

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MOTOR SİLİNDİR HONLAMASININ VE NANOKAPLAMALARIN
TRİBOLOJİK YÖNDEN MOTOR PERFORMANSINA,
AŞINMASINA VE YAĞLANMASINA ETKİLERİNİN DENEYSEL
ARAŞTIRILMASI

Veli UYSAL

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Programı

Danışman

Prof. Dr. Emrullah Hakan KALELİ

Agustos, 2023

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MOTOR SİLİNDİR HONLAMASININ VE NANOKAPLAMALARIN
TRİBOLOJİK YÖNDEN MOTOR PERFORMANSINA,
AŞINMASINA VE YAĞLANMASINA ETKİLERİNİN DENEYSEL
ARAŞTIRILMASI

Veli UYSAL tarafından hazırlanan tez çalışması 11.08.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Enerji Programı DOKTORA olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Emrullah Hakan KALELİ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Emrullah Hakan KALELİ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Selma Ergin, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Levent YÜKSEK, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Murat KIYAK, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Cenk MISIRLI, Üye
Trakya Üniversitesi

Danışmanım Prof. Emrullah Hakan KALELİ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Motor Silindir Honlamasının ve Nanokaplamaların Tribolojik Yönden Motor Performansına, Aşınmasına ve Yağlanmasına 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.

Veli UYSAL

İmza



*Aileme, ve
biricik oğlum Asil'e*

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmamın her aşamasında beni destekleyen, görüş ve fikirleri ile çalışmalarımı yönlendiren sevgili hocam ve değerli tez danışmanım Prof. Dr. Emrullah Hakan Kaleli'ye içten teşekkürlerimi sunarım. Tez izleme komitesindeki değerli hocalarım Prof. Dr. Selma Ergin ve Doç. Dr. Levent Yüksek'e de tezime sundukları katkı ve yönlendirmeleri için çok teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince en büyük destekçilerim olan ailem ve biricik oğlum Asil olmak üzere tüm sevdiklerime çok teşekkür ederim.

Veli UYSAL



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ	xiv
ÖZET	xvi
ABSTRACT	xviii
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı ve Özgünlüğü	8
1.3 Hipotez.....	8
2 DENEYSEL ÇALIŞMA	10
2.1 DeneySEL Çalışma Hazırlığı	10
3 TRİBOMETRE TEST SONUÇLARI	32
3.1 Tribometre İle Yapılan Test Sonuçları	32
3.2 Açılara Göre Honlama İle Yapılan Test Sonuçları	32
3.3 Kaplamalara Göre Test Sonuçları.....	71
4 MOTOR TEST SONUÇLARI	111
4.1 Performans Testleri.....	111
4.2 Silindirlerin Kesilmesi ve Yüzey Analizi	117
5 SONUÇ	125
KAYNAKÇA	129
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	135

KISALTMA LİSTESİ

AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu (<i>Atomic Force Microscope</i>)
COF	Sürtünme Katsayısı (<i>Coefficient Of Friction</i>)
CrCN	Krom Karbon Nitrür (<i>Chromium Carbon Nitride</i>)
DLC	Elmas Benzeri Karbon (<i>Diamond Like Carbon</i>)
EDS	Enerji Dağılımı Spektrometresi (<i>Energy Dispersive Spectrometry</i>)
EDX	Enerji Dağıtıcı X-Işını (<i>Energy Dispersive X-Ray</i>)
EPD	Elektro Foretik Biriktirme (<i>Electro Phoretic Deposition</i>)
PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme (<i>Physical Vapor Deposition</i>)
Ra	Pürüzlülük Profilinin Aritmetik Ortalama Sapması
rGO	İndirgenmiş Grafen Oksit (<i>Reduced Graphene Oxide</i>)
Sa	Aritmetik Ortalama Yükseklik
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu (<i>Scanning Electron Microscope</i>)
TiN	Titanyum Nitrür (<i>Titanium Nitride</i>)
ÜÖN	Üst Ölü Nokta

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Tribometre ve içten yanmalı motor deney setinde kullanılan Anadolu Motor Antor 6 LD 400 Diesel motoru ve teknik özellikleri	10
Şekil 2.2 Psaron nanobender 2D-3D optik mikroskop profilometre yazılımı	11
Şekil 2.3 Nanosurf Flex AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu) (a) Atomik kuvvet mikroskobu genel görüntüsü, (b) Atomik kuvvet mikroskobu konsol muhafazası	13
Şekil 2.4 Orijinal honlama açısı 45° olan Antor motoru	13
Şekil 2.5 Antor LD 400 motorunun farklı açılarda honlanacak yüzeyi.....	14
Şekil 2.6 Antor LD 400 motorunun farklı açılarda nanokaplanacak yüzeyi	14
Şekil 2.7 Silindir numunelerinin kesilmesi.....	15
Şekil 2.8 Tribometre testleri için honlanacak yüzeyde çalışacak segman-silindir ikilisi	16
Şekil 2.9 Tribometre testleri için nanokaplanacak yüzeyde çalışacak segman-silindir ikilisi	16
Şekil 2.10 Bilye-silindir ikilisi a) Bilye tutucu ve bilye b) Bilye-silindir ikilisi konfigürasyonu	17
Şekil 2.11 Tribometre testleri için üretilmiş özel bilye tutucusunun (a) ve (b) Yandan ve üstten görünüşü c), d) Ölçüleri.....	17
Şekil 2.12 Çelik bilye ve (10X10X13mm) ölçülerinde kesilmiş honlanmış ve nanokaplanmış silindir konumları.....	17
Şekil 2.13 Ham kovanın honlama işlemleri.....	18
Şekil 2.14 20°, 30°, 40°, 45° ve 60° honlanmış silindirlerin optik mikroskop görüntüleri	19
Şekil 2.15 a) Kaplanmamış yüzeye uygulanan b) rGO c) CrCN d) TiN e) DLC nanokaplamalar	20
Şekil 2.16 PVD kaplama cihazı.....	21
Şekil 2.17 Kaplanacak numuneyi yerleştirme işlemi	22
Şekil 2.18 Isıtma (buharlaştırma) işlemi.....	22
Şekil 2.19 Dağlama (sıçratma) işlemi.....	23
Şekil 2.20 Kaplama soğutma ve havalandırma (plazma) işlemi	24
Şekil 2.21 (a) “Consort Ev 3150” marka güç kaynağı (b) Güç kaynağı ile çalışma prensibi.....	26
Şekil 2.22 Otomotiv A.B.D. bünyesinde bulunan gidip-gelme (Reciprocating) hareketi yapan tribometre. (a) Tribometre (b) Sürtünme kuvveti eğrisi örneği (c) Dijital sıcaklık kontrol panosu	26
Şekil 2.23 Bilye-silindir ikilisi konfigürasyonu: (a) Tutucuya yerleştirilmiş bilye (b) Bilye tutucu ve honlanmış/nano kaplamalı silindir kovanı konfigürasyonu	26

Şekil 2.24 Antor 6 LD Diesel motor ve test düzeneği (a) Test düzeneğinin şeması (b) İçten yanmalı motor (c) Deney düzeneği	29
Şekil 2.25 Antor LD 400 diesel motoru test düzeneği (a) Dinamometre (b) Kaplin bağlantısı	30
Şekil 2.26 Motor dinamometre testi	30
Şekil 3.1 Yeni test öncesi kullanılmamış bilye X5.....	32
Şekil 3.2 Yeni test öncesi kullanılmamış bilye X10.....	32
Şekil 3.3 Yeni test öncesi kullanılmamış bilyenin optik, 2D, çizgisel pürüzlülük, 3D ve 3D haritalama dijital optik mikroskop görüntüleri	33
Şekil 3.4 Yeni kullanılmamış bilye için SEM ve EDX (Test öncesi)	34
Şekil 3.5 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindir gömlekleri üzerinde test edilen bilyelerin yatay ve dikey olarak ölçülen aşınma izi çapları	34
Şekil 3.6 20° honlanmış silindir üzerinde test edilen bilyenin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi	35
Şekil 3.7 30° honlanmış silindir üzerinde test edilen bilyenin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi	36
Şekil 3.8 40° honlanmış silindir üzerinde test edilen bilyenin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi	37
Şekil 3.9 45° honlanmış silindir üzerinde test edilen bilyenin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi	38
Şekil 3.10 60° honlanmış silindir üzerinde test edilen bilyenin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi	39
Şekil 3.11 Test öncesi 20° honlanmış silindirin optik, 2D, çizgisel pürüzlülük, 3D ve 3D haritalama dijital optik mikroskop görüntüleri	41
Şekil 3.12 Test öncesi 30° honlanmış silindirin optik, 2D, çizgisel pürüzlülük, 3D ve 3D haritalama dijital optik mikroskop görüntüleri	42
Şekil 3.13 Test öncesi 40° honlanmış silindirin optik, 2D, çizgisel pürüzlülük, 3D ve 3D haritalama dijital optik mikroskop görüntüleri	43
Şekil 3.14 Test öncesi 45° honlanmış silindirin optik, 2D, çizgisel pürüzlülük, 3D ve 3D haritalama dijital optik mikroskop görüntüleri	44
Şekil 3.15 Test öncesi 60° honlanmış silindirin optik, 2D, çizgisel pürüzlülük, 3D ve 3D haritalama dijital optik mikroskop görüntüleri	45
Şekil 3.16 Çelik bilye altında test edilen (a) 20°, (b) 30°, (c) 40°, (d) 45°, (e) 60° honlanmış silindir gömleklerinin yatay olarak ölçülen aşınma izlerinin optik dijital görüntüleri	46
Şekil 3.17 Çelik bilye altında test edilmiş 20° honlanmış silindirin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi	48
Şekil 3.18 Çelik bilye altında test edilmiş 30° honlanmış silindirin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi	49
Şekil 3.19 Çelik bilye altında test edilmiş 40° honlanmış silindirin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi	50

Şekil 3.20 Çelik bilye altında test edilmiş 45° honlanmış silindirin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi	51
Şekil 3.21 Çelik bilye altında test edilmiş 60° honlanmış silindirin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi	52
Şekil 3.22 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindir gömlekleri üzerinde test edilen bilyelerin AFM pürüzlülük analizlerinin karşılaştırılması.....	54
Şekil 3.23 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindir gömleklerinin aşınma izlerinin AFM pürüzlülük analizlerinin karşılaştırılması	56
Şekil 3.24 20°honlanmış silindir gömleği üzerinde test edilen bilyenin SEM görüntüsü ve EDS spektrumu	57
Şekil 3.25 Çelik bilye altında test edilen 20° honlanmış silindir gömleğinin SEM görüntüsü ve EDS spektrumu	58
Şekil 3.26 20° honlanmış kaplamasız silindir üzerine bilye testi	59
Şekil 3.27 30° honlanmış kaplamasız silindir üzerine bilye testi	59
Şekil 3.28 40° honlanmış kaplamasız silindir üzerine bilye testi	60
Şekil 3.29 Orijinal 45° honlanmış kaplamasız silindir üzerine bilye testi.....	60
Şekil 3.30 60° honlanmış kaplamasız silindir üzerine bilye testi	61
Şekil 3.31 Tüm açılara göre 1. Ölçüm sürtünme katsayısı test sonuçları karşılaştırılması	62
Şekil 3.32 Tüm açılara göre 1. Ölçüm sürtünme katsayısı test sonuçları.....	62
Şekil 3.33 20° honlanmış kaplamasız silindir üzerine bilye testi	63
Şekil 3.34 30° honlanmış kaplamasız silindir üzerine bilye testi	63
Şekil 3.35 40° honlanmış kaplamasız silindir üzerine bilye testi	64
Şekil 3.36 Orijinal 45° honlanmış kaplamasız silindir üzerine bilye testi.....	64
Şekil 3.37 60° honlanmış kaplamasız silindir üzerine bilye testi	65
Şekil 3.38 Tüm açılara göre 2. Ölçüm sürtünme katsayısı test sonuçları karşılaştırılması	66
Şekil 3.39 Tüm açılara göre 2. Ölçüm sürtünme katsayısı test sonuçları.....	66
Şekil 3.40 20° Honlanmış kaplamasız silindir üzerine bilye testi	67
Şekil 3.41 30° honlanmış kaplamasız silindir üzerine bilye testi	67
Şekil 3.42 40° honlanmış kaplamasız silindir üzerine bilye testi	68
Şekil 3.43 45° honlanmış kaplamasız silindir üzerine bilye testi	68
Şekil 3.44 60° honlanmış kaplamasız silindir üzerine bilye testi	69
Şekil 3.45 Tüm açılara göre 3. Ölçüm sürtünme katsayısı test sonuçları karşılaştırılması	70
Şekil 3.46 Tüm açılara göre 3. Ölçüm sürtünme katsayısı test sonuçları.....	70
Şekil 3.47 Tüm testlerin sürtünme katsayısı ortalama verileri grafiği	71
Şekil 3.48 Test edilmemiş silindir fotoğrafı ve mikroskop görüntüsü	71

Şekil 3.49	Kaplama öncesi test edilmemiş silindirin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi.....	72
Şekil 3.50	Test edilmemiş rGO kaplı silindirin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi.....	73
Şekil 3.51	Test edilmemiş CrCN kaplı silindirin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi.....	74
Şekil 3.52	Test edilmemiş TiN kaplı silindirin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi.....	75
Şekil 3.53	Test edilmemiş DLC kaplı silindirin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi.....	76
Şekil 3.54	20° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayılarının eğrilerinin zamana göre karşılaştırılması	77
Şekil 3.55	20° Honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayıları verilerinin karşılaştırılması	78
Şekil 3.56	30° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayılarının eğrilerinin zamana göre karşılaştırılması	79
Şekil 3.57	30° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayıları verilerinin karşılaştırılması	79
Şekil 3.58	40° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayılarının eğrilerinin zamana göre karşılaştırılması	80
Şekil 3.59	40° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayıları verilerinin karşılaştırılması	81
Şekil 3.60	45° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayılarının eğrilerinin zamana göre karşılaştırılması	82
Şekil 3.61	45° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayıları verilerinin karşılaştırılması	82
Şekil 3.62	60° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayılarının eğrilerinin zamana göre karşılaştırılması	83
Şekil 3.63	60° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayıları verilerinin karşılaştırılması	84
Şekil 3.64	Tüm açılara göre 20°, 30°, 40°, 45° ve 60° honlanmış silindirler üzerinde rGO nanokaplamaların sürtünme katsayıları eğrilerinin zamana göre karşılaştırılması 85	
Şekil 3.65	Tüm açılara göre 20°, 30°, 40°, 45° ve 60° honlanmış silindirler üzerinde rGO nanokaplamaların sürtünme katsayıları verilerinin karşılaştırılması	85
Şekil 3.66	30° için kaplamasız, rGO, CrCN, TiN ve DLC kaplı silindir gömlekleri üzerinde test edilen bilyelerin yatay ve dikey olarak ölçülen aşınma izi çaplarının optik dijital görüntüleri. (a) Test edilmemiş, (b) Kaplamasız (c) rGO, (d) CrCN, (e) TiN, (f) DLC	86

Şekil 3.67 Kaplanmamış silindir gömleği üzerinde test edilen bilyenin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi	88
Şekil 3.68 RGO kaplanmış silindir gömleği üzerinde test edilen bilyenin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi	89
Şekil 3.69 CrCN kaplanmış silindir gömleği üzerinde test edilen bilyenin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi	90
Şekil 3.70 TiN kaplanmış silindir gömleği üzerinde test edilen bilyenin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi	91
Şekil 3.71 DLC kaplanmış silindir gömleği üzerinde test edilen bilyenin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi	92
Şekil 3.72 30° İçin çelik bilye altında test edilen kaplamasız, rGO, CrCN, TiN ve DLC kaplı silindir gömleklerinin yatay olarak ölçülen aşınma izlerinin optik dijital görüntüleri. (a) Test edilmemiş, (b) Kaplamasız (c) rGO, (d) CrCN, (e) TiN, (f) DLC.....	93
Şekil 3.73 Çelik bilye altında test edilmiş kaplamasız silindir gömleğinin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi	95
Şekil 3.74 Çelik bilye altında test edilmiş RGO kaplamalı silindir gömleğinin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi.....	96
Şekil 3.75 Çelik bilye altında test edilmiş CrCN kaplamalı silindir gömleğinin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi.....	97
Şekil 3.76 Çelik bilye altında test edilmiş CrCN kaplamalı silindir gömleğinin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi.....	98
Şekil 3.77 Çelik bilye altında test edilmiş DLC kaplamalı silindir gömleğinin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi.....	99
Şekil 3.78 Çelik bilye altında test edilmiş rGO kaplamalı silindir gömleğinin rGO koruma tabakasının 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi	101
Şekil 3.79 Test öncesi, 20°, 30°, 40°, 45°, 60° rGO kaplanmış silindir gömlekleri üzerindeki bilyelerin AFM pürüzlülük analizlerinin karşılaştırması	102
Şekil 3.80 20°, 30°, 40°, 45°, 60° rGO kaplanmış silindir gömleklerinin 5 honlama açısındaki aşınma izlerinin AFM pürüzlülük analizlerinin karşılaştırılması	104
Şekil 3.81 30° için kaplanmamış silindir gömleği üzerinde test edilen bilyenin SEM görüntüsü ve EDS spektrumu	105
Şekil 3.82 30° için rGO kaplanmış silindir gömleği üzerinde test edilen bilyenin SEM görüntüsü ve EDS spektrum	106
Şekil 3.83 30° için çelik bilye altında test edilen kaplanmamış silindir gömleğinin SEM görüntüsü ve EDS spektrum	107
Şekil 3.84 30° için çelik bilye altında test edilen rGO kaplanmış silindir gömleğinin SEM görüntüsü ve EDS spektrumu	107
Şekil 4.1 Silindir honlama açısı 45° ile yapılan 3 adet performans test sonucu güç ortalamasının devire göre grafiği	112

Şekil 4.2 Silindir honlama açısı 45° ile yapılan 3 adet performans test sonucu moment ortalamasının devire göre grafiği	112
Şekil 4.3 Silindir honlama açısı 20° ile yapılan 3 adet performans test sonucu güç ortalamasının devire göre grafiği	113
Şekil 4.4 Silindir honlama açısı 20° ile yapılan 3 adet performans test sonucu moment ortalamasının devire göre grafiği	113
Şekil 4.5 Honlama açısı 30° ve rGO kaplama olan silindir ile yapılan 3 adet performans test sonucu güç ortalamasının devire göre grafiği	114
Şekil 4.6 Honlama açısı 30° ve rGO kaplama olan silindir ile yapılan 3 adet performans test sonucu moment ortalamasının devire göre grafiği	115
Şekil 4.7 Silindir honlama açısı 20°, 45°, ve 30° rGO kaplama olan silindirlerin güç testleri ortalamalarının devire göre grafiği	116
Şekil 4.8 Silindir honlama açısı 20°, 45° ve 30° rGO kaplama olan silindirlerin moment testleri ortalamalarının devire göre grafiği	117
Şekil 4.9 Metal Kesme cihazı	117
Şekil 4.10 Kesilen silindir kovanlarının Üst Ölü Nokta görüntüsü	119
Şekil 4.11 Kesilen silindir kovanlarının Üst Ölü Nokta bölgelerinin optik mikroskop görüntüleri	119
Şekil 4.12 Motor dinamometresinde test edilmiş 45° honlanmış silindirin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi	120
Şekil 4.13 Motor dinamometresinde test edilmiş 20° honlanmış silindirin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi	121
Şekil 4.14 Motor dinamometresinde test edilmiş 30° honlanmış rGO kaplı silindirin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi	122
Şekil 4.15 45° Test edilen 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	123
Şekil 4.16 20° Test edilen 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 anali	123
Şekil 4. 17 30° rGOkaplı test edilen motor silindir kovanının Ü.Ö.N (Üst Ölü Noktasındaki) yüzey analizi a) Optik Mikroskop, b) ve c) Elektron mikroskobu d) X-Ray e) Elementel analiz	124

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 5W-40 Sentetik motor yağının özellikleri	27
Tablo 2.2 Yeni test edilmemiş 100 Cr6 bilyenin kimyasal bileşimi	28
Tablo 2.3 Silindir malzemesinin (gri dökme demir) kimyasal analizi.....	29
Tablo 2.4 İçten yanmalı motor deneyleri ve koşulları	31
Tablo 3.1 Test öncesi bilyenin elementel analizi	34
Tablo 3.2 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindir gömleği üzerinde test edilen bilyelerin aşınma izi çapları.....	34
Tablo 3.3 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindir gömlekleri üzerinde test edilen bilyelerin aşınma izlerinin 2D ve 3D pürüzlülük değerleri	40
Tablo 3.4 20°, 30°, 40°, 45°, 60° test öncesi honlanmış silindir gömleklerinin 2D ve 3D pürüzlülük değerleri.....	46
Tablo 3.5 Çelik bilye altında test edilen 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış gömlek numunelerinin maksimum ve minimum aşınma izi mesafeleri.....	47
Tablo 3.6 Çelik bilye altında test edilmiş 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindir gömleklerinin 2D ve 3D pürüzlülük değerleri.....	53
Tablo 3.7 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindir gömlekleri üzerinde test edilen bilyelerin aşınma izlerinin 2D ve 3D pürüzlülük değerleri	55
Tablo 3.8 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış çelik bilye altına test edilmiş silindir numunelerinin aşınma izlerinin 2D ve 3D pürüzlülük değerleri	57
Tablo 3.9 20° honlanma için sürtünen parçaların aşınma izlerinin EDS ile analiz verileri	58
Tablo 3.10 Birinci test sonucunda 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindirlerin zamana göre sürtünme katsayısı verileri	61
Tablo 3.11 İkinci test sonucunda 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindirlerin zamana göre sürtünme katsayısı verileri.....	65
Tablo 3.12 Üçüncü test sonucunda 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindirlerin zamana göre sürtünme katsayısı verileri	69
Tablo 3.13 Kaplamasız ile rGO, CrCN, TiN ve DLC kaplı silindir gömleklerinin test öncesi 2D ve 3D pürüzlülük değerleri	77
Tablo 3.14 20° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayısı verileri	78
Tablo 3.15 30° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayısı verileri.	80
Tablo 3.16 40° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayısı verileri.	81
Tablo 3.17 45° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayısı verileri	83

Tablo 3.18 60° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayısı verileri	84
Tablo 3.19 Tüm açılara göre 20°, 30°, 40°, 45° ve 60° honlanmış silindirler üzerinde rGO nanokaplamanın sürtünme katsayıları verileri.....	86
Tablo 3.20 Kaplamasız ve RGO, CrCN, TiN ve DLC kaplı silindir gömlekleri üzerinde test edilen bilyelerin yatay ve dikey olarak ölçülen aşınma izi çapları	87
Tablo 3.21 Kaplamasız, RGO, CrCN, TiN ve DLC kaplı silindir gömlekleri üzerinde test edilen bilyelerin aşınma izlerinin 2D ve 3D pürüzlülük değerleri.....	93
Tablo 3.22 Çelik bilye altında test edilmemiş, kaplamasız, RGO, CrCN, TiN ve DLC kaplı silindir gömleklerinin maksimum ve minimum aşınma izi mesafeleri	94
Tablo 3.23 Çelik bilye altında test öncesi ve sonrası kaplamasız, rGO, CrCN, TiN ve DLC kaplı silindir gömleklerinin aşınma izlerinin 2D ve 3D pürüzlülük değerleri	100
Tablo 3.24 20°, 30°, 40°, 45°, 60° rGO kaplanmış silindir gömlekleri üzerinde test edilen bilyelerin aşınma izlerinin 2D ve 3D Pürüzlülük değerleri	103
Tablo 3.25 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış rGO kaplanmış çelik bilye altında test edilmiş silindir numunelerinin aşınma izlerinin 2D ve 3D pürüzlülük değerleri	105
Tablo 3.26 30° için kaplanmamış ve rGO kaplı silindir gömleği üzerinde test edilen bilyenin aşınma izlerinin EDS ile analiz verileri.....	106
Tablo 3.27 30° için kaplanmamış ve rGO kaplanmış silindir gömleğinin aşınma izlerinin EDS ile analiz verileri	108
Tablo 3.28 Testten önce silindir kovanı kaplamasının sertlik değerleri	109
Tablo 4.1 Silindir honlama açısı 45° ile performans testleri verileri	112
Tablo 4.2 Silindir honlama açısı 20° ile performans testleri verileri	113
Tablo 4.3 Silindir honlama açısı 30° ve rGO kaplama ile performans testleri verileri	114
Tablo 4.4 Silindir honlama açısı 20°, 45° ve 30° rGO kaplama olan silindirlerin ortalama güç ve moment testleri verileri	116
Tablo 4.5 Silindir kesme cihazına ait teknik özellik ve donanımlar	118
Tablo 4.6 Motor dinamometresinde test edilmiş 45°, 20°, 30° kesilmiş silindir numunelerinin aşınma izlerinin 2D ve 3D pürüzlülük değerleri	123
Tablo 4.7 45°, 20° ve 30° ile test edilen motor silindirlerinin sürtünen yüzeylerin aşınma izlerinin EDS ile analiz verileri	124

Motor Silindir Honlamasının ve Nanokaplamaların Tribolojik Yönden Motor Performansına, Aşınmasına ve Yağlanmasına Etkilerinin Deneysel Araştırılması

Veli UYSAL

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Emrullah Hakan KALELİ

İçten yanmalı motorlarda sürtünme kayıplarının en çok meydana geldiği yer segman ile silindir gömleği arasında olup tüm mekanik kayıpların % 20-40'ını kapsamaktadır. Eğer bu mekanik kayıplar %10 azaltılabilirse, taşıtın yakıt verimliliği yaklaşık %1,5-2,5 kadar artırılabilir. Bu kayıpları en aza indirmek için silindir gömlek yüzeyinin topografyasını honlama gibi daha iyi sonuçlar getiren bir yöntemle iyileştirmek önem arz etmektedir. Böylece aşınma ve sürtünmelerin azaltılması, motor ömrü ve dayanıklılığının artmasına neden olur.

Literatür araştırmalarına göre, çeşitli honlama teknikleri yüzey pürüzlülüğü parametreleri dikkate alınarak nümerik hesaplama (simülasyon) ve pim-disk veya pim-plaka gibi tribometre sürtünme testleri yapılmış, fakat farklı honlama açılarının tribolojik özellikleri ve avantajlarının, gerek tribometrede gerekse gerçek motor testlerinde incelenmediği tespit edilmiştir.

Bu tez çalışmasında motor silindir kovanında 20°, 30°, 40°, 45° ve 60° gibi farklı honlama açılarının işlenmesi, plato honlama yapılması, bu farklı açılarda farklı nanokaplamaların yapılması ile ortaya çıkan deneysel çalışmalar sonucunda; yağlamanın iyileştirilmesi, motor sürtünmesinin ve aşınmaların azaltılması, motor gücünün artırılması sağlanmıştır.

Bu farklı açılarda sırasıyla Titanyum Nitrür (TiN), Krom Karbon Nitrür (CrCN), Elmas Benzeri Karbon (DLC) ve İndirgenmiş Grafen Oksit (rGO) gibi nanokaplamalar yapılması, sürtünmelerin azaltılması, motor gücünün, motor ömrünün artırılması ile bilime ve ekonomiye önemli bir katkı sağlanmıştır.

Yağlamayı iyileştiren, sürtünmeyi ve aşınmayı azaltan daha düşük sürtünme ile en iyi açı ve mikro-nano pürüzlülük davranışı belirlenmiş, sürtünen yüzeyler ile katkı maddeleri de 2D-3D pürüzlülük dijital optik mikroskobu, SEM-EDX ve AFM analizi ile analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Plato honlama, en iyi açı, nanokaplama, pürüzlülük, sürtünme.



Experimental Investigation of the Effects of Engine Cylinder Honing and Nanocoatings on Tribological Engine Performance, Wear and Lubrication

Veli UYSAL

Department of Mechanical Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Emrullah Hakan KALELİ

Friction losses occur mostly between the piston ring and cylinder liner, and it covers 20-40% of all mechanical losses in internal combustion engines. If these mechanical losses can be reduced by 10%, the fuel efficiency of the vehicle can be increased by approximately 1.5-2.5%. In order to minimize these losses, it is important to improve the topography of the cylinder liner surface with a method that brings better results, such as honing. Thus, reducing wear and friction leads to an increase in engine life and durability.

According to the literature survey, various honing techniques have been used and the generated surfaces with various surface roughness parameters have been characterized using numerical calculation but the tribological properties and advantages of different honing angles have not been yet investigated in the literature using pin-on-plate tribometer friction tests.

In this thesis, processing plateau honing with different honing angles such as 20°, 30°, 40°, 45° and 60° on the engine cylinder sleeve, and making different nanocoatings at these different angles; improvement of lubrication, reduction of engine friction and wear, and increase of engine power have been provided, as a result of the experimental studies.

An important contribution to science and economy has also been made by making nanocoatings such as Titanium Nitride (TiN), Chromium Carbon Nitride (CrCN), Diamond-Like Carbon (DLC) and Reduced Graphene Oxide (rGO) at these different angles, reducing friction, increasing engine power and engine life.

The best angle and micro-nano roughness behavior with lower friction improving lubrication, reducing of friction and wear is determined and the rubbed surfaces as well as all additives were analyzed through 2D-3D roughness digital optical microscopy, SEM-EDX and AFM analysis.

Keywords: Plateau honing, best angle, nanocoating, roughness, friction.



1.1 Literatür Özeti

Silindir gömleği yüzeylerindeki honlama çizgilerinin varlığının, içten yanmalı motorlarda yağlamayı geliştirdiği, tortuları muhafaza ederek piston-gömlek sürtünmesini azalttıkları ve sonuç olarak yakıt ekonomisini ve motor ömrünü arttırdıkları bilinmektedir [1].

İçten yanmalı motorların yakıt ekonomisi ve egzoz emisyonu standartları da dahil olmak üzere motor performansı ve dayanıklılığı konusunda şimdiki ve gelecekteki standartları yerine getirmeleri beklenmektedir. Bu talepler için kilit konulardan biri, termomekanik iç kayıplar, aşınma ve yağlama yağı tüketiminin sınırlandırılmasıdır. Bu gibi durumlar, piston segmanı-silindir ikilisinin tribolojik davranışı ile birlikte koşullandırılır. Çeşitli ileri teknolojilerin yanı sıra, geleneksel bir honlama işlemi hala silindir gömleği yüzey mikro yapısını şekillendirmede standart teknolojidir. Silindir gömlekleri, krank ve eksantrik mili yatakları, supap yuvası ve kılavuzları, supap gövdesi, yüksek basınç pompası elemanları gibi otomotiv endüstrisi bileşenleri, benzersiz bir yüzey dokusu gerektiren yağlamaya ihtiyaç duyar. Bu durum, iki işlem sonucunda elde edilen plato honlama ile sağlanır. Honlama; büyük aşındırıcı tane boyutuna sahip ön honlama veya kaba honlama ve daha sonra küçük aşındırıcı tane boyutunda finisaj (parlatma) veya ince yani plato honlamadır. Kaba honlama, belirli geometriyi derin şekilde sıyırır. Derin sıyrıkları sağlayan kaba honlama arkasından pürüzsüz yüzey elde etmek için plato honlama yapılır [2].

Silindir kovanları farklı imalat yöntemleri ile üretilir, imal edilir ve işlenir. Honlama, silindirik formda iş parçasının, yüzey pürüzlülüğünü azaltarak, yüzey kalitesini artırmak amacıyla uygulanan son işlemdir.

Motor performansı ve motor kullanım ömrü, honlanmış yüzeyin kalitesinden doğrudan etkilenir. Yapının kalitesi, pürüzlülük ve honlama ile üretilen yüzey görünümü, piston-segmanın kovan üzerindeki sürtünmesini belirler.

Honlama işlemi, 10-100N/cm² gibi düşük basınçlarda honlama taşları ile malzemeye uygulanan işleme prosesidir [3]. Başka bir deyişle honlama, aşındırıcı bir taşı kontrollü

bir hat boyunca metal malzemeye sürterek metal malzeme üzerinde hassas bir yüzey oluşturan aşındırıcı talaşlı işlem sürecidir ve bir yüzeyin geometrik formunu iyileştirmek için kullanılır [4]. Honlanmış yüzeyler; yağlayıcıları tutabilen, çalışma özelliklerini iyileştirebilen ve tribolojik olarak parçaların ömrünü uzatabilen çapraz kanallar vasıtasıyla iyi tribolojik özellikler, yüksek temas oranları ve düşük pürüzlülük gösterir. Yüksek yüzey kalitesine ek olarak uzun stroklu honlama teknolojisi, yüksek boyutlu ve doğru yapıda iç silindirik yüzeylerin üretilmesini mümkün kılar. Bu yöntem kaymalı yataklarda, silindir gömleklerinde ve motor silindirlerinin ince işlenmesinde kullanılır [5].

İşleme süreci esnasında honlama taşları mekanik veya hidrolik tahrikli sistemler vasıtasıyla malzeme ile temas halindedir. Honlama kafaları, etrafına eşit aralıklarla yerleştirilmiş 3-12 adet honlama taşı olan gövdeden ve aşındırıcı olmayan kılavuzlardan oluşur. Bu aşındırıcı olmayan kılavuzlar; bronz, dökme demir ve sinterlenmiş malzemelerden imal edilmiştir [3,52].

Honlama işlemi, uygulama tipine bağlı olarak birkaç belirli sınıfa ayrılabilir. Başlıcaları boyuna strok honlama, kısa strok honlama, merkez daldırma honlama, profil honlama, yüzey honlama ve dişli honlama teknikleridir. Uzunlamasına strok honlama işlemi, biyel kolu büyük ve küçük uçlarında, silindir duvarlarında, fren yataklarında, makaralı rulman kılavuz deliklerinde uygulanabilir. Eksenel strok honlama işlemi, kısa işlem süresi, yüksek talaş kaldırma kapasitesi, yüksek silindiriklik ve boyutsal doğruluğa sahip olma açısından avantajlara sahiptir [6,53].

Honlama işleminde iki temel hareket meydana gelir. Bunlardan biri salınım yapan eksenel hareket, diğeri de honlama taşlarının dairesel olarak dönmesini sağlayan dönme hareketidir. Honlama işlemi sırasında, hidrolik veya mekanik sürüş sistemi honlama taşlarına baskı yapmaz. Başka bir deyişle, honlama taşları bu süre zarfında yer değiştirmez. Honlama işleminde, önce honlama kafası malzemenin içine girer, ikinci olarak hidrolik veya mekanik olarak tahrik edilen honlama taşları genişler, böylelikle honlama taşları ve malzeme temas halinde kalır. Malzeme ile temas eden honlama taşları, dönme ve öteleme hareketlerinin bir sonucu olarak talaş kaldırma sürecini üretir. Kesme parametreleri hassas bir şekilde ayarlanmalı, gerilmelerden ve termal yüklerden kaynaklanan ölçüm hataları en aza indirilmelidir, çünkü honlama işlemi son yüzey işleme sürecidir. Bu amaçla, çalışma yüzeyi sıcaklığı 100°C'yi aşmamalıdır [3]. Bu nedenle,

kesme sıvısı tam olarak ayarlanmalıdır. Kesme sıvısı ayrıca talaşları yüzeyden çıkarmak, malzemenin kirlenmesini önlemek gibi görevlere de sahiptir.

Honlama işlemi sırasında temas basıncı artarsa, kesme aletlerinin delme kapasitesi artar. Bu durumda, honlama taşı daha büyük gerilimlere maruz kalır, temas basıncı arttıkça, aşınmayı, yüzey pürüzlülüğünü, talaş miktarını artıracak, silindir duvarlarının eğriliği hafifçe iyileşmeye başlayacak ancak daha sonraki süreçte bu daha güçlü bir meyil ile kötüleşmeye başlayacaktır [6, 54].

Eksenel strok honlama işleminde honlama kafası, bağlı olduğu shaft ile hem dönme hem de öteleme hareketleri yapar. Bu sırada, honlama kafası aşağı doğru hareket ederken, honlama taşının köşeleri, malzeme yüzeyinde dönme yönü ve salınım yönü boyunca çizikler oluşturur. Daha sonra yukarı doğru hareket sırasında da enine yönünde aynı sonuç ortaya çıkar. Sonuç olarak, honlama çizgileri, honlama işleminde karakteristik olarak oluşan honlama çapraz tarama açısı üretir. Honlama çapraz tarama açısı, iki enine honlama izi ile üretilen bir açıdır. Honlama işlemi sırasında oluşan yarıklar bir yağ deposu olup mikro yatak görevi görür [7, 46, 55]. Honlama çapraz tarama açısı, silindir duvarı ile segman arasındaki tribolojik özellikleri doğrudan etkiler. Bu tarama açısı; honlama kafasının salınım hızı ve honlama kafasının dönme yönündeki hızını değiştirmek suretiyle değiştirilebilir. Salınım hızı azalır veya dönme hızı artarsa, honlama açısı daha küçük bir değere taşınır [8, 65].

Eksenel strok honlama işlemi sırasında geleneksel yöntemler kullanılırsa, malzeme üzerinde genellikle sabit honlama çapraz tarama açısı üretilir. Bununla birlikte, hareket yönünün değiştirilmesi sırasında, honlama kafasının doğrusal hızlanmasının doğal bir sonucu olarak daha küçük honlama açısı elde edilir. Bunun nedeni, salınım yönü değişirken besleme oranı hızının sıfır değerine düşmesi ve daha sonra zıt yönlü hızlandırılmasıdır [6].

İçten yanmalı motorların silindir gömleklerinin honlanmasında genellikle iki farklı işlemden bahsetmek mümkündür. Bunlar kaba honlama, ince honlama yani plato honlamadır. Kaba yani pürüzlü honlama işlemi sırasında işlenecek malzeme yüzeyinin vadi ve tepe pürüzlülük değerleri artar. Kullanılan honlama taşlarının özelliklerine bağlı olarak yüksek yüzey pürüzlülüğü değerlerine sahiptir. Plato honlama işlemi, içten yanmalı motorların silindir gömleklerinin honlanmasındaki son işlemdir. Plato honlama işlemi ile silindirin tepe pürüzlülük değerleri ciddi şekilde azaltılabilirken, silindirin vadi

pürüzlülük değeri fazla değişmez. Bu şekilde, vadi pürüzlülüğü hacimleri yağlama yatağı rolünü üstlenir. Diğer yandan, tepe pürüzlülüğünün azalmasına bağlı olarak, piston-segman ile silindirin etkili temas alanı artacak, yüzey basıncı ve aşınma özelliği de azalacaktır.

Yüzey pürüzlülüğü değerlerini sayısal olarak değerlendirmek için çeşitli yöntemler vardır. Genel olarak, aritmetik ortalama ile pürüzlülüğün negatif ve pozitif sapmaları hakkında bir öngörü sahibi olunursa sağlıklı bir karşılaştırma yapılabilmektedir. Bu nedenle, aritmetik ortalamanın veya vadi dip-tepe pürüzlülüğünün incelenmesi, plato honlanmış yüzeylerin pürüzlülük değerlerinin ve yüzey özelliklerinin incelenmesinde fayda sağlayacaktır [9].

Plato honlama, pik pürüzlülük değerlerinde ve pik pürüzlülük malzeme konsantrasyonlarında önemli azalmalar sağlar. Plato honlama özelliği ile belirli bir bölümün malzeme yoğunluğu daha kararlı hale gelir ve yüzey bir bütün olarak daha kararlı hareket eder. Bu, birlikte çalışan iki parça arasındaki temas riskinin azaldığı ve temas halinde daha geniş bir yüzey alanı üzerinde temasın meydana geldiği anlamına gelir, böylece yüzey basıncı ve aşınma azalır. Bununla birlikte, vadinin pürüzlülük değerleri değişmez ve yağlayıcı destek etkisi hala devam eder [10].

Plato honlama işlemi, içten yanmalı motorlar için silindir gömleklerinin finisajında yaygın olarak kullanılmaktadır. Plato honlamanın, dokusunda çok daha az değişiklik yapılması gereken silindir kovanının faaliyete başlaması sebebiyle maliyetli olan alıştırma süresini önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir. Plato honlanmış yüzeyleri daha iyi anlamak, kontrol etmek ve nihayetinde “mühendislik” yapmak için, bu dokuyu kapsamlı bir şekilde karakterize etmek gereklidir [11].

Aşınmaların ve sürtünmelerin azaltılması, silindir honlanmasının temel hedeflerdendir. Bu hedefler, delikli veya daha iyisi çapraz honlama ile karşılanabilir. Bu işlem plato honlama ile kıyaslanabilir ve mevcut honlama makinelerinde uygulanabilir. Bu noktada honlanmış silindir kovani yüzeyleri özel bir konuma sahiptir. Kovan sürtünme yüzeyleri arasında metal ile metal temasını önlemek için yeterli miktarda motor yağı bulundurulmalıdır [12, 65, 66, 67, 68, 69].

Siqi M. ve diğerleri çapraz honlama açılarının (47° 'den 65° 'ye) artmasıyla piston segmanı ile silindir gömleğin arasındaki sürtünme katsayısının arttığını göstermiş ve çalışmamızı desteklemiştir. Honlama çapraz açısının azalmasıyla (65° 'den 58° 'ye) honlamanın

yönlendirilmesi, yağ kamasının yük taşıma kapasitesini arttırdığından sürtünen çiftin kayma işlemi sırasında yağlama yağı akışına katkıda bulunmaktadır [13].

Tez çalışması geniş bir çerçevede yapılmıştır. Sadece yüzeyde honlama açılarının değişimi değil bu açılarda çeşitli nano kaplamalar da yapılmıştır. Yüzeylere sırası ile TiN, CrCN, DLC ve rGO gibi nananokaplamalar uygulanmıştır.

Böylece gerek honlamanın gerekse nanokaplamanın etkileri ortaya konularak sürtünme ve aşınmaların azalıp azalmadığı tespit edilmiştir.

Bu kayıpları en aza indirmek için silindir gömlek yüzeyinin topografyasını honlama gibi daha iyi sonuçlar getiren bir yöntemle en iyi açığı bulmak önem arz etmiştir. Böylece aşınma ve sürtünmeler, motor ömrü ve dayanıklılığının artmasıyla azaltılmıştır.

Nano kaplama, motor bileşenleri arasındaki aşınmayı azaltarak otomotiv motorunun performansını ve ömrünü artırmaya yardımcı olmaktadır, aynı zamanda aşınma direncini, yağlamayı, sürtünme katsayısını, sertliği, kaplanmış honlama silindir duvarına uygunluğu, yüzey pürüzlülüğü ve topografyayı iyileştirmek için uygulanır [14].

Tribolojik uygulamalarda kaplamaların kullanılması, sürtünmeyi azaltmak ve alt tabaka yüzeyini aşınmadan korumak için etkili ve nispeten ekonomik bir önlemdir. Bununla birlikte, belirli bir tribolojik uygulama için uygun kaplamayı seçmek önemlidir. Kaplama sisteminin tribolojik tepkisi birçok faktöre; kaplama özellikleri, karşılık, alt tabaka, arayüz ve çalışma koşullarına bağlıdır. Kaplama seçimine yardımcı olacak genel bir kural yoktur. Tribolojik kaplamaların seçimi için geniş bir yelpaze sağlayan birçok yeni kaplama tekniği ve yeni kaplamalar sürekli olarak geliştirilmektedir. Bu durum aynı zamanda, kaplama kullanıcıları için bir sorun teşkil etmektedir: belirli bir tribolojik uygulama için sayısız olasılık arasından en uygun kaplama bulunması gerekir. Mevcut yöntem, zaman alıcı ve pahalı olan deneme yanılma yöntemidir ve muhtemelen bazı daha iyi kaplamalar gözden kaçırılmamalıdır [15].

Kaplamalarla yüzey modifikasyonu, aşınma, korozyon ve oksidasyon gibi yüzey özelliklerini iyileştirmek için önemli bir adım haline gelmiştir [16]. Karşılıklı hareket eden bileşenler arasında en az sürtünme kuvvetine sahip olmak esastır. Yüksek sürtünme katsayısı, motor ömrünü etkileyen daha yüksek aşınma oranına yol açar. Ayrıca mekanik sürtünme, içten yanmalı motorların yakıt ekonomisi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Motorun genel verimliliğini artırmak, yağ tüketimini azaltmak ve motorun ömrünü uzatmak için bu sürtünme kayıplarını azaltmaya acil ihtiyaç vardır [17]. Bu deneysel

çalışmada, Diesel motor silindir gömleği numunelerinin yüzeyine rGO (İndirgenmiş Grafen Oksit), CrCN (Krom Karbon Nitrür), TiN (Titanyum Nitrür) ve DLC (Elmas Benzeri Karbon) kaplamaları uygulanmıştır.

Shailesh Kumar Singh ve diğerleri, piston segman malzemesi üzerindeki krom nitrür (CrN) kaplamanın gömlek malzemesine karşı aşınma davranışını incelemiştir. Bilindiği gibi piston segmanları ve silindir gömlekleri imalatında yaygın olarak kullanılan dökme demir alaşımıdır. Kaplama, fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemiyle sağlanmıştır. Aşınma testi Pim-Disk tribometresinde yapılmış; kaplanmış numune, silindir gömleği malzemesi olan bir disk üzerinde sürtünmüştür. Kaplama, segman malzemesinin aşınmaya karşı direncine olumlu etkileri olan yüzey sertliğini artırmıştır. Sürtünme katsayısı, yük ve hız art arda artırıldığında yükselmiş, silindir malzemesini aşındırmıştır [18].

Eleonora Santecchia ve diğerleri fiziksel buhar biriktirme (PVD) kullanılarak elde edilen titanyum nitrür bazlı kaplamaların aşınma direncini gözden geçirmiştir. Bir malzemenin bir karşı gövdeye karşı sürtünürken aşınma performansı, bir tribometrede yapılan ölçümlerle değerlendirilmektedir. Çelik karşı gövdeye doğru sürtünürken, aşınma izi üzerine aşınma kalıntıları bulaşır. Bununla birlikte, TiN ile kaplama aşınma mekanizmaları oksidasyon ve yıpratıcı aşınma nedeniyle başarısız olmuştur. Yıpratıcı aşınma, oksidasyon ve mikro olukların oluşumuna neden olmuştur [19].

Magdalena Lepicka ve arkadaşları, iki model metalik malzeme üzerinde kalan titanyum nitrür kaplamaları üzerinde çalışmışlardır: 316LVM paslanmaz çelik ve Ti6Al4V titanyum alaşımı. Aşınma testi sırasında TiN kaplama aşınmış, altlık yüzeyinde oluşan tribofilmler koruyucu görevini sürdürmüştür. TiN kaplı çelik için, temas bölgesinde kaplamanın sert parçacıklarının varlığından dolayı alt tabakanın yıpratıcı aşınmasının neden olduğu oluklar sadece yüksek ölçekli büyütmeyle görülmüştür. Bununla birlikte, en ciddi hasar, sert bir TiN kaplamanın ayrılmış parçalarının birikmesi tarafından yapılmıştır. Bilyenin incelenen diske göre yer değiştirmesinden dolayı hem kaplamada hem de alt tabakada çeşitli tiplerde gerilmeler oluşmuştur. Temas yüzeyine bitişik alanlarda, numunenin dönme hareketi, çizilme testlerinden iyi bilindiği üzere kaplama deformasyon mekanizmalarına neden olur çekme gerilmeleri nedeniyle kaplama da çatlamış, ancak çelik yüzeyi aşındırmıştır [20].

Aşınma testlerinde, TiN kaplamanın yaygın aşınma mekanizmaları tribokimyasal aşınma, aşınma kalıntılarının oksidasyonu ve karşı malzemeye transferidir. Bununla birlikte, DLC kaplama, alt tabakadan ayrılan küçük film parçalarının neden olduğu sürtünmeyle aşınmaya uğramıştır. Yapılan çizik testlerinde, DLC kaplama için, optik mikroskopi ve SEM gözlemleri temelinde alt tabakada bir deformasyon bulunmuştur, oysa TiN kaplama için çatlama kaydedilmiştir. Çizilme testlerinde yetersiz performansına rağmen, TiN, alt tabakaya DLC'den daha iyi yapışma sağlamıştır. WC-Co bilyesinden malzeme aktarımı da gözlenmiştir, ancak bilyenin aşınması, diskin aşınmasından daha fazladır. Kaplamasız 316 LVM çeliğinin şiddetli aşınması gözlemlenmiştir. Aşınma ürünlerinden bazıları plastik olarak deforme olup talaş benzeri alanlar oluşturmuştur. Yorulma aşınmasına neden olan siyahımsı, oksitlenmiş aşınma artıkları aşınma izine yapışıp birikme eğilimi göstermiştir [21].

Nor Azmmi Masripan ve diğerleri çizik sertlik testi yapmış ve sürtünme testi sırasında en üst aşınmış yüzeyde oluşan dönüştürülmüş tabakanın sertliğini bulmuştur. Bununla birlikte, dönüştürülmüş DLC tabakası çok sert olduğu için yüksek sıcaklıkta sürtünme artışı olmuştur. Bu durumda, dönüştürülmüş katman, iki sert kayan yüzey arasında ayırıcı katman olarak hareket edemez. Pim ve diskin iki sert yüzeyi arasında daha fazla temas vardır, bu da sınır yağlamada meydana geldiği gibi sürtünme katsayısını artırmıştır [22].

Bir binek otomobilin içten yanmalı motorunda sürtünmenin üstesinden gelmek için gereken enerjiyi azaltmada, çok düşük sürtünme katsayısına sahip ve aşınmaya karşı yüksek dirençli kaplamalar sağlamak gereklidir. DLC kaplamaları, otomobil motor parçaları uygulamasında düşük sürtünme katsayıları ve mükemmel tribolojik özellikleri ile bilinmektedir. DLC kaplamaların sertliği 5 ila 40 GPa arasında değişmektedir [23].

Otomotiv motorlarında sürtünmeyi azaltmak ve dayanıklılığı artırmak için elmas benzeri karbon (DLC) kaplamalar kullanılır. Çok çeşitli mekanik, fiziksel ve tribolojik özellikler sağlayan birçok DLC film çeşidi vardır. Filmler son derece sert olabilir (>90 GPa), belli yüzeylere karşı yüksek sürtünme katsayıları verebilir ve kaplanmış yüzeylerde yüksek aşınma direnci sergileyebilir [24].

Alüminyumun DLC kaplamalarına karşı elektro-triboloji testleri, pim-disk konfigürasyonunda gerçekleştirilmiştir. Elektro-tribolojik veriler, arıza modları hakkında önemli bilgiler sağladığından, kaplama geliştirme ve optimizasyonu çerçevesinde potansiyel olarak faydalı olduğunu göstermiştir [25].

Elektroforetik biriktirmede (EPD), bir sıvı içinde asılı kalan parçacıklar, süspansiyona elektrik alanı uygulanarak (elektroforez) bir elektrota doğru hareket etmeye zorlanır. Daha sonra parçacıklar elektrotlardan birinde toplanır, uyumlu bir tortu oluşturur ve üzerine bağlanır. İşlemin sadece bir toz kompaktı verdiği ve bu nedenle elektroforetik çökeltmeyi, tamamen yoğun bir malzeme elde etmek için sinterleme veya kürleme gibi bir yoğunlaştırma adımı takip etmesi gerekmektedir. Süspansiyondaki parçacıklar, eğer bir yük taşıyorlarsa, yalnızca elektrik alanına tepki olarak hareket edecektir. Parçacıklar üzerindeki yükün gelişebileceği dört mekanizma tanımlanmıştır: (a) sıvıdan katı parçacık üzerine iyonların seçici adsorpsiyonu, (b) iyonların katı fazdan sıvıya ayrılması, (c) adsorpsiyon veya yönelim parçacık yüzeyindeki dipolar moleküllerin sayısı ve (d) iş fonksiyonundaki farklılıklardan dolayı katı ve sıvı faz arasındaki elektron transferi [26].

Bu tez çalışmasında, üç PVD kaplamanın, CrCN, TiN ve DLC'nin motor silindir gömleği üzerindeki etkisini, dökme demir motor silindir gömleği üzerine uygulanan rGO'nun EPD metodu ile kaplanmasıyla karşılaştırılması incelenmiştir.

1.2 Tezin Amacı ve Özgünlüğü

Bu tezin temel amacı, en iyi silindir yüzey honlamasını ve silindir yüzeyindeki nanokaplamayı tribolojik testler yoluyla analiz etmek ve incelemektir. En iyi honlama ve kaplama çerçevesinde, yağlamayı iyileştirmek, hareketlerdeki sürtünmeyi azaltmak, aşınma, yapışma, korozyon, sürtünme, yüzey yorgunluğu gibi aşınma mekanizmalarını azaltmak için plato honlama yöntemi uygulanmıştır. Bu tez çalışmasının orijinalliği burada ortaya çıkmaktadır; bu öğeleri iyileştirmek için honlama açıları 20° ile 60° arasında değiştirilmiş ve farklı honlama açılarındaki işlenmiş yüzeyler aynı zamanda nano kaplanmıştır. Tribometre ile sürtünme katsayısı ölçümü ve motor testleri ile de güç ve tork ölçümleri yapılmıştır. Sürtünme katsayısındaki azalma ile güç, tork gibi motor performanslarındaki artışa hangi honlama açısının ve hangi açıda hangi nano kaplamanın etkisi olduğu belirlenmiştir. Yüzey analizleri (optik mikroskop, dijital profilometre ile pürüzlülük, SEM-EDX) yapılmış ve en iyi honlama açısı ile nano kaplamanın aşınmaya etkisi kanıtlanmıştır. Böylece bilime katkıda bulunulmuştur.

1.3 Hipotez

Honlama işlemi genellikle işlenmiş iş parçalarına yüzey kalitesini ve boyutsal doğruluğu iyileştirmek için son bir işleme işlemi olarak uygulanır.

Honlama açısının motor gömleği sürtünmesi üzerinde büyük etkisi vardır. Honlama açısının azalması, yağlayıcılar ve kayan çiftler arasında hızlı yüzey reaksiyonu sağlayan daha iyi yüzey bozunması oluşturan pürüzsüz ve reaktif bir yüzey oluşturur.

Honlama işleminin yanında kaplamalar ile yüzey modifikasyonu, aşınma, korozyon ve oksidasyon gibi yüzey özelliklerini iyileştirmek için önemli bir adım haline gelmiştir. Eşleşen ve/veya ileri geri hareket eden bileşenler arasında mevcut olan daha düşük sürtünme kuvvetlerine sahip olmak esastır. Yüksek sürtünme katsayısı, motor ömrünü etkileyen daha yüksek aşınma oranına yol açar. Ayrıca, mekanik sürtünmenin içten yanmalı motorlarda yakıt ekonomisi üzerinde önemli bir etkisi vardır. Motorun genel verimliliğini artırmak, yağ tüketimini azaltmak, motor ömrünü artırmak ve sürtünme kayıplarını azaltmak için nanokaplamalar da yapılmaktadır.

Bu tez çalışması için şekil 2.1’de gösterilen Anadolu Motor grubundan Antor 6 LD 400 Diesel motoru seçilmiştir. Motorun kovanı ıslak kovan olup sökülebilir ve değiştirilebilir niteliktedir.

2.1 Deneyisel Çalışma Hazırlığı

Doktora tezi kapsamında hedeflenen nihai amaca ulaşmak için izlenecek yöntemler 2 aşamada gerçekleşmiştir. Bunlarda ilki tribometre testleri, ikincisi ise motor testleri olup bu test basamakları aşağıdaki gibidir:



Motor	Özellikler
Model diesel	6 LD 400
Silindir hacmi	395 cm ³
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 sarfıyatı	220 gr/BG.saat
Yağ tüketimi	13 gr/saat
Karter yağ kapasitesi	1,2 lt
Kuru (boş) ağırlık	45 kg

Şekil 2.1 Tribometre ve içten yanmalı motor deney setinde kullanılan Anadolu Motor Antor 6 LD 400 Diesel motoru ve teknik özellikleri

2.1.1 Silindir Honlama İşlemi

Anadolu Motor Grubu'nun verilerine göre Antor LD400'ün orijinal (normal) honlama açısı 45° 'dir. Anadolu Motor Grubu'nda bulunan henüz honlanmamış ham silindir gömleği temin edilmiş silindir gömleğinde, farklı açılardaki honlama; dikkatlice ve hassas bir şekilde 20 °, 30 °, 40 ° ve 60 ° açılarda plato honlama olarak yapılmıştır. Böylece 5 farklı honlama açısı test edilmiştir. 2D (Ra, Rt, Rp, Rz, Rv, Rc, Rq, Rsk, Rku, RSm) ve 3D (Sa, Sq, Ssk, Sp, Sv) yüzey parametreleri kullanılarak ayrıntılı yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yapılmış, topografyanın kalitesini bilhassa Ra ve Sa parametreleri değerlendirilerek belirlenmiştir.

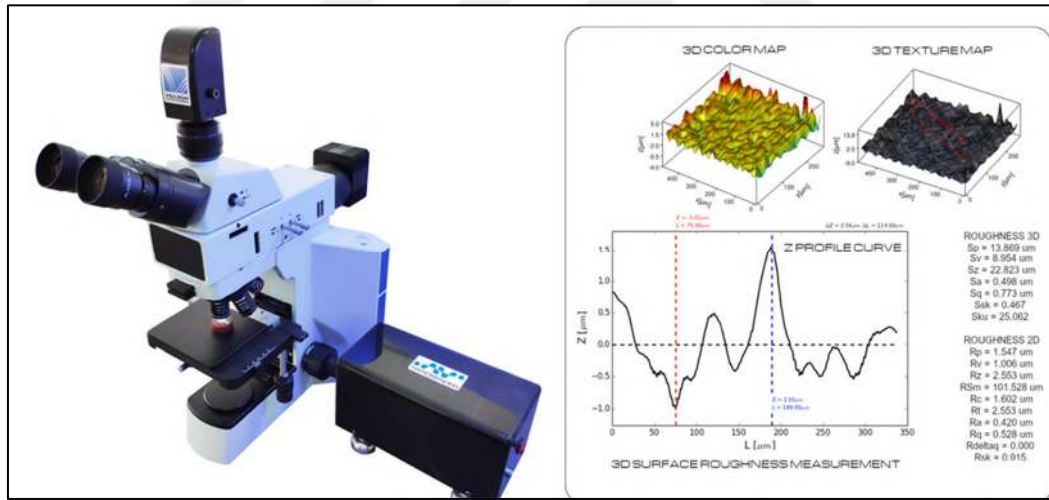
2.1.2 Temel 2D Ölçüm Parametreleri

Pürüzlülük profilinin aritmetik ortalama sapması (R_a), pürüzlülük profilinin toplam yüksekliği (R_t), Pürüzlülük profilinin maksimum profil tepe yüksekliği (R_p), Pürüzlülük profilinin maksimum yüksekliği (R_z), pürüzlülüğün maksimum profil vadi derinliği (R_v), pürüzlülük profil elemanlarının ortalama yüksekliği (R_c), pürüzlülük profilinin ortalama karekök sapması (R_q), pürüzlülük profilinin eğriliği (R_{sk}), pürüzlülük profilinin basıklığı (R_{ku}), pürüzlülük profil elemanlarının ortalama genişliği (R_{Sm}). Bunlardan en önemlisi R_a 'dır. Sonuçlarda değerlendirmeye alınmıştır.

2.1.3 Temel 3D Ölçüm Parametreleri

Aritmetik ortalama yükseklik (S_a), karekök ortalama yüksekliği (S_q), eğim (S_{sk}), Basıklık (S_{ku}), maksimum yükseklik (S_z), maksimum tepe yüksekliği (S_p), maksimum vadi derinliği (S_v). Üç boyut parametresi olarak kullanılmakta ve bunlardan en önemlisi S_a 'dır. Sonuçlarda değerlendirmeye alınmıştır.

2.1.3.1 Mikroskobik İncelemeler



Şekil 2.2 Psaron nanobender 2D-3D optik mikroskop profilometre yazılımı

Şekil 2.2’de gösterildiği gibi mikroskobik incelemeler Psaron nanobender 2D-3D optik mikroskop profilometre yazılımı kullanarak yapılmıştır.

- NANOENDER, herhangi bir optik mikroskobu 3D yüksek çözünürlüklü optik profilometreye dönüştürmek için kullanılan bir araçtır.
- Kullanıcı dostu tasarımıyla mevcut bir mikroskobu 5 dakikada 3D optik profilometreye dönüştürür.

- Mikroskobunuza otomatik odaklama ve 3D görüntüleme yetenekleri ekler. Bu sayede tüm 3D/2D yüzey pürüzlülüğü parametreleri ölçülür ve 3D yüzey grafiğinde gösterilir.

2.1.3.2 Yazılım

- 2D/3D ölçülen pürüzlülük parametreleri: 2D (R_p , R_v , R_z , RS_m , R_c , R_t , R_a , R_q , R_{ditaq} , R_{sk}) > 3D (S_p , S_v , S_z , S_a , S_q , S_{sk} , S_{ku}) 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. Son işleme için ikincil yazılım gerekmez.
- Kağıt kalitesinde grafik çıktısıyla birlikte 3D yüzey haritalama ve CAD dosyasının 3D baskı için STL formatında hazırlanması.
- Z koordinat belleği boyunca 1000 nokta ile numunenin farklı bölgelerde otomatik konum değişikliğiyle analiz edilmesi.
- Hızlı otomatik odaklama ile 2D/3D görüntüler elde etmek için zaman atlamalı deneyler oluşturma.

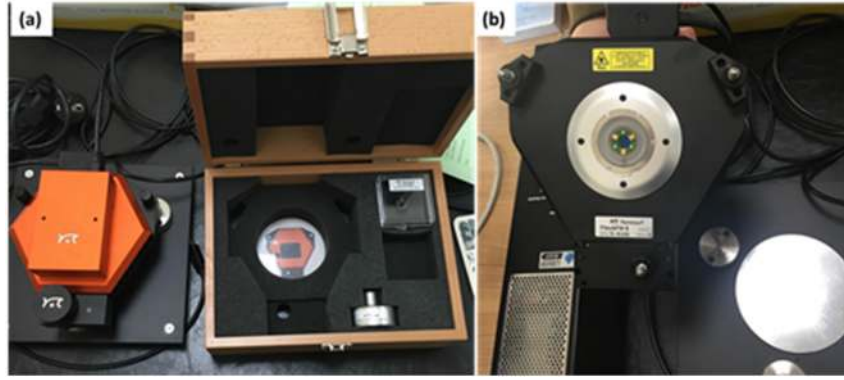
2.1.3.3 Donanım

- 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)

2.1.3.4 Desteklediği Aygıtlar

Her türlü üstten ışıklı trinoküler metal mikroskobu. Anabilim Dalımızda bulunan Psaron yazılımı trinoküler metal mikroskobuna monte edilerek ışık mikroskobu 2D-3D optik dijital mikroskopa dönüştürülmüş, ölçümler yapılmıştır.

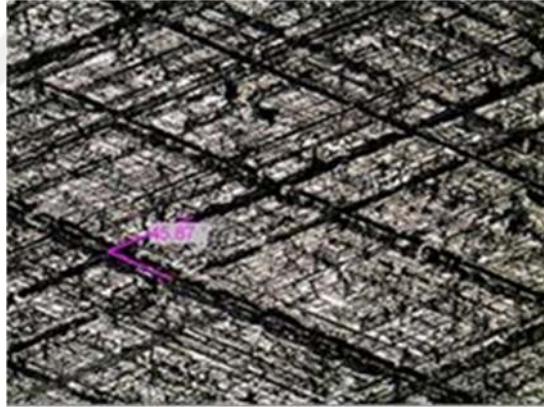
2.1.4 Nanoskobik İncelemeler (AFM)



Şekil 2.3 Nanosurf Flex AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu) (a) Atomik kuvvet mikroskobu genel görüntüsü, (b) Atomik kuvvet mikroskobu konsol muhafazası

Şekil 2.3 Nanosurf Flex AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu)'nu göstermektedir. Test öncesi ve sonrası farklı honlama açıları ve nanokaplamalar 2D olarak Ra 3D olarak Sa veileri ile kıyaslanmıştır.

2.1.5 Silindir Numunelerinin Hazırlanması



Şekil 2.4 Orijinal honlama açısı 45° olan Antor motoru

Antor motorlarının orijinal honlama açısı 45°'dir (Şekil 2.4). İlk etapta tribometre testleri için (silindir çapı 86 mm) Antor 6 LD 400 motoruna göre daha geniş olan, yeni (silindir çapı 102 mm) Antor 4 LD 820 motoruna ait değiştirilebilir kuru gömlek kullanılmıştır. Daha geniş silindir çapının kullanılmasının sebebi; Tribometrede, deney sırasında, segman-silindir ikilisinde sınır yağlama koşullarında yüzey temasının uygun sağlanmasıdır. Aksi takdirde yüzeyde gelişigüzel sürtünme ve aşınma çizgileri elde edilmektedir.



Şekil 2.5 Antor LD 400 motorunun farklı açılarda honlanacak yüzeyi



Şekil 2.6 Antor LD 400 motorunun farklı açılarda nanokaplanacak yüzeyi

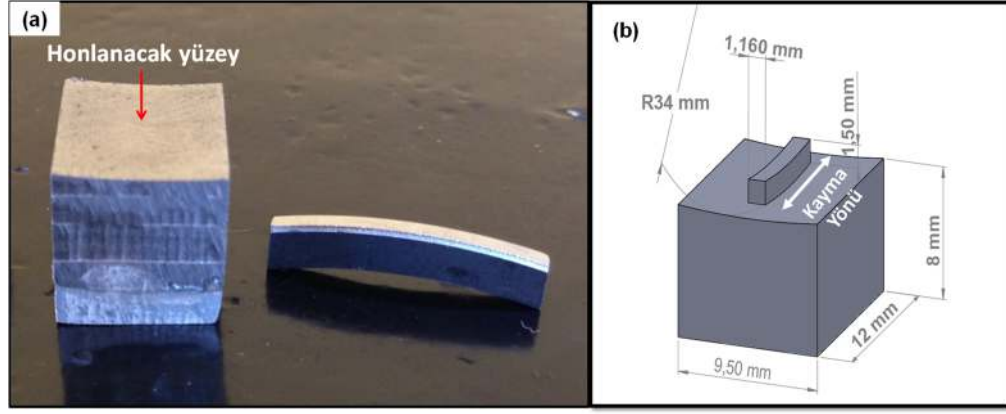
Antor LD 400 motorunun yeni (kuru silindir gömleği ham gömleği, honlanmamış) yedek parça olarak satın alınmıştır. Şekil 2.5 ve 2.6'da gösterildiği gibi kaplanacak yüzey plato honlanmıştır. Silindir iç çapı 86 mm ve strok 77 mm'dir.



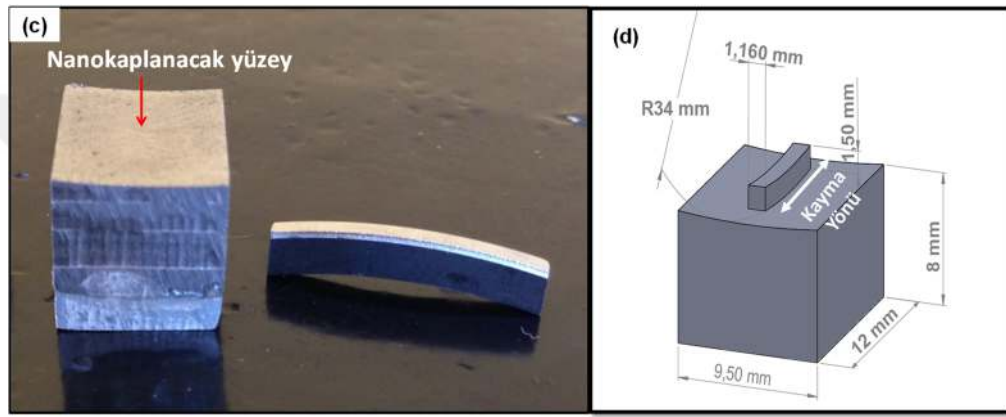
Şekil 2.7 Silindir numunelerinin kesilmesi

Bu gömlek (20 °, 30 °, 40 ° ve 60 °) gibi 4 farklı açıda honlanmış ve silindir gömleği numuneleri Şekil 2.7’de gösterildiği gibi 10X10X13 mm ölçülerinde kesilmiştir. Silindir çapının daha büyük kullanılmasının nedeni, tribometre testlerinde sınır yağlama koşulları altında piston segmanı ile silindir gömleği arasındaki uygun yüzey temasıdır. Aksi takdirde, yüzeyde rastgele sürtünme ve aşınma çizgileri elde edilir. Yüzey temas alanı, en iyi honlama açısı ve dokusunu bulmak için yapılan deneysel çalışmanın başarısı için önemlidir. Bu 4 farklı honlama açısı, tribolojik deneyler için orijinal honlama açısı (45 ° açı) ile karşılaştırılmıştır.

Silindir kovan test numuneleri kuru kesme yöntemi ile hassas bir şekilde kesilmiştir. Honlanmış yüzeylere zarar vermeden Türkiye İstanbul’da CNC freze proses teknolojisi kullanılarak Dünya Kalıp limited’de kesim işlemi hassas bir şekilde yapılmıştır. Numune sıcaklığı göz önünde bulundurulmuş ve ısı tarafından indüklenen silindir gömleği olası malzeme özelliği değişikliklerinden dolayı kesme işlemi sırasında sıcaklığı kontrol edilmiştir. Kesme işlemi sırasında yüzey sıcaklığı kızılötesi dijital termometre ile kontrol edilmiş ve yapılan ölçümlerde yüzey sıcaklığının 49°C’yi geçmediği görülmüştür.

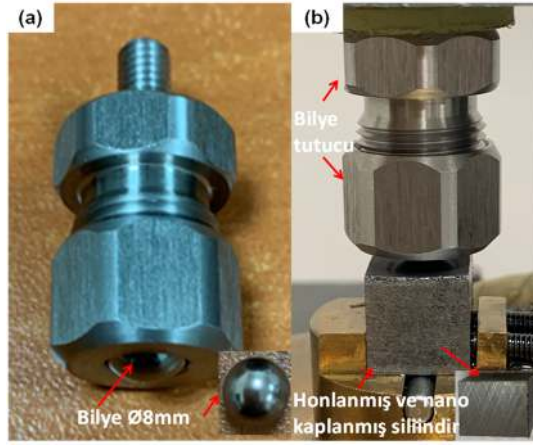


Şekil 2.8 Tribometre testleri için honlanacak yüzeyde çalışacak segman-silindir ikilisi

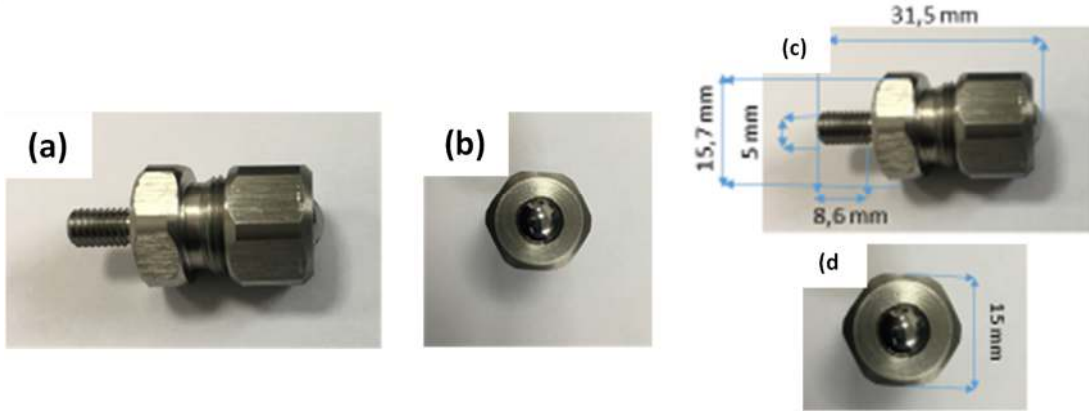


Şekil 2.9 Tribometre testleri için nanokaplanacak yüzeyde çalışacak segman-silindir ikilisi

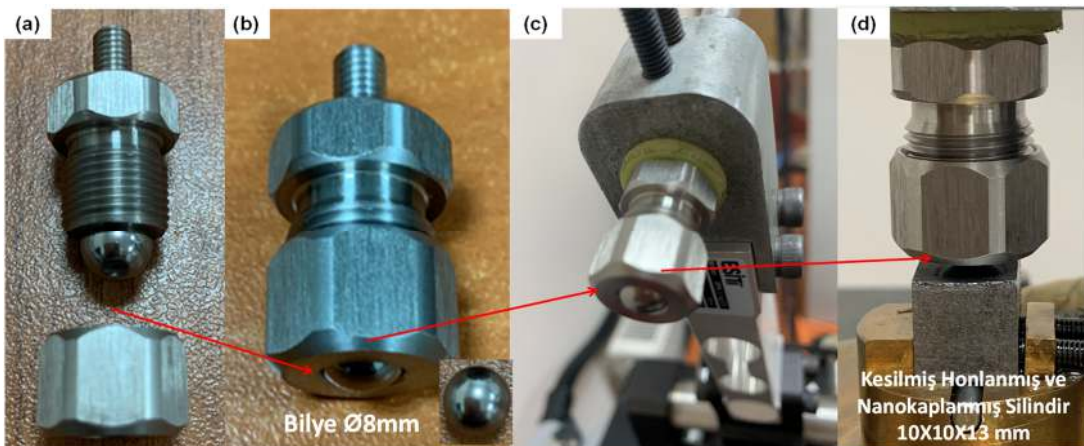
Şekil 2.8 ve 2.9 Tribometre testleri için honlanacak ve nanokaplanacak yüzeyde çalışacak segman-silindir ikilisini göstermektedir. Segman-silindir ikilisi testlerinden vazgeçilmiştir. Olumlu sonuçlar alınamamış, tam karşılaştırma yapılamamıştır. Bunun sebebi bilhassa segmanın tutucuda oturma konumunda ki mikron mertebesinde oynamalar/farklılıklar temas noktasında sonuçları etkilemiştir. Bu yüzden bilye-silindir ikilisi kullanılmıştır.



Şekil 2.10 Bilye-silindir ikilisi a) Bilye tutucu ve bilye b) Bilye-silindir ikilisi konfigürasyonu



Şekil 2.11 Tribometre testleri için üretilmiş özel bilye tutucusunun (a) ve (b) Yandan ve üstten görünüşü c), d) Ölçüleri



Şekil 2.12 Çelik bilye ve (10X10X13mm) ölçülerinde kesilmiş honlanmış ve nanokaplanmış silindir konumları

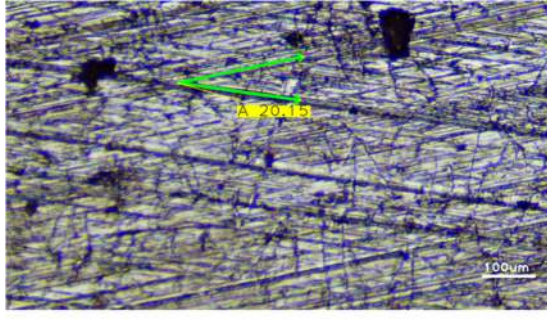
Farklı honlama açıları ve nanokaplanmış testlerde daha hassa ve noktasal temas sonuçlar alabilmek için segman silindir ikilisi yerine bilye-silindir ikilisi (Şekil 2.10) kullanılmıştır. Şekil 2.11 Tribometre testleri için üretilmiş özel bilye tutucusunun ölçülerini, Şekil 2.12 Çelik bilye ve (10X10X13mm) ölçülerinde kesilmiş honlanmış ve nanokaplanmış silindir konumlarını göstermektedir.

2.1.6 Silindir Numunelerinin Honlanması

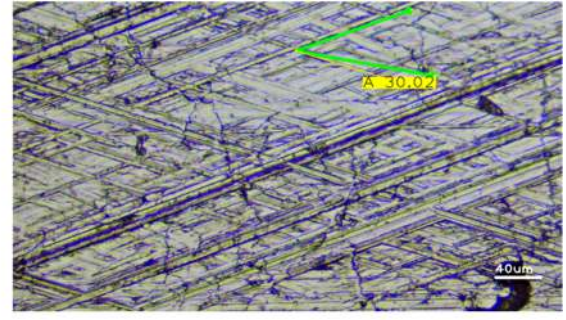


Şekil 2.13 Ham kovanın honlama işlemleri

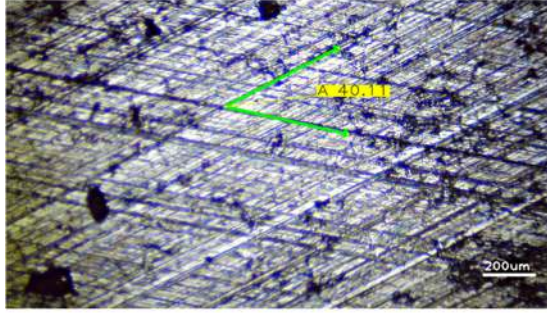
Orijinal silindir kovanı honlama açısı 45° 'dir. Ham kovan, İstanbuldaki “Anadolu Motor” firması tarafından temin edilmiş olup 20° , 30° , 40° , 60° honlama açıları için firmada honlanmıştır. Şekil 2.13’deki Fotoğraflarda 20° honlama açısı işlemi örneği gösterilmektedir.



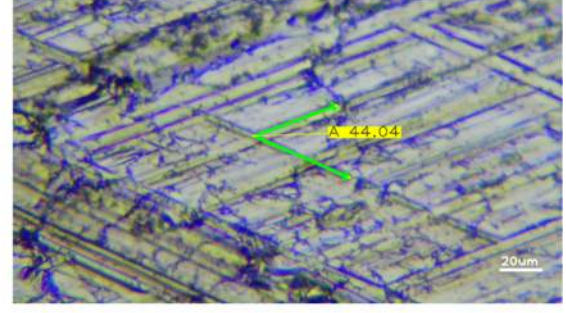
Honlama açısı 20°



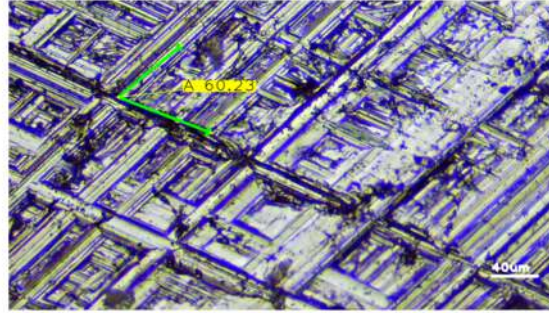
Honlama açısı 30°



Honlama açısı 40°



Honlama açısı 45°



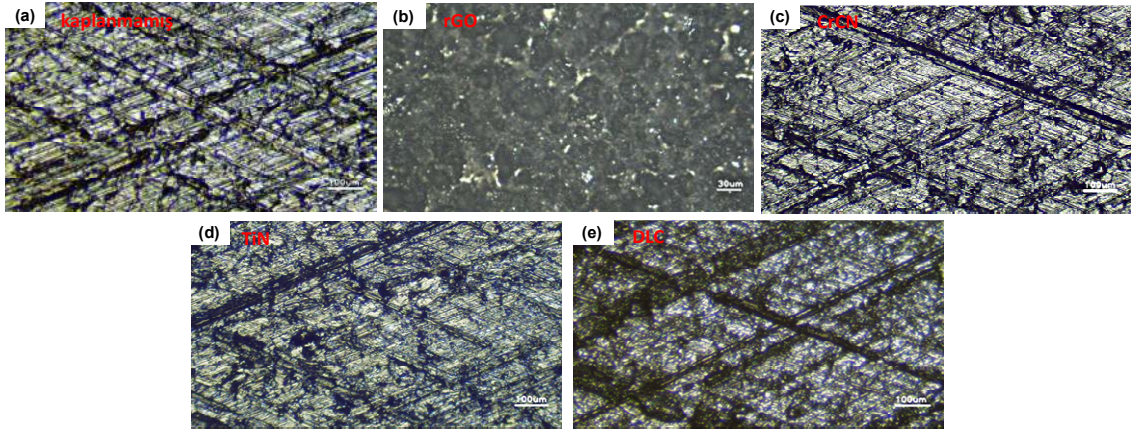
Honlama açısı 60°

Şekil 2.14 20°, 30°, 40°, 45° ve 60° honlanmış silindirlerin optik mikroskop görüntüleri

“Anadolu Motor” grubu tarafından 20°, 30°, 40°, 45° ve 60° olmak üzere işlenmiş honlama açıları dijital optik mikroskopda ölçülüp doğrulanmıştır (Şekil 2.14).

2.1.7 Silindirlerin Nanokaplama İşlemi

Silindir numunelerinin hazırlanmasında gösterildiği gibi silindir gömleği (20°, 30°, 40°, 45° ve 60°) gibi 5 farklı açıda honlandıktan sonra silindir gömleği numuneleri 10X10X13 mm ölçülerinde kesilmiştir. Yüzey temas alanı, en iyi honlama açısı ve dokusunu bulmak için yapılan deneysel çalışmanın başarısı için önemlidir. Bu 4 farklı honlama açısı, tribolojik deneyler için orijinal honlama açısı Şekil 4’de gösterilen 45° honlama açısı ile karşılaştırılmıştır. Bu yüzeyler nano kaplanmıştır.



Şekil 2.15 a) Kaplanmamış yüzeye uygulanan b) rGO c) CrCN d) TiN e) DLC nananokaplamalar

Şekil 2.15’de gösterildiği gibi kaplanmamış, İndirgenmiş grafen oksit (rGO), krom karbon nitrür (CrCN), titanyum nitrür (TiN), elmas benzeri karbon (DLC) gibi nananokaplamalar 20°, 30°, 40°, 45° ve 60°deki honlanmış silindir yüzeyinde uygulanmıştır.

İndirgenmiş Grafen Oksit (rGO) kaplama, Makine Fakültesi Otomotiv Anabilim Dalı laboratuvarında 21 mA, 23W ve 1200V’de 4 dakika boyunca güç kaynağı tarafından kontrol edilen elektroforetik biriktirme işlemi ile motor silindir gömleği üzerine uygulanmıştır.

CrCN, TiN ve DLC kaplamalar, KAPCO kaplama Ltd.-İstanbul TÜRKİYE (<http://www.kapco.com.tr/tr>) adlı yüksek kaliteli kaplama firmasında fiziksel buhar biriktirme (PVD) işlemi ile motor silindir gömleği üzerine uygulanmıştır. Şekil 2.16 PVD kaplama cihazını göstermektedir. Testten önce PVD kaplamalar üzerinde herhangi bir adhezyon testi yapılmamıştır. Amacımız, honlanmış yüzeylere zarar vermeden çok hassas bir şekilde kesilmiş motor gömleği numuneleri üzerindeki kaplamaları karşılaştırmaktır. Tüm kaplamalar başarılı olmuştur.



Şekil 2.16 PVD kaplama cihazı

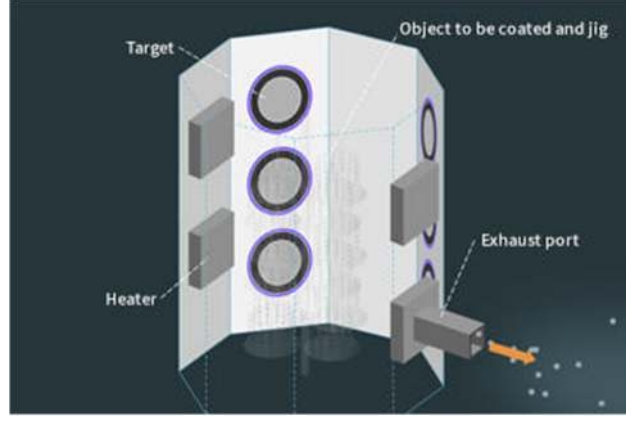
2.1.7.1 Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) Kaplama Metodu

Ticari amaçlı ilk PVD takım kaplama uygulaması Balzers tarafından 1979 yılında gerçekleştirilmiştir. İlk olarak bir HSS matkap ve kılavuz takımı kaplanmış olup, yöntemin uygulanışı daha sonra diğer takımlara da yaygınlaştırılmıştır. PVD kaplama uygulamaları, 1980'lerin başından beri endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. PVD yöntemi, uygulanma kolaylığı, taban malzemenin mikro yapısına zarar vermemesi, ölçüsel tolerans değişikliğine gerek duyulmaması vb. özelliklerinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teknik, vakum altında bulundurulmuş malzemelerin buharlaştırılarak veya sıçratılarak atomların yüzeyden kopartılması ve kaplama yapılacak yüzeye atomsal veya iyonik olarak biriktirilmesi esasına dayanır [76].

PVD teknikleri üç ana grup altında incelenebilir:

- 1) Isıtma (buharlaştırma),
- 2) Dağlama (sıçratma),
- 3) Kaplama soğutma ve havalandırma (plazma)

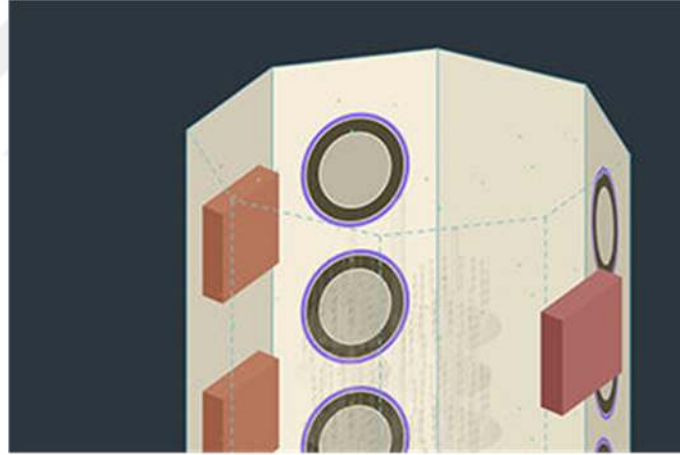
oluşturmaktır. Bu teknikleri birbirinden ayıran noktalar ise; buharlaştırmanın ayrı yöntemlerle yapılması veya kaplanacak parçaya vakum odasına göre negatif potansiyel uygulama (BIAS) ve plazma kullanımı gibi uygulamalardır. Farklı teknikler, kaplamanın yapısı, özellikleri ve birikme hızı gibi parametreleri yoğun olarak etkilemektedir [77, 80].



Şekil 2.17 Kaplanacak numuneyi yerleştirme işlemi

Kaplanacak Numuneyi yerleştirme işlemi Şekil 2.17’de gösterilmiştir. Proses fırınının (haznenin) içi, kaplamanın etkilenmediği seviyeye (taban basıncı) kadar vakumla boşaltılır. Fırında izin verilenden daha fazla hava kalırsa, sonraki ısıtma işlemi sırasında iş parçasının yüzeyinde bir oksit filmi oluşur ve bu da zayıf adhezyona yol açabilir.

2.1.7.1.1 Isıtma (Buharlaştırma) İşlemi



Şekil 2.18 Isıtma (buharlaştırma) işlemi

Şekil 2.18’de Isıtma işlemini göstermektedir. İş parçasının yüzeyine yapışan yabancı maddeler (esas olarak su) buharlaştırılır. Az miktarda su bile zayıf adhezyona neden olabilir, bu nedenle fırın sıcaklığı uygun şekilde kontrol edilir ve tüm iş parçaları tamamen ısıtılır.

2.1.7.1.2 Dağlama (Sıçratma) İşlemi

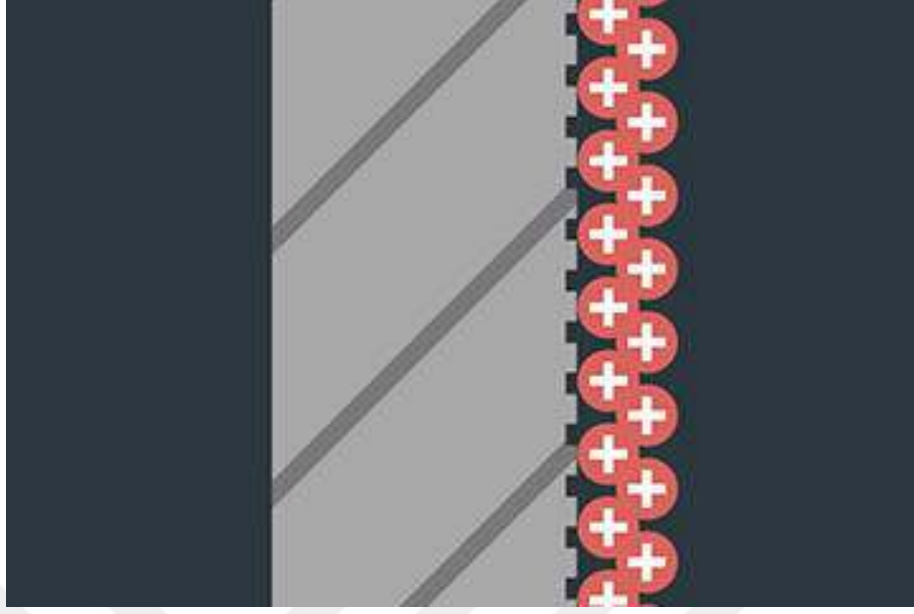


Şekil 2.19 Dağlama (sıçratma) işlemi

Şekil 2.19’da dağlama işlemini göstermektedir. İş parçasının yüzeyi, yabancı maddeleri (esas olarak oksit film) uzaklaştırarak argon iyonları tarafından atılır. PVD kaplama cihazı, güçlü argon gazı plazması üreterek ve onu üniform şekilde kontrol ederek ideal dağlama etkisine ve mükemmel film ile kaplamasını sağlar.

Fiziksel buhar biriktirme işlemlerinde düşük taban malzeme sıcaklıkları ve yüksek oranda refrakter kaplama malzemeleri kullanımı sebebiyle yüksek iç gerilmeler oluşmaktadır. Ayrıca yüksek enerjili iyon bombardımanı nedeniyle iç gerilmede artış meydana gelebilmektedir. Bu işlem refrakter malzemelerin biriktirilmesinde uygun bir kaplama tekniğidir. Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD), kısmen iyonize olmuş metal buharının üretimi, belirli gazlarla reaksiyonu ve taban malzeme üzerinde belirli bir bileşime sahip ince bir film oluşturarak metal bazlı sert kaplamaların üretilmesi için bir yöntemdir [78, 79].

2.1.7.1.3 Kaplama Soğutma Ve Havalandırma (Plazma) İşlemi



Şekil 2.20 Kaplama soğutma ve havalandırma (plazma) işlemi

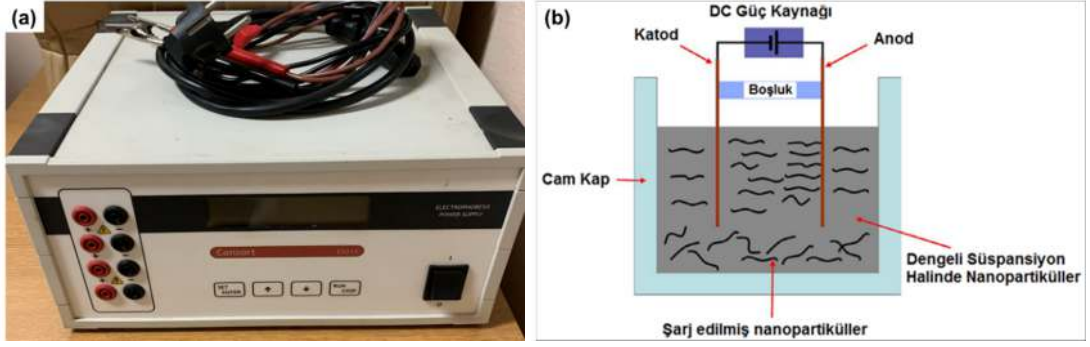
Şekil 2.20’de görüldüğü gibi kaplama işlemi için metal malzeme ile proses fırını (bölme) arasında, metal malzemeyi bir plazma haline buharlaştıran ve filmi oluşturan elemanları iyonize eden bir ark deşarjı gerçekleştirilir. Daha sonra, numuneye negatif voltaj uygulayarak, iyonize elemanlar onu yüksek hızda etkiler ve bir film oluşturur. Kullanılan metal malzemenin türüne ve işleme koşullarına bağlı olarak, aşınma ve ısı direnci dahil olmak üzere çeşitli film özellikleri elde etmek mümkündür. Ek olarak, çok elemanlı bir alaşım film veya lamine film oluşturmak için çok sayıda metal malzeme kullanılabilir. İşlem fırınına enjekte edilen gazın türü ve miktarı değiştirilerek karbon gibi ilave gaz elementleri ile biriktirme mümkündür. Soğutma ve havalandırma işlemi için soğutmayı desteklemek amacıyla proses fırınına azot veya helyum püskürtülebilir. Kaplanan numunenin türüne bağlı olarak renk bozulması (tav renginin yapışması) meydana gelebileceğinden, hava enjekte edildiğinde dikkate alınmalıdır. Bu sistemde plazma içinde hareket eden iyonların kinetik enerjileri 40-100 eV arasındadır. Bunun sonucunda diğer tekniklere oranla daha yüksek biriktirme hızlarına ulaşılmaktadır. Damlacık sayısı azaldıkça üretilen kaplamalarda yapışma (bonding) ve aşınma özelliklerinde gelişme gözlenmektedir. Damlacıkların olumsuz etkilerinin görüldüğü uygulamalar optik ve mikro elektronik kaplamalardır. Optik kaplamalarda damlacıklar saçılma merkezleri olarak davranır ve optik kaybı artırır [77].

Yüzey mühendisliğinin amacı; belirli endüstriyel uygulamalar için en ekonomik ve en iyi yüzey özellik tasarımlarını sağlayacak uygun teknolojilerin ortaya konmasını sağlamaktır. Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) yöntemleri kullanılarak üretilen ince seramik film kaplamalar, malzemenin aşınmaya karşı dayanımını yükselten etkili bir yöntem olmasının yanısıra uygun kaplama parametreleri seçildiğinde taban malzemenin kullanım ömrünü ve ticari değerini önemli ölçüde etkilemektedir.

Kaplamanın kalınlığına göre yüzeye uygulanan kaplamalar ince film kaplamalar ve kalın film kaplamalar olarak ikiye ayrılır. İnce film kaplamalar kalınlıkları 1-10 µm arasında olan kaplamalardır ve kaplamanın birikmesi atomik düzeyde gerçekleşmektedir. Kalın film kaplamalarda ise birikme büyük kütlelerin transferi ile gerçekleşmektedir. PVD kaplamalar, sertlik, aşınma ve korozyon direncinin artırılması amacıyla yaygın olarak kullanılmasına rağmen, yüksek işlem maliyeti, sınırlı kaplama alanı, düşük kaplama hızı, yüksek yüzey sertliği gibi bazı dezavantajlara da sahiptir [77].

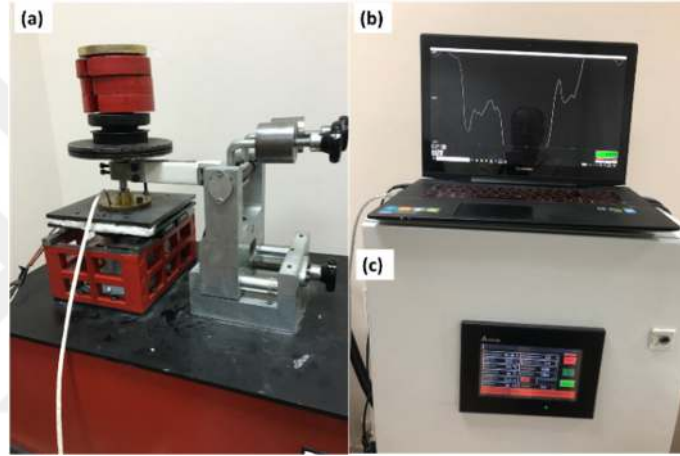
2.1.7.2 Elektroforetik Biriktirme (EPD) İle Kaplama Metodu

Yıldız Teknik Üniversitesi otomotiv laboratuvarında honlanmış silindirler elektroforetik biriktirme (EPD) işlemiyle indirgenmiş grafen oksit ile kaplanmıştır. Bu işlem için Şekil 2.21(a)'da gösterilen “Consort Ev 3150” marka güç kaynağı ile kaplama sağlanmıştır. Çalışma prensibi Şekil 2.21(b)'dedir. Silindir malzemesi dökme demir olması nedeniyle yüksek voltajlı güç kaynağına gereksinim vardır. Bu cihaz maksimum 1200V, 500mA ve 300W'lık bir güce sahiptir. Kaplama metodu elektroforetik biriktirme yöntemidir. Bu tip kaplama ile ilgili ön çalışmalar yapılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. rGO, grafen oksitten indirgenir. Grafen oksit, modifiye edilmiş Hummer yöntemi ile sentezlenir. Daha sonra ağırlıkça %0.25 grafen çözeltisi elde etmek için damıtılmış suya ilave edilir. Magnezyum nitrat ($Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$), izopropanol ve grafen solüsyonu ultrasonik temizleyicide 1 saat karıştırılarak EPD solüsyonu elde edilir. Elde edilen EPD çözeltisinin, grafen levhalar üzerinde kalan artık polar oksijen içeren grupların varlığı nedeniyle EPD işlemi için yeterince kararlı olduğu tespit edilir. Pozitif yüklü magnezyum iyonlarını grafen levhalara bağlamak için magnezyum nitrat tozu eklenir. rGO, 1 saatlik sonikasyon yardımıyla 500 ml grafen-izopropanol çözeltisine 25 mg magnezyum nitrat ($Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) eklenerek süspansiyon halinde yüklenmiş olacaktır. Daha sonra hazırlanan grafen- Mg^{2+} çözeltisi (0.05 mg/mL) EPD işlemi için elektrolit olarak kullanılır [70].

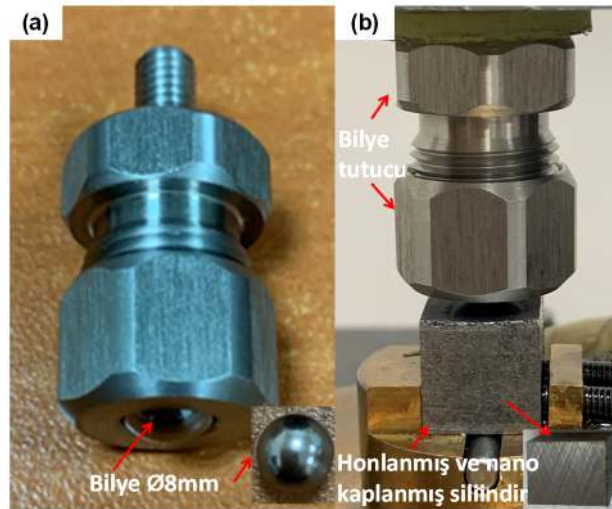


Şekil 2.21 (a) “Consort Ev 3150” marka güç kaynağı (b) Güç kaynağı ile çalışma prensibi

2.1.8 Tribometre Testleri



Şekil 2.22 Otomotiv A.B.D. bünyesinde bulunan gidip-gelme (Reciprocating) hareketi yapan tribometre. (a) Tribometre (b) Sürtünme kuvveti eğrisi örneği (c) Dijital sıcaklık kontrol panosu



Şekil 2.23 Bilye-silindir ikilisi konfigürasyonu: (a) Tutucuya yerleştirilmiş bilye (b) Bilye tutucu ve honlanmış/nano kaplamalı silindir kovanı konfigürasyonu

Tablo 2.1 5W-40 Sentetik motor yağının özellikleri

5W-40 Sentetik motor yağının bazı 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

Çapraz honlanmış ve kaplanmış silindir gömleklerinin tribolojik performansı, onaylı test parametrelerine göre bazı özellikleri Tablo 2.1'de verilen 5W-40 sentetik motor yağı ile, özel kurulmuş gidip gelme hareketi yapan tribometre kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Şekil 2.22. Otomotiv A.B.D. bünyesinde bulunan gidip-gelme (Reciprocating) hareketi yapan tribometreyi göstermektedir. Tribometre bir servo motor tarafından çalıştırılır ve bir monitöre doğrudan bağlı bir veri kaydedici kullanılarak yük hücresinden saniyede 800 veri (değer) toplanır. Her strok 0,8 sn sürmektedir (saniyede 640 veri) ve bu şekilde ölçüm sırasında aşınma izinin ortalama sürtünme katsayısı CoF'u hesaplanabilmektedir. Tüm testler 100 °C'da sınır yağlama koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Tribolojik ölçümler sırasında normal yük 60,5 N olarak ayarlandı. 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 kaplanmış silindir numunelerinin yüzeyine motor yağından üç damla damlatılmıştır. Daha sonra, 100CrMn6 çelik bilye, Şekil 2.23'de 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 program kullanılarak özel bir yazılımla tasarlanmıştır. Son CoF ortalama eğrisini zamanın bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Bu kurulumda silindir, sabit bir bilye altında kaymaktadır. Tribometrenin detayları ve özellikleri daha önce önceki çalışmalarımızda [27, 28, 29, 30, 31] açıklanmıştır. Tribometre testi sonuçlarını elde ederken yük hücresi doğruluk oranı % 0.06'dır. Kullanılan yük hücresi modeli ESIT SPA 3kg olup tek noktadan belli bir alanda tartım yapabilen yük hücresidir. 160 Hz ölçüm, 800 Hz veri çıkışı bulunmaktadır. Yüksek hassasiyete sahip olan SPA'nın moment kuvvetinden etkilenmeme özelliği vardır. Alüminyum gövdesi ile korozyona dayanıklıdır. Ölçüm bölgesi kimyasal malzeme ile izole edilmiş olan SPA yük hücreleri IP55 sınıfında toza ve suya karşı korumalıdır. 3, 6,

10, 20, 30, 35 ve 50 kg kapasitelerde üretilen SPA yük hücreleri 30x30cm ebatlarına kadar platform basküllerde kullanılabilir. Tek yük hücreli platform baskülleri, bantlı-rulolu sistemler ve proses ölçümlerinde kullanılır. Verilerin aktarılmasında Esit elektronik firmasının veri kaydedici Data Logger'ı kullanılmıştır. Windows işletim sistemine uygun olup Data Logger arabirimi RS232C/RS485 çevirici ile yapılmakta olup Microsoft Excel'e tüm verileri aktarmaktadır.

Tablo 2.2 Yeni test edilmemiş 100 Cr6 bilyenin kimyasal bileşimi

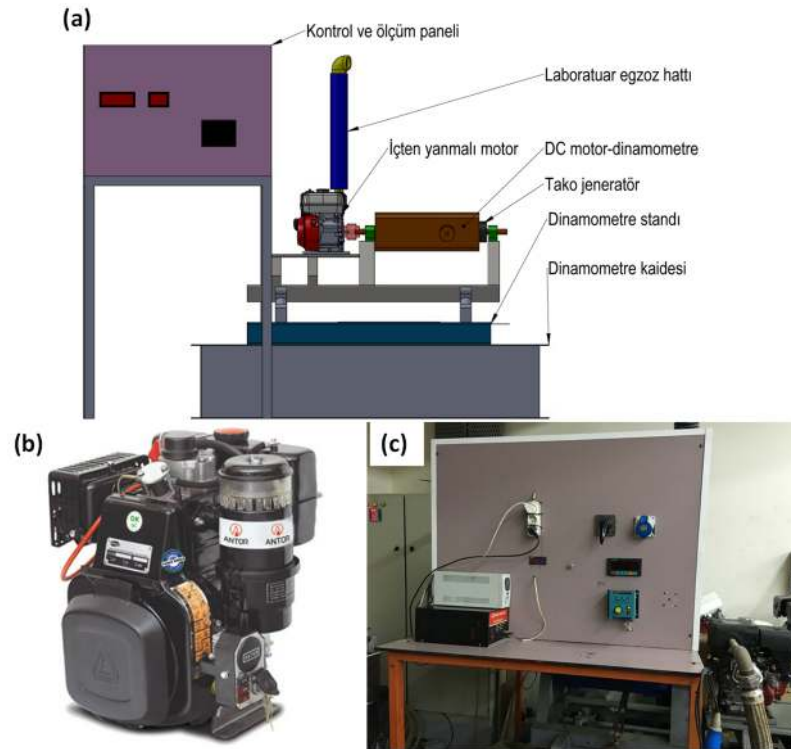
Numune adı	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Cu
Düşük alaşımlı martensitik krom çelik (100 Cr6)	0.95-1.05	0.15-0.35	0.25-0.45	0.025 max	0.025 max	1.40-1.65	0.30 max	0.08 max	0.20 max

Tablo 2.3 Silindir malzemesinin (gri dökme demir) kimyasal analizi

Element	%	Element	%	Element	%
Karbon C	3.2000	Silisyum (Si)	2.59000	Demir (Fe)	92.44082
Fosfor (P)	0.33319	Kükürt (S)	0.02737	Mangan (Mn)	0.70000
Molibden (Mo)	0.02700	Nikel (Ni)	0.01900	Chromium (Cr)	0.43700
Kobalt (Co)	0.00343	Bakır (Cu)	0.11600	Alüminyum (Al)	0.00010
Titanyum (Ti)	0.08497	Vanadyum (V)	0.01401	Niyoyum (Nb)	0.00297
Kalay (Sn)	0.00359	Magnezyum (Mg)	0.00045	Wolfram (W)	0.00010

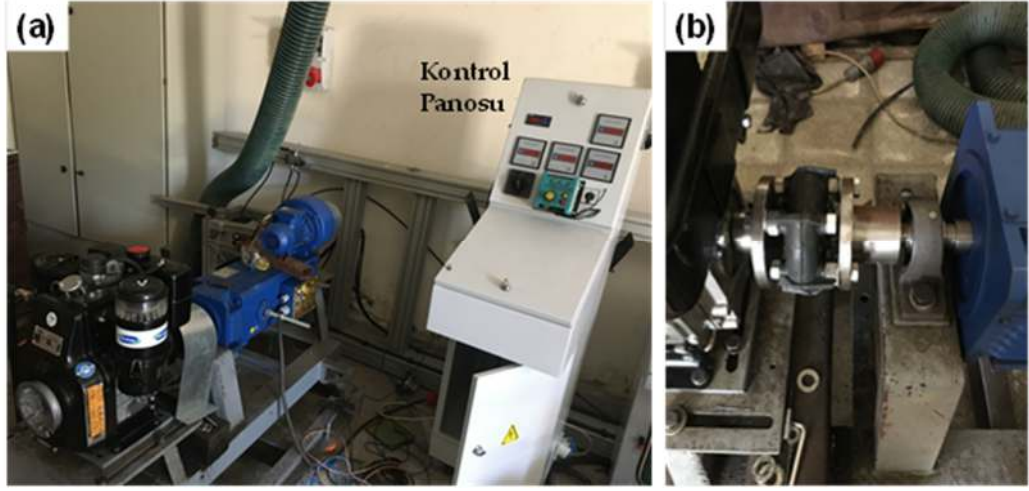
Tablo 2.2, düşük alaşımlı martensitik krom çelik (100 Cr6) bilyenin, Tablo 2.3 ise dökme demir silindir malzemesinin kimyasal bileşimini göstermektedir.

2.1.9 Motor Testleri



Şekil 2.24 Antor 6 LD Diesel motor ve test düzeneği (a) Test düzeneğinin şeması (b) İçten yanmalı motor (c) Deney düzeneği

Şekil 2.24 de gösterilen içten yanmalı motor test düzeneği; hem dinamometre hem de motor ömrü testleri için tasarlanmıştır.



Şekil 2.25 Antor LD 400 diesel motoru test düzeneği (a) Dinamometre (b) Kaplin bağlantısı



Şekil 2.26 Motor dinamometre testi

Şekil 2.25 ve Şekil 2.26 Antor LD 400 Diesel motoru için test düzeneği, dinamometre ve kaplin bağlantısı ile motor dinamometre test düzeneğini göstermektedir.

Tablo 2.4 İçten yanmalı motor deneyleri ve koşulları

Yapılan Motor Testleri	
Performans testleri	Motor ömrü testleri
Performans testleri: Güç (kW), moment (Nm)'dir	50 saat ömür testi, moment ve motor devri ISO 8178-4'e göre belirlenerek yapılmıştır.

Tribometre deneysel sonuçlarına dayanarak motor testi yapılmıştır. Motor testleri motor performans testleri motor ömür testleridir. Tablo 2.4 'de motor testleri ayrıntıları verilmiştir.

Tribometre testlerinden sonra motor testleri yapılmıştır:

- 1) Orijinal silindir honlama açısı 45° ile,
- 2) Tribometre testleri neticesinde en düşük sürtünme katsayısını veren en iyi honlama açısı ile,
- 3) Tribometre testleri neticesinde en düşük sürtünme katsayısını veren en iyi nanokaplamalı honlama açısı ile,

Shell Helix Ultra 5W-40 tam sentetik ticari motor yağı kullanılarak testler yapılmış, karşılaştırılmıştır.

3

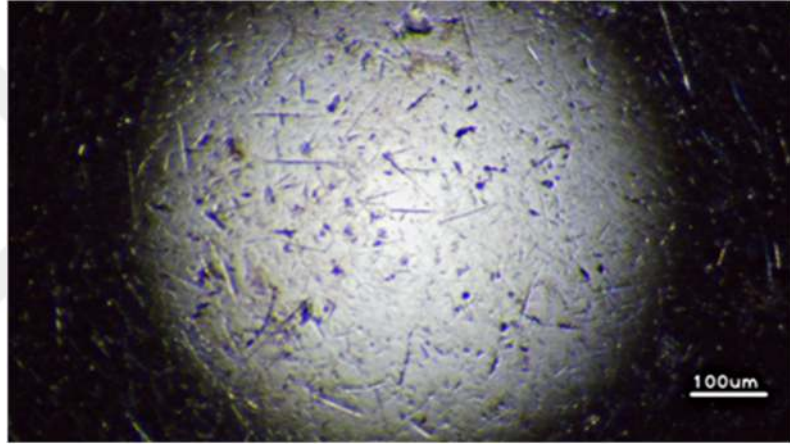
TRİBOMETRE TEST SONUÇLARI

3.1 Tribometre İle Yapılan Test Sonuçları

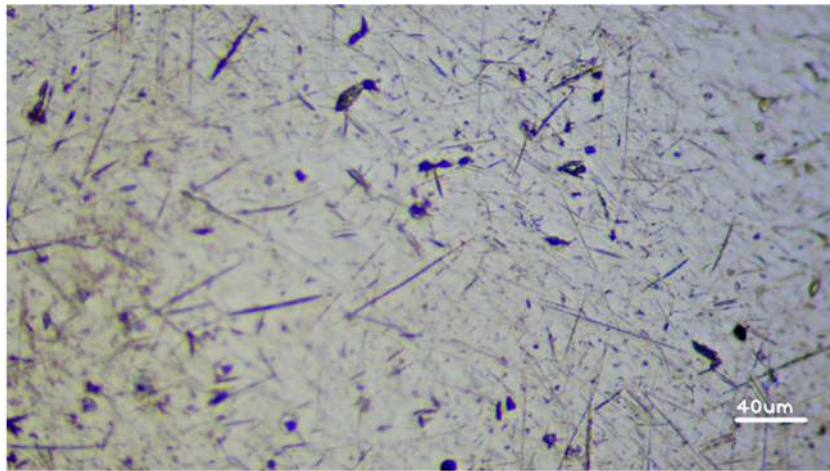
Bu çalışmada motor silindir kovanının (20°, 30°, 40°, 45° ve 60°) gibi farklı honlama açılarının işlenmesi, plato honlama yapılması, bu farklı açılarda sırasıyla rGO, CrCN, TiN, DLC gibi nanokaplamalar yapılarak tribometre testleri uygulanmıştır.

3.2 Açılara Göre Honlama İle Yapılan Test Sonuçları

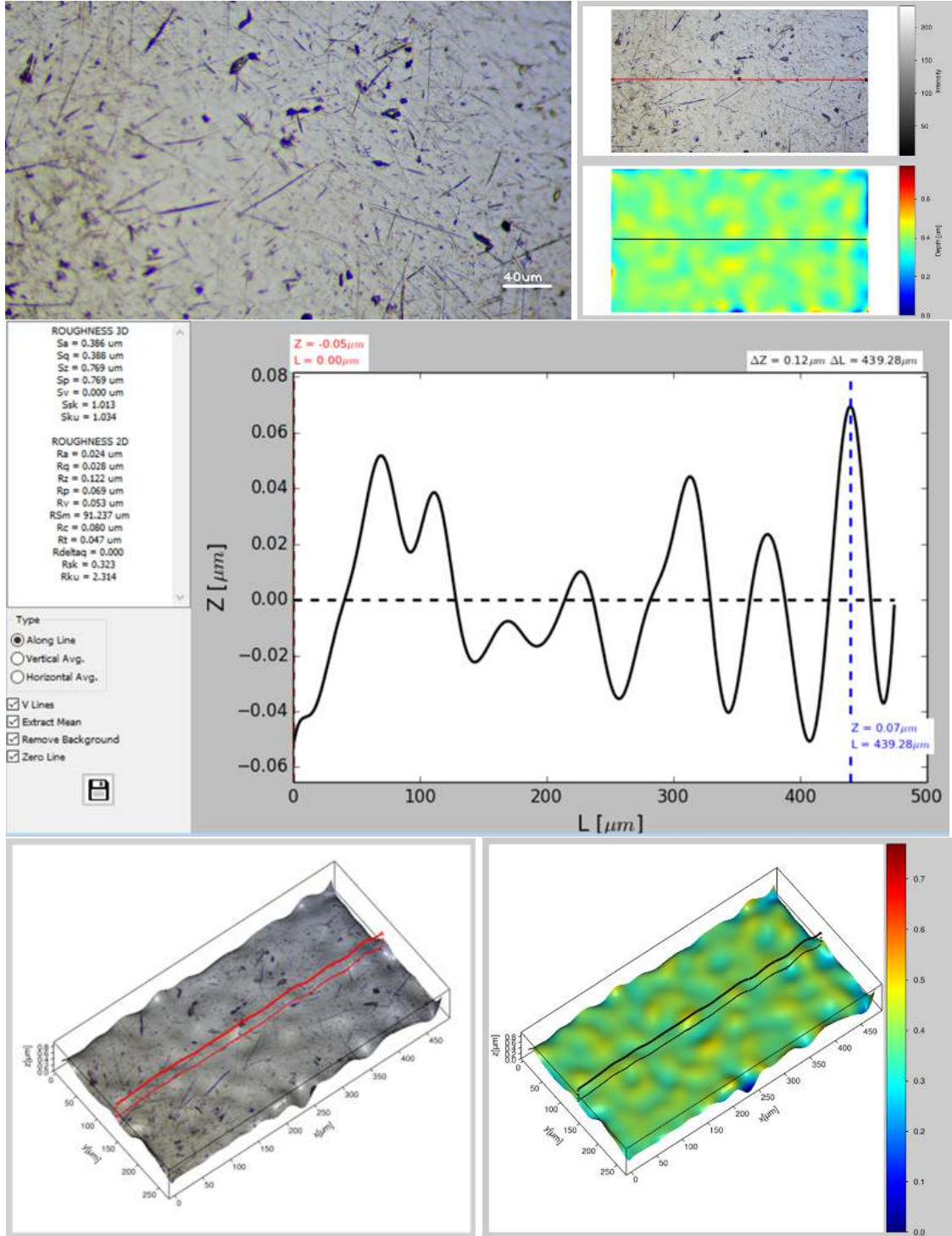
3.2.1 Açılara Göre Bilye Test Sonuçları



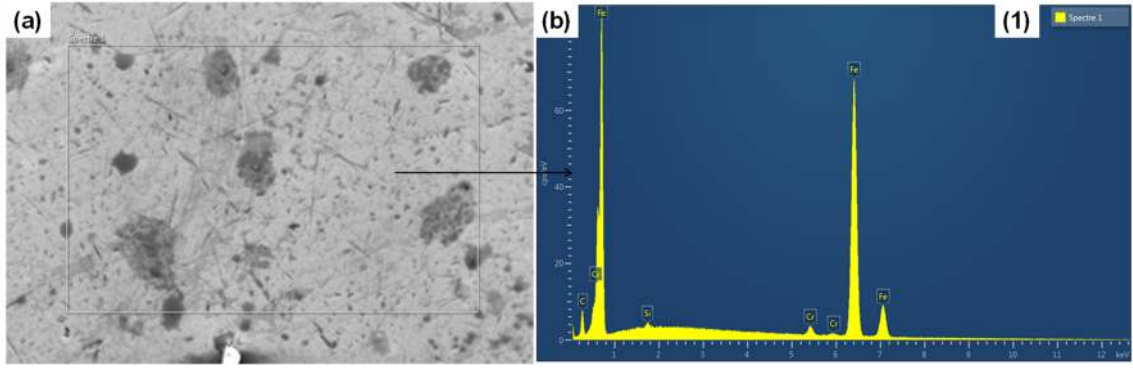
Şekil 3.1 Yeni test öncesi kullanılmamış bilye X5



Şekil 3.2 Yeni test öncesi kullanılmamış bilye X10



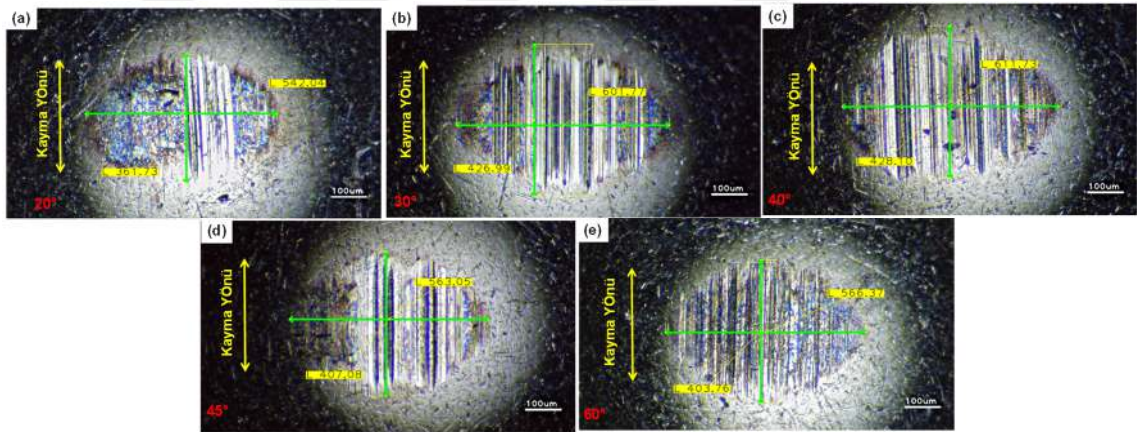
Şekil 3.3 Yeni test öncesi kullanılmamış bilyenin optik, 2D, çizgisel pürüzlülük, 3D ve 3D haritalama dijital optik mikroskop görüntüleri



Şekil 3.4 Yeni kullanılmamış bilye için SEM ve EDX (Test öncesi)

Tablo 3.1 Test öncesi bilyenin elementel analizi

Spectra no	Numune adı	C	O	Al	Si	P	Ca	Mn	Cr	Fe	Toplam
1	Test edilmemiş bilye	7	1	0	0	0	0	0	2	90	100

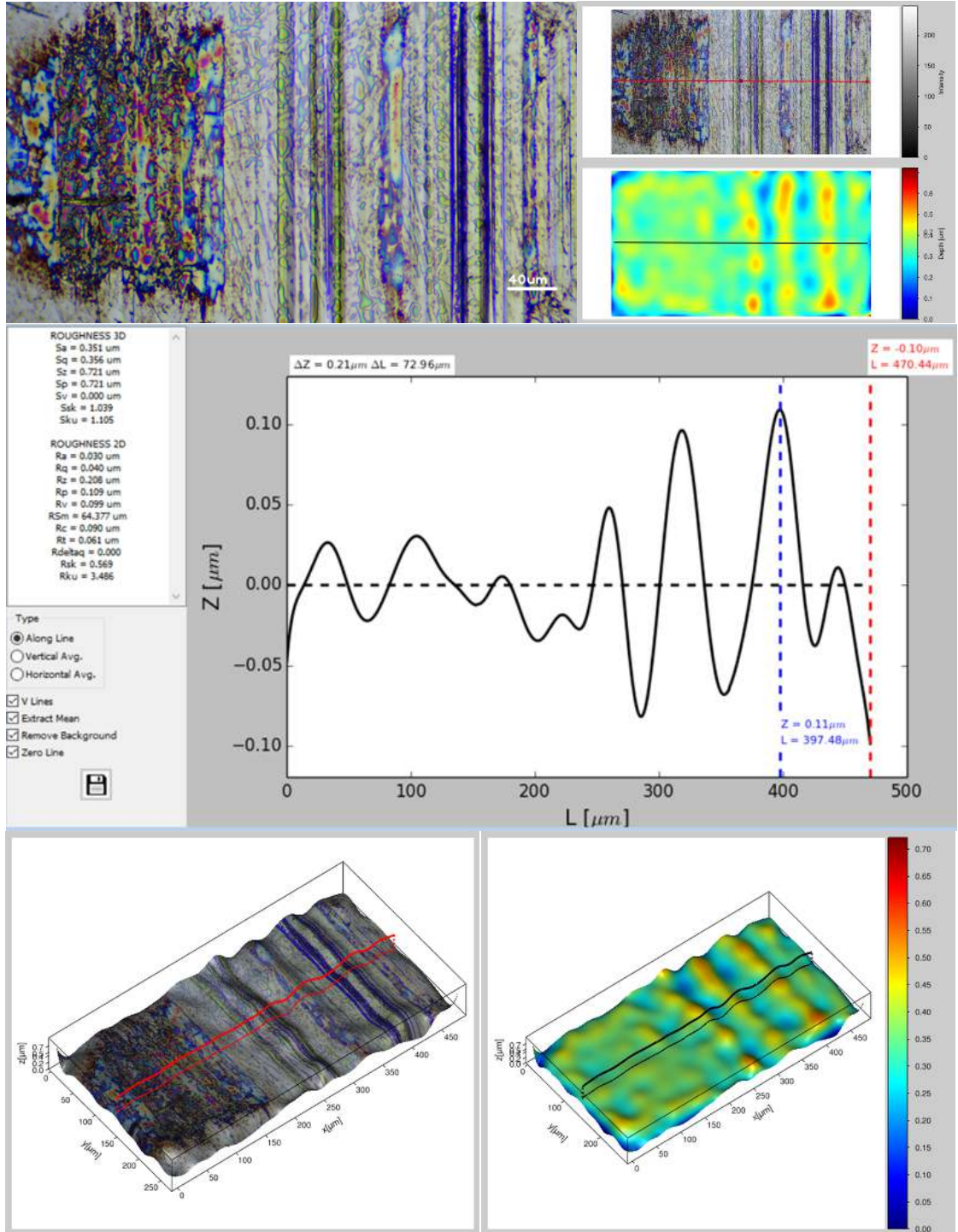


Şekil 3.5 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindir gömlekleri üzerinde test edilen bilyelerin yatay ve dikey olarak ölçülen aşınma izi çapları

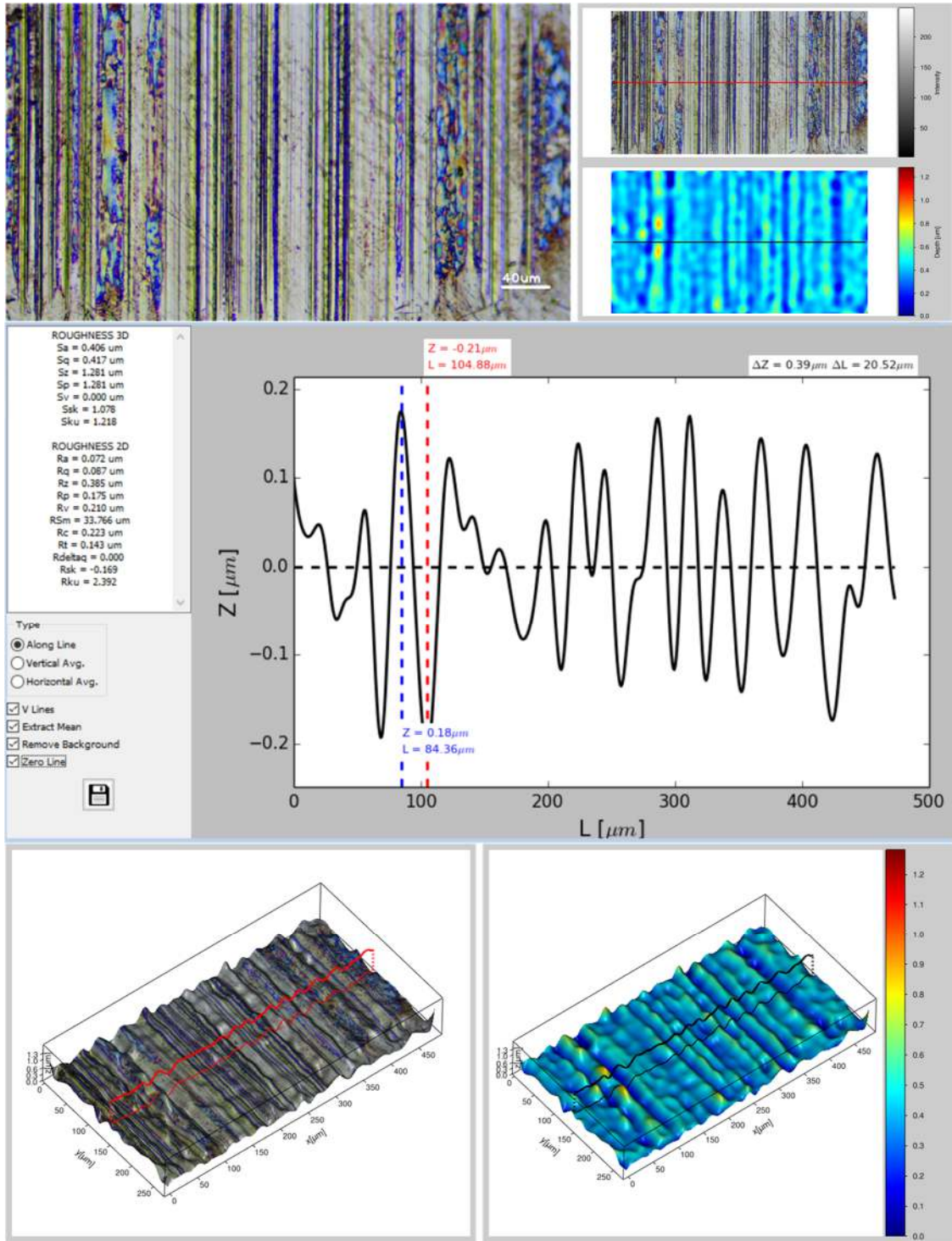
Tablo 3.2 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindir gömleği üzerinde test edilen bilyelerin aşınma izi çapları

Honlama açısı	Aşınma izi çapı yatay (µm)	Aşınma izi çapı dikey (µm)
20°	542.04	361.73
30°	601.77	426.99
40°	611.73	428.10
45°	563.05	407.08
60°	566.37	403.76

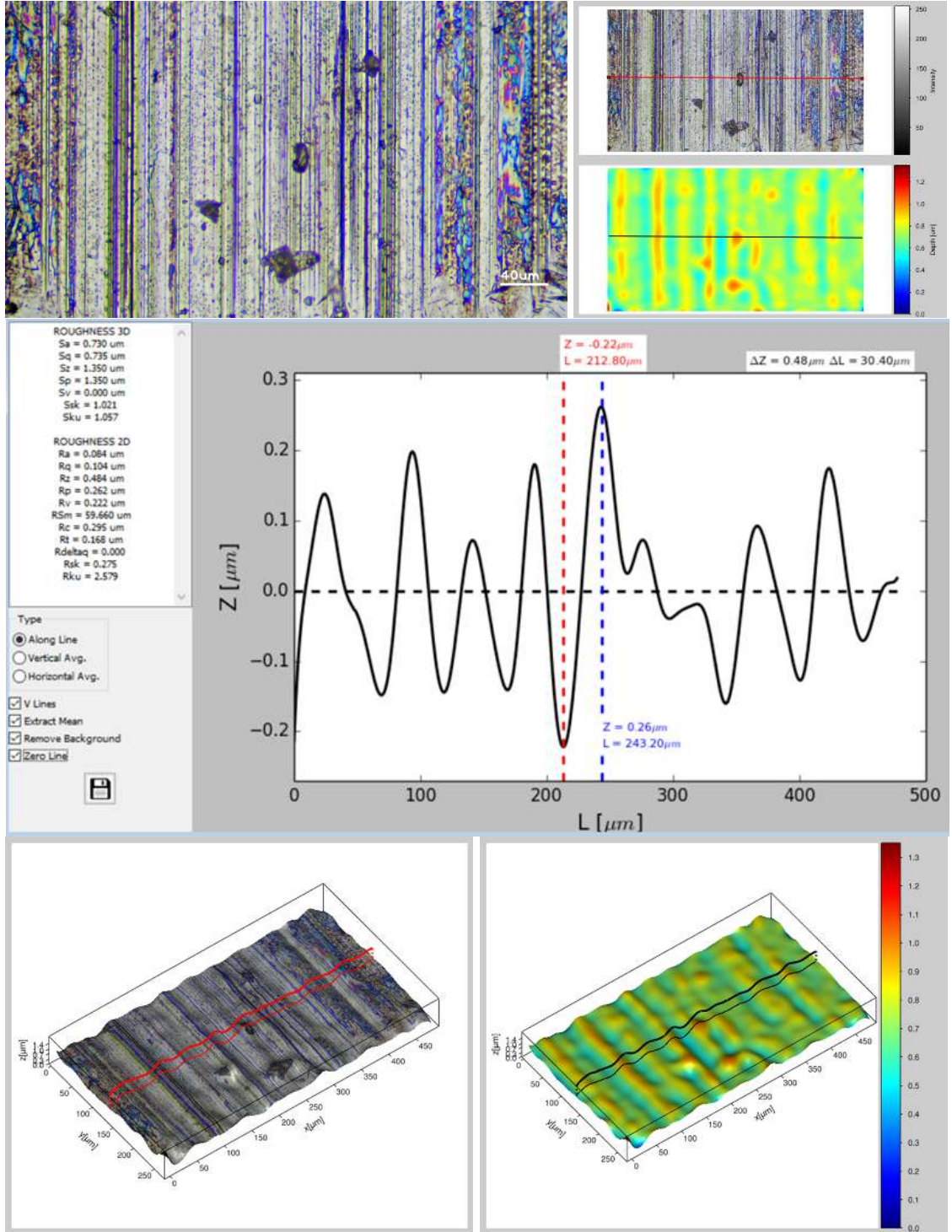
Şekil 3.5'e göre tablo 3.2.'de görüldüğü gibi yatay ve dikey olarak 20° honlama açısında ölçülen aşınma izi çapı, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindir gömleklerine göre en düşük değeri göstermiştir.



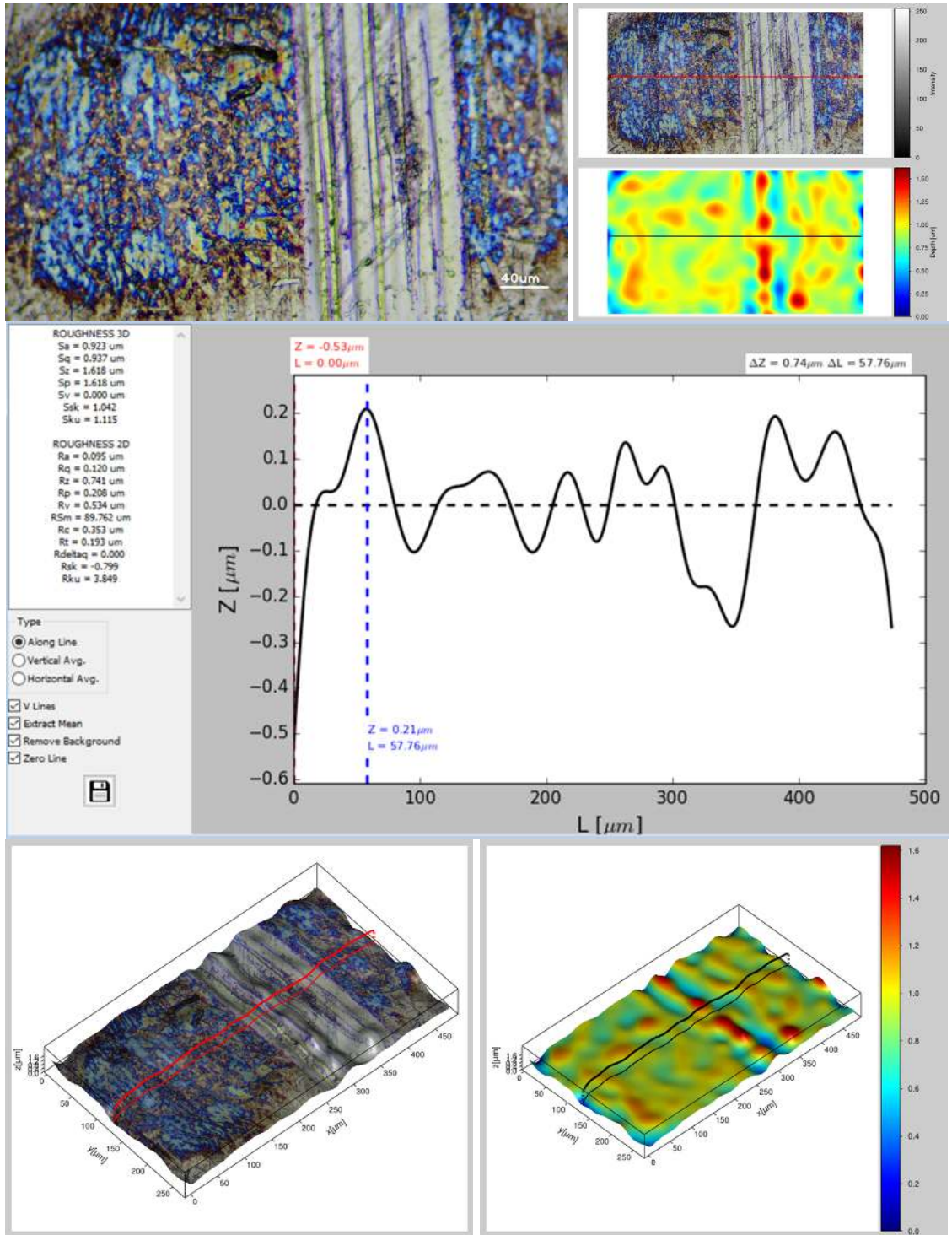
Şekil 3.6 20° honlanmış silindir üzerinde test edilen bilyenin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi



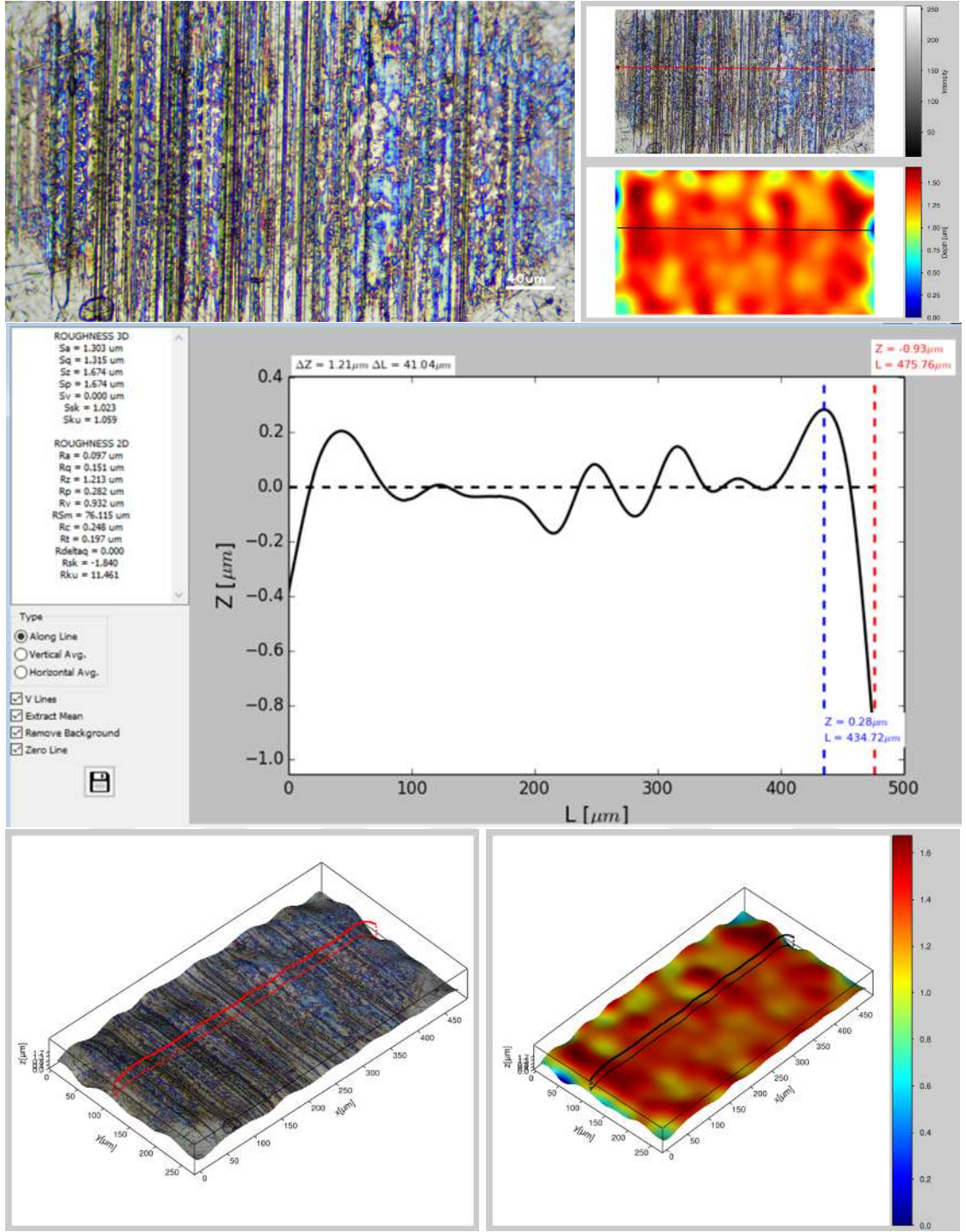
Şekil 3.7 30° honlanmış silindir üzerinde test edilen bilyenin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi



Şekil 3.8 40° honlanmış silindir üzerinde test edilen bilyenin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi



Şekil 3.9 45° honlanmış silindir üzerinde test edilen bilyenin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi



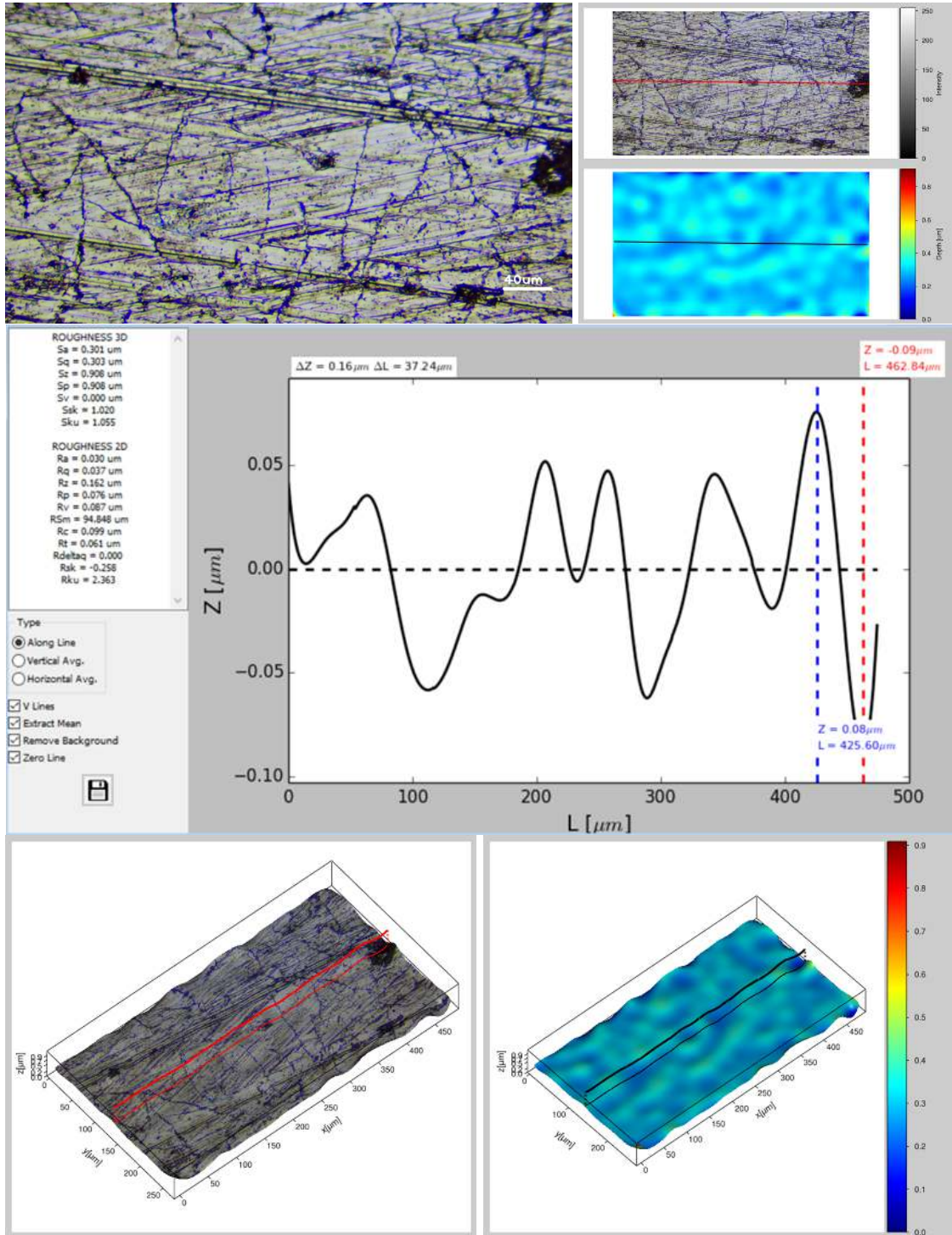
Şekil 3.10 60° honlanmış silindir üzerinde test edilen bilyenin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi

Tablo 3.3 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindir gömlekleri üzerinde test edilen bilyelerin aşınma izlerinin 2D ve 3D pürüzlülük değerleri

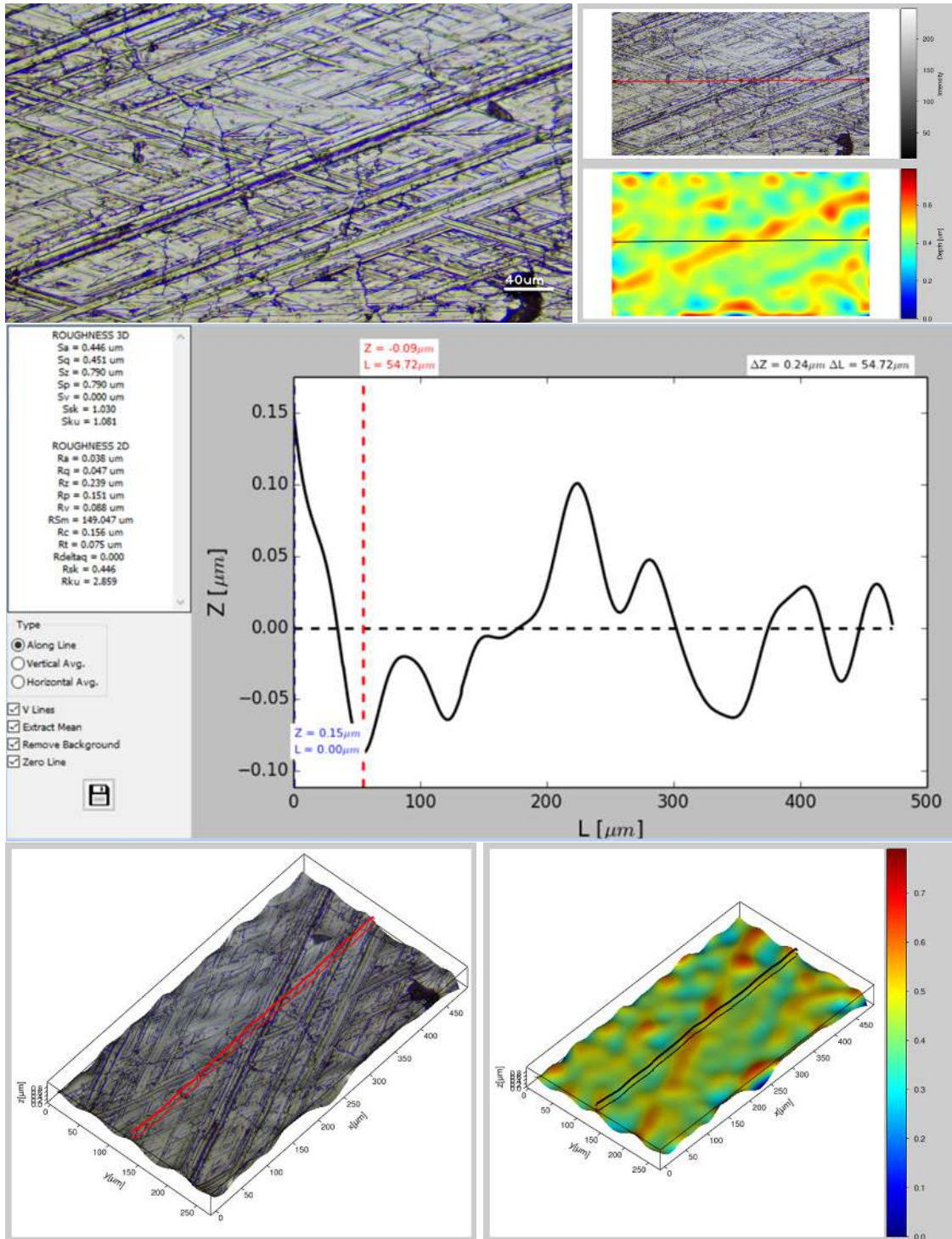
Honlama açısı	Sa (μm)	Ra (μm)
test edilmemiş bilye	0.386	0.024
20°	0.351	0.030
30°	0.406	0.072
40°	0.730	0.084
45°	0.923	0.095
60°	1.303	0.097

Sırası ile Şekil 3.6, Şekil 3.7, Şekil 3.8, Şekil 3.9, Şekil 3.10; 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindir gömleği üzerinde test edilen bilyelerin 2D-3D optik mikroskopi dijital pürüzlülük analizlerini göstermektedir. Bu şekillerden elde edilen veriler Tablo 3.3’de 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindir gömlekleri üzerinde test edilen bilyelerin aşınma izlerinin 2D ve 3D pürüzlülük değerlerini göstermektedir. 2D Ra ve 3D Sa değerleri dikkate alınmıştır. 20°, honlama açısı en düşük değeri göstermekte olup en düşük aşınma izi çapını doğrulamaktadır.

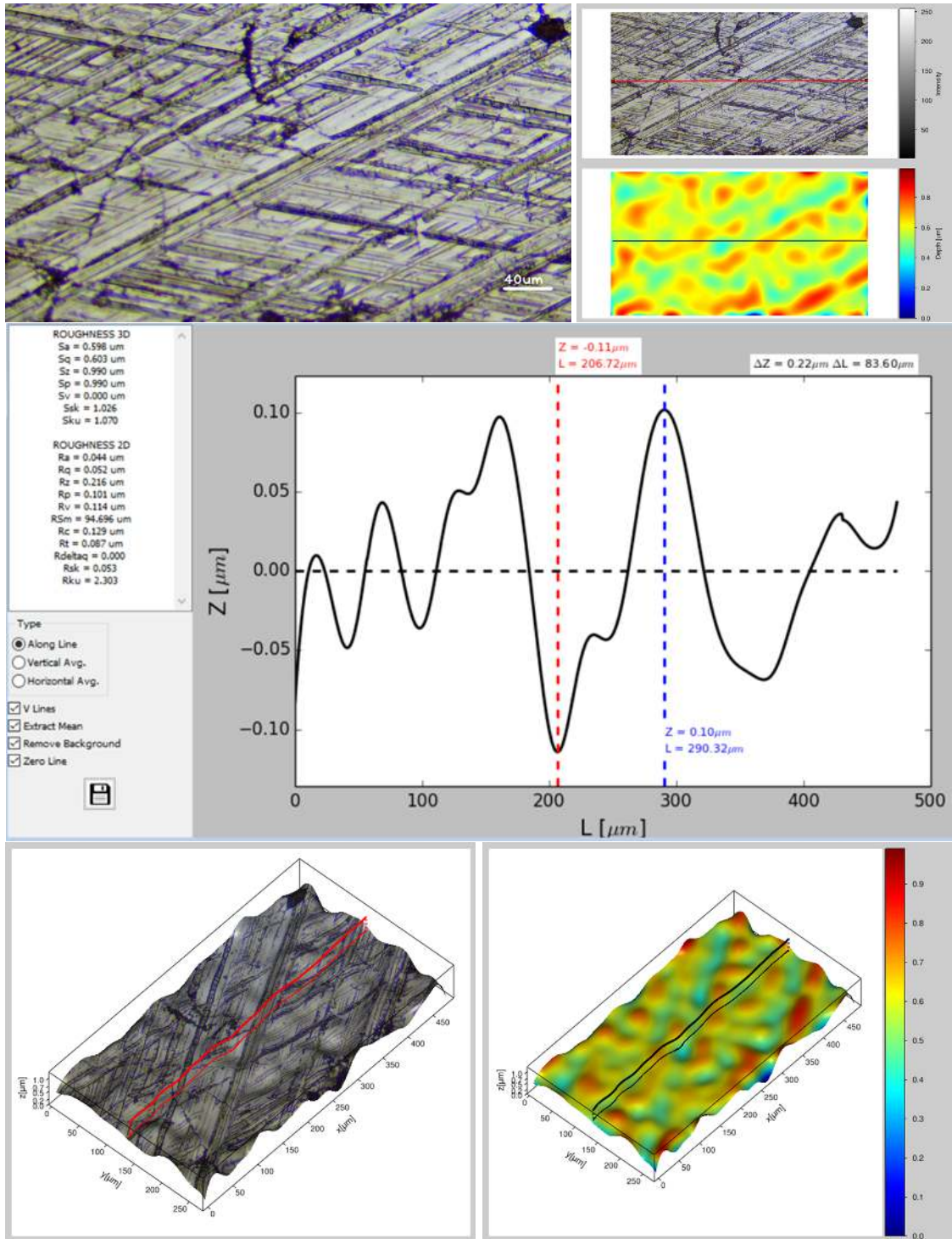
3.2.2 Açılara Göre Silindir Test Sonuçları



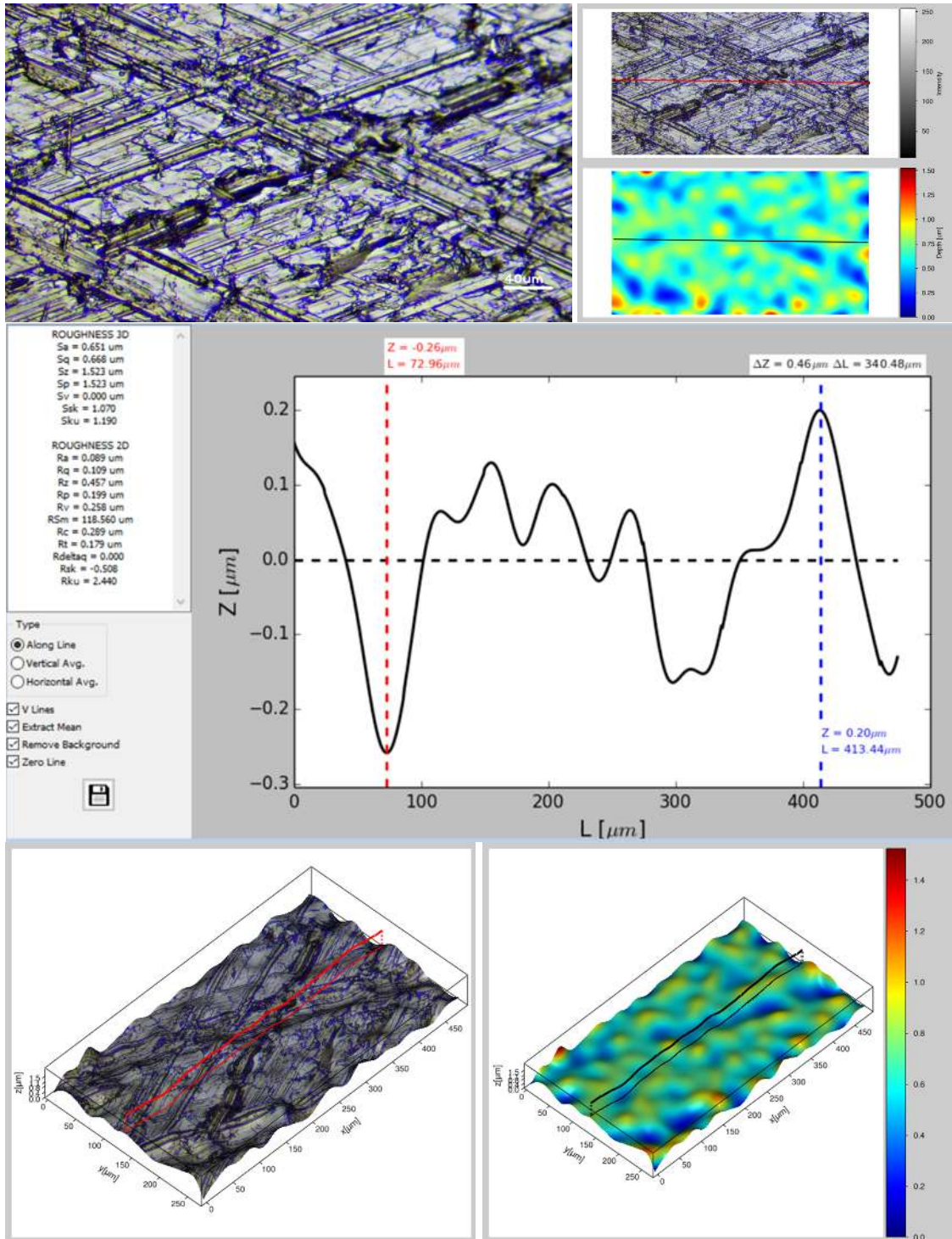
Şekil 3.11 Test öncesi 20° honlanmış silindirin optik, 2D, çizgisel pürüzlülük, 3D ve 3D haritalama dijital optik mikroskop görüntüleri



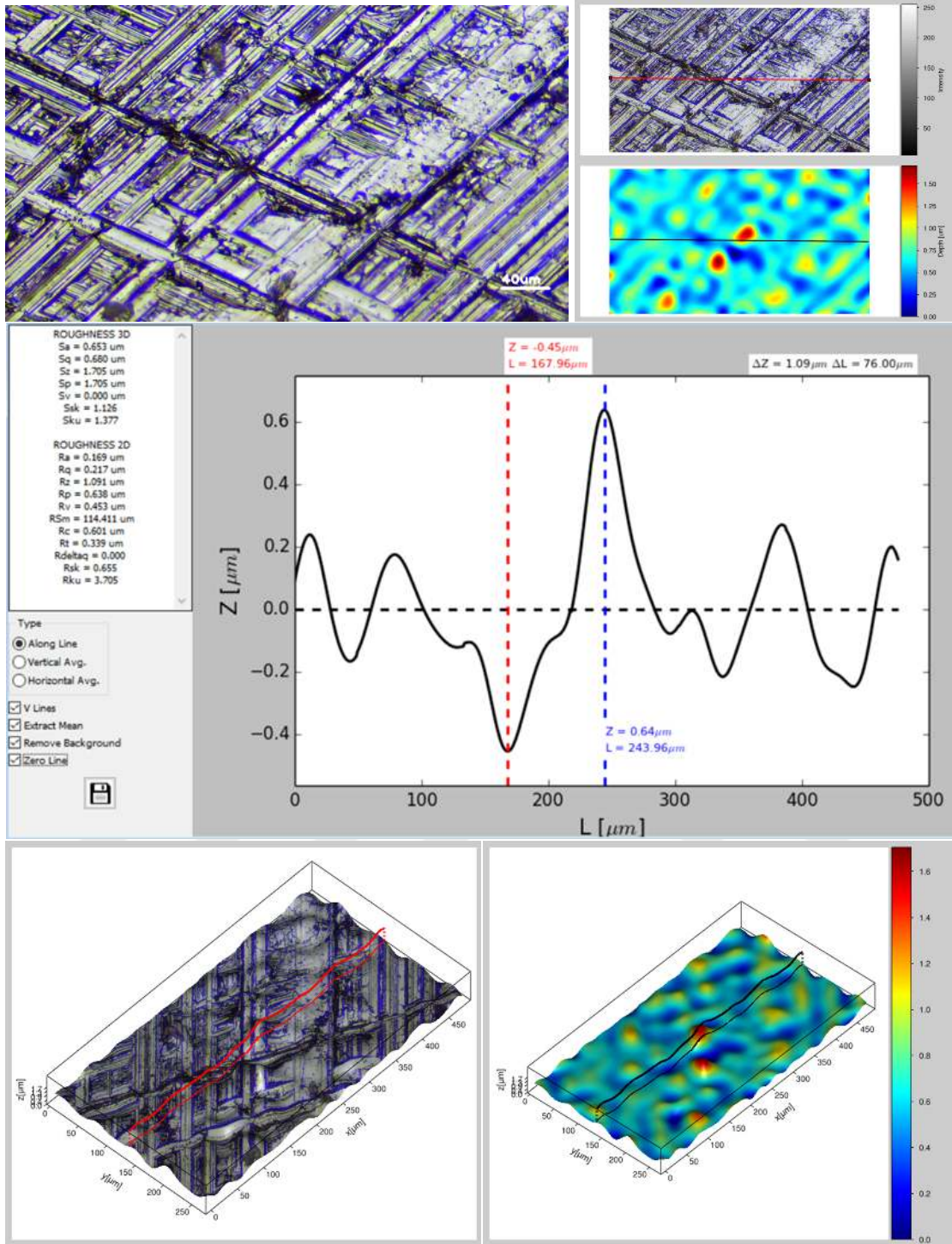
Şekil 3.12 Test öncesi 30° honlanmış silindirin optik, 2D, çizgisel pürüzlülük, 3D ve 3D haritalama dijital optik mikroskop görüntüleri



Şekil 3.13 Test öncesi 40° honlanmış silindirin optik, 2D, çizgisel pürüzlülük, 3D ve 3D haritalama dijital optik mikroskop görüntüleri



Şekil 3.14 Test öncesi 45° honlanmış silindirin optik, 2D, çizgisel pürüzlülük, 3D ve 3D haritalama dijital optik mikroskop görüntüleri

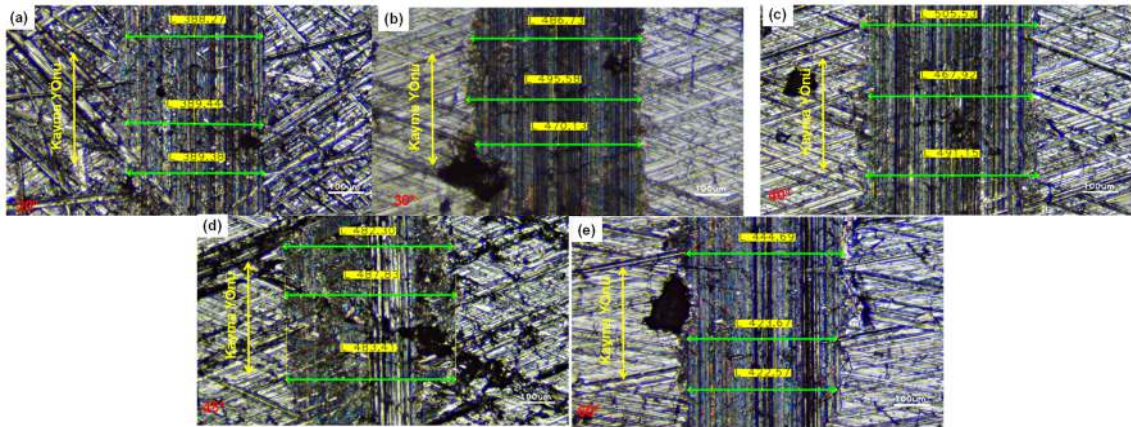


Şekil 3.15 Test öncesi 60° honlanmış silindirin optik, 2D, çizgisel pürüzlülük, 3D ve 3D haritalama dijital optik mikroskop görüntüleri

Sırası ile Şekil 3.11, Şekil 3.12, Şekil 3.13, Şekil 3.14, Şekil 3.15; 20°, 30°, 40°, 45°, 60° test öncesi honlanmış silindir gömleğinin 2D-3D optik mikroskopi dijital pürüzlülük analizlerini göstermektedir. Bu şekillerden elde edilen veriler Tablo 3.4'te sıralanmıştır. 20°, honlama açısı en düşük değeri göstermiştir.

Tablo 3.4 20°, 30°, 40°, 45°, 60° test öncesi honlanmış silindir gömleklerinin 2D ve 3D pürüzlülük değerleri

Honlama açısı	Sa (μm)	Ra (μm)
20°	0.301	0.030
30°	0.446	0.038
40°	0.598	0.044
45°	0.651	0.089
60°	0.653	0.169



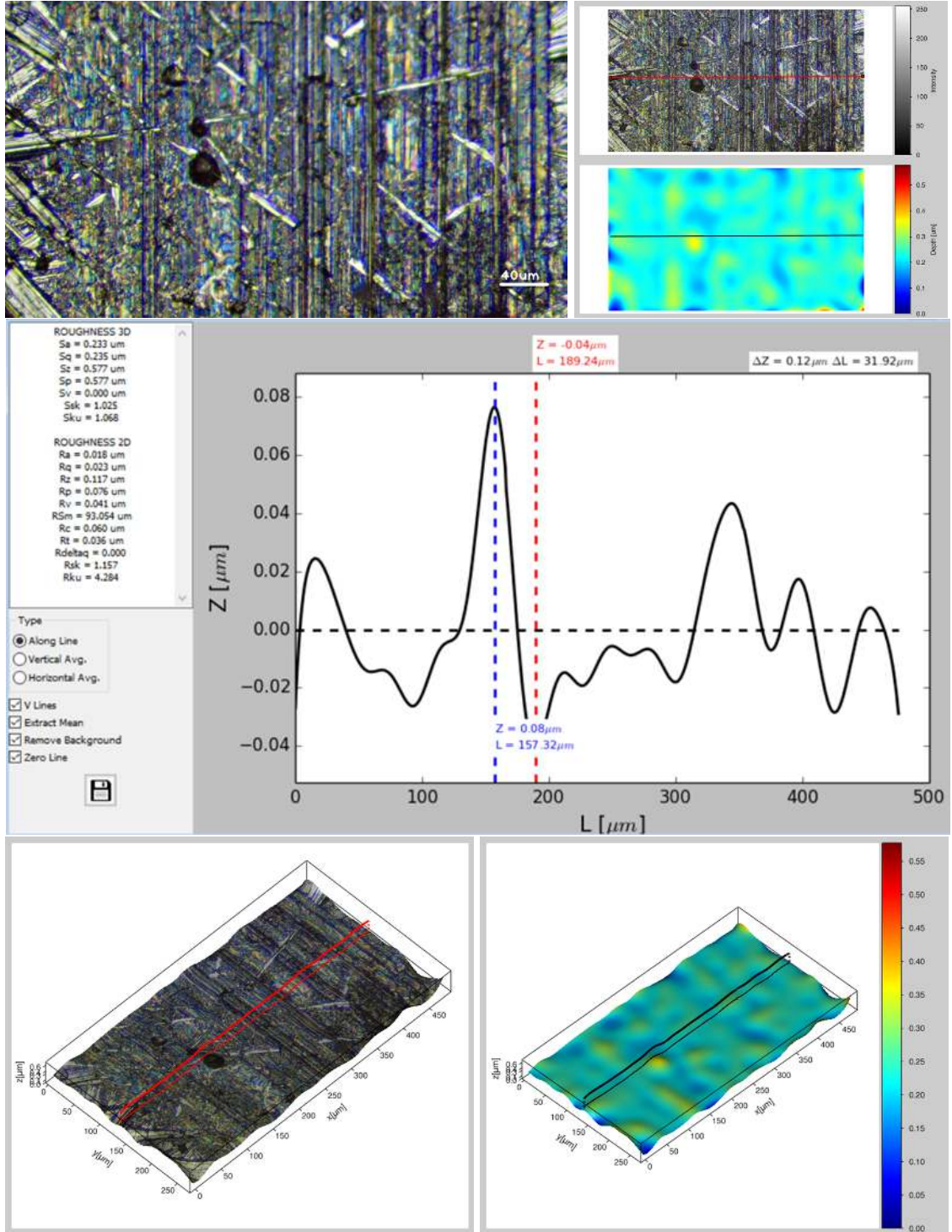
Şekil 3.16 Çelik bilye altında test edilen (a) 20°, (b) 30°, (c) 40°, (d) 45°, (e) 60° honlanmış silindir gömleklerinin yatay olarak ölçülen aşınma izlerinin optik dijital görüntüleri

Şekil 3.16 Çelik bilye altında test edilen (a) 20°, (b) 30°, (c) 40°, (d) 45°, (e) 60° honlanmış silindir gömleklerinin yatay olarak ölçülen aşınma izlerinin optik dijital görüntülerini göstermektedir.

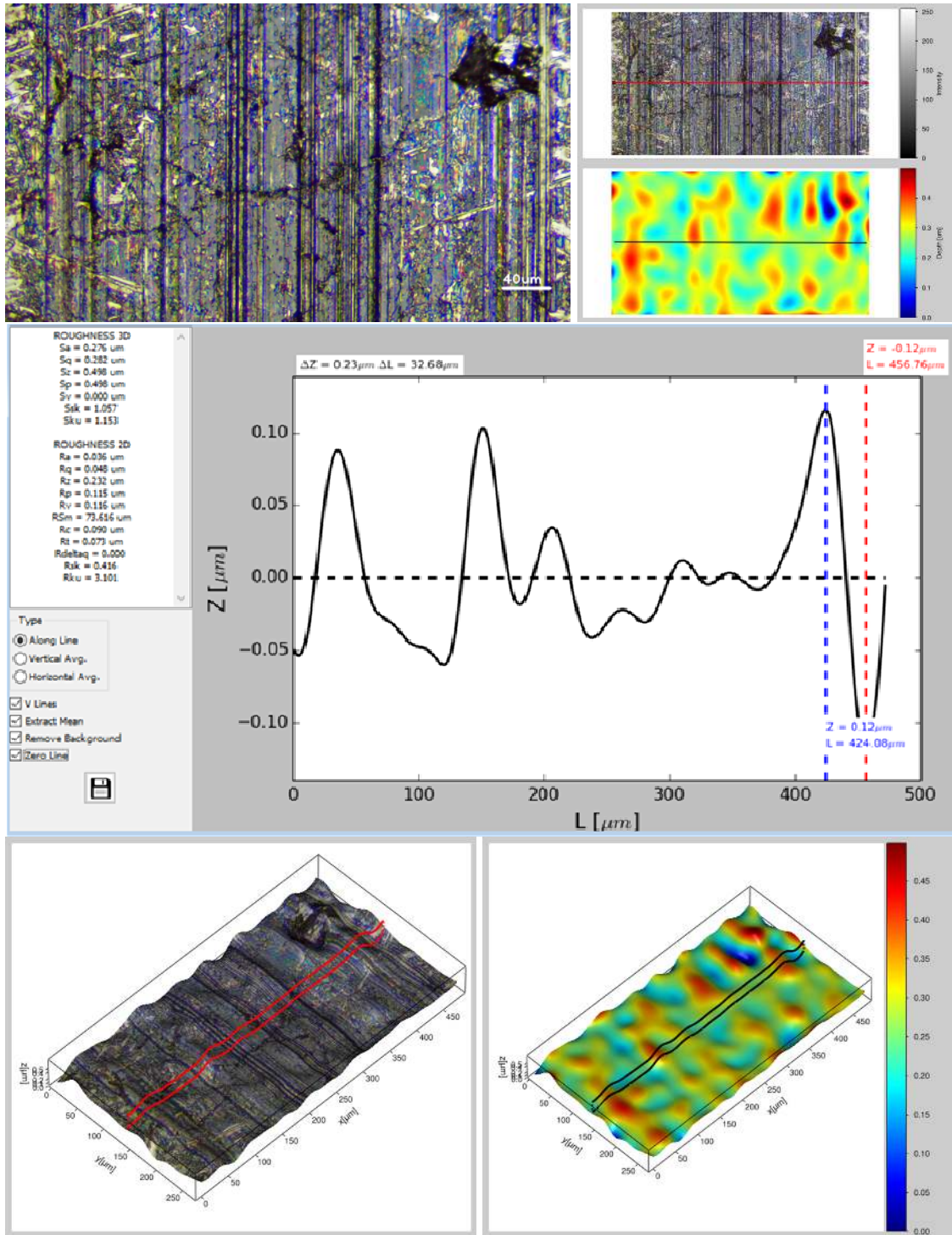
Tablo 3.5 Çelik bilye altında test edilen 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış gömlek numunelerinin maksimum ve minimum aşınma izi mesafeleri

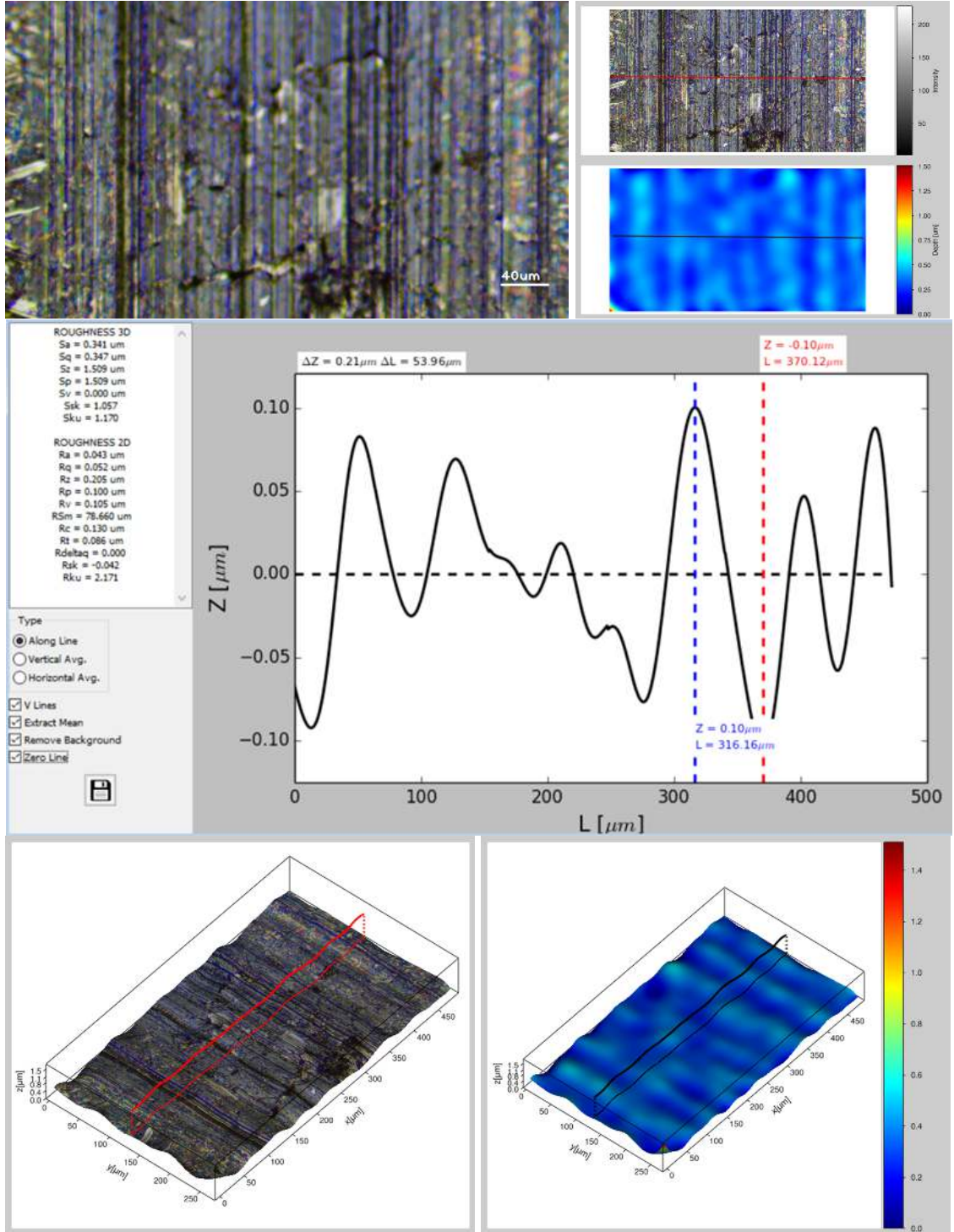
Honlama açısı	Max. Aşınma mesafesi (µm)	Min. Aşınma mesafesi (µm)
20°	389.44	388.27
30°	495.58	470.13
40°	505.53	467.92
45°	487.83	482.30
60°	444.69	422.57

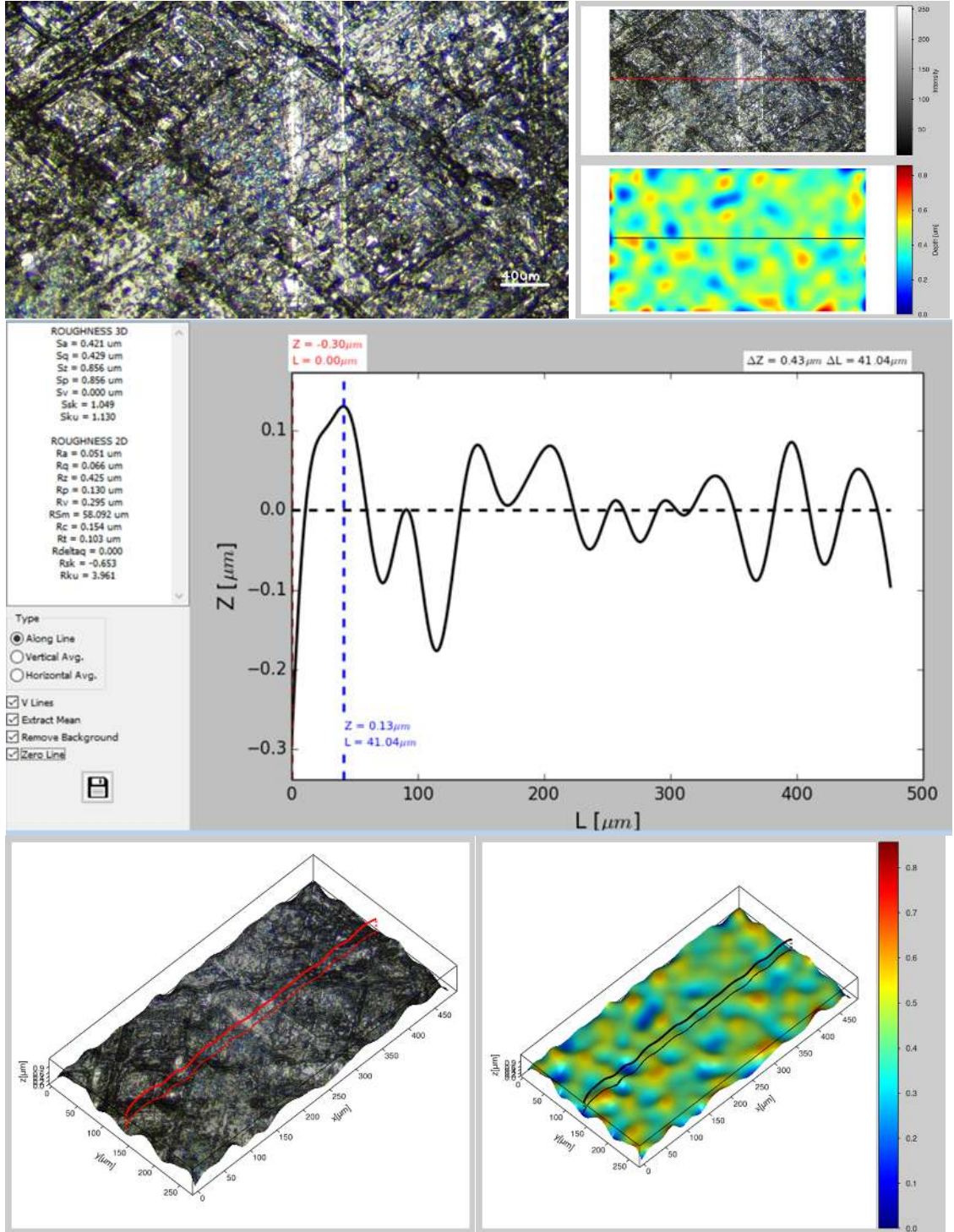
Tablo 3.5’de görüldüğü gibi, 20° honlanmış açının silindir gömleğindeki aşınma izi mesafesi, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindir gömleklerindeki aşınma izi mesafelerine göre en düşük değeri vermiştir.



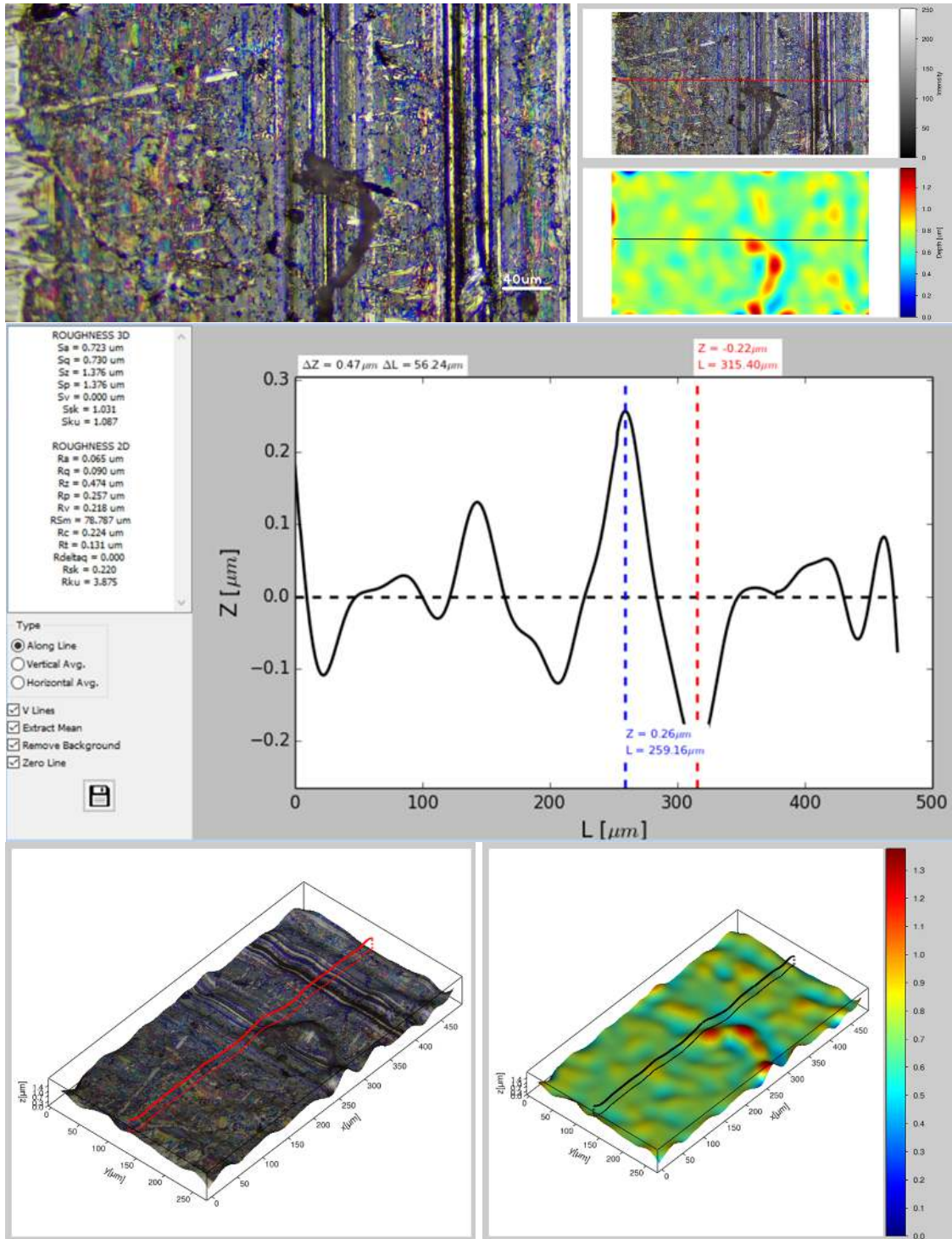
Şekil 3.17 Çelik bilye altında test edilmiş 20° honlanmış silindirin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi







Şekil 3.20 Çelik bilye altında test edilmiş 45° honlanmış silindirin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi



Şekil 3.21 Çelik bilye altında test edilmiş 60° honlanmış silindirin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi

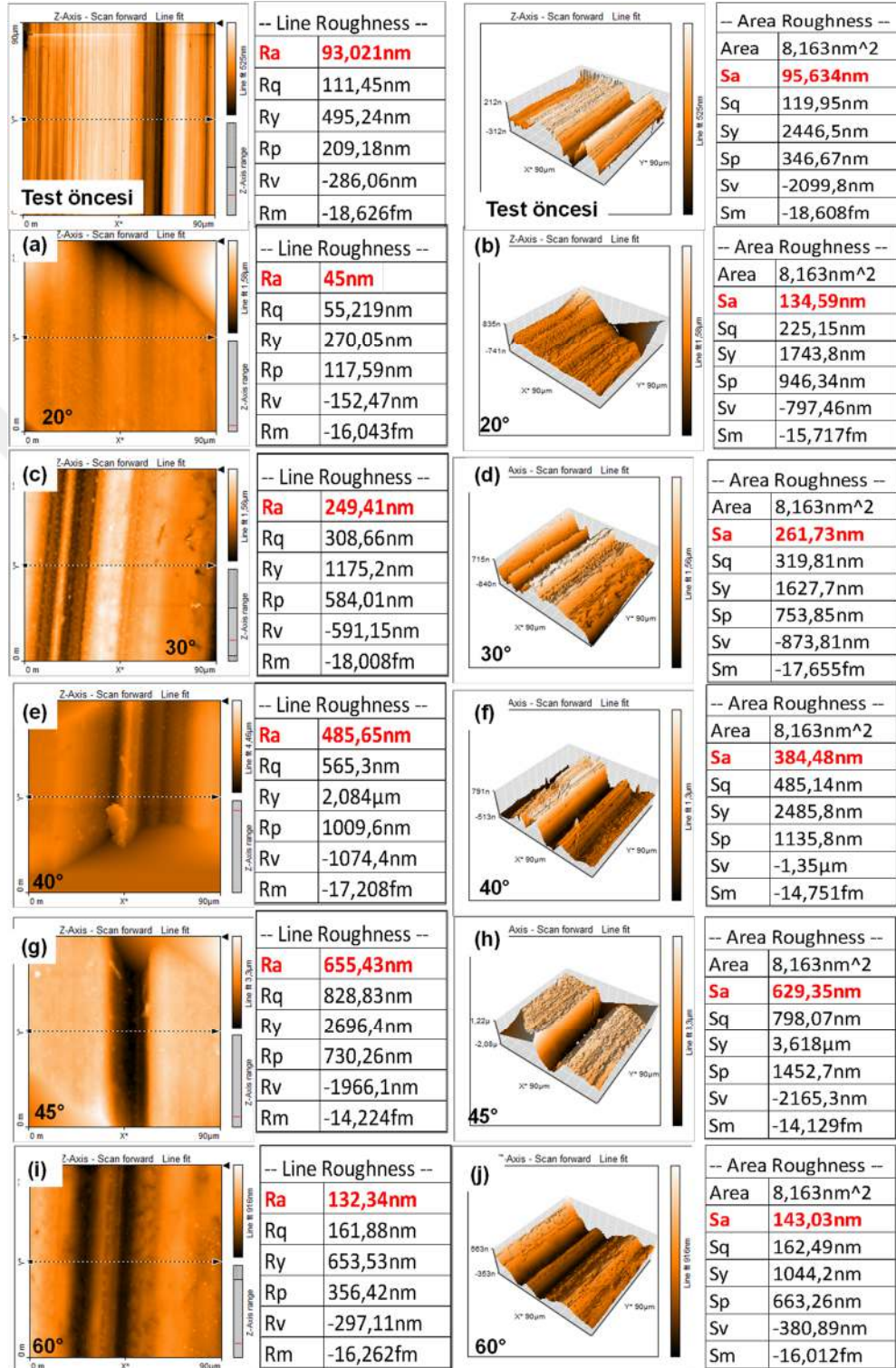
Sırası ile Şekil 3.17, Şekil 3.18, Şekil 3.19, Şekil 3.20, Şekil 3.21; çelik bilye altında test edilmiş 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindir gömleğinin 2D-3D optik mikroskopi dijital pürüzlülük analizlerini göstermektedir. Bu şekillerden elde edilen veriler Tablo 3.6’da sıralanmıştır. 20°, honlama açısı en düşük değeri göstermiştir.

Tablo 3.6 Çelik bilye altında test edilmiş 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindir gömleklerinin 2D ve 3D pürüzlülük değerleri

Honlama açısı	Sa (µm)	Ra (µm)
20°	0.233	0.018
30°	0.276	0.036
40°	0.341	0.043
45°	0.421	0.051
60°	0.723	0.065

3.2.3 Açılara Göre AFM Sonuçları

3.2.3.1 Tribotestlerden Sonra Honlanmış Silindir Gömlekleri Üzerinde Test Edilen Bilyelerin AFM Analizlerinin Karşılaştırılması



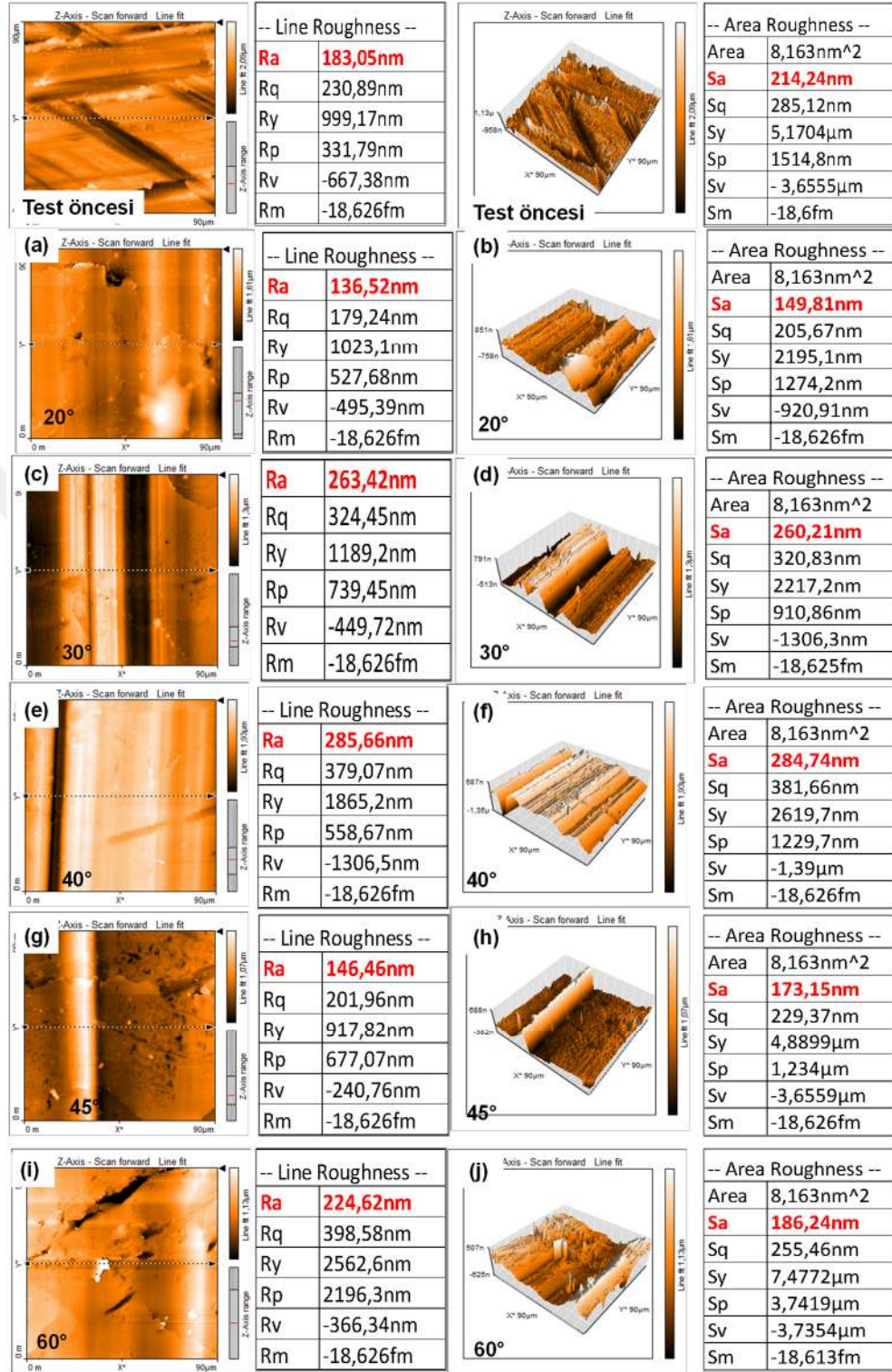
Şekil 3.22 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindir gömlekleri üzerinde test edilen bilyelerin AFM pürüzlülük analizlerinin karşılaştırılması

Şekil 3.22 Sırasıyla 20°, 30°, 40°, 45° ve 60° olmak üzere 2D (a, c, e, g, i) ve 3D (b, d, f, h, j) silindir üzerinde 5 honlama açısında sürtünen bilyelerin aşınma izinin atomik kuvvet mikroskopunda ölçülen pürüzlülük görüntülerini ve değerlerini vermektedir. Tablo 3.7’de 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindir gömlekleri üzerinde test edilen bilyelerin aşınma izlerinin 2D ve 3D pürüzlülük değerleri verilmiştir. 20° honlama açısı en düşük değeri göstermiştir.

Tablo 3.7 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindir gömlekleri üzerinde test edilen bilyelerin aşınma izlerinin 2D ve 3D pürüzlülük değerleri

Honlama açısı	Sa (nm)	Ra (nm)
test öncesi	95.634	93.021
20°	134.59	45
30°	261.73	249.41
40°	384.48	485.65
45°	629.35	655.43
60°	143.03	132.34

3.2.3.2 Tribotestlerden Sonra Honlanmış Silindir Gömleklerinin AFM Analizlerinin Karşılaştırılması



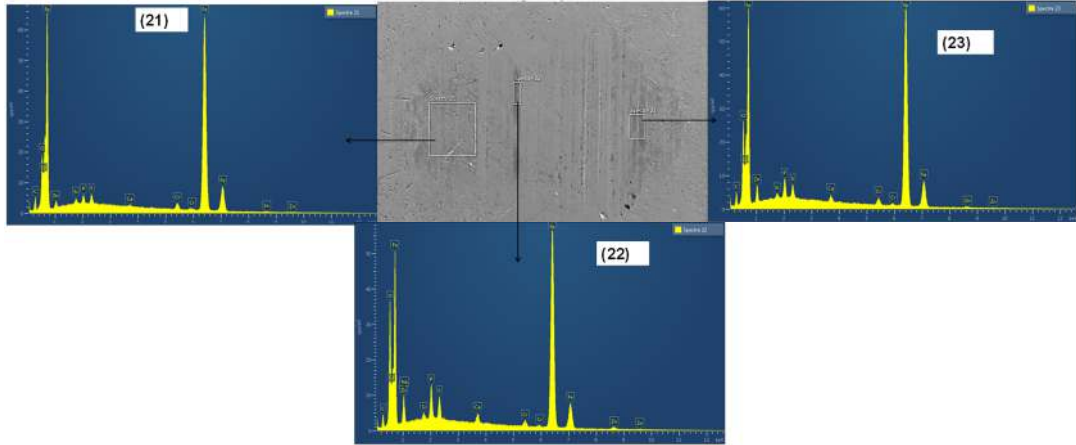
Şekil 3.23 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindir gömleklerinin aşınma izlerinin AFM pürüzlülük analizlerinin karşılaştırılması

Şekil 3.23 Sırasıyla 20°, 30°, 40°, 45° ve 60° olmak üzere 2D(a, c, e, g, i) ve 3D (b, d, f, h, j) çelik bilye altına sürtünmüş 5 honlama açılı silindir numunelerinin aşınma izlerinin atomic kuvvet mikroskopunda ölçülen pürüzlülük görüntülerini ve değerlerini vermektedir. Tablo 3.8’de 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış çelik bilye altında test edilmiş silindir numunelerinin aşınma izlerinin 2D ve 3D pürüzlülük değerleri verilmiştir. 20°, honlama açısı en düşük değeri göstermiştir.

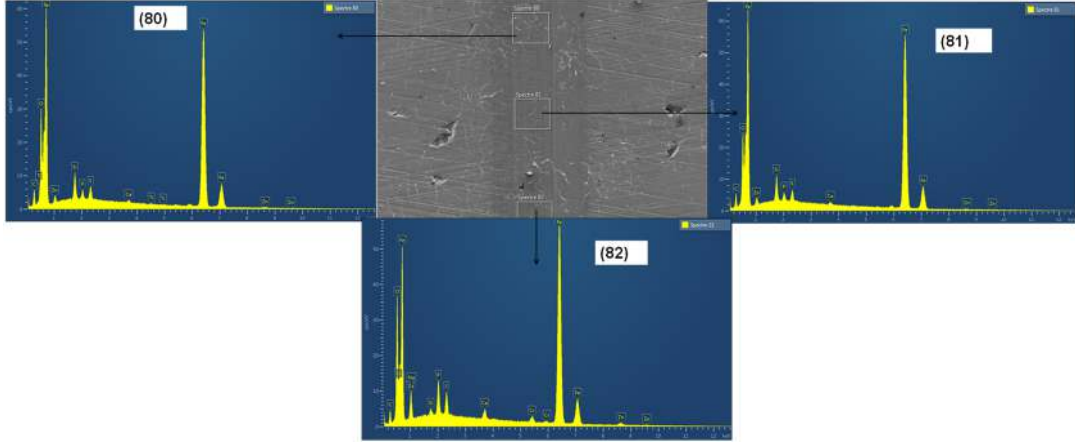
Tablo 3.8 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış çelik bilye altına test edilmiş silindir numunelerinin aşınma izlerinin 2D ve 3D pürüzlülük değerleri

Honlama açısı	Sa (nm)	Ra (nm)
test öncesi	214.24	183.05
20°	149.81	136.52
30°	260.21	263.42
40°	284.74	285.66
45°	173.15	146.46
60°	186.24	224.62

3.2.4 En İyi Açıya Göre SEM-EDX Sonuçları



Şekil 3.24 20°honlanmış silindir gömleği üzerinde test edilen bilyenin SEM görüntüsü ve EDS spektrumu



Şekil 3.25 Çelik bilye altında test edilen 20° honlanmış silindir gömleğinin SEM görüntüsü ve EDS spektrumu

20° honlanmış silindir gömleği ile yapılan test en iyi sonuçlar verdiğinden, bu numunede SEM görüntüsü ve EDS spektrumları ölçülmüştür. Şekil 3.24 20° honlanmış silindir gömleği üzerinde test edilen bilyenin sürtünen yüzeyinin SEM görüntüsünü ve EDS spektralarını, Şekil 3.25 ise çelik bilye altında test edilen 20° honlanmış silindir gömleğinin SEM görüntüsü ve EDS spektralarını göstermektedir.

Tablo 3.9 20° honlanma için sürtünen parçaların aşınma izlerinin EDS ile analiz verileri

Spektra no	Numune adı	C	O	Al	Si	P	Ca	Mn	Fe	Zn	Toplam
21	Bilyenin aşınma izi	4.66	4.21	0.07	0.35	0.74	0.15	0.48	87.31	2.03	100
22		3.9	9.2	0.08	0.38	2.36	0.92	0.52	76.25	6.39	100
23		4.4	6.22	0.07	0.3	1.49	0.66	0.54	81.63	4.69	100
80	20° honlanmış	5.62	7.86	0	1.85	0.71	0.31	0.79	80.71	2.14	100
81	silindirin aşınma	4.93	6.36	0	1.9	0.69	0.33	0.81	82.72	2.26	100
82	izi	5.24	8.69	0	1.73	1.05	0.39	0.74	79.36	2.8	100

Elementel analizler Tablo 3.9 'da bilye için 21, 22, 23, silindir için 80, 81, 82. spektrum numaralarıyla listelenmiştir. Motor yağından gelen Ca, Zn ve P gibi katkı elementleri sürtünen yüzeyleri iyi koruduğu tespit edilmiştir.

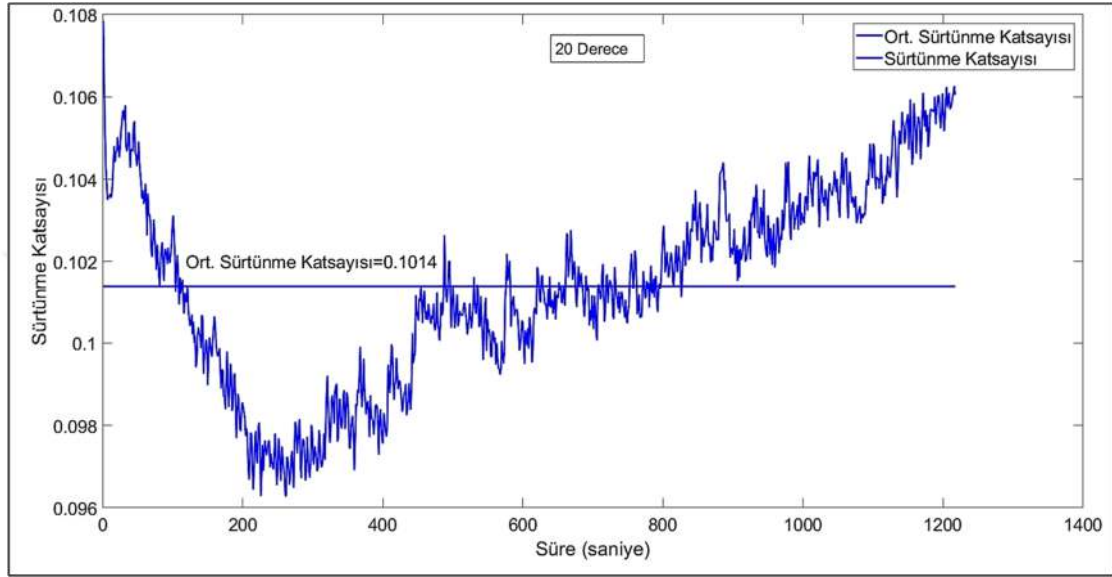
SEM-EDS sonucu dikkate alındığında elementel analiz, koruyucu tabakalarda oluşan Zn, Ca, P gibi katkı maddelerinin birikimini ve sürtünme katsayısının azaldığını göstermiştir. Bu, 20° honlanmış silindir gömleğinin kayan parçalar arasında daha etkili bir yağlama sağladığı anlamına gelmektedir. Bu nedenle, sürtünme ve aşınma izinin azaltılması

yönünde kilit bir rol oynadığı ve delaminasyon etkisi yoluyla kayma gerilimine karşı yüzey korumasına katkıda bulunduğu açıktır [32].

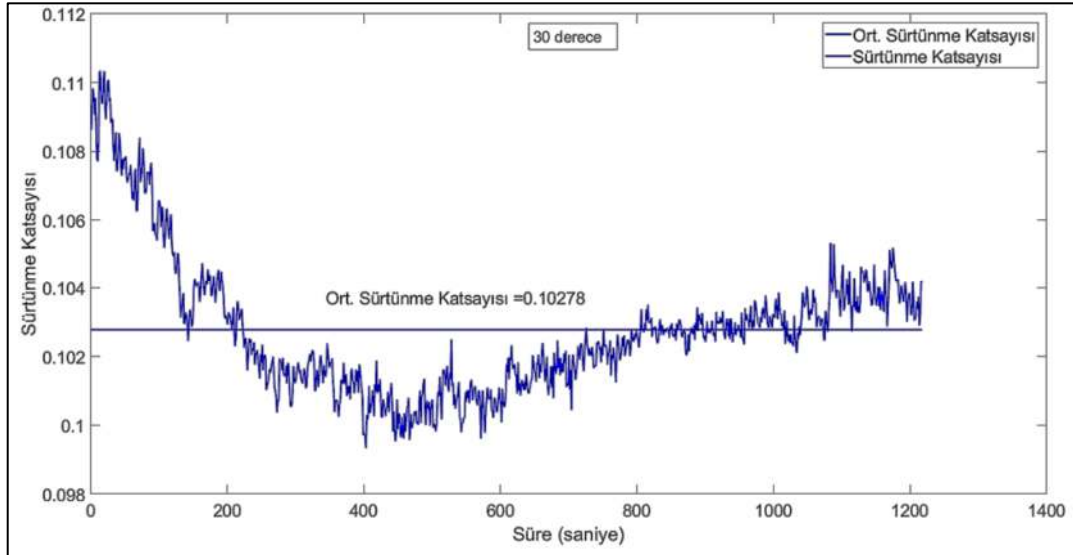
3.2.5 Açılara Göre Sürtünme Katsayısı (COF) Eğrileri

20°, 30°, 40°, 45° ve 60° açılarla honlanmış silindir tribometre testleri en iyi sonuçları elde etmek için 3 kere tekrar edilmiş ve ortalamaları alınmıştır.

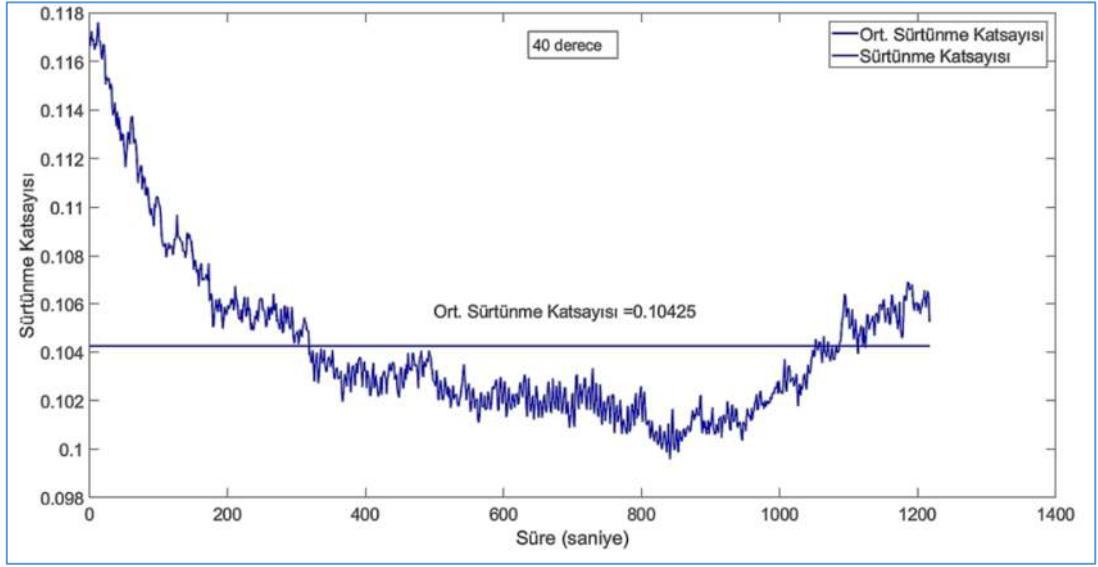
3.2.5.1 Açılara Göre Sürtünme Katsayısı (COF) Eğrileri 1. Ölçüm



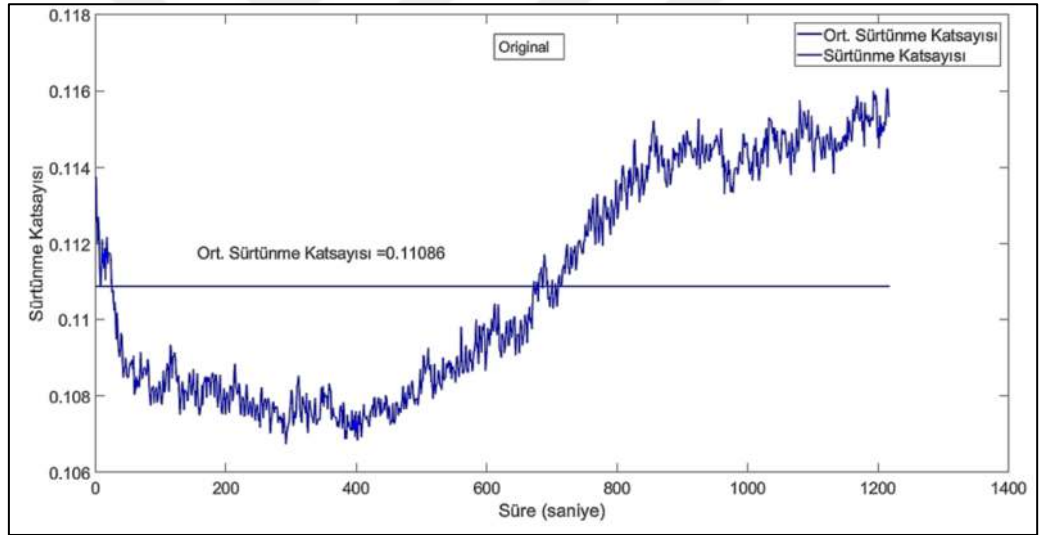
Şekil 3.26 20° honlanmış kaplamasız silindir üzerine bilye testi



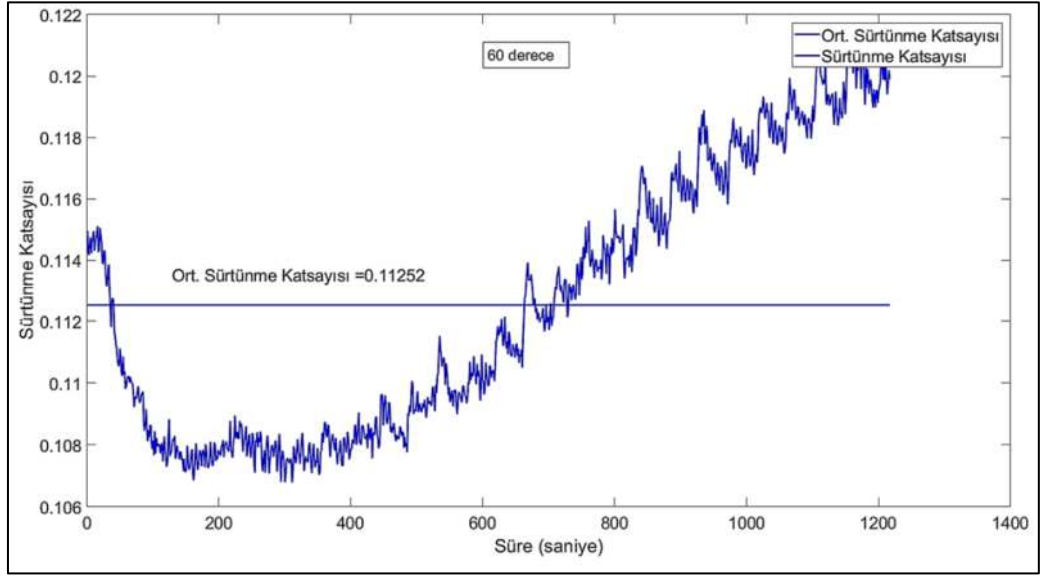
Şekil 3.27 30° honlanmış kaplamasız silindir üzerine bilye testi



Şekil 3.28 40° honlanmış kaplamasız silindir üzerine bilye testi



Şekil 3.29 Orijinal 45° honlanmış kaplamasız silindir üzerine bilye testi

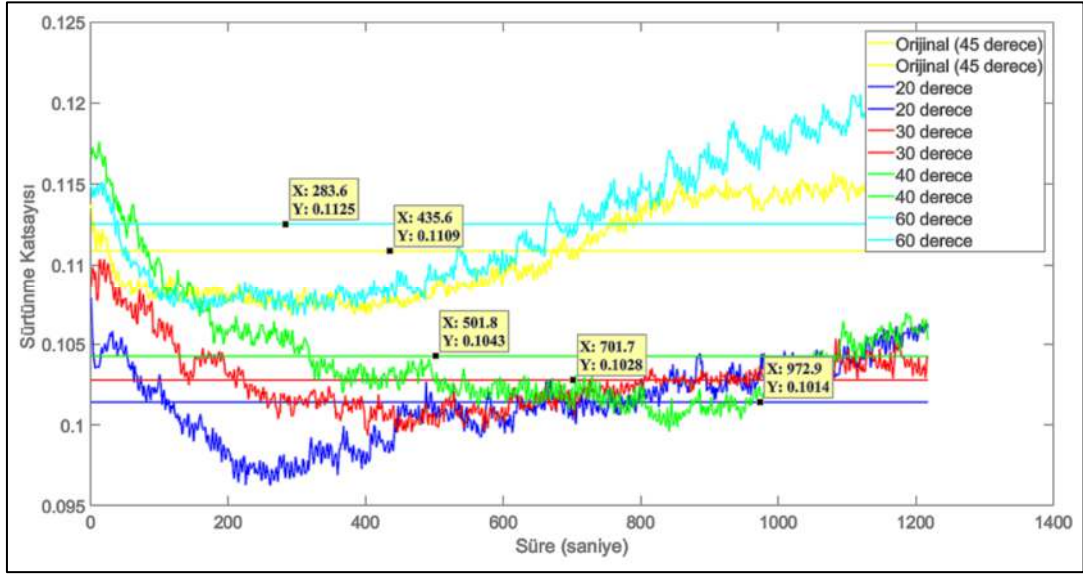


Şekil 3.30 60° honlanmış kaplamasız silindir üzerine bilye testi

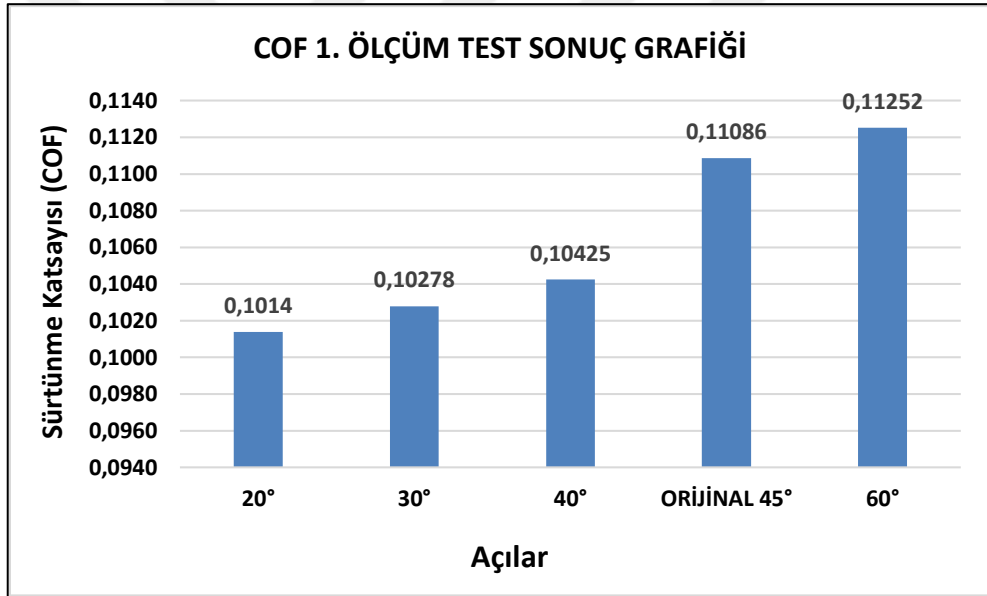
Birinci test sonucunda sırası ile Şekil 3.26, Şekil 3.27, Şekil 3.28, Şekil 3.29, Şekil 3.30; 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindirlerin zamana göre sürtünme katsayısı eğrilerini göstermektedir. Sürtünme katsayısı ölçüm sonuçları Tablo 3.10 'da verilmiştir.

Tablo 3.10 Birinci test sonucunda 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindirlerin zamana göre sürtünme katsayısı verileri

Honlama açısı	Sürtünme katsayısı
20°	0.1014
30°	0.10278
40°	0.10425
45°	0.11086
60°	0.11252



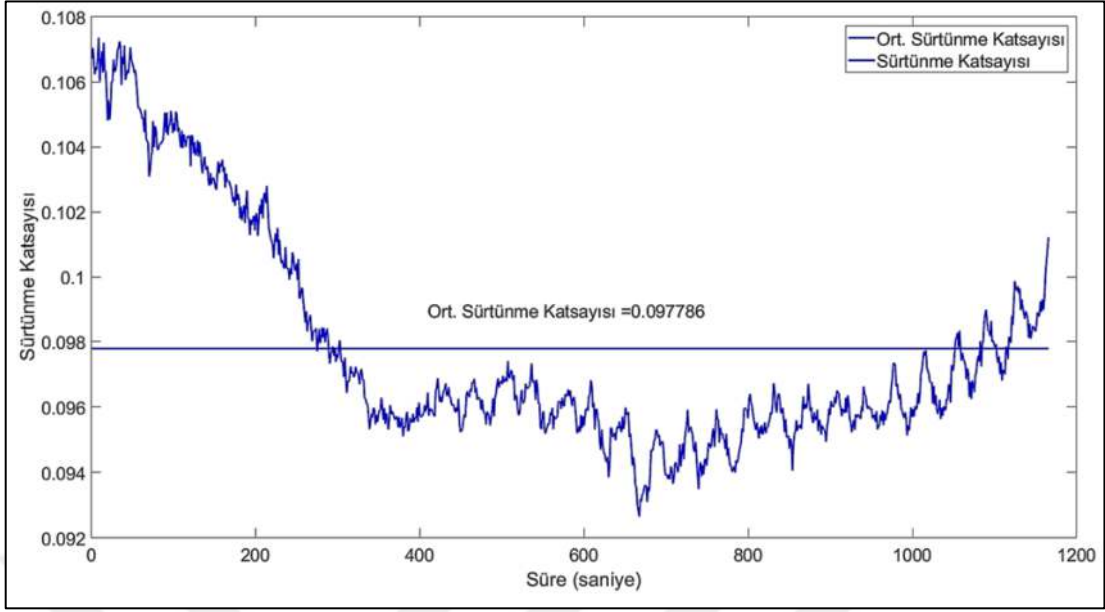
Şekil 3.31 Tüm açılara göre 1. Ölçüm sürtünme katsayısı test sonuçları karşılaştırılması



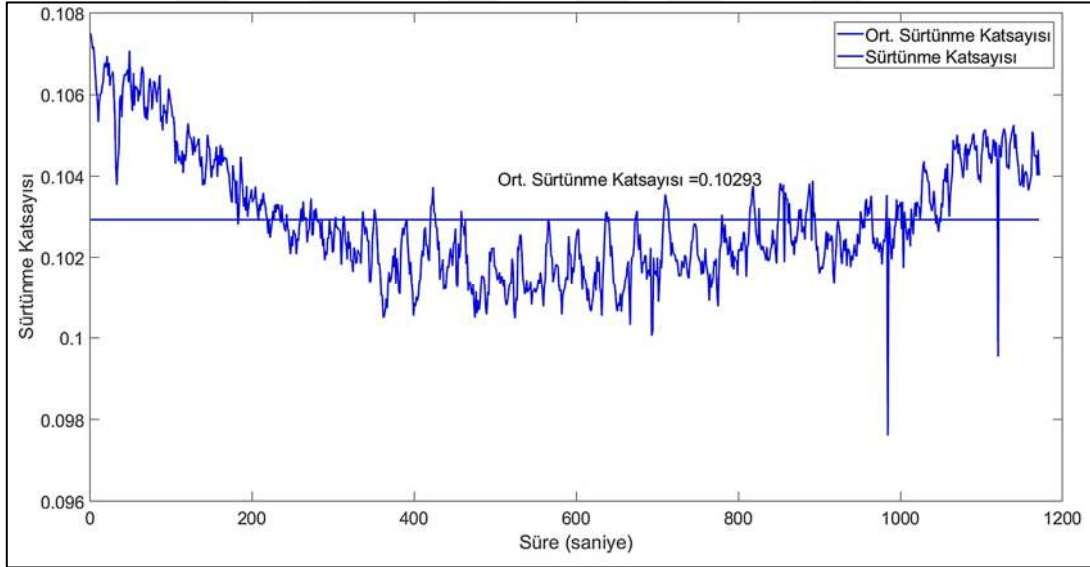
Şekil 3.32 Tüm açılara göre 1. Ölçüm sürtünme katsayısı test sonuçları

Şekil 3.31. ve Şekil 3.32 tüm açılara göre 1. Ölçüm sürtünme katsayısı test sonuçları karşılaştırılması ile 1. Ölçüm sürtünme katsayısı test sonuçlarını göstermektedir. 2. Ölçüm sürtünme katsayısı test sonuçlarında en düşük sürtünme katsayısı 20° honlanmış silindirde ölçülmüştür.

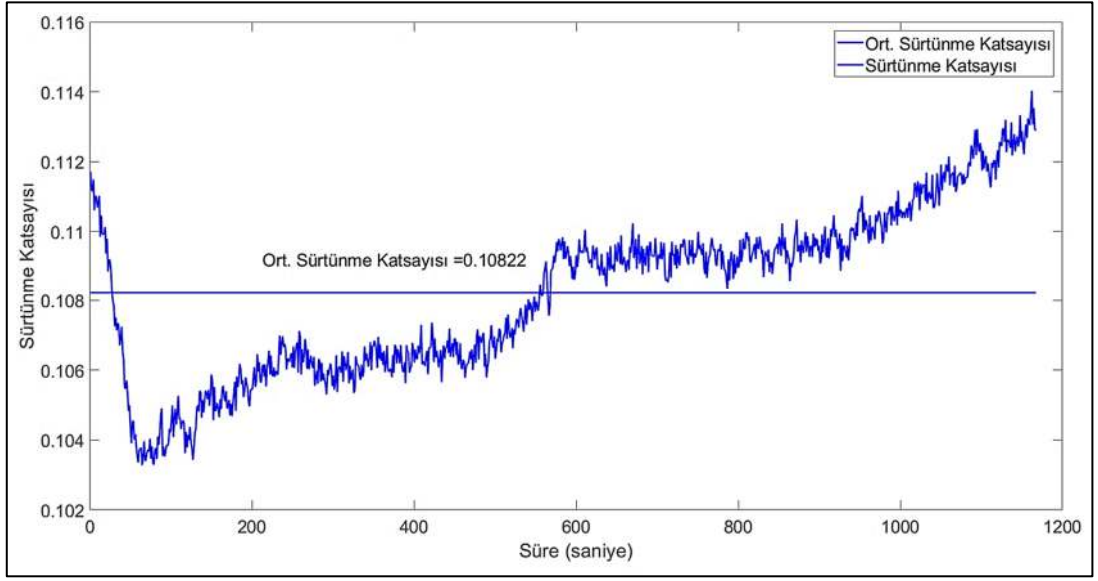
3.2.5.2 Açılara Göre Sürtünme Katsayısı (COF) Eğrileri 2. Ölçüm



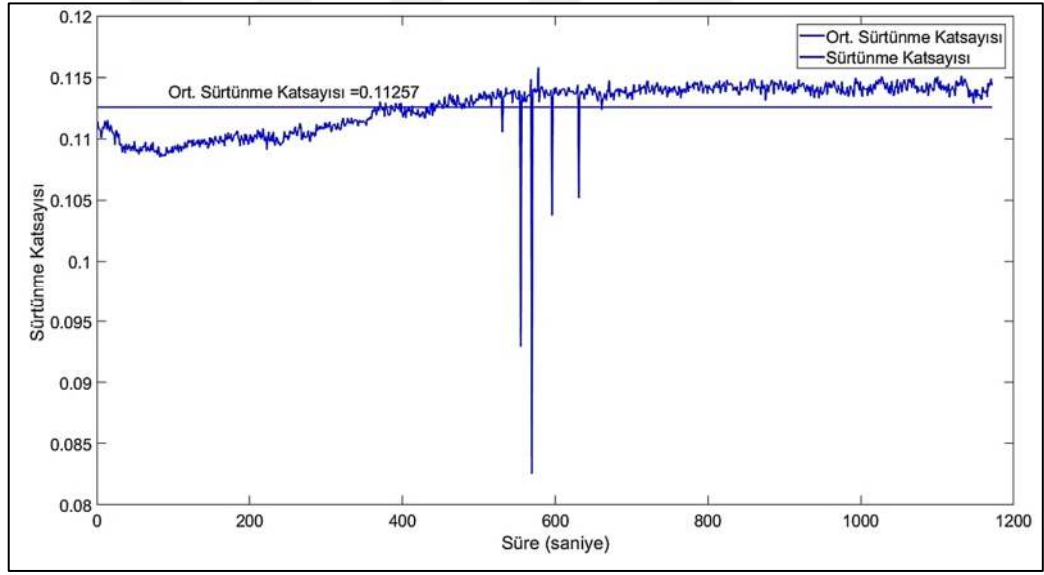
Şekil 3.33 20° honlanmış kaplamasız silindir üzerine bilye testi



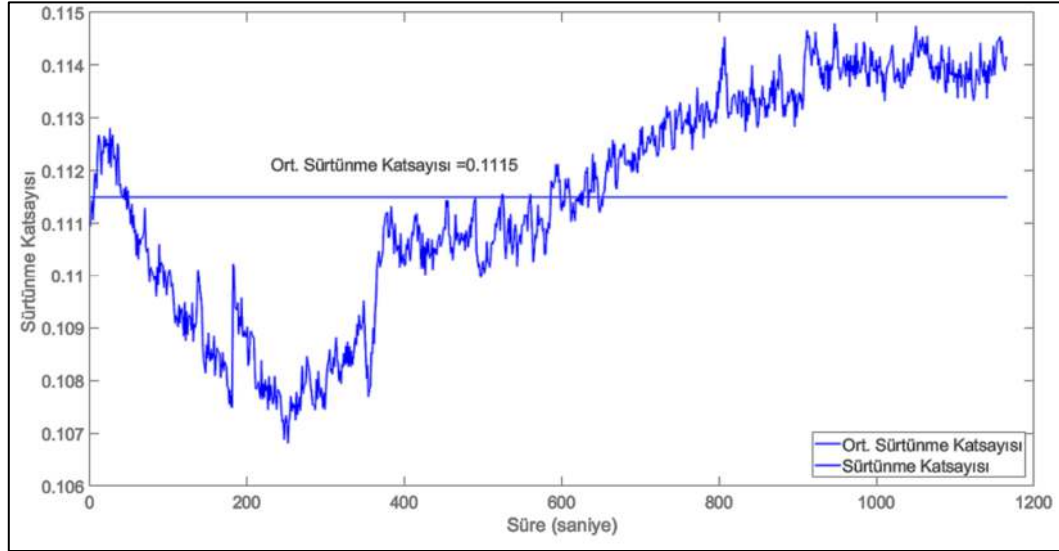
Şekil 3.34 30° honlanmış kaplamasız silindir üzerine bilye testi



Şekil 3.35 40° honlanmış kaplamasız silindir üzerine bilye testi



Şekil 3.36 Orijinal 45° honlanmış kaplamasız silindir üzerine bilye testi

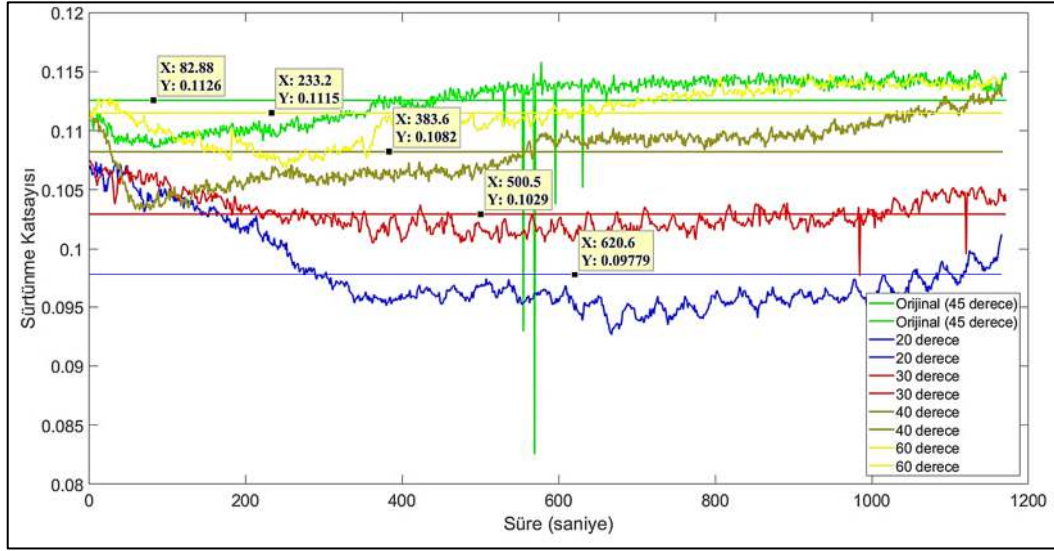


Şekil 3.37 60° honlanmış kaplamasız silindir üzerine bilye testi

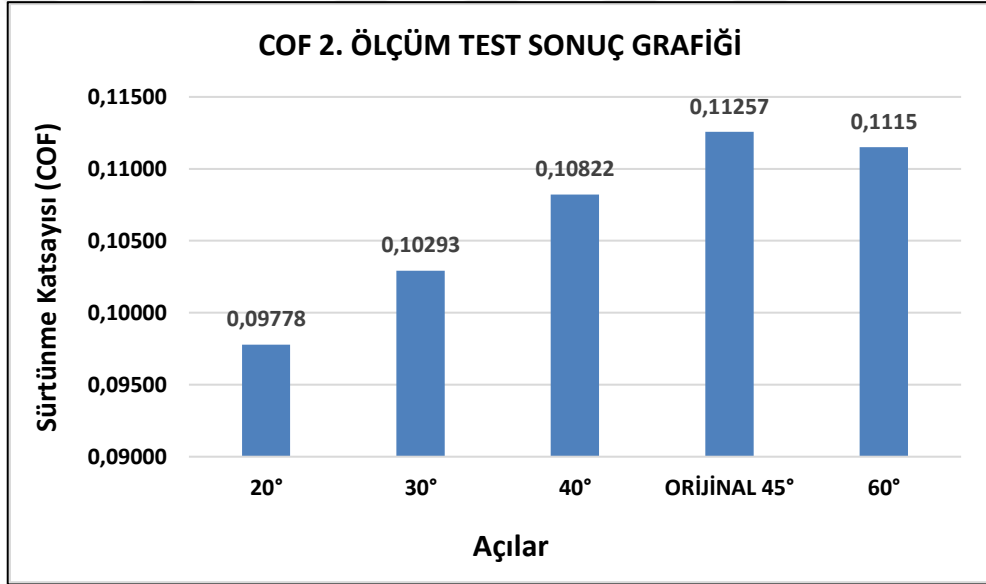
İkinci test sonucunda sırası ile Şekil 3.33, Şekil 3.34, Şekil 3.35, Şekil 3.36, Şekil 3.37; 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindirlerin zamana göre sürtünme katsayısı eğrilerini göstermektedir. Sürtünme katsayısı ölçüm sonuçları tablo 3.11'de verilmiştir.

Tablo 3.11 İkinci test sonucunda 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindirlerin zamana göre sürtünme katsayısı verileri

Honlama açısı	Sürtünme katsayısı
20°	0.097786
30°	0.10293
40°	0.10822
45°	0.11257
60°	0.1115



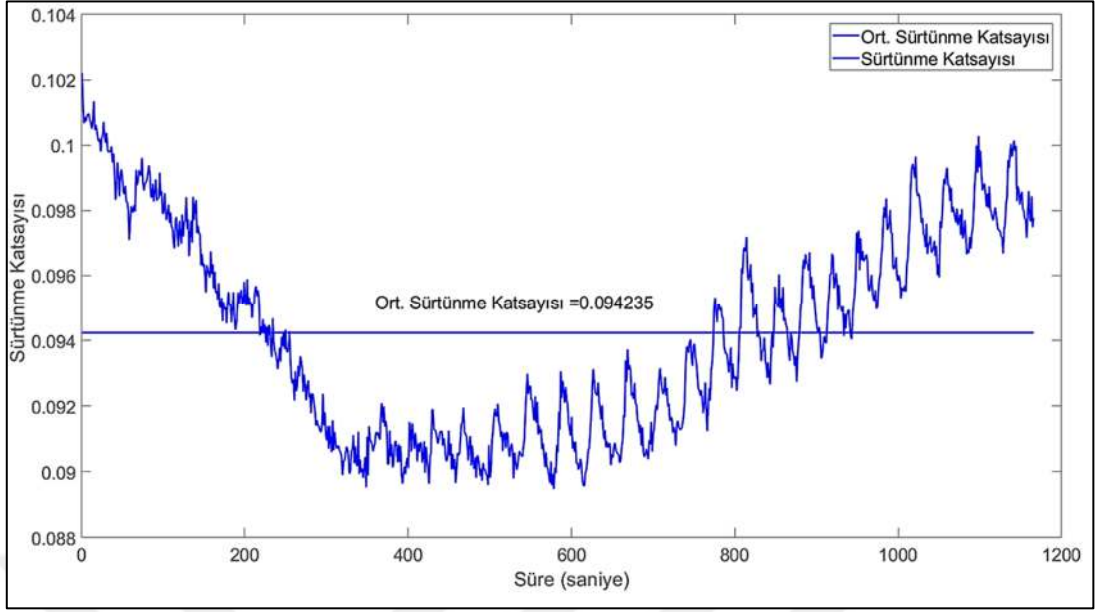
Şekil 3.38 Tüm açılara göre 2. Ölçüm sürtünme katsayısı test sonuçları karşılaştırılması



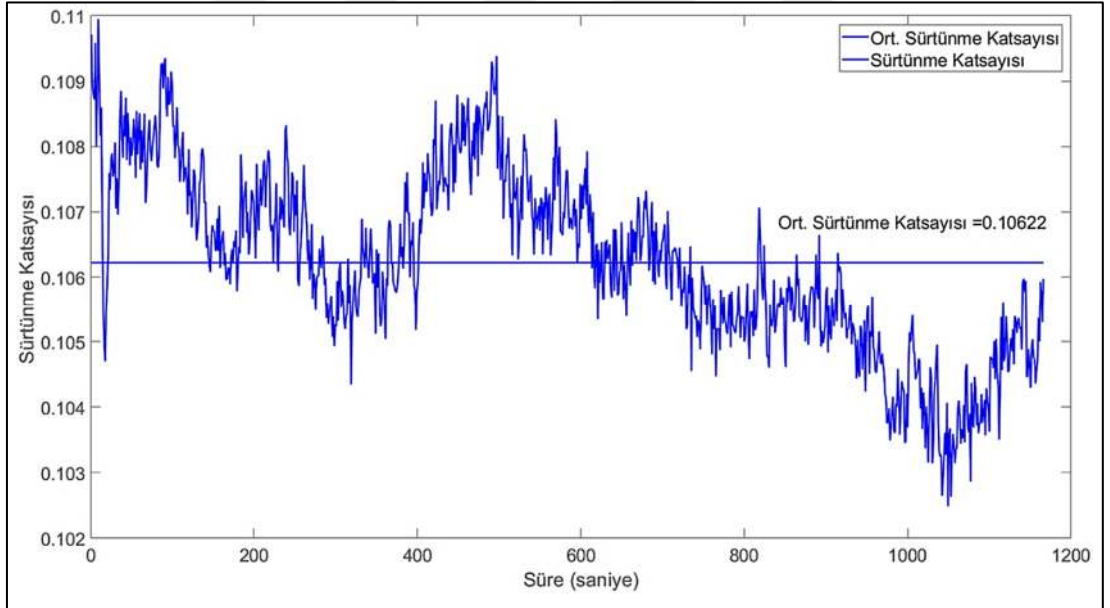
Şekil 3.39 Tüm açılara göre 2. Ölçüm sürtünme katsayısı test sonuçları

Şekil 3.38 ve Şekil 3.39 tüm açılara göre 2. Ölçüm sürtünme katsayısı test sonuçları karşılaştırılması ile 2. Ölçüm sürtünme katsayısı test sonuçlarını göstermektedir. 2. Ölçüm sürtünme katsayısı test sonuçlarında en düşük sürtünme katsayısı 20° honlanmış silindirde ölçülmüştür.

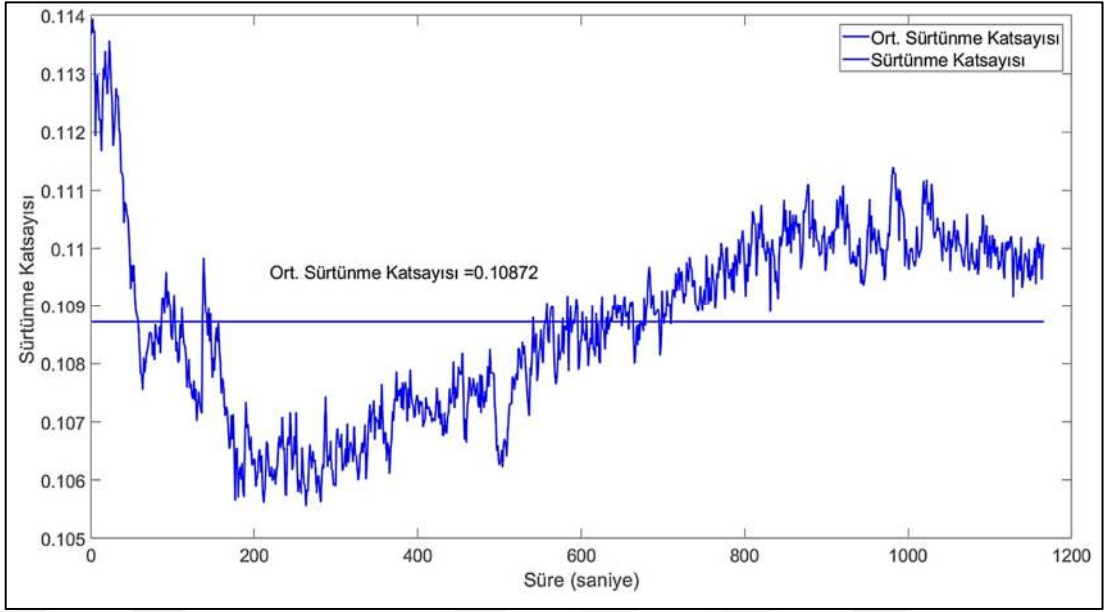
3.2.5.3 Açılara Göre Sürtünme Katsayısı (COF) Eğrileri 3. Ölçüm



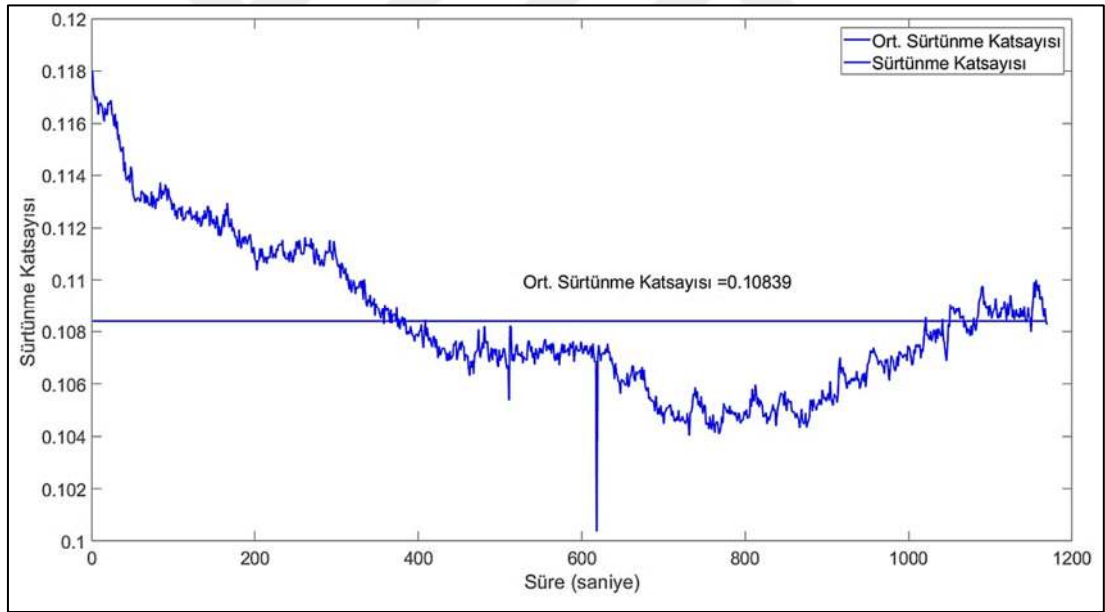
Şekil 3.40 20° Honlanmış kaplamasız silindir üzerine bilye testi



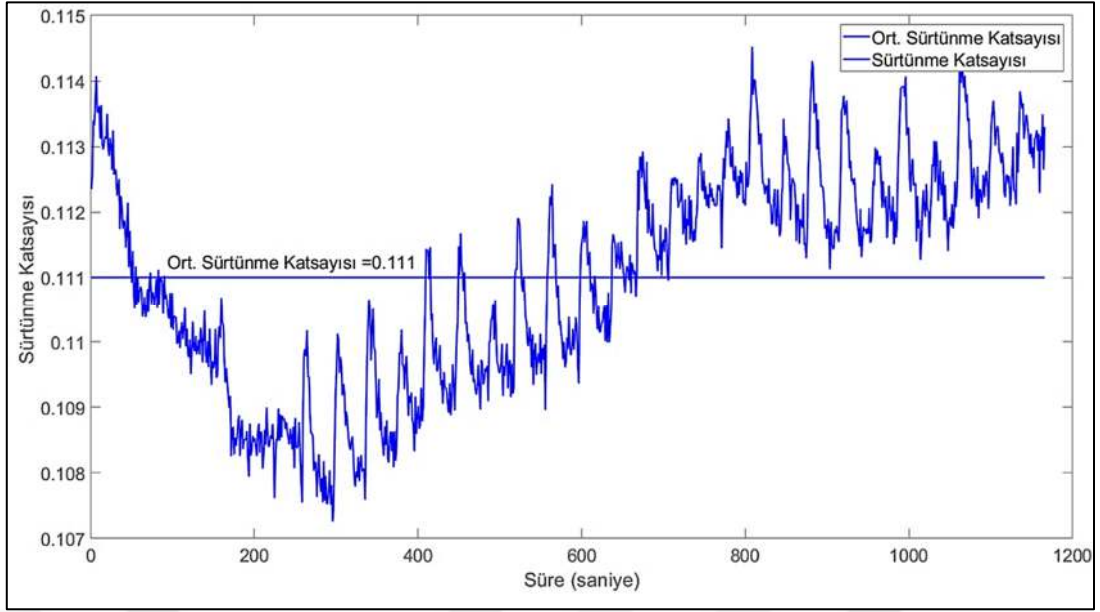
Şekil 3.41 30° honlanmış kaplamasız silindir üzerine bilye testi



Şekil 3.42 40° honlanmış kaplamasız silindir üzerine bilye testi



Şekil 3.43 45° honlanmış kaplamasız silindir üzerine bilye testi

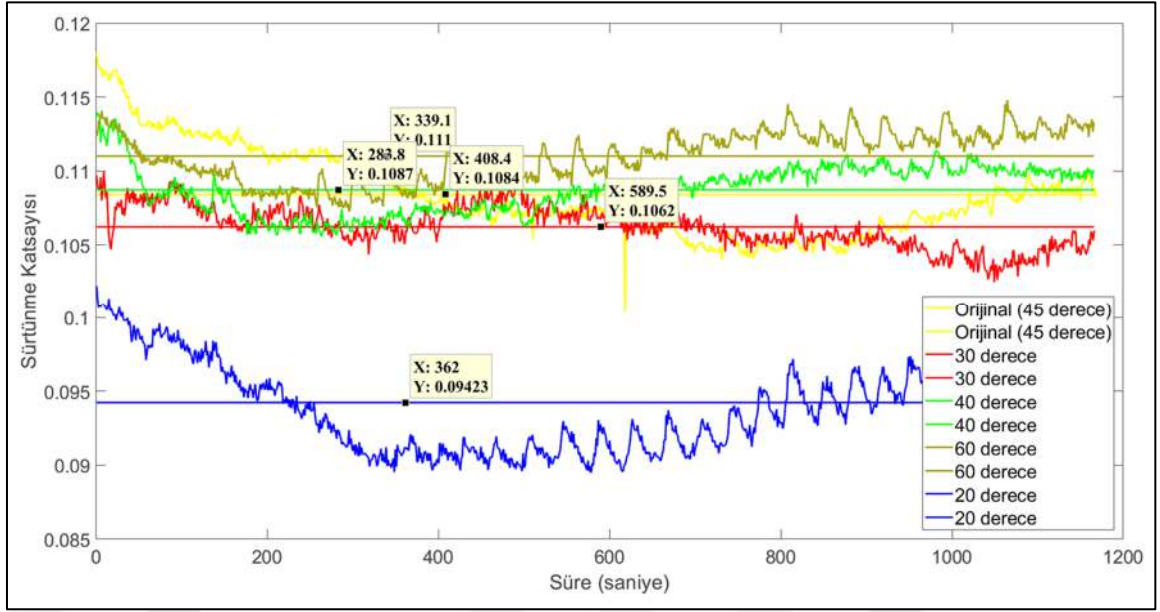


Şekil 3.44 60° honlanmış kaplamasız silindir üzerine bilye testi

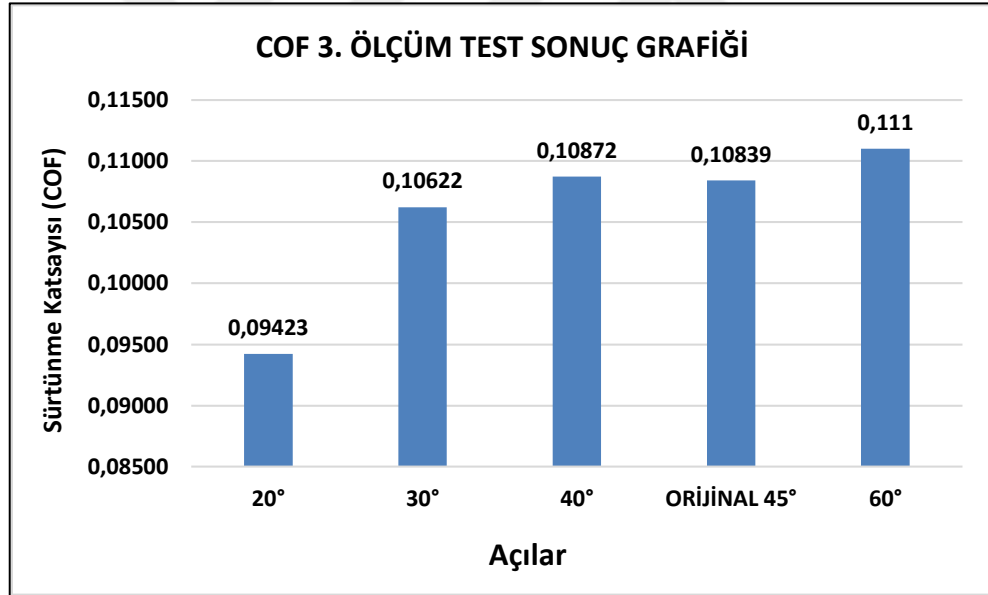
Üçüncü test sonucunda sırası ile Şekil 3.40, Şekil 3.41, Şekil 3.42, Şekil 3.43, Şekil 3.44; 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindirlerin zamana göre sürtünme katsayısı eğrilerini göstermektedir. Sürtünme katsayısı ölçüm sonuçları tablo 3.12'de verilmiştir.

Tablo 3.12 Üçüncü test sonucunda 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindirlerin zamana göre sürtünme katsayısı verileri

Honlama açısı	Sürtünme katsayısı
20°	0.094235
30°	0.10622
40°	0.10872
45°	0.10839
60°	0.111

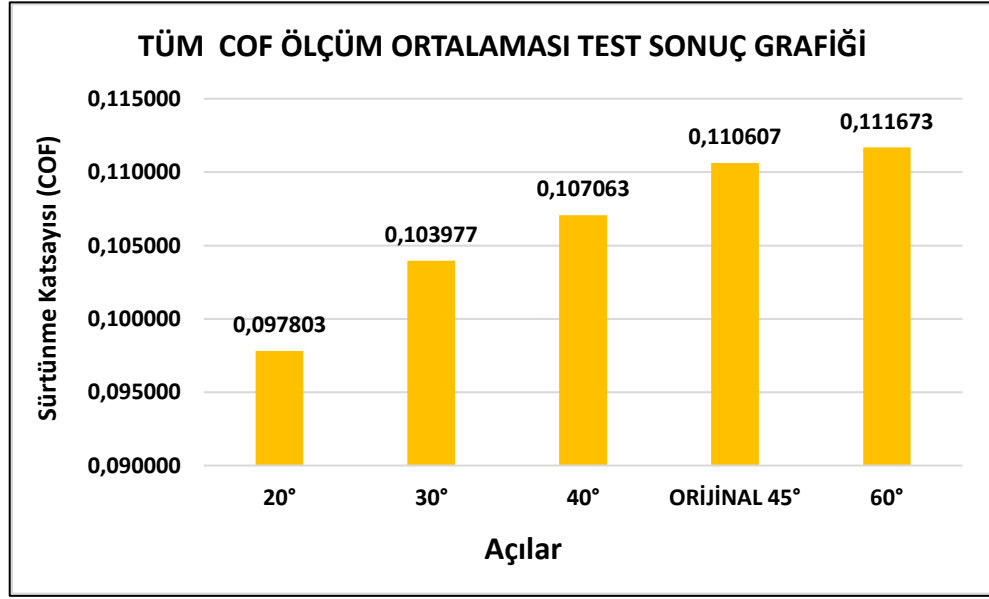


Şekil 3.45 Tüm açılara göre 3. Ölçüm sürtünme katsayısı test sonuçları karşılaştırılması



Şekil 3.46 Tüm açılara göre 3. Ölçüm sürtünme katsayısı test sonuçları

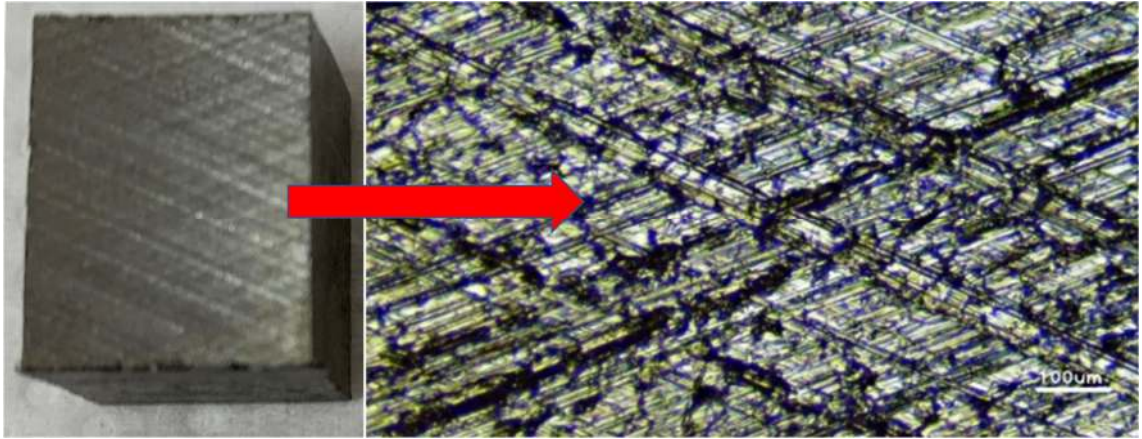
Şekil 3.45 ve Şekil 3.46 tüm açılara göre 3. Ölçüm sürtünme katsayısı test sonuçları karşılaştırılması ile 3. Ölçüm sürtünme katsayısı test sonuçlarını göstermektedir. 3. Ölçüm sürtünme katsayısı test sonuçlarında en düşük sürtünme katsayısı 20° honlanmış silindirde ölçülmüştür.



Şekil 3.47 Tüm testlerin sürtünme katsayısı ortalama verileri grafiği

Şekil 3.47 tüm testlerin sürtünme katsayısı ortalama verileri grafiğini göstermektedir. Ortalama verilere göre en düşük sürtünme katsayısı 20° honlanmış silindirde ölçüldüğü doğrulanmıştır.

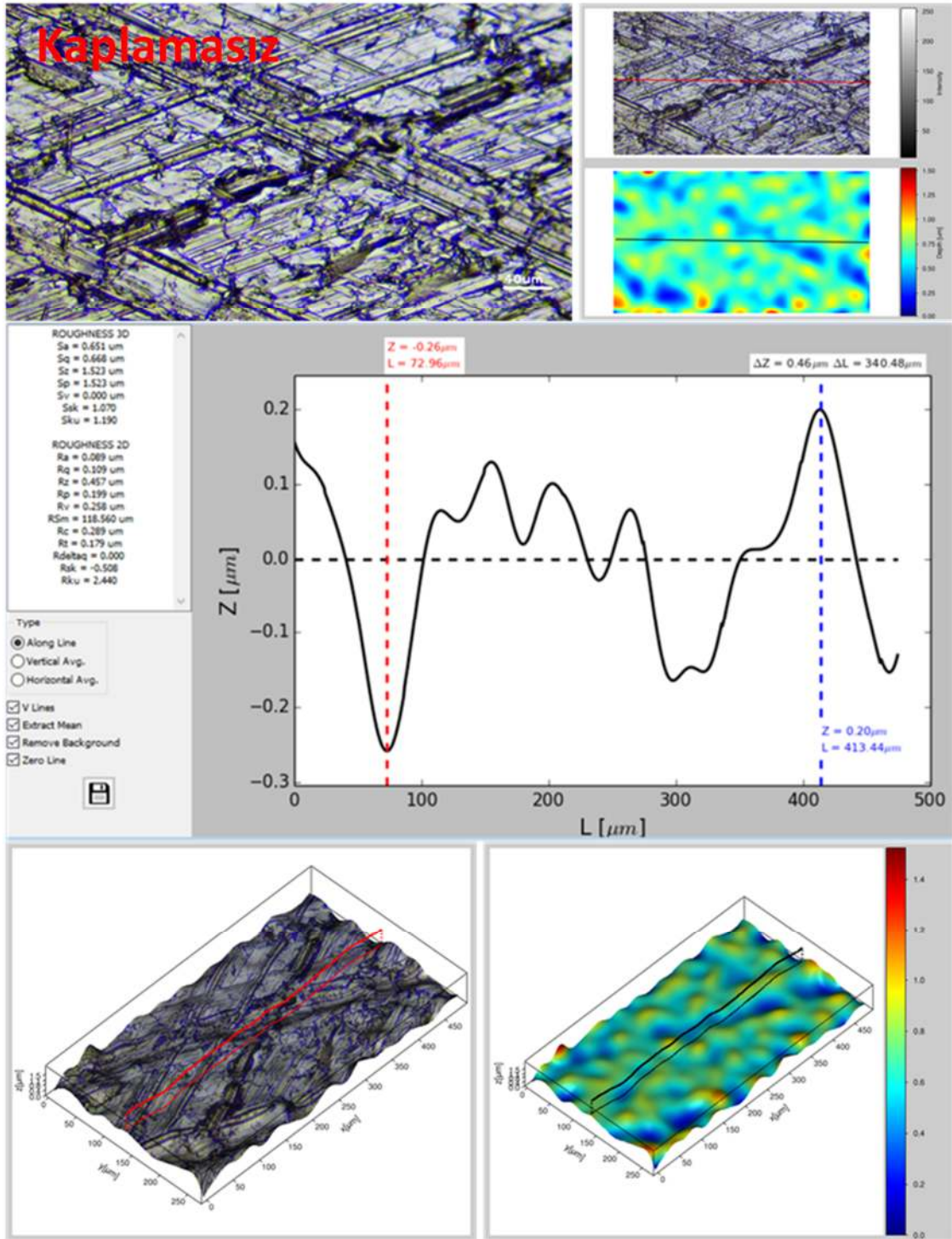
3.3 Kaplamalara Göre Test Sonuçları



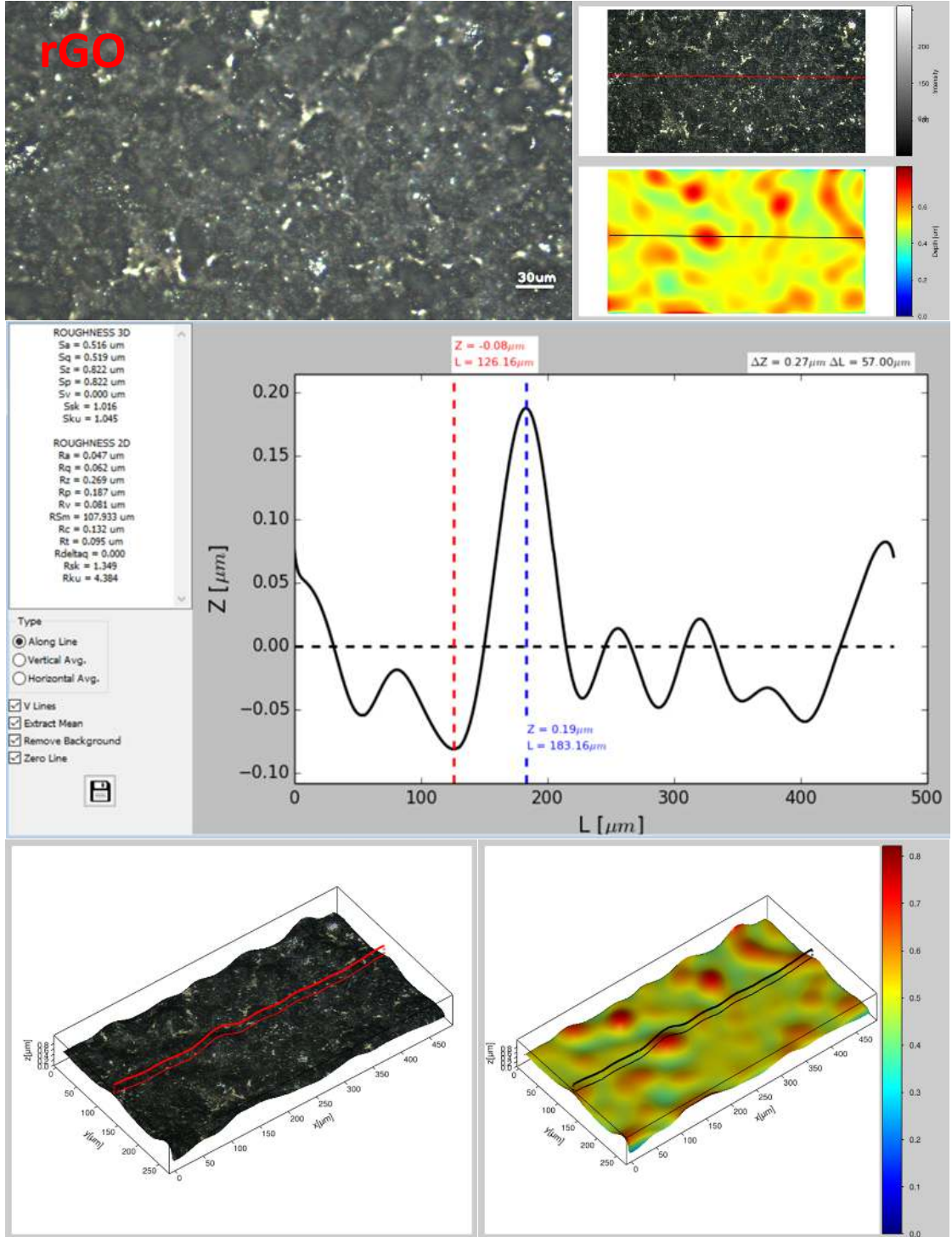
Şekil 3.48 Test edilmemiş silindir fotoğrafı ve mikroskop görüntüsü

Şekil 3.48 test edilmemiş silindir fotoğrafı ve mikroskop görüntüsünü göstermektedir. (20°, 30°, 40°, 45° ve 60°) honlanmış silindirlerde sırası *ile rGO, CrCN, TiN ve DLC* ile kaplanmış ve tribometre testleri yapılmıştır. Testler aynı ortam şartlarında, 100°C ortam sıcaklığında, 5W40 Shell motor tam sentetik yağında 6.176 kg yükü gerçekleştirilmiştir.

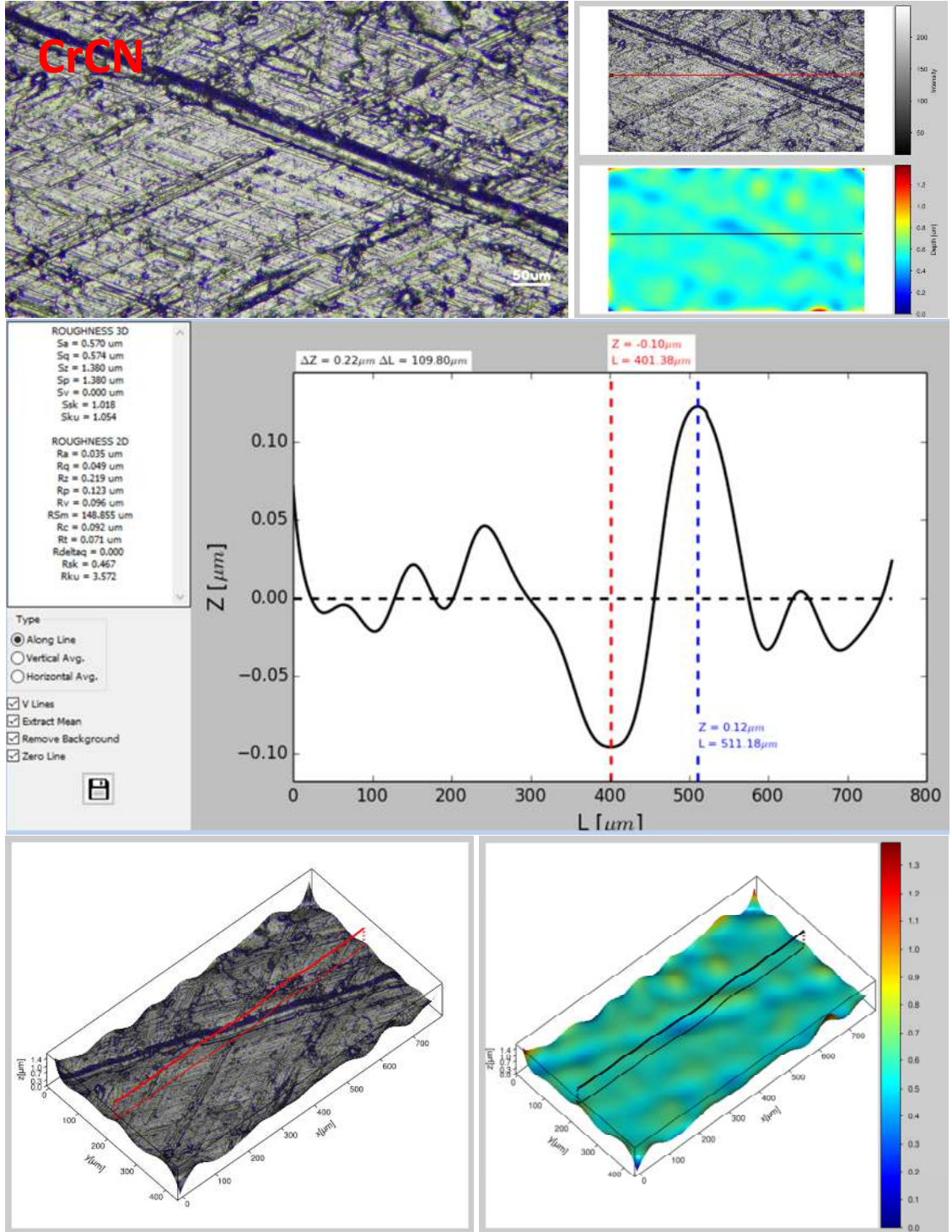
3.3.1 Test Öncesi Kaplamalar



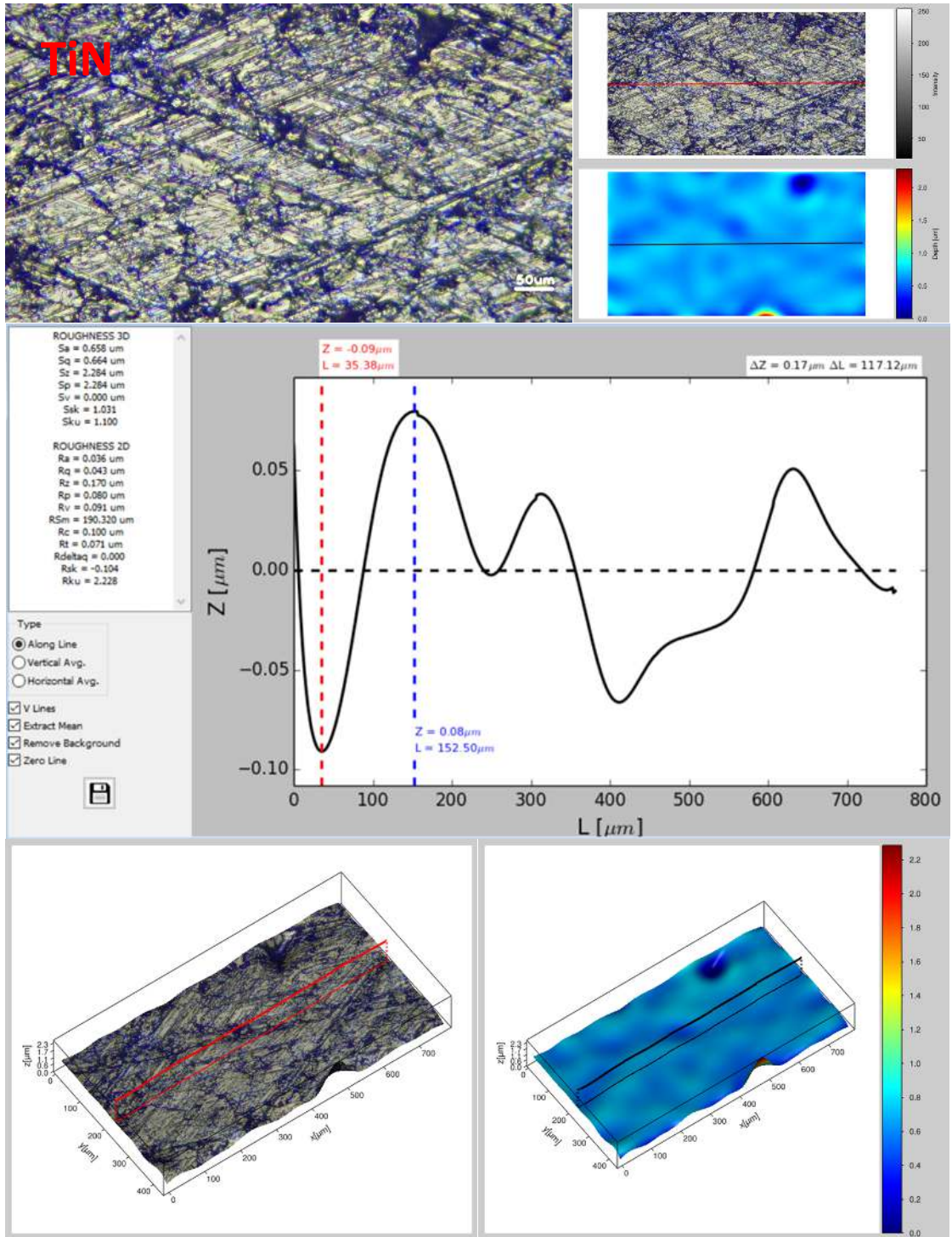
Şekil 3.49 Kaplama öncesi test edilmemiş silindirin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi



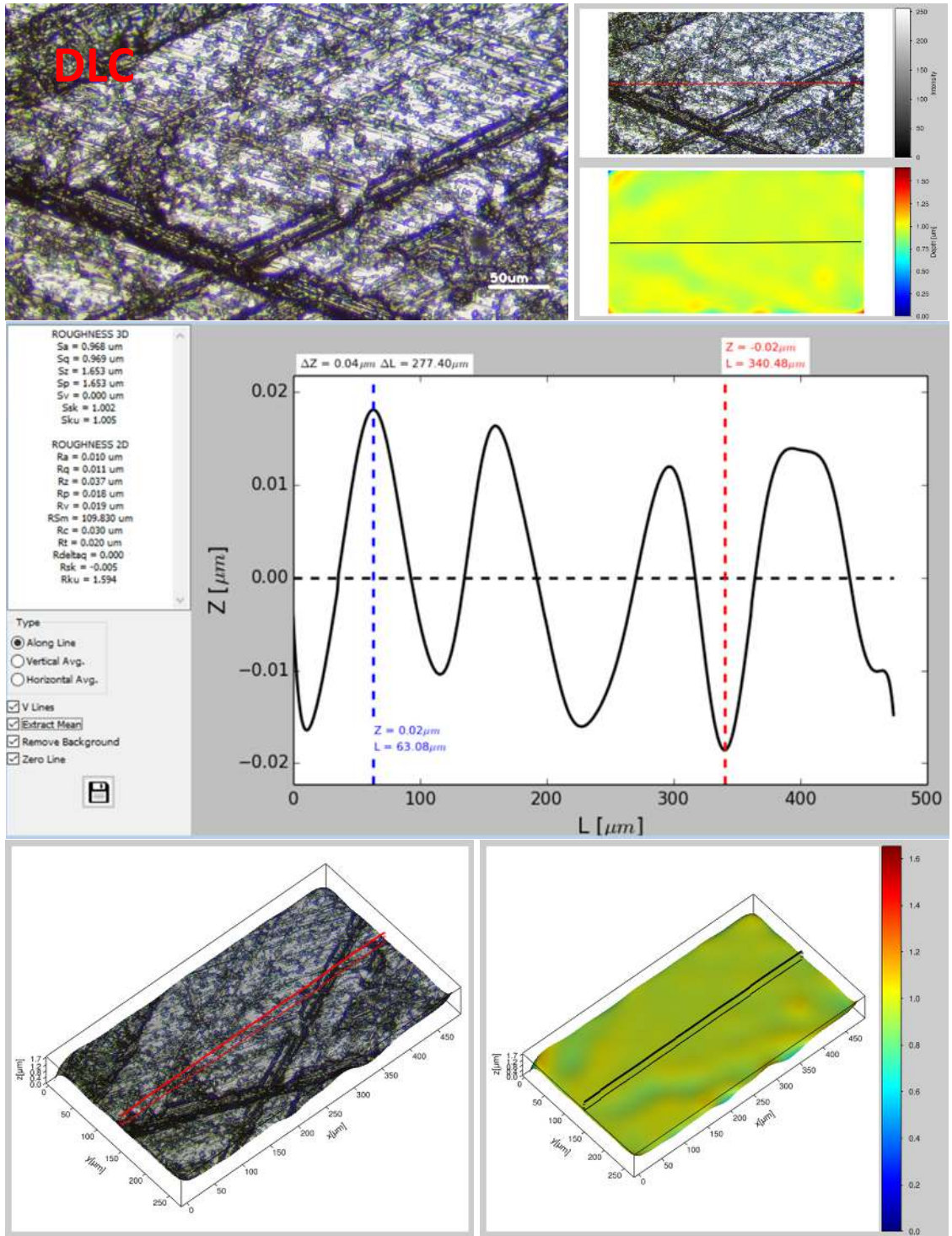
Şekil 3.50 Test edilmemiş rGO kaplı silindirin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi



Şekil 3.51 Test edilmemiş CrCN kaplı silindirin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi



Şekil 3.52 Test edilmemiş TiN kaplı silindirin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi



Şekil 3.53 Test edilmemiş DLC kaplı silindirin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi

Sırasıyla Şekil 3.49, Şekil 3.50, Şekil 3.51, Şekil 3.52, Şekil 3.53 kaplamasız ile rGO, CrCN, TiN ve DLC kaplı silindir gömleklerinin test öncesi 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisini göstermektedir. 2D ve 3D pürüzlülük değerleri Tablo 3.13'te verilmiştir.

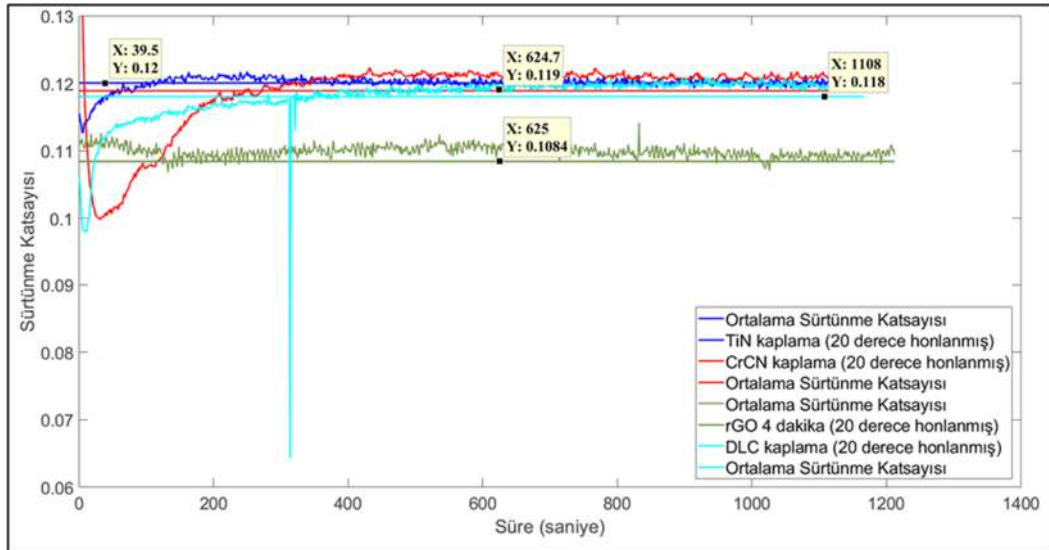
Tablo 3.13 Kaplamasız ile rGO, CrCN, TiN ve DLC kaplı silindir gömleklerinin test öncesi 2D ve 3D pürüzlülük değerleri

Test öncesi kaplama şekli	Sa (μm)	Ra (μm)
Kaplamasız	0.651	0.089
rGO	0.516	0.047
CrCN	0.570	0.035
TiN	0.658	0.036
DLC	0.968	0.010

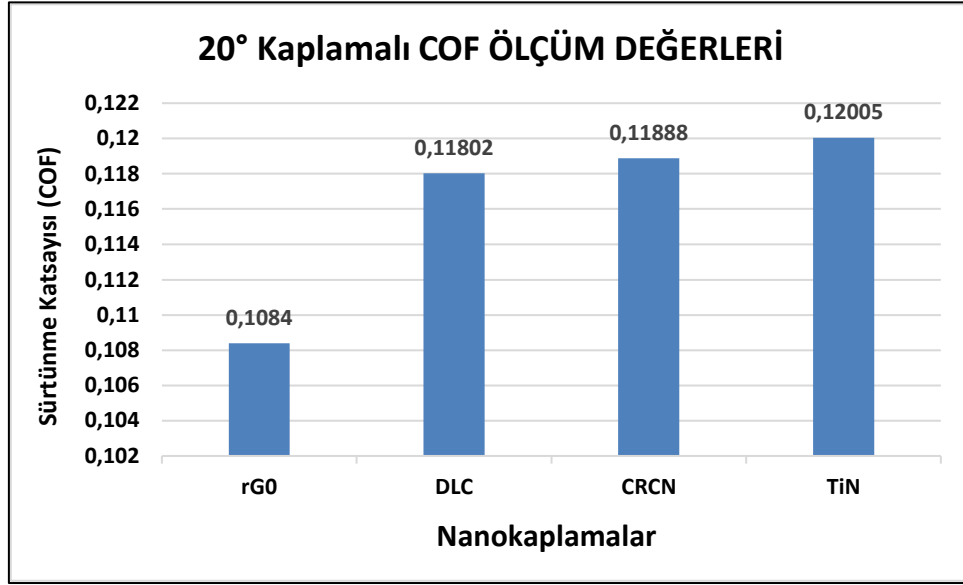
3.3.2 Kaplamalara Göre Yapılan Test Sonuçları

Bu çalışmada motor silindir kovanının (20° , 30° , 40° , 45° ve 60°) gibi farklı honlama açılarının işlenmesi, plato honlama yapılması, bu farklı açılarda sırasıyla rGO, CrCN, TiN, DLC gibi nanokaplamalar yapılarak tribometre testleri sonucunda en iyi kaplama açısı bulunup motor testleri yapılmıştır.

3.3.3 Tüm Kaplamalı Testlerin Açılara Göre Sürtünme Katsayısı Test Sonuçları



Şekil 3.54 20° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayılarının eğrilerinin zamana göre karşılaştırılması

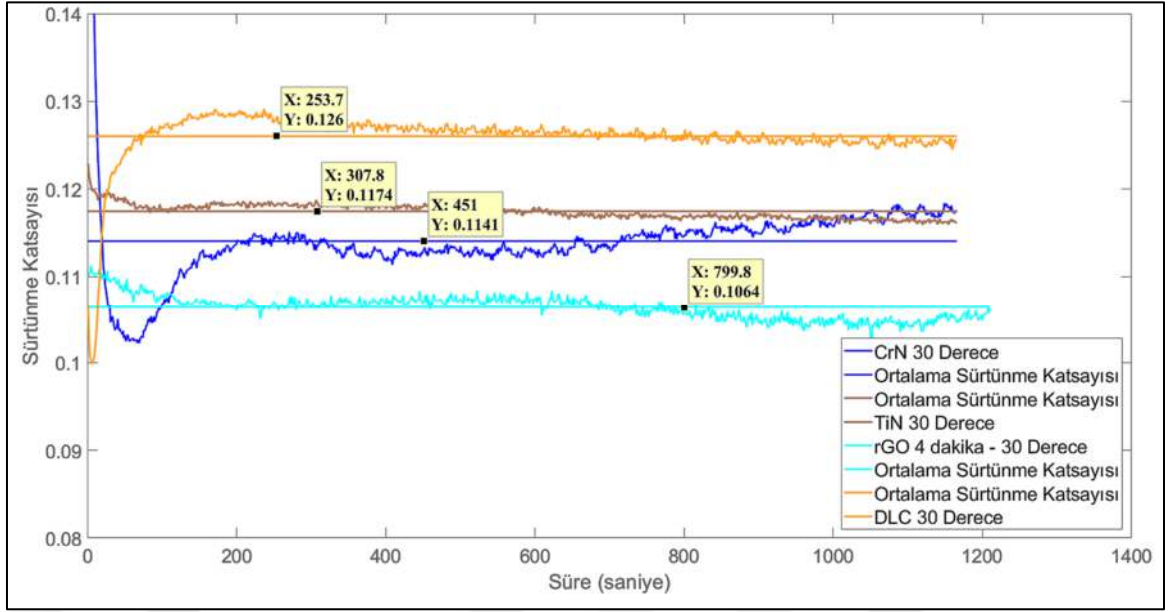


Şekil 3.55 20° Honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayıları verilerinin karşılaştırılması

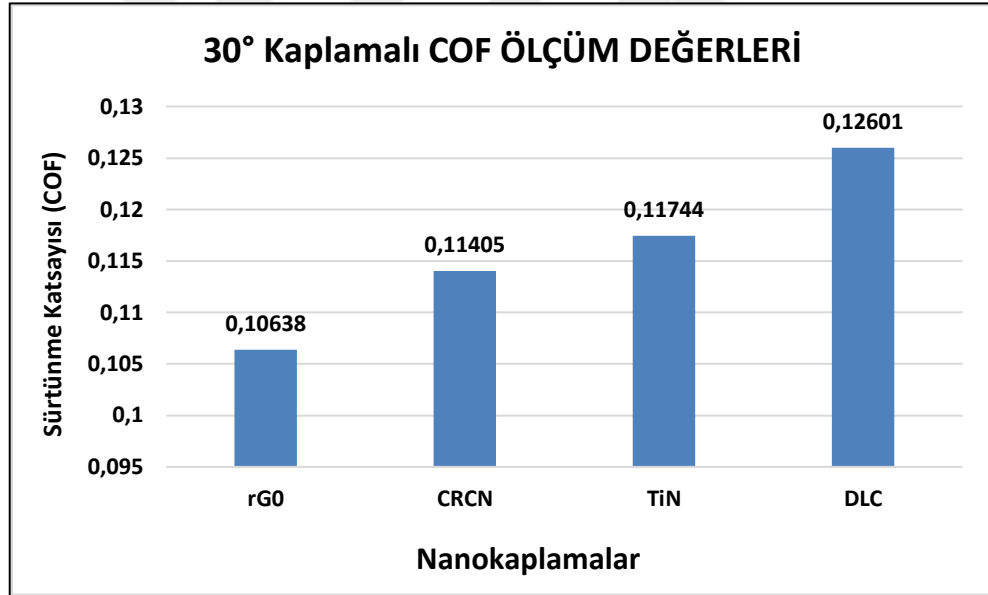
20° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayılarının eğrileri ve verileri Şekil 3.54 ve Şekil 3.55’de gösterilmiştir. Tablo 3.14’de göre en düşük sürtünme katsayısı 20° honlanmış rGO kaplamalı silindirde ölçülmüştür.

Tablo 3.14 20° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayısı verileri

20° Honlanmış silindirde kaplama	Sürtünme katsayısı
rGO	0.1084
CrCN	0.11888
TiN	0.12005
DLC	0.11802



Şekil 3.56 30° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayılarının eğrilerinin zamana göre karşılaştırılması

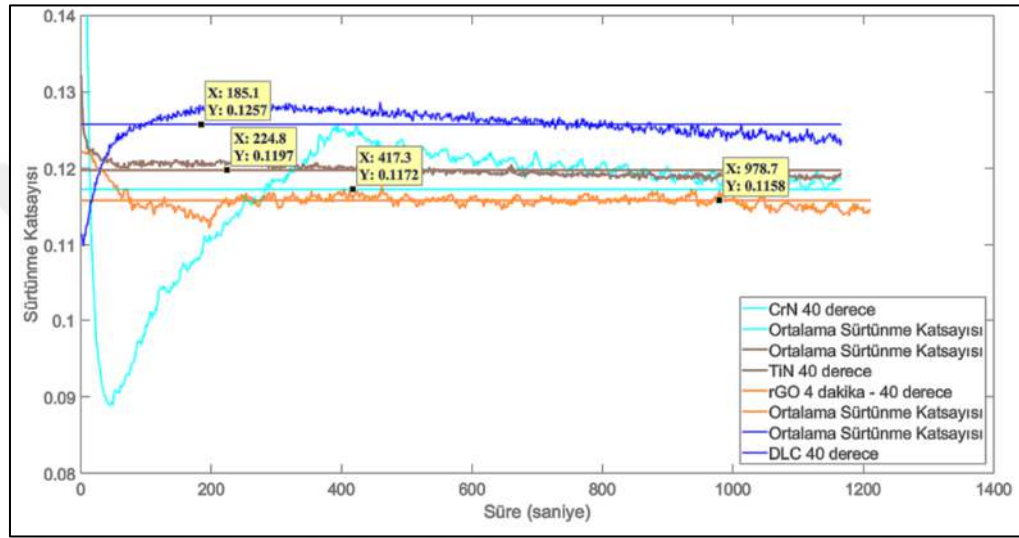


Şekil 3.57 30° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayıları verilerinin karşılaştırılması

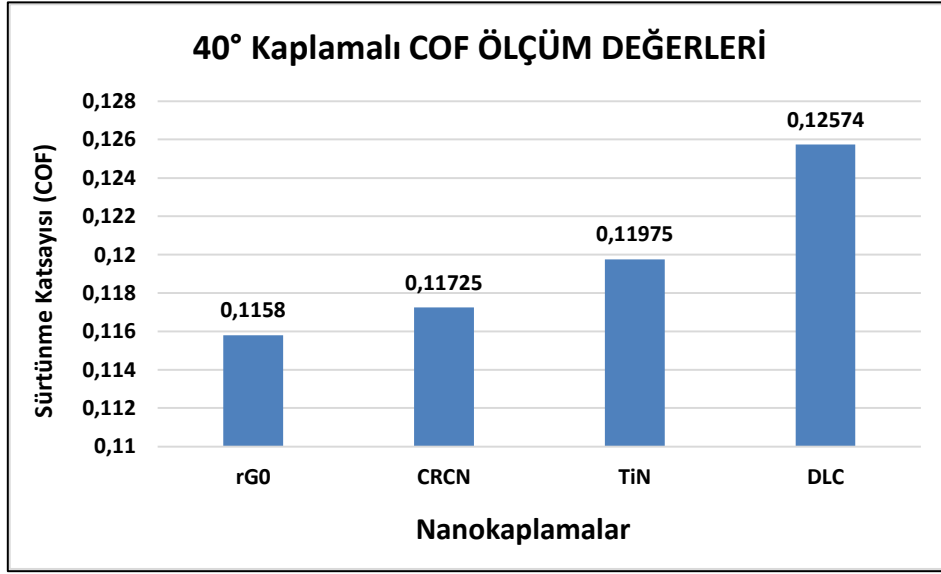
30° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayılarının eğrileri ve verileri Şekil 3.56 ve Şekil 3.57’de gösterilmiştir. Tablo 3.15’e göre en düşük sürtünme katsayısı 30° honlanmış rGO kaplamalı silindirde ölçülmüştür.

Tablo 3.15 30° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayısı verileri.

30° Honlanmış silindirde kaplama	Sürtünme katsayısı
rGO	0.10638
CrCN	0.11405
TiN	0.11744
DLC	0.12601



Şekil 3.58 40° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayılarının eğrilerinin zamana göre karşılaştırılması

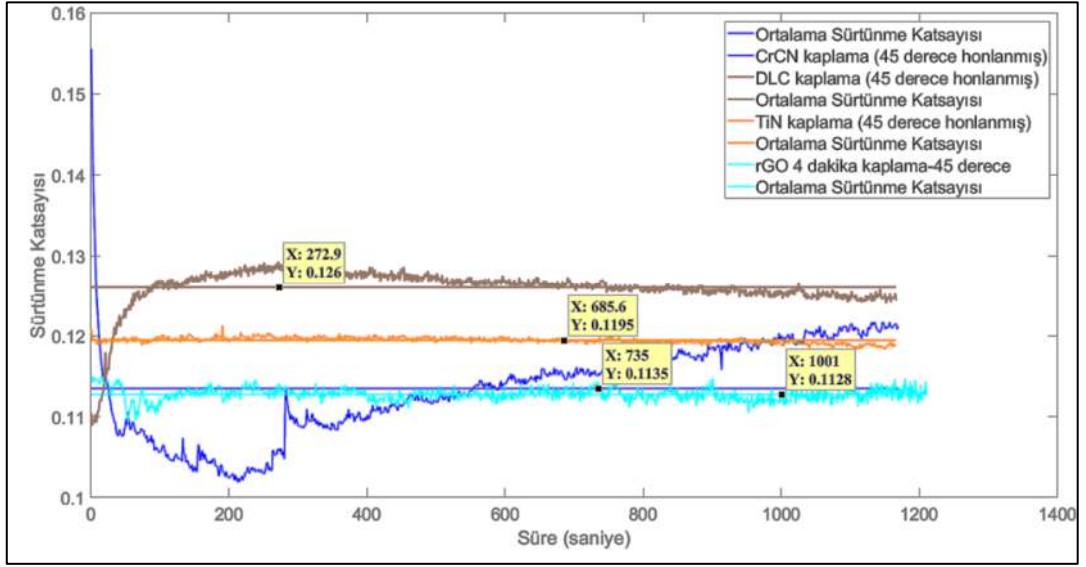


Şekil 3.59 40° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayıları verilerinin karşılaştırılması

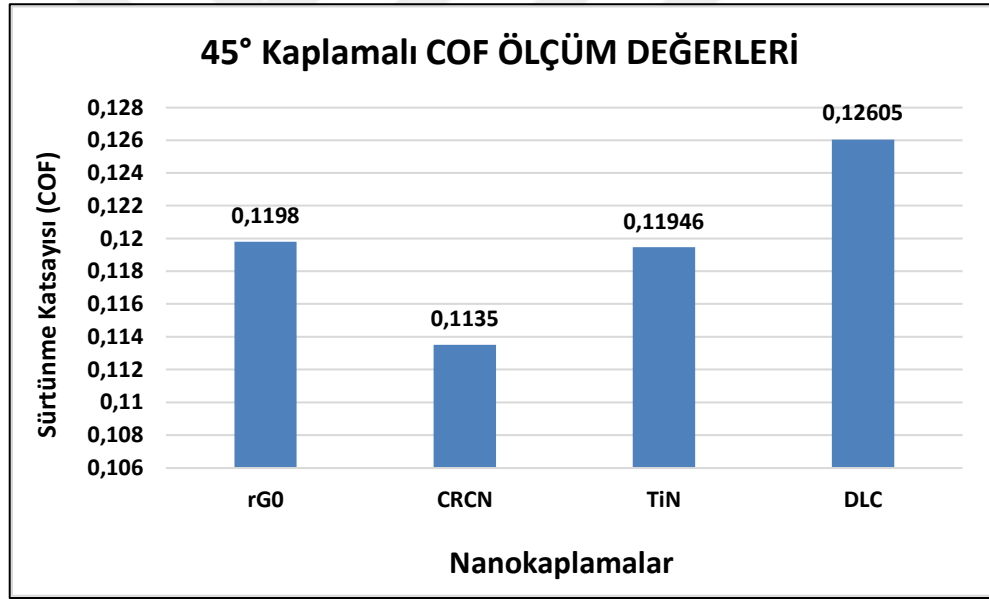
40° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayılarının eğrileri ve verileri Şekil 3.58 ve Şekil 3.59’da gösterilmiştir. Tablo 3.16’ya göre en düşük sürtünme katsayısı 40° honlanmış rGO kaplamalı silindirde ölçülmüştür.

Tablo 3.16 40° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayısı verileri.

40° Honlanmış silindirde kaplama	Sürtünme katsayısı
rGO	0.11580
CrCN	0.11725
TiN	0.11975
DLC	0.12574



Şekil 3.60 45° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayılarının eğrilerinin zamana göre karşılaştırılması

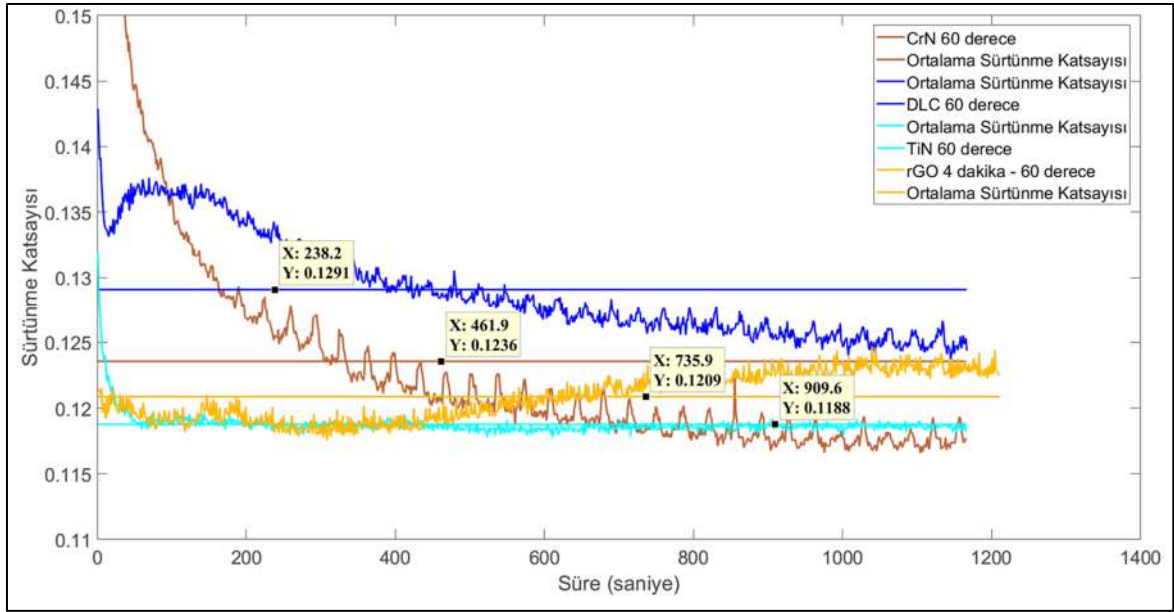


Şekil 3.61 45° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayıları verilerinin karşılaştırılması

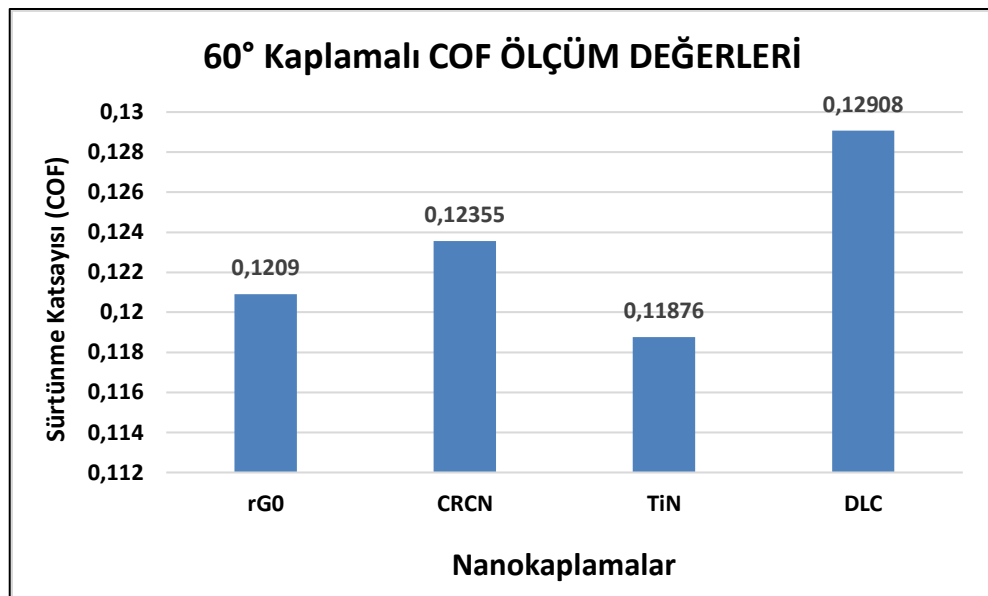
45° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayılarının eğrileri ve verileri Şekil 3.60 ve Şekil 3.61’de gösterilmiştir. Tablo 3.17’ye göre en düşük sürtünme katsayısı 45° honlanmış rGO kaplamalı silindirde ölçülmüştür.

Tablo 3.17 45° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayısı verileri

45° Honlanmış silindirde kaplama	Sürtünme katsayısı
rGO	0.1128
CrCN	0.1135
TiN	0.11946
DLC	0.12605



Şekil 3.62 60° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayılarının eğrilerinin zamana göre karşılaştırılması



Şekil 3.63 60° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayıları verilerinin karşılaştırılması

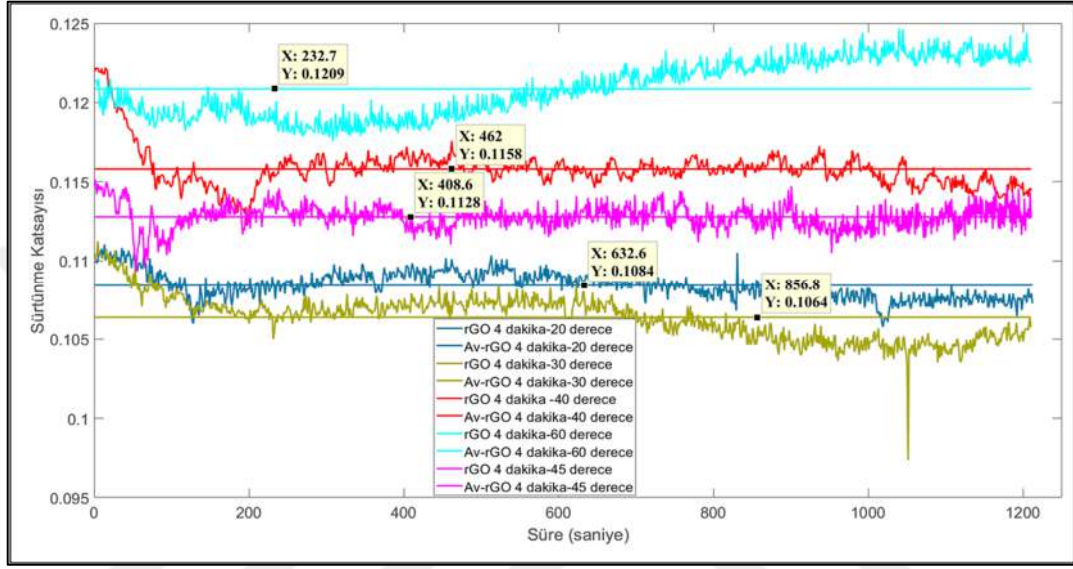
60° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayılarının eğrileri ve verileri Şekil 3.62 ve Şekil 3.63’de gösterilmiştir. Tablo 3.18’e göre en düşük sürtünme katsayısı 60° honlanmış TiN kaplamalı silindirde ölçülmüştür. Bu ölçülen değer 30° rGO kaplamanın çok üstündedir. Dikkate alınmamıştır.

Tablo 3.18 60° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayısı verileri

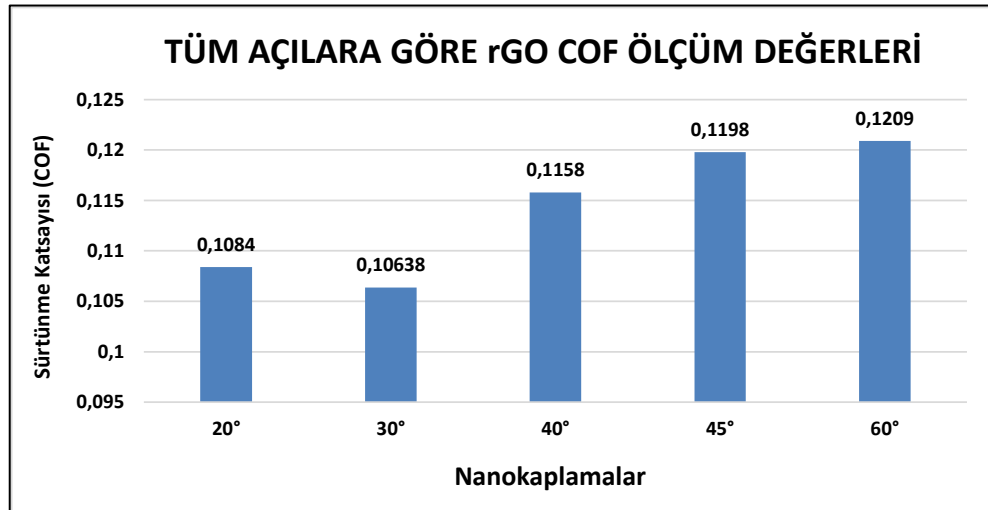
60° Honlanmış silindirde kaplama	Sürtünme katsayısı
rGO	0.12090
CrCN	0.12355
TiN	0.11876
DLC	0.12908

3.1.1 Kaplamalı Testlerde Açılara Göre En Düşük Sürtünme Katsayısı Test Sonuçları

Şekil 3.56 ve Şekil 3.57 ve Tablo 3.19’da gösterildiği gibi 30° honlanmış silindir üzerinde sırası ile rGO, CrCN, TiN ve DLC nanokaplamaların sürtünme katsayılarının eğrileri ve verileri kıyaslandığında en düşük sürtünme katsayısı 30° honlanmış rGO kaplamalı silindirde ölçülmüştür. Buna göre;



Şekil 3.64 Tüm açılara göre 20°, 30°, 40°, 45° ve 60° honlanmış silindirler üzerinde rGO nanokaplamaların sürtünme katsayıları eğrilerinin zamana göre karşılaştırılması



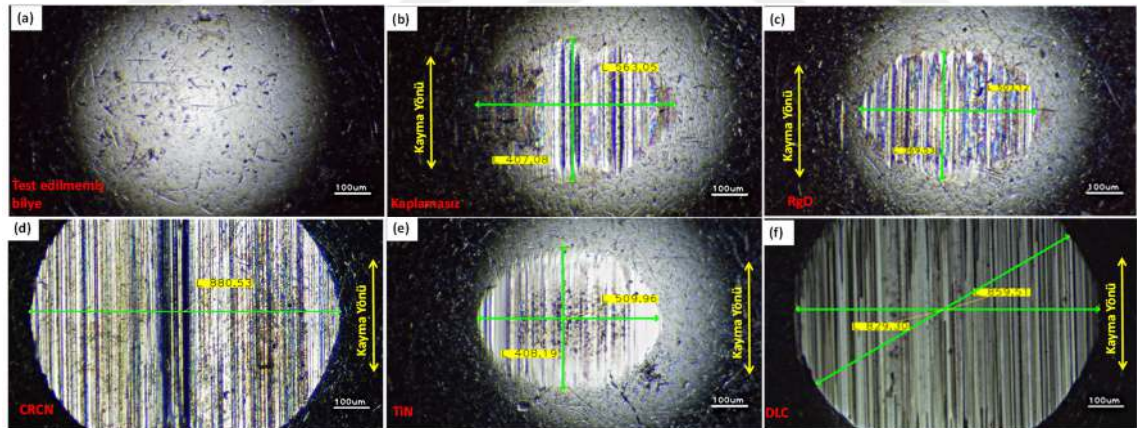
Şekil 3.65 Tüm açılara göre 20°, 30°, 40°, 45° ve 60° honlanmış silindirler üzerinde rGO nanokaplamaların sürtünme katsayıları verilerinin karşılaştırılması

Tüm açılara göre 20°, 30°, 40°, 45° ve 60° honlanmış silindirler üzerinde rGO nanokaplamanın sürtünme katsayılarının eğrileri ve verileri Şekil 3.64 ve Şekil 3.65’de gösterilmiştir. Tablo 3.19’a göre en düşük sürtünme katsayısı 30° honlanmış rGO kaplamalı silindirde ölçülmüştür. *Önemli sonuç, en düşük sürtünme katsayısı 30°honlanmış rGO kaplamalı silindirde elde edilmiştir. Dolayısı ile 30° honlanmış rGO kaplamalı bilye-silindir ikilisi diğer kaplamalar ile karşılaştırılmıştır.*

Tablo 3.19 Tüm açılara göre 20°, 30°, 40°, 45° ve 60° honlanmış silindirler üzerinde rGO nanokaplamanın sürtünme katsayıları verileri

Honlanma açıları	Kaplama	Sürtünme katsayısı
20°	rGO	0.1084
30°	rGO	0.10638
40°	rGO	0.1158
45°	rGO	0.1198
60°	rGO	0.1209

3.3.3.1 30° Kaplamalara Göre Bilye Test Sonuçları



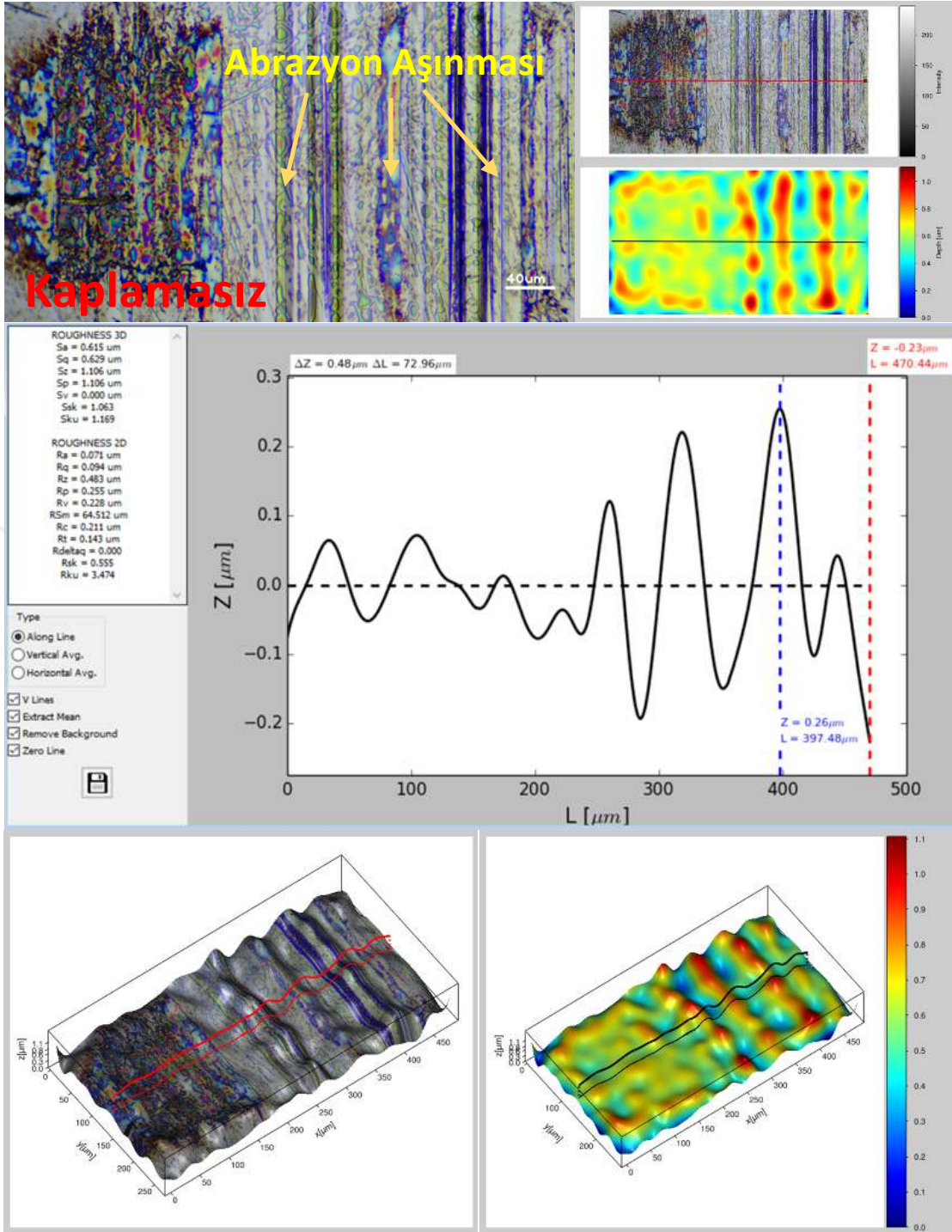
Şekil 3.66 30° için kaplamasız, rGO, CrCN, TiN ve DLC kaplı silindir gömlekleri üzerinde test edilen bilyelerin yatay ve dikey olarak ölçülen aşınma izi çaplarının optik dijital görüntüleri. (a) Test edilmemiş, (b) Kaplamasız (c) rGO, (d) CrCN, (e) TiN, (f) DLC

Şekil 3.66’ e göre Tablo 3.20’de görüldüğü gibi (30° için) test edilmemiş, kaplamasız, rGO, CrCN, TiN ve DLC kaplı silindir gömlekleri üzerinde test edilen bilyelerin yatay ve dikey olarak ölçülen en düşük aşınma izi çapı rGO kaplamalı silindirde ölçülmüştür. Şaşırtıcı bir şekilde, CrCN ve DLC’nin aşınma izi çapları, 100 µm olan aynı mikroskobik

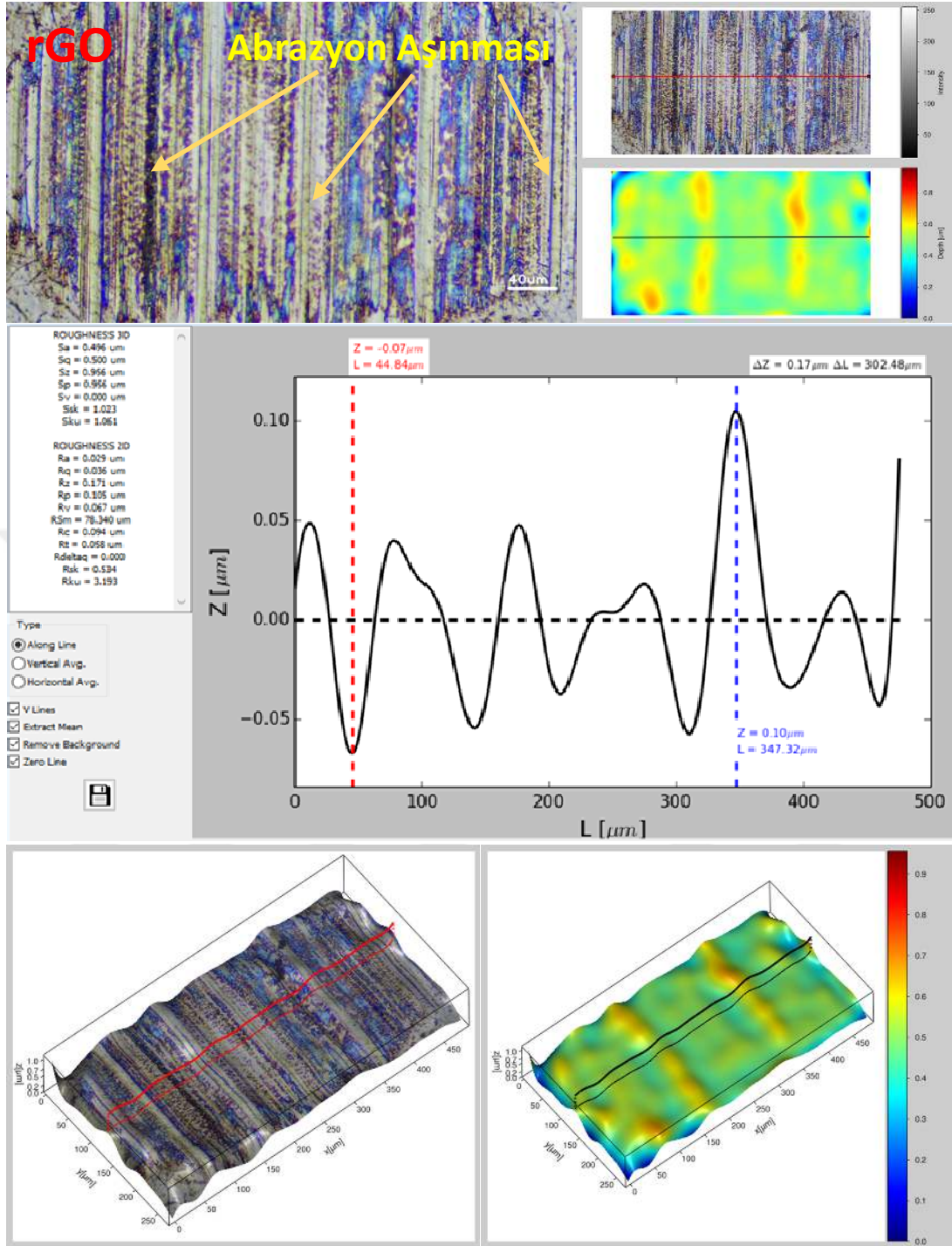
ölçekte görüntüde sınırın dışında kalmıştır. DLC kaplamanın mikrosertliği, 4H13 çeliğinin mikrosertliğinden 5,5 kat daha fazladır [33]. Sert kaplama karşı yüzeyi daha çok aşındırmıştır.

Tablo 3.20 Kaplamasız ve RGO, CrCN, TiN ve DLC kaplı silindir gömlekleri üzerinde test edilen bilyelerin yatay ve dikey olarak ölçülen aşınma izi çapları

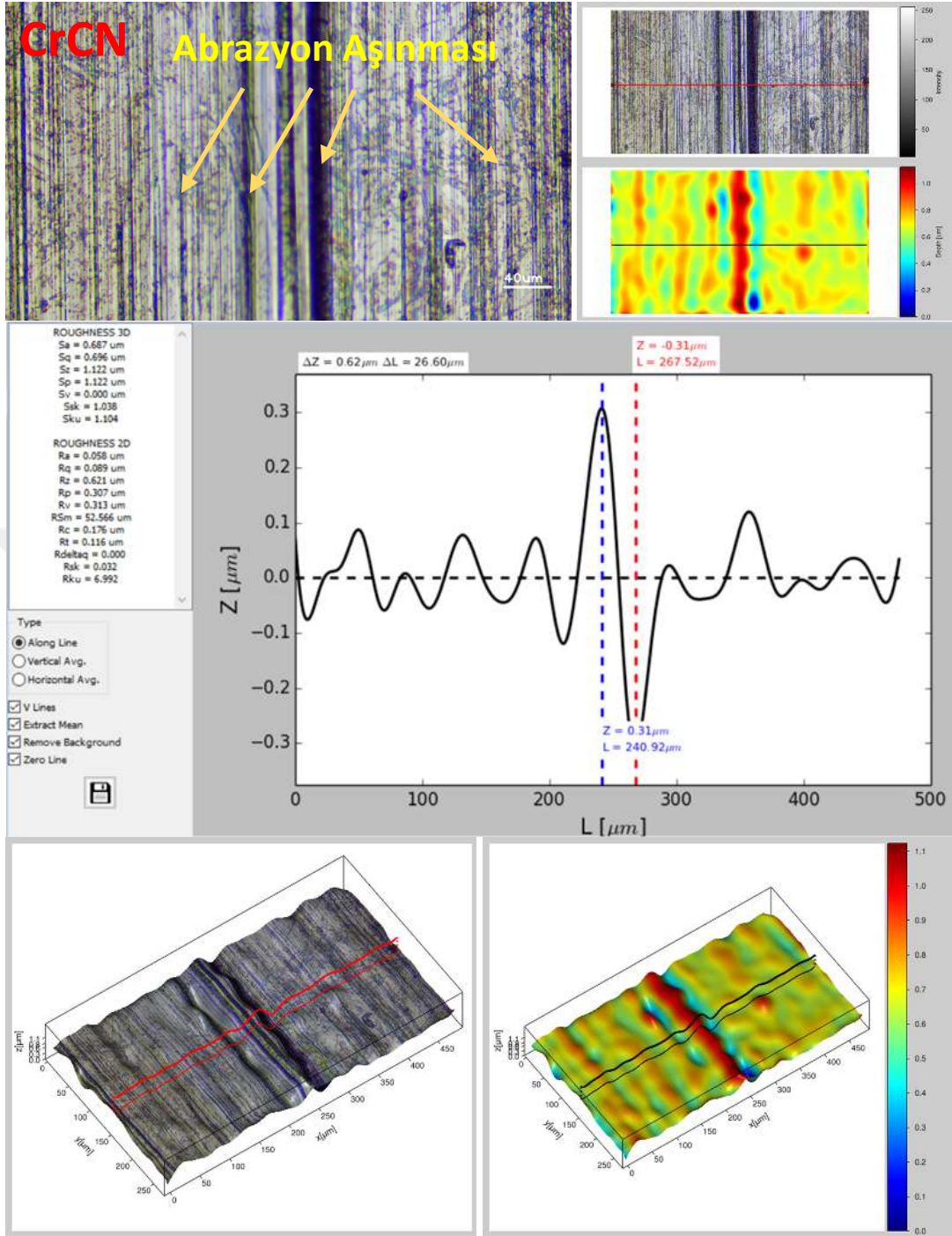
Kaplama tipi	Aşınma izi çapı yatay (μm)	Aşınma izi çapı dikey (μm)
Kaplamasız	563.05	407.08
rGO	503.12	369.53
CrCN	880.53	Limit dışı
TiN	509.96	408.19
DLC	859.51	Limit dışı



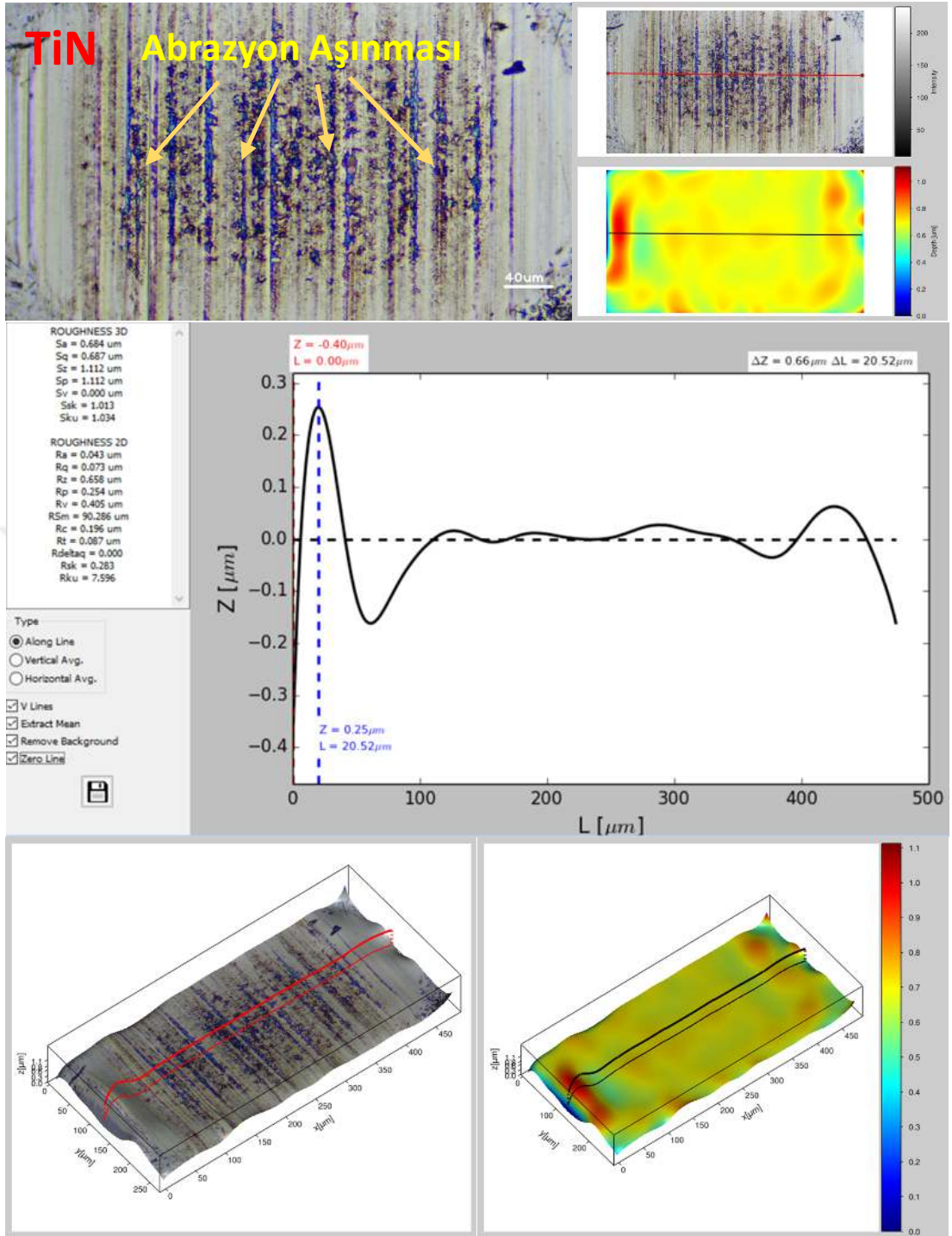
Şekil 3.67 Kaplanmamış silindir gömleği üzerinde test edilen bilyenin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi



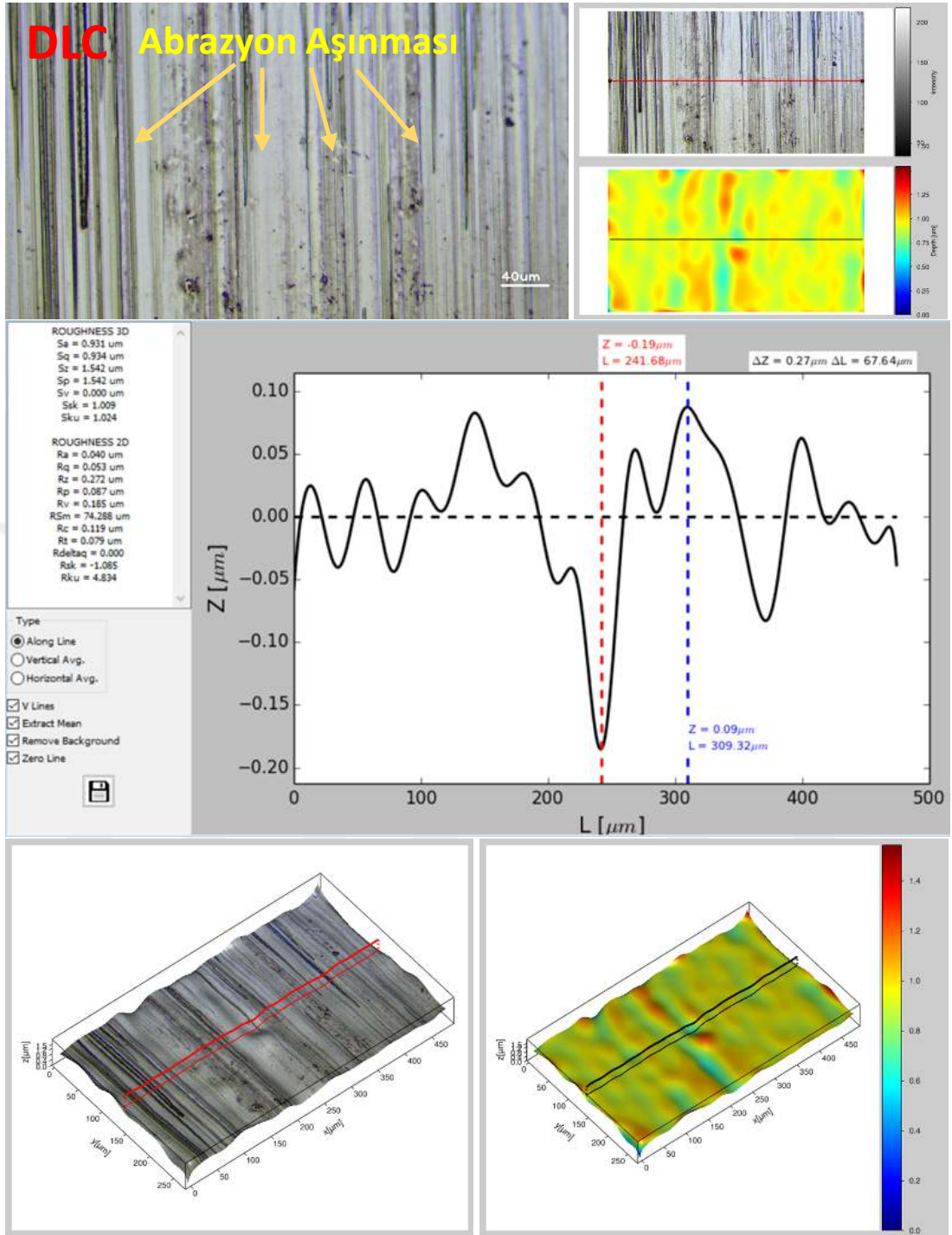
Şekil 3.68 RGO kaplanmış silindir gömleği üzerinde test edilen bilyenin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi



Şekil 3.69 CrCN kaplanmış silindir gömleği üzerinde test edilen bilyenin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi



Şekil 3.70 TiN kaplanmış silindir gömleği üzerinde test edilen bilyenin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi



Şekil 3.71 DLC kaplanmış silindir gömleği üzerinde test edilen bilyenin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi

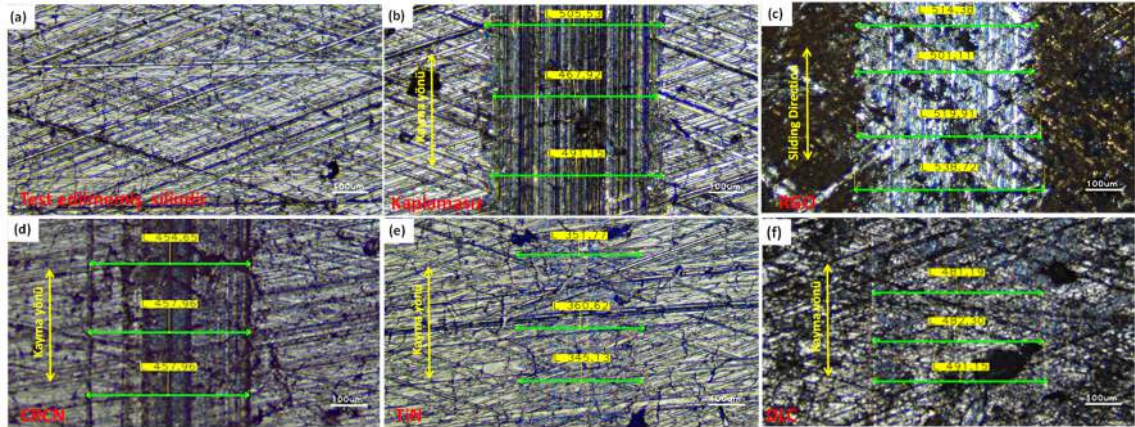
Sırasıyla Şekil 3.67, Şekil 3.68, Şekil 3.69, Şekil 3.70, Şekil 3.71 (30° için) kaplamasız, rGO, CrCN, TiN ve DLC kaplı silindir gömlekleri üzerine test edilen bilyelerin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisini göstermektedir. Sa ve Ra değerleri gibi pürüzlülük parametreleri, Tablo 3.21 'de gösterildiği gibi rGO kaplı gömleklerde kaplamasız, CrCN,

TiN ve DLC kaplı gömleklere göre daha düşük ölçülmüştür. Bunun ana nedeni “sert ve pürüzlü” CrCN, TiN ve DLC kaplı silindir gömlekleridir.

Tablo 3.21 Kaplamasız, RGO, CrCN, TiN ve DLC kaplı silindir gömlekleri üzerinde test edilen bilyelerin aşınma izlerinin 2D ve 3D pürüzlülük değerleri.

Test edilen bilye	Sa (μm)	Ra (μm)
Test edilmemiş	0.386	0.024
kaplamasız	0.615	0.071
rGO	0.496	0.029
CrCN	0.687	0.058
TiN	0.684	0.043
DLC	0.931	0.040

3.3.3.2 30° Kaplamalara Göre Silindir Test Sonuçları



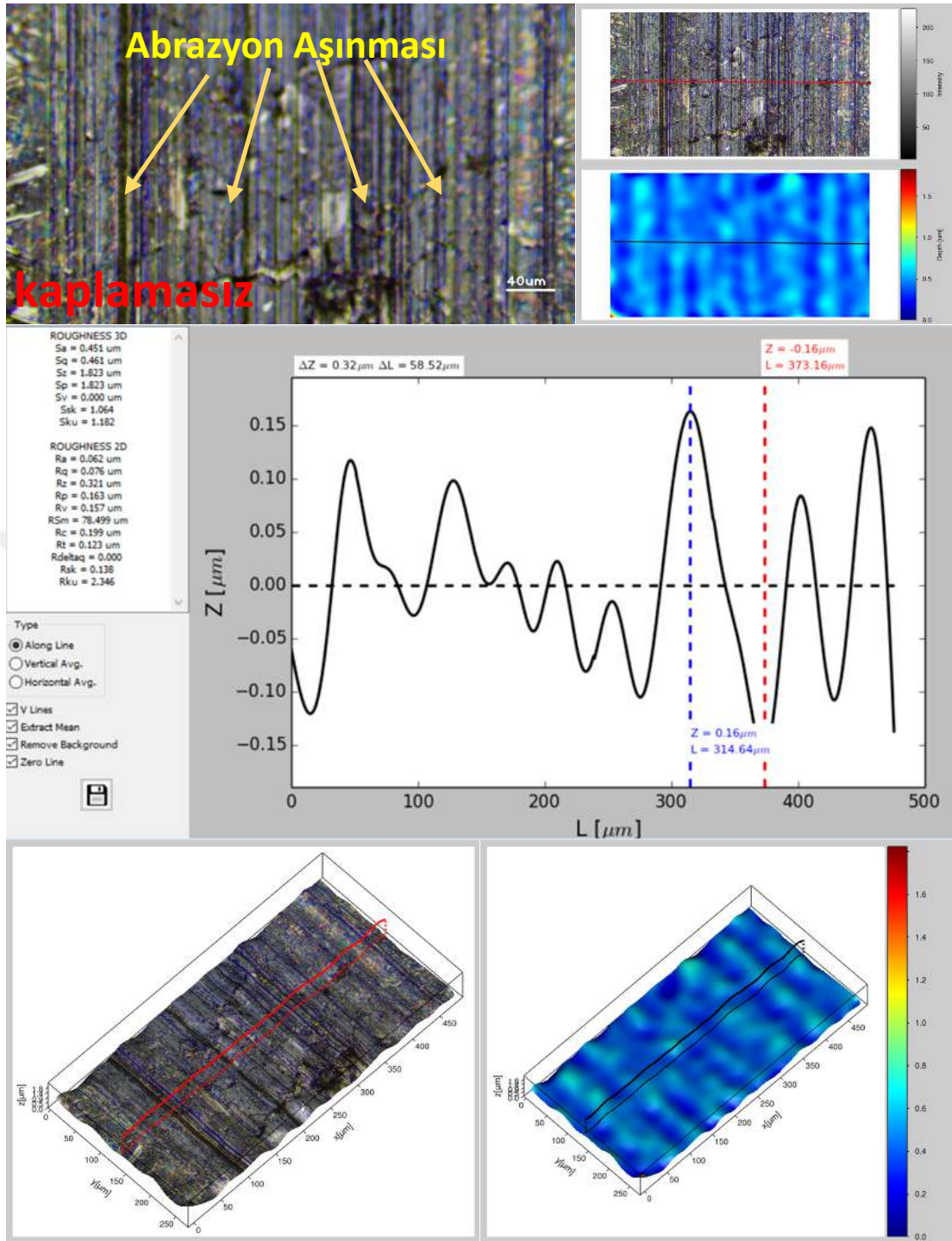
Şekil 3.72 30° İçin çelik bilye altında test edilen kaplamasız, rGO, CrCN, TiN ve DLC kaplı silindir gömleklerinin yatay olarak ölçülen aşınma izlerinin optik dijital görüntüleri. (a) Test edilmemiş, (b) Kaplamasız (c) rGO, (d) CrCN, (e) TiN, (f) DLC

Şekil 3.71'e göre Tablo 3.22'de görüldüğü gibi (30° için) çelik bilye altında test edilmemiş, kaplamasız, rGO, CrCN, TiN ve DLC kaplı silindir gömleklerinin maksimum ve minimum aşınma izi mesafesi rGO kaplamalı silindirde ölçülmüştür. CrCN, TiN ve DLC kaplamaların sertliği yüksek olduğundan rGO kaplamaya göre çok fazla yıpranmamış, aşınmamıştır. Minimum ve maksimum aşınma izi mesafesi, sırasıyla en az TiN, daha sonra CrCN, ve DLC en düşük değeri göstermiştir çünkü aşınmaya karşı daha

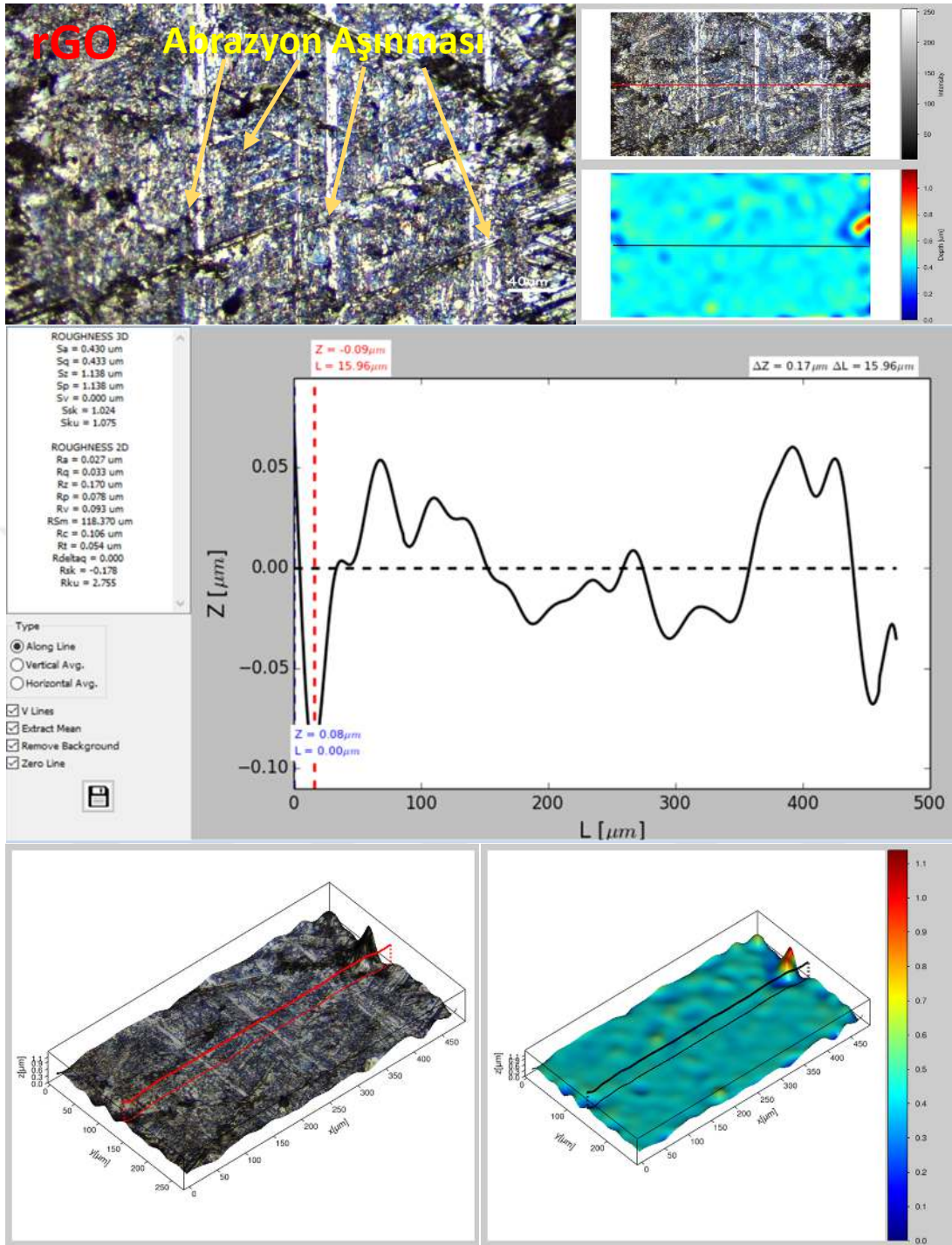
dirençli oldukları için aşınma izi mesafesinin azaltmasında kaplamaların mikrosertliğinin büyük etkisi vardır. Doğal olarak en fazla rGO kaplı silindir gömleklerinde göstermiştir.

Tablo 3.22 Çelik bilye altında test edilmemiş, kaplamasız, RGO, CrCN, TiN ve DLC kaplı silindir gömleklerinin maksimum ve minimum aşınma izi mesafeleri

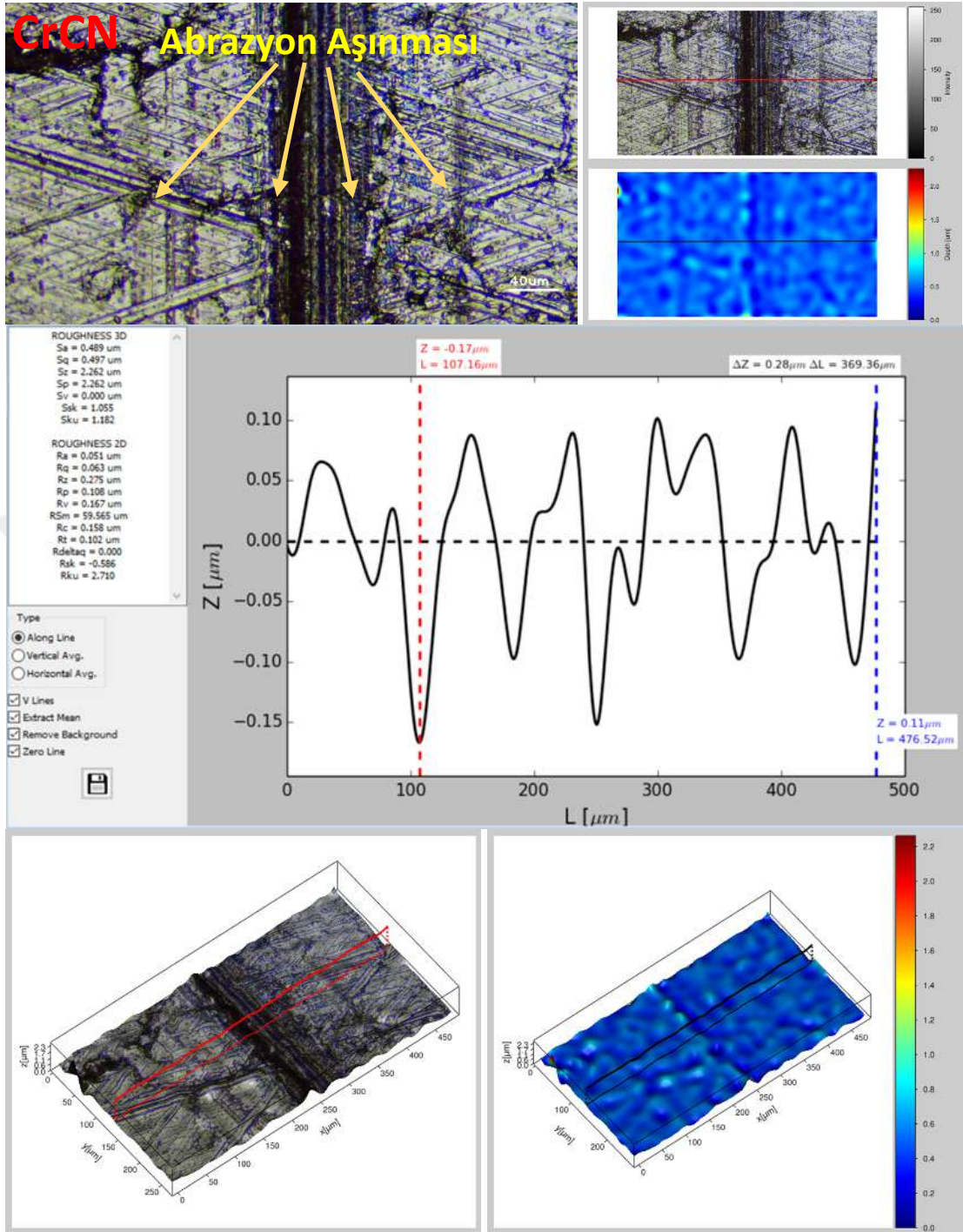
Kaplama tipi	Min. Aşınma izi genişliği (μm)	Max. Aşınma izi genişliği (μm)
Kaplamasız	467.92	505.53
rGO	501.11	538.72
CrCN	454.65	457.96
TiN	345.13	360.62
DLC	481.19	491.15



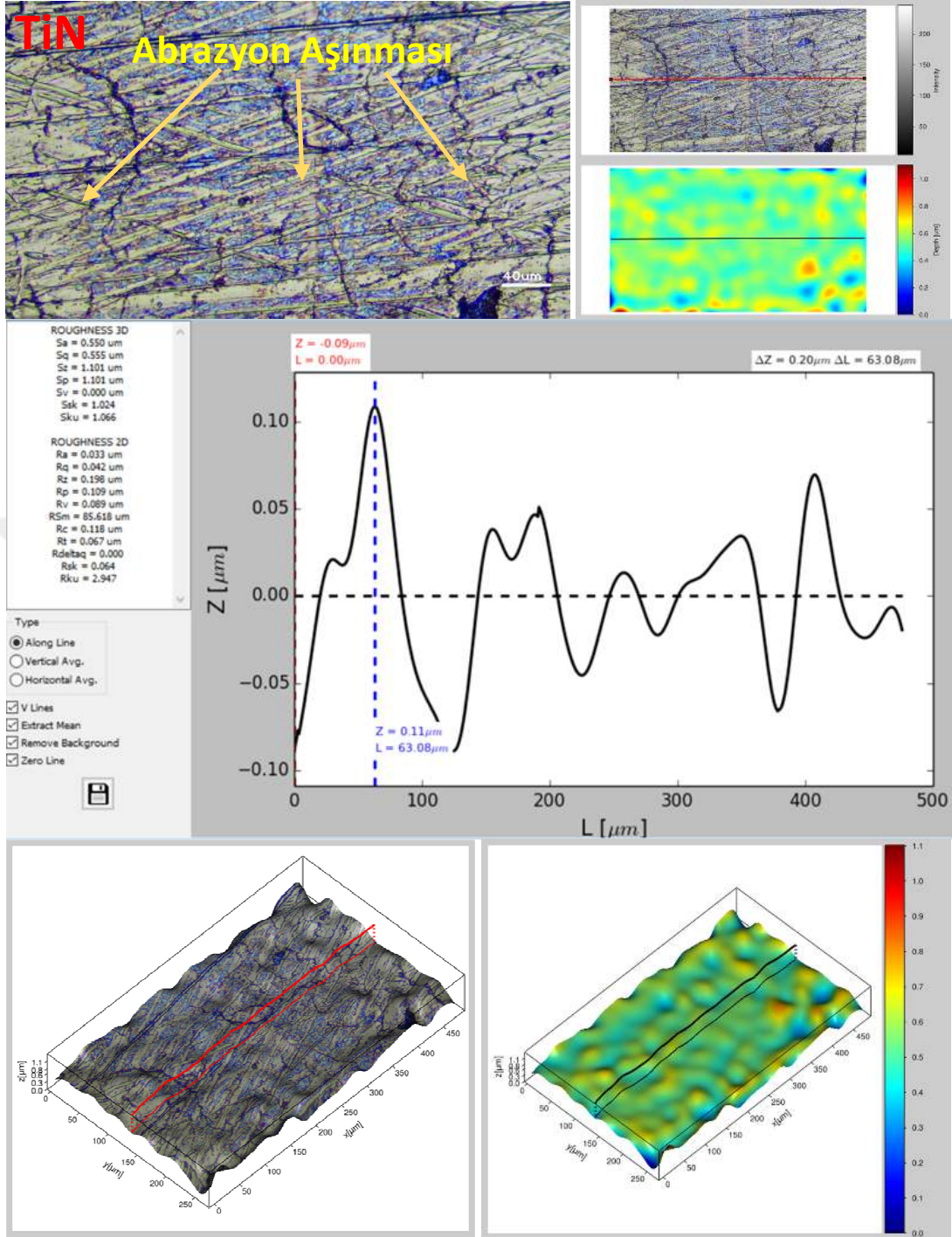
Şekil 3.73 Çelik bilye altında test edilmiş kaplamasız silindir gömleğinin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi



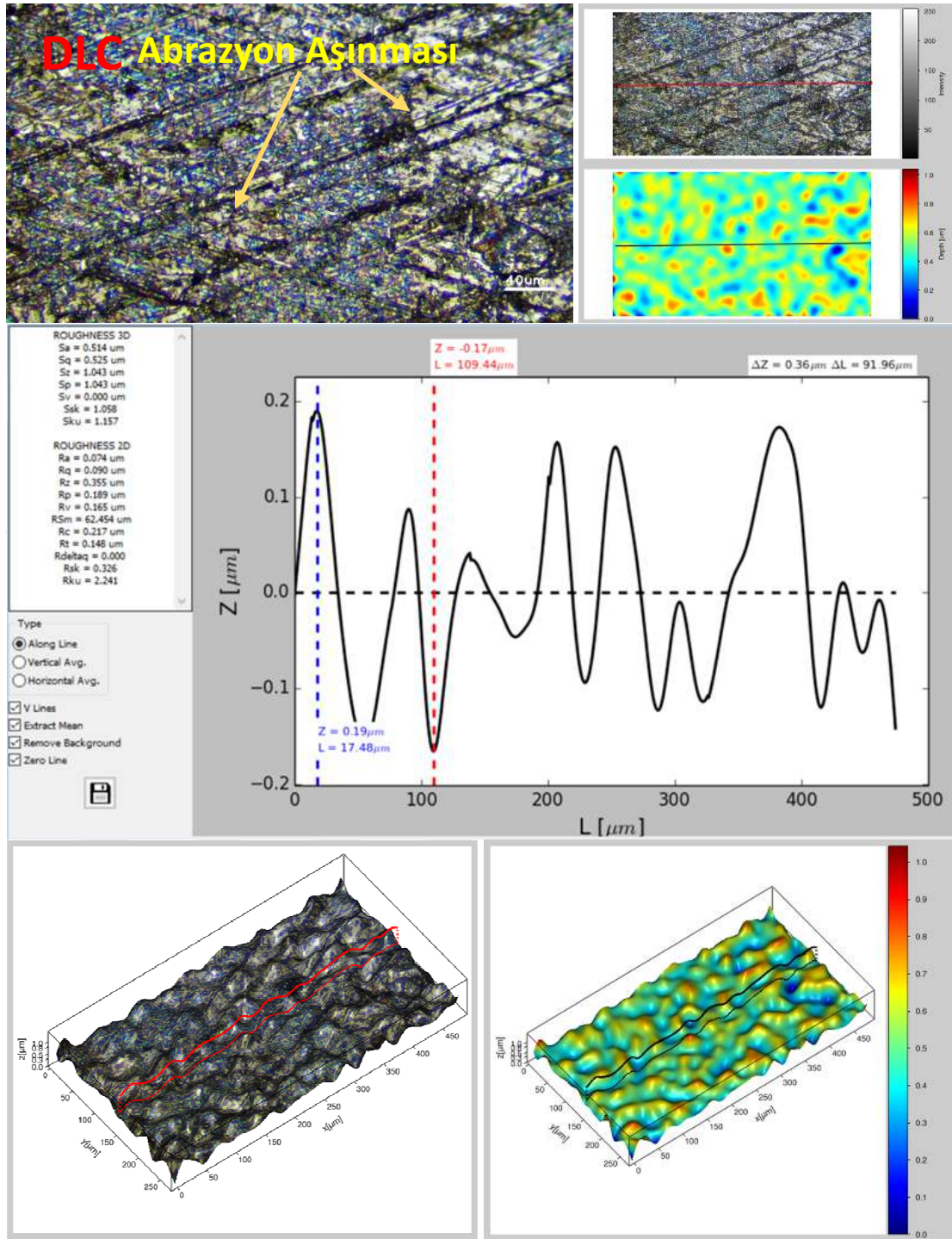
Şekil 3.74 Çelik bilye altında test edilmiş RGO kaplamalı silindir gömleğinin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi



Şekil 3.75 Çelik bilye altında test edilmiş CrCN kaplamalı silindir gömleğinin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi



Şekil 3.76 Çelik bilye altında test edilmiş CrCN kaplamalı silindir gömleğinin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi



Şekil 3.77 Çelik bilye altında test edilmiş DLC kaplamalı silindir gömleğinin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi

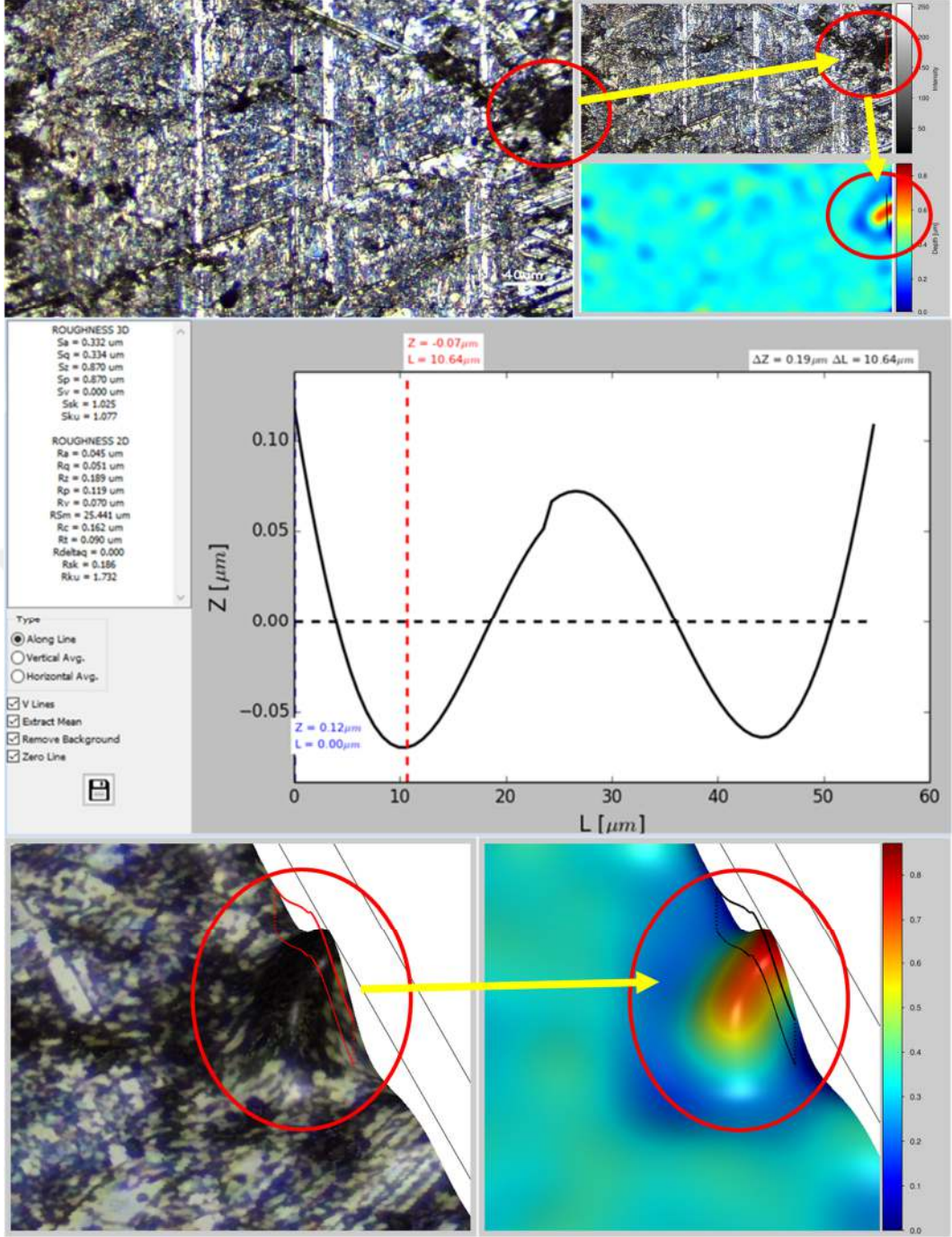
Sırasıyla Şekil 3.72, Şekil 3.73, Şekil 3.74, Şekil 3.75, Şekil 3.76 (30° içi) kaplamasız, rGO, CrCN, TiN ve DLC kaplı silindir gömleklerinin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisini göstermektedir. Sa ve Ra değerleri gibi pürüzlülük parametreleri, Tablo 3.23 'de gösterildiği gibi rGO kaplı gömleklerde kaplamasız ve CrCN, TiN, DLC kaplı

gömleklere göre daha düşük küçük ölçülmüştür. Bunun ana nedeni “sert ve pürüzlü” CrCN, TiN ve DLC kaplı silindir gömlekleridir.

Tablo 3.23 Çelik bilye altında test öncesi ve sonrası kaplamasız, rGO, CrCN, TiN ve DLC kaplı silindir gömleklerinin aşınma izlerinin 2D ve 3D pürüzlülük değerleri

Test edilen silindir	Sa (μm)	Ra (μm)
Test öncesi 30° için	0.446	0.038
kaplamasız	0.451	0.062
rGO	0.430	0.027
CrCN	0.489	0.051
TiN	0.550	0.033
DLC	0.514	0.74

Abrazyon aşınması her zamanki gibi tespit edilmiştir. Kaplamasız ve CrCN, DLC, TiN kaplı silindirlere bağlı olarak rGO kaplı silindirin aşınma izinde aşınma çizgileri çok daha belirgindir. Koruyucu rGO kaplama tabakalarının oluşumunda yüzey bozulmasının ve yüksek sıcaklığın büyük etkisi vardır. Yüzeyde katmanlar elde etmek için temel mekanik koşullar, hafif bir yüzey bozulması (abrazyon çizgileri) ve en düşük sürtünme katsayısı değerinin elde edildiği sınır yağlamada yüksek sıcaklıktır [47, 48, 49, 50].

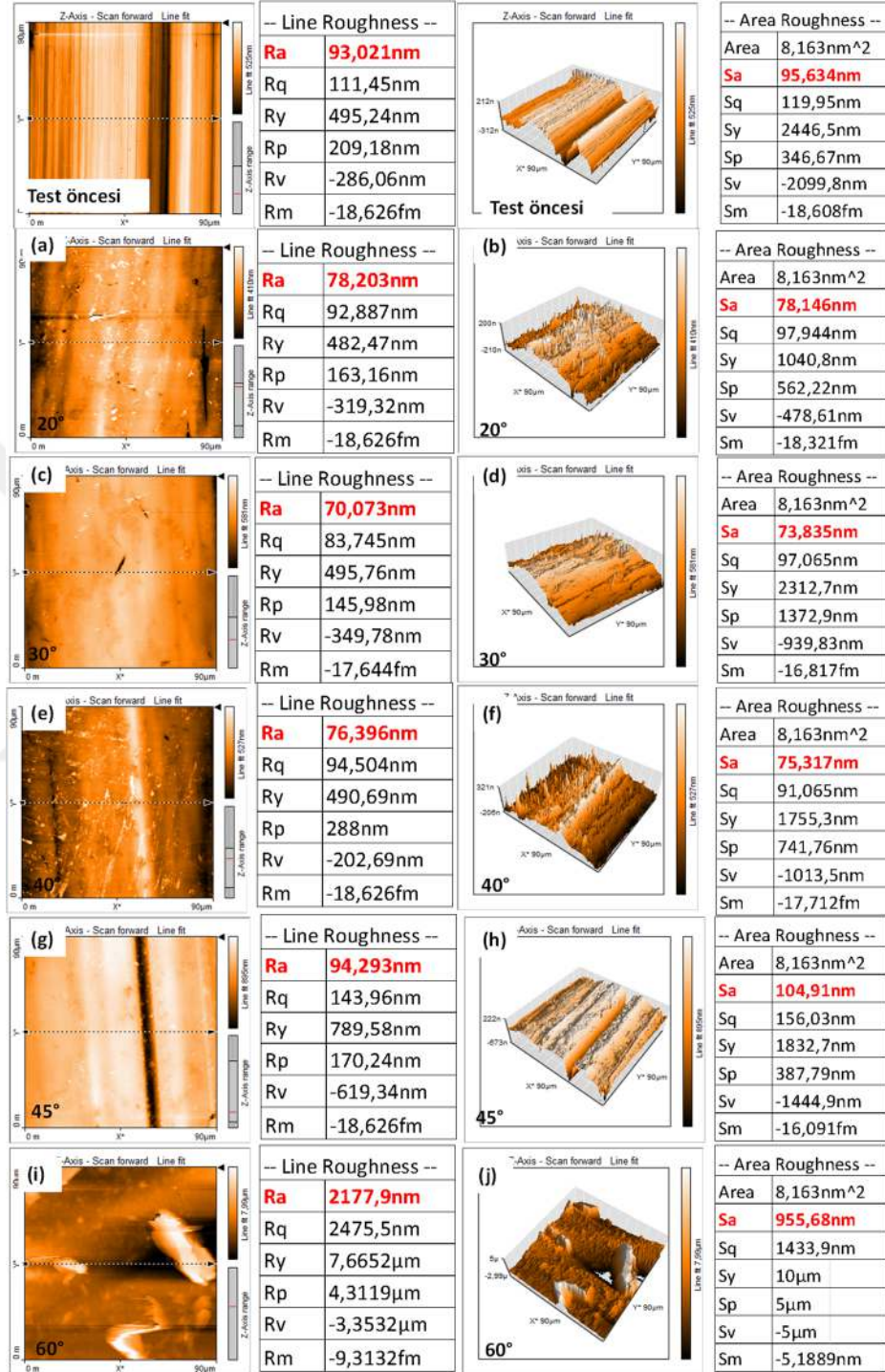


Şekil 3.78 Çelik bilye altında test edilmiş rGO kaplamalı silindir gömleğinin rGO koruma tabakasının 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi

Şekil 3.78, kırmızı daire içinde gösterildiği gibi, test edilen rGO kaplı silindir gömleği üzerinde oluşturulan rGO katmanının 2D-3D pürüzlülük dijital optik mikroskopisini göstermektedir. Pürüzlülük değerleri Sa ve Ra sırasıyla 332 nm ve 45 nm'dir.

3.3.4 Kaplamalara göre AFM sonuçları

3.3.4.1 Tribotestlerden Sonra rGO Kaplanmış Silindir Gömlekleri Üzerinde Test Edilen Bilyelerin AFM Analizlerinin Karşılaştırılması

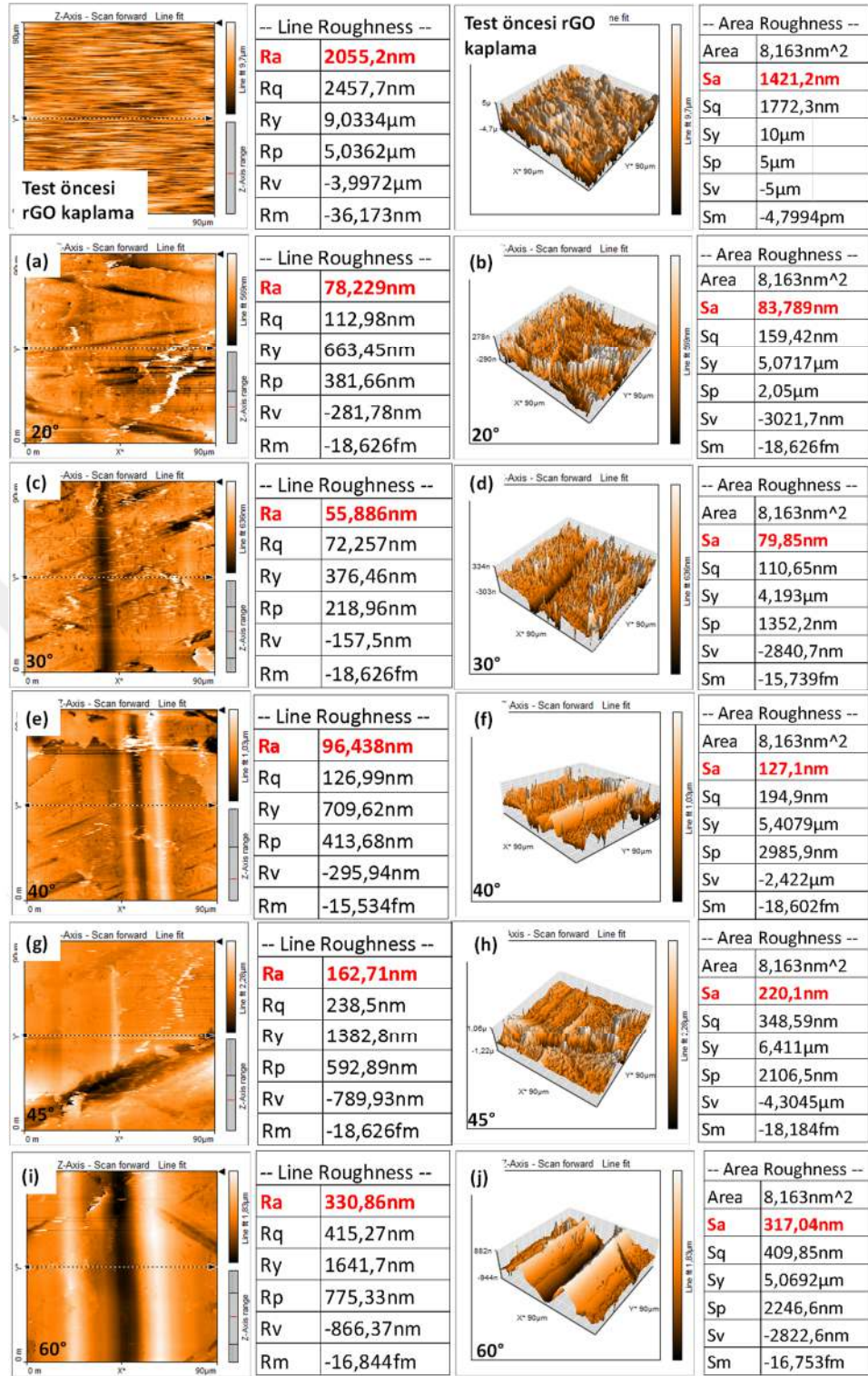


Şekil 3.79 Test öncesi, 20°, 30°, 40°, 45°, 60° rGO kaplanmış silindir gömlekleri üzerindeki bilyelerin AFM pürüzlülük analizlerinin karşılaştırması

Şekil 3.79 Sırasıyla test öncesi, 20°, 30°, 40°, 45° ve 60° olmak üzere 2D(a, c, e, g, i) ve 3D (b, d, f, h, j) rGO kaplanmış silindir gömleği 5 honlama açısında sürtünen bilyelerin aşınma izinin atomik kuvvet mikroskopunda ölçülen pürüzlülük görüntülerini ve değerlerini vermektedir. Tablo 3.24'te 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindir gömlekleri üzerinde test edilen bilyelerin aşınma izlerinin 2D ve 3D Pürüzlülük değerleri verilmiştir. 30°, honlama açısı en düşük değeri göstermiştir.

Tablo 3.24 20°, 30°, 40°, 45°, 60° rGO kaplanmış silindir gömlekleri üzerinde test edilen bilyelerin aşınma izlerinin 2D ve 3D Pürüzlülük değerleri

Honlama açısı	Sa (nm)	Ra (nm)
test öncesi	95.634	93.021
20°	78.146	78.203
30°	73.835	70.073
40°	75.317	76.396
45°	104.91	94.243
60°	955.68	2177.9



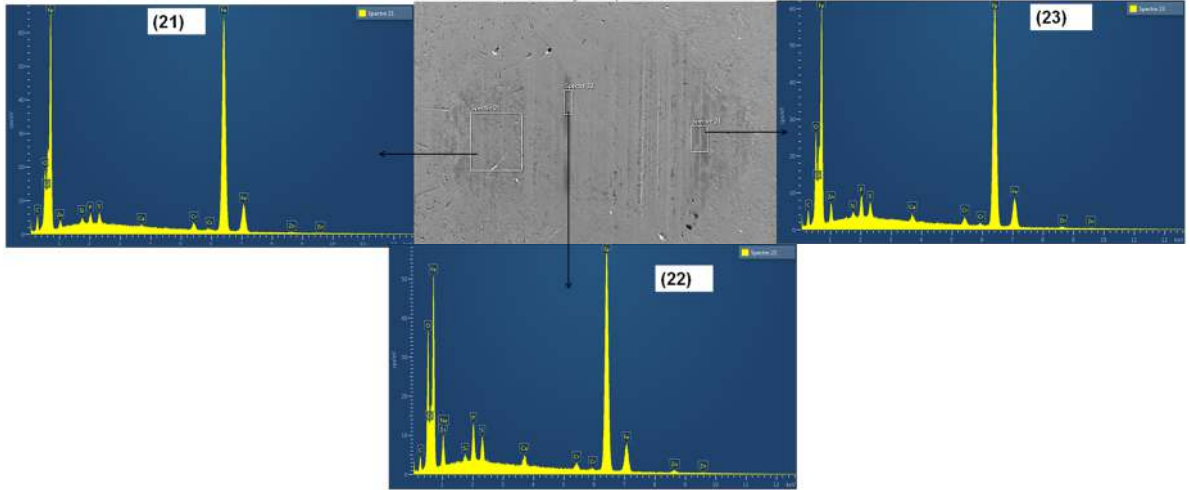
Şekil 3.80 20°, 30°, 40°, 45°, 60° rGO kaplanmış silindir gömleklerinin 5 honlama açısındaki aşınma izlerinin AFM pürüzlülük analizlerinin karşılaştırılması

Şekil 3.80 Sırasıyla test öncesi, 20°, 30°, 40°, 45° ve 60° olmak üzere 2D (a, c, e, g, i) ve 3D (b, d, f, h, j) rGO kaplanmış 5 honlama açılı silindir numunelerinin aşınma izlerinin atomik kuvvet mikroskopunda ölçülen pürüzlülük görüntülerini ve değerlerini vermektedir. Tablo 3.25’de 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış rGO kaplanmış çelik bilye altına test edilmiş silindir numunelerinin aşınma izlerinin 2D ve 3D Pürüzlülük değerleri verilmiştir. 30°, honlama açısı en düşük değeri göstermiştir.

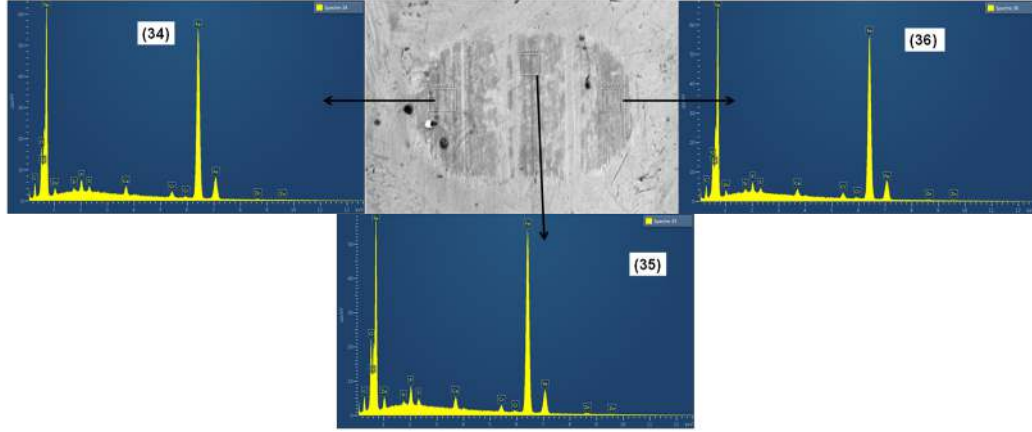
Tablo 3.25 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış rGO kaplanmış çelik bilye altında test edilmiş silindir numunelerinin aşınma izlerinin 2D ve 3D pürüzlülük değerleri

Honlama açısı	Sa (nm)	Ra (nm)
test öncesi	1421.2	2055.2
20°	83.789	78.229
30°	79.85	55.886
40°	127.1	96.438
45°	220.1	162.71
60°	317.04	330.86

3.3.5 En İyi Kaplamaya Göre SEM-EDX Sonuçları



Şekil 3.81 30° için kaplanmamış silindir gömleği üzerinde test edilen bilyenin SEM görüntüsü ve EDS spektrumu

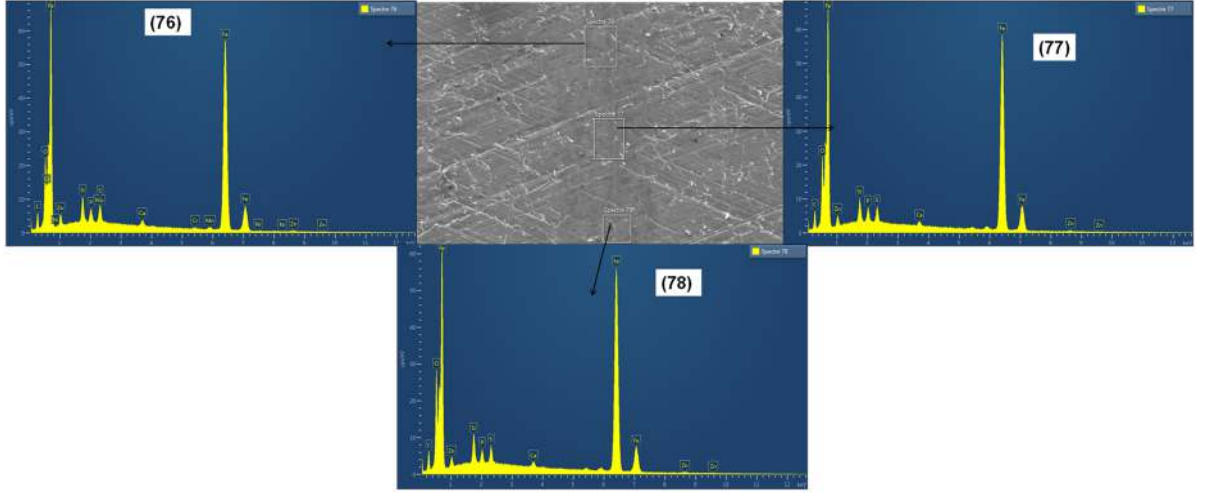


Şekil 3.82 30° için rGO kaplanmış silindir gömleği üzerinde test edilen bilyenin SEM görüntüsü ve EDS spektrum

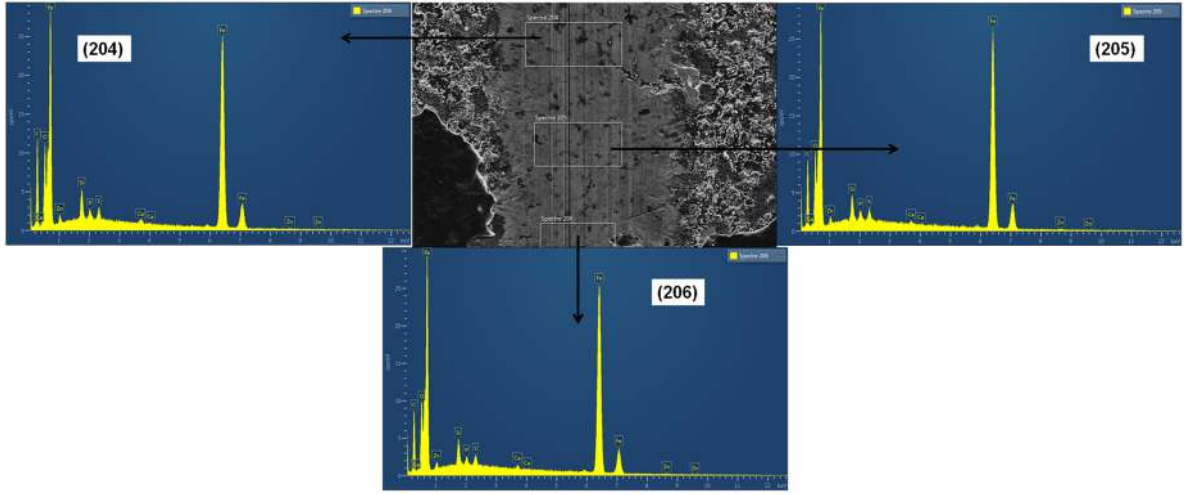
Tablo 3.26 30° için kaplanmamış ve rGO kaplı silindir gömleği üzerinde test edilen bilyenin aşınma izlerinin EDS ile analiz verileri

Spek No	Numune adı	C	O	Al	Si	P	Ca	Mn	Fe	Zn	Toplam
21	Kaplamasız silindir	4.66	4.21	0.07	0.35	0.74	0.15	0.48	87.31	2.03	100
22	üzerinde bilyenin	3.9	9.2	0.08	0.38	2.36	0.92	0.52	76.25	6.39	100
23	aşınma izi	4.4	6.22	0.07	0.3	1.49	0.66	0.54	81.63	4.69	100
34	rGO kaplı silindir	5.31	4.5	0.02	0.26	1.06	1.17	0.44	85.04	2.21	100
35	üzerinde bilyenin	5.29	6.18	0.02	0.24	1.46	1.44	0.45	81.58	3.34	100
36	aşınma izi	5.32	3.86	0.07	0.28	0.94	0.93	0.56	86.02	2.02	100

30° için rGO kaplanmış silindir gömleği ile yapılan testler daha iyi sonuçlar verdiği için, bu numunede SEM görüntüsü ve EDS spektrumları ölçülmüştür. Dolayısı ile diğer açılar için SEM-EDS yapılmasına gerek duyulmamıştır. Şekil 3.81 ve 3.82 kaplanmamış ve rGO kaplı silindir üzerinde test edilen bilyenin SEM görüntülerini ve EDS spektrumlarını göstermektedir. Element analizi Tablo 3.26’da listelenmiştir. Motor yağından gelen Ca, Zn ve P gibi katkı elementleri, sürtünen yüzeyleri iyi korumuştur. Koruyucu yüzey tabakaları oluşturan Ca, S, P ve Zn gibi diğer katkı elementleri ile karışan rGO’daki karbon (C) miktarının yüksek olması beklenen sonuçtur.



Şekil 3.83 30° için çelik bilye altında test edilen kaplanmamış silindir gömleğinin SEM görüntüsü ve EDS spektrum



Şekil 3.84 30° için çelik bilye altında test edilen rGO kaplanmış silindir gömleğinin SEM görüntüsü ve EDS spektrumu

Şekil 3.83 ve Şekil 3.84 çelik bilye altında test edilmiş kaplamasız ve rGO kaplı silindir gömleklerinin SEM görüntülerini ve EDS spektrumlarını göstermektedir. Elemental analiz Tablo 3.27'de listelenmiştir. Motor yağından Ca, Zn ve P gibi ilave elemanlar sürtünmüş yüzeyleri iyi korumuştur. Karbon (C) miktarının, RGO'nun Ca, S, P ve Zn gibi diğer katkı maddeleri elemanlarıyla karıştığı ve yüksek çıkması ve koruma tabakası oluşturduğu beklenen sonuçtur.

Tablo 3.27 30° için kaplanmamış ve rGO kaplanmış silindir gömleğinin aşınma izlerinin EDS ile analiz verileri

Spek No	Numune adı	C	O	Al	Si	P	S	Ca	Mn	Fe	Zn	Toplam
76	Kaplamasız silindirin aşınma izi	5.57	5.38	0.05	1.71	1.01	0	0.63	0.84	81.83	2.99	100
77		6.01	5.35	0.05	1.49	1.05	0	0.49	1.06	81.58	2.9	100
78		5.93	7.28	0.02	1.81	0.97	0	0.57	0.95	79.96	2.52	100
204	rGO kaplı silindirin aşınma izi	18.2	5.74	0	1.49	0.49	0.71	0.4	0	71.36	1.58	100
205		15.3	5.09	0	1.3	0.58	0.66	0.22	0	75.38	1.43	100
206		14.7	5.12	0	1.4	0.5	0.66	0.34	0	76	1.26	100

SEM-EDS'lerin sonucu dikkate alındığında, elemental analiz, koruyucu katmanlarda oluşan Zn, Ca, P içeriği ve düşük sürtünme katsayısı gibi katkı maddelerinin birikimini gösterilmiştir. Bu, RGO kaplı silindir kovanının kayar parçalar arasında daha etkili bir yağlama sağladığı anlamına gelmektedir. Bu nedenle, sürtünmenin azalmasına ve aşınma izinin azaltılmasına yönelik önemli bir rol oynadığı ve delaminasyon etkisi yoluyla kesme gerilmesine karşı yüzey korumasına katkıda bulunduğu açıktır [27].

Elektroforetik biriktirme (EPD) de farklı bir uygulamaya sahiptir. İnce toz (<30 µm) veya koloidal süspansiyon formunda mevcut olan herhangi bir katıya uygulanabilir. Metaller, polimerler, karbürler, oksitler, nitrürler ve camlar dahil hemen her malzeme sınıfından malzemelerin elektroforetik biriktirme örnekleri bulunabilir. Ayrıca proses, kaplamaların üretilmesi, yekpare, lamine edilmiş ve derecelendirilmiş bağımsız nesnelerin şekillendirilmesi ve kompozit üretimi için gözenekli malzemelerin ve dokuma fiber formların oluşması için kullanılabilir. EPD kaplama, otomotiv, beyaz eşya ve genel endüstriyel (organik) kaplamalar için dünya çapında kabul görmüştür. Yüksek otomasyon seviyesi, düşük kirlilik seviyeleri, yüksek çıkış gücü ve kaplamanın homojenliği elektroforetik biriktirme kullanımına yol açan avantajlardır [26].

Uygulamaların yanı sıra ve literatür taramasına göre motor araştırmalarında grafen oksit uygulaması fazla bulunmamaktadır. Otomotivdeki motor silindiri, motor performansında etki eden ana unsurdur. Motor silindir gömleği yüksek mukavemetli, ısıya dayanıklı ve aşınmaz özellikte olmalıdır. Motorun çeşitli bileşenlerini üretmek için daha hafif ve daha güçlü mühendislik malzemelerinin kullanılması, aynı zamanda motorun ve dolayısıyla otomobilin güç-ağırlığını artırma etkisine sahiptir. Aşınmaları azaltmak, ekonomik ve çevreye duyarlı çözümler elde etmek için; rGO kaplama, aşınmaya dayanıklı ve düşük sürtünmeli silindir çalışma yüzeyleri üretmek için mükemmel bir seçenektir. Bu amaçla,

sürtünme ve aşınmada bir azalma olup olmadığını anlamak ve yağlamayı iyileştirmek için motor silindir gömleğini veya kovanını EPD yöntemiyle kaplamak için rGO nanopartikülü uygulanmıştır. Farklı kaplama türlerinin farklı davranışları olduğu iyi bilinmektedir. Kaplamalar, karşı çift yüzeyine kıyasla daha yüksek sertlik sergilese de, bunların aşındığı söylenebilir ve karşı yüzeye transfer katmanı olarak bilinen bir film tabakası oluşturur. Bu transfer tabakası karşı yüzeyi aşınmadan korur ve sürtünme katsayısını düşürür, çünkü transfer tabakası malzemesi esas olarak yağlama etkisi olan grafitik yapıdır. Khandakar Mahmud, iki yüzey birbirine karşı kaydırıldığında, genel kural daha yumuşak malzemenin yıpranacağını göstermiştir. Kaplama, bazı doğal özellikleri, bu tür yüksek aşınma direnci ve kaplanmış yüzeyinde yüksek sertlik nedeniyle çekici bir hal almaktadır. Genel olarak, nano kaplamalar sürtünme özelliğini geliştirmek için karşı yüzeyde kolayca bir transfer katmanları oluşturabilir. Kaplama teması metal temasla karşılaştırıldığında daha düşük sürtünme özelliğine sahiptir. Kaplamaların sürtünmemiş parçalara kıyasla sürtünme özelliğini iyileştirmede bazı olumlu etkileri olmasına rağmen, farklı kaplama türlerinin farklı sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerlerine sahiptir. Sonuç olarak, tez çalışmalarımızı destekleyen yüksek sürtünme katsayısı gözlemlenmiştir [34].

Tribometre test sonuçları, rGO kaplama daha az sürtünme ve aşınma sonuçlarını sağlamıştır. Bunun gerçek motor testleri olmadığı dikkate alınmalıdır. Motor çalışma koşulları tribometre ile aynı değildir. Gerçek motorda yanma, sürtünme kayıpları vardır. Yanma gazlarının kuvvet basıncı piston yüzeyinde, daha sonra ilk segman üzerinde 2/3, daha sonra ikinci segmanda 1/3 kadar etki eder. Bilye temas yükünü karşılaştırmamalı ve gerçek segman temas basıncını ele almamalıyız. Kaplama karşılaştırması için uygulanan resmi test koşullarını iyi bilmekteyiz [28, 29, 30, 31]. Karşılaştırmanın onayı için gerçek motor testleri, Makine Mühendisliği Fakültesi'ndeki Otomotiv Bölümü Motor Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.28 Testten önce silindir kovani kaplamasının sertlik değerleri

Test öncesi sertlik	GPa
rGO	5.83
CrCN	29.6
TiN	~13 2
DLC	10-30

Sonuç olarak, kaplanmış silindir kovan yüzeyinin yüksek pürüzlülüğü ve sertliği (bkz. Tablo 3.28) aşınmaya karşı direnç üzerinde olumlu etkilere sahiptir. Ancak kaplama sertliği, sürtünen bilyelerin yüzeyinde daha büyük aşınma izi ve çoğunlukla abrazyon aşınmasına neden olduğu tesbit edilmiştir. Pürüzlü yüzeylerdeki daha büyük gerçek temas alanı sürtünme katsayısını yükselttiğinden, yük ve hızı art arda arttırarak sürtünme katsayısı artmaktadır.



MOTOR TEST SONUÇLARI

Tribometre testlerinden sonra motor testleri yapılmıştır:

- 1) Orijinal silindir honlama açısı 45° ile,
- 2) Tribometre testleri neticesinde en düşük sürtünme katsayısını veren en iyi honlama açısı 20° ile,
- 3) Tribometre testleri neticesinde en düşük sürtünme katsayısını veren en iyi nanokaplamalı 30° honlama açısı ile,

Shell Helix Ultra 5W-40 tam sentetik ticari motor yağı kullanılarak testler yapılmış, karşılaştırılmıştır.

Performans testleri 3 kere tekrar edilmiştir.

4.1 Performans Testleri

Motor ömrü için hız tespiti motor performans testlerinde ISO 8178-4 standardı dikkate alınarak tesbit edilmiştir. ISO8178-4 standardına göre motorun intermediate hızının 2400 d/d olduğu hesaplanmış olup, bu devirde elde edilen gücün 4 kW olduğu Antor motor ile yapılan test neticesinde elde edilen grafikten okunmuştur. Motor ömür testleri için %50 yük şartı uygulandığında 2400 d/d-2kW şartlarında testler gerçekleştirilmiştir. Tekrarlı 3 adet performans testi yapılmış olup N güç, T moment ortalama değerlerini göstermektedir. Doğruluk, belirsizlik hesapları aşağıdadır:

$$N = V(\text{Volt}) \times I(\text{A}) (\text{KW}),$$

$$T = N \times 9550 / n(\text{d/d}) (\text{N.m}),$$

$$9550 = 1000 \times 60 / 2\pi$$

Dinamometre testi için doğruluk oranı:

Voltmetre (Volt) $\pm 2V$

Ampermetre (Amper) $\pm 0.1A$

Takometre (Devir) $\pm 0.5\text{rpm}$

Belirsizlik için hesaplanan büyüklük:

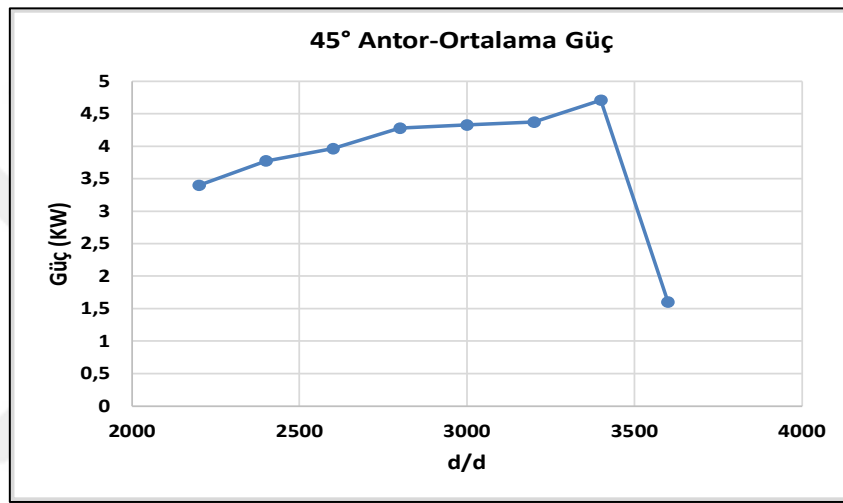
Motor gücü (N) $\pm \%0.02$

Motor momenti (N.m) $\pm$ %0.03

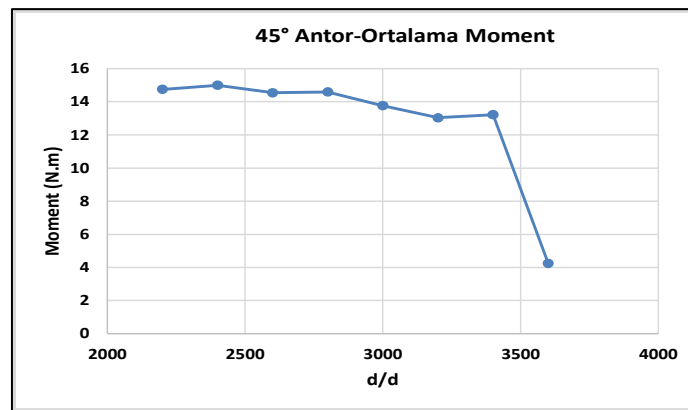
4.1.1 Orijinal Silindir Honlama Açısı 45° İle Performans Testleri

Tablo 4.1 Silindir honlama açısı 45° ile performans testleri verileri

	test 1				test 2				test 3				Emisyon								Performans Ortalama	
n	V	I	N	T	V	I	N	T	V	I	N	T	λ	CO	CO2	O2	HC	NOx	N	T		
3600	129	13.2	1.7028	4.51715	128	13.4	1.7152	4.550044	116	11.9	1.3804	3.661894	1.531	0.4	9.3	7.6	17	443	1.599467	4.24303		
3400	215	21.9	4.7085	13.22535	215	22	4.73	13.28574	214	21.9	4.6866	13.16383	1.446	0.51	9.6	6.7	12	487	4.708367	13.22497		
3200	207	21.1	4.3677	13.03485	208	21.1	4.3888	13.09783	207	21	4.347	12.97308	1.431	0.48	9.7	6.6	10	536	4.367833	13.03525		
3000	203	20.9	4.2427	13.50593	204	21	4.284	13.6374	209	21.3	4.4517	14.17125	1.446	0.49	9.6	6.7	9	585	4.326133	13.77152		
2800	203	20.8	4.2224	14.4014	207	21.1	4.3677	14.89698	205	20.7	4.2435	14.47337	1.792	0.45	9.3	7.2	8	835	4.277867	14.59058		
2600	197	20.2	3.9794	14.61664	201	20.6	4.1406	15.20874	193	19.5	3.7635	13.82363	1.475	0.59	9.2	7	10	694	3.961167	14.54967		
2400	189	19.4	3.6666	14.59001	197	20.2	3.9794	15.8347	189	19.4	3.6666	14.59001	1.495	0.63	9	7.2	12	748	3.770867	15.00491		
2200	179	18.4	3.2936	14.29722	188	19.2	3.6096	15.66895	179	18.4	3.2936	14.29722	1.512	0.69	8.9	7.4	12	781	3.398933	14.75446		



Şekil 4.1 Silindir honlama açısı 45° ile yapılan 3 adet performans test sonucu güç ortalamasının devire göre grafiği



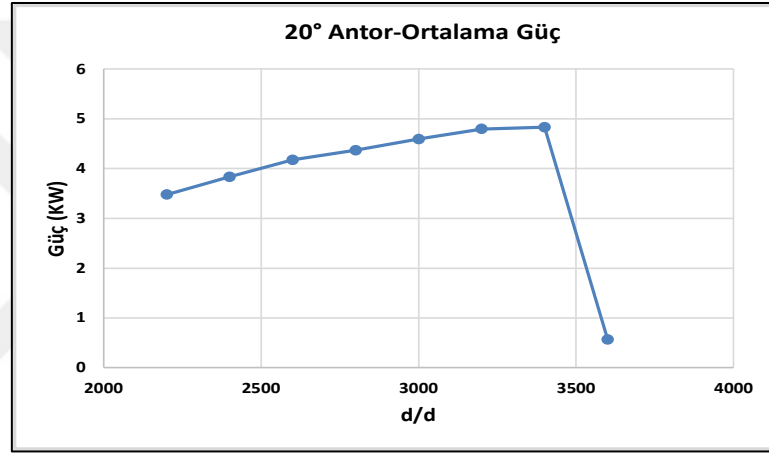
Şekil 4.2 Silindir honlama açısı 45° ile yapılan 3 adet performans test sonucu moment ortalamasının devire göre grafiği

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 silindir honlama açısı 45° ile yapılan 3 adet performans test sonucu Tablo 4.1'e göre güç ve moment ortalamasının devire göre grafiğini göstermektedir.

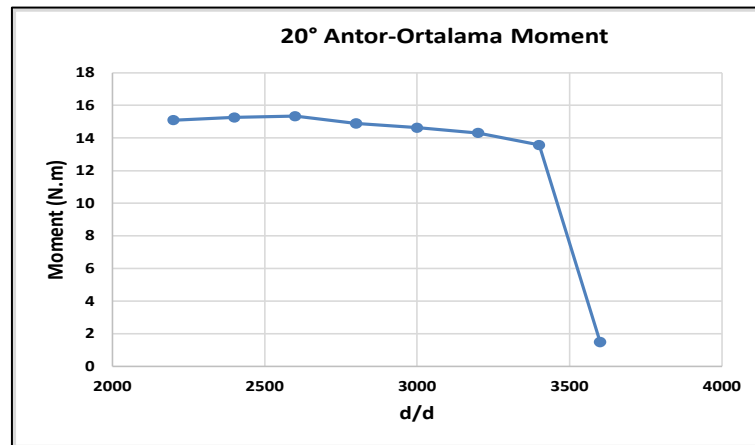
4.1.2 Silindir Honlama Açısı 20° İle Performans Testleri

Tablo 4.2 Silindir honlama açısı 20° ile performans testleri verileri

test 1					test 2				test 3				Emisyon							Performans Ortalama	
n	V	I	N	T	V	I	N	T	V	I	N	T	λ	CO	CO2	O2	HC	NOx	N	T	
3600	21	2.3	0.0483	0.128129	89	9.1	0.8099	2.148485	91	9.2	0.8372	2.220906	7112	0.01	2.3	20.2	30	11	0.565133	1.499173	
3400	217	22.4	4.8608	13.65313	218	22.5	4.905	13.77728	215	22	4.73	13.28574	1.876	1.04	8.3	12.4	50	290	4.831933	13.57205	
3200	214	21.9	4.6866	13.98657	218	22.3	4.8614	14.50824	219	22.1	4.8399	14.44408	6.626	0.18	1.9	17.1	15	88	4.795967	14.31296	
3000	210	21.4	4.494	14.3059	214	22	4.708	14.98713	213	21.5	4.5795	14.57808	1.77	0.59	7.9	9.7	6	499	4.593833	14.6237	
2800	206	21.2	4.3672	14.89527	208	21.2	4.4096	15.03989	206	21	4.326	14.75475	1.6	0.88	8.2	8.3	17	493	4.3676	14.89664	
2600	204	20.9	4.2636	15.66053	202	20.6	4.1612	15.28441	201	20.4	4.1004	15.06108	1.535	1.08	8.3	7.9	25	525	4.175067	15.33534	
2400	195	20	3.9	15.51875	194	19.8	3.8412	15.28478	193	19.5	3.7635	14.97559	1.462	1.4	8.4	7.2	42	604	3.8349	15.25971	
2200	185	19	3.515	15.2583	184	18.8	3.4592	15.01607	182	19	3.458	15.01086	1.404	1.54	8.6	6.9	50	641	3.4774	15.09508	



Şekil 4.3 Silindir honlama açısı 20° ile yapılan 3 adet performans test sonucu güç ortalamasının devire göre grafiği



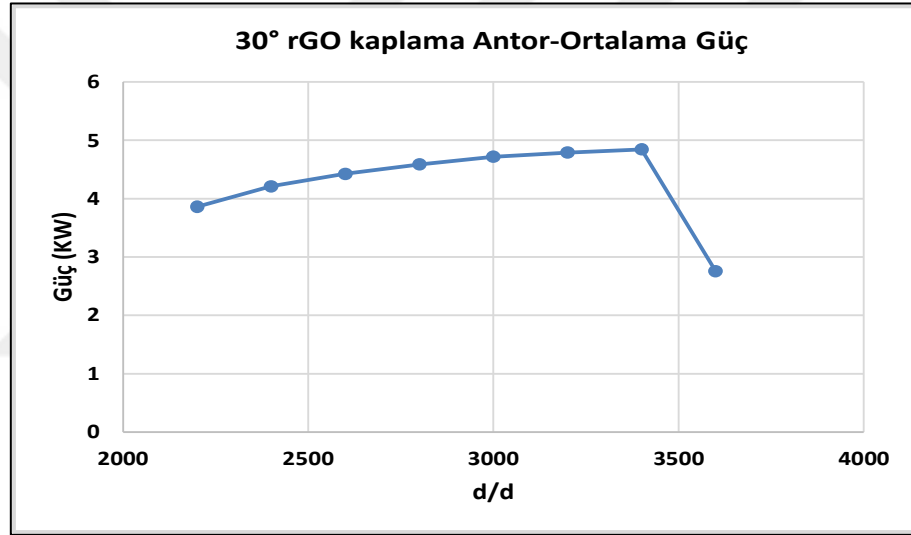
Şekil 4.4 Silindir honlama açısı 20° ile yapılan 3 adet performans test sonucu moment ortalamasının devire göre grafiği

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4 Silindir honlama açısı 20° ile yapılan 3 adet performans test sonucu Tablo 4.2'ye göre güç ve moment ortalamasının devire göre grafiğini göstermektedir.

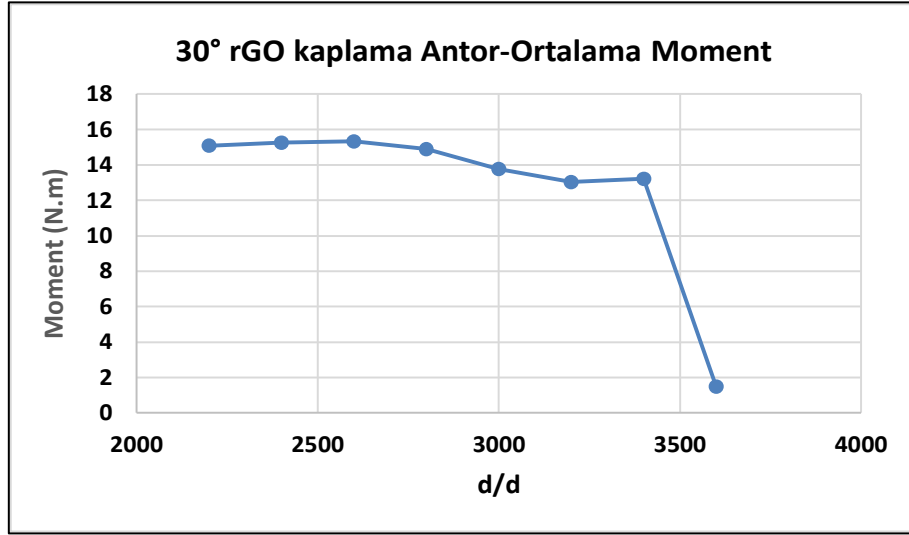
4.1.3 Silindir Honlama Açısı 30° ve rGO Kaplama Olan Silindirin Performans Testleri

Tablo 4.3 Silindir honlama açısı 30° ve rGO kaplama ile performans testleri verileri

	Test 1				Test 2				Test 3				Emisyon							Performans ortalaması	
n	V	I	N	T	V	I	N	T	V	I	N	T	λ	CO	CO2	O2	HC	NO _x	N	T	
3600	129	13.2	1.7028	4.51715	160	16.5	2.64	4.51715	197	19.9	3.9203	7.003333	3.097	0.16	4.5	14.2	57		2.753677	7.306723	
3400	218	22.3	4.8614	13.65481	224	22.5	5.04	13.65481	217	21.3	4.6221	14.15647	1.279	0.25	10.9	4.6	48	324	4.841167	13.59798	
3200	216	22.4	4.8384	14.4396	222	22.3	4.9506	14.4396	214	21.4	4.5796	14.77445	0.783	7.67	8.6	0.62	515	226	4.789533	14.29376	
3000	217	22.3	4.8391	15.40447	219	21.9	4.7961	15.40447	212	21.3	4.5156	15.26759	0.75	8.57	7.8	0.63	723	231	4.716933	15.01557	
2800	213	21.9	4.6647	15.90996	214	21.6	4.6224	15.90996	211	21.2	4.4732	15.76569	0.736	8.95	7.4	0.62	736	250	4.586767	15.64415	
2600	208	21.4	4.4512	16.3496	210	21.1	4.431	16.3496	209	21	4.389	16.2754	0.73	9.08	7.3	0.62	812	254	4.423733	16.24871	
2400	203	20.8	4.2224	16.80163	205	20.6	4.223	16.80163	204	20.5	4.182	16.80402	0.724	9.2	7.2	0.59	800	260	4.209133	16.74884	
2200	193	19.9	3.8407	16.67213	196	19.7	3.8612	16.67213	197	19.7	3.8809	16.76112	0.721	9.25	7.2	0.54	812	269	3.860933	16.75996	



Şekil 4.5 Honlama açısı 30° ve rGO kaplama olan silindir ile yapılan 3 adet performans test sonucu güç ortalamasının devire göre grafiği



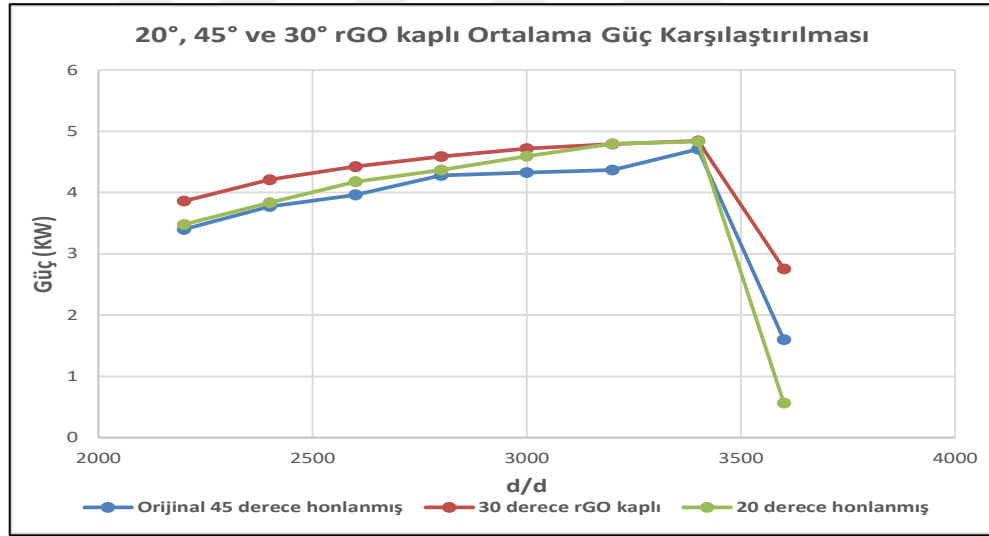
Şekil 4.6 Honlama açısı 30° ve rGO kaplama olan silindir ile yapılan 3 adet performans test sonucu moment ortalamasının devire göre grafiği

Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 silindir honlama açısı 30° ve rGO kaplama olan silindir ile yapılan 3 adet performans test sonucu Tablo 4.3'e göre güç ve moment ortalamasının devire göre grafiğini göstermektedir.

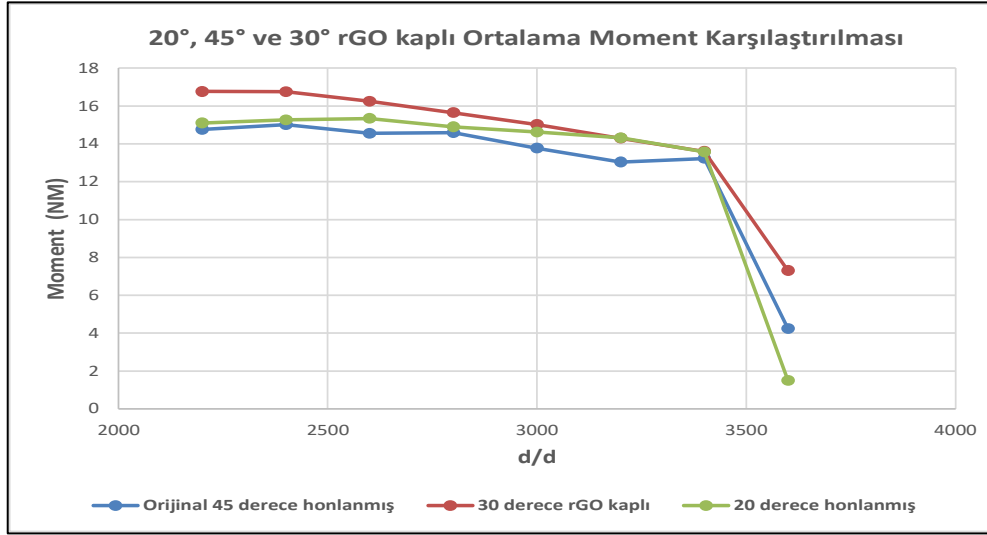
4.1.4 Silindir Honlama Açısı 20°, 45° ve 30° rGO Kaplama Olan Silindirlerin Ortalama Güç ve Moment Testlerinin Karşılaştırılması

Tablo 4.4 Silindir honlama açısı 20°, 45° ve 30° rGO kaplama olan silindirlerin ortalama güç ve moment testleri verileri

n	Ortalama N (Güç) ve M (Moment) değerleri							
	20 derece			30 derece			45 derece	
	N	T		N	T		N	T
3600	0,565133	1,499173		2,754367	7,306723		1,599467	4,24303
3400	4,831933	13,57205		4,841167	13,59798		4,708367	13,22497
3200	4,795967	14,31296		4,789533	14,29376		4,367833	13,03525
3000	4,593833	14,6237		4,716933	15,01557		4,326133	13,77152
2800	4,3676	14,89664		4,586767	15,64415		4,277867	14,59058
2600	4,175067	15,33534		4,423733	16,24871		3,961167	14,54967
2400	3,8349	15,25971		4,209133	16,74884		3,770867	15,00491
2200	3,4774	15,09508		3,860933	16,75996		3,398933	14,75446



Şekil 4.7 Silindir honlama açısı 20°, 45°, ve 30° rGO kaplama olan silindirlerin güç testleri ortalamalarının devire göre grafiği



Şekil 4.8 Silindir honlama açısı 20°, 45° ve 30° rGO kaplama olan silindirlerin moment testleri ortalamalarının devire göre grafiği

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8 silindir honlama açısı 20°, 45° ve 30° rGO kaplama olan silindirlerin güç ve moment testleri ortalamalarının devire göre grafiği silindir honlama açısı 30° ve rGO kaplama olan silindir ile yapılan 3 adet performans test sonucu Tablo 4.3'e göre güç ve moment ortalamasının devire göre grafiğini göstermektedir. Sonuç olarak 20° ve 45° olan silindirler benzer sonuçlar vermiş olup 30° rGO kaplamalı silindirin daha fazla performans gösterdiği görülmektedir.

4.2 Silindirlerin Kesilmesi ve Yüzey Analizi



Şekil 4.9 Metal Kesme cihazı

Şekil 4.9'da gösterilen metal kesme cihazı UMSY 280 marka olup Uzak makinadan temin edilmiştir. Mafsallı yarı otomatik modellerde malzeme boyu ayarı manuel olarak

gerçekleşmektedir. Tek kesimlere sahip işletmeler için uygun bir modeldir. Ayrıca mengene çenelerinin döndürülmesi ile açılı kesimler yapabilmek imkanı vardır. Teknik özellikleri tablo 4.5’de verilmiştir.

Tablo 4.5 Silindir kesme cihazına ait teknik özellik ve donanımlar

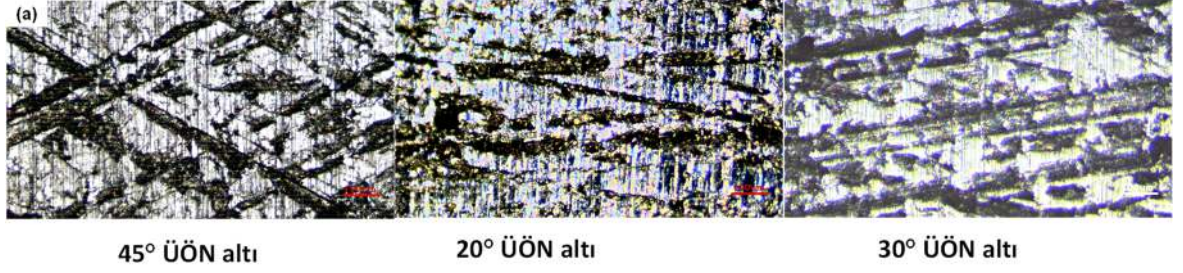
Teknik özellikler		Donanımlar
Ana Motor	1,5 kW 1500 d/d	Manuel malzeme sürme / boy ayarlama
Soğutma Motoru	0.09 kW 3000 d/d	Mengeneden ayarlama ile sağ-sol 45° açılı kesim
Hidrolik Motor	0.25 kW 1500 d/d	İnvertörlü şerit hızı kontrolü
Talaş Konveyörü	0.18 kW 1000 d/d	Hidro-mekanik şerit gerdirme, şerit kopma sivişi
Elektrovaryatör	20 – 100	Soğutu pompa
Kesme Hızı	20-100 m/dk	Tek rulo malzeme sehpaı, kesme yükseklik ayarı
Şerit Ölçüsü	3660x27x0.9	Hidrolik mengene
Yükleme Ağırlığı	520 Kg	Mekanik malzeme boy dayama ayarı
Besleme Yüksekliği	650 mm	Hareketli kumanda paneli
Çalışma Ebatları	200x1300x1730	Hidrolik kesme iniş hızı kontrolü



Şekil 4.10 Motor testleri sonunda silindir kovanlarının kesilmesi

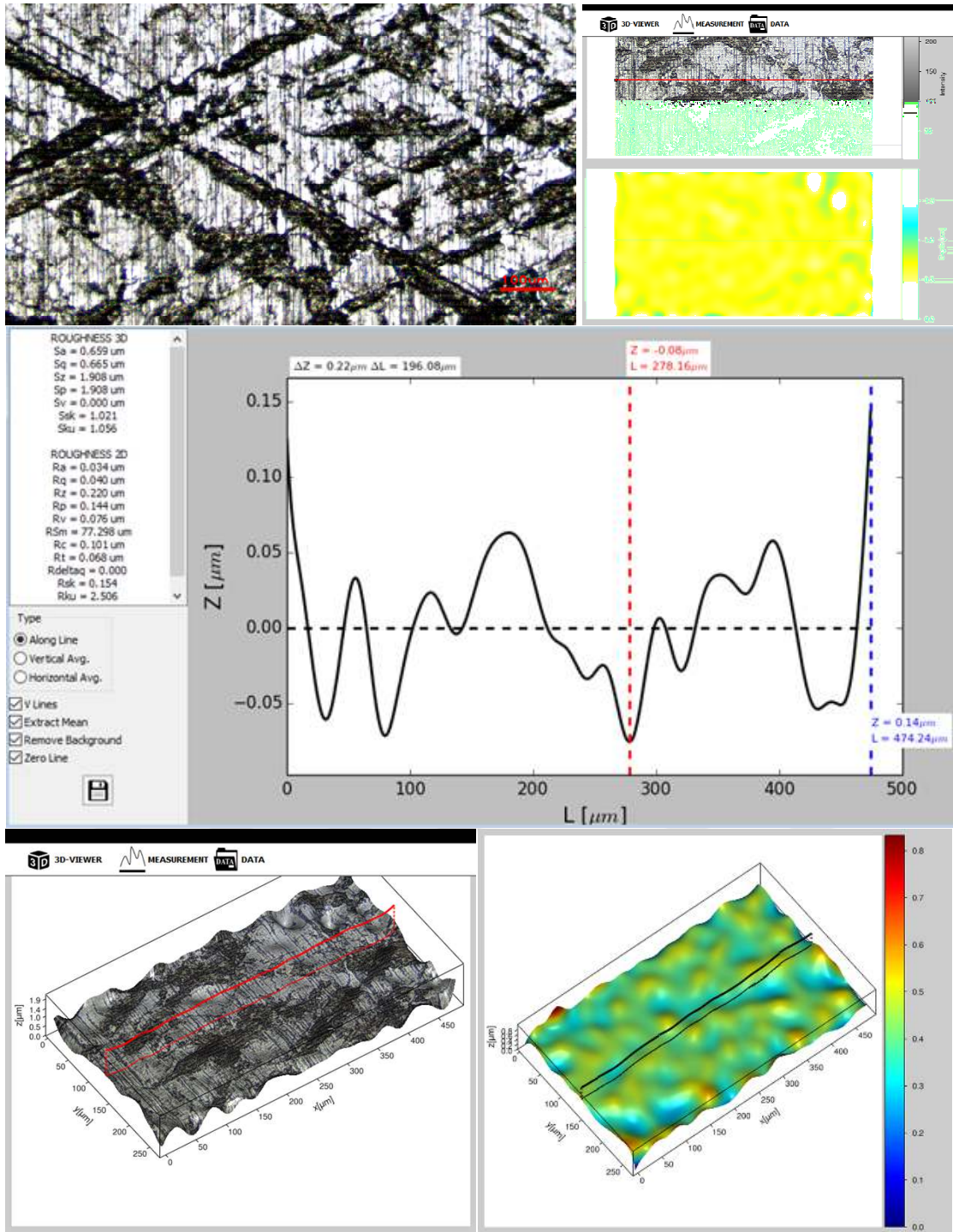


Şekil 4.10 Kesilen silindir kovanlarının Üst Ölü Nokta görüntüsü

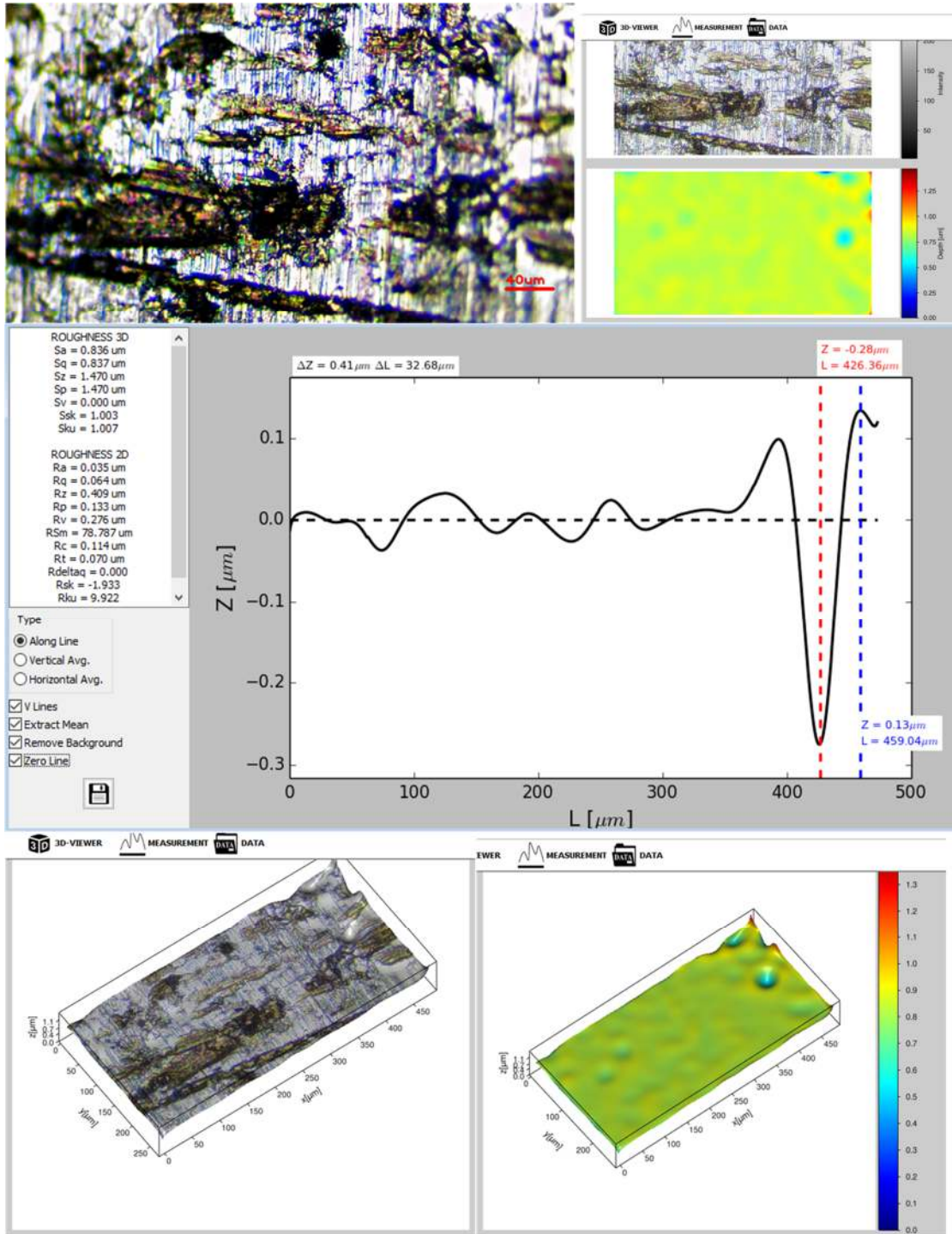


Şekil 4.11 Kesilen silindir kovanlarının Üst Ölü Nokta bölgelerinin optik mikroskop görüntüleri

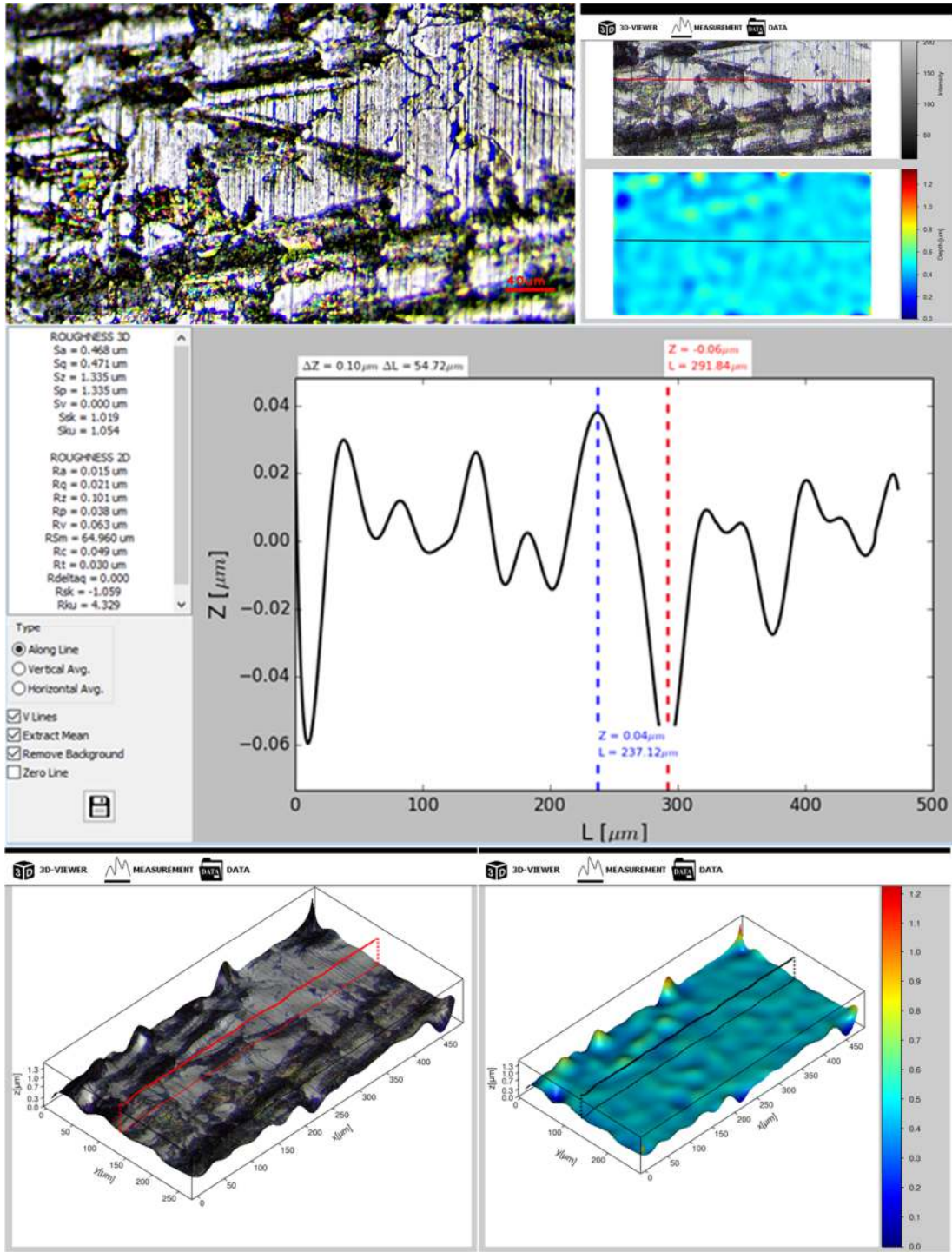
Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 motor testlerinin bitiminde silindir kovanlarının metal kesme cihazında yüzeye zarar vermeden kesilmesini, 45°, 20° ve 30° kesilen silindir kovanlarının bilhassa aşınmaların en fazla meydana geldiği Üst Ölü Nokta bölgelerinin mikroskopik görüntülerini göstermektedir.



Şekil 4.12 Motor dinamometresinde test edilmiş 45° honlanmış silindirin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi



Şekil 4.13 Motor dinamometresinde test edilmiş 20° honlanmış silindirin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi

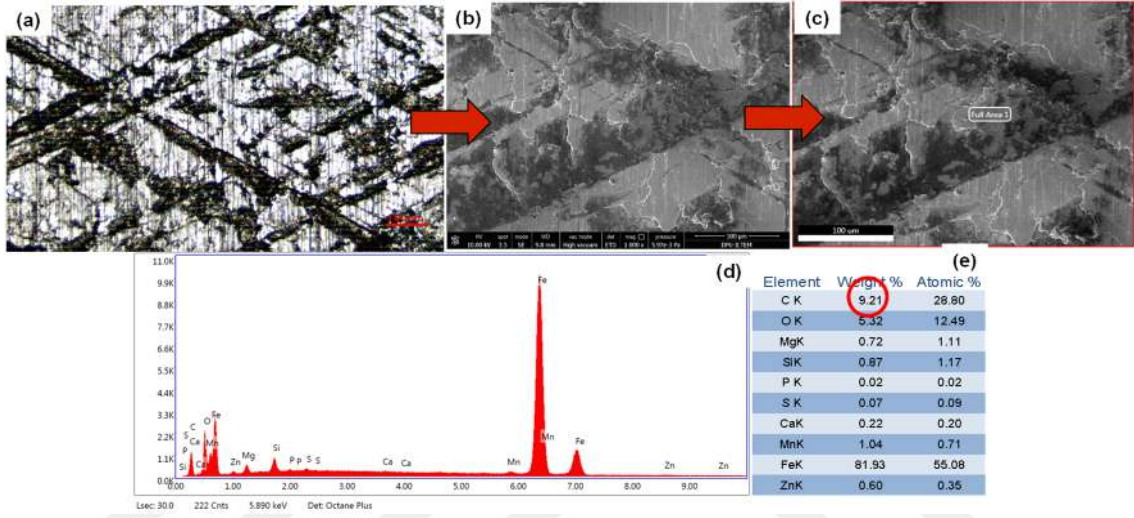


Şekil 4.14 Motor dinamometresinde test edilmiş 30° honlanmış rGO kaplı silindirin 2D-3D dijital pürüzlülük optik mikroskopisi

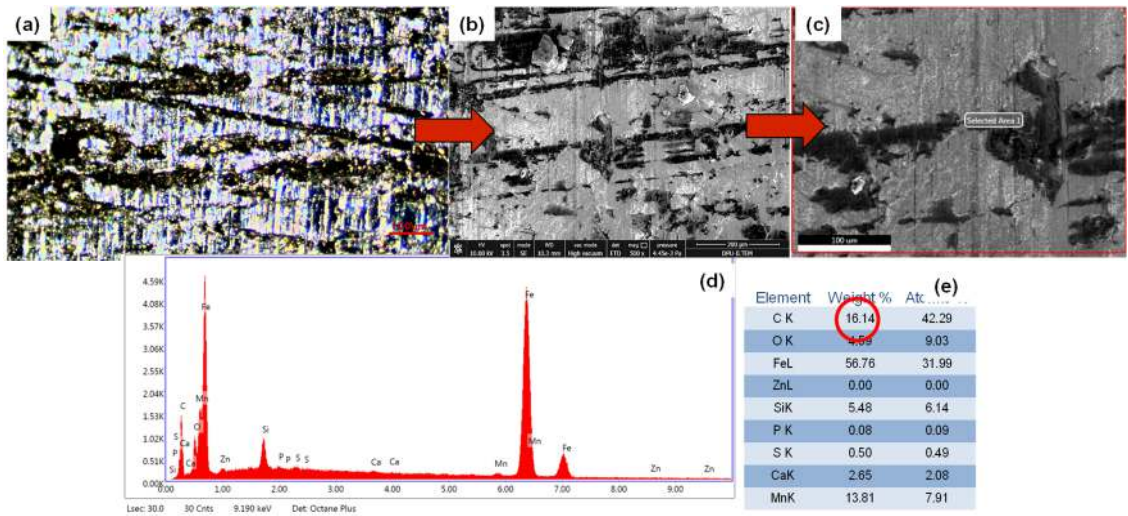
Sırası ile Şekil 4.13, Şekil 4.14, Şekil 4.15, Motor dinamometresinde test edilmiş 45°, 20°, 30° honlanmış silindir gömleğinin 2D-3D optik mikroskopi dijital pürüzlülük analizlerini göstermektedir. Bu şekillerden elde edilen veriler Tablo 4.6’da sıralanmıştır. 30° honlanmış rGO kaplı silindirin en düşük değeri göstermiştir.

Tablo 4.6 Motor dinamometresinde test edilmiş 45°, 20°, 30° kesilmiş silindir numunelerinin aşınma izlerinin 2D ve 3D pürüzlülük değerleri

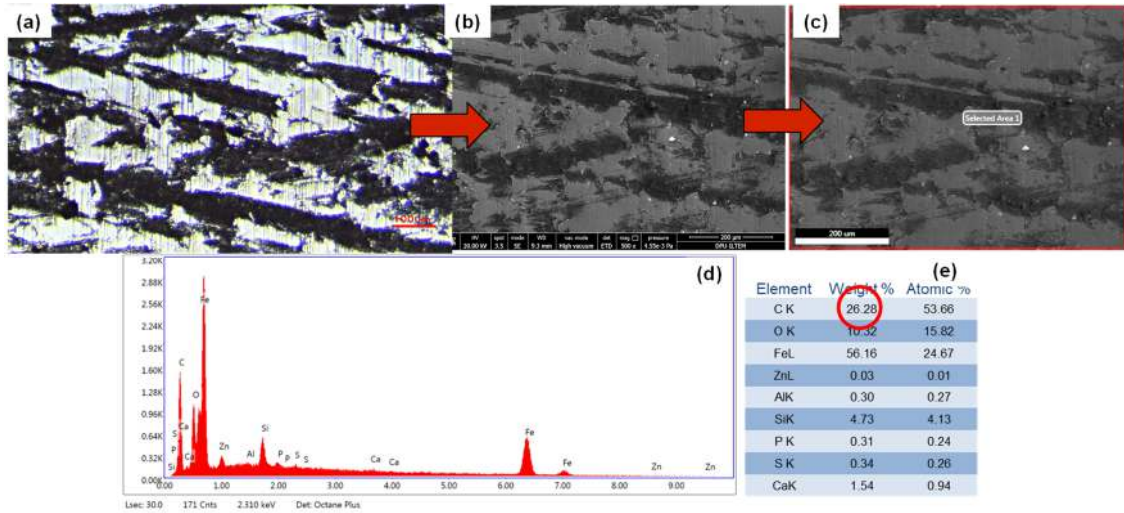
Honlama açısı (Test sonrası)	Sa (nm)	Ra (nm)
45°	0.659	0.034
20°	0.836	0.035
30°	0.468	0.015



Şekil 4.15 45° Test edilen 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 4.16 20° Test edilen 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 anali



Şekil 4. 17 30° rGO kaplı test edilen motor silindir kovanının Ü.Ö.N (Üst Ölü Noktasındaki) yüzey analizi a) Optik Mikroskop, b) ve c) Elektron mikroskobu d) X-Ray e) Elementel analiz

45°, 20° ve 30° ile test edilen motor silindir kovanları karşılaştırıldığında (Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18) aşınmaların en fazla Üst Ölü Nokta bölgelerinde meydana gelmesi nedeniyle bu bölge mikroskobik olarak incelenmiştir. rGO kaplı 30° ile test edilen motor silindir kovanının Ü.Ö.N.'sındaki %C miktarı 45° ve 20° motora göre doğal olarak yüksek çıkmıştır. Grafen kaplama yüzeyi korumuştur.

Tablo 4.7 45°, 20° ve 30° ile test edilen motor silindirlerinin sürtünen yüzeylerin aşınma izlerinin EDS ile analiz verileri

Açı	Numune adı	C	O	Al	Mn	Mg	Si	P	Ca	S	Fe	Zn	Toplam
45°	Silindirin aşınma izi	9.21	5.32	0.00	1.04	0.72	0.87	0.02	0.22	0.07	81.93	0.60	100
20°		16.14	4.59	0.00	13.81	0.00	5.48	0.08	2.65	0.50	56.76	0.00	100
30°		28.28	10.32	0.30	0.00	0.00	4.73	0.31	1.54	0.34	56.16	0.03	100

45°, 20° ve 30° ile test edilen motor silindir kovanlarının elementer analizleri Tablo 4.7 'de verilmiştir. rGO kaplı 30° ile test edilen motor silindir kovanının Ü.Ö.N.'sındaki grafenden gelen yüksek C miktarı motor yağında bulunan Ca, Zn ve P gibi katkı elementleri ile karışarak sürtünen yüzeyleri iyi koruduğu tespit edilmiştir.

Literatür araştırmalarına göre, çeşitli honlama teknikleri yüzey pürüzlülüğü parametreleri dikkate alınarak nümerik hesaplama ve pim-disk veya pim-plaka gibi tribometre testleri yapılmış, fakat farklı honlama açılarının tribolojik özellikleri ve avantajlarının gerek tribometrede gerekse gerçek motor testlerinde incelenmediği tespit edilmiştir.

Plato honlama işlemi, içten yanmalı motorların silindir gömleklerinin honlanmasıdaki son işlemdir. Plato honlama işlemi ile silindirin tepe pürüzlülük değerleri ciddi şekilde azaltılabilirken, silindirin vadi pürüzlülük değeri fazla değişmez.

İçten yanmalı bir motorun silindir yüzey kalitesi motor verimini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Bu yüzeylere uygulanan son üretim yöntemi honlamadır. Bu işlem ile yüzeye geometrik doğruluk verilmekte ve istenen yüzey kalitesi oluşturulmaktadır. Amaç, düzgün bir yüzey ve yağlamaya yardımcı olacak mikro yağlama kanalları meydana getirmektir. Motorun ilk çalışması sırasında segman, honlama işlemi ile oluşturulan yüzey pürüzlerinin uçlarını tepelerini aşındırır. Belli bir miktar aşınma olduktan sonra segman ve silindir yüzeyi arasında yeterli bir yatak alanı meydana gelir. Özellikle Diesel motorlarında uygulanan plato-honlama yöntemi ile bu aşındırma işlemi yapay olarak oluşturulmakta, böylece motor işletmeye alındığında bir alıştırma (rodaj) dönemi gerekmemekte ve ömrü uzamaktadır. Plato-honlanmış yüzeylerde belirli bir yatak alanı ve mikro yağ kanalları oluşur. Kalite kontrolü sırasında silindir yüzeylerinin bu özelliğinin ölçülmesi ve bir standarda göre kontrol edilmesi gerekir. Ancak bu konuda bütün motor üreticisi kuruluşlar tarafından kabul edilmiş ortak bir standart yoktur. Her firma kendi standardını kendisi tanımlamakta ve kalite kontrolü bu standarda göre yapmaktadır [35, 36, 37, 38, 39].

Bu yüzden tezde tüm pürüzlülük ölçümleri, yazılımda 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 şekillerde net olarak görülebilmektedir (Microsurf serisi komparatörlerde Ra için 0,0125 μm 'den 0,26 μm) ile UKAS ile uyumludur [40].

Yüzey pürüzlülüğü, Ra, silindir boyunca 0.4-0.8 μm arasında olmalıdır. Yani $<1 \mu\text{m}$.

Silindir gömleğinde, farklı açılardaki honlama; dikkatlice ve hassas bir şekilde 20 °, 30 °, 40 °, 45 ° ve 60 ° açılarda plato honlama olarak yapılmıştır. 5 farklı honlama açısı test edilmiştir [42, 43, 44, 45].

Tez çalışmasında sadece yüzeyde honlama açılarının değişimi değil bu açılarda çeşitli nano kaplamalar da yapılmıştır. Yüzeylere sırası ile TiN, CrCN, DLC ve rGO gibi nananokaplamalar uygulanmıştır.

Genel olarak elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

1. Yatay ve dikey olarak 20° honlama açısında ölçülen aşınma izi çapı, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindir gömleklerine göre en düşük değeri göstermiştir. Dikkate alınan 2D Ra ve 3D Sa değerleri 20° honlama açısında en düşük değeri göstermiş olup en düşük aşınma izi çapını doğrulamıştır.
2. 20°, 30°, 40°, 45° ve 60° honlanmış silindir gömleklerinin yatay olarak ölçülen aşınma izlerinde 20° honlanmış açının aşınma izi mesafesi, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindir gömleklerine göre en düşük değeri vermiştir.
3. Çelik bilye altında test edilmiş 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindir gömleğinin 2D-3D optik mikroskopi dijital pürüzlülük analizlerinde 20°, honlama açısı en düşük değeri göstermiştir.
4. Atomik kuvvet mikroskobunda silindir üzerinde 5 honlama açısında 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindir gömleği üzerinde test edilen bilyelerin aşınma izinin 2D ve 3D pürüzlülük değerlerinde nm olarak 20°, honlama açısı en düşük değeri göstermiştir.
5. Atomik kuvvet mikroskobunda çelik bilye altına sürtünmüş 5 honlama açısında 20°, 30°, 40°, 45°, 60° honlanmış silindir izlerinin 2D ve 3D pürüzlülük değerlerinde nm olarak 20° honlama açısı en düşük değeri göstermiştir.
6. Honlama açısı küçüldükçe yağlama işlevini arttırmaktadır, iyileştirmektedir. 20°'nin altına düşmemesi gerekmektedir.
7. SEM-EDS analiz sonuçları dikkate alındığında elementel analiz, koruyucu tabakalarda oluşan Zn, Ca, P, S gibi katkı maddelerinin birikimini ve sürtünme katsayısının azalttığını göstermiştir. Bu, 20° honlanmış silindir gömleğinin kayan parçalar arasında daha etkili bir yağlama sağladığı anlamına gelmektedir. Bu nedenle, sürtünme ve aşınma izinin azaltılması yönünde kilit bir rol oynadığı ve delaminasyon

- etkisi yoluyla kayma gerilimine karşı yüzey korumasına katkıda bulunduğunu ortaya koymuştur.
8. Tekrarlı testlerin sürtünme katsayısı ortalama verileri, grafik sonuçlarına göre en düşük sürtünme katsayısının 20° honlanmış silindirde ölçüldüğünü doğrulamıştır.
 9. 20° , 30° , 40° , 45° ve 60° honlanmış silindir gömlekleri yüzeylerinde rGO, CrCN, TiN, DLC nananokaplamalar uygulanmıştır.
 10. Tüm açılara göre 20° , 30° , 40° , 45° ve 60° honlanmış silindir üzerinde rGO nanokaplamaların sürtünme katsayılarının eğrileri ve verilerine göre en düşük sürtünme katsayısı 30° honlanmış rGO kaplamalı silindirde ölçülmüştür.
 11. Tribometre testlerinde aşınma açısından (30° için) test edilmemiş, kaplamasız, rGO, CrCN, TiN ve DLC kaplı silindir gömlekleri üzerinde test edilen bilyelerin yatay ve dikey olarak ölçülen en düşük aşınma izi çapı rGO kaplamalı silindirde ölçülmüştür. Şaşırtıcı bir şekilde, CrCN ve DLC'nin aşınma izi çapı, $100\ \mu\text{m}$ olan aynı mikroskobik ölekte görüntüde sınırın dışında kalmıştır.
 12. Yüzey analizi açısından (30° için) kaplamasız, rGO, CrCN, TiN ve DLC kaplı silindir gömlekleri üzerine test edilen bilyelerin 2D-3D dijital optik mikroskopda ölçülen Sa ve Ra parametreleri gibi pürüzlülük değerleri rGO kaplı silindir gömleklerinde daha düşük ölçülmüştür. Bunun ana nedeni “sert ve pürüzlü” CrCN, TiN ve DLC kaplı silindir gömlekleridir.
 13. Yine (30° için) kaplamasız, rGO, CrCN, TiN ve DLC kaplı silindir gömleklerinin 2D-3D dijital optik mikroskopda ölçülen Sa ve Ra parametreleri gibi pürüzlülük değerleri rGO kaplı silindir gömleklerinde daha düşük küçük ölçülmüştür. Bunun da ana nedeni “sert ve pürüzlü” CrCN, TiN ve DLC kaplı silindir gömlekleridir; sırasıyla DLC, CrCN, TiN kaplamaların mikrosertliği rGO kaplamaya göre fazladır [41, 50, 51].
 14. Abrasyon aşınması her zamanki gibi tesbit edilmiştir. Bu aşınma mekanizması olağandır. Kaplamasız ve CrCN, DLC, TiN kaplı silindirlere bağlı olarak rGO kaplı silindir in aşınma izinde aşınma çizgileri çok daha belirgindir. Koruyucu rGO kaplama tabakalarının oluşumunda yüzey bozulmasının ve yüksek sıcaklığın büyük etkisi vardır. Yüzeyde katmanlar elde etmek için temel mekanik koşullar, hafif bir yüzey bozulması (abrazyon çizgileri) ve en düşük sürtünme katsayısı değerinin elde edildiği sınır yağlamada yüksek sıcaklıktır.

15. rGO kaplanmış silindir gömleği 5 honlama açısında sürtünen bilyelerin aşınma izinin atomik kuvvet mikroskobunda ölçülen 2D ve 3D Pürüzlülük değerleri 30° , honlama açısında en düşük değer ölçülmüştür. Aynı şekilde rGO kaplanmış 5 honlama açılı silindir numunelerinde 30° , honlama açısı en düşük değeri göstermiştir [58, 59, 60, 61, 62, 63].
16. 30° için rGO kaplanmış silindir gömleği ile yapılan testler daha iyi sonuçlar verdiğinden, bu numunede SEM görüntüsü ve EDS spektrumları yapılmıştır. Dolayısı ile diğer açılar için SEM-EDS yapılmasına gerek duyulmamıştır. Kaplanmamış ve rGO kaplı silindir üzerinde test edilen bilyenin SEM görüntülerini ve EDS spektrumlarının elementer analizi Motor yağından gelen Ca, Zn ve P gibi katkı elementleri, sürtünen yüzeyleri iyi korumuştur. Koruyucu yüzey tabakaları oluşturan Ca, S, P ve Zn gibi diğer katkı elementleri ile karışan rGO'dan gelen karbon (C) miktarının yüksek olması beklenen sonuçtur [56, 57, 64].
17. Aynı şekilde çelik bilye altında test edilmiş kaplamasız ve rGO kaplı silindir gömleklerinin SEM görüntülerini ve EDS spektrumlarında motor yağından gelen Ca, Zn ve P gibi ilave elemanlar sürtünmüş yüzeyleri iyi korumuştur. Karbon (C) miktarının, rGO'nun Ca, S, P ve Zn gibi diğer katkı maddeleri elemanlarıyla karıştığı ve yüksek çıkması ve koruma tabakası oluşturduğu beklenen sonuçtur.
18. Silindir honlama açısı 20° , 45° ve 30° rGO kaplama olan silindirlerin güç ve moment testleri ortalamalarının devire göre 3 adet performans test sonucunda 20° ve 45° olan silindirler benzer sonuçlar vermiş olup 30° rGO kaplamalı silindirin daha fazla performans gösterdiği tespit edilmiştir.
19. 45° , 20° ve 30° ile test edilen motor silindir kovanları karşılaştırıldığında aşınmaların en fazla Üst Ölü Nokta bölgelerinde meydana gelmesi nedeniyle rGO kaplı 30° ile test edilen motor silindir kovanının Ü.Ö.N' daki %C miktarı 45° ve 20° motora göre doğal olarak yüksek çıkmıştır. Grafen kaplamanın yüzeyi koruduğu tespit edilmiştir [70, 71, 72, 73, 74, 75].

- [1] Dimkovski, Z., Anderberg, C., Ohlsson, R., Rosén B.G. 2011. “Characterisation of worn cylinder liner surfaces by segmentation of honing and wear scratches”, *Wear*, 271, 548–552.
- [2] Vrac, D., Sidjanin, L., Balos, S. 2014. “The Effect of Honing Speed and Grain Size on Surface Roughness and Material Removal Rate during Honing”, *Acta Polytechnica Hungarica*, 11, 10, 163-175.
- [3] K1sa, M. Özel Üretim Teknikleri., Bursa: (2002) Furkan Ofset.
- [4] Nirmal Raj, L., Rajasaker, K., Vetriseivam, M., Vignesh, R., Suresh, S. 2017. “Straight Pass Rate Improvement of Productivity in Honing Process”, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 6, 3, 4718-4724.
- [5] Uhlmann, E., Spur, G., Kleinschnitker, M. 2015, Bölüm 5, Sayfa 234. Honing and Superfinishing. *Handbook of Ceramics Grinding and Polishing*. Editör: Doi, T., Marinescu, L. D., Uhlmann, E. Elsevier Japan.
- [6] Klocke F. 2009. *Manufacturing Proses 2 Grinding, Honing, Lapping* (RWTH edition). Deblük Berlin, Germany: Springer.
- [7] Bouassida, H., Biboulet, N., Sainsot, P., Lubrecht, A. A. 2014. “Piston ring load carrying capacity: Influence of cross-hatching parameters”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 228, (6), 642-648.
- [8] Biboulet, N., Bouassida, H., Lubrecht, A. A. 2015. “Cross hatched texture influence on the load carrying capacity of oil control rings”, *Tribology International*, 82, 12-19.
- [9] Lipa, Z., Tomaníková, D. 2011. “Utilisation of Abbott-Firestone curves characteristics for the determination of turned surface properties”, *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*, 9(3), 223.
- [10] Corral, I. B., Calvet, J. V., Salcedo, M. C. 2010. “Use of roughness probability parameters to quantify the material removed in plateau-honing”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50, 7, 621-629.
- [11] Malburg, M. C., Raja, J., Whitehouse, D. J., 1993. “Characterization of Surface Texture Generated by Plateau Honing Process”, *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 42, 1, 637-639.
- [12] Air filter supplier Taguti, “New honing technique reduces oil consumption”, <http://www.filter-supplier.com/new-honing-technique-reduces-oil-consumption-air-filter-supplier/>
- [13] Siqi M., Yuchen L., Zichun W., Zheng W., Ruoxuan H., and JiuJun X., “The Effect of Honing Angle and Roughness Height on the Tribological Performance of CuNiCr Iron Liner”, *Metals* 2019, 9, 487.

- [14] J. K. Patil, E. N. Aitavade. "A Review on Investigation of Tribological Behavior of Nanocoating for Piston Ring", International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science (IJLTEMAS) Volume VI, Issue III, March 2017, 88-93.
- [15] D. Luo. "Selection of Coatings for Tribological Applications", phd thesis, 206 pages, 2009.
- [16] J. Jagielski, A.S. Khanna, J. Kucinski, D.S. Mishra, P. Racolta, P. Sioshansi, E. Tobin, J. Thereska, V. Uglov, T. Vilaithong, J. Viviente, S.-Z. Yang and A. Zalar. "Effect of chromium nitride coating on the corrosion and wear resistance of stainless steel", Applied Surface Science, Volume 156, Issues 1–4, 2 February 2000, Pages 47-64.
- [17] N. B. Dahotre, and S. Nayak, "Nanocoatings for engine application", Surface & Coatings Technology, 2005 194, 58– 67.
- [18] S. K. Singh, S. Chattopadhyaya, A. Pramanik and S. Kumar, "Wear behavior of chromium nitride coating in dry condition at lower sliding velocity and load", Int J Adv Manuf Technol (2018) 96:1665–1675.
- [19] E. Santecchiaa, E. Zalnezhabd, A.M.S. Hamoudaa, F. Musharavatia, M. Cabibboc and S. Spigarelli, "Wear resistance investigation of titanium nitride-based coatings", Ceramics International, 41, 2015, 10349-10379.
- [20] Magdalena Łepickaa, Małgorzata Grądzka-Dahlkea, Daniel Pieniakb, Kamil Pasierbiewicz, Kamila Kryńskaa, Andrzej Niewczasb, "Tribological performance of titanium nitride coatings: A comparative study on TiN-coated stainless steel and titanium alloy", Wear, 422–423, 2019, 68-80.
- [21] M. Lepicka, M. Grądzka-Dahlkea, D. Pieniakb, K. Pasierbiewicz, A. Niewczas, "Effect of mechanical properties of substrate and coating on wear performance of TiN- or DLC-coated 316LVM stainless steel", Wear, 382–383, 2017, 62-7.
- [22] N. A. Masripa, Y. Tsukiyama, K. Ohara, N. Umehara, H. Kousaka, T. Tokoroyama, S. Inami, K. Zushi and M. Fujita, "Evaluation of transformed layer hardness of DLC coating after friction test", Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering) 78: 10–3 (2016) 43–47.
- [23] F. O. Kolawole, S. K. Kolawole, L. B. Varela, A. F. Owa, M. A. Ramirez and A. P. Tschiptschin, "Diamond-Like Carbon (DLC) Coatings for Automobile Applications", September 2014, Tribology Online 9(3):135-142.
- [24] S. D. A. Lawes, M. E. Fitzpatrick and S. V. Hainsworth, "Evaluation of the tribological properties of DLC for engine applications", J. Phys. D: Appl. Phys. 40 (2007) 5427–5437.
- [25] I. Braceras, I. Ibanz, S. Dominguez-Meister, X. Velasco, M. Brizuela and I. Garmendia, "Electro-tribological properties of diamond like carbon coatings, Friction", 8 (2): 451–461 (2020).
- [26] O. Van der Biest and L. J. Vandeperr, "Electrophoretic Deposition of Materials", Annual Review of Materials Research, 2003, 29, 1, 327-352.
- [27] H. Kaleli, S. Demirtas, V. Uysal, I. Karnis, M. M. Stylianakis, S. H. Anastasiadis and D. E. Kim, "Tribological Performance Investigation of a Commercial Engine Oil Incorporating Reduced Graphene Oxide as Additive", Nanomaterials 2021, 11(2), 386.

- [28] Kaleli, H., and Berthier, Y., 2001, "The Mechanism of Layer Formation and the Function of Additives Used in Fully Formulated Engine Crankcase Oils", Boundary and Mixed Lubrication: Science and Applications, Proceedings of the 28th Leeds-Lyon Symposium on Tribology as a part World Tribology Congress, Vienna, Austria, WTC 4-7 September 2001, Tribology Series 40, pp. 189-197.
- [29] Kaleli, H., and Durak, E., 2002, "Effect of Friction, Wear and Layer Protection of Oil Fortifiers Added into Crankcase Oils in an Internal Combustion Engine's Journal Bearings", 4th International Conference on Tribology, 12-14 June 2002, Balkantrib'2002, Proceedings Volume 1, Kayseri, Erciyes University, Grand Eras Hotel /TURKEY, pp. 489-496.
- [30] Kaleli, H., 2001, "Protective effect of commercial oil fortifier in fully formulated crankcase oils", Industrial Lubrication and Tribology, Volume 53, Number 1, pp. 10- 21.
- [31] Kaleli, H., 2004, "Evaluation of Additive's Layer Formation in Engine Crankcase Oil Using Two Different Types of Tribological Test Rigs", Industrial Lubrication and Tribology, Volume 53, Number 3, pp. 158-170.
- [32] Demirtas, S.; Kaleli, H.; Khadem, M.; Kim, D.E., "Characterization of the friction and wear effects of graphene nanoparticles in oil on the ring/cylinder liner of internal combustion engine", Ind. Lub. Tribol. 2019, 71, 642. DOI: 10.1108/ILT-05-2018-0170.
- [33] N. Radek, D. Tokar, A. Kalinowski, J. Pietraszek., "Influence of laser texturing on tribological properties of DLC coatings", Production Engineering Archives, 2021, 27(2), 119-123.
- [34] K. A. H. A. Mahmud, M. A. Kalam, H. H. Masjuki, H. M. Mobarak and N.W. M. Zulkifli, "An updated overview of diamond-like carbon coating in tribology", Solid State and Materials Sciences, 40, 2, 2015, 1-29.
- [35] Anlagan, Ö. "Plato-Honlamada Yüzey Kalitesi Kriterleri", Emek Holding. A.5-, Ankara, Makine Tasarım ve İmalat Dergisi -Cilt 1, Sayı 2, Ocak 1987 85-89.
- [36] Trautwein, R., "Characteristic Values for Determining-and Evaluating the Surface of Cylinder Bores", Mahle Gmbh, Technical Report 1978.
- [37] Stout, K.J. and Davis, E.J., "Surface Topography of Cylinder Bores-The Relationship Between Manufacture, Characterization and Function", 95, (1984), Wear.
- [38] Anlagan, Ö., "Cylinder Sleeve Bore Surface Finish Specifications", Richland Industries Ltd. Technical Report 1986.
- [39] Jeng, Y-R. "Impact of Plateaued Surfaces on Tribological Performance", Tribol. Trans. 1996, 39, 354-361.
- [40] The Microsurf Series Of Comparators - Rubert & Co Ltd, available at: <http://www.rubert.co.uk/comparison-specimens/microsurf-2/>: 02/04/2023.
- [41] Biberger, J.; Fufier, H.-J.; Klaus, M.; Genzel, C. "Near-surface and depth-dependent residual stress evolution in a piston ring hard chrome coating induced by sliding wear and friction", Wear 2017, 376-377, 1502-1521.

- [42] Grabon, W.; Pawlus, P.; Wos, S.; Koszela, W.; Wiczorowski, M. "Effects of honed cylinder liner surface texture on tribological properties of piston ring-liner assembly in short time tests", *Tribol Int.* 2017, 113, 137148.
- [43] Grabon, W.; Pawlus, P.; Wos, S.; Koszela, W.; Wiczorowski, M. "Effects of cylinder liner surface topography on friction and wear of liner-ring system at low temperature", *Tribol Int.* 2018, 121, 148-160.
- [44] Grabon, W.A. "A new approach to the description of height distribution of plateau honed cylinder liner surface texture during the initial stage of wear", *Wear* 2018, 408-409, 34-42.
- [45] Guo, Z.; Yuan, C.; Liu, P.; Peng, Z.; Yan, X. "Study on Influence of Iron Liner Surface Texture on Lubrication Performance for Cylinder Liner-Piston Ring Components", *Tribol Lett.* 2007, 42, 8465-8469.
- [46] Hu, Y.; Meng, X.; Xie, Y. "A new efficient flow continuity lubrication model for the piston ring-pack with consideration of oil storage of the cross-hatched texture", *Tribol Int.* 2018, 119, 443-463.
- [47] Tas, M.O.; Banerji, A.; Lou, M.; Lukitsch, M.J.; Alpas, A.T. "Roles of mirror-like surface finish and DLC coated piston rings on increasing scuffing resistance of cast iron cylinder liners", *Wear* 2017, 376-377, 15581569.
- [48] Sripakagorn, A.; Srikam, C. "Design and performance of a moderate temperature difference Stirling engine", *Renew. Energy.* 2011, 36, 1728-1733.
- [49] Huang, R.; Ma, S.; Zhang, M.; Yang, J.; Wang, D.; Zhang, L.; Xu, J. "Wear Evolution of the Glass Fiber-Reinforced PTFE under Dry Sliding and Elevated Temperature", *Materials* 2019, 12(7), 1082.
- [50] Shen, Y.; Yu, B.; Lv, Y.; Li, B. "Comparison of Heavy-Duty Scuffing Behavior between Chromium-Based Ceramic Composite and Nickel-Chromium-Molybdenum-Coated Ring Sliding against Cast Iron Liner under Starvation" *Materials* 2017, 10, 1176.
- [51] Ma, S.; Chen, W.; Li, C.; Jin, M.; Huang, R.; Xu, J. "Wear Properties and Scuffing Resistance of the Cr-AkO₃ Coated Piston Rings: The Effect of Convexity Position on Barrel Surface", *J. Tribol.* 2018, 141, 021301.
- [52] Joshi, G.S.; Putignano, C.; Gaudioso, C.; Stark, T.; Kiedrowski, T.; Ancona, A. "Effects of the micro surface texturing in lubricated non-conformal point contacts", *Tribol. Int.* 2018, 127, 296-301.
- [53] Yuan, S.; Huang, W.; Wang, X. "Orientation effects of micro-grooves on sliding surfaces", *Tribol. Int.* 2011, 44(9), 1047-1054.
- [54] Kim, E.-S.; Kim, S.-M.; Lee, Y.-Z. "The effect of plateau honing on the friction and wear of cylinder liners", *Wear* 2018, 400-401, 207-212.
- [55] Mezghani, S.; Demirci, I.; Zahouani, H.; El, Mansori, M. "The effect of groove texture patterns on piston-ring pack friction", *Precis. Eng.* 2012, 36, 210-217.
- [56] Kato, H.; Komai, K. "Tribofilm formation and mild wear by tribo-sintering of nanometer-sized oxide particles on rubbing steel surfaces", *Wear* 2007, 262, 36-41.
- [57] Bewsher, S.R.; Turnbull, R.; Mohammadpour, M.; Rahmani, R.; Rahnejat, H.; Offner, G. "Effect of cylinder de-activation on the tribological performance of

- compression ring conjunction”, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J. Eng. Tribol.* 2016, 231, 997-1006.
- [58] Cabanettes, F.; Dimkovski, Z.; Rosen, BG. “Roughness variations in cylinder liners induced by honing tools' wear”, *Precis. Eng.* 2015, 41, 40-46.
 - [59] Li, W; Yu, B.; Lv, Y.; Shen, Y.; Huang, R.; Du, F. “Wear Behavior of CuSn Coated Piston Ring Sliding against Nodular Cast Iron Cylinder Liner under Heavy-Duty Condition”, *Metals* 2019, 9(2), 139.
 - [60] Szwajka, K.; Zielinska-Szwajka, J.; Trzepieciniski, T. “Experimental Study on Drilling MDF with Tools Coated with TiAlN and ZrN”, *Materials* 2019, 12(3), 386.
 - [61] Sedlecky, M. “Surface roughness of medium-density fiberboard (MDF) and edge-glued panel (EGP) after edge milling”, *BioResources* 2017, 12, 8119-8133.
 - [62] Eduardo, T. “Friction and wear bench tests of different engine liner surface finishes”, *Tribol. Int.* 2008, 41, 1032-1038.
 - [63] Santochi, M., Vignale, M., Giusti, F. “A study on the functional properties of a honed surface”, *CIRP Ann.* 1982, 31, 431-434.
 - [64] Minsky, M. “Memoir on Inventing the Confocal Scanning Microscope” *Scanning* 1988, 10, 128-138.
 - [65] Jocsak, J.; Li, Y.; Tian, T.; Wong, V.W. “Analyzing the effects of three-dimensional cylinder liner surface texture on ring-pack performance with a focus on honing groove cross-hatch angle”, *ICEF* 2005, 1333, 621632.
 - [66] Weidner, A., Seewig, J.; Reithmeier, E. “3D roughness evaluation of cylinder liner surfaces based on structure-oriented parameters”, *Meas Sci Technol* 2006, 17(3), 477-482.
 - [67] Dimkovski, Z., Anderberg, C.; Rosen, B.G.; Ohlsson, R.; Thomas, TR. “Quantification of the cold worked material inside the deep honing grooves on cylinder liner surfaces and its effect on wear”, *Wear* 2009; 267, 2235-2242.
 - [68] Deepak, K.; Lawrence, B.R. “Multi-surface topography targeted plateau honing for the processing of cylinder liner surfaces of automotive engines”, *App Surf Sci* 2016, 365, 19-30.
 - [69] Checo, H.M., Ausas, R.F.; Jai, M.; Cadalen, J-P. “Moving textures: Simulation of a ring sliding on a textured liner”, *Tribol Int* 2014; 72, 131-142.
 - [70] Tripathi, K., Gyawali, G; Lee, S.W. “Graphene Coating via Chemical Vapor Deposition for Improving Friction and Wear of Gray Cast Iron at Interfaces”, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2017, 9 (37), 32336-32351.
 - [71] Woś, P., Michalski, J. “Effect of Initial Cylinder Liner Honing Surface Roughness on Aircraft Piston Engine Performances”, *Tribol Lett* 2011, 41, 555-567.
 - [72] Ruoxuan, Huang., Siqi, Ma., Meidi, Zhang., Jie, Yang., Dehong, Wang., Liang, Zhang., Jiujun, Xu., “Dynamic deformation and failure process of quasi-closed-cell aluminum foam manufactured by direct foaming technique”, *Material Sci Eng A* 2019, 756, 302-311.

- [73] Zhu, F., Xu, J., Han, X., Shen, Y., Jin, M., “Deposit formation on chromium-plated cylinder liner in a fully formulated oil”, Proc. Inst. Mech. Eng. Part J. Eng. Tribol. 2016, 230, 1415-1422.
- [74] Zhu, F., Xu, J., Han, X., Shen, Y., Jin, M. “Tribological performance of three surface-modified piston rings matched with chromium-plated cylinder liner”, Ind Lubr Tribol 2017, 69 (2), 276-281.
- [75] Shen, Y., Lv, Y., Li, B., Huang, R., Yu, B., Wang, W., Li, C., Xu, J., “Reciprocating electrolyte jet with prefabricated-mask machining micro-dimple arrays on cast iron cylinder liner”, J. Mater. Process. Technol. 2019, 266, 329-338.
- [76] Kıyak, M., Çakır, O., Altan, E. (2003). CVD ve PVD kaplama yöntemlerinin kesici takımlara uygulanması. II. Makina Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi (MATİT 2003)., Konya, s:115-124.
- [77] Aytaç, A., M, Uğur, “Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemlerinden PVD ve JVD/DVD İnce Film Kaplamaların Karşılaştırılması ve DVD Kaplama Teknolojisinin Endüstriyel Uygulamaları Üzerine Kavramsal, Akademik ve Teorik Bir Analiz”, Savunma Bilimleri Dergisi, Mayıs 2018, Cilt 17, Sayı 1.
- [78] PVD Technology and Coating Portfolio. 29 Temmuz 2023’de <http://www.ionbond.com/coating-services/forming-molding-tools/coating-portfolio/> adresinden erişim sağlanmıştır.
- [79] Kusano, E., Kitagawa, M., Kuroda, Y., Nanto, H., Kinbara, A. (1998), “Adhesion and hardness of compositionally gradient TiO₂/Ti/TiN, ZrO₂/Zr/ZrN and TiO₂/Ti/Zr/ZrN coatings” Thin Solid Films, 334:151-155.
- [80] Bunshatta R.F. (1980), “High rate physical vapour deposition processes” Agard Lecture Series No: 106, Material Coating Techniques, Hardford House, London, pp: 21-26.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Kaleli, H., Demirtas, S., Uysal, V., Tanriseven, Z., (2019). “Effects of NBA Nanoparticle as Lubricant Additives on Friction and Wear Behaviour in Diesel Engine at Macro and Nanoscale”, 10th International Conference on Advancements in Polymeric Materials (Innovations in Polymeric Product Development and Manufacturing), January 22-24, APM 2019.
2. Kaleli, H., Uysal, V. (2020). “Wear and Lubrication Effect of Reduced Graphene Oxide Coating by EPD method on Engine Cylinder Liner with Variable Honed Angle”. 2 nd Korea-Tribology International Symposium, K-TRIB2020 Nov.29-Dec.2, Online Symposium.
3. Kaleli, H., Uysal, V. (2021). “Experimental Investigation of the Effects of Engine Cylinder Honing as Tribological Aspect on Performance, Wear and Lubrication”, ITRS 2021 2nd Virtual International Tribology Research Symposium, 8th-10th December 2021.

Poster Sunum

1. Uysal, V., Kaleli, H., Öktem, A. S., Topaç, E., (2019). “Is the Coating of Graphene Oxide Effective to Protect Cylinder Liner Surface?” 10th International Conference on Advancements in Polymeric Materials (Innovations in Polymeric Product Development and Manufacturing), January 22-24, APM 2019.
2. Uysal, V., (2019). “Friction effect of chromium carbon nitride coating on engine cylinder liner surface”, “6th International Conference and Exhibition on Automobile & Mechanical Engineering: held during July 08-09, 2019 in Zurich, Switzerland.

Makaleler

1. Kaleli, H., Demirtaş, S., Uysal, V., Tanriseven, Z., & Zhao, J. (2019). “Application of Suspended Nanoboric Acid as an Efficient Lubrication Additive in Engine Oil”. Key Engineering Materials, 823: 53-60.
2. Kaleli, H., Demirtaş, S., Uysal, V., Karnis, I., Stylianakis, M. M., Anastasiadis, S. H., & Kim, D. E. (2021). “Tribological performance investigation of a commercial engine oil incorporating reduced graphene oxide as additive”. Nanomaterials, 11(2): 386.

Ödüller

1. Uysal, V., (2019). "Is the Coating of Graphene Oxide Effective to Protect Cylinder Liner Surface?", 10th International Conference on Advancements in Polymeric Materials (Innovations in Polymeric Product Development and Manufacturing), January 22- 24, APM 2019.