

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KARBON NANOTÜP KATKILI YAĞLAYICILARIN SEGMAN
AŞINMASINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Özge BAYKO ŞAHİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
İmal Usulleri Programı

Danışman
Doç.Dr. Bedri Onur KÜÇÜKYILDIRIM

Temmuz, 2019

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KARBON NANOTÜP KATKILI YAĞLAYICILARIN SEGMAN
AŞINMASINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Özge BAYKO ŞAHİN tarafından hazırlanan tez çalışması 24.07.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç.Dr. Bedri Onur KÜÇÜKYILDIRIM

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Bedri Onur KÜÇÜKYILDIRIM, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN EKER, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Egemen SULUKAN, Üye

Milli Savunma Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Bedri Onur KÜÇÜKYILDIRIM sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Karbon Nanotüp Katkılı Yağlayıcıların Segman Aşınmasına Etkisinin İncelenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim

Özge BAYKO ŞAHİN

İmza

Bu çalışma, Erin Motor A.Ş. tarafından desteklenmiştir.

Aileme

ve

sevgili eşime

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren sayın tez danışmanım Doç. Dr. Bedri Onur Küçülyıldırım'a teşekkürü borç bilirim. Yıldız Teknik Üniversitesi otomotiv anabilim dalında görevli Doç. Dr. Levent Yüksek'in tezim süresinde vermiş olduğu ilgi, destek ve ayrıca ayırmış olduğu değerli vakitleri için teşekkür ediyorum.

Yüksek lisans eğitim süresince benden desteğini esirgemeyen Erin Motor genel müdürü ve yönetim kurulu üyesi Ersin Şahin başta olmak üzere Ar-Ge müdürüm Erdal Tunçer'e, üretim müdürüm Şafih Engin Yalım'a test sürecimde vermiş olduğu destekten ötürü üretim ve montaj sorumlusu Nail Fidan'a teşekkür ediyorum.

Yıldız İleri Malzeme Araştırma Grubu'nun her üyesine ve ayrıca nano yağlayıcı hazırlama sürecimde vermiş olduğu destekten dolayı Metehan Demirkol'a teşekkür ederim.

Her an desteği ile hayatımı anlamlı kılan sevgili eşim Tolga'ya, değerli annem Nurhan ve babam Fahrettin Ferhat'a yardımları ve destekleri için teşekkür ediyorum.

Özge BAYKO ŞAHİN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	IX
KISALTMA LİSTESİ	X
ŞEKİL LİSTESİ	XI
TABLO LİSTESİ	XIV
ÖZET	XV
ABSTRACT	XVII
1 Giriş.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	3
1.3 Hipotez	4
2 Dizel Motor	5
2.1 Giriş.....	5
2.2 Motor Çalışma Döngüleri	5
2.3 Motor Yağlama Sistemi	7
2.3.1 Yağ Pompası	8
2.3.2 Yağ Filtresi	9
3 Karbon Nanotüp	10
3.1 Karbon Elementi.....	10
3.2 Karbon Allotropları	11
3.2.1 Karbon Nanotüplerin Yapısı	133
4 Yağlama	16
4.1 Giriş.....	16
4.2 Motor Yağı Katkı Maddeleri	17

4.3. Yağlama Rejimleri	19
4.3.1 Sınır Tabaka Yağlama	20
4.3.2 Hidrodinamik Yağlama	21
4.3.3 Elastohidrodinamik Yağlama	22
5 Sürtünme ve Aşınma	23
5.1. Sürtünme	23
5.1.1. İçten Yanmalı Motorlarda Sürtünme	24
5.2 Aşınma	27
5.2.1 Aşınma Tipleri	27
5.3 Nano Malzemelerin Tribolojik Özellikleri	31
5.3.1 Boyut Etkisi	32
5.3.2 Şekil Etkisi	32
5.3.3 Nanoyapı Etkisi	32
5.3.4 Yüzey Fonksiyonelleştirme Etkisi	33
5.3.5 Nanomalzeme Konsantrasyon Etkisi	33
5.3.6 Sürtünme Esnasında Yüzeylerin Fiziksel Ve Kimyasal Yönleri	33
6 Deneysel Çalışmalar	34
6.1 Giriş	34
6.2 Malzeme ve Metot	34
6.3 Karbon Nanotüplerin Fonksiyonelleştirilmesi	38
6.4 Nano Katkılı Yağlayıcının Hazırlanması ve Çökelme Testleri	42
6.5 Motor Testleri	44
6.6 Sonuçlar ve Tartışma	46
7 Sonuç	76
Kaynakça	78

Ekler	82
Tezden Üretilmiş Yayınlar	86

SİMGE LİSTESİ

Amp	Amplitude
BG	Beygit Gücü
°C	Santigrad Derece
cc	Cubic Centimeter
cm ³	Santimetreküp
Dak	Dakika
Dev/dak	Devir/dakika
g	Gram
kW	Kilowatt
L	Litre
L/dak	Litre/dakika
m ²	Metrekare
mg	Miligram
mL	Mililitre
mm	Milimetre
mm ²	Milimetrekare
N	Newton
nm	Nanometre
Nm	Newton metre
Ph	Power of Hydroge
s	Saat
s	Saniye
µm	Mikrometre

KISALTMA LİSTESİ

CNT	Carbon nanotube (Karbon nanotüp)
DWNT	Double walled carbon nanotube(Çift cidarlı karbon nanotüp)
EDS	Energy Dispersive Spectrometry (Enerji Dağılım Spektrometresi)
FT-IR	Fourier dönüşümlü kızıl ötesi spektrometre
h-BN	Hexagonal Boron Nitrid
KOH	Potasyum Hidroksit
MWCNT	Multi walled carbon nanotube (Çok duvarlı karbon nanotüp)
SAE	Society of Automotive Engineers (Otomotiv mühendisleri topluluğu)
SEM	Scanning electron microscope (Taramalı elektron mikroskobu)
TBN	Total Base Number (Toplam baz sayısı)
TDI	Turbocharged Direct Injection (Aşırı doldurmalı direkt enjeksiyon)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Dizel Motor Çevrimi.....	6
Şekil 2.2 Erin Motor Yağlama Sistemi.....	7
Şekil 2.3 Yağ Pompası.....	8
Şekil 2.4 Yağ Filtresi.....	9
Şekil 3.1 Karbonun Orbital Hibridizasyonu.....	10
Şekil 3.2 Karbon Allotroplarının Yapısı.....	12
Şekil 3.3 Grafen Levhadan Oklarla Çeşitli Karbon Nanotüp Tiplerinin Oluşumu ...	13
Şekil 3.4 Bir C60 Molekülünün Yarısı İle Kapatılabilen İki Nanotüpün Çizimleri ..	14
Şekil 3.5 Karbon Nanotüp Çeşitleri.....	15
Şekil 3.6 Tek Duvarlı Karbon Nanotüp ve Çok Duvarlı Karbon Nanotüp	15
Şekil 4.1 Tribolojik Sistemin Yapısı	19
Şekil 4.2 Sınır Yağlama.....	20
Şekil 4.3 Hidrodinamik Yağlama.....	21
Şekil 4.4 Elastohidrodinamik Yağlama.....	22
Şekil 5.1 İçten Yanmalı Motorlarda Sürtünme Kayıpları Dağılımı.....	24
Şekil 5.2 Tipik Bir Piston ve Segman Düzeneginin Yapısı ve İsimlendirilmesi.....	25
Şekil 5.3 Adhezyon Aşınması Nedeni İle Metal Transfer İşlemi	28
Şekil 5.4 Abrasyon Aşınması	29
Şekil 5.5 Yorulma Aşınması	30
Şekil 5.6 Yağlayıcının İçerisindeki Nano Partükülün Çalışması	31
Şekil 6.1 MWCNT'ün SEM Görüntüsü	35
Şekil 6.2 MWCNT'ün TEM Görüntüsü	36
Şekil 6.3 CNT'lerin Yüzey Katmanı Üzerinde Oksijen Gruplarını Gösteren Şematik Diyagram	38
Şekil 6.4 Reflü Kondenser Sistemi.....	39
Şekil 6.5 Filtrasyon Sistemi.....	40
Şekil 6.6 Fonksiyonelleştirilmiş Karbon nanotüp Eldesi.....	40
Şekil 6.7 Fonksiyonelleştirme İşlemi Uygulanmış Karbon nanotüplerin FT-IR Sonucu	42
Şekil 6.8 Sonikasyon İşlemi.....	43
Şekil 6.9 Nano Yağlayıcının Homojenliği	43

Şekil 6.10 Test Düzeneği.....	45
Şekil 6.11 Numune Alımı	45
Şekil 6.12 Aşınma Metali Fe.....	47
Şekil 6.13 Aşınma Metali Cr	48
Şekil 6.14 Aşınma Metali Al	49
Şekil 6.15 Kinematik Viskozite	50
Şekil 6.16 Toplam Baz Sayısı.....	51
Şekil 6.17 Yağ Segmanlarının Aşınma Yüzeylerinin SEM Görüntüleri.....	53
Şekil 6.18 Nano Yağlayıcı İle Çalışmış Motor Yağ Segmanının Detay SEM Görüntüsü	54
Şekil 6.19 Orta Kompresyon Segmanlarının Aşınma Yüzeylerinin Genel SEM Görüntüleri	55
Şekil 6.20 Orta Kompresyon Segmanlarının Aşınma Yüzeylerinin Detay SEM Görüntüleri	56
Şekil 6.21 Üst Kompresyon Segmanlarının Aşınma Yüzeylerinin SEM Görüntüleri	58
Şekil 6.22 Tam Formüle Yağ İle Çalışmış Motorun Yağ Segmanının Yüzeyinde Bulunan 1 Numaralı Noktasında Yapılan EDS Analizi	59
Şekil 6.23 Tam Formüle Yağ İle Çalışmış Motorun Yağ Segmanının Aşınma Çizgisinde Bulunan 2 Numaralı Noktasında Yapılan EDS Analizi	60
Şekil 6.24 Nano Yağlayıcı İle Çalışmış Motorun Yağ Segmanının Aşınma Çizgisinde Bulunan 1 Numaralı Noktasında Yapılan EDS Analizi	61
Şekil 6.25 Tam Formüle Yağlayıcı İle Çalışmış Motorun Orta Kompresyon Segmanının Yüzeyinde Bulunan 1 Numaralı Noktasında Yapılan EDS Analizi.....	62
Şekil 6.26 Tam Formüle Yağlayıcı İle Çalışmış Motorun Orta Kompresyon Segmanının Aşınma Çizgisinde Bulunan 2 Numaralı Noktasında Yapılan EDS Analizi.....	63
Şekil 6.27 Tam Formüle Yağlayıcı İle Çalışmış Motorun Orta Kompresyon Segmanının Yüzeyinde Bulunan Porozun 1 Numaralı Noktasında Yapılan EDS Analizi.....	64
Şekil 6.28 Tam Formüle Yağlayıcı İle Çalışmış Motorun Orta Kompresyon Segmanının Porlu Bölgesinde Bulunan 1 Numaralı Noktasında Yapılan EDS Analizi	65
Şekil 6.29 Tam Formüle Yağlayıcı İle Çalışmış Motorun Orta Kompresyon Segmanının Porlu Bölgesindeki Aşınma Çizgisinde Bulunan 2 Numaralı Noktasında Yapılan EDS Analizi	66

Şekil 6.30	Tam Formüle Yağlayıcı İle Çalışmış Motorun Orta Kompresyon Segmanının Aşınma Çizgisinde Bulunan 1 Numaralı Noktasında Yapılan EDS Analizi.....	67
Şekil 6.31	Nano Yağlayıcı İle Çalışmış Motorun Orta Kompresyon Segmanının Aşınma Çizgisinde Bulunan 1 Numaralı Noktasında Yapılan EDS Analizi68	
Şekil 6.32	Tam Formüle Yağ İle Çalışmış Motorun Üst Kompresyon Segmanının Yüzeyinde Bulunan 1 Numaralı Noktasında Yapılan EDS Analizi	69
Şekil 6.33	Tam Formüle Yağ İle Çalışmış Motorun Üst Kompresyon Segmanının Aşınma Çizgisinde Bulunan 2 Numaralı Noktasında Yapılan EDS Analizi	70
Şekil 6.34	Tam Formüle Yağ İle Çalışmış Motorun Üst Kompresyon Segmanının Aşınma Çizgisinde Bulunan 3 Numaralı Noktasında Yapılan EDS Analizi71	
Şekil 6.35	Tam Formüle Yağ İle Çalışmış Motorun Üst Kompresyon Segmanının Yüzeyinde Bulunan Çatlak Üzerindeki 1 Numaralı Noktada Yapılan EDS Analizi	72
Şekil 6.36	Nano Yağlayıcı İle Çalışmış Motorun Üst Kompresyon Segmanının Yüzeyinde Bulunan 1 Numaralı Noktasında Yapılan EDS Analizi	73
Şekil 6.37	Nano Yağlayıcı İle Çalışmış Motorun Üst Kompresyon Segmanının Aşınma Çizgisinde Bulunan 2 Numaralı Noktasında Yapılan EDS Analizi74	
Şekil 6.38	Üst Kompresyon Segmanlarının Aşınma Yüzeylerinin SEM Görüntüleri ve Yüzey Pürüzlülükleri	75

TABLO LİSTESİ

Tablo 4.1 Motor Yağı Katkı Maddeleri.....	18
Tablo 6.1 MWCNT'ün Özellikleri	34
Tablo 6.2 CNT'ün Kimyasal Analizi.....	35
Tablo 6.3 Yağ Tipik Özellikleri.....	36
Tablo 6.4 Test Motoru Karakteristikleri.....	37

Karbon Nanotüp Katkılı Yağlayıcıların Segman Aşınmasına Etkisinin İncelenmesi

Özge BAYKO ŞAHİN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Bedri Onur KÜÇÜKYILDIRIM

Yağlamanın yakıt ekonomisi ile ilişkili olması, motor parçalarının değişim sürelerinin uzatılması, yağ değişim periyotlarının uzatılarak yağa ödenen maliyetlerin düşürülmesi, atık yağların çevreye vermiş olduğu zarar, azalan enerji kaynaklarının korunması gibi nedenlerden dolayı günümüzde, motor yağı ile yapılan çalışmalar motor yağı katkı maddeleri ile aşınmanın azaltılması yönündedir.

Nano malzemelerin hayatımıza girmesi ile beraber triboloji alanında kullanımları da gün geçtikçe artmaktadır. Literatürde karbon nanotüp katkı yağlayıcılar ile ilgili deneysel çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar, fonksiyonelleştirilmiş karbon nanotüplerin motor yağı ile homojen bir karışım elde edilmesi ile aşınmayı önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Karbon nanotüplerin bu üstün aşınma önleyici özelliklerinden dolayı, motor yağına ilavesiyle motor üzerinde yapılan testler ile piston segmanındaki aşınmayı azaltması öngörülmüştür.

Tez kapsamında, nano yağlayıcı hazırlanmış akabinde öncelikle tam formüle yağ motor testleri ardından nano yağlayıcı motor testleri gerçekleştirilmiştir. Testler esnasında alınan yağ numunelerinin analiz sonuçları değerlendirilmiştir. Ardından testlerde kullanılan motorların piston segmanları demonte edilerek, yüzey aşınmaları taramalı elektron mikroskobu (SEM) yöntemi ile incelenmiştir. Aşınma çizgilerinde EDS analizi yapılarak elementler değerlendirilmiştir.

Tezin sonucunda, nano yağlayıcı ve tam formüle yağ ile yapılan motor testlerinden alınan yağ numuneleri değerlendirildiğinde nano yağlayıcının 250. saatin sonunda güvenli aralıkta olduğu sonucuna varılmıştır. Piston segmanlarının SEM incelemesinde, karbon nanotüp katkılı motor yağı ile çalışma durumunun, tam formüle yağ ile çalışma durumuna kıyasla daha az seviyede aşınmaya neden olduğu tespit edilmiştir. Bu sayede katkı maddesi olarak karbon nanotüp kullanımı ile aşınma problemleri azalmaktadır. Motor yağı özelliklerinin iyileştiren bu gelişmeler daha uzun ömürlü motorlar için bizlere bir referans olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Nanoyağlayıcı, triboloji, Karbon nanotüp, yağlama, aşınma

Investigating the Effects of Carbon Nanotube Added Lubricants to the Ring Wear

Özge BAYKO ŞAHİN

Department of Mechanical Engineering

MSc Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Bedri Onur KÜÇÜKYILDIRIM

Today, studies related to engine oil are aimed at reducing wear of engine with engine oil additive agents due to reasons such as protection of decreasing energy sources, damage caused by waste oils to the environment, reducing the costs made for the oil by extending the oil drain periods, lengthening the changing period of engine parts and lubrication being related to the fuel economy.

The usage of nanomaterials in tribology is increasing day by day thanks to their introduction into our lives. There are experimental studies related to carbon nanotube additive lubricants in the literature. These studies showed that functionalized carbon nanotubes with a homogeneous mixture with engine oil significantly reduce wearing. Thanks to these outstanding anti-wear properties of carbon nanotubes, it is expected to reduce wear on the piston ring by testing on the engine with their inclusion into the engine oil.

Nano lubricant was prepared and then firstly fully formulated oil engine tests and after that nano-lubricant engine tests were conducted within the scope of the thesis.

The results of oil analysis were evaluated together with the oil samples obtained during the tests. After that the surface wear was examined by means of scanning electron microscope (SEM) method by disassembling of the piston rings of the engines which were used in the tests. Elements were evaluated by performing EDS analysis in the wear scar.

As a result of the thesis, when oil samples obtained from the tests conducted by nano-lubricants and fully formulated oil were evaluated, it was concluded that the nano-lubricant was within the safety limits at the end of the 250th hour. In the SEM examination of the piston rings, it was found that operating with carbon nanotube doped oil causes less wear when compared with the operating with fully formulated oil. The wear problem is reduced thanks to the usage of carbon nanotube as an additive agent. These developments improving the features of engine oil will be a reference for us about long-lasting engines.

Keywords: Nanolubricant, tribology, Carbon nanotube, lubricating, wear

1.1 Literatür Özeti

Tribolojik sistemlerde sürtünme nedeniyle enerji kaybı oldukça fazladır. Mekanik sistemlerde enerji tasarrufu, emisyonun azaltılarak çevrenin korunması, sürtünmenin düşürülmesi, çalışan parçaların uzun ömrünün sağlanması için yağlayıcılar kullanılmaktadır [1]. İçten yanmalı motorlardaki sürtünme kayıpları toplam motor kayıplarının %15-20'sini oluşturmaktadır [2]. İçten yanmalı motorların iç sürtünmesinin büyük bir kısmı, piston segmanları ve piston eteğini içeren piston düzeneğinden kaynaklanmaktadır [3]. Tek ve çok duvarlı karbon nanotüp gibi karbon nano yapılar üstün sürtünme özelliklerine sahip olmaları sebebi ile nano yağlayıcı olarak temas yüzeylerinde sürtünmeyi ve aşınmayı azaltma amacı ile kullanılmaktadır [4]. Cornelio J. ve diğerleri [5] karboksilik asit ile (%0,01, 0,05 konsantrasyonunda) fonksiyonelleştirilmiş karbon nanotüplerin tribolojik özelliklerini çift diskli bir tribo test cihazında incelemişlerdir. Testlerde sürtünme katsayılarını ve kütle kayıplarını 0,063 daha düşük ölçmüşlerdir. Ali M. ve diğerleri [6] yağa grafen ilave ederek otomobil motorunun tribolojik davranışını ASTM G181 standardına göre tribometre üzerinde incelemişlerdir. Tribolojik testlerin, gerçek motor performansı ile ilişkisini AVL dinamometre kullanarak değerlendirmişlerdir. Tribolojik sonuçlar; grafen katkılı nano yağlayıcının sınır yağlama esnasında %29-35, sürtünme önleyici ve aşınma önleyici özelliklerini ise %22-29 oranında iyileştirdiğini göstermiştir. Zhai W. ve diğerleri [7] yağ ağırlıkça %0,2 nanoelmas ilave etmişler ve sürtünme torkunda 0,02 Nm ile kayda değer azalma gözlemlemişlerdir. Sürtünme ve aşınmadaki önemli düşüşün nanoelmas tarafından kuvvetlendirilmiş tribofilmin etkisinden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Kałużny J. ve diğerleri [8] yağa %0,5 oranında karbon nanotüp ilave ederek motorlar üzerinde yaptıkları çalışmada sürtünme kayıplarını incelemişlerdir. Test sonuçlarında yağa karbon nanotüp ilavesi ile sürtünme kayıplarında gözle görünür düşüş tespit etmişlerdir. TDI motorda yaptıkları araştırmalar sonucunda, 1000 dev/dak'da

torkun %7'den, 2500 dev/dak'da %4'e düştüğünü gözlemlemişlerdir. Zhang Z. ve diğerleri [9] karbon nanotüplerin kuru ve yağlanmış koşullar altında sürtünme ve aşınma üzerindeki etkilerini segman ve silindir gömleği sistemi üzerinde incelemişlerdir. Kuru sürtünme altında, karbon nanotüplerin katı yağlayıcı görevi gördüğünü, yağlayıcı ile yapılan testlerde ise bir tür katkı maddesi olarak davrandığını söylemişlerdir. Khaili W. ve diğerleri [10] baz mobil dişli 627 ve parafinik mineral yağa katkı maddesi olarak çok duvarlı karbon nanotüp ilave ederek sürtünme ve aşınmayı dört bilyalı tribometre üzerinde test etmişlerdir. Aşınma testi sonuçlarında; MWCNT katkılı baz mobil dişli 627 yağda %68, MWCNT katkılı parafinik mineral yağda ise %39 oranında aşınmanın azaldığı gözlemlenmiştir. Sürtünme sonuçları ise MWCNT katkılı baz mobil dişli 627 yağda %57, MWCNT katkılı parafinik mineral yağda ise %49 oranında sürtünmenin azaldığını göstermiştir. Kotia A. ve diğerleri [11] Al_2O_3 -SAE 15W40 nano yağlayıcının motordaki performansını dört zamanlı dizel motor üzerinde değerlendirmişlerdir. %3 Al_2O_3 katkılı SAE 15W40 motor yağında nano parçacıkların yataklama ve tamir etme etkisi ile sürtünmede önemli ölçüde azalma gözlemlemişlerdir. Ali M. ve diğerleri [12] Al_2O_3 , TiO_2 ve Al_2O_3/TiO_2 hibrit nano parçacıkları 5W-30 motor yağına katkı maddesi olarak ilave ederek, motor piston segman montajının tribolojik davranışı incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarının sonucunda nano katkılı yağlayıcının tribolojik özelliklerinin iyileştiğini gözlemlemişlerdir. Yüzey sürtünme katsayısının %40-50, aşınma oranının %20-30 azaldığını tespit etmişler ve nano katkılı motor yağlarının yakıt ekonomisi sağlayarak motor verimliliğini arttırmada kullanılabileceğini söylemişlerdir. M. S. Charoo M. ve Wani M. [13] farklı konstrasyonlarda h-BN nano parçacıkları SAE 30W50 motor yağına ilave etmişlerdir. h-BN nano parçacık katkılı SAE 20W50 motor yağının piston segmanı ve silindir gömleği tribo-çifti üzerindeki sürtünme ve aşınma özelliklerini üniversal tribometre kullanarak incelemişlerdir. Katkı maddesi olarak h-BN nano parçacıkların kullanılmasıyla çeşitli yüklerde aşınma kaybının %30-70 oranında azaldığını söyleyerek h-BN nano parçacıkların mükemmel bir tribolojik performans gösterdiğini söylemişlerdir. Ettefaghi E. ve diğerleri [14] motor yağına farklı konsantrasyonlarda MWCNT ilave ederek, yağın özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Motor yağının işlevselliğinde etkili olan dört kalite

parametresi olan viskozite, akma noktası, kül noktası ve ısı iletkenliği incelemişlerdir. Nano katkı maddelerinin artan konsantrasyonuyla yağın bazı özelliklerinin iyileştiğini gözlemlemişlerdir. Nano yağlayıcının ısı iletkenliğinin baz yağa kıyasla %13,2 ve parlama noktasının ise %6,7 oranında arttığını söylemişlerdir.

1.2 Tezin Amacı

Erin Motor A.Ş. yerli kaynakları kullanarak üniversite- sanayi iş birliği ile tasarımı tamamen özgün olan endüstriyel dizel motor, jeneratör, marin motor ve motopomp üretmektedir. Enerji talep artışına bağlı olarak fosil kaynakların hızla tükenmesi, motor üreticilerinin, motor verimini arttırma yönünde çalışmalarını hızlandırmıştır. Motorda sürtünmeye bağlı enerji kayıpları göz ardı edilemeyecek seviyededir. Bu sebep, motor ve motor yağı üreticilerini bu konuda çalışmaya yönlendirmiştir. Motor üretici firmalar, motor tasarımında yapacakları değişiklikler ile motorda yağlamaya bağlı enerji kayıplarını düşürmeyi hedeflemişlerdir. Nano boyuttaki malzemelerin hayatımıza girmesi ile motor yağı üreticileri ise, katkı maddelerinde nano malzemeleri kullanma yönünde çalışmalarını sürdürerek yağın özelliklerini iyileştirmek istemektedirler.

Literatür incelendiğinde yapılmış aşınma testleri, tribo test cihazı veya piston silindir düzeneğinde yapıldığı çalışmaları içermektedir. Tezde, motor yağına karbon nanotüp ilave edilerek, segman aşınmasına etkisi gerçekleştirilecek motor testleriyle incelenecektir. Tez çalışmasında amaç, motor yağına karbon nanotüp ilavesi motor segmanın sürtünme yüzeylerinde aşınma seviyesinde azalma olmasıdır. Önceden yapılmamış bu çalışma ileriki yıllarda ülkemizde motor ve motor yağı üretimi yapan kişiler için bir referans olacaktır.

1.3 Hipotez

Bu tezde, SAE 15W-40 motor yağına karbon nanotüp ilavesi ile piston segmanlarının aşınmasına olan etkisi ve en az çökelme sağlayacak şekilde homojen nano yağlayıcı hazırlama işlemi incelenecektir. Daha sonra test motorlarından alınacak yağ numuneleri ile aşınma elementleri, viskozite, toplam baz sayısı incelenecek ve segman yüzeylerinin SEM analizleri yapılarak piston segmanlarının aşınma karakteristiği tartışılacaktır. Tez çalışması sonucunda elde edilmesi hedeflenen orijinal bilgilerden bazıları aşağıdaki gibidir.

Literatürde nano yağlayıcı için tribotestler yapılmıştır fakat motor üzerinde yapılmış bir test ile karşılaşılmamıştır.

Karbon nanotüpler, fonksiyonelleştirme işleminden sonra motor yağına ultasonik yöntemle karıştırılacaktır, test motorundan alınan yağ numuneleri ile motorun piston segmanlarının aşınması değerlendirilecektir.

Segmanların, silindir gömleği ile beraber tribolojik sistem oluşturan yüzeyleri SEM ile incelenecek, EDS analizi yapılacak ve karbon nanotüplerin yağlama mekanizması üzerindeki etkileri tartışılacaktır.

Karbon nanotüplerin kinetik ve katmanlar arası ayrılma özellikleri sebebi ile motor yağı katkı maddesi olarak kullanılması yönünde çalışmalar devam etmektedir. Fonksiyonelleştirme işlemi nano yağlayıcının stabilitesi açısından önemlidir, motor yağına az oranda karbon nanotüp ilavesi ile dahi motor yağının aşınma önleyici özellikleri arttırılabilmektedir. Karbon nanotüplerin kendiliğinden yağlama özelliği sayesinde motor yağına ilavesi ile yağ verimliliğinin artması sebebi ile aşınma önleyici katkı maddesi olarak kullanılmasının uygun olduğu düşünülmektedir. Tez çalışmasının sonucunda, motor yağının aşınma önleyici özelliklerinin iyileşmesine bağlı olarak piston segmanlarının aşınmasında azalma beklenmektedir.

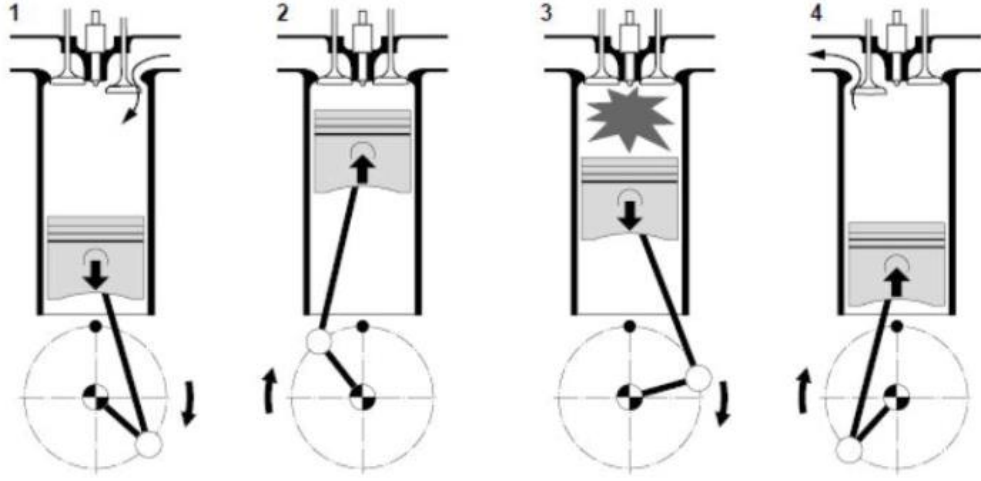
2.1 Giriş

İçten yanmalı motorların amacı, yakıtta bulunan kimyasal enerjiden mekanik güç üretimi sağlamaktır. İçten yanmalı motorların, dıştan yanmalı motorlardan farkı, yakıtın motor içerisinde yakılmasıdır. Çalışma akışkanları; yanma öncesi yakıt-hava karışımı ve yanma sonrası yanmış ürünlerdir. İstenen güç çıkışı sağlayan iş aktarımları doğrudan bu çalışma akışkanları ile motorun mekanik bileşenleri arasında gerçekleşir. Yüksek güç/ağırlık oranına sahip bu motorlar, ulaştırma (kara, deniz ve hava) ve enerji üretiminde geniş bir uygulama alanı bulmuştur.

1892'de Alman mühendis Rudolf Diesel (1858-1913) patentinde yeni bir içten yanmalı motor şeklini açıklamıştır. Sıkıştırma ile ısıtılan havaya sıvı yakıt enjekte ederek yanmayı başlatma kavramı, diğer içten yanmalı motorlara kıyasla verimliliği iki katına çıkartmıştır.

2.2 Motor Çalışma Döngüleri

Silindir içinde alt ölü noktadan üst ölü noktaya hareket eden piston, biyel kolu ve krank mekanizması vasıtasıyla gücü tahrik miline iletir. Krankın sabit şekilde dönmesi, döngüsel piston hareketini oluşturur. Motor çalışma döngüsü iki zamanlı veya dört zamanlıdır. Pistonlu motorların çoğu, dört zamanlıdır. Motor çevrimleri Şekil 2.1'de gösterilmiştir.

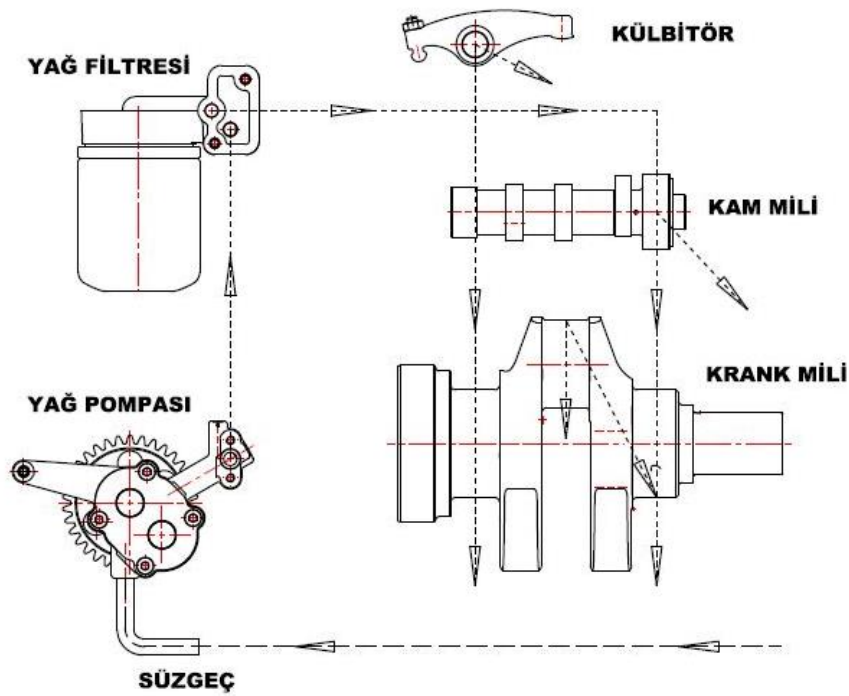


Şekil 2.1 Dizel Motor Çevrimi [15]

1. Üst ölü noktadan başlar ve alt ölü noktada biter. Kütleli arttırmak için giriş valfi, strok başlamadan kısa bir süre önce açılır ve bittikten sonra kapanır.
2. Her iki valf de kapalı ve silindir içindeki karışım başlangıç hacminin küçük bir kısmına sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma strokunun sonuna doğru yanma başlar ve silindir basıncı daha hızlı yükselir.
3. Piston üst ölü noktadan yüksek sıcaklıkta ve yüksek basınçlı gazlar ile aşağıya itilir, krank dönmeye zorladığında alt ölü noktaya gelir.
4. Kalan yanmış gazlar silindirden çıkar. Silindir basıncı egzozdan büyük ölçüde daha yüksek olabileceğinden üst ölü noktaya doğru hareket ettikçe piston tarafından süpürülür. Piston üst ölü noktaya yaklaşırken emme valfi açılır. Alt ölü noktadan hemen sonra egzoz valfi kapanır ve döngü tekrar başlar [16].

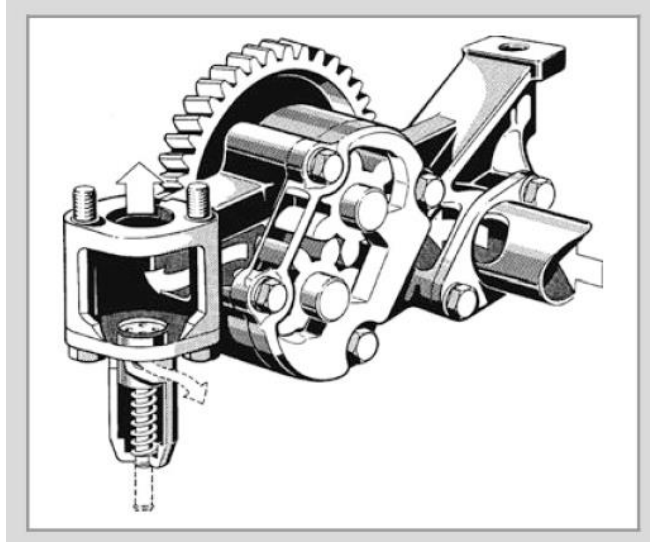
2.3 Motor Yağlama Sistemi

Bir içten yanmalı motorda 5.000 ile 50.000 saat arasında güvenilir bir şekilde çalışan 150–200 hareketli parça bulunmaktadır. Triboloji prensipleri uygulanmadan motorun güvenli bir şekilde çalışma şansı çok düşüktür [17]. Optimum yağlama sistemi tasarımı, dizel motorların servis ömrünün belirlenmesinde önemli ölçüde etkilidir. Yağlama sistemi, motora her koşulda, örneğin en yüksek ve düşük çalışma sıcaklıklarında gerekli miktarda yağ sağlamalıdır [18]. Test motoru olan Erin 1.16 L Dizel Motor'da tam basınçlı yağlama sistemi mevcuttur. Sistem, motorun yağlanacak bölgelerine yağın basınçlandırılarak gönderilmesi ile çalışır. Yağ; yağ süzgeci ve yağ pompası yardımı ile dağıtım kanallarına oradan da krank mili ana yatak ve muylularına, kam mili muylularına, külbütör mili ve yataklarına basınçlı olarak gönderilir. Alternatif olarak, piston pimi ve biyel kolu küçük ucu yağ spreyi ile yağlanmaktadır [18].



Şekil 2.2 Erin Motor Yağlama Sistemi

2.3.1 Yağ Pompası



Şekil 2.3 Yağ Pompası [18]

Yağ pompasının görevi, motorun çalışma hız aralığında gereken yağ hacmini ve basıncını sağlamaktır. Test motoru Erin 1.16 Dizel Motor'da doğrudan krank mili tarafından tahrik edilen dişli pompa kullanılmaktadır. Daha büyük motorlarda genellikle yeterince büyük hacimsel akışı sağlamak ve alan sınırları içinde kalmak için paralel olarak bağlanmış birkaç yağ pompası kullanılmaktadır. Bazı motorlar, başlamadan önce krank mili grubunu çalışmaya hazır tutmak için ek ön yağlama veya kalıcı yağlama özelliğine sahiptir.

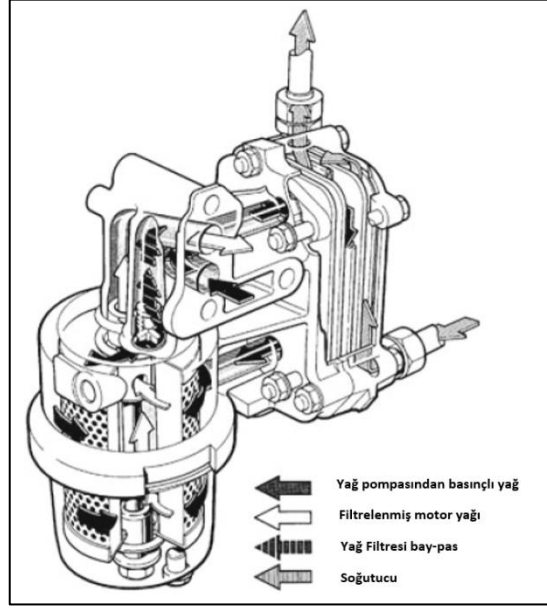
Erin Motor 1.16 L Dizel Motor yağ pompası özellikleri aşağıdaki gibidir;

Yağ pompası 90°C de, 1900 dev/dak 13,2 L/dak yağ vermektedir.

Soğuk başlangıçta, 500 devirde 0,9 L/dak yağ vermektedir.

Bay-pas valfi 6,8 bar'da açılacak şekilde tasarlanmıştır.

2.3.2 Yağ Filtresi



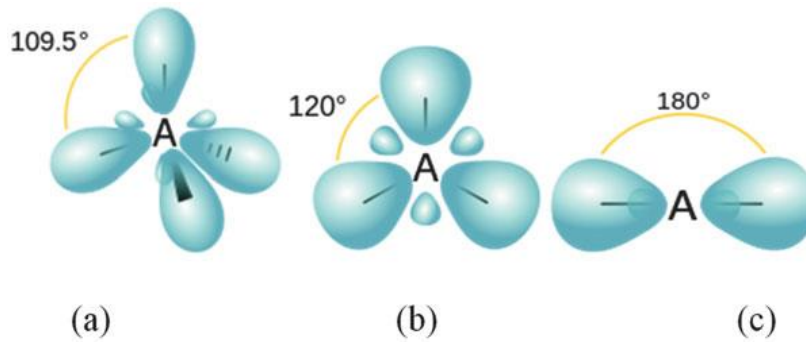
Şekil 2.4 Yağ Filtresi [18]

Yağ filtresi; filtre muhafazası ve filtre elemanını içeren yağ filtre kartuşundan oluşmaktadır. Filtre muhafazası, filtreyi ve giriş-çıkış bay-pas valflerini içermektedir. Yağ soğutucusu da dahil edilebilmektedir. Yağ filtreleri genellikle motor bloğuna flanşlı olarak monte edilmektedirler. Test motorunda da durum bu şekildedir. Şekil 2.4 filtreden yağ akışını göstermektedir. Filtrelenmemiş yağ filtre muhafazasına girmektedir. Yağ, filtre elemanının içinden dışarıya doğru hareket ederek filtre kartuşuna girmekte ve böylelikle kir parçacıklarından ayrılmaktadır. Yağ filtresi elemanı tıkalı olması durumunda motordaki yağ sirkülasyonunu korumak için giriş ve çıkış, bay-pas valfine bağlanmaktadır [18].

3.1 Karbon Elementi

Karbon elementi periyodik tabloda C sembolü ile tanımlanmaktadır. Karbon elementinin periyodik tabloda atom numarası 6 ve atom ağırlığı 12'dir [19]. Karbon, dünyada bulunan en yaygın altıncı elementtir ve bilinen tüm kimyasal maddelerin %90'ından fazlasında bulunmaktadır [20]. Elementel karbon, atomik orbitallerin sp^3 , sp^2 ve sp hibritleşmesine karşılık gelen üç bağlanma durumunda bulunabilir. Tam sayı karbon bağı hibritleşmesine sahip olan üç karbon allotropu vardır. Bunlar; elmas grafit ve karbindir [19]. Tamamen amorf ve tamamen kristal malzemeler dahil olmak üzere çeşitli formlarda bulunabilirler [20]. 1931'de kimyager Linus Pauling metan (CH_4) gibi basit moleküllerin yapısını açıklamak için Şekil 3.1'de gösterilen hibritleşme teorisini geliştirmiştir [19].

Karbonun doğal olarak meydana gelen ^{12}C , ^{13}C ve ^{14}C olmak üzere üç izotopu vardır. 4 değerlik elektronuna sahip $1s^2$, karbonun kovalent bağ oluştururken dört atomu olduğu anlamına gelmektedir. $C = C$ bağ yönüne dik p orbitalleri arasındaki örtüşme, bağ uzunluğuna çok duyarlıdır. İki karbonun birbirine yaklaşma kabiliyeti, bağların oluşmasını sağlamaktadır [19].

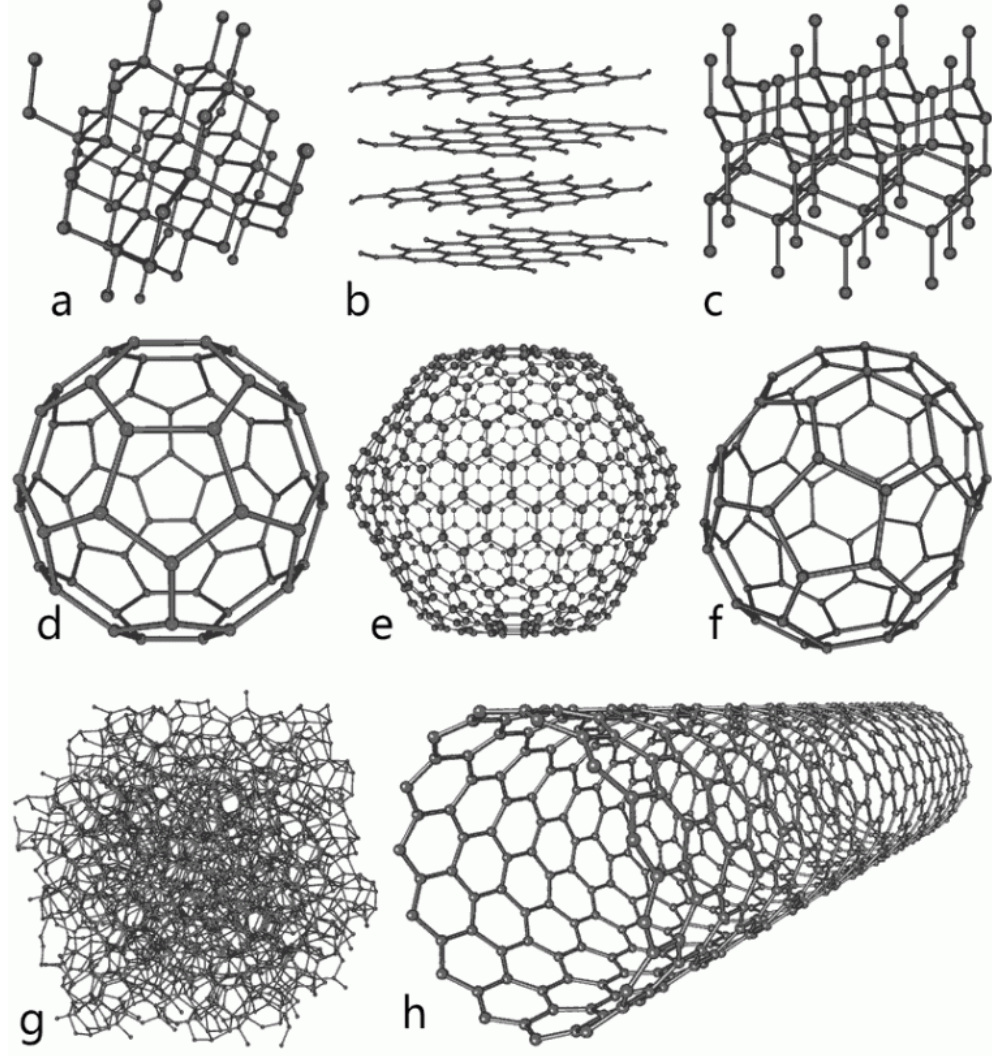


Şekil 3.1 Karbonun Orbital Hibridizasyonu a) Dört sp^3 Orbitalleri b) Üç sp^2 Orbitalleri ve c) İki sp Orbitalleri [19]

3.2 Karbon Allotropları

Karbon canlılarda bulunan en önemli elementtir. Karbonu bu kadar önemli kılan özelliklerinden biri, çeşitli elementlerle farklı şekilde bağ oluşturma yeteneğidir. Çoğu element zayıf bağlar oluşturmaktadır. Yapısal kararlılığa sahip moleküller yüksek enerjili atomik bağlar içermektedir. İnorganik karbon, kalem, elmas, amorf karbon filtre, çeliklerin sertleştirilmesinde, yağlayıcı ve polimerik malzeme gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Hayvanlar ve bitkiler organik karbonu, milyonlarca yıl sonra petrole dönüştürmektedir ve petrol önemli enerji kaynaklarından biridir. Proteinler, aminoasitler, lipitler ve nükleik asit gibi biyolojik materyaller de karbon bazlıdır. Karbon allotropları elmas, kübik ve altıgen yapıda bulunurlar. Kübik elmasta, her bir karbon atomu dörtyüzlü düzlem oluşturmak için sp^3 bağları ile eşit diğer dört atoma bağlanmaktadır. Grafit, normal sıcaklık ve basınç koşulları altında en kararlı termodinamik karbon şeklidir. Altıgen dizideki atom katmanlarından oluşmaktadır. Her katmanın atomları kovalent bağlarla birleştirilirken, farklı katmanlardaki atomlar zayıf van der Waals bağları ile birleşmektedir. Grafit ve pırlantada aynı elementin allotropları olmasına rağmen grafit yumuşak bir malzemedir, elmas ise en sert malzemelerden biridir. Buna bağlı olarak, elmas aşındırıcı ve grafit yağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Grafit elektriksel olarak iletken olmasına karşın elmas yalıtkandır. Elmas optik olarak saydamdır ve grafit optik olarak yoğundur. Elmas izotropik bir yapıya sahiptir, grafitin yapısı ise izotropiktir. Elmas, iyi bir ısı iletkenidir, ancak grafit düşük ısı iletkenliğine sahiptir. “Buckyballs” olarak da adlandırılan Fullerenler, 1985 yılında keşfedilen karbonun üçüncü allotropudur. Bu moleküler form, altıgenler (altı karbon atomları) içinde düzenlenmiş 60 karbon atomu (veya daha fazla) içermektedir. Bu moleküller C_{60} ile temsil edilir. Ayrıca C_{70} , C_{100} vb. gibi moleküllerde de vardır. Bir fullerenin ortalama çapı 1,1 nm'dir. Fullerenler uzayda bulunan moleküller gibi yüksek basınç ve sıcaklık koşulları altında oluşurlar. Nitekim fullerenler, Meksika'da düşen 4,6 milyar yıllık bir göktaşı içinde bulunmuştur. Saf halde fullerenler izolatörlerdir, ancak safsızlıkların eklenmesi ile iletken veya yarı iletken yapabilirler. Uzun formda

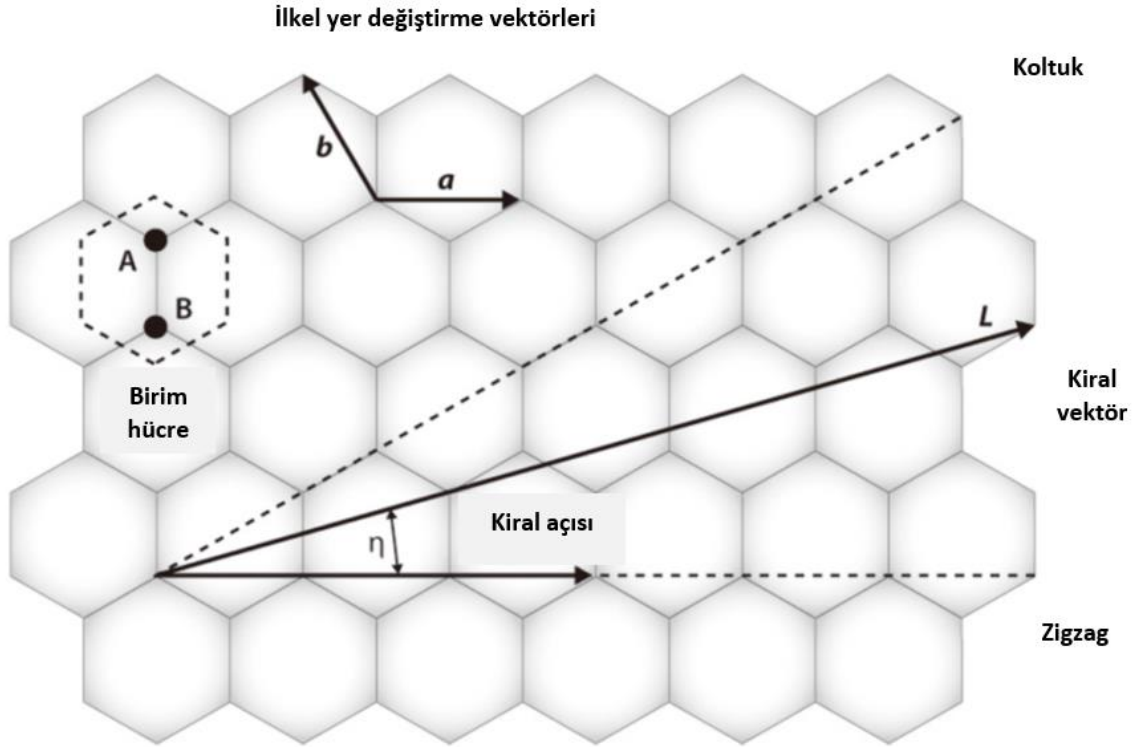
elde edilen fullerenler ise karbon nanotüpleri oluşturmaktadır [21]. Şekil 3.2’de karbonun allotropik yapılarından örnekler gösterilmektedir.



Şekil 3.2 Karbon Allotroplarının Yapısı a) elmas b) grafit c) altıgen elmas d-f) fullerenler (C60, C540, C70); g) amorf karbon; h) karbon nanotüp [22]

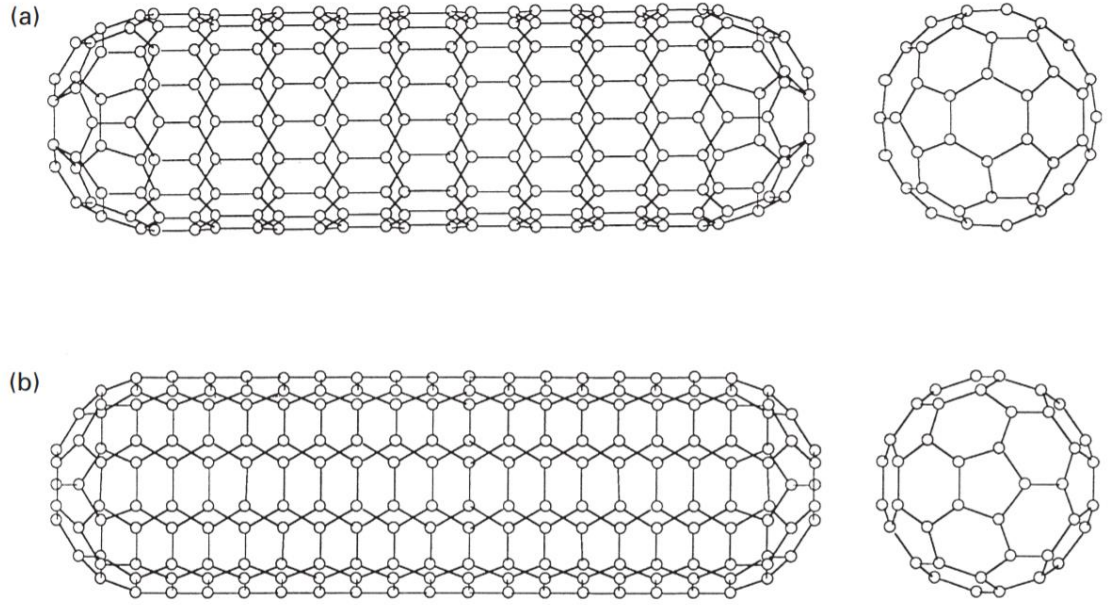
3.2.1 Karbon Nanotüplerin Yapısı

Karbon nanotüpler fulleren ailesinin bir üyesidir [22]. Ark-buharlaştırma yöntemi kullanılarak üretilen nanotüplerin neredeyse hepsi, her iki ucunda pentagonal karbon halkaları içeren kapaklarla kapatılmaktadır [23].



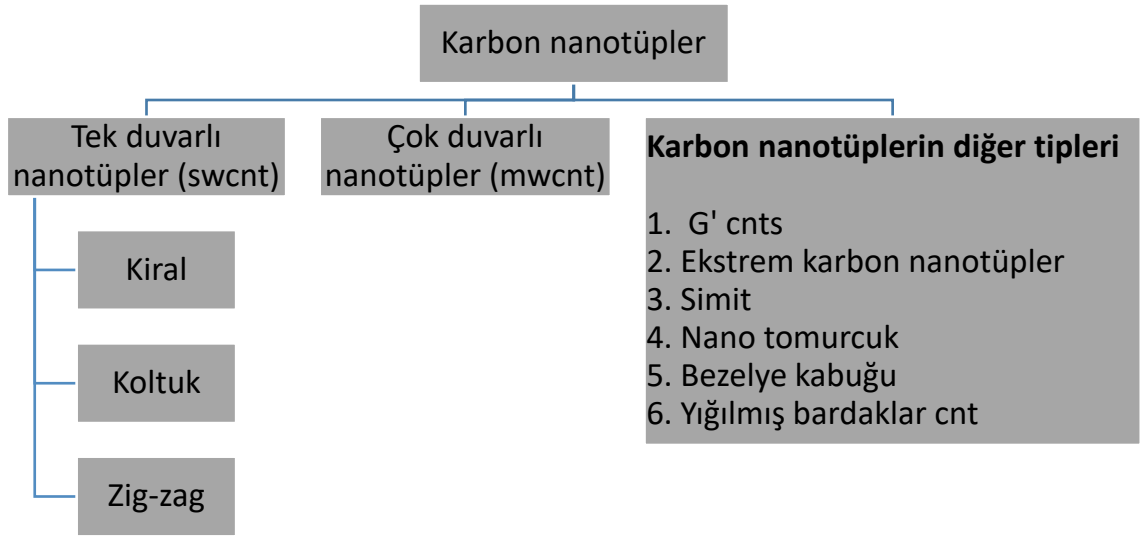
Şekil 3.3 Grafen Levhadan Oklarla Çeşitli Karbon Nanotüp Tiplerinin Oluşumu [23]

Nanotüpler ile fullerenler arasındaki yapısal ilişki, bir C60 molekülünün ikiye kesilmesi ve iki yarım molekülün arasına bir grafen silindirin yerleştirilmesiyle gösterilebilir. C60'ı üç katlı eksenlerden birine paralel olarak bölmek, Şekil 3.4 (a)'da gösterilen zig zag nanotüp ile sonuçlanırken, beş katlı eksenlerden biri boyunca C60'ı ikiye ayırmak, Şekil 3.4 (b)'de gösterilen koltuk tip nanotüpe sebep olmaktadır. 'Zig zag' ve 'koltuk' terimleri, çevredeki altıgenlerin düzenini ifade etmektedir. Uygulamada, kapaklar nadiren yarım küre şeklindedir, ancak çeşitli morfolojileri de olabilmektedir[23].

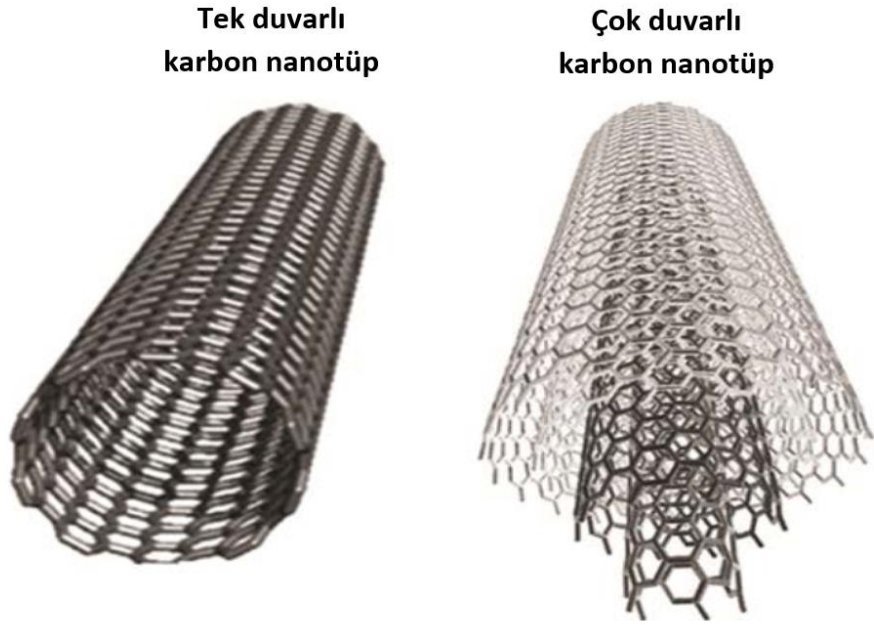


Şekil 3.4 Bir C60 Molekülünün Yarısı İle Kapatılabilen İki Nanotüpün Çizimleri (a) Zig Zag (9, 0) Yapı, (b) Koltuk (5, 5) Yapı [24]

1991 yılında Iijima tarafından açıklanan nanotüpler, birden fazla grafit katman içerir ve genellikle yaklaşık 4 nm iç çaplara sahiptir. 1993'te NEC'den Iijima ve Toshinari Ichihashi, California'daki IBM Almaden Araştırma Merkezi'nden Donald Bethune ve arkadaşları bağımsız olarak tek duvarlı nanotüplerin sentezini bildirdiler. Tek duvarlı nanotüplerin (SWNT'ler) tipik bir görüntüsü Şekil 3.6'da gösterilmektedir. Görünüşün çok duvarlı nanotüplerin (MWNT) örneklerinden oldukça farklı olduğu görülebilmektedir. Bireysel tüpler çok küçük çaplara (tipik olarak 1 nm) sahiptir ve genellikle düz değil kavislidir. Ark-buharlaştırma yöntemi kullanılarak yüksek verimde çift cidarlı karbon nanotüplerin (DWNT'ler) üretilmesi için yöntemler de geliştirilmiştir [23].



Şekil 3.5 Karbon Nanotüp Çeşitleri [22]



Şekil 3.6 Tek Duvarlı Karbon Nanotüp ve Çok Duvarlı Karbon Nanotüp [23]

4.1 Giriş

Yağlayıcılar sürtünmeyi ve aşınmayı azaltma, ısıyı dağıtma, kirleticileri giderme ve verimliliği arttırma için iki hareketli yüzey arasında bulunan madde olarak tarif edilmektedir. Sürtünme, statik ve dinamik olmak üzere iki çeşittir. Statik ortamda durgun halde malzemelerin iki yüzeyi arasında statik sürtünme vardır. Hareket esnasında dinamik sürtünme gözlemlenmektedir [24]. Her yataklama veya kayma yüzeyinde, bu iki sürtünme türü etkilidir. Statik sürtünme, makineyi çalıştırmak için gereken kuvveti, dinamik sürtünme ise, gücü çekerek yakıt tüketimini belirlemektedir. Yağlanmayan yüzeylerde sürtünme direnci artmakta, ısınma, hızlı aşınma ve hatta ağır koşullar altında iki yüzey bozulumu gözlemlenmektedir. Yağlama, genel olarak, hareket eden yüzeyleri bir miktar sıvı tabaka vasıtasıyla birbirinden ayırmak olarak tarif edilebilir. Yağlama ile sürtünme direnci artık katı yüzeylerle değil, yağlayıcının viskozitesiyle doğrudan ilişkili olan iç sürtünmesine bağlıdır [25]. Yağlayıcılar sıvı, katı veya gaz halinde sınıflandırılabilirler. Sıvı yağlayıcılar, doğal yağlar, mineral (petrol) yağlar gibi baz yağlar ve yağlama maddelerinin özelliklerini iyileştiren katkı maddeleri kombinasyonlarını içeren sentetik yağlardan oluşmaktadır. Katı veya kuru yağlayıcılar genellikle bir katı yağ, katı-sıvı süspansiyonu şeklinde tozlar veya yarı katı maddelerdir. Gaz yağlayıcılar, sıvı ya da katı yağlayıcılardan çok daha düşük viskoziteye sahiptir. Yağlama maddeleri genellikle yaklaşık %90 baz yağ, %10'dan az katkı maddesi ve diğer bileşenlerden oluşmaktadır. Yağlayıcıların başlıca görevleri, yabancı parçacıkları eritmek veya taşımak, kirletici maddeleri uzak tutmak, korozyonu veya paslanmayı önlemek, açıklıkları kapatmak, ısıyı dağıtmak, bileşenlerin sürtünmesini ve aşınmasını en aza indirmektir [24].

4.2 Motor Yağı Katkı Maddeleri

Motor yağları, baz yağ veya baz yağ ilave edilmiş katkı maddelerinden oluşmaktadır. Baz yağ olarak, saf mineral yağlar, mineral ve sentetik yağ karışımları veya tamamen sentetik yağlar kullanılmaktadır.

Günümüz motor yağları ihtiyaç duyulan işlevleri yerine getirmek için katkı maddeleri ihtiva ederler. Katkı maddeleri içeren yüksek performanslı motor yağları tam formüle edilmiş yağ olarak adlandırılırlar. Eski zamanlarda katkı maddesi içermeyen motor yağları kullanımı günümüzde yerini tam formüle yağlara bırakmıştır.

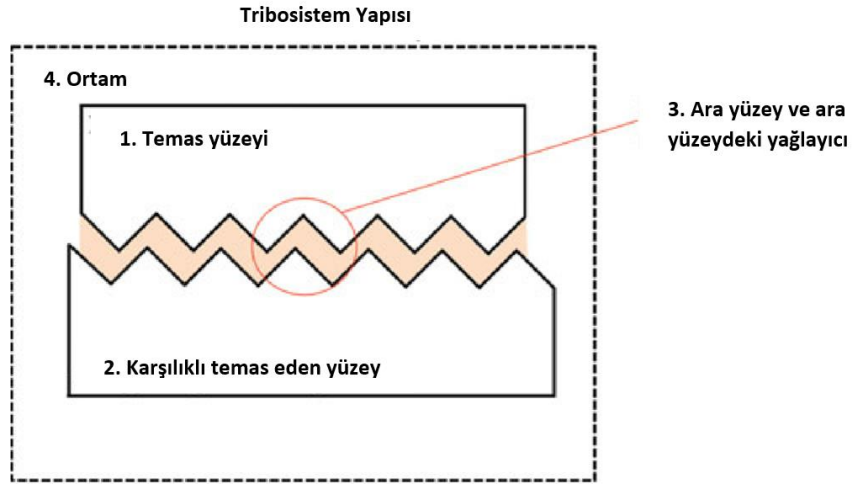
Deterjan ve dispersan katkı maddeleri yağda çözünebilen yanma ve oksidasyon ürünlerini tutar ve böylece metal yüzeylerdeki birikintileri, yağ kalınlaşmasını ve motorda kir oluşumunu engeller. Bazik deterjanlar ayrıca korozyon koruması da sağlarlar. Yağda bulunan asidik yanma ürünlerini nötralize ederler. TBN (Toplam Baz Sayısı) ile belirtilen, motor yağının alkalinitesi, özellikle de yüksek derecede sülfürlü ağır akaryakıt ile çalışan büyük dizel motorlar için özellikle önemlidir. Dispersanlar oleofilik moleküllerin bir kısmına sahip olması sebebi ile ayrıca viskozite arttırıcı işlevi de görürler. Antioksidanlar yağın oksitlenmesini engellerler. Viskozite indeks geliştiricileri ısı arttıkça yağın incelmesini önleme maksadı ile kullanılırlar. Viskozite indeks geliştiricilere sahip bir yağ formülasyonu, yüksek sıcaklık ve yüksek kayma oranlarında yatak boşluklarında geçici viskozite azalmasına izin vermelidir. Karmaşık formüle sahip viskozite indeks geliştirici katkılı yüksek performans yağları düşük içeriğe sahip olanlara kıyasla daha pahalı fakat daha avantajlı bir yöntemdir. Kalıcı ve geçici viskozite kayıpları, özellikle yakıt ekonomisinde büyük rol oynamaktadır. Kalıcı olarak adlandırılan kayıplar, servis ömrü boyunca belirtilen SAE viskozite sınırlarını korumaktadır [18].

Tablo 4. 1 Motor Yağı Katkı Maddeleri [18]

Tip	Örnekler	Fonksiyon
Temel deterjanlar	Kalsiyum veya magnezyum sülfonatlar, fenolatlar veya salisilatlar	1. Asitlerin nötralizasyonu 2. Lak oluşumunun inhibisyonu
Külsüz dağıtıcılar	Poliizobüten süksinimitler	1. Kurum ve oksidasyon ürünlerinin dağılması 2. Safsızlık birikiminin engellenmesi ve lak
Antioksidanlar	Çinko ditiofosfatlar, inhibe fenoller, fosfor-sülfürlü olefinler, metal salisilatlar, aminler	Yağ oksidasyonu ve yağ kalınlaşmasının engellenmesi
Yüksek basınç (EP) katkı maddeleri	Çinko ditiofosfatlar, organik fosfatlar, organik kükürt bileşikleri	Aşınma inhibisyonu
Korozyon / pas koruması katkı maddeleri	Kalsiyum veya sodyum sülfonatlar, amin fosfatlar, çinko ditiofosfatlar	Korozyonun önlenmesi
Akışkanlık indeksi artırıcılar	Polimetakrilatlar, etilen propilen kopolimerleri, stiren bütadien kopolimerler	Viskozitede düşüşün azaltılması, sıcaklık yükselir
Köpük önleyici maddeler	Silikon bileşikleri, akrilatlar	Yoğun dolaşımda köpürmenin engellenmesi
Sürtünme değiştiricileri	Yağ asitleri, yağ asidi türevleri, organik aminler, amin fosfatlar, genellikle daha yumuşak EP katkıları	Sürtünme kuvveti kayıplarının azaltılması

4.3 Yağlama Rejimleri

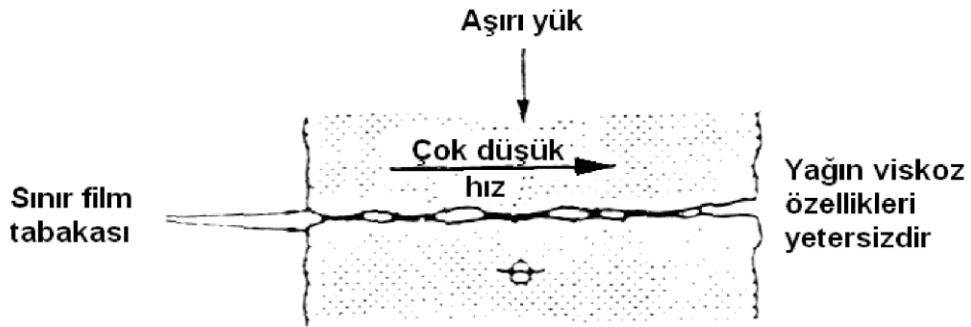
Yağlayıcılar sürtünmeyi ve aşınmayı kontrol etmek için kullanılan bir madde türüdür [26]. Bir tribolojik sistem, Şekil 4.1'de tarif edildiği gibi dört bileşenden oluşmaktadır. İçten yanmalı motorlarda piston segmanları ve silindir gömleği yüzeyi bir tribo sistemdir. Yağlama rejimleri yağlama mekanizmaları ile ilişkilendirilmektedir [24]. Yağlayıcıların bir çoğu sıvıdır, bununla birlikte sıvı yağlayıcılar yüzeyler arasında basınç oluşumu sebebiyle sisteme dahil edilmektedir. Etkileşen yüzeylerin sıcaklığını düşürmekte ve kirleticileri çıkarmakta görevlidirler [26]. Üç ana yağlama rejimi; sınır yağlama, karışık/elastohidrodinamik yağlama ve hidrodinamik yağlama olarak adlandırılabilir [24].



Şekil 4.1 Tribolojik Sistemin Yapısı: (1) Temas Eden Yüzey, (2) Karşılıklı Temas Eden Yüzey, (3) Arayüz ve Arayüzde Yağlama Maddesi ve (4) Ortam [24]

4.3.1 Sınır Tabaka Yağlama

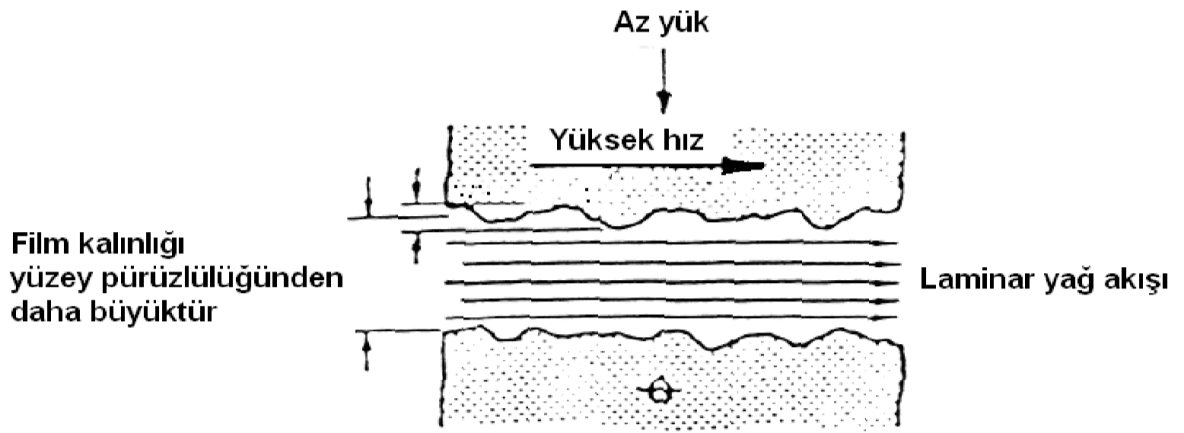
Sınır yağlamada çalışan fizikokimyasal mekanizmalar hala tam olarak anlaşılmamıştır ve bu nedenle birçok güncel akademik ve ticari çalışmaların konusu olmaya devam etmektedir. Sınır tabaka yağlamanın tek bir açıklaması olmadığı gibi farklı mekanizmaların ve reaksiyonların, söz konusu malzemelerin doğasına, yüzeylerine ve koşullara bağlı olarak ortaya çıktığı kesindir [27]. Sınır yağlama, Şekil 4.2.'de görsel olarak gösterilen ince bir sıvı akışkan sebebiyle, yüzeyler arasında en fazla temasın olduğu yağlama rejimidir. İnce film tabakasının kalınlığı bazı durumlarda tek bir atom katman kalınlığına kadar düşebilmektedir. Sınır yağlama karmaşık bir rejim olup, yağ katkı maddeleri ile kontrol edilmektedir [24]. Sınır tabaka yağlama katkı maddelerine karşı son derece duyarlıdır ve bu nedenle kullanılan katkı maddesinin seçimi belirleyicidir [27]. Daha yaygın sınır yağlama katkılarından biri, metalik yüzeylere yapışan ve sıkıca paketlenmiş tek tabaka yağ asitleridir. Bu tek bir atom katmanı, yüksek sürtünme ve aşınma değerlerine neden olan keskin temasları azaltmaya yardımcı olur. Sınır yağlamada tek bir atom katmanlı film hayati öneme sahiptir. Çünkü birçok pratik uygulamada, kalın katmana sahip ve uzun ömürlü yağlayıcılar, karşılıklı temas eden yüzeyler arasında bulunamaz. Bu nedenle tek atom katmanlı film, yüzeyler arasındaki etkileşimi azaltmaya yardımcı olmaktadır [24].



Şekil 4.2 Sınır Yağlama [28]

4.3.2 Hidrodinamik Yağlama

Hidrodinamik yağlama; sıvı yağlama ya da kalın film yağlama olarak da bilinmektedir. Hidrodinamik yağlamada yüzeyler arasında hidrodinamik basınç oluşturularak yüzeylerin teması önlenmektedir. Bu yağlama rejiminde, yüzeyler artık Şekil 4.3'de gösterildiği gibi temas halinde değildir [24]. Bir başka deyişle hareketli yüzeyler tamamen ayrılmaktadır. Yağlamanın etkinliğini geometrik tasarım ve hareket hızının korunması gibi parametreler belirlemektedir. İstenilen kalınlıkta bir yağlayıcı tabakanın oluşturulması, birkaç koşula bağlıdır. Kontrol faktörleri; yüzeylerin durumu, kayma hızı, yağ beslemesi ve viskozitedir [27].

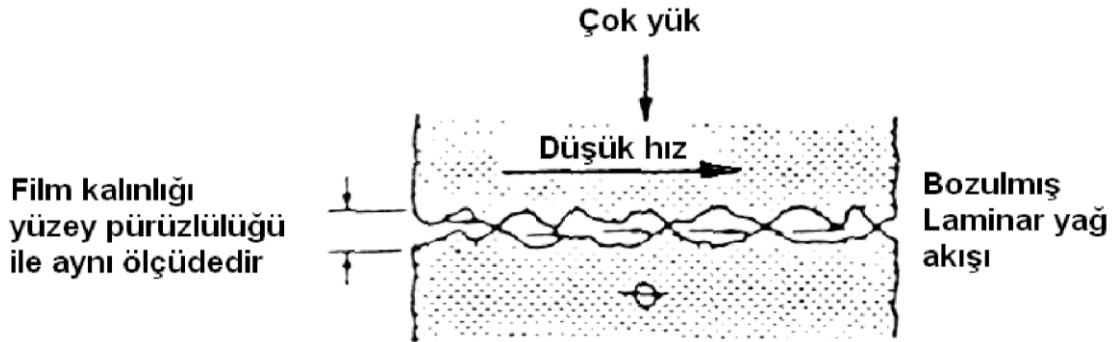


Şekil 4.3 Hidrodinamik Yağlama [28]

4.3.3 Elastohidrodinamik Yağlama

Elastohidrodinamik yağlama, şekil 4.4’de gösterildiği gibi tam hidrodinamik yağlama ve sınır yağlama birleşimidir. Bu yağlama rejiminde, yüzeyler sınır yağlamada olduğu gibi temas maruz kalabilir ve yüzeyler kısmen hidrodinamik olarak yağlanabilmektedir. Elastohidrodinamik yağlama, oluşan tek katman ile, temas sırasında istenmeyen yapışmayı önlemektedir. Elastohidrodinamik yağlamadaki film kalınlığı hidrodinamik yağlamada olduğundan daha incedir ve yük elastohidrodinamik yağlama filmi tarafından desteklenmektedir [24]. Akıcılığın farklı olduğu yerlerde, kaçınılmaz olarak temassızlık meydana gelir. Bundan dolayı temas bölgelerinde sürtünme ve aşınma artmaktadır. Yağlayıcının viskozitesi bu durumda yetersiz kalmaktadır. Temel olarak elastohidrodinamik yağlama sisteminin iki özelliği bulunmaktadır. Bunlar;

- (1) Temas yüzeyleri elastik basınç altında deforme olur ve bu nedenle yük daha büyük bir alana yayılır.
- (2) Yağlama maddesinin viskozitesi yüksek basınçta ciddi oranda artar, böylece temas bölgesindeki taşınan yük artar [27].



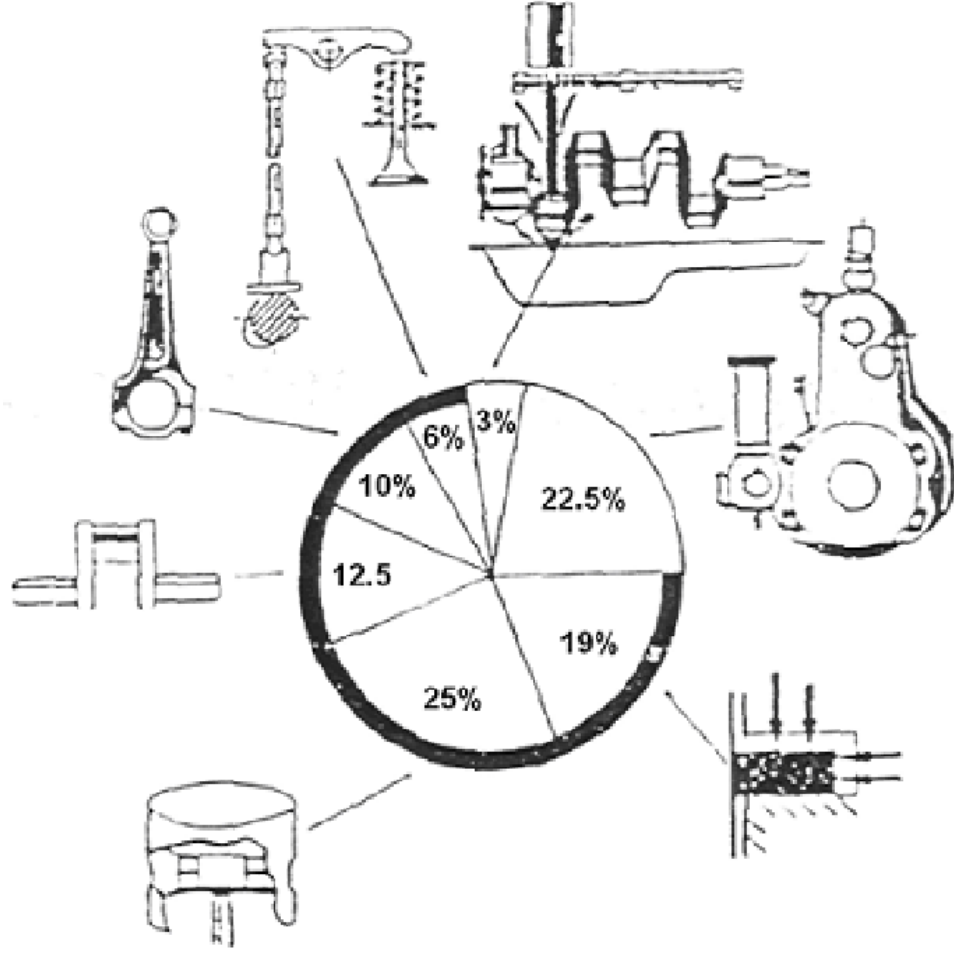
Şekil 4.4 Elastohidrodinamik Yağlama [28]

5.1 Sürtünme

Sürtünme, dinamik bir sistemde kayan bir ara yüzden teğet dirençli kuvvet olarak tanımlanmaktadır [29]. Sürtünme terimi, nispi hareket halindeki malzemeler veya cisimler için kademeli kinetik enerji kaybını tanımlar. Mühendislik açısından sürtünme, ısı olarak yayılan enerji israfının ve ekipmanların arızalanmasının ana nedenidir [30]. Ayrıca, sürtünmenin enerji maliyeti göz önünde bulundurulduğunda sürtünmeyi azaltmak ekonomik bir ihtiyaçtır [31]. Sürtünmeyi anlamak için yüzey pürüzlülüğünü karakterize etmemiz gerekir. Sürtünmenin yüzey topografyası ile ilgili olduğu kanıtlanmış ve temas alanı ve mekanizması ilişkilendirilmiştir [29]. Sürtünme malzeme özelliği olmayıp, temas halinde bulunan iki yüzey oluşturduğu tribolojik sistemin bir özelliğidir. Yaygın olarak karşılaşılan iki tür sürtünme vardır. Bunlar; kuru sürtünme ve sıvı sürtünmedir. Kuru sürtünme aynı zamanda “Coulomb” sürtünme olarak da bilinmektedir. Kuru sürtünme, kuru koşullar altında temas sırasında meydana gelirken; sıvı sürtünme, yağlanmış koşullar altında temas sırasında meydana gelmektedir. İki katı yüzey düzgün ve temiz olsa dahi arasında kimyasal film tabakası yok ise, sürtünme genellikle yüksektir. Yüzey kirleticileri veya ince film tabakası sürtünmeyi etkilemektedir. İyi yağlanmış yüzeylerde genellikle sürtünme düşüktür [24].

5.1.1 İçten Yanmalı Motorlarda Sürtünme

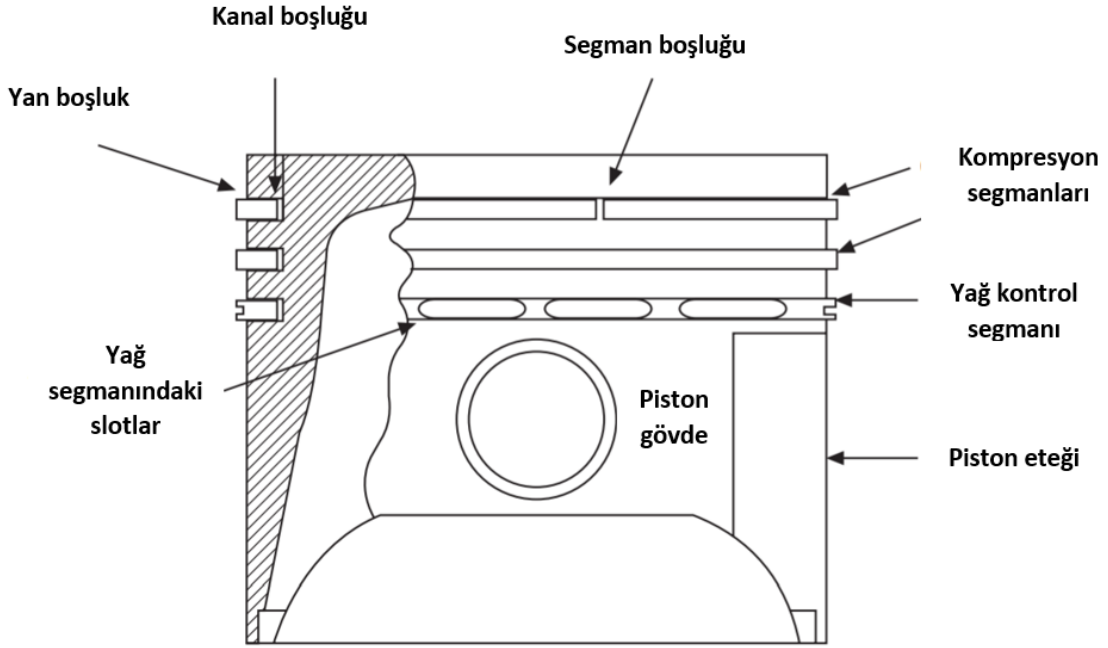
İçten yanmalı motorlarda sürtünme kayıpları Şekil 5.1.'de gösterildiği gibi olup en fazla piston ve segmanlarda meydana gelmektedir.



Şekil 5.1 İçten Yanmalı Motorlarda Sürtünme Kayıpları Dağılımı [28]

5.1.1.2 Piston Segman Sürtünmesi

Tipik bir piston ve segman düzeneğinin yapısı ve isimlendirilmesi, Şekil 5.2.'de gösterilmektedir.



Şekil 5.2 Tipik Bir Piston ve Segman Düzeneğinin Yapısı ve İsimlendirilmesi [32]

Segmanlar kompresyon ve yağ segmanı olmak üzere iki çeşittir. Kompresyon segmanı piston ve silindir gömleği arasında bir gaz contası görevi görerek yanma gazlarının yanma odasından krank karterine geçişini önlemektedir. Yanma odasını karterden ayırmak için kullanılan kompresyon segmanlarına ek olarak, yağlayıcının silindir gömleği yüzeyine dağıtılması gerekmektedir. Yağ segmanı bu görevden sorumludur. Yağ segmanının görünümü, kompresyon segmanından farklıdır ve yarıklara sahiptir. Bu yarıklar fazla yağın uzaklaştırılmasını sağlamaktadır [32]. Ayrıca, yağ tüketimini kontrol etmek için silindir yüzeyine yeterli yağlayıcı sağlamaktadır. Silindir duvarları ve soğutucu arasındaki ısı transferine yardımcı olarak piston sıcaklıklarını kontrol etmektedir. Erin dizel motorda iki adet kompresyon ve bir adet yağ segmanı bulunmaktadır. Kompresyon segmanları hidrodinamik yağlama koşulları altında çalışırken, ikinci kompresyon segmanındaki gaz basıncı, birinci segmandan daha düşüktür. Yağ segmanları, esasen daha yüksek segman gerilimleri nedeniyle, sınır yağlama altında çalışır ve

kompresyon segmanlarının sürtünmesine iki kat katkıda bulunurlar. Piston segman düzeneği motor sürtünmesinin baskın kaynağıdır. Sürtünmeye katkıda bulunan bileşenler, kompresyon segmanları, yağ segmanları, piston eteği ve piston pernosudur. Piston düzeneği sürtünmesinde segman sürtünmesi hâkimdir. Yüksek gaz basıncı ile segmanlar çok fazla yüke maruz kalmaktadır. Emme, sıkıştırma ve egzoz esnasında yağlama sıcaklığının yükselmesi ile film kalınlığı azalmakta ve viskozite düşmektedir. Film kalınlığında bu değişikliğe, segmanın hidrodinamik yağlamadan sınır yağlamaya geçmesi neden olmaktadır. Piston eteği ve silindir gömleği arasındaki geniş temas alanı, segman temas alanına kıyasla daha hafif yüklere maruz kaldığından hidro-dinamik yağlama ile yağlanmaktadır. Sürtünme kuvvetleri, sıkıştırmanın sonunda üst ölü noktadan hemen önce ve üst ölü noktadan sonra en yüksektir. Ateşleme strokunun başlangıcında yanma basıncından kaynaklı piston darbesi ve yüksek itme kuvvetleri segmanlara etkimektedir. Bishop çeşitli kategorilerde piston ve segman sürtünmesi için korelasyonlar geliştirmiştir: Sınır sürtünme koşulunda, segman gerilimi nedeniyle segmanlar ile silindir çeperi arasında, kompresyon segmanların arkasındaki gaz basıncı ile segman ve piston sürtünmesi oluşmaktadır. Sınır sürtünme koşulunda temel olarak kritik bir hızda segman ve silindir cidarı arasındaki piston hareketine bağlı olarak yağ filmi parçalanmaktadır. Sınır yağlamanın kritik bir hızda gerçekleştiği varsayılarak, sınır sürtünmesine bağlı ve strok/bore^2 ile orantılıdır. Segman yüklemesi iki bileşene bağlıdır. Segman geriliminden gelen bileşen sabittir, segmanların arasındaki gaz basıncı nedeniyle oluşan bileşen yüke bağlıdır. Bishop bunun giriş manifoldu basıncı ile orantılı olduğunu varsaymıştır. Hidrodinamik yağlama koşulları altında piston ve segman çeperi arasındaki sürtünme, silindir gömleği ile piston eteği arasındaki temas halindeki alanla ilişkilendirilmiştir. Piston ve segman sürtünmesindeki sınır yağlamanın yük ve hız aralığındaki önemi, viskoz sürtünme bileşeninin artan hız ile artması şeklinde açıklanmıştır. Sınır yağlama sürtünme bileşeni, silindir gaz basınçları artışına bağlı olarak artan yük ile artmaktadır [16].

5.2 Aşınma

Aşınma (OECD, 1968) yüzeydeki bağıl hareketin bir sonucu olarak meydana gelmekte ve yüzeyden madde kaybı olarak tanımlanmaktadır [33]. Çoğu durumda aşınma, yüzeylerdeki etkileşimler nedeniyle oluşur. Aşınma, sürtünme gibi maddenin bir özelliği değil, sistem tepkisidir. Ne yazık ki, sürtünmede olduğu gibi, bir aşınmayı öngörmenin güvenilir bir yolu yoktur [33]. Çalışma koşulları aşınma sürecini etkilemektedir. Yüksek sürtünme yüksek aşınma oranı ile ilişkilendirilmektedir fakat bu mutlaka doğru değildir. Aşınma oranı, birim zaman ya da kayma mesafesi başına çıkarılan malzemenin kütle, hacim ya da yükseklik kaybı olarak tanımlanmaktadır [24].

Uygun malzeme seçimi, kaplama, yüzey tasarımı veya yağlama ile aşınmanın azaltılması, yüksek ekonomik öneme sahiptir [34]. Atmosferdeki çoğu malzeme çifti için gözlenen sürtünme katsayıları genellikle 0,1-1 aralığındadır ve yağlayıcı kullanıldığında bu aralık genellikle daha daralmaktadır [33].

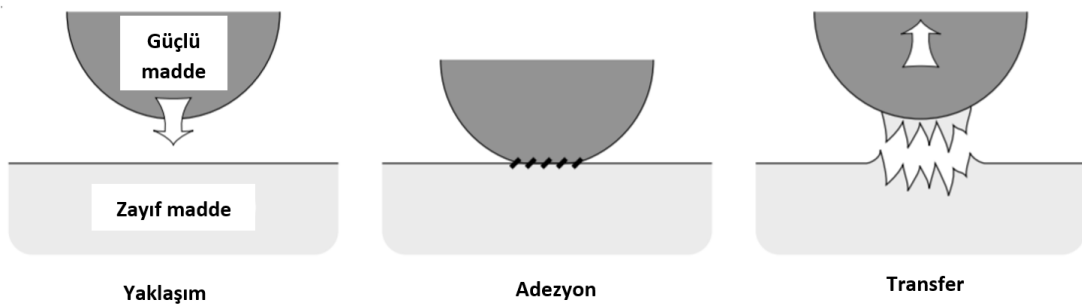
5.2.1 Aşınma Tipleri

Katı yüzeyler birbirine göre kayma, yuvarlanma veya çarpma hareketindeyken aşınma oluşmaktadır. Aşınma, yüzeylerdeki yüzey etkileşimlerinden kaynaklanır ve yüzeyden malzemenin koparılması sonucu oluşur. İyi tasarlanmış tribolojik sistemlerde, malzemenin koparılması genellikle çok yavaş, kararlı ve sürekli bir işlemin sonucunda oluşmaktadır [35]. Önemli aşınma mekanizmaları, adhezyon aşınması, abrazyon aşınması, yorulma aşınması ve tribo oksidatif aşınmalardır. Bunlar farklı aşınma mekanizmaları değil, adhezyon, abrazyon ve adhezyon abrazyon mekanizmalarının kombinasyonlarıdır [35]. Genel olarak, endüstriyel durumlarda karşılaşılan tüm aşınma tiplerinin içte ikisi adhezyon ve abrazyon aşınma mekanizmaları nedeniyle gerçekleşmektedir. Çoğu durumda aşınma bir mekanizma tarafından başlayıp ve diğer aşınma mekanizmaları ile devam edebilir. Bu durum aşınma mekanizmalarının analizini güçleştirmektedir. Bir tribosistemde birden fazla aşınma aynı anda gözlemlenebilmektedir [35]. Aşınma, hafif aşınma ve ağır aşınma olarak, aşınma kalıntılarının ölçek büyüklüğüne göre tanımlanır. Hafif aşınmada, dış yüzey katmanlarında aşınma meydana gelmektedir. Aşınma büyüklüğü 0,01 ila 100 nm arasında değişmekte ve ince oksit parçacıklarını

içermektedir. Ağır aşınmalarda, aşınma derin yüzeylerde meydana gelir ve aşınma büyüklüğü 100 nm ila 100 µm arasında değişmektedir [24].

5.2.1.1 Adhezyon Aşınması

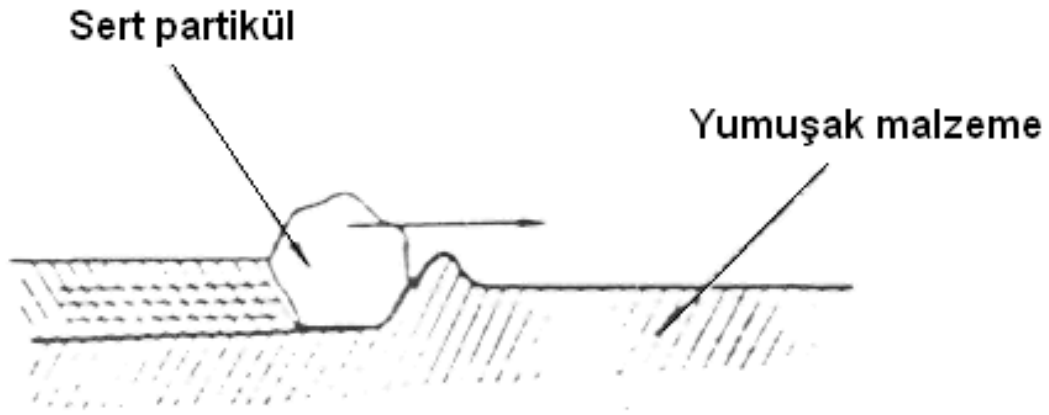
Adhezyon aşınması, yüksek aşınma hızları, büyük ve dengesiz sürtünme katsayısı ile karakterize edilen çok ciddi bir aşınma şeklidir. Kayma yüzeyleri, adhezyon aşınması ile hızlı bir şekilde tahrip olabilir ve sürtünme katsayısının çok büyüdüğü durumlarda kayma hareketi durabilmektedir. Metaller, adhezyon aşınmasına yatkındır. Kayar metal temaslardaki yağlayıcıların yüzeyler arasında ayırma görevini yerine getiremediği durumlarda adhezyon aşınması meydana gelmektedir. Kayma yüzeyleri ayrılmazsa, adhezyon aşınması kaçınılmazdır. Yüzeyler, yağlama koşulları sağlansa dahi karşılıklı temas eden yüzeye temasta bulunacaktır. Adhezyon aşınması, yüzey pürüzlülüğünün artması veya temas eden yüzeylerin sertliklerinin artması ile azalmaktadır [36].



Şekil 5.3 Adhezyon Aşınması Nedeni İle Metal Transfer İşlemi

5.2.1.2 Abrasyon Aşınması

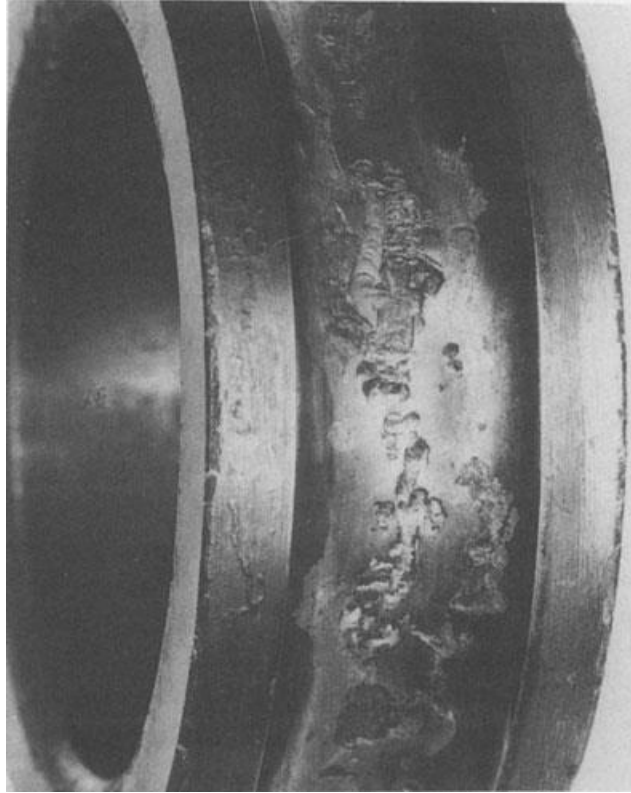
Adından da anlaşılacağı gibi, abrazyon aşınma, aşındırıcı malzemenin kesme hareketinden kaynaklanmaktadır. İşlemin iyi bir örneği, taşlama işleminde malzemeden parçacıkların koparılmasıdır. Aşınma, daha yumuşak bir malzemeden sert malzemeye parçacık geçmesiyle de olabilmektedir. Bazen aşınma, kayan malzeme çifti arasına giren yabancı sert parçacıklardan kaynaklanmaktadır. Toz parçacıklarının yağlama sistemine girdiği durumlarda oluşabilmektedir. Saf metallerin aşınma direnci sertlikle neredeyse orantılıdır. Çelik dâhil alaşımlar için aşınma direnci, sertlikle orantılı değildir ve mikro yapıya bağlıdır [37].



Şekil 5.4 Abrasyon Aşınması [28]

5.2.1.3 Yorulma Aşınması

Yuvarlanma ve kayma sırasında yüzey altı ve yüzey yorgunluğu gözlemlenmektedir. Malzemelerin maruz kaldığı yükleme ve yük boşaltma döngüleri, yüzey altı veya yüzey çatlaklarının oluşumuna neden olabilmektedir. Kritik sayıda çevrime ulaşıldığında, yüzeyden parçacıkların kopması ile büyük oyuklar oluşmaktadır. Bu kritik noktadan önce, kademeli olarak bozulan fakat adhezyon veya abrazyon mekanizmasının neden olduğu aşınmanın aksine ihmal edilebilir aşınma meydana gelmektedir. Bu nedenle, yorulma aşınması ile yüzeyden uzaklaştırılan madde miktarı kullanışlı bir parametre olmamakla beraber devir sayısı veya yorulma aşınması oluşmasına kadar geçen zaman çok daha önemlidir [35].



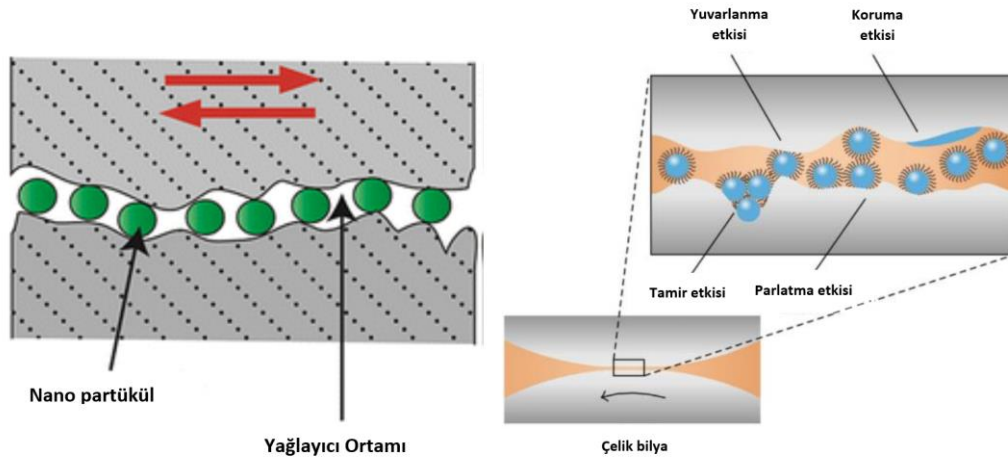
Şekil 5.5 Yorulma Aşınması [35]

5.2.1.4 Tribo Oksidatif Aşınma

Ortamdaki oksijen, birçok iş parçasının yüzeyinde oksit üretimine neden olmaktadır. Oksijen çok az miktarda olsa dahi aşınma oranlarını azaltmaktadır. Bu bağlamda, oksidatif aşınma abrazyon aşınmasına faydalı olarak kabul edilebilmektedir. Oksidatif aşınma proses sıcaklıkları ile hızlanmaktadır. Oksijen genellikle iki yüzey arasında yağlama görevi gören düşük kayma gerilimi sağlayan, sert yüzeydeki aşınmayı azaltan ince film tabakası oluşturmaktadır. Oksitler ayrıca yüzey ve aşındırıcı taneler arasındaki yapışmayı da azaltmaktadır. Bazı durumlarda, sert oksitlerin oluştuğu durumlarda aşınma artabilmektedir. Bu durumda yüzeyler arasındaki sert oksit parçacıkları, her iki yüzeyin de daha fazla aşınmasına ve çalışma yüzeyinin pürüzlülüğünün artmasına neden olacaktır [38].

5.3 Nano Malzemelerin Tribolojik Özellikleri

Karbon nanotüpler yağlayıcıların tribolojik özelliklerini etkileme kabiliyetine sahiptir. Nano parçacık bazlı yağlayıcıların tribolojik özelliklerini etkileyen parametrelerin başında; boyut, şekil, yapı, fonksiyonel gruplar ve nano parçacık konsatrasyonu gelmektedir [39].



Şekil 5.6 Yağlayıcının İçerisindeki Nano Partükülün Çalışması [24]

5.3.1 Boyut Etkisi

Hall-Petch'e yasasına göre, nano malzemelerin sertliği tane büyüklüğü küçülmesi ile birlikte artmaktadır ve bu yasaya göre elastiklik 10 nm'den düşük değerlerde artmaktadır. Bununla birlikte nano partiküller sürtünme yüzeylerinden daha sert olduğunda, aşınmaya neden olabilmektedir. Bu nedenle, nano katkılı yağlayıcı hazırlarken nano parçacıkların neden olduğu değişiklik dikkate alınmalıdır. İkinci olarak, sürtünme yüzeylerinin yüzey pürüzlülüğüne dikkat edilmelidir. Çünkü nano partikül yarıçapı pürüzlülük boyutundan daha fazla olduğu durumlarda, nano katkıdan tribolojik avantaj elde edilemeyecektir. Bununla birlikte, eğer yüzey pürüzlülüğü nano parçacık yarıçapından çok daha büyük ise, nano katkı maddesi pürüzlülükleri yapay olarak pürüzsüzleştirerek, tribolojik özellikleri iyileştirmektedir. Üçüncüsü, yağlayıcının homojenliği, nano parçacık boyutuna bağlıdır. Stokes yasasına göre, nano parçacık büyüklüğünde azalma dağılım stabilitesinde iyileşmeye neden olmaktadır [39].

5.3.2 Şekil Etkisi

Nano parçacıkların şekli nano yağlayıcıların geliştirilmesinde göz önünde bulundurulması gereken en önemli parametredir. Örnek olarak belirli bir yükte, nano kürelerin temas alanı nano levhalara kıyasla daha küçük olması sebebi ile daha yüksek basınca maruz kalacaktır. Dolayısı ile sürtünme yüzeyi deformasyonunu önlemede levha nano parçacıkların kullanılması, çok düşük olasılığa sahiptir [39].

5.3.3 Nanoyapı Etkisi

Nano parçacıkların iç yapısı mekanik özelliklerini değiştirebilmekte, dolayısıyla da tribolojik özelliklerinin değişmesine neden olabilmektedir. Örneğin, nano malzemelerdeki boşluklar (schottky hatası), yer değiştirmeleri engelleyerek, mekanik dayanımı arttırmaktadır. Sınırlı sayıda atom boşluğu nanomalzemelerin mekanik gücünü arttırmaktadır ve böylelikle tribolojik özelliklerin iyileşmesine neden olmaktadır. Nano malzemelerde bulunan aşırı kusur ise mekanik dayanımın düşmesine neden olmaktadır. Örneğin, bir nanotüpün atomik hatalarının artması Yougn modülünü ve çekme gerilimini azaltmaktadır [39].

5.3.4 Yüzey Fonksiyonelleştirme Etkisi

Fonksiyonelleştirme, nano katkı yağlayıcıların geliştirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Fonksiyonelleştirilmemiş nano parçacıklar, genellikle güçlü van der Waals kuvvetleri sebebi ile toplanma eğilimindedir. Fonksiyonel grupların nano parçacıklara bağlanması ile van der Waals kuvvetleri zayıflar. Böylelikle topaklanma önlenir ve daha yüksek tribolojik özellikler elde edilmektedir. Fonksiyonelleştirilmiş nano parçacıklar hibrit bir yapıya sahiptir. Sinerjik kombinasyon ile yüksek basınçlarda sürtünme azalmaktadır. Fonksiyonelleştirme, kolloidal stabilitenin arttırılması ve baz yağda nano parçacıkların homojen dağılımının gerekli olduğu durumlarda uygulanmaktadır [39].

5.3.5 Nanomalzeme Konsantrasyon Etkisi

Baz yağdaki nano parçacıkların miktarı yağlayıcıların tribolojik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. İdeal konsantrasyonun belirlenmesinde ve en düşük sürtünme katsayısının elde edilmesinde çalışma sisteminin tüm parametreleri göz önünde bulundurulmalıdır [39].

5.3.6 Sürtünme Esnasında Yüzeylerin Fiziksel Ve Kimyasal Yönleri

Sürtünme yüzeylerinin fiziksel ve kimyasal yönleri sürtünme yüzeyinde oluşan aşınma mekanizmalarını belirlemektedir. Katkı maddeleri metal yüzey yağlayıcı etkilileşiminden doğan mekanizmalar aşağıdaki gibidir.

Metal yüzeydeki katkı maddelerinin adsorpsiyonu

Tribo aktivasyon koşulları altında kimyasal maddelerin kimyasal olarak ayrışması

Katkı elementleri ile sürtünme metal yüzeyi arasındaki ikincil yapıların oluşumu ile kimyasal etkileşim [39]

6.1 Giriş

Tezin bu bölümünde deneysel çalışmanın metodu ve kullanılan malzemeler tanıtılmıştır.

6.2 Malzeme ve Metot

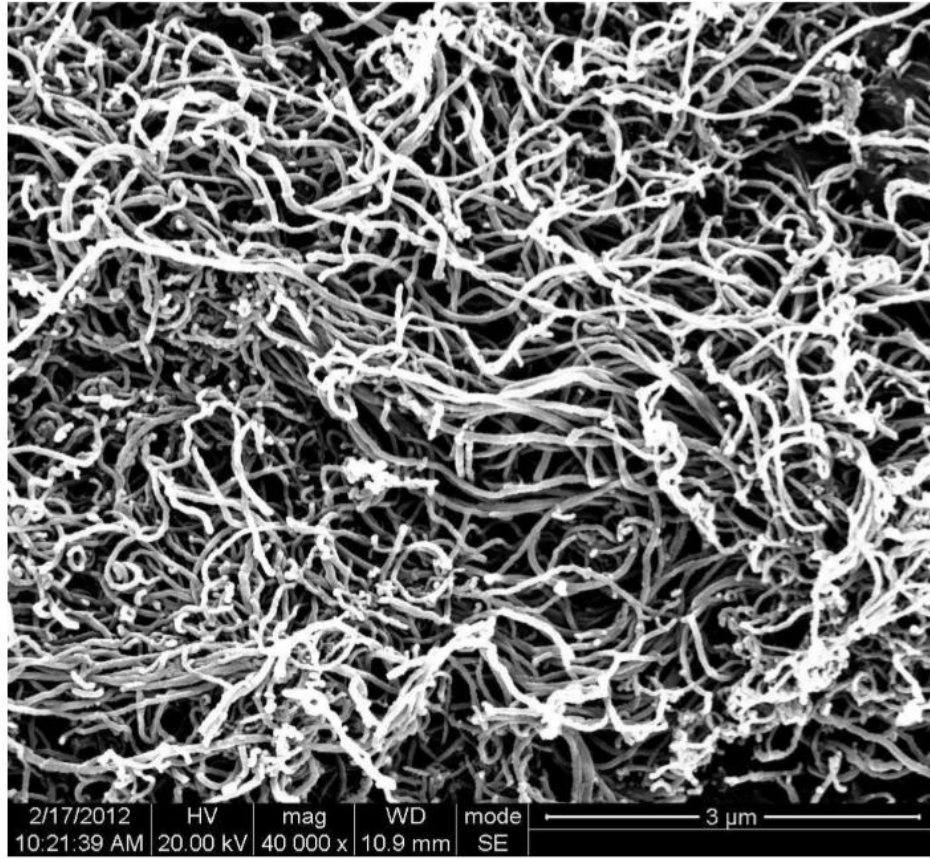
Testlerde kullanılan MWCNT'ler, Chengdu Organic Chemicals Co.Ltd., Çin'den satın alınmıştır. MWCNT'lerin teknik özellikleri Tablo 6.1'de kimyasal analizi ise Tablo 6.2'de verilmiştir [40].

Tablo 6.1 MWCNT'ün Özellikleri

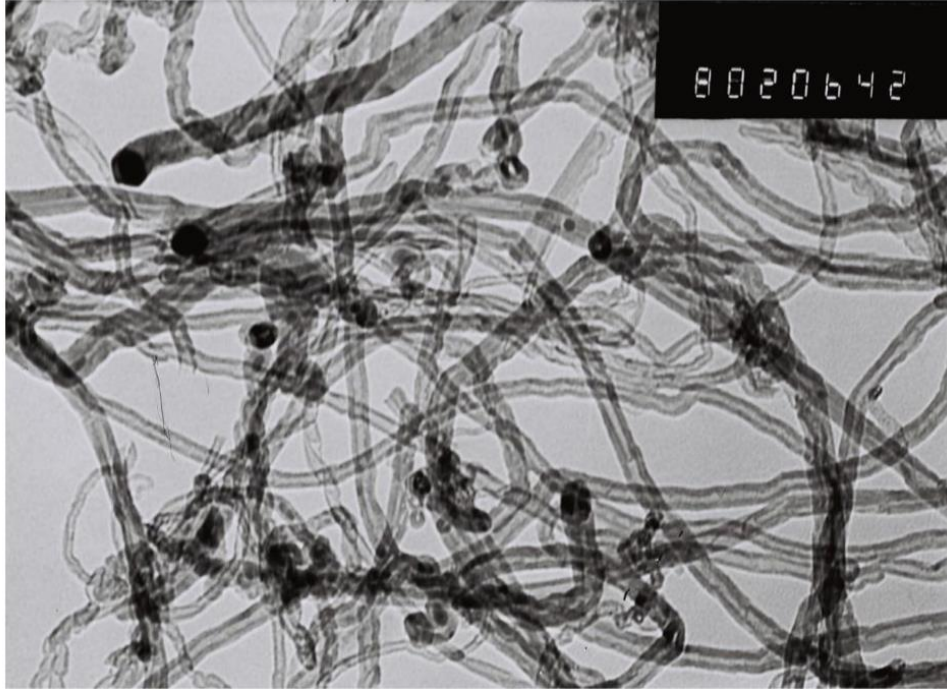
Saflık	>%85
Dış Çap	10-30 nm
İç Çap	5-10 nm
Uzunluk	10-30 μm
Özgül Yüzey Alanı	140 m^2/g
Yoğunluk	0,14 g/cm^3
Gerçek Yoğunluk	2,1 g/cm^3
Üretim Yöntemi	Kimyasal Buhar Biriktirme

Tablo 6.2 CNT'ün Kimyasal Analizi

Bileşenler	İçerik
C	88,33
Al	4,21
Fe	0,18
Ni	0,97
S	0,16



Şekil 6.1 MWCNT'ün SEM Görüntüsü



Şekil 6.2 MWCNT'ün TEM Görüntüsü

Testlerde kullanılan tam formüle edilmiş yağ Opet Fuchs Madeni Yağ San. ve Tic. A.Ş.'den satın alınmıştır. Tipik özellikleri Tablo 6.3'de verilmiştir [41].

Tablo 6.3 Yağ Tipik Özellikleri

Yoğunluk@15°C,g/mL	ASTM D 4052	0,889
Viskozite@40°C,mm ² /s	ASTM D 445	109,8
Viskozite@100°C,mm ² /s	ASTM D 445	14,6
Viskozite İndeksi	ASTM D 2270	137
Parlama Noktası,°C	ASTM D 92	248
Akma Noktası, °C	ASTM D 97	-42
TBN, mgKOH/g	ASTM D 2896	10,8

Nano yağlayıcı Erin 1.16 L Dizel Jeneratör üzerinde test edilmiştir. Test motoru karakteristikleri Tablo 6.4’de verilmiştir [42] .

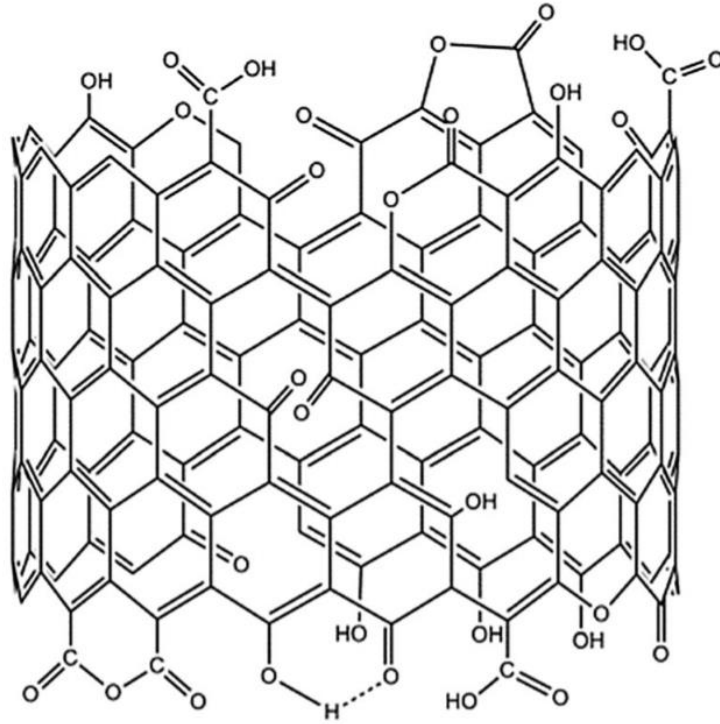
Tablo 6.4 Test Motoru Karakteristikleri

Silindir Sayısı	1
Çap x Strok	108 mm x 127 mm
Toplam Motor Hacmi	1,16 L
Silindir Başına Supap Sayısı	4 adet
Sıkıştırma Oranı	14,6 : 1
DIN Maksimum Güç	18 kW/ 2.400 dev/dak (24.1BG / 2.400 dev/dak)
Maksimum Tork	80 Nm /1800 dev/dak
Maksimum Yüksüz Devir	2.900 dev/dak
Minimum Yüksüz Devir (Rölanti Devri)	600 dev/dak
Özgül Yakıt Tüketimi	250 g/kWs
Dolgu Değişim Metodu	Doğal Emiş
Yanma Odası Konfigürasyonu	Direkt Püskürtme
Yakıt Pompası	Bosch 1.050Bar Yüksek Basıncılı Mekanik Pompa
Yağ Kapasitesi	5 L

6.3 Karbon Nanotüplerin Fonksiyonelleştirilmesi

Oksijen içeren gruplar, karbon nanotübün yüzeylerine kontrollü oksidasyon ile eklenmekte ve su içeren polar çözücülerde karbon nanotüp yüzeylerinin hidrofilikliğini veya ıslanabilirliğini artırabilmektedir. Ayrıca, bu gruplar kovalent, elektrostatik ve hidrojen bağları oluşturmaktadırlar.

Yaygın oksidanlar arasında, nitrik asit, hidrojen peroksit, permanganat, hipoklorit, persülfat, hipoklorit, kloratlar, dikromat, oksijen, ozon ve nitrik oksit bulunmaktadır. Oksidasyon ile yüzey özelliklerini ayarlamak mümkündür. Karbon malzemeler için en yaygın olarak kullanılan oksidan, konsantre veya seyreltik sulu nitrik asittir. Nitrik asit kullanımında; yalnızca sıcaklık, asit konsantrasyonu ve oksidasyon süresinin kontrolü gerektiğinden yöntem etkili bir yöntemdir. Bu nedenle oksidasyon işlemi karbon nanotüplerin yüzey fonksiyonelleştirilmesinde, özellikle oksijen içeren karboksil gruplarının üretilmesinde kullanılmaktadır [43].

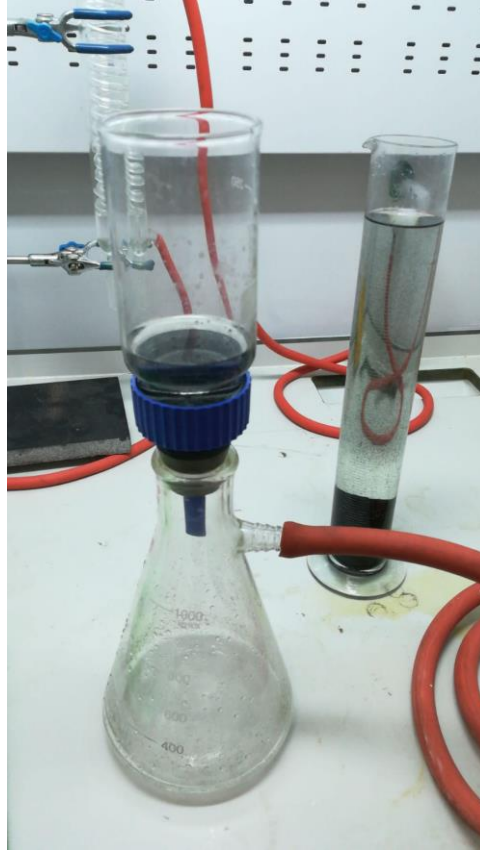


Şekil 6.3 CNT'lerin Yüzey Katmanı Üzerinde Oksijen Gruplarını Gösteren Şematik Diyagram [44]

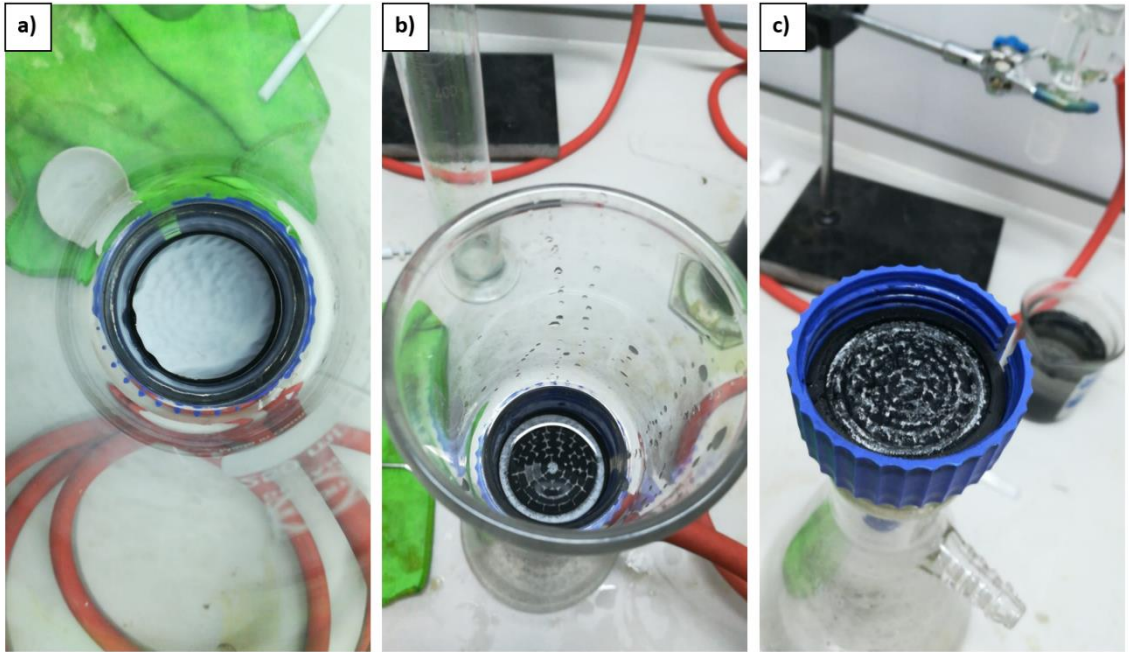
Bu deneysel çalışmada, seyreltik nitrik asit (ağırlıkça %65) kimyasal fonksiyonelleştirme amacıyla kullanılmıştır. 0,1 g karbon nanotüp için 20 mL nitrik asit çözeltisi ilave edilmiştir. Karışım reflü kondenser tüpü vasıtası ile 120 °C' de 600 rpm'de 48 saat manyetik karıştırıcı ile karıştırılmış, asit buharlaştırılıp, yoğunlaştırılarak sistemde devir daim edilmiştir. Düzenek Şekil 6.4' de gösterildiği gibidir.



Şekil 6.4 Reflü Kondenser Sistemi



Şekil 6.5 Filtrasyon Sistemi

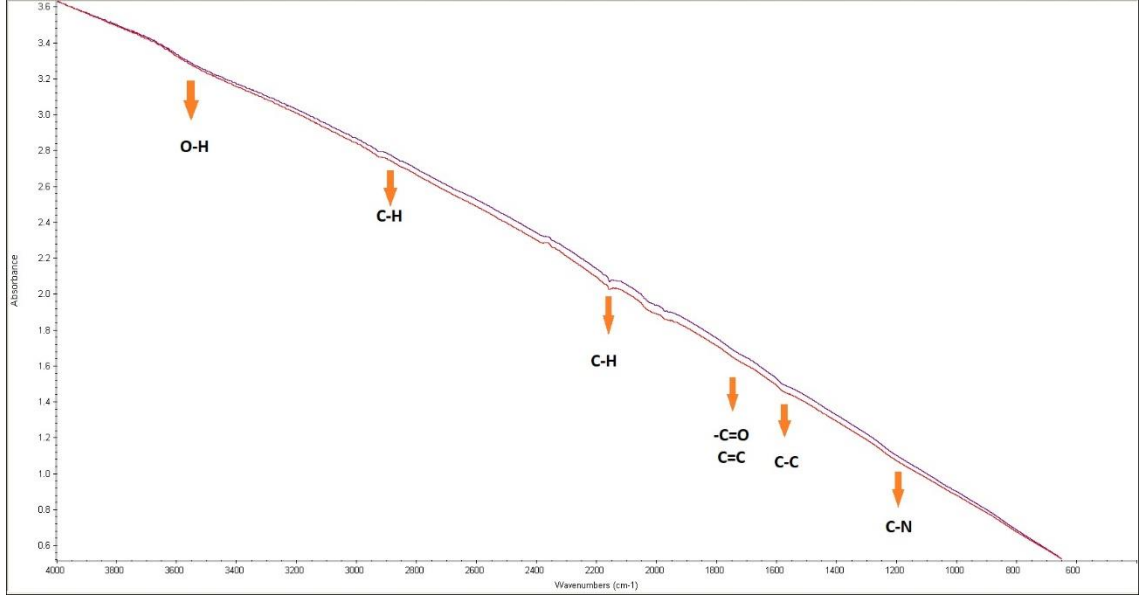


Şekil 6.6 Fonksiyonelleştirilmiş Karbon Nanotüp Eldesi a) Filtrasyon İşlemi Öncesi
b) Filtrasyon Esnasında c) Filtrasyon Sonrası

İşlem tamamlandıktan sonra asit sistemden uzaklaştırıp, karbon nanotüpler saf su ile seyreltilmiştir. Seyreltilen çözelti Şekil 6.5’de gösterildiği gibi filtreden geçirilmiştir. 0,3 mm gözenek boyutuna sahip filtre kullanılarak karbon nanotüpler çözeltiden ayrılmıştır. Karbon nanotüpler saf su ile nötr pH seviyesi elde edilene kadar yıkanmıştır. Karbon nanotüpler 100 °C’de 2 saat boyunca kurutulmuştur. Fonsiyonelleştirme işlemini analiz etmek için karbon nanotüplere FT-IR testi uygulanmıştır.

FT-IR çalışmaları, CNT’lerin yüzeyine bağlı fonksiyonel grubun tanımlanması için 400 ila 4000/cm⁻¹ aralığında gerçekleştirilmiştir. FT-IR spektroskopisi, moleküllerin yapısal tayininde yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 6.7 karşılaştırmalı bir FT-IR verisini göstermektedir.

Şekilde 6.7’de görülen ve çok zayıf tepe noktalarının bulunduğu spektrumun, beklenen nanotüplere özgü 1580 – 1650 cm⁻¹ aralığında C-C germe bağları gösterdiği görülmektedir. 1715 cm⁻¹ dalgasayısındaki zirvenin, karboksil grubunun -C=O gerilmesi ve aromatik halkalarda C=C çiftli bağı ile ilişkili olduğu görülebilmektedir. 3000 - 3500 cm⁻¹ dalgasayısı civarında pikler, karboksil ve hidroksil gruplarında -O-H germe bağı ile ilişkilidir. 2884 cm⁻¹ ve 2823 cm⁻¹ dalgasayısı civarında meydana gelen zirveler, alifatik -CH₂ ve -CH₃ gruplarında C-H germe bağı ile ilişkilidir. 1923 cm⁻¹ dalgasayısında görülen pik, alken fragmanlarının asimetric olarak gerilmesine karşılık gelmektedir. Fonksiyonel grupların yoğun olmaması oldukça az miktarda fonksiyonel grup oluştuğunun ve bu sayede daha az yapısal hata oluşumu ile karbon nanotüplerin özelliklerinin kaybolmadığının işaretidir.



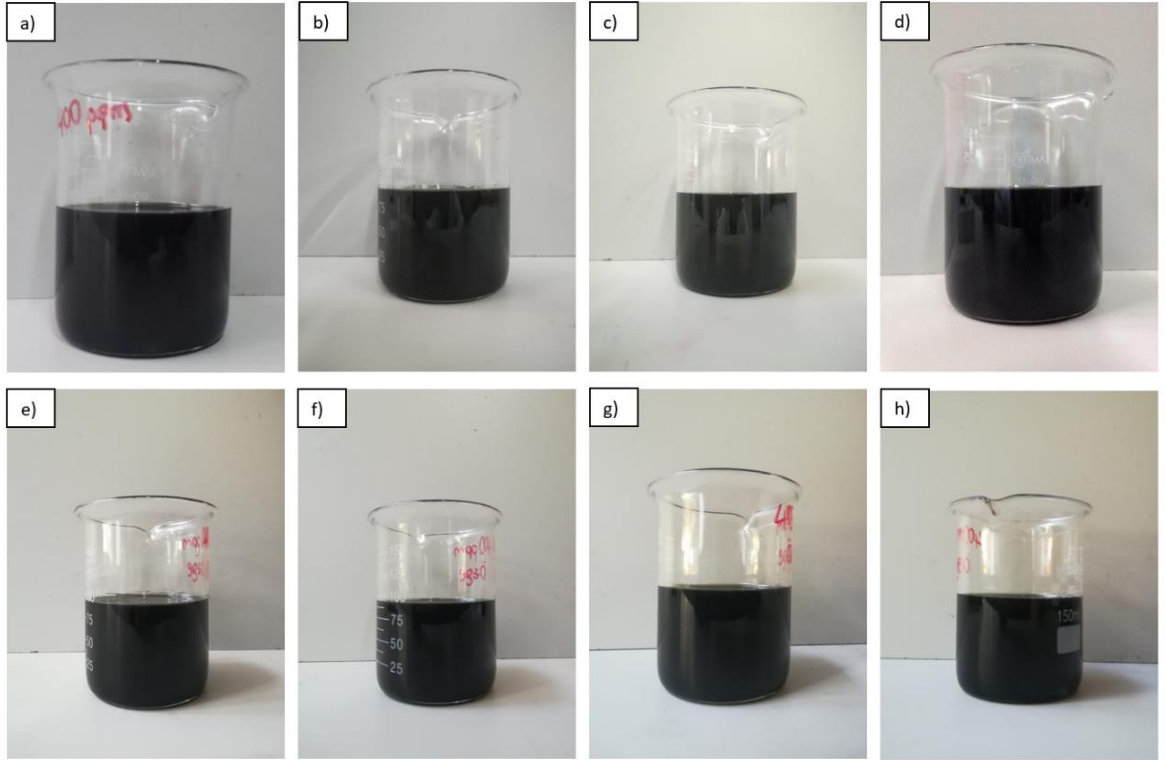
Şekil 6.7 Fonksiyonelleştirme İşlemi Uygulanmış Karbon nanotüplerin FT-IR Sonucu

6.4 Nano Katkılı Yağlayıcının Hazırlanması ve Çökelme Testleri

Nano katkılı yağ numunesine ilave edilecek CNT miktarının 400 ppm olmasına tezin deneysel çalışmasına başlanılana dek yapılan ön laboratuvar çalışmaları neticesinde karar verilmiştir. 177,8 mg fonsiyonelleştirme işlemine tabi tutulmuş CNT, hassas terazi ile ölçülerek beher içerisine konulmuş ve 500 mL tam formüle edilmiş yağ, bir çubuk ile karıştırılarak ilave edilmiştir. Motor testlerinde kullanmayı hedeflediğimiz bu yağlayıcının, hazırlanmanın akabinde hemen kullanılmaması sebebiyle, homojen olması gerekmektedir. Bundan dolayı hazırlanan nano yağlayıcı mümkün olduğunca homojen olmalıdır. Hazırlanan nano katkılı yağ numunesi önce bir çubuk ile karıştırıldıktan sonra, ultrasonik banyoda 30 dak %40 amp sonikasyona tabi tutulmuştur. Ardından elle karıştırılarak 30 dak daha %40 amp sonikasyona tabi tutulmuşturtur. Nano katkılı yağlayıcının homojenliği 1. gün, 2. gün, 3. gün, 7. gün, 14. gün, 21. gün, 28. gün, 2.ayda görsel olarak incelenmiştir. Karbon nanotüpün homojen dağılımı ve 2 ay boyunca çökelme olmadığı gözlemlendiğinden fonksiyonelleştirme miktarının ve homojenizasyon işleminin yeterli olduğu kanısına varılmış ve motorda kullanılması gereken 5,5 L yağ 0,5'er litreler halinde aynı işlemlerden geçirilerek hazırlanmıştır.



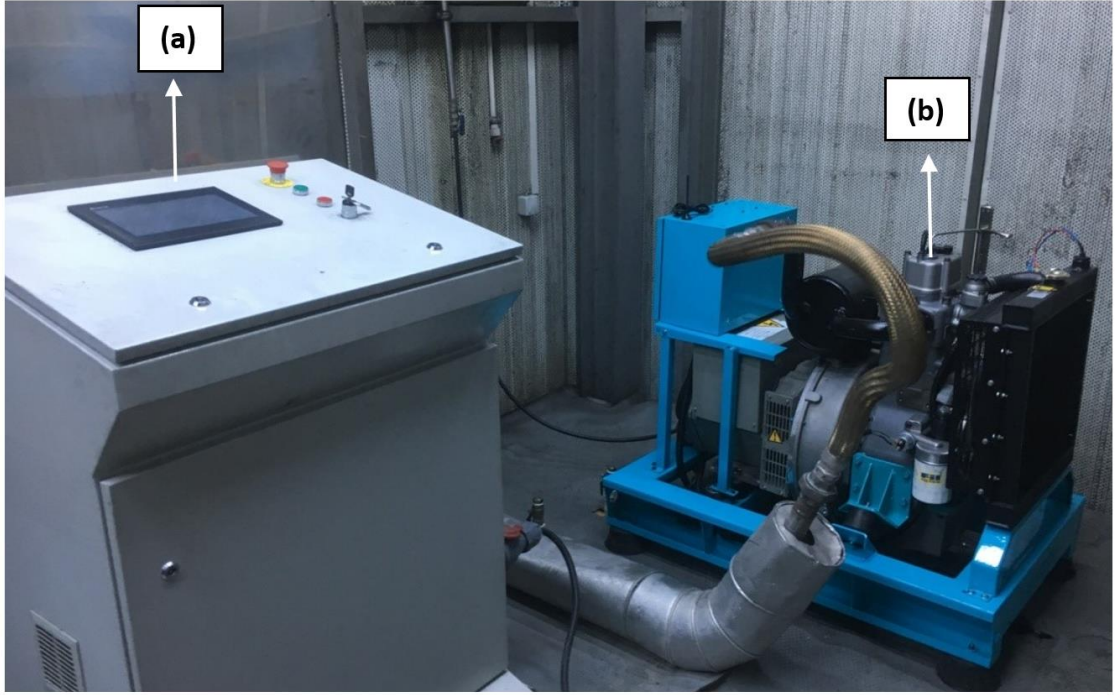
Şekil 6.8 Sonikasyon İşlemi



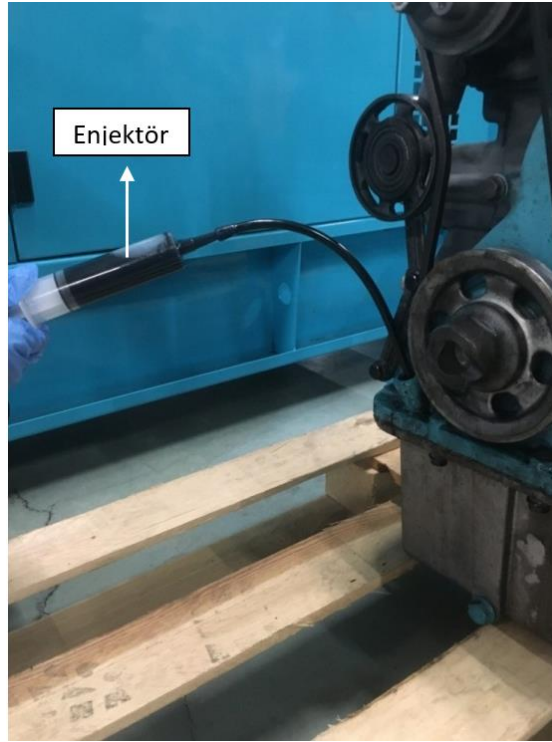
Şekil 6.9 Nano Yağlayıcının Homojenliği a)1. Gün b)2. Gün c)3. Gün d)7. Gün
e)14. Gün f)21. Gün g)28. Gün h)2. Ay

6.5 Motor Testleri

Testler Erin 1.16 L Dizel Jeneratör üzerinde Erin Motor bünyesindeki bulunan test laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Test iki aşamalı olup, iki farklı sıfır motor üzerinde yapılmıştır. Birinci aşamada Opet Fullpro marka 15W-40 SAE viskozitesindeki tam formüle edilmiş yağ motor üzerinde test edilmiştir. İkinci aşamada ise motor üzerinde nano katkılı yağlayıcının testi yapılmıştır. Her iki test esnasında da yağ fitresine CNT'lerin takılma ihtimalini ortadan kaldırmak maksadıyla sistemden bay-pas edilmiştir. Rodaj sürelerinde motorlar 7 saat rölanti, 5 saat %25 yük, 5 saat %50 yük, 3 saat %75 yükte çalıştırılmıştır. Rodaj esnasında, test motorlarının daha önce hiç kullanılmamış olmaları sebebi ile parçaların üretiminden kalan talaş, toz gibi istenmeyen parçacıkların toplanması için motor yağ filtreleri sisteme dahil edilmiştir. 20 saatin sonunda her iki motorun da motor yağı tahliye edilmiş ve test edilmek üzere 150 cc asıl ve 50 cc yedek yağ numuneleri alınmıştır. Yağın ağır çalışma şartları altındaki performansını değerlendirebilmek için iki jeneratör de 250 saat tam yükte çalıştırılmıştır. Jeneratörleri yüklemek için yük bankası kullanılmıştır. Test düzeneği Şekil 6.10'da gösterilmiştir. Her 50 saatte bir olmak üzere 50. , 100. , 150. , 200. , 250. saatlerde motorlardan 150 cc asıl ve 50 cc yedek olmak üzere 2 adet yağ numunesi yağ numune kaplarına alınmıştır [44].



Şekil 6.10 Test Düzenegi (a) Yık Bankası (b) Jeneratör



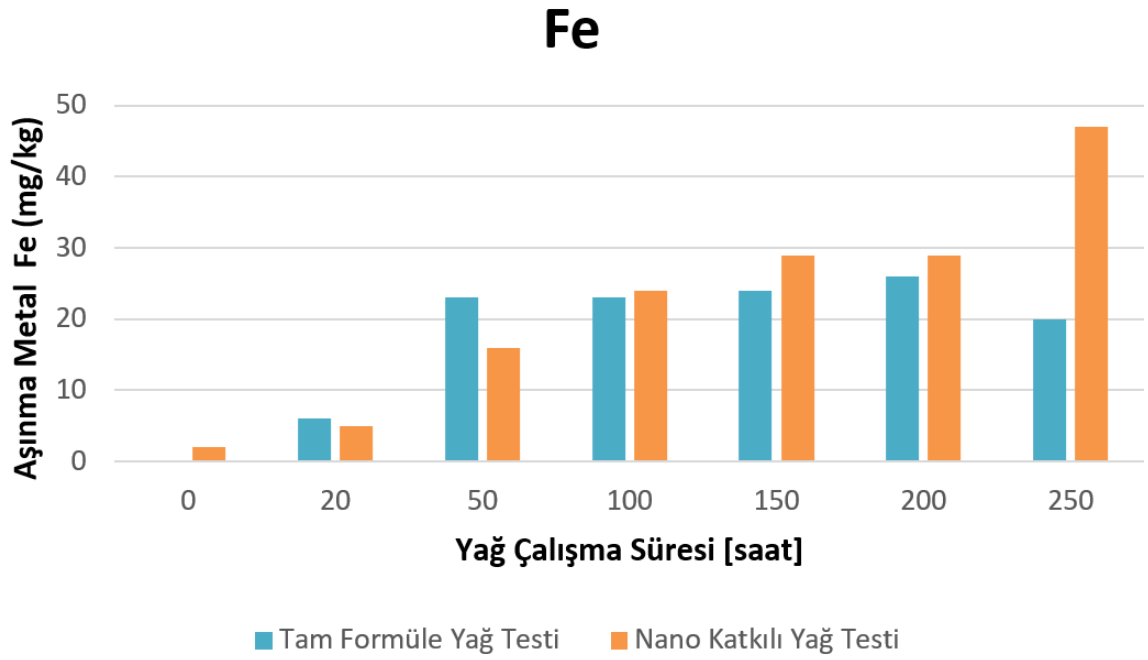
Şekil 6.11 Numune Alımı

Şekil 6.11’de test motorlarından enjektör yardımı ile numune alımı gösterilmiştir. Her numune alımında yeni bir enjektör kullanılmış olup numune alınan yağ miktarında motorlara yağ takviyesi yapılmamıştır. Jeneratörler üzerine entegre edilmiş Datakom marka DKG-300 model otomatik kontrol cihazı ile motor verileri mobil olarak takip edilmiş ve test süresince motor devri, güç, frekans, yağ sıcaklığı, yağ basıncı, soğutucu sıcaklığı, çalışma süreleri izlenmiştir [44].

6.6 Sonuçlar ve Tartışma

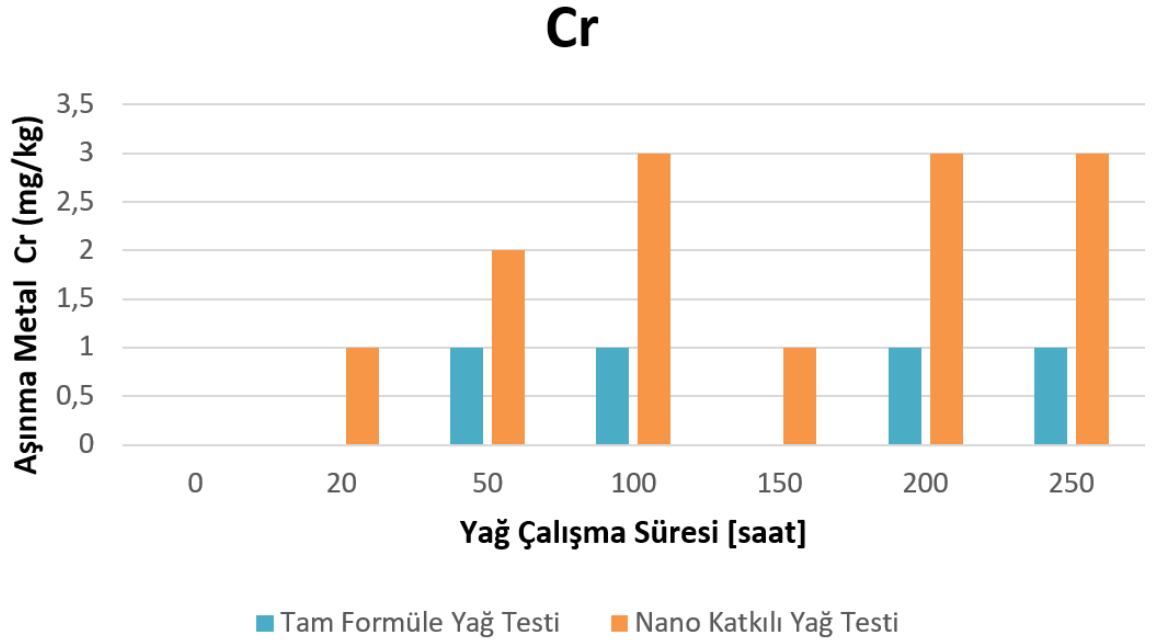
15W-40 SAE motor yağı ve karbon nanotüp katkılı motor yağı, motor üzerinde test edilmiştir. 0. , 20. saatin sonunda rodaj ve 50. ,100. , 150. , 200. ,250. saatlerde yağ numuneleri alınarak; ASTM D 5185 [45], ASTM D445 [46] ve ASTM D 2896’ya [47] uygun olarak alarak Opet full check laboratuvarında analiz edilmiştir. Motor yağına ilave edilen karbon nanotüplerin aşınmaya ne etki ettiğini görmek için yağ analizleri yapılmış ve aşınma elementleri, toplam baz sayısı ve kinematik viskozite sonuçları değerlendirilmiştir. Test motorlarından sökülen piston segmanlarının yüzeylerine SEM ve EDS analizi yapılmıştır. SEM’den alınan yüzey ve yüzey pürüzlülük görüntüleri ise ayrıca ekte paylaşılmıştır.

Demir, motorun birçok parçasında bulunması sebebi ile yağ numunelerinde değerlendirilen en yaygın partiküldür [48]. Fe, muhtemelen silindir gömleği, piston segmanları, valfler, dişliler, miller, yataklar, krank mili, kam milinde oluşan pastan kaynaklanmaktadır. Test sonuçları Şekil 6.12 tam formüle yağ testlerinde Fe elementi en yüksek 200. saatte 26 ppm'dir. Nano yağlayıcı testinden alınan sonuçlara göre 150. ve 200. saatte 29 ppm'den 250. saatte ciddi bir artış göstererek 47 ppm'e ulaşmıştır. Aşınma metali demir incelendiğinde bir miktar aşınmanın olduğu gözlemlenmiş ve bu aşınma elementinin gömlek tarafından geldiği düşünülmüştür. Kaleli H. [49] yağ analizi numunesinin aşınma elementi demir içeriğinin maksimum 40-200 ppm arasında olması durumunda emniyetli olduğunu söylemiştir. Bu durumda nano yağlayıcı test motorundan alınan yağ numuneleri sonuçları, aşınma elementi demir bakımından incelendiğinde güvenli aralıkta olduğu sonucuna varılmıştır.



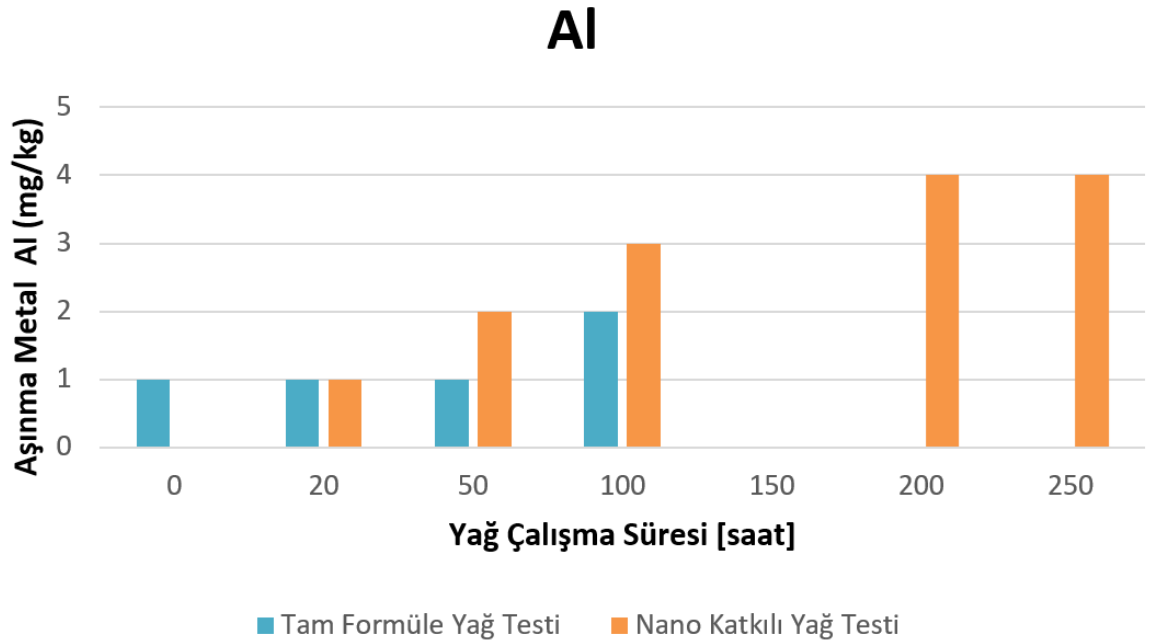
Şekil 6.12 Aşınma Metali Fe

Şekil 6.13 çalışma süresi boyunca aşınma elementi Cr'ü göstermektedir. Krom elementinin kaynakları; piston segmanları, yatak ve burçlardır. Tam formüle yağ testlerinde Cr elementi 50. , 100. , 200. ve 250. saatlerde 1 ppm'dir. Nano yağlayıcı testi sonuçlarında artış göstererek 100. Saatte 3 ppm'e ulaşmış olup, ardından düşüş ile 200 ve 250. saatlerde 3 ppm gözlemlenmiştir. Aşınma elementi Cr sonuçları motorun piston segmanlarında aşınmanın çok düşük seviyede olduğunu göstermektedir. Kaleli H. [49] motor aşınmasında Cr elementinin maksimum sınırının 30 ppm olduğunu bildirmiştir. Böylelikle nano yağlayıcı ile yapılan test motorundan alınan yağ numunelerinin sonuçları Cr elementinin segman aşınması ile ilişkili olması sebebi ile segman aşınmasının çok düşük seviyede olduğu şeklinde yorumlanmıştır.



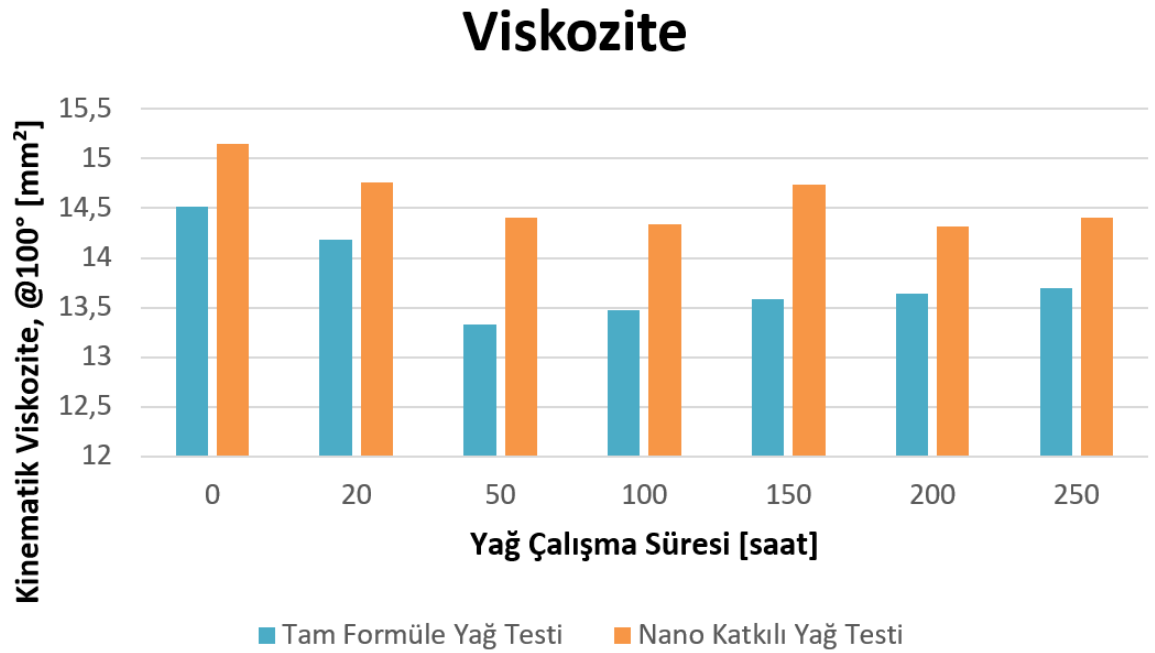
Şekil 6.13 Aşınma Metali Cr

Şekil 6.14 çalışma süresi boyunca aşınma elementi Al'yu göstermektedir. Alüminyum elementinin kaynakları; piston, yataklar, itme çubukları, yağ pompası, dişlilerdir. Test sonuçları Al elementinin tam formüle yağ testinden alınan numunede en yüksek oranın 100. saatte 2 ppm olduğunu göstermektedir. Nano yağlayıcıda ise, Al 200. ve 250. saatlerde 4 ppm olarak en yüksek değerine ulaşmıştır. Kaleli H. [49] motor aşınmasında Al elementinin maksimum sınırının 15-40 ppm olduğunu bildirmiştir. Buna göre, aşınma elementi Alüminyumun piston tarafından geldiği, aşınmasının kabul edilebilir sınırlar içerisinde ve çok düşük olduğu sonucuna varılmıştır.



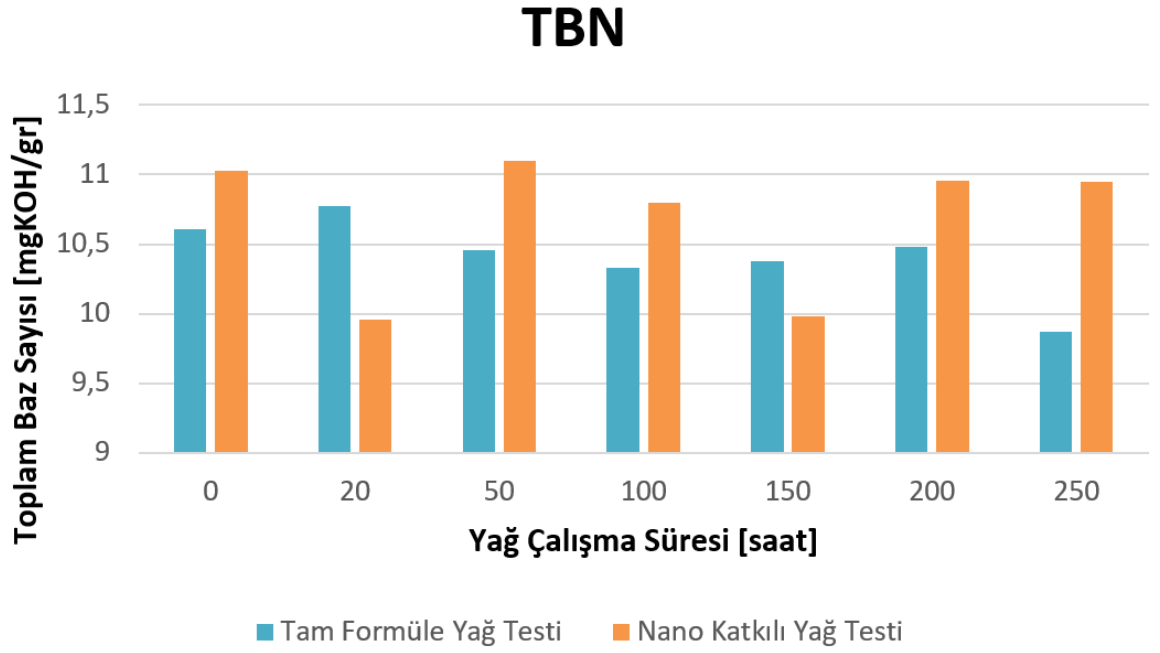
Şekil 6.14 Aşınma Metali Al

Yağlayıcıların en önemli özelliklerinden biri olan viskozite, akmaya karşı olan dirençtir. Motor yağı içerisinde biriken kurum zamanla viskozitenin artmasına neden olmaktadır. Şekil 6.15 viskozite sonuçlarını göstermektedir. Tam formüle yağ testlerinden alınan numunelerde viskozite başlangıçta 14,52 mm²'dir. En düşük değeri 100. saatin sonunda 13,33 mm²'dir. Nano yağlayıcı testlerinden alınan numunelerde viskozite başlangıçta 15,15 mm²'dir. En düşük değeri 100. saatin sonunda 14,32 mm²'dir. Nano yağlayıcının viskozite davranışı tam formüle yağ ile benzer şekildedir. Viskozite başlangıçta hafif bir azalma göstererek akabinde zaman içerisinde biriken kuruma bağlı olarak karakteristiği net bir şekilde artan yönündedir. Bu düşüş sıfır motor olması ile bağdaştırılabilmektedir [44]. Viskozite değerinin başlangıç değerine göre %25 düşmesi veya %25 artması kabul edilebilirdir [49]. Böylelikle nano yağlayıcı ile yürütülen testin sonucunda viskozitenin kabul edilebilir aralıkta olduğu sonucuna varılmıştır.



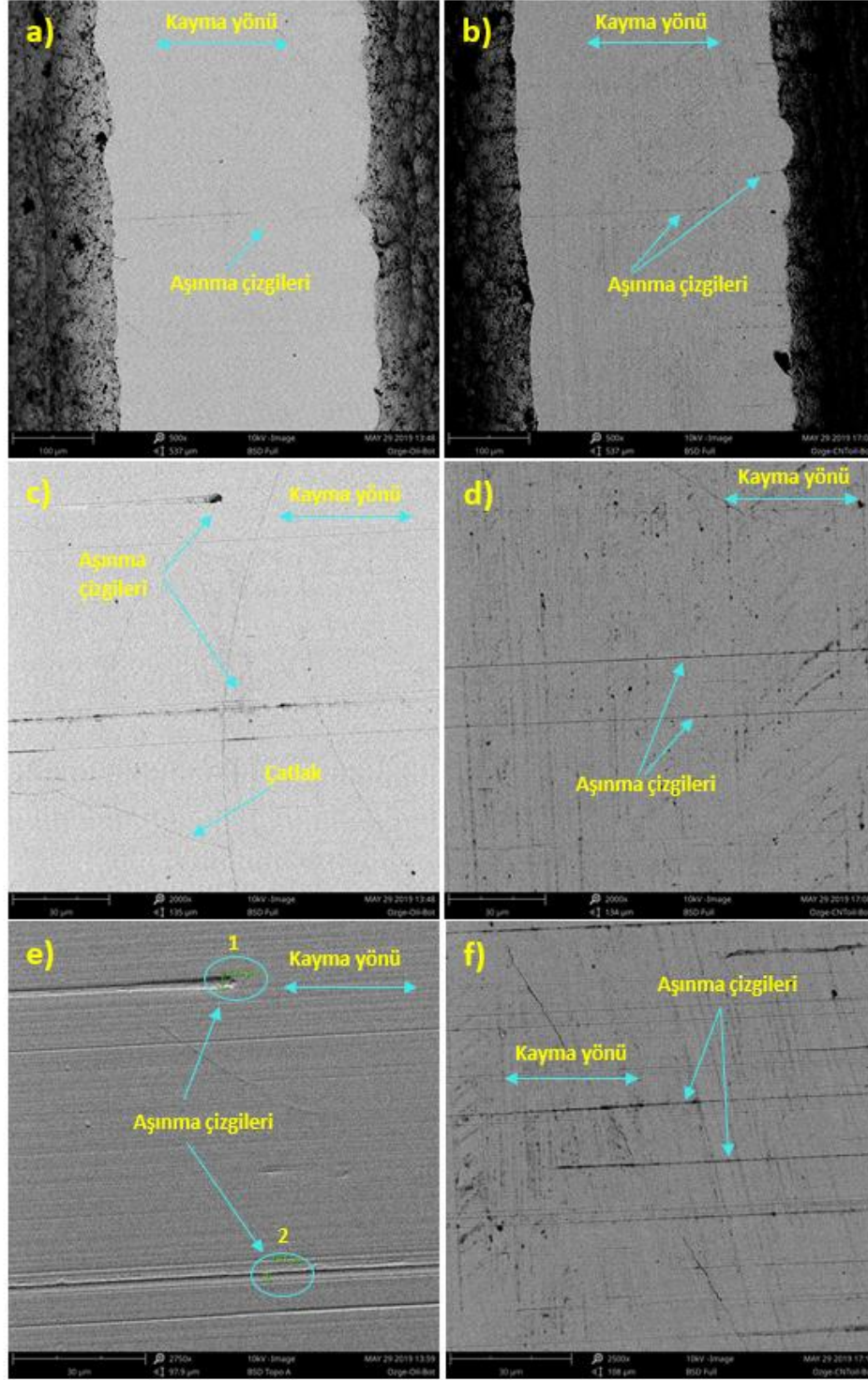
Şekil 6.15 Kinematik Viskozite

TBN (Toplam Baz Sayısı), yağlama yağının alkanite ölçüsüdür. Yağın asit ürünlerini ve yağın bozulmasında etkili olan nötralize etme yeteneğini ölçmektedir [49]. Dizel motorlarda yağlama yağının ömrünü belirlemede önemli bir kriterdir [48]. Toplam baz sayısındaki düşüşün sebebi asiditenin artmasıdır. Tam formüle yağda TBN 250. saatte en düşük değeri olan 9,87 mgKOH/g'a ulaşmıştır. Nano yağlayıcı testlerindeki sonuç ise, rodajdaki azalmanın akabinde hafif artan yönde olup 250. saatin sonunda 10,95 mgKOH/gr'a ulaşmıştır. TBN değerinin orijinal değerinin %50 altına düştüğü zaman yağlama yağı değiştirilmelidir [48]. Değerlendirilen nano yağlayıcı analiz sonuçlarına göre TBN düşüşünün başlangıç değerine göre %50'ye ulaşmaması sebebi ile kullanılmakta olan yağın 250. saatin sonunda güvenli olduğu sonucuna varılmıştır.



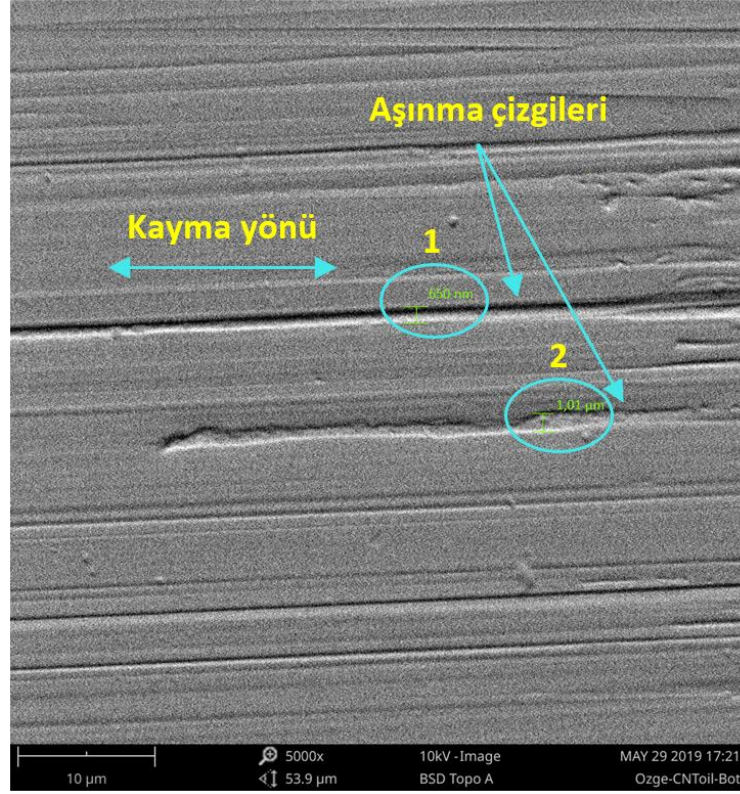
Şekil 6.16 Toplam Baz Sayısı

Şekil 6.17 yağ segmanının aşınma yüzeylerinin SEM görüntülerini göstermektedir. Tam formüle yağ ile çalışmış yağ segmanının aşınma yüzeyi taranmış ve Şekil 6.17 (e)'de oluşmuş en belirgin aşınma çizgisinin genişliği 1 noktasında 2,79 μm , 2 noktasında 1,61 μm ölçülmüştür. Nano yağlayıcı ile çalışan yağ segmanında oluşan abrasif aşınma çizgileri tam formüle yağ ile çalışmış pistonun yağ segmanına göre daha ince ve daha az derinliktedir.



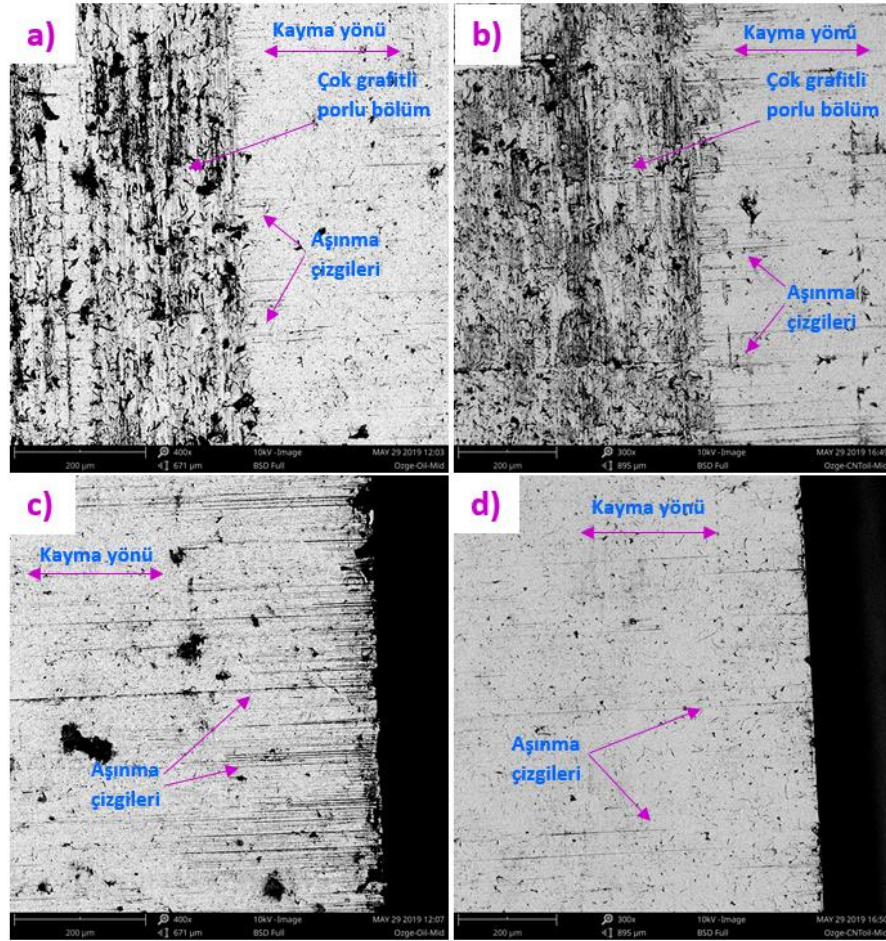
Şekil 6.17 Yağ Segmanlarının Aşınma Yüzeylerinin SEM Görüntüleri (a), (c), (e) Tam Formüle Yağ İle Çalışmış Motor Segmanının SEM Görüntüleri, (b), (d), (f) Nano Yağlayıcı İle Çalışmış Motor Segmanının SEM Görüntüleri

Şekil 6.18’de nano yağlayıcı ile çalışmış yağ segmanının aşınma yüzeyinde oluşmuş aşınma çizgisinin genişliği 1 noktasında 650 nm, 2 noktasında 1,01 μm ölçülmüştür. Karbon nanotüplerin kendi kendini yağlama, üstün dağılma, yataklama gibi aşınma önleyici özellikleri kaynaklı Şekil 6.17 e’de gösterilen tam formüle yağ ile çalışmış motor segmanında oluşan aşınma çizgilerine kıyasla daha düşük seviyededir.



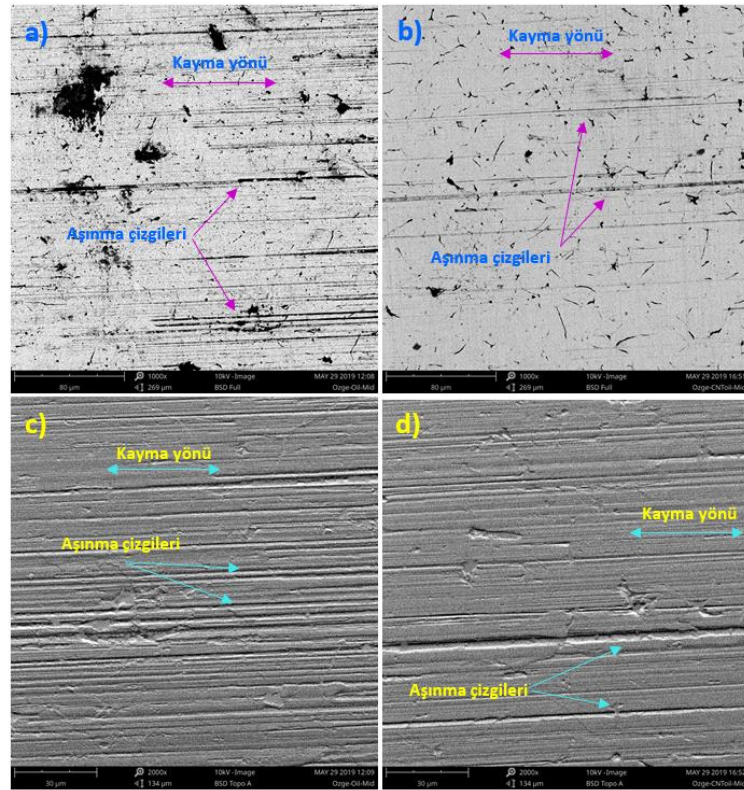
Şekil 6.18 Nano Yağlayıcı İle Çalışmış Motor Yağ Segmanının Detay SEM Görüntüsü

Şekil 6.19 orta kompresyon segmanının aşınma yüzeylerinin genel SEM görüntülerini göstermektedir. Çok duvarlı karbon nanotüpün katmanları kayma gerilmesi etkisi altında kaldığında ayrılabilir. Bu durum kendi kendini yağlama özelliğine sahip karbon nanotüplerin bilya etkisi ile aşınma direncinin artmasına neden olmaktadır. Motor yağına ilave edilen karbon nanotüp üstün yayılma özelliği sayesinde yüzeyler arasında yuvarlanma mekanizmasının etkisi ile teması keserek sürtünmeyi azaltmaktadır [50]. Bunu destekler nitelikte olan Şekil 6.19 (c)'deki görünen aşınma çizgileri Şekil 6.19 (d)'ye göre kıyasla belirgin olarak daha fazladır. Segmanların kenar bölgelerinden kopan malzemelerin aşınmaya neden olduğu görülmektedir.



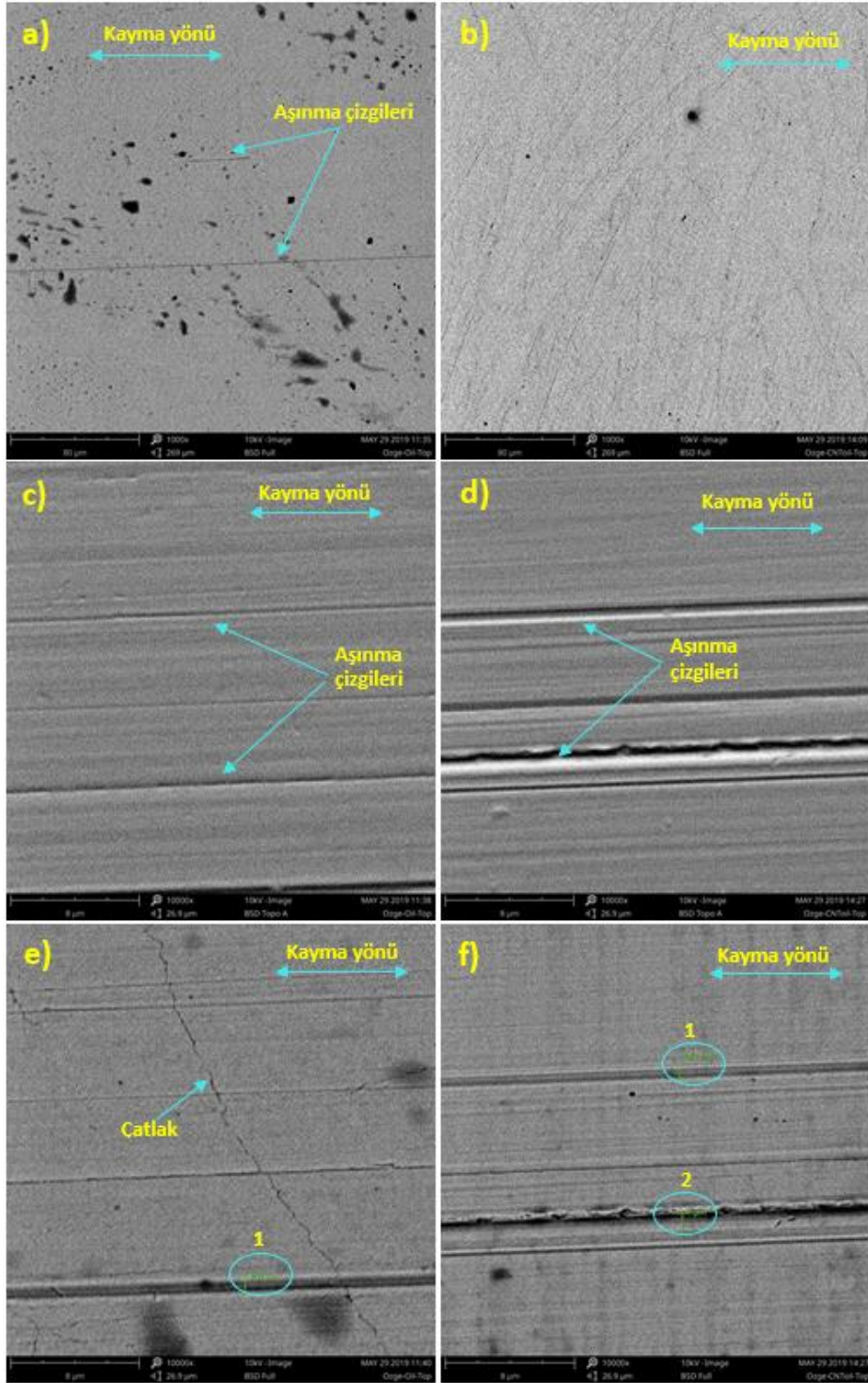
Şekil 6.19 Orta Kompresyon Segmanlarının Aşınma Yüzeylerinin Genel SEM Görüntüleri (a), (c) Tam Formüle Yağ İle Çalışmış Motor Segmanının SEM Görüntüleri, (b), (d), Nano Yağlayıcı İle Çalışmış Motor Segmanının SEM Görüntüleri

Karbon nanotüpler kendi kendine yağlama özellikleri ve nano yuvarlanma hipotezleri ile aşınma önleyici katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Üstün dağılma özelliğine sahip olmaları sayesinde malzemede bulunan kusurları doldurarak aşınmayı azaltmaktadırlar. Piston segmanı gibi sürtünmenin yüksek olduğu yerlerde van der Waals kuvvetleri etkileşiminde bulunan karbon nanotüpün katmanları ayrılabilmekte ve yataklama etkisini arttırabilmektedir. Kusurlar, deformasyonlar ve kirlenmeler karbon nanotüpde enerji kaybına yol açarak yağlayıcılık özelliğini olumsuz etkilemektedir. Fonksiyonel grupların az olması bu bağlamda tribolojik özellikleri iyileştirmektedir [50]. Şekil 6.20 (c)'deki görünen aşınma çizgileri Şekil 6.20 (d)'ye göre kıyasla belirgin olarak daha fazladır.



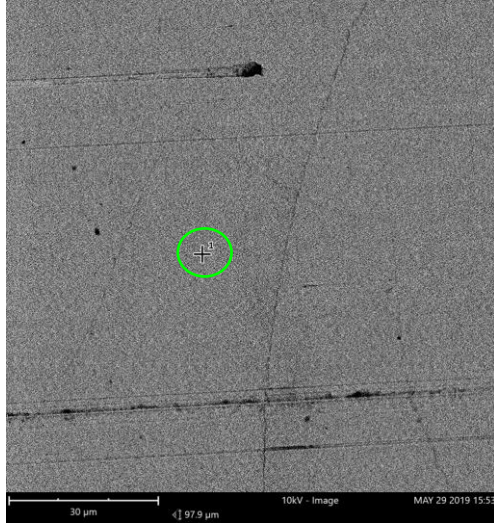
Şekil 6.20 Orta Kompresyon Segmanlarının Aşınma Yüzeylerinin Detay SEM Görüntüleri (a), (c) Tam Formüle Yağ İle Çalışmış Motorun Segmanının SEM Görüntüleri, (b), (d), Nano Yağlayıcı İle Çalışmış Motorun Segmanının SEM Görüntüleri

Yüzey taranarak ilderlenmiş ve Şekil 6.21 (e)'de tam formüle yağ ile çalışmış üst kompresyon segmanının aşınma yüzeyinde oluşmuş en belirgin aşınma çizgisinin genişliği 1 noktasında 707 nm ölçülmüştür. Şekil 6.21 (f)'de nano yağlayıcı ile çalışmış üst kompresyon segmanının aşınma yüzeyinde oluşmuş aşınma çizgisinin genişliği 1 noktasında 561 nm, 2 noktasında 1 µm ölçülmüştür. Nano yağlayıcı ile çalışan yağ segman yüzeyinin tam formüle yağ ile çalışmış segmana yüzeyine göre düzgün olduğu söylenebilmektedir.



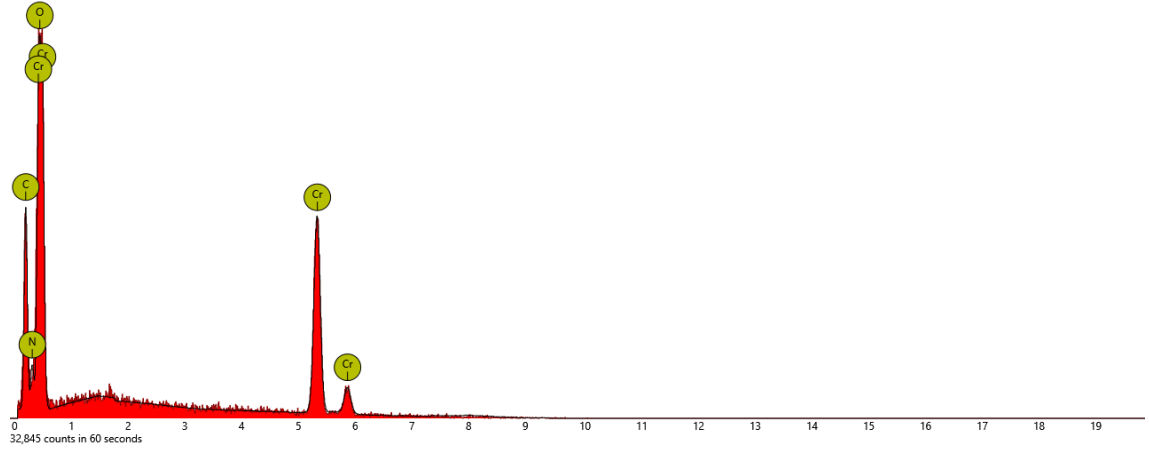
Şekil 6.21 Üst Kompresyon Segmanlarının Aşınma Yüzeylerinin SEM Görüntüleri
 (a), (c), (e) Tam Formüle Yağ İle Çalışmış Motorun Segmanının SEM Görüntüleri,
 (b), (d), (f) Nano Yağlayıcı İle Çalışmış Motorun Segmanının SEM Görüntüleri

Şekil 6.22'e göre, elementler Cr, O, C ve N'dir. Segman malzemesi Cr' dur. O, oksit tabakasından gelmektedir. C ve N ise karbon nitrür kaplamadan gelmektedir.



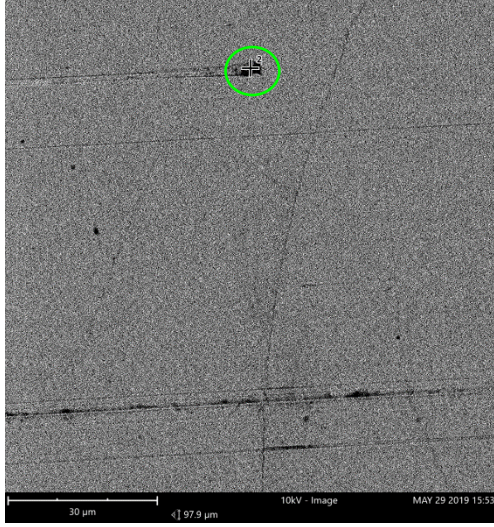
Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wt Conc.
Cr	38.52	70.05	Cr	81.96
O	25.97	14.53		
C	28.25	11.87	C	13.88
N	7.26	3.56	N	4.16

FOV: 97.9 µm, Mode: 10kV - Image, Detector: BSD Full, Time: MAY 29 2019 15:53



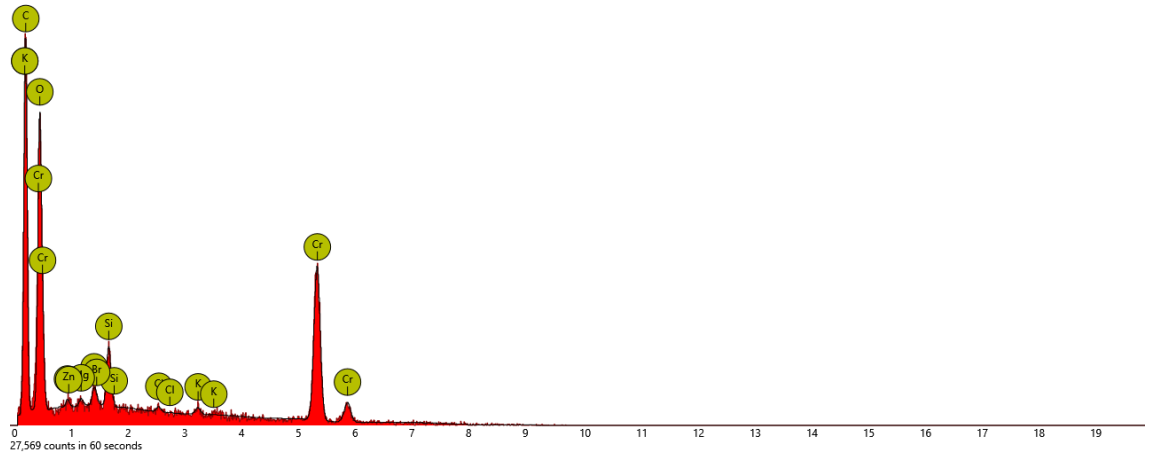
Şekil 6.22 Tam Formüle Yağ İle Çalışmış Motorun Yağ Segmanının Yüzeyinde Bulunan 1 Numaralı Noktasında Yapılan EDS Analizi

Şekil 6.23'ye göre, elementler Cr, C, O, Si, Br, Zn, K, Cl, Mg' dur. Segmanın ana malzemesi Cr' un değeri Şekil 6.22'e kıyasla azalmıştır. Segmanın temel elementi olması sebebi ile bu azalma segmanda meydana gelen aşınma şeklinde yorumlanmaktadır. C' un Şekil 6.22'e kıyasla artışı gömlekte aşınma olduğunun, bu elementin gömlek tarafından geldiğini belirtmektedir. O, oksit tabakasından, Silisyum ise gömlekten gelmektedir.



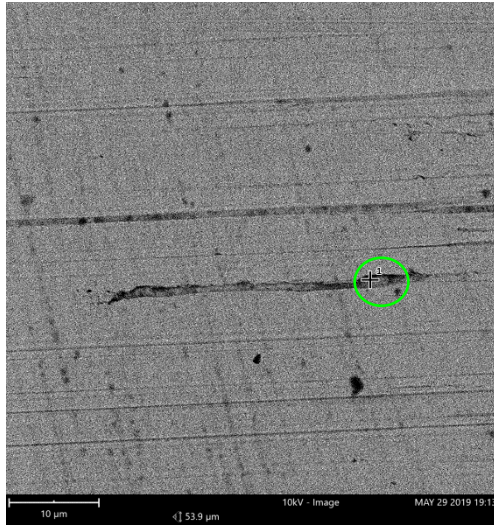
Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wt Conc.
Cr	27.06	57.41	Cr	65.47
C	50.85	24.92	C	28.42
O	18.85	12.30		
Si	1.68	1.92	Si	2.19
Br	0.50	1.63	Br	1.86
Zn	0.27	0.72	Zn	0.82
K	0.36	0.58	K	0.66
Cl	0.19	0.28	Cl	0.32
Mg	0.23	0.23	Mg	0.27

FOV: 97.9 µm, Mode: 10kV - Image, Detector: BSD Full, Time: MAY 29 2019 15:53



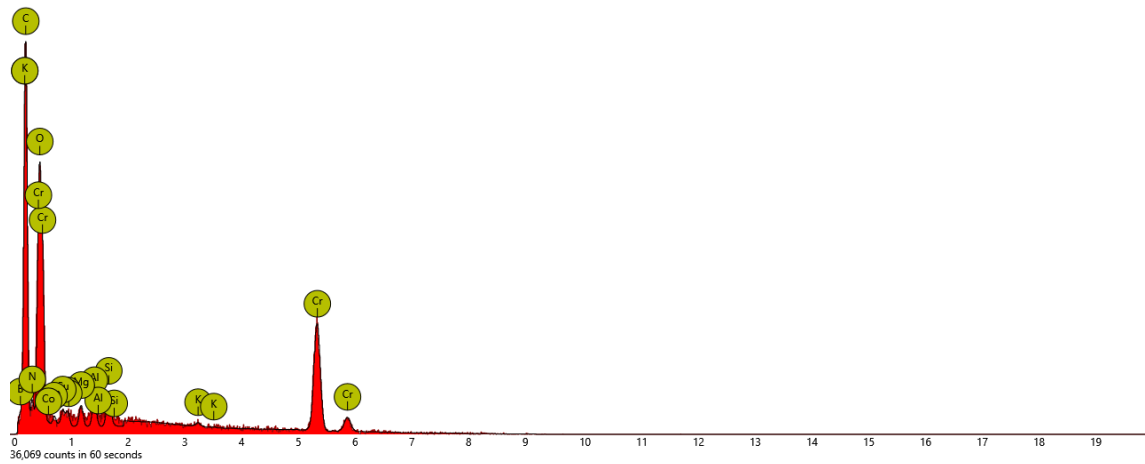
Şekil 6.23 Tam Formüle Yağ İle Çalışmış Motorun Yağ Segmanının Aşınma Çizgisinde Bulunan 2 Numaralı Noktasında Yapılan EDS Analizi

Şekil 6.24'e göre, elementler Cr, C, O, B, N, Co, Cu, Zn, Si, Al, Mg, K' dur. Segmanın ana malzemesi Cr Şekil 6.22'de gösterilen değere göre, segman aşınmasının sonucu olarak azalmıştır. C' un Şekil 6.22'ye kıyasla artışı gömlekte aşınma olduğunun, bu elementin gömlek tarafından geldiğini belirtmektedir. O, oksit tabakasından, B yağdan, N ise karbon nitrür kaplamadan gelmektedir.



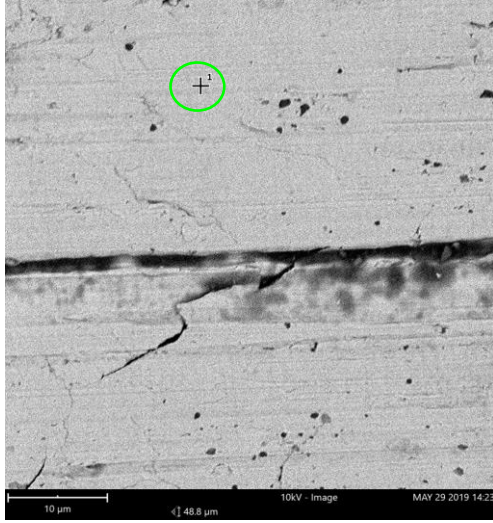
Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wt Conc.
Cr	14.29	38.59	Cr	44.55
C	47.95	29.90	C	34.52
O	16.11	13.38		
B	13.29	7.46	B	8.61
N	5.10	3.71	N	4.28
Co	0.48	1.48	Co	1.71
Cu	0.42	1.40	Cu	1.61
Zn	0.37	1.24	Zn	1.43
Si	0.73	1.07	Si	1.23
Al	0.60	0.85	Al	0.98
Mg	0.51	0.64	Mg	0.74
K	0.14	0.28	K	0.33

FOV: 53.9 µm, Mode: 10kV - Image, Detector: BSD Full, Time: MAY 29 2019 19:13



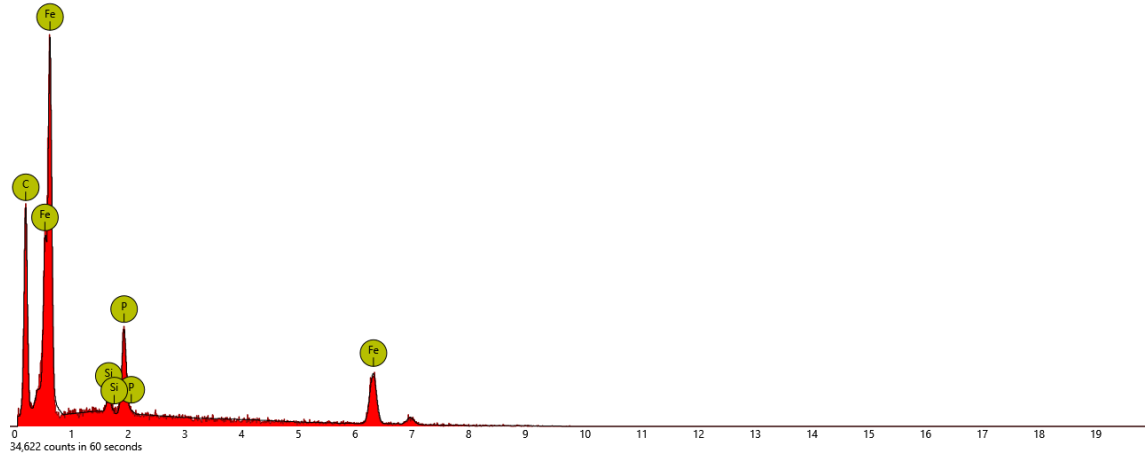
Şekil 6.24 Nano Yağlayıcı İle Çalışmış Motorun Yağ Segmanının Aşınma Çizgisinde Bulunan 1 Numaralı Noktasında Yapılan EDS Analizi

Şekil 6.25'e göre, elementler Fe, C, P, Si'dur. Fe ve C segmanın ana malzemesi dökme demirden, O, oksit tabakasından, P ise motor yağının içerisinde bulunan deterjan katkı maddesinden gelmektedir.



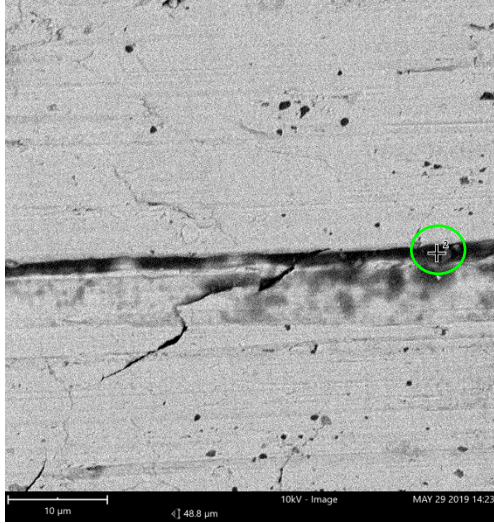
Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wt Conc.
Fe	33.87	67.68	Fe	67.68
C	60.25	25.89	C	25.89
P	5.06	5.61	P	5.61
Si	0.81	0.82	Si	0.82

FOV: 48.8 µm, Mode: 10kV - Image, Detector: BSD Full, Time: MAY 29 2019 14:23



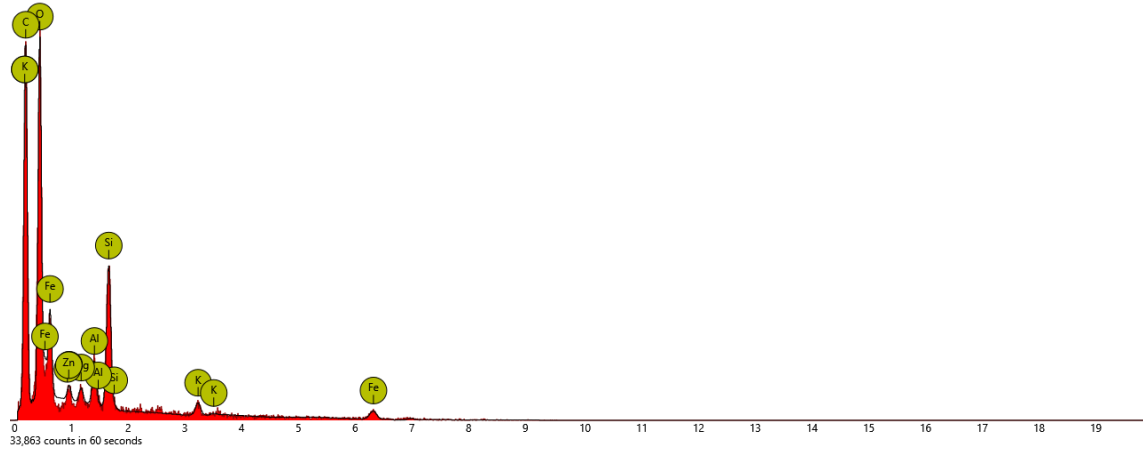
Şekil 6.25 Tam Formüle Yağlayıcı İle Çalışmış Motorun Orta Kompresyon Segmanının Yüzeyinde Bulunan 1 Numaralı Noktasında Yapılan EDS Analizi

Şekil 6.26'ya göre elementler, C, O, Fe, Si, Al, K, Na, Mg, Zn' dur. C elementinin Şekil 6.25'e göre artışı gömlekte aşınma olduğunu göstermektedir. O, oksit tabakasından gelmektedir. Fe'nin Şekil 6.25'e göre azalması segmanda aşınma olduğu anlamına gelmektedir. Si ve Al ise pistonun aşındığının bu elementlerin pistondan segman yüzeyine geldiğinin kanıtıdır.



Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wt Conc.
C	56.50	41.99	C	61.69
O	32.25	31.93		
Fe	3.73	12.90	Fe	18.95
Si	4.30	7.48	Si	10.99
Al	1.44	2.40	Al	3.53
K	0.74	1.78	K	2.62
Na	0.57	0.81	Na	1.19
Mg	0.47	0.70	Mg	1.03
Zn	0.00	0.00	Zn	0.00

FOV: 48.8 µm, Mode: 10kV - Image, Detector: BSD Full, Time: MAY 29 2019 14:23



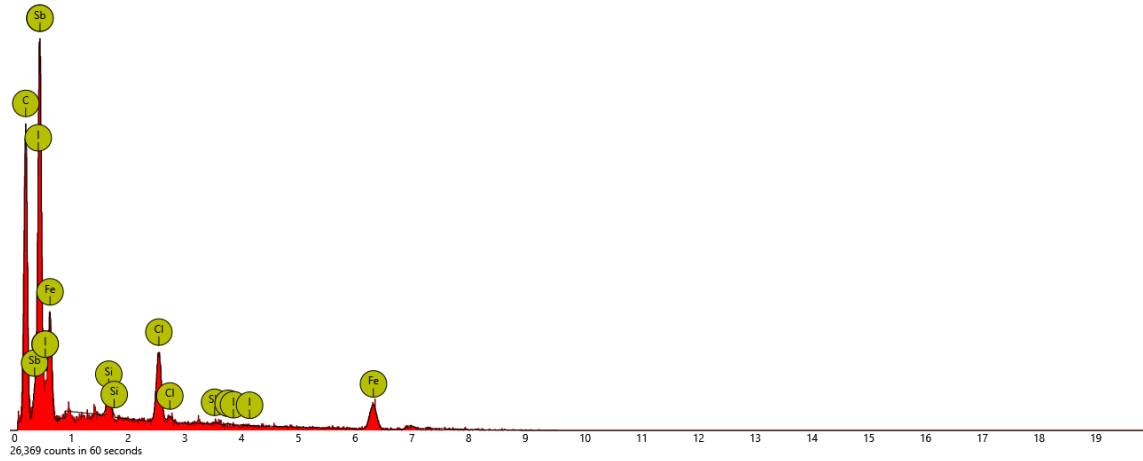
Şekil 6.26 Tam Formüle Yağlayıcı İle Çalışmış Motorun Orta Kompresyon Segmanının Aşınma Çizgisinde Bulunan 2 Numaralı Noktasında Yapılan EDS Analizi

Şekil 6.27'ye göre, elementler Fe, C, O, Cl, Sb, Si, I' dur. Fe Şekil 6.25'e kıyasla azalmış, C ise artmıştır. Bu segmanın gömleği aşındırmasının sonucudur. O, oksit tabakasından gelmektedir. Cl numune hazırlama sürecinden cilde temas kaynaklı oluşmuştur.



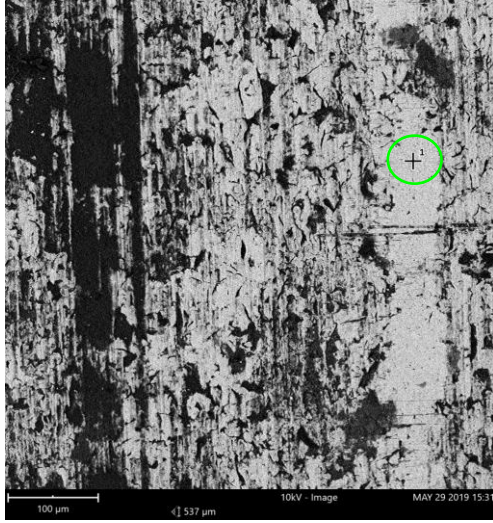
Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wt Conc.
Fe	11.74	33.59	Fe	45.43
C	52.31	32.20	C	43.55
O	31.78	26.06		
Cl	3.28	5.97	Cl	8.07
Sb	0.19	1.17	Sb	1.59
Si	0.70	1.01	Si	1.36
I	0.00	0.00	I	0.00

FOV: 179 µm, Mode: 10kV - Image, Detector: BSD Full, Time: MAY 29 2019 14:19



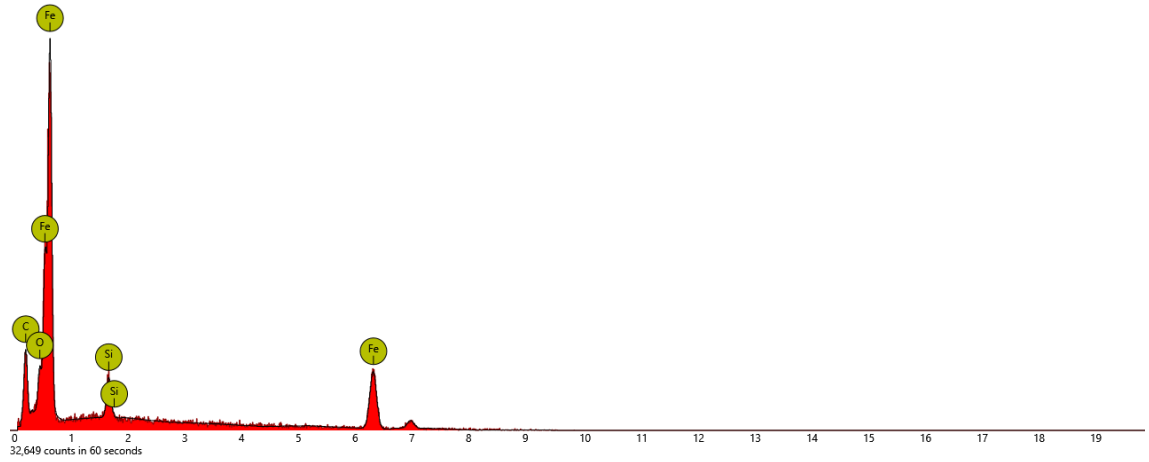
Şekil 6.27 Tam Formüle Yağlayıcı İle Çalışmış Motorun Orta Kompresyon Segmanının Yüzeyinde Bulunan Porozun 1 Numaralı Noktasında Yapılan EDS Analizi

Şekil 6.28'e göre, elementler Fe, C, O ve Si' dir. Yüksek orandaki Fe ve C dökme demir olduğuna işaret etmektedir. O, oksit tabakasından gelmektedir. Si dökme demirin içerisinde bulunmaktadır.



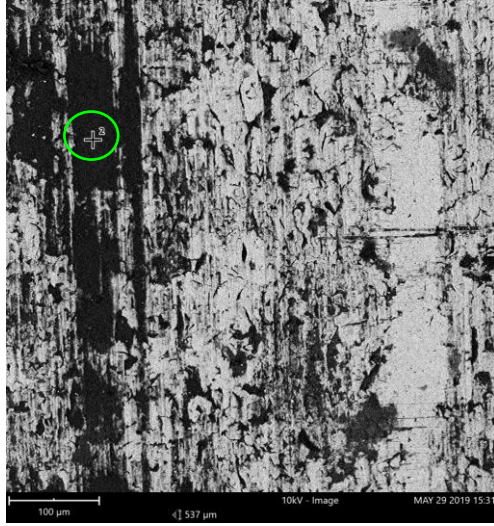
Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wt Conc.
Fe	58.67	84.98	Fe	87.49
C	30.98	9.65	C	9.94
O	6.92	2.87		
Si	3.43	2.50	Si	2.58

FOV: 537 µm, Mode: 10kV - Image, Detector: BSD Full, Time: MAY 29 2019 15:31



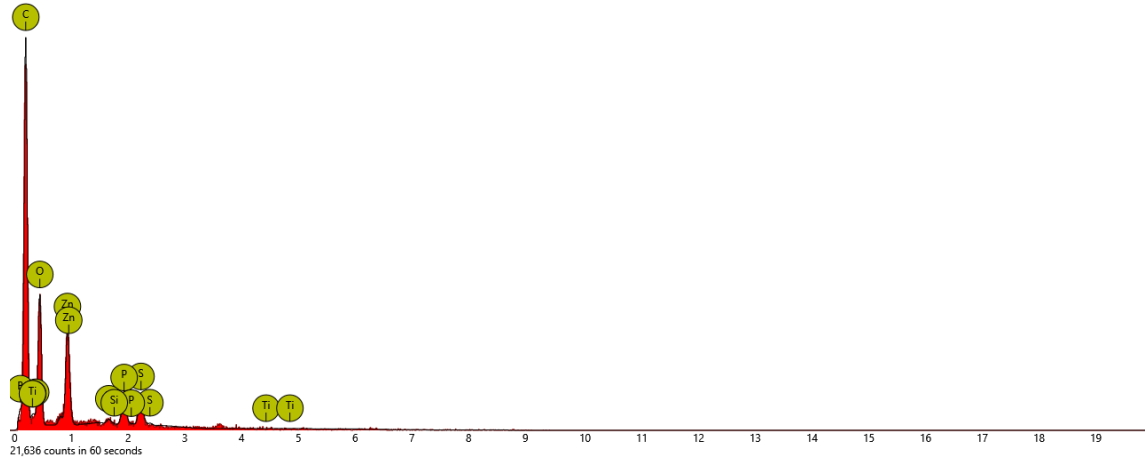
Şekil 6.28 Tam Formüle Yağlayıcı İle Çalışmış Motorun Orta Kompresyon Segmanının Porlu Bölgesinde Bulunan 1 Numaralı Noktasında Yapılan EDS Analizi

Şekil 6.29'a göre bulunan elementler, C, O, Zn, B, S, P, Si, Ti' dir. C ve B elementi segmanın bor karbür kaplama olmasının sonucunda yüzeyde tespit edilmiştir. O, oksit tabakasından gelmektedir. Zn motor yağı katkı maddesi ZDDP' den gelmektedir.



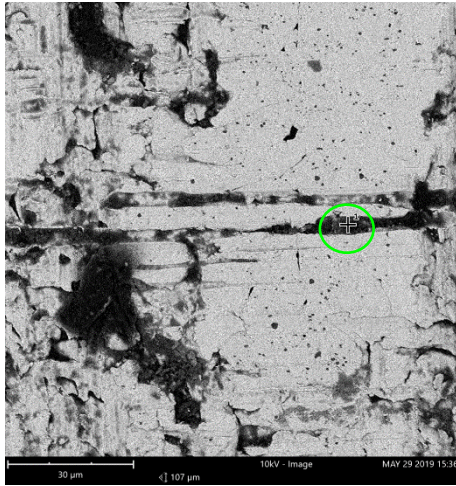
Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wt Conc.
C	69.41	59.55	C	69.82
O	12.86	14.70		
Zn	2.39	11.14	Zn	13.06
B	13.47	10.40	B	12.20
S	0.98	2.25	S	2.64
P	0.79	1.74	P	2.05
Si	0.10	0.20	Si	0.24
Ti	0.00	0.00	Ti	0.00

FOV: 537 µm, Mode: 10kV - Image, Detector: BSD Full, Time: MAY 29 2019 15:31



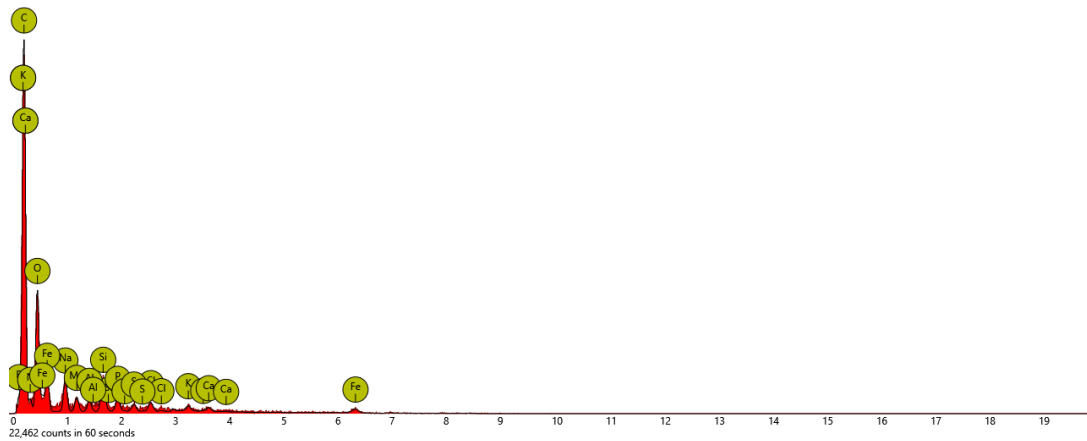
Şekil 6.29 Tam Formüle Yağlayıcı İle Çalışmış Motorun Orta Kompresyon Segmanının Porlu Bölgesindeki Aşınma Çizgisinde Bulunan 2 Numaralı Noktasında Yapılan EDS Analizi

Şekil 6.30'a göre bulunan elementler, C, O, B, Fe, N, Si, Na, P, Cl, K, Ca, Mg, Al, S'dür. C Şekil 6.28'e kıyasla segman aşınması kaynaklı artmış ve Fe azalmıştır. O, oksit tabakasından gelmektedir. B motor yağının içerisinde bulunan katkı maddeleri ve yüzey kaplama kaynaklı bulunmaktadır.



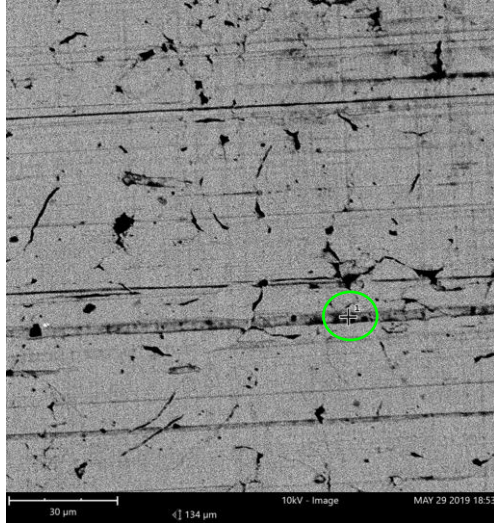
Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wt Conc.
C	62.42	54.70	C	63.99
O	12.44	14.52		
B	14.44	11.39	B	13.32
Fe	1.47	5.99	Fe	7.01
N	5.59	5.72	N	6.69
Si	0.75	1.53	Si	1.79
Na	0.91	1.52	Na	1.78
P	0.36	0.82	P	0.96
Cl	0.30	0.78	Cl	0.91
K	0.23	0.66	K	0.78
Ca	0.22	0.64	Ca	0.75
Mg	0.35	0.62	Mg	0.72
Al	0.29	0.56	Al	0.66
S	0.24	0.55	S	0.65

FOV: 107 µm, Mode: 10kV - Image, Detector: BSD Full, Time: MAY 29 2019 15:36



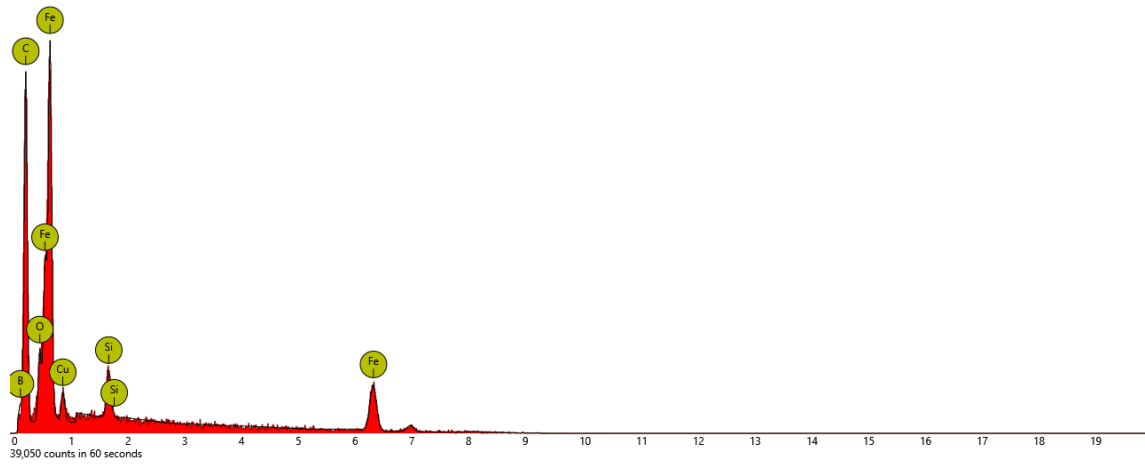
Şekil 6.30 Tam Formüle Yağlayıcı İle Çalışmış Motorun Orta Kompresyon Segmanının Aşınma Çizgisinde Bulunan 1 Numaralı Noktasında Yapılan EDS Analizi

Şekil 6.31'e göre bulunan elementler, Fe, C, B, O, Cu, Si'dur. Fe Şekil 6.25'e göre azalmış, C artmıştır. Fe elementinde azalma segman aşınmasının, C elementinde artış gömlek aşınmasının sonucudur. B motor yağının içerisinde bulunmaktadır. O, oksit tabakasından gelmektedir.



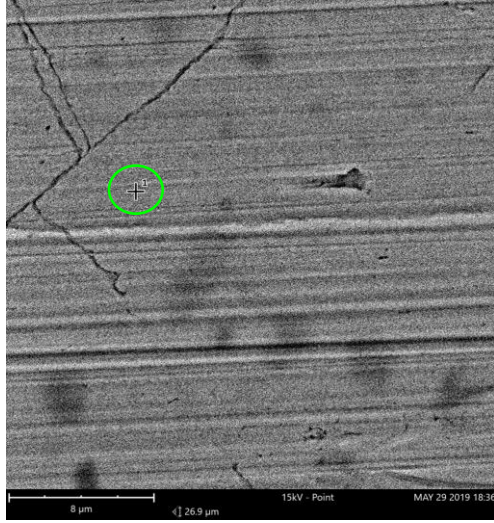
Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wt Conc.
Fe	16.49	45.96	Fe	47.94
C	59.64	35.76	C	37.30
B	16.33	8.81	B	9.19
O	5.17	4.13		
Cu	1.14	3.62	Cu	3.78
Si	1.23	1.72	Si	1.79

FOV: 134 µm, Mode: 10kV - Image, Detector: BSD Full, Time: MAY 29 2019 18:53



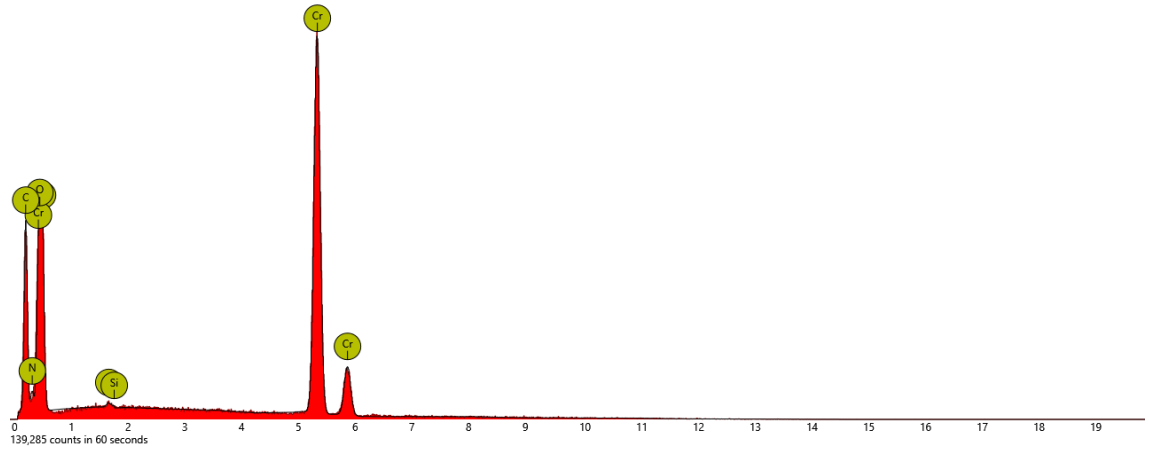
Şekil 6.31 Nano Yağlayıcı İle Çalışmış Motorun Orta Kompresyon Segmanının Aşınma Çizgisinde Bulunan 1 Numaralı Noktasında Yapılan EDS Analizi

Şekil 6.32'ye göre bulunan elementler, Cr, C, O, N, Si' dir. Cr segman malzemesinin temel elementidir. O, oksit tabakasından, C ve N ise karbon nitrür kaplamadan gelmektedir.



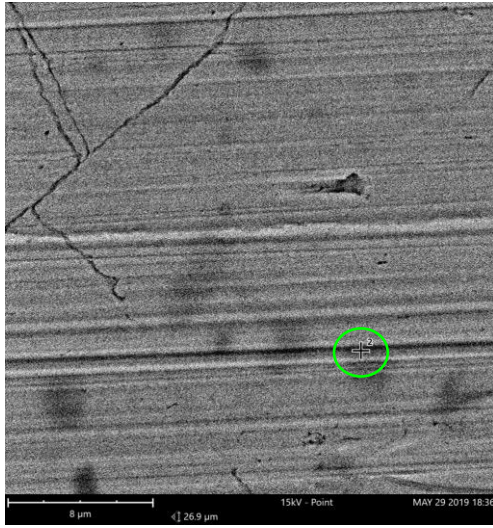
Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wt Conc.
Cr	25.81	57.18	Cr	68.69
C	42.28	21.64	C	25.99
O	24.59	16.76		
N	7.22	4.31	N	5.18
Si	0.10	0.12	Si	0.14

FOV: 26.9 µm, Mode: 15kV - Point, Detector: BSD Full, Time: MAY 29 2019 18:36



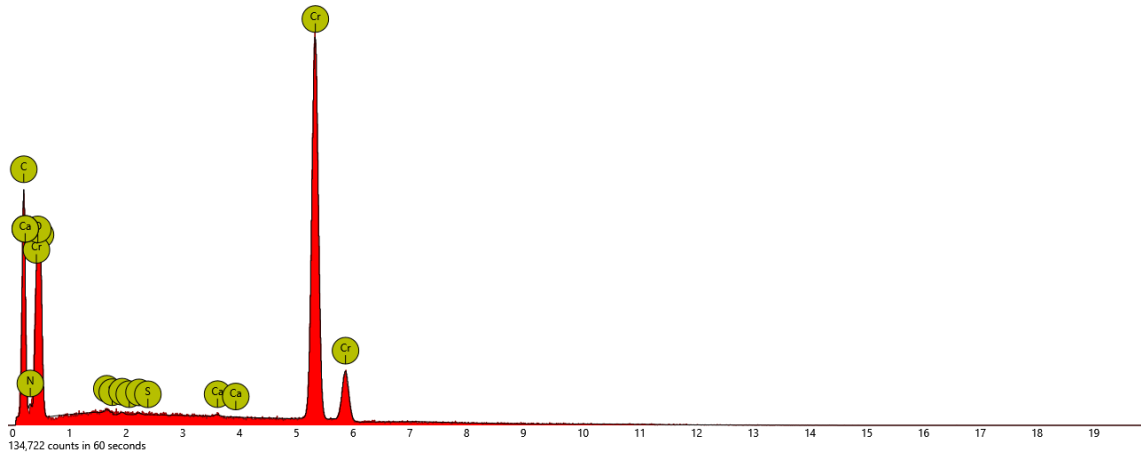
Şekil 6.32 Tam Formüle Yağ İle Çalışmış Motorun Üst Kompresyon Segmanının Yüzeyinde Bulunan 1 Numaralı Noktasında Yapılan EDS Analizi

Şekil 6.33'e göre bulunan elementler, Cr, C, O, N, Ca, Si, P ve S'dir. Cr Şekil 32'ye göre çok azalmış ve C çok az artmıştır. Bu segman ve gömlekte az miktarda aşınmanın sonucudur. O, oksit tabakasından, N ise karbon nitrür kaplamadan gelmektedir.



Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wt Conc.
Cr	25.17	56.72	Cr	66.33
C	48.27	25.13	C	29.39
O	20.89	14.49		
N	5.39	3.27	N	3.83
Ca	0.06	0.11	Ca	0.13
Si	0.09	0.11	Si	0.13
P	0.07	0.10	P	0.11
S	0.05	0.07	S	0.08

FOV: 26.9 µm, Mode: 15kV - Point, Detector: BSD Full, Time: MAY 29 2019 18:36



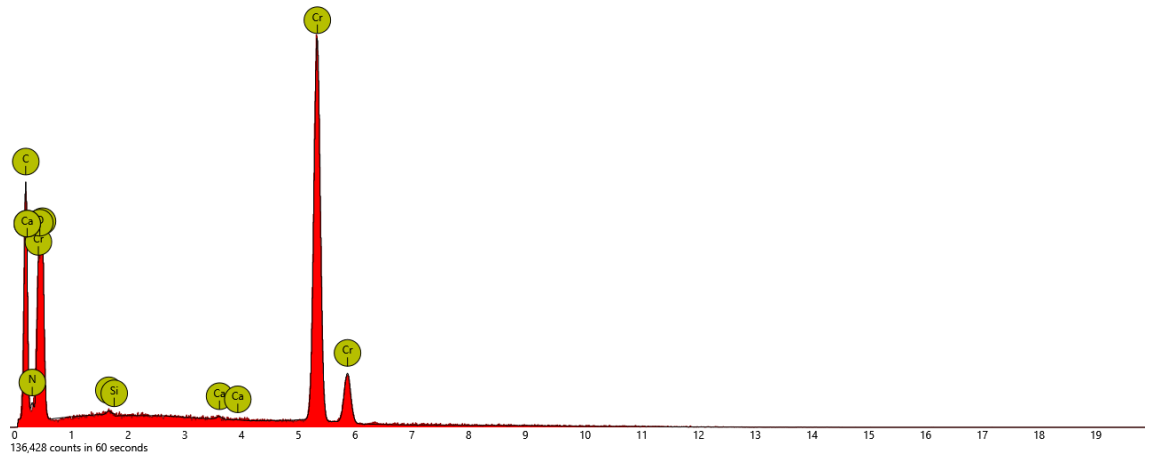
Şekil 6.33 Tam Formüle Yağ İle Çalışmış Motorun Üst Kompresyon Segmanının Aşınma Çizgisinde Bulunan 2 Numaralı Noktasında Yapılan EDS Analizi

Şekil 6.34'e göre bulunan elementler, Cr, C, O, N, Ca, Si'dur. Cr Şekil 6.32'e göre çok azalmış ve C çok az artmıştır. Bu segman ve gömlekte az miktarda aşınmanın sonucudur. Şekil 6.33'e benzer bir aşınma gözlemlenmiştir. O, oksit tabakasından gelmektedir. N ise karbon nitrür kaplamadan gelmektedir.



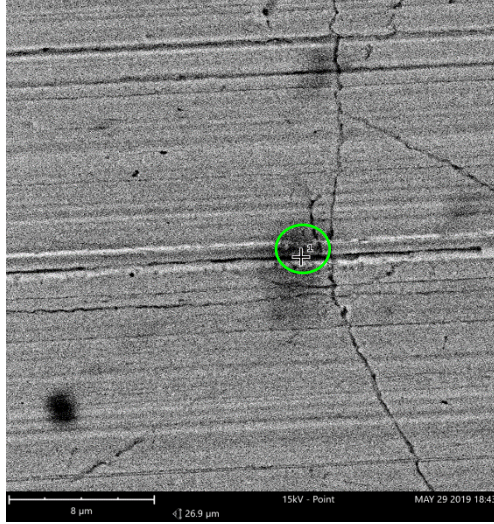
Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wt Conc.
Cr	24.22	55.41	Cr	65.39
C	47.53	25.12	C	29.64
O	21.69	15.27		
N	6.38	3.93	N	4.64
Ca	0.09	0.16	Ca	0.19
Si	0.09	0.11	Si	0.13

FOV: 26.9 µm, Mode: 15kV - Point, Detector: BSD Full, Time: MAY 29 2019 18:36



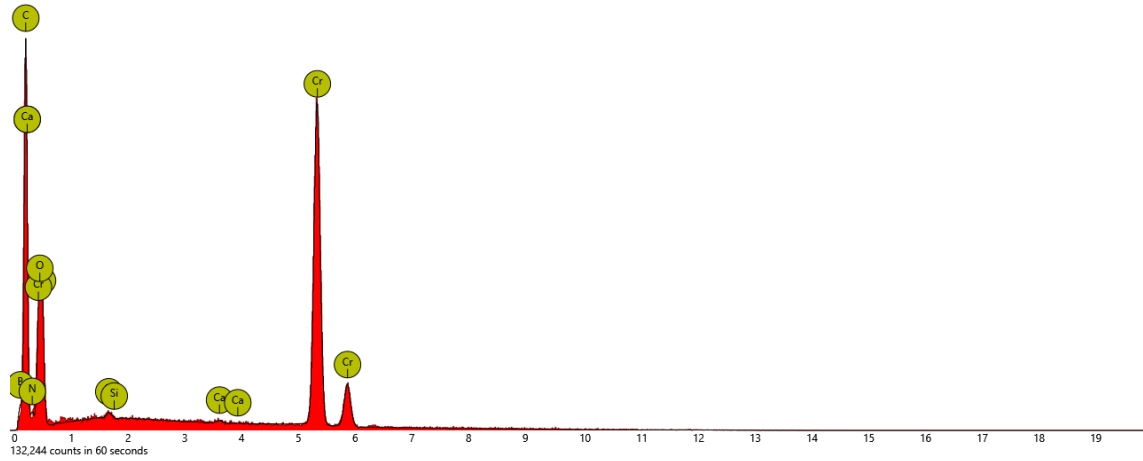
Şekil 6.34 Tam Formüle Yağ İle Çalışmış Motorun Üst Kompresyon Segmanının Aşınma Çizgisinde Bulunan 3 Numaralı Noktasında Yapılan EDS Analizi

Şekil 6.35'e göre bulunan elementler, C, Cr, O, B, N, Ca, Si' dir. Çatlak üzerinde C'un belirgin artışı ve Cr'un Şekil 32'ye göre düşüşü segmanın gömlekte aşınmaya neden olmasının sonucudur. O, oksit tabakasından, N ise karbon nitrür kaplamadan, B motor yağından gelmektedir.



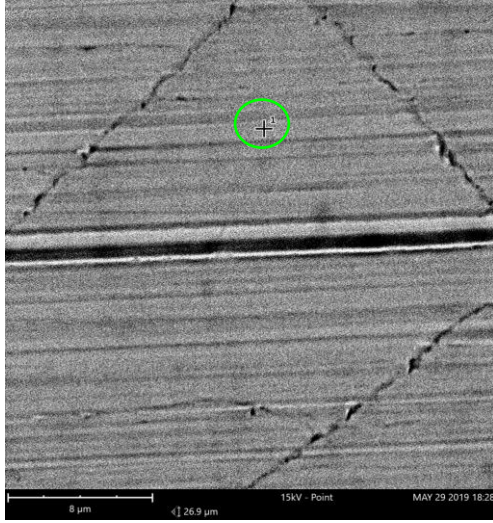
Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wt Conc.
C	58.02	41.75	C	47.46
Cr	10.59	33.00	Cr	37.51
O	12.55	12.03		
B	14.17	9.18	B	10.44
N	4.57	3.83	N	4.36
Ca	0.05	0.11	Ca	0.12
Si	0.06	0.10	Si	0.11

FOV: 26.9 µm, Mode: 15kV - Point, Detector: BSD Full, Time: MAY 29 2019 18:43



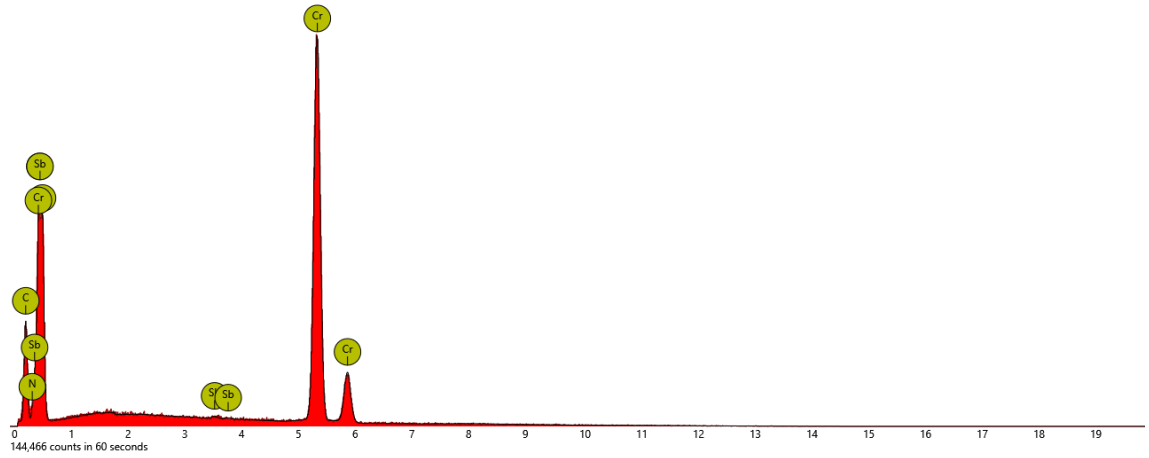
Şekil 6.35 Tam Formüle Yağ İle Çalışmış Motorun Üst Kompresyon Segmanının Yüzeyinde Bulunan Çatlak Üzerindeki 1 Numaralı Noktada Yapılan EDS Analizi

Şekil 6.36'ya göre bulunan elementler, Cr, O, C, N, Sb' dur. Cr segman malzemesinin temel elementidir. O, oksit tabakasından, C ve N ise karbon nitrür kaplamadan gelmektedir.



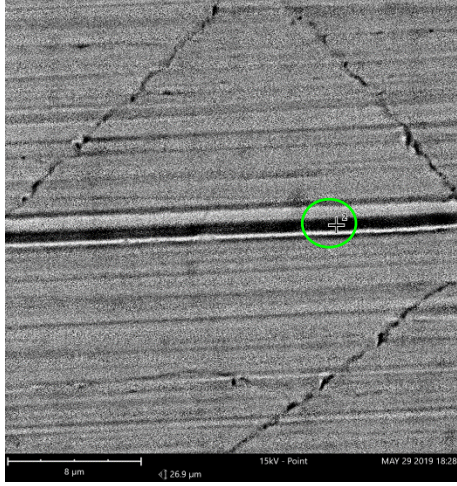
Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wt Conc.
Cr	32.20	63.56	Cr	77.13
O	28.97	17.59		
C	29.31	13.37	C	16.22
N	9.41	5.00	N	6.07
Sb	0.10	0.47	Sb	0.57

FOV: 26.9 µm, Mode: 15kV - Point, Detector: BSD Full, Time: MAY 29 2019 18:28



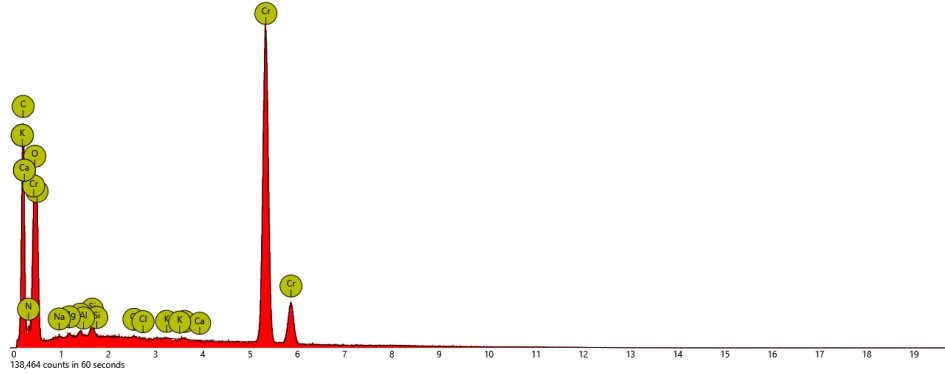
Şekil 6.36 Nano Yağlayıcı İle Çalışmış Motorun Üst Kompresyon Segmanının Yüzeyinde Bulunan 1 Numaralı Noktasında Yapılan EDS Analizi

Şekil 6.37'ye göre bulunan elementler, Cr, C, O, N, Si, Al, Mg, Na, Cl, Ca, K'dur. Cr segman malzemesinin temel elementi olup Şekil 6.36'ya göre bir miktar azalmıştır. O, oksit tabakasından, C ve N ise karbon nitrür kaplamadan gelmektedir, C miktarındaki Şekil 6.36'ya göre artış gömlek aşınmasının sonucudur.



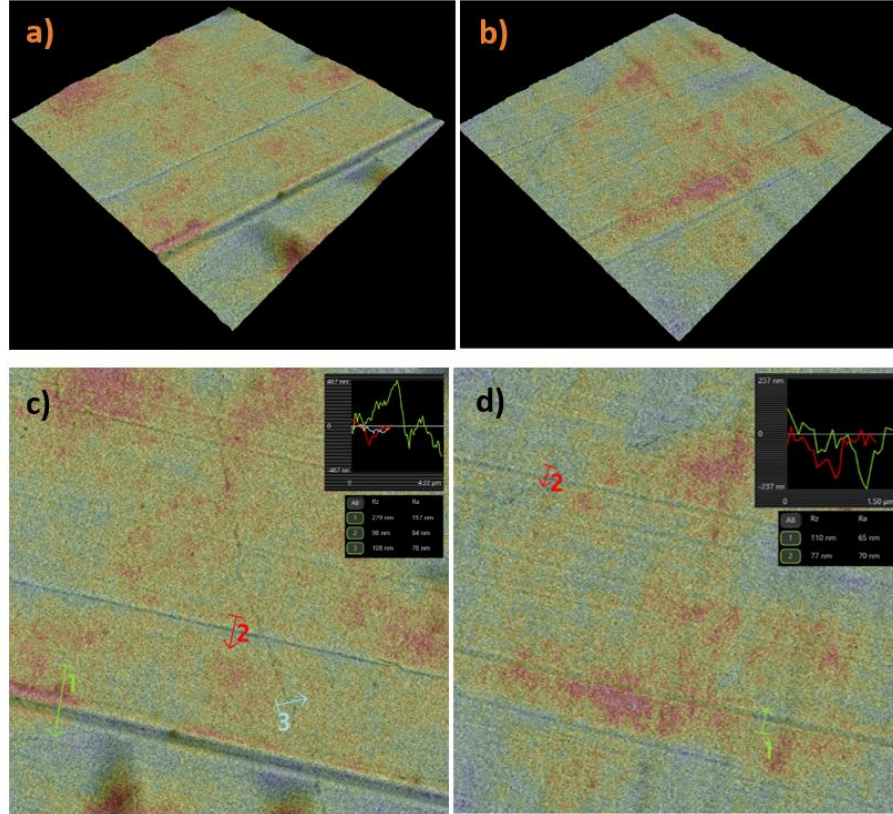
Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wt Conc.
Cr	21.80	51.81	Cr	61.86
C	48.40	26.57	C	31.73
O	22.23	16.26		
N	6.73	4.31	N	5.14
Si	0.26	0.34	Si	0.40
Al	0.18	0.22	Al	0.27
Mg	0.16	0.18	Mg	0.21
Na	0.15	0.16	Na	0.19
Cl	0.05	0.09	Cl	0.10
Ca	0.04	0.07	Ca	0.08
K	0.00	0.00	K	0.00

FOV: 26.9 µm, Mode: 15kV - Point, Detector: BSD Full, Time: MAY 29 2019 18:28



Şekil 6.37 Nano Yağlayıcı İle Çalışmış Motorun Üst Kompresyon Segmanının Aşınma Çizgisinde Bulunan 2 Numaralı Noktasında Yapılan EDS Analizi

Şekil 6.38'de motorların üst kompresyon segmanlarının yüzeyleri gösterilmiş ve yüzeylerde bulunan aşınma çizgilerinin pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Şekil 6.38 c'de bulunan 1 numaralı aşınma çizgisinde pürüzlülük değeri 279 nm , 2 noktasında 98 nm ve 3 noktasında ise 108 nm'dir. Şekil 6.38 d'deki aşınma çizgilerinin pürüzlülüğü 1 noktasında 110 nm 2 noktasında 77 nm ölçülmüş olup tam formüle yağ ile çalışmış segmana göre daha düşük değerdedir.



Şekil 6.38 Üst Kompresyon Segmanlarının Aşınma Yüzeylerinin SEM Görüntüleri ve Yüzey Pürüzlülükleri (a), (c), Tam Formüle Yağ İle Çalışmış Motor Segmanının SEM Görüntüleri ve Yüzey Pürüzlülükleri, (b), (d), Nano Yağlayıcı İle Çalışmış Motor Segmanının SEM Görüntüleri ve Yüzey Pürüzlülükleri

1. Nano yağlayıcı hazırlama sürecinde karbon nanotüpler fonksiyonelleştirilmiş ve ultrasonik homojenizasyon yöntemi ile tam formüle motor yağı içerisinde homojen bir şekilde dağıtılmıştır. Çökelme testi sonuçları ile karbon nanotüp katkılı nano yağlayıcı stabilitesinin en az 2 ay süre ile korunduğu deneysel olarak da gözlemlenmiştir.
2. Tam formüle motor yağı ve karbon nanotüp katkılı motor yağı ile 250'şer saat çalışan motorlardan 20. saatte rodaj numunesi, sonrasında her 50 saatte bir yağ numuneleri alınmıştır. Numunelerin; aşınma elementleri Fe, Al ve Cr, TBN ve viskoziteleri değerlendirilmek üzere analize gönderilmiştir. Analiz sonuçları nano yağlayıcının 250 saat kullanım sonrasında işlevini yerine getirebilmesi bakımından emniyetli değerler içerisinde olduğunu kanıtlamıştır.
3. Nano yağlayıcı ve tam formüle motor yağı ile çalışmış piston yağ ve kompresyon segmanlarının SEM görüntüleri incelenmiş, aşınma çizgileri değerlendirilmiştir. Aşınma çizgilerinin derinlikleri, genişlikleri ve yoğunlukları incelenmiş, nano katkılı yağlayıcı ile çalışan motor piston segmanlarının aşınmasının tam formüle yağa kıyasla daha az seviyede olduğu sonucuna varılmıştır.
4. Segman yüzeylerinde ve yüzeyde tespit edilen aşınma çizgilerinde EDS analizleri yapılmış, aşınma elementleri değerlendirilmiştir.

Tez çalışmasının sonucu, nano yağlayıcı hazırlama sürecinde çok duvarlı karbon nanotüpün aşınma önleyici katkı maddesi olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Yapılacak çalışmalar ile yağlayıcı hazırlama parametre değişiklikleri ve farklı oranlarda karbon nanotüp katkısı ile daha verimli yağlar elde edilebilme olasılığı oluşmuştur. Gelecekte, uygun filtrasyon sistemlerinin entegrasyonu ile karbon

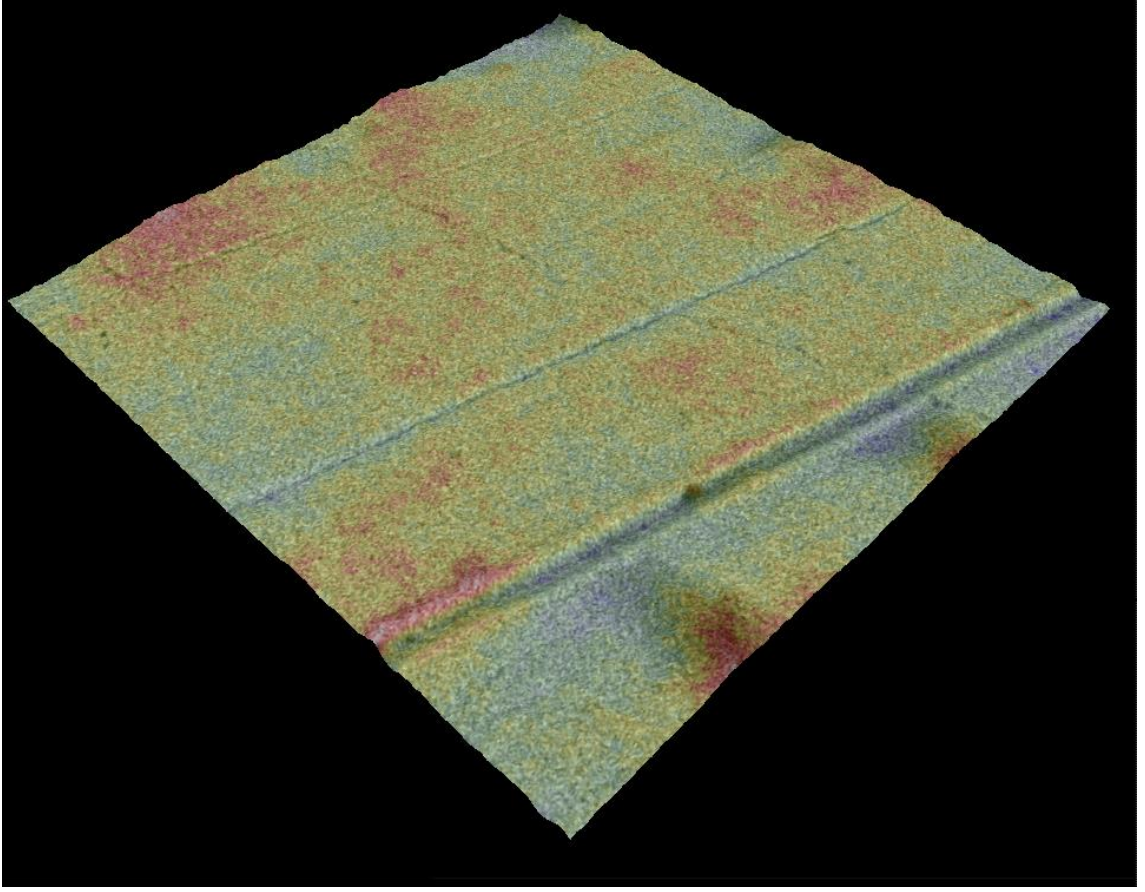
nanotüp gibi nano malzemeler motor yağlarında aşınma önleyici katkı maddesi olarak kullanılabilecektir.

- [1] Paul, G. Shit, S. Hirani, H. Kuila, T. ve Murmu, N., (2019). "Tribological behavior of dodecylamine functionalized graphene nanosheets dispersed engine oil nanolubricants", *Tribology International*, 131: 605-619.
- [2] Umer, J. Morris, N. Leighton, M. Rahmani, R. Balakrishnan, S. ve Rahnejat, H., (2019). "Nano and microscale contact characteristics of tribofilms derived from fully formulated engine oil", *Tribology International*, 131: 620-630.
- [3] Notay, R.S. Priest, M. ve Fox, M.F., (2019). "The influence of lubricant degradation on measured piston ring film thickness in a fired gasoline reciprocating engine", *Tribology International*, 129: 112-123.
- [4] Miyoshi, K. ve Street, K.W., (2004). "Novel carbons in tribology", *Tribology International*, 11: 865-868.
- [5] Cornelio, J.A.C. Cuervo, P.A. Hoyos-Palacio, L.M. Lara-Romero, J. ve Toro, A., (2016). "Tribological properties of carbon nanotubes as lubricant additive in oil and water for a wheel-rail system", *Journal of Materials Research and Technology*, 5: 68-76.
- [6] Ali, M.K.A. Xianjun, H. Abdelkareem, M.A. Gulzar, M. ve Elsheikh, A., (2018). "Novel approach of the graphene nanolubricant for energy saving via anti-friction/wear in automobile engines", *Tribology International*, 124: 209-229.
- [7] Zhai, W. Lu, W. Liu, X. ve Zhou, L., (2019). "Nanodiamond as an effective additive in oil to dramatically reduce friction and wear for fretting steel/copper interfaces", *Tribology International*, 129: 75-81.
- [8] Kałużny, J. Merkisz-Guranowska, A. Giersig, M. ve Kempa, K., (2017). "Lubricating performance of carbon nanotubes in internal combustion engines-engine test results for cnt enriched oil", *International Journal of Automotive Technology*, 18: 1047-1059.
- [9] Zhang, Z. Liu, J. Wu, T. ve Xie, Y., (2017). "Effect of carbon nanotubes on friction and wear of a piston ring and cylinder liner system under dry and lubricated conditions", *Friction*, 5: 147-154.
- [10] Khalil, W. Mohamed, A. Bayoumi, M. ve Osman, T., (2016). "Tribological properties of dispersed carbon nanotubes in lubricant", *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 24: 479-485.
- [11] Kotia, A. Kumar, R. Haldar, A. Deval, P. ve Ghosh, S.K., (2018). "Characterization of Al 2 O 3- SAE 15W40 engine oil nanolubricant and performance evaluation in 4-stroke diesel engine", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40: 38.

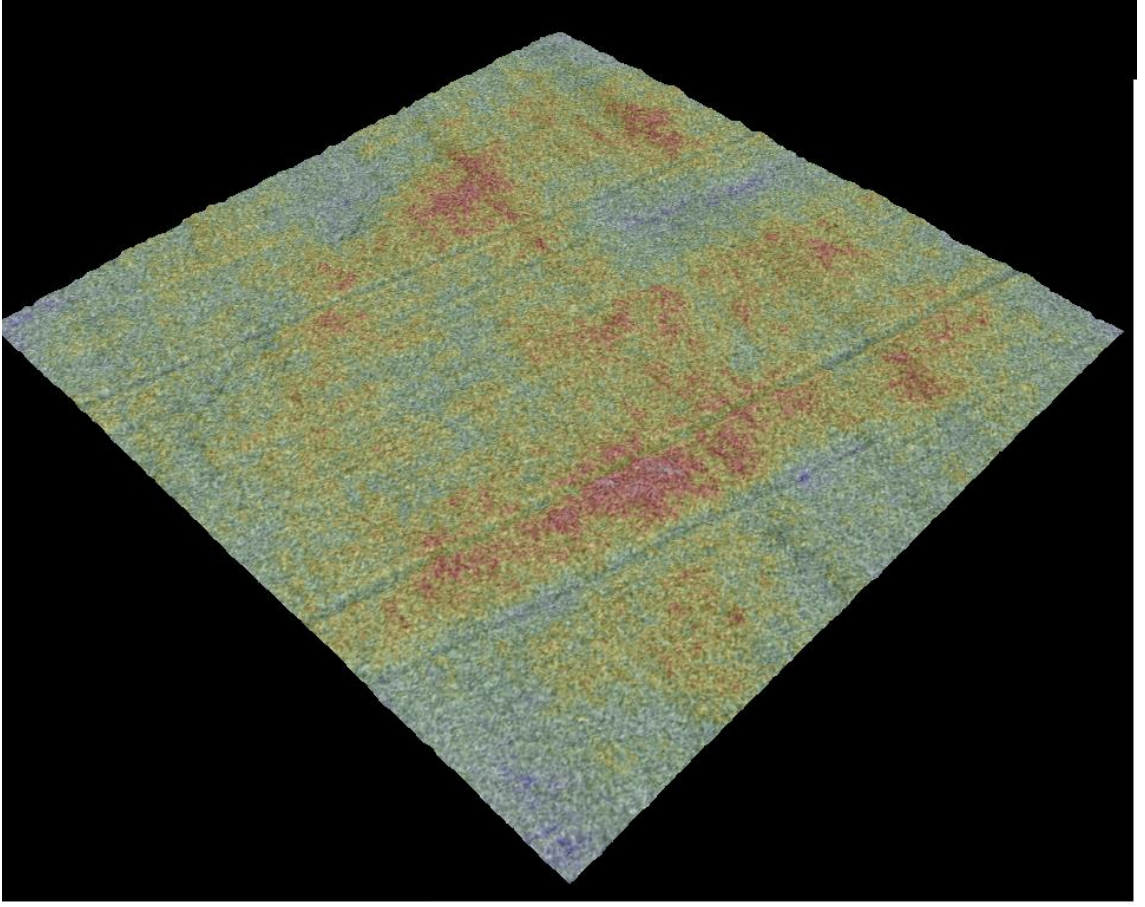
- [12] Ali, M.K.A. Xianjun, H. Turkson, R.F. Peng, Z. ve Chen, X., (2016). "Enhancing the thermophysical properties and tribological behaviour of engine oils using nano-lubricant additives", RSC Advances, 6: 77913-77924.
- [13] Charoo, M. ve Wani, M.F., (2017). "Tribological properties of h-BN nanoparticles as lubricant additive on cylinder liner and piston ring", Lubrication Science, 29: 241-254.
- [14] Ahmadi, H. Rashidi, A. Nouralishahi, A. ve Mohtasebi, S.S., (2013). "Preparation and thermal properties of oil-based nanofluid from multi-walled carbon nanotubes and engine oil as nano-lubricant", International Communications in Heat and Mass Transfer, 46: 142-147.
- [15] Engineering, S.o.A. ve Bosch, R., (1999). Diesel-engine management: SAE International.
- [16] Heywood, J.B., (1988). "Internal combustion engine fundamentals".
- [17] Adams, D., (2010). Tribological considerations in internal combustion engines, ed. Tribology and Dynamics of Engine and Powertrain. Elsevier, 251-283.
- [18] Mollenhauer, K. ve Tschoke, H., (2010). Handbook of diesel engines: Springer.
- [19] Gupta, T., (2017). Carbon: The black, the gray and the transparent: Springer.
- [20] Boehm, R. Jin, C. ve Narayan, R., (2017). "1.7 Carbon and Diamond", Comprehensive Biomaterials II: 145.
- [21] Loos, M., (2014). Carbon nanotube reinforced composites: CNT Polymer Science and Technology: Elsevier.
- [22] Karthik, P. Himaja, A. ve Singh, S.P., (2014). "Carbon-allotropes: synthesis methods, applications and future perspectives", Carbon letters, 15: 219-237.
- [23] Harris, P.J. ve Harris, P.J.F., (2009). Carbon nanotube science: synthesis, properties and applications: Cambridge university press.
- [24] Menezes, P.L. Nosonovsky, M. Ingole, S.P. Kailas, S.V. ve Lovell, M.R., (2013). Tribology for scientists and engineers: Springer.
- [25] Snow, D.A., (2001). Plant engineer's reference book: Elsevier.
- [26] Sadeghi, F., (2010). Elastohydrodynamic lubrication, ed. Tribology and Dynamics of Engine and Powertrain. Elsevier, 171-226e.
- [27] Robertson, W., (2019). Lubrication in practice: Routledge.
- [28] Prof. Dr. Hakan Kaleli, İçten Yanmalı Motorlarda Aşınma, Yağlama ve Soğutma Lisans Ders Notları, <http://www.yildiz.edu.tr>, 05.12.2018.
- [29] Liu, X. ve Chen, G.S., (2016). Friction Dynamics: Principles and Applications: Woodhead Publishing.
- [30] Davim, J.P., (2011). Tribology for engineers: A practical guide: Elsevier.
- [31] Arnell, D., (2010). Mechanisms and laws of friction and wear, ed. Tribology and Dynamics of Engine and Powertrain. Elsevier, 41-72.

- [32] D'Agostino, V. ve Senatore, A., (2010). Fundamentals of lubrication and friction of piston ring contact, ed. Tribology and Dynamics of Engine and Powertrain. Elsevier, 343-386.
- [33] Arnell, R.D. Davies, P. Halling, J. ve Whomes, T., (1991). Tribology: Principles and Design Applications: Principles and Design Applications: Macmillan International Higher Education.
- [34] Popov, V.L., (2010). Contact mechanics and friction: Springer.
- [35] Bhushan, B., (2012). Tribology and mechanics of magnetic storage devices: Springer Science & Business Media.
- [36] Stachowiak, G. ve Batchelor, A.W., (2013). Engineering tribology: Butterworth-Heinemann.
- [37] Sethuramiah, A. ve Kumar, R., (2015). Modeling of Chemical Wear: Relevance to Practice: Elsevier.
- [38] Rowe, W.B., (2013). Principles of modern grinding technology: William Andrew.
- [39] Ali, I. Kucherovala, A. Memetov, N. Pasko, T. Ovchinnikov, K. Pershin, V. Kuznetsov, D. Galunin, E. Grachev, V. ve Tkachev, A., (2019). "Advances in carbon nanomaterials as lubricants modifiers", Journal of Molecular Liquids.
- [40] Co.Ltd., C.O.C., Technical data, China: Chinese Academy of Sciences.
- [41] Opet Fuchs Madeni Yağ San. ve Tic. A.Ş., Ağır Ticari Araç Yağları, <http://www.opetfuchhs.com.tr>, 05.12.2018
- [42] Erin Motor A.Ş., Jeneratör, <http://www.erinmotor.com>, 05.12.2018
- [43] Adams, D., (2010). Tribological considerations in internal combustion engines, ed. Tribology and Dynamics of Engine and Powertrain. Elsevier, 251-283.
- [44] Bayko Şahin, Ö., Küçükyıldırım, B. O., Yüksek, L. , (2019)., "Tek Silindirli Dizel Motorun Yağ Değişim Periyodunun Analizi", Ereğli International Science and Academic Congress, 9-10 Mart 2019, Konya.
- [45] ASTM D5185, Standard Test Method for Multielement Determination of Used and Unused Lubricating Oils and Base Oils by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry (ICP-AES), ASTM International, 2018
- [46] ASTM D445, Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity), ASTM International, 2018
- [47] ASTM D2896, Standard Test Method for Base Number of Petroleum Products by Potentiometric Perchloric Acid Titration, ASTM International, 2015
- [48] Avcı, A., (2009)., Bir Kargo Firmasına Ait 6 Adet Diesel Aracın Optimum Yağ Değişim Süreçlerinin Ekonomik Etüdü, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [49] Kaleli, H. ve Yavasliol, I., (1997). "Oil ageing-drain period in a petrol engine", Industrial Lubrication and Tribology, 49: 120-126.

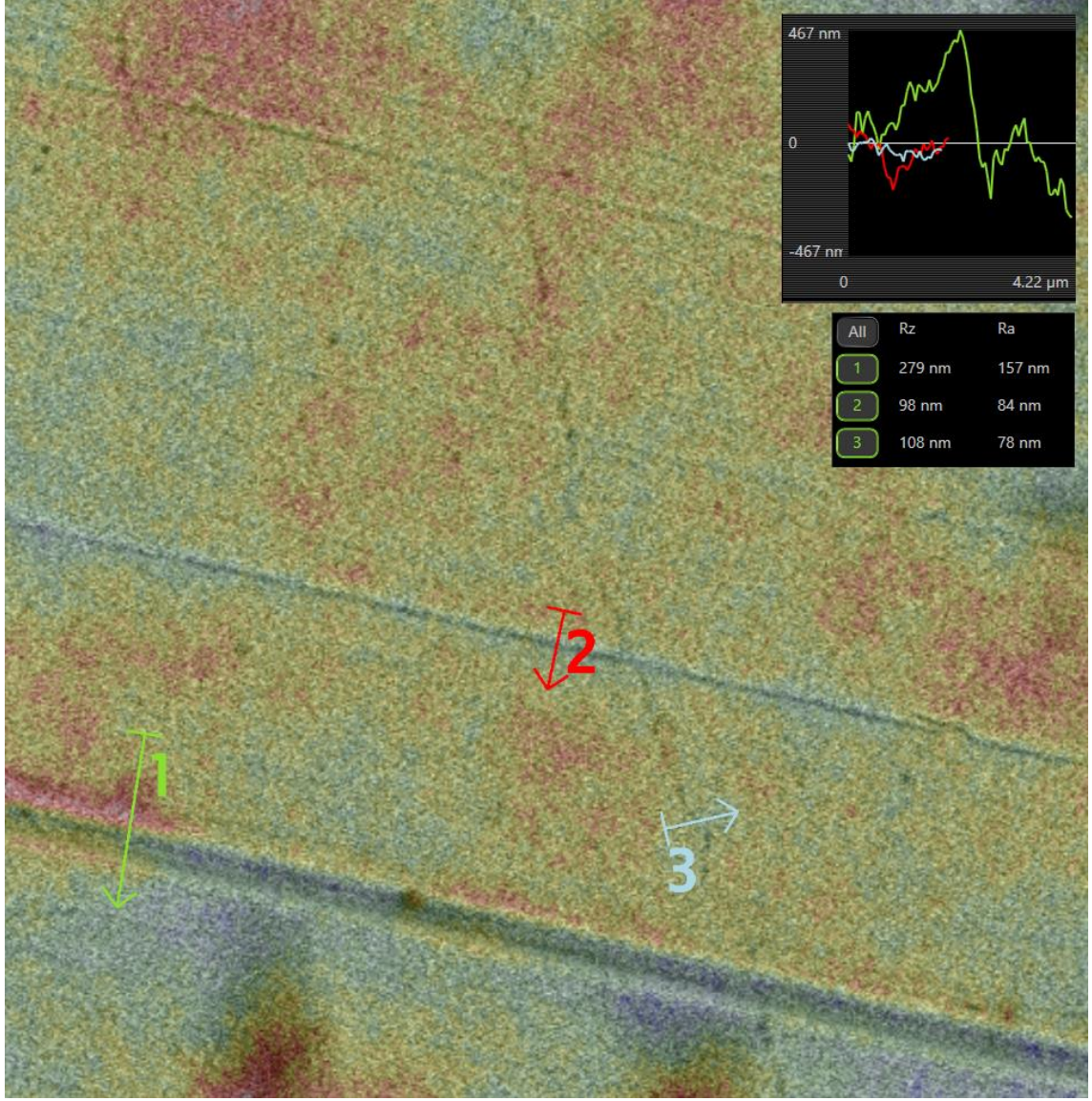
- [50] Zhai, W. Srikanth, N. Kong, L.B. ve Zhou, K., (2017). "Carbon nanomaterials in tribology", Carbon, 119: 150-171.



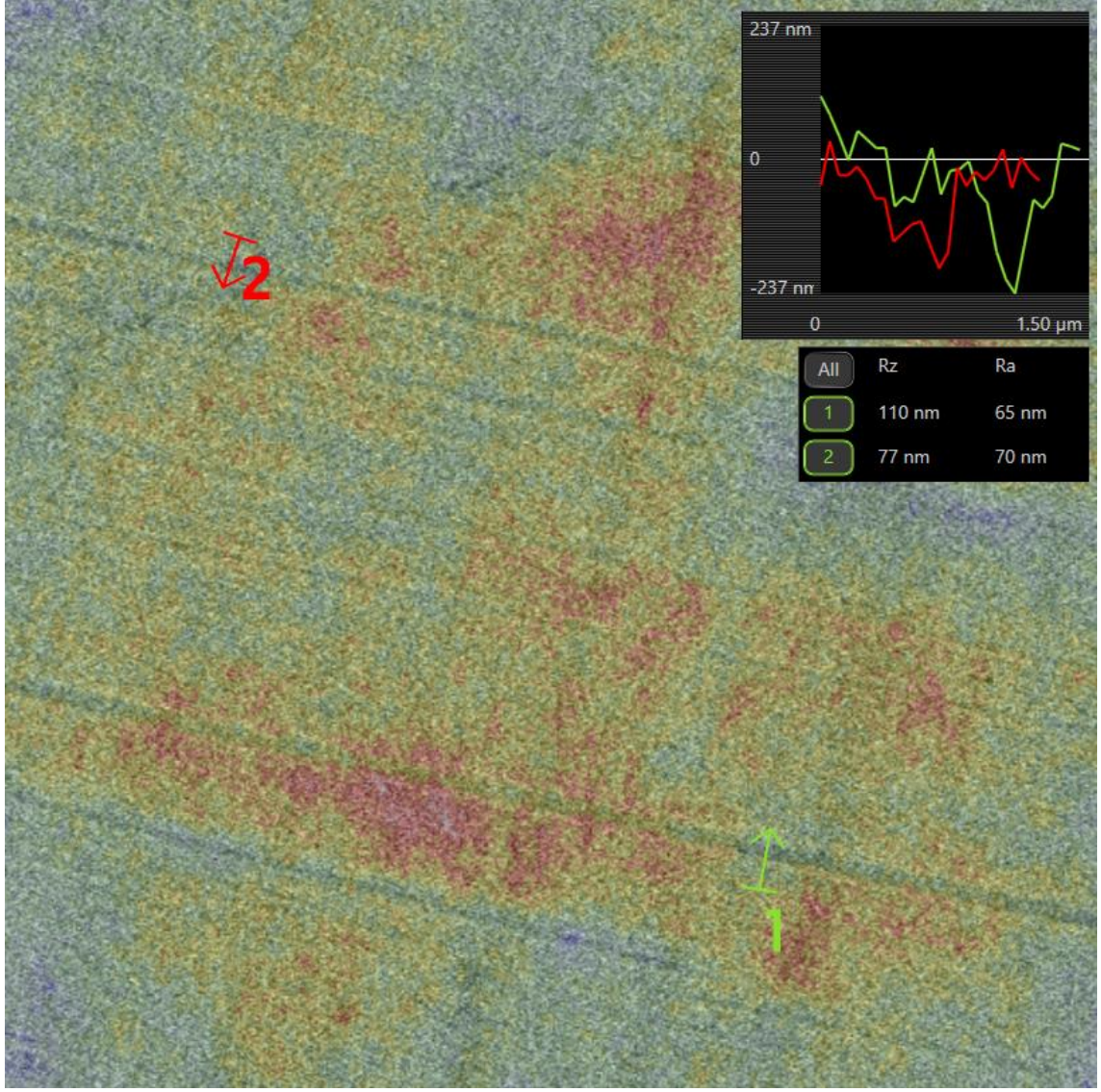
Tam Formüle Yağ ile Çalışmış Motorun Üst Kompresyon Segmanının SEM Görüntüsü



Nano Yağlayıcı ile Çalışmış Motorun Üst Kompresyon Segmanının SEM Görüntüsü



Tam Formüle Yağ ile Çalışmış Motorun Üst Kompresyon Segman Yüzeyinde
Bulunan Aşınma Çizgilerinin Pürüzlülükleri



Nano Yağlayıcı ile Çalışmış Motorun Üst Kompresyon Segmanın Yüzey Yüzeyinde Bulunan Aşınma Çizgilerinin Pürüzlülükleri

Tezden Üretilmiş Yayınlar

İletişim Bilgisi: ozgebaykosahin@gmail.com

Konferans Bildirileri

1. Bayko Şahin, Ö., Küçükyıldırım, B. O., Yüksek, L. , (2019)., "Tek Silindirli Dizel Motorun Yağ Değişim Periyodunun Analizi", Ereğli International Science and Academic Congress, 9-10 Mart 2019, Konya.