

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜÇ BOYUT TEKNOLOJİSİ KULLANARAK NANOKAPLI MOTOR
SEGMANLARININ SÜRTÜNME VE AŞINMA YÖNÜNDEN
İNCELENMESİ

Zeynep Burcu ACUNAŞ KARAGÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Enerji Programı

Danışman
Prof. Dr. E. Hakan KALELİ

Ağustos, 2019

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜÇ BOYUT TEKNOLOJİSİ KULLANARAK NANOKAPLI MOTOR
SEGMANLARININ SÜRTÜNME VE AŞINMA YÖNÜNDEN
İNCELENMESİ

Zeynep Burcu ACUNAŞ KARAGÖZ tarafından hazırlanan tez çalışması 06.08.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Enerji Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. E. Hakan KALELİ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. E. Hakan KALELİ, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Levent YÜKSEK, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Zeynep PARLAR, Üye

İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. E. Hakan KALELİ sorumluluğunda tarafımda hazırlanan Üç Boyut Teknolojisi Kullanarak Nanokaplı Motor Segmanlarının Sürtünme ve Aşınma Yönünden İncelenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Zeynep Burcu ACUNAŞ KARAGÖZ

İmza

TEŞEKKÜR

Tez hazırlama sürecimde eşsiz mesleki birikimiyle beni her daim yönlendiren, yol gösteren, desteğini hiç esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. E. Hakan KALELİ'ye, manevi desteğini her zaman hissettiğim değerli eşim Dr. Öğr. Üyesi Yasin KARAGÖZ'e, enerji dolu gülümsemesiyle beni hep motive eden ve küçücük yaşına rağmen bana tez yazarken yardımcı olmaya çabalayan güzel yürekli oğlum Berkay KARAGÖZ'e, tezimi yazabileyim diye hafta sonlarını benim için feda eden, yaşamım boyunca güçlü varlığını hep arkamda hissettiğim adı gibi bilge kadın annem Bilge KOCABAY'a, bana her koşulda güvenen ve zor zamanlarımda mucizevi sözlerle beni motive eden babam Gökhan ACUNAŞ'a, yaşından olgun yorumlarıyla ve doğru tespitleri ile beni yönlendiren ileri görüşlü kardeşim Burak ACUNAŞ'a teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Zeynep Burcu ACUNAŞ KARAGÖZ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xv
1 Giriş	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	35
1.3 Bulgular.....	38
2 Aşınma	40
2.1 Aşınma.....	40
2.2 Adhezif Aşınma	40
2.3 Abrazif Aşınma	43
2.4 Yorulma Aşınması.....	43
2.4.1 Pitting Aşınmasının Aşamaları	44
2.4.2 Tabakalı (Delaminasyon) Aşınması	45
2.5 Eroziyon Aşınma.....	45
3 Deneysel Çalışmalar	46
3.1 Testlerde Kullanılan Donanımlar ve Özellikleri.....	46
3.2 Deney Öncesi Yapılan Çalışmalar.....	47
3.3 Test Öncesi İkinci Motor Segmanının Optik Olarak İncelenmesi	51

3.4 DLC Kaplamalı İkinci Motor Segmanının Optik Olarak İncelenmesi.....	57
3.5 Test Öncesi BN200nm Kaplamalı İkinci Motor Segmanının Optik Olarak İncelenmesi.....	63
3.6 BN200nm Kaplamalı İkinci Motor Segmanının Optik Olarak İncelenmesi ..	64
3.7 BN600nm Kaplamalı İkinci Motor Segmanının Optik Olarak İncelenmesi ..	70
3.8 CNT Kaplamalı İkinci Motor Segmanının Optik Olarak İncelenmesi	72
3.9 TiO ₂ Kaplamalı İkinci Motor Segmanının Optik Olarak İncelenmesi	74
3.10 Sentezlenmiş Grafen Kaplamalı İkinci Motor Segmanının Optik Olarak İncelenmesi.....	76
4 Sonuç ve Öneriler	77
Kaynakça	80
Tezden Üretilmiş Yayınlar	90

SİMGE LİSTESİ

R_a Roughness average (Ortalama yüzey pürüzlülüğü)

KISALTMA LİSTESİ

AFM	Atomic Force Microscopy (Atomik Kuvvet Mikroskobu)
APS	Atmosferik Plazma Sprey (Atmosferik Plazma Püskürtme)
CNT	Carbon Nano Tube (Karbon Nano Tüp)
EPD	Electrophoretic Deposition (Elektroforetik Biriktirme)
GO	Grafen oksit
HVOF	High Velocity Oxy-Fuel Spraying Process (Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt Püskürtme Yöntemi)
IC	Internal Combustion (İçten Yanmalı)
PACVD	Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Motor verimliliğinin artmasında kaplamanın rolü.....	5
Şekil 1.2	DLC kaplamaların ($R_a=0.15 \mu m$) test süresinin bir fonksiyonu olarak sürtünme karakteristikleri.....	12
Şekil 1.3	(a) Tek duvarlı nano tüpler (b) Çok duvarlı nano tüpler	16
Şekil 1.4	Ni üzerine kaplanan CNT kaplamanın kayma çevrimine (0-200 çevrim) göre sürtünme katsayısı değişimi	17
Şekil 1.5	Ni üzerine kaplanan CNT kaplamanın kayma çevrimine göre (0-20.000 çevrim) sürtünme katsayısı değişimi.....	18
Şekil 1.6	Farklı yağlanma koşullarında zamanın fonksiyonu olarak CrN kaplamanın sürtünme katsayıları (a) Kuru ortamda (b) Sınır yağlama koşullarında (c) Yüksek sıcaklıkta (d) Düşük yük altında	22
Şekil 1.7	c-BN filmlerin CVD elmas uçlarla kayar temasta iken nemli havada, kuru azotta ve ultra yüksek vakumda sürtünme katsayısı değişimi	28
Şekil 1.8	5 N yük altında lineer sürtünme testinde kaplamasız ve kaplamalı numunelerin sürtünme katsayısı değişimi	32
Şekil 1.9	Farklı yağlama koşulları altında ball-on-disk testleri esnasında ölçülen sürtünme katsayısı değerleri (a) zamana karşı (b) ortalama.....	35
Şekil 1.10	Motorlarda sürtünme kayıplarının dağılımı	36
Şekil 2.1	Aşınmanın zamana bağlı değişimi.....	40
Şekil 2.2	Adhezif aşınma	41
Şekil 2.3	Adhezif aşınma sonucu bağlanmış tepeciklerin birbirinden ayrılma şekilleri	42
Şekil 2.4	Abrazif aşınma	43
Şekil 2.5	Pitting oluşum aşamaları.....	44
Şekil 2.6	Pittinge maruz kalmış bir yüzeyin optik görüntüsü.....	44
Şekil 2.7	Bir tribolojik olayın şeması.....	45
Şekil 3.1	(a) Test donanımının genel görünümü (b) Test donanımına monte edilen numuneler (c) Isınma kontrolü ve sıcaklık ölçümleri	46
Şekil 3.2	Nanosurf easyScan 2 AFM test cihazı.....	46
Şekil 3.3	Motor segmanı ve silindir numunelerinin hazırlanması (a) Honda GX-270 motorundan kesilen motor segmanı (b) silindir (c) ve (d) temas pozisyonu ve kayma yönüne göre numuneler	47
Şekil 3.4	(a) Orijinal ikinci motor segmanı Baryum (Ba) ile kaplıdır (b) İkinci motor segmanı asidik yöntem ile baryumdan arındırılmıştır.....	48
Şekil 3.5	DLC kaplamalı ikinci motor segmanının Raman spektroskopisi	49
Şekil 3.6	DLC kaplamalı ikinci motor segmanının XPS grafiği.....	50
Şekil 3.7	(a) Test öncesi kaplamasız ikinci motor segmanı (silindir) (b) Test öncesi DLC kaplamalı ikinci motor segmanı (silindir) (c) Kaplamasız ikinci motor segmanının (silindir) AFM analizi	51

Şekil 3.8	(a) Test öncesi kaplamasız ikinci motor segmanı (b) Test öncesi DLC kaplamalı ikinci motor segmanı (c) Kaplamasız ikinci motor segmanının AFM analizi.....	53
Şekil 3.9	(a) Test öncesi kaplamasız ikinci motor segmanı (b) Test öncesi DLC kaplamalı ikinci motor segmanı.....	55
Şekil 3.10	Test öncesi Honda GX270 motorunun kaplanmamış ikinci motor segmanının 3D yüzey topoğrafyası ve pürüzlülüğü.....	55
Şekil 3.11	Test öncesi Honda GX270 motorunun DLC ile kaplanmış ikinci motor segmanının 3D yüzey topoğrafyası ve pürüzlülüğü.....	56
Şekil 3.12	(a) Test öncesi kaplamasız ikinci motor segmanının optik mikroskop (b) ve (c) SEM görüntüleri.....	56
Şekil 3.13	(a), (b) Honda GX270 motorunun DLC kaplamalı ikinci motor segmanının tribometre test sonuçları (c), (d) SEM-EDX analizi (e) Honda GX-270 motorunun DLC 200nm kaplamalı ikinci motor segmanının AFM analizi	57
Şekil 3.14	Honda GX270 motorunun DLC kaplamalı ikinci motor segmanının optik mikroskop, SEM görüntüleri ve X-ray analizi	59
Şekil 3.15	Tribotest: Honda GX270 motorunun DLC kaplamalı ikinci motor segmanının altında test edilen silindirin optik mikroskop, SEM görüntüleri ve X-ray analizi	60
Şekil 3.16	Honda GX270 motorunun DLC kaplamalı ikinci motor segmanının altında test edilen silindirin 3D yüzey topoğrafyası ve pürüzlülüğü.....	61
Şekil 3.17	Tribotest: Honda GX270 motorunun DLC kaplamalı ikinci motor segmanının altında test edilen silindirin optik mikroskop, SEM görüntüleri ve X-ray analizi	62
Şekil 3.18	Tribotest: Honda GX270 motorunun DLC kaplamalı ikinci motor segmanının altında test edilen silindirin 3D yüzey topoğrafyası ve pürüzlülüğü.....	63
Şekil 3.19	(a) Test öncesi kaplamasız ikinci motor segmanı (b) Test öncesi BN200nm kaplamalı ikinci motor segmanı.....	63
Şekil 3.20	Test öncesi BN200nm kaplamalı ikinci motor segmanının 3D yüzey topoğrafyası ve pürüzlülüğü	64
Şekil 3.21	(a), (b) Honda GX270 motorunun BN200nm kaplamalı ikinci motor segmanının tribometre test sonuçları (c), (d) SEM-EDX analizi (e) Honda GX-270 motorunun BN200nm kaplamalı ikinci motor segmanının AFM analizi	65
Şekil 3.22	Tribotest: Honda GX270 motorunun BN200nm kaplamalı ikinci motor segmanının 3D yüzey topoğrafyası ve pürüzlülüğü	67
Şekil 3.23	Tribotest: Honda GX270 motorunun BN200nm kaplamalı ikinci motor segmanının optik mikroskop, SEM görüntüleri ve X-ray analizi.....	68
Şekil 3.24	Tribotest: Honda GX270 motorunun BN200nm kaplamalı ikinci motor segmanının altında test edilen silindirin optik mikroskop, SEM görüntüleri ve X-ray analizi	69

Şekil 3.25 (a), (b) Honda GX270 motorunun BN600nm kaplamalı ikinci motor segmanının tribometre test sonuçları (c), (d) SEM-EDX analizi (e) Honda GX270 motorunun BN600nm kaplamalı ikinci motor segmanının AFM analizi	70
Şekil 3.26 (a), (b) Honda GX270 motorunun CNT (karbon nanotüp) kaplamalı ikinci motor segmanının tribometre test sonuçları (c), (d) SEM-EDX analizi (e) Honda GX270 motorunun CNT (karbon nanotüp) kaplamalı ikinci motor segmanının AFM analizi	72
Şekil 3.27 (a), (b) Honda GX270 motorunun TiO ₂ kaplamalı ikinci motor segmanının tribometre test sonuçları (c), (d) SEM-EDX analizi (e) Honda GX270 motorunun TiO ₂ kaplamalı ikinci motor segmanının AFM analizi.....	74
Şekil 3.28 (a), (b) Honda GX270 motorunun sentezlenmiş grafen kaplamalı ikinci motor segmanının tribometre test sonuçları (c), (d) SEM-EDX analizi (e) Sentezlenmiş grafen kaplamalı ikinci motor segmanının AFM analizi.....	76
Şekil 4.1 Deneylerde kullanılan tüm nano kaplamalı motor segmanlarının zamana bağlı sürtünme katsayılarının mukayesesi.....	77

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Makrotriboloji ile mikro/nanotribolojinin mukayesesi	2
Tablo 1.2 Sürtünme testlerinde kullanılan gri dökme demir numune tipleri.....	31
Tablo 3.1 Tribometre cihazı deneysel parametreler	47
Tablo 3.2 Honda GX270 motorunun kaplamasız ikinci motor segmanının (silindir) alan pürüzlülük değerleri	52
Tablo 3.3 Honda GX270 motorunun kaplamasız ikinci motor segmanının (silindir) çizgi boyunca pürüzlülük değerleri	52
Tablo 3.4 Honda GX270 motorunun kaplamasız ikinci motor segmanının (segman) alan pürüzlülük değerleri	54
Tablo 3.5 Honda GX270 motorunun kaplamasız ikinci motor segmanının (segman) çizgi boyunca pürüzlülük değerleri	54
Tablo 3.6 Honda GX270 motorunun DLC 200nm kaplamalı ikinci motor segmanının alan pürüzlülük değerleri	58
Tablo 3.7 Honda GX270 motorunun DLC 200nm kaplamalı ikinci motor segmanının çizgi boyunca pürüzlülük değerleri	58
Tablo 3.8 Honda GX270 motorunun BN200nm kaplamalı ikinci motor segmanının alan pürüzlülük değerleri	66
Tablo 3.9 Honda GX270 motorunun BN200nm kaplamalı ikinci motor segmanının hat boyunca pürüzlülük değerleri	66
Tablo 3.10 Honda GX270 motorunun BN600nm kaplamalı ikinci motor segmanının alan pürüzlülük değerleri	71
Tablo 3.11 Honda GX270 motorunun BN600nm kaplamalı ikinci motor segmanının çizgi boyunca pürüzlülük değerleri	71
Tablo 3.12 Honda GX270 motorunun CNT kaplamalı ikinci motor segmanının alan pürüzlülük değerleri	73
Tablo 3.13 Honda GX270 motorunun CNT kaplamalı ikinci motor segmanının çizgi boyunca pürüzlülük değerleri	73
Tablo 3.14 Honda GX270 motorunun TiO ₂ kaplamalı ikinci motor segmanının alan pürüzlülük değerleri	75
Tablo 3.15 Honda GX270 motorunun TiO ₂ kaplamalı ikinci motor segmanının çizgi boyunca pürüzlülük değerleri	75

Üç Boyut Teknolojisi Kullanarak Nanokaplı Motor Segmanlarının Sürtünme ve Aşınma Yönünden İncelenmesi

Zeynep Burcu ACUNAŞ KARAGÖZ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. E. Hakan KALELİ

İçten yanmalı motorlarda toplam sürtünme kaybının yaklaşık %50 ila %65'inin tek başına piston/segman sisteminden kaynaklandığı bilinmektedir. En uygun nano kaplamanın tespit edilerek içten yanmalı motorlarda kullanılmasıyla, sürtünme kayıplarında meydana gelen iyileşme ile regülasyon emisyonları (CO, CO₂, HC, NO_x ve is) ile yakıt tüketiminde önemli ölçüde iyileşme sağlanacağı öngörülmektedir.

İçten yanmalı motorlarda termik verimin iyileşmesi de oldukça önemlidir. Tribolojinin bu alanındaki en büyük zorluk, altında yatan mekanizma anlaşılacak sürtünme ve aşınmayı iyileştirici teknikler geliştirmektir. Uygulanan yük altında temas halinde iken birbirine göre bağlı hareket eden iki katı vücutun deneysel olarak incelenmesinde, yüzeyler arasındaki aşınmanın abrazyon, adhezyon, korozyon ve yüzey yorulması gibi çeşitli mekanizmalardan kaynaklandığı tespit edilmiştir. Özellikle segmanlarda görülen aşınma türleri abrazyon, adhezyon, kazıma ve korozyon aşınması olarak sıralanabilir.

Bu tezin amacı, Honda GX270 motoruna ait (nano kaplamalı ve kaplamasız) segmanlar ile yapılan testlerde meydana gelen aşınma mekanizmalarının tespit edilmesi ve nano kaplamalı ve kaplamasız segmanların sürtünme katsayılarının mukayese edilmesidir. Bu tez çalışmasında nano kaplama olarak DLC, grafen, BN, TiO₂, CNT seçilmiştir.

Nano kaplamalı motor segmanlarının optik mikroskop, S.E.M., EDX ve A.F.M. analizleri literatür araştırma sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma neticesinde meydana gelen aşınma türleri belirlenip, nano kaplamalı segmanın aşınmayı önlemedeki rolü irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Nano kaplama, 3D teknolojisi, nano kaplı motor segmanları, sürtünme, aşınma

Experimental Investigation of Piston Rings in terms of Wear and Coefficient of Friction by Using 3D Technology

Zeynep Burcu ACUNAŞ KARAGÖZ

Department of Mechanical Engineering

Master of Science Thesis

Advisor: Prof. Dr. E. Hakan KALELİ

It is known that about 50% to 65% of the total friction loss in internal combustion engines is due to the piston / piston ring system alone. By using the most suitable nano coating in internal combustion engines, improvement in friction losses is expected to provide significant improvement in fuel consumption through regulation emissions (CO, CO₂, HC, NO_x and heat).

Improvement of thermal efficiency is also very important in internal combustion engines. The biggest challenge in this area of tribology is to develop techniques to improve friction and wear, by understanding the underlying mechanism. In the experimental examination of two rigid bodies in contact, which move relative to each other under applied load; wear between surfaces have been found to be caused by different mechanisms like abrasion, adhesion, corrosion and surface fatigue. Wear observed especially in piston rings can be listed as abrasion, adhesion, scuffing and corrosion wear.

The aim of this thesis is to determine the wear mechanisms of the Honda GX270 (nano coated and uncoated) piston rings during tests and to compare the friction

coefficients of the nano coated and uncoated piston rings. In this thesis, DLC, graphene, BN, TiO₂, CNT were chosen as nano coating.

The optical microscope, S.E.M., EDX and A.F.M. analysis of the nano-coated piston rings are compared with literature results. As a result of this comparison, the types of occurring wear and the role of the nano-coated piston ring in preventing wear are examined.

Keywords: Nano coating, 3D technology, nano coated piston rings, friction, wear

1.1 Literatür Özeti

Triboloji; sürtünme, aşınma ve yağlama ile bunlara bağlı fiziksel olayları inceleyen bir bilim dalıdır.

Triboloji alanındaki çalışmaların amacı, yüzeylerin sürtünmesiyle oluşan sürtünme ve aşınmadan kaynaklanan kayıpları en aza indirmek ve mümkünse yok etmektir. Triboloji, kayan ve yuvarlanan yüzeyler kullanan modern makineler açısından çok önemli bir yere sahiptir. Verimli sürtünme örneği olarak; frenler, debriyajlar, tren ve otomobillerdeki tahrik tekerlekleri, somun ve vidalar verilebilir. Verimli aşınma örneği olarak ise, kalemle yazı yazmak, makinede yüzey işleme, parlatma ve tıraşlama verilebilir. Verimli olmayan sürtünme ve aşınmaya verilebilecek en iyi örnekler; içten yanmalı motorlar, uçak motorları, dişliler, eksantrikler, yataklar ve sızdırmazlık elemanlarıdır. Sürtünmenin azaltılması ile aşınma kontrolü ekonomik nedenler ve uzun süreli dayanıklılığın sağlanabilmesi için önem arz etmektedir. Son çalışmalara göre, daha iyi tribolojik uygulamalar ile beklenen tasarruf araştırma maliyetlerinin 50 katı civarında olacaktır. Tasarruflar kayda değerdir ve bu tasarruflar büyük sermaye yatırımları yapılmadan elde edilebilir. Triboloji alanındaki çalışmalar daha fazla tesis verimliliği, daha iyi performans, daha az arıza ve önemli tasarruflar sağlar [1].

Atomik ve moleküler ölçekten mikro ölçeğe kadar kayan yüzeylerin adhezyon, sürtünme, aşınma, ince film yağlaması gibi proseslerinin deneysel ve teorik olarak incelenmesi tribolojinin ilgi alanıdır. Triboloji alanındaki ilerlemeler mikro triboloji, nano triboloji gibi yeni alanların gelişmesine yol açmıştır. Makro triboloji ile mikro/nano triboloji arasındaki farklılıklar Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1.1 Makrotriboloji ile mikro/nano tribolojinin mukayesesi

Makro triboloji	Mikro / Nano triboloji
Geniş Kütle Ağır Yük Aşınma Kaba malzeme	Küçük Kütle Hafif Yük Aşınma Yok Yüzey (Atomik Katman)

Makro tribolojide testler ağır yük koşullarında geniş kütleli parçalarla yapılmaktadır. Bu testlerde aşınma kaçınılmazdır ve kaba malzeme özellikleri tribolojik performansa etki eder. Mikro / nano tribolojide, hafif yük koşullarında küçük kütleli parçalarla yapılmaktadır. Bu durumda, göz ardı edilebilir derecede az bir aşınma meydana gelir ve yüzey özellikleri tribolojik performansa etki eder. Mikro ve nano yapılarda kullanılan parçalar oldukça hafiftir (mikrogram seviyesinde) ve oldukça düşük yükler altında (mikrogram ile miligram arasında) çalıştırılırlar. Sonuç olarak, hafif yük altındaki mikro / nano parçaların aşınma ve sürtünmesi (nano boyutta) yüzey etkileşimlerine oldukça bağlıdır. Bu yapılar genellikle moleküler olarak ince filmlerle yağlanır. Mikro ve nano yapıların aşınma ve sürtünme proseslerini incelemenin en ideal yöntemi mikro ve nano triboloji tekniklerini kullanmaktır. Her ne kadar nano tribolojik çalışmalar mikro ve nano yapıları incelemek için kritik öneme sahip olsa da, bu çalışmalar bilim ve mühendislik arasında bir köprü oluşturması açısından makro yapılardaki ara yüzeylerin temel olarak anlaşılmasında da büyük önem taşımaktadır [2].

Nano tribolojik çalışmalarda metalurjik mikroskop (yüzey morfolojisini incelemek için), 3D dijital lazer mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM) enerji yayımlı X-ışını analizi (EDX) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) kullanılmaktadır.

Enerji yayımlı X-ışını spektroskopisi ile taramalı elektron mikroskobu (SEM/EDX), yüzey analiz yöntemleri arasında en yaygın ve en çok bilinen yöntem olarak yer almaktadır. Enerji yayımlı X-ışını analizi malzemelerin temel bileşimini tanımlamak için kullanılan bir X-ışını tekniğidir. Yüzey topoğrafyasının yüksek çözünürlüklü görüntüleri, yüksek odaklı, taramalı bir elektron ışını kullanılarak

üretir. EDX analizi ile üretilen veriler, analiz edilen numunenin gerçek kompozisyonunu oluşturan elementlere karşılık gelen pikleri gösteren spektrumlardan oluşmaktadır. Bir numunenin elementsel haritalama ve görüntü analizini de bu yöntemle elde etmek mümkündür. EDX tekniği analiz edilen hacmin temel bileşimini karakterize etmek için bir elektron ışını tarafından bombardıman esnasında numuneden yayılan X-ışınlarını tespit eder.

Lazer mikroskoplar yüksek çözünürlüklü optik görüntüler ve ayrıca yüzey şekil karakterizasyonunu hızlı ve doğru bir şekilde üretmek için tasarlanmıştır. Lazer mikroskoplar hem tam odaklı görüntüler, hem de üç boyutlu şekil analizi elde etmek için büyütülmüş gözlem cihazlarının ve ölçüm cihazlarının avantajlarını birleştirir. Bu cihazlarda boyut, şekil ve malzeme sınırlaması yoktur. Gözlemler oda sıcaklığında vakum gerektirmeden yapılabilir ve işlemler optik mikroskoplara benzer şekilde yapılmakta olup oldukça kolaydır. Numunelerin ön işleme tabi tutulmasına gerek yoktur ve renk gözlemi yapmak mümkündür. Tüm bu faktörler numunelerin hızlı ve doğru analizini sağlar. Bu mikroskoplar yüzey katmanını gözlemlemek ve film kalınlığını ölçmek için de kullanılır. Bu tez çalışmasında Keyence 3D lazer konfokal mikroskop kullanılmıştır. Bu mikroskopun tercih edilmesinin sebebi; kavisli bir yüzey olan motor segmanının incelenmesi esnasında tepeciklerinin flu ve net olmayan görüntülerinin lazer mikroskop sayesinde net hale getirilebiliyor olması, lazer ışını ile elde edilen görüntülerin üç boyuta çevrilebiliyor olması ve iki boyutta yüzey pürüzlülüğü ve görüntülerinin elde edilebiliyor olmasıdır.

AFM cantilever, piezoelektrik seramikler, elektronik devre geri beslemesi ve bilgisayardan oluşur. AFM'nin kalbi niteliğinde olan genellikle silikon ya da silikon nitrürden yapılan cantilever sistemi atomik boyutlara kadar sivriltilmiş bir uca sahiptir. Cantilever sistemindeki eğilme-bükülme, manivelanın bir ucundan dedektöre (bir dizi fotodiyot) yansıtılan bir lazer ışını sayesinde ölçülür. AFM, karakteristikleri üç boyutta analiz edebilen ve 1 Å'dan küçük yükseklik değişimlerini rahatlıkla algılayarak görüntülere çeviren bir cihazdır. Bu mikroskop sayesinde ulaşılmış çözünürlük birkaç nanometre ölçeğinde olup optik tekniklerden en az 1.000 kat daha fazladır. AFM incelemesi, yüzeyin fiziksel özellikleri ve

topografisini yüksek çözünürlükte ve üç boyutlu görüntülenmesini sağlar. AFM cihazıyla yapılan çalışmalarda ön hazırlığa gerek duyulmadan, doğrudan yüzey görüntüleri elde edilebilir. AFM üç boyutlu bir yüzey görüntüsü üzerinde incelemeye olanak sağlamakla birlikte, yüzey pürüzlülüğü parametrelerini rakamsal olarak da verebilir. AFM ayrıca adhezyon, aşınma, yağlama ve elastik / plastik mekanik özelliklerin (çentikleme - indentasyon sertliği ve elastiklik modülü gibi) ölçülmesinde de kullanılmaktadır.

Kaplama, özellikle nanokaplama, araba motorunun performansını ve ömrünü artırmaya yardımcı olabilir. Şekil 1.1'de görüldüğü üzere kaplamaların bazı özellikleri sayesinde daha yüksek verim elde edilebilir. Kaplamalardan beklenen özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

İyi Yağlama için Kaplama

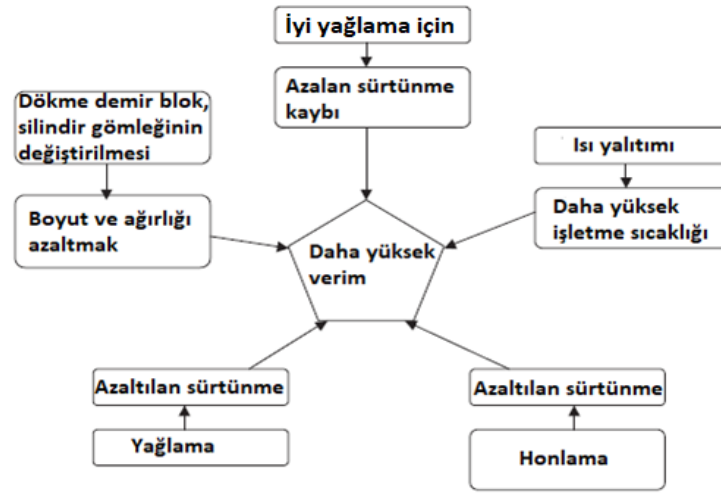
Yüksek sürtünme katsayısı motor ömrünü etkileyen yüksek aşınma oranına sebebiyet verir. Bunun yanı sıra, mekanik sürtünme içten yanmalı motorun yakıt ekonomisi üzerinde kayda değer bir etkiye sahiptir [3]. İçten yanmalı bir motorda başlıca sürtünme kaynakları supap mekanizması, pistonlar, krank ve rulmanlardır. Toplam sürtünme kaybının yaklaşık %50-65'i sadece piston sisteminden kaynaklanmaktadır. Supap mekanizması sürtünme kaybının %10 ila %20'sine, krank ve rulmanlar ise kalan kısma sebep olmaktadır [3,4]. Motorun verimini ve ömrünü artırmak, yağ tüketimini azaltmak için sürtünme kayıplarının en aza indirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla Ni-Mo-MoS₂, Ni-BN, grafit-Ni vb. çeşitli kaplamalar göz önünde bulundurulmaktadır [5].

Korozyon Direnci

Motor bileşenleri korozyona yol açacak ağır çevre şartlarına maruz kalmaktadır. Yakıt ve yanma ürünleri oksitleyici atmosferle karışır ve aşındırıcı ortama termal şok eklenir. Dizel motor ve içten yanmalı motor bile soğuk hava gibi bazı koşullar altında yanma ürünü olarak sülfirik ve formik asit üretir. Özellikle, Mo/Cr bazlı kaplamalar yüksek sıcaklıkta korozyonla mücadele etmek için en uygun kaplamalardandır [5].

Tribolojik Özellikler

Aşınma direncini ve kazıma dayanımını artırmak için kaplama uygulanır. Kaplama içinde bulunan ince taneli tribolojik olarak fonksiyonel Al_2O_3 , SiC ve Fe-oksit gibi seramikler sertlik, basınç dayanımı, aşınma direnci ve kazıma direnci gibi yüzeyle ilişkili özellikleri geliştirebilir [4,6,7]. Kazıma, yağlama filmi bozulduğunda iki metal arasındaki temas nedeniyle yüzey elemanlarının kütle hareketi olarak tanımlanan ana tribolojik problemlerden biridir [8]. Kaplamalar ayrıca, motorun dayanıklılık gereksinimlerini karşılamak için iyi mekanik ve termal şok direncine, iyi yapışma ve gerilme uyumuna sahip olmalıdır.



Şekil 1.1 Motor verimliliğinin artmasında kaplamanın rolü [5]

Isı Transferi

Kaplama, alüminyum veya süper alaşım vasıtasıyla ısı transferi iletiminden yanma odasını izole edecek şekilde düşük ısı iletkenliğine sahip olmalıdır. Isı transferini azaltmayı amaçlayan termal bariyer kaplama geliştirilmiştir. İçten yanmalı [9], dizel [10] ve roket motorunun [11] bilgisayar simülasyonları ve dizel motorun deneysel verileri [12] göstermiştir ki motor silindir cidarı yalıtkan bir oksit ile dışarıdan 2 mm'lik ince bir tabaka ile kaplandığında, ısı kaybı %6 oranında düşmektedir. Eğer kaplama silindirin iç çap yüzeyine uygulanırsa, kondüksiyon yöntemi ile ısı transferi için termik gradyen daha düşüktür ve ısı kaybı daha da azalır.

Alt Katman ve Kaplama Kalınlığı ile Uyum

Alt tabakaya uyumun sağlanması motorlarda karşılaşılan termal şoka karşı direnç gösterebilecek bir kaplama için bir zorunluluktur. Atmosferik plazma püskürtme (APS) yöntemi, yüksek hızlı oxi-yakıt püskürtme yöntemi (HVOF) ve manyeton püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamalardaki bağ dayanımı, kaplamadan ve artık gerilmeden evvel (kaplama kalınlığının fonksiyonudur) yüzey pürüzlülüğünün (Ra ve Rz) güçlü bir fonksiyonudur [13-15]. Maksimum kaplama kalınlığı, ısı genleşme katsayısına ve kaplamanın mekanik özelliklerine bağlıdır. Isı genleşmesi, taban malzemede çok değişkenlik gösterirse veya elastiklik ya da süneklik çok düşükse, çok kalın bir kaplama iç gerilme nedeniyle doğru yapışmayabilir. Öte yandan, honlama sonrası taban malzemede olası döküm boşluklarını tam olarak doldurabilmesi için kaplama kalınlığının 100-180 µm olması gerekmektedir [6]. Çoğu silindirin iç yarıçapının 70-110 mm olduğu ve bu boyutlarda kaplama yapabilmek için özel aletlere gereksinim duyulacağı da dikkate alınmalıdır.

Termal bariyer kaplamasında, nikel bazlı süper alaşımın üzerine oksit kaplamanın tutunabilirliğini artırmak için bağlayıcı tabaka uygulanır. Oksit, üzerinde başka bir oksit tabakasının (zirkonya veya titanya-alümina) plazma ile kaplandığı bağlayıcı tabaka ile uyum içindedir. Oksit tabakaları aynı zamanda kondüksiyonla ısı kaybını minimuma indiren bir yalıtıcı işlevi görürler.

Yüksek Kalite İhtiyacını Karşılamak

Silindir, motor segmanı ve yağlayıcı yanmalı motorda bir tribolojik sistem olarak etkileşim içindedirler. Silindir deliklerinin kaplanması için endüstriyel bir çözüm bulmanın temel zorluğu, yalnızca uygun bir malzeme ve işlem geliştirmek değil, aynı zamanda bu işlemi uygun maliyetli, yüksek hacimli ve tam otomatik bir üretim kaplama sistemine entegre etmektir. Bu kaplama makinesi motor üreticisinin katı kalite gereksinimlerini karşılayabilecek kapasitede olmalıdır. Kaplama sistemi sadece kaplama işlemini kontrol etmez, aynı zamanda yüzey hazırlığı, temizleme, soğutma ve sistem içerisinde motor bloklarının taşınması işlemlerini de kontrol eder. Ayrıca, piston sisteminin kaplamalarının aşınmayı önlemek için bir bütün olarak değerlendirilmesi gerekir. Örneğin, oldukça sert bir piston silindir gömleğinde aşınmaya neden olabilir.

Farklı malzemeler ve alaşımları üzerine yapılan kaplamalarda; termo kimyasal kaplama, termal sprej ile kaplama, sol-jel yöntemi, kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve fiziksel buhar biriktirme (PVD) gibi yöntemler kullanılmaktadır. Sol-jel küçük moleküllerden katı madde üretimi için kullanılan bir yöntemdir. Katı malzemenin sıvı süspansiyonu içindeki haline sol denir. Bu yöntem, metal oksitlerin, özellikle de titanyum oksitlerin üretiminde kullanılır. Moleküller arası bağ yerçekimi kuvvetinden büyük olduğu için solü meydana getiren malzeme dibe çökmez. Bu moleküller süspansiyon içerisinde genişleyerek belli bir boyuta ulaşırsa jel adını alır. [17,18]. Sol-jel işlemi, sıvı fazdan katı faza geçiş sistemini içerir [20]. Sol-jel işleminin kollodial yöntem ve polimerik yöntem olmak üzere iki varyasyonu bulunur. İkisi arasındaki fark kullanılan başlangıç malzemesinin farklı olmasından kaynaklanır.

Jel katı ve sıvı faz arasındadır, her çözelti jele dönüşemez ve jel olabilmesi için parçacık ile çözücü arasında güçlü bir etkileşimin olması gerekir. Jel sıvı tabakası, katı gibi görünmesine rağmen ıslak bir çözeltidir. Jel ısıtılarak su ve organik çözücüler gibi maddelerden uzaklaştırılır. Jelin kurutulması esnasında çözücü fazlalığının (alkol ve su) giderilmesiyle birlikte jel büzülür ve bu aşamada jel miktarında bir azalma meydana gelir [21,22].

Sol-jel yönteminin oldukça pahalı ve zahmetli olmasına karşın nano parçacık üretiminde tercih edilmesinin sebebi; minerallerden ve kimyasallardan, arzu edilen boyutta ve şekilde malzemelerin kontrollü bir şekilde, homojen olarak, geliştirilmiş süreç adımlarıyla üretilmesidir. Sistemin en büyük dezavantajı, elde edilen ürün miktarının giren ürüne göre çok küçük olması yani verimin çok az olmasıdır. Kirliliğe sebep olmaması, homojen filmlerin düşük ısılarda hazırlanabilmesi ve enerji tasarrufu sağlanabilmesi sol-jel yönteminin avantajları arasındadır [19].

Termal sprej kaplama, toz veya tel halindeki kaplama malzemesinin elektrik arkı, alev veya plazma ile ergitilerek, bir püskürtme gazı yardımıyla ergimiş partikülleri altlık malzemeye yapışmasını sağlayan yöntemlerin genel adıdır. Termal sprej başlığı altında plazma sprej, yüksek hızlı oksijen-yakıt sprej (HVOF), alev sprej, ark sprej ve detonasyon tabancası yöntemleri sayılabilir. Termal sprej kaplama yönteminin temel amacı, metal ve alaşımların yüzeyinde aşınmaya dirençli bir kaplama tabakası oluşturmaktır [23]. Bu

işlem parçanın yüzey özelliklerini veya boyutlarını geliştirmek veya onarmak için kullanılır. Termal sprej prosesleri her tür malzemenin kaplama malzemesi olarak kullanılabileceği (Metalik, metalik olmayan veya seramik kaplamalar) esnek bir kaplama üretim teknolojisidir [24]. Kaplama performansını etkileyen önemli parametrelerden biri de kaplama malzemesine verilen kinetik enerjidir. Plazma sprej yönteminde yüksek sıcaklıklar elde edilmektedir. Detonasyon tabancası ve HVOF gibi yöntemlerde kaplama malzemesi süpersonik hızlara sahip olmaktadır. Yüksek sıcaklıklara ulaşılması sayesinde ergime sıcaklığı yüksek olan seramik ve benzeri malzemelerin kaplanması bu yöntemlerle mümkündür [25]. Termal sprej yöntemi; metal yüzeylerin aşınmaya, sürtünmeye ve korozyona karşı direncini artırmak amacıyla kullanılmaktadır.

Makina parçalarının ömürleri ve takımların kullanım süreleri aşınma nedeniyle sınırlıdır. Günümüzde aynı parçanın gittikçe artan sayıda üretilme taleplerine karşılık, aşınma nedeniyle üretim tezgahlarının durma süreleri maliyet faktörünü devamlı arttırmaktadır. Bu nedenle aşınmanın geciktirilebilmesi ekonomik anlamda her geçen gün daha fazla önem kazanmaktadır. Kullanılan takım ve kalıp parçalarını daha pahalı olan yenileriyle değiştirmek yerine, parça yüzeyinin sürtünme ve aşınma özelliklerini geliştirmek soruna ekonomik ve daha pratik bir yaklaşım getirmektedir. Bu alanda ince film sert seramik kaplamalar büyük başarı sağlamaktadır. Sert seramik kaplamaların kalıp ve takım yüzeylerine başarıyla uygulanabildiği yöntemlerin başında fiziksel buhar biriktirme (PVD) kaplama tekniği gelmektedir. Bu teknik vakum altında bulunan malzemelerin buharlaştırılarak veya sıçratılarak, kaplama yapılacak yüzeye iyonik olarak biriktirilmesi prensibine dayanmaktadır [26]. PVD kaplamanın avantajları; yüksek sertlik, yüksek aşınma direnci, düşük sürtünme katsayısı, düşük ısıl iletkenlik, her bölgede homojen kaplama kalınlığı elde edilebilmesi olarak sıralanabilir.

Kimyasal buhar biriktirme (CVD) yönteminde, vakum ortamında kaplama malzemesi buharlaştırılarak kaplama yapılacak yüzey üzerine biriktirilir. Yöntem, buhar fazından belirli bir basınç altında kimyasal olarak katı kaplama malzemesi elde etme esasına dayanmaktadır. Kimyasal buhar biriktirme ile metalik, seramik ve elementer kaplamalar elde etmek mümkündür. Kesici, delici ve aşındırıcı yüzey elde edilmesinde, yüksek sıcaklığa dirençli seramik esaslı kaplamaların elde edilmesinde bu yöntem oldukça tercih edilmektedir. Yüksek ergime noktasına sahip tantal,

karbon, tungsten gibi elementler ise sadece bu yöntem kullanılarak ile kaplanabilmektedir. CVD yönteminde malzemeler üniform bir biçimde kaplanabilmekte ve ince kaplama tabakaları elde edilmektedir [26].

Genel olarak motor segmanları aşınma direnci için kromla kaplanmıştır. NiCr/Cr₃C₂ ve NiCrMo/Cr₃C₂ yüksek beygirli dizel motorları için önerilmektedir [16, 10, 12].

Nano kaplamalar yüksek sıcaklıkta yapılmaktadır. Kaplama başarılı olabilmekte; ancak segman malzeme yapısını ve formunu değiştirmekte, pistonu yerleştirme zorluğu ve motor çalışmasında güç düşüklülüğü meydana gelmektedir.

Motorlarda kullanılan diğer nano kaplamalara örnek olarak CrN, TiN, DLC, grafen, CNT, BN ve TiO₂ verilebilir.

Karbon gibi elmas yüksek sertliği, aşınma direnci ve çoğu mühendislik malzemesi üzerinde kayarken çok düşük sürtünmeye sahip olması nedeniyle tribolojik uygulamalarda çok tercih edilen bir malzemedir [27]. DLC'nin motor segmanları için koruyucu kaplama olarak uygulanması, sürtünme kaybının (dolayısıyla yakıt tüketiminin) azaltılmasında, motorun güvenilirliği ve motor ömrünün artmasında önemli bir yarar sağlar [28]. Ancak, koruyucu kaplamaların daha uzun bir çalışma ömrü sağlaması için belirli bir kalınlığa sahip olması gerekir. Ne yazık ki, DLC'nin en büyük eksikliklerinden biri çok yüksek iç gerilime sahip olması nedeniyle kalınlığının sınırlanmasıdır.

Bir aracın verimini ve ömrünü artırmanın yollarından biri motor bileşenlerinin sürtünme ve aşınmasını azaltmaktır. Çok düşük sürtünme ve düşük aşınma oranları elde etmek için son zamanlarda motor parçalarında yüzey kaplama teknolojileri kullanılmaya başlanmıştır. Günümüz motorlarında ince, aşınmaya karşı dirençli, düşük sürtünmeye sahip DLC kaplama kullanmak oldukça yaygın bir uygulama haline gelmiştir [29].

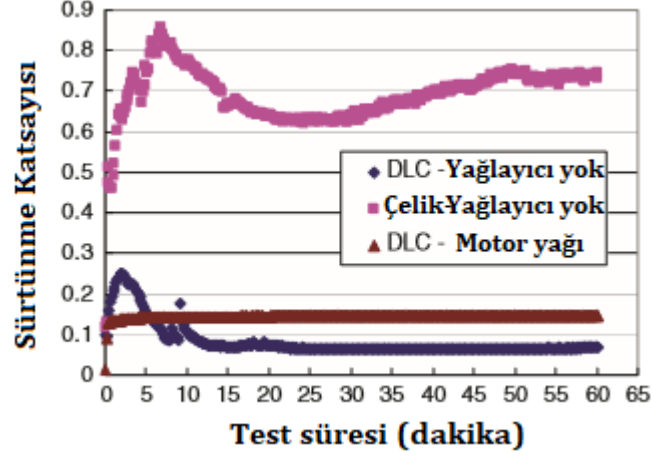
DLC, sp³ bağlarının önemli bir kısmını içeren amorf bir karbon şeklidir [30]. DLC'nin yaygınlaşması sadece yağlayıcı tasarımı ile elde edilemeyen motor ve şanzıman bileşenlerinin performansının iyileştirilmesinde geniş olanaklar sunar [29].

İnce DLC kaplamanın sürtünme ve aşınma özellikleri son yıllarda özellikle laboratuvar ortamında yoğun bir şekilde incelenmektedir. Bu kaplama yağlayıcının

yokluğunda sürtünmeyi önemli ölçüde azaltmaktadır. Yağlayıcının bulunduğu durumlarda bu kaplamanın sürtünme konusunda sağladığı faydalar henüz detaylı bir şekilde çalışılmamıştır. Mevcut araştırma daha ziyade laboratuvar ortamında DLC kaplamanın sürtünmeyi azaltma potansiyelini ortaya çıkarma hususuna odaklanmış olup testler motorlu supap mekanizmasında yürütülmüştür. Test öncesinde supap DLC ile kaplanmıştır. Laboratuvar test sonuçları yağlayıcının bulunmadığı ortamda sürtünmenin ciddi anlamda azaldığını; ancak motor yağının bulunduğu ortamda bu durumun gerçekleşmediğini ortaya koymuştur. Motorlu supap mekanizma testlerinde sert kaplamasız supaplarla mukayese edildiğinde sürtünme torkunda kayda değer bir düşüş gözlenmiştir. Ancak, iyi bir yüzey kalitesine sahip kaplamasız supaplarla karşılaştırıldığında sürtünmede herhangi bir düşüş görülmemiştir. Sınır yağlama koşullarında, DLC kaplanmış yüzeyde yağlayıcı türevli yüzey film tabakası bulunmamıştır. Fakat karışık yağlama koşullarında DLC ile kaplanmış supapların üzerinde düzensiz aşınma engelleyici yüzey filmleri gözlenmiştir. Aşınma engelleyici filmin başlıca kalsiyum fosfattan oluştuğu görülmektedir [31].

DLC kaplamaların oldukça düşük sürtünme katsayısı ile birlikte yüksek sertlik ve aşınma direnci bu kaplamaları kayma hareketine dâhil olan mühendislik bileşenleri için uygun bir malzeme yapmaktadır. DLC kaplamaların sürtünme azaltıcı özelliği 1970'li yılların başında [32] DLC'nin çelik ile kuru kayar temasta iken çok düşük sürtünme katsayılarının rapor edilmesi ile ortaya çıkmıştır. 1980'lerin sonuna doğru, birçok araştırma kaynağı kesici takımlar ve diğer mühendislik uygulamalarında sürtünmeyi azaltmak için ince elmas kaplamaların geliştirilmesine ayrılmıştır. Ancak, çelik yüzeylerin elmas ile kaplanması için çok yüksek sıcaklıklara gereksinim duyulduğundan dolayı kaplama başarılı olmamaktadır. Ayrıca, her iki kayma yüzeyi de elmas ile kaplandığı zaman, düşük sürtünme sadece kuru kayma yüzeyinde elde edilmiştir [33-37]. Sadece bir yüzey kaplandığında sürtünme katsayısı yüksektir, bununla birlikte kaplanmamış yüzeyde yüksek aşınmaya neden olur; çünkü yüzeyi kaplayan filmlerin yüzey pürüzlülüğü yüksektir [37]. Bu durum DLC kaplamalar üzerinde daha fazla araştırma yapılmasına neden olmuştur; çünkü kaplamalar amorfudur ve DLC kaplamalar elmas kaplamalara göre çok daha pürüzsüzdür. Temel olarak, DLC kaplı malzemelerin pürüzlülüğü bir alt katmanın

pürüzlülüğüne benzemektedir. Bununla birlikte, ilk kaplamalar nem bozulmasına karşı duyarlıdır [38,39] ve kaplama kalınlıklarını birkaç mikrometreden az olacak şekilde sınırlayan yüksek sıkıştırma gerilimine sahiptir. Nitrojen [40] ile tungsten, silikon, tantal, vb. metallerin dâhil [41] edilmesi ile sıkıştırma gerilimi azalmıştır. Kaplamanın içerisine silikon dâhil edilmesi de kaplamanın neme karşı duyarlılığını azaltmıştır [42]. 0.05 – 0.010 kadar düşük sürtünme katsayıları herhangi bir yağlayıcının bulunmadığı durumlarda çelikle temas eden yüzeylerde rutin olarak gözlemlenmektedir, kaplamasız çeliğin çelik üzerinde hareket ettiği durumlarda ise sürtünme katsayısı 0.5-0.7 aralığındadır. Bazı test ortamlarında 0.01 ve daha düşük kayma sürtünme katsayıları elde edilmiştir [43]. DLC kaplamaların düşük sürtünme katsayısına sahip olmasının nedeni karşı yüzey üzerinde bir transfer katmanı oluşturmalarıdır. Kaymanın başında çelik ile DLC kaplama arasında kuvvetli bir etkileşim olduğundan yüksek bir sürtünme katsayısı oluşur. Ancak, kayma devam ettikçe, DLC kaplamanın kohezyon kuvvetleri azalmaya başlar ve DLC aşınma partiküllerinin karşı yüzeye geçmesine öncülük eder [44]. Raman spektroskopisi kullanarak aşınma yüzeyleri üzerine yapılan araştırmada, Oguri ve Arai [45] nemin olmadığı bir ortamda DLC kaplamanın kayma hareketinde grafit benzeri bir hale dönüştüğünü ve böylece sürtünmenin düştüğünü ileri sürmüşlerdir. Nemin olduğu ortamda, silikon içeren DLC kaplamaların düşük sürtünme katsayısı silika-sol oluşumuna bağlanmıştır. Erdemir ve diğerleri [46] DLC kaplamaların düşük sürtünme katsayısını temas alanlarında grafit benzeri bir malzeme oluşumuna dayandırmıştır. Sınır yağlama şartlarında, pin-on disk testleri esnasında, DLC kaplamalarında sürtünmede herhangi bir azalma görülmemiştir. Bu sonuç, karşı yüzey malzemesi üzerinde herhangi bir film oluşmamasına bağlanmıştır [47].



Şekil 1.2 DLC kaplamaların ($R_a=0.15 \mu\text{m}$) test süresinin bir fonksiyonu olarak sürtünme karakteristikleri [31]

Yağlayıcı olmayan ortamda DLC kaplamanın sürtünme katsayısı başlangıçta çelikte yüksek karbon bulunması nedeniyle yüksektir. Daha sonra, karşı yüzeyde transfer filmi oluşumu nedeniyle sürtünme katsayısı daha düşük bir değere ulaşmıştır. Son 30 dakikalık kayma boyunca, sürtünme katsayısı 0.08 değerinde sabit kalmıştır. Motor yağının varlığında başlangıç sürtünme katsayısı yağlanmayan durumda gözlemlenenenden düşüktür ve test boyunca bu seviyede kalmıştır. Yağlayıcı bulunmayan ortamda sabit olan sürtünme katsayısı yağlayıcı bulunan ortama göre daha düşüktür. Çelik yüzey üzerinde kayan çeliğin yağlayıcı bulunmayan ortamda sürtünme katsayısı değişimi Şekil 1.2’de mukayese açısından gösterilmiştir [31].

Yağlayıcı olmayan kayma testlerinde, transfer filmi oluşumundan dolayı çelik üzerinde kayan çeliğe kıyasla DLC kaplamanın sürtünme katsayısında belirgin bir azalma gözlenmiştir. Ancak, motor yağının olduğu durumlarda muhtemelen transfer film oluşumu olmadığından dolayı sürtünme katsayısı motor yağının olmadığı zaman gözlenenenden biraz daha yüksektir. Sınır yağlama koşullarında, DLC kaplı yüzey ile temas halinde olan çelik silindirin karşı yüzeyinin aşınması DLC kaplamanın yüksek sertliği ve kaplanan yüzeyde yağlayıcı türevli aşınma önleyici filmlerin olmamasından dolayı kaplamasız çelik yüzeylere göre daha yüksektir. Yağlayıcının olmadığı kayma koşullarında Raman spektroskopisi verileri DLC kaplamanın mikro yapısında bir dönüşüm olduğunu gösterir. Bu dönüşüm, yağlayıcının bulunduğu kayma durumlarına göre daha az belirgindir [31].

Son 10 yılda uygulamalı yüzey bilimi ve kaplama teknolojisindeki yenilikler sayesinde sürtünme katsayısında ciddi bir düşüş elde edilmiştir [48]. 0.01'in altında sürtünme katsayıları sadece çok yüksek vakum altında MoSO₂ ve DLC kaplamalar için gözlenmiştir [49-51]. Bu aralıkta sürtünme katsayısına sahip kaplamalar sayesinde sıvı yağlama ihtiyacı ortadan kalkabilir. Ancak, sürtünme katsayısı bir malzeme parametresi değildir, daha ziyade kayma yüzeyinin temas gerilimine, kayma hızına, çevreye ve tribokimyasal özelliklere bağlıdır [52-54]. Grafitin vakum ortamında sürtünmesi O₂ ve H₂O'ya maruz kaldığında düşerken [55], DLC aynı gazlara maruz bırakıldığında sürtünmesi artmaktadır [56,57].

Erdemir ve diğerleri atmosferik basınçta sürtünme katsayıları 0.001'e kadar düşen DLC kaplamaları kuru azotta araştırmıştır [58,59]. DLC kaplamalar hidrojen ve hidro-karbon açısından zengin bir ortamda düşük sıcaklıkta plazma destekli kimyasal buharlı bırakım yöntemiyle hazırlanmıştır [59]. 1 µm kalınlıkta ve 6.35 mm çapında safir bilyalar, 12.7 mm çapında çelik bilyalar ve H13 çelik yüzeyler DLC ile kaplanmıştır. Sürtünme testleri karşılıklı gidip gelen düz bilyalı bir tribometre ile kuru azot ortamında gerçekleştirilmiştir. Erdemir ve diğerleri, kayan temas yüzeyleri arasındaki maruz kalma süresi 5 saniyenin altında olduğu sürece kuru azotta DLC kaplamaların süper düşük sürtünme katsayılarını (0.003-0.008) koruyabildiklerini ortaya koymuştur [48].

DLC filmler çok düşük sürtünme katsayıları, yüksek aşınma dirençleri ve yüksek korozyon dirençleri ile nitelenmektedir. Test ortamına bağlı olarak, sürtünme katsayısı 0.01'e kadar düşürülebilir. Filmler atmosferik ortamda olduğu gibi vakumda da aşınmaya dayanıklıdır. Bununla birlikte, DLC'nin tribolojik özellikleri kaplamanın yapılış yöntemine göre farklılık göstermektedir [60].

DLC filmler karbon içeren katı veya gaz halindeki çeşitli kaynak malzemelerden plazma destekli kimyasal buharlı bırakım (CVD), püskürtme, vakum ark ve iyon demeti biriktirme gibi yöntemlerle hazırlanmaktadır [61]. Biriktirme koşullarına bağlı olarak, filmler değişen miktarlarda hidrojen içerebilir. Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PACVD) yöntemiyle hazırlanan filmler %60 oranına kadar hidrojen içerebilir [62], püskürtme ya da vakum ark ile hazırlanan filmler ise ya çok az miktarda hidrojen içerir ya da hiç hidrojen içermez.

1980 yılında Enke ve diğerleri [63] asetilenden PACVD yöntemiyle kaplanan DLC filmlerinin çok düşük bir sürtünme katsayısına sahip olduğunu bulmuştur. Azot içerisinde, %1'den daha küçük bir bağıl nemde, DLC kaplı silikon ince bir plaka ile çelik bir bilye arasındaki sürtünme katsayısı $\mu=0.01-0.02$ 'dir. Artan bağıl nem ile birlikte sürtünme katsayısı artmaya başlamıştır, bağıl nem %10 iken sürtünme katsayısı 0.05'e, bağıl nem %100 iken sürtünme katsayısı 0.19'a yükselmiştir [64]. DLC filmlerinin sürtünme katsayısı artan bağıl nem ile sürekli bir artış göstermiştir ve %50 ila %100 bağıl nem arasında sürtünme histerezis etkisi göstermektedir. Vakumda $\mu=0.005$ gibi oldukça düşük bir değere ulaşmıştır [64]. Enke ve diğerleri DLC filmlerinin düşük sürtünme katsayısını yüzey tabakasının testler sırasında grafitleştiğini varsayarak açıklamıştır. İyon demeti metodu kullanılarak kaplanan karbon filmlerin düşük sürtünme katsayıları Weiss-mantel ve diğerleri [65] tarafından rapor edilmiştir. DLC filmleri, çeliğe karşı 0.19'luk bir sürtünme katsayısına sahipken, katsayı pin-on-disk aşındırma cihazında 10.000 tur attıktan sonra 0.04'e düşmüştür.

Grill A. [60] yaptığı deney çalışmalarında farklı yöntemlerle kaplanan DLC ve türevi malzemelerin tribolojik özelliklerinin geniş bir aralıkta olmasına rağmen, malzemelerin birçok ortak özelliğe sahip olduğunu göstermektedir:

-PACVD yöntemiyle kaplanan DLC'nin sürtünme katsayısı nemli azot veya oksijende düşük, kuru azotta aşırı düşük ve kuru oksijende oldukça yüksektir;

-yüksek sıcaklıklarda sertleştirme yoluyla hidrojen kaybı, ultra yüksek vakumda sürtünme katsayısında belirgin bir artışa neden olmakla birlikte, nemli bir atmosferde bu değer oldukça az etkilenir;

Ultra yüksek vakumda veya durağan atmosferde bu filmler elmasinkine benzer bir sürtünme davranışı sergiler. Ancak, nemli bir atmosferde davranışları grafitinkine daha yakın gözükmetedir. Diğer yöntemlerle kaplanan DLC'nin davranışı daha az sistemattir, bununla birlikte ultra yüksek vakumda çok düşük sürtünme katsayıları vakum-ark yöntemiyle kaplanan filmlerde gözlenmiştir ve PACVD ile kaplanan filmlerinkine benzer bir davranış püskürtme yöntemiyle kaplanan filmlerde kuru oksijen ve azotta gözlenmiştir. Püskürtme yöntemiyle kaplanan

karbon filmlerin sürtünme katsayılarının davranışı, bu tür filmlerin elmastan çok grafit benzeri olduğunu gösterir [60].

Testler sırasında kuru oksijende bulunan yüksek sürtünme değerleri ve kuru azotta bulunan düşük sürtünme değerleri elmas benzeri özelliklere sahip amorf karbonun ortak özellikleri gibi gözükmemektedir [60].

DLC filmlerin yüzey enerjisinin düşürülmesi sürtünme katsayılarını azaltabilir. Tüm DLC filmlerinin sürtünmesi, özellikle çok sayıda kayma hareketinden sonra, birçok durumda özellikleri çevreye ve kayan yüzeye bağlı olarak değişen ara yüzeyde bir transfer tabakasının oluşturulmasıyla kontrol edilmektedir [60].

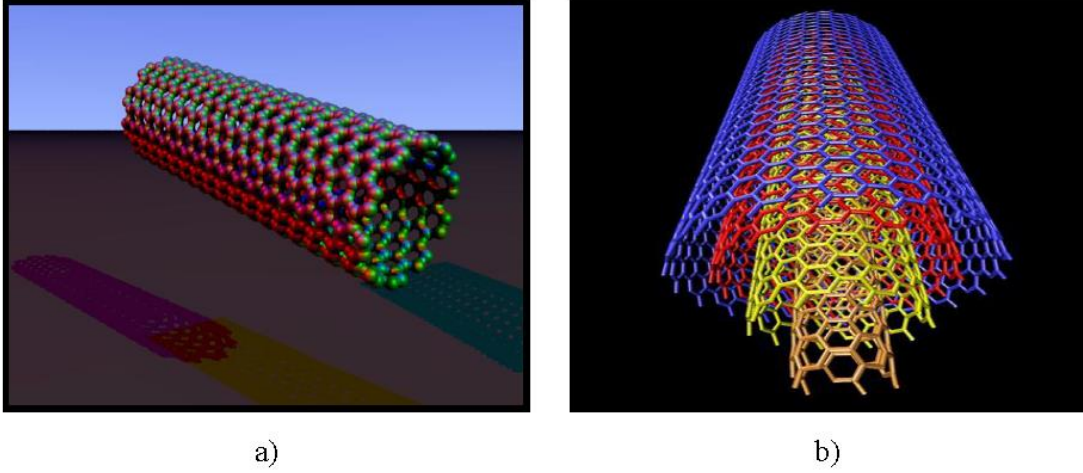
DLC'nin aşınma direnci, filmlerin ayrı ayrı kaplanma koşullarına güçlü bir şekilde bağlıdır. Elimizdeki veriler aşınma direnci ve sürtünme katsayısı arasında bir korelasyon kurmamıza izin vermemektedir. Ancak, sürtünmeyi etkileyen ara yüzey transfer katmanı DLC filmlerinin aşınma davranışını da belirlemektedir. Test ortamı aşınma mekanizmasının mekanik veya tribokimyasal olup olmadığını ve aşınma derecesini belirleyebilir [60].

Sürtünme katsayısına ek olarak, DLC'nin aşınma davranışını etkileyen önemli bir faktör filmlerin yüzeylere yapışmasıdır. Alt katmanın hazırlanması ve kaplama parametreleriyle kontrol edilebilecek bu faktör çoğu durumlarda doğrudan ele alınmamaktadır [60].

ISKRA, A. ve diğerleri pistonların hareketine karşı direnci test etmek için bir alüminyum alaşımının yüzeyinde piston yatağını karbon nanotüp (CNT'ler) tabakası ile kaplamışlardır. Kuvvetli bir elektrik alanının eşzamanlı kullanımında CVD tekniğini kullanırken CNT büyütme sürecini yürütmek, nanotüplerin düşey büyümesini mümkün kılmaktadır. Test sonuçlarına göre, 5 dakika, 15 dakika ve 20 dakika motor çalışmasının ardından yatak yüzeyinde CNT tabakası bulunan pistonlar için elde edilen motor tahrik torku, standart pistonlar için elde edilen motor tahrik torkundan daha iyi sonuçlar göstermiştir [66]. Literatür taramasına göre, segmanlarda karbon nanotüp (CNT'ler) kaplaması bulunmamaktadır.

Nano teknoloji alanında ilk uygulamalar karbon nanotüp yapısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Karbon nanotüplerin çapları nanometre ölçeğindedir. İdeal bir

karbon nanotüp, yuvarlatılmış hegzagonal karbon atom ağı olarak düşünülebilir. Karbon nanotüpler tek ya da iç içe geçmiş, uçları açık ya da kapalı silindirler biçiminde değişik çaplarda olabilmektedirler [67]. Grafit tabakalarının sayısına göre tek duvarlı ve çok duvarlı nanotüpler olmak üzere iki çeşittir (Şekil 1.3).



Şekil 1.3 (a) Tek duvarlı nano tüpler (b) Çok duvarlı nano tüpler [67]

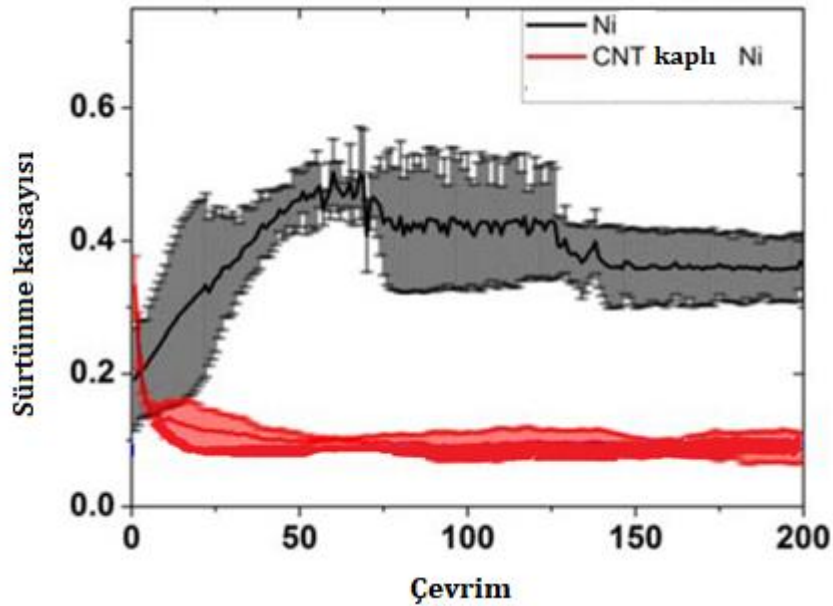
Karbon nano tüplerin yapı çeşitliliği sayesinde tüpler birbirinden farklı mekanik ve elektronik özellikler gösterirler [68,69,70].

Karbon nano tüplerin ağırlıklarının çok hafif olması ve yüksek elastisite modülüne sahip olmaları önemli özellikleridir. Karbon nanotüpler, yapılarındaki değişikliğe bağlı olarak metalik ya da yarı iletken özellik gösterebilmekte ayrıca elastik/plastik yapı deformasyonları ile elektronik özellikleri değiştirilebilmektedir [71].

Son yıllarda, karbon nanotüp özellikle mekanik [72] ve termal [73] olmak üzere, üstün fiziksel özellikleri nedeniyle araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Bunun yanı sıra, şekilleri ve yüksek esneklikleri karbon nanotüpleri katı yağlama veya tribolojik uygulamalarda yağlayıcı katkısı olarak güçlü bir aday yapmaktadır. Birçok çalışma karbon nanotüplerin sürtünme ve aşınmayı azaltma yeteneğini kanıtlamıştır; örneğin kompozitlerde takviye [74-80], koruyucu film [81-84], katı yağlama maddesi [79-81,83,85,86] veya yağlayıcı katkı maddesi [87-90] olarak kullanılır. Test parametrelerinde ve kullanılan tribolojik sistemlerde meydana gelen değişiklik, ölçülen etkinin altında yatan sürtünme ve / veya aşınma mekanizması ile ilişkilendirilmesini oldukça zorlaştırır [91] bu nedenle yapmış oldukları çalışmada,

tüm tribolojik test parametrelerini sabit tutmuşlardır. Çünkü bu sayede tribolojik davranıştaki farklılıklar kullanım amacının bir fonksiyonu olarak daha kolay izlenebilir.

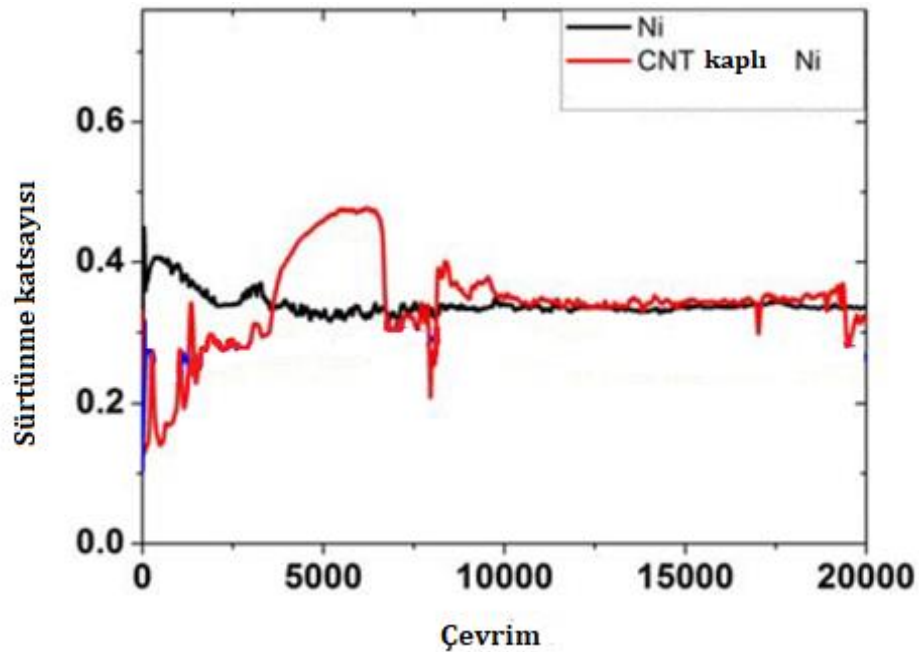
Karbon nanotüpün en büyük dezavantajı, güçlü van derWaals bağlarından dolayı oluşan topaklanmalar nedeniyle işlenme zorluğudur. CNT'lerin topaklanmasını önlemek için en basit yöntem onların çözücü içerisinde dağıtılmasıdır. Düşük toksiklik ve CNT'lerin iyi dağılması nedeniyle çözücü olarak etilen glikol seçilmiştir [92,93,94]. Deneyler CNT'lerin tribolojik davranışlarını incelemek için yağ veya gres gibi bir yağlayıcı etkisinden kaçınmak için kuru koşullar altında yapılmıştır. CNT filmlerinin bir yüzey üzerine kaplanmıştır. Yüzeyin üstündeki CNT filmlerinin, sürtünme ve aşınmayı azaltıcı etkileri, CNT'lerin yuvarlanma ve dolayısıyla sürtünme yüzeylerini ayırma kabiliyeti ile ilişkilidir. Bu kapsamda, CNT'ler rulmanlı yatak gibi hareket edebilir [76,80,95,96]. CNT'lerin sürtünmesindeki azalma yağlayıcı grafitik bir tribo katman oluşturmalarıyla açıklanmaktadır [76,79,80,82]. [91] karşı yüzey olarak Al_2O_3 bir bilyanın kullanıldığı lineer salınım hareketli ball-on-disk tribometrede, sürtünme katsayısının zamana bağlı değişimini incelemiştir.



Şekil 1.4 Ni üzerine kaplanan CNT kaplamanın kayma çevrimine (0-200 çevrim) göre sürtünme katsayısı değişimi [91]

Ni'in sürtünme katsayısı ilk 60 çevrim boyunca 0.2'den yaklaşık 0.45'e yükselir. Deneyin başlangıcında, sadece bilyanın pürüzlü kısımları ile kaplama ana malzemesi temas halindedir, yani yalnızca küçük bir temas alanı meydana gelir. Zamanla, başlangıç yüzeyi aşınır ve pürüzlerin derinliği artarak temas alanının genişlemesine neden olur. Şekil 1.4'de görüldüğü gibi, bu durum sürtünme katsayısında artışa sebebiyet verir. Daha sonra, sürtünme katsayısı sonraki 90 çevrimde düşerek ölçüm süresinin geri kalan kısmında 0.36 değerinde sabitlenmiştir. Belirli bir süre sonra, kaplama malzemesi ve karşı yüzey arasındaki yüzey pürüzlülüğünün azalması nedeniyle sürtünme katsayısı azalır. Bu davranış saf metaller için tipiktir [97].

CNT kaplamalı numune ele alındığında, ilk 50 çevrim esnasında sürtünme katsayısı 0.38'den 0.1'e düşer. Başlangıçtaki yüksek sürtünme katsayısı ilk kayma çevrimi içerisinde büyük miktarda birbirine dolaşmış CNT'nin aşınma çizgisinin yanlarına kaydırılmasıyla açıklanabilir. Birbirine dolaşmış CNT'lerin kaydırılması daha yüksek bir güç gerektirir, bu da daha sürtünme katsayısının artmasına neden olur. Birbirine dolaşmış CNT'ler bilyaya da aktarılır, transfer edilen bu CNT'ler temas alanına sürekli olarak CNT sağlanmasına katkı sağlar. Bu durumda, CNT katı yağlayıcı olarak işlev görür [76,81,83,85,86].



Şekil 1.5 Ni üzerine kaplanan CNT kaplamanın kayma çevrimine göre (0-20.000 çevrim) sürtünme katsayısı değişimi [91]

Şekil 1.5'te görüldüğü gibi, Ni'in sürtünme katsayısı ilk 2500 çevrimde 0.4'den 0.35'e düşmüştür, kalan çevrimlerde sürtünme katsayısı sabit kalmıştır. Zaman içerisinde yüzey pürüzleri aşınmış ve temas koşulları uygun hale gelmiştir. İlk 200 kayma çevrimindeki sürtünme katsayısı değişimi, çalışma esnasında Ni oksit oluşmasından kaynaklanmaktadır [91].

CNT kaplamalı Ni'in sürtünme katsayısı 0.1'den 0.35'e kadar çıkmış ve hatta 4000. çevrimden itibaren ani artışlar göstermiştir. Bu ani artışlar CNT tabakasının yer değiştirmesiyle açıklanabilir. Bu yer değiştirme geçicidir; çünkü aşınma çizgisinden dışarıya kayan CNT'ler kayma hareketi sırasında kısmen geri aktarılabilir. 3000 ve 7000. kayma çevrimleri arasında sürtünme katsayısı 0.35 ile 0.47 arasındadır. Sürtünme katsayısındaki bu artış Al_2O_3 bilyanın Ni yüzeyiyle direkt temasından (artan temas alanı) kaynaklanmaktadır. Ayrıca, oksit partiküllerinin oluşumu da sürtünme katsayısının artışında etkindir. CNT'ler artık yağlayıcı olarak işlev görmemektedir; çünkü aşınma çizgisinden tamamen ayrılmışlardır. 10.000. kayma çevriminden sonra CNT tabakası artık yoktur ve sürtünme katsayısı ölçümün geri kalan kısmında sabit kalmıştır. Bu durum oksit tabakasının varlığı ve CNT'lerin tamamen ortadan kaybolmasından kaynaklanır [91].

Deney esnasında (0-200 kayma çevrimli) Ni'de görülen temel aşınma mekanizması kazıma aşınmasıdır. Karşı yüzeyin (Al_2O_3 bilya) sertliği nikelin sertliğini fazlasıyla geçtiği için bu aşınma mekanizmasının görülmesi beklenen bir durumdur. Ayrıca, Ni oksit partiküllerinin oluşumu da abrazif aşınmaya neden olmaktadır. NiO sürtünme katsayısını artıran yüksek kayma dayanımlı bir katman olarak hareket ettiğini kanıtlamıştır [76]. 0-20.000 kayma çevrimli deney sırasında, 0-200 çevrimli deneye göre daha geniş bir aşınma çizgisi oluşmuştur. Bunun sebebi, Al_2O_3 bilyanın ölçüm esnasında yüzey içerisine iyice batması sonucunda daha geniş bir temas alanı oluşması ve aşınma çizgisinin genişliğinin artmasıdır.

0-200 kayma çevrimli deney esnasında CNT kaplamalı Ni'de şiddetli bir aşınma yoktur. Bilyanın daha büyük pürüzlerinin sebep olduğu hafif çizikler dışında, Ni yüzeyi hala parlaktır. Sadece oldukça parlak yüzeylerde görülebilecek taneler tribolojik deneylerden sonra da görülmektedir. Hafif çiziklerin içerisinde CNT bulunabilir, CNT yüzeyi yağlama görevi görerek şiddetli bir aşınma oluşumunu

önler. Şiddetli bir aşınmanın olmaması, 200 kayma çevrimi boyunca sürtünme katsayısının değişimine CNT kaplamanın karşı yüzey ile temasının yön verdiğini, aslında Ni yüzey için CNTnin koruyucu bir katman olarak görev yaptığını göstermektedir. Oksit oluşumu görülmemiştir, sürtünme katsayısının düşük olması oksit oluşumu olmamasına bağlanabilir [91].

0-20.000 kayma çevrimli deney esnasında aşınma çizgisi olarak iki alan dikkat çekmektedir. Aşınma çizgisinin ortasında şiddetli aşınmanın görüldüğü küçük bir alan (kazıma olarak adlandırılabilir) ve oksidasyon çizgileri fark edilmektedir. Şiddetli aşınma görülmesinin sebebi 3.000 kayma çevriminden sonra artan sürtünme katsayısı ile ilişkilendirilebilir, çünkü Al_2O_3 bilya Ni yüzey ile tam temas halindedir. Şiddetli aşınmanın görüldüğü alanın genişliği Ni yüzey üzerinde görülene göre daha azdır; çünkü CNT bilyanın Ni yüzey ile direkt temasını engellemektedir [91].

Karbon nano tüp, nanofiber, nano elmas ile birlikte grafen oksit (GO) kimyasal reaksiyonların bir katalizörü olarak [99] ve nano kompozit olarak [100-103] kullanılan karbon bazlı bir malzemedir [104]. Özellikle, elektrokimyada, fotovoltaiik cihaz [105], kimyasal sensör ve biyosensörlerde [106,107] düşük şarj transfer direnci ve mükemmel elektrokimyasal aktivite nedeniyle kullanılmaktadır. GO genellikle farklı metotlar kullanılarak grafitin oksidasyonu sonucu elde edilir. En basit yaklaşımla GO süspansiyonu elektrot yüzeyinde buharlaştırılır. Ne yazık ki, bu yöntem kullanılarak oluşturulan katman topaklanmaya neden olur ve düzensiz bir kaplama oluşur. Vlachova ve diğerleri çalışmalarında [108] elektroforetik kaplama yöntemini (EPD) kullanmışlardır. Elektroforetik biriktirme, sıvı bir ortamda dağılmış veya süspansiyon haline getirilmiş yüklü parçacıkların harici elektrik alanının uygulanması yoluyla ters yükün iletken kaplama ana malzemesine doğru ilerlemesi ve daha sonra üzerinde birikmesinden oluşan iki aşamalı bir işlemdir [109,110].

Biriken parçacıkların yüküne göre, iki tip EPD vardır. Parçacıklar negatif yüklendiğinde, elektrik alanının uygulanması pozitif yüklü elektrot (anot) üzerinde parçacıkların birikmesine neden olur. Buna anodik EPD adı verilir. Bu işlemin tam

tersi, negatif yüklü elektrot (katot) üzerinde pozitif yüklü parçacıklar birikir. Bu işleme katodik EPD denir [110].

Yüzey mühendisliği çözümleri otomotiv motorunun motor segmanları, yakıt enjektörleri ve supapları gibi kayan parçaları için gittikçe daha önemli hale gelmektedir. Ark kaplama teknolojisi ile yapılan kalın CrN kaplama, daha yüksek yük taşıma kapasitesi, daha yüksek aşınma direnci, daha yüksek korozyon direnci göstermiştir [111,112]. Bununla birlikte, CrN çok sert ve aşınmaya karşı dayanıklı olmasına rağmen, eğer CrN kaplamalı parçalar yağ azlığı veya döngüsel düşük/yüksek sıcaklık koşulları ile karşılaşır, CrN kaplamanın sürtünen yüzeyleri yağlamadığı, aşırı aşınma ve sürtünme meydana getirdiği görülmüştür [111]. Sert ve aşınmaya karşı dayanıklı, düşük sürtünmeli kaplamalar geleneksel yağlar ve katkıları tarafından sağlanan yağlamaya karşı motor parçalarının bağımlılığını azaltacaktır.

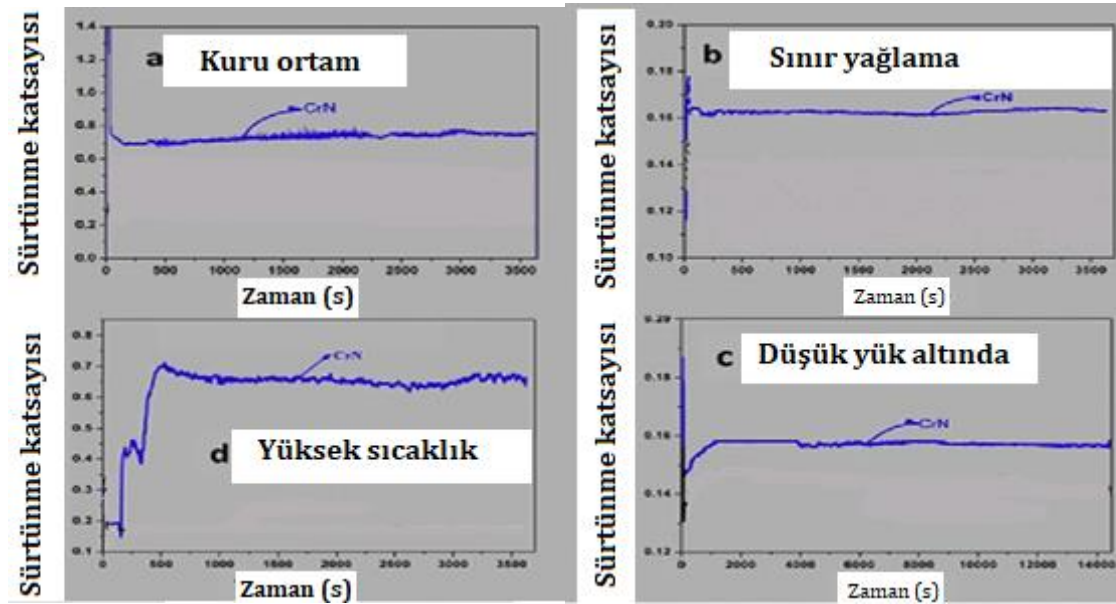
Motor bileşenlerinin performansını iyileştirmek ve yüksek mukavemetli malzemeler oluşturmak için, temas yüzeyleri düşük sürtünme ve yapışma önleyici özellikler ve yüksek aşınma direnci göstermelidir [113]. Bu nedenle, otomotiv, takım ve şekillendirme endüstrileri özellikle fiziksel buhar biriktirme ve plazma destekli kimyasal buhar biriktirme kaplamaları gibi çeşitli yüzey mühendisliği teknikleri ile yakından ilgilenmektedir. Sert kaplama seçilmesinin nedeni, sert kaplamaların temel olarak yüksek sertlik ve aşınma direnci gibi üstün mekanik özelliklere sahip olmasına dayanır [114,115].

Günümüzde PVD ve PACVD kaplamaları kesici takımlar için yaygın olarak kullanımdadır, ancak tribolojik özelliklerini geliştirmek için giderek daha çok makine elemanlarında kullanılmaya başlanmıştır [116-118]. TiN hala kesme ve şekillendirme uygulamalarında en yaygın kullanılan kaplama olmasına karşın, nispeten yüksek sürtünme ve yüksek sürtünme yapışması eğilimi gösterir [119]. DLC kaplamalar düşük sürtünme ve üstün rodaj kabiliyetiyle otomotiv motor parçalarında ağırlıklı olarak kullanılmaktadır [120,121]. Yüksek sertlik, yüksek ısıl kararlılık, sürtünme yapışmasına karşı gösterdiği direnç ve mükemmel korozyon önleyici özellikleri ile bir başka düşük sürtünmeli kaplama CrN'dür [122]. Dolayısıyla, CrN kaplamaları TiN'e bir alternatif olarak, otomotiv bileşenlerinden

şekillendirme kalıplarına ve kalıplar kadar çok sayıda tribolojik uygulama için kullanılmaktadır [123].

Wan S. ve diğerlerinin yaptıkları çalışma sonucunda elde edilen verilere göre oluşturulan [126] Şekil 1.6'da CrN kaplamaların sürtünme performansı gösterilmiştir, burada tamamen formüle edilmiş yağ yağlayıcı olarak kullanılmıştır. İki kaplama için sürtünme katsayıları yağlama koşullarına göre değişmektedir. Kuru kaymada, CrN ile çeliğin teması sonucunda daha yüksek ara yüzey kayma dayanımları nedeniyle 0.7 civarında yüksek bir sürtünme katsayısı ortaya çıkmıştır (Şekil 1.6a).

Şekil 1.6b'de görüldüğü gibi, CrN kaplama için baştaki sürtünme katsayısı $\mu=0.18$ olarak ve sondaki sürtünme katsayısı CrN kaplama için $\mu=0.16$ bulunmuştur [126].



Şekil 1.6 Farklı yağlama koşullarında zamanın fonksiyonu olarak CrN kaplamanın sürtünme katsayıları (a) Kuru ortamda (b) Sınır yağlama koşullarında (c) Yüksek sıcaklıkta (d) Düşük yük altında [126]

Yağlama yağı neredeyse yok olduğunda, ara yüzey sıcaklığı yükselmiştir, yağlayıcılar bozulmuştur ve sonuç olarak yüzeyler direkt temas halindedir. Disk/bilyalı temas 250°C'a kadar ısıtılmış, CrN kaplama $\mu=0.3$ 'lük bir sürtünme katsayısı değeri ile başlamış, sonra birkaç dakika içinde $\mu=0.18$ 'e düşmüş ve kuru ortamda $\mu=0.7$ 'ye çıkmıştır. Yağ azlığından veya kuru ortam şartlarından bağımsız olarak sürtünmede yaklaşık %67'lik bir azalma elde edilmiştir [126].

Titanyum nitrür yüksek mikro sertlik ve kimyasal ile termal stabilite gibi bir dizi özelliğe sahip olan ısı ve sıcaklığa dayanıklı bir bileşiktir. TiN çeşitli uygulamalarda kullanılır: metallerin anokist dökümü için pota malzemesi olarak ya da aşınmaya dayanıklı altın gibi bir kaplama malzemesi olarak [98]. Bu kaplamalar aşınma dirençlerinin artırılması amacıyla kesici takımlara uygulanır.

TiN kaplamanın avantajları arasında yüksek sertlik, iyi yapışma, iyi süneklik, mükemmel yağlama, yüksek kimyasal stabilite, aşınma, korozyon ve sıcaklığa karşı dayanıklılık sayılabilir. Takım çeliklerinin TiN ile kaplanmasının üretimi artırdığı ve maliyeti düşürdüğü kanıtlanmıştır. Kaplama kalınlığının takımın ömrü üzerinde önemli bir etkisi vardır: kaplama ne kadar kalınsa, takımın ömrü o kadar uzundur [124]. Adhezyon, özellikle tribolojik ortamlarda kullanım için mühendislik kaplamalarının önemli bir mekanik özelliğidir. Adhezyon, ara yüzey bağları, yüzey temizliği ve topoğrafyanın hassas bir fonksiyonudur. Bir kaplamanın adhezyon mukavemeti, kaplama ve yüzey malzemesi arasındaki kimyasal ve fiziksel etkileşimlere ve arayüz bölgesinin mikro yapısına bağlıdır. Kaplama sıcaklığının kaplamanın mekanik özellikleri ve mikro yapısı üzerinde önemli bir etkisi vardır.

TiN kaplamanın süreç gelişiminde trend, işlem sıcaklığını düşürmek ve böylece yüzeyin yüksek sıcaklığa maruz kalmasından dolayı oluşan negatif etkiyi en aza indirmek ve böylece TiN kaplanabilecek malzeme sayısını artırmaktır. İyi yapışma ve düşük kaplama sıcaklığı TiN kaplama için yapılacak çalışmaların yönünü belirleyecektir [125].

Seramiklerin metaller üzerine kaplanması bu iki malzemenin ısıl genleşme katsayılarının uygunluğu ile doğrudan ilişkilidir. Mevcut çalışmalar PSZ (Partially-Stabilized Zirconia) cinsi seramikler için en uygun metal malzemesinin dökme demir olduğunu ortaya koymuştur [127,128]. İnce termal bariyer kaplamalar (TBC) gaz türbinlerinde, dizel ve benzinli motorların piston ve supaplarında kullanılmaktadır. ZrO_2 veya $MgZrO_3$ yüzeyde termal bariyer olarak kullanılan malzemelere örnek olarak verilebilir. Bağlayıcı tabaka olarak ise Ni-Al veya Ni-Cr kullanılır. İyi bir kaplama elde edebilmek için temiz bir yüzey ve iyi bir bağ tabakası gereklidir. Yüksek teknoloji seramikleri düşük ısı iletimi, düşük sürtünme, korozyon ve aşınma direnci gibi özellikleriyle kaplama yapımında oldukça tercih

edilmektedir. Yapısal amaçlı yüksek teknoloji seramiklerine örnek olarak oksit seramikler grubundan ZrO_2 ve Al_2O_3 verilebilir. Oksit olmayan seramikler grubunda ise BC, BN, Ti_2B ve SiC yer almaktadır. Bu seramikler hafif olmaları, yüksek sertlikleri, ısı ve korozyon dayanımları ile endüstride birçok alanda kullanımdadır. Kolay bir uygulama olması nedeniyle de tercih edilen ve en yaygın olarak kullanılan seramik kaplama tekniği, plazma sprey yöntemiyle toz halindeki seramiğin metal üzerine tutturulmasıdır [129].

Termal bariyer kaplamalar arasında düşük ısı iletkenliği ve kimyasal kararlılığı ile en yaygın olarak kullanılan ZrO_2 'dir [129].

Modi ve diğerleri [129] yaptıkları çalışmada, seramik kaplamalı su soğutmalı bir dizel motoru yakıt olarak dizel ve palmiyeden elde edilmiş biyodizel kullanarak performans ve egzoz emisyonu açısından değerlendirmiştir. Çok silindirli, dikey su soğutmalı dizel motor, pistonlar, silindir kafasının üst yüzeyi ve silindir gömlekleri PSZ cinsi seramik ile kaplanmıştır. Dizel motor orta hızda, değişken yük durumunda çalıştırılmıştır. Sonuçlar, termal bariyer kaplamalı motor için yakıt ekonomisi ve düşük kirlilik seviyesi elde edildiğini göstermektedir. Üç ana kaplama tipi vardır: Termal bariyerli kaplamalar ısıyı tutar, ısı yayan kaplamalar ısının dışarıya atılmasını sağlar ve düşük sürtünmeli kaplamalar ısı kaynaklı sürtünmeyi azaltır.

En yaygın kullanılan TBC, piston kafasına, yanma odasına, silindir kafasındaki supap oturma yüzeylerine uygulanan seramik bazlı bir malzemedir. TBC piston, supap ve kafadan (daha sonra soğutma sistemi tarafından absorbe edilir) ısı yayılmasına izin vermez, onun yerine odada daha fazla ısı tutar. Bu, teorik olarak silindir basıncını arttırır ve pistonu daha da zorlayarak daha fazla güç sağlar. TBC ayrıca pistonu yoğun ısıdan korur, böylece hava/yakıt karşımı pistonun içinde yanmadan maksimum güç için fakirleşir. Motorun geri kalanına yayılan ısı miktarı azaldığı için motorun çalışma ve yağ sıcaklıkları düşer. Bu aynı zamanda, radyal gerilme ve sızdırmazlık yeteneklerini geliştiren motor segmanları için de faydalıdır. TBC'ler ayrıca emme ve egzoz kanallarında ve silindir kafasında süpürmeyi iyileştirerek motor kaputunun sıcaklığını düşürür [129].

Modi ve diğerleri [129] yaptıkları çalışmada daha iyi aşınma direnci, düşük termal iletkenliği, yüksek termal şok direnci ve yüksek ergime sıcaklığı (yaklaşık 2800 °C)

nedeniyle termal bariyer kaplama olarak ZrO_2 'yi seçmişlerdir. ZrO_2 plazma yöntemiyle kaplanmıştır. Seramik kaplama motor sisteminde daha iyi ısı yalıtımı yapılabilmesine olnaak tanımış, daha yüksek çalışma sıcaklıkları elde edilmiştir ve soğutma ihtiyacı azalmıştır. TBC kaplamalı dizel motorun genel performansı kaplanmamış dzel motora göre daha iyidir. TBC kaplamalı motorun mekanik verimliliği %10-16 oranında ve motor termik verimi %10-15 oranında artmıştır. Kaplanmamış motorda boşa harcanan ısı TBC kaplamalı motorda frenleme gücünü artırmak için kullanılmıştır.

Bor nitrür elektriksel yalıtkanlık, yüksek sıcaklık kararlılığı, ısı iletkenliği, kayganlığı, kimyasal olarak kararlılığı ve ıslanmazlığı nedeniyle tercih edilen kaplamalardandır. Bor nitrür aşırı yüksek sıcaklıklarda bile kaygan kalabilmektedir. BN ile yapılan kaplamalar yapışmayı engeller ve yüzey pürüzlülüğünü azaltır. BN kaplamalar sıcak veya ergimiş metallerle temas halindeki yüzeyleri korurlar. BN korozyonu önler ve kimyasal ataklardan korur. Bor nitrür kaplamalar kaynak ve lehimleme için göz önünde bulundurulması gereken mükemmel adaylardır.

Bor nitrür tribolojide ve elektronik cihaz uygulamalarında artan kullanımı ile ciddi önem kazanmıştır [130]. Özellikle, ince bor nitrür filmleri aşınmaya dayanıklı kaplama, elektrik yalıtıcısı ve aşındırıcı olarak birçok alanda kullanılmaktadırlar [131]. Bor nitrür karbon gibi iki fazlıdır, altıgen bor nitrür olarak bilinen grafit benzeri yapı ve elmas veya çinko karışımı bir yapıya sahip kübik bor nitrür. Altıgen bor nitrürün, iki boyutlu anizotropi ve yalıtım özelliği nedeniyle ince bir film malzemesi olarak çok çeşitli uygulamalara sahip olduğu, öte yandan sert kübik bor nitrür aşırı sert olması, geniş bant aralığı, yüksek elektriksel direnci, yüksek ısı iletkenliği ve yüksek erime sıcaklığı ile oldukça dikkat çekici özelliklere sahiptir [132].

Bor nitrür yağlayıcı olması, yüksek ısı iletkenliği, elektriği iletmemesi, yüksek sıcaklıklara dayanıklılığı ile çok farklı alanlarda kullanılmaktadır. Bor nitrür genellikle hegzagonal yapıda oluşur. Kübik sistemde ise oldukça serttir. Kübik yapıdaki bor nitrür çok iyi bir abrazif malzemedir. Bu özelliğinden dolayı, kesici aletlerin yapımında ve sert alaşımların işlenmesinde kullanılır [133].

Yu Cheng ve diğerkleri çalışmasında, bor nitrür kaplamalarını bor triklorür (BCl_3), amonya (NH_3), hidrojen (H_2) ve argon (Ar) karışım gazları kullanarak düşük basınçlı kimyasal buhar biriktirme (LPCVD) yöntemi ile hazırlamıştır. Termodinamik analiz, 1000 °C ve toplam 1000 Pa basınçta NH_3 miktarı fazla olduğı zaman, bor nitrürün tek katı ürün olduğunu göstermiştir. Turbostatik bir yapıya sahip BN kaplama 1300 °C üzerinde ısıt işlemlerden sonra iyi kristallenmiş altıgen bor nitrür (h-BN) bir yapıya dönüşmüştür. BN toplam 1000 Pa basınçta, sırasıyla 650 °C, 800 °C ve 1000 °C sıcaklıklarda incelenmiştir [134].

Yu Cheng ve diğerkleri çalışmasının sonucunda LPCVD biriktirme yöntemiyle BN kaplamanın biriktirme oranının 800 °C ve 1000 Pa'da en çok 1.6 $\mu\text{m/h}$ değerine ulaştığını ve kaplamanın homojen olduğunu bulmuştur. BN kaplama 1000 °C ve 1000 Pa'da grafit ara katman üzerine başarılı bir şekilde kaplanabilmiştir. TEM deneyleri kaplamanın kalınlığı boyunca karbon atomlarının görünür bir yoğunlukta olduğunu göstermiştir. BN kaplama ısıt işlem sonrasında 1300 °C üzerinde hegzagonal bir forma dönüşmüştür ve ısıt işlemle birlikte yükselen sıcaklıkla kristallenme derecesi artmıştır [134].

Altıgen bor nitrür (h-BN) yapısal ve işlevsel özellikleriyle oldukça dikkat çekmektedir [135,136]. H-BN bazlı malzemeler düşük dielektrik sabiti, mükemmel elektriksel direnci, iyi kimyasal stabilitesi ve kendiliğinden yağlanma kabiliyeti sayesinde yalıtkan malzeme, mikrodalga tüpler [137], dalga geçirgen malzemeler ve fren malzemesi [138] olarak geniş uygulama alanı bulmuştur.

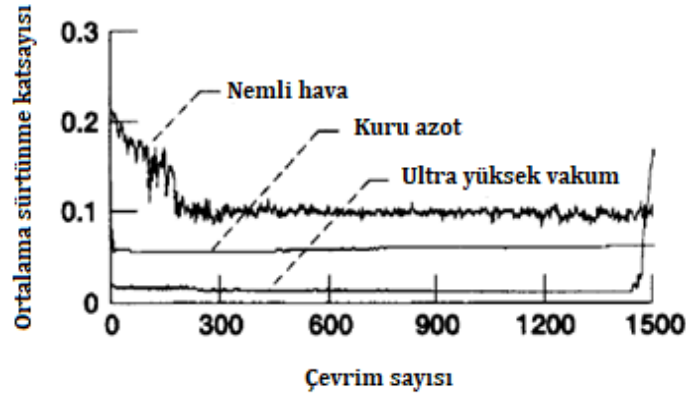
Bor kaynakları genellikle BF_3 ve BCl_3 'tür. BCl_3 gaz sistemi kullanan BN biriktirme sıcaklığı 500 °C'a kadar düşürülebilir [139]. Bununla birlikte, düşük kristallenme derecesine sahiptir, havadaki O_2 ve H_2O 'ya duyarlıdır. C.G. Cofer ve diğerkleri [140] BN'nün neme karşı duyarlılığının kristallenme derecesiyle güçlü bir şekilde ilintili olduğunu belirtmişlerdir. Bu sebepten ötürü, BN'nün kristallenme derecesi ısıt işlemle geliştirilmelidir. S. Le Gallet ve diğerkleri, [141] BN kaplama içerisindeki oksijen miktarının en çok 1300 °C'a kadar düşen kristallenme sıcaklığını etkilediğini ortaya konmuştur.

BN üstün kimyasal, elektriksel ve ısıt özelliklerine sahip bir bileşik olup hegzagonal (h-BN), wüstitik (w-BN) ve kübik (c-BN) bor nitrür yapılarına rastlanmaktadır. Bor

nitrürün kristal yapısı karbonla benzerlik göstermektedir. Bu nedenle, hegzagonal bor nitrür genellikle beyaz grafit veya beyaz karbon olarak adlandırılır. Doğada bulunmayan yapay bir malzeme olan hegzagonal bor nitrür bor ve azotun bir araya getirilmesiyle üretilmektedir. Hegzagonal BN sıcaklık ve basınç etkisiyle kübik bor nitrüre dönüştürüldüğünde elmas sertliğine benzer özelliklere sahip olmaktadır. BN'ün seramik malzemelere göre yoğunluğu çok düşüktür, yüksek sıcaklık kararlılığı (ergime sıcaklığı 2300 °C), kimyasallara karşı dayanım (asitlere karşı korozyon direnci yüksektir) ve ısıl şoklara karşı kararlıdır [142].

Seramikler ve grafitlerin yanı sıra metaller iyi yağlama özelliklerine sahip bor nitrür ile kaplanabilir. Bor nitrür kaplamalar, seramiklerin sıcak preslenmesi, camın şekillendirilmesi ve metal döküm için kalıpların kaplanması gibi farklı şekillendirme işlemlerinde yağlayıcı madde olarak kullanılır. Yüksek sıcaklıklarda iyi yağlama özellikleriyle, bor nitrür kaplamalar ideal birer yağlayıcı madde olarak düşünülebilir. Bu sebeple, 1000 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda süper plastik şekillendirme işlemleri için de kullanılırlar. Bu zamana kadar sıklıkla kullanılan grafit ve molibden disülfidin yerini almaktadır. Erimelere karşın ıslanmıyor olması sayesinde BN kaplama potalarında katı bor nitrüre alternatif olarak kullanılmaktadır. Diğer uygulamalar yüksek ısıl iletkenlikle ilgilidir, örneğin eriyiklerin içerisine batırılmadan önce termokupl borularının kaplanması [143].

DLC'nin tribolojik uygulamaları demir ve demir bazlı alaşımlarla reaksiyona girmeleri nedeniyle sınırlanabilir. Kübik bor nitrür bu sorunun üstesinden gelebilecek bir alternatiftir. Kübik bor nitrür, elmastan sonra en yüksek sertliğe sahiptir, yüksek ısıl iletkenliği ve termal kararlılığı ile tercih edilmektedir. C-BN demir ve demir alaşımları ile temasta iken aşınmaya dayanıklı ve kendi kendine yağlama özelliği olan bir kaplamadır. Aşınma ve sürtünme davranışlarını belirlemek için kayma sürtünme deneyleri c-BN filmleri yarım küre doğal elmas uç (eğrilik yarıçapı 1,3 mm) ile temastayken nemli havada, kuru azotta ve ultra yüksek vakumda yapılmıştır [144].



Şekil 1.7 c-BN filmlerin CVD elmas uçlarla kayar temasta iken nemli havada, kuru azotta ve ultra yüksek vakumda sürtünme katsayısı değişimi [144]

Nemli hava, kuru azot ve ultra yüksek vakum olmak üzere her üç ortamda da sürtünme katsayıları düşüktür; ancak sürtünme katsayısının en düşük olduğu ortam ultra yüksek vakum ortamıdır (Şekil 1.7).

Ultra yüksek vakum ortamında kayma hareketi c-BN filmlerinin kopmasına neden olmuştur; bu nedenle yaklaşık 1400 geçişten sonra sürtünme katsayısı hızlı bir şekilde artmıştır. Öte yandan, nemli ortamda ve kuru azotta sürtünme katsayısı 100.000 geçişte bile filmler kopmadığı için sabit kalmıştır [144].

Li-Yu Lin ve diğerleri AFM kullanarak çok katmanlı grafen filmlerin sürtünme ve aşınma özelliklerini araştırmıştır. Sürtünme ve aşınma ölçümleri için kullanılan çok katmanlı grafen filmler 6-15 kattan oluşmaktadır. Grafenin sürtünme özellikleri, -5 ile 30 nN arasında değişen negatif ve pozitif yükler altında ölçülmüştür. Sonuçlar, grafenin Si substratına göre daha düşük sürtünme sergilediğini göstermiştir. Tribometre aşınma testi sonuçları, 100 kayma çevriminden sonra 5 μN 'lik uygulanan kritik yükte önemli bir grafen aşınması olduğunu göstermiştir [145].

Emre Çıtak ve diğerleri sentetik grafeni, kimyasal buhar birikim sistemi ile piston segmanının yüzeyi üzerine transfer etmeyi başarmıştır. İlk olarak, CVD yöntemi ile grafen sentezlenir. Ardından, tek katmanlı grafen pulları olarak segmanı kaplayarak aktarılır. Grafen katmanları, 1581 ve 1582 cm^{-1} gibi Raman tepeleriyle ve Raman spektroskopisinde 2700 cm^{-1} bandında 2D tepe noktalarıyla 532 nm dalga uzunluğundaki yeşil lazer ile teyit edilmiştir. Grafen katmanlarının sürtünme özellikleri tribotest teçhizatında deneysel olarak test edilmiştir. Grafen kaplama,

segman ve silindir gömleği arasında daha düşük sürtünme değeri göstermiş ve tribofilmler mikroskopik muayene ile sunulmuştur. Grafen katmanlarının transfer yöntemi ile kaplanabilmesi ve içten yanmalı motorlarda kullanılması önerilir [146].

950 °C'da CVD direkt sentez metoduyla grafen kaplı segman ve 530 °C'daki gaz nitrür kaplı segman üzerinde kaplama başarılı olduğu halde, dökme demirin yüzey sertleşmesi ve deforme olması motor testinde başarıyı engellemiştir. Dolayısı ile transfer yöntemi yani genellikle bakır (Cu) üzerine CVD ile kaplayıp segman üzerine transfer etme, sıvı fazda sentezden sonra ultrasonik veya hava spreyi ile nanokaplama yöntemi uygulamak en etkin çözüm yöntemidir. Sıcaklık gereksiniminde, nano kaplama yapılırken dökme demirin Fe-C denge diyagramında dönüşüm sıcaklığının altında çalışılacaktır. Kaplamaların yapılması esnasında denemeler ile bu sıcaklık tespit edilmiş ve malzeme yapısına ve şekline hiçbir şekilde müdahale edilmemiştir [147].

Grafen elektriksel, mekanik ve ısı özelliklerinden dolayı bilim adamlarının dikkatini çekmektedir.

Karagöz ve diğerleri yaptıkları çalışmada, doğrudan CVD yöntemiyle grafen kaplanmış (tek katmanlı ve çok katmanlı) motor segmanlarının yapılan tribometre deneylerinin ardından kaplanmamış motor segmanlarına nazaren sürtünme katsayısının önemli ölçüde düştüğünü tespit etmişlerdir. Motor segmanlarının yüzeyinde abrazyon aşınma gözlenmiştir. Honda GX 270 motor segmanlarında argon /hidrojen akısı ve metan gazı kullanılarak yapılan grafen kaplamasının başarılı olmadığı açıktır. Ancak, tek katmanlı ve çok katmanlı olarak vakum koşulları altında CVD yöntemiyle hidrojen akısı kullanarak sentezlenmiş hegzan buharı ile motor segmanları üzerine biriktirilen grafen başarıyla kaplanmıştır. Tribometre testlerinde motor segmanlarının sürtünen yüzeylerinde ilave katmanlar oluşurken, bunlar motor testlerinde sadece silindir gömleğinin üst ölü noktasında tespit edilmiştir. Motor testleri esnasında, motor segmanında ilave koruyucu tabakalar tespit edilmiştir. Bunun temel nedeni, düşük kayma hızı ve yüksek gaz sıcaklığı nedeniyle ince yağlayıcı film ve yüksek temas basıncı nedeniyle motor segmanının en çok üst ölü noktada aşınmasıdır. CVD grafen kaplama 800 °C'dan daha yüksek bir sıcaklıkta gerçekleştirildiği için, motor segmanı bozulmakta ve şekil

değiştirmektedir. Bu nedenle, motor arızası meydana gelmiştir. Dolayısıyla, Honda GX270 motor segmanlarına CVD işlemi ile biriktirilen sentezlenmiş grafen ve grafen kaplama metodunun aktarılması içten yanmalı motorlarda daha verimlidir ve tavsiye edilmektedir [147].

Tripathi ve diğerleri yaptıkları çalışmada [148], CVD yöntemiyle kapladıkları grafenin içten yanmalı bir motorun gri dökme demir silindir gömleğinin tribolojik performansı üzerindeki etkisini ball-on-disk sürtünme testleri yaparak araştırmışlardır. Grafen kaplı numunenin sürtünme değerlerinde kaplanmamış numuneye göre %53 oranında bir azalma görülmüştür. Grafen kaplı numunenin ve bilyanın aşınma direnci ise sırasıyla 2 kat ve 5 kat artmıştır. Grafenin aşırı düşük kesme mukavemeti ve yüksek yağlama kabiliyeti kayan yüzeyler arasında yağlayıcı bir film oluşumuna katkı sağlarken aynı zamanda kuru ortamda yüzeyler arasındaki etkileşimi azaltmıştır. Uygulanan yük altında, yüzeyler arasında Fe_2O_3 , Fe_3O_4 ve $FeOOH$ gibi demir oksit filmlerinin oluştuğu görülmüştür. Numuneler arasında oluşan metal artıkları ve oksitlerle birlikte grafen kaplanmasının yağlayıcılığı artırdığı ve kayma kuvvetini azalttığı öngörülmektedir. Temas yüzeyleri arasında grafenin nanoyapılı grafitlere dönüşümü filmin yağlayıcılığını artırırken malzemenin sürtünme ve aşınmasını azaltmıştır.

Son zamanlarda, birçok araştırmacı ince film kaplamalara yönelmiş ve ince film kaplamaların kullanımı ile aşınma ve sürtünme konusunda ciddi bir aşama kat etmiştir [149]. Metal karbürler (WC, TiC, CrC), DLC ve molibden disülfür (MoS_2) gibi kaplama malzemelerinin sınır yağlamada çelik üzerinde sürtünürken düşük sürtünme (0.2'den az) gösterdiği tespit edilmiştir [150-154]. Kaplamaların yüksek sertlik, düşük sürtünme, yüksek aşınma direnci, düşük yüzey enerjisi gibi özelliklerinin malzemelerin tribolojik performansını artıracığı varsayılmaktadır. Grafen yüksek elastikiyet modülü (yaklaşık 1 TPa) ve yüksek kırılma tokluğu (125 GPa) gibi üstün mekanik özelliklerinden dolayı düşük sürtünme ve aşınma malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır [155,156]. Grafit ve metal oksitler (CuO , ZnO) ve metal sülfidler (MoS_2 , WS_2) gibi diğer geleneksel katı yağlayıcılara kıyasla grafen birçok farklı çevrede katı yağlayıcı işlevi gören bir kaplama malzemesi olarak sunulmaktadır [157].

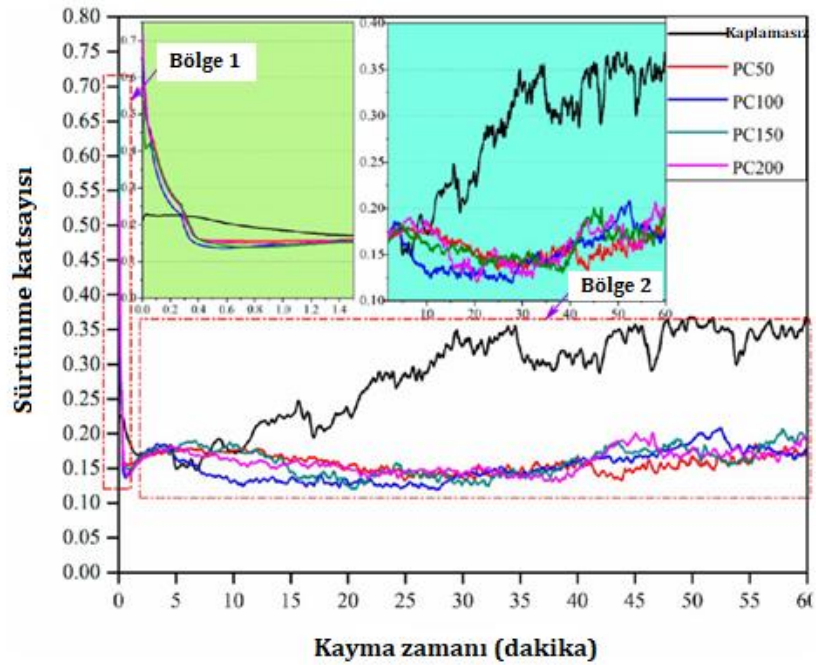
Tripathi ve diğeri [148] ball-on-disk bir tribometrede, 5 N normal yük altında ve kuru ortamda 5 cm/s hızda testleri gerçekleştirmiştir. Aşınma testlerinde çelik bilyalı rulman (SAE52100; çapı=12.7 mm ve Vickers sertliği=848 HV) 1 saat boyunca 3 mm'lik bir dönüş yarıçapı ile tek yönlü olarak kayma hareketi yapmıştır. Sürtünme testlerinde kullanılan gri dökme demir numune tipleri Tablo 1.2'de özetlenmiştir.

Tablo 1.2 Sürtünme testlerinde kullanılan gri dökme demir numune tipleri

Numune Tipi	Adı
Parlatılmış gri dökme demir	Kaplamasız
Grafen kaplamalı (50 sccm CH ₄)	PC50
Grafen kaplamalı (100 sccm CH ₄)	PC100
Grafen kaplamalı (150 sccm CH ₄)	PC150
Grafen kaplamalı (200 sccm CH ₄)	PC200

İlk başta, kaplanmış numunenin sürtünme katsayısı nispeten yüksek bir değerden başlamıştır. İlk 20 saniye boyunca kaplanmış numunelerin sürtünmesi oldukça yüksektir (Şekil 1.8 - Bölge 1). Pürüzlü yüzey kayma sırasında pürüzsüz hale geldiğinden, numuneler arasındaki gerçek sürtünme kaydedilmeye başlar. Sürtünme katsayısının yüksek olduğu bölge, sürtünme testinin alıştırma safhası olarak kabul edilir. Alıştırma safhasında, sürtünme düşmeye başlar. Temas yüzeyleri düzensizliklere uyum sağlayacak şekilde aşındığında, sürtünme kararlı durum değerine ulaşır. Bu aşamada, temas basıncı deneyin başlangıcına göre daha düşüktür, bu sayede sürtünme ve aşınma da çok düşük bir seviyeye ulaşır. 300 saniyelik bir kaymanın ardından sürtünme katsayısı sabit bir değere erişir (Şekil 1.8 - Bölge 2). Bir noktada, kaplamasız ve kaplamalı numunelerin sürtünme katsayıları benzerdir. Kaplanmamış numune için birkaç dakika kayma hareketinden sonra daha düşük sürtünme homojen dağılmış grafit tanelerinin yağlayıcı doğasından kaynaklanmaktadır [158-160,161]. Daha sonra, kaplamasız numunenin sürtünmesi daha yüksek bir değere ulaşmıştır. Grafit tanelerinin etkisi taneler tamamen yüzeyden soyuluncaya kadar devam eder. Tanelerin soyulması sonucunda delikler ve çatlaklar görülebilir. Temas bölgesinde ortaya çıkan bu delik ve çatlaklar yüzeyi daha pürüzlü hale getirir ve daha yüksek bir sürtünme ile sonuçlanır. Kaplamasız

numune döngülerin sonunda daha yüksek bir sürtünme katsayısına ulaşmıştır (yaklaşık 0.35). Grafen filmlerinin olumlu etkisi, grafen kaplı numune için elde edilen düşük sürtünme katsayısı ile açıklanabilir. Grafen kaplı numunenin, deney boyunca ve deneyin sonuna kadar sabit bir sürtünme katsayısına sahip olması grafen filmin varlığı ile ilişkilendirilebilir. Kaplanmış numunenin sürtünme katsayısı değerlerinde görülen ufak dalgalanmalar, yüzeylerin temas bölgelerinde ortaya çıkan aşınma artıklarıyla etkileşimden kaynaklanmaktadır. Kaplanmış numunenin, kaplanmamış numuneye kıyasla daha düşük sürtünme katsayısına sahip olması, grafenin oldukça düşük kesme mukavemeti ve yüksek yağlayıcı etkisi sayesinde [162,157,163].



Şekil 1.8 5 N yük altında lineer sürtünme testinde kaplamasız ve kaplamalı numunelerin sürtünme katsayısı değişimi [148]

Her ne kadar kaplamalı dört numune farklı CVD koşullarında hazırlanmış olsa da, numunelerin sürtünme değerlerinde ciddi bir farklılık görülmemiştir.

Kaplanmış numune için aşınma izleri ve bilya aşınma izleri kaplanmamış numunelere göre çok daha dardır. Yüzeylerde görülen aşınma çeşitleri deneyin başında abrazif aşınma olmak üzere adhezif ve oksidatif aşınmadır. Aşınmış yüzeylerde yağlayıcı ince demir oksit filmlerinin oluşumu (Fe_2O_3 , Fe_2O_4 , $FeOOH$) kaplamasız ve grafen kaplamalı numunelerin düşük sürtünme ve düşük aşınmadan

sorumludur. Grafenle kaplanmış demir oksitler, özellikle grafenin aşınması sonucu oluşan Fe_3O_4 ve nanoyapılı grafit kristalleri ve diğer metal oksitler sürtünme ve aşınmadaki ciddi düşüşten sorumludurlar [148].

TiO_2 ince filmler korozyona karşı koruma sağlanmasında, güneş pillerinde, kendi kendini temizleyen yüzeylerde ve kapasitörlerde kullanılmaktadır. TiO_2 kaplama ise motor silindirleri ve hafif rulmanlar gibi farklı sürtünme parçalarında tercih edilmektedir.

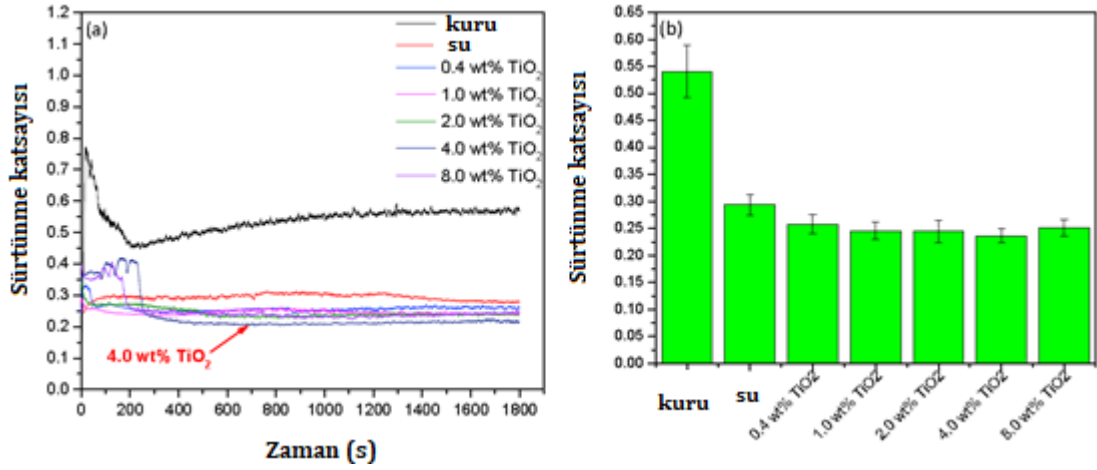
Otomotiv üreticileri görünümü, aşınma ve korozyon direnci nedeniyle yıllardır krom kaplama kullanmayı tercih etmişlerdir. Krom kaplama, kaplama işlemi esnasında kullanılan toksik maddeler nedeniyle insan sağlığını olumsuz yönde etkilemektedir. Prasath ve diğerleri yaptıkları çalışmada, alüminyum alaşımlı krom kaplama üzerine yapılan termal sprej kaplamanın mekanik ve mikro yapı özelliklerini incelemişler, alüminyum alaşım 6063 üzerine termal olarak TiO_2 kaplama uygulayarak elde ettikleri doneleri krom kaplama ile mukayese etmişlerdir. Termal sprej kaplamanın krom kaplamaya göre daha iyi aşınma direncine ve daha yüksek sertlik değerlerine sahip olduğunu tespit etmişlerdir. İnce termal sprej kaplamaları sert krom kaplamalardan daha üstün performans göstermiştir ve sert krom kaplamalara alternatif olarak kullanılabilirler [164].

Termal sprej erimiş veya ısıtılmış malzemelerin başka bir malzemenin yüzeyine püskürtüldüğü bir kaplama işlemidir. Prasath ve diğerleri yaptıkları çalışmada, oksijen ve yakıt toz halinde kaplama malzemesi (TiO_2) ile birlikte beslenir. Tozu tam anlamıyla küçük damlacıklar halinde eriten ve süpersonik hızda (1200 m/s'ye kadar) yüzeylere püskürten bir ısı kaynağı kullanılmıştır. Yüzeyle etkileşimde olan sıcak toz partiküllerinin yüksek kinetik enerjisi yoğun ve güçlü bir kaplama oluşturur. Termal sprej kaplamalar; nikel ve krom kaplamaya alternatif olarak yaygınlaşmaktadır. Püskürtme esnasında, sıcak erimiş malzeme daha yüksek bir ayrışma göstererek yüzeye eşit şekilde yayılır ve böylece yüksek sertlikte kaplamalar üretilir. Motorlarda termal sprej kaplamalar düşük gözeneklilikleri (<%1), kimyasal tepkimeye açık metaller için %1'den daha az oksit içeriğine sahip sert ve bağlı kaplamalar (bağlanma gücü > 50 MPa) olmaları nedeniyle tercih edilmektedirler. Termal sprej yöntemiyle TiO_2 kaplanmış alüminyum alaşımın

krom kaplı alüminyum alaşımına göre daha yüksek sertlik değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Aşınma ölçümü aşınma testinden sonra aşınmış malzeme miktarını belirlemek için yapılır. Numunelerin ağırlığı aşınma testinden önce ve sonra dikkatlice ölçülür. Deney öncesi ve sonrası ağırlık arasındaki fark aşınma nedeniyle oluşan ağırlık kaybını temsil etmektedir. Aşınma testi sonuçları krom kaplı alüminyum alaşımının aşınma kaybının TiO_2 kaplı alüminyum alaşımından daha fazla olduğunu açıkça göstermektedir. Bu, termal sprej yöntemiyle TiO_2 kaplı alüminyum alaşımının aşınma direncinin daha yüksek olduğunu gösterir. Termal sprej kaplamanın avantajları daha yüksek sertlik, kalın kaplama kabiliyeti, daha iyi korozyon direnci, daha iyi aşınma direnci, daha iyi bağlanma karakteristikleri, termal sprej kaplama sonrası açığa çıkan atıkların toksik olmaması olarak sıralanabilir [164].

Dai W.W. ve diğerleri [165], plazma sprej yöntemiyle biriktirilmiş TiO_2 kaplamanın paslanmaz çeliğe karşı aşınmasını farklı yüklerde ve kayma hızlarında blok bilezik aşınma deney cihazında test etmiştir. TiO_2 kaplamanın aşınma kaynaklı kütle kaybının artan yüklerle beraber arttığı, ancak artan kayma hızlarıyla beraber düştüğünü tespit etmişlerdir. Mekanizma; adhezif aşınma, mikromekanik delaminasyon aşınması, plastik deformasyon aşınması, erime aşınması ve Fe_2O_3 ve Fe_3O_4 ince film oluşumu ile açıklanmaktadır.

Wu H. ve diğerleri yaptıkları çalışmada [166], ferritik paslanmaz çelik (FFS) 445 üzerinde TiO_2 nano-katkılı su bazlı yağlayıcının tribolojik davranışlarını ball-on-disk bir tribometrede çalışmışlardır. Oksitlenmemiş (temiz) ve önceden oksitlenmiş FFS disklerine ve orijinal sert yüzeylere oda sıcaklığında tribolojik testler uygulanmıştır. Test sonuçları yüzde ağırlıkça 0.4-8.0 TiO_2 konsantrasyonuna sahip su bazlı nano yağlayıcıların her iki disk tipinde de sürtünme katsayısını ciddi oranda azalttığını göstermiştir. Ağırlıkça %4 TiO_2 konsantrasyonuna sahip yağlayıcı tüm yağlama koşulları altında uygulanan bilyalar üzerindeki en düşük sürtünme katsayısı, en güçlü aşınma önleme özelliği dahil olmak üzere optimum tribolojik özellikler göstermiştir. Yağlama mekanizmaları iki farklı disk üzerinde sırasıyla tribofilm oluşumuna ve TiO_2 nano parçacıklarının bilyalı rulman etkisine bağlanmıştır.

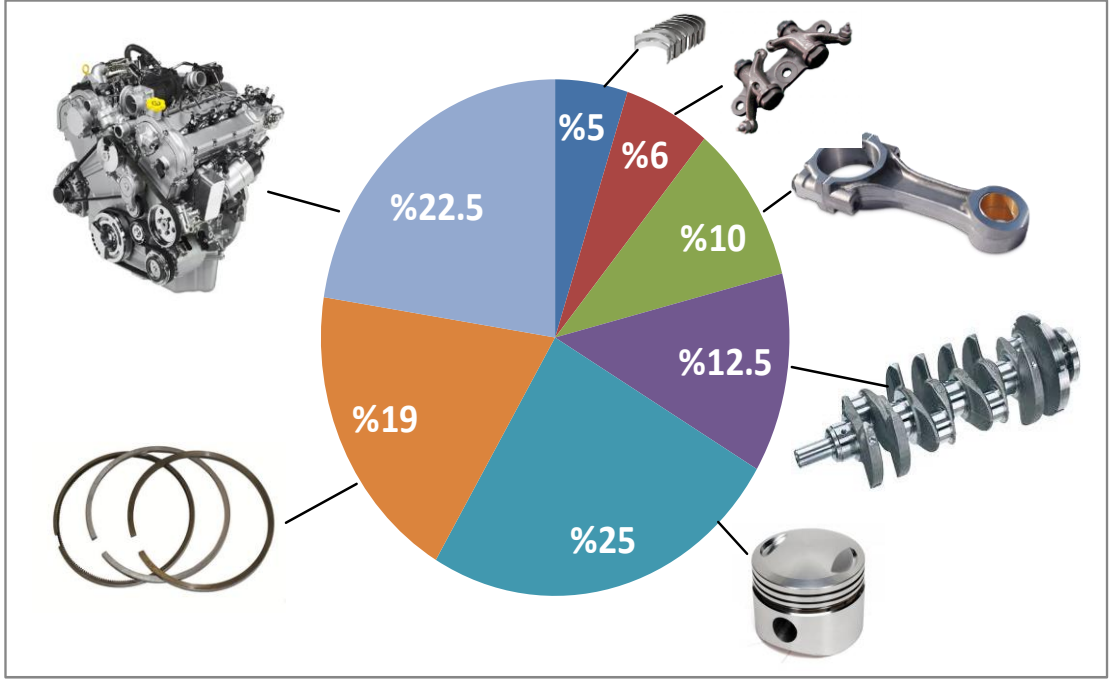


Şekil 1.9 Farklı yağlama koşulları altında ball-on-disk testleri esnasında ölçülen sürtünme katsayısı değerleri (a) zamana karşı (b) ortalama [166]

Temiz diskler kullanıldığında, TiO₂ nano katkılı su bazlı yağlayıcıların sürtünme katsayıları kuru ve sulu yağlama koşullarında elde edilen sürtünme katsayılarına göre daha düşüktür. Ağırlıkça %4 TiO₂ içeren yağlayıcı kullanımı ile en düşük sürtünme katsayısı ve tüm yağlama koşullarında en küçük bilya aşınması elde edilmiştir. Bu durum tribo film oluşumu ile ilişkilendirilir [166].

1.2 Tezin Amacı

İçten yanmalı motorların performansını ve yakıt tasarrufunu artırmak hususunda en önemli zorluk, sürtünme güç kayıplarının azaltılmasıdır. Toplam sürtünme kaybının yaklaşık %50 ila %65'i tek başına piston/segman sisteminden kaynaklanmaktadır.



Şekil 1.10 Motorlarda sürtünme kayıplarının dağılımı

Motorun genel verimini iyileştirmek, yağ ve yakıt tüketimini azaltmak, motor ömrünü arttırmak ve segman ile silindir gömleği arasındaki sürtünme kayıplarını düşürmek için hızlı bir çözüme ihtiyaç vardır. Son yıllarda, nanomalzemeler (Nano kaplamalar veya nano partiküller gibi) bilim dünyasında oldukça ilgi çekmektedir ve nadir görülen mekanik, elektriksel ve piezoelektrik özelliklerinden dolayı enerji ile ilgili birçok alanda kullanılmıştır.

Günümüzde taşıtlarda kullanılan segmanlar genellikle küresel dökme demirden imal edilmekte ve imalat sonrasında ise yüzeyleri işlenmekte gerekirse kaplama işlemine tabi tutulmaktadırlar. Literatür taramasına göre, ince taneli nanokaplamalar sertlik, basınç dayanımı, abrazyon aşınma direnci ve kazıma sürtünme direnci gibi yüzey özelliklerini iyileştirir. Kazıma, özellikle yağ filminin koptuğu andaki iki metal arasında temas yoluyla yüzey elementlerinin kütle hareketi olarak tanımlanan başlıca tribolojik bir konudur. Kaplamalar, motor dayanıklılık gereksinimlerini karşılamak için iyi mekanik ve termal şok direncine, iyi yapışmaya ve dökme demir alt tabakasının gerilme dayanımına sahip olması gerekir.

Dr. Liang'e göre (Daimler Benz) motorlarda yakıt enerjisinden elde edilen enerjinin %30'u egzoz gazları, %30'u silindir işi, %40'ı ise indike işe harcanmaktadır. Motorlarda mekanik kayıplar ise, indike işin yaklaşık %25'ini kapsamakta olup, toplam enerjinin %10'unu teşkil etmektedir. Dr. Liang'e göre, sürtünme kayıpları, mekanik kayıpların yaklaşık %72.5'una denk gelmekle beraber, geri kalan ise yağ pompası, su pompası, soğutma fanı, hidrolik pompalar vs. gibi yardımcı organlar tarafından harcanmaktadır [167].

En uygun nanokaplamanın tespit edilerek içten yanmalı motorlarda ve günümüz taşıtlarında kullanılmasıyla, sürtünme kayıplarında meydana gelen iyileşme ile regülasyon emisyonları (CO, CO₂, HC, NO_x ve is) ile yakıt tüketiminde önemli ölçüde iyileşme sağlanacağı öngörülmektedir.

İçten yanmalı motorlarda termik verimin iyileşmesi de oldukça önemlidir. Tribolojinin bu alanındaki en büyük zorluk, altında yatan mekanizma anlaşılacak sürtünme ve aşınmayı iyileştirici teknikler geliştirmektir. Birçok teknolojik gelişme bu amaçla gerçekleştirilmesine rağmen, günümüz teknolojisi hala motorlardaki sürtünme ve aşınmayı kontrol edecek sistemden oldukça uzaktır. Uygulanan yük altında temas halinde iken birbirine göre bağlı hareket eden iki katı vücudun deneysel olarak incelenmesinde, yüzeyler arasındaki aşınma; abrazyon, adhezyon, korozyon ve yüzey yorulması gibi çeşitli mekanizmadan dolayı meydana gelir.

Nano kaplamalı ürünler geniş bir uygulama yelpazesi için geliştirilmekte ve dağıtılmaktadır. Tanımlandığı gibi, nano kaplamalar bir su geçirmezlik malzemesi değil, daha ziyade hidrofobik ve yüzey temizlemesi kolay bir moleküler modifikasyondur. Parçacıklar aşınmaya, korozyona ve diğer zararlı elementlere karşı tam koruma sağlamak için fiziksel ve kimyasal olarak yüzeye bağlanır.

Ticari ve sivil havacılık, denizcilik ve savunma, cam imalatı, plastik, otomotiv ve hatta havacılık alanlarında günümüzde pek çok sanayi, kabiliyetleri nedeniyle nano kaplamaların gücünü kullanmaktadır.

Kaplamalar, özellikle nanokaplamalar otomotiv motorunun performansını ve ömrünü artırmaya yardımcı olabilir. Motorun genel verimliliğini artırmak, yağ tüketimini azaltmak, motor ömrünü uzatmak ve bu sürtünme kayıplarını azaltmak için acil bir ihtiyaç vardır. Motor parçaları korozyona karşı ciddi çevresel uyaranlara

maruz kalmaktadır. Oksitleyici atmosfer ve termal şokla karışan daha yüksek sıcaklık, yakıt ve yanma ürünleri korozyif ortamlara katkıda bulunur. İçten yanmalı (IC) motor, soğuk hava gibi belirli koşullar altında yanmanın bir ürünü olan sülfürik ve formik asidi bile üretir. Bu ortamda yüksek sıcaklık korozyonu ile mücadele etmek için kaplamalar en uygundur.

Aşınma direncini ve sürtünme direncini en azından değiştirdikleri dökme demir gömleği kadar iyi geliştirmek için bir kaplama uygulanır. İnce taneli tribolojik olarak fonksiyonel malzemeler sertlik, basınç dayanımı, aşınma direnci ve sürtünme direnci gibi yüzey özelliklerini iyileştirebilir.

Yüzeyleri kullanılan malzemelerin özelliklerine göre kaplamak için farklı teknikler kullanılır. Düşük maliyet ve yakıt tüketimi için istenen kullanım amacına uygun yöntemler şu şekilde sıralanabilir: Kimyasal buharlı bırakım (CVD), iyonla kaplama, fiziksel buharlı bırakım (PVD), alev püskürtme (FS), plazma püskürtme (PS), sol-gel (SG), elektron ışınıyla buharlaştırarak kaplama (EBE), reaktif iyon kaplama (IP), eşbasıncılı sıcak presleme ile kaplama ve elektroforetik biriktirme işlemi.

Yakıt tüketiminin azalması ve motor elemanlarının kullanım ömrünün uzaması, yanma odası elemanlarının uygun termal kaplaması ile sağlanabilir.

Termal püskürtme kaplamaları veya termal bariyer kaplamaları (TBC'ler) (genellikle zirkonya veya alumina-titanyum) çalışma sıcaklıklarını azaltmak ve/veya bileşenlerin dayanıklılığını artırmak için geleneksel olarak gaz türbinlerinin kanatlarına uygulanır [5].

Genel olarak motorlarda kullanılan kaplamalar CrN, TiN, DLC, grafen (türleri CVD, transfer, vs.) ve termal bariyer (seramik türleri) olarak sıralanabilir. Bu tez çalışmasında, bu kaplamalara ek olarak motor segmanları CNT, BN ve TiO₂ ile de kaplanarak 3D teknolojisi kullanılarak sürtünme ve aşınma yönünden incelenecektir.

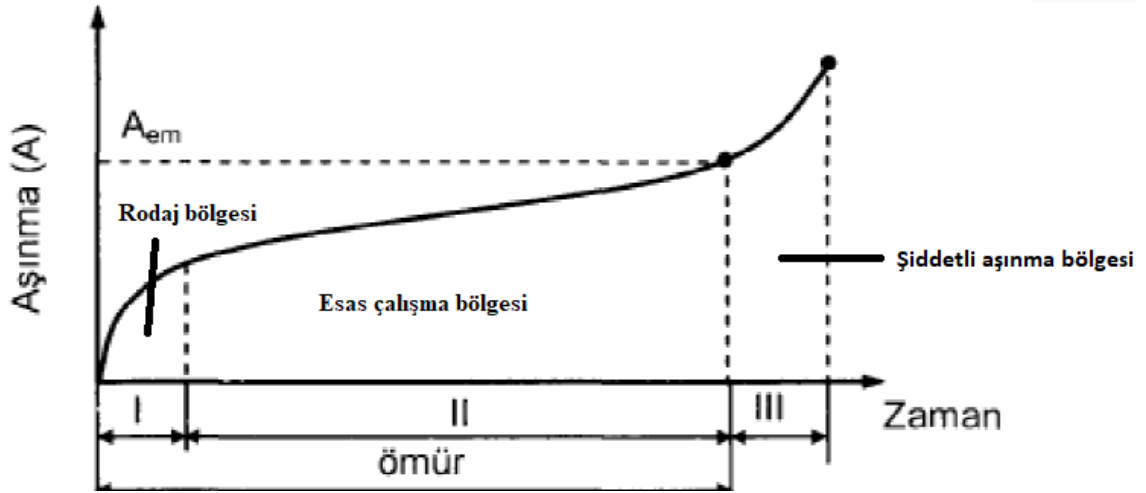
1.3 Bulgular

İçten yanmalı motorların verimliliği ve ömrünü artırmak için sürdürülen çalışmalar artarak devam etmektedir. Bu tez kapsamında, içten yanmalı motorlarda ömrü ve

verimi etkileyen en önemli parametrelerden sürtünme ve aşınmayı incelemek amacıyla Honda GX-270 motorunun motor segmanları kesilmiştir. Motor segmanları çok düşük sürtünme katsayıları ve yüksek aşınma dirençleri ile tanınan elmas gibi karbon (DLC), CNT, BN, TiO₂ ve grafen ile kaplanmıştır. Önce kaplamalı olmayan motor segmanları ardından nano kaplamalı (DLC, CNT, BN, TiO₂ ve grafen ile kaplanmış) motor segmanları Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ve tribometre kullanılarak sürtünme ve aşınma yönünden irdelenecektir. Bu tez kapsamında deneylerde kullanılan nano kaplamalar aynı zamanda nano partiküllerdir, motor yağına eklenen nano partiküllerin aynı zamanda nano kaplama olarak kullanıp kullanılamayacağı ve bu nano kaplamaların kullanımının motor verimliliğine olası etkileri araştırılacaktır.

2.1 Aşınma

Sürtünen yüzeyde malzemenin, mekanik etkilerle istenmeyen bir şekilde kopması ve ana parçalarından ayrılması aşınma olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 2.1 Aşınmanın zamana bağlı değişimi

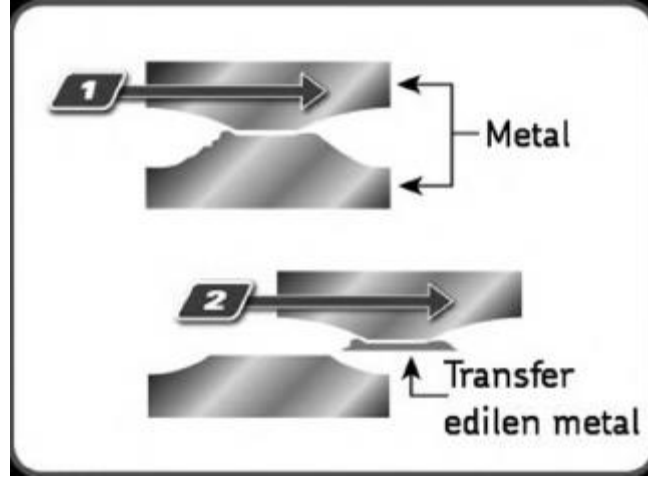
Aşınma temas yüzeylerinde dış etkiler altında oluşan fiziksel ve kimyasal değişimlerin sonucunda ortaya çıkmaktadır.

2.2 Adhezif Aşınma

İki metal yüzeyi basınç altında birbirlerine sürtündüklerinde temas yüzeylerinde bulunan karşılıklı pürüzler birbiriyle kaynaklanır. Hareketin devam etmesi kaynaklanmış olan pürüzlerden daha düşük mukavemete sahip olanın kopmasına ve karşı yüzeye yapışmasına neden olur. Bu prosesin çalışma koşullarında birçok kez tekrarlanmasıyla malzeme kaybı kendini hissettirecek boyutlara ulaşır. Yapışma aşınması olarak da isimlendirilen adhezif aşınma en sık rastlanılan aşınma türü olmasına karşın, hasarları hızlandırıcı etkide bulunmaz [168].

Adhezif aşınma pürüz tepelerindeki lokal kaynak bağları sonucunda başlar. Birbirine göre izafi hareket eden malzemelerin türleri bu kaynak bağının

mukavemetini çok etkiler. Tabakalar arası kristal yapı, doğal oksit filmi oluşumu gibi bütün parametreler adhezif aşınmayı etkiler.



Şekil 2.2 Adhezif aşınma [169]

Kuru ve sınır sürtünme halindeki fonksiyon yüzeylerinin birbiri ile temas halinde olan pürüz tepelerinde, özellikle akma sınırı aşıldığında kuvvetli bir adhezif veya sıcaklık etkisi ile teşvik edilen kohezif bir bağ meydana gelir. Bu bağ, metal değme yüzeyleri ne kadar temiz ise o oranda kuvvetlidir. Pürüz tepecikleri arasında bu tür bağlar oluşmuş olan iki yüzey birbirine göre hareket ettirildiğinde bağlanmış tepeciklerin birbirinden ayrılması dört şekilde olabilir (Şekil 2.3):

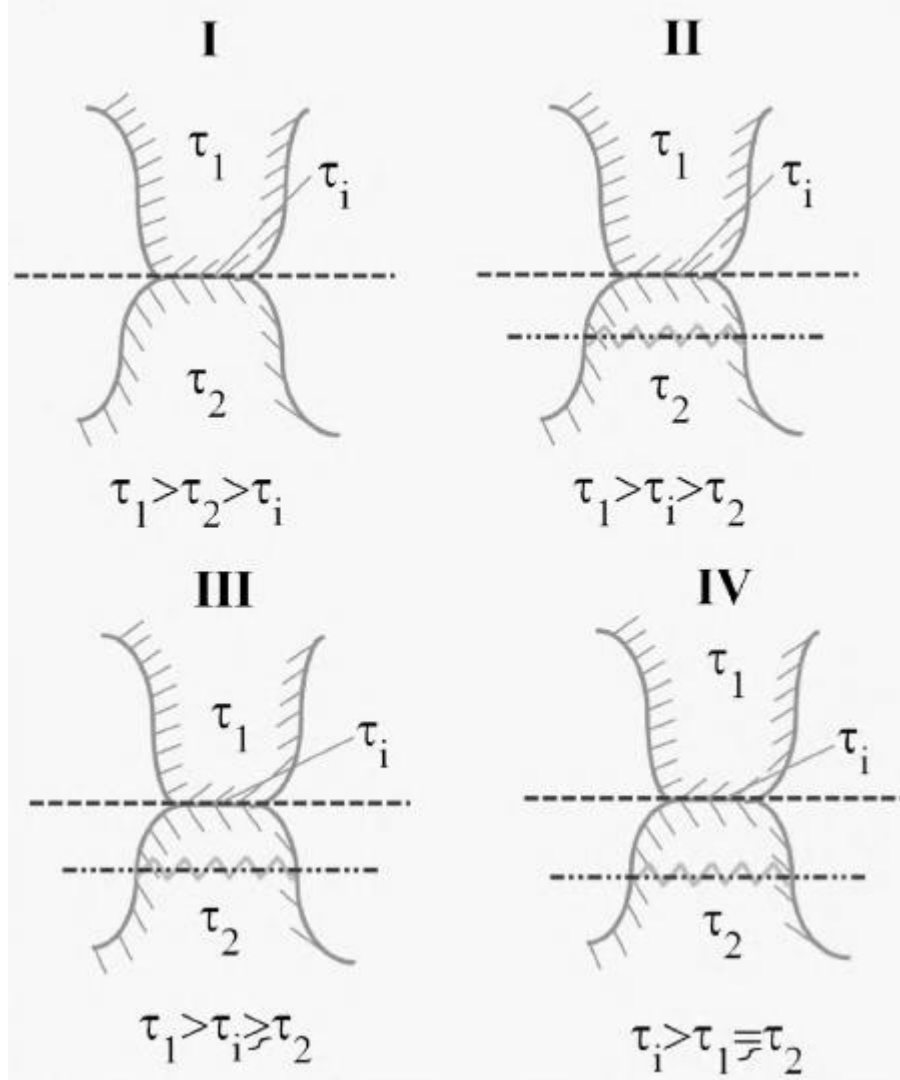
I-Ara yüzeyin kesme direnci malzemelerin kesme dirençlerinden (τ_1 , τ_2) daha küçüktür. Bu durumda, ayrılma ara yüzeyden (veya oluşan kaynak bağından) olur. Bu tür adhezif aşınmada aşınma miktarı en azdır.

II-Ara yüzeyin kesme direnci, 1 numaralı malzemeden küçük, 2 numaralı malzemeden büyüktür.

III-Ara yüzeyin kesme direnci, yüzey malzemelerinin birinden küçük, diğerinden ise çok az farklı, heterojen yapıda olan ikinci malzemeye ise yer yer eşit olabilir. Bu durumda, yumuşak malzemeden sert malzemeye bir madde geçişi vardır. Ancak bazı noktalarda parçacık kopmaları görülmektedir. Madde geçişi yanında madde ayrılmaları suretiyle daha büyük bir madde kaybı ortaya çıkacaktır.

IV-Ara yüzeyin kesme direnci her iki yüzey malzemesinin kesme direncinden büyüktür. Ayrıca, kuvvetli bir plastik şekil değişimi sonucu pekleşmiş ve kırılğan

hale gelmiştir. Belirli bir kayma mesafesinde yüzeyden kopup ayrılacak, kuvvetli bir aşındırıcı olarak yüzeyler arasında adhezif aşınmaya ek olarak bir abrazif aşınmaya neden olacaktır. Bunun neticesinde, her iki yüzeyde de kuvvetli bir aşınma meydana gelecektir [169].



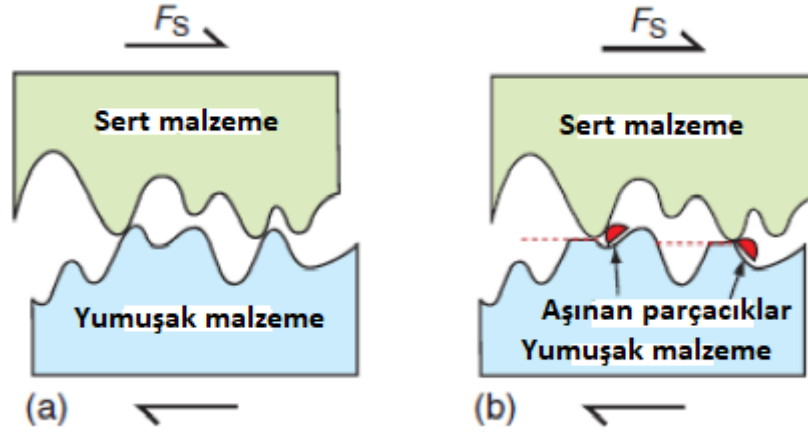
Şekil 2.3 Adhezif aşınma sonucu bağlanmış tepeciklerin birbirinden ayrılma şekilleri [169]

Adhezif aşınmayı en aza indirmek için alınacak önlemler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Temas yüzeyleri yağlanmalıdır,
- Birbirleri içerisinde çözünürlüğü olmayan metaller tercih edilmelidir,
- Temas yüzeyleri mümkün olduğunca düz ve pürüzsüz olmalıdır,
- Metal-metal temasının önüne geçmek için ara yüzeyde film veya kaplama bulunmalıdır.

2.3 Abrazif Aşınma

Sert, keskin bir parçanın daha yumuşak bir parçadan talaş kaldırmasına abrazif aşınma denmektedir. Abrasif aşınma biri diğerinden daha sert ve pürüzlü olan metal yüzeylerinin birbirleriyle temas halindeyken kayması sırasında meydana gelir.



Şekil 2.4 Abrasif aşınma [170]

Abrasif aşınmayı en aza indirmek için alınacak önlemler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Yüzey sertliğini artırmak: Abrasif aşınmanın engellenmesinde en etkili yol olmakla birlikte malzemenin gevrek olup kırılma riski artar.
- Abrasif parçacıkları uzaklaştırmak,
- Aşınmış parçaları değiştirmek: Abrasif aşınmaya uğrayacak parçanın kolay bir şekilde değiştirilmesine imkan verecek tasarımların yapılmasıyla aşınma ortadan kaldırılır [170].

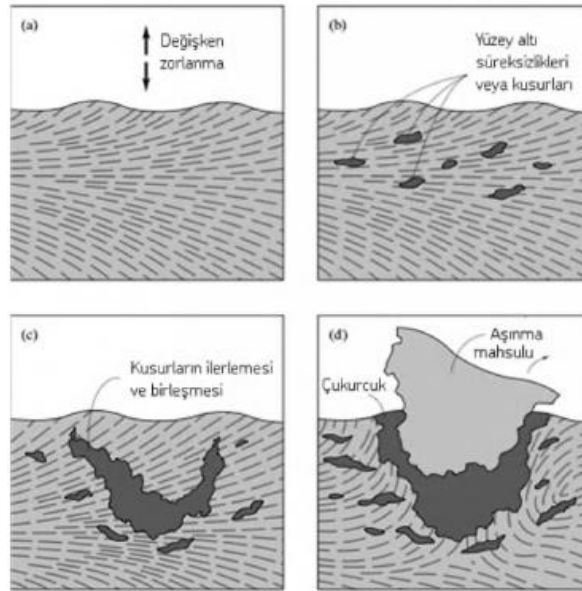
2.4 Yorulma Aşınması

Noktasal veya çizgisel temas halinde olan fonksiyon yüzeyleri arasında meydana gelir. Çok küçük değme noktalarında değişken yük etkisi altında zamanla pul şeklinde malzeme parçacıkları yüzeyden ayrılarak geriye çukurcuklar bırakır.

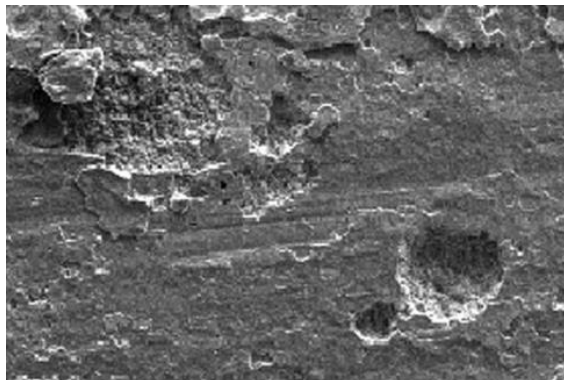
Bazı araştırmacılar pitting'in mikro değme noktalarındaki değişken zorlamalar ve bunun sonucunda ortaya çıkan yorulma neticesinde meydana geldiğini ileri sürmektedir.

2.4.1 Pitting Aşınmasının Aşamaları

- Yüzey altındaki tabakalarda değişken zorlanma sonucu dislokasyonların birikmesi,
- Maksimum Hertz gerilmesi bölgesinde veya civarındaki süreksizliklerde (tane sınırı, önceden mevcut porozite vb.) boşluk veya mikro çatlak oluşumu,
- Yüzey altındaki tabakada mikro çatlakların ilerlemesi,
- Çatlakların birleşerek yüzeye doğru ilerlemesi,
- Pullanma ve çukurcukların oluşumu,
- Hasarın yakın bölgelere doğru yayılması,
- Yüzeyde veya yüzeyin altından önemli miktarda aşınma mahsulünün oluşarak, nihai hasara neden olması [169].



Şekil 2.5 Pitting oluşum aşamaları [169]



Şekil 2.6 Pittinge maruz kalmış bir yüzeyin optik görüntüsü

2.4.2 Tabakalı (Delaminasyon) Aşınması

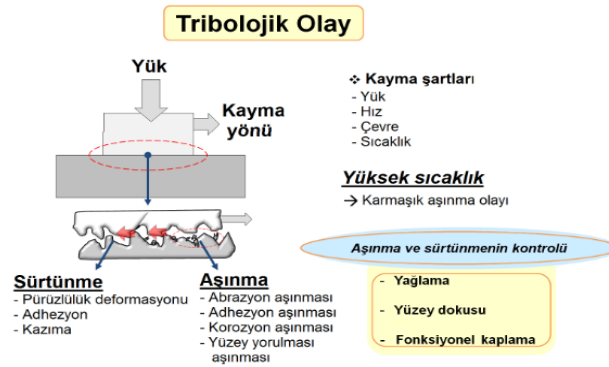
Bir yorulma aşınması türü olan tabakalı (delaminasyon) aşınma, yüzey pürüzlerinin kayma noktalarında birbirleri üzerinde devamlı hareketi sonucu olan bir aşınma türüdür. Yüzeyin altında küçük çatlaklar meydana gelmesi görülen bir durumdur. Temas noktasının hemen altındaki üç eksenli basma gerilmesinden dolayı, çatlak çekerdekleme meydana gelir. Devamlı yüklemeler ve deformasyon prosesi çatlakların büyümesine ve komşu çatlaklar ile birleşmesine sebep olmaktadır.

2.5 Eroziv Aşınma

Genel yapısı itibarıyla abrazif aşınmaya benzemektedir. Abrazif aşınmadan farkı, eroziv aşınmada ana malzemenin kendinden daha sert, küçük boyutlu parçacıklar tarafından tekrarlanan bir şekilde darbe yüküne maruz bırakılmasıdır. Parçacıkların şekli, parçacık boyutu, parçacıkların sertliği, hız ve sıcaklık eroziv aşınmayı etkileyen faktörlerdir [169].

Temel aşınma mekanizmalarına ek olarak en çok bilinen aşınma mekanizmaları şunlardır:

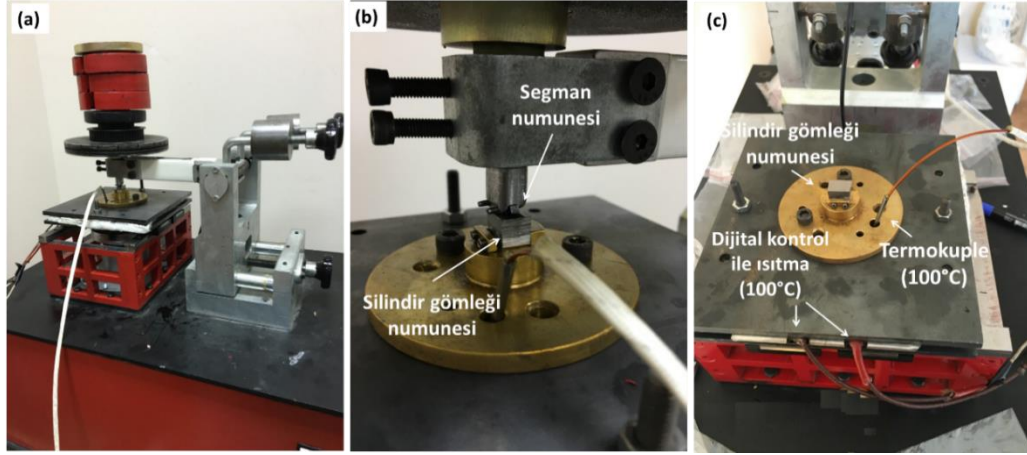
- Titreşimli aşınma, kabarıp dökülme (fretting),
- Kazıma, sürtme (scuffing),
- Oyarak (cavitation),
- Çözünme aşınması (Solution wear),
- Erime aşınması (Melt wear),
- Çarpışma aşınması (Impact wear),
- Yaygın aşınma (Diffusive wear),
- Hafif aşınma (Mild wear),
- Şiddetli aşınma (Severe wear).



Şekil 2.7 Bir Tribolojik Olayın Şeması

3.1 Testlerde Kullanılan Donanımlar ve Özellikleri

Nanokaplamalı motor segmanları tribometre cihazında (Şekil 3.1) ve AFM cihazında (Şekil 3.2) test edilmiştir.



Şekil 3.1 (a) Test donanımının genel görünümü (b) Test donanımına monte edilen numuneler (c) Isınma kontrolü ve sıcaklık ölçümleri



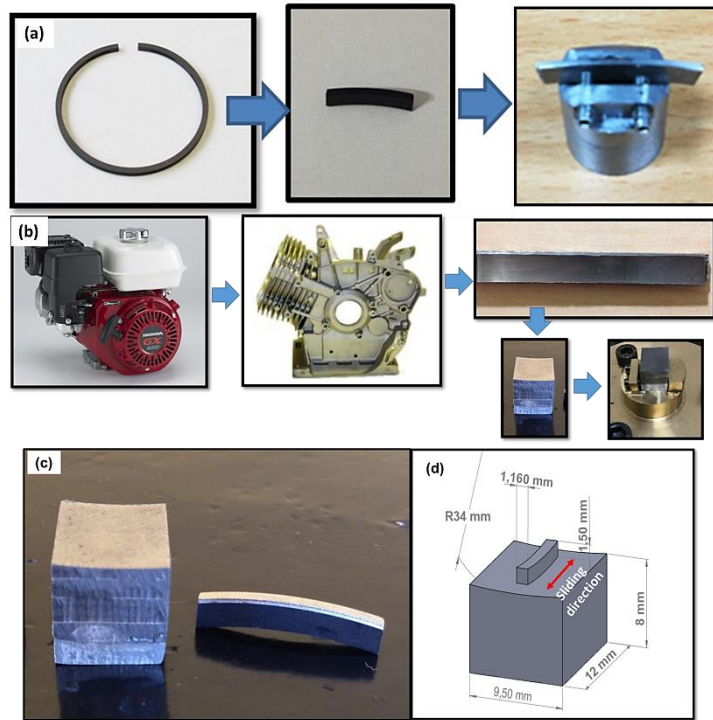
Şekil 3.2 Nanosurf easyScan 2 AFM test cihazı

Tablo 3.1 Tribometre cihazı deneysel parametreler

Yük (N)	60
Frekans (Hz)	2
Strok (mm)	10
Yağ sıcaklığı	99 °C
Test süresi (dakika)	21

Tribometre deneyleri, 60 N yük altında, 2 Hz frekansta, 21 dakika boyunca, 99 °C yağ sıcaklığında yapılmıştır.

3.2 Deney Öncesi Yapılan Çalışmalar



Şekil 3.3 Motor segmanı ve silindir numunelerinin hazırlanması (a) Honda GX-270 motorundan kesilen motor segmanı (b) silindir (c) ve (d) temas pozisyonu ve kayma yönüne göre numuneler

Honda GX-270 motorunun motor segmanları Şekil 3.3’de gösterildiği gibi kesilerek tribometrede ve AFM cihazında test edilmek üzere hazır hale getirilmiştir.

Deneylerde kullanılmak üzere, Honda GX-270 motorunun ikinci kompresyon segmanı seçilmiştir.



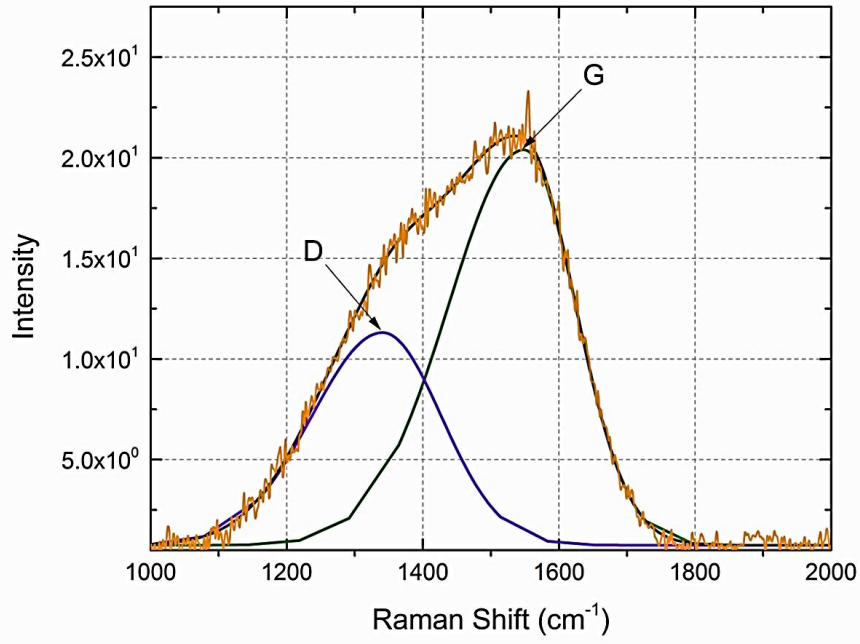
Şekil 3.4 (a) Orijinal ikinci motor segmanı Baryum (Ba) ile kaplıdır (b) İkinci motor segmanı asidik yöntem ile baryumdan arındırılmıştır.

Yetkili firmadan orijinal yedek parça olarak satın alınan ikinci motor segmanının korozyona karşı raf ömrünü artırmak amacıyla magnezyum alaşımlı Baryum (Ba) ile kaplanmış olduğu tespit edilmiştir, asidik yöntem ile motor segmanı baryumdan arındırılarak DLC (BN, TiO₂, CNT, grafen) ile kaplanmıştır. İkinci motor segmanının baryumdan arındırılması esnasında uygulanan kimyasal yöntem yüzeye zarar vermeksizin yürütülmüştür.

Kaplanmış motor segmanı %50 su, %50 HCl ve %1 asit inhibitörü içerisinde 3 dakika tutulmuştur. Ardından, motor segmanı %2 pas önleyici Z101 çözeltisi ile durulanmıştır. Birkaç dakika sonra ise su antistatik kağıt ile kurutulur. Kaplama tamamen çıkarılır ve metalik görünüm ortaya çıkar.

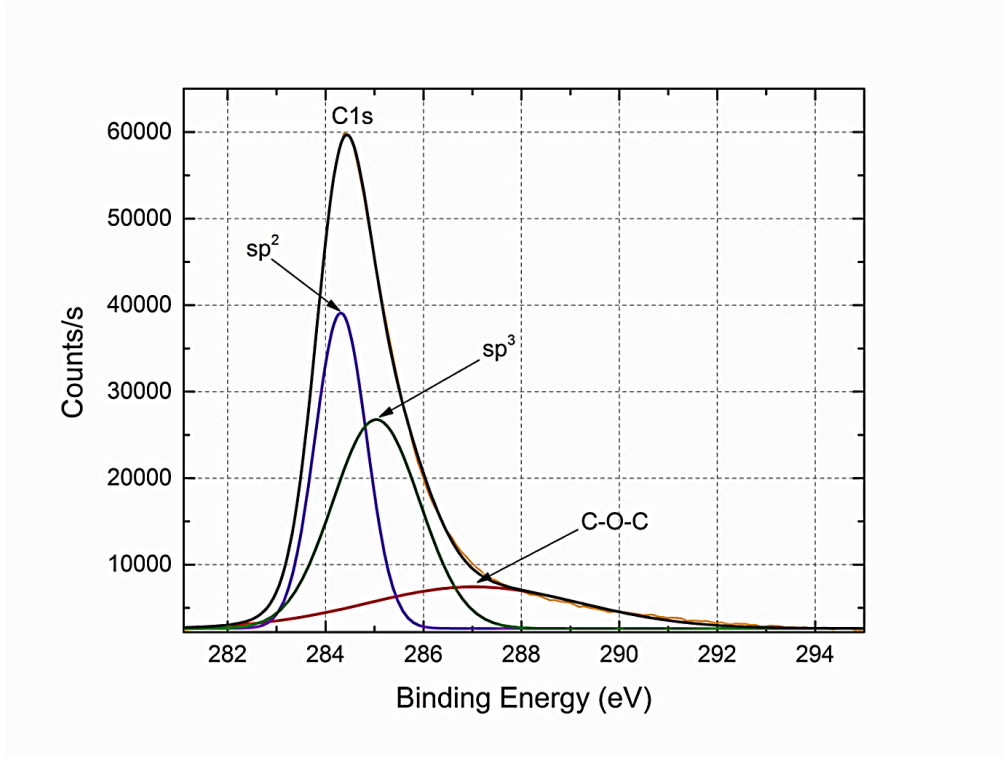
BN, TiO₂, CNT magneton püskürtme yöntemi ile kaplanmıştır. Grafen CVD tekniği ile kaplanmıştır.

DLC kaplama magneton püskürtme yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Kaplanan DLC'nin kalınlığı yaklaşık 200nm'dir. DC güç akımı 250 mA olarak ayarlanmıştır. Sinyal genişliği ve frekansı sırayla 14 ve 40 KHZ olarak ayarlanmıştır. Karbon kaynağı olarak grafit hedefi (%99.99 saflıkta) kullanılmıştır. Kaplamadan önceki baz basınç 5×10^{-6} Torr'dur ve kaplama sırasında 2×10^{-3} Torr çalışma basıncında 6.8 SCCM Argon gazı sağlanmıştır.



Şekil 3.5 DLC kaplamalı ikinci motor segmanının Raman spektroskopisi

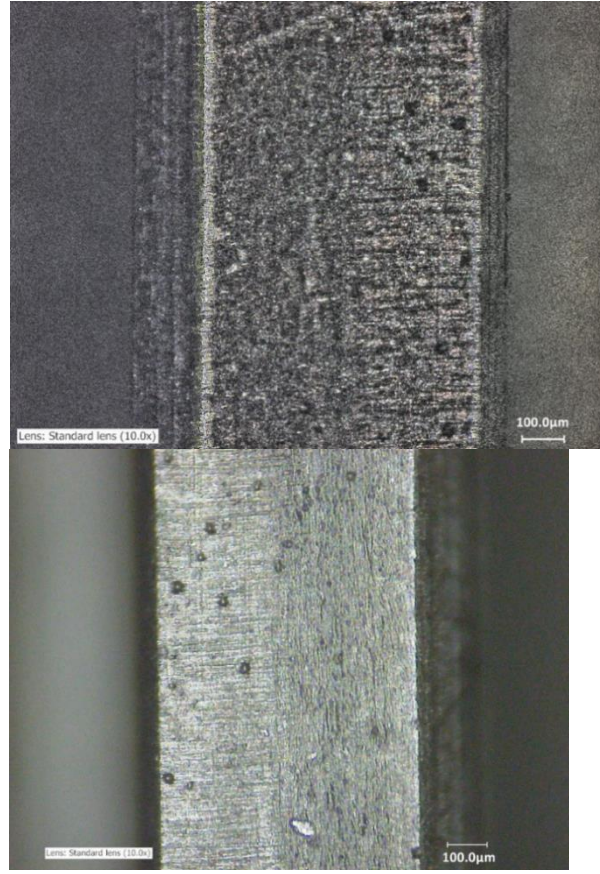
DLC kaplamanın nano yapı özellikleri ve kimyasal durumu Raman ve XPS kullanılarak elde edilmiştir. Amorf karbon için 1000 cm^{-1} ve 1800 cm^{-1} arasında bulunan tipik bant aralığı Raman analizinde tespit edilmiştir. Bu geniş bant iki bileşenden oluşmaktadır: Yaklaşık 1326 cm^{-1} 'de bulunan birinci bileşen (D bileşeni) düzensiz sp^2 hibritlerini ve segmanların “nefes alma” titreşim modunu temsil etmektedir. 1520 cm^{-1} 'de bulunan ikinci bileşen (G bileşeni) sp^2 karbon zinciri çiftlerinin “gerilme” modunu temsil etmektedir. D ve G bileşenlerinin gerilim oranı $I(D) / I(G)$ yaklaşık 0.54'tür.



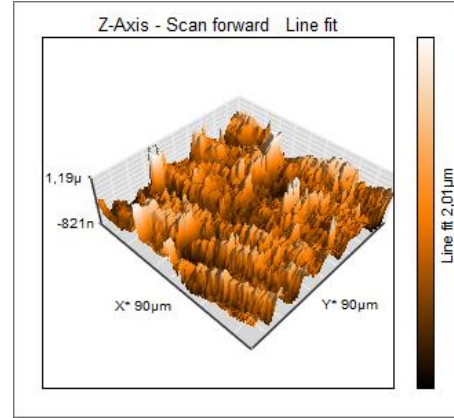
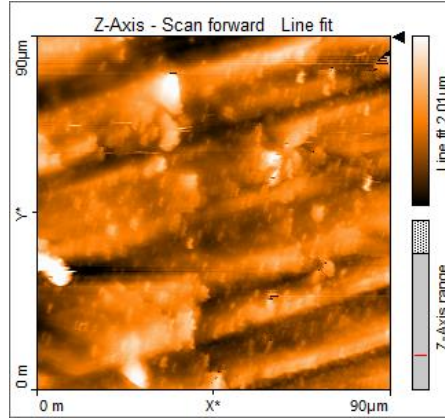
Şekil 3.6 DLC kaplamalı ikinci motor segmanının XPS grafiği

sp^3 içeriğinin yüzdesi XPS verileri kullanılarak doğrudan tahmin edilmiştir. C1s'in pik noktasının terse dönmesiyle birlikte üç bileşen ortaya çıkmıştır. İlk iki bileşen yaklaşık 284.3 ve 285.1 eV'de sırasıyla sp^2 ve sp^3 karbon bağlarını temsil etmektedir [171]. Üçüncü bileşen 286.5 eV'de karbon-oksijen bileşiklerinden ortaya çıkmaktadır [172]. Hesaplamalar DLC kaplamanın %42 oranında bir sp^3 içeriğine sahip olduğunu göstermiştir.

3.3 Test Öncesi İkinci Motor Segmanının (Silindir) Optik Olarak İncelenmesi



(a) (b)



(c)

Şekil 3.7 (a) Test öncesi kaplamasız ikinci motor segmanı (silindir) (b) Test öncesi DLC kaplamalı ikinci motor segmanı (silindir) (c) Kaplamasız ikinci motor segmanının (silindir) AFM analizi

Şekil 3.7 (a)'da test öncesi kaplamasız ikinci motor segmanı, (b)'de test öncesi DLC kaplamalı ikinci motor segmanının SEM görüntüleri paylaşılmıştır. (c)'de Honda

GX270 motorunun kaplamasız ikinci motor segmanının (silindir) AFM analiz sonuçlarını göstermektedir.

Tablo 3.2 Honda GX270 motorunun kaplamasız ikinci motor segmanının (silindir) alan pürüzlülük değerleri

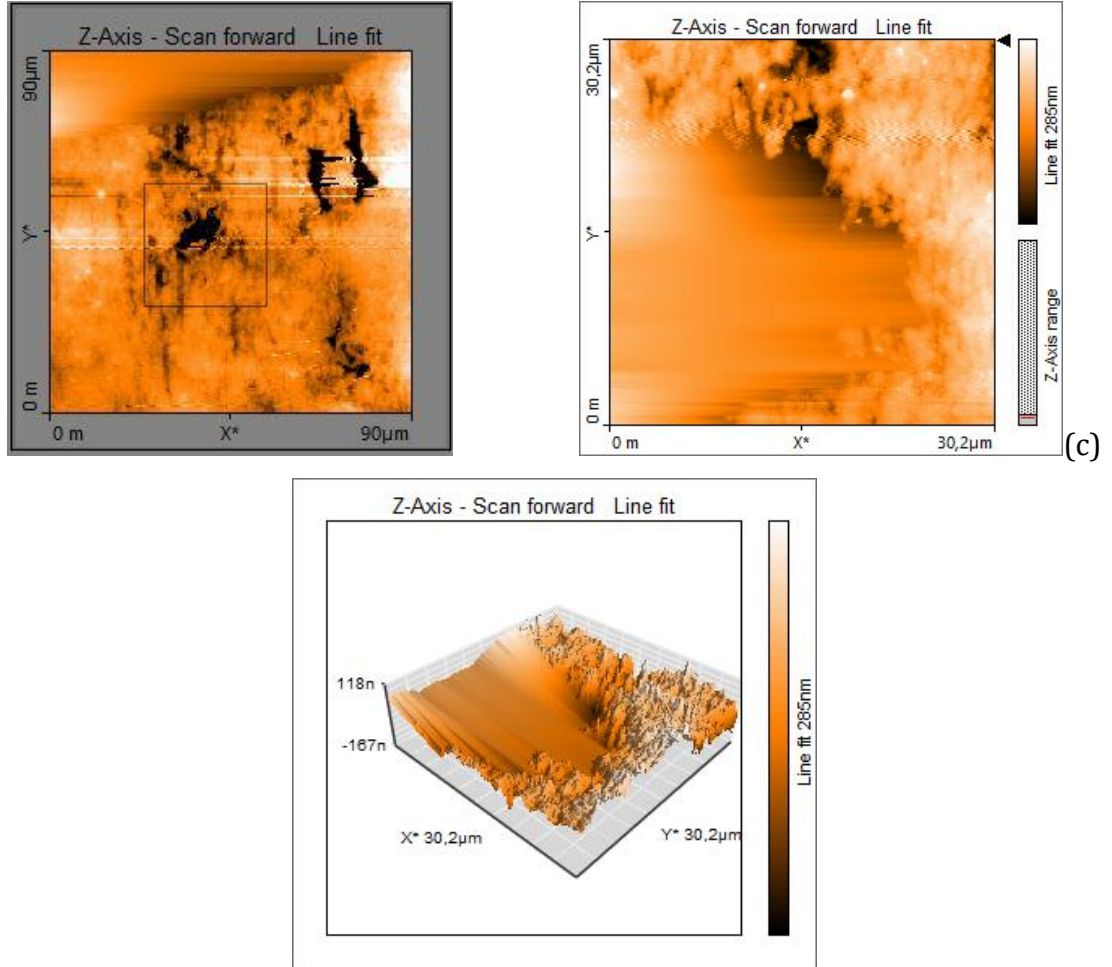
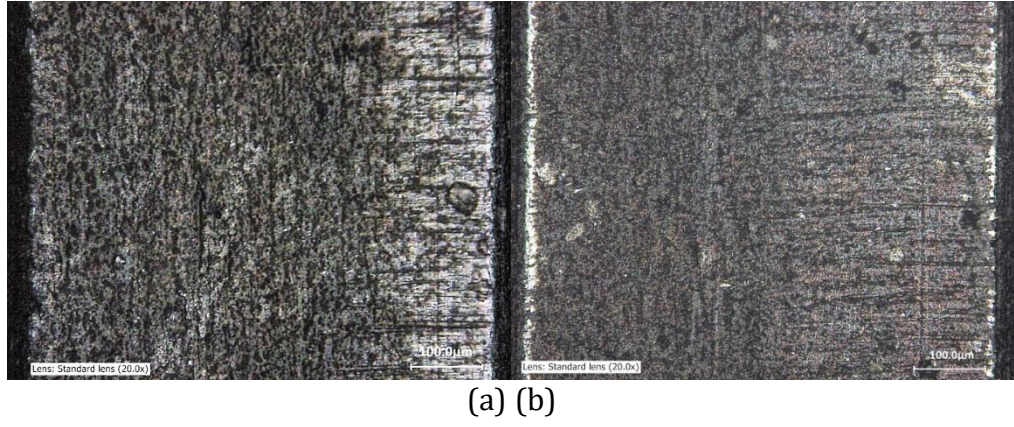
Alan Pürüzlülüğü	
Alan	8,163 nm ²
Sa	267,59 nm
Sq	355,71 nm
Sy	7,709 nm
Sp	3,4056 nm
Sv	-4,3034 nm

Tablo 3.2 Honda GX270 motorunun kaplamasız ikinci motor segmanının (silindir) alan pürüzlülük değerlerini göstermektedir. 8.163 nm² alanda Sa 267.59 nm olarak ölçülmüştür.

Tablo 3.3 Honda GX270 motorunun kaplamasız ikinci motor segmanının (silindir) çizgi boyunca pürüzlülük değerleri

Çizgi Boyunca Pürüzlülük	
Ra	140,72 nm
Rq	175,39 nm
Ry	889,5 nm
Rp	583,12 nm
Rv	-306,39 nm
Rm	-18,626 fm

Tablo 3.3 Honda GX270 motorunun kaplamasız ikinci motor segmanının (silindir) çizgi boyunca pürüzlülük değerlerini göstermektedir. Ra 140.72 nm olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.8 (a) Test öncesi kaplamasız ikinci motor segmanı (b) Test öncesi DLC kaplamalı ikinci motor segmanı (c) Kaplamasız ikinci motor segmanının AFM analizi

Şekil 3.8 (a)'da test öncesi kaplamasız ikinci motor segmanı, (b)'de test öncesi DLC kaplamalı ikinci motor segmanının SEM görüntüleri paylaşılmıştır (100x büyütülmüştür). (c)'de Honda GX270 motorunun kaplamasız ikinci motor segmanının AFM analiz sonuçlarını göstermektedir. İkinci motor segmanının

kaplaması X20 asidik yöntemiyle kaldırılmıştır.

Tablo 3.4 Honda GX270 motorunun kaplamasız ikinci motor segmanının alan pürüzlülük değerleri

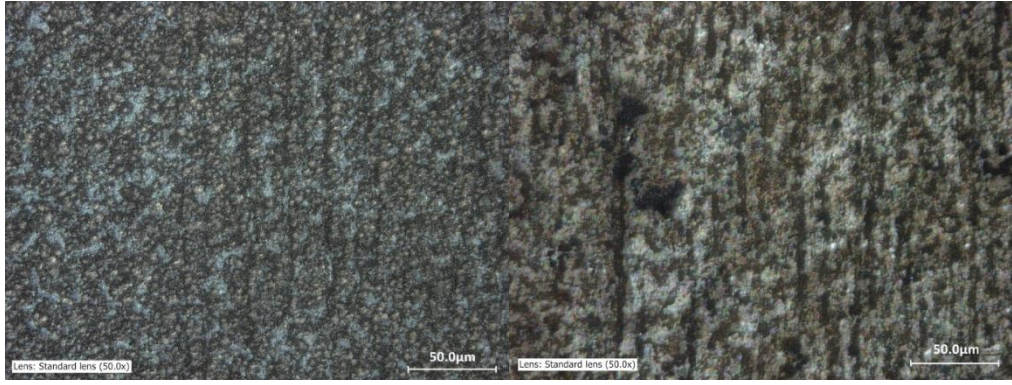
Alan Pürüzlülüğü	
Alan	921,3 nm ²
Sa	32,546 nm
Sq	42,895 nm
Sy	445,37 nm
Sp	186,65 nm
Sv	-258,71 nm

Tablo 3.4 Honda GX270 motorunun kaplamasız ikinci motor segmanının alan pürüzlülük değerlerini göstermektedir. 921.3 nm²'lik alanda Sa 32.546 nm olarak ölçülmüştür.

Tablo 3.5 Honda GX270 motorunun kaplamasız ikinci motor segmanının çizgi boyunca pürüzlülük değerleri

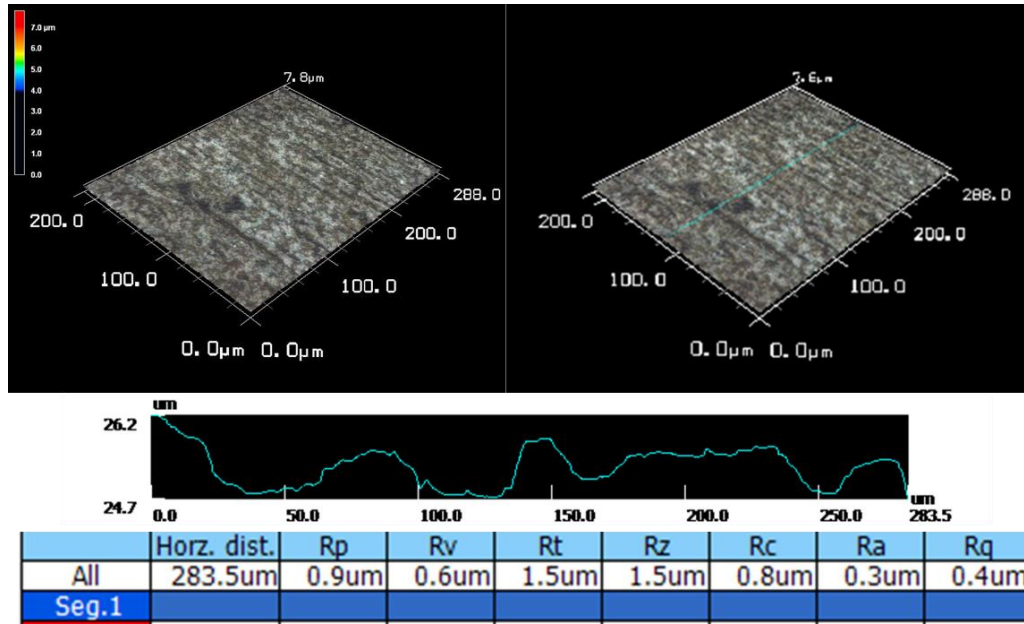
Çizgi Boyunca Pürüzlülük	
Ra	45,426 nm
Rq	52,973 nm
Ry	207,43 nm
Rp	112,37 nm
Rv	-95,058 nm
Rm	-18,626 fm

Tablo 3.5 Honda GX270 motorunun kaplamasız ikinci motor segmanının çizgi boyunca pürüzlülük değerlerini göstermektedir. Ra 45,426 nm olarak ölçülmüştür.



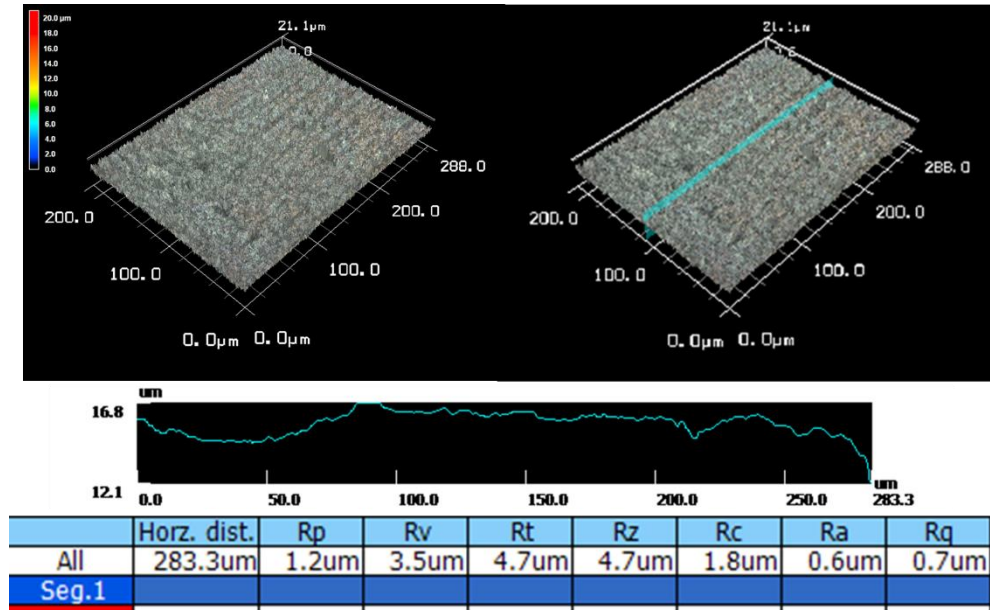
Şekil 3.9 (a) Test öncesi kaplamasız ikinci motor segmanı (b) Test öncesi DLC kaplamalı ikinci motor segmanı

Şekil 3.9 (a)'da test öncesi kaplamasız ikinci motor segmanı, (b)'de test öncesi DLC kaplamalı ikinci motor segmanının SEM görüntüleri paylaşılmıştır (50x büyütülmüştür). İkinci motor segmanının kaplaması X50 asidik yöntemiyle kaldırılmıştır.



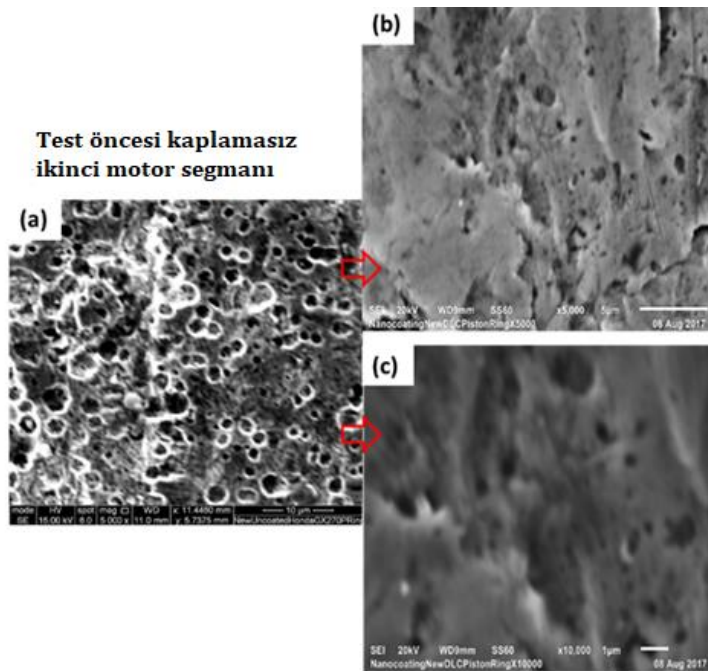
Şekil 3.10 Test öncesi Honda GX270 motorunun kaplanmamış ikinci piston segmanının 3D yüzey topoğrafyası ve pürüzlülüğü

Şekil 3.10 test öncesi Honda GX270 motorunun kaplanmamış ikinci piston segmanının 3D yüzey topoğrafyasını ve pürüzlülüğünü göstermektedir. Dijital mikroskop ile Ra 0.3 µm olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.11 Test öncesi Honda GX270 motorunun DLC ile kaplanmış ikinci motor segmanının 3D yüzey topoğrafyası ve pürüzlülüğü

Şekil 3.11 test öncesi Honda GX270 motorunun DLC ile kaplanmış ikinci motor segmanının 3D yüzey topoğrafyası ve pürüzlülüğünü göstermektedir. Dijital mikroskop ile Ra 0.6 μm olarak ölçülmüştür.

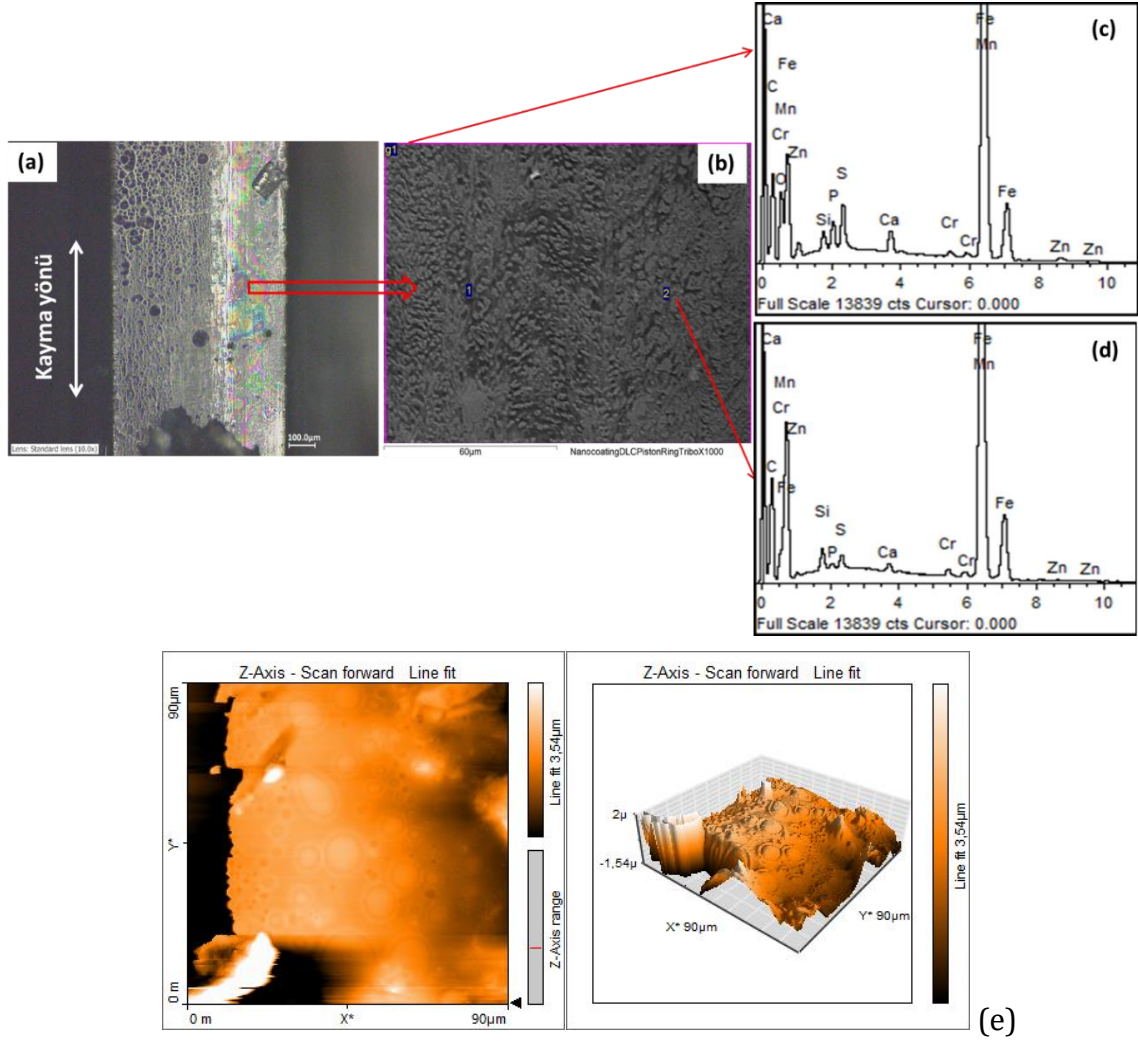


Şekil 3.12 (a) Test öncesi kaplamasız ikinci motor segmanının optik mikroskop, (b) ve (c) SEM görüntüleri

Şekil 3.12 (a)'da test öncesi kaplamasız ikinci motor segmanının optik mikroskop

görüntüsü, (b) ve (c)'de ise test öncesi ikinci motor segmanının SEM görüntüleri paylaşılmıştır.

3.4 DLC Kaplamalı İkinci Motor Segmanının Optik Olarak İncelenmesi



Şekil 3.13 (a), (b) Honda GX270 motorunun DLC kaplamalı ikinci motor segmanının tribometre test sonuçları (c), (d) SEM-EDX analizi (e) Honda GX270 motorunun DLC 200nm kaplamalı ikinci motor segmanının AFM analizi

Şekil 3.13 (a), (b) 'de Honda GX270 motorunun DLC kaplamalı ikinci motor segmanının tribometre test sonuçları paylaşılmıştır. (c) ve (d)'de orijinal yüzey iyi korunmuştur ve yapısında C, Si, P, S, Ca, Cr, Mn, Fe ve Zn tespit edilmiştir. (e)'de Honda GX270 motorunun DLC 200nm kaplamalı ikinci motor segmanının AFM analiz sonucunu göstermektedir.

Tablo 3.6 Honda GX270 motorunun DLC 200nm kaplamalı ikinci motor segmanının alan pürüzlülük değerleri

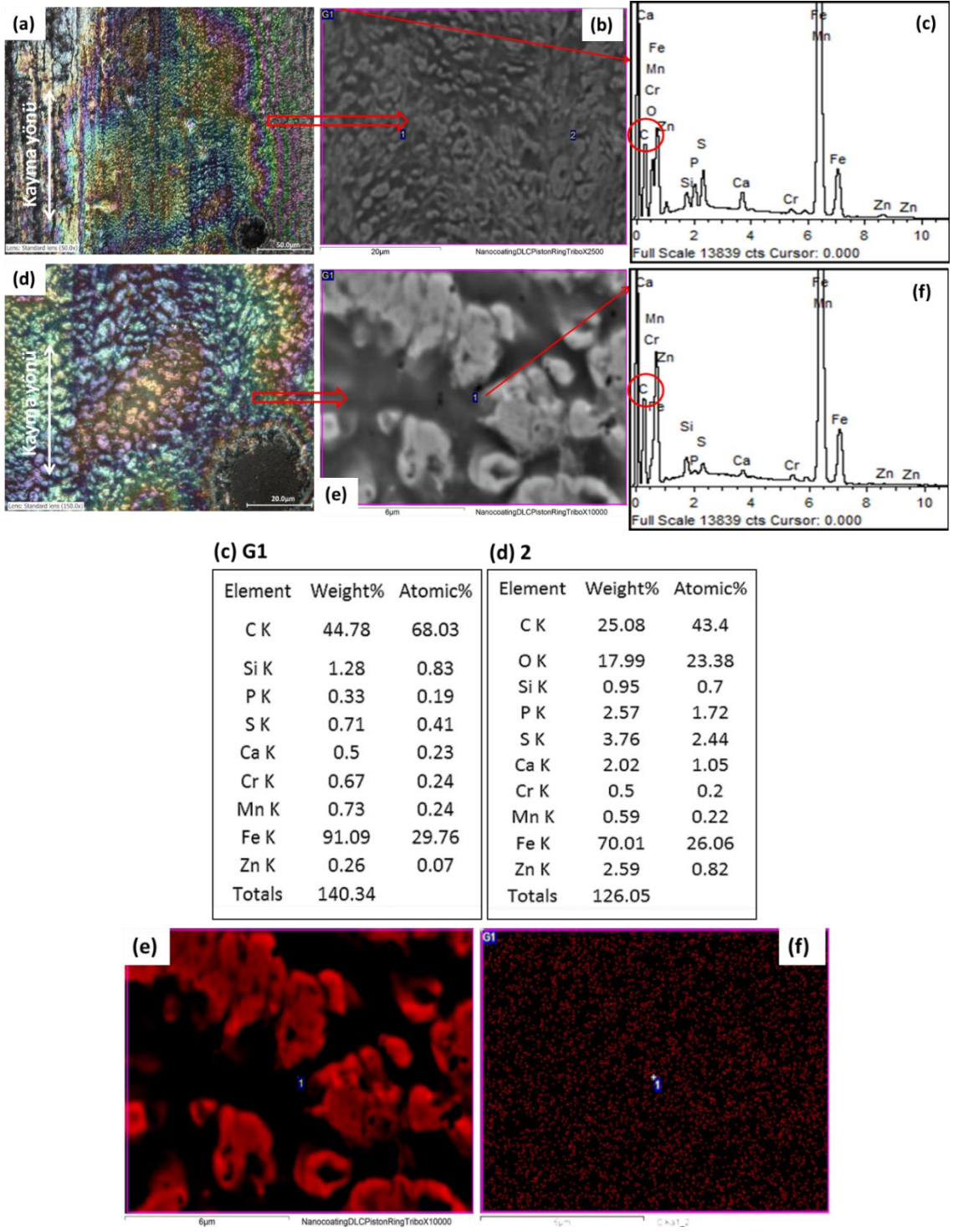
Alan Pürüzlülük Değerleri	
Alan	8,163 nm ²
Sa	784,21 nm
Sq	1095,8 nm
Sy	10 µm
Sp	5 µm
Sv	-5 µm

Tablo 3.6, DLC 200nm kaplamalı ikinci motor segmanının alan pürüzlülük değerlerini göstermektedir. 8.163 nm²'lik alanda Sa 784.21 nm olarak ölçülmüştür.

Tablo 3.7 Honda GX270 motorunun DLC 200nm kaplamalı ikinci motor segmanının çizgi boyunca pürüzlülük değerleri

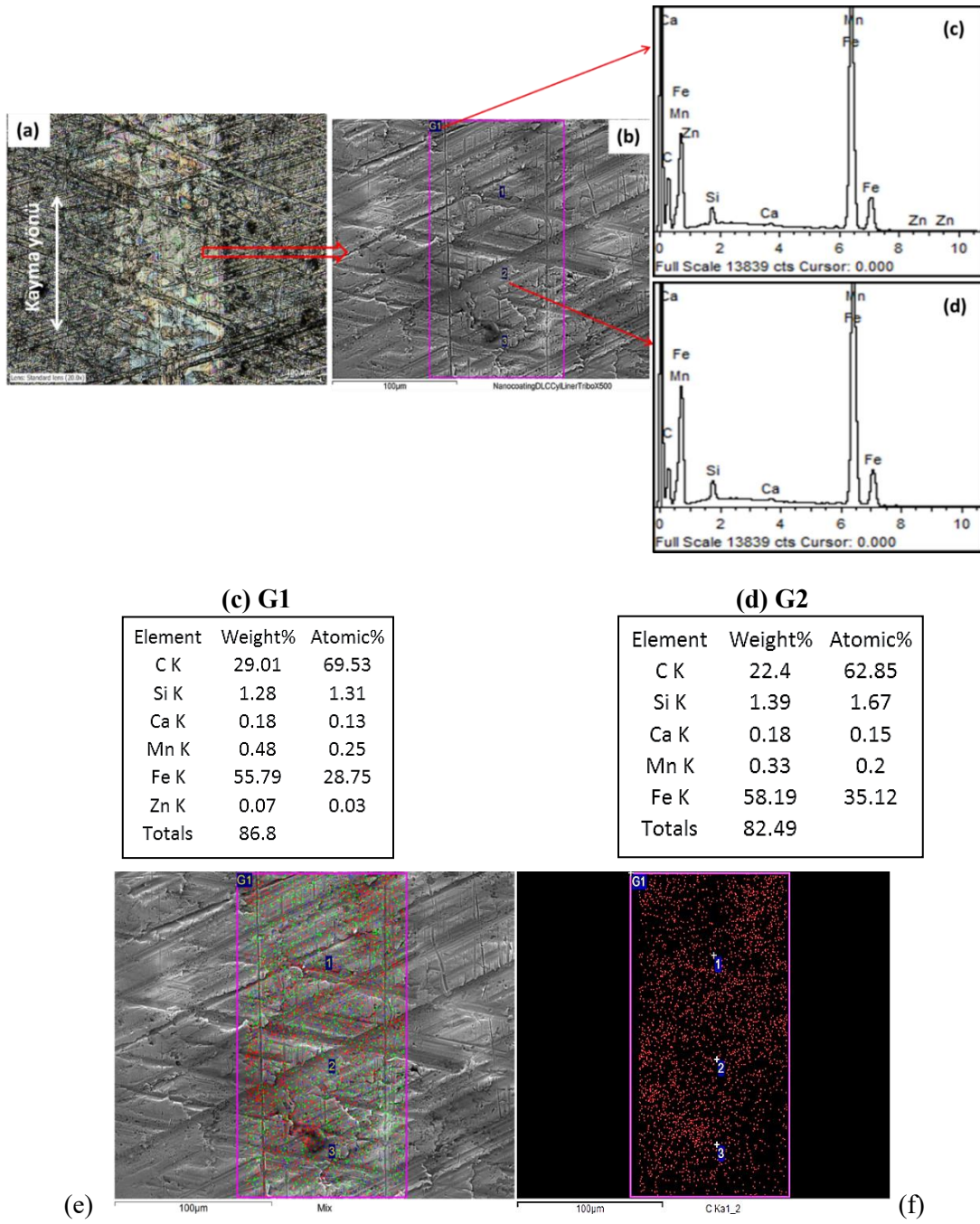
Çizgi Boyunca Pürüzlülük Değerleri	
Ra	777,42 nm
Rq	900,09 nm
Ry	2931,2 nm
Rp	1039,9 nm
Rv	-1891,4 nm
Rm	-18,626 fm

Tablo 3.7 Honda GX270 motorunun DLC 200nm kaplamalı ikinci motor segmanının çizgi boyunca pürüzlülük değerlerini göstermektedir. Ra 777.42 nm olarak ölçülmüştür. Yapılan tribometre testleri sonucunda DLC 200nm kaplamalı ikinci segman için bulunan Ra=0.6 µm değeri ile AFM testleri sonucunda bulunan Ra 777.42 nm değerleri birbirine yakındır.



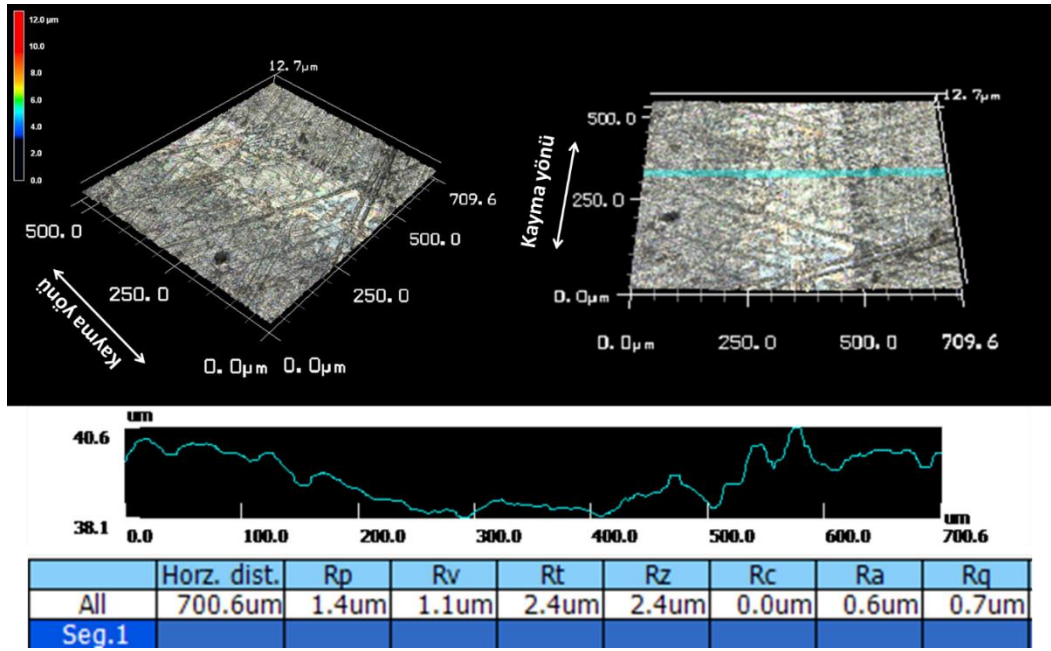
Şekil 3.14 Honda GX270 motorunun DLC kaplamalı ikinci motor segmanının optik mikroskop, SEM görüntüleri ve X-ray analizi (a), (d) Optik mikroskop; (b), (e) SEM görüntüleri; (c), (f) X-Ray analizi; (c) G1 ve (d) 2 elementsel analiz olup (e) ve (f) SEM görüntüsünden yüksek oranda büyütme ile elde edilmiştir.

Şekil 3.14 Honda GX270 motorunun DLC kaplamalı ikinci motor segmanının optik mikroskop, SEM görüntüleri ve X-ray analizini göstermektedir. Orijinal yüzey iyi korunmuştur ve yapısında C, Si, P, S, Ca, Cr, Mn, Fe ve Zn tespit edilmiştir.



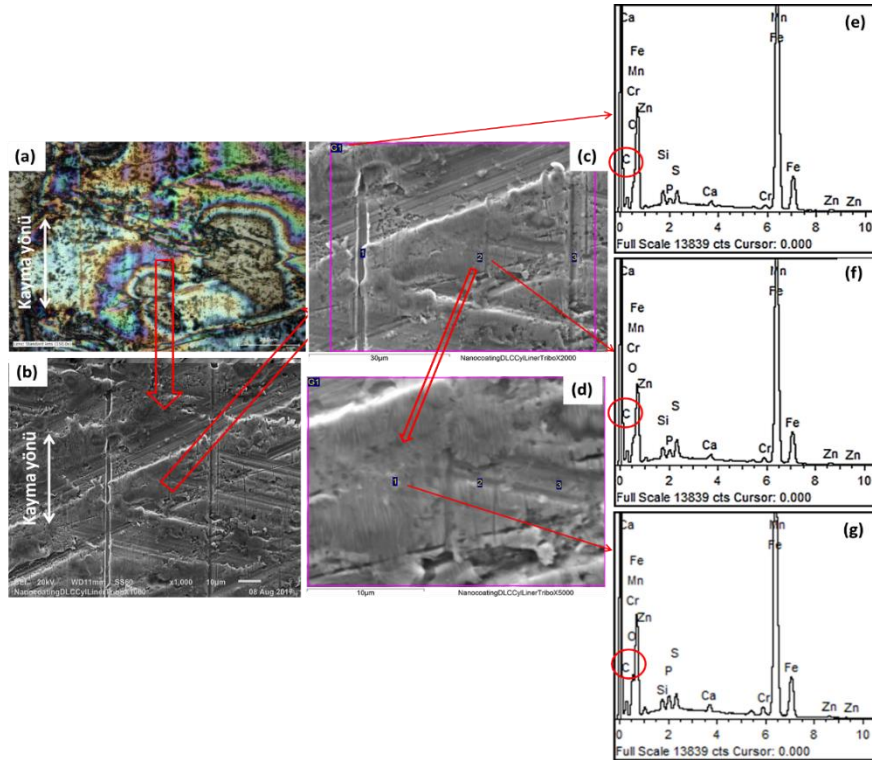
Şekil 3.15 Tribotest: Honda GX270 motorunun DLC kaplamalı ikinci motor segmanının altında test edilen silindirin optik mikroskop, SEM görüntüleri ve X-ray analizi (a) Optik mikroskop; (b) SEM görüntüsü; (c), (d) X-Ray analizi; (c) G1 ve (d) G2 elementsel analiz olup (e) ve (f) SEM görüntüsünden yüksek oranda büyütme ile elde edilmiştir.

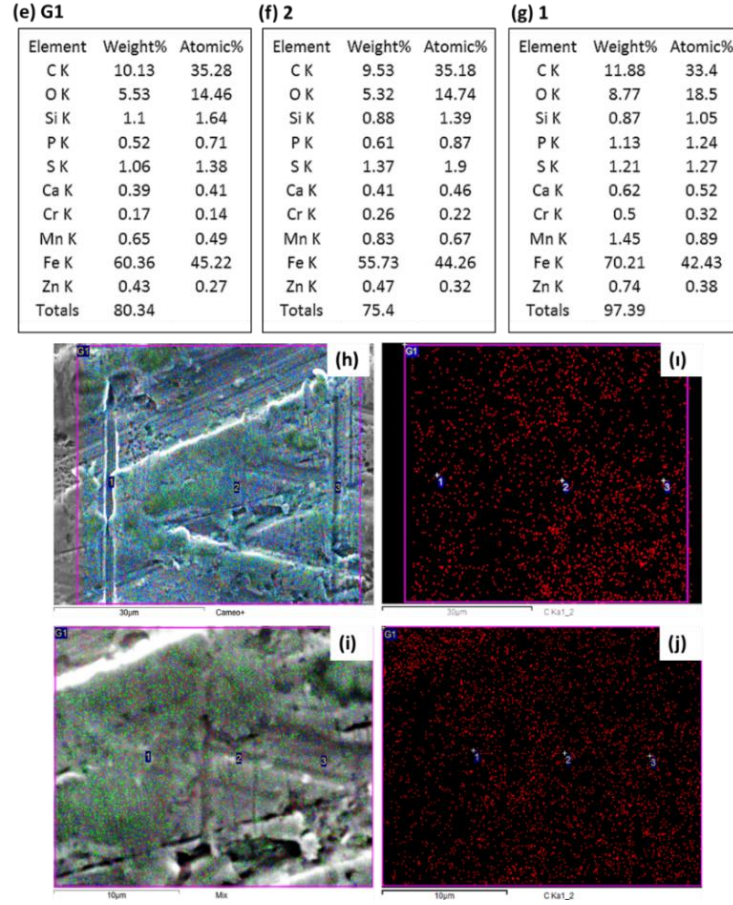
Şekil 3.15 Honda GX270 motorunun DLC kaplamalı ikinci motor segmanının altında test edilen silindirin optik mikroskop, SEM görüntüleri ve X-ray analizini göstermektedir. Orijinal yüzey iyi korunmuştur ve yapısında C, Si, Ca, Mn, Fe ve Zn tespit edilmiştir.



Şekil 3.16 Honda GX270 motorunun DLC kaplamalı ikinci motor segmanının altında test edilen silindirin 3D yüzey topoğrafyası ve pürüzlülüğü

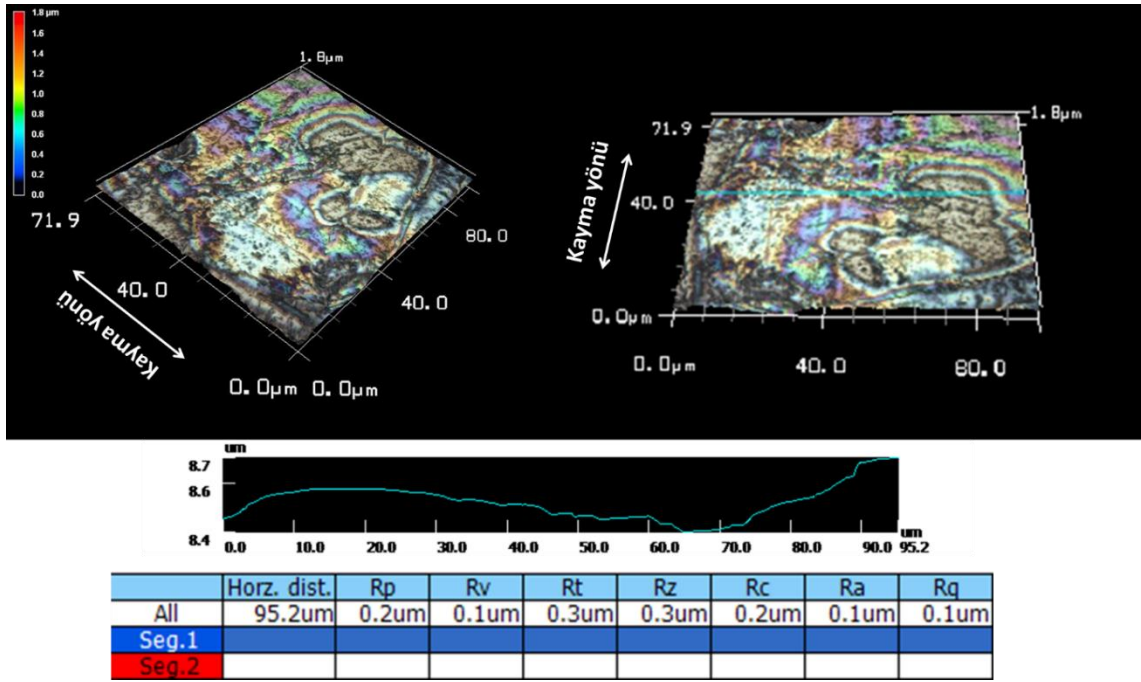
Şekil 3.16 Honda GX270 motorunun DLC kaplamalı ikinci motor segmanının altında test edilen silindirin tribotest sonuçlarından elde edilen 3D yüzey topoğrafyası ve pürüzlülüğünü göstermektedir. Dijital mikroskop ile Ra 0.6 μm olarak ölçülmüştür.





Şekil 3.17 Tribotest: Honda GX270 motorunun DLC kaplamalı ikinci motor segmanının altında test edilen silindirin optik mikroskop, SEM görüntüleri ve X-ray analizi (a), (b) Optik mikroskop; (c), (d) SEM görüntüleri; (e), (f), (g) X-Ray analizi; (e) G1, (f) 2, (g) 1 elementsel analiz olup (h), (i), (j) ve (j) SEM görüntülerinden yüksek oranda büyütme ile elde edilmiştir.

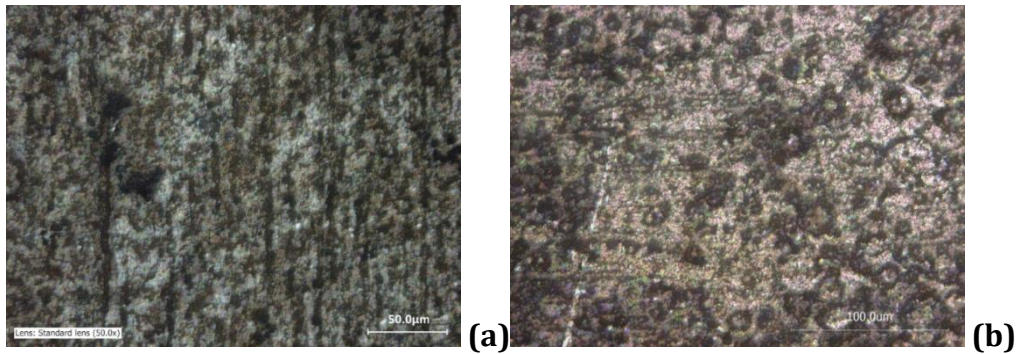
Şekil 3.17 Honda GX270 motorunun DLC kaplamalı ikinci motor segmanının altında test edilen silindirin tribotest sonuçlarından elde edilen optik mikroskop ve SEM görüntüleri ile X-ray analizini göstermektedir. Orijinal yüzey iyi korunmuştur ve yapısında C, O, Si, P, S, Ca, Cr, Mn, Fe ve Zn tespit edilmiştir.



Şekil 3.18 Tribotest: Honda GX270 motorunun DLC kaplamalı ikinci motor segmanının altında test edilen silindirin 3D yüzey topoğrafyası ve pürüzlülüğü

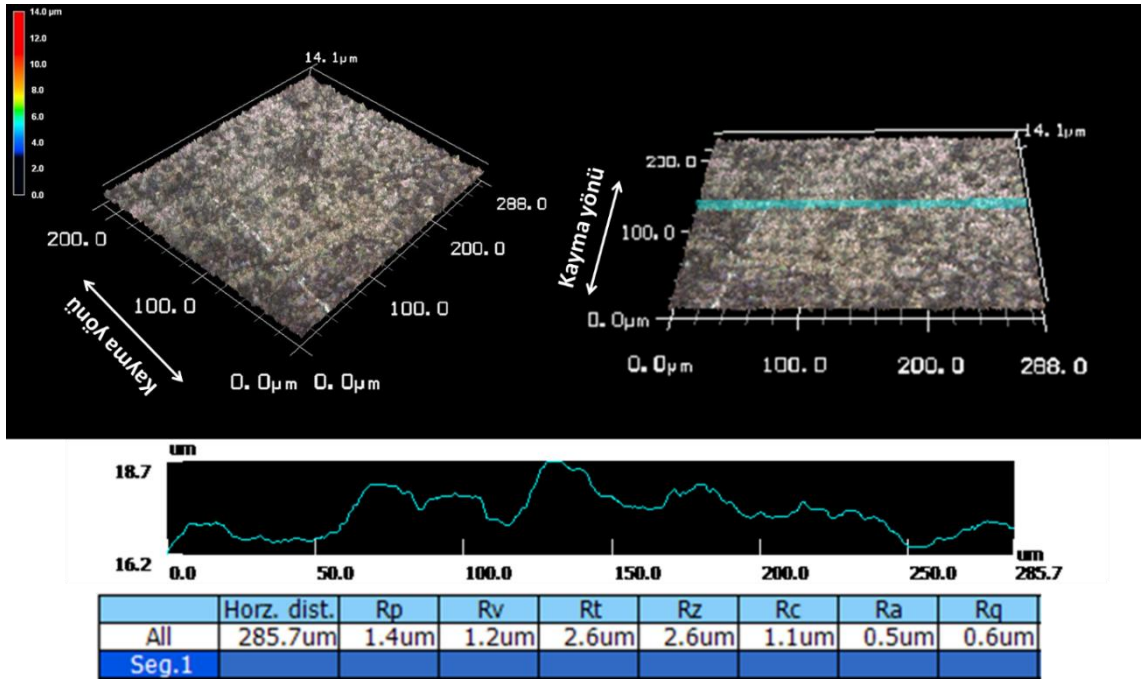
Şekil 3.18 Honda GX270 motorunun DLC kaplamalı ikinci motor segmanının altında test edilen silindirin tribotest sonuçlarından elde edilen 3D yüzey topoğrafyası ve pürüzlülüğünü göstermektedir. Dijital mikroskop ile Ra 0.1 μm olarak ölçülmüştür.

3.5 Test Öncesi BN200nm Kaplamalı Honda GX270 İkinci Motor Segmanının Optik Olarak İncelenmesi



Şekil 3.19 (a) Test öncesi kaplamasız ikinci motor segmanı (b) Test öncesi BN200nm kaplamalı ikinci motor segmanı

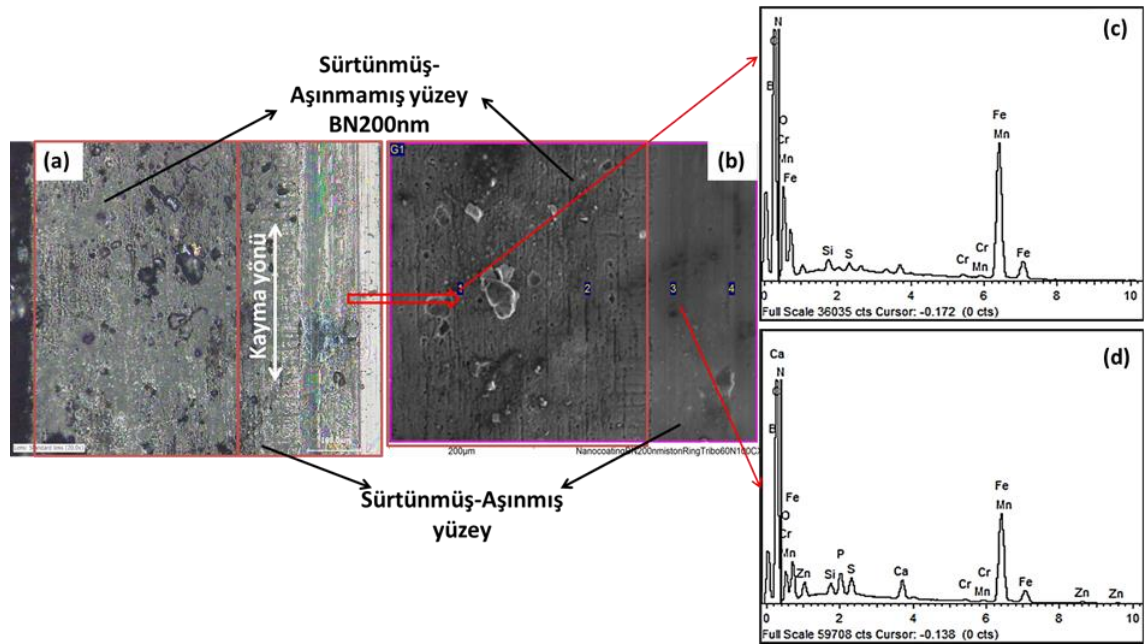
Şekil 3.19 (a)'da test öncesi kaplamasız ikinci motor segmanı, (b)'de test öncesi BN200nm kaplamalı ikinci motor segmanının SEM görüntüleri paylaşılmıştır.

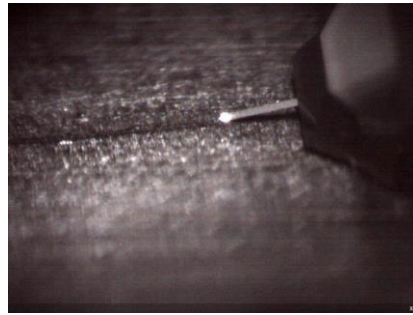
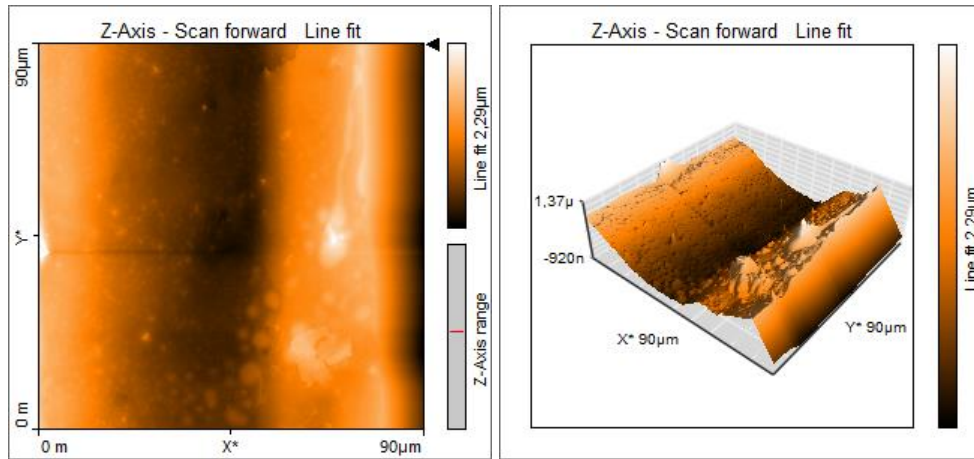
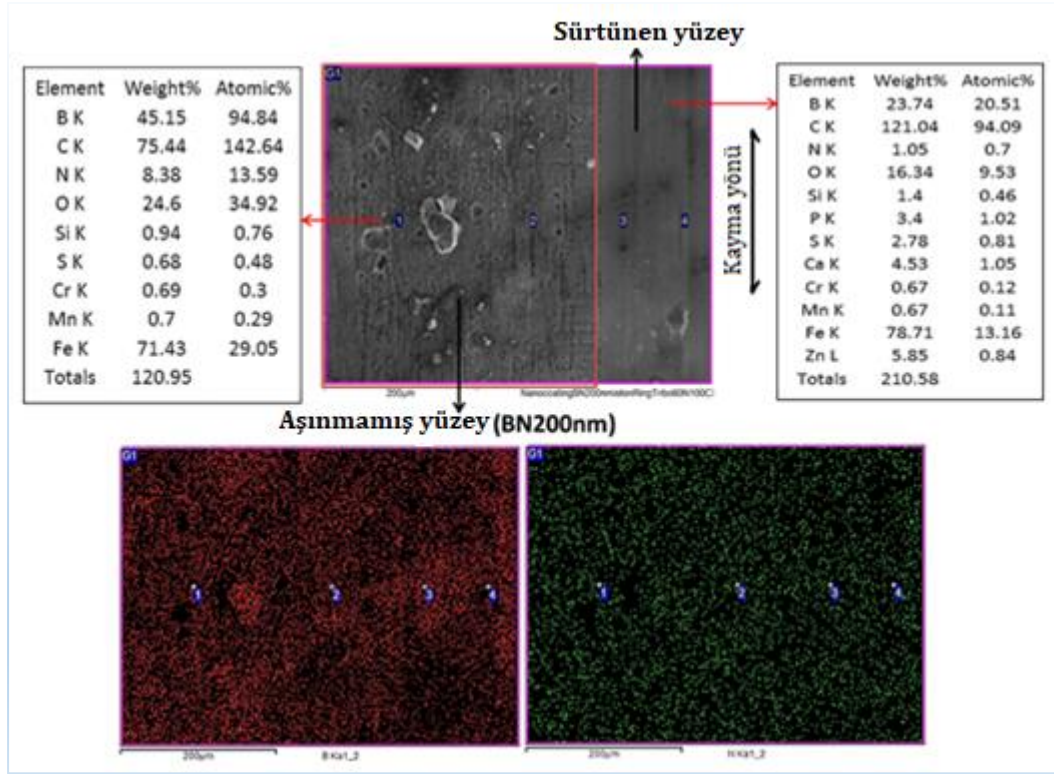


Şekil 3.20 Test öncesi BN200nm kaplamalı ikinci motor segmanının 3D yüzey topoğrafyası ve pürüzlülüğü

Şekil 3.20 Honda GX270 motorunun BN200nm kaplamalı ikinci motor segmanının test öncesi 3D yüzey topoğrafyası ve pürüzlülüğünü göstermektedir. Dijital mikroskop ile Ra 0.5 μm olarak ölçülmüştür.

3.6 BN200nm Kaplamalı İkinci Motor Segmanının Optik Olarak İncelenmesi





(e)

Şekil 3.21 (a), (b) Honda GX270 motorunun BN200nm kaplamalı ikinci motor segmanının tribometre test sonuçları (c), (d) SEM-EDX analizi (e) Honda GX270 motorunun BN200nm kaplamalı ikinci motor segmanının AFM analizi

Şekil 3.21’de Honda GX270 motorunun BN200nm kaplamalı ikinci motor segmanının tirbometre test sonuçları paylaşılmıştır. Orijinal yüzey iyi korunmuştur ve yapısında B, C, O, Si, P, S, Ca, N, Cr, Mn ve Fe tespit edilmiştir. (e)’de Honda GX270 motorunun BN200nm kaplamalı ikinci motor segmanının AFM analiz sonucunu göstermektedir.

Tablo 3.8 Honda GX270 motorunun BN200nm kaplamalı ikinci motor segmanının alan pürüzlülük değerleri

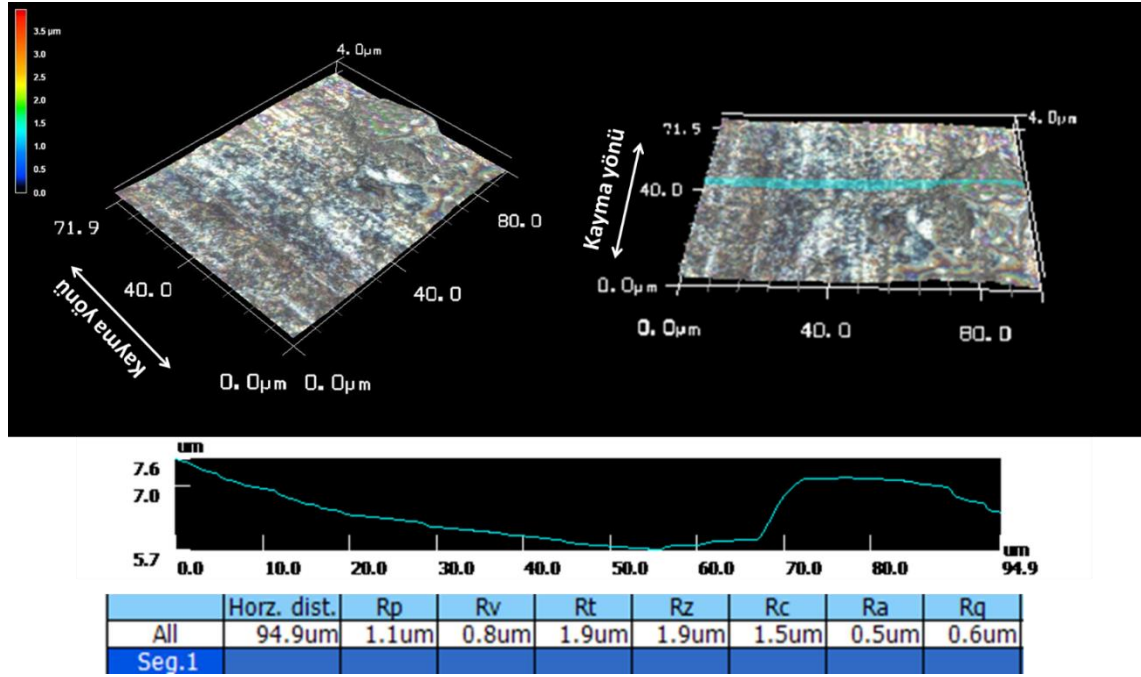
Alan Pürüzlülük Değerleri	
Alan	8,163 nm ²
Sa	419,28 nm
Sq	478,5 nm
Sy	4,533 µm
Sp	3,6032 µm
Sv	-929,83 nm

Tablo 3.8 Honda GX270 motorunun BN200nm kaplamalı ikinci motor segmanının alan pürüzlülük değerlerini göstermektedir. 8.163 nm²’lik alanda Sa 419.28 nm olarak ölçülmüştür.

Tablo 3.9 Honda GX270 motorunun BN200nm kaplamalı ikinci motor segmanının hat boyunca pürüzlülük değerleri

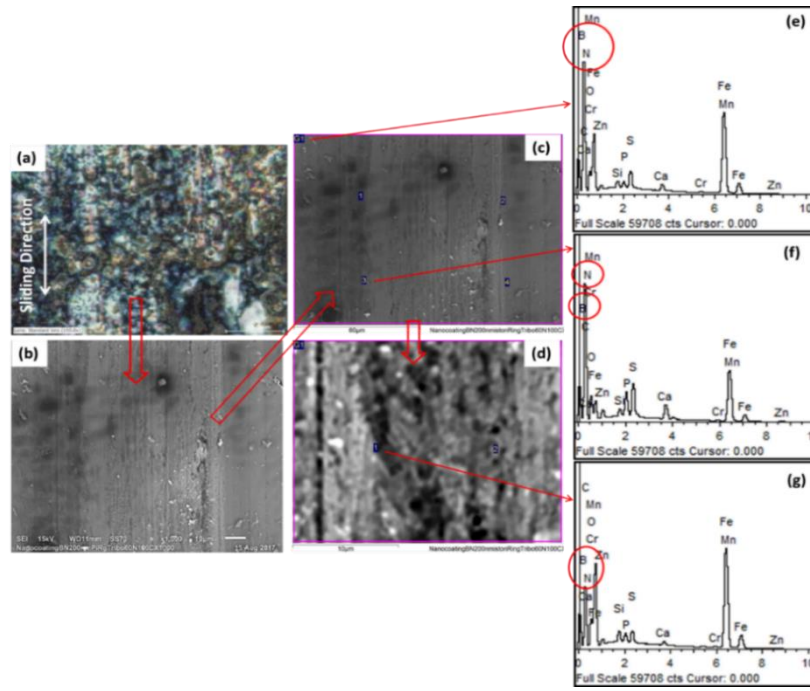
Çizgi Boyunca Pürüzlülük Değerleri	
Ra	502,9 nm
Rq	586,32 nm
Ry	2251,4 nm
Rp	1331,2 nm
Rv	-920,23 nm
Rm	-13,824 fm

Tablo 3.9 Honda GX270 motorunun BN200nm kaplamalı ikinci motor segmanının çizgi boyunca pürüzlülük değerlerini göstermektedir. Ra 502.9 nm olarak ölçülmüştür. Yapılan tribometre testleri sonucunda BN200nm kaplamalı ikinci segman için bulunan Ra 0.5 μm değeri ile AFM testleri sonucunda bulunan Ra 502.9 nm değeri birbiriyle örtüşmektedir.

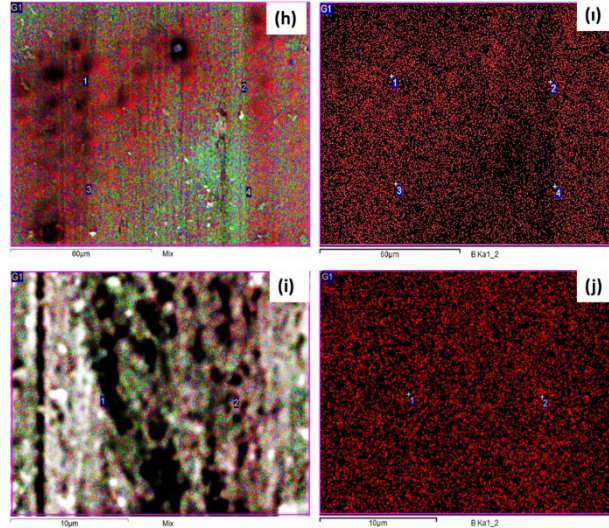


Şekil 3.22 Tribotest: Honda GX270 motorunun BN200nm kaplamalı ikinci motor segmanının 3D yüzey topoğrafyası ve pürüzlülüğü

Şekil 3.22 Honda GX270 motorunun BN200nm kaplamalı ikinci motor segmanının tribotest sonuçlarından elde edilen 3D yüzey topoğrafyası ve pürüzlülüğünü göstermektedir. Dijital mikroskop ile Ra 0.5 μm olarak ölçülmüştür.

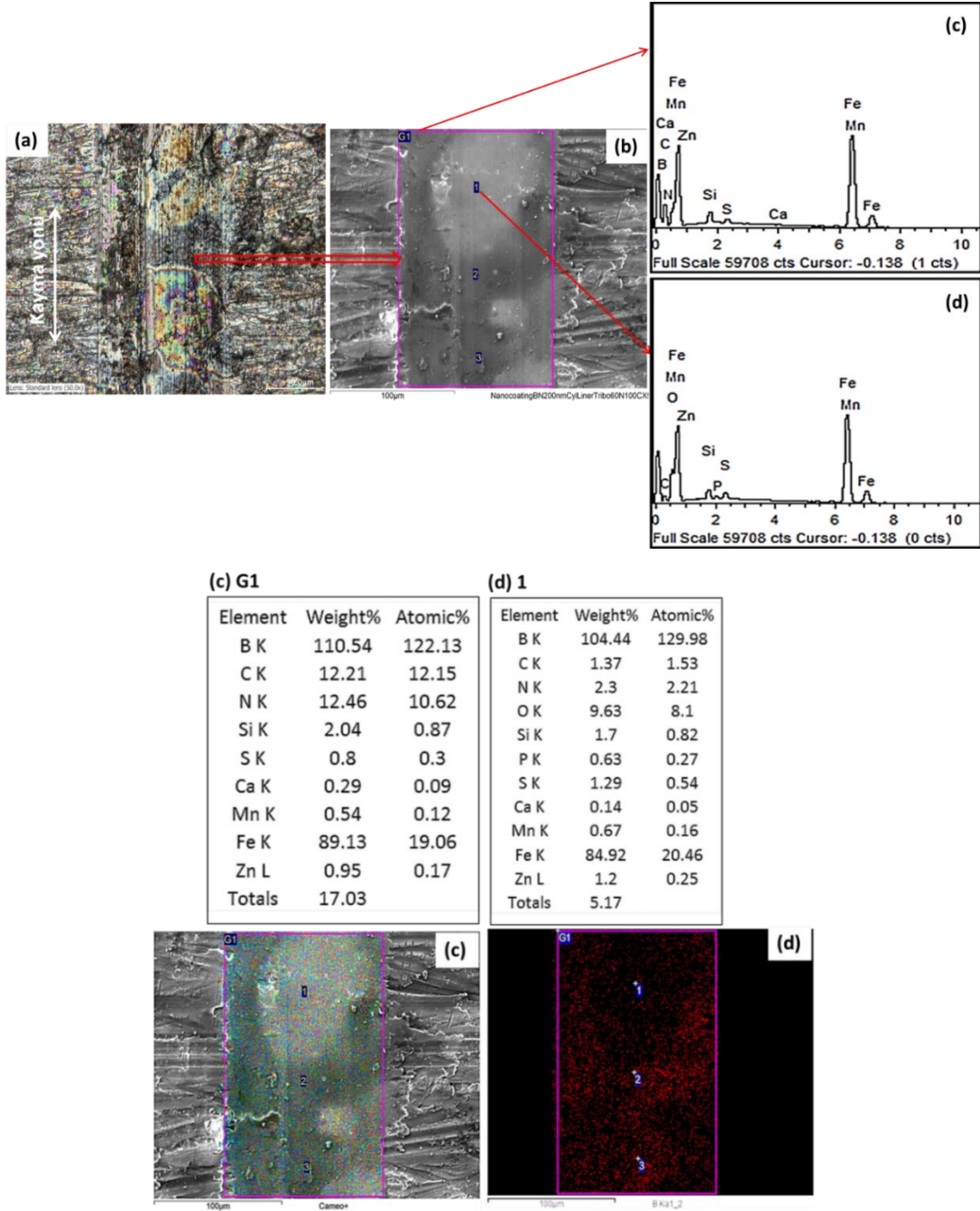


(e) G1			(f) 3			(g) 1		
Element	Weight%	Atomic%	Element	Weight%	Atomic%	Element	Weight%	Atomic%
B K	21.74	19.02	B K	22.63	18.18	B K	28.44	43.83
C K	113.05	89.03	C K	123.03	88.96	C K	61.56	85.4
N K	-0.11	-0.07	N K	2.1	1.3	N K	0.42	0.5
O K	15.26	9.02	O K	20.9	11.35	O K	14.97	15.59
Si K	1.31	0.44	Si K	1.37	0.42	Si K	2.18	1.29
P K	1.54	0.47	P K	5.8	1.63	P K	2.16	1.16
S K	4.09	1.21	S K	7.92	2.14	S K	2.85	1.48
Ca K	2.35	0.55	Ca K	5.39	1.17	Ca K	1.24	0.52
Cr K	0.59	0.11	Cr K	0.5	0.08	Cr K	0.94	0.3
Mn K	0.6	0.1	Mn K	0.64	0.1	Mn K	0.94	0.29
Fe K	104.75	17.74	Fe K	66.7	10.37	Fe K	121.49	36.25
Zn L	2.91	0.42	Zn L	4.9	0.65	Zn L	4.14	1.05
Totals	224.6		Totals	216.62		Totals	184.44	



Şekil 3.23 Tribotest: Honda GX270 motorunun BN200nm kaplamalı ikinci motor segmanının optik mikroskop, SEM görüntüleri ve X-ray analizi(a), (b) Optik mikroskop; (c), (d) SEM görüntüleri; (e), (f), (g) X-Ray analizi; (e) G1, (f) 3, (g) 1 elementsel analiz olup (h), (i), (j) ve (k) SEM görüntülerinden yüksek oranda büyütme ile elde edilmiştir.

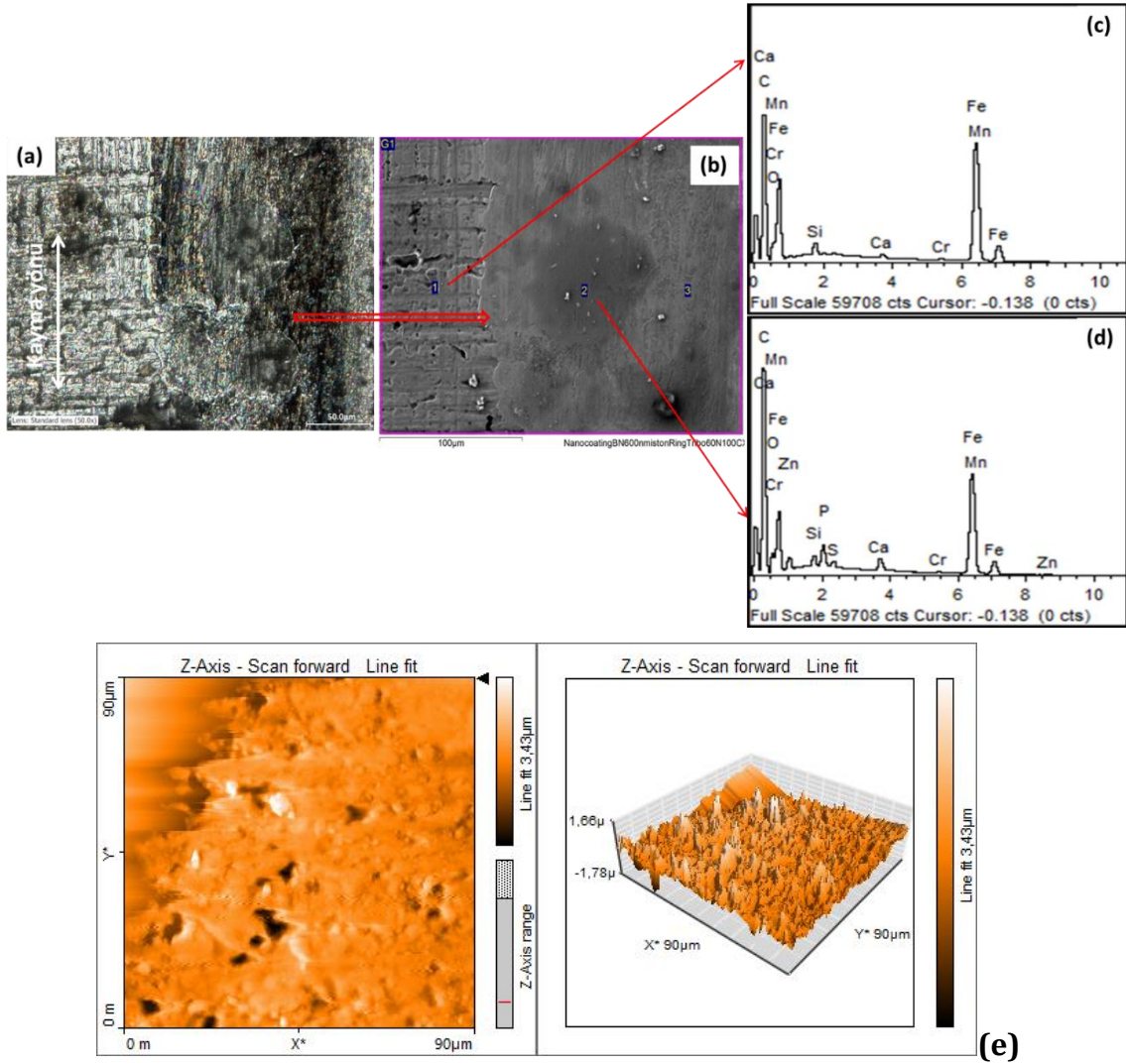
Şekil 3.23 Honda GX270 motorunun BN200nm kaplamalı ikinci motor segmanının tribotest sonuçlarından elde edilen optik mikroskop ve SEM görüntüleri ile X-ray analizini göstermektedir. Orijinal yüzey iyi korunmuştur ve yapısında B, C, O, N, Si, P, S, Ca, N, Cr, Mn, Fe ve Zn tespit edilmiştir.



Şekil 3.24 Tribotest: Honda GX270 motorunun BN200nm kaplamalı ikinci motor segmanının altında test edilen silindirin optik mikroskop, SEM görüntüleri ve X-ray analizi (a) Optik mikroskop; (b) SEM görüntüsü; (c), (d) X-Ray analizi; (c) G1, (d) 1 elementsel analiz olup (c) ve (d) SEM görüntüsünden yüksek oranda büyütme ile elde edilmiştir.

Şekil 3.24 Honda GX270 motorunun BN200nm kaplamalı ikinci motor segmanının altında test edilen silindirin tribotest sonuçlarından elde edilen optik mikroskop ve SEM görüntüleri ile X-ray analizini göstermektedir. Orijinal yüzey korunmuştur ve yapısında B, C, N, O, Si, P, S, Ca, Mn, Fe ve Zn tespit edilmiştir.

3.7 BN600nm Kaplamalı İkinci Motor Segmanının Optik Olarak İncelenmesi



Şekil 3.25 (a), (b) Honda GX270 motorunun BN600nm kaplamalı ikinci motor segmanının tribometre test sonuçları (c), (d) SEM-EDX analizi (e) Honda GX270 motorunun BN600nm kaplamalı ikinci motor segmanının AFM analizi

Şekil 3.25 (a) ve (b)'de Honda GX270 motorunun BN600nm kaplamalı ikinci motor segmanının tribometre test sonuçları paylaşılmıştır. (c) ve (d)'de orijinal yüzey korunmuştur ve yapısında Ca, Mn, O, Zn, Cr, P, Si, S, Ca ve Fe tespit edilmiştir. (e)'de

Honda GX270 motorunun BN600nm kaplamalı ikinci motor segmanının AFM analiz sonucunu göstermektedir.

Tablo 3.10 Honda GX270 motorunun BN600nm kaplamalı ikinci motor segmanının alan pürüzlülük değerleri

Alan Pürüzlülük Değerleri	
Alan	8,163 nm ²
Sa	263,23 nm
Sq	361,15 nm
Sy	3,9613 µm
Sp	2146,1 nm
Sv	-1815,2 nm

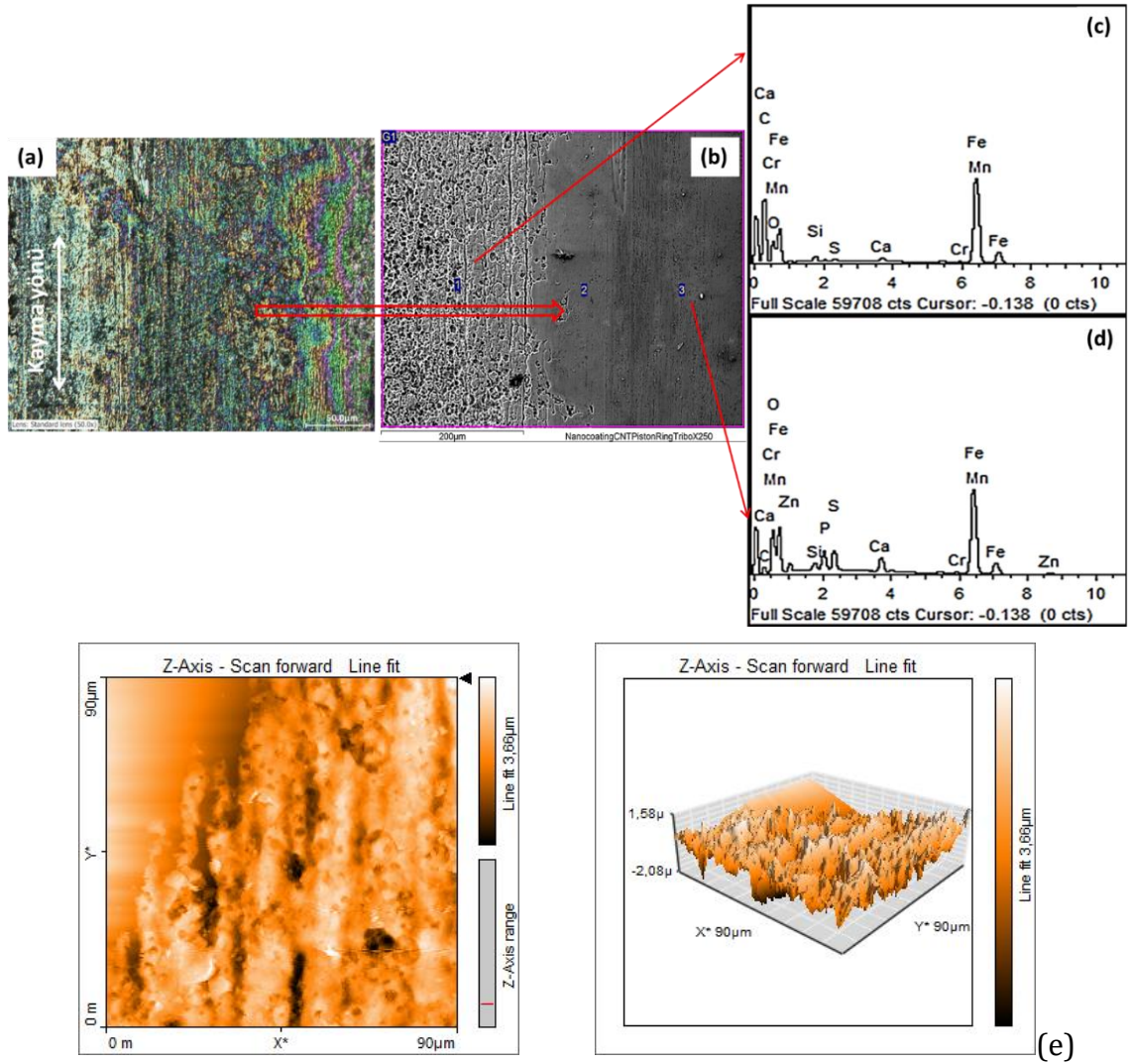
Tablo 3.10 Honda GX270 motorunun BN600nm kaplamalı ikinci motor segmanının alan pürüzlülük değerlerini göstermektedir. 8.163 nm²'lik alanda Sa 263.23 nm olarak ölçülmüştür.

Tablo 3.11 Honda GX270 motorunun BN600nm kaplamalı ikinci motor segmanının çizgi boyunca pürüzlülük değerleri

Çizgi Boyunca Pürüzlülük Değerleri	
Ra	183,14nm
Rq	249,47nm
Ry	2146,9nm
Rp	1607,8nm
Rv	-539,04nm
Rm	-16,88fm

Tablo 3.11 Honda GX270 motorunun BN600nm kaplamalı ikinci motor segmanının çizgi boyunca pürüzlülük değerlerini göstermektedir. Ra 183.14 nm olarak ölçülmüştür.

3.8 CNT Kaplamalı İkinci Motor Segmanının Optik Olarak İncelenmesi



Şekil 3.26 (a), (b) Honda GX270 motorunun CNT (Karbon nanotüp) kaplamalı ikinci motor segmanının tribometre test sonuçları (c), (d) SEM-EDX analizi (e) Honda GX270 motorunun CNT (Karbon nanotüp) kaplamalı ikinci motor segmanının AFM analizi

Şekil 3.26 (a), (b)'de Honda GX270 motorunun CNT (karbon nanotüp) kaplamalı ikinci motor segmanının tribometre test sonuçları paylaşılmıştır. (c), (d)'de orijinal yüzey korunmuştur ve yapısında Ca, C, Cr, Fe, Mn, O, Zn, P, Si ve S tespit edilmiştir. (e)'de Honda GX270 motorunun CNT kaplamalı ikinci motor segmanının AFM analiz sonucunu göstermektedir.

Tablo 3.12 Honda GX270 motorunun CNT kaplamalı ikinci motor segmanının alan pürüzlülük değerleri

Alan Pürüzlülük Değerleri	
Alan	8,163 nm ²
Sa	481,82 nm
Sq	597,84 nm
Sy	4,8918 µm
Sp	2493,4 nm
Sv	-2398,4 nm

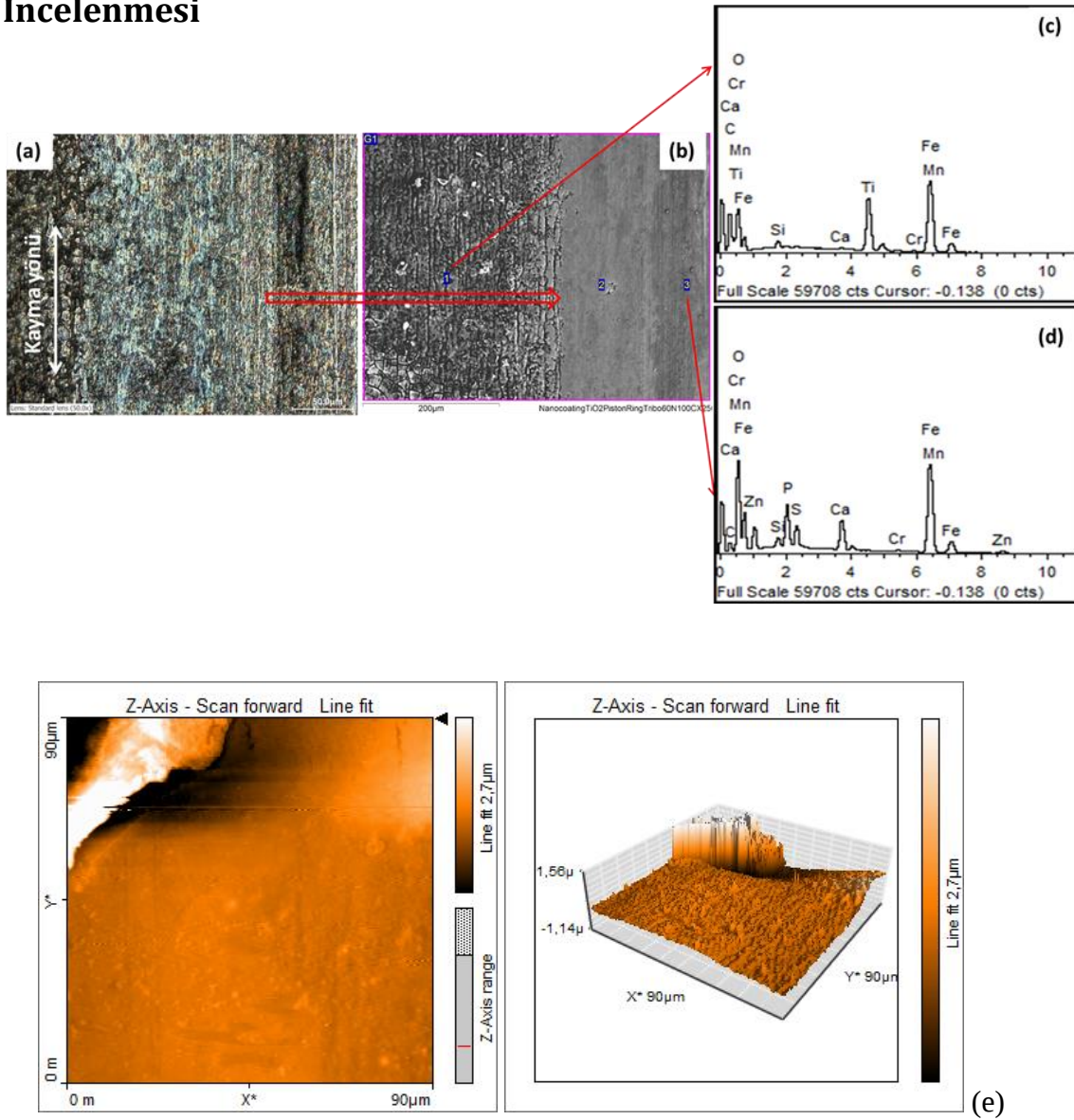
Tablo 3.12 Honda GX270 motorunun CNT kaplamalı ikinci motor segmanının alan pürüzlülük değerlerini göstermektedir. 8.163 nm²'lik alanda Sa 481.82 nm olarak ölçülmüştür.

Tablo 3.13 Honda GX270 motorunun CNT kaplamalı ikinci motor segmanının çizgi boyunca pürüzlülük değerleri

Çizgi Boyunca Pürüzlülük Değerleri	
Ra	435,05 nm
Rq	517,83 nm
Ry	2256,9 nm
Rp	1003,1 nm
Rv	-1253,8 nm
Rm	-16,371 fm

Tablo 3.13 Honda GX270 motorunun CNT kaplamalı ikinci motor segmanının çizili hat boyunca pürüzlülük değerlerini göstermektedir. Ra 435.05 nm olarak ölçülmüştür.

3.9 TiO₂ Kaplamalı İkinci Motor Segmanının Optik Olarak İncelenmesi



Şekil 3.27 (a), (b) Honda GX270 motorunun TiO₂ kaplamalı ikinci motor segmanının tribometre test sonuçları (c), (d) SEM-EDX analizi (e) Honda GX270 motorunun TiO₂ kaplamalı ikinci motor segmanının AFM analizi

Şekil 3.27 (a) ve (b)'de Honda GX270 motorunun TiO₂ kaplamalı ikinci motor segmanının tribometre test sonuçları paylaşılmıştır. (c) ve (d)'de orijinal yüzey korunmuştur ve yapısında Ca, C, Cr, Fe, Mn, O, Zn, P, Si ve S tespit edilmiştir. (e)'de Honda GX270 motorunun TiO₂ kaplamalı ikinci motor segmanının AFM analizi paylaşılmıştır.

Tablo 3.14 Honda GX270 motorunun TiO₂ kaplamalı ikinci motor segmanının alan pürüzlülük değerleri

Alan Pürüzlülük Değerleri	
Alan	8,163 nm ²
Sa	267,29 nm
Sq	502,89 nm
Sy	5,3936 µm
Sp	3154,7 nm
Sv	-2238,9 nm

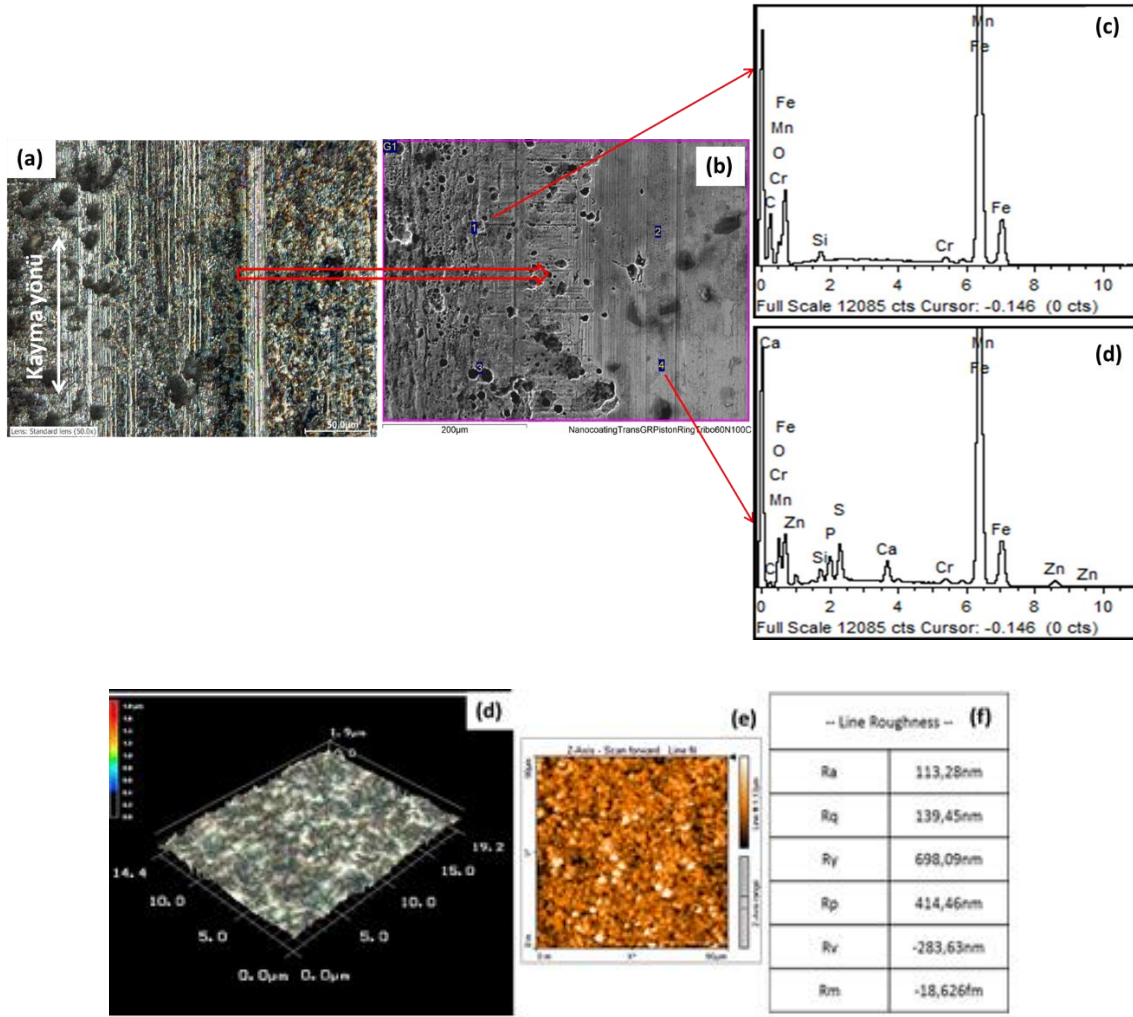
Tablo 3.14 Honda GX270 motorunun TiO₂ kaplamalı ikinci motor segmanının alan pürüzlülük değerlerini göstermektedir. 8.163 nm²'lik alanda Sa 267.29 nm olarak ölçülmüştür.

Tablo 3.15 Honda GX270 motorunun TiO₂ kaplamalı ikinci motor segmanının çizgi boyunca pürüzlülük değerleri

Çizgi Boyunca Pürüzlülük Değerleri	
Ra	67,147 nm
Rq	84,142 nm
Ry	443,02 nm
Rp	230,56 nm
Rv	-212,46 nm
Rm	-17,39 fm

Tablo 3.15 Honda GX270 motorunun TiO₂ kaplamalı ikinci motor segmanının çizgi boyunca pürüzlülük değerlerini göstermektedir. Ra 67.147 nm olarak ölçülmüştür.

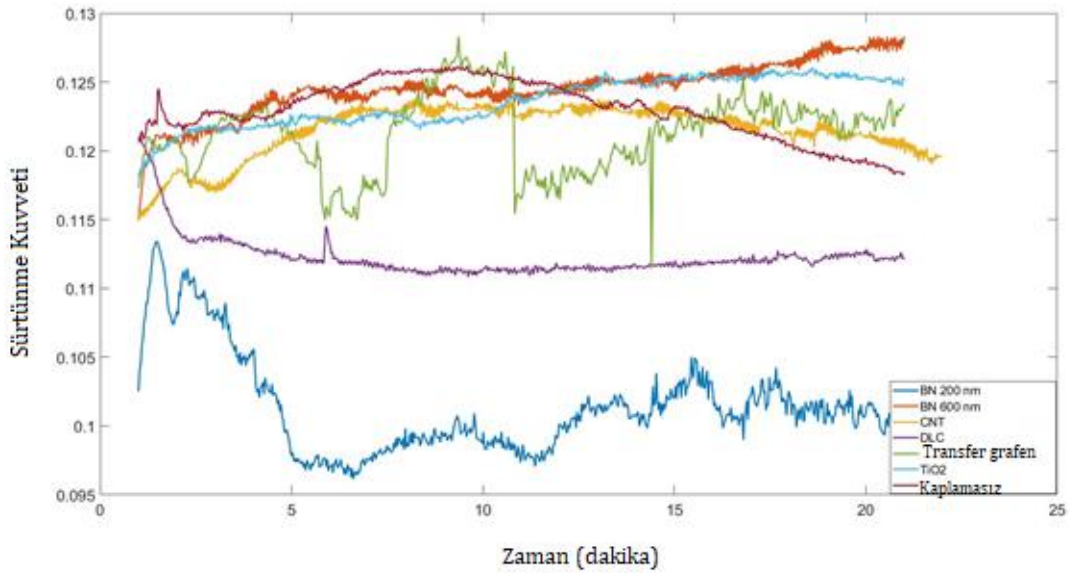
3.10 Sentezlenmiş Grafen Kaplamalı İkinci Motor Segmanının Optik Olarak İncelenmesi



Şekil 3.28 (a), (b) Honda GX270 motorunun sentezlenmiş grafen kaplamalı ikinci motor segmanının tribometre test sonuçları (c), (d) SEM-EDX analizi (e) Sentezlenmiş grafen kaplamalı ikinci motor segmanının AFM analizi

Şekil 3.28’de Honda GX270 motorunun sentezlenmiş grafen kaplamalı ikinci motor segmanının tirbometre test sonuçları paylaşılmıştır. Orijinal yüzey korunmuştur ve yapısında Ca, C, Cr, Fe, Mn, O, Zn, P, Si ve S tespit edilmiştir.

Motorlarda sürtünme ve aşınmanın en fazla sıkıştırma stroğunun sonunda yanma başlangıcında piston, segman ve silindir cidarı arasında meydana geldiği bilinmektedir. Bu nedenle, bu tez kapsamında sürtünme ve aşınmanın en çok görüldüğü motor parçalarından biri olan segmanlar üzerinde çalışılmıştır. Honda GX270 motorundan kuru kesim yöntemiyle kesilen motor segmanları DLC, grafen, BN, TiO₂ ve CNT ile ayrı ayrı kaplanarak tribometre testine tabi tutulmuş, SEM, X-ray ve AFM analizleri yapılmıştır.



Şekil 4.1 Deneylerde kullanılan tüm nano kaplamalı motor segmanlarının zamana bağlı sürtünme katsayılarının mukayesesi

Şekil 4.1 deneylerde kullanılan tüm nano kaplamalı motor segmanlarının (BN 200nm, BN 600nm, CNT, DLC, transfer yöntemiyle kaplanmış grafen ve TiO₂) zamana bağlı olarak sürtünme katsayılarının değişimini göstermektedir.

Kaplamasız motor segmanlarının sürtünme katsayısı $\mu=0.118 - 0.126$ aralığında değişmektedir. Deneylerde kullanılan nano kaplamalı motor segmanları arasında sürtünme katsayısında sağladığı düşüş açısından en iyi performansı BN200nm kaplama göstermiştir. BN200 nm kaplamalı motor segmanının sürtünme katsayısının $\mu=0.097-0.102$ arasında değiştiği tespit edilmiştir. 3D yüzey

topoğrafyasında yüzey pürüzlülüğü $Ra=0.5 \mu m$ olarak ölçülmüştür. Bu sonuç, Miyoshi Kazuhisa [144]'nın elde ettiği sonuçlarla örtüşmektedir.

DLC nano kaplamalı motor segmanlarının sürtünme katsayısı $\mu=0.113-0.12$ arasında değişmektedir. Bu sonuç, Gangopadhyay A. [31]'nin elde ettiği bulgularla örtüşmektedir. Gangopadhyay A. yaptığı deneyler sonucunda DLC kaplamanın sürtünme katsayısının yağlayıcı bulunmayan koşulda sürtünme katsayısının $\mu=0.25$ ile başladığını, ardından $\mu=0.08$ 'de sabitlendiğini, motor yağı bulunan koşulda ise sürtünme katsayısının $\mu=0.1-0.15$ arasında değiştiğini bulmuştur.

Deneyin başında, kayma hareketinin yeni başladığı anlarda karşı yüzey ile DLC kaplama arasında kuvvetli bir etkileşim olduğundan sürtünme katsayısı yüksektir. Ancak, kayma devam ettikçe DLC kaplamanın kohezyon kuvvetleri azalmaya başlar ve DLC aşınma partikülleri karşı yüzeye geçmeye başlar. DLC karşı yüzey üzerinde bir transfer katmanı oluşturarak sürtünme katsayısının düşmesini sağlar.

DLC kaplamalı segman yüzeyinde birbirine paralel ve kayma yönünde abrazyon çizgilerinin oluştuğu görülmüştür. DLC kaplamalı motor segmanının orijinal yüzeyi iyi korunmuştur ve yapısında C, Si, P, S, Ca, Cr, Mn, Fe ve Zn tespit edilmiştir. AFM analizinde yüzey pürüzlülüğü $Ra=777.42 \text{ nm}$ olarak ölçülmüştür.

Grafen nano kaplamalı segmanın sürtünme katsayısı $\mu=0.11-0.127$ arasında değişmektedir. Bu sonuç, Dai, W. [147]'nin elde ettiği bulgularla örtüşmektedir. Dai, W. yaptığı deneyler sonucunda grafen kaplamanın sürtünme katsayısının $\mu=0.13-0.20$ arasında değiştiğini tespit etmiştir.

Grafen kaplamalı motor segmanının yüzeyinde birbirine paralel ve kayma yönünde abrazyon çizgilerinin oluştuğu görülmüştür. Grafen kaplamalı motor segmanının orijinal yüzeyi korunmuştur ve yapısında Ca, C, Cr, Fe, Mn, O, Zn, P, Si ve S tespit edilmiştir. AFM analizinde yüzey pürüzlülüğü $Ra=113.28 \text{ nm}$ olarak ölçülmüştür.

CNT nano kaplamalı motor segmanlarının sürtünme katsayısı $\mu=0.115-0.122$ arasında değişmektedir. Bu sonuç, Reinert L. [91]'nin bulgularıyla örtüşmektedir. Reinert L. yaptığı deneylerde CNT nano kaplamalı segmanın sürtünme katsayısının $\mu=0.38-0.1$ arasında değiştiğini bulmuştur. Deneyin başlangıcındaki sürtünme katsayısının yüksek olmasının nedeni; ilk kayma çevrimi içerisinde büyük miktarda birbirine dolaşmış CNT'nin aşınma çizgisinin yanlarına kaymasıdır. Birbirine

dolaşmış CNT'lerin kayması daha yüksek bir güç gerektirdiği için sürtünme katsayısının artmasına neden olur.

CNT nano kaplama koruyucu bir katman olarak görev yapar, böylece sürtünen yüzeylerde ciddi bir aşınma olmaz. CNT kaplamalı segmanın yüzeyinde oksidasyon çizgileri tespit edilmiştir. CNT nano kaplamalı segmanın orijinal yüzeyi korunmuştur ve yapısında Ca, C, Cr, Fe, Mn, O, Zn, P, Si ve S tespit edilmiştir. AFM analizinde yüzey pürüzlülüğü $R_a=435.05$ nm olarak ölçülmüştür.

TiO₂ nano kaplamalı motor segmanlarının sürtünme katsayısı $\mu=0.118-0.125$ arasında değişmektedir.

TiO₂ nano kaplamalı segmanın orijinal yüzeyi korunmuştur ve yapısında Ca, C, Cr, Fe, Mn, O, Zn, P, Si ve S tespit edilmiştir. TiO₂ nano kaplamalı segmanın yüzeyinde abrazyon ve kazıma aşınması tespit edilmiştir. AFM analizinde yüzey pürüzlülüğü $R_a=67.147$ nm olarak ölçülmüştür.

BN600nm nano kaplamalı motor segmanlarının sürtünme katsayısı $\mu=0.12-0.1275$ arasında değişmektedir.

BN600nm nano kaplamalı segmanın yüzeyinde adhezyon ve kazıma aşınması tespit edilmiştir. AFM analizinde yüzey pürüzlülüğü $R_a=183.14$ nm olarak ölçülmüştür.

-
- [1] Bhushan B., Principles and applications of tribology, "Industrial Significance of Tribology".
- [2] Bhushan B., Principles and applications of tribology, "Origins and Significance of Micro/Nanotribology".
- [3] Lin S.S., Patterson D.J. (1993), SAE Paper No.-930794 129.
- [4] Rao V.D.N., Kabat D.M., Yeager D., Zizitter B. (1997), SAE Paper No.-970009.
- [5] Narendra B. D., Nayak S., "Nanocoatings for engine application", Surface& Coatings Technology, 194 (2005) 58– 67.
- [6] Rao V.D.N., Kabat D.M., Rose R., Yeager D., Leong D.Y., SAE Paper No.-970023 (1997).
- [7] Cole G.S., Bin F., Proceed. ASM Mater. Cong. Pittsburg, PA, October 17–21 ASM International Materials Park, OH (1993) 13.
- [8] Yoon H., Sheiretov T., Cusano C., Wear 237 (2000) 163.
- [9] Prasad R., Samra N.K., Comput. Struct. 34 (51) (1990) 787.
- [10] Hejwaowski T., Weron'ski A., Vacuum 65 (3–4) (2002) 427.
- [11] Nesbitt J.A., Surf. Coat. Technol. 130 (2– 3) (2000) 141.
- [12] Taymaz I., Cakir K., Gur M., Mimaroglu A., Surf. Coat. Technol. 169– 170 (2003) 168.
- [13] Schwingel D., Taylor R., Haubold T., Wigren J., Gualco C., Surf. Coat. Technol. 108– 109 (1998) 99.
- [14] Wenzelburger M., Escribano M., Gadow R., Surf. Coat. Technol. 180– 181 (2003) 429.
- [15] Becker E.P., Tribology International (2003) 37 (7) (2004) 569.
- [16] Rastegar F., Richardson D.E., Surf. Coat. Technol. 90 (1–2) (1997) 156.
- [17] Klein, L. C., "Sol-gel technology for thin films, fibers, preforms, electronics, and specialty shapes", Noyes Publications, 55, 1988.
- [18] Brinker C.J., Scherer G.W., "Sol-gel science: The physics and chemistry of sol-gel processing", Academic Press, Newyork, 2656, 1990.
- [19] Kurmi S. Z., Sol-Jel Yöntemiyle TiO₂ VE HAP Kaplanan Ti₆Al₇Nb Alaşımının Mekanik ve Optik Özelliklerinin Araştırılması, Fırat Üniversitesi, 2018, Yüksek lisans tezi.
- [20] George, J., "Preparation of thin films", Marcel Dekker Inc., New York. 1992.
- [21] Pierre, C. "Introduction to sol-gel processing", Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, London, 1998.
- [22] Gönüllü Y., "Ortopedik implant malzemesi olarak kullanılan ostenitik paslanmaz çeliğin sol-jel tekniği ile yüzey özelliklerinin geliştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.

- [23] Tucker R.C., "Thermal spray coatings, surface engineering", ASM Handbook, ASM International, Vol.5, 1994.
- [24] Davis J. R., "Handbook of thermal spray technology", Madison County, Mississippi, 2004.
- [25] Karakaş Y., Soykan H.Ş., Mahmutoğlu M. Z., Aslanoğlu Z., "Çelik yüzeylerin kaplanması", KDR Ereğli Erdemir Bilim ve Teknoloji Serisi, Şubat 2006.
- [26] Evcin A., "Kaplama teknikleri ders notları", Afyonkarahisar Kocatepe Üniversitesi, 2006.
- [27] Aisenberg S., Chamot R., J. Appl. Phys. 42 (6) (1971) 2953.
- [28] Zhang S., Bui X.L., Fu Y., Surf. Coat. Technol. 167 (2-3) (2003) 137.
- [29] Mobarak H. M., Masjuki H. H., NizaMohamad E., AshrafurRahman S.M., Al Mahmud K. A. H., Habibullah M., Salauddin S. "Effect of DLC coating on tribological behaviour of cylinder liner-piston ring material combination when lubricated with jatropha oil", 10th International Conference on Mechanical Engineering, ICME2013, 90 (2014) 733-739.
- [30] Cui W.G., Lai Q.B., Zhang L., Wang F.M. "Quantitative measurements of sp³ content in DLC films with Raman spectroscopy", Surface & Coatings Technology, 205 (2010) 1995-1999.
- [31] Gangopadhyay A., Sinha K., Uy D., Mcwatt D. G., Zdrodowski R. J., Simko S. J. "Friction, wear and surface film formation characteristics of diamond-like carbon thin coating in valvetrain application", Tribology Transactions, 54 (2011) 104-114.
- [32] Aisenberg, S. and Chabot, R. W. "Physics of Ion Plating and Ion Beam Deposition," Journal of Vacuum Science and Technology, 10 (1973) 104-107.
- [33] Bowden, E. P. and Young, J. E. (1951), "Friction in Diamond, Graphite, and Carbon and the Influences of Surface Films," Proceedings of the Royal Society of London - Series A, 208, 444.
- [34] Bowden, E. P. and Hanwell, A. E. (1966), "The Friction of Clean Crystal Surfaces," Proceedings of the Royal Society of London - Series A, 295, p 233.
- [35] Jahanmir, S., Deckman, D. E., Ives, L. K., Feldman, A., and Farabough, E. (1989), "Tribological Characteristics of Synthesized Diamond Films on Silicon," Wear, 133, 73.
- [36] Samuels, B. and Wilks, J. (1988), "The Friction of Diamond Sliding on Diamond," Journal of Materials Science, 23, p 2846.
- [37] Gangopadhyay, A. K. and Tamor, M. A. (1993), "Friction and Wear Behavior of Diamond Films against Steel and Ceramics," Wear, 169, pp 221229.
- [38] Kokaku, Y. and Kitoh, M. (1989), "Influence of Exposure to an Atmosphere of High Relative Humidity on Tribological Properties of Diamondlike Carbon Films," Journal of Vacuum Science and Technology A, 7(3), p 2311.
- [39] Kim, D. S., Fischer, T. E., and Gallois, B. (1991), "The Effects of Oxygen and Humidity on Friction and Wear of Diamond-Like Carbon Films," Surface and Coatings Technology, 49, p 537.

- [40] Franceschini, D. F., Achete, C. A., and Freire, F. L., Jr. (1992), "Internal Stress Reduction by Nitrogen Incorporation in Hard Amorphous Thin Films," *Applied Physics Letters*, 60(26), 3229.
- [41] Miyake, S., Miyamoto, T., and Kaneko, R. (1993), "Microtribological Improvement of Carbon Films by Silicon Inclusion and Fluorination," *Wear*, 168, 155.
- [42] Gangopadhyay, A. K., Willermet, P. A., Tamor, M. A., and Vassell, W. C. (1997), "Amorphous Hydrogenated Carbon Films for Tribological Applications I. Development of Moisture Insensitive Films Having Reduced Compressive Stress," *Tribology International*, 30(1), p 9.
- [43] Donnet, C., Belin, M., Auge, J. C., Martin, J. M., Grill, A., and Patel, V. (1994), "Tribiochemistry of Diamond-Like Carbon Coatings in Various Environments," *Surface and Coatings Technology*, 68, 626-631.
- [44] Gangopadhyay, A. K., Vassell, W. C., Tamor, M. A., and Willermet, P. A. (1994), "Tribological Behavior of Amorphous Hydrogenated Carbon Films on Silicon," *Journal of Tribology*, 116, 454.
- [45] Oguri, K., Arai, T. (1992), "Two Different Low Friction Mechanisms of Diamond-Like Carbon with Silicon Coatings Formed by Plasma-Assisted Chemical Vapor Deposition," *Journal of Materials Research*, 7(6), p 1313.
- [46] Erdemir, A., Switala, M., Wei, R., and Wilbur, P. (1991), "A Tribological Investigation of the Graphite to Diamond-Like Behavior of Amorphous Carbon Films Ion Beam Deposited on Ceramic Substrates," *Surface and Coatings Technology*, 50, p 17.
- [47] Gangopadhyay, A. K., Willermet, P. A., Vassell, W. C., and Tamor, M. A. (1997), "Amorphous Hydrogenated Carbon Films for Tribological Applications I. Films Deposited on Aluminum Alloys and Steel," *Tribology International*, 30(1), p 19.
- [48] Heimberg J. A., Wahl K. J., Singer I. L., Erdemir A. (2001), "Superlow friction behavior of diamond-like carbon coatings: Time and speed effects," *Applied Physics Letters*, 78 (17), p. 2448.
- [49] Martin J. M., Donnet C., Le Mogne Th., Epicier Th. (1993), *Phys. Rev. B* 48, 10583.
- [50] Sugimoto, Miyake S. (1990), *Appl. Phys. Lett.* 56, 1868.
- [51] Donnet C., Grill A., (1997), *Surf. Coat. Technol.*, 94-95, 456; Donnet C., Belin M., Augé J. C., Martin J. M., Grill A., Patel V. (1994), *ibid.*, 68/69, 626.
- [52] Singer L. (1998), *MRS Bull.* 23, 37.
- [53] Grill A. (1999), *Diamond Relat. Mater.* 8, 428.
- [54] Marchon B., Khan M. R., Heiman N., Pereira P., Lautie A. (1990), *IEEE Trans. Magn.* MAG-26, 2670.
- [55] Bowden F. P., Tabor D. (Clarendon, Oxford, 1964), "The Friction and Lubrication of Solids", 2, 191.
- [56] Enke K., Dimigen H., Hübsch H. (1980), *Appl. Phys. Lett.* 36, 291; Dimigen H., Hübsch H., Memming R. (1987), *ibid.*, 50, 1056.

- [57] Donnet C., Le Mogne T., Ponsonnet L., Belin M., Grill A., Patel V. (1998), *Tribol. Lett.* 4, 259.
- [58] Erdemir A., Eryilmaz O. L., Nilufer I. B., Fenske G. R. (2000), *Surf. Coat. Technol.* 448, p. 133–134.
- [59] Erdemir A., Eryilmaz O. L., Fenske G. (2000), *J. Vac. Sci. Technol. A* 18, 1987.
- [60] Grill A. (1993), “Review of the tribology of diamond-like carbon,” *Wear*, 168, p. 143-153
- [61] Grill A., Meyerson B.S., in K.E. Spear and J.P. Dismukes (eds.), *Synthetic Diamond: Emerging CYD Science and Technology*, Wiley, New York, 1993.
- [62] Grill A., Meyerson B.S., Patel V. (1989), *Diamond Optics*, *Pror. SPIE*, 969 52.
- [63] Enke K., Dimigen H., Hubsch H., (1980), *Appl. Phys. Lett.*, J6, 291.
- [64] Enke K. (1981), *Thin Solid Films*, 80, 227.
- [65] Weissmantel C., Bewiioqua K., Breuer K., Dietrich D., Ebersbach U., Erler H.J., Rau B., Reisse G. (1982), *Thin Solid Films*, 96, 31.
- [66] 360ip A Battelle Company, 2014, “Technology Summary: Engine Oil Additive”, <http://360ip.com/technologies/nanotechnology>.
- [67] İncebay H., Grafen Türevlerin Sentezi ve Cu(II) İyonlarının Elektrokimyasal Tayininde Kullanılması, Selçuk Üniversitesi, 2015, Doktora tezi
- [68] Biercuk, M., Llaguno, M.C., Radosavljevic M, Hyun J, Johnson A.T., Fischer J.E., 2002, Carbon nanotube composites for thermal management, *Applied physics letters*, 80 (15), 2767-9.
- [69] Kilbrid, B., Coleman, J., Fraysse, J., Fournet, P., Cadek, M., Drury, A., Hutzler, S., Roth, S., Blau, W., 2002, Experimental observation of scaling laws for alternating current and direct current conductivity in polymer-carbon nanotube composite thin films, *Journal of Applied Physics*, 92 (7), 4024-30.
- [70] Roen, L., Paik, C., Jarvi, T., 2004, Electrocatalytic corrosion of carbon support in PEMFC cathodes, *Electrochemical and Solid-State Letters*, 7 (1), 19-22.
- [71] Hata, K., Futaba, D.N., Mizuno K, Namai T, Yumura M, Iijima S, 2004, Water assisted highly efficient synthesis of impurity-free single-walled carbon nanotubes, *Science*, 306 (5700), 1362-4.
- [72] Lu, Y.; Liaw, P.K. The mechanical properties of nanostructured materials. *JOM* 2001, 53, 31–35.
- [73] Kim, P.; Shi, L.; Majumdar, A.; McEuen, P. Thermal transport measurements of individual multiwalled nanotubes. *Phys. Rev. Lett.* 2001, 87, 215502.
- [74] Chen,W.X.; Tu, J.P.;Wang, L.Y.; Gan, H.Y.; Xu, Z.D.; Zhang, X.B. Tribological application of carbon nanotubes in a metal-based composite coating and composites. *Carbon* 2003, 41, 215–222.
- [75] Kim, K.T.; Cha, S.I.; Hong, S.H. Hardness and wear resistance of carbon nanotube reinforced Cu matrix nanocomposites. *Mater. Sci. Eng. A* 2007, 449–451, 46–50.

- [76] Scharf, T.W.; Neira, A.; Hwang, J.Y.; Tiley, J.; Banerjee, R. Self-lubricating carbon nanotube reinforced nickel matrix composites. *J. Appl. Phys.* 2009, 106.
- [77] Tan, J.; Yu, T.; Xu, B.; Yao, Q. Microstructure and wear resistance of nickel-carbon nanotube composite coating from brush plating technique. *Tribol. Lett.* 2006, 21, 107–111.
- [78] Guiderdoni, C.; Estournès, C.; Peigney, A.; Weibel, A.; Turq, V.; Laurent, C., “The preparation of double-walled carbon nanotube/Cu composites by spark plasma sintering, and their hardness and friction properties”, *Carbon* 2011, 49, 4535–4543.
- [79] Dorri Moghadam, A.; Omrani, E.; Menezes, P.L.; Rohatgi, P.K. Mechanical and tribological properties of self-lubricating metal matrix nanocomposites reinforced by carbon nanotubes (CNTs) and graphene—A review. *Compos. Part B Eng.* 2015, 77, 402–420.
- [80] Omrani, E.; Moghadam, A.; Menezes, P.L.; Rohatgi, P.K. New emerging self-lubricating metal matrix composites for tribological applications. *Ecotribology* 2016, 63–103.
- [81] Hirata, A.; Yoshioka, N., “Sliding friction properties of carbon nanotube coatings deposited by microwave plasma chemical vapor deposition”, *Tribol. Int.* 2004, 37, 893–898.
- [82] Hu, J.J.; Jo, S.H.; Ren, Z.F.; Voevodin, A.; Zabinski, J.S., “Tribological behavior and graphitization of carbon nanotubes grown on 440C stainless steel”, *Tribol. Lett.* 2005, 19, 119–125.
- [83] Miyoshi, K.; Street, K.W., Jr.; VanderWal, R.L.; Andrews, R.; Sayir, A., “Solid lubrication by multiwalled carbon nanotubes in air and in vacuum”, *Tribol. Lett.* 2005, 19, 191–201.
- [84] Dickrell, P.L.; Pal, S.K.; Bourne, G.R.; Muratore, C.; Voevodin, A.; Ajayan, P.M.; Schadler, L.S.; Sawyer, W.G., “Tunable friction behavior of oriented carbon nanotube films”, *Tribol. Lett.* 2006, 24, 85–90.
- [85] Zhang, X.; Luster, B.; Church, A.; Muratore, C.; Voevodin, A.; Kohli, P.; Aouadi, S.; Talapatra, S. Carbon nanotube-MoS₂ composites as solid lubricants. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2009, 1, 735–739.
- [86] Arai, S.; Fujimori, A.; Murai, M.; Endo, M. Excellent solid lubrication of electrodeposited nickel-multiwalled carbon nanotube composite films. *Mater. Lett.* 2008, 62, 3545–3548.
- [87] Chen, C.S.; Chen, X.H.; Xu, L.S.; Yang, Z.; Li, W.H. Modification of multi-walled carbon nanotubes with fatty acid and their tribological properties as lubricant additive. *Carbon* 2005, 43, 1660–1666.
- [88] Peng, Y.; Hu, Y.; Wang, H. Tribological behaviors of surfactant-functionalized carbon nanotubes as lubricant additive in water. *Tribol. Lett.* 2006, 25, 247–253.
- [89] Lu, H.F.; Fei, B.; Xin, J.H.; Wang, R.H.; Li, L.; Guan, W.C. Synthesis and lubricating performance of a carbon nanotube seeded miniemulsion. *Carbon* 2007, 45, 936–942.

- [90] Kristiansen, K.; Zeng, H.; Wang, P.; Israelachvili, J.N. Microtribology of Aqueous Carbon Nanotube Dispersions. *Adv. Funct. Mater.* 2011, 21, 4555–4564.
- [91] Reinert L., Suárez S., Rosenkranz A., “Tribo-Mechanisms of Carbon Nanotubes: Friction and Wear Behavior of CNT-Reinforced Nickel Matrix Composites and CNT-Coated Bulk Nickel”, *Lubricants* 2016, 4, 11; doi:10.3390/lubricants4020011.
- [92] Reinert, L.; Zeiger, M.; Suarez, S.; Presser, V.; Mücklich, F., “Dispersion analysis of carbon nanotubes, carbon onions, and nanodiamonds for their application as reinforcement phase in nickel metal matrix composites”, *RSC Adv.* 2015, 5, 95149–95159.
- [93] Variava, M.F.; Church, T.L.; Harris, A.T.; Minett, A.I. Polyol-assisted functionalization of carbon nanotubes—A perspective. *J. Mater. Chem. A* 2013, 1, 8509.
- [94] Suárez, S.; Rosenkranz, A.; Gachot, C.; Mücklich, F., “Enhanced tribological properties of MWCNT/Ni bulk composites – Influence of processing on friction and wear behaviour”, *Carbon* 2014, 66, 164–171.
- [95] Chen, X.H.; Chen, C.S.; Xiao, H.N.; Liu, H.B.; Zhou, L.P.; Li, S.L.; Zhang, G. Dry friction and wear characteristics of nickel/carbon nanotube electroless composite deposits. *Tribol. Int.* 2006, 39, 22–28.
- [96] Dickrell, P.L.; Sinnott, S.B.; Hahn, D.W.; Raravikar, N.R.; Schadler, L.S.; Ajayan, P.M.; Sawyer, W.G., “Frictional anisotropy of oriented carbon nanotube surfaces”, *Tribol. Lett.* 2005, 18, 59–62.
- [97] Blau, P.J. On the nature of running-in. *Tribol. Int.* 2005, 38, 1007–1012.
- [98] Prokudina V.K., “Titanium Nitride”, *Concise Encyclopedia of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-804173-4.00160-5>.
- [99] Pyun, J., “Graphene oxide as catalyst: Application of carbon materials beyond nanotechnology”, *Angewandte Chemie International Edition* 2011, 50, 46–48.
- [100] Jasinski, J.B.; Ziolkowska, D.; Michalska, M.; Lipinska, L.; Korona, K.P.; Kaminska, M., “Novel graphene oxide/manganese oxide nanocomposites”, *RSC Advances* 2013, 3, 22857–22862.
- [101] Yang, X.; Tu, Y.; Li, L.; Shang, S.; Tao, X., “Well-dispersed chitosan/graphene oxide nanocomposites”, *ACS Applied Materials & Interfaces* 2010, 2, 1707–1713.
- [102] Maheshkumar, K.V.; Krishnamurthy, K.; Sathishkumar, P.; Sahoo, S.; Uddin, E.; Pal, S.K.; Rajasekar, R., “Research updates on graphene oxide-based polymeric nanocomposites”, *Polymer Composites* 2014, 35, 2297–2310.
- [103] Zhang, H.; Zhang, X.; Zhang, D.; Sun, X.; Lin, H.; Wang, C.; Ma, Y., “One-step electrophoretic deposition of reduced graphene oxide and Ni(OH)₂ composite films for controlled syntheses supercapacitor electrodes”, *The Journal of Physical Chemistry B* 2013, 117, 1616–1627.
- [104] Cha, C.; Shin, S.R.; Annabi, N.; Dokmeci, M.R.; Khademhosseini, A., “Carbon-based nanomaterials: Multifunctional materials for biomedical engineering”, *ACS Nano* 2013, 7, 2891–2897.

- [105] Yin, Z.; Sun, S.; Salim, T.; Wu, S.; Huang, X.; He, Q.; Lam, Y.M.; Zhang, H., "Organic photovoltaic devices using highly flexible reduced graphene oxide films as transparent electrodes", *ACS Nano* 2010, 4, 5263-5268.
- [106] Shao, Y.; Wang, J.; Wu, H.; Liu, J.; Aksay, I.A.; Lin, Y., "Graphene based electrochemical sensors and biosensors: A review", *Electroanalysis* 2010, 22, 1027-1036.
- [107] Sharma, P.; Tuteja, S.K.; Bhalla, V.; Shekhawat, G.; Dravid, V.P.; Suri, C.R. Bio-functionalized graphene-graphene oxide nanocomposite based electrochemical immunosensing. *Biosensors and Bioelectronics* 2013, 39, 99-105.
- [108] Vlachova J.; Labuda J.; Hynek D.; Zitka O.; Kizek R., "Utilization of graphene oxide electrophoretic deposition for construction of electrochemical sensors and biosensors", *Journal of Metallomics and Nanotechnologies* 2015, 3, 57—63.
- [109] Chavez-Valdez, A.; Shaffer, M.S.P.; Boccaccini, A.R., "Applications of graphene electrophoretic deposition. A review", *The Journal of Physical Chemistry B* 2013, 117, 1502-1515.
- [110] Besra, L.; Liu, M., "A review on fundamentals and applications of electrophoretic deposition (epd)", *Progress in Materials Science* 2007, 52, 1-61.
- [111] Treutler C.P.O., *Surf. Coat. Technol.* 200 (2005) 1969.
- [112] Wu L.M., Guo X.Y., Zhang J., *Lubricants* 2 (2014) 66.
- [113] Groche P, Christiany M., "Evaluation of the potential of tool materials for the cold forming of advanced high strength steels", *Wear* 2013; 302:1279–85.
- [114] Eriksson J, Olsson M., "Tribological testing of commercial CrN, (Ti,Al)N and CrC/C PVD coatings – evaluation of galling and wear characteristics against different high strength steels", *Surf Coat Technol* 2011;205:4045–51.
- [115] Podgornik B, Leskovšek V, Tehovnik F, Burja J., "Vacuum heat treatment optimization for improved load carrying capacity and wear properties of surface engineered hot work tool steel", *Surf Coat Technol* 2015;261:253–61.
- [116] Cora O.M., Agcayazı A., Namiki K., Sofuoglu H., Koc M., "Die wear in stamping of advanced high strength steels – investigations on the effects of substrate material and hard-coatings", *Tribol Int* 2012;52:50–60.
- [117] Lorenzo-Martin C., Ajayi O., Erdemir A., Fenske G.R., Wei R., "Effect of micro-structure and thickness on the friction and wear behavior of CrN coatings", *Wear* 2013;302:963–71.
- [118] Chen Y., Nie X., "Study on fatigue and wear behaviors of a TiN coating using an inclined impact-sliding test", *Surf Coat Technol* 2012;206:1977–82.
- [119] Podgornik B., Hogmark S., "Surface modification to improve friction and galling properties of forming tools", *J Mater Process Technol* 2006;174:334–41.
- [120] Bewilogua K., Hofmann D., "History of diamond-like carbon films – from first experiments to worldwide applications", *Surf Coat Technol* 2014;242:214–25.
- [121] Podgornik B., Vižintin J., "Tribological reactions between oil additives and DLC coatings for automotive applications", *Surf Coat Technol* 2005;200:1982–9.

- [122] Petrogalli C., Montesano L., Gelfi M., La Vecchia GM, Solazzi. L., "Tribological and corrosion behavior of CrN coatings: roles of substrate and deposition defects", *Surf Coat Technol* 2014;258:878–85.
- [123] Tung S.C., Gao H., "Tribological characteristics and surface interaction between piston ring coatings and a blend of energy-conserving oils and ethanol fuels. *Wear* 2003;255:1276–85.
- [124] Posti E., Nieminen I., *Wear*, 129 (1989) 273.
- [125] Zhang S., Zhu W., "TiN coating of tool steels: a review", *Journal of Materials Processing Technology*, 39 (1993) 165-177.
- [126] Wan S., Pu J., Li D., Zhang G., Zhang B., "Tribological performance of CrN and CrN/GLC coated components for automotive engine applications", *Journal of Alloys and Compounds* 695 (2017) 433 – 442.
- [127] Flynn, G. and MacBeth, J.W., "A Low Friction, Unlubricated, Uncooled Ceramic Diesel Engine-Chapter II," *SAE Technical Paper* 860448, 1986.
- [128] Wallace K.C.J., Alexander W.D., Cole. A and Tatabad M., "Thermally Insulated Diesel Engines", *Proceedings of Institute of Mechanical Engineers*, Vol 198A, 1984.
- [129] Modi A.J., Gosai D.C., "Experimental Study on Thermal Barrier Coated Diesel Engine Performance with Blends of Diesel and Palm Biodiesel", *SAE Int. J. Fuels Lubr.*, Volume 3, Issue 2, 2010-01-1519.
- [130] Nasrazadani S., Vemuri P., "Synthesis of Cubic Boron Nitride Thin Films on Silicon Substrate Using Electron Beam Evaporation", *AIP Conference Proceedings* 788, 501 (2005); doi: 10.1063/1.2063010.
- [131] Lei T., Fanciulli M., Molnar R.J., and Moustakas T.D., *Appl. Phys. Lett.* 59, 944 (1991).
- [132] Saitoh H., and Yarbrough W.A., *Diamond Relat. Mater.* 1, 137 (1992).
- [133] Ediz vd., 1997
- [134] Cheng Y., Yin X., Liu Y., Li S., Cheng L., Zhang L., "BN coatings prepared by low pressure chemical vapor deposition using boron trichloride–ammonia–hydrogen–argon mixture gases", *Surface & Coatings Technology* 204 (2010) 2797–2802
- [135] Naslain R., Guette A., Rebillat F. et al., *J. Solid State Chem.* 177 (2004) 449.
- [136] Pierson H.O., *J. Compos. Mater.* 9 (1975) 228.
- [137] Lei G., Jian Y., Q. Tai, *Electron. Comp. Mater.* 27 (2008) 22.
- [138] Seghi S., Fabio B., *J. Economy, Carbon* 42 (2004) 3043.
- [139] Cholet V., Vandenbulcke L., Rouan J.P., *J. Mater. Sci.* 29 (1994) 1417.
- [140] Cofer C.G., *J. Economy, Carbon* 33 (1995) 389.
- [141] Le Gallet S., Chollon G., Rebillat F. et al., *J. Eur. Ceram. Soc.* 24 (2004) 33.
- [142] Durukan O., Bor Nitrür Nano Tabakaları İçeren Polietilen Filmlerin Üretimi ve Karakterizasyonu, Anadolu Üniversitesi, 2012, Yüksek lisans tezi.

- [143] Rudolph S., "Composition and Application of Coatings Based on Boron Nitride", *Interceram* Vol. 42 No. 5. 1993
- [144] Miyoshi K., "CVD Diamond, DLC, and c-BN Coatings for Solid Film Lubrication", Evanston, Illinois, June 29-July 2, 1997.
- [145] Asrul M., Zulkifli NWM., Masjuki HH., Kalam MA., (2013), "Tribological properties and lubricant mechanism of Nanoparticle in Engine Oil", *Procedia Engineering* 68, 320 – 325.
- [146] Zou, Q., 2013. "Nanoparticles in Automotive Applications", *Encyclopedia of Tribology*, 2376-2381.
- [147] Karagöz ZBA., Demirtaş S., Kaleli H., Yüksek L., Çıtak E., "Review of tribological behavior of graphene coatings on piston rings in engines", *Industrial Lubrication and Tribology*, Art. No: 10.1108 /ILT-06-2018-0233.
- [148] Dai, W., Kheireddin, B., Gao, H., Liang, H. "Roles of nanoparticles in oil lubrication", *Tribology International* 102, (2016) 88–98.
- [149] Dennis, B. R. V.; Viyannalage, L. T.; Anil, V. Graphene Nanocomposite Coatings for Protecting Low-Alloy Steels From Corrosion. *Am. Ceram. Soc. Bull.* 2013, 92 (5), 18–24.
- [150] Voevodin, A. A.; O'Neill, J. P.; Zabinski, J. S. Tribological Performance and Tribochemistry of Nanocrystalline WC/amorphous Diamond-like Carbon Composites. *Thin Solid Films* 1999, 342 (1–2), 194–200.
- [151] Monaghan, D. P.; Teer, D. G.; Logan, P. A.; Efeoglu, I.; Arnell, R.D. Deposition of Wear Resistant Coatings Based on Diamond like Carbon by Unbalanced Magnetron Sputtering. *Surf. Coat. Technol.* 1993, 60 (1–3), 525–530.
- [152] Delplancke-Ogletree, M. P.; Monteiro, O. R. Wear Behavior of Diamond-like Carbon/metal Carbide Multilayers. *Surf. Coat. Technol.* 1998, 108–109, 484–488.
- [153] Gilmore, R.; Baker, M. A.; Gibson, P. N.; Gissler, W.; Stoiber, M.; Losbichler, P.; Mitterer, C. Low-Friction TiN-MoS₂ Coatings Produced by Dc Magnetron Co-Deposition. *Surf. Coat. Technol.* 1998, 108–109, 345–351.
- [154] Siu, J. H. W.; Li, L. K. Y. An Investigation of the Effect of Surface Roughness and Coating Thickness on the Friction and Wear Behaviour of a Commercial MoS₂ – Metal Coating on AISI 400C Steel. *Wear* 2000, 237 (2), 283–287.
- [155] Geim, A. K. Graphene: Status and Prospects. *Science* 2009, 324 (5934), 1530–1534.
- [156] Lee, C.; Wei, X.; Kysar, J. W.; Hone, J. Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene. *Science* 2008, 321 (5887), 385–388.
- [157] Berman, D.; Erdemir, A.; Sumant, A. V. Graphene: A New Emerging Lubricant. *Mater. Today* 2014, 17 (1), 31–42.
- [158] Ghasemi, R.; Elmquist, L. The Relationship between Flake Graphite Orientation, Smearing Effect, and Closing Tendency under Abrasive Wear Conditions. *Wear* 2014, 317 (1–2), 153–162.

- [159] Ghasemi, R.; Elmquist, L. Cast Iron and the Self-Lubricating Behaviour of Graphite under Abrasive Wear Conditions. 10th Inter. Symp. Sci. Process Cast Iron– SPCI10 2014, 1–7.
- [160] Tripathi, K.; Joshi, B.; Gyawali, G.; Amanov, A.; Lee, S. W. A Study on the Effect of Laser Surface Texturing on Friction and Wear Behavior of Graphite Cast Iron. *J. Tribol.* 2016, 138 (1), 011601.
- [161] Tripathi, K.; Gyawali, G.; Amanov, A.; Lee, S. W. Synergy Effect of Ultrasonic Nanocrystalline Surface Modification and Laser Surface Texturing on Friction and Wear Behavior of Graphite Cast Iron. *Tribol. Trans.* 2017, 60 (2), 226–237.
- [162] Berman, D.; Erdemir, A.; Sumant, A. V. Few Layer Graphene to Reduce Wear and Friction on Sliding Steel Surfaces. *Carbon* 2013, 54, 454–459.
- [163] Kim, K.; Lee, H.; Lee, C.; Lee, S.; Jang, H.; Ahn, J.; Kim, J.; Lee, H. Chemical Vapor Deposition–Grown Graphene: The Thinnest Solid Lubricant. *ACS Nano* 2011, 5 (6), 5107–5114.
- [164] Prasath S., Raghul K., Venkatesh M., Vignesh R., “Performance Analysis of TiO₂ Coated Aluminium Alloy For Engine Pistons”, Department of Mechanical Engineering, Sri Ramanujar Engineering College, Vandalur, Kolapakkam, Chennai -127.
- [165] Dai W.W., Ding C.X., Li J.F., Zhang Y.F., Zhang P.Y., “Wear mechanism of plasma-sprayed TiO₂ coating against stainless steel”, *Wear* 196 (1996) 238-242.
- [166] Wu H., Zhao J., Cheng X., Xia W., He A., Yun J., Huang S., Wang L., Huang H., Jiao S., Jiang Z., “Friction and wear characteristics of TiO₂ nano-additive water-based lubricant on ferritic stainless steel”, *Tribology International* 117 (2018) 24-38.
- [167] Dai, W., Kheireddin, B., Gao, H., Liang, H. “Roles of nanoparticles in oil lubrication”, *Tribology International* 102, (2016) 88–98.
- [168] Kayalı E.S., Çimenoglu H., *Malzemelerin Yapısı ve Mekanik Davranışları*, İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi, İstanbul, 1986.
- [169] Temiz V., “Triboloji Ders Notları”, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü.
- [170] Özbek İ., “Malzeme Seçimi ve Prensipleri”, Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, 1 Mart 2016.
- [171] Paik, N., 2005. Raman and XPS studies of DLC films prepared by a magnetron sputter-type negative ion source. *Surf. Coat. Tech.* 200, 2170-2174.
- [172] Khadem, M. et al., 2016. Ultra-thin carbon-based nanocomposite coatings for superior wear resistance under lubrication with nano-diamond additives. *RSC. Adv.* 6, 56918-56929.

Tezden Üretilmiş Yayınlar

İletişim Bilgisi: zacunaskaragoz@gmail.com

Makaleler

1. Zeynep Burcu Acunaş Karagöz, Selman Demirtaş, Hakan Kaleli, Levent Yüksek, Emre Çıtak, “Review of tribological behavior of graphene coatings on piston rings in engines”, Industrial Lubrication and Tribology, Art. No: 10.1108 /ILT-06-2018-0233

Konferans Bildirileri

1. Zeynep Burcu Acunaş Karagöz, “Review of tribological behavior of graphene coatings on piston rings in engines”, 2nd International Conference on Tribology Turkeytrib 2018, April 18-20 2018, ISBN: 978-605-9546-10-2.

2. Zeynep Burcu Acunaş Karagöz, “Study of tribological behavior of BN and DLC nano coatings on piston rings”, 2nd International Conference on Tribology Turkeytrib 2018, April 18-20 2018, ISBN: 978-605-9546-10-2.