T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MOTOR YAĞINA EKLENEN NANOPARTİKÜL KATKI MADDELERİNİN TRİBOLOJİK PERFORMANSLARININ MOTOR AŞINMASINA ETKİLERİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

Selman DEMİRTAŞ

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Programı

Danışman

Prof. Dr. Emrullah Hakan KALELİ

Ağustos, 2024

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MOTOR YAĞINA EKLENEN NANOPARTİKÜL KATKI MADDELERİNİN TRİBOLOJİK PERFORMANSLARININ MOTOR AŞINMASINA ETKİLERİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

Selman DEMİRTAŞ tarafından hazırlanan tez çalışması 14.08.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Enerji Programı DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Emrullah Hakan KALELİ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Emrullah Hakan KALELİ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Selma ERGİN, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Levent YÜKSEK, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Zeynep PARLAR, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Murat KIYAK, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Emrullah Hakan KALELİ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Motor Yağına Eklenen Nanopartikül Katkı Maddelerinin Tribolojik Performanslarının Motor Aşınmasına Etkilerinin Deneysel Araştırılması 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.

Selman DEMİRTAŞ

İmza

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü'nün FDK-2020-3944 numaralı "Motor Yağına Eklenen Nanopartikül Katkı Maddelerinin Tribolojik Performanslarının Motor Aşınmasına Etkilerinin Deneysel Araştırılması" başlıklı Doktora Tez Projesi ile desteklenmiştir.

Aileme,

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında bana rehberlik eden, bilgi ve tecrübesini benimle paylaşarak çalışmamı şekillendiren tez danışmanım Sayın Prof. Dr. E. Hakan KALELİ'ye, testlerin gerçekleştirilmesinde büyük desteği olan Sayın Doç. Dr. Levent YÜKSEK'e ve aileme en derin şükranlarımı sunarım.

Selman DEMİRTAŞ

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR v
SİMGE LİSTESİ viii
KISALTMA LİSTESİ ix
ŞEKİL LİSTESİ x
TABLO LİSTESİ xvii
ÖZET xx
ABSTRACT xxii
1 GİRİŞ 24
1.1 Literatür Özeti ... 24
1.2 Tezin Amacı ve Özgünlüğü ... 42
1.3 Hipotez ... 43
2 DENEYSEL ÇALIŞMA 44
2.1 Deneysel Çalışma Hazırlığı ... 44
2.1.1 TiO_2 nanopartikülü ... 45
2.1.2 SWCNTs nanopartikülü ... 46
2.1.3 MWCNTs nanopartikülü ... 47
2.1.4 hBN nanopartikülü ... 47
2.1.5 GO nanopartikülü ... 47
2.1.6 nBA nanopartikülü ... 48
2.1.7 rGO nanopartikülü ... 49
2.1.8 Tribometre Test Düzeneği ... 55
2.1.9 Temel 2D Ölçüm Parametreleri ... 63
2.1.10 Temel 3D Ölçüm Parametreleri ... 63
2.1.11 2 ve 3 Boyutlu İncelemeler ... 63
2.1.12 Nanoskobik incelemeler (AFM) ... 64
2.1.13 Motor Test Düzeneği ... 65
3 TRİBOMETRE TEST SONUÇLARI 68
3.1 Sverker Çeliği İle Yapılan Tribometre Testleri ... 70
3.2 Honda GX270 Benzinli Motor Tribometre Testleri ... 83
3.2.1 Honda GX270 Benzinli Motor - Test Öncesi Yapılan Optik Mikroskop Analizleri ... 84
3.2.2 Honda GX270 Benzinli Motor Test Sonrası Optik Mikroskop Analizleri 89
3.2.3 Tribometre Sürtünme Katsayısı Test Sonuçları ... 114
3.3 Antor 6LD400 Diesel motoru Tribometre Testleri ... 116

3.3.1 Antor 6LD400 Test Öncesi Optik Mikroskop Analizleri 117
3.3.2 Antor 6LD400 Test Sonrası Optik Mikroskop Analizleri 120
3.3.3 Tribometre Testleri Sürtünme Katsayısı Sonuçları..... 144
4 MOTOR TEST SONUÇLARI **147**
4.1 Performans Testleri..... 147
4.1.1 Antor Performans Testleri..... 148
4.1.2 Honda Performans Testleri 153
4.2 Silindirlerin Kesilmesi ve Yüzey Analizleri..... 157
4.2.1 Antor Diesel Motor Silindirin Kesilmesi ve Yüzey Analizleri..... 157
4.2.2 Honda Benzinli Motor Silindirin Kesilmesi ve Yüzey Analizleri 166
5 SONUÇ VE ÖNERİLER **174**
KAYNAKÇA **177**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **183**

SİMGE LİSTESİ

I	Akım
Sz	Alan Maksimum Yüksekliği
Sp	Alan Maksimum Tepe Yüksekliği
Sv	Alan Maksimum Vadi Derinliği
Ra	Aritmetik Pürüzlülük Ortalaması
n	Devir
P	Güç
µm	Mikrometre
M	Moment
nm	Nanometre
Rt	Pürüzlülük Profilinin Toplam Yüksekliği
Rp	Pürüzlülük Profilinin Maksimum Tepe Yüksekliği
Rz	Pürüzlülük Profilinin Maksimum Yüksekliği
Rv	Pürüzlülük Profilinin Maksimum Vadi Derinliği
Rc	Pürüzlülük Profil Elemanlarının Ortalama Yüksekliği
Rq	Pürüzlülük Profilinin Ortalama Karekök Sapması
Rsk	Pürüzlülük Profilinin Çarpıklığı
Rku	Pürüzlülük Profilinin Basıklığı
RSm	Pürüzlülük Profil Elemanlarının Ortalama Genişliği
V	Volt
Sa	Yüzey Alanı Aritmetik Ortalama Yüksekliği
Sq	Yüzey Alanı Karekök Ortalama Yüksekliği
Ssk	Yüzey Alan Çarpıklığı
Sku	Yüzey Alan Basıklığı

KISALTMA LİSTESİ

FESEM	Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
BN	Bor Nitrür
MWCNTs	Çok Duvarlı Karbon Nanotüpler
HBN	Hegzagonal Bor Nitrür
rGO	İndirgenmiş Grafen Oksit
nBA	Nano-Borik Asit
COF	Sürtünme Katsayısı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SWCNTS	Tek Duvarlı Karbon Nanotüpler
ÜÖN	Üst Ölü Nokta
XRD	X- Işını Kırınım Yöntemi
ATR	Zayıflatılmış Toplam Yansıma

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2. 1 %1 oranında TiO_2 içeren 5W40 yağın dibe çökmüş hali. 46

Şekil 2. 2 5mg/10 mL (% 0.1) SWCNTs+5W40 yağın dibe çökmüş hali. 46

Şekil 2. 3 50 mg/10 mL hBN+5W40 yağın dibe çökmüş hali. 47

Şekil 2. 4 Kütlece %0.1 GO+5W40 yağın dibe çökmüş hali. 47

Şekil 2.5 5W40 yağına eklenerek askıda tutulan nBA nanopartikülü. 48

Şekil 2.6 Farklı konsantrasyonlardaki 7 adet rGO+Shell 5W40 numuneleri. 50

Şekil 2.7 Farklı konsantrasyonlardaki 6 adet SWCNTs+Shell 5W40 numuneleri. 50

Şekil 2.8 Farklı konsantrasyonlardaki 6 adet (rGO+SWCNTs)+Shell 5W40 numuneleri. 51

Şekil 2.9 Süspansiyon halinde kalan 6 no'lu rGO+5W40 (rGO6 %0.02) motor yağı numunesi. 51

Şekil 2.10 rGO (indirgenmiş grafen oksit) nanopartiküllerin a) SEM ve b) TEM görüntüleri. 52

Şekil 2. 11 Motor yağına katılmış ve dispers edilmiş rGO'nun Raman spektrumu. 52

Şekil 2.12 rGO'nun zayıflatılmış toplam yansıma Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi. 53

Şekil 2.13 Referans 5W40 motor yağının ve % 0.01-0.2 oranında katkı maddesi olarak rGO içeren hazırlanmış dispersiyonların türbidimetri ölçümleri. 54

Şekil 2.14 Zeta boyutlandırıcı ve potansiyel ölçümü. 54

Şekil 2. 15 Bu çalışmada kullanılan saf rGO'nun XRD (X-Ray Diffraction) X Işını Kristalografisi) grafiği. 55

Şekil 2.16 Tek Silindirli benzinli motor ve teknik özellikleri. 55

Şekil 2.17 Honda GX 270 silindir bloğunun kesilmesi ve tribometreye yerleştirilmesi. 56

Şekil 2.18 Tribometre ve içten yanmalı motor deney setinde kullanılan Anadolu Motor Antor 6 LD 400 Diesel motoru ve teknik özellikleri. 57

Şekil 2. 19 Silindir numunelerinin hazırlanması. 57

Şekil 2.20 Kesilen silindir numunelerinin hassas olarak parlatılması. 58

Şekil 2.21 Tribometre testleri için hazırlanan segman-silindir ikilisi. 58

Şekil 2.22 Bilye ve gerçek silindir numuneleri konfigürasyonu. 59

Şekil 2.23 Tribometre testleri için üretilmiş özel bilye tutucusunun (a) ve (b) yandan ve üstten görünüşü c), d) ölçüleri. 59

Şekil 2.24 Çelik bilye ve (10x10x13mm) ölçülerinde kesilmiş silindir konumları. 59

Şekil 2.25 Uddeholm Sverker 21 çelik (sertlik 60 HRC). 60

Şekil 2.26 Gidip gelme hareketi yapan Tribometre test cihazı. 61

Şekil 2.27 Psaron Nanobender 2D-3D Optik mikroskop profilometre yazılımı. 63

Şekil 2.28 Nanosurf Flex AFM (Atomik kuvvet mikroskobu) (a) Atomik kuvvet mikroskobu genel görüntüsü, (b) Atomik Kuvvet Mikroskobu tarama kafası. 64

Şekil 2.29 Antor LD 400 Diesel motoru test düzeneği (a) dinamometre (b) kaplin bağlantısı. 65

Şekil 2.30 Honda GX 270 benzinli motoru test düzeneği. 65

Şekil 2.31 Süspansiyon halinde kalan rGO+5W40 (rGO6 %0.02) motor testlerinde kullanılan motor yağı. 66

Şekil 3.1 5W40 motor yağına eklenen TiO_2, GO, SWCNTs, MWCNTs, NBA ve BN (hexagonal) nanopartiküllerinin sürtünme katsayısının zamana bağlı eğrisel grafiği. 68

Şekil 3.2 5W40 motor yağına eklenen tüm TiO_2, GO, SWCNTs, MWCNTs, nBA ve BN (hexagonal) nanopartiküllerinin sürtünme katsayısının zamana bağlı ortalama sonuçları. 69

Şekil 3.3 Motor yağına eklenen başarılı ve süspansiyon halinde kalan rGO6'nın referans 5W40'a göre zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi. 70

Şekil 3.4 Test öncesi kullanılmamış bilyenin a) 5X, b) 10X mercek altındaki görüntüsü. 71

Şekil 3.5 Test öncesi kullanılmamış bilyenin optik, 2D, çizgisel pürüzlülük, 3D ve 3D haritalama dijital optik mikroskop görüntüleri. 72

Şekil 3.6 Test öncesi kullanılmamış Sverker silindirin optik, 2D, çizgisel pürüzlülük, 3D ve 3D haritalama dijital optik mikroskop görüntüleri. 73

Şekil 3.7 a) 5W40 ve b) rGO6 ile yapılan testte optik mikroskop ile bilye aşınma yüzey ölçümü. 74

Şekil 3.8 a) 5W40 ve b) rGO6 ile yapılan testte optik mikroskop ile silindirin aşınma yüzey ölçümü. 75

Şekil 3.9 5W40 ile yapılan tribometre test sonucunda bilyenin aşınma yüzey ölçümü için Optik mikroskop 2 ve 3 boyutlu yüzey pürüzlüğü ve parametreleri. 76

Şekil 3.10 rGO6+5W40 ile yapılan tribometre test sonucunda bilyenin aşınma yüzey ölçümü için Optik mikroskop 2 ve 3 boyutlu yüzey pürüzlüğü ve parametreleri. 77

Şekil 3.11 5W40 ile yapılan tribometre test sonucunda Sverker blok silindirin aşınma yüzey ölçümü Optik mikroskop 2 ve 3 boyutlu yüzey pürüzlüğü ve parametreleri. 78

Şekil 3.12 rGO6+5W40 ile yapılan tribometre test sonucunda blok silindirin aşınma yüzey ölçümü için Optik mikroskop 2 ve 3 boyutlu yüzey pürüzlüğü ve parametreleri. 79

Şekil 3. 13 5W-40 motor yağı ile test edilen bilyenin EDS tarafından desteklenen SEM görüntülerinde aşınma izi. 81

Şekil 3.14 rGO6 ile test edilen bilyenin EDS tarafından desteklenen SEM görüntülerinde aşınma izi. 81

Şekil 3.15 Referans 5W-40 motor yağı ile test edilen silindirin EDS tarafından desteklenen aşınma izi SEM görüntüleri. 82

Şekil 3.16 rGO6 ile test edilen silindirin EDS tarafından desteklenen aşınma izi SEM görüntüleri. 82

Şekil 3.17 Yeni (kullanılmamış) bilye a) Optik mikroskop b,c) S.E.M d) X-Ray, e) Elementel analiz sonuçları. 84

Şekil 3.18 Test öncesi kullanılmamış bilyenin AFM görüntüleri ve yüzey pürüzlülük değerleri. 85

Şekil 3. 19 Test öncesi parlatılmış HondaGX 270 motor silindirinin a) 5X, b) 10X mercek altındaki dijital optik mikroskop görüntüsü. 86

Şekil 3.20 Test öncesi parlatılmış benzinli motor silindirinin 2D-3D dijital mikroskop görüntüsü. 87

Şekil 3.21 Test öncesi parlatılmış Honda GX 270 silindirinin AFM ile ölçülen 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri ve yüzey pürüzlülük değerleri. 88

Şekil 3.22 Parlatılmış silindir gömleği üzerinde 3 kez test edilen bilyelerin optik dijital mikroskop ile aşınma izi çap mesafelerinin ölçümü. 89

Şekil 3.23 5W40 yağ ile yapılan tribometre testi bilye yüzeyi – Test 1. 91

Şekil 3.24 rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan tribometre testi bilye yüzeyi – Test 1. 92

Şekil 3.25 5W40 yağ ile yapılan tribometre testi bilye yüzeyi – Test 2. 93

Şekil 3.26 rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan tribometre testi bilye yüzeyi – Test 2. 94

Şekil 3.27 5W40 yağ ile yapılan tribometre testi bilye yüzeyi – Test 3. 95

Şekil 3.28 rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan tribometre testi bilye yüzeyi – Test 3. 96

Şekil 3.29 5W-40 motor yağı ile test edilen bilyenin FE-SEM - X-ray ve elementel analiz değerleri. 98

Şekil 3.30 rGO6 içeren motor yağı ile test edilen bilyenin FE-SEM - Xray ve elementel analiz değerleri. 98

Şekil 3.31 Honda GX270 silindir ile test edilen bilyenin AFM ile ölçülen 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri ve yüzey pürüzlülük değerleri. 100

Şekil 3.32 Birinci, ikinci ve üçüncü test sonrası silindirin optik dijital mikroskop ile ölçülen aşınma mesafeleri ölçümü. 101

Şekil 3.33 5W40 yağ ile yapılan tribometre testi silindir yüzeyi – Test 1. 103

Şekil 3.34 rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan tribometre testi silindir yüzeyi – Test 1. 104

Şekil 3.35 Referans yağ ile yapılan tribometre testi silindir yüzeyi – Test 2. 105

Şekil 3.36 rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan tribometre testi silindir yüzeyi – Test 2. 106

Şekil 3.37 Referans yağ ile yapılan tribometre testi silindir yüzeyi – Test 3. 107

Şekil 3. 38 rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan tribometre testi silindir yüzeyi – Test 3. 108

Şekil 3.39 5W-40 motor yağı ile test edilen silindirin EDS tarafından desteklenen FE-SEM görüntülerinde aşınma izi. 110

Şekil 3.40 rGO6 motor yağı ile test edilen silindirin EDS tarafından desteklenen FE-SEM görüntülerinde aşınma izi. 110

Şekil 3.41 rGO eklenmiş yağ ile yapılan testler neticesinde elde edilen rGO koruyucu yüzeyin 2 ve 3 boyutlu yüzey pürüzlülüğü. 112

Şekil 3.42 5W40 referans yağ ve rGO6 yağ ile test edilen benzinli motor silindirine ait AFM analiz görüntüleri. 113

Şekil 3.43 5W40 referans yağ ve rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan tribometre testleri ortalama sürtünme katsayıları – Test 1. 115

Şekil 3.44 5W40 referans yağ ve rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan tribometre testleri ortalama sürtünme katsayıları – Test 2. 115

Şekil 3.45 5W40 referans yağ ve rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan tribometre testleri ortalama sürtünme katsayıları – Test 3. 116

Şekil 3.46 Test öncesi parlatılmış Diesel motor silindirin optik, 2D, çizgisel pürüzlülük, 3D ve 3D haritalama dijital optik mikroskop görüntüleri. 118

Şekil 3.47 Test öncesi kullanılmamış Diesel motor silindirin AFM ile yapılan analiz görüntüleri. 119

Şekil 3.48 Parlatılmış silindir gömleği üzerinde 3 kez test edilen bilyelerin optik dijital mikroskop ile aşınma izi çap mesafelerinin ölçümü. 120

Şekil 3.49 Diesel motor silindiri kullanılarak 5W40 yağ ile yapılan tribometre testi bilye yüzeyi – Test 1. 122

Şekil 3.50 Diesel motor silindiri kullanılarak rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan tribometre testi bilye yüzeyi – Test 1. 123

Şekil 3.51 Diesel motor silindiri kullanılarak 5W40 yağ ile yapılan tribometre testi bilye yüzeyi – Test-2. 124

Şekil 3.52 Diesel motor silindiri kullanılarak rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan tribometre testi bilye yüzeyi – Test-2. 125

Şekil 3.53 Diesel motor silindiri kullanılarak 5W40 yağ ile yapılan tribometre testi bilye yüzeyi – Test-3. 126

Şekil 3.54 Diesel motor silindiri kullanılarak rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan tribometre testi bilye yüzeyi – Test-3. 127

Şekil 3.55 5W-40 motor yağı ile test edilen bilyenin EDS tarafından desteklenen FE-SEM görüntülerinde aşınma izi. 129

Şekil 3.56 rGO6 motor yağı ile test edilen bilyenin EDS tarafından desteklenen FE-SEM görüntülerinde aşınma izi. 129

Şekil 3.57 Diesel silindir ile test edilen bilyenin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri..... 130

Şekil 3.58 Çelik bilye altında 3 kez test edilen parlatılmış Diesel motor silindirinin maksimum ve minimum aşınma izi genişliğinin optik dijital görüntüleri. 132

Şekil 3.59 Referans yağ 5W40 ile yapılan birinci test sonrası sürtünen Diesel motor silindirin ölçülen aşınma izleri ve yüzey pürüzlülük değerleri. 134

Şekil 3.60 rGO6 yağ ile yapılan birinci test sonrası sürtünen Diesel motor silindirin ölçülen aşınma izleri izleri ve yüzey pürüzlülük değerleri. 135

Şekil 3.61 Referans yağ 5W40 ile yapılan ikinci test sonrası sürtünen Diesel motor silindirin ölçülen aşınma izleri ve yüzey pürüzlülük değerleri. 136

Şekil 3.62 rGO6 yağ ile yapılan ikinci test sonrası sürtünen Diesel motor silindirin ölçülen aşınma izleri izleri ve yüzey pürüzlülük değerleri. 137

Şekil 3.63 Referans yağ 5W40 ile yapılan üçüncü test sonrası sürtünen Diesel motor silindirin ölçülen aşınma izleri ve yüzey pürüzlülük değerleri. 138

Şekil 3.64 rGO6 yağ ile yapılan üçüncü test sonrası sürtünen Diesel motor silindirin ölçülen aşınma izleri ve yüzey pürüzlülük değerleri. 139

Şekil 3.65 5W-40 ile test edilen Diesel motor silindirin a) Optik mikroskop b,c) S.E.M d) X-Ray, e) Elementel analiz sonuçları. 141

Şekil 3.66 rGO6 ile test edilen Diesel motor silindirin a) Optik mikroskop b,c) S.E.M d) X-Ray, e) Elementel analiz sonuçları. 141

Şekil 3.67 rGO içeren yağ ile yapılan bilye ve silindir testleri neticesinde Diesel motor silindir yüzeyinde oluşan koruyucu rGO tabakasının 2 ve 3 boyutlu yüzey pürüzlülüğü. 142

Şekil 3.68 Diesel motor silindirin test sonrası AFM ile ölçülen 2 ve 3 boyutlu yüzey pürüzlülük görüntü ve değerleri. 144

Şekil 3.69 5W40 referans yağ ve rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan tribometre testleri ortalama sürtünme katsayıları – Test 1. 145

Şekil 3.70 5W40 referans yağ ve rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan tribometre testleri ortalama sürtünme katsayıları – Test 2. 145

Şekil 3.71 5W40 referans yağ ve rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan tribometre testleri ortalama sürtünme katsayıları – Test 3. 146

Şekil 4. 1 ISO 8178-4 standartına göre intermediate (ara) hız; maksimum torkun oluştuğu hızdır (3 rakamı ile numaralandırılmıştır). 147

Şekil 4.2 5W40 yağ ile yapılan 3 adet Diesel motorunun performans test sonucu güç ortalamasının devre göre grafiği 149

Şekil 4.3 5W40 yağ ile yapılan 3 adet Diesel motorunun performans test sonucu tork (moment) ortalamasının devre göre grafiği 149

Şekil 4.4 rGO6 eklenmiş motor yağı ile yapılan 3 adet Diesel motorunun performans test sonucu güç ortalamasının devre göre grafiği. 150

Şekil 4.5 rGO6 eklenmiş motor yağı ile yapılan 3 adet Diesel motoru performans test sonucu tork ortalamasının devre göre grafiği. 151

Şekil 4.6 5W40 ve rGO6 ile yapılan Diesel motor performans testlerinin güç yönünden karşılaştırması 151

Şekil 4.7 5W40 ve rGO6 ile yapılan Diesel motor performans testlerinin tork yönünden karşılaştırması. 152

Şekil 4.8 5W40 referans motor yağı ile yapılan 3 adet benzinli motor performans test sonucu güç ortalamasının devre göre grafiği. 153

Şekil 4.9 5W40 referans motor yağı ile yapılan 3 adet benzinli motor performans test sonucu tork ortalamasının devre göre grafiği. 154

Şekil 4.10 rGO6 eklenmiş motor yağı ile yapılan 3 adet benzinli motor performans test sonucu güç ortalamasının devre göre grafiği. 154

Şekil 4.11 rGO6 eklenmiş motor yağı ile yapılan 3 adet benzinli motor performans test sonucu tork ortalamasının devre göre grafiği. 155

Şekil 4.12 5W40 referans yağ ve rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan 3 adet benzinli motor performans test sonucu güç ortalamasının devre göre grafiği. 155

Şekil 4.13 5W40 referans yağ ve rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan 3 adet benzinli motor performans test sonucu tork ortalamasının devre göre grafiği. 156

Şekil 4.14 Motor testleri sonunda silindir kovanlarının Anabilim dalımızda bulunan şerit testere ile yüzey zarar vermeden kesilmesi. 157

Şekil 4.15 Silindir kovanları bilhassa aşınmaların en fazla meydana geldiği Üst Ölü Nokta bölgelerinden mikroskobik olarak incelenmiştir. 158

Şekil 4.16 Kesilen Antor silindir kovanının Üst Ölü Nokta bölgelerinin optik mikroskop görüntüleri. 158

Şekil 4.17 Motor dinamometresinde 5W40 yağ ile test edilmiş Diesel motor silindirinin dijital optik mikroskop ile görüntülenen 2D-3D yüzey pürüzlülüğü. 159

Şekil 4.18 Motor dinamometresinde rGO6 yağ ile test edilmiş Diesel motor silindirinin dijital optik mikroskop ile görüntülenen 2D-3D yüzey pürüzlülüğü. 160

Şekil 4.19 Kesilen Diesel motor silindiri Üst Ölü Noktası'nda optik mikroskop ile tespit edilen grafen nanopartikülü ve yüzey değerleri. 162

Şekil 4.20 5W40 yağ ile test edilen Diesel motor silindir kovanının Ü.Ö.N (Üst Ölü Nokta'sındaki yüzey analizi) a) Optik Mikroskop, b) ve c) Elektron mikroskobu d) X-Ray e) Elementel analiz. 163

Şekil 4.21 rGO6 yağ ile test edilen Diesel motor silindir kovanının Ü.Ö.N (Üst Ölü Nokta'sındaki yüzey analizi) a) Optik Mikroskop, b) ve c) Elektron mikroskobu d) X-Ray e) Elementel analiz 163

Şekil 4.22 FE-SEM analizi neticesinde Antor silindir yüzeyinde tespit edilen nano boyuttaki rGO nanopartikülü a) 50 µm ölçek b) 10 µm ölçek 164

Şekil 4.23 Ömür testi sonrası kesilen Antor motor silindirinin AFM altında incelenen yüzey pürüzlülük değerleri 165

Şekil 4.24 Motor testleri sonunda silindir kovanlarının Anabilim dalımızda bulunan şerit metal testere ile yüzeye zarar vermeden kesilmesi. 166

Şekil 4.25 Kesilen benzinli motor silindirinin Üst Ölü Nokta bölgelerinin optik mikroskop görüntüleri. 166

Şekil 4.26 Motor dinamometresinde 5W40 yağ ile test edilmiş Honda silindirin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi. 167

Şekil 4.27 Motor dinamometresinde rGO6 yağ ile test edilmiş Honda silindirin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi. 168

Şekil 4.28 Kesilen benzinli motor silindiri Üst Ölü Noktası'nda optik mikroskop ile tespit edilen grafen (rGO) nanopartikülü ve yüzey değerleri. 170

Şekil 4.29 5W40 yağ ile test edilen Honda silindir kovanının Ü.Ö.N (Üst Ölü Nokta'sındaki yüzey analizi) a) Optik Mikroskop, b) ve c) Elektron mikroskobu d) X-Ray e) Elementel analiz..... 171

Şekil 4.30 rGO6 yağ ile test edilen Honda silindir kovanının Ü.Ö.N (Üst Ölü Nokta'sındaki yüzey analizi) a) Optik Mikroskop, b) ve c) Elektron mikroskobu d) X-Ray e) Elementel analiz..... 171

Şekil 4.31 FE-SEM analizi neticesinde Honda silindir yüzeyinde tespit edilen nano boyuttaki rGO nanopartikülü a) 50 µm ölçek b) 10 µm ölçek..... 172

Şekil 4.32 Ömür testi sonrası kesilen Benzinli motor silindirinin AFM altında incelenen yüzey pürüzlülük değerleri 173

TABLO LİSTESİ

Tablo 1. 1 Tek Duvarlı ve Çok Duvarlı Karbon Nanotüplerin karşılaştırılması..... 37

Tablo 2. 1 Nanokatkı maddelerinin özellikleri. 45

Tablo 2.2 Farklı konsantrasyonlardaki rGO+Shell 5W40 (%50-%50wt) numunelerinin kütlece yüzdeleri. 49

Tablo 2.3 Farklı konsantrasyonlardaki SWCNTs+Shell 5W40 (%50 - %50wt) numunelerinin kütlece yüzdeleri. 50

Tablo 2.4 Farklı konsantrasyonlardaki (rGO+SWCNTs)+Shell 5W40 (%50 - %50wt) numunelerinin kütlece yüzdeleri. 50

Tablo 2.5 Tribometre deney parametreleri. 61

Tablo 2.6 Shell Helix Ultra 5W-40 sentetik motor yağının özellikleri. 62

Tablo 2.7 Yeni test edilmemiş 100 Cr6 bilyenin kimyasal bileşimi. 62

Tablo 2.8 Silindir malzemesinin (gri dökme demir) kimyasal analizi. 62

Tablo 2.9 İçten yanmalı motor deneyleri ve koşulları. 66

Tablo 3.1 5W40 motor yağına eklenen tüm TiO_2, GO, SWCNTs, MWCNTs, nBA ve BN (hexagonal) nanopartiküllerinin ortalama sürtünme katsayısı değer tablosu. 69

Tablo 3.2 Çelik bilye ve Sverker çelik silindir çifti kullanılarak yapılan tribometre test sonuçları. 70

Tablo 3.3 Test edilmemiş çelik bilye ve Sverker çelik silindirin optik mikroskop yüzey pürüzlülük değerleri. 74

Tablo 3.4 Tribometre testi optik mikroskop sonuçları. 75

Tablo 3.5 Tribometre test öncesi ve sonrası bilye ve silindirin optik mikroskop yüzey pürüzlülük değerleri. 80

Tablo 3.6 Bilye ve blok silindirde EDS tarafından ölçülen aşınma izlerinin elementel analizi. 83

Tablo 3. 7 Test öncesi bilyenin elementel analizi. 85

Tablo 3.8 Test öncesi parlatılmış benzinli motor silindiri optik mikroskop yüzey pürüzlülük değerleri. 88

Tablo 3.9 5W40 ve rGO6 ile parlatılmış Honda GX 270 motor silindir bloğu üzerinde test edilen bilyelerin aşınma izi çapları. 90

Tablo 3.10 5W40 ve rGO6 ile parlatılmış Honda GX 270 motor silindir bloğu üzerinde test edilen bilyelerin 2D ve 3D yüzey pürüzlülük değerleri. 97

Tablo 3.11 5W-40 ve rGO 6 motor yağı ile test edilen bilyenin FE-SEM elementel analiz değerleri (kütlesel). 98

Tablo 3.12 Honda GX270 silindir ile test edilen bilyenin 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu AFM yüzey pürüzlülük değerlerinin karşılaştırılması. 100

Tablo 3.13 5W40 ve rGO6 ile bilye altında test edilen parlatılmış Honda GX 270 motor silindir bloğunun maksimum ve minimum aşınma izi mesafeleri. 102

Tablo 3. 14 5W40 ve rGO6 ile çelik bilye altında test edilen parlatılmış Honda GX 270 motor silindir bloğunun 2D ve 3D yüzey pürüzlük değerleri. 109

Tablo 3.15 5W-40 ve rGO 6 motor yağı ile test edilen silindirin FE-SEM elementel analiz değerleri (kütlesel) 110

Tablo 3. 16 Benzinli motor silindirine ait 2 ve 3 boyutlu AFM yüzey pürüzlülük değerlerinin karşılaştırılması. 114

Tablo 3.17 5W40 ve rGO 6 ile yapılan tribometre testleri neticesinde elde edilen sürtünme katsayıları. 116

Tablo 3.18 Test öncesi parlatılmış Diesel motor silindiri optik mikroskop yüzey pürüzlülük değerleri. 119

Tablo 3.19 5W40 ve rGO6 ile parlatılmış motor silindiri üzerinde test edilen bilyelerin aşınma izi çapları. 121

Tablo 3.20 5W40 ve rGO6 içeren yağ ile parlatılmış Diesel motor silindir bloğu üzerinde test edilen bilyelerin 2D ve 3D yüzey pürüzlülük değerleri. 128

Tablo 3.21 5W40 ve rGO 6 ile yapılan test sonrası EDS analiz sonuçları 129

Tablo 3.22 Diesel motor silindiri ile test edilen bilyenin 2 ve 3 boyutlu AFM yüzey pürüzlülük değerlerinin karşılaştırılması. 131

Tablo 3.23 5W40 ve rGO6 ile çelik bilye altında test edilen parlatılmış Diesel motor silindirinin maksimum ve minimum aşınma izi genişliği. 132

Tablo 3.24 5W40 ve rGO6 ile test edilen parlatılmış Diesel motor silindirinin test öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülük değerleri. 140

Tablo 3.25 5W40 ve rGO6 ile test edilen parlatılmış Diesel motor silindirinin FE-SEM analizi elementel değerleri. 141

Tablo 3.26 Diesel motor silindirin test öncesi ve sonrası AFM ile ölçülen 2 ve 3 boyutlu yüzey pürüzlülük değerlerinin karşılaştırılması. 144

Tablo 3.27 5W40 ve rGO 6 ile yapılan tribometre testleri neticesinde elde edilen sürtünme katsayısı verileri. 146

Tablo 4.1 Diesel motorun 5W40 motor yağı ile yapılan performans verileri 148

Tablo 4.2 rGO6 eklenmiş motor yağı ile yapılan performans testleri verileri. 150

Tablo 4.3 5W40 ve rGO6 eklenmiş yağın Diesel motor performans testleri ortalama güç ve tork verileri. 152

Tablo 4.4 5W40 motor yağı ile yapılan benzinli motor performans testleri verileri ... 153

Tablo 4.5 rGO6 motor yağı ile yapılan benzinli motor performans testleri verileri 154

Tablo 4.6 5W40 ve rGO6 eklenmiş yağın benzinli motor performans testleri ortalama güç ve tork değerleri. 156

Tablo 4.7 Ömür testleri sonunda kesilerek yüzeyi optik mikroskop altında incelenen Antor Diesel Motor'a ait yüzey pürüzlülük değerleri. 160

Tablo 4.8 FE-SEM analizleri neticesinde Diesel motor silindir yüzeyi üzerinde ölçülen elemental analiz değerleri. 163

Tablo 4.9 Antor motor silindirinin 5W40 ve rGO6 testleri sonrası ölçülen AFM yüzey pürüzlülük değerlerinin karşılaştırılması. 165

Tablo 4.10 Ömür testleri sonunda kesilerek yüzeyi optik mikroskop altında incelenen Honda benzinli motora ait yüzey pürüzlülük değerleri..... 168

Tablo 4.11 FE-SEM ile ölçülen silindir yüzeyi elemental analiz değerleri. 171

Tablo 4.12 Ömür testi sonrası AFM ile incelenen benzinli motor silindir yüzeyinde meydana gelen yüzey pürüzlülük değerlerinin karşılaştırılması..... 173

ÖZET

Motor Yağına Eklenen Nanopartikül Katkı Maddelerinin Tribolojik Performanslarının Motor Aşınmasına Etkilerinin Deneysel Araştırılması

Selman DEMİRTAŞ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Programı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Emrullah Hakan KALELİ

Günümüzde nanopartiküllerin yağlama yağındaki tribolojik performanslarının etkilerinin araştırılması güncel bir konudur. Literatürde özellikle, son yıllarda nanopartiküllerin kimyasal, fiziksel ve morfolojik parametreleri üzerine çalışmalar başlatılmış olup, nanopartiküllerin içten yanmalı motorlarda sürtünme ve aşınma yönünden etkilerinin araştırılması, kayıpların azaltılması önem kazanmıştır. Genel olarak yapılan literatür araştırmalarında, çok çeşitli nanopartiküllerin yüksek avantajlı tribolojik özellikleri pim-disk veya pim-plaka gibi Tribometre sürtünme testleri ile ortaya konulmaya çalışılmış; ancak bunlar süspansiyon halinde kalmayıp dibe çökmüş ve gerçek motor testlerinde de süspansiyon halindeki avantajın incelenmediği tespit edilmiştir.

Bu çalışmada, içten yanmalı motorlarda kullanılan ve piyasada satılan ticari 5W40 tam sentetik motor yağına Titanyum Dioksit (TiO2), İndirgenmiş Grafen Oksit (rGO), Tek Duvarlı Karbon Nanotübler (SWCNTs), Çok Duvarlı Karbon Nanotübler (MWCNTs), Nano Borik Asit (nBA) ve Hegzagonal Bor Nitrür (HBN), nanopartikülleri eklenerek aşınma ve sürtünmeye olan etkileri incelenmiştir. Nanopartikül eklenmemiş motor yağı (5W40 referans yağ olarak kabul edilmiş) ve nanopartikül eklenmiş motor yağları öncelikle tribometrede sürtünme testine tabii tutulmuştur. Hassas tribometre vasıtasıyla

elde edilen bilgilerin MATLAB programında işlenmesi neticesinde her bir motor yağının zamana bağlı sürtünme katsayısı belirlenmiş, nanopartikül eklenmemiş (5W40 referans motor yağı) ve en düşük sürtünme katsayısını veren nanopartikül eklenmiş motor yağı, tez kapsamında belirlenen tek silindirli benzinli ve Diesel bir motorlara eklenerek performans ve ömür testine tabi tutulmuştur. Tüm bu testlerden sonra motorlar kesilerek yüzeyleri Dijital Optik Mikroskop/Yüzey Pürüzlülüğü, Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskopi (FESEM) ve Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) vasıtasıyla detaylı olarak incelenmiştir. Böylece nanopartikül eklenmiş ve eklenmemiş motor yağlarının hem tribometre hem de gerçek motor testlerinin gerçekleştirilmesi ile şimdiye kadar sadece tribometre testleri ile desteklenen literatür çalışmaları gerçek motor testleri ile doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Nanopartikül Katıklar, Motor Yağı, Motor Aşınması, Motor Performansı, Benzinli Motor, Diesel Motor

ABSTRACT

Experimental Investigation of the Tribological Performance of Nanoparticle Additives Added to Engine Oil on the Effects of Engine Wear

Selman DEMİRTAŞ

Department of Mechanical Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Emrullah Hakan KALELİ

Today, the investigation of the effects of the tribological performance of nanoparticles in lubricating oil is a current issue. In the literature, especially in recent years, studies on the chemical, physical and morphological parameters of nanoparticles have been started, and it has become important to investigate the effects of nanoparticles in internal combustion engines in terms of friction and wear, and to reduce losses. In literature researches, highly advantageous tribological properties of a wide variety of nanoparticles have been tried to be demonstrated by tribometer friction tests such as pin-disc or pin-plate; however, they did not remain in suspension, they collapsed and it was determined that the advantage in suspension was not examined in real engine tests.

In this study, the effects of Titanium Dioxide (TiO_2), Reduced Graphene Oxide (rGO), Single-Walled Carbon Nanotubes (SWCNTs), Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWCNTs), Nano Boric Acid (nBA) and Hexagonal Boron Nitride (hBN) on wear and friction were investigated by adding these nanoparticles to commercial 5W40 fully synthetic engine oil used in internal combustion engines. Engine oil without nanoparticles (5W40 is accepted as reference oil) and engine oils with nanoparticles were first subjected to friction test in a tribometer. As the result of processing the information in the MATLAB program obtained through the sensitive tribometer, the time-dependent friction coefficient

of each engine oil was determined, then, the engine oil without nanoparticles (5W40 reference engine oil) and nanoparticle added, which gave the lowest friction coefficient, was added to a single-cylinder gasoline and diesel engines determined within the scope of the thesis, subjected to performance and life testing testing. After all these tests, engines were cut and their surfaces were examined in detail by means of Digital Optical Microscope/Surface Roughness, Scanning Electron Microscope (SEM) or Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) and Atomic Force Microscope (AFM). Thus, by performing both tribometer and real engine tests of engine oils with and without nanoparticle added, literature studies that have been supported only by tribometer tests until now have been confirmed by real engine tests.

Keywords: Nanoparticle Additives, Engine Oil, Engine Wear, Engine Performance, Gasoline Engine, Diesel Engine

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Tribolojinin konularından biri olan sürtünme, yüzeyleri belli bir baskı altında temas halinde olan ve göreceli hareketli makina parçalarında aşınmaya neden olur. Makinalardaki hasarın büyük bölümü aşınma kaynaklıdır. Kuru sürtünmenin kaçınılmaz oldugu durumlarda makina elemanının ömrünün uzun olması için aşınma direnci yüksek malzemeler tercih edilir. Bunun yanında aşınmaya bağlı bir hasar meydana gelmeden önce bu durumun öngörülebilmesi ile alınacak önlemler ve yapılacak bakımlar ile parça ömrünün uzatılması söz konusudur. Aşınma hasarlarının öngörülmesi için aşınma deneylerine bağlı modeller üzerinden simülasyon çalışmaları yapılarak öngörü gerçekleştirmek mümkündür.

Motorlardaki sürtünme kayıpları Dr. Lang tarafından istatistiki araştırma ile belirlenmiştir. Dr. Lang'e göre (Daimler Benz) motorlarda yakıt enerjisinin %30'u egzoz gazları, %30'u silindir işi, %40'ı ise indike işe harcanmaktadır. Motorlarda mekanik kayıplar ise, indike işin yaklaşık %25'ini kapsamakta olup, toplam enerjinin %10'unu teşkil etmektedir. Dr. Lang'e göre sürtünme kayıpları, mekanik kayıpların yaklaşık %72.5'una denk gelmekle beraber, geri kalan ise yağ pompası, su pompası, soğutma fanı, hidrolik pompalar vs. gibi yardımcı organlar tarafından harcanmaktadır. Aşınmaların en çok meydana geldiği Üst Ölü Nokta civarında piston-segman ikilisinde kayıplar %50'leri bulmaktadır [1].

Yağlama sınır, karışık ve elastohidro-dinamik olmak üzere 3'e ayrılır [2]. Bir strok sırasında, çalışma koşullarına bağlı olarak strok boyunca farklı yağlama rejimleri oluşabilir. Sınır veya karışık yağlama rejimleri, strokun üst ve alt ölü merkezinin (TDC ve BDC) yakınında, hidrodinamik yağlama rejimi ise strokun ortasında meydana gelir [3]. Bununla birlikte, hidrodinamik sürtünme yüksek hız ve düşük yükleme koşullarında artar [4]. Segman toplam sürtünmesi, pürüz temas noktalarındaki (ÜÖN ve AÖN) sınır sürtünmesi ve yağlama maddesinin kopmasından kaynaklanan viskoz sürtünmeyi içerir. Yağ filmi yeterince ince olursa sınır yağlaması meydana gelebilir. Yük, yağlayıcı film tarafından değil, yüzey tepe noktaları üzerinden taşınır. Bu nedenle, nano-yağlayıcı katkı maddeleri, kayma yüzeylerini ayırmak için pürüzlü temas noktalarında bir tribofilm oluşturduğundan, sınır yağlama koşullarında oldukça

etkilidir [5],[6].

Sürtünmeyi kontrol etmenin en etkili yollarından biri sıvı yağlayıcı kullanmaktır. Sıvı yağlayıcılar, ya şiddetli veya daha sık metal-metal temaslarından kayan temas yüzeylerini önleyerek ya da sürtünme yüzeylerinde düşük kesme, yüksek dayanıklılığa sahip bir sınır filmi oluşturarak sürtünmeyi neredeyse ortadan kaldırır [7],[8]. Örneğin, kayma hızına ve diğer çalışma koşullarına bağlı olarak motor yağları, doğrudan doğruya metal-metale temas sıklığını azaltarak ve böylece sürtünme ve aşınmayı azaltarak, segmanların ve gömleklerin temas yüzeylerini etkin bir şekilde ayırabilir. Metal-metal teması durumunda, bu yağlardaki herhangi bir katkı maddesi, ek güvenlik sağlayan düşük kesmeli, yüksek düzeyde koruyucu bir sınır filmi oluşturabilir [7],[8]. Kısacası, düşük sürtünme, yakıt tasarrufu anlamına gelirken, daha az aşınma daha uzun dayanıklılık anlamına gelir [8],[9]. Sıvı yağlayıcılar sayesinde günümüz motorlarının ve diğer mekanik sistemlerin bileşenleri uzun süre güvenli ve sorunsuz bir şekilde çalıştırılabilmektedir.

Yağlama mekanizması; yağlayıcı molekülleri, malzeme yüzeyi ve çevre arasındaki fiziksel ve kimyasal etkileşimlerden kaynaklanmaktadır. Yağlama mekanizmasının geliştirilmesi için yağlayıcıya eklenen nanopartiküller; sahip oldukları yakıt ekonomisi potansiyeli ve düşük emisyon gibi önemli avantajlar sayesinde son yıllarda oldukça değer kazanmıştır. Normalde 100 nm'den küçük karakteristik boyutları, temas bölgesine girmelerini sağlamaktadır. Organik katkı maddeleri ile kıyaslandığında, yüksek sıcaklıklarda kararlı ısıl dengede kalması nanopartikülleri yağlayıcı katkı maddeleri olarak uygun kılmıştır. Dolayısı ile mekanik sistemlerde, tutarlı performans ve enerji tasarrufu için çevre dostu ve oldukça yüksek verimli yağlayıcılar talep edilmektedir [10].

Yağlama mekanizmasını etkileyen parametrelerden biri ve bu tezin de ana odak noktalarından biri olan yağlayıcı moleküllerin incelendiği bir çalışmada farklı performans düzeylerine sahip (mineral SAE 30, sentetik SAE 10W40 ve biyo-esaslı) motor ticari yağlarının eskimesi üzerine araştırmalar yapılmış olup bu çalışma sonucunda motor yağlarının eskimesinde basınç ve sıcaklığın kilit rolü olduğu tespit edilmiştir. Tek silindirli bir motosikletin laboratuvar ortamında yapılan deneylerinin sonuçlarını içeren bu çalışmada. motor yağının eskimesinin dinamik viskozite değerinde değişikliklere neden olduğu görülmüştür. Yapılan bu çalışmada motor yağının kullanım ömrü boyunca sıcaklık ve basınca bağlı viskozite değişimlerini değerlendirmek ve ölçülen değerlerin belirsizlik analizini yapmak amaçlanmıştır.

Literatür taramasına göre, araştırmalar, yağlama yağının tribolojik özelliklerini iyileştiren katkı maddelerini keşfetmeye odaklanmıştır. Bu katkı maddeleri; antioksidanlar, viskozite geliştiriciler, aşınma önleyici maddeler vb. gibi davranır. Katkı maddeleri, organik partiküllerden, elementlerden, doğada şekilli veya şekilsiz tanımlı bileşiklerden oluşur. Geçtiğimiz on yılda, nanopartiküller, yağlama yağının tribolojik özelliklerinde iyileşme için çok umut verici bulunmuştur.

Konvansiyonel yağlayıcı katkı maddelerine kıyasla nanopartikül katkılarının başlıca avantajları aşağıda belirtilmiştir:

1- Nanoparçacıklar genellikle oda sıcaklığında daha etkilidir.

2- Nanopartikül yüzeyinin iyi aktivasyonu.

3- Aşırı küçük boyutların ve yüzey alanının artması.

4- 100 nm'den küçük boyutlu nanopartiküller, akışkanlardan daha yüksek ısıl iletkenliğe sahiptir.

5- Nanopartiküller katı yağlayıcılar kadar mükemmel tribolojik performans sağlar [11].

Nanopartiküllerin, farklı şekil, boyut ve konsantrasyonunda, yağlama yağları için sürtünme katsayısının ve aşınmanın azalmasında farklı gelişmeler tespit edilmiştir. Nanopartiküllerin ağırlıkça % 0.01-1 oranında eklenmesi küçük aşınma izlerinde bile, yağın tribolojik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmektedir. Yağa eklenen nanopartiküllerin boyutları 10 nm ila 100 nm arasındadır [12].

Özellikle tez kapsamında TEM ölçümü yapılan rGO nanopartikülünün boyutu da 100 nm’den küçük olup literatürde yer alan makaleler çalışmamızı destekler mahiyettedir.

Motor yağındaki nanopartikül katkısının önemlerinden bir diğeri ise adhezyon aşınmasını önleyebilmek için iki yüzeyi birbirinden ayırmak ve nanopartiküllerin yükün bir büyük kısmını taşıyarak tribo ikilisi arasında yağ filminin daha ince ve karışık yağlama ya da sınır yağlama oluşturduğu zaman aşınma önleyici mekanizma olarak davranması şeklinde açıklanabilir. Böylece aşınma önleyici özelliklerinden kazanç sağlanır [13].

Nanopartiküllerin bahsedilen bu yüksek potansiyellerinden dolayı çoğu tasarımcı ve araştırmacı, sonunda otomotiv motorlarının daha iyi performans göstermesini sağlayacak şekilde içten yanmalı motorlarda nanotriboloji üzerine odaklanmış, bu da sürtünme güç kayıplarını, aşırı ısı oluşumunu ve temas yüzeylerinin aşınmasını en aza indirecek temel strateji olarak ortaya çıkmıştır. Otomotiv motorlarındaki güç kayıpları üretilen toplam enerjinin % 17 ile % 19'u arasında değişir. Segman takımı, toplam

sürtünme güç kayıplarına karşı önemli bir katkı sağlar. Yağlama yağlarının ve segman takımının tribolojik performansında bir iyileşme, motorlarda verim artışına ve yakıt ekonomisine yol açar, çünkü segman ve silindir gömleği arasındaki sürtünme, güç kayıplarının yaklaşık %40-50'sini oluşturur. Ayrıca, nano-yağlayıcıların kullanımıyla sürtünmenin kontrol edilmesi, aşınma seviyesinde bir azalmaya ve yağ değişimine ihtiyaç duyulan servis aralıklarında bir artışa yol açar. Bu da, en aza indirgenmiş bakım maliyetlerine dönüşür [6].

Otomobil motor endüstrisinde, yetersiz yağlama koşullarında mükemmel tribolojik performansı takip etmek için çeşitli yağ katkıları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür ticari yağ katkı maddelerinin sürtünmeyi ve / veya aşınmayı bir dereceye kadar azalttığı kanıtlanmış olsa da, yüksek SAPS (sülfürik kül, fosfor, sülfür) içeren konvansiyonel katkı maddelerinin kullanımı çevresel nedenlerden dolayı kaygıları arttırmıştır. Bu nedenlerden dolayı, araştırmacılar, nanopartiküllerin motorların tribolojik performansına olan katkısına odaklanmıştır. Li vd. (2018), MoS2 nanotüplerinin yağa ilave edilmesinin, sınır yağlama rejimi altındaki sürtünmeyi azaltabildiğini ve bu tür nano malzemenin mevcut kimyasal bazlı yağlama katkı maddelerinin yeni, motor yağı için fiziksel bazlı katkı maddesi yağlama teknolojisi ile potansiyel olarak değiştirilebileceğini önermiştir [14].

Nanopartiküllerin göreceli olarak daha büyük parçacıklara oranla kendi doğal geniş yüzey-hacim oranıyla kayması, nanopartikülleri oldukça ilgi çekici yapmaktadır. Bu yüksek yüzey alanları potansiyel olarak katalitik süreçleri ve ara yüzeyde tahrik olayını artırır. Nanopartiküller farklı baz sıvıların içinde dağıtıldıkları zaman, sıvıların tribolojik performansını ve büyük ölçüde ısıl iletkenliğini artırmaktadır. Genel olarak, nanopartikül içeren iki fazlı süspansiyon halindeki nanosıvılar, baz sıvılardan daha yüksek büyüklüklerde bir ısıl iletken kütleye sahiptir. Madeni yağ içinde nanopartiküllerin kullanılması, yük taşıma kapasitesi, aşınma önleme ve hareketli mekanik parçalar arasındaki sürtünmeyi azaltma gibi özelliklerinden dolayı yağların tribolojik özelliklerini geliştirmek için kullanılması öngörülmektedir [15].

Madeni yağlara nano katkı maddelerinin dahil edilmesi, yağlayıcıların verimliliğinin iyileştirilmesine yönelik önemli bir adım olarak görülse de, motor yağlarına rastgele bir nanomalzeme eklenmesi, tortuların birikmesine neden olabilir ve bu tür yığılmalar yerçekimi nedeniyle bile çökebilir [16],[17]. Nanomalzemeler arasındaki Van der Waals kuvvetleri itici olanlardan daha güçlü olduğunda ve Brownian hareketi çekimin üstesinden gelemediğinde agregasyon yani yığılma, dibe çökme gerçekleşir [6].

Yapılan çalışmalar nanopartiküllerin yağa eklenmesi durumunda arzulanan olumlu etkilerin görülmesi için nanopartiküllerin süspansiyon halinde kalmasını öngörmektedir.

Otomotiv motorlarında aşınma ve sürtünmenin en önemli sonuçlarından biri de yakıt verimliliği azalması ve makine parçalarının ömrünün kısalması, Sürtünme testleri için nanoyağlayıcılar sıklıkla kullanılsa da, viskoz sıvılarda bu nanopartiküllerin stabilitesi ve dağılma derecesi hakkında çok az şey bilinmektedir. Yüksek Gibbs enerjileri nedeniyle, kolloidal nanopartiküller ortam koşulları altında termodinamik olarak kararsızdır. Birincil nanopartiküller birbiriyle etkileşir ve zamanla çökeltilen nanoparçacık topaklaşır veya kümeler oluşturur. Özellikle motorun çalışması sırasında sert koşullar altında, aglomerasyon eğilimi artmaktadır, çünkü nanopartiküller kimyasal, mekanik ve ısıl yüke maruz kalmaktadır. Sonuç olarak, nanoyağlayıcılarda istenmeyen yaşlanma meydana gelebilir. Bununla birlikte, bu kolloidal nanopartiküllerin stabilitesi nadiren tartışılmaktadır çünkü mevcut araştırmalar temel olarak aşınma ve sürtünme testlerinden elde edilen uygulama ile ilgili sonuçlara odaklanmaktadır. Açıkça, yüksek bir kolloidal nanopartikül stabilitesi, sıvı içinde nanopartiküllerin iyi bir dağılımını gerektirir [18]. Nanomalzemelerin dispersiyonlarında aglomerasyon meydana geldiğinde, sedimantasyon hızlanırken, sürtünme performansı olumsuz yönde etkilenir [19],[20]. Bu nedenle, uzun süreli stabilite, nanopartikülü uzun bir depolama süresinden sonra çökmemesi ve aşınmış yüzeyler arasında ihmal edilebilir mekanik arıza (aşınma) sağlamak için yüksek verimli ve güvenilir nano yağlayıcıların formülasyonu için hala rekabet halinde devam etmektedir [6],[21].

Nanopartiküllerin aglomerasyon eğilimi oldukça fazla olup bu durum nanopartiküllerin yağlayıcı katkısı olarak kullanılmalarını büyük oranda kısıtlamaktadır [22]. Bu yüzden nanopartiküllerin yüzey modifikasyonu birincil derecede öneme sahiptir. Yapılan çalışmalarda modifiye edilmiş bazı nanopartiküllerin yağlayıcı içerisinde iyi bir dispersiyon kararlılığı sağladığı görülmüştür [23],[24],[25],[26],[27].

İçten yanmalı motorlardaki yağlama rejimleri 3 şekilde sınıflandırılabilir: Sınır, karışık ve hidrodinamik yağlama. Alt ve Üst Ölü Noktalarda piston ve silindir arasında meydana gelen yağlama rejimleri sınır veya karışık yağlamadır. Sınır yağlama harekete başlama, durma veya ağır işlemler esnasında meydana gelir [28],[3].

Kolloidal nanoparçacıklar, sürtünme ve aşınmayı etkileyen bir sınır filmi tabakası

oluşturmak için mekanik bir tutma mekanizması vasıtasıyla EHD (elastohidrodinamik) yağlamış temaslara nüfuz eder. Bu film katıdır ve film kalınlığı partikül çapından daha kalın olduğunda yüksek hızlarda yüzeyde yenilenemez. Bu nanopartiküller, yağ film kalınlığı partikül boyutundan daha küçük olduğunda, yağ film kalınlığına katkıda bulunarak sadece düşük hızlarda yuvarlanma ve kayma temaslarına etkili olur [29]. Askıdaki nanopartiküller sınır yağlamada sürtünme ve aşınma açısından etkili olmakta yağ filmi kalınlığına katkıda bulunmaktadır.

Tasarımcı ve araştırmacıları nanotribolojiye yönlendiren en önemli sebeplerden biri de otomotiv motorlarının performansını artıracak olan sürtünmeye bağlı güç kayıplarının, aşırı ısı üretiminin ve temas yüzeylerinin aşınmasının en aza indirilmesidir. Motor üzerinde yer alan piston ve segman ikilisi de toplam sürtünme gücü kaybının önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Araç motorlarındaki güç kaybı üretilen toplam gücün %17-19'u arasında değişmektedir [30]. Motor yağı ve piston-segman çiftinin tribolojik performansında yapılacak olan bir iyileştirme, motorun verimi ve yakıt ekonomisinde de iyileşme sağlayacaktır çünkü piston ve segman arasında meydana gelen sürtünme tüm sürtünme kayıplarının yaklaşık olarak %40-50'sini oluşturmaktadır [3],[31]. Sürtünmeyi nanoyağlayıcılarla kontrol etmek aşınmayı azaltacak olup yağ değişimi için gerekli olan servis aralıklarını artıracaktır. Bu da toplam maliyetin azalmasını sağlayacaktır [6].

Piston segmanlarının maruz kaldığı sürtünmenin incelendiği bir çalışmada turboşarjlı bir Diesel motorunda yağlama yağı özelliklerini (yağ tipi, viskozite, sıcaklık) incelemek için deneysel olarak doğrulanmış bir simülasyon kullanılmış, yağlama yağının mekanik sürtünmeyi ve dolayısıyla hız tepkisini, yakıt pompası dişli konumunu, yükleme için turboşarj çalışma noktasını nasıl etkilediği tespit edilmiştir. Özellikle düşük ortam koşullarında, yüksek yağ viskozitesi, motorun anlık tepkisini kötüleştiren sürtünme kayıplarında önemli bir artışa yol açar. Parametrik çalışma öncesinde, SAE 30 yağı ile çalışan, kararlı ve geçici koşullarda çalışan, altı silindirli, turboşarjlı bir Diesel motor üzerinde detaylı deneysel inceleme yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda yağ sıcaklığı ne kadar düşük ve derecesi ne kadar yüksekse kinematik viskozitesinin; dolayısıyla piston segmanları sürtünme kuvvetinin ve toplam sürtünme torkunun o kadar yüksek olduğu ortaya çıkmıştır [32],[33].

Nanopartiküllerin anılan bu yüksek potansiyelleri sebebiyle çeşitli metal oksitler yağlama yağı katkı maddesi olarak kullanılmıştır. TiO_2'nin de yer aldığı farklı nanopartiküllerin tribolojik özelliklerinin incelendiği bir çalışma, nanopartiküllerin

sürtünme yüzeyinde birikerek tabaka oluşturup baz yağın özelliklerini iyileştirebildiğini göstermektedir. Aynı zamanda, düşük ağırlıkta nanopartikül konsantrasyonu, ağırlıkça %2'nin altında, sürtünme ve aşınma davranışını iyileştirmek için yeterlidir. Bununla birlikte, çeşitli nanooksitler için, ağırlıkça % 0.5 optimum konsantrasyondur [34].

Farklı nanopartiküllerin tribolojik özelliklerinin incelendiği başka bir çalışmada ise SAE 10W30 yağ içerisine herhangi bir modifikasyon yapılmadan eklenen TiO_2, nanopartiküllerinin sürtünme ve aşınma özellikleri incelenmiştir. Yağ içerisine eklenen nanopartiküller boyut olarak 30-50 nm, konsantrasyon olarak da 0.1 wt% olarak belirlenmiştir. Testler, paslanmaz çelik plaka ve çelik bilya kullanılarak, 20N yük altında, 0.13 $m.s^{-1}$ lineer hıza sahip gitme gelme hareketi yapan bir tribometre ile yapılmıştır. 1 mL yağ kullanılarak sınır yağlama koşullarının sağlandığı deneyler oda sıcaklığında 2 saat süre ile yapılmıştır. Testler neticesinde TiO_2'nin sürtünme katsayısını motor yağına kıyasla %10 oranında düşürdüğü gözlemlenmiştir. Plaka yüzeyinde meydana gelen aşınmalar incelendiğinde TiO_2 nanopartiküllerinin aşınmayı %23,2 oranında azalttığı görülmüştür. Testlerde kullanılan nanopartiküllü yağlayıcının çok kısa süreli olarak süspansiyon halde durduğu ve uzun süreli stabilitesinin sağlanmadığı görülmüştür [35].

Literatür çalışmalarından da görüleceği üzere nanopartikül olarak TiO_2 'nin yaygın olarak kullanıldığı nanoyağlayıcının sürtünme katsayısının araştırıldığı bir çalışmada (bilya-disk) mikrotribometre kullanılarak deneyler yapılmıştır. Paslanmaz çelik bilya ve disklerin kullanıldığı bu çalışmada, 4 ml yağ damlatılarak testler gerçekleştirilmiştir. İki yüzey arasına yağlayıcı damlatıldıktan sonra gerçekleştirilen test 20 dakika sürmüştür. Testler neticesinde TiO_2 içermeyen baz yağ ile yapılan testin sürtünme katsayısı 0,15 olarak hesaplanırken TiO_2 içeren nanoyağlayıcılı testin sürtünme katsayısı 0,14 olarak hesaplanmıştır. Yağlayıcı olarak kullanılan bu karışımın stabilitesi hakkında ise bulguya varılamamıştır [4].

Titaniumdioksit (TiO_2) nanoparçacıklarının tribolojik davranışlarının incelendiği başka bir çalışmada ise TiO_2 nanoparçacıkları mineral bazlı çok dereceli motor yağında katkı maddesi olarak eklenmiş ve test edilmiştir. Pim-disk Tribometre kullanılarak yapılan aşınma ve sürtünme testlerinde %0.3, %0.4 ve %0.5 oranında nanopartikül içeren motor yağı farklı yükler altında test edilmiştir. Deneyler sonucunda, TiO_2 nanoparçacıklarının motor yağına eklenmesinin sürtünme katsayısını %86'lara varan oranlarda azalttığını ve dolayısıyla motor yağının yağlama

özelliklerini geliştirdiğini göstermiştir. Bu deney kapsamında test edilen TiO_2'nin süspansiyon halde tutulması kısa süreli olarak gerçekleştirilmiş olup bu konu hakkında kesin bulguların yer almadığı görülmüştür [36].

Nanopartikül olarak TiO_2'in incelendiği başka bir çalışmada ise Nano-TiO_2 eklenmiş yağlarla yapılan farklı çalışmalar incelenip derlenmiştir. Bu çalışmada TiO_2 tribolojik özellikleri bakımından ele alınmış ve yapılan farklı çalışmalarda elde edilen bulgular aşınma, sürtünme, nanopartikül boyutu yönünden incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında, TiO_2 nanopartiküllerinin eklenmiş olduğu kolza yağının mikropartikül eklenmiş yağa kıyasla sürtünme katsayısını %15.2; aşınma izini ise %11 oranında düşürdüğü tespit edilmiştir. Eklenen TiO_2 nanopartiküllerinin stabilitesinin testler için yeterli olmakla birlikte bu sürenin 80 saat ile sınırlı kaldığı görülmüştür [37],[38].

Tez kapsamında incelenen nanopartiküllerden biri olan TiO_2 nanopartikülleri ile ilgili yapılan çalışmalardan da görüleceği üzere TiO_2 nanopartikülünun uzun süreli dispersiyonu mümkün olmamış olup sadece tribometre testlerinde kullanılabilecek bir süre kadar stabil halde tutulmuştur. İncelenen çalışmalarda motor testlerinin yer almadığı görülmüştür.

Yağ katkısı olarak kullanılan nanopartiküllerden bir diğeri olan Hegzagonal Boron nitrit (Altıgen bor nitrür) (hBN) veya lamellar yapıda olan beyaz grafit olarak adlandırılan nanopartiküller, yağlama teknolojilerinde ilginç bir katkı maddesi haline gelmiştir. Bu nano boyutlu parçacığın, ısıl stabilitesini muhafaza etme ve motor bileşeni arasındaki aşınmayı azaltmada potansiyeli olup, performansı koruyabilen ve motor verimliliğini arttıran sürtünme düşürücü özelliğe sahiptir. Optimize edilmiş karışım ve stabilize edilmiş homojen yöntemle, bu hBN nanopartikülleri yağlayıcı moleküller arasında homojen bir şekilde tutunabilmektedir [39].

Yağ katkısı olarak yaygın şekilde kullanılan hBN ile ilgili yapılan çalışmalardan bir diğeri ise Çelik ve arkadaşlarının yağ katkı maddesi olarak nano hegzagonal bor nitrür (hBN) partiküllerini kullanarak yaptığı ve (hBN)'nin aşınma ve sürtünmeye etkilerini inceledikleri çalışmadır. 50-1000 nm ölçülerine sahip hBN tozları, bilye ile öğütme yöntemiyle küçültülerek SAE10W yağ içerisine eklenmiştir. Hacimsel olarak 0 ile %10 arasında değişen hBN içerikli 4 farklı yağlayıcı hazırlanmış olup aşınma testleri bilye-disk mekanizması ile test edilmiştir. Aşınma testleri DIN 5034 standartlarına göre yapılmış olup sıcaklık 20 °C'ye ayarlanmıştır. Aşınma testlerinde kayma hızı 2.5 cm/s, aşınma izi ise 6 mm olup tüm testlerde yük olarak 10 N yük kullanılmıştır. Hesaplanan Hertzian temas basıncı 2.93 GPa'dır. Sürtünme katsayısı ve

teğetsel kuvvetler 40 m'lik kayma mesafesi boyunca kaydedilmiş olup tüm testler 4er kez tekrar edilmiştir. Aşınan yüzeyler SEM ve EDS kullanılarak incelenmiştir. Yapılan testler neticesinde hBN içeren yağların sürtünme katsayısında %14.4; aşınmada ise %65'lik bir düşüş sağladığı görülmüştür. Yapılan bu çalışmada hBN nanopartikülü sadece sürtünme yönünden test edilmiş olup nanopartikülün uzun süreli süspansiyonu konusunda bir çalışmanın yer almadığı görülmüştür [40].

Bor malzemesi sadece hBN olarak değil, farklı türevleri ile nanokatkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bor içerikli bir bileşenin odağa alındığı bir çalışmada mineral baz yağın içerisine ağırlıkça %2 oranında BN ilave ederek segman-silindir tribometresinde baz yağa karşı test etmiştir. Çalışmanın sonucunda aşınma ve sürtünmenin azaltılmasında çok iyi sonuçlar vermesinden dolayı BN' nin yağlama yağı katkı maddesi olma açısından potansiyel bir aday olduğunu belirtmişlerdir [41]. Bor nitrür nanopartikülleri içeren yağlama yağı üzerine yapılan başka bir çalışmada ise yaklaşık olarak 120 nm çapa sahip ve tek bir şerit kalınlığı 30 nm olan BN nanopartikülleri kullanılmış ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. Yağın akışkan özellikleri bir akışölçer vasıtasıyla; aşınma ve sürtünme özellikleri ise tribometre vasıtasıyla ölçülmüştür. Nanopartiküllerin çözelti içinde askıda kalması için oleik asit kullanılmıştır. Yağlar kütlesel olarak %0.1, %0.5 ve %1 şeklinde hazırlanmış olup BN01, BN05 ve BN1 olarak adlandırılmışlardır. Yapılan tribotestler neticesinde BN01, BN05 ve BN1'in sürtünme katsayısını sırasıyla; %76,9, %53.8 ve %27.7 düşürdüğü gözlemlenmiştir. Test sonuçlarından da anlaşılacağı üzere BN nanopartikül konsantrasyonu arttıkça sürtünme katsayısı da artmıştır. Tribometre testlerinden sonra aşınma izi morfolojik analizleri atomik kuvvet mikroskobu ve taramalı elektron mikroskobu vasıtasıyla, aşınan yüzeylerdeki elementel analiz ise X-ray enerji dağılımı spektroskopisi ile yapılmış olup, bu analizler neticesinde çok az miktarda BN nanopartikülü içeren yağlayıcıların çok iyi tribolojik performans gösterebileceğini kanıtlamıştır. Tribolojik performanslarının iyi olmasının dışında BN nanopartiküllerinin 2 haftadan daha uzun süre stabilite gösterdiği belirtilmiştir [42].

Bor malzemesinin odağa alındığı bir diğer çalışmada ise parafin baz yağa laboratuvar ortamında sentezlenmiş azot içeren borat katkı maddesi ilave edilmiş ve bu nanopartiküllü yağ bilye disk tribometresinde 392 N yük altında test edilmiştir. Araştırmacılar yaptıkları XPS analizleri sonucunda yüzeylerde oluşan BN'nin borun (1s2 , 2s2 , 2p1), p orbitalindeki eksik elektron ile azot (1s2 , 2s2 , 2p3)'taki p orbitalindeki fazla elektron alışverişi sonucu oluştuğunu, azot içeren bor katkı

maddesinin iyi bir aşınma önleyici olduğunu belirtmişlerdir [43].

Bor nanopartikülü yaygın tribometre testlerinin dışında gerçek zamanlı saha testlerinde kullanılarak da test edilmiştir. Diesel jeneratörlerdeki aşınmaların incelendiği bir araştırmada 2 adet 50 Hz Diesel jeneratör kullanılmış olup jeneratörler maximum kapasitelerinin %80 (9 kw) %50 (6kW) ve %30'u (3kW) ile 5er saat çalıştırılmışlardır. Yapılan testler neticesinde borik asit katkı maddesi içeren (1:1000) Diesel jeneratörün diğer jeneratöre oranla %10 daha az yakıt harcadığı tespit edilmiştir.

Yine aynı çalışmada segman silindir temasını tespit etmek amacıyla düz bir yüzey üzerinde gitme gelme hareketi yapan bir silindir kullanılmıştır. 100°C altında yapılan testlerde borik asit katkısı 3 farklı şekilde temas ettirilmiştir.

1- Yüzeylere Tekrarlı sprey ile
2- Düz yüzeye borik asit birikimi ile
3- Yüzeylere Tekrarlı sprey + Düz yüzeye borik asit birikimi ile

Yapılan deneyler neticesinde en sabit sürtünme davranışı yüzeye az miktarda borik asitin tekrarlı püskürtülmesi metodu ile elde edilmiştir. Ortalama sürtünme 100 °C'de %20, oda sıcaklığında ise % 40 azalmıştır.

Oda sıcaklığında biriktirilmiş borik asit ise sürtünmeyi azaltıp yaklaşık olarak 0,07 seviyesinde sabit tutmaktadır. Borik asit spreyi sıkıldığında ise sürtünme katsayısı yaklaşık olarak 0,05 mertebesine düşmektedir ki bu da sürtünme katsayısının ilk haline oranla %50 azalması anlamına gelmektedir.

Aynı testler 100 °C ile yapıldığında ise başlangıçta 0,3-0,4 civarında sonuç vermekte olup bu sonuç referans yağa kıyasla oldukça yüksektir. Daha sonra bu değer yaklaşık olarak 0,12 mertebesine düşmekte (referans yağa kıyasla daha düşük) bu borik asit etkisi de bir kaç yüz çevrim sonra sona ermekte olup, sürtünme katsayısı tekrar referans yağı aşmaktadır. Bu değişimin yüzeydeki borik asit miktarı ile alakalı olduğu düşünülmekte olup optimum miktar tespit edilememiştir.

1000. çevrimden sonra sıkılan sprey ile sürtünme katsayısı değişkenlik göstermekte olup 0,10 ile 0,2 arasında salınım yapmıştır. Sonuç olarak sürtünme katsayısındaki düşüşlerin büyük kısmı oda sıcaklığındaki testlerde meydana gelmiştir. Bunun sebebi olarak, 100 °C'deki yüzeye püskürtülen borik asidin henüz yüzeye ulaşmadan buharlaşması olarak gösterilmektedir. Bu çalışmada da nanopartiküllerin uzun süreli stabilitesinin zayıf olduğu, tribotestlerde de sıcaklığa bağlı olarak stabilitenin değiştiği gözlemlenmiştir [44].

Bor içerikli nanopartiküllerden bir diğeri ise Borik Asittir. Borik Asit; lameler yapısı ile oldukça iyi tribolojik özelliklere sahiptir[45]. Borik asit, Bor Oksit'in su ile teması ile oluşmaktadır.

Nano-borik asit ile yapılan bir çalışmada kütlece %0.25, 0.5, 0.75 ve 1 olarak farklı konsantrasyonlarda sentezlenen nano-borik asit eklenmiş motor yağı gitme gelme hareketi yapan bir tribometre ile 30, 40 ve 50N yükler altında test edilmiştir. Yapılan testler neticesinde tribolojik özellikler bakımından optimum sonuçların %0.5 oranında nanoborik asit eklenmiş motor yağı ile elde edildiği görülmüştür. Nanopartiküllerin etkisini görmek için dispersanların kullanılmadığı bu çalışmada nano-borik asidin süspansiyon halinde tutulamadığı ve kısa süre içerisinde çökelmenin meydana geldiği tespit edilmiştir [45].

Optimum nanopartikül konsantrasyon miktarının araştırıldığı bir çalışmada ise farklı miktarda nBA nanopartikülleri 20W40 yağına eklenmiştir. Kütlece %0.5, 0.75 ve 1 şeklinde hazırlanan nano yağlayıcıların içerisine ayrıca yeterli miktarda oleic asit de eklenmiştir. Herhangi bir tribometre veya motor testinin yer almadığı bu çalışmada hazırlanan nanoyağlayıcılar UV-spektrometresi ile incelenmiş ve baz yağa kıyasla en Yüksek süspansiyon oranına sahip nanoborik asit konsantrasyonunun kütlece %0.75 nano boric asit eklenmiş motor yağı olduğu tespit edilmiştir [46].

nBA içeren yağ ile yapılan başka bir çalışmada ise yeni geliştirilen bir yöntem ile boyutları 50 nm ve 200 nm arasında değişen boric asit partiküllerinin eklendiği 5W40 yağının tribometre testleri ve nanopartiküllerin süspansiyon halde kalıp kalmadığı incelenmiştir. Turbiscan vasıtasıyla nanoyağlayıcıların stabilitesi incelenmiş ve geliştirilen bu yöntemin nanopartikülleri askıda tuttuğu görülmüştür. Elde edilen bu süspansiyon ile yapılan tribometre testleri neticesinde de 3N yük altında 100C sıcaklıkta gerçekleştirilen testlerde nBA içeren yağın baz yağa kıyasla daha düşük sürtünme katsayısına sahip olduğu görülmüştür [47].

Bor içerikli nanopartiküllerle yapılan çalışmalarda da yağlayıcı içinde uzun süreli dağılımı sağlamanın tam olarak gerçekleştirilemediği, kısa süreli olarak dispersiyon halde tutulan nanopartiküllerin belirli bir süre sonra çökelmeye uğradığı görülmüştür. Bilinen konvansiyonel nanopartiküllerin dışında günümüzde farklı nanopartiküllerin sentezlenmesi ile kullanımları da oldukça yaygınlanmıştır. Bu bağlamda, grafen ve türevleri, iyi bilinen kayganlıkları, termal kararlılıkları, olağanüstü elektriksel ve mekanik özellikleri ve neme ve oksijene karşı geçirgensizlik nedeniyle ideal katı veya koloidal sıvı yağlayıcı katkı maddeleri olarak kullanılabilirler [48],[49],[16],[50].

Araştırmacılar, oleic asit ve stearik asit yardımıyla farklı konsantrasyonda sentezledikleri homojen dağılımlı ve kararlı yapıdaki Grafen içeren yağı 4 bilyalı aşınma cihazı ile teste tabi tutmuşlardır. Bu testler 392 N yük altında, farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. 500SN referans yağ ve kütlece %0,30, %0,35, %0,40 ve %%0,50 oranında Grafen eklenmiş 500SN yağla yapılan 4 bilye testlerinde bütün sıcaklık ve konsantrasyon durumlarında Grafen eklenmiş yağın referans yağa kıyasla daha düşük sürtünme katsayısına sahip olduğu, en düşük sürtünme katsayısının ise %0,035 oranında Gr içeren yağ ile 25C'de yapılan test olduğu, bu testteki sürtünme katsayısının referans yağa kıyasla %40,8 daha düşük çıktığı tespit edilmiştir. Yine yapılan testler neticesinde sıcaklık arttıkça sürtünme katsayısının da arttığı, bu artışın istisnasız olarak bütün konsantrasyonlarda gözlemlendiği tespit edilmiştir. Tribometre testlerinden sonra yapılan yüzey incelemelerinde sıcaklık artışının grafenin aşınma ve sürtünme önleyici özelliğini azaltırken sıcaklığa karşı direncini de zayıflattığı görülmüştür [51].

Grafen ile ilgili yapılan çalışmalardan bir diğerinde ise grafen bazlı organik katkı maddeleri, sürtünme metal yüzeyi ile tribokimyasal reaksiyon sağlayacak organik madde kullanılarak grafen yüzey modifikasyonu ile hazırlanmıştır. Deneyler, ağırlıkça % 0.01 katkı kullanarak baz yağ üzerinde gerçekleştirilmiştir. Tribolojik testler, oda sıcaklığında dört bilya test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve aşınmış yüzeylerin morfolojisi, Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) kullanılarak karakterize edilmiştir. Deneysel sonuçlar, hiçbir katkı içermeyen baz yağa kıyasla sürtünmede %16 ve aşınmada %30 azalma meydana geldiğini göstermiştir [52].

Motor yağı, dişli yağı ve soğutucu nano-yağlayıcılar gibi temel uygulamalarda kullanılan nano-yağlayıcılar üzerine yapılan son çalışmaların incelendiği bir çalışmada, belirli nano-yağlayıcıların motor aşınmaları, soğuk çalıştırma hasarları, enerji tasarrufu vb. üzerindeki etkileri araştırılmış, tribolojik ve ısıl verim açısından maksimum fayda sağlayacak uygun nanopartikül katkı maddeleri tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu nedenle, yapılan testler ile nanoparçacık tipinin, nanoyağlayıcıların tribolojik, termal ve reolojik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan testler sonucunda, Gr içeren nanoyağlayıcının yakıt tüketimini (%17) ve emisyon salınımını (%5,42) azalttığı tespit edilmiştir. Yağlayıcıların aşınma, sürtünme, emisyon ve Yakıt tüketimi açısından incelendiği bu çalışmada nanopartiküllerin süspansiyon halinde tutulup tutulmadığı konusunda bir inceleme yapılmamıştır [53].

Ali ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Cu ve Gr nanopartiküllerini birlikte içeren motor yağını sürtünme katsayısı, aşınma oranı ve yüzey pürüzlülüğü yönünden referans yağla (5W-30) kıyaslamıştır. Tribometre testlerinde sırasıyla 320 ve 413 Vickers sertliğine sahip segman ve silindirin kullanıldığı bu çalışmada farklı yük ve kayma hızlarında, farklı yoğunlukta nanopartikül içeren yağlarla test yapılmıştır. 0.03, 0.2, 0.4, ve 0.6 wt% yoğunlukta hibrid nanopartikülleri içeren yağlarla, 216N ve 0,25 m/s kayma hızında yapılan tribotestler neticesinde nanopartikül içeren yağların tüm testlerde referans yağa kıyasla daha düşük sürtünme katsayısına sahip olduğu belirlenmiştir. Yapılan testler neticesinde en düşük sürtünme katsayısının %0,4 yoğunluktaki nano-yağlayıcı olduğu görülmüştür. Farklı yük ve kayma hızlarında yapılan testler neticesinde kütlece %0,4 yoğunluktaki Cu/ Gr içeren nanopartiküllü yağların referans yağa kıyasla sürtünme katsayısını 26.5%– 32.6% aralıklarında düşürdüğü tespit edilmiştir. Yine aynı şekilde incelenen hybrid nanopartikül içeren nano- yağlayıcının segman ve silindirde meydana gelen aşınma oranlarını sırasıyla %13-20 ve %25-30 oranında düşürdüğü hesaplanmıştır. Tribolojik özellikleri bakımından detaylı olarak incelenen nanopartikülün stabilite yönünden her ne kadar iyi olsa da uzun süreli süspansiyon sağlanamadığı belirtilmiştir [54].

Doktora tezinin temel konusu ile benzerlik gösteren bir çalışmada ise piston segman çiftinde Gr nanoyağlayıcı kullanarak oluşan aşınma ve sürtünme önleme mekanizmaları standart bir motor yağına (5W30) kıyasla incelenmiş ve aşınan yüzeylerde meydana gelen tribo-kimyasal film tabakasının oluşumu ve morfolojisi FE-SEM, EDS, 3D yüzey profilometre, XPS ve Raman spektroskopi testleri ile detaylandırılmıştır. Deneyler için 4 adet Gr katkılı yağ numunesi (0.03, 0.2, 0.4 ve 0.6 wt.%) hazırlanmıştır. Grafen'in yağ içinde topaklaşıp daha sonra çökmesini önlemek için sürfaktan olarak oleik asit kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler 413 VH sertlikteki silindir yüzey ve 320 VH sertliğindeki segman ile, oda sıcaklığında, 0,154 – 0,6 m/s arasında değişen hızlarda, 90-368 N arasında değişen temas yükleri altında 3 kez tekrarlı şekilde test edilmiştir. Yine aynı şekilde hazırlanan numuneler gerçek motor testine tabi tutulmuştur. Yapılan tüm testler neticesinde standart referans yağa kıyasla en düşük sürtünme katsayısını 0.4 wt oranındaki yağın verdiği görülmüştür. Bu durumun, yüzeyin bu orandaki Gr'e doyduğu ve daha fazla katı katkı maddesi içeremeyeceğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapılan testler neticesinde, Gr katkılı yağın sınır yağlama koşullarında sürtünmeyi ve aşınmayı sırasıyla %29-35 ve %22-29 oranında azalttığı görülmüştür. Gr katkılı yağın kullanıldığı motor testlerinde

ise yakıt tüketiminin %17; egzoz emisyonlarının ise %2,79-5,42 oranında azaldığı görülmüştür. Gr katkılı yağın dispersiyonu için daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulduğu belirtilen bu çalışmada Gr'in kısa süreli olarak askıda tutulabildiği, zaman geçtikçe topaklaşma ve çökelmenin görülebileceği belirtilmiştir [55].

Yağlama yağına eklenen bir diğer nanokatkı malzemesi olan karbon nanotüpler (CNTs) sahip oldukları fiziksel ve kimyasal özelliklerle oldukça dikkat çekmektedirler. CNTs, çelikten 60 kat daha güçlü olup, bakırdan daha yüksek elektriksel iletkenliğe sahiptirler. Bu özellikleri karbon nanotüpleri yağlayıcı katkısı olarak da elverişli hale getirmektedir. Tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüpler karşılaştırıldığında, tek duvarlı karbon nanotüplerin yağ içinde dağılım probleminden dolayı çok duvarlı karbon nanotüplerin yağlayıcı katkısı olmaya daha elverişli olduğu tespit edilmiştir. Tablo 1.1'de tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüpler karşılaştırılmıştır [56].

Tablo 1. 1 Tek Duvarlı ve Çok Duvarlı Karbon Nanotüplerin karşılaştırılması

SWCNT	**MWCNT**
Tek katmandan yapılırlar	Çok katmanlı bir yapıya sahiptirler
Üretimi için katalizöre ihtiyaç vardır	Üretimi için katalizöre ihtiyaç yoktur
Toplu üretimi zordur	Toplu üretimi kolaydır
Saflığı düşüktür	Saflığı yüksektir
Üretimi esnasında kusur meydana gelme ihtimali yüksektir	Üretimi esnasında kusur meydana gelme ihtimali düşüktür
Çözelti içinde düşük artış	Çözelti içinde yüksek artış
Kolay karakterizasyon	Çok zor karakterizasyon
Kolay büküm	Oldukça zor büküm

CNT'lerin morfolojik ve tribolojik özelliklerini daha iyi anlamak için yapılan bir çalışmada araştırmacılar, segman ile silindir gömleği arasındaki ayrıntılı etkileşimleri anlamak için çeşitli hareket modelleri geliştirmiş ve iyileştirmişlerdir. PRCL (segman ve silindir kovanı) tribosisteminin sürtünmesini ve aşınmasını azaltmak için, örneğin yüzey modifikasyonu, yağlamanın iyileştirmesi ve mekanik tasarım için çeşitli yöntemler önerilmiştir. Zhang vd. (2017) yaptıkları çalışmada karbon nanotüplerin, kuru ve yağlı koşullar altında çalışan bir PRCL sisteminin tribolojik performansı

üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Kuru sürtünme koşullarında, bir PRCL sistemine CNT'lerin eklenmesinin sürtünme ve aşınmada büyük bir azalma sağlayabileceği tespit edilmiştir. SEM ve EDS analizlerinde, CNT'lerin temas yüzeylerini kaplayan bir karbon filmi oluşturduğu, CNT'lerin düşük kesme özelliğinden dolayı sürtünme katsayısının, CNT'siz numunelere göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Kuru sürtünme altında CNT'lerin etki süresinin sınırlı olduğu, CNT içeriğindeki artışla sürtünme katsayısının azalacağı tespit edilmiştir. Kuru sürtünme altındaki aşınma mekanizması esas olarak adhezyon aşınmasıdır. Yağlanmış koşullar altında, yağlayıcıya CNT'lerin eklenmesi sürtünme katsayısını artırmıştır. Bunun nedeni, CNT'lerin yağlayıcıda tanecikler gibi davranarak aşındırıcı aşınmayı ve sürtünmeyi artırması olabilir [57].

CNT'ler aşınma ve sürtünmeye etkileri dışında motordaki hareketli parçalardan ısıyı taşıyarak soğutma görevi de görür. CNT'ler, tıpkı diğer nanopartiküller gibi ısı transferi özelliklerinden dolayı da motor yağında katkı olarak kullanılmaktır. Dinesh vd., motor yağı içerisine Çok Duvarlı Karbon Nanotübler (MWCNTs - Multiwalled Carbon Nanotubes) nano partikül katkıları ekleyerek Pin-Disk Tribometresinde test etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar, nano partiküllerin motor yağına yayılımı ile kayda değer bir iyileşmenin olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, ileriki çalışmalar için içten yanmalı motorların işletme şartları altında eskime testlerinin gerçekleştirilmesini teşvik etmektedir [58].

Araştırmacılar tarafından katkı maddesi olarak yaygın şekilde test edilen CNT'lerden bir diğeri olan SWCNTlerin yağlayıcının viskozitesine olan etkilerinin incelendiği bir çalışmada yarıçapları 2 nm, uzunlukları 10-15 μm arasında değişmekte olan nanotüpler kullanılmıştır. Sürfaktan kullanılmayan bu deneyde oldukça iyi bir süspansiyon karışım hazırlanmıştır. Yapılan bu çalışmada kütlesel olarak %0.01-0.2 SWCNTs içeren yağlama yağı ile 25 °C-100 °C arasında test yapılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde yağlayıcının kinematik viskozitesinin sıcaklığın azalmasıyla arttığı ve SWCNT nanopartikül konsantrasyonu artmasıyla da arttığı gözlemlenmiştir. Ağırlıkça %0.2 oranında SWCNT içeren yağlayıcının viskozite indeksinin %32.94'lere ulaştığı görülmüştür [59].

Yağlama yağındaki etkisi sıklıkla incelenen nanopartiküllerden Çok Duvarlı Karbon Nanotüp (MWCNTs) ile yapılan bir çalışmada dişli yağında yer alan MWCNTs nanopartikül boyutlarının aşınmaya etkisi incelenmiştir. Bilyeli öğütme yöntemiyle elde edilen ve dişli yağında kullanılan çok duvarlı karbon nanotüplerin boyutları ve

yapısı elektron mikroskobu ve Raman spektroskopisi ile belirlenmiştir. Kütlesel olarak %0.5 çok duvarlı karbon nanotüplerin yağ içindeki dağılımı ışık saçılım tekniği ile ölçülmüştür. Yağların aşınma, sürtünme ve basınç özellikleri ise dört bilye test cihazı ile yapılmıştır. Yapılan testler neticesinde; bilye ile öğütme neticesinde elde edilen MWCNT'lerin yağlayıcı içinde 60 günden fazla sabit kalabileceği, Raman spektroskopi sonuçlarına göre 10 saate kadar yapılan bilyeli öğütme işleminin MWCNT yüzeyine zarar vermediği fakat 20 saatlik öğütme işleminin zarar verebileceği, 1 ila 3 mikron aralığında optimum uzunluktaki MWCNTs içeren yağlayıcı en iyi sonuçları verebilirken, iyi süspansiyon oluşturmalarına rağmen kusurların oluşması nedeniyle çok kısa MWCNT'lerin en iyi performansı veremeyebileceği tespit edilmiştir [60].

CNT'ler üzerine yapılan literatür araştırmasında da uzun süreli stabilitenin tam olarak sağlanamadığı, yapılan deneylerin çoğunda kısa süreli stabilite sağlandığı, dolayısıyla testlerin tribometre testleri ile sınırlı kaldığı, motor testlerinin gerçekleştirilemediği görülmüştür.

Tribolojik özellikleri bakımından yaygın olarak incelenen bir diğer nanokatkı maddesi ise Grafen Oksittir (GO) [61],[62]. Yapılan bir çalışmada grafitten, grafen oksit sentezlenmiş, grafen oksit ile baz yağ ve grafen oksit ile tam olarak formüle edilmiş yağ ihtiva eden karışımlar yapılmıştır. Araştırmacılar bu karışımları bilye-plaka tribometresinde test edip test sonucunda grafen oksitin baz yağ ile pozitif olarak etkileştiğini, yüzeyde sürtünme katsayısını ve aşınmayı düşürdüğü sonucuna varmışlardır [63].

Endüstriyel anlamda üretimi zor ve karmaşık olan grafenin, sentezlerinden biri olan GO'in üretimi de yapılan çalışmaların konuları arasındadır. Yapılan bir çalışmada araştırmacılar GO nanoparçacıklarının mineral yağlama yağına aktarımı için kimyasal olmayan, kolay ve hızlı bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntemde ilk olarak Hummer metoduna göre sentezlenmiş GO nanoparçacıklarından oluşan 10 mL'lik 0.1 mg/mL GO – su karışımına 3 mL ethanol eklenmiştir. Daha sonra bu karışıma %0.5 oranında oleylamine içeren 10 mL'lik mineral yağ eklenmiş ve 10 saniye boyunca elle çalkalanmıştır. 20 saniyelik beklemenin ardından GO içeren Mineral yağ ayırma hunisi yardımıyla su fazından ayrıştırılır. Son olarak, bu solüsyonda yer alan fazla ethanolün de buharlaştırılmasıyla GO içeren mineral yağ eldesi sağlanmış olur. GO'in yağ içerisindeki dağılımını iyileştirmek adına 30 dakikalık ultrasonik karıştırma uygulanmıştır. Bu karışımda, GO nanoparçacıklarının en az 1 hafta boyunca stabil

durduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen bu GO içerikli yağ ve GO içermeyen mineral yağın 50N yük altında yapılan tribometre testi neticesinde GO içeren yağın sürtünme katsayısını %72 oranında düşürdüğü görülmüştür. Yine aynı şekilde, tribometre testleri sonrasında numuneler üzerinde yapılan yüzey analizleri neticesinde de GO içeren yağın, içermeyen yağa kıyasla yüzeylerde aşınmaya karşı daha yüksek oranda koruyuculuk sağladığı görülmüştür [64].

GO'in sentezlenmesi kadar stabil ve kolloidal halde tutulması da araştırmacıların yoğunlaştığı konulardan biridir. Bu konuda yapılan bir çalışmada araştırmacılar %0,5, %1, %1,5 ve %2 mg/mL konsantrasyonlarında hazırladıkları GO eklenmiş yağları çeşitli kimyasal aşamalardan sonra 30 gün stabil halde duracak şekilde geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri bu yağları, yağ banyosu altında ball-on-disc tribometrede ve tek silindirli Diesel motor ile test etmişlerdir. Yapılan tribometre testleri neticesinde sınır, karışık ve hidrodinamik yağlama koşulları altında tüm konsantrasyonların sürtünme katsayısının baz yağ olan 10W40 yağa kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür. Sınır yağlama şartları altında en düşük sürtünme katsayısı 1.0 mg/mL GO nanoparçacıklarını içeren yağda gözlenirken, karışık ve hidrodinamik yağlama şartlarında ise bu yağ 1.5 mg/mL içeren yağ ile yapılan testlerde görülmektedir. Gerçek bir motordaki temel komponentlerin dinamik yük şartları altında çalıştığı da göz önünde bulundurulduğunda motor testleri için en uygun yağın 1.5 mg/mL konsantrasyondaki yağ olduğuna karar verilmiştir. Yine aynı şekilde motor testleri neticesinde de GO içeren yağ ile yapılan testlerde motor torkunda %6'lık bir artış gözlemlendiği, mekanik verimin %2.4 oranında arttığı, frenleme güç ve momentinin ise tüm motor hızlarında ortalama olarak %1.1 oranında arttığı gözlemlenmiştir [65]. GO'in detaylı olarak test edildiği bu çalışmada olumlu sonuçlar elde edilmiş olup, tezde bu çalışmadan farklı olarak benzinli motorlardaki etkinin de incelenecek olması, rGO eklenmiş yağın 30 günden daha uzun süren stabilitesi ile bu çalışmadan ayrışmaktadır.

GO ile ilgili yapılan çalışmalar genelde baz yağa nanopartikül katılarak yapılan tribometre çalışmalarından oluşmaktadır. Buna benzer olarak yapılan bir çalışmada SN150 yağ numuneleri arasında ağırlıkça %0.1 GO ve SN150 baz yağı ile yapılan bir karşılaştırmada, grafen nanopartikülleri ile numunenin sürtünme katsayısının azalmasının dikkate değer olduğunu göstermektedir. Özellikle, grafen oksitin mevcudiyeti, sınır, karışık ve EHL rejiminde bilya aşınma izi çapının sırasıyla % 12, % 27 ve % 30 oranında azaltılmasına olanak sağlamıştır. Ağırlıkça % 0.1'lik GO

konsantrasyonunun, inorganik nanokatıklar ve karbon nanotüpler için mevcut olandan çok daha düşük olup ve oleik asitle modifiye edilmiş grafenin kullanıldığı önceki çalışmalarla uyumlu olduğu tespit edilmiştir. GO'in bir dispersan katkısıyla askıda tutulduğu bu çalışmada uzun süreli stabilite hakkında detay verilmemiştir [66].
Literatür çalışmalarından da görüleceği üzere grafen; üzerinde olukça yoğun çalışma yapılan nanopartiküllerden biridir. Kimyasal olarak inert olan grafenin yüksek mukavemete ve pürüzsüz yüzeyinde iyi bir kayma kabiliyetine sahip olması da tribolojik olarak grafeni ilgi çekici kılmaktadır [67]. Ayrıca yapılan çalışmalarda grafenin mekanik özellik bakımından da en sağlam malzemelerden biri olduğu kanıtlanmıştır[48],[68]. Grafenin ayrıca sıvı ve gazlara karşı geçirimsiz olduğu, böylece genellikle sürtünme yüzeylerinde daha fazla hasara neden olan aşındırıcı ve oksidatif süreçleri yavaşlattığı tespit edilmiştir. Ancak yapılan çalışmalar, grafen partiküllerinin yağlayıcı içinde yüksek oranda çöktüğünü ve süspansiyon halde tutulamadığını göstermiştir. Bu nedenle grafenin sınırlı olarak kullanılmasına yol açacak bu olumsuzluk, bazı kimyasal modifikasyon işlemleri uygulanarak aşılmaya çalışılmıştır. Son yıllarda GO'i kimyasal prosesler vasıtasıyla modifiye etmek amacıyla çok sayıda çalışma yapılmıştır. Nurul Athirah Ismail ve Samira Bagheri yaptıkları çalışmada GO'i çeşitli kimyasal proseslerle modifiye etmiş, referans yağ ve rGO içeren yağ ile yaptıkları tribometre testleri neticesinde indirgenmiş grafen oksit'in baz yağa kıyasla sürtünme ve aşınmada sırasıyla %16 ve %24'lük azalma sağladığını tespit etmişlerdir [69].

GO nanopartikülüne kıyasla daha yüksek C/O oranına sahip olan rGO nanopartikülü de motor yağlarında test edilen grafen sentezi nanopartiküllerinden bir diğeri olup yapı olarak da grafene en yakın grafen türevi olarak kabul edilmektedir [70],[71],[72],[73]. İndirgenmiş grafen oksit (rGO) katkılarının yağlama ve aşınma özelliklerinin incelendiği bir çalışmada yağ içerisindeki rGO katkılarının konsantrasyonuna vurgu yapan araştırmacılar, çok düşük konsantrasyonda yağlamanın iyi olmayacağını, yüksek konsantrasyonda ise rGO parçacıklarının yağ içerisinde topaklanacağını ve yağlama etkisi gösteremeyeceğini belirtmişlerdir. Fakat optimum konsantrasyonda ise sürtünme katsayısının ve aşınmanın, katkısız yağa oranla sırasıyla %70 ve %50 oranında azalacağını belirtmişlerdir. Yapılan tribometre testleri neticesinde polyethylene glycol içerisindeki optimum rGO konsantrasyonun 0.2 $mg.mL^{-1}$ olduğu, bu konsantrasyonda sürtünme katsayısının 0.06 olduğu tespit edilmiştir. Bununla

beraber yüksek temas basıncında rGO katkılarının enerji verimliliğinin arttığı, bunun düşük kayma mukavemetli sınır filmi oluşumu yoluyla polyethylene glycol içinde dağılan grafenin etkili kesilmesi ile ilgili olduğu belirtilmiştir [17].

GO'in indirgenerek rGO'e dönüştürülmesi için oksijen tutucu olarak hidrazin monohidrat, dispersan olarak ise oktadesilamin'in kullanıldığı bir çalışmada farklı rGO konsantrasyonlarının yer aldığı nanoyağlayıcı ile tribotestler gerçekleştirilmiştir. 0,025 mg/mL'lik artışlarla 0'dan 0,125 mg/mL'ye varan farklı konsantrasyonlardaki motor yağları ile 2 haftadan uzun süreli olarak süspansiyonların elde edilemediği görülmüştür. Yapılan testler neticesinde en düşük sürtünme katsayısının 0,075 mg/mL'lik nano yağlayıcı ile elde edildiği, bu yüzden tribolojik işlemler için en uygun konsantrasyonun 0,075 mg/mL olarak kabul edilmesi gerektiği belirtilmiştir [74].

Yukarıda kısaca özetlenen literatür çalışmalarından da görüleceği üzere nanopartikül içeren yağlarla ilgili çok fazla çalışma yapılmakla beraber çalışmaların çoğunda ya çökelme gözlendiği ya da kısa süreli süspansiyonun gerçekleştirilebildiği, nanopartiküllerle ilgili yapılan testlerin tribometre testleri ile sınırlı kaldığı, yüzey incelemelerinin sınırlı şekilde yapıldığı, motor testleri ve motor testi sonrası yüzey analizlerini de içeren çalışmaların olmadığı görülmüştür. Bu bağlamda, tezde kapsamında gerçekleştirilen uzun süreli süspansiyon, tribometre testleri ve testler sonrası detaylı yüzey analizleri ile benzinli ve Diesel motorlarda ayrı ayrı olmak üzere performans ve ömür testleri ve test sonrası motor yüzey analizlerinin olduğu bir çalışmanın literatürde yer almadığı görülmüştür.

1.2 Tezin Amacı ve Özgünlüğü

Bu tezin temel amacı, sentetik bir motor yağı olan 5W40 motor yağına eklenen farklı nanopartikül katkı maddelerinin aşınma ve sürtünmeye etkisini hem teorik hem de testler yoluyla analiz etmek ve incelemektir. Aynı zamanda nanopartikül katkı maddesinin farklı kimyasal müdahaleler ile yağ içerisinde süspansiyon halde tutulması da tezin gerçekleştirilmesi hedeflenen amaçlarındandır. Yapılan literatür araştırmasında farklı nanopartiküllerle yapılan deneylere sıklıkla rastlansa da uzun süreli stabilitenin sağlandığı, süspansyion haldeki motor yağı ile tribometre ve motor testlerinin yapılarak bu testlerin birbirini doğruladığı, tribometre ve motor testlerinden önce ve sonra yüzey analizlerinin yer aldığı ve ve bu analizler ile testlerin birbirini doğruladığı bir çalışmanın yer almadığı görülmüştür. Yapılan testler neticesinde, hem süspansiyon halde tutulan hem de en düşük sürtünme katsayısına sahip nanopartikül

katkılı motor yağı ile gerçekleştirilen motor testi neticesinde motorda meydana gelen aşınma türleri ve bunların hangi noktada etkili olduğu ve motora yaygın etkileri belirlenmiştir.

1.3 Hipotez

Birbirine sürtünen iki maddenin arasında yer alan motor yağları; aşınma, sürtünme gibi motor üzerinde yıkıcı etkiye sahip durumların azaltılmasında önemli etkiye sahiptir. Motor yağına eklenen farklı boyut ve hacimdeki katkı maddeleri, sahip oldukları kimyasal ve fiziksel özellikler ile motor yağının bu kritik görevinde destekleyici bir rol üstlenmektedir. Literatür araştırmaları ile tespit edilen nanopartikül katkı maddeleri, gelişmiş tribolojik özellikleri ile motor yağının özelliklerini geliştirerek motordaki aşınma ve sürtünmeyi azaltarak motor ömrünü uzatmaktadır. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen testler ile de nanopartikül katkılı motor yağlarının aşınma ve sürtünmeyi azaltarak genel anlamda motor ömrüne etkisi detaylı olarak irdelenmiştir.

2
DENEYSEL ÇALIŞMA

Doktora tezi kapsamında hedeflenen nihai amaca ulaşmak için izlenecek yöntemler 2 aşamada gerçekleşecektir: Bunlarda ilki Tribometre Testleri, ikincisi ise Motor Testleridir. Yapılması hedeflenen motor testleri Benzinli ve Diesel, tek silindirli motorlarda gerçekleştirilecek olup, Diesel motor olarak Anadolu Motor grubundan Antor 6 LD 400 Diesel motoru seçilmiştir. Motorun kovanı ıslak kovan olup sökülebilir ve değiştirilebilir niteliktedir. Benzinli motor olarak seçilen motor ise Honda GX 270 motor olup motor silindiri monoblok formundadır.

2.1 Deneysel Çalışma Hazırlığı

Literatür çalışmaları neticesinde aşınmayı azalttığı tespit edilen TiO_2, GO, SWCNTs, MWCNTs, nBA ve BN (hexagonal) nanopartikülleri belirli oranlarda Shell 5W40 motor yağına eklenmiştir. Bu nanopartikül içeren motor yağları ve nanopartikül eklenmemiş (referans) motor yağı bilye-silindir çifti kullanılarak tribometrede tekrarlı olarak test edilmiş ve sürtünme katsayıları değişimi ve ortalaması tespit edilmiştir. Süspansiyon halde tutulabilen ve en düşük sürtünme katsayısına sahip nanopartiküllü motor yağı ve nanopartikülsüz (referans) motor yağı tek silindirli benzinli ve Diesel motorda ayrı ayrı test edilmiş, gerçekleştirilen bu testler neticesinde elde edilen sonuçların karşılaştırılması amacıyla testlerden önce ve sonra numune yüzeyleri dijital optik mikroskop, Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskopi (FESEM) ve Atomik Kuvvet Mikroskopu (AFM) vasıtasıyla incelenerek nanopartiküllerin aşınmaya etkisi net bir şekilde ortaya konulmuştur. Böylece gerçek bir motorda test edilen yağların motor ömrüne etkisi tespit edilmiştir.

Tez kapsamında 5W40 motor yağına eklenerek test edilen farklı nanopartiküllerin özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir. Tezin ilk aşamasında süspansiyon halde kalıp kalmadığı gözle takip edilen bu nanopartiküller, Grafenbiotech firmasından temin edilmiştir. Tabloda yer almayan ve Tribor AR-GE firmasından temin edilen Borik Asit nanopartiküllerinin boyutu 50-200 nm arasında değişkenlik göstermekte olup, firma tarafından yeni geliştirildiği için içeriği gizli tutulmuş ve tabloda gösterilememiştir.

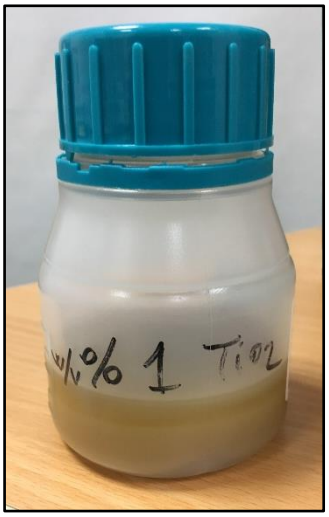
Tablo 2. 1 Nanokatkı maddelerinin özellikleri.

	SWCNTs	**TiO_2**	**MWCNTs**	**Grafen**	**BN**
Saflık %	> 90 wt	99.55	90	99	99.7
Optik Yoğunluk OD (nm)	1-2		8-10		
ID (nm)	0,8-1,6		5-15		
Ortalama çap (nm)	1.1	13	9.5	7 µm	
Uzunluk (µm)	5-30		1,5	25	40-50
SSA (m2/g)	> 380	60	290	420	
Metal oksit			10		
Kül %	< 1.5		1.5		
Doldurma yoğunluğu (g/cm3)	0.14	0.19	0.25		
Gerçek yoğunluk (g/cm3)	~ 2.1	4.1	2.4		
Elektriksel İletkenlik (S/cm)	100		98		
Isıl İletkenlik (W/m.K)	50-200				
Renk	Siyah	Beyaz	Siyah		
Ig/Id	< 9				
Üretim Metodu	CVD		CVD		

Tez kapsamında test edilen TiO_2, GO (Grafen), SWCNTs, MWCNTs, nBA ve BN (hexagonal) nanopartiküllerinin 5W40 sentetik motor yağına eklenmesi ve süspansiyon halinde olup olmadığının gözlemlenmesi sağlanmıştır.

2.1.1 TiO_2 nanopartikülü

Deney aşamalarının bir sonraki safhası olan motor testleri için süspansiyon halinde askıda durması gereken TiO_2'nin belirli bir süre sonra dibe çöktüğü ve motor testleri için uygun olmadığı tespit edilmiştir, dolayısı ile yeni testler için dikkate alınmamıştır. (Şekil 2.1). Dibe çöken bu nanopartiküllü yağ, kütlesel olarak %1 oranında TiO_2 içermektedir.



Şekil 2.1 %1 oranında TiO_2 içeren 5W40 yağın dibe çökmüş hali.

2.1.2 SWCNTs nanopartikülü

Tez kapsamında hazırlanan nanopartiküllerden bir diğeri olan SWCNTs'ün de belirli bir süre sonra dibe çöktüğü ve testler için kullanılamayacağı gözlemlenmiştir (Şekil 2.2). Motor testleri için kritik olan çökelme, SWCNTs'ün bu sentezleme yöntemi ile motor testleri için uygun olmadığını göstermektedir. Dolayısı ile yeni testler için dikkate alınmamıştır. Hazırlanan bu karışım kütlece % 0.1 SWCNTs nanopartikül içermektedir.

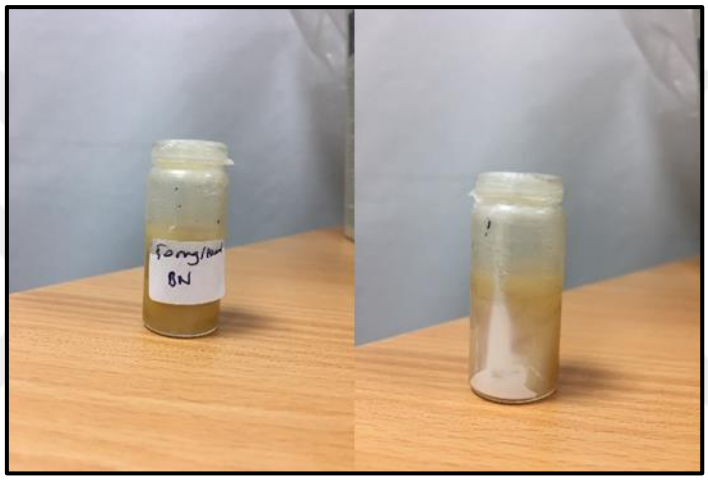
Şekil 2.2 5mg/10 mL (% 0.1) SWCNTs+5W40 yağın dibe çökmüş hali.

2.1.3 MWCNTs nanopartikülü

5mg/10 mL'lik kütlesel hacimle hazırlanan MWCNTs+5W40 numunesi de dibe çökmüştür.

2.1.4 hBN nanopartikülü

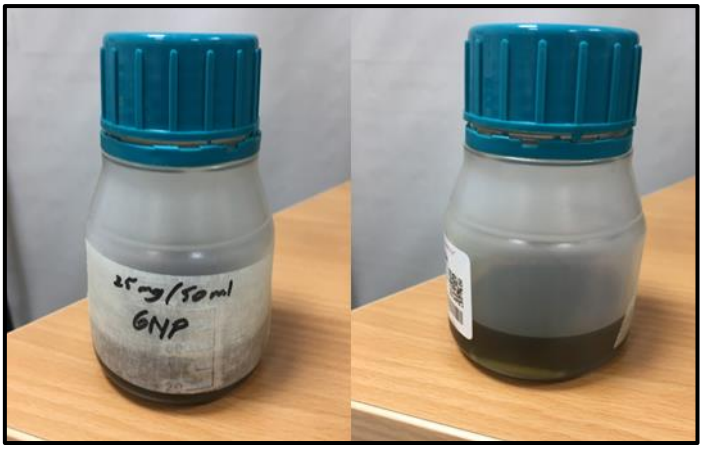
Tribometre testleri için sentezlenen hBN nanopartiküllü bu yağın Şekil 2.3'ten de görüleceği üzere bir süre sonra dibe çöktüğü görülmüştür. Ayrıca bor içeren nanopartiküllü yağların daha önce açıklandığı üzere araçların filtrelerini tıkadığı da göz önünde bulundurulduğunda motor testleri için uygun olmadığına karar verilmiştir. Dolayısı ile yeni testler için dikkate alınmamıştır.



Şekil 2.3 50 mg/10 mL hBN+5W40 yağın dibe çökmüş hali.

2.1.5 GO nanopartikülü

Kütlece %0.1'lik oranda üretilen GO nanopartiküllü yağ, literatürde de sıklıkla karşılaşıldığı üzere grafen nanokatkılarının dibe çökmesi nedeniyle motor testlerinde kullanılamamıştır [64](Şekil 2.4). Dolayısı ile motor testleri için dikkate alınmamıştır.

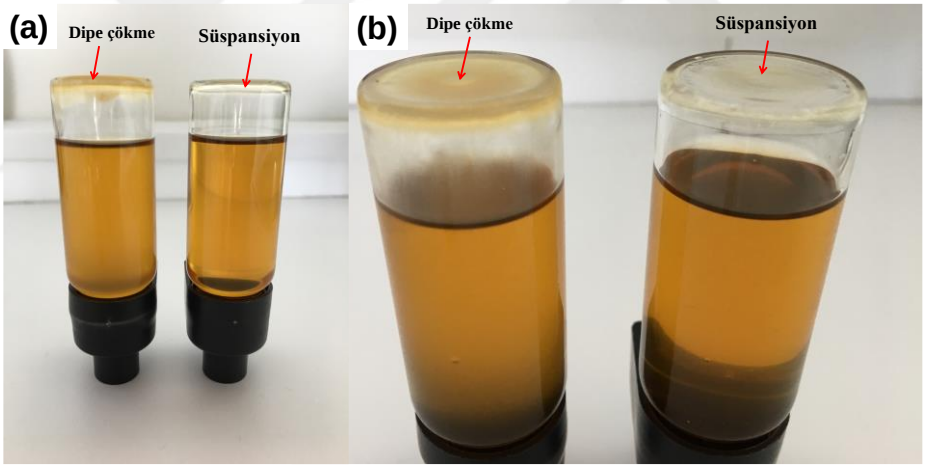


Şekil 2.4 Kütlece %0.1 GO+5W40 yağın dibe çökmüş hali.

Şekil 2.1, 2.2, 2.3 ve 2.4'te de görüldüğü gibi Grafenbiotech firmasından temin edilen ve literatürde yaygın olarak tercih edilen oranlarda sentezlenen TiO_2, GO, SWCNTs, MWCNTs, ve hBN nanopartiküllerinin 5W40 sentetik motor yağına eklendikten sonra süspansiyon halinde kalmadığı ve dibe çöktüğü tespit edilmiştir.

2.1.6 nBA nanopartikülü

Tribor Ar-Ge firması tarafından sentezlenen ve yeni bir yöntemle geliştirildiği için içeriği gizli tutulan nBA, belirli bir oranda 5W40 yağına eklenmiş olup yapılan Turbiscan analizleri neticesinde karışımın süspansiyon halde tutulduğu tespit edilmiştir (Şekil 2.5) [47]. Bor, tribolojik özellikleri bakımından her ne kadar yüksek potansiyelli bir katkı maddesi olsa da partikül boyutları ve literatürdeki çalışmalar da göz önünde bulundurulduğunda filtreleri tıkadığı için motor testleri için uygun olmadığına karar verilmiştir. Bu konuda endüstriyel yağ üreticisi Mobil firması tarafından yapılan ve detayları aşağıda özetlenen bir vakada, yapılan elementel analizler neticesinde bor maddesinin filtreleri tıkadığı tespit edilmiştir.



Şekil 2.5 5W40 yağına eklenerek askıda tutulan nBA nanopartikülü.

Yağ olarak Mobilgear 600XP68 yağ kullanılan bir hidrolik pompada filtrenin tıkandığı farkedilmiş ve bu sorunun çözümü için üretici firma olan Mobil'den destek istenmiştir. Makineden numune olarak 2 filtre alınmış olup filtreyi tıkayan maddelerin/yağların elementel analizi yapılmıştır. Bu analizler sonucunda normal koşullarda Mobilgear 600 XP 68 ürünün içinde yer almayan oldukça yüksek miktardaki bor içeriğinin varlığı tespit edilmiş ve bor içerikli katkı maddesinin filtre içinde yoğunlaştığı veya sistemi kirleten (gözenekleri tıkayan) başka bir bor içeren bileşik olduğu belirlenmiştir. Bunlarla beraber önemli miktarda kalsiyum ve sodyum; eser miktarda da baryum,

potasyum ve silikon tespit edilmiştir. Sistemde aşınma olduğunu gösteren demir, bakır, kurşun, alüminyum, nikel gibi metallerin varlığı da ayrıca tespit edilmiştir. Tespit edilen bu durumlar nedeniyle nBA, motor testleri için dikkate alınmamıştır.

2.1.7 rGO nanopartikülü

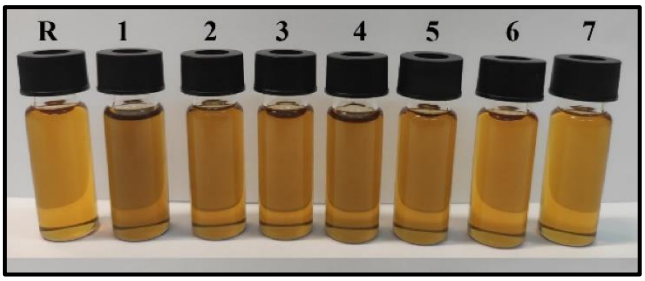
Tez kapsamında test edilen nanopartiküllerin çökmesi, süspansiyon haldeki nBA'in ise filtreleri tıkaması ve nanopartikülleri süspansiyon halde tutmanın zorlukları da göz önünde bulundurularak ileriki safhalarda kullanılacak ve askıda tutulabilecek nanopartikülün rGO olduğuna karar verilmiş ve doktora çalışmaları kapsamında Institute of Electronic Structure and Laser, Foundation for Research and Technology Hellas (FORTH), GR-7110 Heraklion, Crete, Greece)'de Dr.Minas M. Stylianakis tarafından yeni nanopartiküller 5W40 sentetik motor yağına eklenerek hazırlanmıştır. Hazırlanan bu nanopartikül katkılı yağlar 6 adet rGO+5W40, 6 adet SWCNTs+5W40 ve 6 adet rGO+SWCNTs+5W40 yağ numuneleridir. Girit Hellenic Mediterranean Üniversitesi tarafından hazırlanan nanopartiküllü yağların sentezleme yöntemi şu şekildedir:

Prosedüre göre, modifiye edilmiş bir Hummers yöntemiyle sentezlenen grafen oksit GO (100 mg), soğuk buzlu asetik asit ve hidroiyodik asit (AcOH/HI) karışımı ile indirgenmiştir. Prosedürde, temiz bir şişeye (22 mL) motor yağından 20 mL (10 g) hacim ilave edilir. Daha sonra farklı kütle oranlarında (%0,2 - %0.01) rGO eklenmiş ve karışım ultrason destekli bir işlemle 30 dakika homojenize edilmiştir.

Tablo 2.2, 2.3 ve 2.4 ve Şekil 2.6, 2.7 ve 2.8'de gösterildiği gibi Girit Hellenic Mediterranean Üniversitesinden temin edilen ve tarafımıza süspansiyon halinde test edilen numuneler aşağıdaki gibidir:

Tablo 2.2 Farklı konsantrasyonlardaki rGO+Shell 5W40 (%50-%50wt) numunelerinin kütlece yüzdeleri.

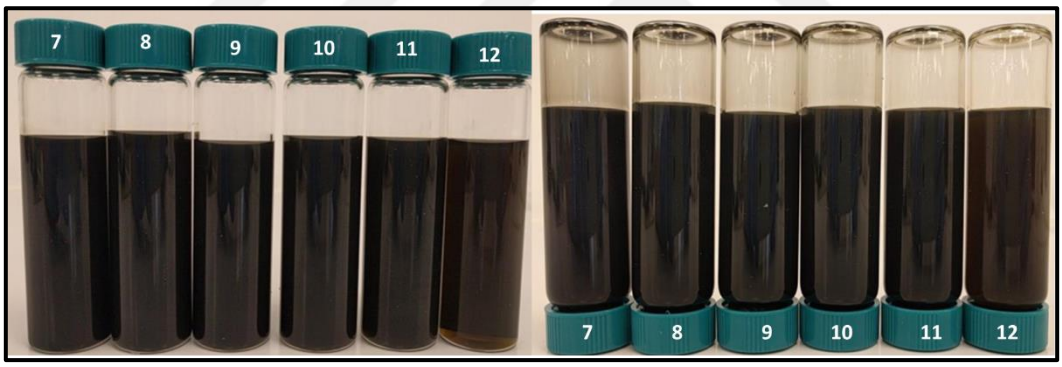
Numuneler	Yağ (g)	rGO (mg)	Konsantrasyon (%wt)
1	10	20	0.2
2	10	10	0.1
3	10	8	0.08
4	10	6	0.06
5	10	4	0.04
6	10	2	0.02
7	10	1	0.01



Şekil 2.6 Farklı konsantrasyonlardaki 7 adet rGO+Shell 5W40 numuneleri.

Tablo 2.3 Farklı konsantrasyonlardaki SWCNTs+Shell 5W40 (%50-%50wt) numunelerinin kütlece yüzdeleri.

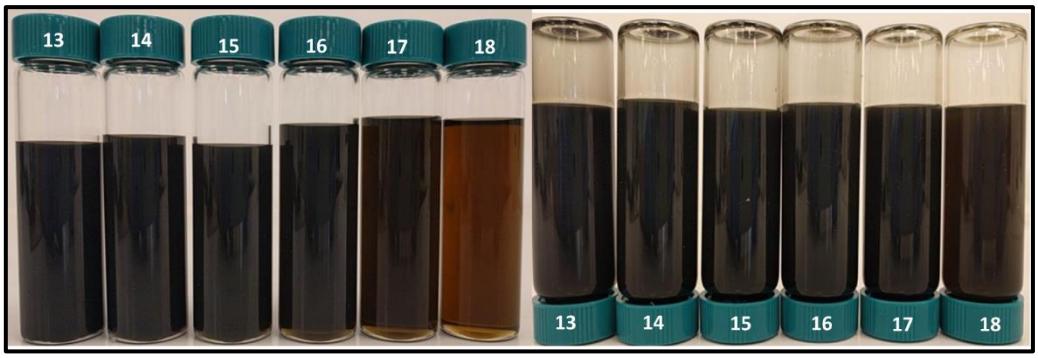
Numuneler	Yağ (g)	SWCNTs (mg)	Konsantrasyon (%wt)
7	10	20	0.2
8	10	10	0.1
9	10	8	0.08
10	10	6	0.06
11	10	4	0.04
12	10	2	0.02



Şekil 2.7 Farklı konsantrasyonlardaki 6 adet SWCNTs+Shell 5W40 numuneleri.

Tablo 2.4 Farklı konsantrasyonlardaki (rGO+SWCNTs)+Shell 5W40 (%50-%50wt) numunelerinin kütlece yüzdeleri.

Numuneler	Yağ (g)	rGO+SWCNTs (mg)	Konsantrasyon (%wt)
13	10	20	0.2
14	10	10	0.1
15	10	8	0.08
16	10	6	0.06
17	10	4	0.04
18	10	2	0.02



Şekil 2.8 Farklı konsantrasyonlardaki 6 adet (rGO+SWCNTs)+Shell 5W40 numuneleri.

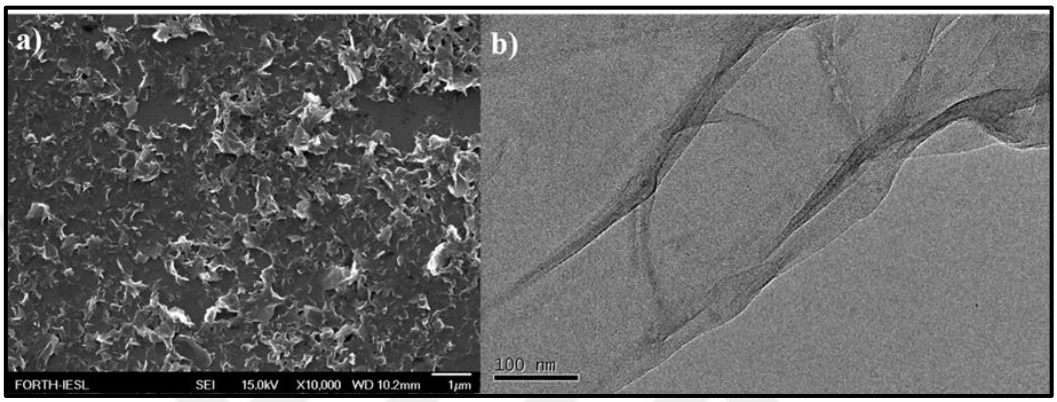
Farklı konsantrasyonlarda hazırlanan rGO+Shell5W40, SWCNTs+Shell 5W40 ve (rGO+SWCNTs)+Shell 5W40 numunelerinin süspansiyon halinde kalıp kalmayacağı gözlemlenmiştir. Bu numuneler arasında Şekil 2.9'da gösterilen rGO6 (%0.02) ve rGO7 (%0.01) motor yağları süspansiyon halinde kalmış olsa da, en düşük sürtünme katsayısı rGO6 ile elde edildiği için bundan sonraki çalışmalara bu yağ ile devam edilmiştir. rGO7'nin içerik olarak en düşük rGO miktarına sahip olmasına rağmen sürtünme katsayısının rGO6'ya kıyasla daha yüksek olmasının, tribofilm oluşturacak kadar rGO içermemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir [75].

Şekil 2.9 Süspansiyon halinde kalan 6 no'lu rGO+5W40 (rGO6 %0.02) motor yağı numunesi.

2.1.7.1 rGO (İndirgenmiş Grafen Oksit) Nanopartikülü İle İlgili Analizler

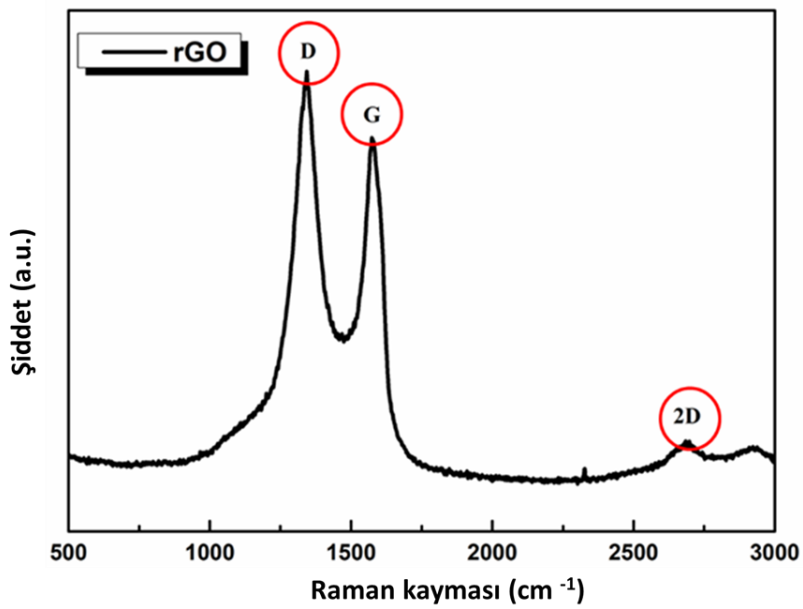
Tez kapsamında hazırlanan diğer nanopartiküllerin dibe çökmesi nedeniyle sadece yapılacak çalışmalarda kullanılacak olan rGO nanopartikülü ile ilgili analizler yapılmıştır.

Tez çalışmasında kullanılan rGO (indirgenmiş Grafen oksit) nanopartiküllerin Şekil 2.10a ve b'de SEM ve TEM görüntüleri verilmiştir. Partikül büyüklüğünün nanometre mertebesinde olduğu görülmekte olup bu boyutlar 100nm'den küçüktür



Şekil 2.10 rGO (indirgenmiş grafen oksit) nanopartiküllerin a) SEM ve b) TEM görüntüleri.

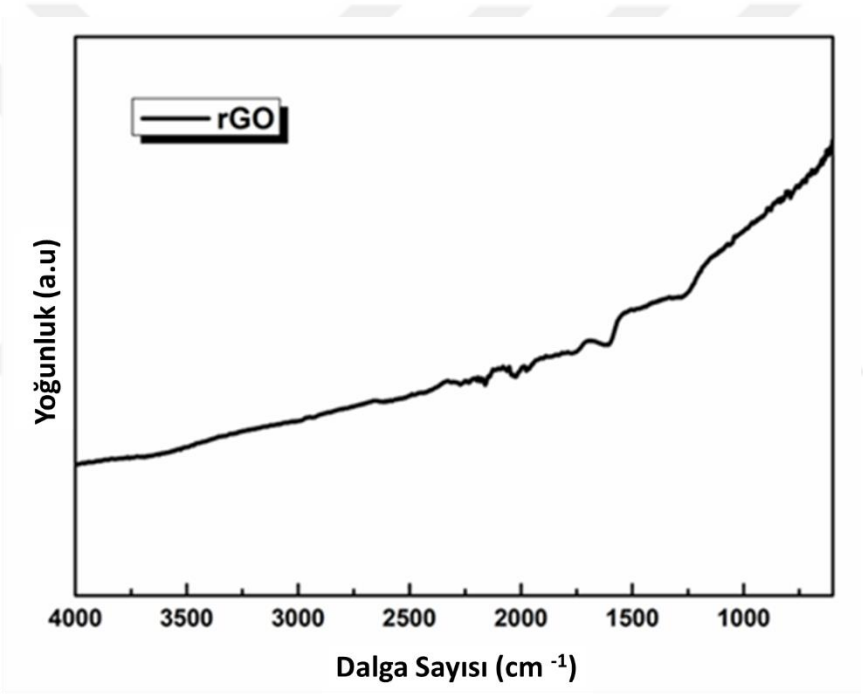
Motor yağına katılan ve dağıtılan rGO (indirgenmiş Grafen oksit) nanopartikülünün Şekil 2.11'de yer alan Raman spektrumu, ~1343 cm^{-1}'de D tepe noktası, ~1573 cm^{-1}'de G tepe noktası ve ~2684 cm^{-1}'de 2D tepe noktasını gösterir. Bu grafikler tipik bir rGO'nun eğilimini takip eder ve doğrular.



Şekil 2.11 Motor yağına katılmış ve dispers edilmiş rGO'nun Raman spektrumu.

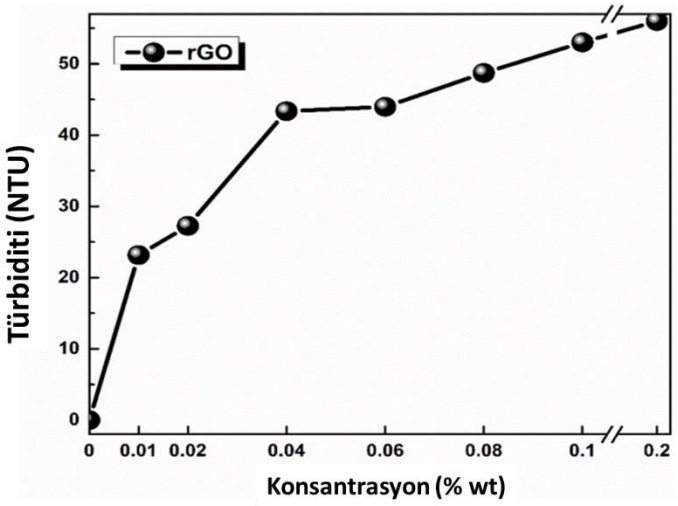
Attenuated Total Reflectance (ATR - Zayıflatılmış toplam yansıma), yapısal ve bileşimsel bilgi elde etmek için numuneye ışık verilen bir örnekleme yöntemi olup FT-IR için en çok kullanılan örnekleme teknolojilerinden biridir. Zayıflatılmış toplam yansıma (ATR), katı veya sıvı numunelerin daha fazla hazırlık gerektirmeden doğrudan incelenmesini sağlayan bir numune alma metodolojisidir. Katı bir numune 100 mikron veya 100 mm kalınlığında olabilir, kaydedilen kızılötesi spektrum temelde aynı görünecektir. Şekil 2.12'de yer alan grafik, indirgemenin bir sonucu olarak önemli piklerin olmadığı tipik bir ATR FT-IR rGO spektrumudur.

Şekil 2.12'de yer alan spektrumda, 3400cm^{-1}'de –OH bağına denk gelen karakteristik pik GO sebebiyle kaybolmuş olup, 1700-1900'daki zayıf pikler ise C=O, C-O-C bağlarına karşılık gelip indirgenemeyen az miktardaki tortudan meydana gelmektedir.



Şekil 2.12 rGO'nun zayıflatılmış toplam yansıma Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi.

Şekil 2.13, rGO'yu çeşitli konsantrasyonlarda motor yağı ile birleştirerek hazırlanan 7 farklı dispersiyonun türbidimetri ölçümlerini gösterir. Kütlece % 0.06'nın üzerindeki konsantrasyon değerleri için bulanıklık ile neredeyse doğrusal bir ilişki elde edildiği, daha düşük olanlar için ise bulanıklığın düzensiz bir eğilim izlediği açıktır. Veriler ***Yao et.al.*** referansına uygundur [76].



Şekil 2.13 Referans 5W40 motor yağının ve % 0.01-0.2 oranında katkı maddesi olarak rGO içeren hazırlanmış dispersiyonların türbidimetri ölçümleri.

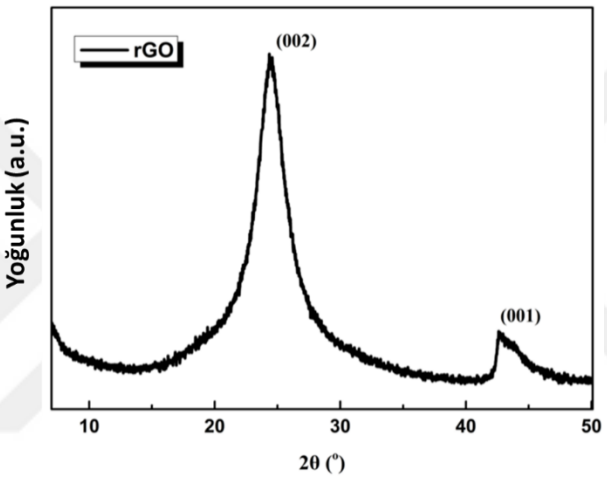
rGO nanopartikülünün boyutu ve zeta potansiyeli ise 25° C'de 90° 'de dinamik ışık saçılımı (DLS) ile tahmin edilmiştir (Şekil 2.14). Diğer numunelerin konsantrasyonu çok yüksek olduğundan, sadece rGO7'nin (%0.01) konsantrasyonu incelenmiştir. Sonuç olarak, ortalama rGO nanopartikülünün boyutu ~ 531 d.nm (nm cinsinden hidrodinamik çap), PDI (numunenin polidispersitesi) 0.61 (0 ve 1 arasında olduğu için tek dağılımlı örnektir) zeta potansiyeli sırasıyla -30 mV olarak bu dağılımın yüksek stabilitesini ifade etmektedir [77].

Şekil 2.14 Zeta boyutlandırıcı ve potansiyel ölçümü.

rGO ile ilgili yapılan analizlerden bir diğeri ise XRD (X Işını Kristalografisi) analizidir. XRD, bir kristalin atomik ve moleküler yapısını incelemek için kullanılan

ve kristalleşmiş atomların bir X-ışını demetindeki ışınların kristale özel çeşitli yönlerde kırınımı olayına dayanan bir yöntemdir. Kırınıma uğrayan bu demetlerin açıları ve genlikleri ölçülerek kristaldeki elektronların yoğunluğunun üç boyutlu bir görüntüsünü elde edilebilir. Bu elektron yoğunluğundan kristaldeki atomların kimyasal bağları, kristal yapıdaki düzensizlikler ve bazı başka bilgilerle birlikte ortalama konumları tespit edilebilir.

Şekil 2.15; 3.34 Å 'lük bir ara katman mesafesine karşılık gelen, ~24.7° 'de karakteristik bir geniş pik ve ~42.7°' de daha küçük olanı gösteren rGO'nun XRD modelini göstermektedir. Bu, çalışmamızda kullanılan rGO'nun yüksek kalitede (yüksek indirgeme derecesinde) olduğunu göstermektedir.



Şekil 2. 15 Bu çalışmada kullanılan saf rGO'nun XRD (X-Ray Diffraction) X Işını Kristalografisi) grafiği.

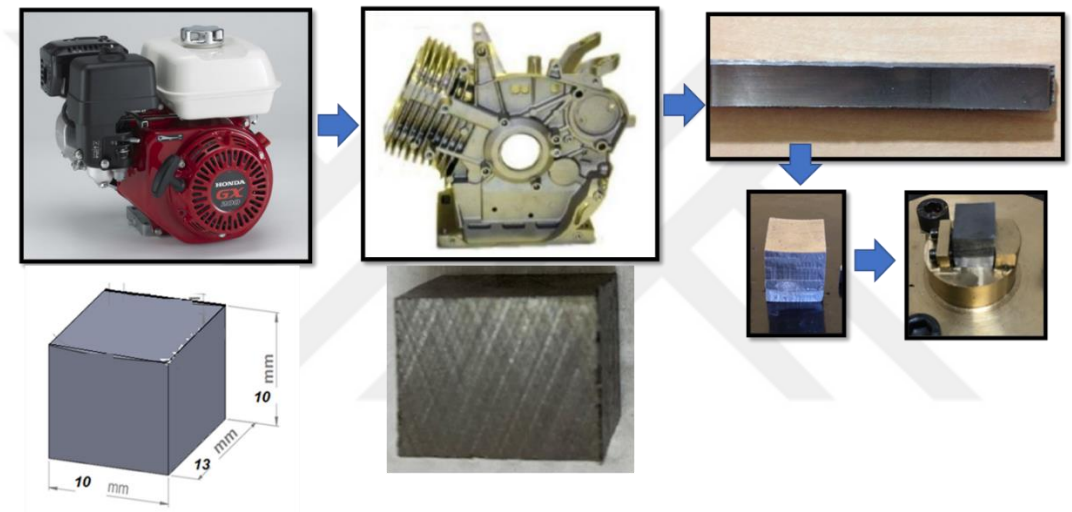
2.1.8 Tribometre Test Düzeneği

Tribometre testlerinde ve içten yanmalı motor deney setinde kullanılacak tek silindirli Honda GX270 benzinli motor ve teknik özellikleri Şekil 2.16'da gösterilmektedir.

Motor Tipi	Hava soğutmalı, 4 stroklu, tek silindirli
Çap ve strok	77 x 58 mm
Silindir hacmi	270 cm³
Sıkıştırma oranı	8.5:1
Net güç (kW/rpm)	6.3 kW
Net tork	19.1 Nm
Ateşleme sistemi	Değişen zamanlı buji ateşlemeli
Yağlama sistemi	Sıçratma yöntemi ile yağlama
Hava filitresi	Çift kademeli
Yağ kapasitesi	1.1 Lt
Yakıt kapasitesi	5.3 Lt
Boyutlar (L x W x H)	380 mm x 429 mm x 422 mm
Kuru ağırlığı	25 kg

Şekil 2.16 Tek Silindirli benzinli motor ve teknik özellikleri.

Tribometre testlerinde kullanılacak olan Honda motor numuneleri, silindir kovanının kuru kesme yöntemi ile hassas bir şekilde kesilmesi ile elde edilmiştir (Şekil 2.17). İstanbul 'da CNC frezeleme teknolojisi kullanılarak Dünya Kalıp Şirketi'nde kesim işlemi yüzeylere zarar vermeden hatasız bir şekilde yapılmıştır. Silindir gömleği alt tabakalarında ısı ile indüklenen alt tabaka, olası malzeme özelliği değişikliklerinden dolayı sıcaklığı dikkate alınmış ve kesme işlemi sırasında sıcaklığı kontrol edilmiştir. Kesme işlemi sırasında yüzey sıcaklığı kızılötesi dijital termometre ile kontrol edilmiştir. Yapılan ölçümler yüzey sıcaklığının 49°C'yi geçmediğini göstermiştir. Silindir gömleği alt tabaka boyutları, Şekil 2.17'de gösterildiği gibi 10 mm x 13 mm x 10 mm (G x D x Y) dir.



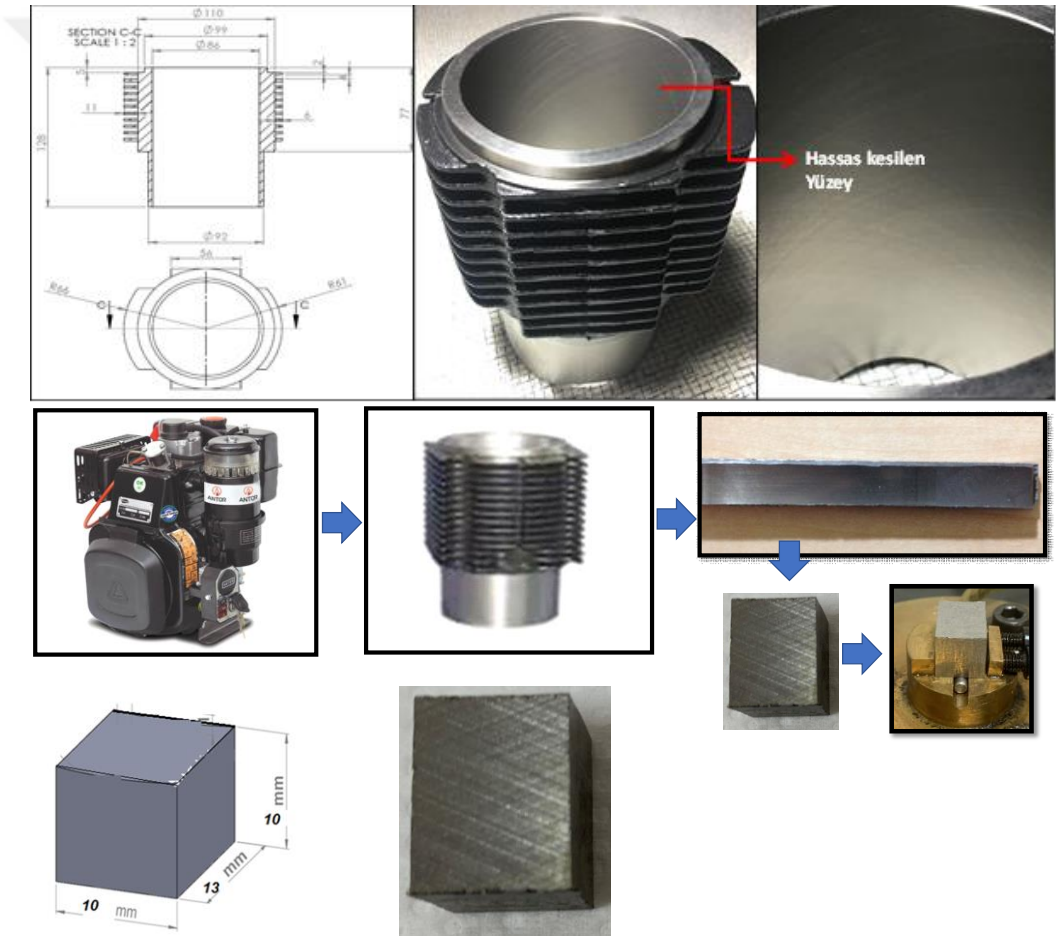
Şekil 2.17 Honda GX 270 silindir bloğunun kesilmesi ve tribometreye yerleştirilmesi.

Şekil 2.18, tribometre ve içten yanmalı motor deney setinde kullanılacak Anadolu Motor Antor 6 LD 400 Diesel motoru ve teknik özelliklerini göstermektedir. Silindir kovanı test numuneleri kuru kesme yöntemi ile hassas bir şekilde kesilmiştir. İstanbul 'da CNC frezeleme teknolojisi kullanılarak Dünya Kalıp Şirketi'nde kesim işlemi yüzeylere zarar vermeden hatasız bir şekilde yapılmıştır. Silindir gömleği alt tabakalarında ısı ile indüklenen olası malzeme özelliği değişikliklerinden dolayı, alt tabaka sıcaklığı dikkate alınmış ve kesme işlemi sırasında sıcaklık kontrol edilmiştir. Kesme işlemi sırasında yüzey sıcaklığı kızılötesi dijital termometre ile kontrol edilmiştir. Yapılan ölçümler yüzey sıcaklığının 49°C'yi geçmediğini göstermiştir. Silindir gömleği alt tabaka boyutları, Şekil 2.19'da gösterildiği gibi 10 mm x 13 mm x 10 mm (G x D x Y) dir.

Antor 6LD400

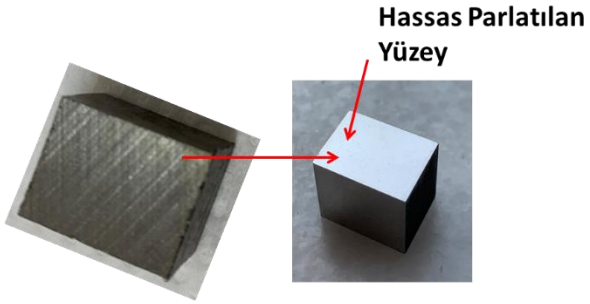
Motor	Özellikler
Model dizel	6 LD 400
Silindir hacmi	395 cm³
Silindir çapı	86 mm
Sıkıştırma oranı	18:1
Motor devri	3600 d/dk
Motor gücü	8,5 BG
Max.Tork	2 kg-m @2200 d/dk
Yakıt depo kapasitesi	4,5 lt
Özgül yakıt sarfiyatı	220 gr/BG.saat
Yağ tüketimi	13 gr/saat
Karter yağ kapasitesi	1,2 lt
Kuru (boş) ağırlık	45 kg

Şekil 2.18 Tribometre ve içten yanmalı motor deney setinde kullanılan Anadolu Motor Antor 6 LD 400 Diesel motoru ve teknik özellikleri.



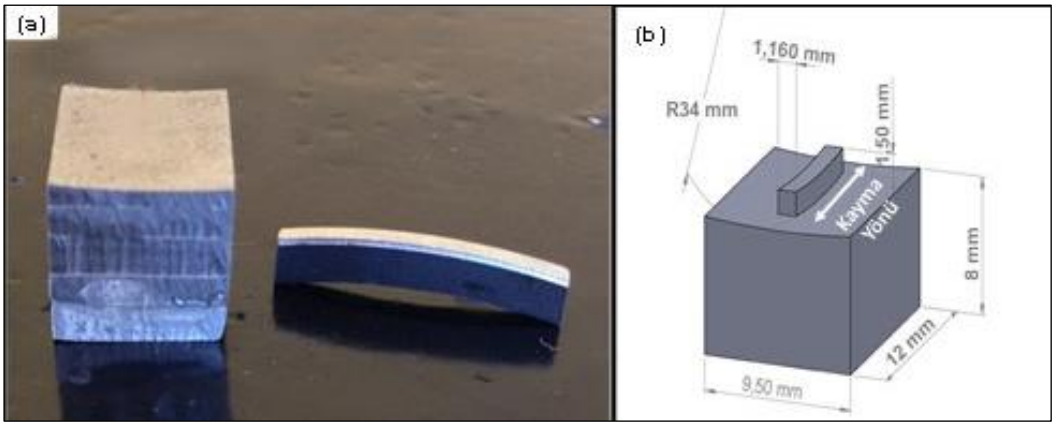
Şekil 2. 19 Silindir numunelerinin hazırlanması.

Tribometre testlerinin aynı şartlarda gerçekleştirilmesi ve tek noktada karşılaştırma yapılabilmesi için kesilen silindir numuneleri (Honda ve Antor) Şekil 2.20'de gösterildiği gibi hassas olarak parlatılmıştır. Yapılan bu parlatma işlemi elmas aşındırıcılar kullanılarak polisaj işlemi ile yapılmıştır.



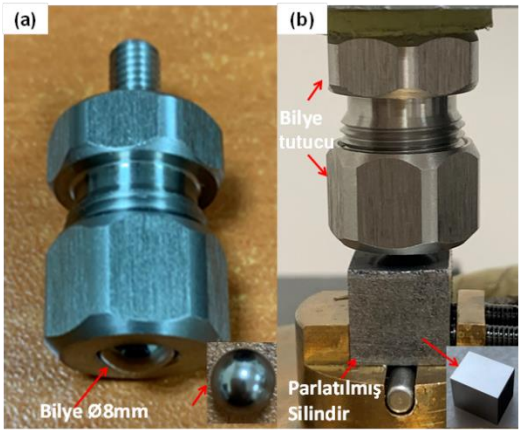
Şekil 2.20 Kesilen silindir numunelerinin hassas olarak parlatılması.

Tribometre testleri için hazırlanan ilk deney çifti olan segman-silindir ikilisi Şekil 2.21'de gösterilmektedir. Bu ikili ile yapılan tekrarlı testlerden olumlu sonuçlar alınamamış, tam karşılaştırma yapılamamıştır. Bunun sebebi bilhassa segmanın tutucuda oturma konumundaki oynamalar/farklılıklar olup, bu farklılıklar temas noktasındaki sonuçları etkilemiştir. Bu nedenlerden dolayı yapılan ön testlerden sonra segman-silindir ikilisi testlerinden vazgeçilmişir.



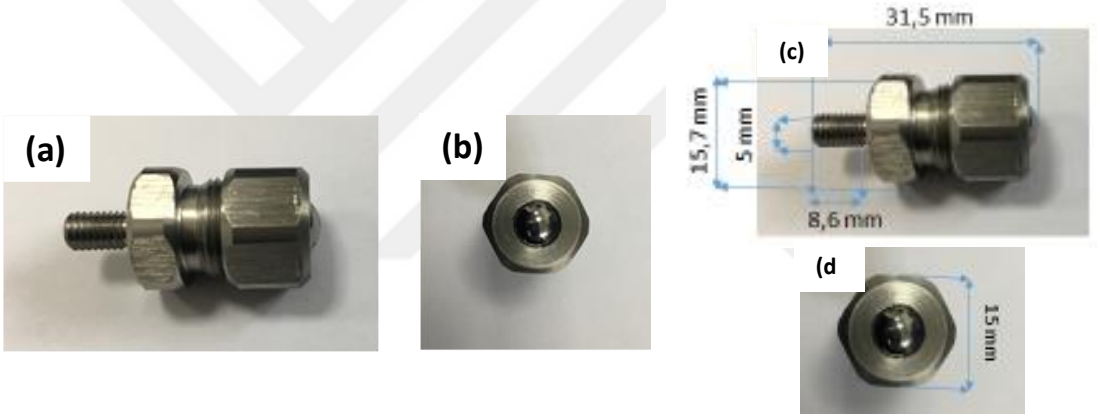
Şekil 2.21 Tribometre testleri için hazırlanan segman-silindir ikilisi.

Tez kapsamında yapılan tribometre testlerinden daha noktasal sonuçlar alabilmek için segman silindir ikilisi yerine bilye-silindir ikilisi (Şekil 2.22) kullanılmıştır. Şekil 2.23, Tribometre testleri için üretilmiş özel bilye tutucusunun ölçülerini; Şekil 2.24, çelik bilye ve (10x10x13mm) ölçülerinde kesilmiş silindir ve konumlarını göstermektedir.

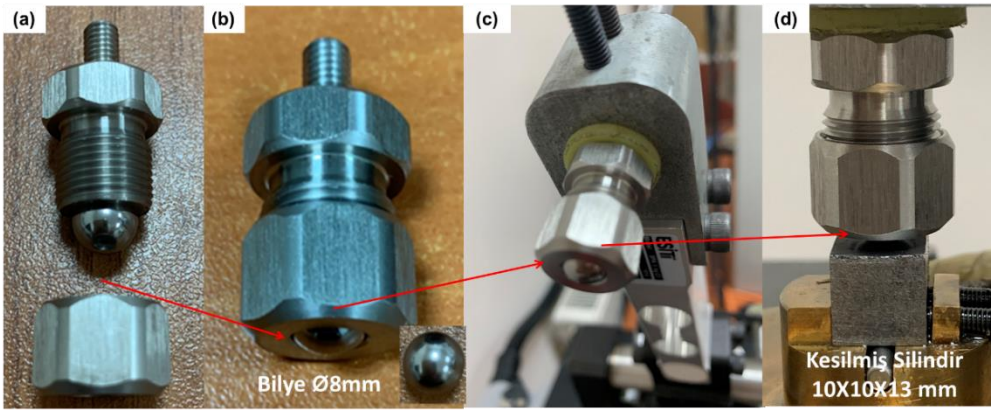


Şekil 2.22 Bilye ve gerçek silindir numuneleri konfigürasyonu.

(a) Üst tutucuya yerleştirilen bilye (b) Bilye tutucu ve parlatılmış gerçek silindir konfigürasyonu.

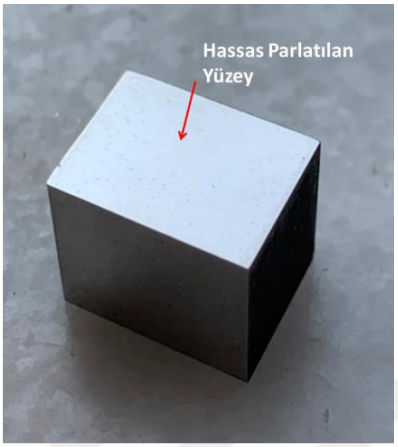


Şekil 2.23 Tribometre testleri için üretilmiş özel bilye tutucusunun (a) ve (b) yandan ve üstten görünüşü c), d) ölçüleri.



Şekil 2.24 Çelik bilye ve (10x10x13mm) ölçülerinde kesilmiş silindir konumları.

Tribometre testlerinde ilk aşamada test edilecek birden fazla nanopartikülün olması ve elde edilecek olan sürtünme katsayısı sonuçlarının literatür ile karşılaştırılabilir olması amacıyla silindir malzemesi olarak ilk aşamada yüzeyi parlatılmış 60 HRC sertlik değerinde Sverker 21 çelik (10x10x13 mm) kullanılmıştır (Şekil 2.25).



Şekil 2.25 Uddeholm Sverker 21 çelik (sertlik 60 HRC).

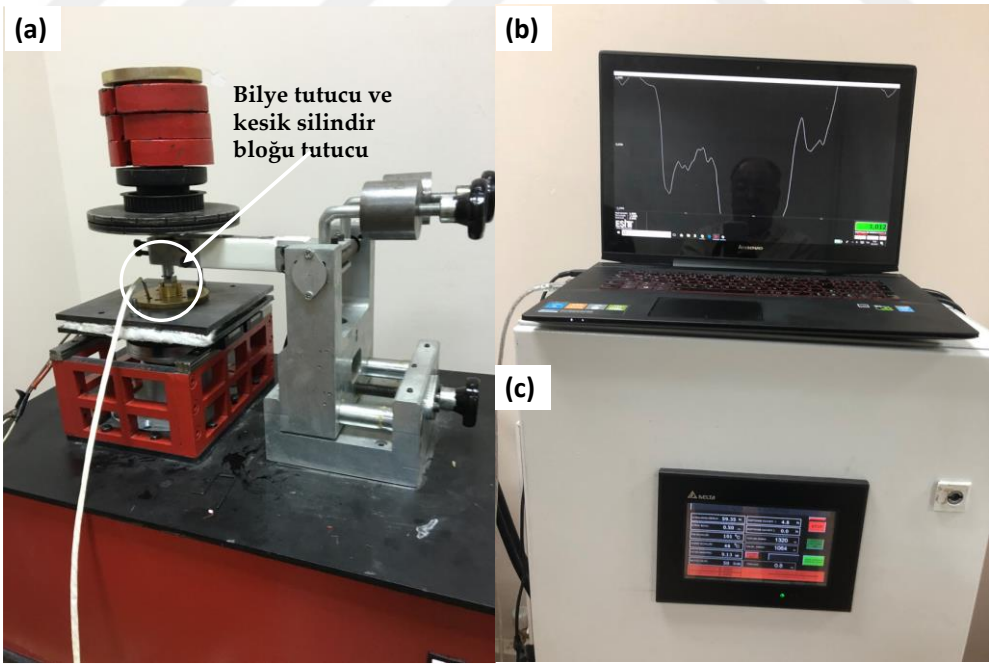
Tez kapsamında aşınma ve sürtünme özellikleri incelenen farklı nanopartiküllerin tribolojik performansı, Şekil 2.26'da gösterildiği gibi resmi, iyi yapılanmış, özel kurulmuş Otomotiv A.B.D. bünyesinde yer alan gidip gelme hareketi yapan (reciprocating) Tribometre test cihazı ile yapılmıştır. Test şartları Tablo 2.5'te verilmiştir. Bu test şartları daha önce yapılan çalışmalarda katkı maddelerinin yüzeyde reaksiyon yapabileceği test şartlarıdır. İndirgenmiş grafen oksit konsantrasyonu Tablo 2.6'da bazı özellikleri verilen Shell Helix Ultra 5W-40 çok dereceli sentetik ticari yağa süspansiyon kalacak şekilde dispers edilmiştir. Sentetik yağın tüm özellikleri ve içindeki katıklar bilinmektedir: Ca, P, Zn, S, Mg ve Mo ana katkı maddeleridir. Katık miktarları firma tarafından gizli tutulmaktadır.

Tribometre bir servo motor tarafından çalıştırılır ve bir monitöre doğrudan bağlı bir veri kaydedici kullanılarak yük hücresinden saniyede 800 veri (değer) toplanır. Tribometrede kullanılan yük hücresi Esit marka, SPA 6 model yük hücresi olup OIML R 60 standartlarına göre C1 hassasiyet sınıfında olup %±0.006 hata oranı ile çalışmaktadır. Tribometre testlerinde silindir, sabit bir bilye altında kaymaktadır. Her strok 0,8 sn sürmektedir (saniyede 640 veri) ve bu şekilde ölçüm sırasında aşınma izinin ortalama sürtünme katsayısı (COF) hesaplanabilmektedir. Tüm testler 100 °C'da sınır yağlama koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Tribolojik ölçümler sırasında normal yük 60,5 N olarak ayarlanmıştır. Kayma hızı veya gidip gelme hızı ve strok

sırasıyla 0,055 m/s ve 8 mm'dir. Silindir sıcaklığı, düzenek üzerine monte edilmiş bir dijital kontrol ölçüm cihazı ile donatılmış gelişmiş bir ısıtıcı kullanılarak 100 °C'ye ayarlanmıştır. 21 dakikalık bir tribotest ölçümü yapmak için silindir numunelerinin yüzeyine motor yağından üç damla damlatılmıştır. Daha sonra, 100CrMn6 çelik bilye, Şekil 2.26'da gösterildiği gibi, sınır yağlama koşulları altında silindir üzerinde sürtünme işlemi yapılmıştır. Veri toplama, herhangi bir titreşim gürültüsünü filtrelemek ve ortalama COF'u hesaplamak için MATLAB kullanılarak geliştirilen özel bir yazılım kullanımıştır. Son olarak COF ortalama eğrisi zamanın bir fonksiyonu olarak çizilmiştir.

Tablo 2.5 Tribometre deney parametreleri.

Yük (N)	60,5
Frekans (Hz)	2
Strok (mm)	8
Yağ Sıcaklığı (°C)	99
Test Süresi (dk)	21



Şekil 2.26 Gidip gelme hareketi yapan Tribometre test cihazı.

a) Tribometre genel görünüm, (b) Sürtünme kuvveti veri ölçüm kaydı, (c) Isıtma, sıcaklık, frekans kontrolü.

Tablo 2.6 Shell Helix Ultra 5W-40 sentetik motor yağının özellikleri.

5W-40 sentetik motor yağı özellikleri	
Toplam Baz Sayısı (TBN)	11.28 mg KOH/g
Parlama Noktası	217 °C
Viskozite @100 °C	13.59 cSt
Viskozite @40 °C	84.27 cSt

Tribometre testlerinde kullanılan düşük alaşımlı martensitik krom çelik, AISI 52100 (100 Cr6) bilyenin kimyasal bileşimi Tablo 2.7'de, silindir malzemesinin kimyasal bileşimi ise Tablo 2.8'de gösterilmektedir.

Tablo 2.7 Yeni test edilmemiş 100 Cr6 bilyenin kimyasal bileşimi.

Numune adı	**%C**	**%Si**	**%Mn**	**%P**	**%S**	**%Cr**	**%Ni**	**%Mo**	**%Cu**
Düşük alaşımlı martensitik krom çelik, AISI 52100 (100 Cr6)	0.95-1.05	0.15-0.35	0.25-0.45	0.025 max	0.025 max	1.40-1.65	0.30 max	0.08 max	0.20 max

Tablo 2.8 Silindir malzemesinin (gri dökme demir) kimyasal analizi.

Element	**%**	**Element**	**%**	**Element**	**%**
C	3.2000	Si	2.59000	Fe	92.44082
P	0.33319	S	0.02737	Mn	0.70000
Mo	0.02700	Ni	0.01900	Cr	0.43700
Co	0.00343	Cu	0.11600	Al	0.00010
Ti	0.08497	V	0.01401	Nb	0.00297
Sn	0.00359	Mg	0.00045	W	0.00010

Yapılan tribometre testleri sonrasında numune yüzeyleri optik mikroskop, FESEM, AFM gibi farklı yüzey analiz cihazları ile incelenmiştir. Bu analizler neticesinde yüzeyin film tabakası ile korunup korunmadığı, meydana gelen aşınmanın türü ve etkinliği, yüzey pürüzlülük değerleri detaylı olarak incelenebilmiştir.

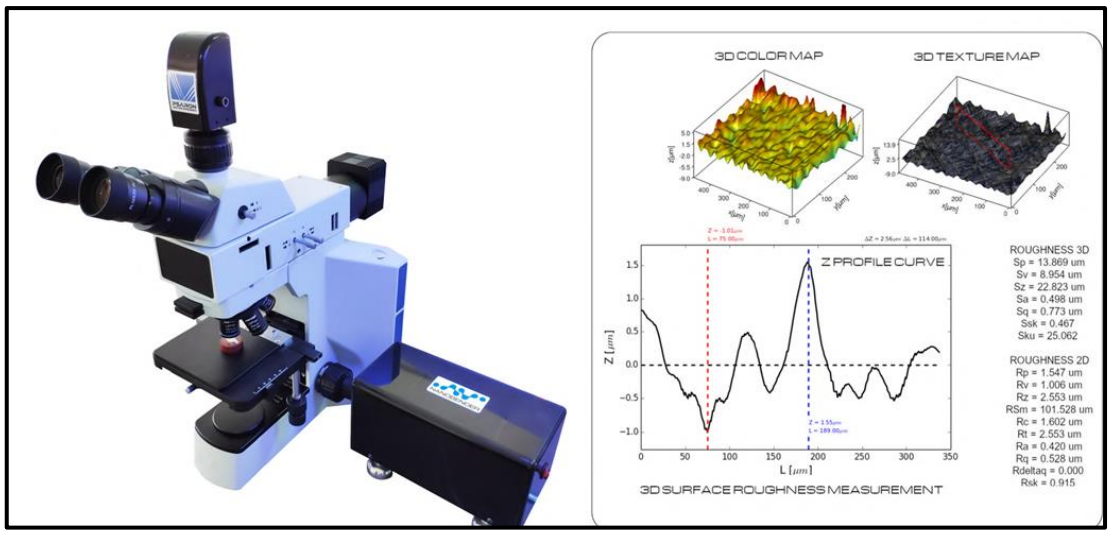
2.1.9 Temel 2D Ölçüm Parametreleri

Yapılan yüzey ölçümleri neticesinde elde edilen temek pürüzlülük parametreleri pürüzlülük profilinin aritmetik ortalama sapması (Ra), pürüzlülük profilinin toplam yüksekliği (Rt), pürüzlülük profilinin maksimum profil tepe yüksekliği (Rp), pürüzlülük profilinin maksimum yüksekliği (Rz), pürüzlülüğün maksimum profil vadi derinliği (Rv), pürüzlülük profil elemanlarının ortalama yüksekliği (Rc), pürüzlülük profilinin ortalama karekök sapması (Rq), pürüzlülük profilinin eğriliği (Rsk), pürüzlülük profilinin basıklığı (Rku), pürüzlülük profil elemanlarının ortalama genişliği (RSm) şeklindedir. Yapılan deneylerde gösterge olarak literatürde yaygın olarak kullanılan Ra değeri baz alınmıştır.

2.1.10 Temel 3D Ölçüm Parametreleri

2 boyutlu ölçümlere ek olarak seçilen alanın yüzey pürüzlülüğünün ölçüldüğü yüzey analizlerinde kullanılan temel ölçüm parametreleri; aritmetik ortalama yükseklik (Sa), karekök ortalama yüksekliği (Sq), eğim (Ssk), basıklık (Sku), maksimum yükseklik (Sz), maksimum tepe yüksekliği (Sp), maksimum vadi derinliği (Sv) olup, tez kapsamında yapılan deneylerde gösterge değer olarak literatürde yaygın olarak kullanılan Sa değeri referans alınmıştır.

2.1.11 2 ve 3 Boyutlu İncelemeler



Şekil 2.27 Psaron Nanobender 2D-3D Optik mikroskop profilometre yazılımı.

Şekil 2.27'de gösterildiği gibi Optik mikroskop incelemeleri Psaron Nanobender 2D-3D Optik mikroskop profilometre yazılımı kullanarak yapılmıştır. Her türlü üstten ışıklı trinoküler metal mikroskobu destekleyen bu yazılım, Anabilim Dalımızda

bulunan Trinoküler Metal Mikroskobuna monte edilerek mevcut Işık mikroskobu 2D-3D optik dijital mikroskopa dönüştürülmüş, ölçümler yapılmıştır.

Anabilim dalımız bünyesinde yer alan bu yazılımın özellikleri şu şekildedir:

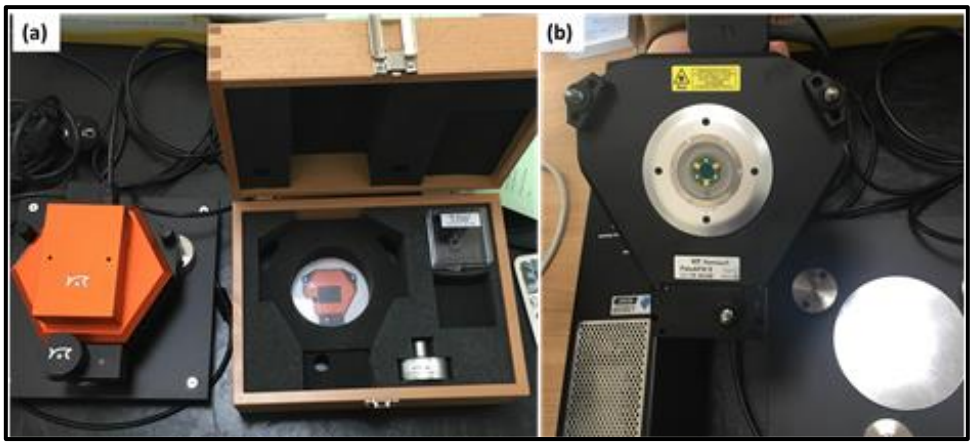
- 2D/3D ölçülen pürüzlülük parametreleri: 2D (Rp, Rv, Rz, RSm, Rc, Rt, Ra, Rq, Rdeltaq, Rsk) - 3D (Sp, Sv, Sz, Sa, Sq, Ssk, Sku) ve 3D yüzey (renk haritası, doku haritası, odaklar) görüntüleri.
- Otofoküslü tam dijital mikroskopi.
- 2D/3D gelişmiş görüntü işleme teknolojisine sahip tam odaklı görüntüler.
- Farklı modlarda canlı görüntü üzerinde gerçek zamanlı ölçüm: Çizgi, geometrik, derinlik, hacim, alan, 3D profil oluşturma ve serbest ölçümler

Psaron Nanobender'ın yazılımı dışında optik mikroskoba entegrasyonu için donanımsal parçaları da mevcuttur. Bu donanım ürünleri ve özellikleri aşağıdaki gibidir:

- Manuel düğme kontrol ünitesi: çözünürlük 6400/devir, USB 2.0 (3.0 etkin), güç (12V 50/60Hz)
- P-CAMn kamera (2mp ve 5mp bilimsel kamera seçenekleri)

2.1.12 Nanoskobik incelemeler (AFM)

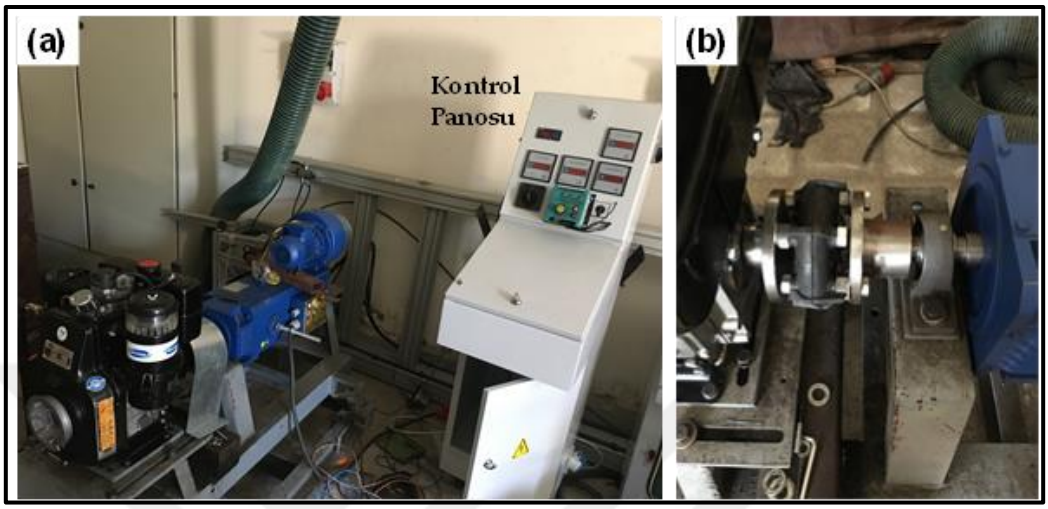
Test öncesi ve sonrası numune yüzeylerindeki aşınma izleri 90x90 µm, 30x30 µm ve 5x5 µm tarama alanları olacak şekilde 2D ve 3D olarak Şekil 2.28'de gösterilen Nanosurf Flex AFM (Atomik kuvvet mikroskobu) ile ölçülerek kıyaslanmıştır. AFM ile ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri, 100 pm /max 200 pm gürültü seviyesi ve ± 5% hata töleransı ile çalışmaktadır.



Şekil 2.28 Nanosurf Flex AFM (Atomik kuvvet mikroskobu) (a) Atomik kuvvet mikroskobu genel görüntüsü, (b) Atomik Kuvvet Mikroskobu tarama kafası.

2.1.13 Motor Test Düzeneği

Şekil 2.29 ve 2.30'da gösterilen içten yanmalı motor test düzenekleri; test motoru, dinamometre ve kontrol panosuna sahip olup, tez kapsamında gerçekleştirilecek olan performans ve motor ömrü testlerini kapsayacak şekilde tasarlanmıştır.



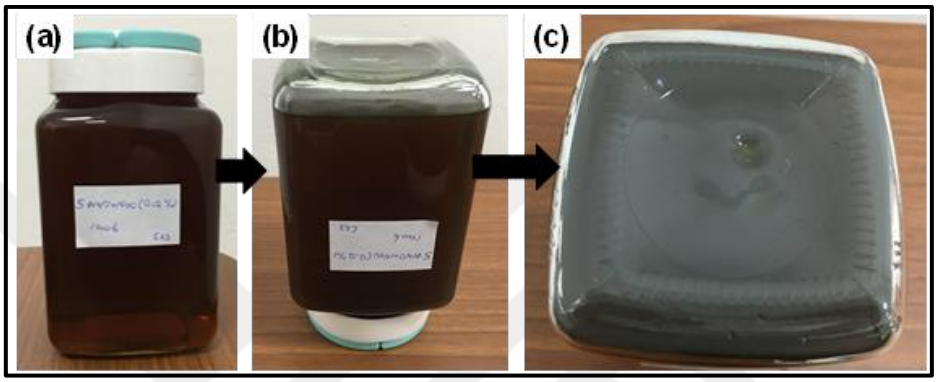
Şekil 2.29 Antor LD 400 Diesel motoru test düzeneği (a) dinamometre (b) kaplin bağlantısı.

Şekil 2.29, Antor LD 400 Diesel motoru için test düzeneği, dinamometre ve kaplin bağlantısı test düzeneğini göstermektedir.

Şekil 2.30 Honda GX 270 benzinli motoru test düzeneği.

Şekil 2.30, Honda GX 270 Benzinli motoru için test düzeneği, dinamometre ve kaplin bağlantısı test düzeneğini göstermektedir.

Motor testleri için kullanılacak olan rGO içeren motor yağları, Dr. Minas M. Stylianakis (Institute of Electronic Structure and Laser, Foundation for Research and Technology Hellas (FORTH), GR-7110 Heraklion, Crete, Greece) tarafından 1.5 lt rGO nanopartiküllü motor yağı şeklinde hazırlanmış ve temin edilmiştir (Şekil 2.31). Şekil 2.31 (b) ve (c)'de görüldüğü gibi şişe ters çevrilmiş durumda iken yağa eklenen rGO nanopartikülü süspansiyon halinde olup dibe çökme veya aglomerasyon söz konusu değildir. Motor testleri kapsamında kullanılacak motor karter yağ kapasitesi 1,2lt olup hazırlanan yağ numuneleri motor testleri için yeterlidir.



Şekil 2.31 Süspansiyon halinde kalan rGO+5W40 (rGO6 %0.02) motor testlerinde kullanılan motor yağı.

Tablo 2.9 İçten yanmalı motor deneyleri ve koşulları.

Performans testleri	**Motor ömrü testleri**
Performans testleri, test edilen motorun ürettiği güç değerlerine bağlı olarak ISO 8178-4'e standartına göre belirli devirlerdeki güç ve moment değerlerinin hesaplandığı testtir. Bu test neticesinde tespit edilen Güç birimi (kW), moment ise (Nm)'dir	Ömür testi, yapılan performans testi ile tespit edilen maksimum momentte karşılık gelen güç ve devir parametreleri altında yapılan testtir. Tez kapsamında yapılan ömür testleri 50 saattir.

Tribometre deney sonuçlarında elde edilen en düşük sürtünme katsayısı verilerine göre motor testleri yapılmıştır. Motor testleri; motor performans testleri ve motor ömür testlerinden oluşmaktadır. Tablo 2.9'da motor testleri ayrıntıları açıklanmıştır.

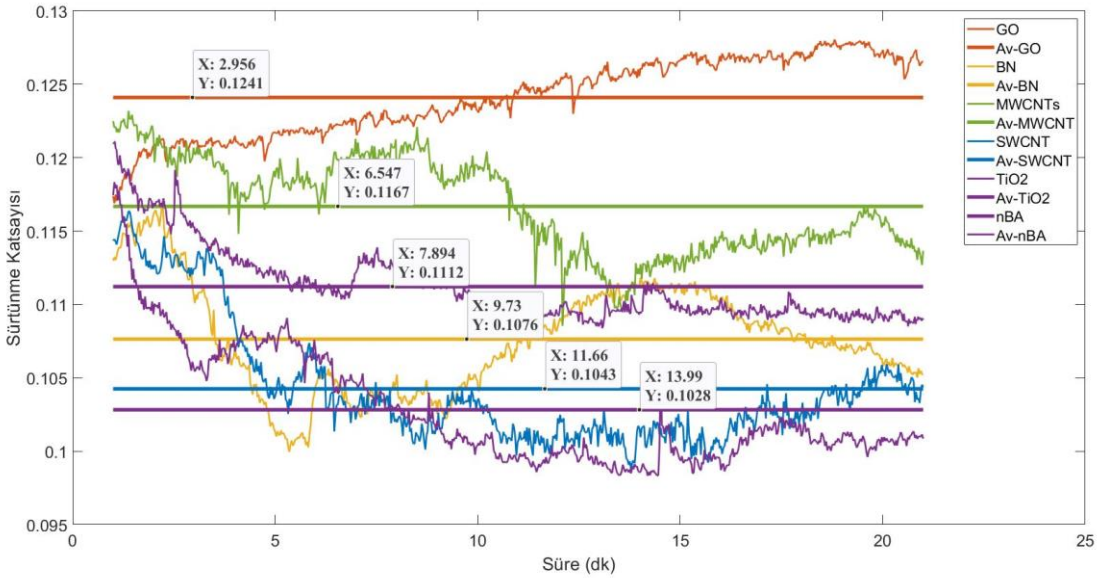
Tribometre testlerinden sonra yapılan motor testleri 2’ye ayrılmaktadır:

1) Referans motor yağı Shell Helix Ultra 5W-40 tam sentetik ticari motor yağı ile yapılan testler,

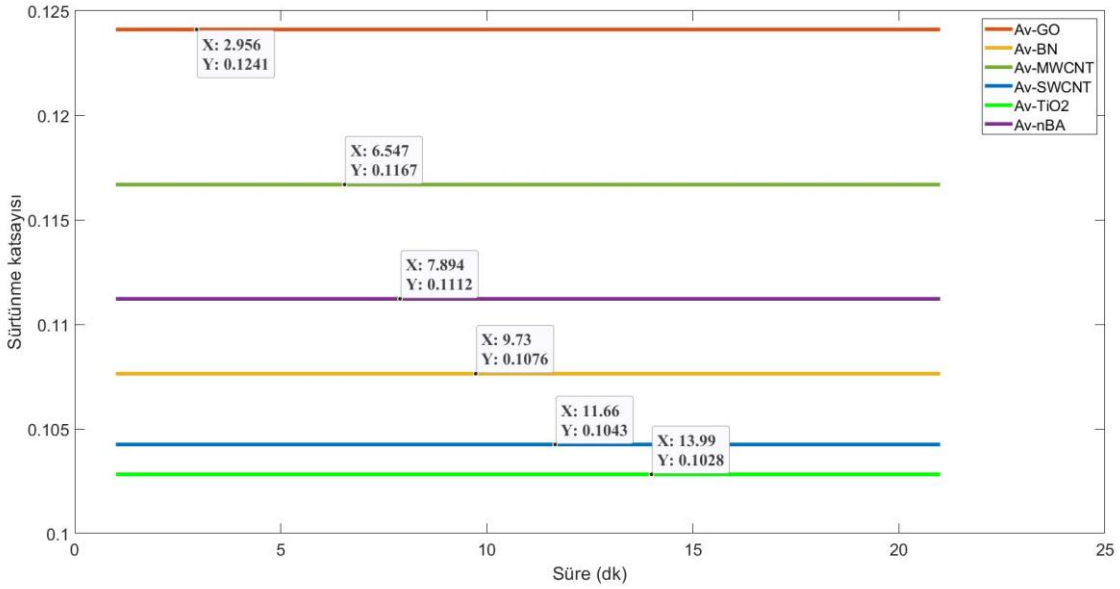
2) Tribometre testleri neticesinde en düşük sürtünme katsayısını veren nanopartikül (rGO6) içeren motor yağı ile yapılan testler.

3
TRİBOMETRE TEST SONUÇLARI

Literatür araştırması neticesinde belirlenen ve tez kapsamında incelenen tüm nanopartiküller tribometre testine tabi tutulmuş ve sürtünme katsayısı (Coefficient of Friction – COF) karşılaştırması yapılmıştır. Yapılan testler neticesinde elde edilen grafikler eğrisel ve ortalama değer olmak üzere sırasıyla Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de gösterilmiş; ortalama sürtünme katsayıları ise Tablo 3.1'de listelenmiştir.



Şekil 3.1 5W40 motor yağına eklenen TiO_2, GO, SWCNTs, MWCNTs, NBA ve BN (hexagonal) nanopartiküllerinin sürtünme katsayısının zamana bağlı eğrisel grafiği.



Şekil 3.2 5W40 motor yağına eklenen tüm TiO_2, GO, SWCNTs, MWCNTs, nBA ve BN (hexagonal) nanopartiküllerinin sürtünme katsayısının zamana bağlı ortalama sonuçları.

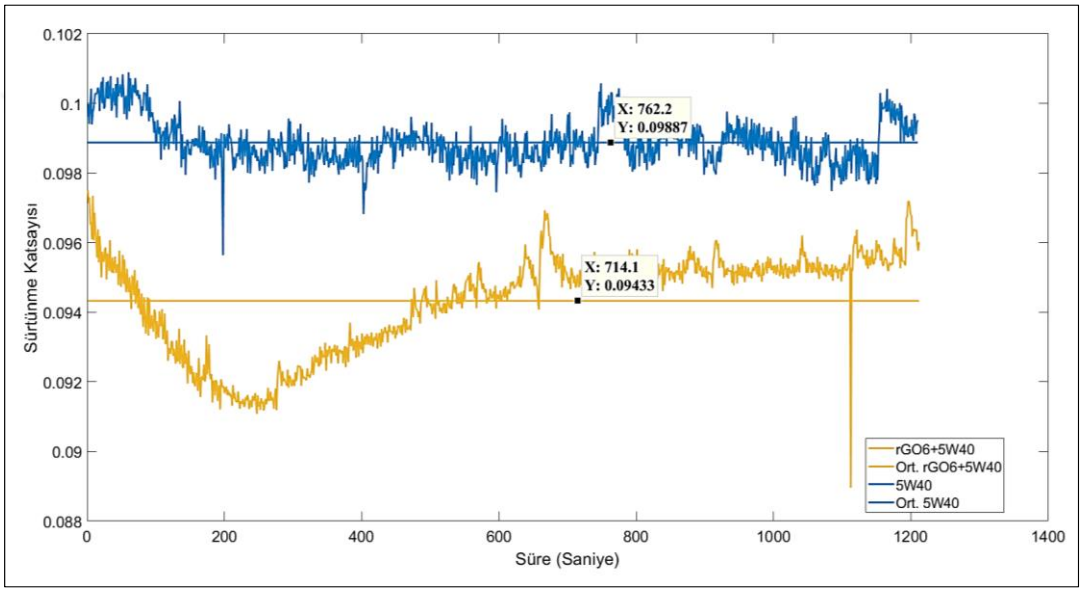
Tablo 3.1 5W40 motor yağına eklenen tüm TiO_2, GO, SWCNTs, MWCNTs, nBA ve BN (hexagonal) nanopartiküllerinin ortalama sürtünme katsayısı değer tablosu.

Nanopartikül	**Ortalama COF**
Grafen Oksit	0.1241
MWCNTs	0.1167
nBA	0,1112
BN	0.1076
SWCNTs	0.1043
TiO_2	0.1028

Tablo 3.1'den de görüleceği üzere yapılan tribometre testleri neticesinde her ne kadar en düşük sürtünme katsayısı TiO_2 içeren yağ ile elde edilmiş olsa da Şekil 2.9'da gösterilen rGO6 (%0.02) ve rGO7 (%0.01) motor yağları süspansiyon halinde kalmış, diğer nanopartiküller ise dibe çökmüştür. Süspansiyon halde kalan bu iki nanopartikül arasında ise en düşük sürtünme katsayısı rGO6 ile elde edildiği için bundan sonraki çalışmalara bu yağ ile devam edilmiştir. rGO7'nin içerik olarak en düşük rGO miktarına sahip olmasına rağmen sürtünme katsayısının rGO6'ya kıyasla daha yüksek olmasının, tribofilm oluşturacak kadar rGO içermemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir [75].

3.1 Sverker Çeliği İle Yapılan Tribometre Testleri

Yapılan analizler neticesinde uzun süreli süspansiyon halde kaldığı belirlenen rGO6 nanopartikülü içeren 5W40 sentetik motor yağı, referans yağa kıyasla sürtünmeye etkisinin tespiti amacıyla çelik bilye ve Sverker çelik silindir çifti, Otomotiv A.B.D. bünyesinde yer alan tribometre ile test edilmiştir. Şekil 3.3'te yer alan grafik, motor yağına eklenen başarılı rGO6'nın 5W40 referans yağa göre düşük sürtünme katsayısını göstermektedir. Sürtünme katsayısının (COF) 0,09887'den 0,09433'e düşerek % 4,69 mertebesinde bir azalma sağlandığı tespit edilmiştir. (Tablo 3.2)



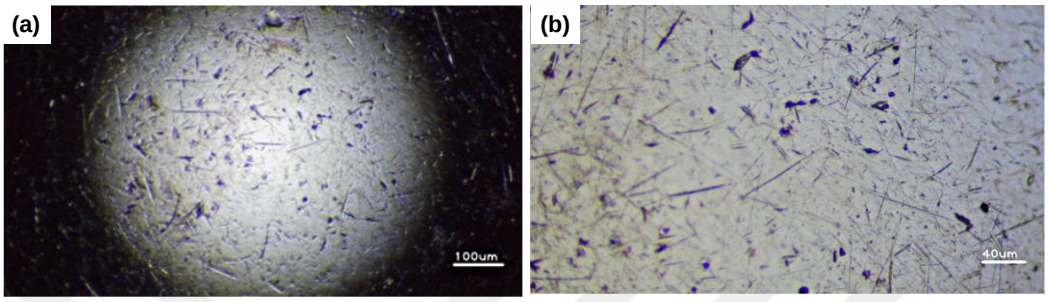
Şekil 3.3 Motor yağına eklenen başarılı ve süspansiyon halinde kalan rGO6'nın referans 5W40'a göre zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi.

Tablo 3.2 Çelik bilye ve Sverker çelik silindir çifti kullanılarak yapılan tribometre test sonuçları.

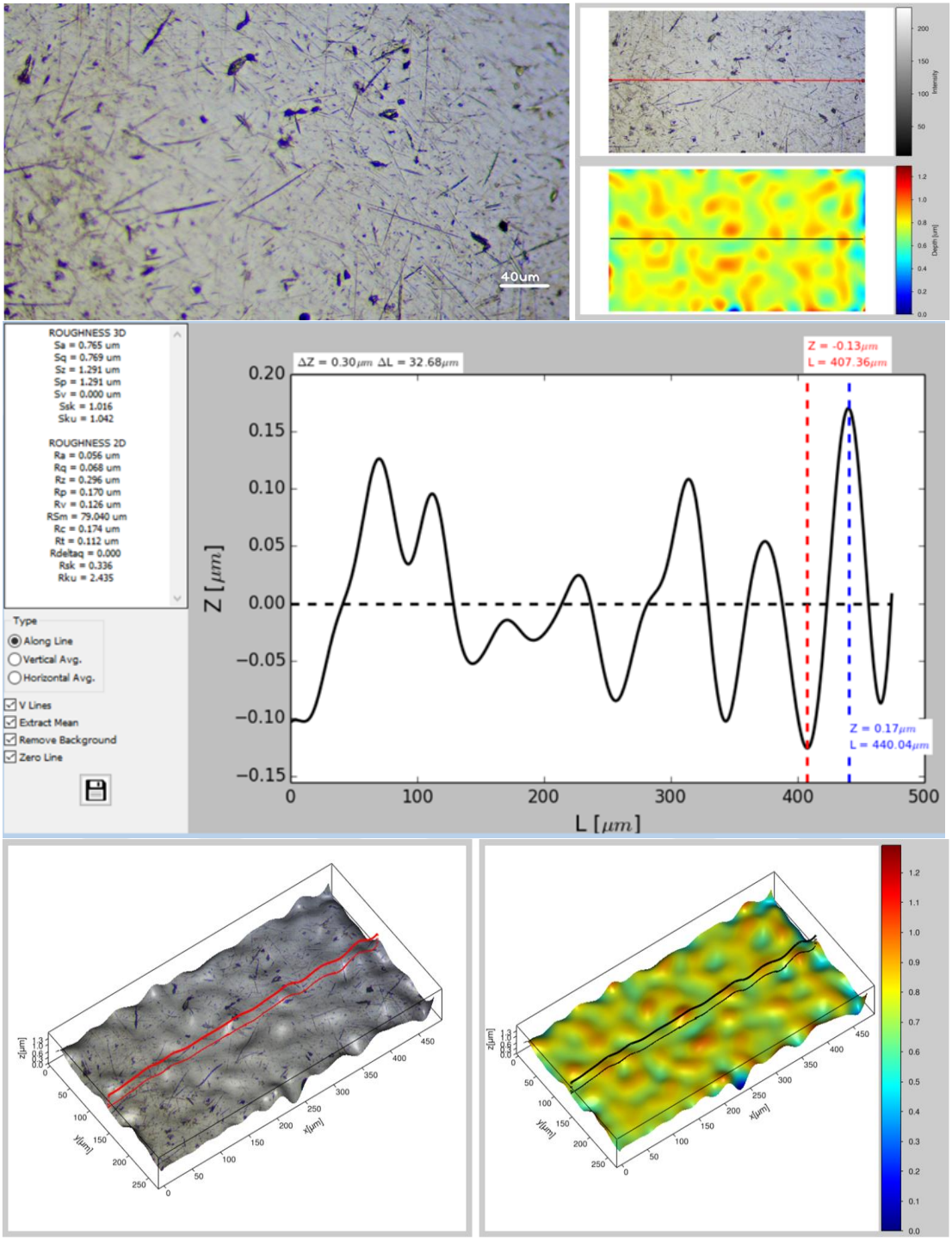
Yağ	COF
5W40	0.09887
rGO6 + 5W40	0.09433

Motor testlerinde de kullanılacak olan nanopartiküllü yağın tespiti için yapılan ilk tribometre testleri bilye ve Sverker 21 blok silindir çeliği üzerinde yapılmıştır. Süspansiyon halde tutulan ve en düşük sürtünme katsayısına sahip kütlece %0.02 rGO içeren yağın (rGO6) tribometre testleri sonucunda mikroskobik analizler yapılmıştır. Yapılan optik mikroskop analizleri neticesinde Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'den de görüldüğü

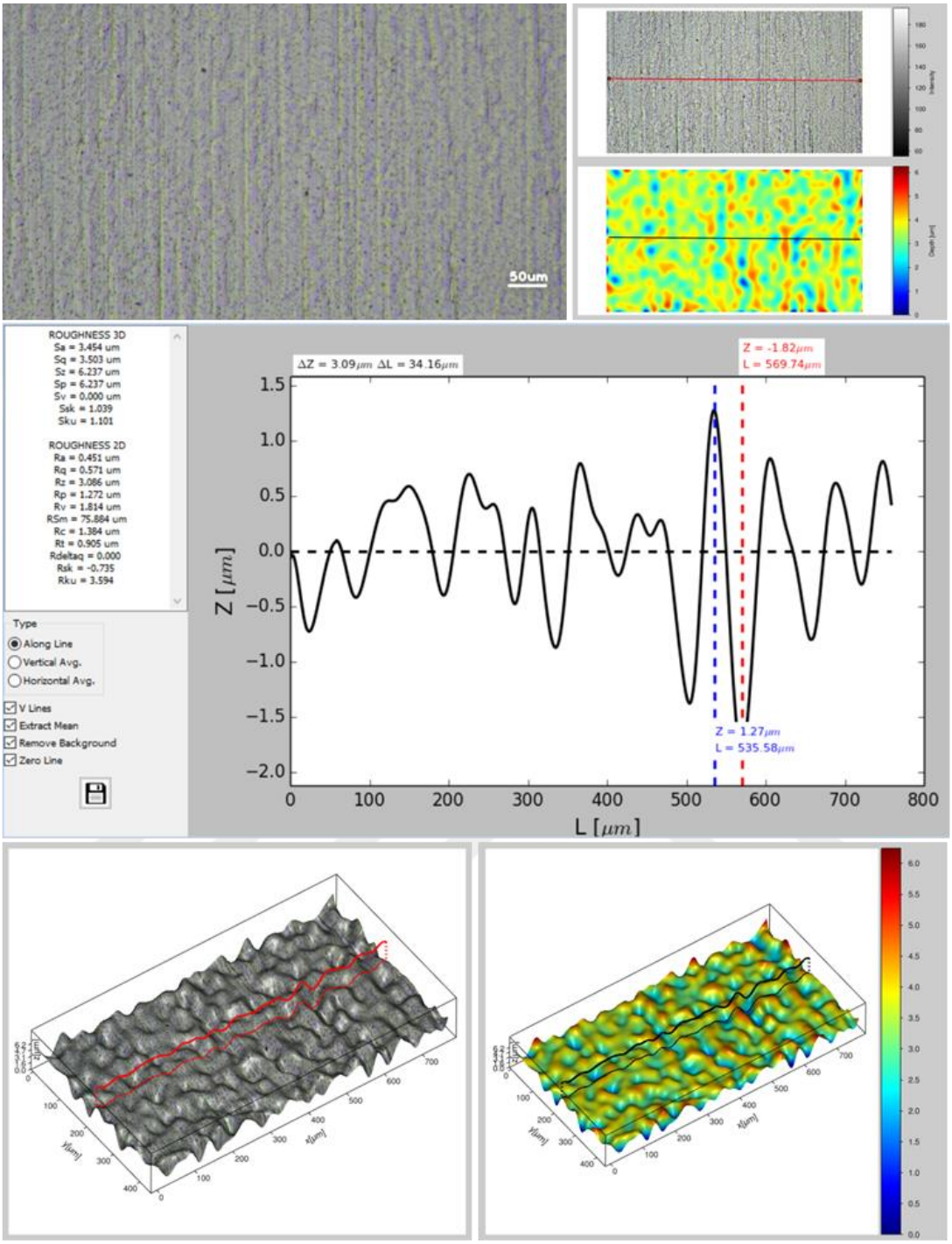
üzere gerek sürtünme katsayısında, gerekse aşınma izinde hem bilyede hem de silindirde rGO6+5W40; referans yağ 5W40'a göre daha düşük değerlerde ölçülmüştür. Bilyede 5W40 referans yağda çaplar 250µm ve 262.17µm iken rGO6+5W40'da 247µm ve 255µm'dir. Yine aynı şekilde silindir aşınma izi genişlikleri 5W40 referans yağda 274.39 µm, 292.92 µm mertebelerindeyken bu iz rGO 6 içeren yağda 253.91 µm ve 223.84 µm seviyelerine düşmektedir (Tablo 3.4).



Şekil 3.4 Test öncesi kullanılmamış bilyenin a) 5X, b) 10X mercek altındaki görüntüsü.



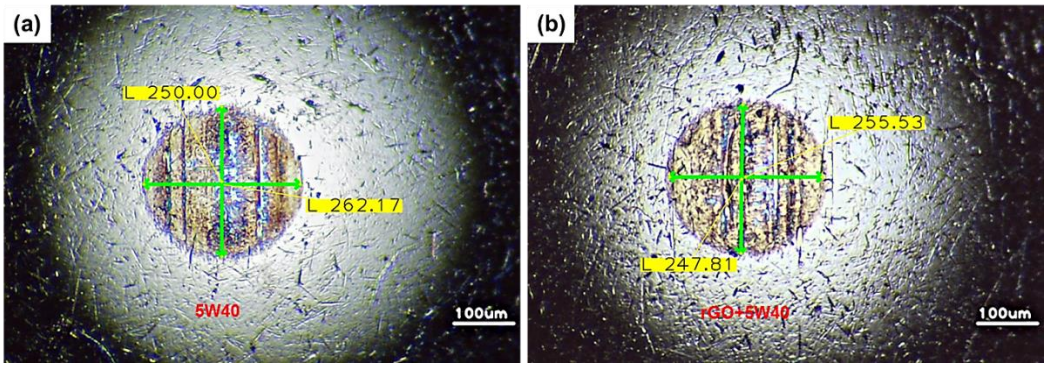
Şekil 3.5 Test öncesi kullanılmamış bilyenin optik, 2D, çizgisel pürüzlülük, 3D ve 3D haritalama dijital optik mikroskop görüntüleri.



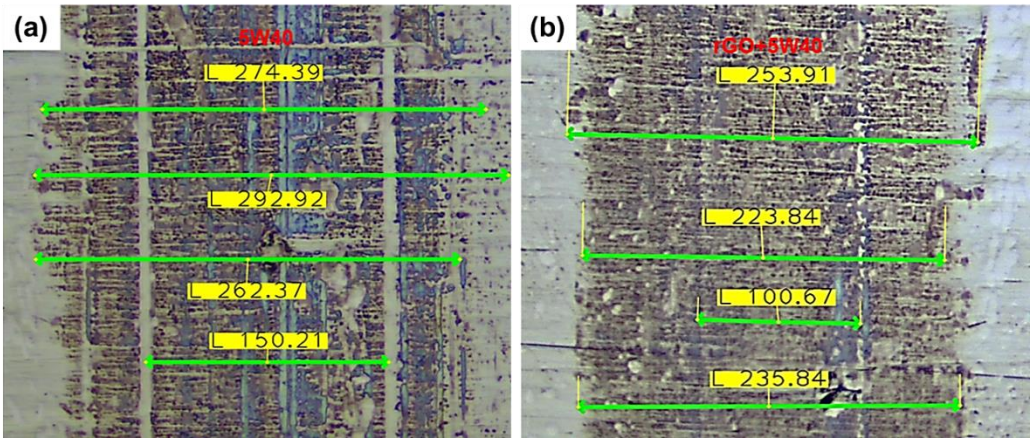
Şekil 3.6 Test öncesi kullanılmamış Sverker silindirin optik, 2D, çizgisel pürüzlülük, 3D ve 3D haritalama dijital optik mikroskop görüntüleri.

Tablo 3.3 Test edilmemiş çelik bilye ve Sverker çelik silindirin optik mikroskop yüzey pürüzlülük değerleri.

Pürüzlülük Değeri	Test Edilmemiş Bilye	Test Edilmemiş Sverker
Ra	0.056 µm	0.451 µm
Rq	0.068 µm	0.571 µm
Rz	0.0296 µm	3.086 µm
Rp	0.170 µm	1.272 µm
Rv	0.126 µm	1.814 µm
RSm	79.040 µm	75.884 µm
Rc	0.174 µm	1.384 µm
Rt	0.112 µm	0.905 µm
Rsk	0.336	0.735
Rku	2.435	3.594
Sa	0.765 µm	3.454 µm
Sq	0.769 µm	3.503 µm
Sz	1.291 µm	6.237 µm
Sp	1.291 µm	6.237 µm
Ssk	1.016	1.039
Sku	1.042	1.101



Şekil 3.7 a) 5W40 ve b) rGO6 ile yapılan testte optik mikroskop ile bilye aşınma yüzey ölçümü.



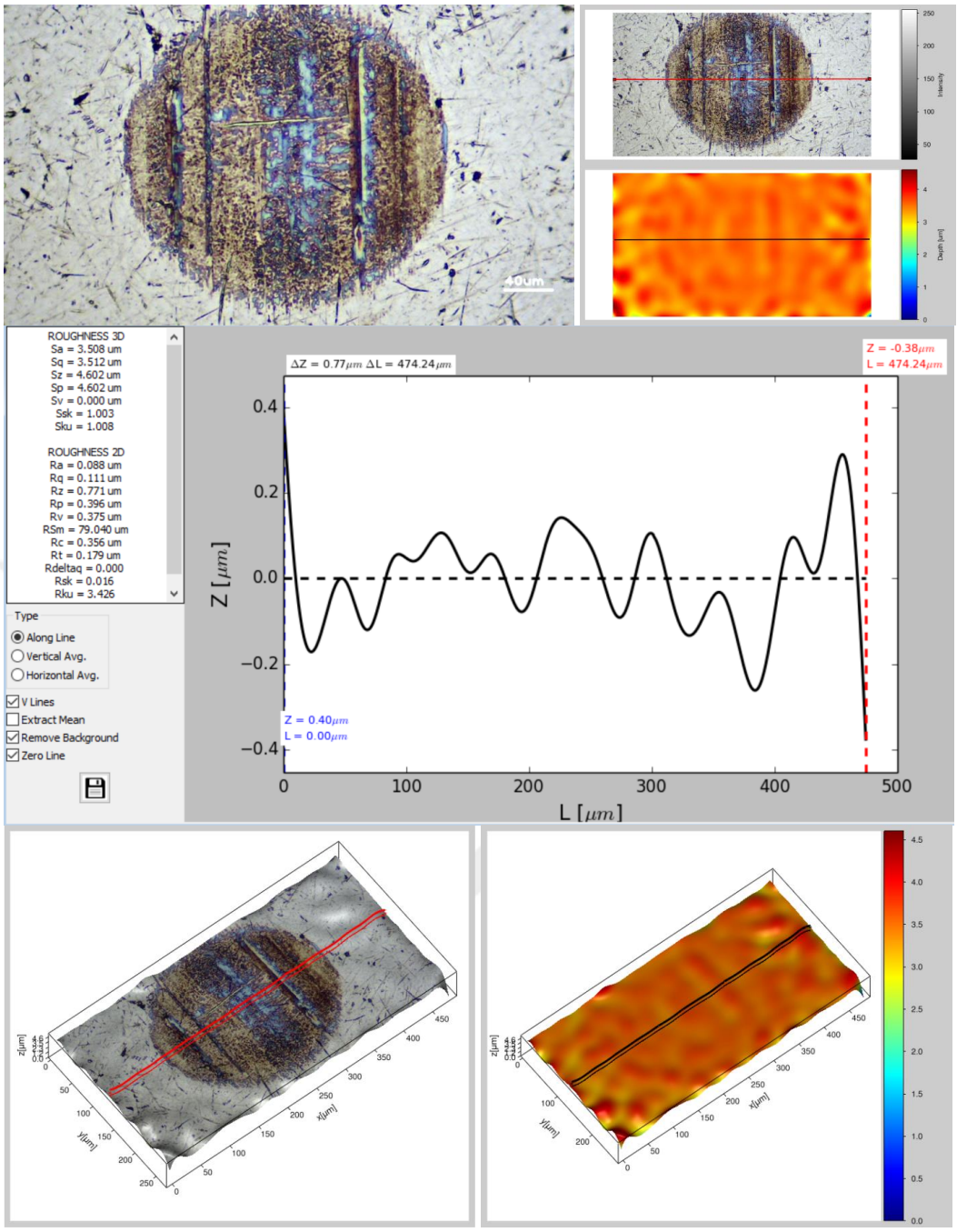
Şekil 3.8 a) 5W40 ve b) rGO6 ile yapılan testte optik mikroskop ile silindirin aşınma yüzey ölçümü.

Tablo 3.4 Tribometre testi optik mikroskop sonuçları.

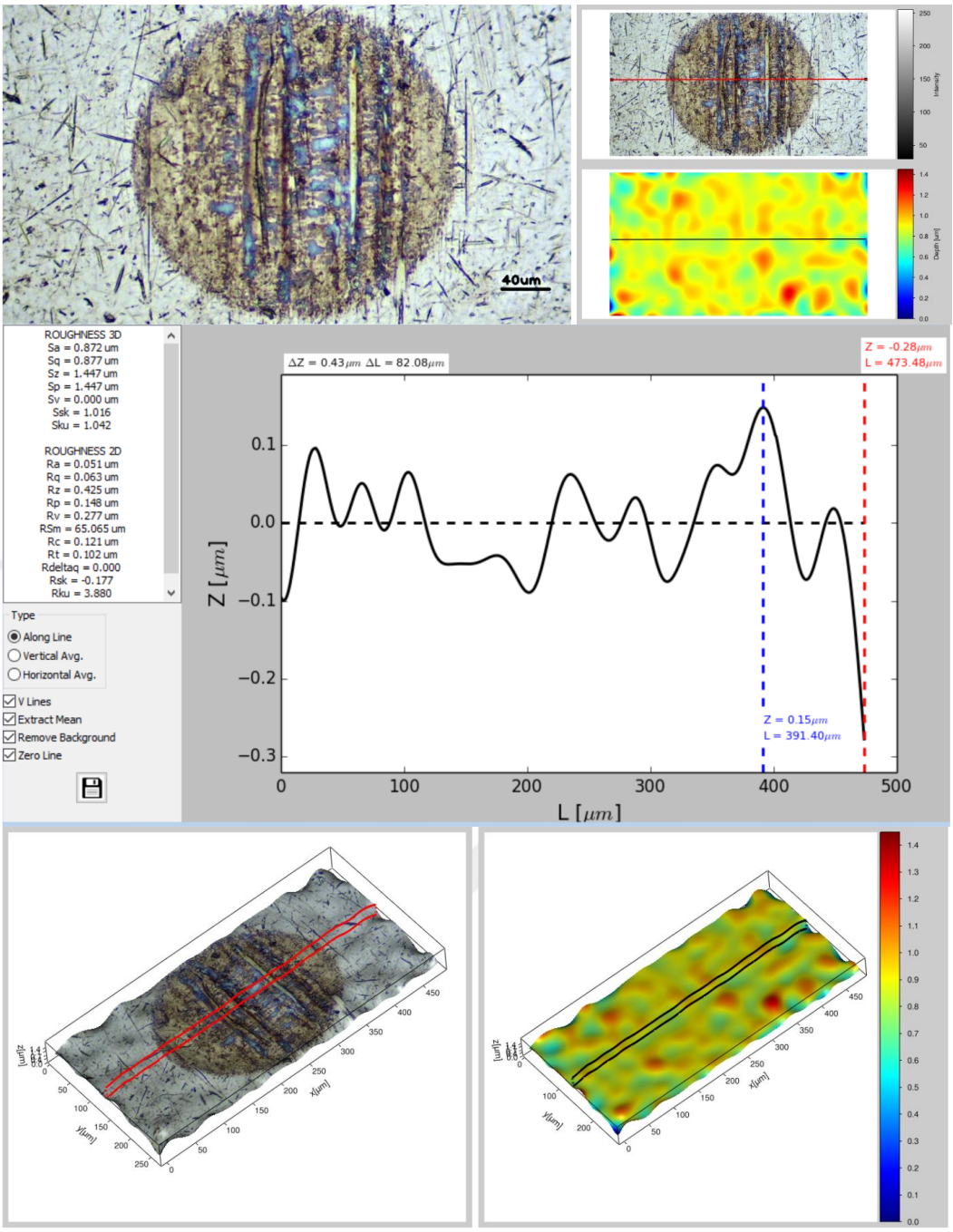
	Bilye		**Silindir**	
	Dikey	**Yatay**	**Aşınma izi - 1**	**Aşınma izi - 2**
5W40	250 µm	262 µm	274 µm	292 µm
rGO 6	247 µm	255 µm	253 µm	223 µm

Tablo 3.4'te, yapılan optik mikroskop analizleri neticesinde elde edilen aşınma izi ölçüm sonuçları gösterilmiş olup, hem bilyede hem de silindirde rGO6+5W40; referans yağ 5W40'a göre daha düşük değerler ölçülmüştür.

Yine aynı şekilde test sonrası incelenen bilye ve silindir yüzeyleri, optik mikroskoba entegre edilen Psaron Nano-bender yazılım ile yüzey pürüzlülüğü yönünden de değerlendirilmiştir (Şekil 3.9 – Şekil 3.10).

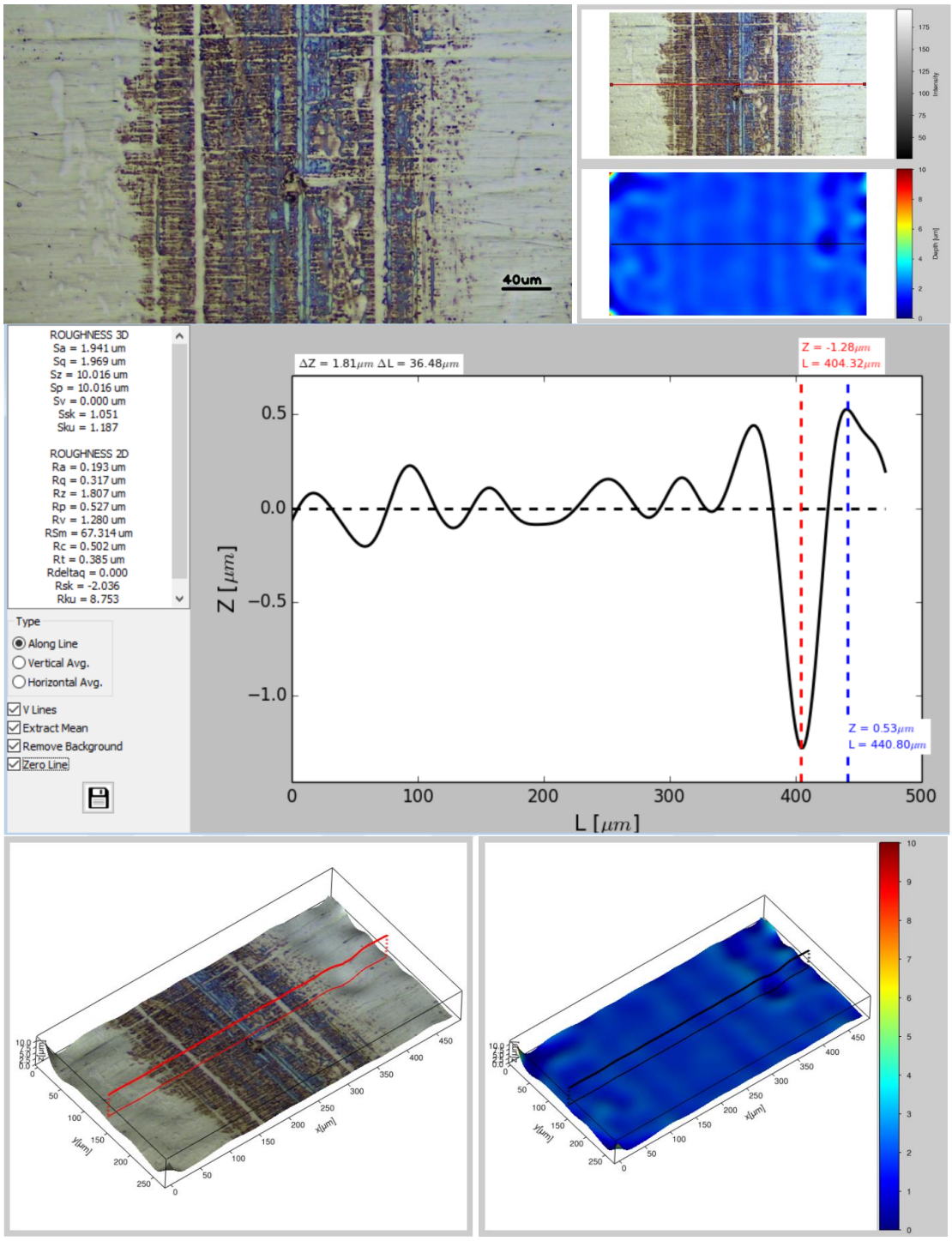


Şekil 3.9 5W40 ile yapılan tribometre test sonucunda bilyenin aşınma yüzey ölçümü için Optik mikroskop 2 ve 3 boyutlu yüzey pürüzlüğü ve parametreleri.

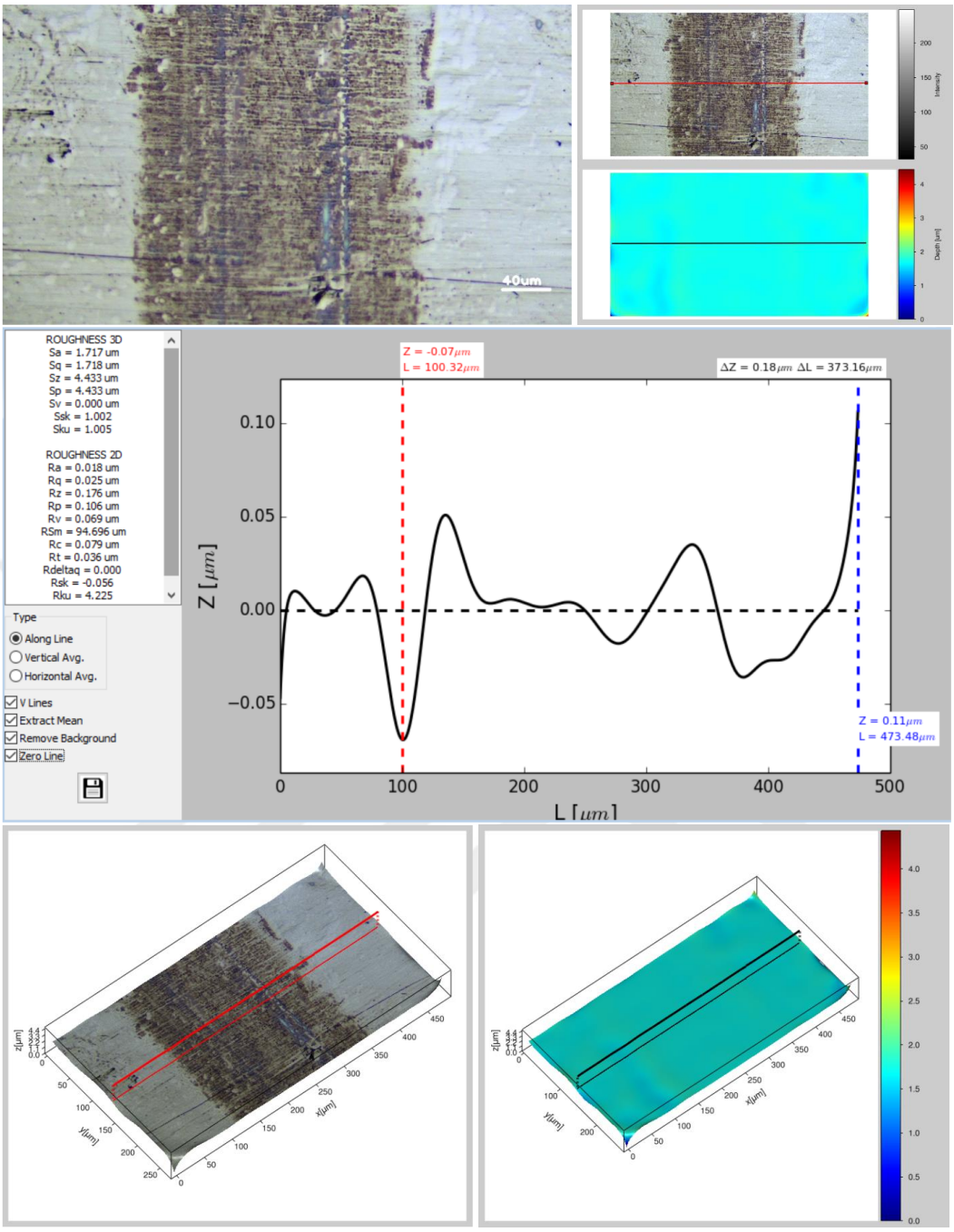


Şekil 3.10 rGO6+5W40 ile yapılan tribometre test sonucunda bilyenin aşınma yüzey ölçümü için Optik mikroskop 2 ve 3 boyutlu yüzey pürüzlüğü ve parametreleri.

Tribometre testi sonrası yüzey pürüzlülüğü açısından incelenen diğer parça ise bilye ile karşılıklı olarak test edilen Sverker çeliğidir. Yapılan yüzey pürüzlülük ölçümleri sonucunda ölçülen 5W40 ve rGO6 eklenmiş yağ ile test edilen silindirin yüzey pürüzlülük değerleri sırasıyla Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



Şekil 3.11 5W40 ile yapılan tribometre test sonucunda Sverker blok silindirin aşınma yüzey ölçümü Optik mikroskop 2 ve 3 boyutlu yüzey pürüzlüğü ve parametreleri.



Şekil 3.12 rGO6+5W40 ile yapılan tribometre test sonucunda blok silindirin aşınma yüzey ölçümü için Optik mikroskop 2 ve 3 boyutlu yüzey pürüzlüğü ve parametreleri.

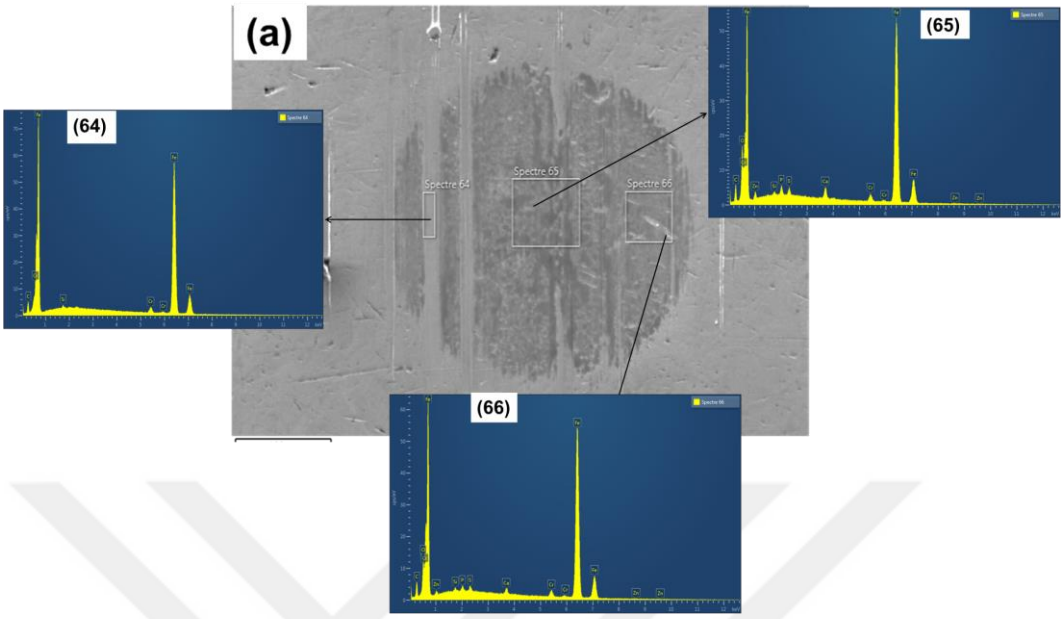
Tablo 3.5 Tribometre test öncesi ve sonrası bilye ve silindirin optik mikroskop yüzey pürüzlülük değerleri.

	(µm)	Ra	Rq	Rz	Rp	Rv	RSm	Rc	Rt	Sa	Sq	Sz
Bilye	Test edilmemiş	0.056	0.068	0.296	0.170	0.126	79.040	0.174	0.112	0.765	0.769	1.291
	5W40	**0.088**	0.111	0.771	0.396	0.375	79.040	0.356	0.179	**3.508**	3.512	4.602
	rGO6	**0.051**	0.063	0.425	0.148	0.277	65.065	0.121	0.102	**0.872**	0.877	1.447
Silindir	Test edilmemiş	0.451	0.571	3.086	1.272	1.814	75.884	1.384	0.905	3.454	3.503	6.237
	5W40	**0.193**	0.317	1.807	0.527	1.280	67.314	0.502	0.385	**1.941**	1.969	10.016
	rGO6	**0.018**	0.025	0.176	0.106	0.069	94.696	0.079	0.036	**1.717**	1.718	4.433

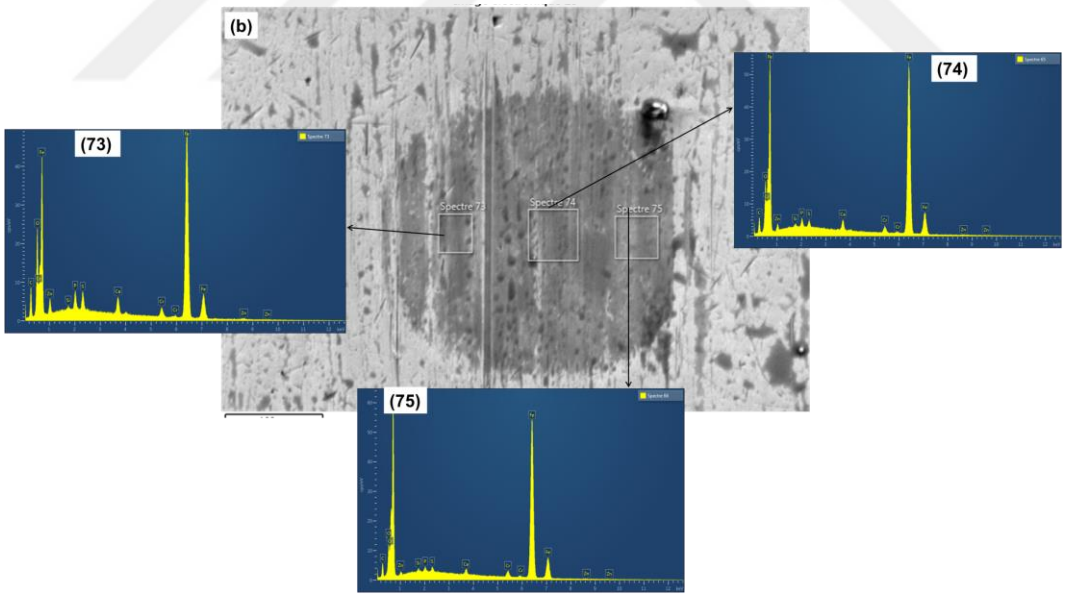
Tablo 3.5'te, yapılan yüzey pürüzlülük ölçümleri sonucunda 5W40 ve rGO6 içeren yağ ile test edilen bilye ve silindirin yüzey pürüzlülük değerleri gösterilmiştir. Yapılan ölçümler neticesinde 5W40 ile test edilen bilya için Ra:0.088 µm, Sa: 3.508 µm olarak ölçülürken, rGO6 eklenmiş yağ ile test edilen bilyenin yüzey pürüzlülük değerleri ise Ra:0.051 µm, Sa: 0.872 µm olarak ölçülmüştür. Görüleceği üzere rGO6, bilye yüzeyi üzerinde yüzey pürüzlülüğünü azaltıcı etki göstermiştir. Yine aynı şekilde silindirdeki yüzey pürüzlülük değerleri 5W40 ile test edilen silindir için Ra: 0.193 µm, Sa: 1.941 µm olarak ölçülürken rGO6 eklenmiş yağ ile test edilen silindirin yüzey pürüzlülük değerleri ise Ra:0.018 µm, Sa: 1.717 µm olarak ölçülmüştür. Görüleceği üzere silindir yüzeyinde de rGO6 yüzey pürüzlülüğünü azaltıcı etki göstermiştir. Aynı zamanda, Ra ve Sa'nın yanında Rq, Rz, Rp, Rv, Rsm, Rc, Rt, Sq, Sz değerlerinde de gerek bilyede gerek silindirde rGO6 eklenmiş yağda pürüzlülük değerlerinde azalma görülmüştür. Özellikle silindir yüzeyinde 5W40 yağ ve test öncesi silindirde belirgin bir düşüş elde edilmiştir.

Şekil 3.13-3.16'da yer alan referans ve rGO6 örneklerinin Enerji-dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) ile desteklenen SEM görüntüleri, sürtünme yüzeylerinin deformasyon derecesinin yanı sıra haritalama yoluyla uzun süre karbon varlığını göstermektedir. rGO6 testi sonucunda hem bilye hem de silindir blok parçalar için yüzey deformasyonunun 5W-40 motor yağınkine kıyasla önemli ölçüde daha düşük olduğu açıktır. Dolayısı ile rGO kendi kendine yağlama davranışını arttırmış ve motor yağı içinde bulunan Ca, Zn, P ve S gibi katkı maddeleri ile karışarak koruma etkinliğini göstermiştir. Kırmızı halka ile gösterilen rGO6 ile test edilen bilye ve bloktaki karbon

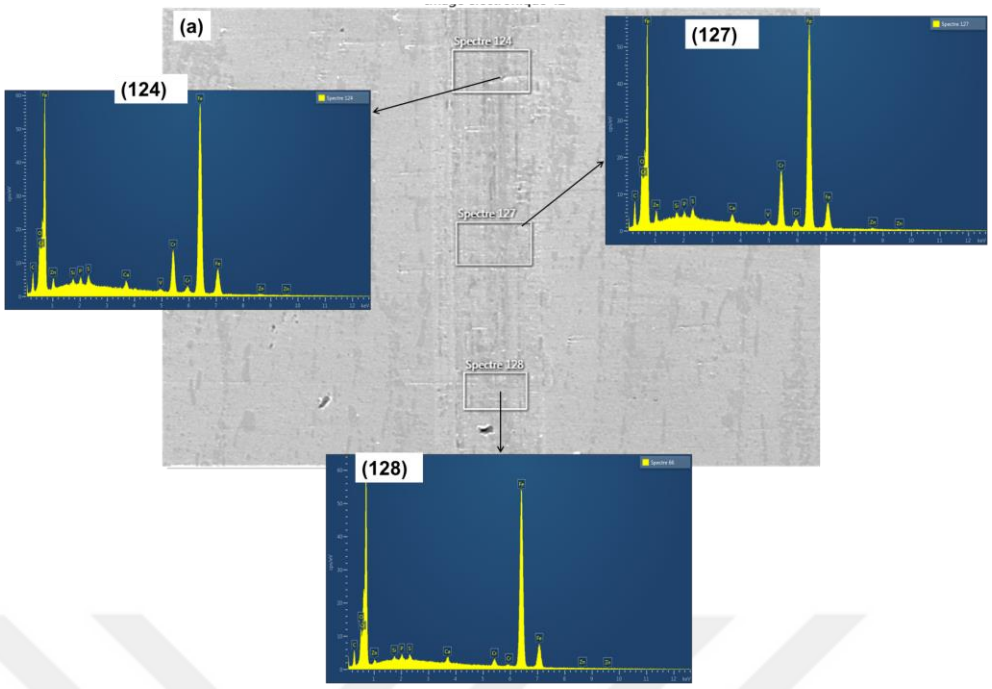
(C) miktarları 5W-40 motor yağına göre daha fazladır. Bu durum Tablo 3.6'da daha detaylı olarak görülmektedir.



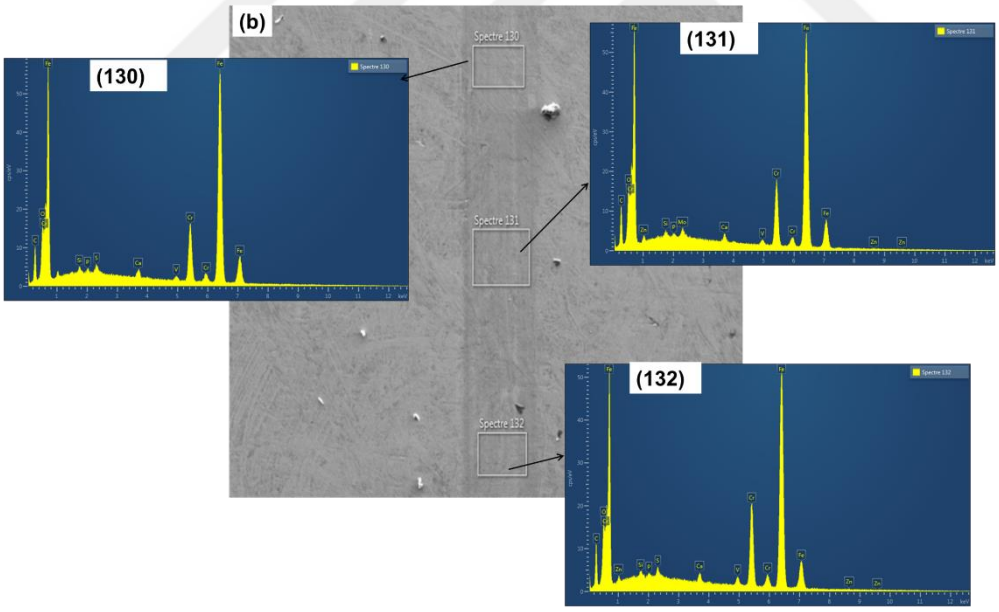
Şekil 3. 13 5W-40 motor yağı ile test edilen bilyenin EDS tarafından desteklenen SEM görüntülerinde aşınma izi.



Şekil 3.14 rGO6 ile test edilen bilyenin EDS tarafından desteklenen SEM görüntülerinde aşınma izi.



Şekil 3.15 Referans 5W-40 motor yağı ile test edilen silindirin EDS tarafından desteklenen aşınma izi SEM görüntüleri.



Şekil 3.16 rGO6 ile test edilen silindirin EDS tarafından desteklenen aşınma izi SEM görüntüleri.

Tablo 3.6 Bilye ve blok silindirde EDS tarafından ölçülen aşınma izlerinin elementel analizi.

	No	**C**	O	Al	Si	P	Ca	Mn	Fe	Zn	*Toplam*
Bilya (5W40)	64	**5.49**	0.86	0	0.25	0.1	0.01	0.49	92.44	0.36	100
	65	**6.06**	4.69	0.09	0.21	0.72	1.36	0.51	84.03	2.33	100
	66	**5.94**	2.95	0.04	0.25	0.46	0.81	0.59	87.66	1.29	100
Bilya (rGO6)	73	**8.94**	7.54	0.07	0.18	1.28	1.81	0.39	76.02	3.78	100
	74	**11.16**	5.52	0.13	0.28	0.43	1.65	0.54	79.16	1.13	100
	75	**7.61**	4.73	0.02	0.23	0.42	1.53	0.42	83.66	1.38	100
Silindir (5W40)	124	**6.44**	3.76	0.08	0.34	0.55	0.92	1.34	83.47	3.1	100
	127	**7.69**	3.67	0.07	0.37	0.42	0.86	1.82	82.01	3.09	100
	128	**7.72**	3.75	0.08	0.36	0.51	0.82	2.04	81.69	3.02	100
Silindir (rGO6)	130	**9.85**	3.73	0.14	0.31	0.3	0.86	1.76	81.58	1.47	100
	131	**11**	3.7	0.11	0.28	0.22	0.75	1.75	80.47	1.72	100
	132	**11.53**	3.74	0.07	0.27	0.24	0.89	2.13	79.76	1.37	100

*Tüm elementlerin içeriği kütlesel yüzde (%) olarak verilmiştir.

Tablo 3.6'da listelenen elementel analize göre, rGO6 testinden sonra (Şekil 3.14 ve 3.16) 5W-40 durumuna (Şekil 3.13 ve 3.15) kıyasla, sürtünme yüzeylerindeki karbon içeriği neredeyse iki katına çıkarken Fe içeriği azalmıştır. Bu sonuç, kayan parçalar arasında daha etkili bir yağlama sağlayan rGO katkısı sayesinde sürtünme yüzeylerinde koruyucu bir kaplamanın varlığını doğrular. Bu nedenle, rGO'nun, delaminasyon etkisi yoluyla kayma gerilimine karşı yüzey korumasına katkıda bulunan, sürtünme ve aşınma yolunun azaltılmasında anahtar bir role sahip olduğu açıktır [78].

3.2 Honda GX270 Benzinli Motor Tribometre Testleri

Testte kullanılacak olan bilye ve silindirin test öncesi aşınmamış haldeki ve test sonrası aşınmış yüzey pürüzlülükleri optik mikroskop ve dijital mikroskop vasıtasıyla 2D ve 3D olarak incelenmiş ve yüzey pürüzlülükleri tespit edilmiştir. Yüzeyde pürüzlülüklerinin doğru şekilde karşılaştırılabilmesi için tüm pürüzlülük ölçümleri, optik mikroskop yazılımında yüksek kaliteli arka plan çıkarma bölümü seçilerek 10X Olympus objektifi ile gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma için literatürde yaygın olarak tercih edilen Ra ve Sa değerleri dikkate alınmıştır. 2D/3D pürüzlülük parametreleri 1 µm'den küçük olduğu için (Microsurf serisi komparatörlerde Ra değeri 0.0125 µm'den

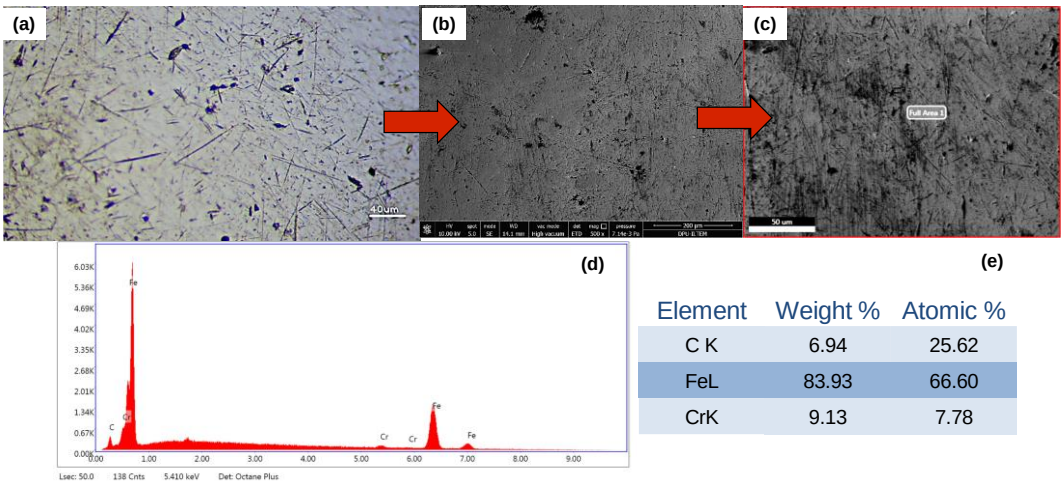
0.26 µm arasında değişmektedir) grafiklerde net olarak görülebilmekte olup bu değerler UKAS ile uyumludur [79].

3.2.1 Honda GX270 Benzinli Motor - Test Öncesi Yapılan Optik Mikroskop Analizleri

3.2.1.1 Test Öncesi Bilye Yüzey Analizleri

Tribometre testleri Honda GX 270 benzinli motor ve Antor 6LD 400 Diesel motor olmak üzere 2 motordan kesilen silindir parçaları ile gerçekleştirilmiş olup bu kısımda ilk olarak Honda GX 270 motora ait test sonuçları irdelenecektir.

Tribometre testlerinde tutucuya monte edilecek olan bilyenin test öncesi 2D ve 3D dijital mikroskop analizleri gerçekleştirilmiş olup, test sonrası meydana gelen aşınma seviyesi ile karşılaştırılmak üzere Ra ve Sa değerleri tespit edilmiştir. Bilyenin 5X ve 10X mercek altındaki görüntüleri Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Dijital mikroskop altında incelenen kullanılmamış bilyenin pürüzlülük değeri Ra:0.056 µm, Sa: 0.765 µm olarak ölçülmüş ve Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Kullanılmamış bilyenin elementel bileşenenlerinin tayini için ise FESEM analizleri yapılarak analiz sonuçları Şekil 3.17 ve Tablo 3.7'de gösterilmiştir.

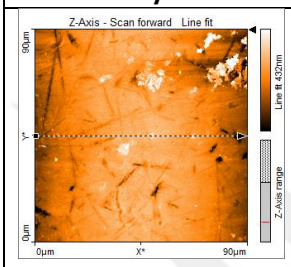
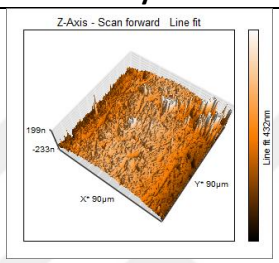
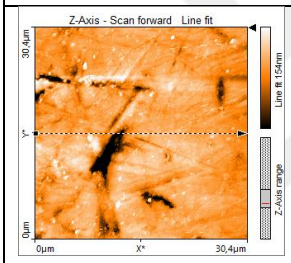
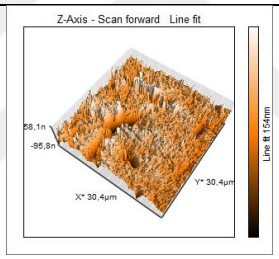
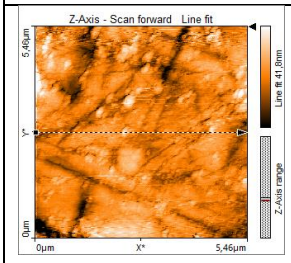
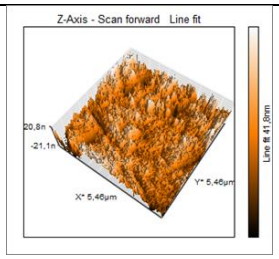


Şekil 3.17 Yeni (kullanılmamış) bilye a) Optik mikroskop b,c) S.E.M d) X-Ray, e) Elementel analiz sonuçları.

Tablo 3. 7 Test öncesi bilyenin elementel analizi.

	Numune adı	C	O	Al	Si	P	Ca	Cr	Fe	Toplam
1	Test edilmemiş bilye	6.94	0	0	0	0	0	6.94	83.93	100

Kullanılmamış bilyenin yüzeyi AFM vasıtasıyla incelenerek yüzey pürüzlülükleri 90x90 µm, 30x30 µm ve 5x5 µm olarak ölçülmüştür. Şekil 3.18'de yer alan grafik, bilyenin test öncesi yapılan 2 ve 3 boyutlu AFM görüntüleri ve yüzey pürüzlülük değerlerini göstermektedir.

2 Boyutlu	Yüzey Pürüzlülük	3 Boyutlu	Yüzey Pürüzlülük
	-- Line Roughness -- Ra 61,548nm Rq 73,414nm Ry 420,63nm Rp 187,57nm Rv -233,06nm Rm -18,626fm		-- Area Roughness -- Area 8,163nm^2 Sa 55,988nm Sq 71,906nm Sy 2093,4nm Sp 747,64nm Sv -1345,8nm Sm -17,899fm
	-- Line Roughness -- Ra 12,849nm Rq 20,795nm Ry 159,95nm Rp 29,235nm Rv -130,72nm Rm -18,626fm		-- Area Roughness -- Area 930,8pm^2 Sa 16,609nm Sq 27,425nm Sy 478,24nm Sp 179,05nm Sv -299,19nm Sm -18,626fm
	-- Line Roughness -- Ra 4,5565nm Rq 5,894nm Ry 31,568nm Rp 18,271nm Rv -13,297nm Rm -18,626fm		-- Area Roughness -- Area 30,03pm^2 Sa 5,0573nm Sq 6,8195nm Sy 100,28nm Sp 46,071nm Sv -54,205nm Sm -18,626fm

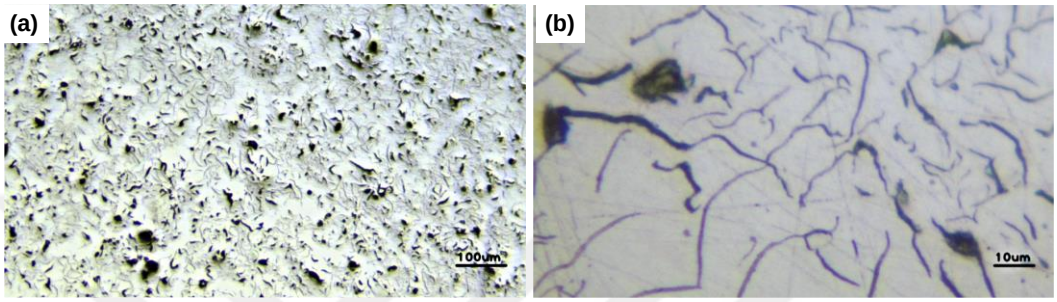
Şekil 3.18 Test öncesi kullanılmamış bilyenin AFM görüntüleri ve yüzey pürüzlülük değerleri.

3.2.1.2 Test Öncesi Silindir Yüzey Analizleri

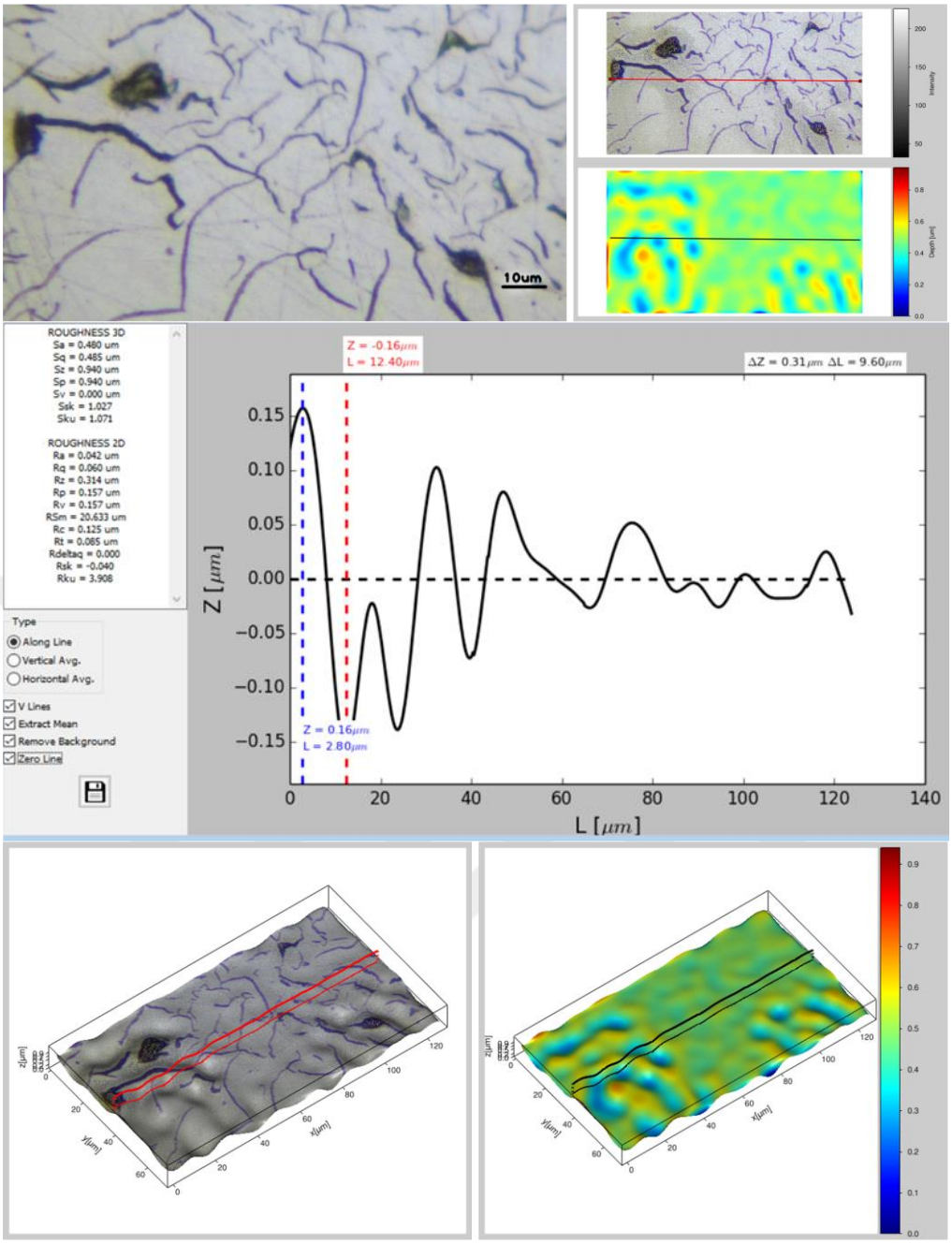
Test edilmemiş Honda GX270 motora ait (parlatılmış) silindir, yüzey pürüzlülüklerinin tayini ve test sonrası meydana gelen aşınma seviyesinin karşılaştırılması amacıyla mikroskop altında incelenmiştir (Şekil 3.19). İncelenen silindir yüzeyi 2D ve 3D görüntülenerek yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Şekil 3.20'de gösterilen ve parlatılmış motor silindirininin 2D-3D dijital mikroskop görüntülerini içeren şekilde yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüş ve bu ölçümlerde Ra

ve Sa değerleri dikkate alınmıştır. Yapılan ölçümler neticesinde test edilmemiş silindire ait yüzey pürüzlülükleri Ra:0.042 µm, Sa: 0.480 µm olarak ölçülmüş ve Tablo 3.8'de gösterilmiştir.

Kullanılmamış silindirin yüzeyi ayrıca AFM vasıtasıyla da incelenerek yüzey pürüzlülükleri 90x90 µm, 30x30 µm ve 5x5 µm olarak ölçülmüştür. Şekil 3.21'de yer alan grafik, silindirin test öncesi yapılan 2 ve 3 boyutlu AFM görüntülerini ve yüzey pürüzlülük değerlerini göstermektedir.



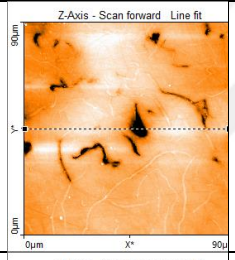
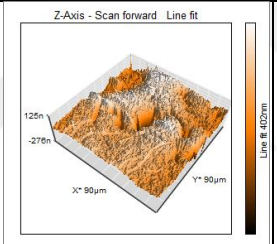
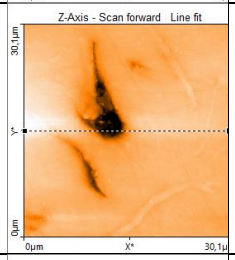
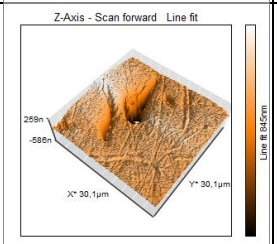
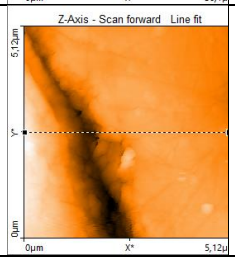
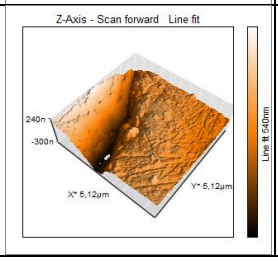
Şekil 3.19 Test öncesi parlatılmış HondaGX 270 motor silindirinin a) 5X, b) 10X mercek altındaki dijital optik mikroskop görüntüsü.



Şekil 3.20 Test öncesi parlatılmış benzinli motor silindirinin 2D-3D dijital mikroskop görüntüsü.

Tablo 3.8 Test öncesi parlatılmış benzinli motor silindiri optik mikroskop yüzey pürüzlülük değerleri.

Test Edilmemiş Honda Silindir	
(µm)	Yüzey pürüzlülüğü
Ra	0.042
Rq	0.060
Rz	0.314
Rp	0.157
Rv	0.157
RSm	20.633
Rc	0.125
Rt	0.065
Sa	0.480
Sq	0.485
Sz	0.940
Sp	0.940

	2 Boyutlu	Yüzey Pürüzlülük	3 Boyutlu	Yüzey Pürüzlülük
90x90		-- Line Roughness -- Ra 89,225nm Rq 151,39nm Ry 921,07nm Rp 123,82nm Rv -797,25nm Rm -18,626fm		-- Area Roughness -- Area 8,163nm^2 Sa 46,129nm Sq 71,236nm Sy 1,167µm Sp 359,5nm Sv -807,54nm Sm -18,625fm
30x30		-- Line Roughness -- Ra 170,17nm Rq 235,92nm Ry 938,6nm Rp 270,47nm Rv -668,12nm Rm -18,626fm		-- Area Roughness -- Area 915,9pm^2 Sa 60,734nm Sq 108,36nm Sy 1,088µm Sp 318,57nm Sv -769,39nm Sm -18,626fm
5x5		-- Line Roughness -- Ra 66,952nm Rq 95,685nm Ry 458,84nm Rp 211,14nm Rv -247,69nm Rm -18,626fm		-- Area Roughness -- Area 26,44pm^2 Sa 66,219nm Sq 90,476nm Sy 613,32nm Sp 249,91nm Sv -363,41nm Sm -18,626fm

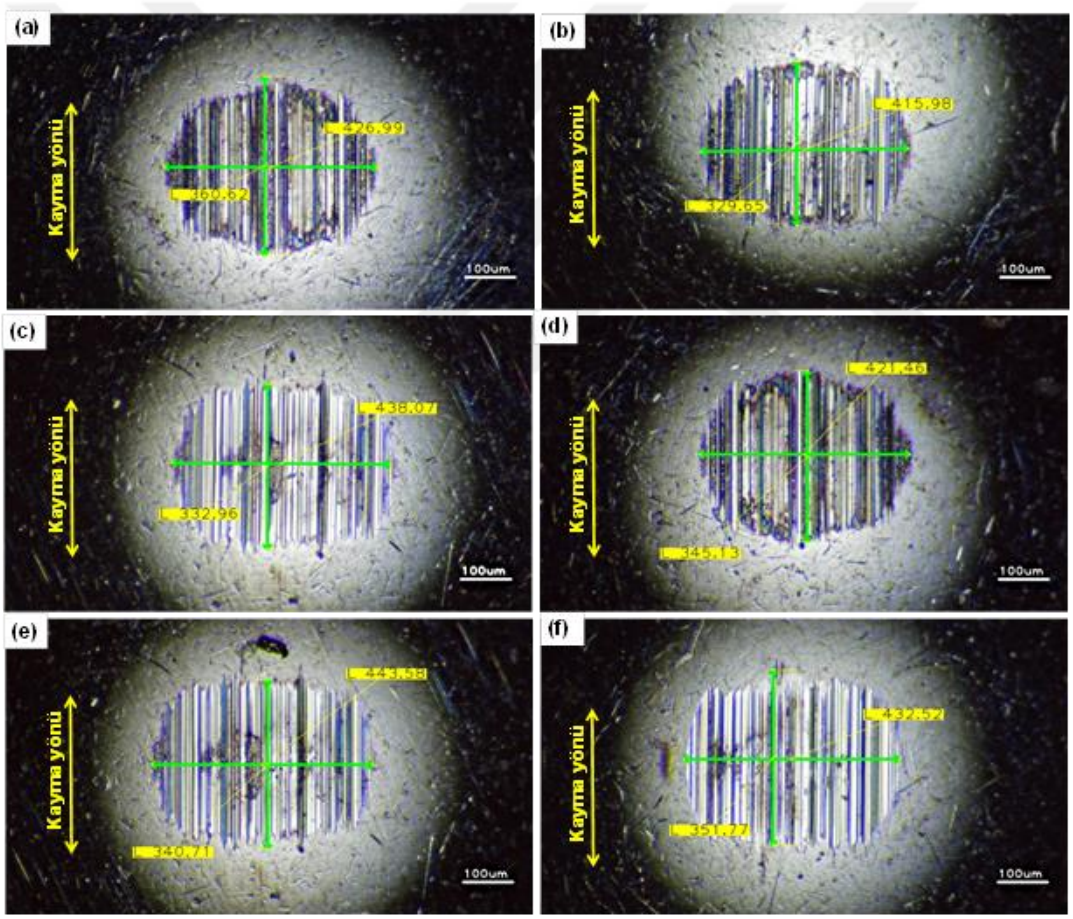
Şekil 3.21 Test öncesi parlatılmış Honda GX 270 silindirinin AFM ile ölçülen 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri ve yüzey pürüzlülük değerleri.

3.2.2 Honda GX270 Benzinli Motor Test Sonrası Optik Mikroskop Analizleri

3.2.2.1 Test Sonrası Bilye Yüzey Analizleri

Bölüm 2'de detaylı olarak açıklanan test parametrelerine uygun olarak yapılan tribometre testleri neticesinde aşınan bilye ve silindirde meydana gelen aşınma izleri optik mikroskop ve dijital mikroskop vasıtasıyla 2D ve 3D olarak incelenmiş ve yüzey pürüzlülükleri tespit edilmiştir.

Deney parametrelerine uygun şekilde referans yağ (5W40) ve rGO6 eklenmiş yağ ile gerçekleştirilen tekrarlı tribometre testleri neticesinde bilyede meydana gelen noktasal aşınma izleri optik mikroskop vasıtasıyla incelenmiş ve Şekil 3.22'de gösterilmiştir. Ölçülen bu aşınma iz genişliklerinin karşılaştırmalı hali ise Tablo 3.9'da gösterilmiştir.



(a) 5W40 ile yapılan 1.test
(b) rGO 6+5W40 ile yapılan 1. test
(c) 5W40 ile yapılan 2.test
(d) rGO 6+5W40 ile yapılan 2. test
(e) 5W40 ile yapılan 3.test
(f) rGO 6+5W40 ile yapılan 3. test

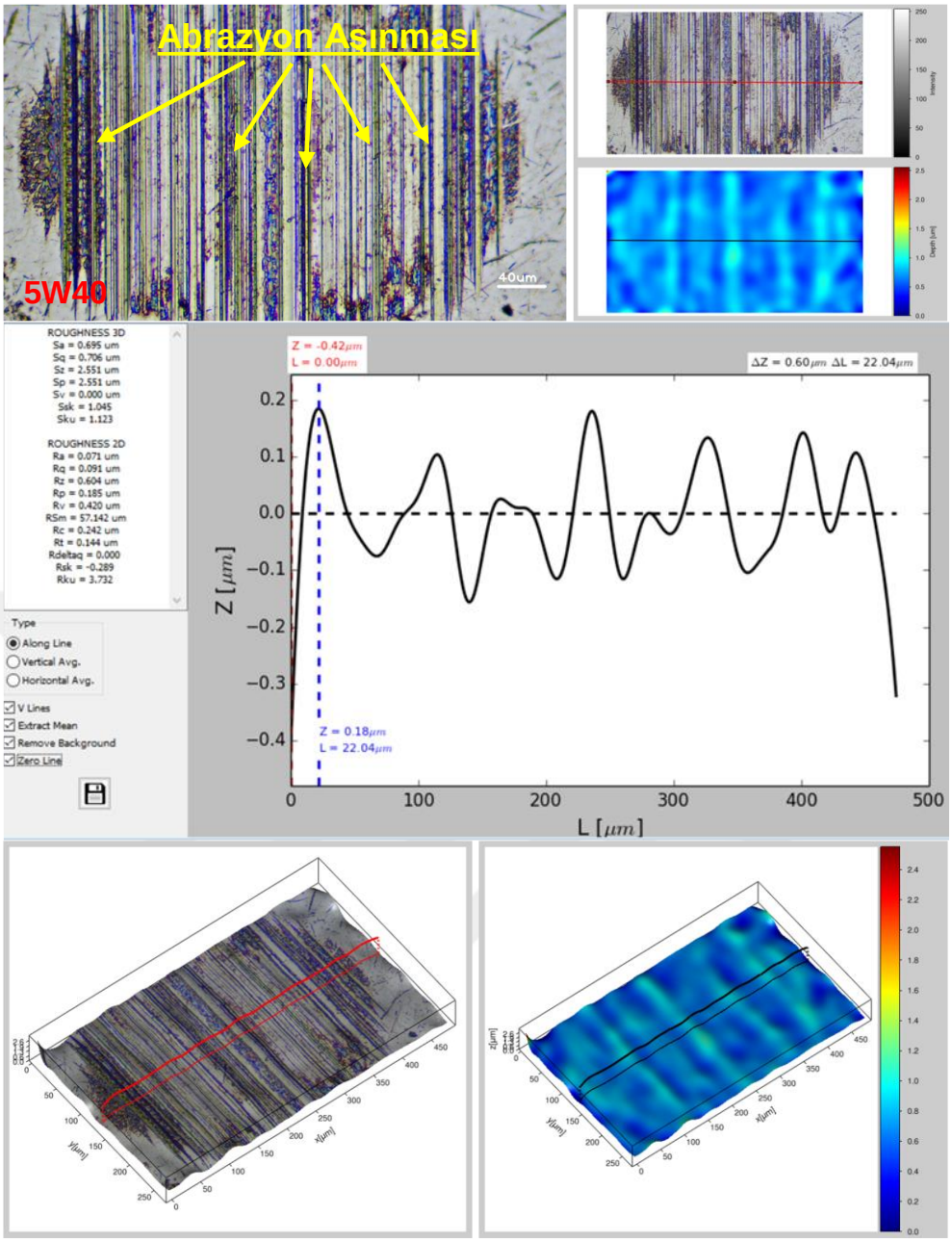
Şekil 3.22 Parlatılmış silindir gömleği üzerinde 3 kez test edilen bilyelerin optik dijital mikroskop ile aşınma izi çap mesafelerinin ölçümü.

Tablo 3.9 5W40 ve rGO6 ile parlatılmış Honda GX 270 motor silindir bloğu üzerinde test edilen bilyelerin aşınma izi çapları.

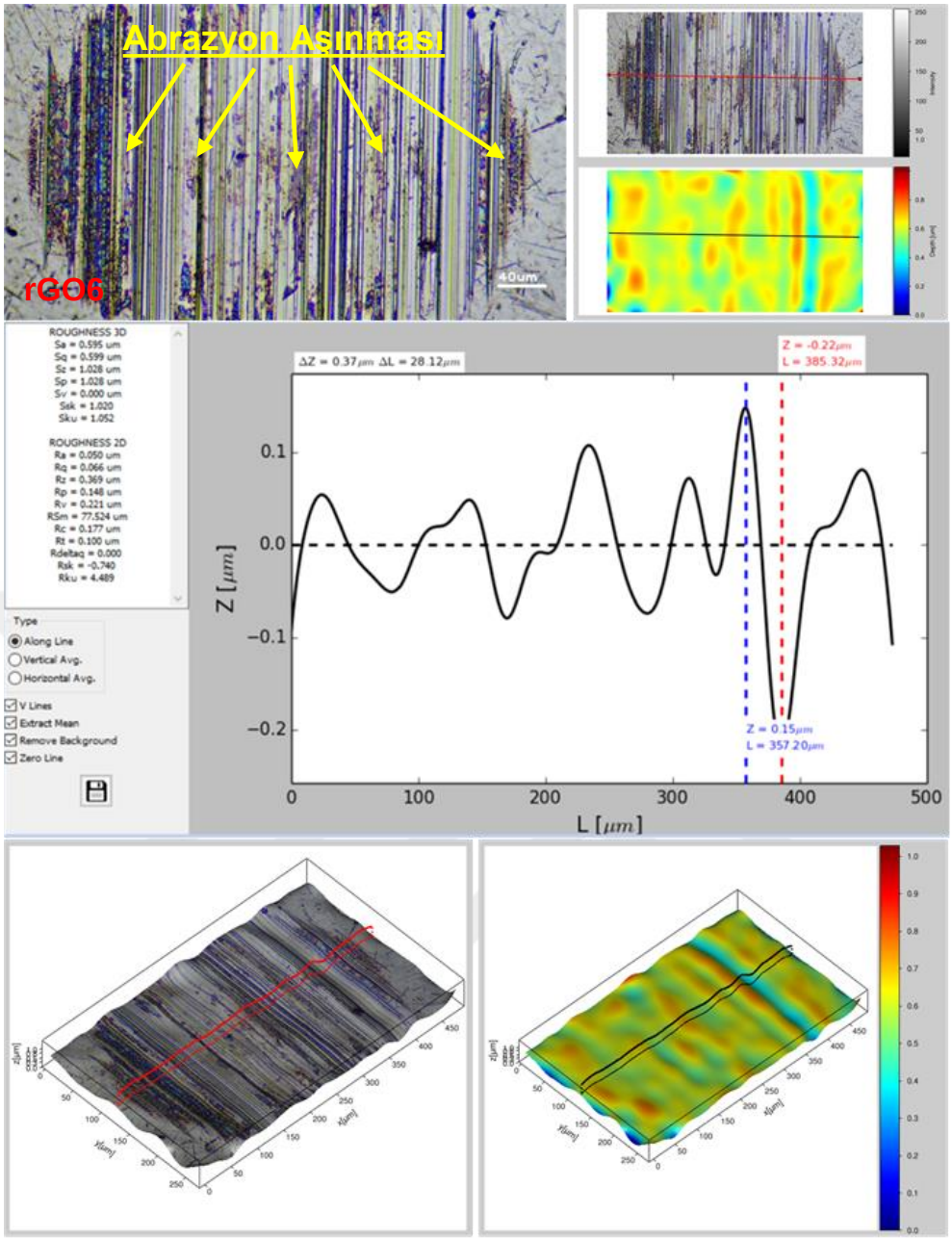
Test no	Aşınma izi çapı Yatay (µm)	Aşınma izi çapı Dikey (µm)
Test1 (5W40)	426.99	360.62
Test1 (rGO6)	**415.98**	**329.65**
Test2 (5W40)	438.07	332.96
Test2 (rGO6)	**421.46**	**345.13**
Test3 (5W40)	443.58	340.71
Test3 (rGO6)	**432.52**	**351.77**

Her bir testte rGO6 ile ölçülen aşınma izi, referans Shell 5W40 yağa kıyasla gerek yatay gerekse dikey olarak düşük çıkmıştır. Yağa %0.02 eklenen ve süspansiyon halde duran indirgenmiş grafen oksit nanopartikülü rGO6 yüzeyi kaplamış ve korumuştur. Dijital mikroskop altında incelenen aşınma izleri, yüzey pürüzlülüğü yönünden de incelenmiş ve referans değer olarak Ra ve Sa değerleri alınmıştır. Referans yağ ve rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan 3 adet tekrarlı testten oluşan tribometre testlerinde bilyelerin yüzey pürüzlülük ölçüleri Tablo 3.10'da gösterilmiş olup yüzey pürüzlülük analiz sonuçları detaylı olarak aşağıdaki gibidir:

5W40 referans yağ ve rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan tribometre testlerinin ilki olan Test 1'de bilye yüzeyi optik dijital mikroskop altında incelenmiştir. Yapılan inceleme neticesinde bilyenin yüzey pürüzlülük değerleri 5W40 yağ için Ra: 0.071, Sa: 0.695 (Şekil 3.23); rGO6 eklenmiş yağ için ise Ra: 0.050, Sa: 0.595'tir (Şekil 3.24).

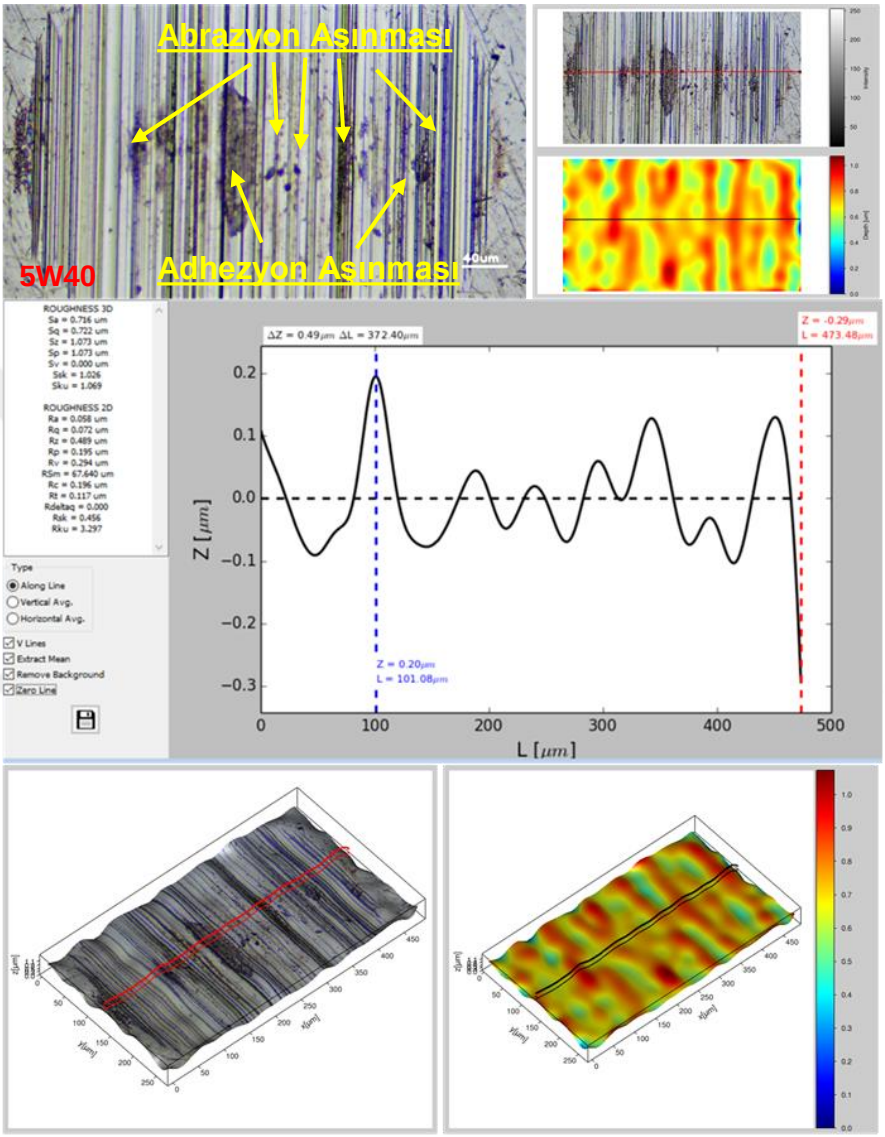


Şekil 3.23 5W40 yağ ile yapılan tribometre testi bilye yüzeyi – Test 1.

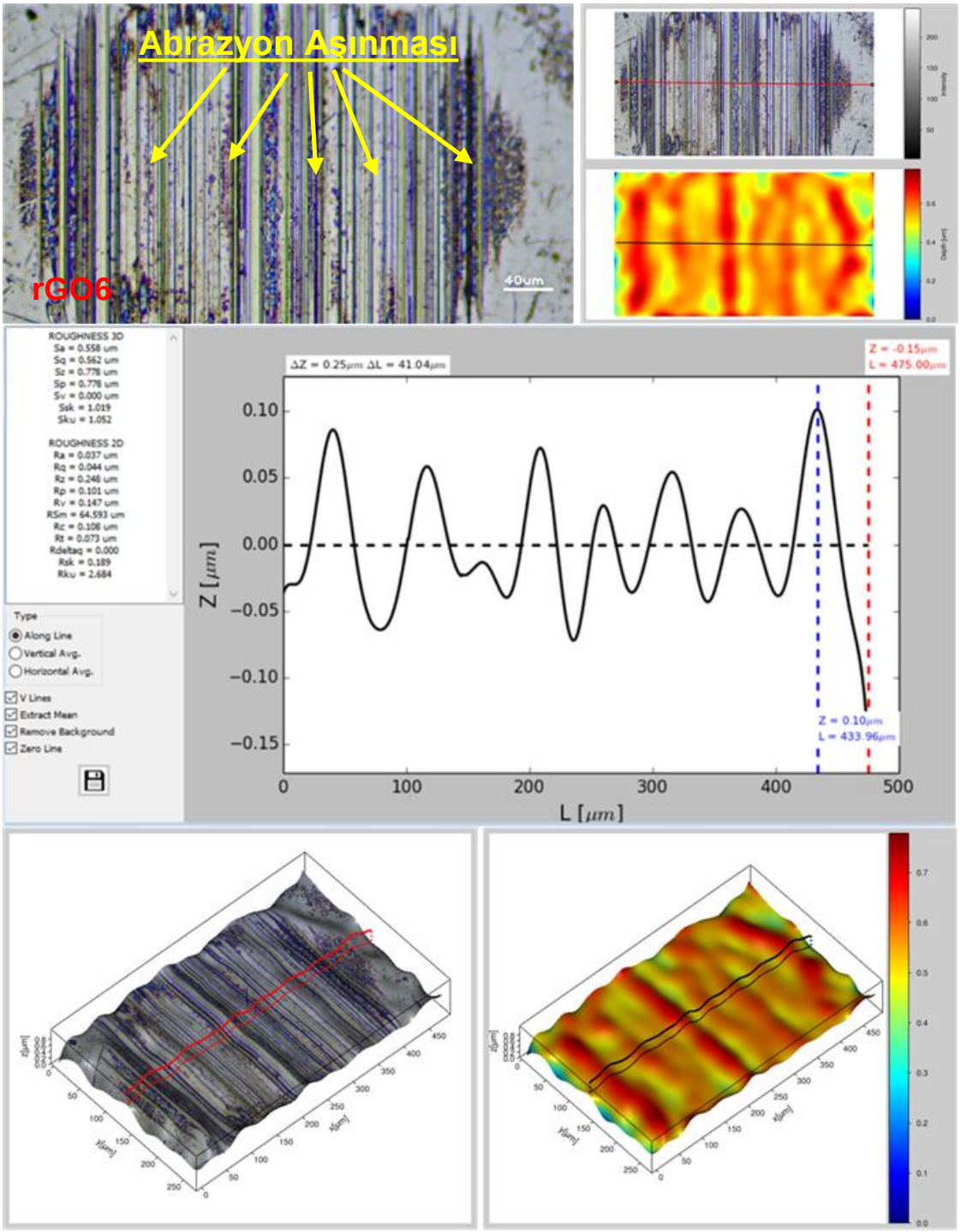


Şekil 3.24 rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan tribometre testi bilye yüzeyi – Test 1.

5W40 referans yağ ve rGO6 eklenmiş referans yağ ile yapılan tribometre testlerinin ikincisi olan Test 2'de bilye yüzeyi optik dijital mikroskop altında incelenmiştir. Yapılan inceleme neticesinde bilyenin yüzey pürüzlülük değerleri 5W40 yağ için Ra: 0.058, Sa: 0.716 (Şekil 3.25); rGO6 eklenmiş yağ için ise Ra: 0.037, Sa: 0.558 olarak ölçülmüştür (Şekil 3.26).

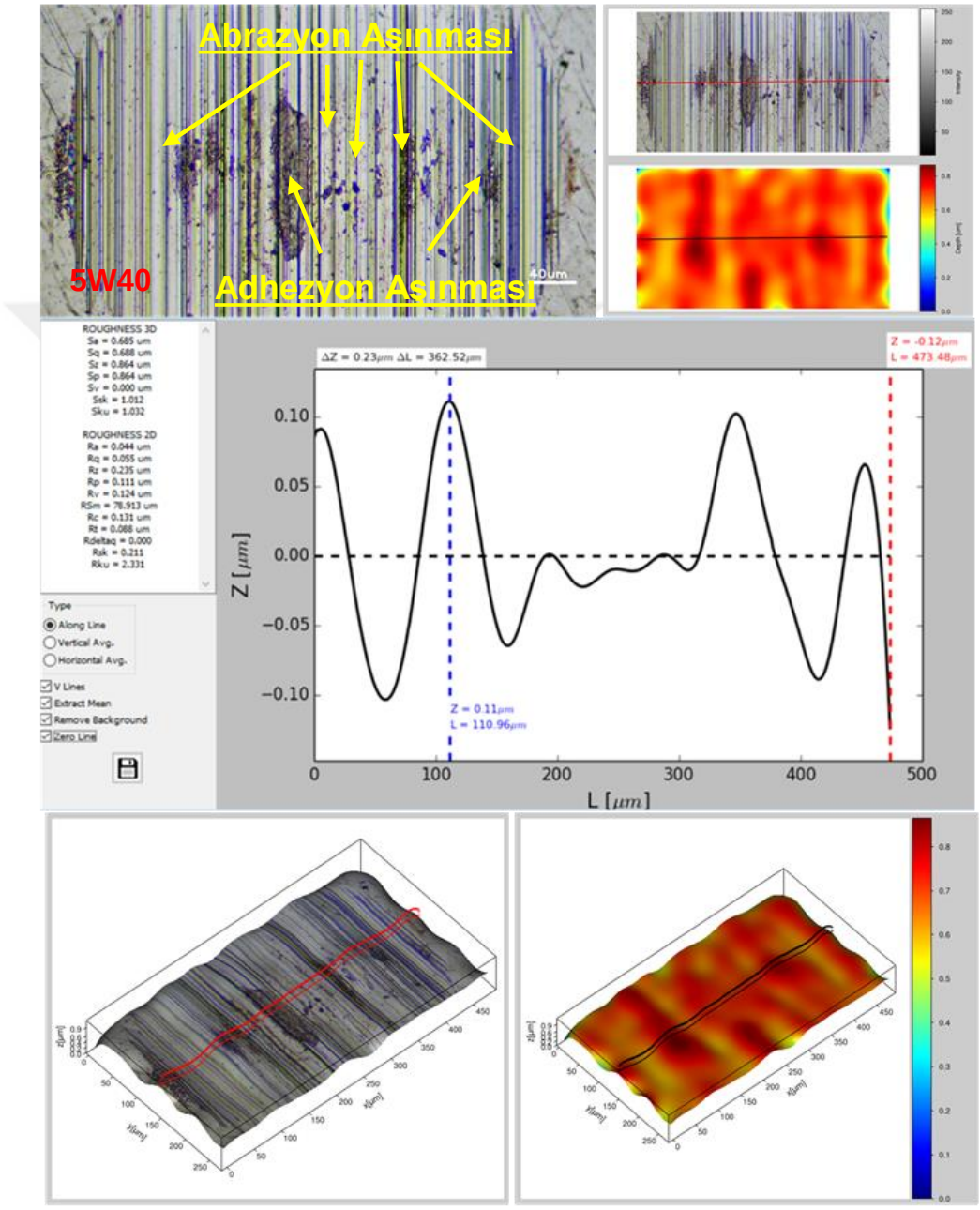


Şekil 3.25 5W40 yağ ile yapılan tribometre testi bilye yüzeyi – Test 2.

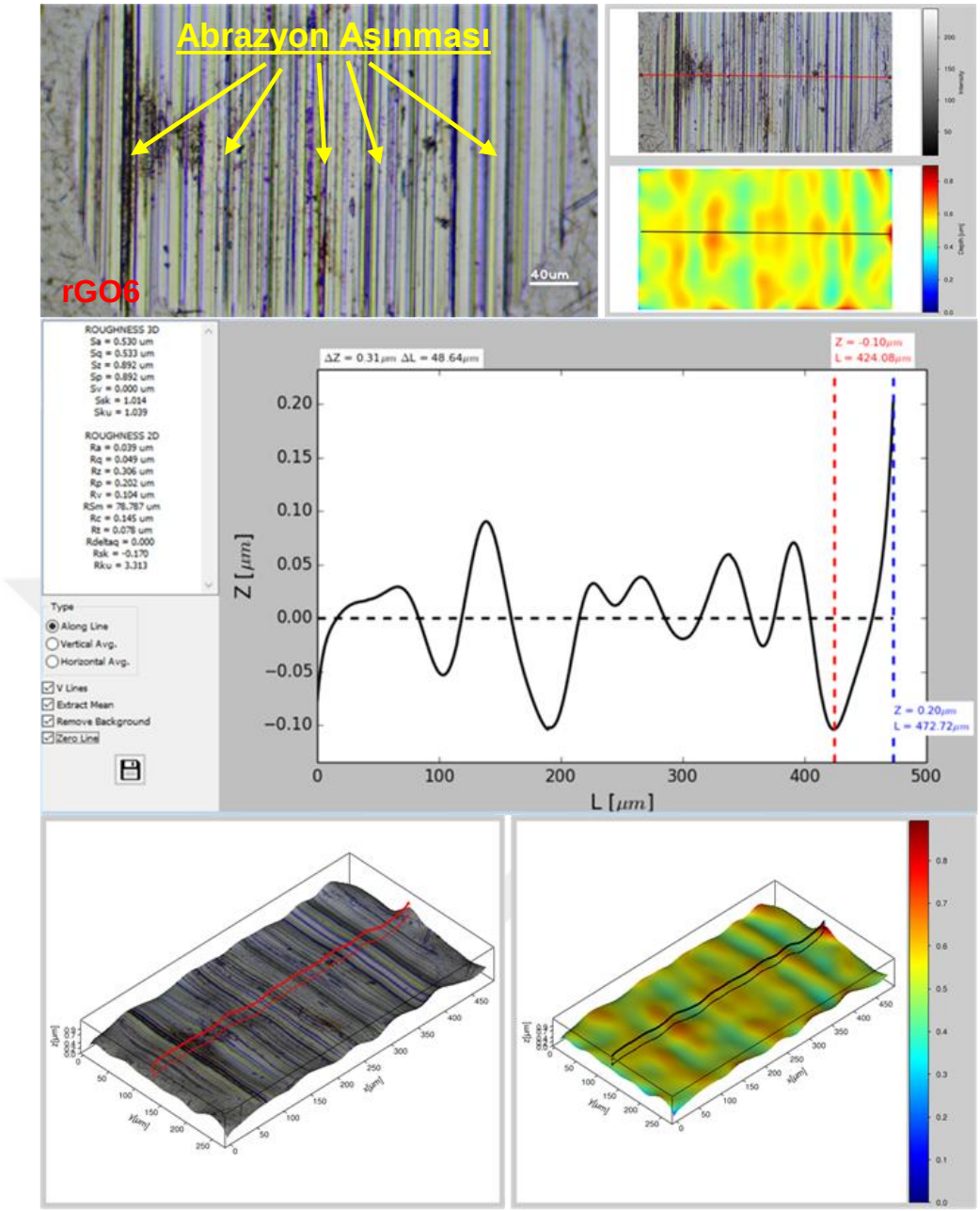


Şekil 3.26 rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan tribometre testi bilye yüzeyi – Test 2.

5W40 referans yağ ve rGO6 eklenmiş referans yağ ile yapılan tribometre testlerinin üçüncüsü olan Test 3'te bilye yüzeyi optik dijital mikroskop altında incelenmiştir. Yapılan inceleme neticesinde bilyenin yüzey pürüzlülük değerleri 5W40 yağ için Ra: 0.044, Sa: 0.685 (Şekil 3.27); rGO6 eklenmiş yağ için ise Ra: 0.039, Sa: 0.530 olarak ölçülmüştür (Şekil 3.28).



Şekil 3.27 5W40 yağ ile yapılan tribometre testi bilye yüzeyi – Test 3.



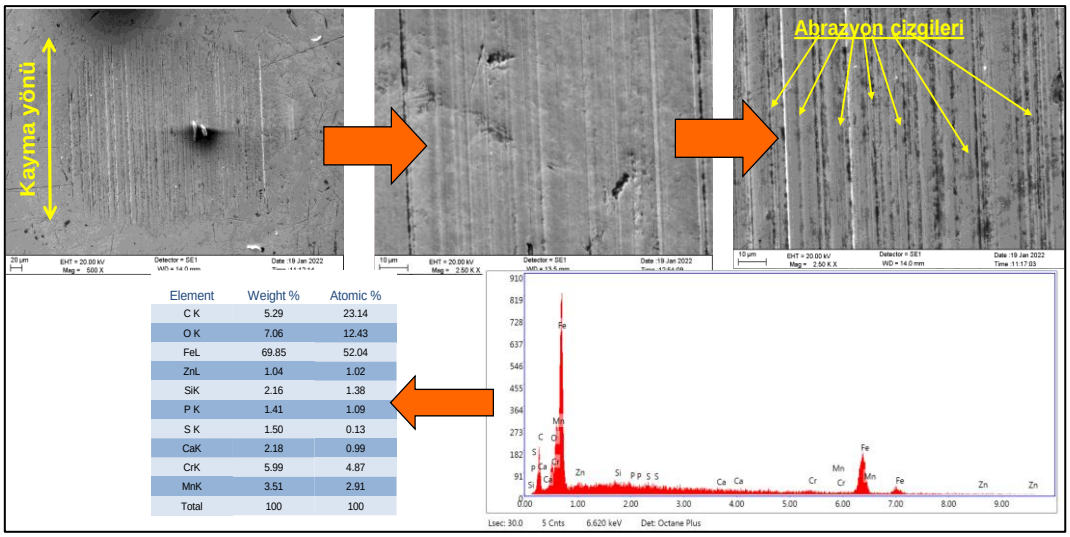
Şekil 3.28 rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan tribometre testi bilye yüzeyi – Test 3.

Tablo 3.10 5W40 ve rGO6 ile parlatılmış Honda GX 270 motor silindir bloğu üzerinde test edilen bilyelerin 2D ve 3D yüzey pürüzlülük değerleri.

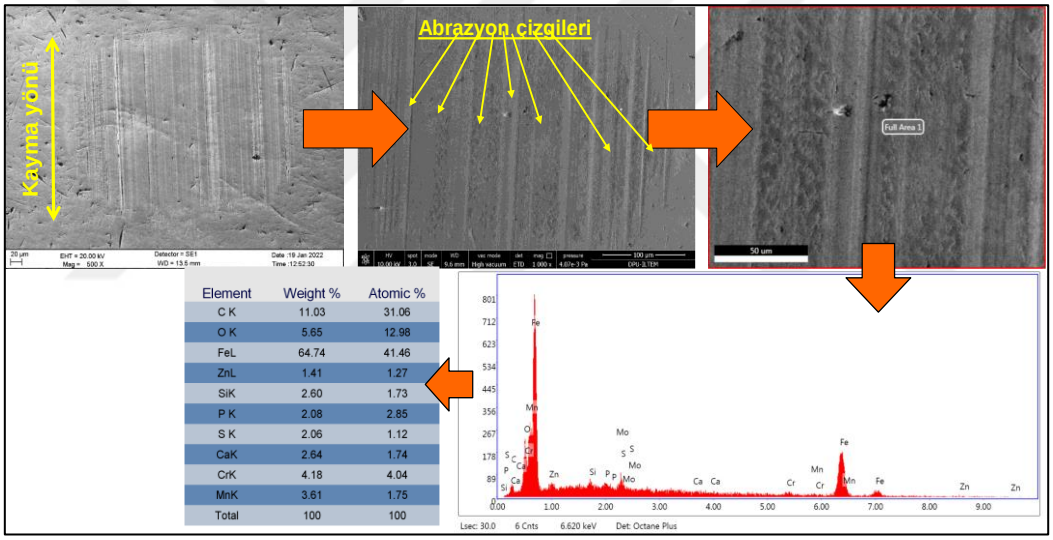
	(µm)	Ra	Rq	Rz	Rp	Rv	RSm	Rc	Rt	Sa	Sq	Sz
	Test edilmemiş	0.056	0.068	0.296	0.170	0.126	79.040	0.174	0.112	0.765	0.769	1.291
Test 1	5W40	0.071	0.091	0.604	0.185	0.420	57.142	0.242	0.144	0.695	0.706	2.551
	rGO6	0.050	0.033	0,369	0.148	0.221	77.524	0.177	0.100	0.595	0.599	1.028
Test 2	5W40	0.058	0.072	0.489	0.195	0.294	67.640	0.196	0.117	0.716	0.722	1.073
	rGO6	0.037	0.044	0.248	0.101	0.147	64.593	0.108	0.073	0.558	0.562	0.778
Test 3	5W40	0.044	0.055	0.235	0.111	0.124	78.913	0.131	0.066	0.685	0.688	0.864
	rGO6	0.039	0.049	0.306	0.202	0.104	78.787	0.145	0.078	0.530	0.533	0.892

Tablo 3.10, referans yağ ve rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan 3 adet tekrarlı testten oluşan tribometre testlerinde bilyelerin yüzey pürüzlülük ölçülerini göstermektedir. Yapılan tüm tekrarlı testlerde Ra ve Sa değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, Ra ve Sa'nın yanında Rq, Rz, Rp, Rv, Rsm, Rc, Rt, Sq, Sz değerlerinde de gerek bilyede gerek silindirde rGO6 eklenmiş yağda pürüzlülük değerlerinde azalma görülmüştür.

Yapılan tribometre ve dijital mikroskop analizleri ile sürtünme katsayısını düşürdüğü tespit edilen rGO6 nanopartiküllü yağ, test sonrası aşınmış yüzeyde oluşan kimyasal tabakanın detaylandırılması amacıyla FE-SEM analizine tabii tutulmuştur. Şekil 3.29 ve 3.30 5W40 ve rGO 6 ile test edilmiş bilyenin test sonrası yüzeyinin elementel analizini içermektedir. Tablo 3.11'de detaylı olarak verilen elementel analiz sonuçlarında rGO 6 içeren yağ ile yapılan test sonrası yüzeyde karbon etkinliğinin artmış olması, rGO6'nın yüzeyde tribo film oluşturarak sürtünme katsayısını azalttığını göstermektedir.



Şekil 3.29 5W-40 motor yağı ile test edilen bilyenin FE-SEM - X-ray ve elementel analiz değerleri.



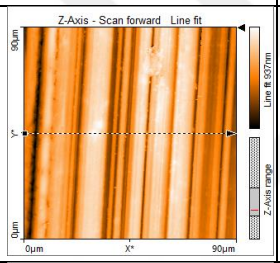
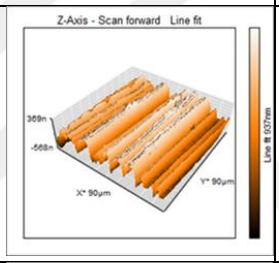
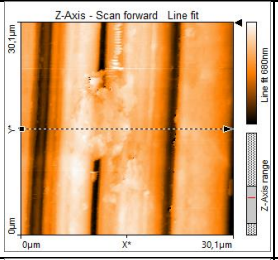
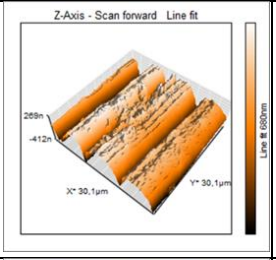
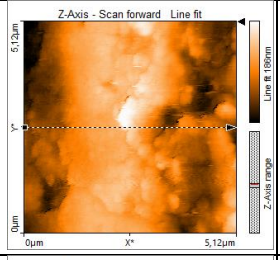
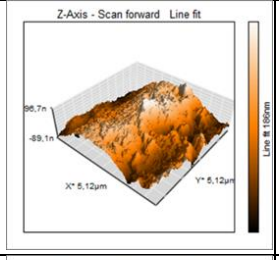
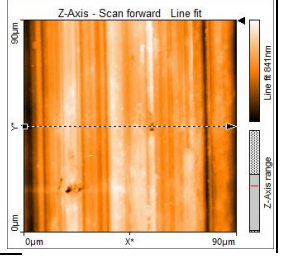
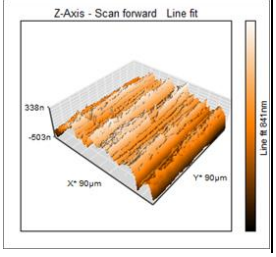
Şekil 3.30 rGO6 içeren motor yağı ile test edilen bilyenin FE-SEM - Xray ve elementel analiz değerleri.

Tablo 3.11 5W-40 ve rGO 6 motor yağı ile test edilen bilyenin FE-SEM elementel analiz değerleri (kütlesel).

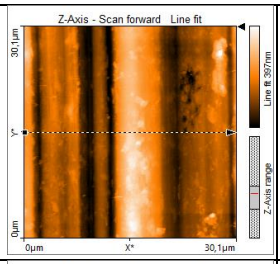
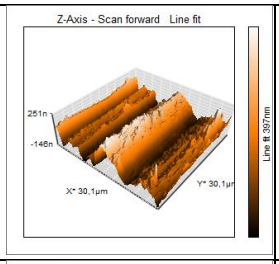
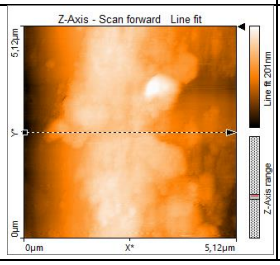
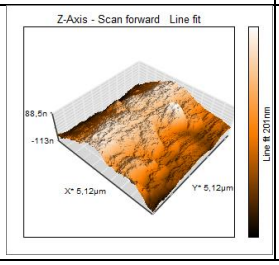
Element	C K	O K	FeL	ZnL	P K	MoL	S K	CaK	CrK	MnK
5W40	5.29	7.06	69.85	1.04	2.16	1.41	1.5	2.18	5,99	8.51
rGO 6	11.03	5.65	64,74	1.41	2,71	0,33	0,91	1,23	5,14	2,64

Tablo 3.11'de, FE-SEM analizi ile bilye yüzeyinde yapılan analiz sonuçları gösterilmiştir. Yapılan testlerde rGO6 içeren yağ ile yapılan testlerde C oranının, referans yağla yapılan teste kıyasla daha yüksek oranda olduğu tespit edilmiştir. Kırmızı daire içine alınan C değerlerinin ve bu değerlerdeki artışın, yağa eklenen rGO'dan kaynaklandığı ve rGO ile yüzeyde koruyucu tribofilmin etkin olduğu görülmüştür.

Honda GX270 silindir ile yapılan tribometre testlerinden sonra bilye yüzeyi AFM vasıtasıyla incelenerek yüzey pürüzlülükleri 90x90 µm, 30x30 µm ve 5x5 µm olarak ölçülmüştür. Şekil 3.31'de yer alan grafik, bilyenin 5W40 referans yağ ve rGO6 yağ ile yapılan test sonrası 3 boyutlu AFM görüntülerini göstermektedir. AFM ile ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri ise Tablo 3.12'de gösterilmiş olup rGO6 ile yapılan testler neticesinde yüzey sürtünmesinin azaldığı görülmüştür.

	2D	Yüzey pürüzlülüğü	3D	Yüzey pürüzlülüğü
5W40 (90x90)		-- Line Roughness -- Ra 170,27nm Rq 205,37nm Ry 988,03nm Rp 369,55nm Rv -618,48nm Rm -18,626fm		-- Area Roughness -- Area 8,163nm^2 Sa 163,03nm Sq 193,52nm Sy 1348,9nm Sp 527,22nm Sv -821,71nm Sm -18,626fm
5W40 (30x30)		-- Line Roughness -- Ra 129,77nm Rq 157,7nm Ry 590,77nm Rp 228,87nm Rv -361,9nm Rm -18,626fm		-- Area Roughness -- Area 915,9pm^2 Sa 125,57nm Sq 155,94nm Sy 3,025µm Sp 400,37nm Sv -2624,7nm Sm -18,626fm
5W40 (5x5)		-- Line Roughness -- Ra 45.257nm Rq 34,276nm Ry 142,38nm Rp 92,175nm Rv -50,208nm Rm -18,626fm		-- Area Roughness -- Area 26,44pm^2 Sa 39,52nm Sq 39,277nm Sy 292,97nm Sp 117,83nm Sv -175,14nm Sm -18,626fm
rGO6 (90x90)		-- Line Roughness -- Ra 111,47nm Rq 151,22nm Ry 700,27nm Rp 247,06nm Rv -453,21nm Rm -18,626fm		-- Area Roughness -- Area 8,163nm^2 Sa 119,28nm Sq 156,43nm Sy 1071,1nm Sp 493,28nm Sv -577,84nm Sm -17,965fm

Şekil 3.31 Honda GX270 silindir ile test edilen bilyenin AFM ile ölçülen 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri ve yüzey pürüzlülük değerleri.

rGO6 (30x30)		-- Line Roughness -- Ra 58,642nm Rq 74,688nm Ry 321,44nm Rp 179,23nm Rv -142,21nm Rm -18,626fm		-- Area Roughness -- Area 915,9pm^2 Sa 65,537nm Sq 82,777nm Sy 555,07nm Sp 364,69nm Sv -190,38nm Sm -18,626fm
rGO6 (5x5)		-- Line Roughness -- Ra 32,801nm Rq 39,688nm Ry 161,91nm Rp 49,634nm Rv -112,28nm Rm -18,626fm		-- Area Roughness -- Area 26,44pm^2 Sa 33,854nm Sq 45,503nm Sy 216,35nm Sp 100,27nm Sv -116,08nm Sm -18,626fm

Şekil 3.32 Honda GX270 silindir ile test edilen bilyenin AFM ile ölçülen 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri ve yüzey pürüzlülük değerleri. (devamı)

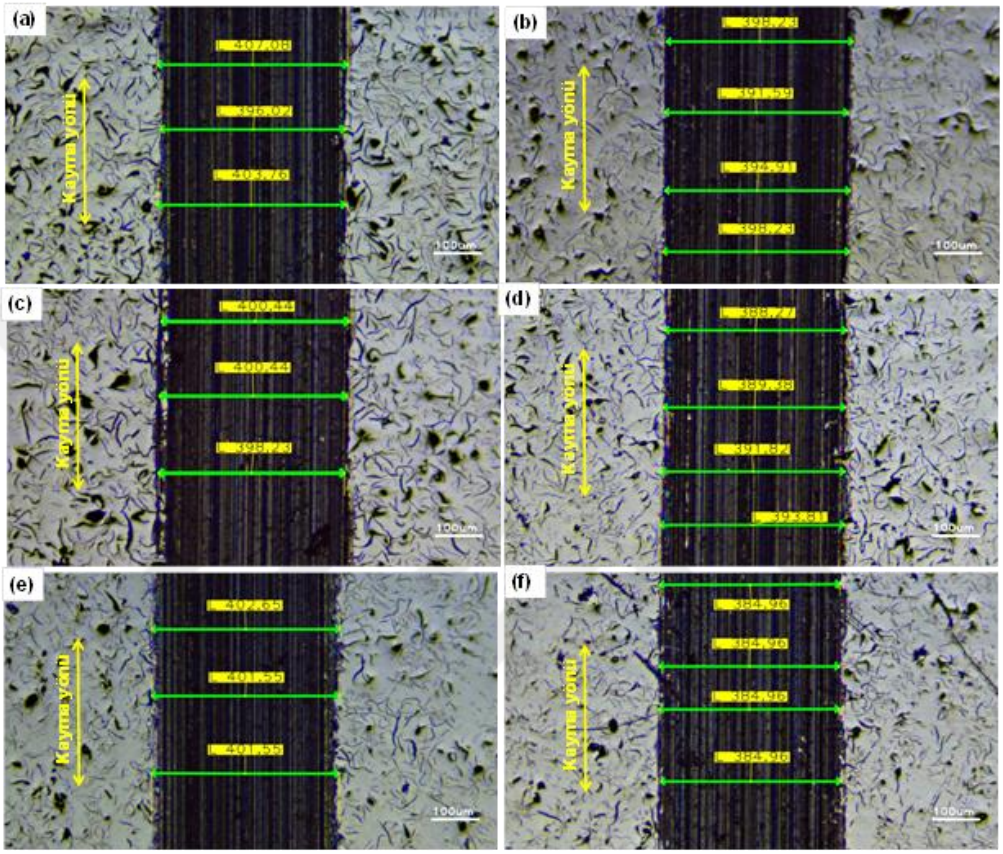
Tablo 3.12 Honda GX270 silindir ile test edilen bilyenin 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu AFM yüzey pürüzlülük değerlerinin karşılaştırılması.

Test	Ra (nm)	Sa (nm)
90x90 (Test edilmemiş)	61.548	55.988
90x90 (5W40)	170.27	163.03
90x90 (rGO6)	**111.47**	**119.28**
30x30 (Test edilmemiş)	12.849	16.609
30x30 (5W40)	129.77	125.57
30x30 (rGO6)	**58.642**	**65.537**
5x5 (test edilmemiş)	4.5565	5.0573
5x5 (5W40)	45.257	39.52
5x5 (rGO6)	**32.801**	**33.854**

Tablo 3.12'de yer alan 2 ve 3 boyutlu yüzey pürüzlülük değerleri, rGO6 ile yapılan testler neticesinde bilye yüzeyinde meydana gelen aşınmanın referans yağa kıyasla azaldığını göstermektedir. Bu azalma, rGO katkılı tribofilmin yüzeyde koruyucu etki yapması ile meydana gelmiştir.

3.2.2.2 Test Sonrası Silindir Yüzey Analizleri

Deney parametrelerine uygun şekilde referans yağ (5W40) ve rGO6 eklenmiş yağ ile gerçekleştirilen tekrarlı tribometre testleri neticesinde Honda GX270 silindirde meydana gelen aşınma izleri optik mikroskop vasıtasıyla incelenmiş ve Şekil 3.32'de gösterilmiştir. Ölçülen bu aşınma iz değerleri Tablo 3.13'te gösterilmiştir



(a) 5W40 ile yapılan 1.test
(b) rGO+5W40 ile yapılan 1. test
(c) 5W40 ile yapılan 2.test
(d) rGO+5W40 ile yapılan 2. test
(e) 5W40 ile yapılan 3.test
(f) rGO+5W40 ile yapılan 3. test

Şekil 3.33 Birinci, ikinci ve üçüncü test sonrası silindirin optik dijital mikroskop ile ölçülen aşınma mesafeleri ölçümü.

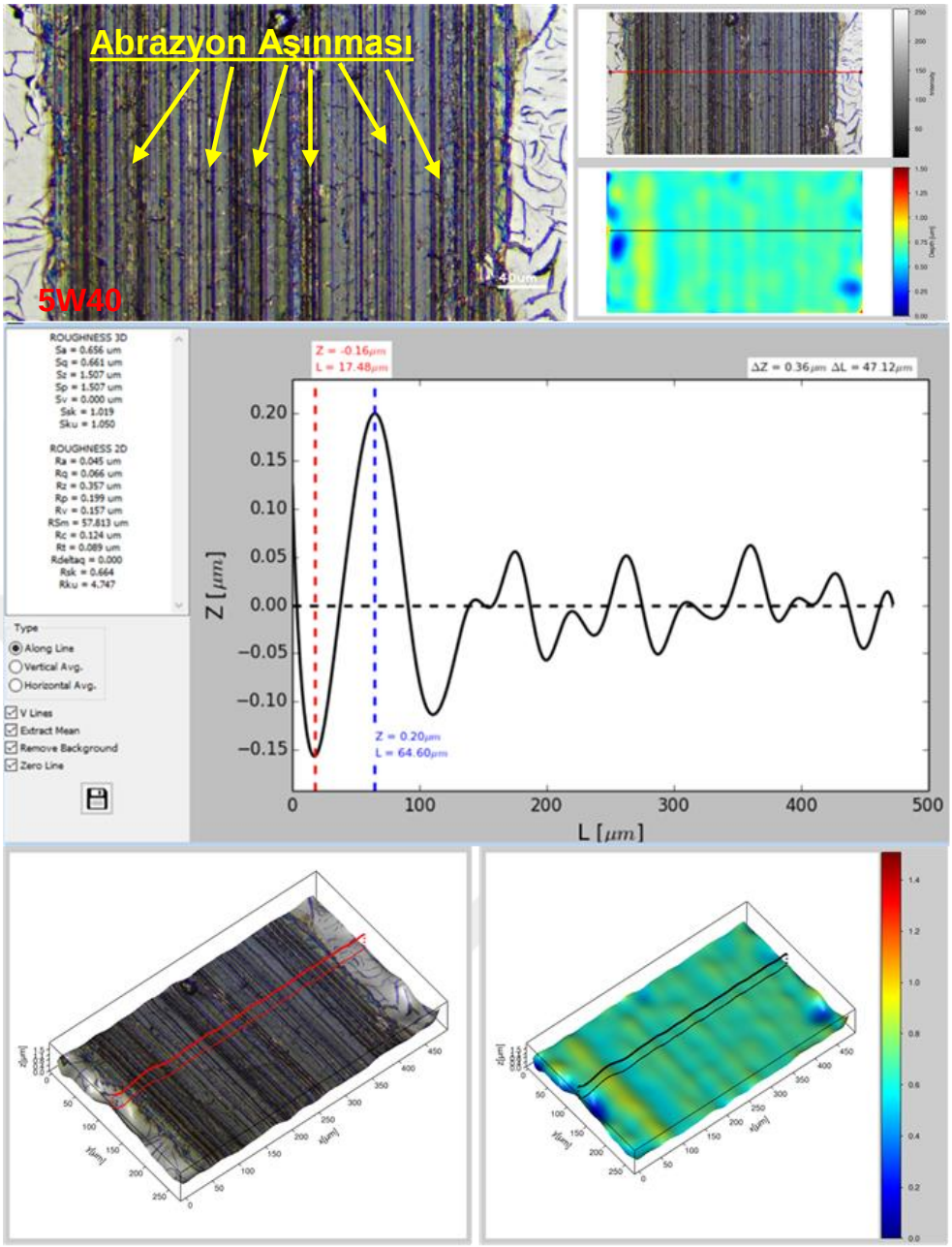
Tablo 3.13 5W40 ve rGO6 ile bilye altında test edilen parlatılmış Honda GX 270 motor silindir bloğunun maksimum ve minimum aşınma izi mesafeleri.

Test no	Max aşınma izi mesafesi (µm)	Min. aşınma izi mesafesi (µm)
Test1 (5W40)	407.08	403.76
Test1 (rGO6)	398.23	391.59
Test2 (5W40)	400.44	398.23
Test2 (rGO6)	389.38	391.82
Test3 (5W40)	402.65	401.55
Test3 (rGO6)	384.96	384.96

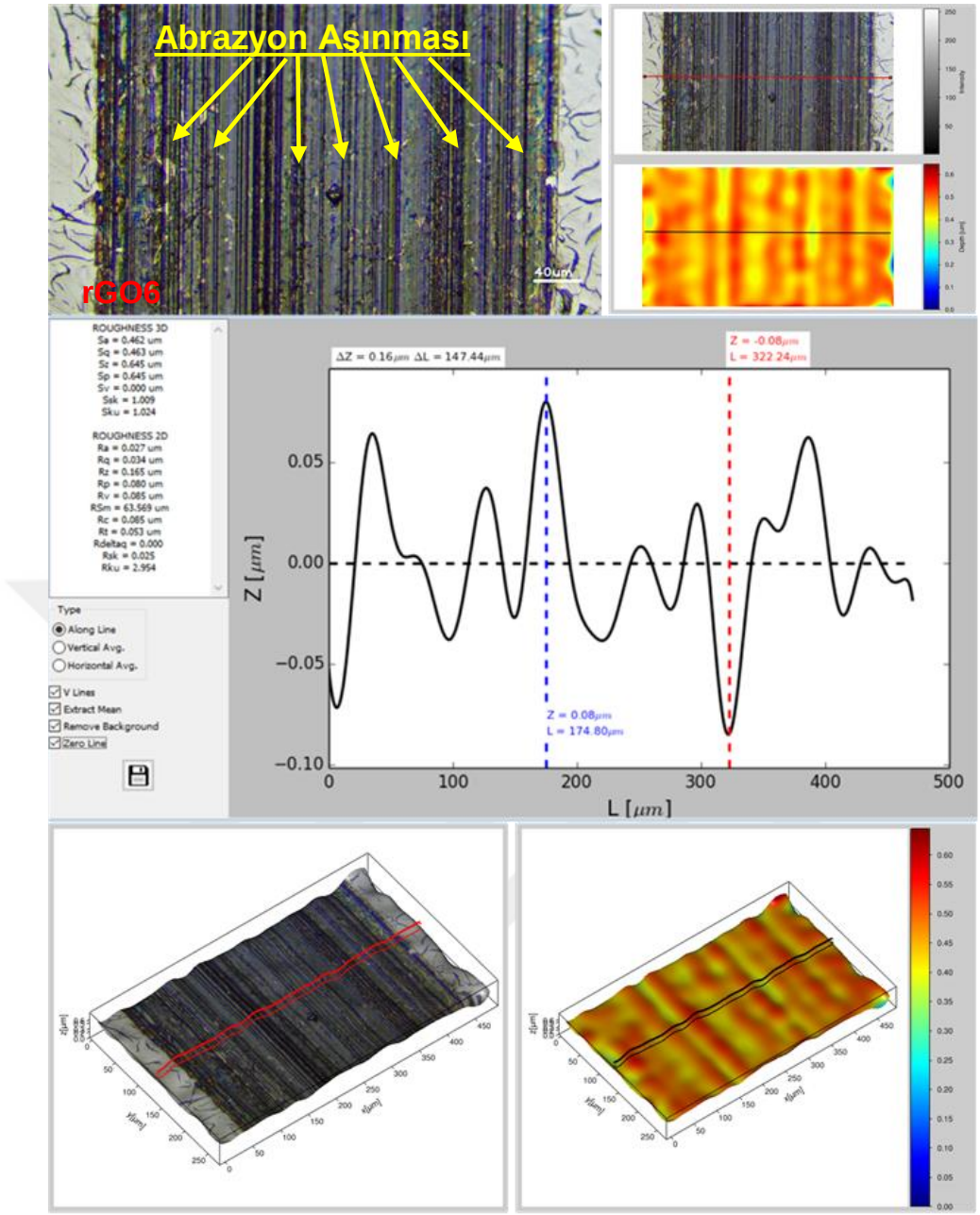
Tablo 3.13'ten de görüleceği üzere, tüm testlerde rGO6 ile yapılan testlerdeki maksimum ve minimum aşınma izi mesafeleri referans 5W40 yağı ile yapılan testlerdeki aşınma izi mesafelerinden daha düşük çıkmıştır. Yağa kütlesel olarak %0.02 oranında eklenen ve süspansiyon halde duran indirgenmiş grafen oksit nanopartikülü rGO6 yüzeyi kaplamış ve korumuştur.

Dijital mikroskop altında incelenen aşınma izleri, yüzey pürüzlülüğü yönünden de incelenmiş ve referans değer olarak Ra ve Sa değerleri alınmıştır. Referans yağ ve rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan 3 adet tekrarlı testten oluşan tribometre testlerinde her bir testin yüzey pürüzlülük ölçüleri Tablo 3.14'te listelenmiş olup yüzey pürüzlülük grafikleri ve ortalama sürtünme katsayısı grafiği detaylı olarak aşağıdaki gibidir:

5W40 referans yağ ve rGO6 eklenmiş referans yağ ile yapılan tribometre testlerinin ilki olan Test 1'de silindir yüzeyi optik dijital mikroskop altında incelenmiştir. Yapılan inceleme neticesinde silindirin yüzey pürüzlülük değerleri 5W40 yağ ile yapılan test için Ra: 0.045, Sa: 0.656 (Şekil 3.33); rGO6 eklenmiş yağ için ise Ra: 0.027, Sa: 0.462 olarak ölçülmüştür (Şekil 3.34).

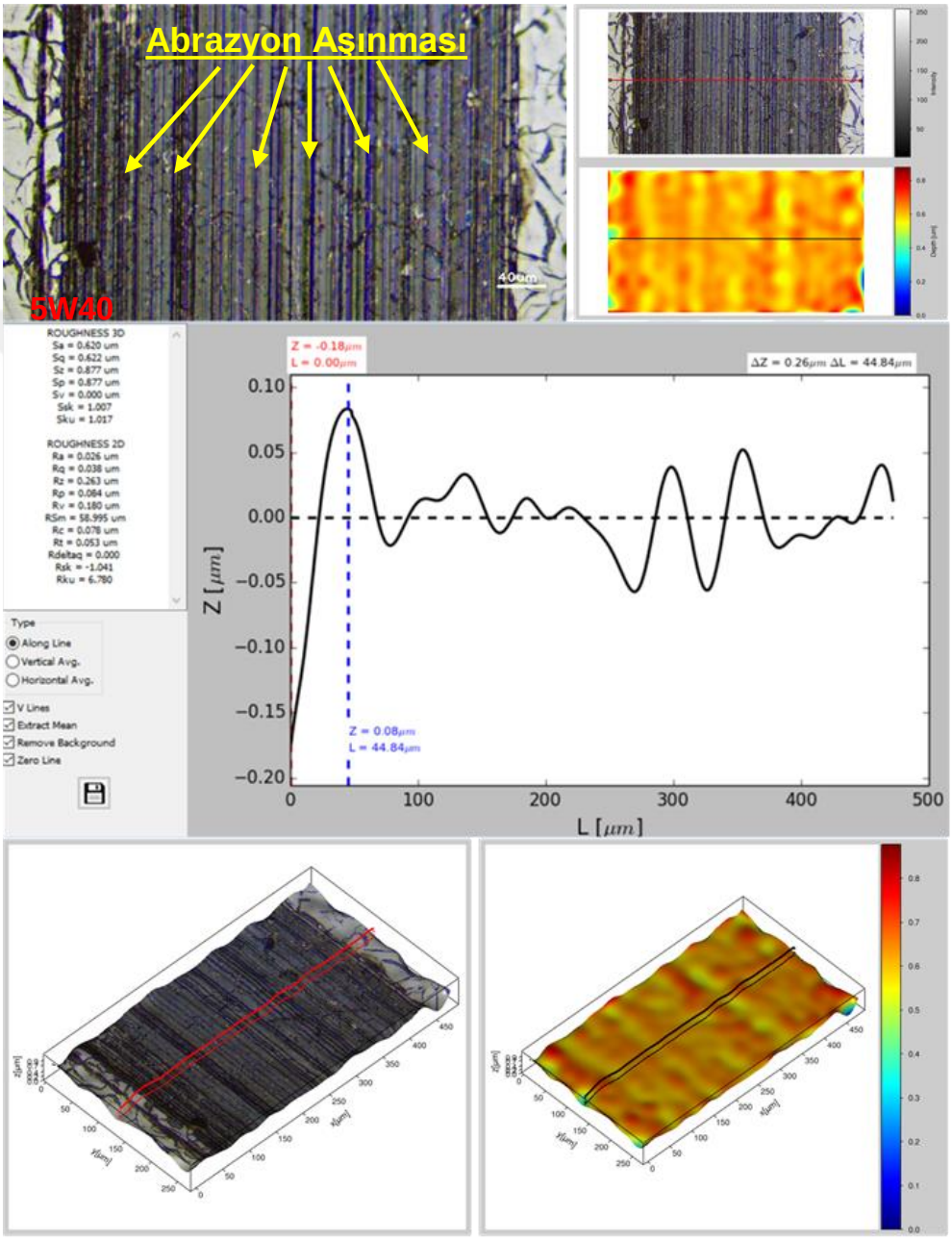


Şekil 3.34 5W40 yağ ile yapılan tribometre testi silindir yüzeyi – Test 1.

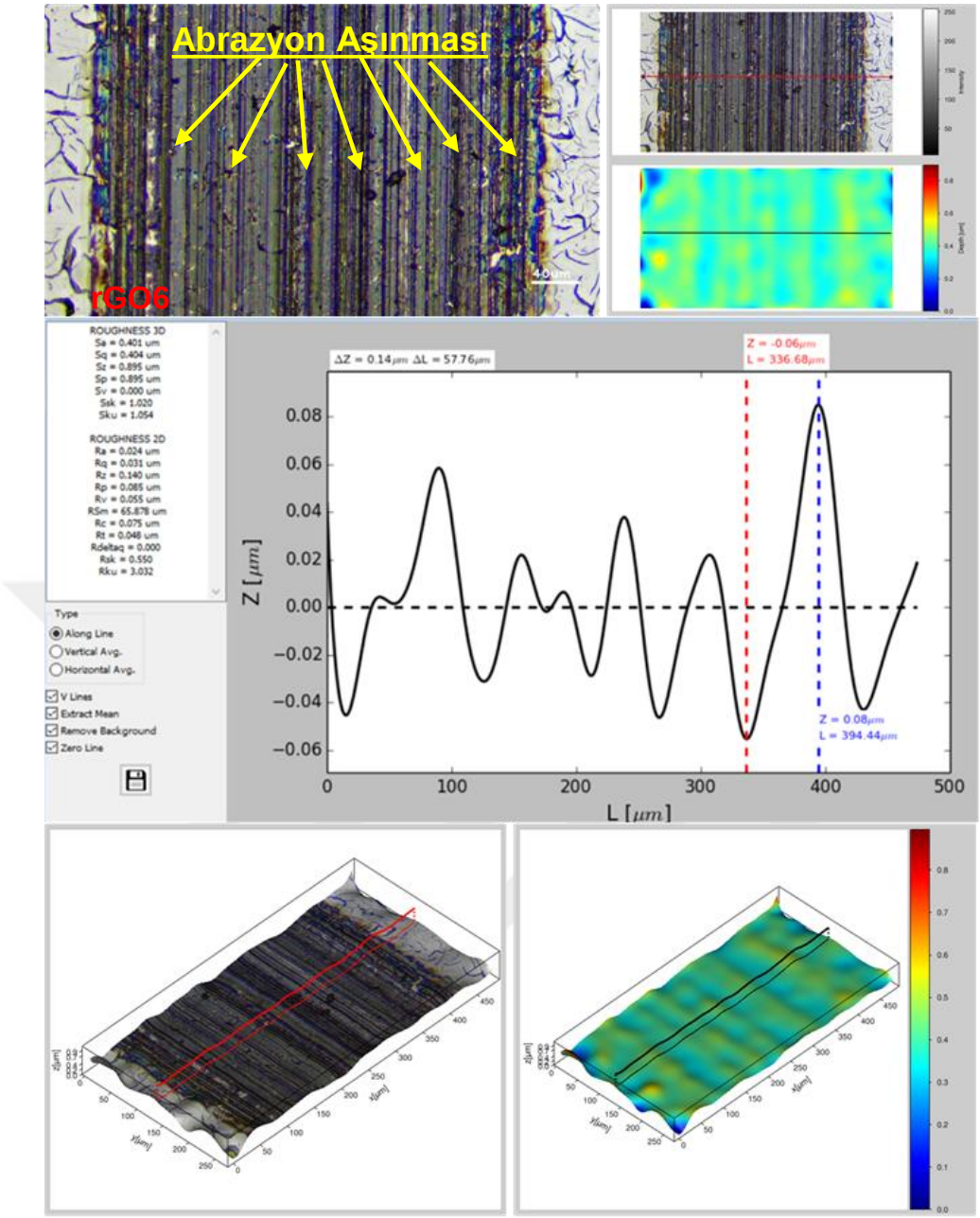


Şekil 3.35 rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan tribometre testi silindir yüzeyi – Test 1.

5W40 referans yağ ve rGO6 eklenmiş referans yağ ile yapılan tribometre testlerinin ikincisi olan Test 2'de silindir yüzeyi optik dijital mikroskop altında incelenmiştir. Yapılan inceleme neticesinde silindirin yüzey pürüzlülük değerleri 5W40 yağ ile yapılan test için Ra: 0.026 Sa: 0.620 (Şekil 3.35); rGO6 eklenmiş yağ için ise Ra: 0.024, Sa: 0.401 olarak ölçülmüştür (Şekil 3.36).

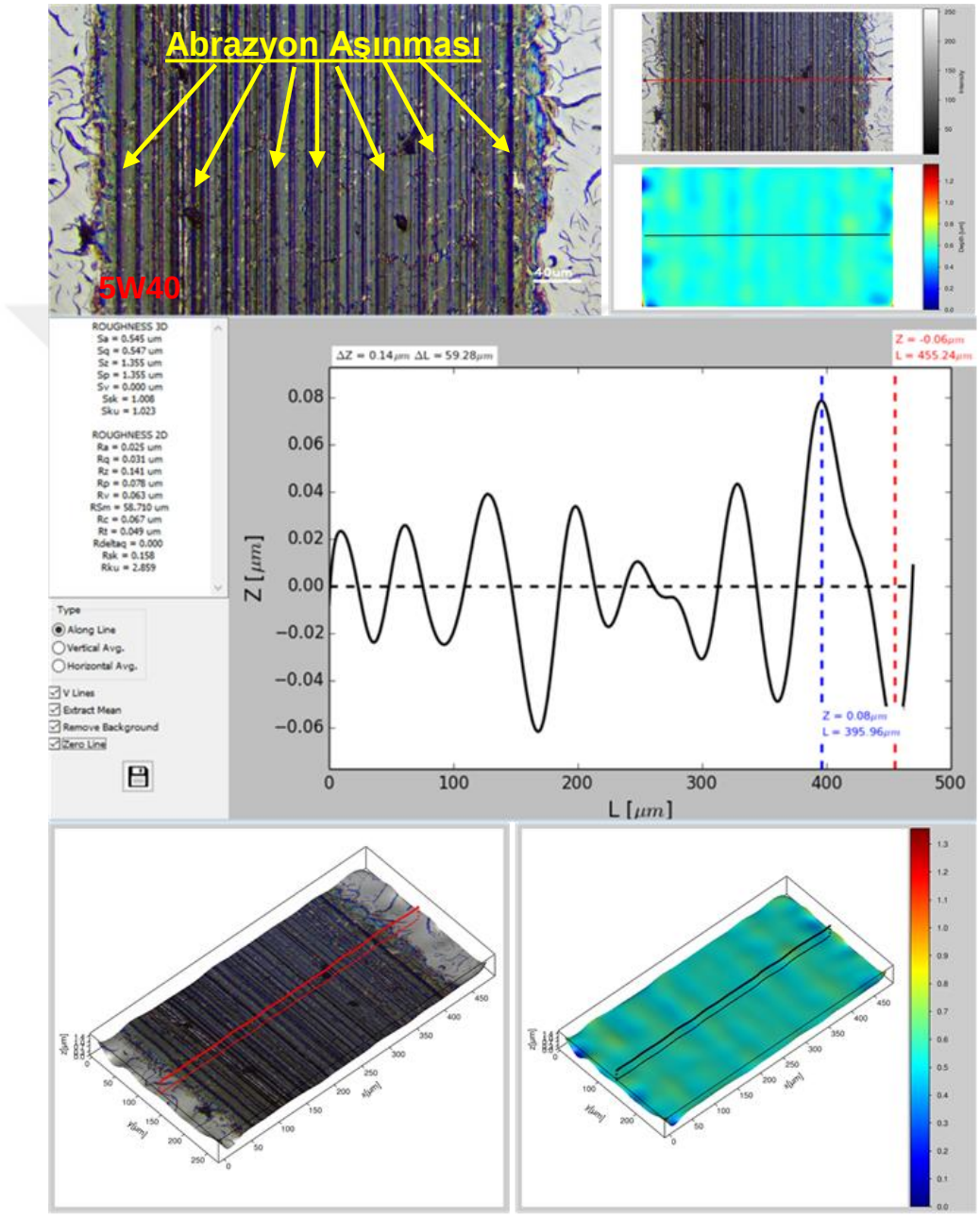


Şekil 3.36 Referans yağ ile yapılan tribometre testi silindir yüzeyi – Test 2.

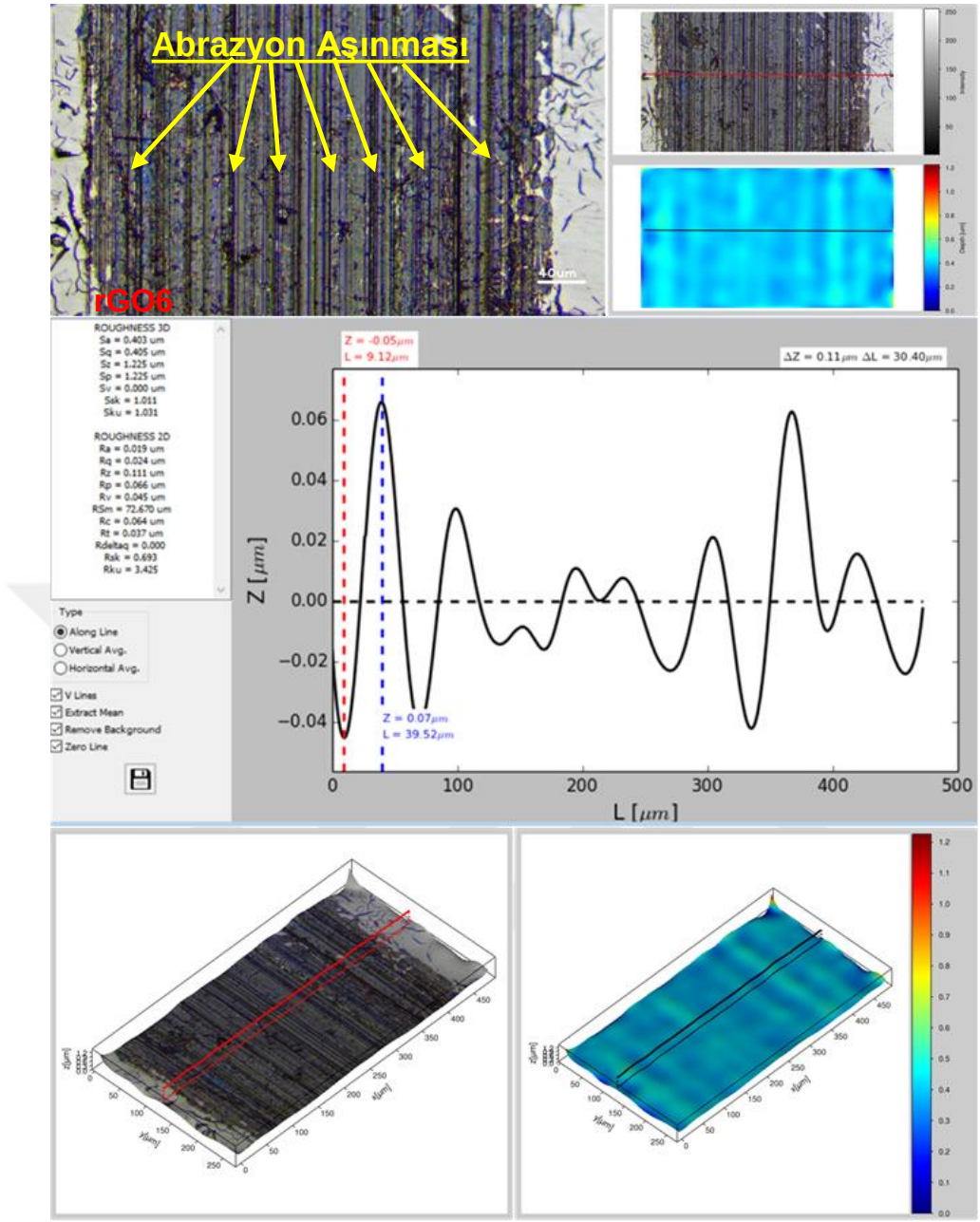


Şekil 3.37 rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan tribometre testi silindir yüzeyi – Test 2.

5W40 referans yağ ve rGO6 eklenmiş referans yağ ile yapılan tribometre testlerinin üçüncüsü olan Test 3'te silindir yüzeyi optik dijital mikroskop altında incelenmiştir. Yapılan inceleme neticesinde silindirin yüzey pürüzlülük değerleri 5W40 yağ ile yapılan test için Ra: 0.031 Sa: 0.545 (Şekil 3.37); rGO6 eklenmiş yağ için ise Ra: 0.019, Sa: 0.403 olarak ölçülmüştür (Şekil 3.38).



Şekil 3.38 Referans yağ ile yapılan tribometre testi silindir yüzeyi – Test 3.



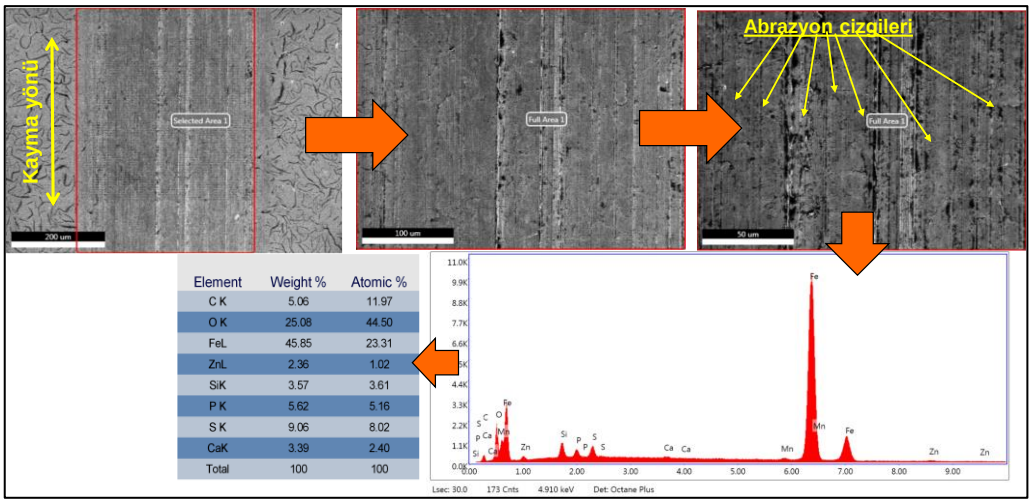
Şekil 3.39 rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan tribometre testi silindir yüzeyi – Test 3.

Tablo 3. 14 5W40 ve rGO6 ile çelik bilye altında test edilen parlatılmış Honda GX 270 motor silindir bloğunun 2D ve 3D yüzey pürüzlük değerleri.

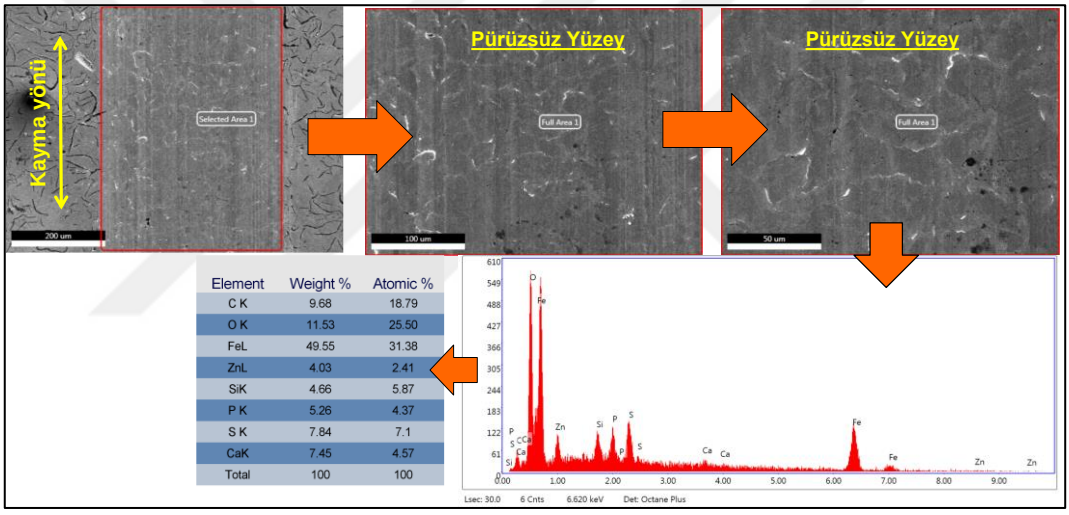
	(µm)	Ra	Rq	Rz	Rp	Rv	RSm	Rc	Rt	Sa	Sq	Sz
	Test edilmemiş	0.042	0.060	0.314	0.170	0.157	20.633	0.174	0.125	0.480	0.485	0.940
Test 1	5W40	0.045	0.066	0.357	0.199	0.157	57.813	0.124	0.089	0.656	0.661	1.507
	rGO6	0.027	0.034	0.165	0.080	0.085	63.569	0.177	0.100	0.462	0.463	0.645
Test 2	5W40	0.026	0.038	0.263	0.084	0.180	58.995	0.078	0.053	0.620	0.622	0.877
	rGO6	0.024	0.031	0.140	0.085	0.055	658.783	0.075	0.048	0.401	0.404	0.895
Test 3	5W40	0.025	0.031	0.141	0.078	0.063	587.203	0.067	0.049	0.545	0.547	1.355
	rGO6	0.019	0.024	0.111	0.066	0.045	72.670	0.064	0.037	0.403	0.405	1.225

Tablo 3.14, referans yağ ve rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan 3 adet tekrarlı testten oluşan tribometre testlerinde neticesinde elde edilen yüzey pürüzlülük ölçülerini içermektedir. Dijital mikroskop altında incelenen aşınma izleri, yüzey pürüzlülüğü yönünden incelenmiş ve referans değer olarak Ra ve Sa değerleri alınmıştır. Aynı zamanda, Ra ve Sa'nın yanında Rq, Rz, Rp, Rv, Rsm, Rc, Rt, Sq, Sz değerlerinde de gerek bilyede gerek silindirde rGO6 eklenmiş yağda pürüzlülük değerlerinde azalma görülmüştür.

Yapılan tribometre testleri neticesinde dijital mikroskop analizleri ile sürtünme katsayısını düşürdüğü tespit edilen rGO6 nanopartiküllü yağ, test sonrası aşınmış yüzeyde oluşan kimyasal tabakanın detaylandırılması amacıyla FESEM analizine tabii tutulmuştur. Şekil 3.39 ve 3.40, referans 5W40 ve rGO 6 içeren 5W40 yağ ile yapılan testler sonrası silindirin yüzey elementel analizini içermektedir. rGO 6 içeren yağ ile yapılan test sonrası referans 5W40 yağ ile yapılan teste kıyasla yüzeyde karbon etkinliğinin artmış olması, rGO6'nın yüzeyde tribo film oluştururak sürtünme katsayısını azalttığını göstermektedir. Analiz sonucu elde edilen elementel analiz değerleri Tablo 3.15'te gösterilmiştir.



Şekil 3.40 5W-40 motor yağı ile test edilen silindirin EDS tarafından desteklenen FE-SEM görüntülerinde aşınma izi.



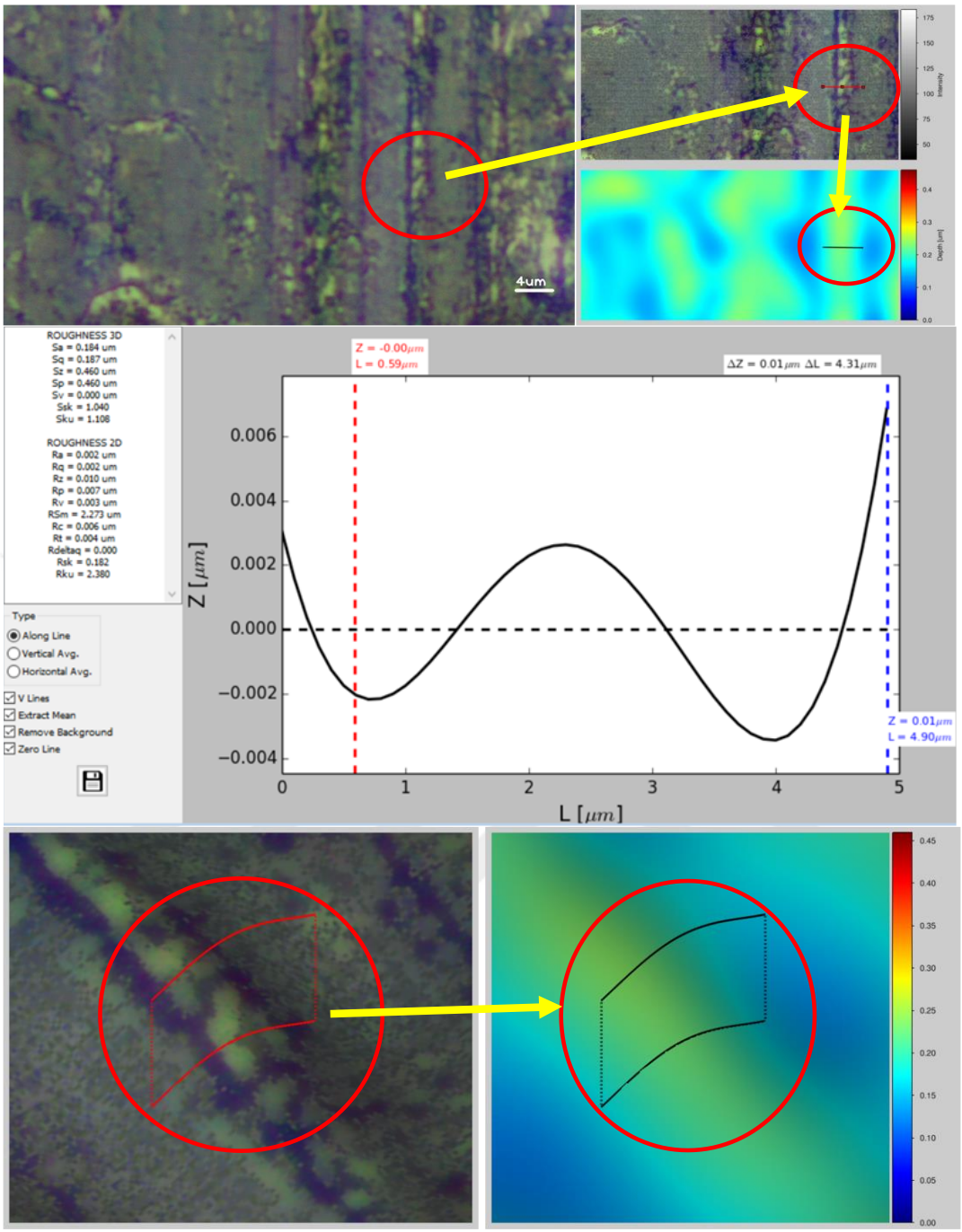
Şekil 3.41 rGO6 motor yağı ile test edilen silindirin EDS tarafından desteklenen FE-SEM görüntülerinde aşınma izi.

Tablo 3.15 5W-40 ve rGO 6 motor yağı ile test edilen silindirin FE-SEM elementel analiz değerleri (kütlesel)

	C K	O K	FeL	ZnL	SiK	P K	S K	CaK
5W40	5.06	25.08	45.85	2.36	3.57	5.62	9.06	3.39
rGO 6	9.66	11.53	49.55	4.03	4.66	5.26	7.84	7.45

Tablo 3.15'te, FE-SEM analizi ile silindir yüzeyinde yapılan analiz sonuçları gösterilmiştir. Yapılan testlerde rGO6 içeren yağ ile yapılan testlerde C oranının, referans yağla yapılan teste kıyasla daha yüksek oranda olduğu tespit edilmiştir. Kırmızı daire içine alınan C değerlerinin ve bu değerlerdeki artışın, yağa eklenen rGO'dan kaynaklandığı ve rGO ile yüzeyde koruyucu tribofilmin etkin olduğu görülmüştür.

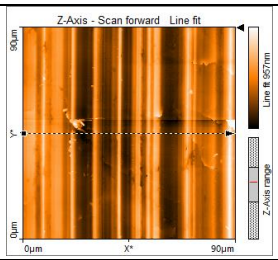
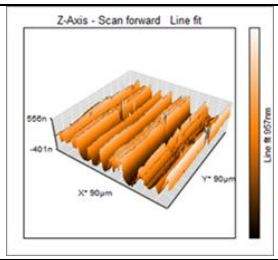
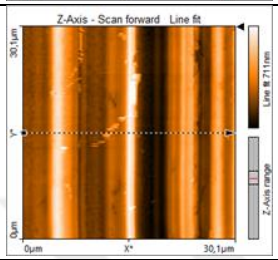
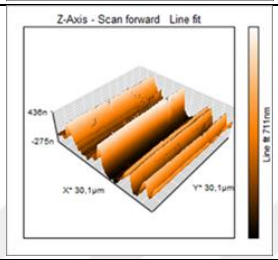
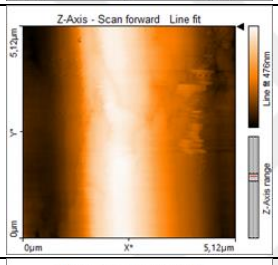
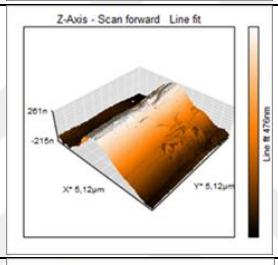
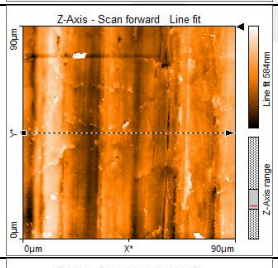
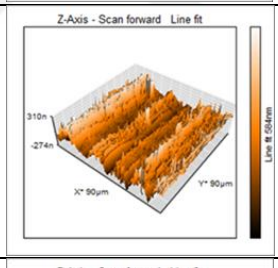
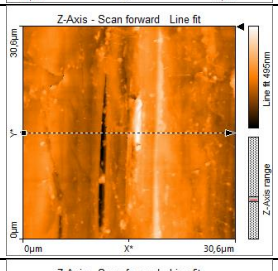
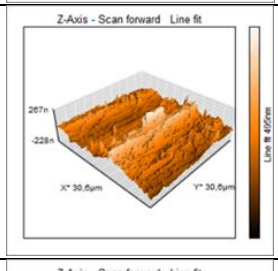
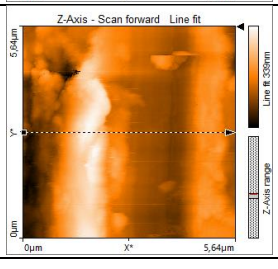
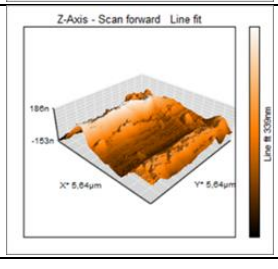
Şekil 3.41, rGO eklenmiş yağ ile yapılan testler sonucunda silindir yüzeyinde oluşan rGO koruyucu tabakasının 2 ve 3 boyutlu görüntüsünü göstermektedir. Optik mikroskop ile elde edilen görüntüler neticesinde Sa ve Ra yüzey pürüzlülükleri sırasıyla 0.184 μm ve 0.002 μm çıkmaktadır.



Şekil 3.42 rGO eklenmiş yağ ile yapılan testler neticesinde elde edilen rGO koruyucu yüzeyin 2 ve 3 boyutlu yüzey pürüzlülüğü.

Honda GX270 silindir ile yapılan tribometre testlerinden sonra silindir yüzeyi AFM vasıtasıyla incelenerek yüzey pürüzlülükleri 90x90 µm, 30x30 µm ve 5x5 µm alanlarında ölçülmüştür. Şekil 3.42'de yer alan grafik Honda silindirin 5W40 referans yağ ve rGO6 yağ ile yapılan test sonrası 2 ve 3 boyutlu AFM görüntülerini göstermektedir. AFM ile ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri ise Tablo 3.16'da

gösterilmiş olup rGO6 ile yapılan testler neticesinde yüzey sürtünmesinin 5W40 ile yapılan teste kıyasla azaldığı görülmüştür.

	2D	Yüzey Pürüzlülüğü	3D	Yüzey Pürüzlülüğü
5W40 (90x90)		-- Line Roughness -- Ra 176,84nm Rq 208,74nm Ry 916,87nm Rp 554,98nm Rv -361,89nm Rm -18,626fm		-- Area Roughness -- Area 8,163nm^2 Sa 162,67nm Sq 196,83nm Sy 2572,2nm Sp 1975,5nm Sv -596,64nm Sm -14,491fm
5W40 (30x30)		-- Line Roughness -- Ra 125,42nm Rq 158,05nm Ry 665,94nm Rp 417,07nm Rv -248,87nm Rm -9,3132fm		-- Area Roughness -- Area 915,9pm^2 Sa 126,25nm Sq 159,71nm Sy 1,08µm Sp 786,6nm Sv -293,41nm Sm -9,3146fm
5W40 (5x5)		-- Line Roughness -- Ra 121,32nm Rq 138,5nm Ry 405,4nm Rp 237,11nm Rv -168,28nm Rm -9,3132fm		-- Area Roughness -- Area 26,44pm^2 Sa 128,91nm Sq 146,8nm Sy 493,6nm Sp 263,59nm Sv -230,01nm Sm -9,3138fm
rGO6 (90x90)		-- Line Roughness -- Ra 78,754nm Rq 97,373nm Ry 484,75nm Rp 294,48nm Rv -190,27nm Rm -18,626fm		-- Area Roughness -- Area 8,163nm^2 Sa 79,553nm Sq 102,27nm Sy 1,957µm Sp 1301,4nm Sv -655,59nm Sm -18,626fm
rGO6 (30x30)		-- Line Roughness -- Ra 51,999nm Rq 71,86nm Ry 487,55nm Rp 265nm Rv -222,55nm Rm -18,626fm		-- Area Roughness -- Area 942,6pm^2 Sa 42,141nm Sq 55,591nm Sy 603,7nm Sp 287,72nm Sv -315,98nm Sm -18,626fm
rGO6 (5x5)		-- Line Roughness -- Ra 57,384nm Rq 71,439nm Ry 288,57nm Rp 180,08nm Rv -108,48nm Rm -18,626fm		-- Area Roughness -- Area 32,08pm^2 Sa 52,048nm Sq 65,801nm Sy 545,24nm Sp 189,83nm Sv -355,41nm Sm -18,626fm

Şekil 3.43 5W40 referans yağ ve rGO6 yağ ile test edilen benzinli motor silindirine ait AFM analiz görüntüleri.

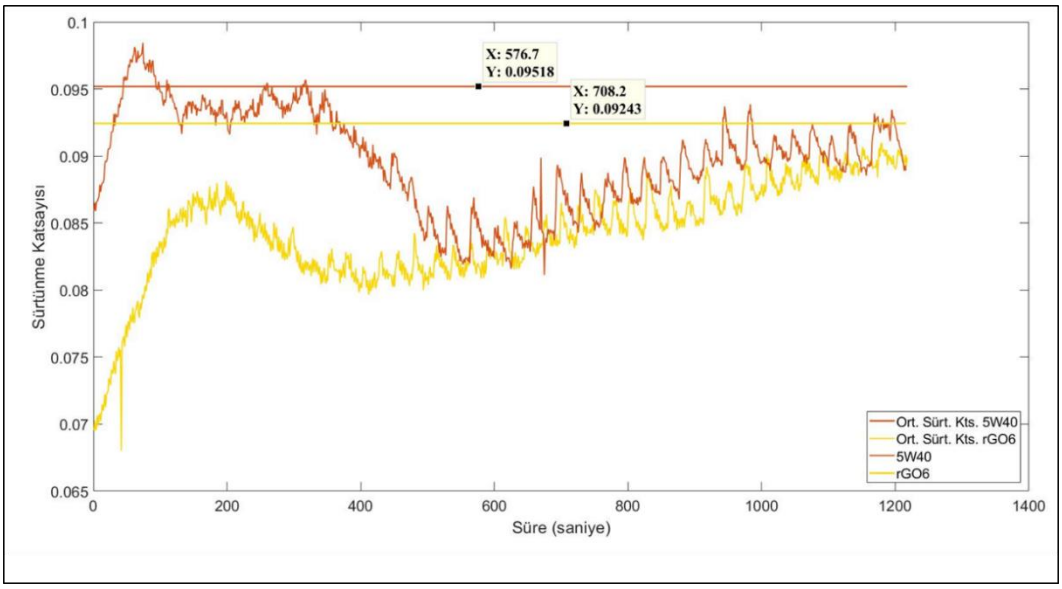
Tablo 3.16 Benzinli motor silindirine ait 2 ve 3 boyutlu AFM yüzey pürüzlülük değerlerinin karşılaştırılması.

Test	Ra (nm)	Sa (nm)
90x90 (Test edilmemiş)	89.225	46.129
90x90 (5W40)	176.84	162.67
90x90 (rGO6)	**78.754**	**79.553**
30x30 (Test edilmemiş)	170.17	60.734
30x30 (5W40)	125.42	126.25
30x30 (rGO6)	**51.999**	**42.141**
5x5 (test edilmemiş)	66.952	66.219
5x5 (5W40)	121.32	128.91
5x5 (rGO6)	**57.384**	**52.048**

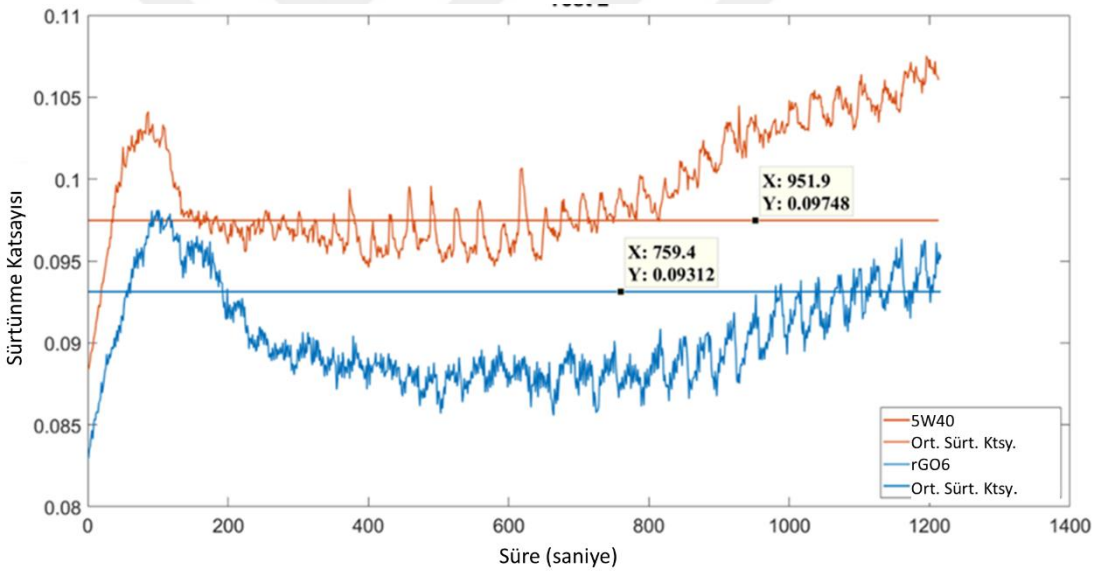
Tablo 3.16, 5W40 referans yağ ve rGO6 içeren yağ ile yapılan tribometre testleri neticesinde Honda GX 270 benzinli motor silindirinin AFM altında incelenen yüzey pürüzlülük değerlerini göstermektedir. Yapılan incelemeler neticesinde, rGO6 içeren yağ ile yapılan testlerdeki yüzey pürüzlülüklerinin referans yağa kıyasla daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülüklerindeki bu düşüş, grafenin silindir yüzey,nde etkin koruma sağlayarak tribofilm oluşturduğu ve aşınmayı azalttığını göstermektedir.

3.2.3 Tribometre Sürtünme Katsayısı Test Sonuçları

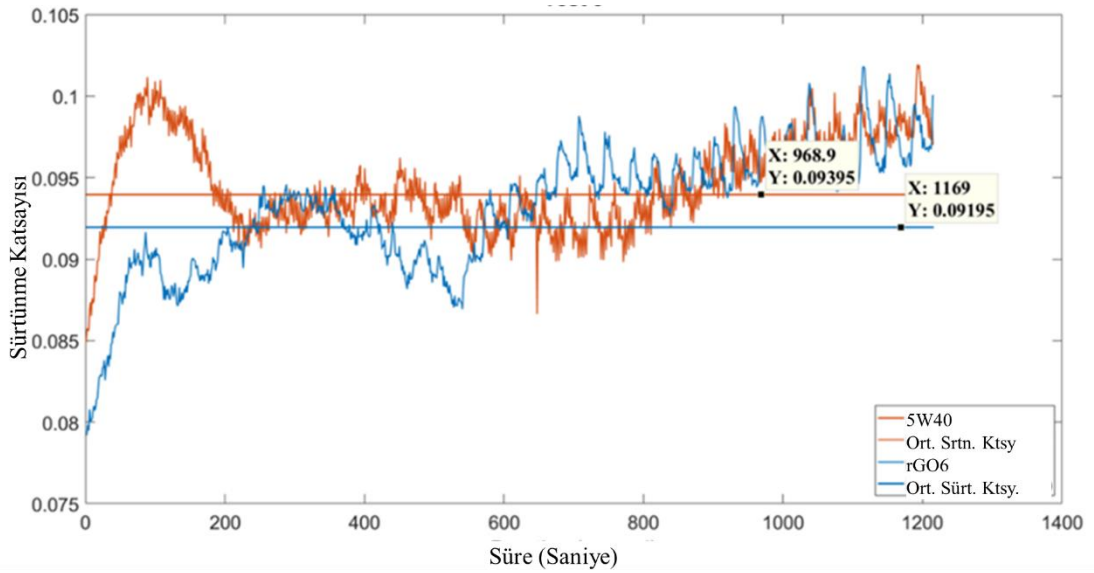
5W40 referans yağ ve rGO6 nanopartikülü içeren yağ ile yapılan 3 adet tekrarlı tribometre testleri neticesinde elde edilen sonuçlar rGO6'nın sürtünme katsayısını azalttığı şeklindedir. Yapılan 3 adet teste ait sürtünme katsayısı grafikleri Şekil 3.43, 3.44 ve 3.45'te verilmiştir. Grafiklerden de görüleceği üzere bütün testlerde rGO6 içeren yağın sürtünme katsayısı referans yağa kıyasla daha düşüktür. Yapılan tekrarlı testler neticesinde elde edilen sürtünme katsayısı sonuçları Tablo 3.17'deki gibidir



Şekil 3.44 5W40 referans yağ ve rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan tribometre testleri ortalama sürtünme katsayıları – Test 1.



Şekil 3.45 5W40 referans yağ ve rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan tribometre testleri ortalama sürtünme katsayıları – Test 2.



Şekil 3.46 5W40 referans yağ ve rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan tribometre testleri ortalama sürtünme katsayıları – Test 3.

Tablo 3.17 5W40 ve rGO 6 ile yapılan tribometre testleri neticesinde elde edilen sürtünme katsayıları.

	Test 1	**Test 2**	**Test 3**
5W40	0.09518	0.09748	0.09395
rGO 6	0.09243	0.09312	0.09195

Tablo 3.17'de yer alan sürtünme katsayısı değerleri, benzinli motor silindiri ve bilye çifti kullanılarak, rGO6 içeren yağ ve referans yağ ile yapılan tribometre testlerini içermektedir. Yapılan tribometre testleri rGO6 içeren yağın, referans yağa kıyasla sürtünme katsayısını azaltığını, bu azalmanın grafen nanopartiküllerinin tribofilm oluşturarak yüzeyde etkinlik göstermesi ile gerçekleştiğini göstermektedir.

3.3 Antor 6LD400 Diesel Motoru Tribometre Testleri

Tribometre testleri Honda GX 270 benzinli motor ve Antor 6LD 400 Diesel motor olmak üzere 2 motordan kesilen silindir parçaları ile gerçekleştirilmiş olup bu kısımda ise Antor 6 LD 400 Diesel motora ait test sonuçları irdelenecektir.

3.3.1 Antor 6LD400 Test Öncesi Optik Mikroskop Analizleri

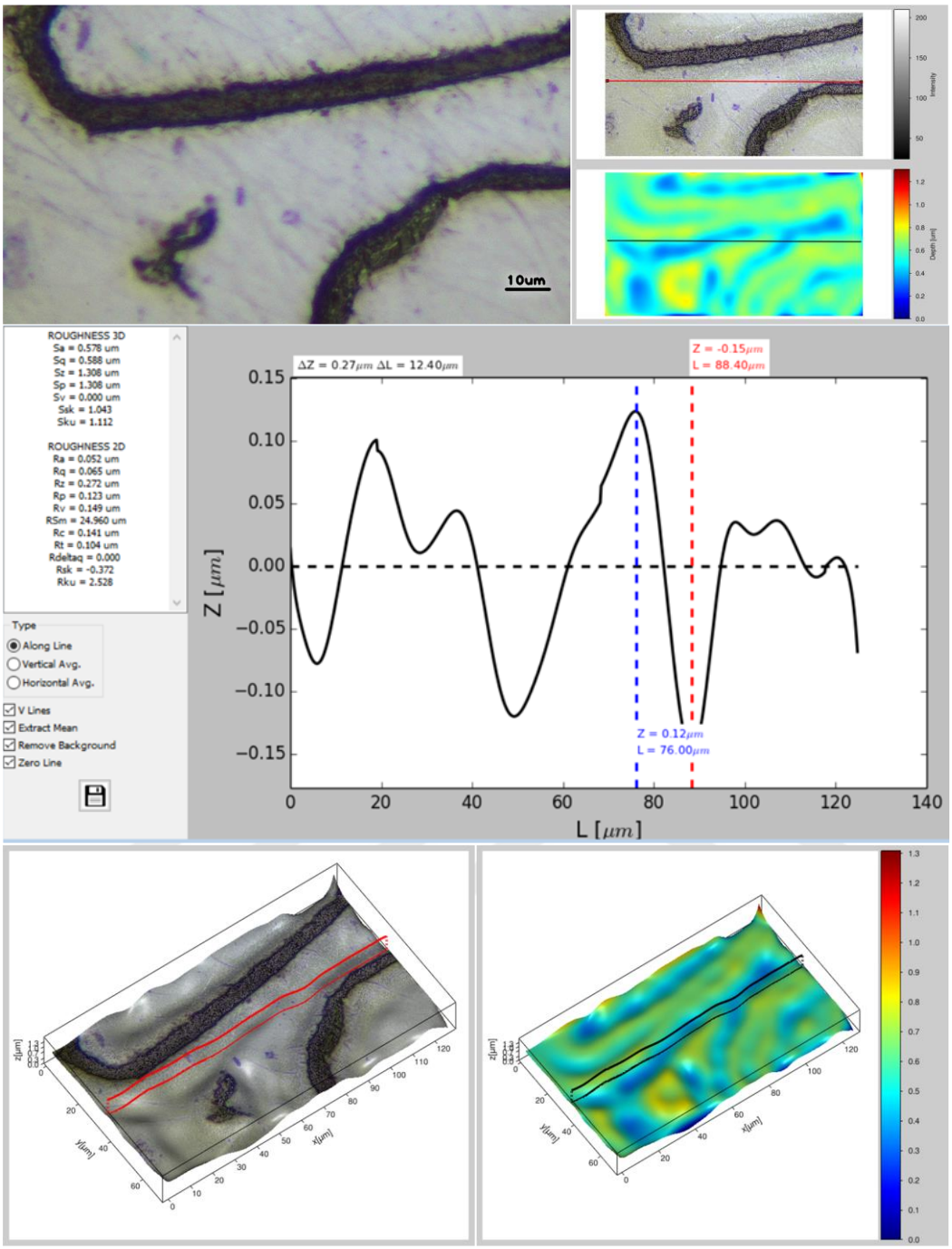
Testlerde kullanılacak olan bilye ve silindirin test öncesi aşınmamış haldeki ve test sonrası aşınmış yüzey pürüzlülükleri optik mikroskop ve dijital mikroskop vasıtasıyla 2D ve 3D olarak incelenmiş ve yüzey pürüzlülükleri tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülüklerinin doğru şekilde kerşılaştırılabilmesi için tüm pürüzlülük ölçümleri, optik mikroskop yazılımında yüksek kaliteli arka plan çıkarma bölümü seçilerek 10X Olympus objektifi ile gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma için Ra ve Sa değerleri dikkate alınmıştır. 2D/3D pürüzlülük parametreleri 1 µm'den küçük olduğu için (Microsurf serisi komparatörlerde Ra değeri 0.0125 µm'den 0.26 µm arasında değişmektedir) grafiklerde net olarak görülebilmekte olup bu değerler UKAS ile uyumludur [79].

3.3.1.1 Test Öncesi Bilye Yüzey Analizleri

Testlerde kullanılan bilyelerle ilgili analizler 3.1 başlığı altında verilmiştir

3.3.1.2 Test Öncesi Silindir Yüzey Analizleri

Test edilmemiş Antor 6LD 400 motora ait silindir, yüzey pürüzlülüklerinin tayini ve test sonrası meydana gelen aşınma seviyesinin karşılaştırılması amacıyla mikroskop altında incelenmiştir (Şekil 3.46). İncelenen silindir yüzeyi 2D ve 3D görüntülenerek yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Şekil 3.46'da gösterilen ve parlatılmış Diesel motor silindirininin dijital mikroskop görüntülerini içeren şekilde yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüş ve bu ölçümlerde Ra ve Sa değerleri dikkate alınmıştır. Yapılan ölçümler neticesinde aşınmamış silindire ait yüzey pürüzlülükleri Ra: 0.052 µm, Sa: 0.578 µm olarak ölçülmüştür.

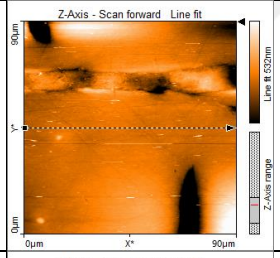
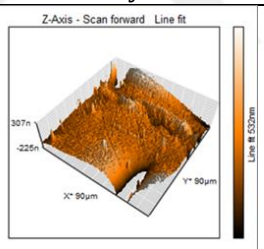
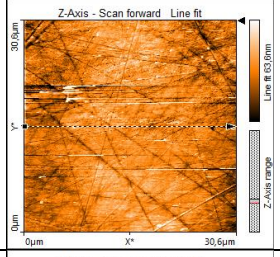
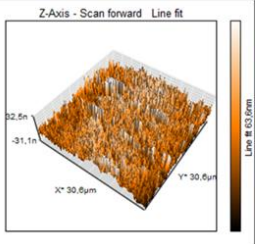
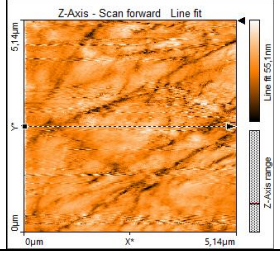
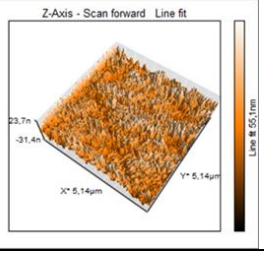


Şekil 3.47 Test öncesi parlatılmış Diesel motor silindirin optik, 2D, çizgisel pürüzlülük, 3D ve 3D haritalama dijital optik mikroskop görüntüleri.

Tablo 3.18 Test öncesi parlatılmış Diesel motor silindiri optik mikroskop yüzey pürüzlülük değerleri.

Test Edilmemiş Diesel motor silindir	
(µm)	Yüzey pürüzlülüğü
Ra	0.052
Rq	0.065
Rz	0.272
Rp	0.123
Rv	0.149
RSm	24.960
Rc	0.141
Rt	0.104
Sa	0.578
Sq	0.588
Sz	1.308

Antor 6LD 400 silindir ile yapılan tribometre testlerinden önce silindir yüzeyi AFM vasıtasıyla incelenerek yüzey pürüzlülükleri 90x90 µm, 30x30 µm ve 5x5 µm olarak ölçülmüştür. Şekil 3.47'de yer alan grafik Antor silindirin test öncesi, 2 ve 3 boyutlu AFM görüntülerini göstermektedir.

	2 Boyutlu	**Yüzey Pürüzlülüğü**	**3 Boyutlu**	**Yüzey Pürüzlülüğü**
90x90		-- Line Roughness -- Ra 12.137nm Rq 15.213nm Ry 71.225nm Rp 29.298nm Rv -41.927nm Rm -18.626fm		-- Area Roughness -- Area 8.163nm^2 Sa 72.249nm Sq 136.47nm Sy 2041.9nm Sp 661.72nm Sv -1380.1nm Sm -18.625fm
30x30		-- Line Roughness -- Ra 6.5525nm Rq 8.472nm Ry 51.671nm Rp 26.278nm Rv -25.393nm Rm -18.626fm		-- Area Roughness -- Area 942.6pm^2 Sa 8.102nm Sq 11.818nm Sy 333.64nm Sp 242.81nm Sv -90.835nm Sm -18.625fm
5x5		-- Line Roughness -- Ra 6.8738nm Rq 8.3054nm Ry 43.977nm Rp 19.269nm Rv -24.708nm Rm -18.626fm		-- Area Roughness -- Area 26.59pm^2 Sa 5.7373nm Sq 7.578nm Sy 110.2nm Sp 39.331nm Sv -70.868nm Sm -18.626fm

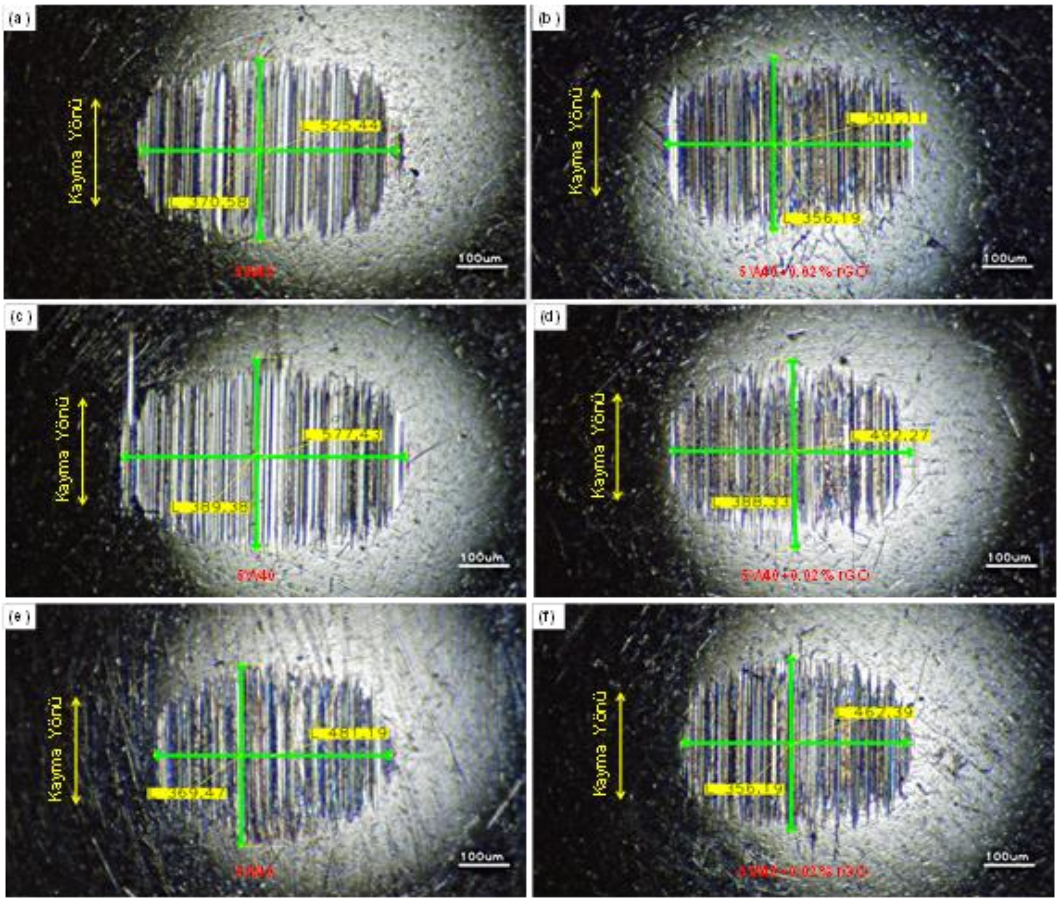
Şekil 3.48 Test öncesi kullanılmamış Diesel motor silindirin AFM ile yapılan analiz görüntüleri.

3.3.2 Antor 6LD400 Diesel Motor - Test Sonrası Optik Mikroskop Analizleri

Test parametrelerine uygun olarak yapılan tribometre testleri neticesinde bilye ve silindirde meydana gelen aşınma izleri optik mikroskop ve dijital mikroskop vasıtasıyla 2D ve 3D olarak incelenmiş ve yüzey pürüzlülükleri tespit edilmiştir.

3.3.2.1 Tribometre Testi Sonrası Bilye Yüzey Analizleri

Deney parametrelerine uygun şekilde referans yağ (5W40) ve rGO6 eklenmiş yağ ile gerçekleştirilen tekrarlı tribometre testleri neticesinde bilyede meydana gelen noktasal aşınma izleri optik mikroskop vasıtasıyla incelenmiş ve Şekil 3.48'te gösterilmiştir. Ölçülen bu aşınma izlerinin karşılaştırmalı hali ise Tablo 3.18'de gösterilmiştir.



(a) 5W40 ile yapılan 1.test
(b) rGO 6+5W40 ile yapılan 1. test
(c) 5W40 ile yapılan 2.test
(d) rGO 6+5W40 ile yapılan 2. test
(e) 5W40 ile yapılan 3.test
(f) rGO 6+5W40 ile yapılan 3. test

Şekil 3.49 Parlatılmış silindir gömleği üzerinde 3 kez test edilen bilyelerin optik dijital mikroskop ile aşınma izi çap mesafelerinin ölçümü.

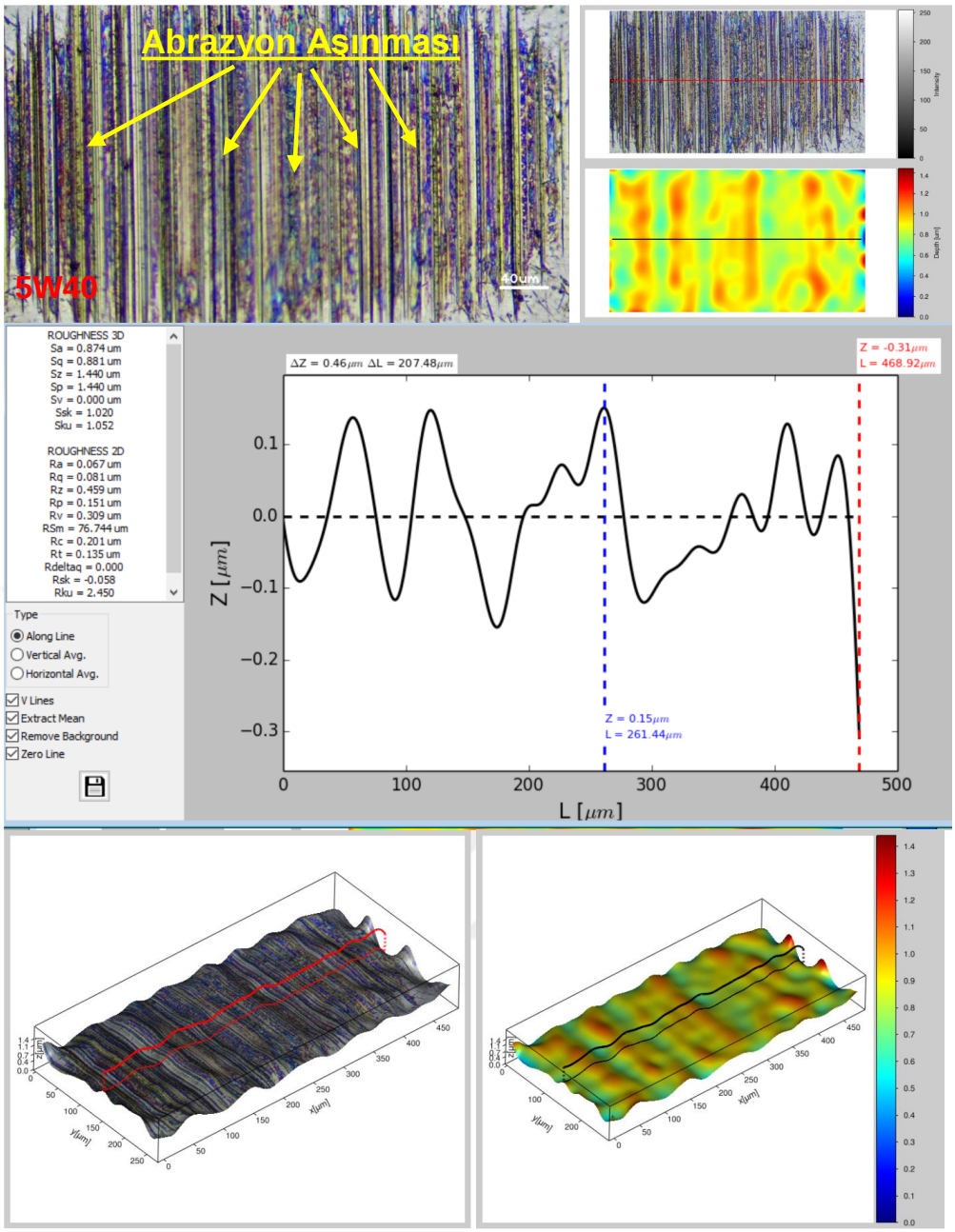
(a,c,e) referans yağ (5w40) ile, (b,d,f) rGO ilaveli yağ ile test edilen bilyeler.

Tablo 3.19 5W40 ve rGO6 ile parlatılmış motor silindiri üzerinde test edilen bilyelerin aşınma izi çapları.

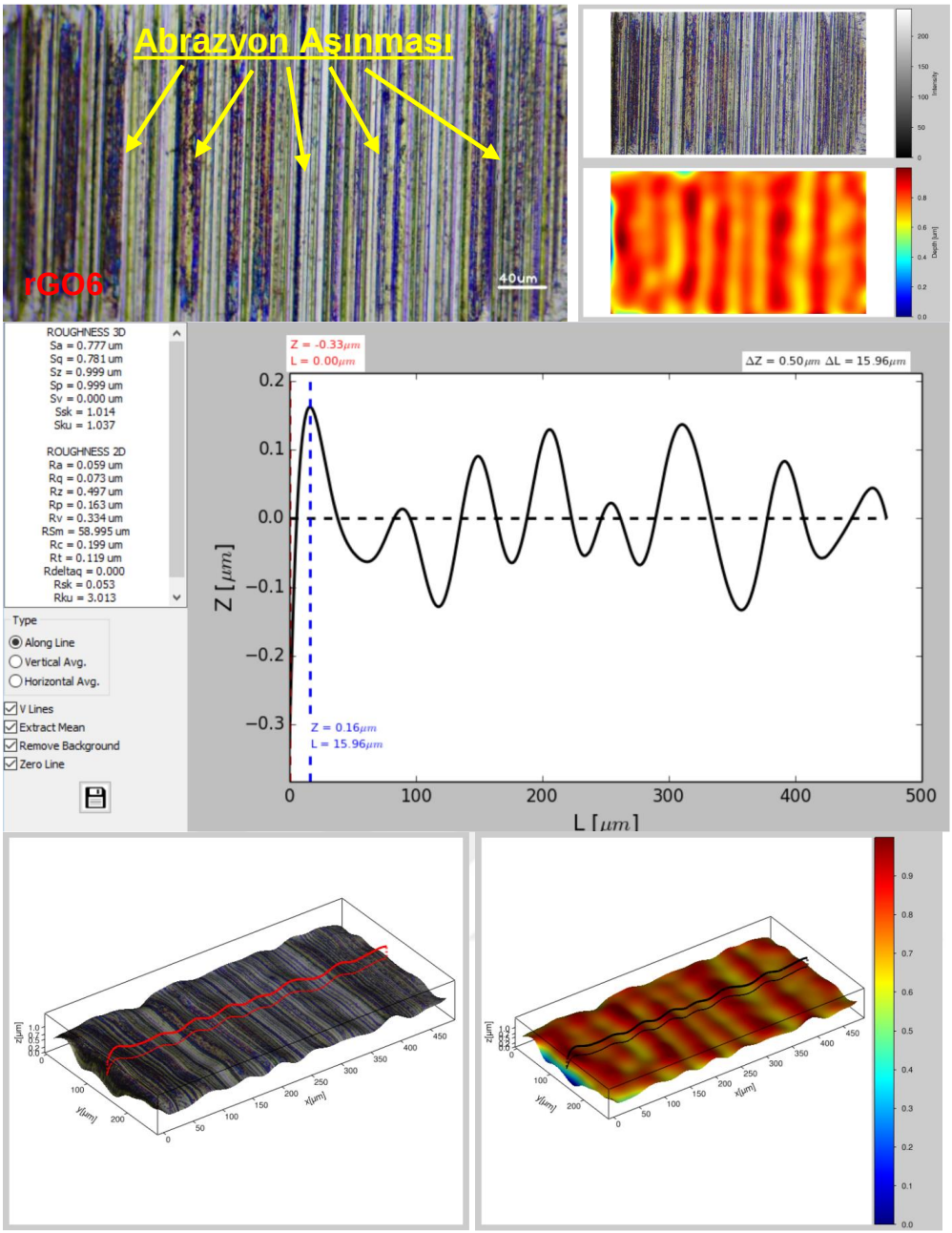
Test no	Yatay aşınma izi çapı (µm)	Dikey aşınma izi çapı (µm)
Test1 (5W40)	525.44	370.58
Test1 (rGO6)	**501.11**	**356.19**
Test2 (5W40)	577.43	389.38
Test2 (rGO6)	**492.27**	**388.33**
Test3 (5W40)	481.19	369.47
Test3 (rGO6)	**462.39**	**356.19**

Tablo 3.19'da, her bir testte rGO6 ile ölçülen aşınma izi, referans Shell 5W40 yağa kıyasla gerek yatay gerekse dikey olarak düşük çıkmıştır. Yağa %0.02 eklenen ve süspansiyon halde duran indirgenmiş grafen oksit nanopartikülü rGO6 yüzeyi kaplamış ve korumuştur. Dijital mikroskop altında incelenen aşınma izleri, yüzey pürüzlülüğü yönünden de incelenmiş ve referans değer olarak yatay Ra değerleri alınmıştır. Referans yağ ve rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan 3 adet tekrarlı testten oluşan tribometre testlerinde her bir testin yüzey pürüzlülük ölçüleri Tablo 3.20'de gösterilmiş olup yüzey pürüzlülük analiz sonuçları ve ortalama sürtünme katsayısı grafiği detaylı olarak aşağıda verilmiştir

5W40 referans yağ ve rGO6 eklenmiş referans yağ ile yapılan tribometre testlerinin ilki olan Test 1'de bilye yüzeyi optik dijital mikroskop altında incelenmiştir. Yapılan inceleme neticesinde bilyenin yüzey pürüzlülük değerleri 5W40 yağ için Ra:0.067 µm Sa: 0.874µm (Şekil 3.49); rGO6 eklenmiş yağ için ise Ra:0.059 µm, Sa: 0.777µm (Şekil 3.50) olarak ölçülmüştür.

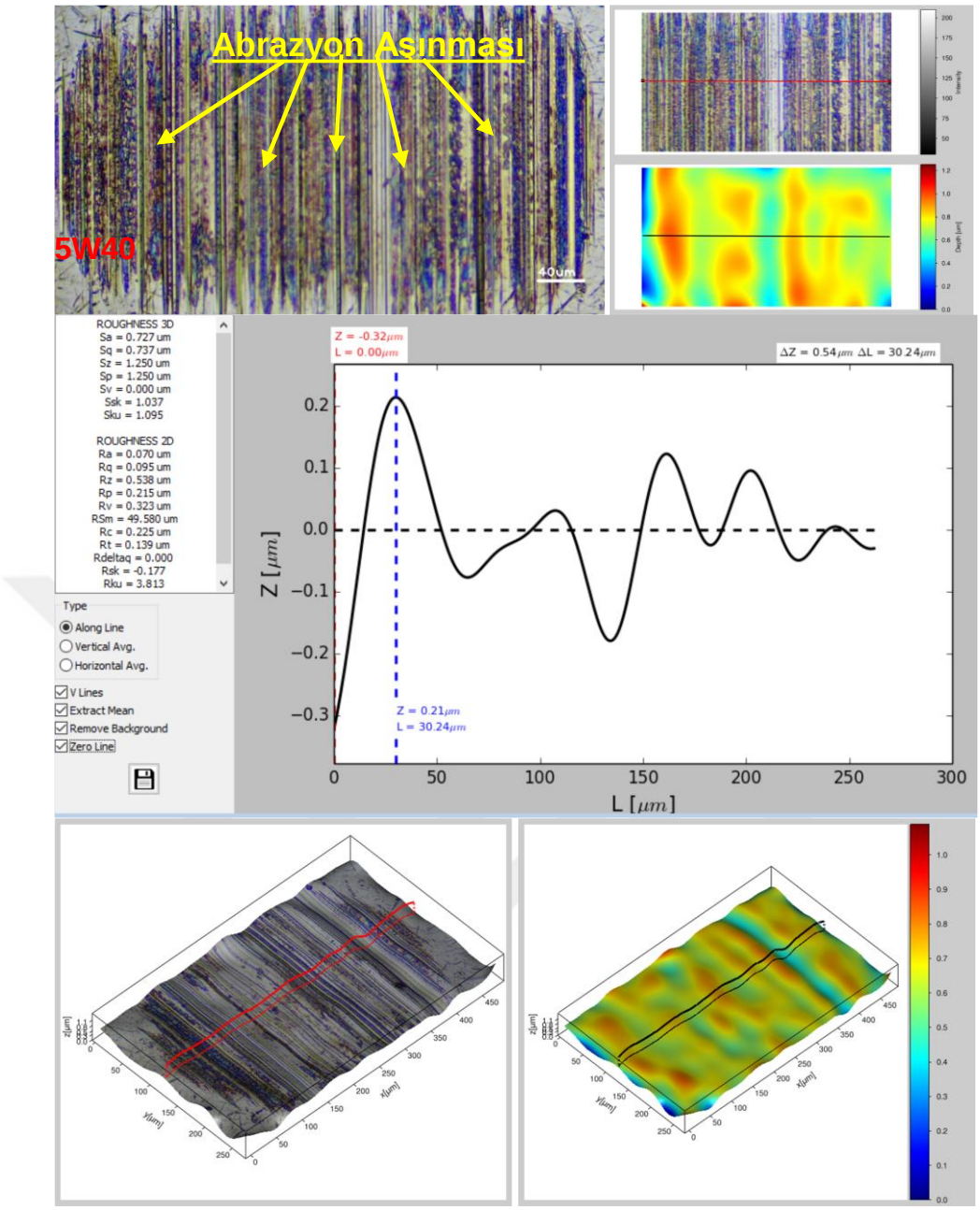


Şekil 3.50 Diesel motor silindiri kullanılarak 5W40 yağ ile yapılan tribometre testi bilye yüzeyi – Test 1.

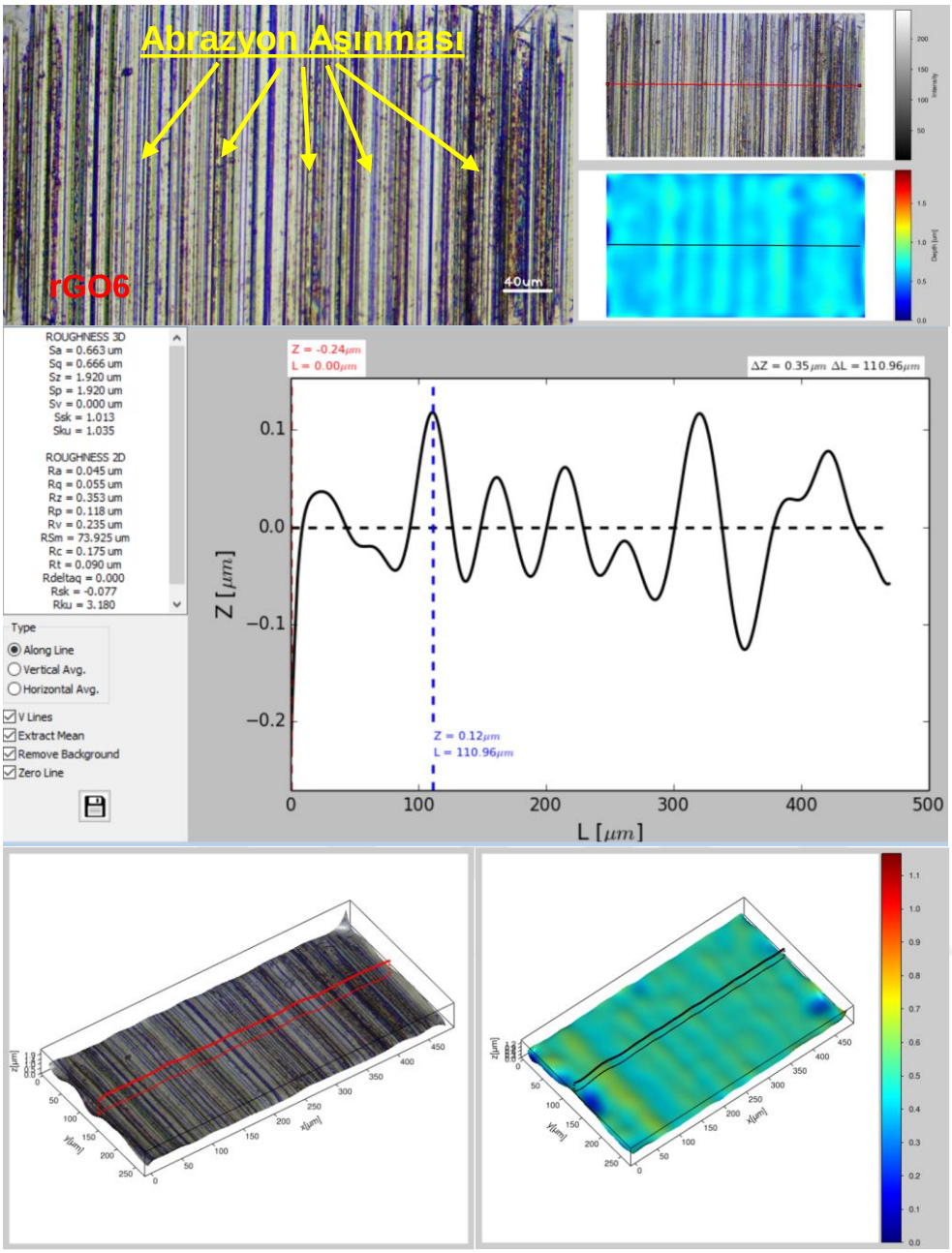


Şekil 3.51 Diesel motor silindiri kullanılarak rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan tribometre testi bilye yüzeyi – Test 1.

5W40 referans yağ ve rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan tribometre testlerinin ikincisi olan Test 2'de bilye yüzeyi optik dijital mikroskop altında incelenmiştir. Yapılan inceleme neticesinde bilyenin yüzey pürüzlülük değerleri 5W40 yağ için Ra: 0.070 µm, Sa: 0.727 µm (Şekil 3.51); rGO6 eklenmiş yağ için ise Ra:0.045 µm, Sa: 0.663µm (Şekil 3.52) olarak ölçülmüştür.

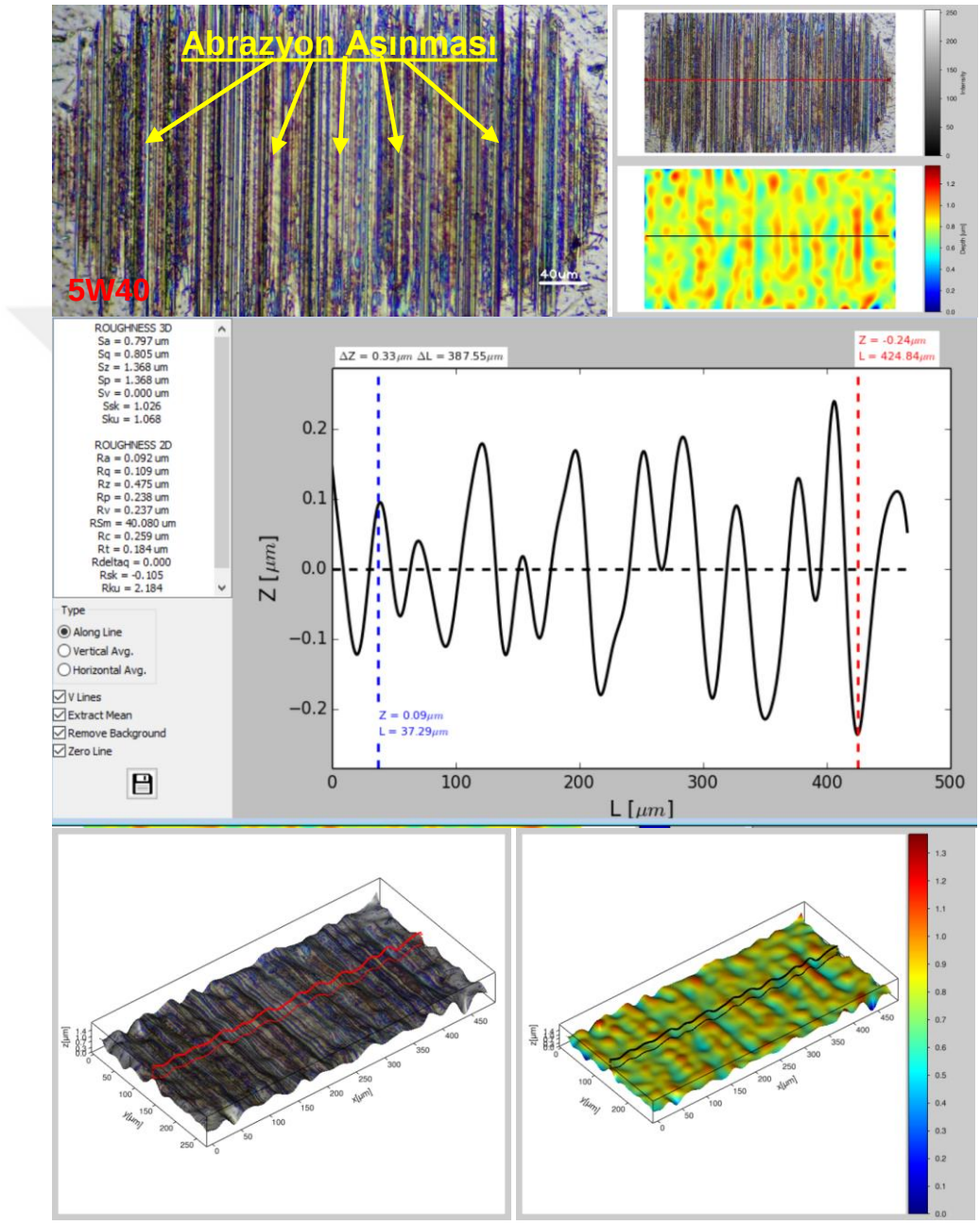


Şekil 3.52 Diesel motor silindiri kullanılarak 5W40 yağ ile yapılan tribometre testi bilye yüzeyi – Test-2.

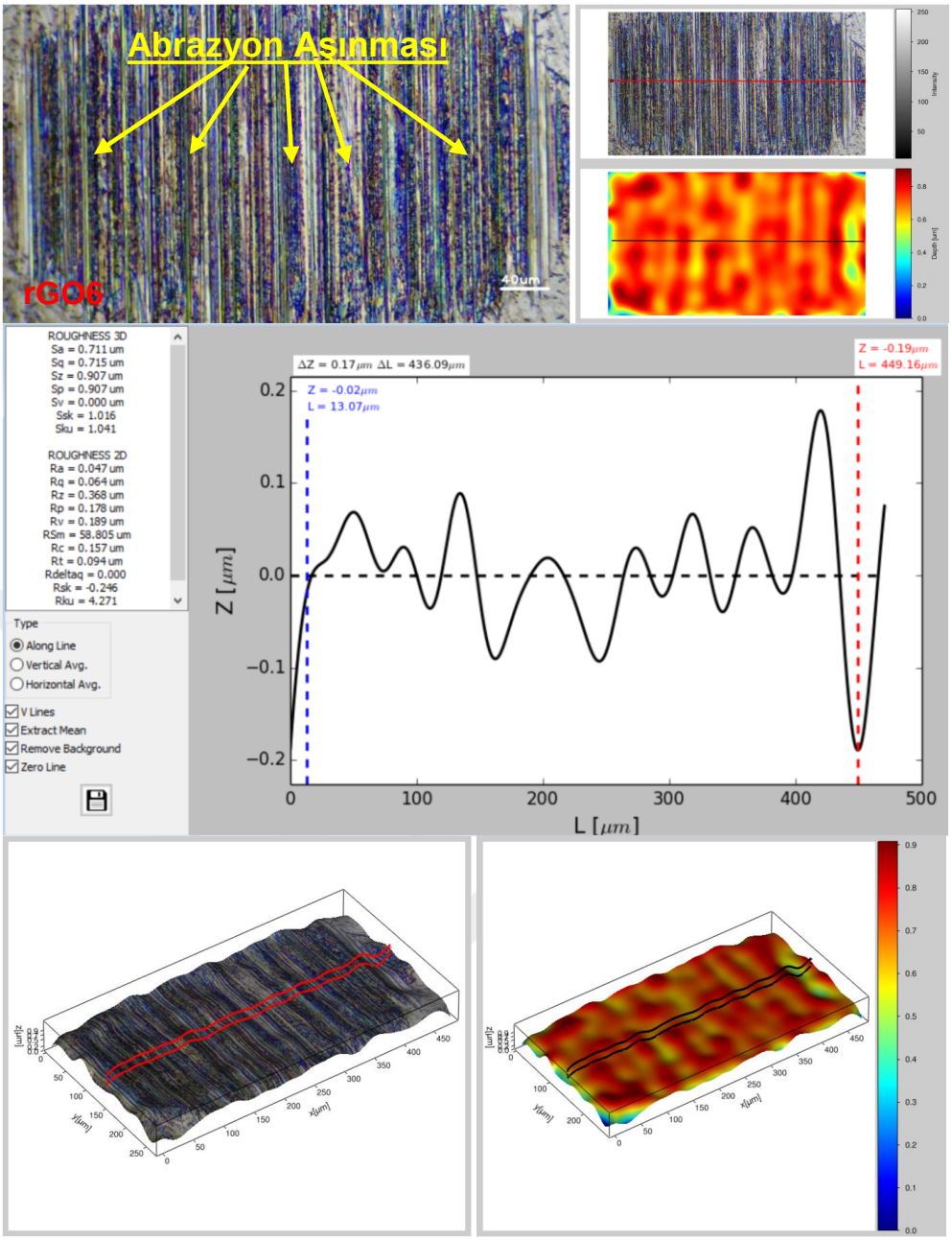


Şekil 3.53 Diesel motor silindiri kullanılarak rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan tribometre testi bilye yüzeyi – Test-2.

5W40 referans yağ ve rGO6 eklenmiş referans yağ ile yapılan tribometre testlerinin sonuncusu olan Test 3'te bilye yüzeyi optik dijital mikroskop altında incelenmiştir. Yapılan inceleme neticesinde bilyenin yüzey pürüzlülük değerleri 5W40 yağ için Ra:0.092 µm, Sa: 0.797 µm (Şekil 3.53); rGO6 eklenmiş yağ için ise Ra:0.047 µm, Sa: 0.711µm (Şekil 3.54) olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.54 Diesel motor silindiri kullanılarak 5W40 yağ ile yapılan tribometre testi bilye yüzeyi – Test-3.



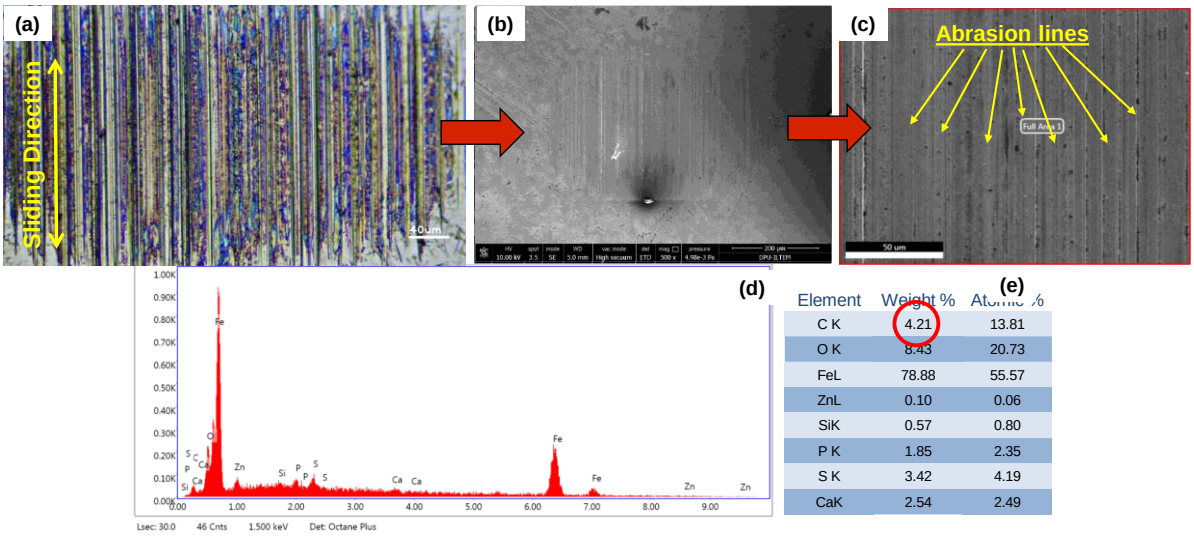
Şekil 3.55 Diesel motor silindiri kullanılarak rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan tribometre testi bilye yüzeyi – Test-3.

Tablo 3.20 5W40 ve rGO6 içeren yağ ile parlatılmış Diesel motor silindir bloğu üzerinde test edilen bilyelerin 2D ve 3D yüzey pürüzlülük değerleri.

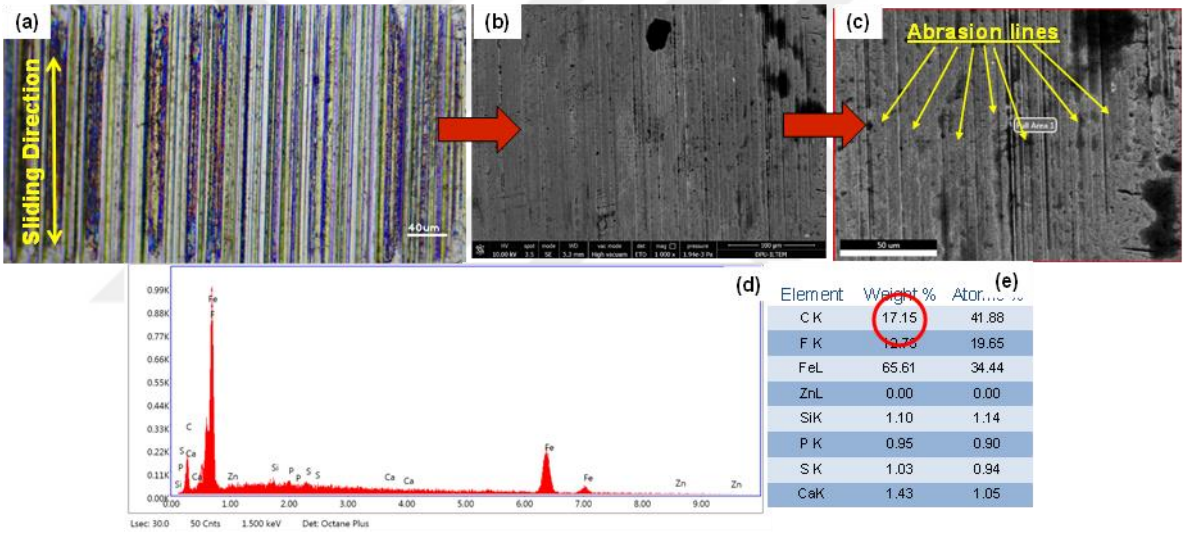
	(μm)	Ra	Rq	Rz	Rp	Rv	RSm	Rc	Rt	Sa	Sq	Sz
	Test edilmemiş	0.056	0.068	0.296	0.170	0.126	79.040	0.174	0.112	0.765	0.769	1.291
Test 1	5W40	0.067	0.081	0.459	0.151	0.309	76.744	0.201	0.135	0.874	0.881	1.440
	rGO6	0.059	0.073	0.497	0.063	0.334	58.995	0.199	0.119	0.777	0.781	0.999
Test 2	5W40	0.070	0.095	0.538	0.215	0.323	49.580	0.225	0.139	0.727	0.737	1.250
	rGO6	0.045	0.055	0.353	0.118	0.235	73.925	0.175	0.090	0.663	0.666	1.920
Test 3	5W40	0.092	0.109	0.475	0.238	0.237	40.080	0.259	0.184	0.797	0.805	1.368
	rGO6	0.047	0.064	0.368	0.178	0.189	58.805	0.157	0.094	0.711	0.715	0.907

Tablo 3.20, referans yağ ve rGO içeren referans yağ ile yapılan tekrarlı 3 teste ait bilye yüzeyi pürüzlülük değerlerini içermektedir. Optik mikroskop vasıtasıyla ölçülen bilye yüzey pürüzlülük değerleri, rGO6 içeren yağ ile yapılan testlerde yüzey pürüzlülüğünün düştüğünü göstermektedir. Her 3 testte de tespit edilen bu düşüş, indirgenmiş grafenin yüzeyde etkin bir şekilde koruma sağlayarak aşınmayı azaltmasından kaynaklanmaktadır.

Antor 6 LD 400 Diesel motor silindir numunesi ve bilye ile gerçekleştirilen tribometre testleri neticesinde, optik mikroskop ile sürtünme katsayısını düşürdüğü tespit edilen rGO6 nanopartiküllü yağ, test sonrası aşınmış yüzeyde oluşan kimyasal tabakanın detaylandırılması amacıyla FESEM analizine tabii tutulmuştur. Şekil 3.55 ve 3.56 bilyenin test sonrası yüzey elementel analini içermektedir. Test sonrası yüzeyde karbon etkinliğinin artmış olması, rGO6'nın yüzeyde tribo film oluşturarak sürtünme katsayısını azalttığını göstermektedir. Deneyler sonucunda bilye yüzeyinde elde edilen elementel analiz sonuçları Tablo 3.21'de gösterilmiştir.



Şekil 3.56 5W-40 motor yağı ile test edilen bilyenin EDS tarafından desteklenen FE-SEM görüntülerinde aşınma izi.

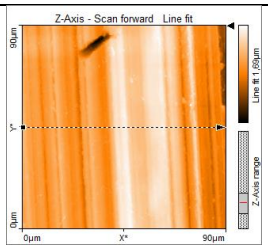
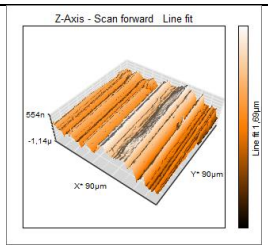
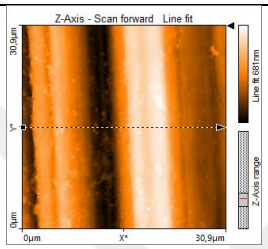
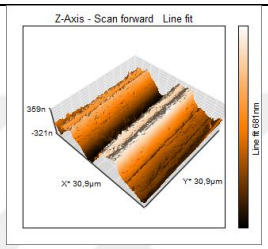
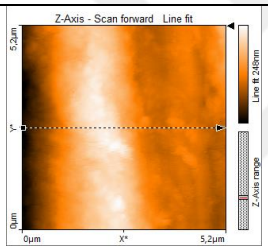
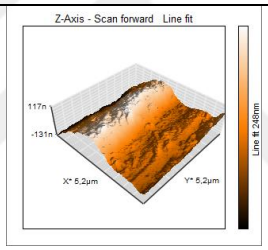
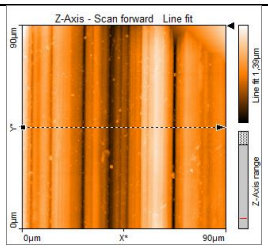
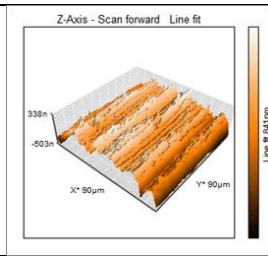
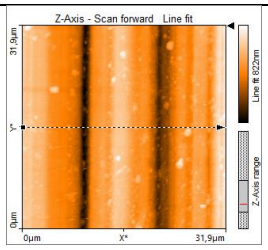
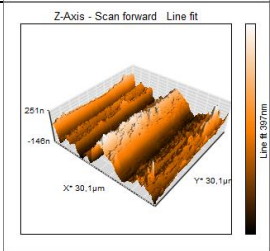
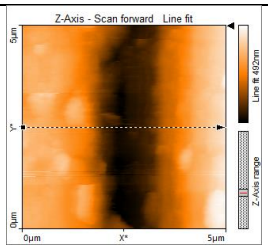
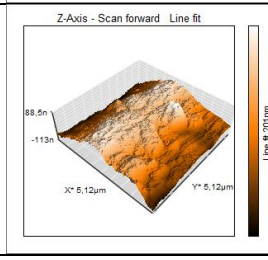


Şekil 3.57 rGO6 motor yağı ile test edilen bilyenin EDS tarafından desteklenen FE-SEM görüntülerinde aşınma izi.

Tablo 3.21 5W40 ve rGO 6 ile yapılan test sonrası EDS analiz sonuçları

	Element	C K	O K	FeL	Zn L	Si K	P K	S K	CaK
Area 1	5W40	4.21	8.43	78.88	0.10	0.57	1.85	3.42	2.54
	rGO 6	17.15	12.75	65.61	0.00	1.10	0.95	1.03	1.43

Diesel motor silindiri ile yapılan tribometre testlerinden sonra bilye yüzeyi AFM vasıtasıyla incelenerek yüzey pürüzlülükleri 90x90 µm, 30x30 µm ve 5x5 µm olarak ölçülmüştür. Şekil 3.57'de yer alan grafik, bilyenin 5W40 referans yağ ve rGO6 yağ ile yapılan test sonrası 2 ve 3 boyutlu AFM görüntülerini göstermektedir.

	2D	Yüzey pürüzlülüğü	3D	Yüzey pürüzlülüğü
5W40 (90x90)		-- Line Roughness -- Ra 206,14nm Rq 243,94nm Ry 989,26nm Rp 486,83nm Rv -502,43nm Rm -18,626fm		-- Area Roughness -- Area 8,163nm^2 Sa 211,36nm Sq 256,14nm Sy 1745,5nm Sp 587,27nm Sv -1158,3nm Sm -18,626fm
5W40 (30x30)		-- Line Roughness -- Ra 146,99nm Rq 173,49nm Ry 626,13nm Rp 316,86nm Rv -309,27nm Rm -18,626fm		-- Area Roughness -- Area 964,6pm^2 Sa 146,41nm Sq 173,64nm Sy 1030,9nm Sp 371,74nm Sv -659,2nm Sm -18,625fm
5W40 (5x5)		-- Line Roughness -- Ra 46,4nm Rq 57,209nm Ry 227,04nm Rp 105,7nm Rv -121,34nm Rm -18,626fm		-- Area Roughness -- Area 27,22pm^2 Sa 112,05nm Sq 53,986nm Sy 257,62nm Sp 120,46nm Sv -137,16nm Sm -18,626fm
rGO6 (90x90)		-- Line Roughness -- Ra 190,02nm Rq 244,49nm Ry 1217,5nm Rp 538,08nm Rv -679,44nm Rm -17,753fm		-- Area Roughness -- Area 8,163nm^2 Sa 190,87nm Sq 242,52nm Sy 1680,9nm Sp 796,07nm Sv -884,84nm Sm -16,546fm
rGO6 (30x30)		-- Line Roughness -- Ra 115,02nm Rq 153,12nm Ry 773,52nm Rp 309,03nm Rv -464,49nm Rm -18,626fm		-- Area Roughness -- Area 1,024nm^2 Sa 114,11nm Sq 148,96nm Sy 882,36nm Sp 401,34nm Sv -481,02nm Sm -18,626fm
rGO6 (5x5)		-- Line Roughness -- Ra 39,369nm Rq 129,91nm Ry 437,19nm Rp 217,51nm Rv -219,68nm Rm -18,626fm		-- Area Roughness -- Area 25,2pm^2 Sa 44,135nm Sq 128,29nm Sy 532,37nm Sp 267,83nm Sv -264,54nm Sm -18,624fm

Şekil 3.58 Diesel silindir ile test edilen bilyenin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri

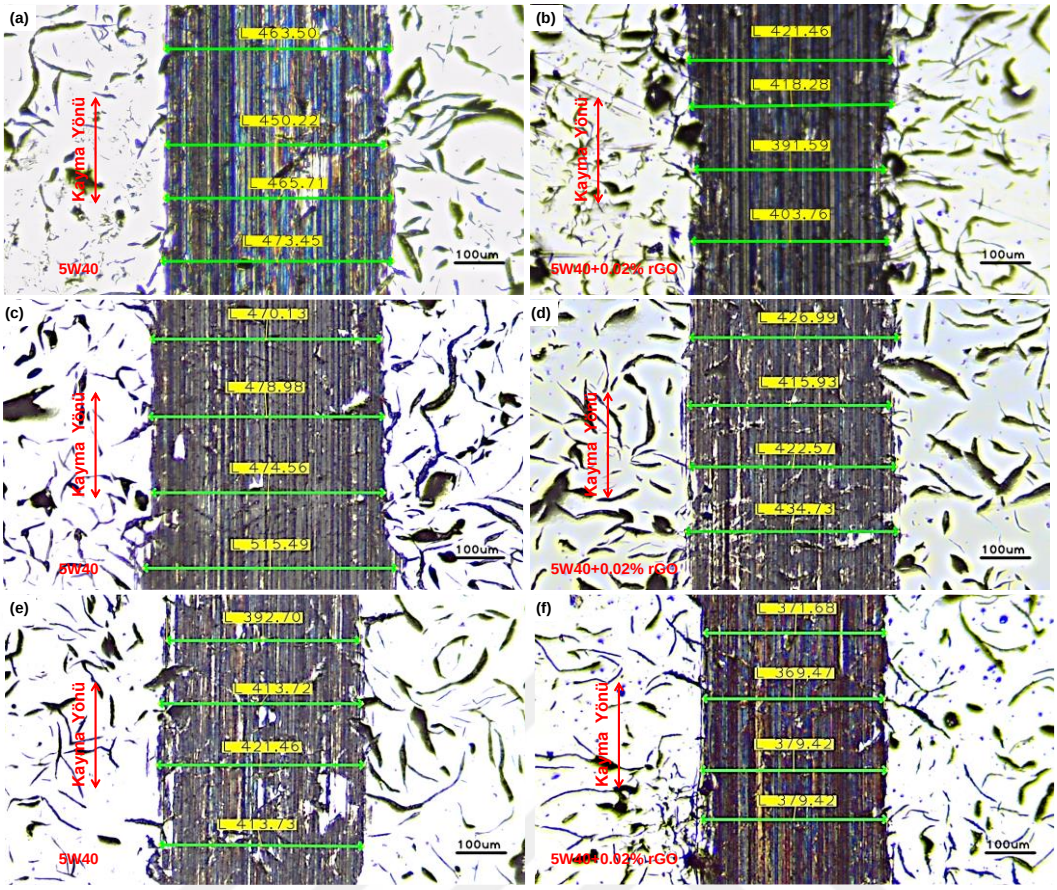
Tablo 3.22 Diesel motor silindiri ile test edilen bilyenin 2 ve 3 boyutlu AFM yüzey pürüzlülük değerlerinin karşılaştırılması.

Test no	Ra (nm)	Sa (nm)
90x90 (Test edilmemiş)	61.548	55.988
90x90 (5W40)	206.14	211.36
90x90 (rGO6)	190.02	190.87
30x30 (Test edilmemiş)	12.849	16.609
30x30 (5W40)	146.99	146.41
30x30 (rGO6)	115.02	114.11
5x5 (test edilmemiş)	4.5565	5.0573
5x5 (5W40)	46.4	112.05
5x5 (rGO6)	39.369	44.135

Tablo 3.22'de yer alan 2 ve 3 boyutlu yüzey pürüzlülük değerleri, rGO6 ile yapılan testler neticesinde bilye yüzeyinde meydana gelen aşınmanın referans yağa kıyasla azaldığını göstermektedir. Bu azalma, rGO katkılı tribofilmin yüzeyde koruyucu etki yapması ile meydana gelmiştir.

3.3.2.2 Tribometre Testi Sonrası Silindir Yüzey Analizleri

Deney parametrelerine uygun şekilde referans yağ (5W40) ve rGO6 eklenmiş yağ ile gerçekleştirilen tekrarlı tribometre testleri neticesinde silindirde meydana gelen aşınma izleri optik mikroskop vasıtasıyla incelenmiş ve Şekil 3.58'te gösterilmiştir. Ölçülen bu aşınma izlerinin karşılaştırmalı hali ise Tablo 3.23'te gösterilmiştir



Şekil 3.59 Çelik bilye altında 3 kez test edilen parlatılmış Diesel motor silindirinin maksimum ve minimum aşınma izi genişliğinin optik dijital görüntüleri.

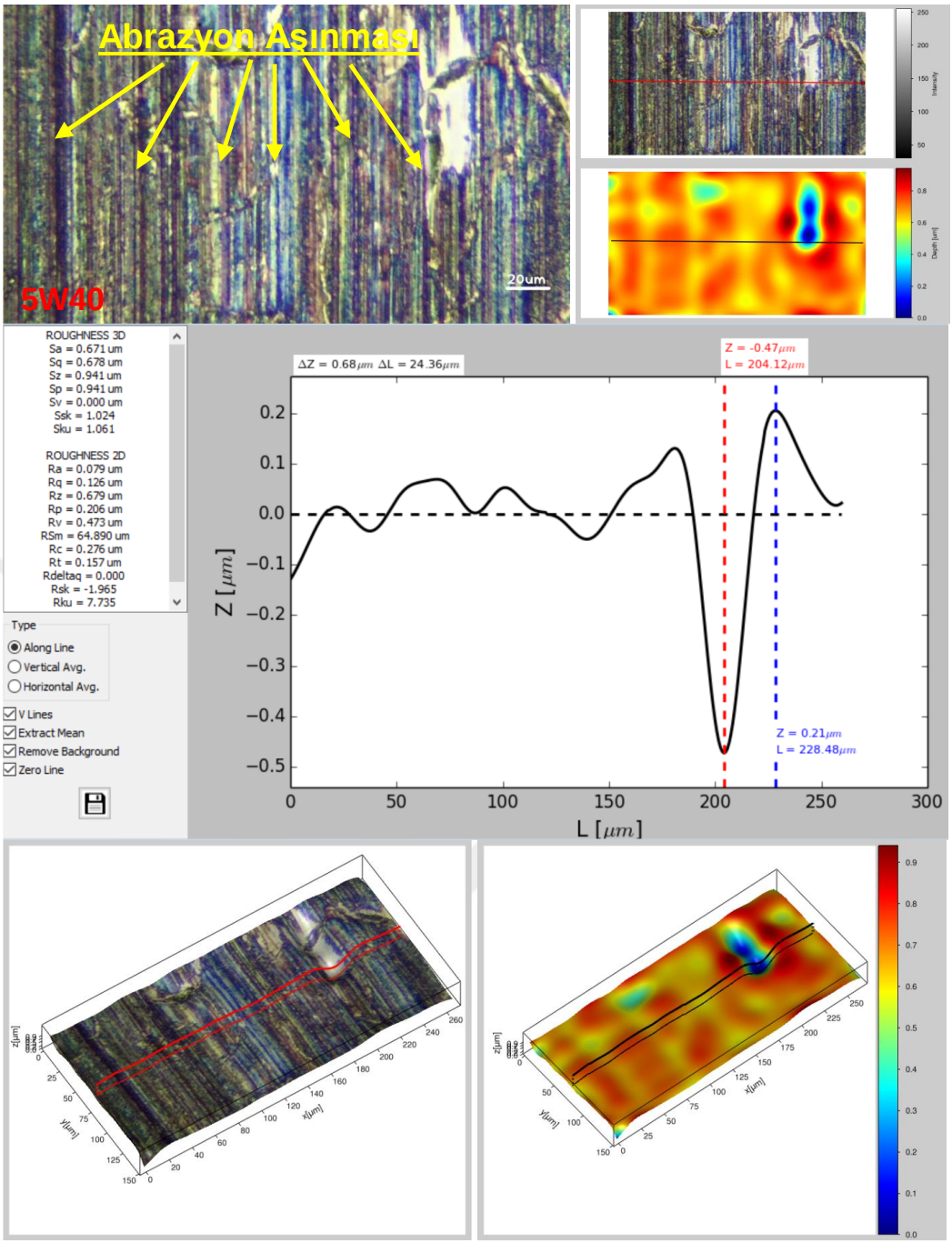
(a,c,e) referans yağ (5W40) ile, (b,d,f) rGO ilaveli yağ.

Tablo 3.23 5W40 ve rGO6 ile çelik bilye altında test edilen parlatılmış Diesel motor silindirinin maksimum ve minimum aşınma izi genişliği.

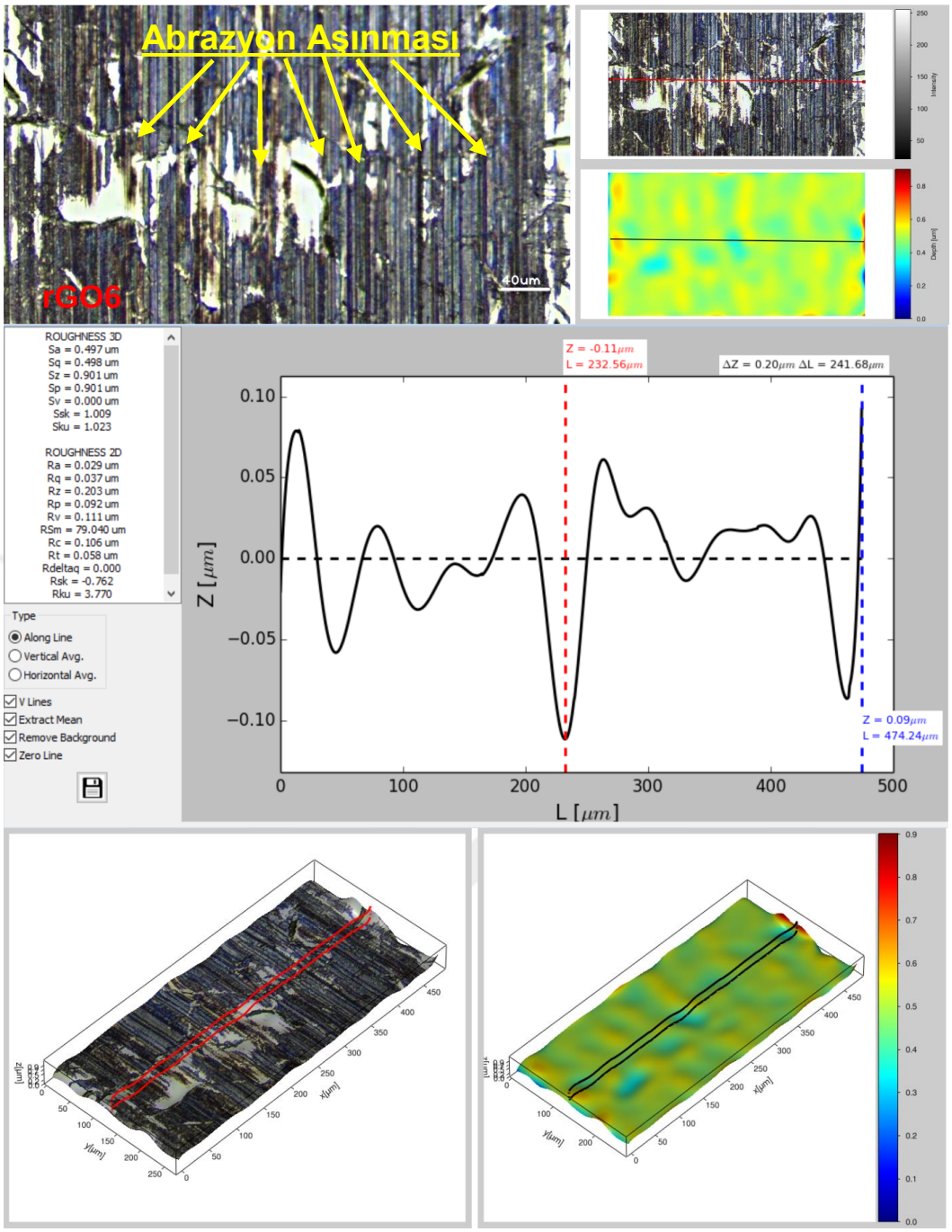
Test no	Max. aşınma izi genişliği (µm)	Min. aşınma izi genişliği (µm)
Test1 (5W40)	473.45	450.22
Test1 (rGO6)	**421.46**	**391.59**
Test2 (5W40)	515.49	470.13
Test2 (rGO6)	**434.73**	**415.93**
Test3 (5W40)	421.46	392.70
Test3 (rGO6)	**379.42**	**369.47**

Tablo 3.23'te gösterilen her bir testte, rGO6 ile ölçülen aşınma izi, referans 5W40 yağa kıyasla daha düşük çıkmıştır. Yağa %0.02 eklenen ve süspansiyon halde duran indirgenmiş grafen oksit nanopartikülü rGO6 yüzeyi kaplamış ve korumuştur. Dijital mikroskop altında incelenen aşınma izleri, yüzey pürüzlülüğü yönünden de incelenmiş ve referans değer olarak Ra ve Sa değerleri alınmıştır. Referans yağ ve rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan 3 adet tekrarlı testten oluşan tribometre testlerinde her bir testin yüzey pürüzlülük ölçüleri Tablo 3.24'te gösterilmiş olup yüzey pürüzlülük analiz sonuçları aşağıdaki gibidir:

5W40 referans yağ ve rGO6 eklenmiş referans yağ ile yapılan tribometre testlerinin ilki olan Test 1'de silindir yüzeyi optik dijital mikroskop altında incelenmiştir. Yapılan inceleme neticesinde silindir yüzey pürüzlülük değerleri 5W40 yağ için Ra:0.079 µm, Sa: 0.671µm (Şekil 3.59); rGO6 eklenmiş yağ için ise Ra:0.029 µm, Sa: 0.497µm (Şekil 3.60).

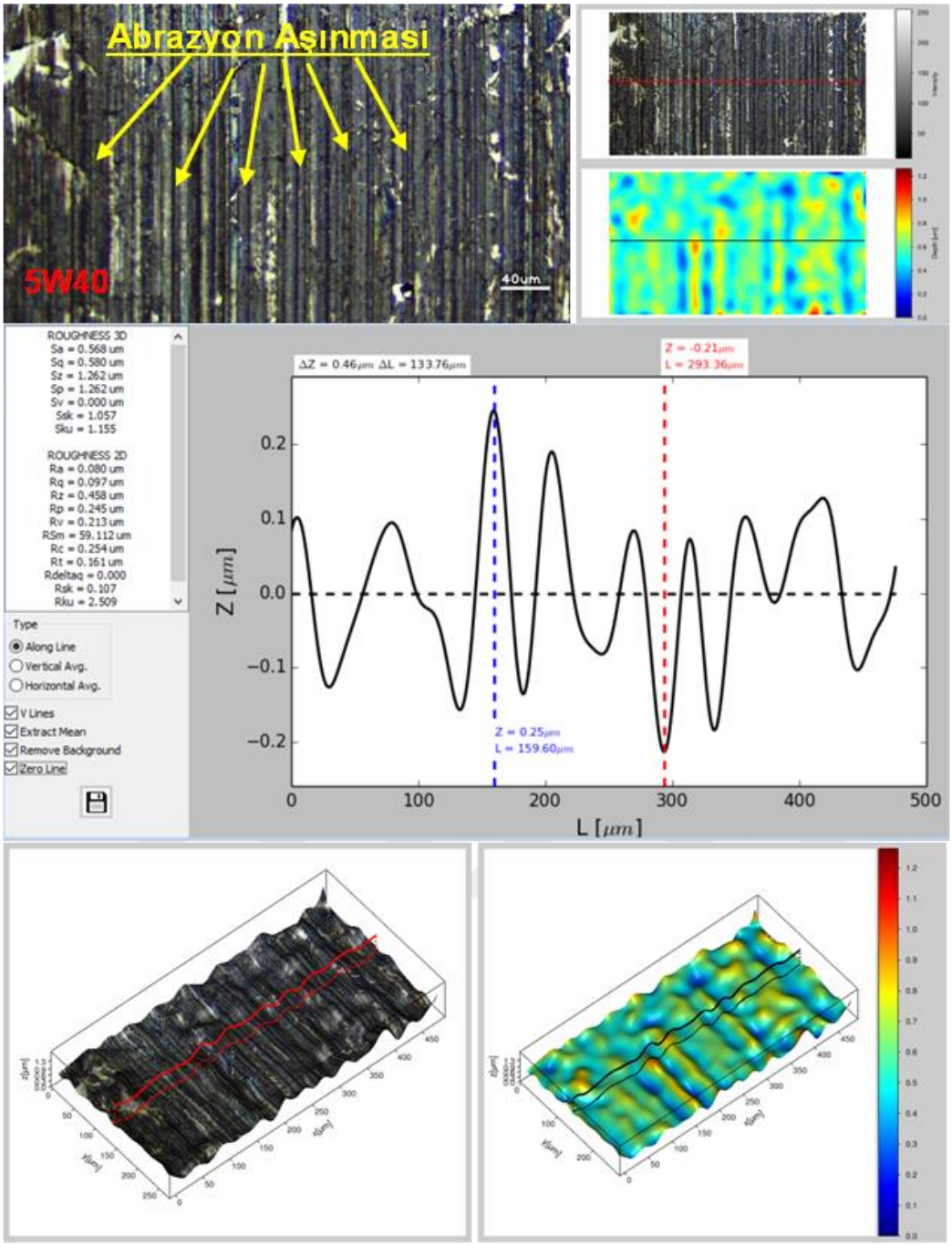


Şekil 3.60 Referans yağ 5W40 ile yapılan birinci test sonrası sürtünen Diesel motor silindirin ölçülen aşınma izleri ve yüzey pürüzlülük değerleri.

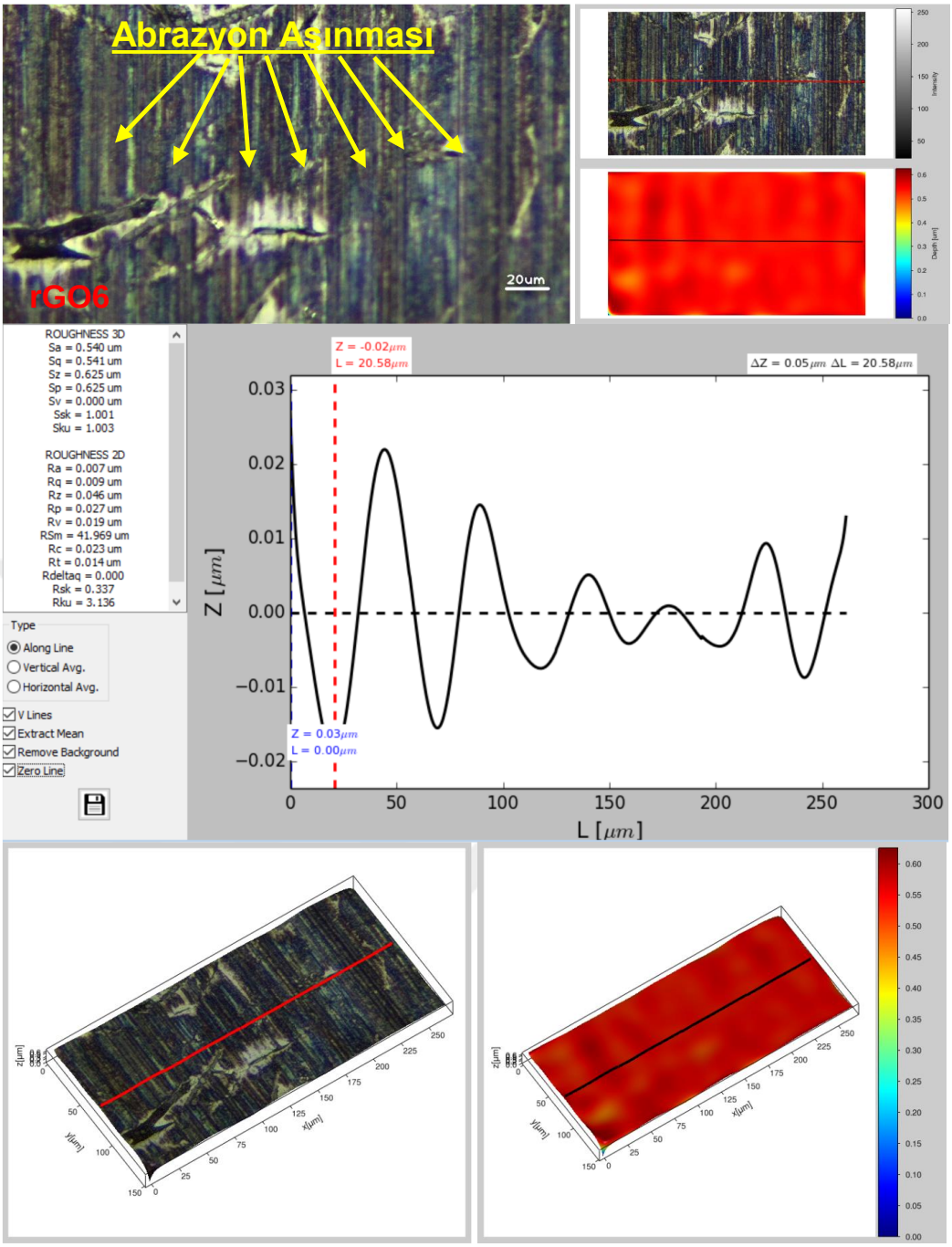


Şekil 3.61 rGO6 yağ ile yapılan birinci test sonrası sürtünen Diesel motor silindirin ölçülen aşınma izleri izleri ve yüzey pürüzlülük değerleri.

5W40 referans yağ ve rGO6 eklenmiş referans yağ ile yapılan tribometre testlerinin ikincisi olan Test 2'de silindir yüzeyi optik dijital mikroskop altında incelenmiştir. Yapılan inceleme neticesinde silindir yüzey pürüzlülük değerleri 5W40 yağ için Ra:0.080 µm, Sa: 0.568µm (Şekil 3.61); rGO6 eklenmiş yağ için Ra:0.007 µm, Sa: 0.540µm (Şekil 3.62).

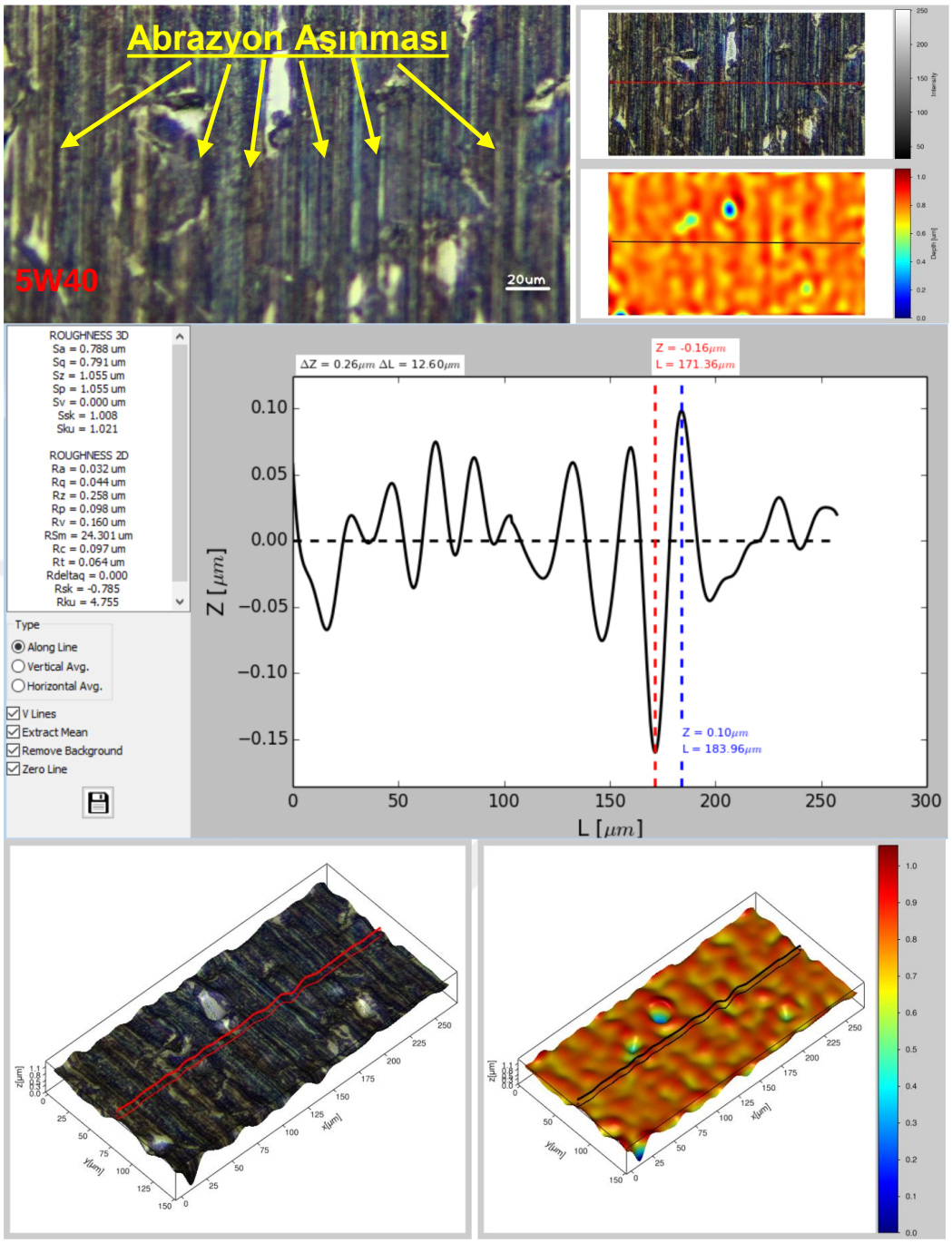


Şekil 3.62 Referans yağ 5W40 ile yapılan ikinci test sonrası sürtünen Diesel motor silindirin ölçülen aşınma izleri ve yüzey pürüzlülük değerleri.

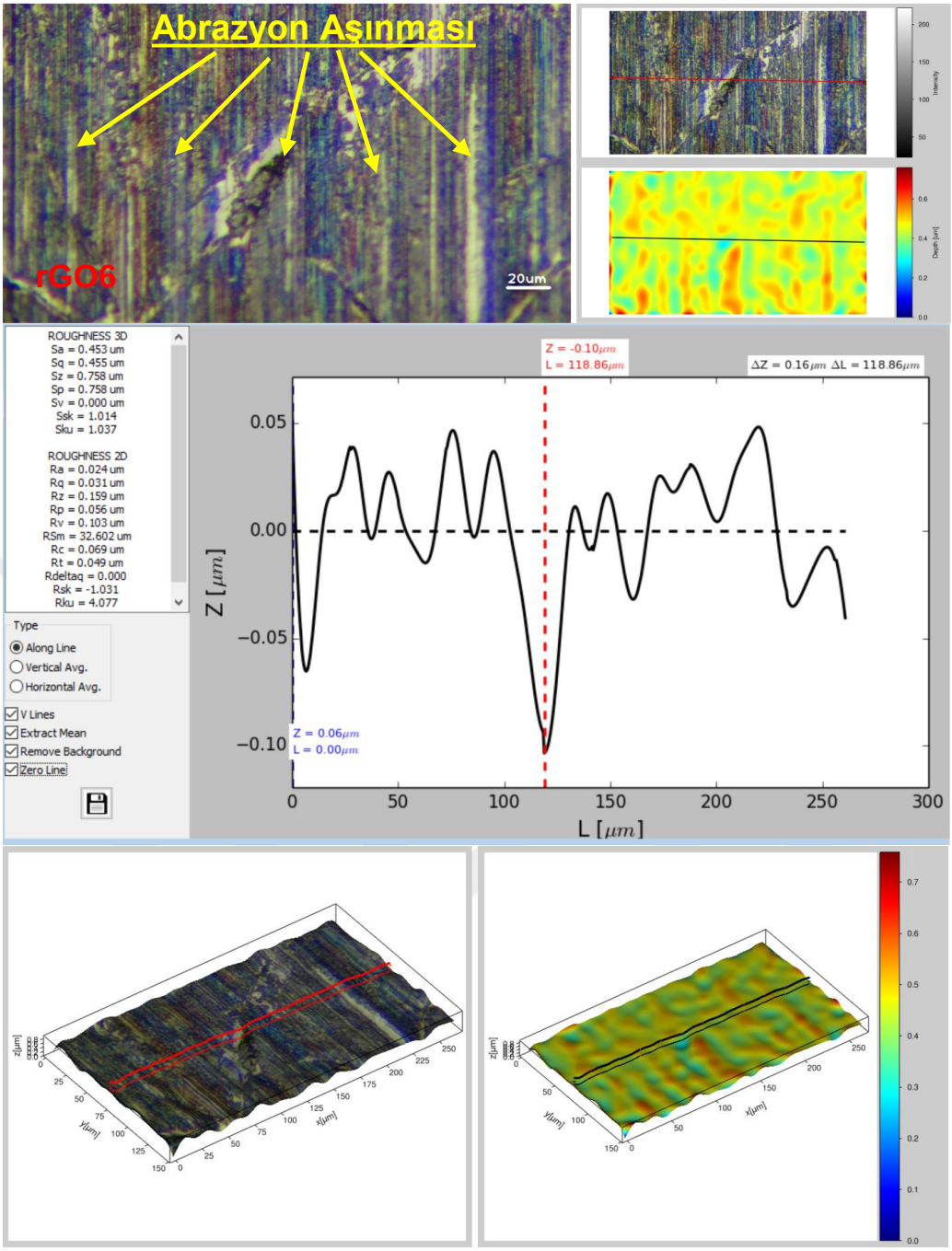


Şekil 3.63 rGO6 yağ ile yapılan ikinci test sonrası sürtünen Diesel motor silindirin ölçülen aşınma izleri izleri ve yüzey pürüzlülük değerleri.

5W40 referans yağ ve rGO6 eklenmiş referans yağ ile yapılan tribometre testlerinin sonuncusu olan Test 3'te silindir yüzeyi optik dijital mikroskop altında incelenmiştir. Yapılan inceleme neticesinde silindir yüzey pürüzlülük değerleri 5W40 yağ için Ra:0.032 µm , Sa: 0.788µm (Şekil 3.63); rGO6 eklenmiş yağ için Ra:0.024 µm , Sa: 0.453µm (Şekil 3.64).



Şekil 3.64 Referans yağ 5W40 ile yapılan üçüncü test sonrası sürtünen Diesel motor silindirin ölçülen aşınma izleri ve yüzey pürüzlülük değerleri.



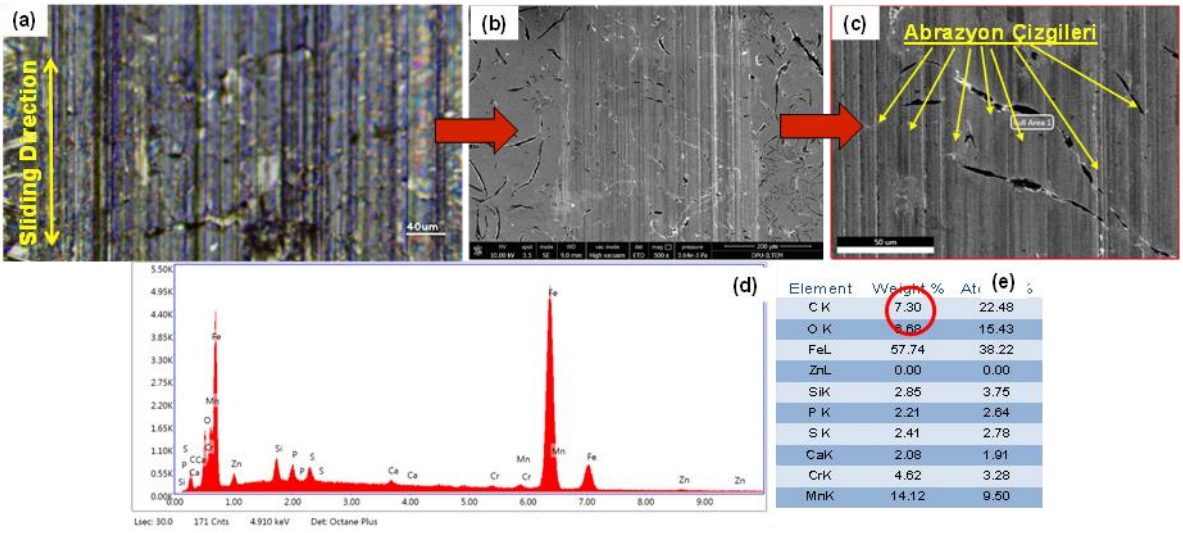
Şekil 3.65 rGO6 yağ ile yapılan üçüncü test sonrası sürtünen Diesel motor silindirin ölçülen aşınma izleri ve yüzey pürüzlülük değerleri.

Tablo 3.24 5W40 ve rGO6 ile test edilen parlatılmış Diesel motor silindirinin test öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülük değerleri.

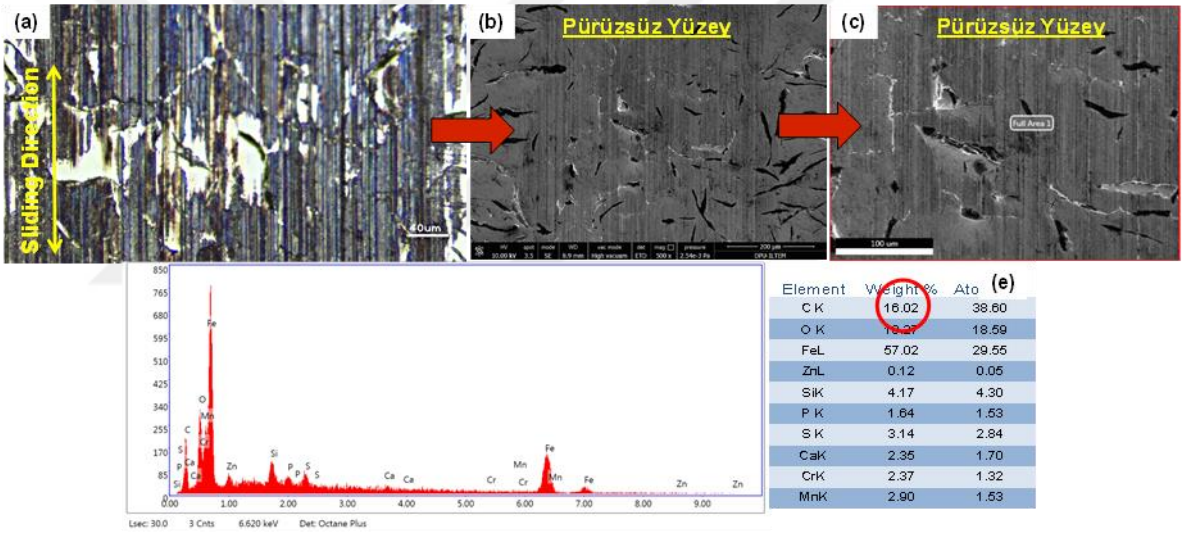
	(µm)	Ra	Rq	Rz	Rp	Rv	RSm	Rc	Rt	Sa	Sq	Sz
	Test edilmemiş	0.052	0.065	0.272	0.123	0.149	24.960	0.141	0.104	0.578	0.588	1.308
Test 1	5W40	0.079	0.126	0.679	0.206	0.473	64.890	0.276	0.157	0.671	0.678	0.941
	rGO6	0.029	0.037	0.203	0.092	0.111	79.040	0.106	0.058	0.47	0.498	0.901
Test 2	5W40	0.080	0.097	0.458	0.245	0.213	59.112	0.254	0.161	0.568	0.580	1.262
	rGO6	0.07	0.009	0.046	0.027	0.019	41.969	0.023	0.014	0.540	0.541	0.625
Test 3	5W40	0.032	0.044	0.258	0.098	0.160	24.301	0.097	0.064	0.788	0.791	1.055
	rGO6	0.024	0.031	0.159	0.056	0.103	32.602	0.069	0.049	0.453	0.455	0.758

Tablo 3.24, referans yağ ve rGO içeren referans yağ ile yapılan tekrarlı 3 teste ait silindir yüzeyi pürüzlülük değerlerini içermektedir. Optik mikroskop vasıtasıyla ölçülen silindir yüzey pürüzlülük değerleri, Ra ve Sa'nın yanı sıra Rq, Rz, Rp, Rv, Rsm, Rc, Rt, Sq, Sz değerlerinde de gerek bilyede gerek silindirde rGO6 eklenmiş yağda pürüzlülük değerlerinde azalma görülmüştür. Her 3 testte de tespit edilen bu düşüş, indirgenmiş grafenin yüzeyde etkin bir şekilde koruma sağlayarak aşınmayı azaltmasından kaynaklanmaktadır.

Yapılan tribometre testleri neticesinde dijital mikroskop analizleri ile sürtünme katsayısını düşürdüğü tespit edilen rGO6 nanopartiküllü yağ, test sonrası aşınmış yüzeyde oluşan kimyasal tabakanın detaylandırılması amacıyla FESEM analizine tabii tutulmuştur. Şekil 3.65 ve 3.66, referans yağ ve rGO 6 içeren 5W40 yağ ile yapılan testler sonrası silindirin yüzey analizini içermektedir. rGO 6 içeren yağ ile yapılan test sonrası referans 5W40 yağ ile yapılan teste kıyasla yüzeyde karbon etkinliğinin artmış olması, rGO6'nın yüzeyde tribo film oluşturarak sürtünme katsayısını azalttığını göstermektedir. Elde edilen elementel değerler Tablo 3.25'te gösterilmiştir.



Şekil 3.66 5W-40 ile test edilen Diesel motor silindirin a) Optik mikroskop b,c) S.E.M d) X-Ray, e) Elementel analiz sonuçları.



Şekil 3.67 rGO6 ile test edilen Diesel motor silindirin a) Optik mikroskop b,c) S.E.M d) X-Ray, e) Elementel analiz sonuçları.

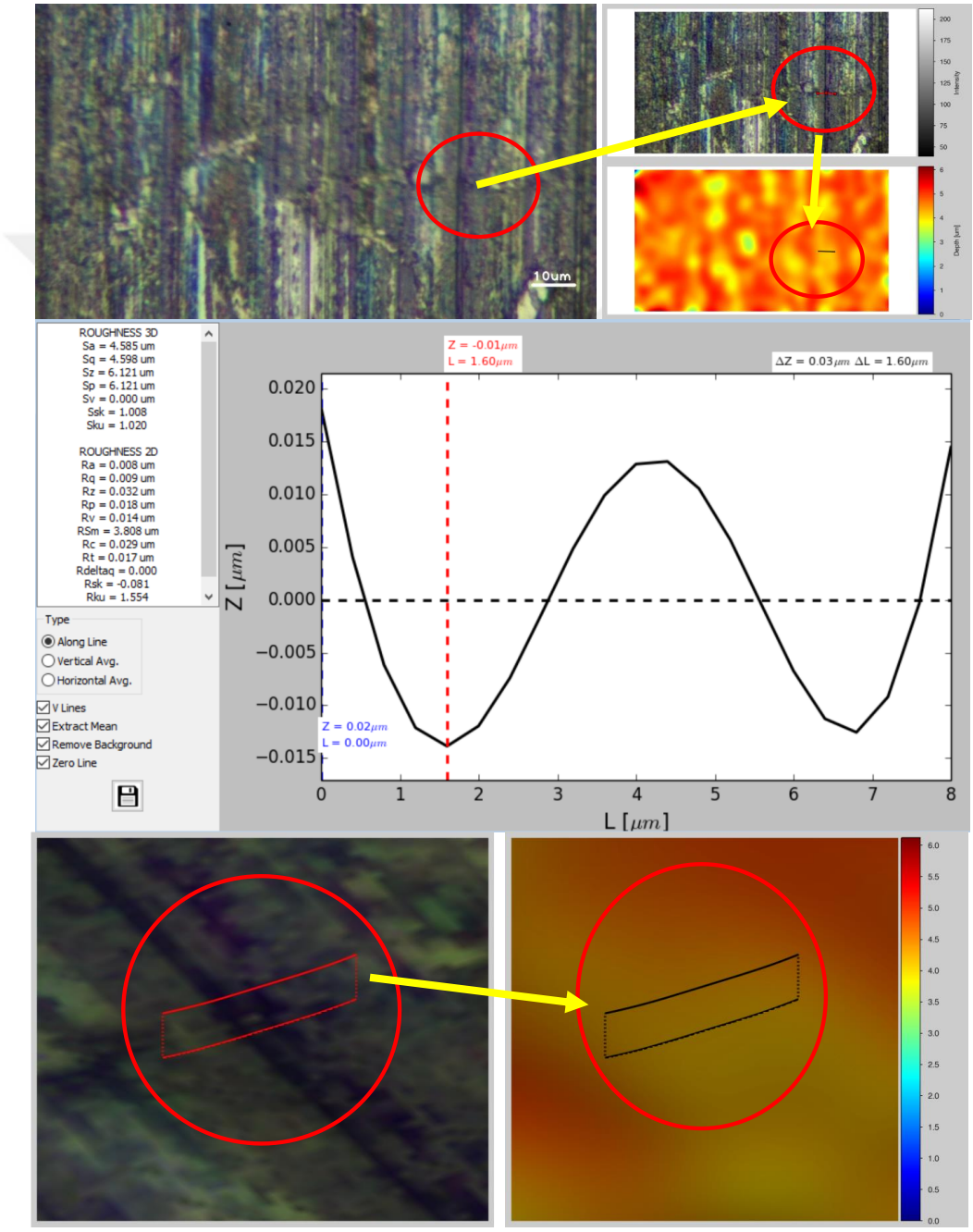
Tablo 3.25 5W40 ve rGO6 ile test edilen parlatılmış Diesel motor silindirinin FE-SEM analizi elementel değerleri.

	Element	C K	O K	FeL	Zn L	Si K	P K	S K	CaK	Cr K	Mn K
5W40		7.30	3,47	57.74	0.0	2.85	2.21	2.41	2.08	4.62	14.12
rGO 6		16.02	19.21	57.02	0.12	4.17	1.64	3.14	2.35	2.37	2.90

Tablo 3.25, yapılan FE-SEM analizi neticesinde silindir yüzeyinden elde edilen elementel değerleri göstermektedir. rGO 6 içeren yağ ile yapılan test sonrası referans 5W40 yağ ile yapılan teste kıyasla yüzeyde karbon etkinliğinin artmış olması, diğer

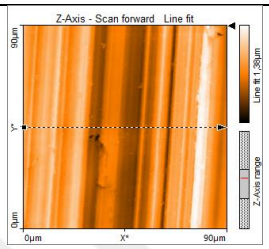
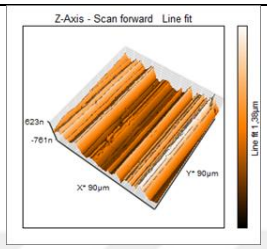
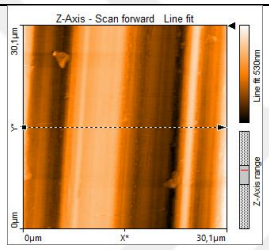
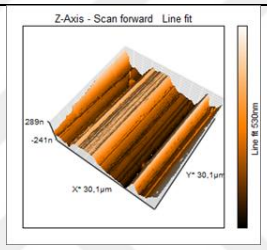
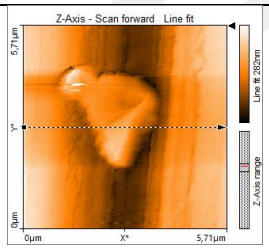
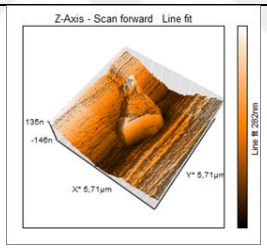
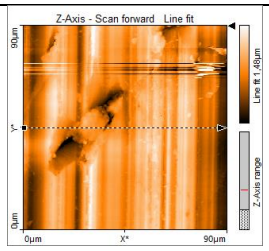
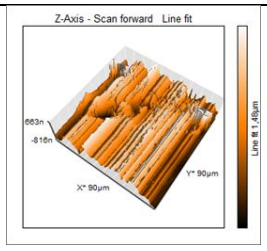
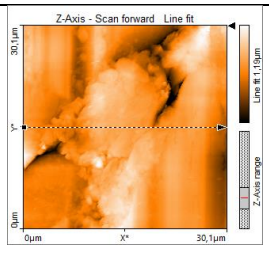
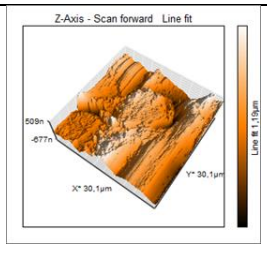
FE-SEM sonuçlar da göz önünde bulundurulduğunda rGO6'nın yüzeyde tribo film oluşturarak sürtünme katsayısını azalttığını göstermektedir.

rGO6 içeren yağ ile yapılan bilya ve silindir testlerinde, optik mikroskop ile silindir yüzeyinde yapılan incelemeler neticesinde yüzeydeki Grafen varlığı tespit edilmiş ve şekil 3.67'de gösterilmiştir. Yapılan testler neticesinde yüzey pürüzlülükleri, Sa ve Ra sırasıyla 4.585 µm 8nm olarak ölçülmüştür.

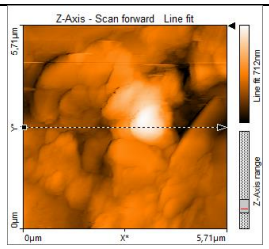
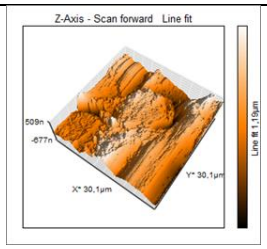


Şekil 3.68 rGO içeren yağ ile yapılan bilye ve silindir testleri neticesinde Diesel motor silindir yüzeyinde oluşan koruyucu rGO tabakasının 2 ve 3 boyutlu yüzey pürüzlülüğü.

Antor silindir ile yapılan tribometre testlerinden sonra silindir yüzeyi AFM vasıtasıyla incelenerek yüzey pürüzlülükleri 90x90 µm, 30x30 µm ve 5x5 µm alanlarında ölçülmüştür. Şekil 3.68'te yer alan grafik Antor silindirin 5W40 referans yağ ve rGO6 yağ ile yapılan test sonrası 2 ve 3 boyutlu AFM görüntülerini göstermektedir. AFM ile ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri, rGO6 ile yapılan testler neticesinde yüzey sürtünmesinin 5W40 ile yapılan teste kıyasla azaldığını göstermektedir.

	2D	Yüzey pürüzlülüğü	3D	Yüzey pürüzlülüğü
5W40 (90x90)		-- Line Roughness -- Ra 207,68nm Rq 256,48nm Ry 1,127µm Rp 468,01nm Rv -658,95nm Rm -18,626fm		-- Area Roughness -- Area 8,163nm^2 Sa 242,88nm Sq 322,72nm Sy 6,6832µm Sp 4,3527µm Sv -2330,4nm Sm -18,604fm
5W40 (30x30)		-- Line Roughness -- Ra 101,79nm Rq 116,2nm Ry 447,23nm Rp 237,28nm Rv -209,95nm Rm -9,3132fm		-- Area Roughness -- Area 915,9pm^2 Sa 150,14nm Sq 191,99nm Sy 2286,1nm Sp 679,25nm Sv -1606,9nm Sm -18,626fm
5W40 (5x5)		-- Line Roughness -- Ra 40,435nm Rq 47,794nm Ry 173,96nm Rp 93,191nm Rv -80,768nm Rm -18,626fm		-- Area Roughness -- Area 32,83pm^2 Sa 69,669nm Sq 99,744nm Sy 969,03nm Sp 446,53nm Sv -522,5nm Sm -18,625fm
rGO6 (90x90)		-- Line Roughness -- Ra 200,39nm Rq 240,33nm Ry 1011,9nm Rp 576,04nm Rv -435,86nm Rm -18,372fm		-- Area Roughness -- Area 8,163nm^2 Sa 199,86nm Sq 241,25nm Sy 1442,4nm Sp 681,72nm Sv -760,68nm Sm -16,875fm
rGO6 (30x30)		-- Line Roughness -- Ra 90,034nm Rq 106,61nm Ry 444,65nm Rp 190,19nm Rv -254,47nm Rm -18,626fm		-- Area Roughness -- Area 915,9pm^2 Sa 101,08nm Sq 115,63nm Sy 615,72nm Sp 361,94nm Sv -253,78nm Sm -9,7417fm

Şekil 3.69 Diesel motor silindirin test sonrası AFM ile ölçülen 2 ve 3 boyutlu yüzey pürüzlülük görüntü ve değerleri.

rGO6 (5x5)		-- Line Roughness - Ra 31,661nm Rq 37,274nm Ry 167,66nm Rp 80,892nm Rv -86,772nm Rm -9,3132fm		-- Area Roughness -- Area 32,83pm^2 Sa 47,999nm Sq 56,869nm Sy 459,16nm Sp 228,36nm Sv -230,8nm Sm -9,3132fm

Şekil 3.70 Diesel motor silindirin test sonrası AFM ile ölçülen 2 ve 3 boyutlu yüzey pürüzlülük görüntü ve değerleri. (devamı)

Tablo 3.26 Diesel motor silindirin test öncesi ve sonrası AFM ile ölçülen 2 ve 3 boyutlu yüzey pürüzlülük değerlerinin karşılaştırılması.

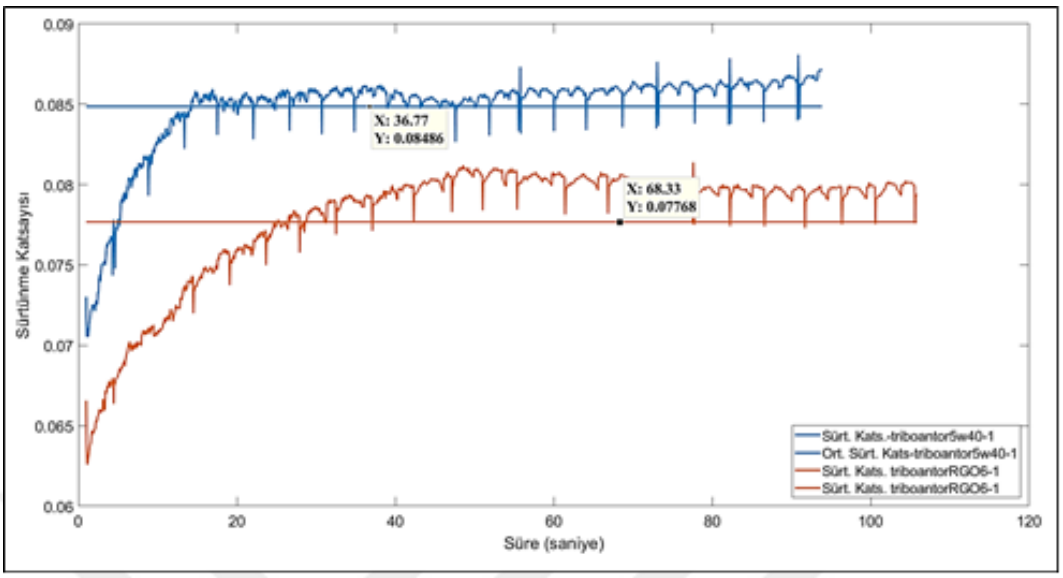
Test no	Ra (nm)	Sa (nm)
90x90 (Test edilmemiş)	12.137	72.249
90x90 (5W40)	207.68	242.88
90x90 (rGO6)	**200.39**	**199.86**
30x30 (Test edilmemiş)	6.5525	8.102
30x30 (5W40)	101.79	150.14
30x30 (rGO6)	**90.034**	**101.08**
5x5 (test edilmemiş)	6.8738	5.7373
5x5 (5W40)	40.435	69.669
5x5 (rGO6)	**31.661**	**47.999**

Tablo 3.26, 5W40 referans yağ ve rGO6 içeren yağ ile yapılan tribometre testleri neticesinde Diesel motor silindirinin AFM altında incelenen yüzey pürüzlülük değerlerini göstermektedir. Yapılan incelemeler neticesinde, rGO6 içeren yağ ile yapılan testlerdeki yüzey pürüzlülüklerinin referans yağa kıyasla daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülüklerindeki bu düşüş, grafenin silindir yüzeyinde etkin koruma sağlayarak tribofilm oluşturduğu ve bu filmin de aşınmayı azaltarak yüzey pürüzlülüğünü düşürdüğünü göstermektedir.

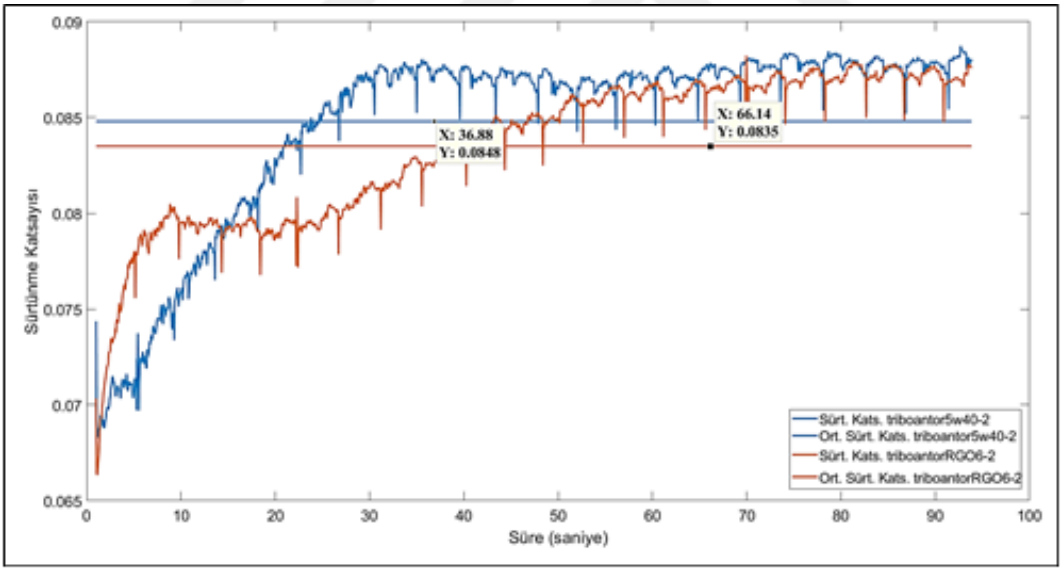
3.3.3 Tribometre Testleri Sürtünme Katsayısı Sonuçları

5W40 referans yağ ve rGO6 nanopartikülü içeren yağ ile yapılan adet tekrarlı tribometre testleri neticesinde elde edilen sonuçlar rGO6'nın sürtünme katsayısını azalttığı şeklindedir. Yapılan 3 adet teste ait Sürtünme Katsayısı grafikleri Şekil 3.69, 3.70 ve 3.71'de verilmiştir. Grafiklerden de görüleceği üzere bütün testlerde rGO6

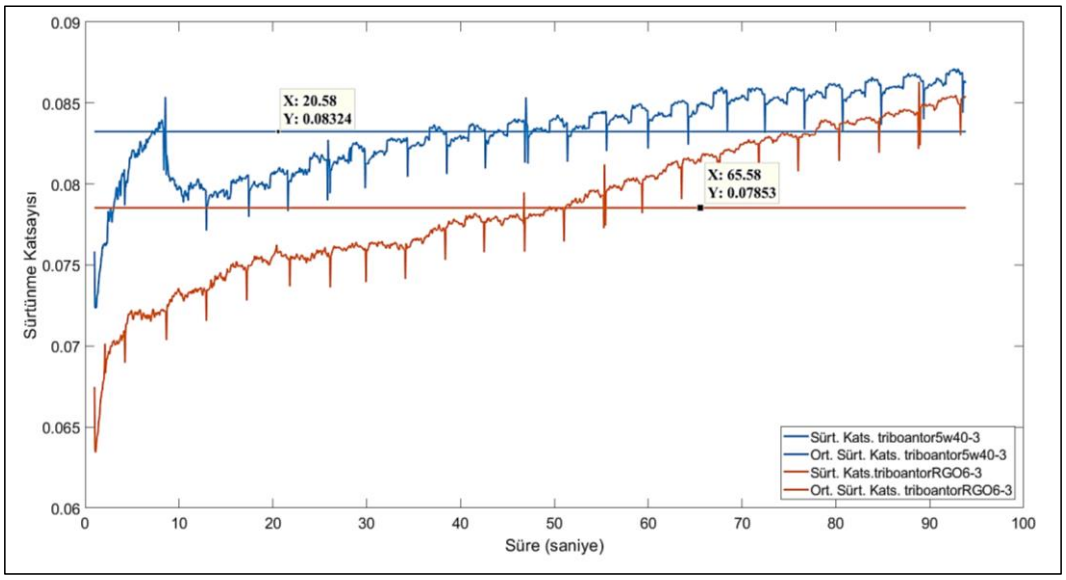
içeren yağın sürtünme katsayısı referans yağa kıyasla daha düşüktür. Elde edilen sürtünme katsayısı değerleri Tablo 3.27'da listelenmiştir.



Şekil 3.71 5W40 referans yağ ve rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan tribometre testleri ortalama sürtünme katsayıları – Test 1.



Şekil 3.72 5W40 referans yağ ve rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan tribometre testleri ortalama sürtünme katsayıları – Test 2.



Şekil 3.73 5W40 referans yağ ve rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan tribometre testleri ortalama sürtünme katsayıları – Test 3.

Tablo 3.27 5W40 ve rGO 6 ile yapılan tribometre testleri neticesinde elde edilen sürtünme katsayısı verileri.

	Test 1	**Test 2**	**Test 3**
5W40	0.08486	0.0848	0.08324
rGO 6	0.07768	0.0835	0.07853

Tablo 3.27'de yer alan sürtünme katsayısı değerleri, rGO6 içeren yağ ile yapılan tribometre testleri neticesinde referans yağa kıyasla sürtünme katsayısının azaldığını, bu azalmanın grafen nanopartiküllerinden tribofilm oluşturarak yüzeyde etkinlik göstermesi ile gerçekleştiğini göstermektedir.

4
MOTOR TEST SONUÇLARI

Tribometre testlerinden sonra motor testleri benzinli Honda GX 270 ve Diesel Antor 6LD 400 olmak üzere 2 farklı motorda aşağıdaki şekilde yapılmıştır:

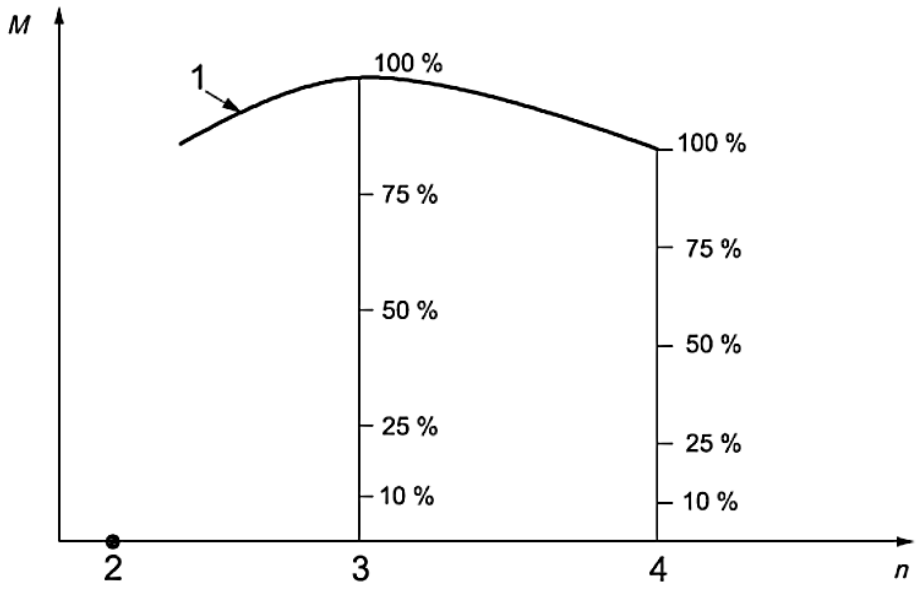
1) Referans motor yağı Shell Helix Ultra 5W-40 tam sentetik ticari motor yağı ile

2) Tribometre testleri neticesinde en düşük sürtünme katsayısını veren 5W40+rGO6 ile testler yapılmış, karşılaştırılmıştır.

Performans testleri 3 kere tekrar edilmiştir.

4.1 Performans Testleri

Yapılacak olan uzun soluklu motor ömür testlerinde hız ve güç parametreleri ISO 8178-4 standartı dikkate alınarak tespit edilmiştir.



1 Tam yük tork eğrisi

2 Rölanti

3 Ara hız

4 Nominal hız

Şekil 4. 1 ISO 8178-4 standartına göre intermediate (ara) hız; maksimum torkun oluştuğu hızdır (3 rakamı ile numaralandırılmıştır).

4.1.1 Diesel Motor Performans Testleri

ISO 8178-4 standardına göre motorun intermediate (ara) hızının 2400 d/d olduğu tespit edilmiş olup (Şekil 4.3), bu devirde elde edilen güç ve moment aşağıdaki formül bağıntılarıyla hesaplanmıştır:

$$G\text{üç}: P = IxV \tag{4.1}$$

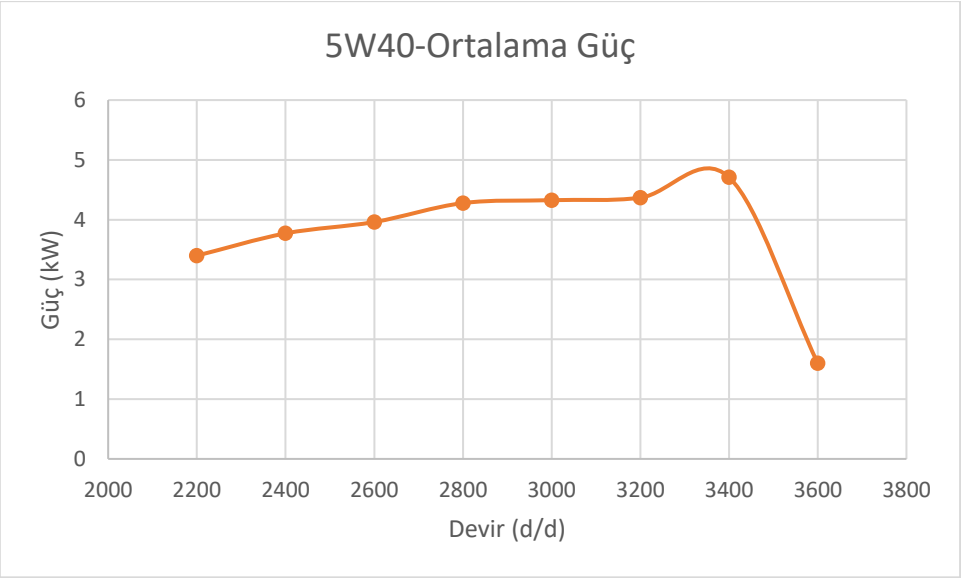
$$Moment: M = \frac{(Px9550)}{n} \tag{4.2}$$

Referans yağ ile yapılan performans testi neticesinde ara hızda elde edilen gücün 3.7 kW (Tablo 4.1); rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan testte ise 4.2 kW olduğu (Tablo 4.2) hesaplanmıştır. Motor ömür testleri ISO 8178-4 standartı gereği 2400 d/d ve %50 yük şartı altında gerçekleştirilmiştir.

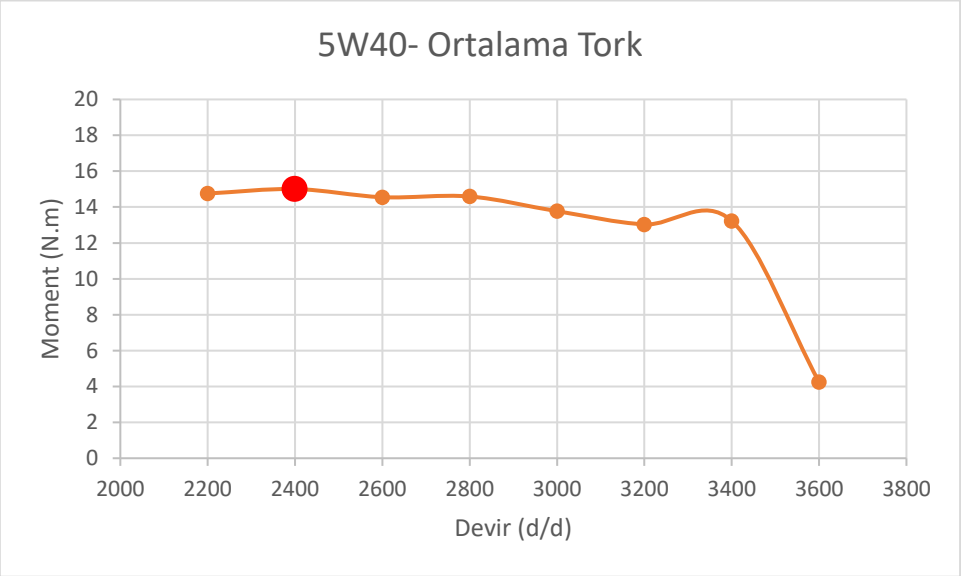
5W40 referans yağ ve rGO6 eklenmiş motor yağı ile Antor motorda yapılan performans testleri neticesinde rGO6 eklenmiş yağın motorun güç ve torkunu arttırdığı tespit edilmiş olup karşılaştırmalı grafik Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de verilmiştir. Tablo 4.3 ise performans testleri neticesinde ölçülen ortalama güç ve torkun devre göre sonuçlarını göstermektedir.

Tablo 4.1 Diesel motorun 5W40 motor yağı ile yapılan performans verileri

	Test 1				**Test 2**				**Test 3**				**Ortalama**	
n	**V**	**I**	**P**	**M**	**V**	**I**	**P**	**M**	**V**	**I**	**P**	**M**	**P**	**M**
3600	129	13.2	1.703	4.517	128	13.4	1.715	4.550	116	11.9	1.380	3.662	1.599	4.243
3400	215	21.9	4.709	13.225	215	22	4.730	13.286	214	21.9	4.687	13.164	4.708	13.225
3200	207	21.1	4.368	13.035	208	21.1	4.389	13.098	207	21	4.347	12.973	4.368	13.035
3000	203	20.9	4.243	13.506	204	21	4.284	13.637	209	21.3	4.452	14.171	4.326	13.772
2800	203	20.8	4.222	14.401	207	21.1	4.368	14.897	205	20.7	4.244	14.473	4.278	14.591
2600	197	20.2	3.979	14.617	201	20.6	4.141	15.209	193	19.5	3.764	13.824	3.961	14.550
2400	189	19.4	3.667	14.590	197	20.2	3.979	15.835	189	19.4	3.667	14.590	3.771	15.005
2200	179	18.4	3.294	14.297	188	19.2	3.610	15.669	179	18.4	3.294	14.297	3.399	14.754



Şekil 4.2 5W40 yağ ile yapılan 3 adet Diesel motorunun performans test sonucu güç ortalamasının devre göre grafiği

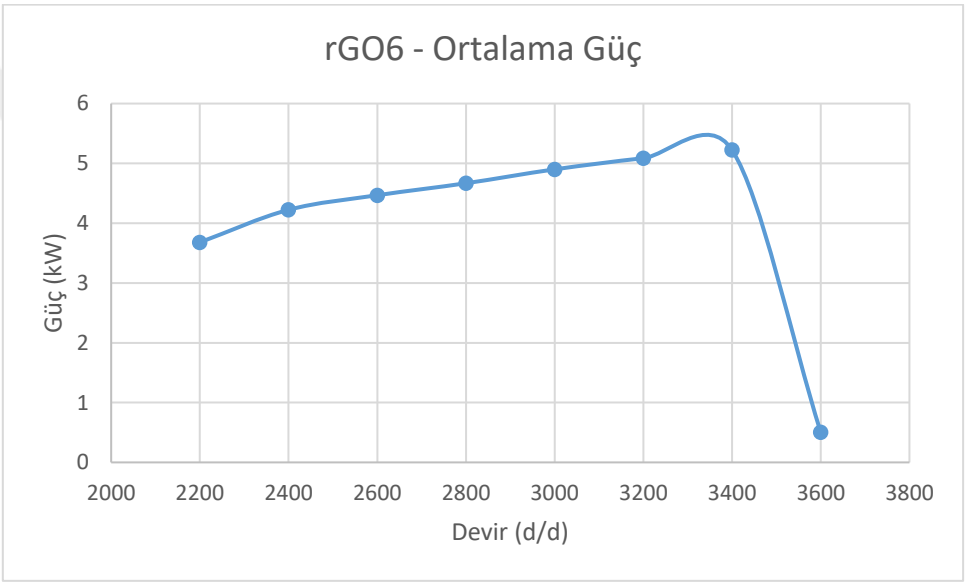


Şekil 4.3 5W40 yağ ile yapılan 3 adet Diesel motorunun performans test sonucu tork (moment) ortalamasının devre göre grafiği

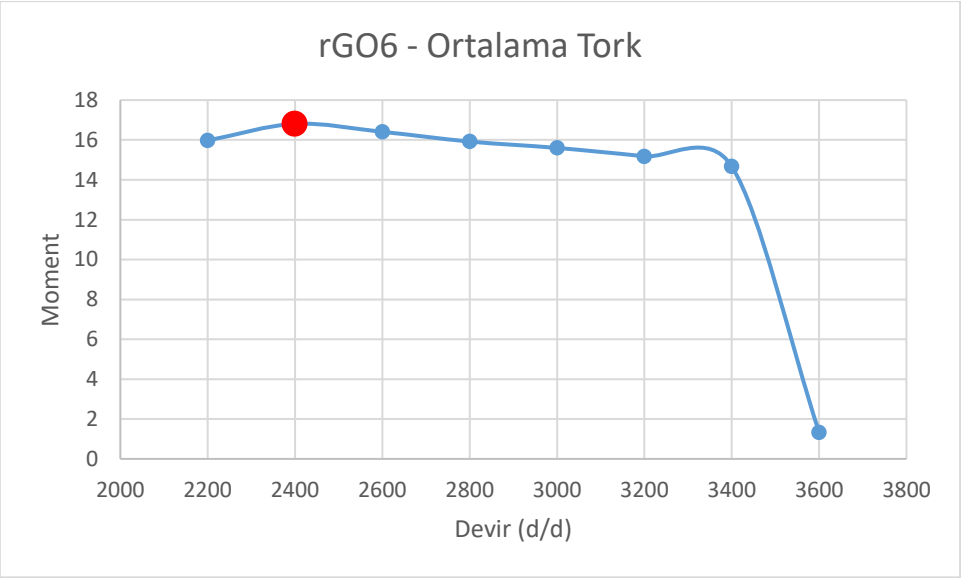
Şekil 4.2 ve Şekil 4.3, 5W40 yağ ile yapılan 3 adet performans test ortalama değerlerini gösterirken Tablo 4.1 devre bağlı güç ve tork değerlerini göstermektedir.

Tablo 4.2 rGO6 eklenmiş motor yağı ile yapılan performans testleri verileri.

	Test 1				Test 2				Test 3				Ortalama	
n	**V**	**I**	**P**	**M**	**V**	**I**	**P**	**M**	**V**	**I**	**P**	**M**	**P**	**M**
3600	86	8.8	0.757	2.008	83	8.4	0.697	1.850	23	2.4	0.055	0.146	0.503	1.335
3400	231	23.7	5.475	15.377	224	22.3	4.995	14.031	228	22.8	5.198	14.601	5.223	14.670
3200	228	23.3	5.312	15.854	221	22	4.862	14.510	226	22.5	5.085	15.176	5.086	15.180
3000	223	22.6	5.040	16.043	216	21.6	4.666	14.852	224	22.3	4.995	15.901	4.900	15.599
2800	219	22.2	4.862	16.582	210	21	4.410	15.041	218	21.7	4.731	16.135	4.667	15.919
2600	213	21.7	4.622	16.977	209	20.8	4.347	15.968	211	21	4.431	16.275	4.467	16.407
2400	207	20.9	4.326	17.215	203	20.5	4.162	16.559	205	20.4	4.182	16.641	4.223	16.805
2200	191	19.3	3.686	16.002	191	19.4	3.705	16.085	191	19.1	3.648	15.836	3.680	15.974

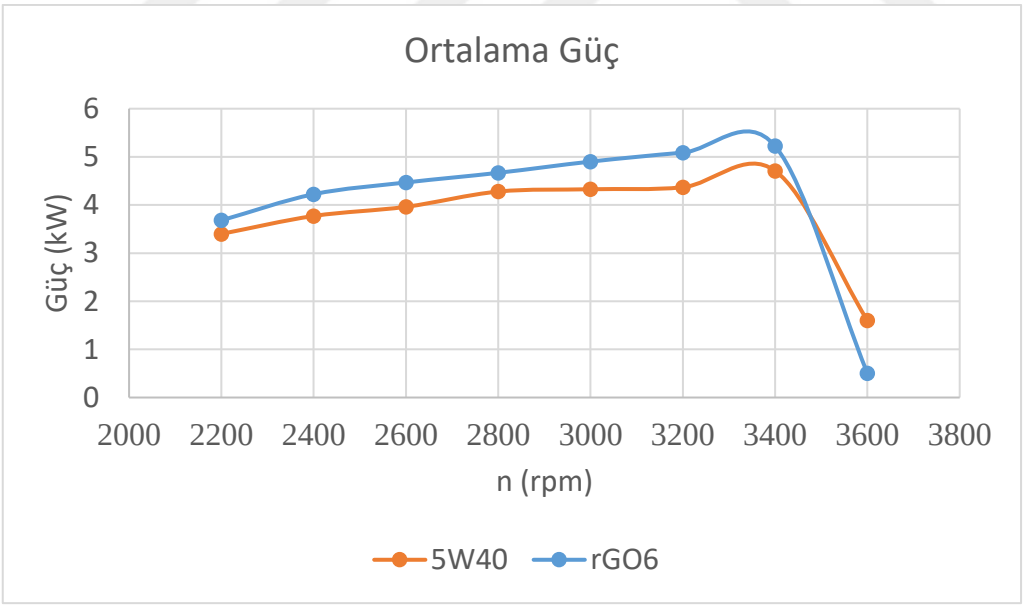


Şekil 4.4 rGO6 eklenmiş motor yağı ile yapılan 3 adet Diesel motorunun performans test sonucu güç ortalamasının devre göre grafiği.

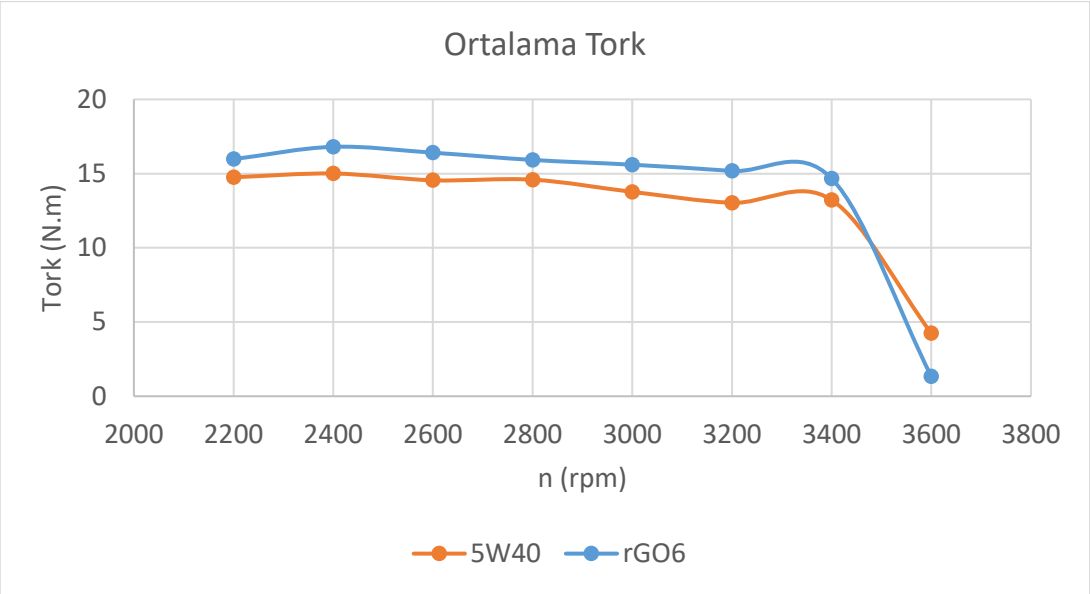


Şekil 4.5 rGO6 eklenmiş motor yağı ile yapılan 3 adet Diesel motoru performans test sonucu tork ortalamasının devre göre grafiği.

Şekil 4.4 ve Şekil 4.5, rGO eklenmiş yağ ile yapılan 3 adet performans test ortalama değerlerini gösterirken Tablo 4.2 devre bağlı güç ve moment değerlerini göstermektedir.



Şekil 4.6 5W40 ve rGO6 ile yapılan Diesel motor performans testlerinin güç yönünden karşılaştırması



Şekil 4.7 5W40 ve rGO6 ile yapılan Diesel motor performans testlerinin tork yönünden karşılaştırması.

Tablo 4.3 5W40 ve rGO6 eklenmiş yağın Diesel motor performans testleri ortalama güç ve tork verileri.

	P		Artış	M		Artış
n	**5W40**	**rGO6**		**5W40**	**rGO6**	
3600	1.599	0.503		4.243	1.335	
3400	4.708	5.223		13.225	14.670	
3200	4.368	5.086		13.035	15.180	
3000	4.326	4.900		13.772	15.599	
2800	4.278	4.667		14.591	15.919	
2600	3.961	4.467		14.550	16.407	
2400	3.771	4.223	↑ %12	15.005	16.805	↑ %12
2200	3.399	3.680		14.754	15.974	

Tablo 4.3'ten de görüleceği üzere, rGO6 içeren yağ ile yapılan testlerde 5W40 yağa kıyasla tüm devirlerde (başlangıç devri olan 3600 hariç) güç ve momentte artış olmuştur. Diesel motorda gerçekleştirilen 3 adet performans testi neticesinde performans testinin gerçekleştirildiği hız olan 2400 d/d'da rGO içerikli yağın, referans yağa kıyasla motor gücünü ve motor torkunu %12 oranında arttırdığı tespit edilmiştir.

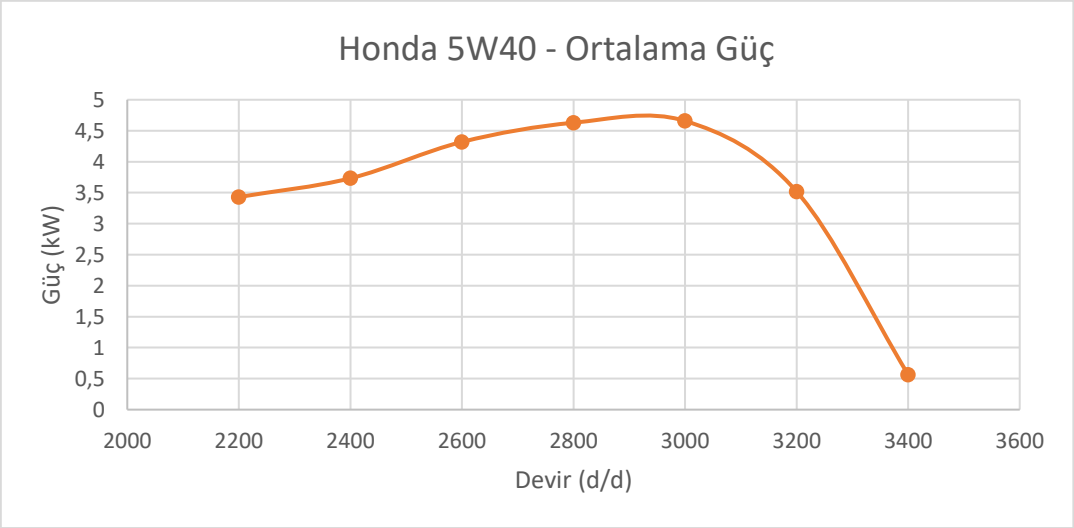
4.1.2 Benzinli Motor Performans Testleri

ISO 8178-4 standardına göre motorun intermediate (ara) hızının 2600 d/d olduğu tespit edilmiş olup (Şekil 4.9), bu devirde elde edilen gücün referans 5W40 yağ ile; 4.31 kW (Tablo 4.4); rGO6 eklenmiş yağ ile 4.33 kW olduğu hesaplanmıştır (Tablo 4.5). Yapılan bu ölçümler sonucunda motor ömür testleri standart gereğince %50 yük ve 2600 d/d şartlarında gerçekleştirilmiştir.

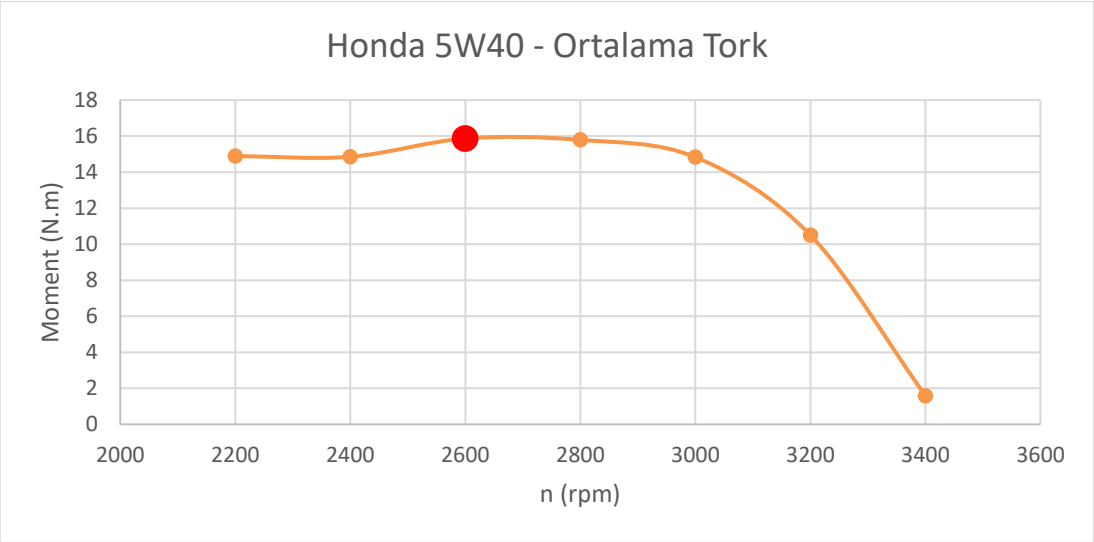
5W40 referans yağ ve rGO6 eklenmiş motor yağı ile benzinli motorda yapılan performans testleri neticesinde rGO6 eklenmiş yağın motorun güç ve torkunu arttırdığı tespit edilmiş olup karşılaştırmalı grafik Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te verilmiştir. Tablo 4.6 ise performans testleri neticesinde ölçülen ortalama güç ve torkun devre göre sonuçlarını göstermektedir.

Tablo 4.4 5W40 motor yağı ile yapılan benzinli motor performans testleri verileri

	Test 1				Test 2				Test 3				Ortalama	
n	**V**	**I**	**P**	**M**	**V**	**I**	**P**	**M**	**V**	**I**	**P**	**M**	**P**	**M**
3400	75	7.6	0.570	1.601	74	7.6	0.562	1.580	74	7.6	0.562	1.580	0.565	1.587
3200	186	19	3.534	10.547	177	18.2	3.221	9.614	192	19.8	3.802	11.345	3.519	10.502
3000	215	22	4.730	15.057	212	21.7	4.600	14.645	213	21.8	4.643	14.781	4.658	14.828
2800	215	21.9	4.709	16.059	214	21.6	4.622	15.766	211	21.6	4.558	15.545	4.630	15.790
2600	208	21.7	4.514	16.579	203	20.8	4.222	15.509	203	20.8	4.222	15.509	4.319	15.866
2400	197	20.2	3.979	15.835	188	19.2	3.610	14.363	188	19.2	3.610	14.363	3.733	14.854
2200	190	19.4	3.686	16.001	180	18.4	3.312	14.377	180	18.3	3.294	14.299	3.431	14.892



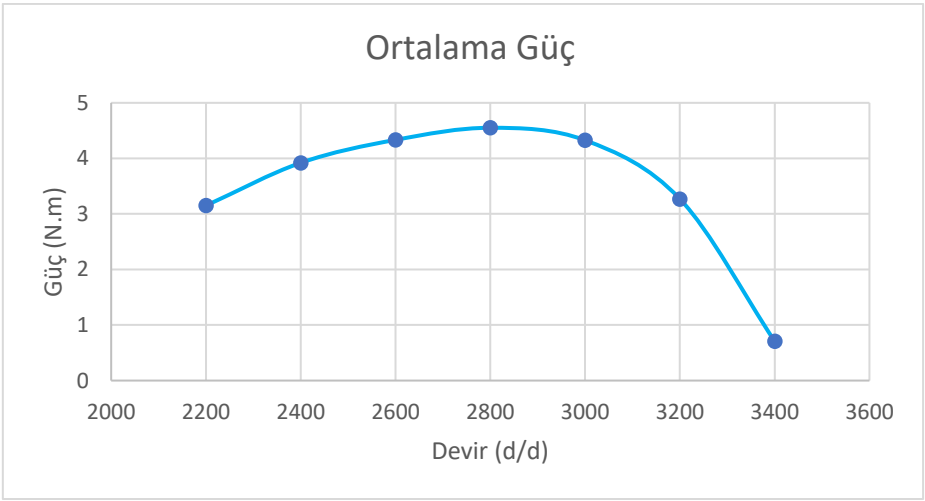
Şekil 4.8 5W40 referans motor yağı ile yapılan 3 adet benzinli motor performans test sonucu güç ortalamasının devre göre grafiği.



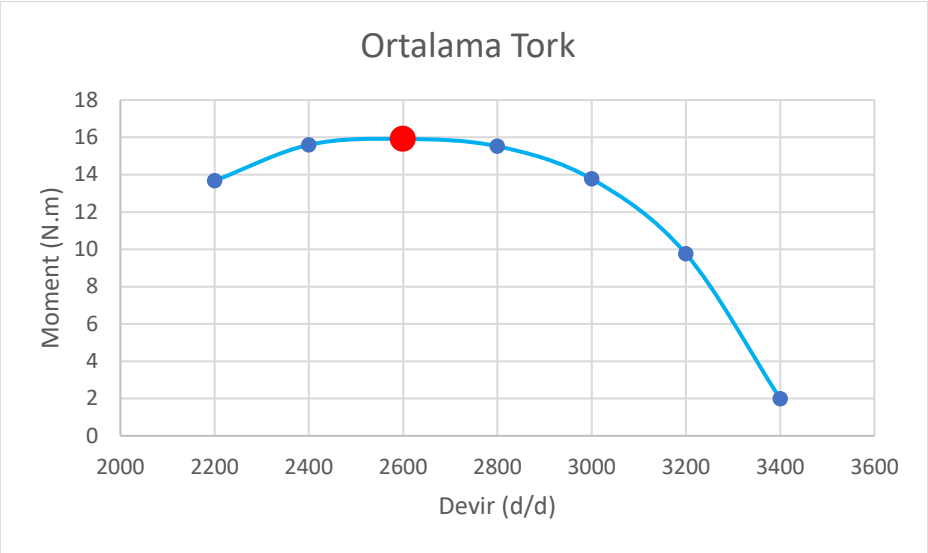
Şekil 4.9 5W40 referans motor yağı ile yapılan 3 adet benzinli motor performans test sonucu tork ortalamasının devre göre grafiği.

Tablo 4.5 rGO6 motor yağı ile yapılan benzinli motor performans testleri verileri

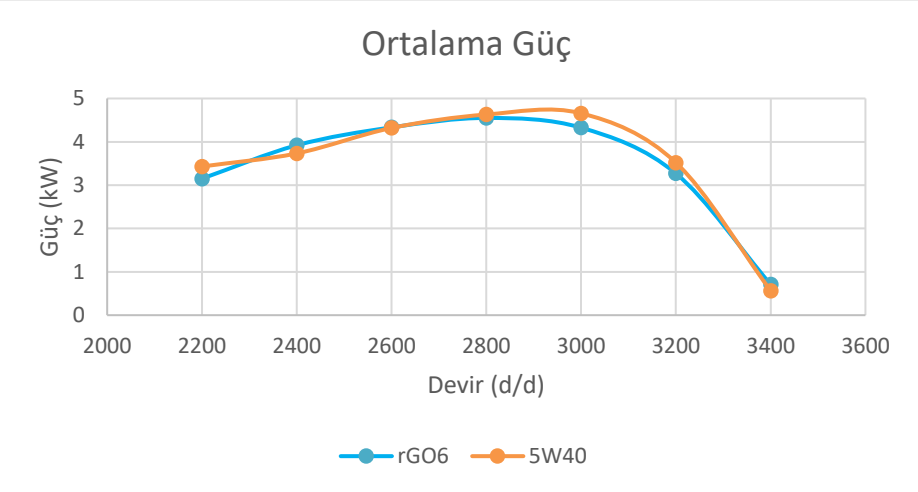
	Test 1				Test 2				Test 3				Ortalama	
n	**V**	**I**	**P**	**M**	**V**	**I**	**P**	**M**	**V**	**I**	**P**	**M**	**P**	**M**
3400	88	8.1	0.713	2.002	84	8.4	0.706	1.982	84	8.4	0.706	1.982	0.708	1.989
3200	177	18.1	3.204	9.561	180	18.3	3.294	9.831	181	18.3	3.312	9.885	3.270	9.759
3000	206	20.8	4.285	13.640	206	21	4.326	13.771	208	21	4.368	13.905	4.326	13.772
2800	211	21.3	4.494	15.329	213	21.6	4.601	15.692	212	21.5	4.558	15.546	4.551	15.522
2600	206	20.9	4.305	15.814	208	20.9	4.347	15.968	207	21	4.347	15.967	4.333	15.916
2400	199	19.9	3.960	15.758	197	19.9	3.920	15.600	195	19.9	3.881	15.441	3.920	15.600
2200	176	17.7	3.115	13.523	176	18	3.168	13.752	177	17.9	3.168	13.753	3.151	13.676



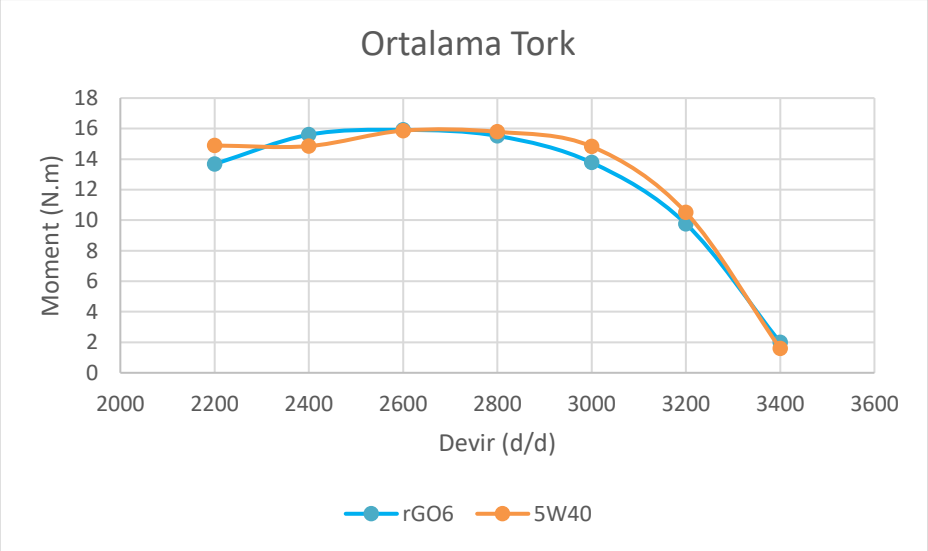
Şekil 4.10 rGO6 eklenmiş motor yağı ile yapılan 3 adet benzinli motor performans test sonucu güç ortalamasının devre göre grafiği.



Şekil 4.11 rGO6 eklenmiş motor yağı ile yapılan 3 adet benzinli motor performans test sonucu tork ortalamasının devre göre grafiği.



Şekil 4.12 5W40 referans yağ ve rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan 3 adet benzinli motor performans test sonucu güç ortalamasının devre göre grafiği.



Şekil 4.13 5W40 referans yağ ve rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan 3 adet benzinli motor performans test sonucu tork ortalamasının devre göre grafiği.

Tablo 4.6 5W40 ve rGO6 eklenmiş yağın benzinli motor performans testleri ortalama güç ve tork değerleri.

	P		**Artış**	**M**		**Artış**
n	**5W40**	**rGO6**		**5W40**	**rGO6**	
3400	0.565	0.708		1.587	1.989	
3200	3.519	3.270		10.502	9.759	
3000	4.658	4.326		14.828	13.772	
2800	4.630	4.551		15.790	15.522	
2600	4.319	4.333	↑ % 0.32	15.866	15.916	↑ % 0.32
2400	3.733	3.920		14.854	15.600	
2200	3.431	3.151		14.892	13.676	

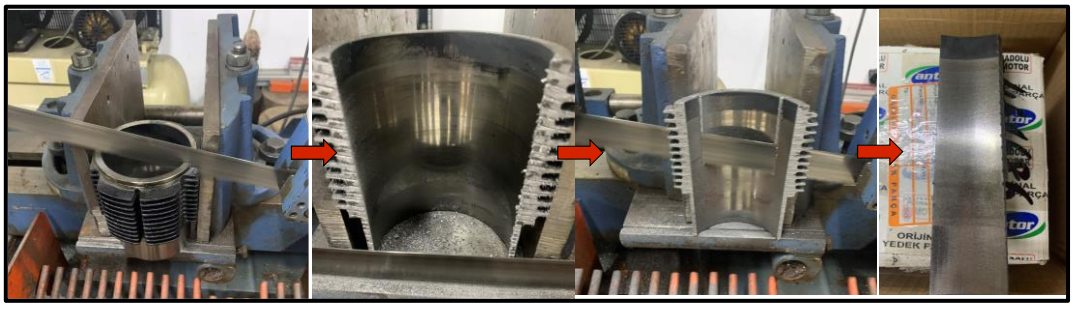
Benzinli motorda yapılan testler neticesinde rGO6 içeren yağın referans 5W40 yağa kıyasla motorun güç ve torkunu arttırdığı tespit edilmiştir. Benzinli motorda gerçekleştirilen 3 adet performans testi neticesinde, performans testinin gerçekleştirildiği hız olan 2600 d/d'da rGO6 içerikli motor yağının, referans yağa kıyasla motor gücünü ve motor torkunu %0.32 oranında arttırdığı görülmüştür.

4.2 Silindirlerin Kesilmesi ve Yüzey Analizleri

50 saatlik motor ömür testleri gerçekleştirildikten sonra silindir kovanları metal kesme cihazında yüzeye zarar vermeden kesilmiştir. Motorun çalışma yapısı gereği aşınmaların en fazla olduğu Üst Ölü Nokta, Otomotiv A.B.D. bünyesinde yer alan 1.5 kW 1500 d/d motor gücü ve 20-100 m/dk kesme hızına sahip Uzay 280 marka yarı otomatik şerit testere ile iniş hızı hidrolik motor ile kontrol edilerek hassas ve kontrollü bir şekilde kesilmiş ve mikroskobik inceleme yoğun olarak bu bölgede gerçekleştirilmiştir.

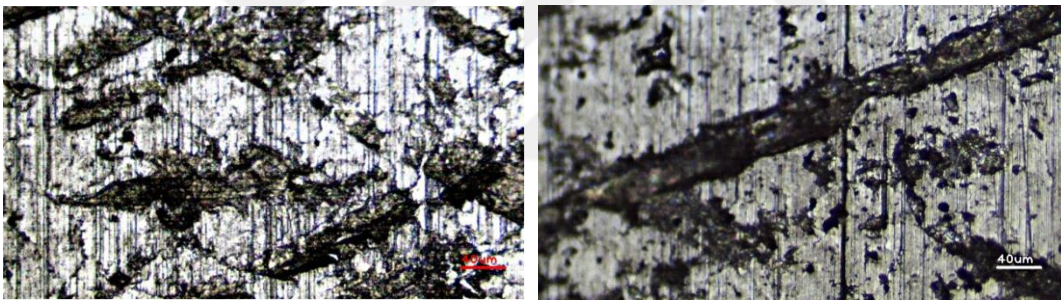
4.2.1 Antor Diesel Motor Silindirin Kesilmesi ve Yüzey Analizleri

Referans yağ ve rGO6 içeren yağ ile yapılan ömür testleri sonucunda motor silindirinde meydana gelen aşınma ve yüzey pürüzlülüklerinin tespiti için motor silindirleri Yıldız Teknik Üniversitesi, Otomotiv A.B.D'de bulunan şerit testere ile hassas şekilde kesilmiştir (Şekil 4.14). Motor silindirinden kesilen numune, optik mikroskop, FE-SEM ve AFM analizleri için, aşınmanın en yoğun olduğu nokta olan Üst Ölü Nokta kısmından incelenmiştir (Şekil 4.15-4.16).



Şekil 4.14 Motor testleri sonunda silindir kovanlarının Anabilim dalımızda bulunan şerit testere ile yüzey zarar vermeden kesilmesi.

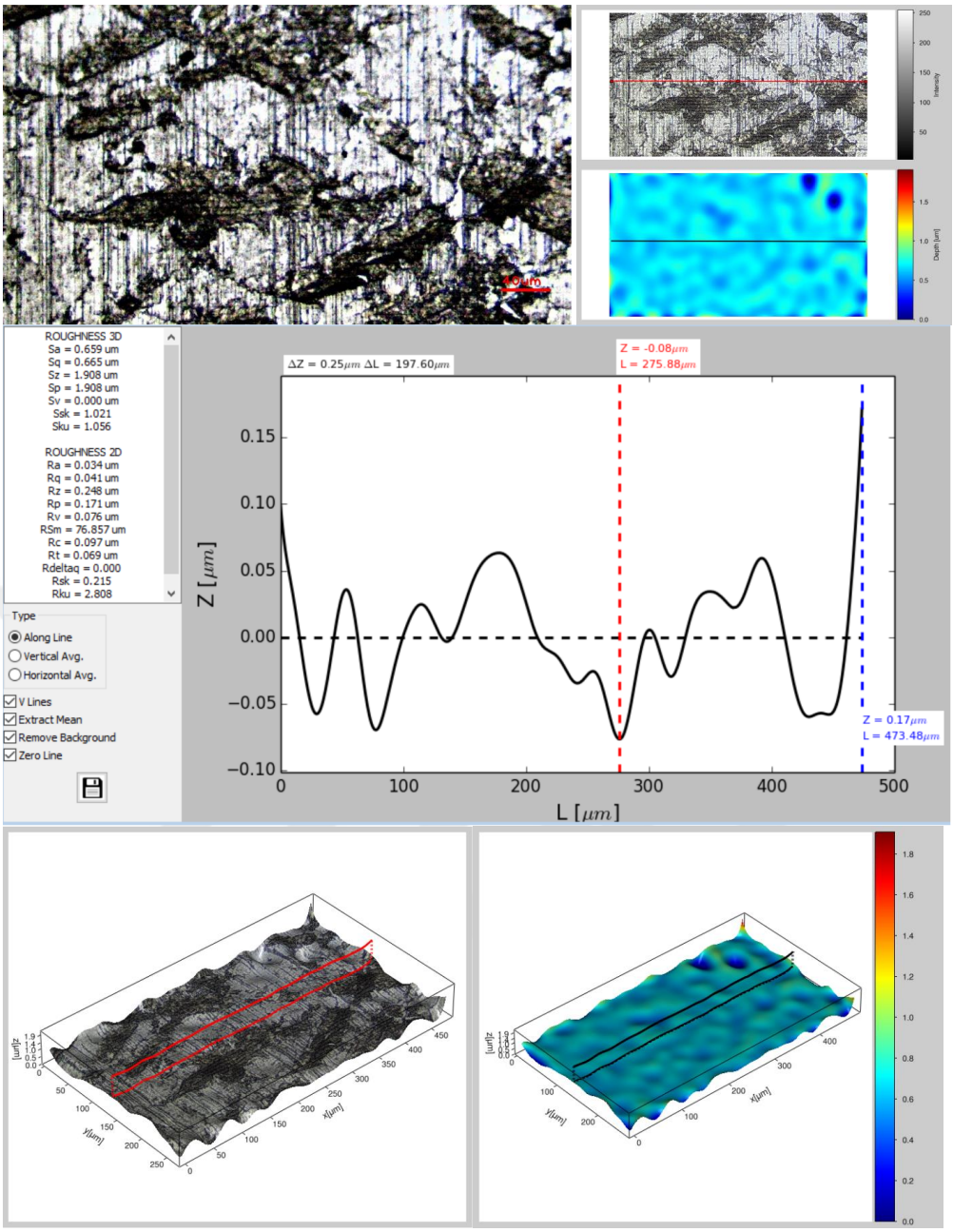
Şekil 4.15 Silindir kovanları bilhassa aşınmaların en fazla meydana geldiği Üst Ölü Nokta bölgelerinden mikroskobik olarak incelenmiştir.



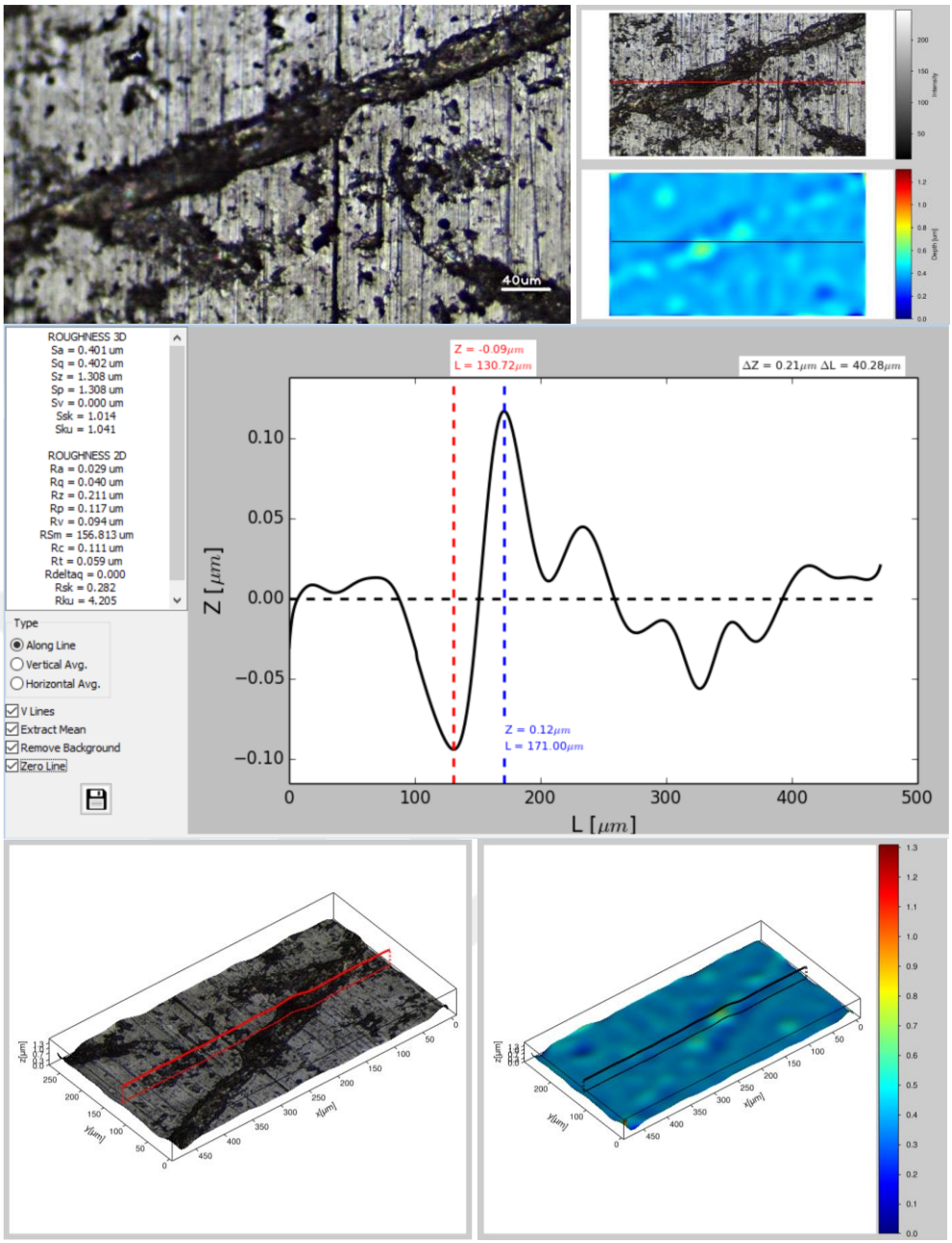
a) 5W40 **b)rGO6**

Şekil 4.16 Kesilen Antor silindir kovanının Üst Ölü Nokta bölgelerinin optik mikroskop görüntüleri.

Dijital mikroskop altında incelenen silindir yüzeyi, yüzey pürüzlülüğü yönünden incelenmiş ve referans değer olarak Ra ve Sa değerleri alınmıştır. Referans yağ ve rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan 50 saatlik ömür testleri sonunda kesilerek incelenen Diesel motor silindirine ait yüzey pürüzlülük değerleri Tablo 4.7'de gösterilmiş olup yüzey pürüzlülük analiz sonuçları Şekil 4.17 ve 4.18'de gösterilmiştir.



Şekil 4.17 Motor dinamometresinde 5W40 yağ ile test edilmiş Diesel motor silindirinin dijital optik mikroskop ile görüntülenen 2D-3D yüzey pürüzlülüğü.



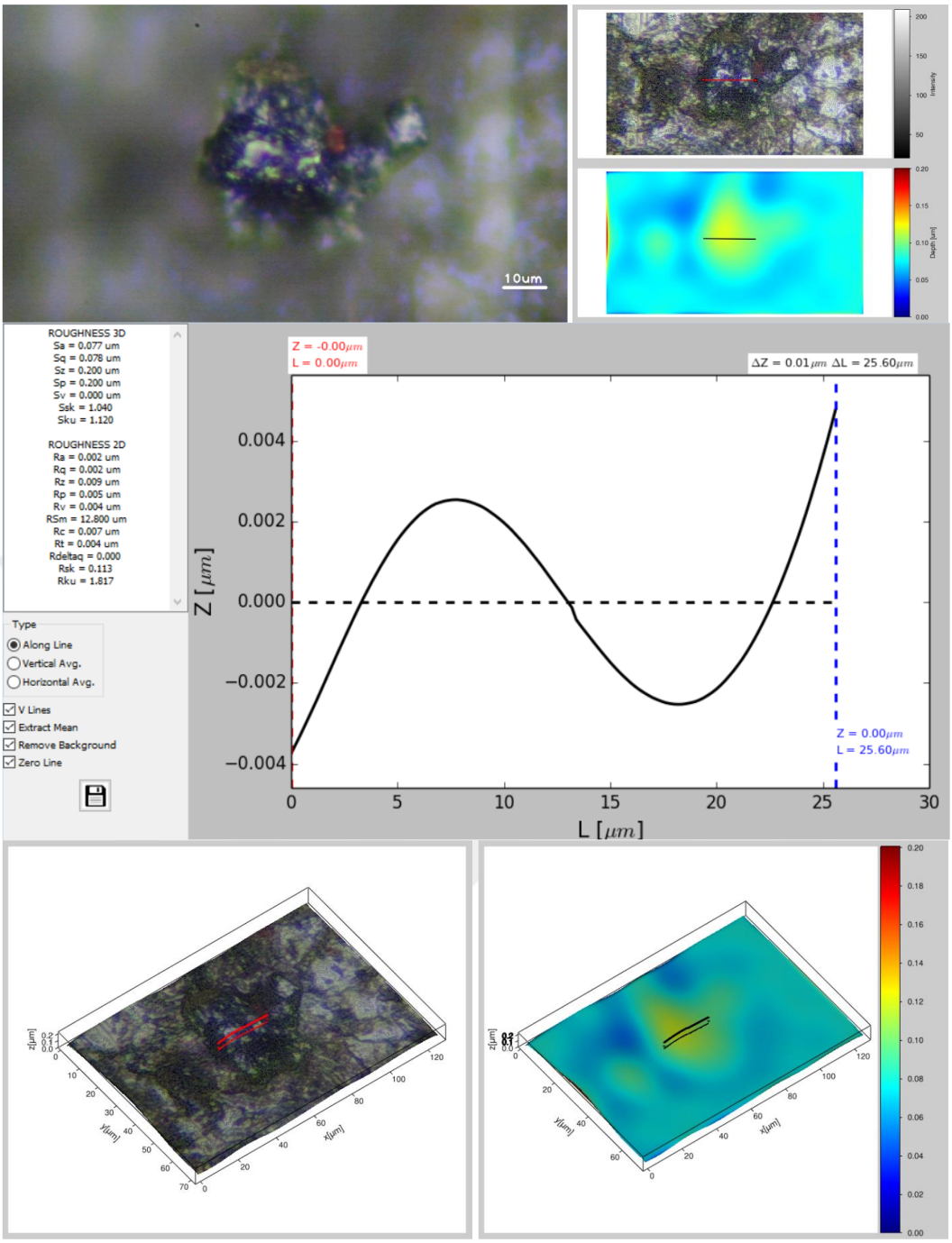
Şekil 4.18 Motor dinamometresinde rGO6 yağ ile test edilmiş Diesel motor silindirinin dijital optik mikroskop ile görüntülenen 2D-3D yüzey pürüzlülüğü.

Tablo 4.7 Ömür testleri sonunda kesilerek yüzeyi optik mikroskop altında incelenen Antor Diesel Motor'a ait yüzey pürüzlülük değerleri.

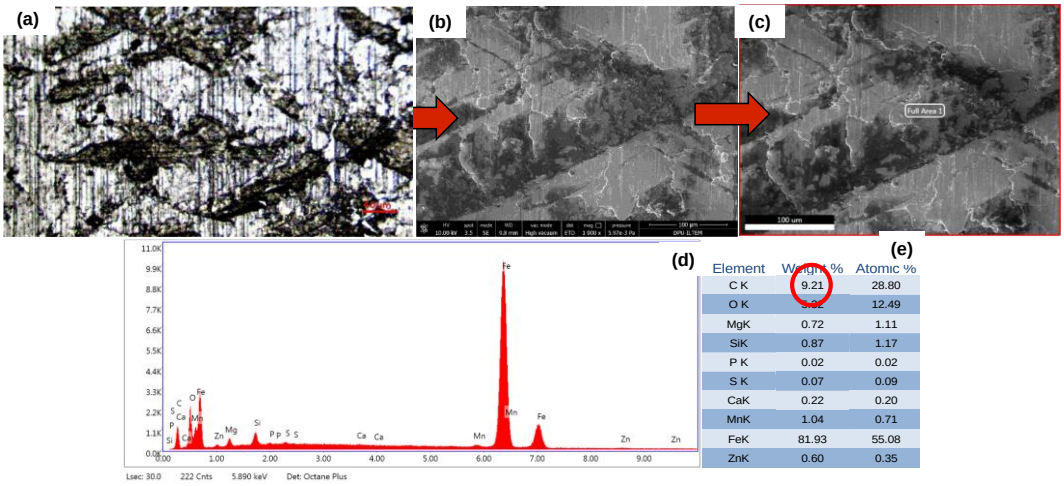
(µm)	Ra	Rq	Rz	Rp	Rv	RSm	Rc	Rt	Sa	Sq	Sz
5W40	0.034	0.041	0.248	0.171	0.076	76.857	0.097	0.069	0.659	0.665	1.908
rGO6	0.029	0.040	0.211	0.117	0.094	156.813	0.111	0.059	0.401	0.402	1.308

Tablo 4.7, referans yağ ve rGO içeren referans yağ ile yapılan ömür testi sonunda kesilerek, optik mikroskop ile incelenen silindir yüzeyi pürüzlülük değerlerini içermektedir. Optik mikroskop vasıtasıyla ölçülen silindir yüzey pürüzlülük değerleri, Ra ve Sa'nın yanı sıra Rq, Rz, Rp, Rt, Sq ve Sz değerlerinde de rGO eklenmiş yağda pürüzlülük değerlerinde azalma olduğubu göstermektedir. 50 saatlik ömür testleri sonunda silindir yüzeyinde tespit edilen bu düşüş, indirgenmiş grafenin yüzeyde etkin bir şekilde koruma sağlayarak aşınmayı azaltmasından kaynaklanmaktadır.

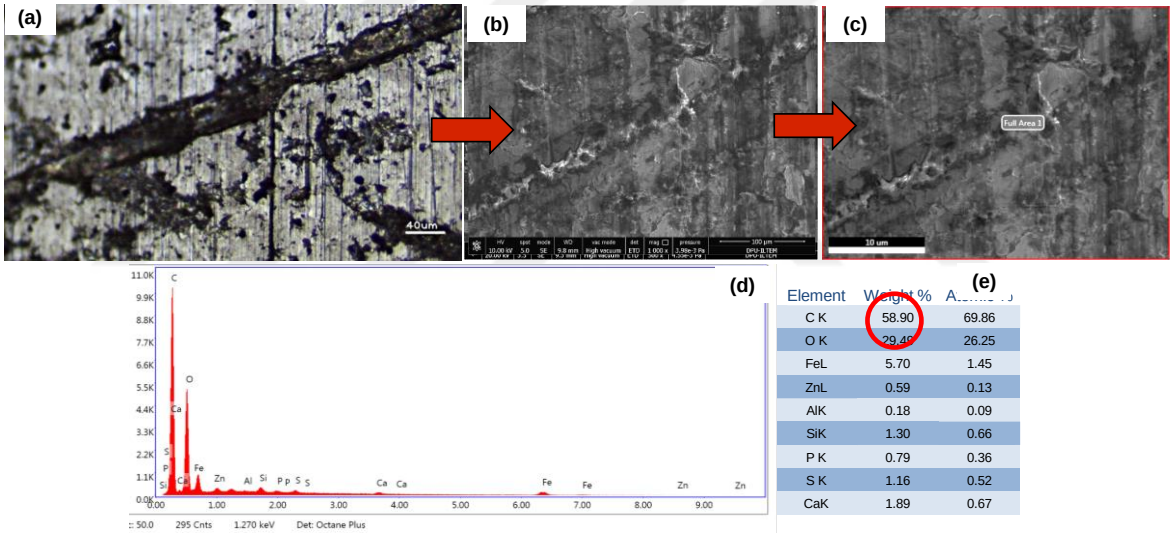
rGO6 içeren yağ ile yapılan ömür testi sonrası optik mikroskop ile silindir yüzeyinde yapılan incelemeler neticesinde yüzeydeki Grafen varlığı tespit edilmiş ve Şekil 4.19'da gösterilmiştir. Yapılan testler neticesinde yüzey pürüzlülükleri, Sa ve Ra sırasıyla 0.077 µm 0.002 µm olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.19 Kesilen Diesel motor silindiri Üst Ölü Noktası'nda optik mikroskop ile tespit edilen grafen nanopartikülü ve yüzey değerleri.



Şekil 4.20 5W40 yağ ile test edilen Diesel motor silindir kovanının Ü.Ö.N (Üst Ölü Nokta'sındaki yüzey analizi) a) Optik Mikroskop, b) ve c) Elektron mikroskobu d) X-Ray e) Elementel analiz.



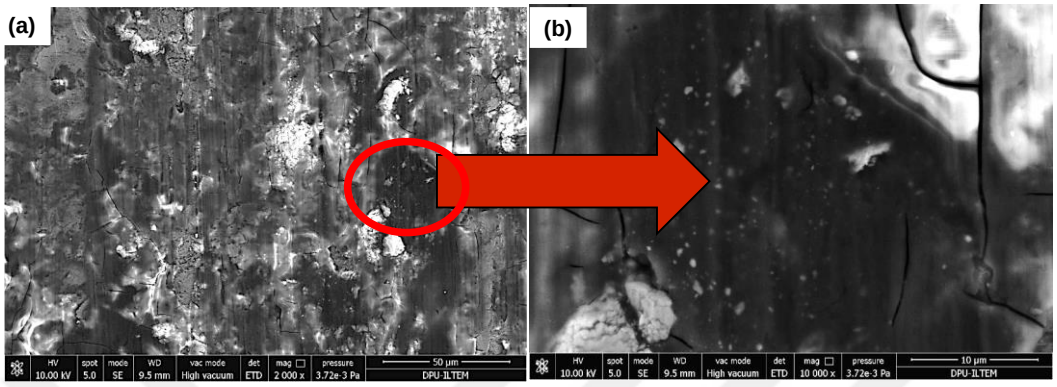
Şekil 4.21 rGO6 yağ ile test edilen Diesel motor silindir kovanının Ü.Ö.N (Üst Ölü Nokta'sındaki yüzey analizi) a) Optik Mikroskop, b) ve c) Elektron mikroskobu d) X-Ray e) Elementel analiz

Tablo 4.8 FE-SEM analizleri neticesinde Diesel motor silindir yüzeyi üzerinde ölçülen elemental analiz değerleri.

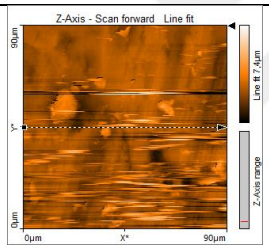
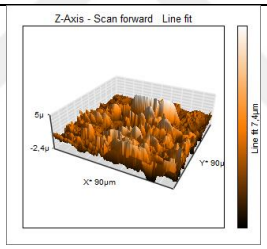
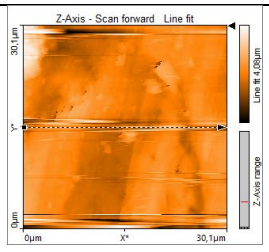
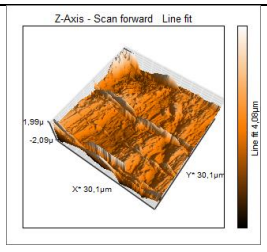
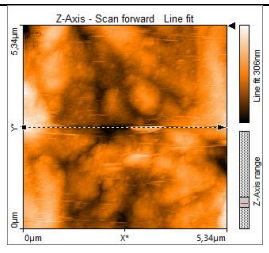
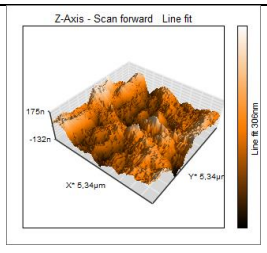
	Element	C K	O K	MgK	Si K	P K	S K	CaK	Mn K	Fe K	ZnK
5W40		9.21	5.32	0.72	0.87	0.02	0.07	0.22	1.04	81.93	0.60
rGO 6		58.9	29.4	-	1.3	0.79	1.16	1.89	-	5.7	0.59

Tablo 4.8, yapılan FE-SEM analizi neticesinde silindir yüzeyinden elde edilen elementel değerleri göstermektedir. Tabloda yer alan elementel analiz değerleri,

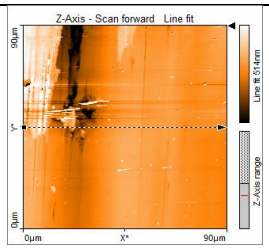
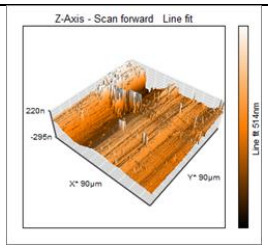
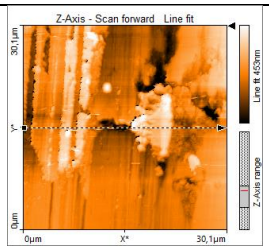
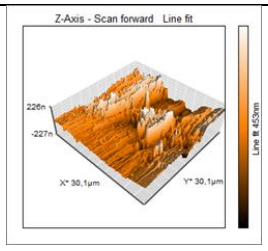
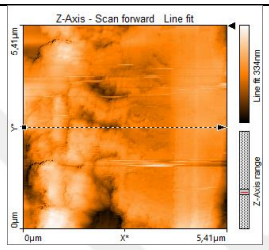
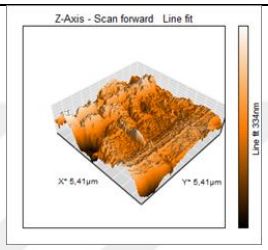
özellikle C miktarı yönünden önem taşımaktadır. rGO6 içeren yağ ile yapılan test sonucunda yüzeyde ölçülen C miktarının, referans 54W0 yağ ile yapılan teste kıyasla daha yüksek olması, sürtünme katsayısındaki azalmanın yüzeydeki rGO vasıtasıyla oluşan tribofilmin etkin korumasından kaynaklandığını göstermektedir.



Şekil 4.22 FE-SEM analizi neticesinde Antor silindir yüzeyinde tespit edilen nano boyuttaki rGO nanopartikülü a) 50 µm ölçek b) 10 µm ölçek

	2D	Yüzey pürüzlülüğü	3D	Yüzey pürüzlülüğü
5W40 (90x90)		-- Line Roughness -- Ra 334.96nm Rq 426.98nm Ry 2612.2nm Rp 1289.5nm Rv -1322.7nm Rm -18.626fm		-- Area Roughness -- Area 8.163nm^2 Sa 528.35nm Sq 785.68nm Sy 9.4108µm Sp 5µm Sv -4.4108µm Sm -262.85pm
5W40 (30x30)		-- Line Roughness -- Ra 588.43nm Rq 706.98nm Ry 2.451µm Rp 1.315µm Rv -1136.1nm Rm -17.826fm		-- Area Roughness -- Area 915.9pm^2 Sa 353.77nm Sq 495.62nm Sy 7.1832µm Sp 3038.4nm Sv -4.1448µm Sm -18.201fm
5W40 (5x5)		-- Line Roughness -- Ra 76.446nm Rq 90.122nm Ry 326.5nm Rp 171.4nm Rv -155.1nm Rm -18.626fm		-- Area Roughness -- Area 28.79pm^2 Sa 41.076nm Sq 51.081nm Sy 425.29nm Sp 179.51nm Sv -245.78nm Sm -18.626fm

Şekil 4.23 Ömür testi sonrası kesilen Antor motor silindirinin AFM altında incelenen yüzey pürüzlülük değerleri.

rGO6 (90x90)		-- Line Roughness -- Ra 49.692nm Rq 71.003nm Ry 435.94nm Rp 229.72nm Rv -206.22nm Rm -18.626fm		-- Area Roughness -- Area 8.163nm^2 Sa 54.619nm Sq 88.069nm Sy 4.2635µm Sp 1073.9nm Sv -3.1896µm Sm -18.626fm
rGO6 (30x30)		-- Line Roughness -- Ra 80.604nm Rq 106.01nm Ry 582.9nm Rp 232.01nm Rv -350.89nm Rm -18.626fm		-- Area Roughness -- Area 915.9pm^2 Sa 60.303nm Sq 84.509nm Sy 2312.9nm Sp 398.82nm Sv -1914.1nm Sm -18.626fm
rGO6 (5x5)		-- Line Roughness -- Ra 33.99nm Rq 40.89nm Ry 183.08nm Rp 56.171nm Rv -126.91nm Rm -18.626fm		-- Area Roughness -- Area 29.55pm^2 Sa 34.588nm Sq 45.894nm Sy 509.08nm Sp 159.91nm Sv -349.16nm Sm -18.626fm

Şekil 4.24 Ömür testi sonrası kesilen Antor motor silindirinin AFM altında incelenen yüzey pürüzlülük değerleri. (devamı)

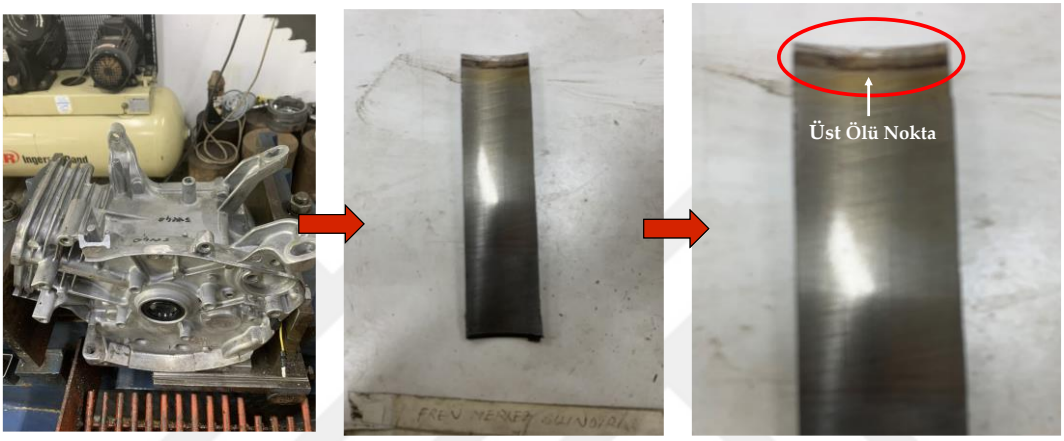
Tablo 4.9 Antor motor silindirinin 5W40 ve rGO6 testleri sonrası ölçülen AFM yüzey pürüzlülük değerlerinin karşılaştırılması.

Test no	Ra (nm)		Sa (nm)	
90x90 (5W40)	334.96	↓	528.35	↓
90x90 (rGO6)	49.692		54.619	
30x30 (5W40)	588.43	↓	353.77	↓
30x30 (rGO6)	80.604		60.303	
5x5 (5W40)	76.446	↓	41.076	↓
5x5 (rGO6)	33.99		34.588	

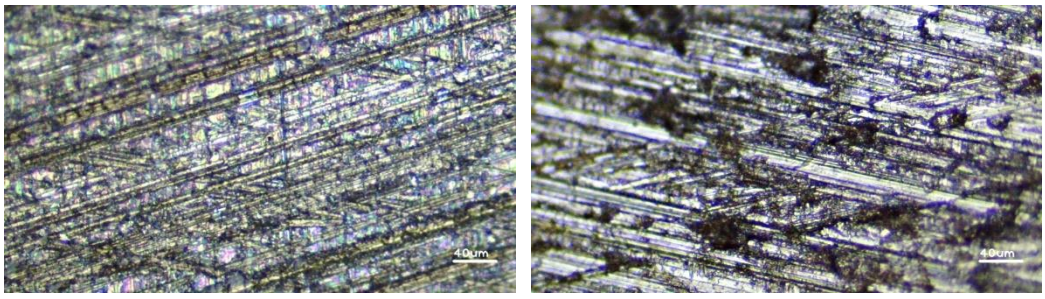
Tablo 4.9'da yer alan değerler, referans yağ ve rGO6 içeren yağ ile yapılan testler sonucunda elde edilen ve Şekil 4.23'te 2 ve 3 boyutlu olarak gösterilen AFM yüzey pürüzlülüklerini içermektedir. Ölçülen bu değerler, rGO6 ile yapılan testte meydana gelen yüzey pürüzlülüklerinin, referans yağa kıyasla daha düşük olduğunu göstermektedir. Yüzey pürüzlülüklerindeki bu düşüş, rGO içeren yağın silindir yüzeyinde tribofilm oluşturarak etkin bir koruma oluşturması, boşlukları doldurarak aşınmayı azaltması ile meydana gelmiştir.

4.2.2 Honda Benzinli Motor Silindirin Kesilmesi ve Yüzey Analizleri

Referans yağ ve rGO6 içeren yağ ile yapılan ömür testleri sonucunda motor silindirinde meydana gelen aşınma ve yüzey pürüzlülüklerinin tespiti için motor silindirleri, Yıldız Teknik Üniversitesi, Otomotiv A.B.D'de bulunan yarı otomatik şerit testere ile hidrolik motor vasıtasıyla yüzeye zarar vermeden kontrollü şekilde kesilmiştir (Şekil 4.24). Motor silindirinden kesilen numune; optik mikroskop, FE-SEM ve AFM analizleri için, aşınmanın en yoğun olduğu nokta olan Üst Ölü Nokta kısmından incelenmiştir (Şekil 4.25).



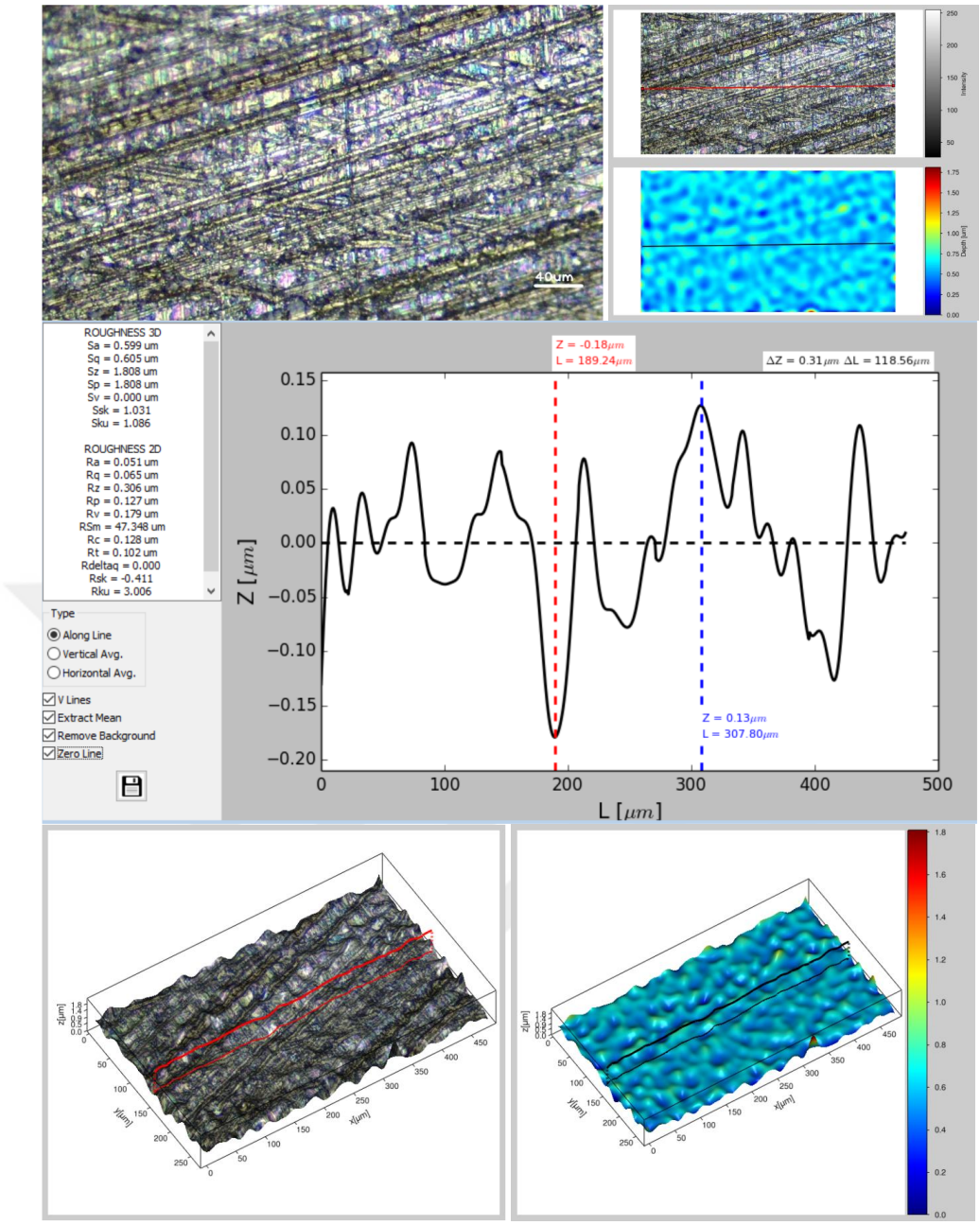
Şekil 4.25 Motor testleri sonunda silindir kovanlarının Anabilim dalımızda bulunan şerit metal testere ile yüzeye zarar vermeden kesilmesi.



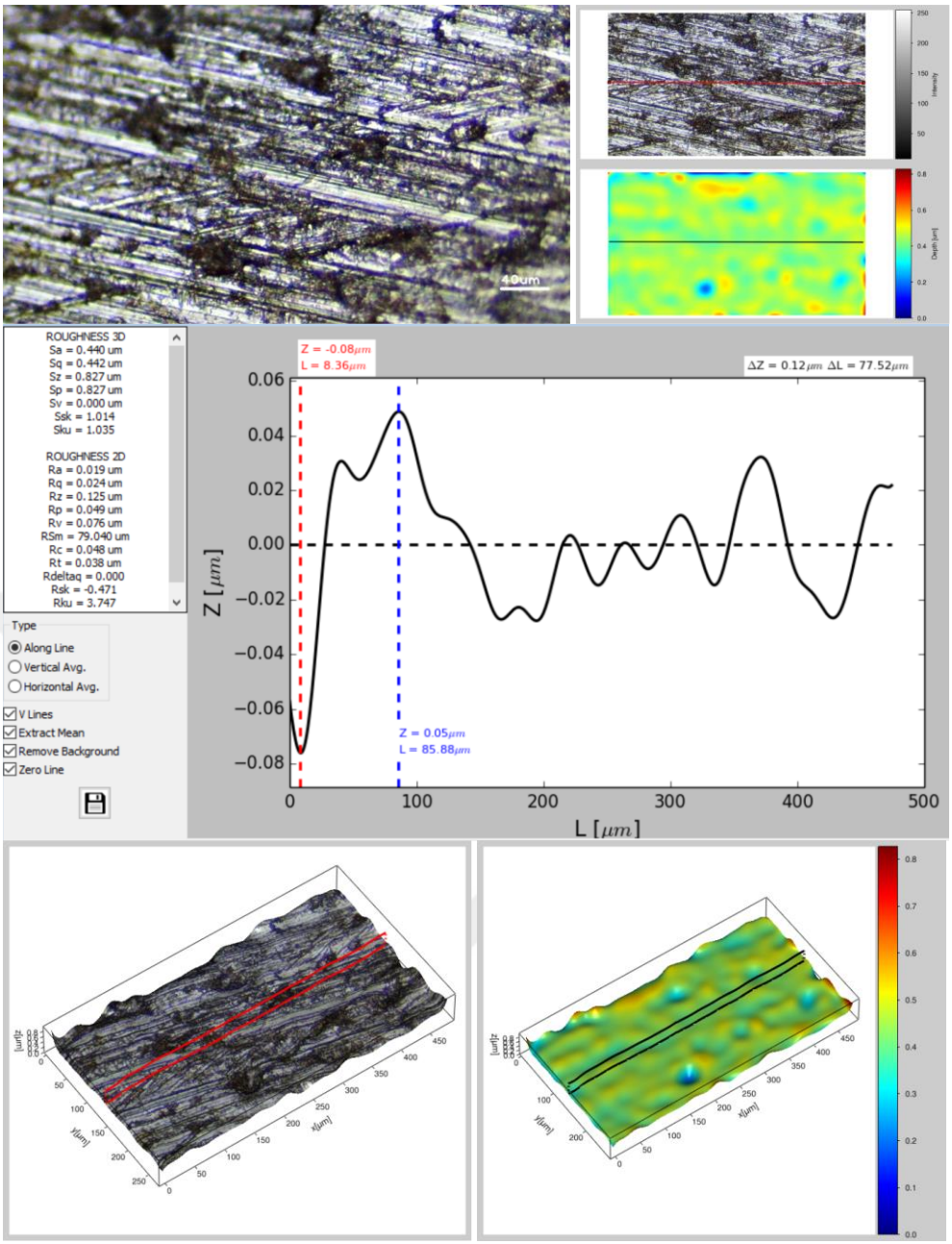
a) 5W40 **b) rGO6**

Şekil 4.26 Kesilen benzinli motor silindirinin Üst Ölü Nokta bölgelerinin optik mikroskop görüntüleri.

Dijital mikroskop altında incelenen benzinli motor silindiri, yüzey pürüzlülüğü yönünden incelenmiş ve referans değer olarak Ra ve Sa değerleri alınmıştır. Referans yağ ve rGO6 eklenmiş yağ ile yapılan 50 saatlik ömür testleri sonunda kesilerek incelenen benzinli motor silindirine ait yüzey pürüzlülük analiz sonuçları Şekil 4.26 ve 4.27'de, yüzey pürüzlülük değerleri ise Tablo 4.10'da gösterilmiştir



Şekil 4.27 Motor dinamometresinde 5W40 yağ ile test edilmiş Honda silindirin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi.



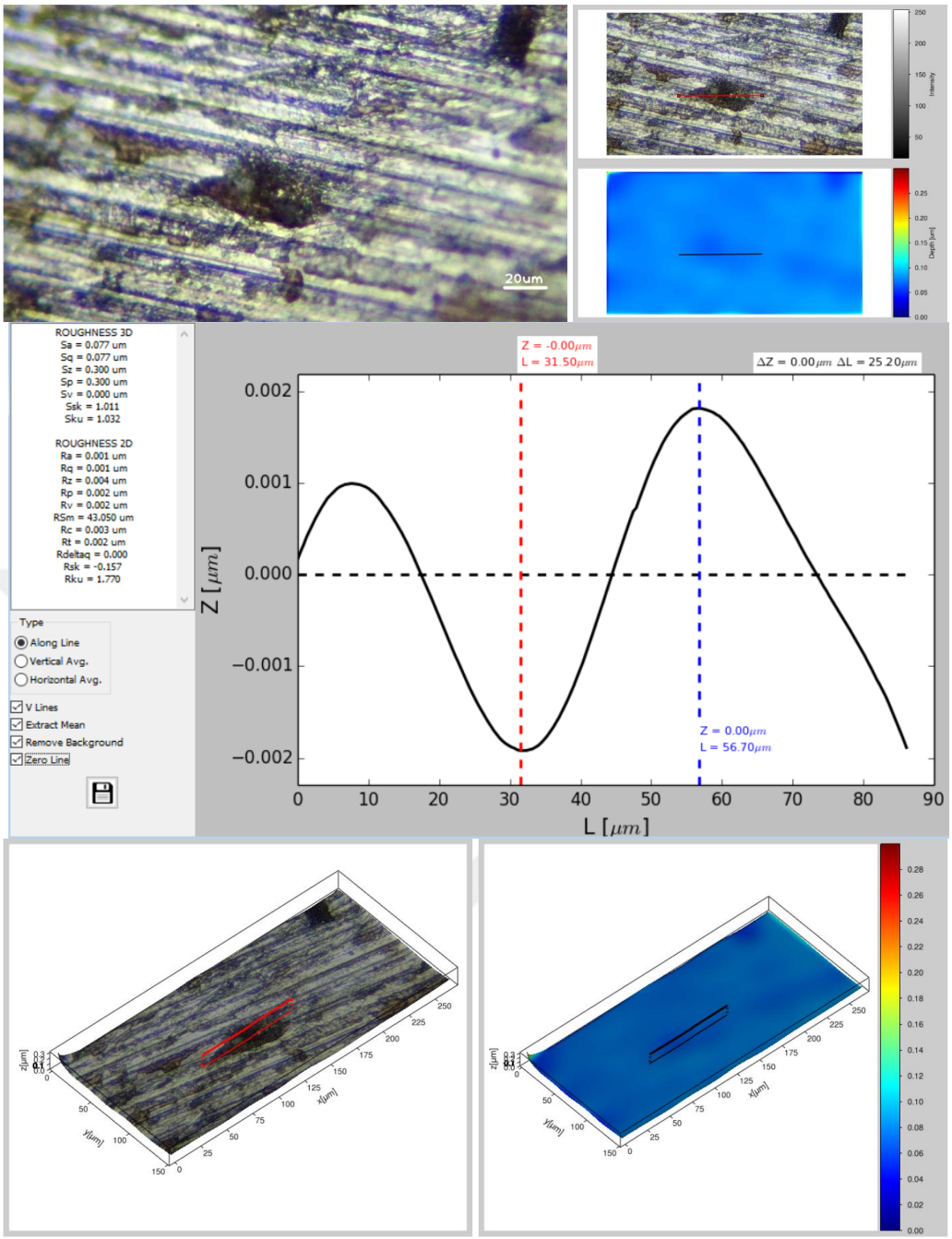
Şekil 4.28 Motor dinamometresinde rGO6 yağ ile test edilmiş Honda silindirin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi.

Tablo 4.10 Ömür testleri sonunda kesilerek yüzeyi optik mikroskop altında incelenen Honda benzinli motora ait yüzey pürüzlülük değerleri.

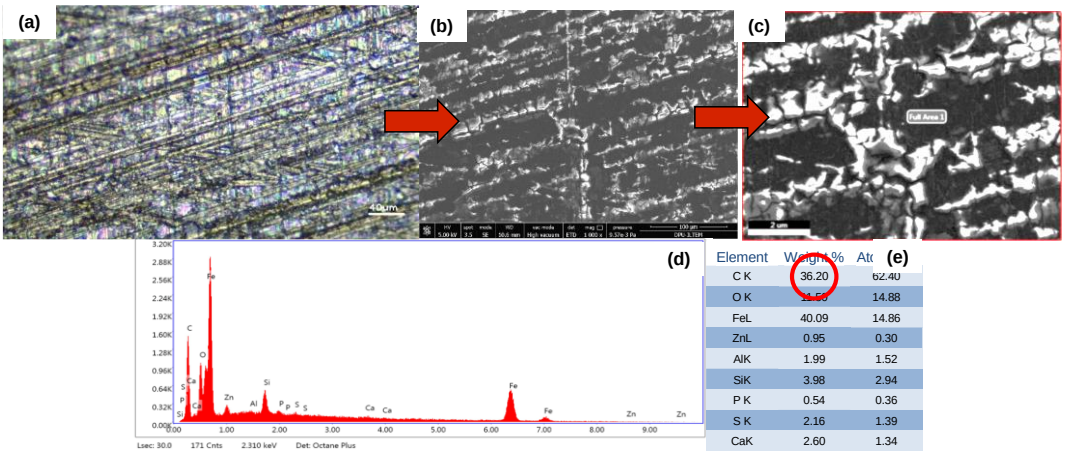
(μm)	Ra	Rq	Rz	Rp	Rv	RSm	Rc	Rt	Sa	Sq	Sz
5W40	0.051	0.065	0.306	0.127	0.179	47.348	0.128	0.102	0.599	0.605	1.808
rGO6	0.019	0.024	0.125	0.049	0.076	79.040	0.048	0.038	0.440	0.442	0.827

Tablo 4.10, referans yağ ve rGO içeren referans yağ ile yapılan ömür testi sonunda kesilerek, optik mikroskop ile incelenen silindir yüzeyi pürüzlülük değerlerini içermektedir. Optik mikroskop vasıtasıyla ölçülen silindir yüzey pürüzlülük değerleri, Ra ve Sa'nın yanı sıra Rq, Rz, Rp, Rv, Rc, Rt, Sq ve Sz değerlerinde de rGO eklenmiş yağda pürüzlülük değerlerinde azalma olduğubu göstermektedir. 50 saatlik ömür testleri sonunda silindir yüzeyinde tespit edilen bu düşüş, indirgenmiş grafenin yüzeyde etkin bir şekilde koruma sağlayarak aşınmayı azalttığını göstermektedir.

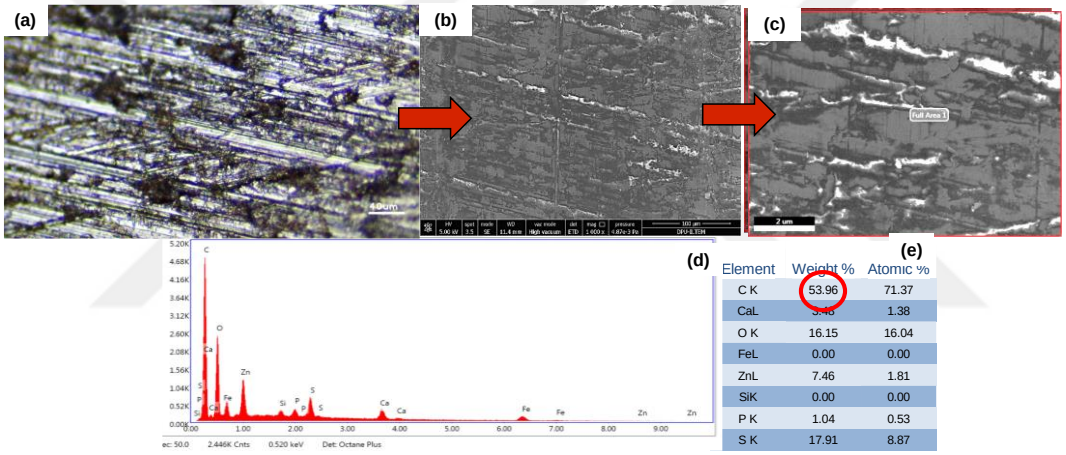
rGO6 içeren yağ ile yapılan ömür testi sonrası optik mikroskop ile silindir yüzeyinde yapılan incelemeler neticesinde yüzeydeki Grafen varlığı tespit edilmiş ve Şekil 4.28'de gösterilmiştir. Yapılan testler neticesinde yüzey pürüzlülükleri, Sa ve Ra sırasıyla 0.077 µm 0.001 µm olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.29 Kesilen benzinli motor silindiri Üst Ölü Noktası'nda optik mikroskop ile tespit edilen grafen (rGO) nanopartikülü ve yüzey değerleri.



Şekil 4.30 5W40 yağ ile test edilen Honda silindir kovanının Ü.Ö.N (Üst Ölü Nokta'sındaki yüzey analizi) a) Optik Mikroskop, b) ve c) Elektron mikroskobu d) X-Ray e) Elementel analiz.

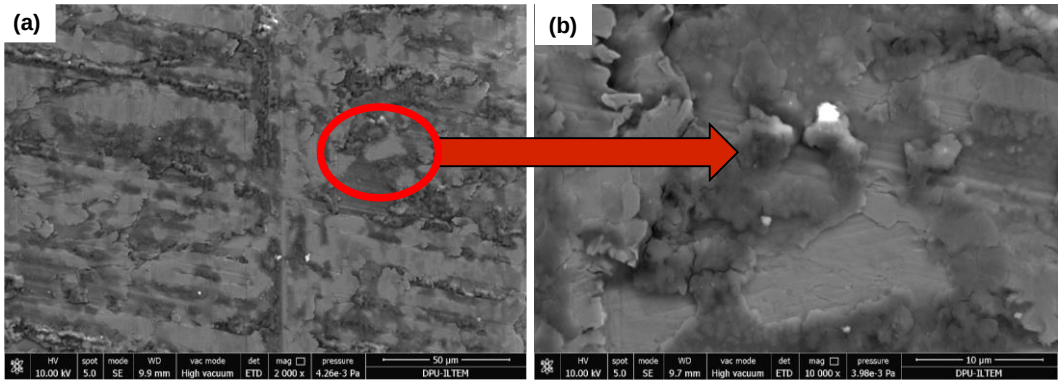


Şekil 4.31 rGO6 yağ ile test edilen Honda silindir kovanının Ü.Ö.N (Üst Ölü Nokta'sındaki yüzey analizi) a) Optik Mikroskop, b) ve c) Elektron mikroskobu d) X-Ray e) Elementel analiz.

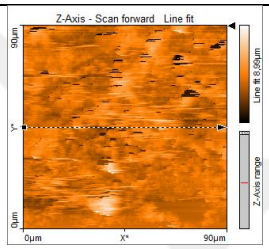
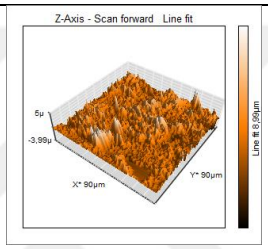
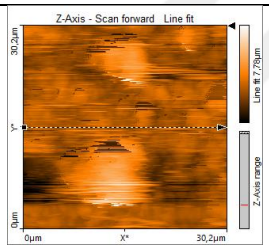
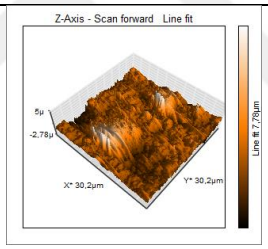
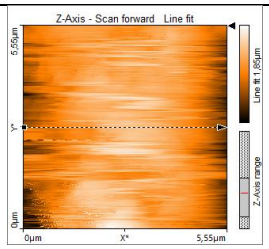
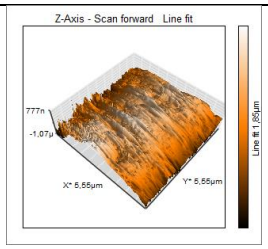
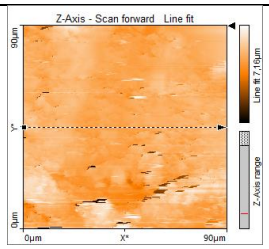
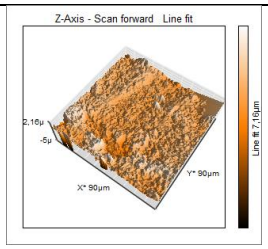
Tablo 4.11 FE-SEM ile ölçülen silindir yüzeyi elemental analiz değerleri.

	Element	C K	O K	MgK	Si K	P K	S K	CaK	Mn K	Fe K	ZnK
5W40		36.20	13,48		3.98	0.54	2.16	2.60	-	40.09	0.95
rGO 6		53.96	16.15	-	0	1.04	17.91	3.45	-	0.0	7.45

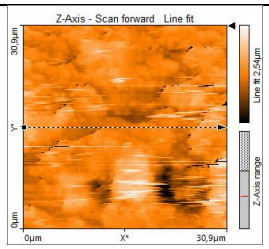
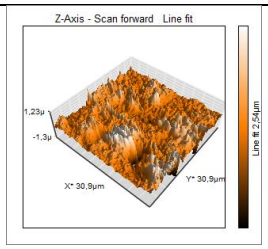
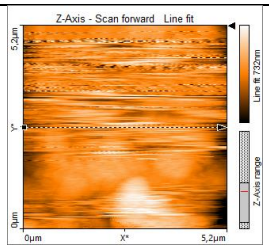
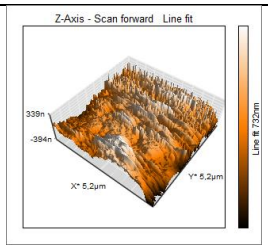
Tablo 4.11'de yer alan elemental analiz değerlerinden de görüleceği üzere, rGO6 ile yapılan motor deneyleri sonucunda yüzeydeki C miktarı referans yağa kıyasla artmıştır. Meydana gelen bu artış, yüzey pürüzlülük değerleri ile beraber değerlendirildğinde yüzeyin rGO nanopartikülü ile korunarak, oluşan tribofilmin yüzey pürüzlülüklerini azalttığını göstermektedir.



Şekil 4.33 FE-SEM analizi neticesinde Honda silindir yüzeyinde tespit edilen nano boyuttaki rGO nanopartikülü a) 50 µm ölçek b) 10 µm ölçek

	2D	Yüzey pürüzlülüğü	3D	Yüzey pürüzlülüğü
5W40 (90x90)		-- Line Roughness -- Ra 556.47nm Rq 826.4nm Ry 5.909µm Rp 4.1753µm Rv -1733.7nm Rm -18.626fm		-- Area Roughness -- Area 8.163nm^2 Sa 640.45nm Sq 904.8nm Sy 9.6394µm Sp 5µm Sv -4.6394µm Sm -278.39pm
5W40 (30x30)		-- Line Roughness -- Ra 305.02nm Rq 386.38nm Ry 1703.2nm Rp 749.71nm Rv -953.53nm Rm -18.626fm		-- Area Roughness -- Area 921.3pm^2 Sa 684.33nm Sq 966.13nm Sy 9.8572µm Sp 5µm Sv -4.8572µm Sm -878.77pm
5W40 (5x5)		-- Line Roughness -- Ra 235.73nm Rq 276.4nm Ry 948.67nm Rp 368nm Rv -580.67nm Rm -18.626fm		-- Area Roughness -- Area 31.05pm^2 Sa 236.74nm Sq 298.04nm Sy 2770.2nm Sp 1.19µm Sv -1580.1nm Sm -18.614fm
rGO6 (90x90)		-- Line Roughness -- Ra 239.14nm Rq 290.56nm Ry 1281.1nm Rp 701.71nm Rv -579.41nm Rm -16.153fm		-- Area Roughness -- Area 8.163nm^2 Sa 391.01nm Sq 591.74nm Sy 7.7693µm Sp 2769.3nm Sv -5µm Sm 429.45pm

Şekil 4.32 Ömür testi sonrası kesilen Benzinli motor silindirinin AFM altında incelenen yüzey pürüzlülük değerleri.

rGO6 (30x30)		-- Line Roughness -- Ra 168.1nm Rq 193.9nm Ry 673.2nm Rp 374.83nm Rv -298.37nm Rm -18.626fm		-- Area Roughness -- Area 964.6pm^2 Sa 226.85nm Sq 336.69nm Sy 6.4075µm Sp 1859.8nm Sv -4.5477µm Sm -18.564fm
rGO6 (5x5)		-- Line Roughness -- Ra 138.12nm Rq 162.5nm Ry 616nm Rp 240.73nm Rv -375.27nm Rm -18.626fm		-- Area Roughness -- Area 27.22pm^2 Sa 93.75nm Sq 130.75nm Sy 4.1372µm Sp 1497.8nm Sv -2639.4nm Sm -18.626fm

Şekil 4.34 Ömür testi sonrası kesilen Benzinli motor silindirinin AFM altında incelenen yüzey pürüzlülük değerleri. (devamı)

Tablo 4.12 Ömür testi sonrası AFM ile incelenen benzinli motor silindir yüzeyinde meydana gelen yüzey pürüzlülük değerlerinin karşılaştırılması.

Test no	Ra (nm)	Sa (nm)
90x90 (5W40)	556.47	640.45
90x90 (rGO6)	239.14	391.01
30x30 (5W40)	305.02	684.33
30x30 (rGO6)	168.1	226.85
5x5 (5W40)	235.73	236.74
5x5 (rGO6)	138.12	93.75

Tablo 4.12'de yer alan değerler, referans yağ ve rGO6 içeren yağ ile yapılan testler sonucunda elde edilen ve Şekil 4.32'de 2 ve 3 boyutlu olarak gösterilen AFM yüzey pürüzlülüklerini içermektedir. Ölçülen bu değerler, rGO6 ile yapılan testte meydana gelen yüzey pürüzlülüklerinin, referans yağa kıyasla daha düşük olduğunu göstermektedir. Yüzey pürüzlülüklerindeki bu düşüş, rGO içeren yağın silindir yüzeyinde tribofilm oluşturarak etkin bir koruma oluşturması, boşlukları doldurarak aşınmayı azaltması ile meydana gelmiştir.

5
SONUÇ VE ÖNERİLER

Literatürde yaygın olarak kullanılan ve gelişmiş tribolojik özellikleri bilinen Titanyum Dioksit (TiO_2), Grafen Oksit (GO), Tek Duvarlı Karbon Nanotübler (SWCNTs), Çok Duvarlı Karbon Nanotübler (MWCNTs), Nano Borik Asit (nBA), Hegzagonal Bor Nitrür (HBN) ve İndirgenmiş Grafen Oksit (rGO) nanopartikülleri 5W40 tam sentetik motor yağına eklenerek aşınma ve sürtünmeye olan etkileri incelenmiştir.

Tez kapsamında planlanan motor testlerinin gerçekleştirilebilmesi için nanopartiküllerin yağ içinde süspansiyon halde kalması gerekmekte olup bu durum sadece nBA ve rGO6 nanopartikülleri için geçerli olmuştur. Yapılan araştırmalar neticesinde, nBA'in filtreleri tıkadığı tespit edilmiş olup motor testleri için en düşük sürtünme katsayısını veren ve süspansyion halinde kalabilen rGO nanopartikülü seçilmiştir.

Çeşitli konsantrasyonlarda 5W40 yağına eklenen rGO nanopartikülü ile yapılan tribometre testleri neticesinde en iyi sonuç rGO6 (%0,02) ile elde edilmiş olup tezin geri kalanında bütün testler bu nanopartikül ile yapılmıştır.

İki aşamalı olarak yapılan testlerin ilk aşaması tribometre testleri olup, rGO6 içeren yağ ile yapılan 3 adet tekrarlı tribometre testleri neticesinde, hem benzinli motor silindiri-bilye hem de Diesel motor silindiri-bilye ile başarılı sonuçlar elde edilmiş, rGO6'nın her iki silindir üzerinde de sürtünme katsayısının düşürürerek yüzeyde koruma sağladığı görülmüştür. Benzinli motor silindiri ve bilye çifti ile yapılan 3 tekrarlı tribometre testi sonucunda rGO6 içeren yağın ortalama sürtünme katsayısı 0.09249, referans yağın ortalama sürtünme katsayısı ise 0.09553 olarak hesaplanmıştır. Yapılan testtler neticesinde rGO6 içeren yağın yüzeyde koruma sağlayarak sürtünme katsayısını %3.19 oranında düşürdüğü tespit edilmiştir. Diesel motor silindiri ve bilye çifti ile yapılan 3 tekrarlı tribometre testi sonucunda rGO6 içeren yağın ortalama sürtünme katsayısı 0.0799, referans yağın ortalama sürtünme katsayısı ise 0.0843 olarak hesaplanmıştır. Yapılan testtler neticesinde rGO6 içeren yağın yüzeyde koruma sağlayarak sürtünme katsayısını %5.22 oranında düşürdüğü tespit edilmiştir.

Tribometre ile elde edilen sonuçların teyidi ve detaylandırılması amacıyla tribometre testleri sonrası aşınan yüzeyler optik mikroskop, FESEM ve AFM ile incelenmiş,

yapılan tüm incelemelerde de rGO6'nın yüzeyde yoğun miktardaki C ile etkin koruma sağladığı, yüzey aşınması izlerini azalttığı ve yüzey pürüzlülüğünü düşürdüğü gözlemlenmiştir. Tribometre testleri sonrası bilye ve silindir yüzeyleri ayrı ayrı incelenmiş olup; aşınma izi genişlikleri, yüzey pürüzlülükleri ve aşınma mekanizmaları detaylı olarak incelenmiştir. Benzinli motor ile yapılan testlerde rGO içerikli yağın aşınma izini bilyede %2.95; silindirde ise %3.10 oranında azalttığı tespit edilmiştir. Yine aynı şekilde Diesel motor ile yapılan tribometre testlerinde de rGO içerikli yağın aşınma izini bilyede %8.09; silindirde ise %12.39 oranında azalttığı görülmüştür. Bu azalma, rGO katkılı motor yağının oluşturduğu film tabakası ile yüzey temas alanını arttırarak metal temas yüzeylerinde aşınmayı azalttığını ve bilyeli yatağa benzer çalışma mekanizması ile yüzeydeki temas basıncını düşürerek yüzeyin yük taşıma kapasitesini artırdığını göstermektedir.

Tribometre testleri sonrasında incelenen bir diğer parametre ise yüzey pürüzlülükleridir. Yüzey pürüzlülükleri hem optik mikroskop hem de farklı yüzey alanlarında AFM vasıtasıyla incelenmiştir. Optik mikroskop ile yapılan incelemeler neticesinde rGO içeren yağın, 5W40 referans yağa kıyasla;

Benzin silindiri ile yapılan testlerde **bilye** yüzeyi Ra değerini %26.31; Sa değerini ise %19.70 oranında; **silindir** yüzeyi Ra değerini %27.08, Sa değerini ise %30.47 oranında azaltırken, **Diesel** motor silindiri ile yapılan testlerde ise **bilye** yüzeyi Ra değerini %34.07, Sa değerini ise %10.30 oranında, **silindir** yüzeyi Ra değerini %35.64, Sa değerini ise %27.82 oranında azalttığı görülmüştür.

AFM vasıtasıyla incelenen yüzey pürüzlülüklerinde ise rGO içeren yağın, 5W40 referans yağa kıyasla;

Benzin silindiri ile yapılan testlerde bilye yüzeyi Ra değerini %34.49; Sa değerini ise %26.83 oranında; silindir yüzeyi Ra değerini %55.46, Sa değerini ise %51.09 oranında azaltırken, **Diesel** motor silindiri ile yapılan testlerde ise **bilye** yüzeyi Ra değerini %7.82, Sa değerini ise %9.69 oranında, **silindir** yüzeyi Ra değerini %3.51, Sa değerini ise %17.71 oranında azalttığı görülmüştür.

rGO içeren yağ ile yapılan testlerdeki yüzey pürüzlülüğündeki azalma, indirgenmiş grafen oksitin aşınan bölgelerdeki boşlukları tribofilm oluşturarak kapladığını ve yüzeydeki aşınmaları düşürdüğünü göstermektedir.

Testlerin ikinci aşaması olan motor testleri ise nanopartiküllü yağın, özellikleri bilinen benzinli (Honda GX 270) ve Diesel (Antor 6 LD 400) tek silindirli motorlarda test edilmesidir. Motor test parametreleri ISO 8178-4 standartlarına göre belirlenmiş olup, 50 saatlik ömür testleri bu parametrelere göre gerçekleştirilmiştir.

Benzinli ve Diesel motorlarda yapılan testler neticesinde rGO6 içeren yağın referans 5W40 yağa kıyasla motorun güç ve torkunu arttırdığı tespit edilmiştir. Benzinli motorda gerçekleştirilen 3 adet performans testi neticesinde performans testinin gerçekleştirildiği hız olan 2400 d/d'da rGO6 içerikli motor yağının, referans yağa kıyasla motor gücünü ve torkunu %0.32 oranında arttırdığı görülmüştür. Diesel motorda gerçekleştirilen 3 adet performans testi neticesinde ise performans testinin gerçekleştirildiği hız olan 2600 d/d'da rGO içerikli yağın, referans yağa kıyasla motor gücünü %12.00; motor torkunu ise %12.00 oranında arttırdığı tespit edilmiştir. Motor testlerinden sonra rGO6'nın yüzey etkinliğinin tespiti amacıyla motor silindirleri kesilerek incelenmiş, yapılan yüzey incelemeleri neticesinde rGO ile yapılan testlerde yüzeyde tespit edilen C miktarının referans yağa kıyasla daha fazla olduğu, rGO6'nın yüzeyde etkin şekilde tribofilm oluşturarak aşınma ve sürtünmeleri azaltarak motor güç ve torkunda artışa yol açtığı tespit edilmiştir.

Gerek Tribometre gerekse motor terstleri sonucunda elde edilen dominant aşınma mekanizması abrazyon aşınma mekanizmasıdır.

İçten yanmalı motorlardaki verim kaybının çok büyük oranda sürtünme kaynaklı olduğu bilinmektedir. Motorlarda meydana gelen aşınma ve sürtünmenin azaltılması ile aracın motor ömrünün uzatılacağı, bunun da tez kapsamında yapılan testler ile aşınmayı azalttığı tespit edilen rGO6 içeren yağlar ile mümkün olduğu görülmüştür. Bunun nedeni homojen plastik deformasyon yüzeyin pürüzsüz ve reaktif olmasını sağlayarak daha iyi yüzey bozulması yani pürüzsüz yüzey elde edilir. bu da rGO ilaveli yağ testi için yağlayıcılar ve kayan çiftler arasında hızlı bir yüzey reaksiyonuna izin verir çünkü Zn, Ca, P içeriği gibi katkı maddeleri onunla karışarak koruyucu tabakalar oluşturur ve sürtünme katsayısını azaltır.

Grafen sentezinin endüstriyel olarak zor olduğu, indirgenmiş grafen oksitin bu sorunun çözümünde bir alternatif olabileceği, grafen ve türevlerinin motor yağına eklenerek ticarileştirilmesinin henüz gerçekleştirilmediği bilinmekte olup ileride bu konularda çalışmalar yapılmasının uygun olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

[1] F. A. Martin, “Friction in internal combustion engine bearings,” *ImechE*, pp. C67-85, 1985.

[2] Y. Choi *et al.*, “Tribological behavior of copper nanoparticles as additives in oil,” *Curr. Appl. Phys.*, vol. 9, no. 2 SUPPL., pp. e124–e127, 2009, doi: 10.1016/j.cap.2008.12.050.

[3] M. K. A. Ali, H. Xianjun, R. F. Turkson, and M. Ezzat, “An analytical study of tribological parameters between piston ring and cylinder liner in internal combustion engines,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part K J. Multi-Body Dyn.*, vol. Vol. 230 N, pp. 329–349, 2016.

[4] H. Chang, Z. Y. Li, M. J. Kao, K. D. Huang, and H. M. Wu, “Tribological property of TiO2 nanolubricant on piston and cylinder surfaces,” *J. Alloys Compd.*, vol. 495(2), pp. 481–484, 2010.

[5] A. Senatore and D. Aleksendric, “Advances in Piston Rings Modelling and Design,” *Recent Patents Eng.*, vol. 7, no. 1, pp. 51–67, 2013.

[6] M. K. A. Ali, H. Xianjun, L. Mai, C. Qingping, R. F. Turkson, and C. Bicheng, “Improving the tribological characteristics of piston ring assembly in automotive engines using Al2O3 and TiO2 nanomaterials as nano-lubricant additives,” *Tribol. Int.*, vol. 103, pp. 540–554, Nov. 2016, doi: 10.1016/J.TRIBOINT.2016.08.011.

[7] E. Kohn, “A theory on the role of lubricants in metal cutting at low speeds and in boundary lubrication,” *Wear*, vol. 8, no. 1, pp. 43–59, 1965.

[8] A. Erdemir and B. Bhushan, *Handbook of Modern Tribology*. 2001.

[9] X. Liu, Z. Lu, H. Dong, Y. Cao, and X. Qian, “Friction and Wear Characteristics of Microporous Interface Filled with Mixed Lubricants of M50 Steel at Different Loads,” *Materials (Basel).*, vol. 13, p. 2934, 2020.

[10] W. Dai, B. Kheireddin, H. Gao, and H. Liang, “Roles of nanoparticles in oil lubrication,” *Tribol. Int.*, vol. 102, pp. 88–98, 2016, doi: 10.1016/j.triboint.2016.05.020.

[11] M. K. A. Ali, M. A. A. Abdelkareem, A. Elagouz, F. Essa, and H. Xianju, “Mini Review on the Significance Nano-Lubricants in Boundary Lubrication Regime,” *Int. J. Biosens. Bioelectron.*, vol. 2, no. 2, pp. 42–43, 2017, doi: 10.15406/ijbsbe.2017.02.00014.

[12] A. A. Thakre and A. Thakur, “Study of behaviour of aluminium oxide nanoparticles suspended in SAE20W40 oil under extreme pressure lubrication,” *Ind. Lubr. Tribol.*, vol. 67/4, pp. 328–335., 2015.

[13] M. Asrul, N. W. M. Zulkifli, H. H. Masjuki, and M. A. Kalam, “Tribological properties and lubricant mechanism of nanoparticle in engine oil,” *Procedia Eng.*, vol. 68, pp. 320–325, 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.12.186.

[14] X. Li, M. Murashima, and N. Umehara, “Effect of nanoparticles as lubricant additives on friction and wear behavior of tetrahedral amorphous carbon (ta-

C) coating," *J. Tribol.*, vol. 16, pp. 15-29., 2018.

[15] Q. Zou, "Nanoparticles in Automotive Applications," *Encycl. Tribol.*, pp. 2376–2381, 2013.

[16] L. Liu *et al.*, "Recent advances in friction and lubrication of graphene and other 2D materials: Mechanisms and applications," *Friction*, vol. 7, pp. 199–216, 2019.

[17] B. Gupta, N. Kumar, K. Panda, S. Dash, and A. K. Tyagi, "Energy efficient reduced graphene oxide additives: Mechanism of effective lubrication and antiwear properties," *Sci. Rep.*, vol. 6, no. October 2015, pp. 1–10, 2016, doi: 10.1038/srep18372.

[18] S. Jendrzej, B. Gokce, and S. Barcikowski, "Colloidal Stability of Metal Nanoparticles in Engine Oil under Thermal and Mechanical Load," *Chem. Eng. Technol.*, vol. 2017, pp. 1569-1576., 2017.

[19] K. Rajkumar and S. Aravindan, "Tribological behavior of microwave processed copper–nanographite composites," *Tribol. Int.*, vol. 57, pp. 282–296, Jan. 2013, doi: 10.1016/J.TRIBOINT.2012.06.023.

[20] A. Rylski and K. Siczek, "The Effect of Addition of Nanoparticles, Especially ZrO2-Based, on Tribological Behavior of Lubricants," *Lubricants*, vol. 8, no. 3, p. 23, Mar. 2020, doi: 10.3390/lubricants8030023.

[21] M. K. Ahmed Ali, H. Xianjun, M. A. A. Abdelkareem, and A. H. Elsheikh, "Role of nanolubricants formulated in improving vehicle engines performance," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 563, no. 2, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/563/2/022015.

[22] M. J.M. and N. Ohmae, "Nanolubricants," *Wiley*, 2008.

[23] F. Nsib, N. Ayed, and Y. Chevalier, "Selection of dispersants for the dispersion of carbon black in organic medium," *Prog. Org. Coat.*, vol. 55, pp. 303–310, 2006.

[24] X. Kang, B. Wang, L. Zhu, and H. Zhu, "Synthesis and tribological property study of oleic acid-modified copper sulfide nanoparticles," *Wear*, vol. 265, pp. 150–154, 2008.

[25] R. Xia, Y. Zhang, Q. Zhu, J. Qian, Q. Dong, and F. Li, "Surface modification of nano-sized silicon nitride with BA-MAA-AN tercopolymer," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 107, pp. 562–570, 2008.

[26] E. Tang, G. Cheng, X. Ma, X. Pang, and Q. Zhao, "Surface modification of zinc oxide nanoparticle by PMAA and its dispersion in aqueous system," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 252, pp. 5227–5232, 2006.

[27] L. Wang, A. Lu, Z. Xiao, J. Ma, and Y. Li, "Surface-modification of SiO2 nanoparticles with oleic acid," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 255, pp. 7542–7546, 2009.

[28] Booth J., H. T., W. R., and P. H., "Scuffing detection of TU3 cam–follower contactsby electrostatic charge condition monitoring," *Tribol. Int.*, vol. 43, pp. 113–128, 2010.

[29] F. C. Castillo and H. A. Spikes, "Mechanism of Action of Colloidal Solid Dispersions," *J. Tribol.*, vol. 125, pp. 552–557, 2003.

[30] M. K. A. Ali and H. Xianjun, “Improving the tribological behavior of internal combustion engines via the addition of nanoparticles to engine oils,” *Nanotechnol. Rev.*, vol. 4, no. 4, pp. 347–358, 2015, doi: 10.1515/ntrev-2015-0031.

[31] K. D. Lawrence and B. Ramamoorthy, “Multi-surface topography targeted Plateau honing for the processing of cylinder liner surfaces of automotive engines,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. Vol. 365, pp. 19–30, 2016.

[32] C. Rakopoulos, A. Dimaratos, E. Giakoumis, and D. Rakopoulos, “Evaluation of the effect of engine, load and turbocharger parameters on transient emissions of a diesel engine,” *Energy Convers Manag.*, vol. 50, pp. 2381–93, 2009.

[33] E. G. Giakoumis, “Lubricating oil effects on the transient performance of a turbocharged diesel engine,” *Energy*, vol. 35, no. 2, pp. 864–873, 2010, doi: 10.1016/j.energy.2009.08.009.

[34] S. M. Alves, B. S. Barros, M. F. Trajano, K. S. B. Ribeiro, and M. E., “Tribological behavior of vegetable oil-based lubricants with nanoparticles of oxides in boundary lubrication conditions,” *Tribol. Int.*, vol. 65, pp. 28–36.

[35] F. Ma *et al.*, “Evaluation of tribological performance of oxide nanoparticles in fully formulated engine oil and possible interacting mechanism at sliding contacts,” *Surfaces and Interfaces*, vol. 24, no. November 2020, p. 101127, 2021, doi: 10.1016/j.surfin.2021.101127.

[36] M. Laad and V. K. S. Jatti, “Titanium oxide nanoparticles as additives in engine oil,” *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, vol. 30, no. 2, pp. 116–122, 2018, doi: 10.1016/j.jksues.2016.01.008.

[37] S. Arumugam and G. Sriram, “Preliminary Study of Nano- and Microscale TiO2 Additives on Tribological Behavior of Chemically Modified Rapeseed Oil,” *Tribol. Trans.*, vol. 56, no. 5, pp. 797–805, 2013, doi: 10.1080/10402004.2013.792977.

[38] S. Shahnazar, S. Bagheri, and S. B. Abd Hamid, “Enhancing lubricant properties by nanoparticle additives,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 4, pp. 3153–3170, 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.12.040.

[39] H. Abdullah, M. I. H. C. Abdollah, M. F. B. Amiruddin, N. Tamaldin, N. R. M. Nuri, and A. R. Saleman, “The hBN Nanoparticles as an Effective Engine Oil Additive to Enhance the Durability and Performance of a Small Diesel Engine,” *J. Mech. Eng.*, vol. Vol SI 1, pp. 103-112.

[40] O. N. Çelik, N. Ay, and Y. Göncü, “Effect of nano hexagonal boron nitride lubricant additives on the friction and wear properties of AISI 4140 steel,” *Part. Sci. Technol.*, vol. 31, no. 5, pp. 501–506, 2013, doi: 10.1080/02726351.2013.779336.

[41] Y. Kimura, T. Wakabayashi, K. Okada, T. Wada, and H. Nishikawa, “Boron nitride as a lubricant additive,” *Wear*, vol. 232, pp. 199–206, 1999.

[42] Q. Wan, Y. Jin, P. Sun, and Y. Ding, “Tribological behaviour of a lubricant oil containing boron nitride nanoparticles,” *Procedia Eng.*, vol. 102, pp. 1038–1045, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.01.226.

[43] Y. Junbin, “Antiwear function and mechanism of borate containing nitrogen,”

Tribol. Int., vol. 30, pp. 387–389, 1997.

[44] E. Larsson, P. Olander, and S. Jacobson, “Boric acid as a lubricating fuel additive – Simplified lab experiments to understand fuel consumption reduction in field test,” *Wear*, vol. 376–377, pp. 822–830, 2017, doi: 10.1016/j.wear.2017.01.105.

[45] B. S. Ajay Vardhaman, M. Amarnath, J. Ramkumar, and P. K. Rai, “Experimental Investigations to Enhance the Tribological Performance of Engine Oil by Using Nano-Boric Acid and Functionalized Multiwalled Carbon Nanotubes: A Comparative Study to Assess Wear in Bronze Alloy,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 27, no. 6, pp. 2782–2795, 2018, doi: 10.1007/s11665-018-3384-9.

[46] S. Ramteke, R. Maddineni, and H. Chelladurai, “Formulation, stability analysis and characterization of boric acid based engine oil nanofluid for heat transfer and tribological application in diesel engines,” *Mater. Today Proc.*, vol. 18, pp. 4334–4340, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.393.

[47] H. Kaleli, S. Demirtaş, V. Uysal, Z. Tanriseven, and J. Zhao, “Application of suspended nanoboric acid as an efficient lubrication additive in engine oil,” *Key Eng. Mater.*, vol. 823 KEM, pp. 53–60, 2019, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.823.53.

[48] D. Berman, A. Erdemir, and A. V. Sumant, “Graphene: A new emerging lubricant,” *Mater. Today*, vol. 17, no. 1, pp. 31–42, 2014, doi: 10.1016/j.mattod.2013.12.003.

[49] Z. Li, C. Xu, G. Xiao, J. Zhang, Z. Chen, and M. Yi, “Lubrication performance of graphene as lubricant additive in 4-n-pentyl-4’-cyanobiphyl Liquid Crystal (5CB) for Steel/Steel contacts,” *Materials (Basel).*, vol. 11, no. 11, 2018, doi: 10.3390/ma11112110.

[50] M. J. Nine, M. A. Cole, D. N. H. Tran, and D. Losic, “Graphene: a multipurpose material for protective coatings,” *J. Mater. Chem. A*, vol. 3, pp. 12580–12602, 2015.

[51] Y. Dong, B. Ma, C. Xiong, Y. Liu, and Q. Zhao, “Study on the Lubricating Characteristics of Graphene Lubricants,” *Lubricants*, vol. 11, no. 12, 2023, doi: 10.3390/lubricants11120506.

[52] N. A. Ismail and S. Bagheri, “Lube Oil Wear Reduction via Organic Tribofilms,” *Lubricants*, pp. 5–30, 2017.

[53] M. Hatami, M. Hasanpour, and D. Jing, “Recent developments of nanoparticles additives to the consumables liquids in internal combustion engines: Part II: Nano-lubricants,” *J. Mol. Liq.*, vol. 319, p. 114156, 2020, doi: 10.1016/j.molliq.2020.114156.

[54] M. K. A. Ali, X. Hou, and M. A. A. Abdelkareem, “Anti-wear properties evaluation of frictional sliding interfaces in automobile engines lubricated by copper/graphene nanolubricants,” *Friction*, vol. 8, no. 5, pp. 905–916, 2020, doi: 10.1007/s40544-019-0308-0.

[55] M. K. A. Ali, H. Xianjun, M. A. A. Abdelkareem, M. Gulzar, and A. H. Elsheikh, “Novel approach of the graphene nanolubricant for energy saving via anti-friction/wear in automobile engines,” *Tribol. Int.*, vol. 124, pp. 209–

229, 2018, doi: 10.1016/j.triboint.2018.04.004.

[56] R. Tonk, “The challenges and benefits of using carbon nano-tubes as friction modifier lubricant additives,” *Mater. Today Proc.*, vol. 37, no. Part 2, pp. 3275–3278, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.09.112.

[57] Z. Zhang, J. Liu, T. Wu, and Y. Xie, “Effect of carbon nanotubes on friction and wear of a piston ring and cylinder liner system under dry and lubricated conditions,” *Friction*, vol. 5, no. 2, pp. 147–154, 2017, doi: 10.1007/s40544-016-0126-6.

[58] R. Dinesh, M. J. Giri Prasad, R. Rishi Kumar, N. Jerome Santharaj, J. Santhip, and A. S. Abhishek Raaj, “Investigation of tribological and thermophysical properties of engine oil containing nano additives,” *Mater. Today Proc.*, vol. 3, no. 1, pp. 45–53, 2016, doi: 10.1016/j.matpr.2016.01.120.

[59] G. Vakili-Nezhaad and A. Dorany, “Effect of single-walled carbon nanotube on the viscosity of lubricants,” *Energy Procedia*, vol. 14, no. 1998, pp. 512–517, 2012, doi: 10.1016/j.egypro.2011.12.967.

[60] K. R. R. Chebattina, V. Srinivas, and N. Mohan Rao, “Effect of size of multiwalled carbon nanotubes dispersed in gear oils for improvement of tribological properties,” *Adv. Tribol.*, vol. 2018, no. January 2019, 2018, doi: 10.1155/2018/2328108.

[61] T. Bao, Z. Wang, Y. Zhao, Y. Wang, and X. Yi, “Long-term stably dispersed functionalized graphene oxide as an oil additive,” *RSC Adv.*, vol. 9, no. 67, pp. 39230–39241, 2019, doi: 10.1039/c9ra07685a.

[62] D. Berman, A. Erdemir, A. V. Zinovev, and A. V. Sumant, “Nanoscale friction properties of graphene and graphene oxide,” *Diam. Relat. Mater.*, vol. 54, no. 1, pp. 91–96, 2015, doi: 10.1016/j.diamond.2014.10.012.

[63] B. Schlüter, A. Kailer, and B. Mülhaupt, “Functionalized Graphene: fabrication and tribological behavior in ester oil,” *World Tribol. Congr.*, 2013.

[64] Q. Tang, Q.-Y. Wu, and L. Gu, “Ultra−fast and stable dispersion of graphene oxide in lubricant oil toward excellent tribological property,” *Tribol. Int.*, vol. 192, p. 109214, 2024, doi: 10.1016/j.triboint.2023.109214.

[65] Ö. Can and Ö. Çetin, “Potential use of graphene oxide as an engine oil additive for energy savings in a diesel engine,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 48, no. October, 2023, doi: 10.1016/j.jestch.2023.101567.

[66] A. Senatore, V. D’Agostino, V. Petrone, P. Ciambelli, and M. Sarno, “Graphene Oxide Nanosheets as Effective Friction Modifier for Oil Lubricant: Materials, Methods, and Tribological Results,” *Tribology*, vol. 2013iiii, 2013.

[67] J. Ou *et al.*, “Tribology study of reduced graphene oxide sheets on silicon substrate synthesized via covalent assembly,” *Langmuir*, vol. 26, no. 20, pp. 15830–15836, 2010, doi: 10.1021/la102862d.

[68] E. J. Sandoz-Rosado, “The tribological behavior of graphene and its role as a protective coating,” p. 123, 2013, [Online]. Available: http://search.proquest.com/pqdtglobal/docview/1440118233/abstract/141CB1AC47F362D26C1/6?accountid=144525%0Ahttp://media.proquest.com/media/pq/classic/doc/3092839701/fmt/ai/rep/NPDF?hl=tribological%2Ctribological%2Cproperty%2Cproperties%2Cproperty%2Cproper.

[69] N. A. Ismail and S. Bagheri, “Highly oil-dispersed functionalized reduced graphene oxide nanosheets as lube oil friction modifier,” *Mater. Sci. Eng. B Solid-State Mater. Adv. Technol.*, vol. 222, pp. 34–42, 2017, doi: 10.1016/j.mseb.2017.04.010.

[70] S. Some *et al.*, “High-quality reduced graphene oxide by a dual-function chemical reduction and healing process,” *Sci. Rep.*, vol. 3, no. Figure 1, pp. 1–5, 2013, doi: 10.1038/srep01929.

[71] H. Feng, R. Cheng, X. Zhao, X. Duan, and J. Li, “A low-temperature method to produce highly reduced graphene oxide,” *Nat. Commun.*, vol. 4, pp. 1–8, 2013, doi: 10.1038/ncomms2555.

[72] A. T. Smith, A. M. LaChance, S. Zeng, B. Liu, and L. Sun, “Synthesis, properties, and applications of graphene oxide/reduced graphene oxide and their nanocomposites,” *Nano Mater. Sci.*, vol. 1, no. 1, pp. 31–47, 2019, doi: 10.1016/j.nanoms.2019.02.004.

[73] L. Destiarti, B. N. Huda, R. Riyanto, R. Roto, and M. Mudasir, “Challenges of using natural extracts as green reducing agents in the synthesis of rGO: A brief review,” *Results Chem.*, vol. 7, no. December 2023, p. 101270, 2024, doi: 10.1016/j.rechem.2023.101270.

[74] B. Yu, K. Wang, X. Pang, G. Wu, J. Pu, and H. Zhao, “Tribological properties of alkylated reduced graphene oxide as lubricant additive,” *Tribol. Int.*, vol. 165, no. September 2021, 2022, doi: 10.1016/j.triboint.2021.107273.

[75] H. Kaleli *et al.*, “Tribological performance investigation of a commercial engine oil incorporating reduced graphene oxide as additive,” *Nanomaterials*, vol. 11, no. 2, pp. 1–14, 2021, doi: 10.3390/nano11020386.

[76] M. Yao, J. Nan, and T. Chen, “Effect of particle size distribution on turbidity under various water quality levels during flocculation processes,” *Desalination*, vol. 354, pp. 116–124, 2014, doi: 10.1016/j.desal.2014.09.029.

[77] K. Anagnostou *et al.*, “An extensive case study on the dispersion parameters of HI-assisted reduced graphene oxide and its graphene oxide precursor,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 580, pp. 332–344, 2020, doi: 10.1016/j.jcis.2020.07.040.

[78] T. Bao, Z. Wang, Y. Zhao, Y. Wang, and X. Yi, “Long-term stably dispersed functionalized graphene oxide as an oil additive,” *RSC Adv.*, vol. 9, no. 67, pp. 39230–39241, 2019, doi: 10.1039/c9ra07685a.

[79] E. H. Kaleli and S. Demirtaş, “Experimental investigation of the effect of tribological performance of reduced graphene oxide additive added into engine oil on gasoline engine wear,” *Lubr. Sci.*, vol. 35, no. 2, pp. 118–143, 2023, doi: 10.1002/ls.1627.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Makaleler:

1. "Experimental investigation of the effect of tribological performance of reduced graphene oxide additive added into engine oil on gasoline engine wear," E. H. Kaleli and S. Demirtaş *Lubr. Sci.*, vol. 35, no. 2, pp. 118–143, 2023, doi: 10.1002/ls.1627.

2. "Tribological performance investigation of a commercial engine oil incorporating reduced graphene oxide as additive," Hakan Kaleli, Selman Demirtaş , Veli Uysal , Ioannis Karnis , Minas M. Stylianakis , Spiros H. Anastasiadis and Dae-Eun Kim Nanomaterials, vol. 11, no. 2, pp. 1–14, 2021, doi: 10.3390/nano11020386.

3. "Tribotest of engine piston ring/cylinder liner pairs with different nanoparticles added into engine oil", Demirtas, S., Kaleli, H., Khadem, M. and Kim, D.-e., Industrial Lubrication and Tribology, Vol. 72 No. 2, pp. 217-231, 2020, https://doi.org/10.1108/ILT-07-2018-0284

4. "Characterization of the friction and wear effects of graphene nanoparticles in oil on the ring/cylinder liner of internal combustion engine", Demirtas, S., Kaleli, H., Khadem, M. and Kim, D.-E., Industrial Lubrication and Tribology, Vol. 71 No. 5, pp. 642-652, 2019, https://doi.org/10.1108/ILT-05-2018-0170

5. "Tribological Properties of New Developed Nano Boric Acid Suspended as Additive in Engine Oil", Kaleli H, Demirtaş S, Uysal V, Tanriseven Z., KEM 2019;823:41–52. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.823.41.