

**T.C.
İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**MOTOR PARÇALARINDA NANO KAPLAMALAR VE YÜZEY
AŞINMALARINA ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zeynep AĞAÇDELEN

**Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Makina Mühendisliği Programı**

Ocak, 2021

**T.C.
İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**MOTOR PARÇALARINDA NANO KAPLAMALAR VE YÜZEY
AŞINMALARINA ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Zeynep AĞAÇDELEN
(Y1713.080023)**

**Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Makina Mühendisliği Programı**

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Lütfiye DAHİL

Eş Danışmanı: Prof. Dr. Emrullah Hakan KALELİ

Ocak, 2021

ONAY FORMU



YEMİN METNİ

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “Motor Parçalarında Nano Kaplamalar Ve Yüzey Aşınmalarına Etkileri” adlı çalışmanın, tezin proje safhasından sonuçlanmasına kadar ki bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve etik geleneklere aykırı düşecek bir davranışımın olmadığını, tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin bibliyografyada gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yaparak yararlanmış olduğumu belirtir ve onurumla beyan ederim 29/01/2021.

Zeynep AĞAÇDELEN



Degerli Aileme ve Petra'ya,

ÖNSÖZ

Bu tezde emeği geçen başta danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Lütfiye DAHİL ve eş danışmanım Prof. Dr. Emrullah Hakan KALELİ hocalarıma bana verdikleri emek ve yardımlardan dolayı çok teşekkür ediyorum.

Yüksek lisans ve tez aşamasında tüm destek ve ilgileriyle yanımda bulundukları için ailem, çalıştığım şirketime ve çalışma arkadaşlarıma bu süreçte bana desteklerini esirgemedikleri için teşekkür ediyorum.

Her daim yanımda olan bana sonsuz sevgi gösterip, sabırla bekleyen köpeğim Petra'ya da teşekkür ederim.

Bu tezde kaplanması gereken numunelerin CVD yöntemi ile grafen kaplanmasında bana sağladıkları yardımlardan dolayı GrafenBioTech Nanoteknoloji mühendislik Ltd. şirketine teşekkür ederim.

Kasım 2020

Zeynep AĞACDELEN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI:	4
3. NANOTEKNOLOJİ VE NANO KAPLAMALAR.....	8
3.1 Nanoteknoloji nedir?	8
3.2 Nano kaplamalar ve üretim yöntemleri	9
3.2.1 Nano kaplamaların genel özellikleri	9
3.2.2 Nano kaplamaların üretim yöntemleri	10
3.2.2.1 Sol-jel yöntemi ile kaplama	11
3.2.2.2 Termal Sprey Yöntemi ile Kaplama	13
3.2.2.3 Fiziksel buhar biriktirme yöntemi (PVD) ile kaplama.....	16
3.2.2.4 Kimyasal buhar biriktirme yöntemi (CVD) ile kaplama.....	19
4. AŞINMA	22
4.1 Aşınma Çeşitleri	23
4.2 Motor Parçaları ve Motor Parçalarında Aşınma	24
4.2.1 Motor parçaları.....	24
4.2.2 Motor Parçalarında Aşınmalar	26
4.2.3 Motor parçalarında aşınmayı önlemek için kullanılan seramik kaplamalar	29
5. MATERYAL VE METOT	36
5.1 Kullanılan Motor Silindir Gömleğinin Özellikleri Ve Ölçü Parametreleri.....	36
5.2 Silindir Gömleği Parçalarının Kaplanma Prosesi.....	40
5.2.1 Deney Düzenneği Hazırlanması Ve Numunelerin Test Edilmesi.....	41
5.3 Deneyden Elde Edilen Sonuçlar Ve Grafikler:	44
5.4 Deney sonrası optik mikroskop analizi görüntüleri	45
5.5 Deney Sonrasında Elde Edilen Grafikler	50
6. SONUÇ.....	51
KAYNAKLAR	53
ÖZGEÇMİŞ.....	58

KISALTMALAR

Al	: Alüminyum
Al₂O₃	: Alümina
Al₂O₃-ZrO₂	: Alüminyum Oksit-Zirkonyum Oksit
AlCr	: Alüminyum krom
APCVD	: Atmosferik Basınçlı Kimyasal Buhar Biriktirme
AT	: Alüminyum Oksit-Titanyum-Oksit
AZ	: Alüminyum Oksit-Zirkonyum Oksit
c-BN	: Kübik boron nitrür
CO	: Karbon monoksit
CO₂	: Karbon dioksit
Cr	: Krom
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
DC	: Doğru akım
FTIR	: Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi
HVOF	: Yüksek hızda oksijen yakıtlı püskürtme
K	: Kübik
LCVD	: Lazer Kimyasal Buhar Biriktirme
LHR	: Isı reddi
LPCVD	: Alçak Basınçlı Kimyasal Buhar Biriktirme
M	: Monolitik
MgO	: Magnezya
MMK	: Metal matriksli kompozitler
MOCVD	: Metal – Organik Kimyasal Buhar Biriktirme
Ni	: Nikel
Nm	: Nanometre
PAPVD	: Elektron ışınlı plazma destekli fiziksel buhar biriktirme
PECVD	: Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
r-BN	: Rhombohedral bor nitrür
RF	: Radyo frekans
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopisi
T	: Tetragonal
TBC	: Termal bariyer kaplama
Ti	: Titanyum
TiO₂	: Titanya
UV	: Mor ötesi
XPS	: X-Ray fotoelektron spektroskopisi
XRD	: X-ışını kırınımı
Y₂O₃	: Yittria
ZrO₂	: Zirkonya
TiN	: Titanyum nitrür

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1: PVD Yönteminde kullanılan kaplamaların fiziksel özellikleri	18
Çizelge 4.1: Seramik kaplamalar ve kullanım yerleri	31
Çizelge 4.2: Seramiklerin kaplama yöntemleri	31
Çizelge 4.3: Oksit seramik kaplamalar ve aşınmaya karşı özellikleri	31
Çizelge 4.4: Bazı seramik kaplama malzemelerinin özellikleri	32
Çizelge 5.1: Tribometre deney düzeneğinin deneysel parametreleri.....	42

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1: Nano teknolojinin sistemi ve sınıflandırılması.....	8
Şekil 3.2: Nano kaplamaların üretim teknikleri karşılaştırması	10
Şekil 3.3: Sol-jel yönteminin hazırlanması ve elde edilen sonuç ürünler.....	11
Şekil 3.4: Sol-jel tekniği ile ince film kaplama	12
Şekil 3.5: Termal sprey ile kaplama yöntemi	14
Şekil 3.6: PVD kaplama yöntemi	17
Şekil 3.7: CVD Kaplama Yöntemi	20
Şekil 3.8: CVD kaplama yönteminin çalışma mekanizması	20
Şekil 4.1: Aşınma türleri şeması.....	22
Şekil 4.2: Aşınma çeşitleri.....	24
Şekil 4.3: Dizel motorun kesiti ve çalışma prensibi	25
Şekil 4.4: Motor segman aşınması örneği.....	26
Şekil 4.5: Normal piston ve fazla ısınmadan kaynaklı aşınmış piston örneği.....	27
Şekil 4.6: Kaplamalı ve kaplamasız Su Soğutmalı Bir Dizel Motorunda Isı Açığa Çıkarma Prosesinin Karşılaştırılması.	28
Şekil 4.7: Egzoz sıcaklığına kaplamanın etkisi.	33
Şekil 4.8: CO emisyonuna kaplamaların etkisi.....	33
Şekil 5.1: (a) ve (b) motor silindir gömleğinin dış görünüşleri	36
Şekil 5.2: Deneyde kullanılan Antor LD 400 motorunun genel özellikleri.....	37
Şekil 5.3: (a) malzemenin iç yüzeyini göstermektedir ve (b) malzemenin iç yüzeyindeki honlama çizgilerini gösterir	37
Şekil 5.4: Motorun genel görüntüsünden deney anına kadar olan süreç	38
Şekil 5.5: Motor silindir gömleğinin Dünya kalıp firması tarafından özel olarak Tribometreye göre kesilmiş boyutları	38
Şekil 5.6: Motor silindir gömleği parçasının ölçüleriyle birlikte teknik resmi	39
Şekil 5.7: Kaplama öncesi numune görünüşleri.....	40
Şekil 5.8: (a) ve (b) CVD kaplama yapılan makine.....	40

Şekil 5.9: Kaplama sonrası parça görüntüsü.....	41
Şekil 5.10: (a) deney düzeneğinin genel görünümü (b) Sürtünme Kuvveti Eğrileri verilerini toplayan bilgisayar (c) Dijital Sıcaklık Kontrol Panosu	41
Şekil 5.11: Deney düzeneğinde numune üzerinde hasar oluşturan bilyelerinin hazırlanması.....	42
Şekil 5.12: Deney sonrası kaplama ve numune görüntüsü	43
Şekil 5.13: Kaplama kalınlığının ölçümü görüntüsü	43
Şekil 5.14: CVD yöntemi ile motor silindir kovanın Yüzeyine Kaplanmış tek tabaka Grafenin Raman Spekleri	44
Şekil 5.15: (a) Yeni Antor Silindir gömleği Kaplamasız Orijinal X5 görüntüsü (b) Yeni Grafen Kaplamalı silindir gömleği Aşınmamış X10 görüntüsü (c) Yeni bilye X10 görüntüsü	45
Şekil 5.16: Kaplamasız Silindir gömleği X10 üzerinde bilyenin tribotest sonrası optik mikroskop analizi ile alınmış görüntüsü	45
Şekil 5.17: X10 bilyesinin altındaki Kaplamasız Silindir numunesini tribotest sonrası optik mikroskop analizi ile alınmış görüntüsü	46
Şekil 5.18: Grafen Kaplı Silindir gömleği X10 üzerinde ki bilyenin tribotest sonrası optik mikroskop analizi ile alınmış görüntüsü	46
Şekil 5.19: X10 bilyesinin altında Grafen Kaplı Silindir gömleği numunesin tribotest sonrası optik mikroskop analizi ile alınmış görüntüsü	47
Şekil 5.20: Tribotest sonucunun 3D yüzey Pürüzlülüğü görüntüsü	48
Şekil 5.21: Tribotest sonucunun 3D yüzey Pürüzlülüğü görüntüsü	48
Şekil 5.22: Tribotest sonucunun 3D yüzey Pürüzlülüğü görüntüsü	49
Şekil 5.23: Tribotest sonucunun 3D yüzey Pürüzlülüğü görüntüsü	49
Şekil 5.24: Kaplamasız numunenin elde edilen grafiği	50
Şekil 5.25: CVD grafen kaplamalı numune grafiği	50

MOTOR PARÇALARINDA NANO KAPLAMALAR VE YÜZEY AŞINMALARINA ETKİLERİ

ÖZET

Bu çalışmada, Dizel motor silindir gömleği yüzeyinin küçük kesilmiş parçaları Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) tekniği kullanılarak Grafen ile kaplanmıştır. Yeni tasarım CVD reaktör ile hegzan buharı kullanarak sentezlenen hidrojen akış ile vakum koşulları altında grafen tek tabaka olarak silindir gömleği üzerinde başarıyla biriktirilmiştir. Bu kaplama (Türkiye) Konya’da bulunan GrafenBioTech Nanoteknoloji mühendislik Ltd.'de kaplanmıştır. (CVD) grafen kaplı motor silindir kovanın sürtünme özellikleri, tribotest cihazında deneysel olarak test edilmiştir. Tribometre testleri, sınır yağlama koşullarında ve 100° C’de 5w40 sentetik motor yağı kullanılarak kaplanmış ve kaplanmamış silindir gömlekleri üzerinde 100CrMn6 bilyeler sürtünerek gerçekleştirilmiştir. Kaplanmış motor silindir kovani küresel grafitli bir dökme demir kullanılmıştır. Deney sonucunda 3D yüzey pürüzlülüğü parametreleri sunulmuştur. Deney sonucunda 3D yüzey pürüzlülüğü parametreleri sunulmuştur. Grafen kaplı motor silindir kovani numunesi, kaplamasız olana göre düşük sürtünme değeri göstermiştir. Kaplamasız ve kaplamalı motor kovani (koruyucu tabakalar ile) sürtünme yüzeyinde aşındırıcı aşınma çizgileri-oluklar oluşurken, bilye yüzeyinde daha az aşınma görülmüştür. Kaplama ile sürtünme katsayısında %11,7’lik bir düşme elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Nanokaplamalar, Motor parçaları, Motor parçalarında kaplamalar, Aşınma, Motor parçalarında aşınma

NANO-COATINGS ON ENGINE PARTS AND ITS EFFECTS ON SURFACE ABRASION

ABSTRACT

In this study, the Diesel engine cylinder liner is coated with Graphene using Chemical Vapour Deposition (CVD) technique on the small cut-pieces of cylinder liner surface. The graphene coating was successfully deposited on cylinder liner as monolayer, by direct synthesized CVD method under vacuum conditions using hydrogen flux synthesizing with hexane vapor in new design CVD reactor. This coating rights belongs to GrafenBioTech Nanotechnology Engineering Ltd. in Konya-Turkey. Friction properties of (CVD) graphene coated liner were tested experimentally in tribotest rig. The tribometer tests were carried out 100CrMn6 balls rubbing on coated and uncoated cylinder liners using 5w40 synthetic engine oil, under boundary lubrication conditions and 100°C. The coated liner material is a spheroidal graphite cast iron. 3D surface roughness parameters were presented. Graphene coating showed lower friction value between ball and coated cylinder liner pairs related non-coated liner. Less wear exists on the ball surface while abrasive wear lines-grooves occurred on the rubbed surface of non-coated and coated liner (with protective layers).

Key word: *Nano-Coatings, Engine Parts, Coatings On Engine Parts, Abrasion, Abrasion on Engine Parts*

1. GİRİŞ

Eski zamanlardan beri insanlar kendi kullanım amaçlarına uygun doğadaki birçok maddeden yararlanarak yeni malzemeler yapma ihtiyacı duymuşlardır. Bu malzemelerin bazıları doğal, bazıları ise yapay olarak kullanılıp amaçlara uygun aletler üretilmiştir ve bunları yaşamlarının birçok bölümünde kendilerini savunmak, avlanmak, beslenmek gibi değişik şekillerde kullanmışlardır. Tasarlanan bu malzemeler insanların hayatlarını kolaylaştırmayı amaçlamıştır. O zamanlarda kullanılan bu malzemeler günümüzdeki birçok malzemenin temelini atılmasına yardımcı olmuştur. Ancak bu malzemeler kullanıldıkça yüzeyde meydana gelen deformasyonlar daha dayanıklı yüzeyler elde etme ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Yüzey dayanıklılığını geliştirebilmek için farklı malzemelerle yüzeyler kaplanarak denemeler yapılmış ve yüzeyde iyileştirme sağlanmaya çalışılmıştır. Örneğin, 13. Yüzyılın sonlarından itibaren ahşap malzemelerin hava ile teması sonucu bozulduğu ortaya çıkmış ve bunu önlemek amacı ile demir dövülerek levha haline getirilmiş ve ahşap malzemelerin üzeri kaplanarak koruma sağlanmıştır.

Günümüzde birçok yüzeyde iyileştirme işlemine ihtiyaç vardır ve bunun için çok çeşitli teknikler uygulanmaktadır. Bu teknikler yüzeyde istenilen özelliklere göre farklılık gösterebilmekte ve malzemenin tamamını değiştirmeden sadece yüzeyde yapılan işlemler ile daha verimli bir şekilde elde edilebilmektedir. Kaplamaların önemi gün geçtikçe dahada ortaya çıkmaktadır. Kaplamaların asıl amacı yüzeyde oluşturulan tabaka ile ana malzemeyi çalışacağı ortamdaki dış etkenlerden korumaktır. Bu sayede esas malzeme kaplanarak korunur ve ömrü uzatılır buna bağlı olarak da maliyeti azaltılabilir. Bir parçanın tamamını pahalı bir malzemeden üretmek yerine sadece o malzeme ile kaplayarak tasarruf sağlanabilir. Kaplamalar ile farklı taleplere uygun çeşitli özellikler elde edilebilir.

Endüstri alanında çok çeşitli kaplama teknikleri kullanılmaktadır. Bunlardan önemli olanları Elektrolitik kaplamalar, Galvanizleme, Püskürtme kaplama, Difüzyon kaplama, Vakum ortamında kaplama: CVD, PVD kaplamalardır. Bunlar talep edilen özelliklere göre çeşitlilik gösterir ve uygulanan yöntemlerde ona göre belirlenir. Genel olarak kaplamanın endüstride kullanım amaçları bazen koruma (korozyona, aşınmaya ve oksidasyona karşı), bazen mühendislik çalışma ihtiyaçları (daha yüksek sertlik, lehimlenebilme gibi), bazen ise daha güzel görünüm elde etmek amacı ile dekoratif amaçlı uygulanmaktadır. Yüzey kaplama tekniğinin asıl hedefi malzemenin yüzeyine başka malzemenin eklenmesi esasına dayanır. Kaplama malzemelerini 3 ana sınıf altında toplamak mümkündür. Bunlar gaz halindeki, çözüldüden elde edilen ve son olarak sıvı ya da plazmadan elde edilen kaplamalardır. Yüzeylere bağlanma şekillerine göre de fiziksel ve kimyasal olarak sınıflandırılabilir.

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte kaplamalarda da farklı teknikler denenerek daha etkili yöntemler elde edilmeye çalışılmıştır. Günümüzde nano teknolojiye kaplama alanına dahil edilerek daha kaliteli bir kaplama elde edilme tekniğine gidilmiştir. Nano teknoloji ile nano kaplamalar elde edilmeye çalışılmış ve yeni teknikler ortaya çıkmıştır.

Malzemeler kullanıldıkça yüzeylerinde oluşan değişiklikler, insanları bu malzemeleri nasıl daha kuvvetli hale getiririz sorusuna yöneltmiştir. Yüzey bir malzemenin çevresiyle olan sınırını belirler ve malzemede gözle görülür oluşan değişiklikler yüzeyde görülebilir. Bir başka deyişle, yine kendi ana malzemesinden meydana gelen ve malzemeyi çevreleyerek onun şeklini oluşturan dış alanlarla ilk temas eden yüzey olarak tanımlanabilir. Ve günümüzde birçok özellik malzemenin yüzeyi sayesinde belirlenebilir. Örneğin, dış görünüş ve renklerini, korozyon davranışlarını, sürtünme ve aşınma özelliklerini, yapışma özelliklerini, optik özellikleri gibi birçok malzeme özelliğini etkiler [1].

Malzemenin özellikleri, yüzeyinin gösterdiği özelliklerle paralel olarak ilerler bu nedenle malzemelerin tümünde değişiklik yapmak yerine yüzeyde yapılacak değişiklikler yeterli olacaktır. Bazı durumlarda yüzeyde görülmek istenen özellikleri malzeme karşılayamayabilir bu nedenle daha yüksek özelliklere sahip yeni malzemelere ihtiyaç duyulabilir. Bu yöntem ile yüzeyde elde edilecek yeni özellik tüm malzeme yapısını değiştirmeyeceği için ekonomik anlamda tasarruf

sağlamayı hedefleyecektir. Örneğin, günümüzde tüm malzemenin altından üretilmesi yerine malzemelerin yüzeyleri altın ile kaplanarak büyük bir tasarruf elde edilmektedir ve istenilen ölçüde daha iyi yüzey özellikleri elde edilir. Bir başka örnek ise aşınmadır. Aşınma yüzeyde meydana geldiği için malzemenin yüzeyine uygulanacak sertleştirme işlemi ile tüm malzemeye bu özellik kazandırılmış olur. Bu sayede yapılan iyileştirmeler ile malzemenin dayanıklılığı ve ömrü büyük miktarda arttırılmış olur.

Yukarıdaki örneklerde de görüldüğü gibi birçok değişik amaç ile yüzey iyileştirme işlemi uygulanmaktadır. Ancak bunlardan en yaygın olarak kullanılanı, malzeme yüzeyine istenilen özellikleri elde etmek amacıyla bir başka malzemenin yerleştirilmesiyle elde edilen kaplamalardır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI:

Malzemelerin dış etmenlere karşı ilk olarak temas ettikleri bölge yüzeyleridir ve bir malzemenin yüzeyi sayesinde malzemenin özellikleri tayin edilebilir. Malzemelerin yüzeylerine bakılarak sürtünme ve aşınmaları, dış görünüşleri, renkleri, korozyon davranışları, yapışma özellikleri, optik özellikleri ve mekanik özellikleri (örneğin: yorulma) belirlenebilir. Bu nedenle bir malzemenin özelliklerinde iyileştirme yapılmak istendiğinde, yüzeyde yapılacak bir iyileştirme prosesi yeterli olacaktır. Buda bize maliyet açısından tasarruf sağlayacaktır. Çünkü tüm malzemenin değiştirilmesi gerekmeden iyileştirme sağlanmış olacaktır. Malzeme yüzeyinde yapılan iyileştirme yüzeyde küçük bir derinlikte olsa da malzemenin ömrünü 10 veya 100 kat arttırabilmektedir. Yüzey üzerine değişik amaçlarla uygulanan işlemler arasında en çok tercih edilen yöntem kaplamalardır. Kaplamalar yüzeye başka bir malzeme yerleştirilmesiyle elde edilir ve bu yöntem çoğunlukla malzemeyi korurken aynı zamanda malzemeye yeni özelliklerde katmaktadır. Geçmiş dönemlerde kaplamalar korozyon önlemek ve dekoratif amaçlı kullanılmış olsa da günümüzde değişik kaplama çeşitleriyle aşınmayı önlemek mümkün hale gelmiştir [1]. Günümüzde nano kaplamalar yoğunluklu olarak kullanılmakta ve bu konular hakkında birçok yeni çalışma yapılmaktadır.

S. Vijaya Kumar Reddy ve arkadaşı, yapılan incelemelerde küçük boyutlarda olan nano kaplamaların diğer geleneksel kaplama çeşitlerine göre sayısız avantajlarını keşfetmişlerdi. Nano teknoloji esaslı kaplamaların sürekli büyümesinde karşılaşılan en büyük zorluklar dağılım, karakterizasyon, sağlık ve güvenlik ve malzeme maliyetidir. Son gelişmeler düşük ısı reddi (LHR) motor uygulamalarına odaklanmıştır. Bu çalışmada şimdiye kadar elde edilen ana sonuçları dikkate almakta ve bio-dizel harmanları üzerinde çalışan nano kaplamalı LHR motorunda karşılaşılan probleme odaklanmaktadır [2].

S. Rudolph, yapılan araştırmalarda bor nitrür kaplamalarının birleşimi ve özelliklerini kullanarak yüksek sıcaklıkta kullanılan metalik ve seramik

malzemelerin yüzeyini kaplamaya başlayarak bu alanda yenilikçi bir girişimde bulunmuştur. Bor nitrür kaplamalar tabakaları kolaylıkla kaydırabildikleri için malzemeler arasında katı bir yağlayıcı görevi de görebilmektedir [3].

Kwang Min Lee ve arkadaşları, kübik boron nitrür (c-BN) kullanarak daha da iyi özellikler elde etmeye çalışmışlardır. Kübik boron nitrür düşük sürtünme katsayısı, sertlik, yüksek aşınma direnci ve yüksek ısı iletkenliği gibi mekanik özelliklere sahiptir. Bu çalışmada en önemli özellik ise bu bileşimin yüksek sıcaklıklarda kimyasal etkileşime girmemesi nedeni ile çok çeşitli endüstriyel alanda avantaj sağlamasıdır. Bu çalışmada, c-BN bileşimi PVD yöntemi kullanılarak sentezlendi [4].

Narendra B. Dahotre ve arkadaşı S. Nayak, yapılan incelemede mühendislik alanında uygulanan kaplamalar incelendi. Boyutsal kararlılık, tribolojik özellikler, yağlama, sürtünme katsayısı, sıcak sertlik, honlama için uygunluk yüzey pürüzlülüğü gibi birçok özellik parametresi incelenmiş ve tartışılmıştır. Ni-Mo-MoS₂, Ni-BN, grafit-Ni vb. gibi çeşitli kaplamaları kullanarak motorun verimini ve ömrünü artırmaya, yağ tüketimini azaltmaya çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmalar sonucu dizel ve içten yanmalı motorlarda Mo/Cr bazlı kaplamalar yüksek sıcaklıkta korozyonla mücadele etmek için en uygun malzeme olduğu tespit edildi [5].

A. S. Kamenetskikh, N. V. Gavrilov ve diğerleri yaptıkları araştırmalarda bor nitrür kaplamaları ile çalışmışlar ve bunların etkileri hakkında bilgi edinmişlerdir. Çalışmada yüzey üzerinde 2-20 mA / cm² kalınlığında bir kaplama elde edilmeye çalışıldı. Sonuç olarak, elektron ışını ile üretilen plazmanın kaplamaların magnetron deşarjı ve faz bileşimi üzerindeki etkisi araştırıldı. Kaplama sırasında elektron ışını akımının değiştirilmesi, iyon akışının kaplamadaki atom sayısına oranının 2–24 aralığında kontrol edilmesine ve c-BN faz oluşumu koşullarının optimizasyonuna izin verildi [6].

M. Chubarov, H. Pedersen, H. Hogberk ve diğerleri Rhombohedral bor nitrür (r-BN) tabakaları ile çalışmalar yapmışlardır. Bu tabakaları kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemini kullanarak safir substrat üzerinde oluşturmaya çalışmışlardır. Bu yüzeyde oluşan kristalin kalitesini araştırmak için X-ışını kırınımı (XRD) ölçümleri yapılmış ve raporlama yapılmıştır. Oluşan kaplama elektron mikroskobu kullanılarak 40'dan fazla atomik tabakalar halinde

incelenmiştir. XRD ölçümleri, yüzeyde kristalin oluşumu sırasında gaz karışımına silikon ekleyerek kristalin kalitesinde önemli bir gelişme sağlamışlardır. Ve bu sayede kaplamadaki kusurları minimize etmişlerdir [7].

T. Tavşanoğlu yaptığı çalışmada tek katlı ve çok katlı bor karbür ve bor karbonitrür filmlerinin farklı sıçratma teknikleriyle oluşturulmasını incelemiştir. Bu ince film tabakaları sırası ile konvansiyonel doğru akım manyetik alanda sıçratma, plazma destekli doğru akım (DC) manyetik alanda sıçratma ve radyo frekans (RF) sıçratma teknikleriyle üretilmiştir. Bor karbonitrür ince filmlerin üretimine azot gazı eklenerek kaplama yapılmıştır. Kalın bor karbür ve bor karbonitrür kaplamalar elde etmek için fonksiyonel gradyanlı çok katmanlı sistemler sıçratma yöntemi ile biriktirilmiş ve sonuçlar tartışılmıştır. Elde edilen sonuçlarda sertlik ve aşınma direnci gerektiren alanlarda bor karbür ince filmlerin çok etkili bir alternatif olabileceği bulgusuna ulaşılmıştır. Üretim aşamasında parametre değişikliği yapılarak farklı özelliklerde ve mikro yapıda bor karbür kaplamalar elde edilmiştir. Yapılan azot ilavesi ile kaplamalarda daha iyi bir sertlik ve aşınma direnci elde edilmiştir. Bu sayede çok katmanlı kaplama tasarımlarında ortaya çıkan sorunlarda minimize edilerek, kalın bor karbür ve bor karbonitrür kaplamalar uygun alt katman seçimiyle başarılı olabileceği gözlemlendi [8].

H. Cesur, B. Kaftanoğlu ve arkadaşları, bor nitrür kaplamaları hakkında çalışmalar yapmışlardır. Bor nitrür kaplamaları, altıgen bir bor nitrür hedefinden radyo frekansı (rf) magnetron püskürtme tekniği ile Si ve çelik substratlar üzerine bırakılmıştır. Biriktirme işlemi, toplam basınç 3×10^{-3} Torr olan, sırasıyla 5 ila 1 oranına sahip bir Ar ve N₂ karışım ortamında gerçekleştirilmiştir. Ana parametreler, bor nitrür birikiminde yanlılık gerilimi ve sıcaklıktır. Bu çalışmada bu parametrelerin etkisi araştırılmıştır. Amaç, bor nitrür kaplamasında kübik fazın en yüksek halini bulmak olmuştur. Kaplamaların karakterizasyonu Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), X-Ray foto elektron spektroskopisi (XPS) ve Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM) teknikleri ile gerçekleştirilmiştir. Bor kaplamaların çelik yüzeyler üzerindeki mekanik özellikleri kalınlık, sürtünme katsayısı ve aşınma ölçümleri ile belirlendi [9].

Suresh Kumar Rupangudi ve arkadaşları, motor pistonlarında yaptıkları kaplamalar sayesinde ısı kaybını azaltarak verimliliği arttırmayı amaçlamışlardır. Bu çalışmada ağırlıklı olarak termal bariyer kaplama (TBC) kullanılmıştır. TBC'lerin uygulanması, yanma odası yüzeyleri (silindir kapağı, motor silindir kovanı ve piston başı dahil) ve piston segmanları aracılığıyla motor soğutma ceketine ısı transferini azaltmışlardır. Yanma odasının seramik esaslı bu kaplama ile yalıtımı yanma sürecini ve dolayısıyla motorların performans ve egzoz emisyon özelliklerini etkilemiştir. Plazma püskürtmeli bir termal bariyer kaplama, bir Dizel motor için bir pistonun üzerine yerleştirilmiş ve bunun motor performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Termal ve mekanik verimliliği arttırdığı gözlemlendi [10].

Bu çalışmada motor silindir gömleği özel kesim yöntemi ile 10x10x13 mm olacak şekilde kesilmiş ve grafen ile kaplanmıştır. Bu kaplanmış numuneler tribotest cihazında test edilmiştir. Test sonrasında numuneler optik mikroskop ile incelenmiş ve kaplamanın sürtünmeye olan etkileri araştırılmıştır. Grafen kaplı silindir gömleği numunesinde ki sürtünme değerinin kaplamasız olana göre %11.7 oranında azaldığı gözlemlendi.

yapılı malzemelerin ve cihazların tasarlanması, üretimi ve işlevsel olarak kullanımı mümkün olacaktır [13].

Nanoteknoloji sayesinde nanometre boyutundaki parçaların analizi kolaylıkla yapılabilmektedir. Nanometre ölçekli yapıların fiziksel özelliklerinin anlaşılmasına olanak sağlamaktadır. Nanometre boyutundaki yapıların imalatının yapılabilmesini sağlar. Nano hassasiyet gerektiren cihazların analizinin ve geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Uygun yöntemler ile nanoskopik ve makroskopik dünya arasındaki bağın oluşturulmasını sağlamaktadır. Daha kaliteli ürünlerin üretilmesini sağlar (örneğin; daha dayanıklı, daha hafif ve daha hızlı ürünler). Daha az enerji ve malzeme kullanılarak çevre dostu bir yaklaşıma sahiptir [14]. Nanoteknoloji hayatın her alanında büyük değişikliklere olanak sağlayacak yeni bir bilim dalıdır. İlerleyen zamanda bunun etkilerini her alanda görmek daha mümkün olacaktır.

3.2 Nano kaplamalar ve üretim yöntemleri

3.2.1 Nano kaplamaların genel özellikleri

Nanoteknoloji sayesinde nano kaplama alanında birçok yenilikçi gelişmeler sağlanmıştır. Nano kaplamalar sayesinde malzemelerin yüzeylerine farklı özellikler kazandırmak mümkün hale gelmiştir. Nano parçacıklar eklenerek elde edilen nano kaplamalar çok ince bir film tabakası şeklinde malzeme üzerine kaplanır. Nano kaplama; içerisinde nano boyutlu (nanometre = 10^{-9} metre) yapıların bulunduğu bir tabaka ile malzeme yüzeylerinin kaplanmasıdır [15]. Eklenen nano parçacıklar titanyum dioksit, silisyum dioksit, gümüş, garfen, DHL gibi çok çeşitlidir. Nano boyutlu olan bu parçacıkların yüzeye ancak düzgün bir şekilde sıralanması ile kaliteli bir kaplama elde edilebilmektedir.

Günümüzde çoğu malzemeye bakıldığında yüzeylerinde bir kaplama olduğunu görebiliriz. Bu kaplamalar sayesinde malzemeler daha güzel görünümlere kavuşturulabilir, dış etkenlerden korunma sağlanabilir ve daha birçok sebeple kaplamalar kullanılabilir. Artık nano kaplamalar sayesinde sadece dış tabakada oluşacak etkilerin yani sıra malzemenin işlevini etkileyen yeni özelliklerde malzemeye kaplamalar ile eklenebilmektedir. Nano kaplamalar uygulandıkları yüzeylerin özelliklerini değiştirerek ya da yeni özellikler kazandırarak

malzemelere değer kazandırır ve onların kullanım alanlarında genişleme sağlamaktadır.

Nano kaplamalar ile malzemelere kazandırılabilen işlevlerden bahsedecek olursak birçok yenilikçi uygulama alanı sağladığını görebiliriz. Nano kaplama ile malzemelere kazandırılan işlevsel özellikler şu şekildedir; kendi kendini temizleyen kaplamalar, anti-bakteriyel kaplamalar, antifauling (yosun, midye gibi deniz canlılarının tutunamadığı) kaplamalar, su tutan ya da tutmayan, kolay temizlenen kaplamalar, korozyon, çizilme önleyici vb. özellikler taşıyan kaplamalara örnek sayılabilmektedir [15, 16]. Genel olarak bakıldığında bu kaplama çeşitlerinin uygulaması kolay, ucuz, çevre dostu ve dayanıklı olmaları gerekmektedir. Bu özellikleri sağlayabilmenin en etkili yöntemi nano kaplamalar ile sağlanabilmektedir.

3.2.2 Nano kaplamaların üretim yöntemleri

Nano kaplamaların farklı malzemeler ve alaşımların üzerine uygulandığı üretim teknikleri; termo kimyasal kaplama, termal sprey ile kaplama, sol-jel yöntemi, kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve fiziksel buhar biriktirme (PVD) gibi yöntemlerdir.

	Buhar Fazdan					Sıvı Fazdan		Ergimiş veya Yarı Ergimiş Fazdan		
	FBB (PVD)	PDFBB (PAPVD)	KBB (CVD)	PDKBB (PACVD)	II	Sol-Jel	Elektro Kaplama	Lazer	Termal Sprey	Kaynak
Biriktirme hızları (kg/h)	0,5'e kadar	0,2'ye kadar	1'e kadar	0,5'e kadar		0,1-0,5	0,1-0,5	0,1-1	0,1-10	3,0-50
Kaplama kalınlığı veya işlem derinliği (µm)	0,1-1000	0,1-100	0,5-2000	1-20	0,01-0,5	1-10	10-500	50-2000	50-1000	1000-10000
Bileşenlerin boyutu	Reaksiyon çember boyutu ile sınırlı					Çözelti banyosu ile sınırlı		Reaksiyon çember boyutu ile sınırlı olabilir		
Yüzey veya işlem sıcaklığı (°C)	50-500	25-500	150-12,000	150-700	50-200	25-1000	25-100	200-2000	100-800	500-1200
Yüzey malzemesi	Metal Seramik Polimer	Metal Seramik	Metal Seramik	Metal Seramik	Metal Seramik Polimer	Metal Seramik Polimer	Metal Seramik Polimer	Metal		
Ön işlem	Mekanik Kimyasal	Mekanik/ Kimyasal lyon bom.	Mekanik Kimyasal	Mekanik/ Kimyasal lyon bom.	Kimyasal lyon bom.	Kum püskürtme Kimyasal temizleme	Kimyasal temizleme ve dağlama	Mekanik ve kimyasal temizleme		
İşlem sonrası	Yok	Yok	Yüzey gerilim giderme	Yok	Yok	Yüksek sıcaklık	Yok veya Termal işlem	Yok veya yüzey gerilim giderme	Yok	Yok
Kaplama homojenliği	İyi	İyi	Çok iyi	İyi					Çeşitli	Çeşitli
Bağ mekanizması	Atomik	Atomik Difüzyon	Atomik	Atomik Difüzyon	Integral	Yüzey kuvvetleri		Mekanik/kimyasal/ metalürjik		

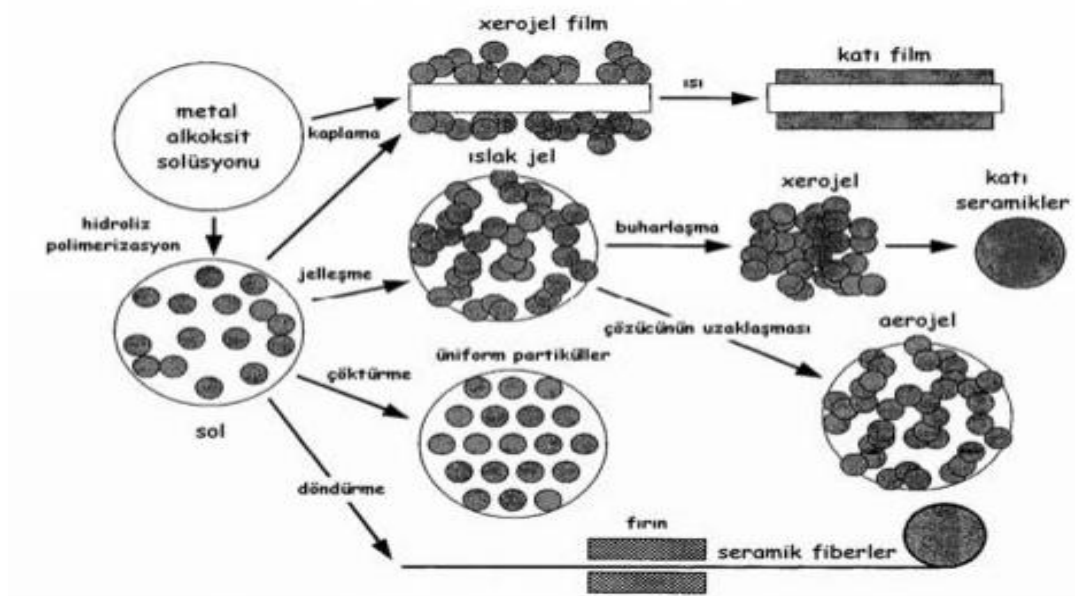
Şekil 3.2. Nano kaplamaların üretim teknikleri karşılaştırması [17]

Şekil 3.2'de de görüldüğü gibi üretim teknikleri birçok parametreye göre incelenmiştir. Ve bu şekildeki gibi en iyi verimin buhar fazından elde edilen teknikler ile sağlanacağı görülmüştür [17].

3.2.2.1 Sol-jel yöntemi ile kaplama

Sol-jel kaplama yöntemi sıvı fazdan (sol) katı faza (jel) geçiş prensibine dayanmaktadır. Bu yöntem ince film şeklinde bir kaplama elde etmek için tercih edilen oldukça kullanışlı bir kaplama türüdür [18]. Bu yöntemde katı maddelerin sıvı süspansiyon içindeki haline sol denmektedir. Bu maddeler sıvı içerisinde dağılmış halde bulunmaktadır. Katı parçacıklar arasında oluşan elektriksel itme ve Van Der Waals bağlarının etkisi ile sol adını verdiğimiz maddeler dibe çökmezler. Ve daha sonrasında bu maddeler sıvı süspansiyon içerisinde genişleyerek daha büyük alan kaplamaya başladığında jel oluşmaya başlamaktadır [19].

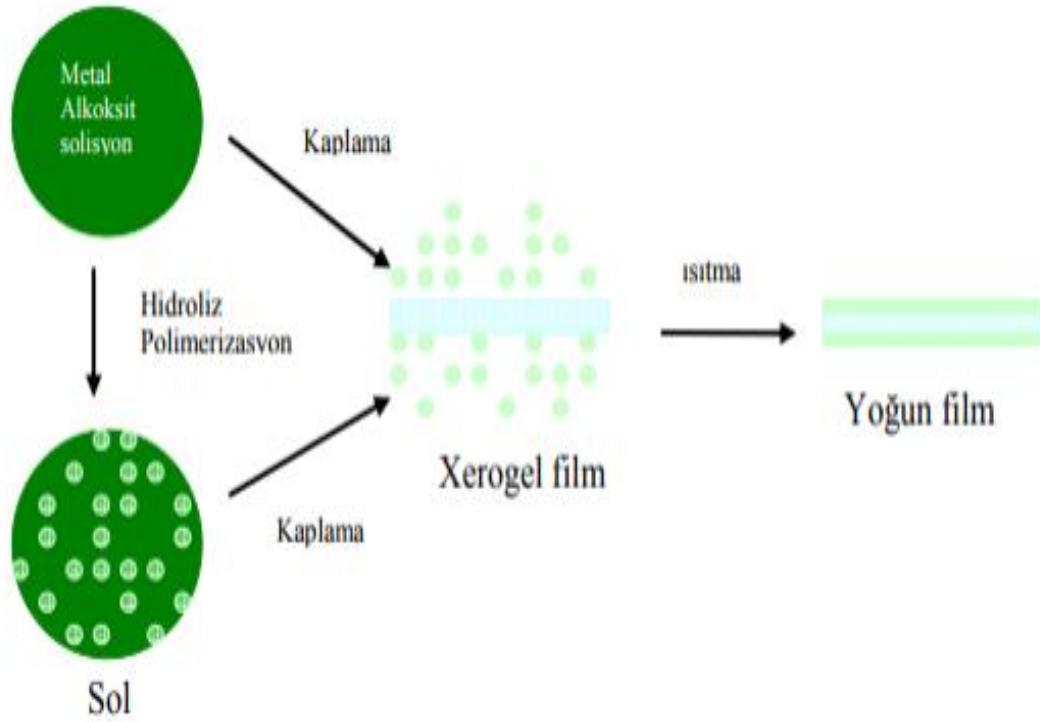
Sol-jel yöntemi 3 aşamada gerçekleşmektedir; solün hazırlanması, solün jelleşmesi ve çözücünün uzaklaştırılması işlemleri olarak tanımlanabilir. Burada sol kelimesi çözeltiden farklı bir şeyi ifade etmektedir. Çözelti tek bir faz sistemi iken sol farklı olarak katı tanelerin sıvı içerisindeki süspansiyonudur. Jel elde edildiğinde oluşan malzeme viskoelastik bir yapıdadır. Jel ne tam katı nede tam sıvı bir yapıya sahiptir. Jel daha kuru bir hale gelebilmesi için ısıtılarak içerisindeki su ve organik çözücüler uzaklaştırılır [20]. Jel kurumaya başladıkça içerisindeki sıvıyı kaybederek yüksek porozite içeren bir katıya dönüşür [18, 21]. Bu tür yüzeylerde, porozite miktarı arttıkça kaplama yüksek yüzey serbest enerjisine sahip olacaktır.



Şekil 3.3: Sol-jel yönteminin hazırlanması ve elde edilen sonuç ürünler [18]

Sol-jel yönteminde ki en kritik nokta kurutma aşamasıdır. Gözeneklerdeki sıvılar yüzeyden uzaklaşırken jel içerisinde kılcal gerilmeler artar ve büzülme gerçekleşir. Bu gerilmeler ve büzölmeler jel içerisinde ve yüzeyinde çatlaklara neden olabilir. Buda jel yapısını bozar bu nedenle kurutma çok yavaş ve kontrollü yapılmalıdır [18, 22]. Sol-jel kaplama yönteminin başarılı olabilmesi için pH, sıcaklık, reaksiyon süresi, konsantrasyon, katalizör ve miktarı, H₂O/Si molar oranı, yaşlandırma sıcaklığı, yaşlandırma süresi gibi faktörler önemlidir [23].

Sol-jel kaplama yönteminin birçok çeşidi bulunmaktadır. Bunlar şu şekildedir; daldırmalı kaplama, püskürtmeli kaplama, akış kaplama, döndürme kaplama, laminar kaplama, merdaneli kaplama ve baskı kaplama teknikleri gibidir [23]. Püskürtmeli, döndürmeli ve daldırmalı kaplama teknikleri kullanılarak sol bir alt tabaka üzerine ince film halinde kaplanabilmektedir. Sol alt tabaka üzerine kaplanmaya başlandığında xerojel (ıslak jel) formuna dönüşecektir ve daha sonra uygulanan kurutma işlemi ile jel yoğunlaşarak ince film halini alacaktır [18, 24]. Bu proses aşağıda Şekil 3.4’te görökmektedir.



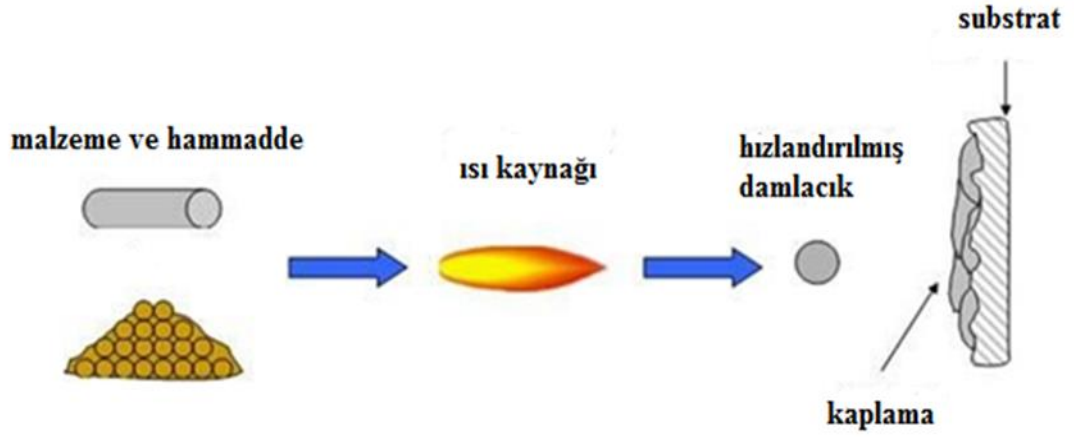
Şekil 3.4: Sol-jel tekniğı ile ince film kaplama [18]

Sol-jel kaplama tekniğinin günümüzde çok kullanılmaktadır. Pahalı ve kaplama şekli zor olmasına rağmen bu kaplama tekniği ile istenilen minerallerden ve kimyasallardan, arzu edilen boyutta, homojen ve kontrollü bir şekilde, geliştirilmiş süreç adımlarıyla başarılı bir kaplama üretilmektedir. Bu yöntem sonucunda elde edilen kaplama saf ve homojendir. Üretim düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilir ve düşük sıcaklık ile çalışmak enerji tasarrufu sağlamaktadır. Kullanılan kimyasal maddeler zararlı olmadığı için doğa dostu bir üretim şeklidir [19]. Bu yöntem ile malzemelere aşınmaya dayanım, elektrik iletkenliği, UV koruma, su, yağ ve kir iticilik, antimikrobiyel etki gibi birçok yeni özellik kazandırılabilir [18]. Bu sistemin dezavantajı ise veriminin az olmasıdır yani elde edilmek istenilen ürünün giren üründen çok daha küçük olmasıdır. Bu yöntemde kaplama süresi uzundur. Bir diğer dezavantaj ise proseste büzülme miktarı büyüktür yani buda kurutma işleminde zorluklar yaratabilir. Bu nedenle bu aşamada jel oluşumunu sabit viskozitede tutmak zor olacaktır [20, 25].

3.2.2.2 Termal Sprey Yöntemi ile Kaplama

Termal sprej ile kaplama teknolojisi gün geçtikçe yeni uygulama alanları geliştirerek birçok alanda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Birçok kaplama teknolojisini altında barındıran bu yöntem ile metalik veya metalik olmayan kaplamayı uygulamak mümkündür [26].

Termal sprej yönteminde, kaplama malzemesi bir ısı kaynağı yardımıyla eritilir ve ardından eritilmiş olan bu partiküller gaz jeti kullanılarak hızlandırılır. Isınan ve hızlanan partiküller önceden hazırlanmış yüzey üzerine çarparak yüzey ile bağlanırlar [27, 28]. Bu yöntemde seramik esaslı kaplamalar önemli yer almaktadır. Tıp alanında kullanılan implantlar bu teknik ile kaplanmaktadır.



Şekil 3.5: Termal sprej ile kaplama yöntemi [29]

Termal sprej kaplamalar sayesinde; aşınmayı engellemek, korozyonu, abrazyonu ve erozyonu gidermek, yüksek sıcaklık ve ısı yalıtımı sağlamak, elektrik iletimi veya yalıtımı gibi birçok özelliğin kazanılmasında etkili olmasının yanı sıra uygulama alanlarının geniş ve çevre dostu olması popülerliğinin artmasında etkili olmuştur [30].

Temel olarak 5 tane termal sprej kaplama tekniği yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemde ısı kaynağı elektrik veya kimyasal (yanma) olarak iki şekilde sağlanabilmektedir. Buda ısı kaynaklarına göre termal sprej kaplama yöntemlerini belirlemektedir. Elektrik ısı kaynağı ark sprej ve plazma sprej olarak ikiye ayrılırken; kimyasal ısı kaynağı alev sprej, HVOF ve detonasyon tabancası olarak üçe ayrılmaktadır [28]. Nikel bazlı bir süper alaşımın üzerine oksit bazlı bir kaplama yapabilmek için gerekli olan bağlayıcı tabaka bu yöntem ile sağlanır [20]. Aynı zamanda, oksit tabakaları ısı kaybını minimuma indiren bir yalıtıcı görevindedir.

Termal sprej kaplamada elektrik ısı kaynağı olarak ele alındığında, en yüksek enerjili proses plazma sprejdir. Bu özellik sayesinde oksit ve benzeri yüksek ergime noktası olan malzemelerin kaplanması mümkün hale gelmektedir. Yüksek sıcaklık oksidasyonuna ve aşınmaya karşı dirençli kaplamalar plazma sprej yöntemiyle daha başarılı sağlanabilmektedir. Bu yöntemde kullanılan argon, helyum, azot, hidrojen gibi kullanılan inert gazlar elektrotlar arasında geçirilerek çok yüksek sıcaklığa ulaşarak plazma haline dönüşür. Oluşan sıcak plazma, kaplama malzemesini de çok yüksek sıcaklığa ulaştırarak kaplamanın

daha kolay oluşabilmesine katkı sağlar ve bu sayede metal, seramik ve polimer gibi tüm malzemeler bu yöntem ile kolaylıkla kaplanabilir [31, 26]. Elektriksel ısı kaynağı ile zıt yüklenmiş iki tel kesiştikleri bölgede kontrollü bir ark oluşturarak kaplama malzemesinin ısınmasına ve ergimesine neden olmaktadır. Ergimiş olan kaplama malzemesi hava veya diğer gazlar ile önceden hazırlanmış altlık malzeme üzerine püskürtülür [32]. Bu proses ark sprej ile kaplama olarak adlandırılmaktadır.

Termal sprej kaplamada kimyasal ısı kaynağı olarak ele alındığında, alev sprej en eski yöntemler arasına girmektedir. Bu yöntem toz ve tel alev sprej olarak iki şekilde yapılmaktadır. En eski yöntemde kalay ve kurşun telleri yakılarak elde alevle kaplama yöntemi yerini günümüzde toz yöntemine bırakmaktadır. Bu yöntem düşük basınçlı oksijen yakıt kullanılarak elde edilen bir kaplama çeşididir. Öncelikle, oksijen ve yakıt gazı karışımı yakılır ve taşıyıcı gaz sayesinde toz aleve iletilmiş olur. Eriyik hale gelen toz partikülleri gaz basınçlarının etkisiyle hızlandırılarak altlık üzerine kaplanır. Burada gazların alev sıcaklığı kısıtlayıcı bir parametredir. Kaplama malzemesine göre yakıt gazı seçilir ve ona uygun sıcaklıklarda çalışılır [26]. HVOF tekniğinde ise, oksijen ve yakıt gazı yüksek enerjilerde kullanılarak termal enerji girişini minimize ederken, kinetik enerjiyi en yüksek derecelere ulaştırır. Propan, propilen ve hidrojen gazları bu yöntemde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yanan gaz öyle bir hıza ulaşır ki, kaplama tozu aleve çok hızlı bir şekilde beslenmiş olur. Yüksek bağ mukavemetli, porozitesi az kaplamalar bu yöntem ile elde edilir. Havacılık ve uzay, petrol, petro-kimya, kâğıt sektörü ve jet motoru parçalarının üretim sektörü gibi sürtünme ve aşınma dayanımı gereksinimi olan özellikler bu uygulamalar ile malzemelere kazandırılır [33]. 2-3 cm iç çapında 1-1.5 m uzunluğunda su soğutmalı bir yanma odasında taşıyıcı gaz ve oksijen-asetilen gaz karışımının patlatılmasıyla, kaplama tozlarının ergitilmesi ve yüzeye püskürtülmesiyle gerçekleştirilen tekniğe detonasyon tabancası yöntemi denir. Yoğun, sert ve yüksek yapışma özelliğine sahip kaplamalar elde edilmek istendiğinde tercih edilen bir yöntemdir. Gaz türbin motor parçacıklarının korunmasında, tekstil makine parçaları, kâğıt ve plastik sanayiinde, nükleer güç endüstrisinde ve kesici uçlarda detonasyon tabancası tekniği yaygın olarak kullanılmaktadır [34].

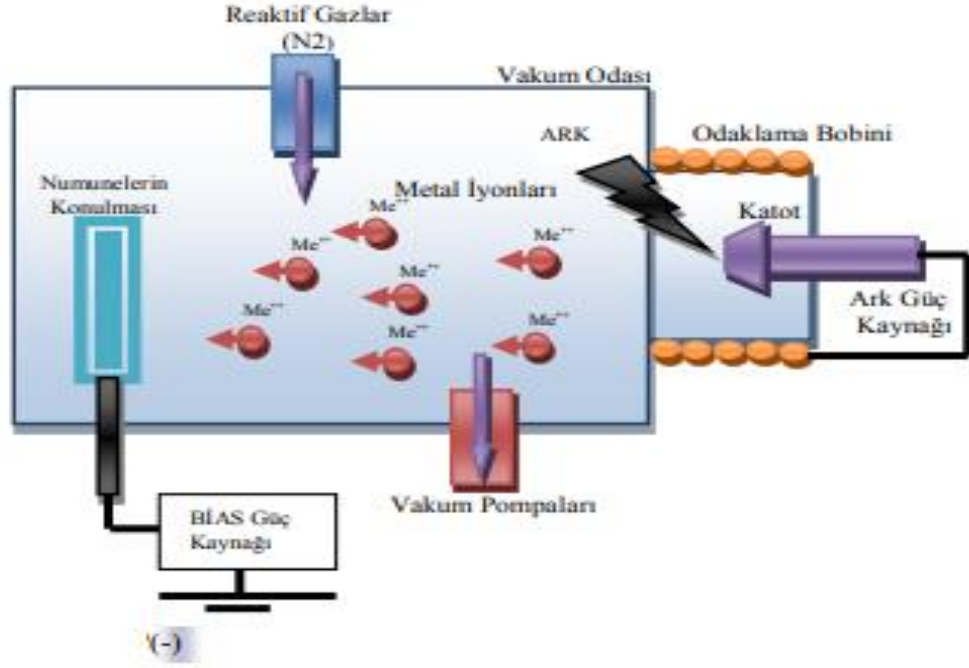
3.2.2.3 Fiziksel buhar biriktirme yöntemi (PVD) ile kaplama

Fiziksel buhar biriktirme yöntemi, kaplama malzemesinin katı veya sıvı bir kaynak sayesinde vakum altında buharlaştırılarak kaplanacak yüzeye taşınarak orada yoğunlaştığı sistematik bir buharlaştırma prosesidir [35]. Bu yöntem ile taban malzemeye zarar vermeden ölçüsel olarak tolerans değişikliğine gerek duyulmadan ve uygulanabilirliği kolay olduğu için bu yöntem endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır.

PVD yöntemini diğer yöntemlerden ayıran önemli avantajlar vardır, bunlar şu şekilde sıralanabilir [36, 37]:

- Bu yöntem sayesinde teorik olarak kaplama malzemesi, her taban malzeme (metal, seramik, polimer ve alaşım gibi) üzerine biriktirilebilir.
- Kaplama malzemeleri bu yöntem sayesinde yüksek yapışma özelliğine sahip olurlar.
- Geniş biriktirme hızı aralığı sayesinde, yüksek hızda üretim sağlar.
- Kaplama prosesi bittikten sonra elde edilen ürün pürüzsüz olduğu için yüzey işlemlerine (zımpara, parlatma gibi) ihtiyaç duyulmamaktadır.
- Çevre dostu bir kaplama yöntemidir atık madde oluşmaz.
- Homojen ve saf bir kaplama elde edebilme özelliği sağlar.
- Tekrarlanabilirlik ve çok katmanlı kaplama yapabilme olanağı sağlar.

PVD yöntemi, vakum altında bulunan kaplama malzemesinin buharlaştırılarak veya sıçratılarak yüzeyden kopartılarak kaplama yapılacak yüzeye biriktirilmesi esasına dayanır. Bu yöntem ile elde edilen kaplamalar ince ve metal bazlı sert kaplamalardır. 250 ile 450 ° C sıcaklığı arasında gerçekleştirilen bu prosesden elde edilen kaplama kalınlığı genellikle 2 ila 5 µm arasındadır [38].



Şekil 3.6: PVD kaplama yöntemi [38]

Titanyum (Ti), Krom (Cr), Zirkonyum (Zr) ve Alüminyum Krom (AlCr), AlTi, TiSi gibi alaşımların nitrürler, karbürler ve karbonitridlerden oluşan kaplamalar bu yöntemde yaygın olarak kullanılarak birçok malzeme üzerine kolayca uygulanabilmektedir. Kaplama yapılacak tabaka malzemesi çelikler, demir dışı metaller, tungsten karbürler ve ayrıca önceden kaplanmış plastikler gibi çok geniş bir uygulanabilirliğe sahiptir. Burada taban malzemesini birikim sıcaklığı ve elektriksel iletkenlikteki stabilitesi sınırlayıcıdır [38].

Çizelge 3.1: PVD yönteminde kullanılan kaplamaların fiziksel özellikleri [38]

Kaplama	Kaplama Kalınlığı (μm)	Micro Sertlik (HV 0.05)	Sürtünme Katsayısı	Çalışma, Sıcaklığı (°C)	Biriktirme Sıcaklığı (°C)
TiN	2 - 4	2800	00.55	450	425
TiCN	2 - 4	2800	0,15-0,3	300	425
TiCrN	4 - 6	2200	0.55	500	425
AlTiN	2 - 4	3500	0.55	700	450
AlTiCrN	3 - 8	3200	0.55	850	450 - 550
AlCrN	2 - 4	3000	0.55	1050	450 - 550
CrN	4 - 6	2300	0.55	700	150 - 400
Cr₂N	2 - 5	1500 - 2800	0.55	700	150 - 400
CrWN	5 - 8	3000 - 3200	0.3	800	350
a-C:H:W	4 - 6	1600	0.2	350	160-250
a-C:H:W a-C:H	+ 3 - 5	2000 - 2800	0.1	300	160-250
CrN + a-C:H	2 - 5	2000 - 2800	0.1	300	200-250
a-C:H	1 - 3	2000 - 2800	0.1	300	160-250
B₄C	1 - 3	3400	0.55	800	200
TiCN + MoS₂	2 - 4	3000 + 2000	0.06	500	425 / 150

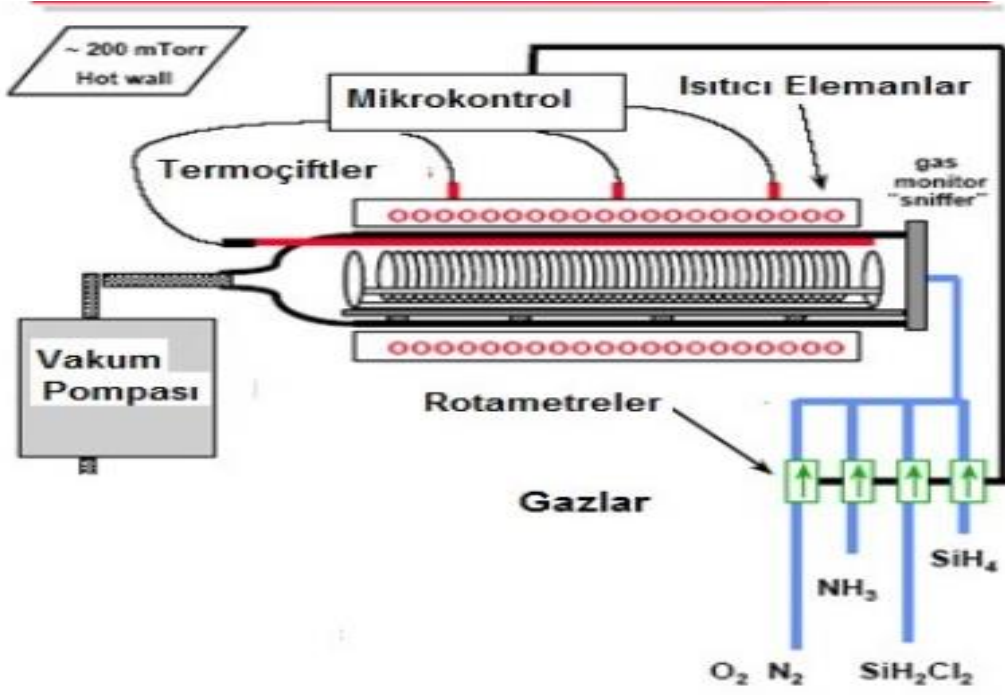
(N: Nitrür)

Çizelge 3.1’de görüldüğü gibi çok çeşitli kaplama malzemelerini bu yöntemle verimli bir şekilde kaplamak mümkündür. Elde edilecek kalınlık, mikro sertlik, sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve biriktirme sıcaklığı her kaplama malzemesi için farklılık göstermektedir. Bunlara bağlı olarak elde edilecek aşınmaya karşı dirençte kaplama malzemesine bağlı olarak farklılık gösterecektir.

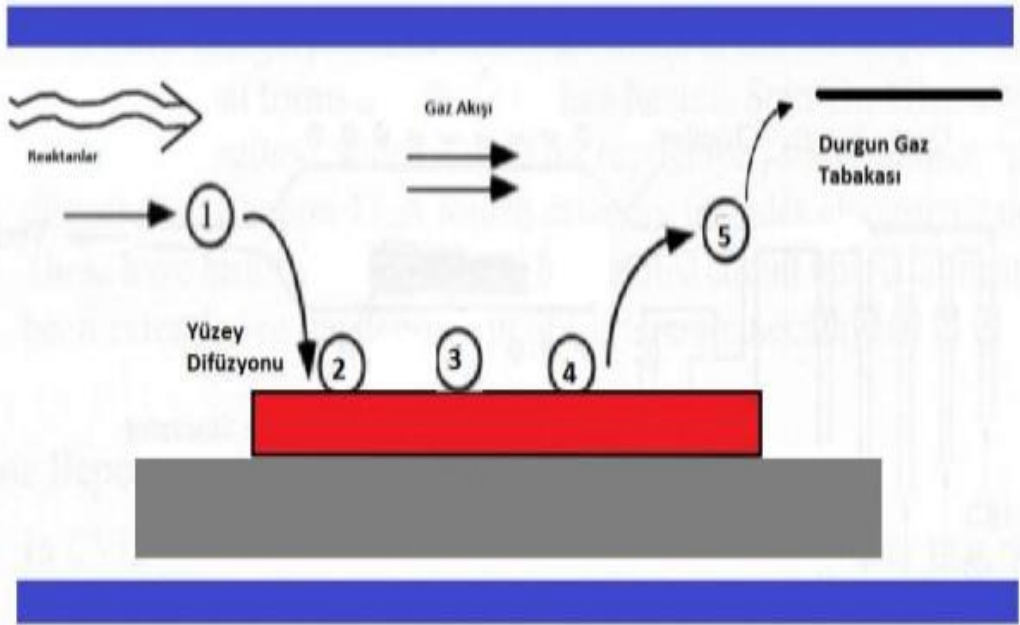
3.2.2.4 Kimyasal buhar biriktirme yöntemi (CVD) ile kaplama

Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) gibi ince film biriktirme teknikleri genellikle endüstriyel uygulamalar için koruyucu kaplamalar oluşturmak için kullanılır. Bu kaplama çeşidi, kapalı bir kap içerisinde buhar halindeki bir taşıyıcı gazın kimyasal reaksiyonu sonucu oluşan katı bir malzeme ile ısıtılmış malzeme yüzeyinin kaplanması şeklinde gerçekleşir [39].

CVD kaplama yönteminde ortam ısısı 1000 °C gibi yüksek bir işlem sıcaklığına sahiptir. İşlem süresi 2 ile 4 saat arasında değişebilir. Yüksek sıcaklıkla birlikte yüzey kaplaması ile çelik matrisli malzeme arasında difüzyon ile mükemmel bir bağlanma gerçekleşir. Tabakanın, ihtiyacı olan elementleri (titanyum, karbon veya azot gibi) sağlaması açısından farklı gazlara ihtiyacı vardır. Kaplanacak malzeme yüzeyiyle temas eden gaz tabakası sayesinde tüm yüzey eşit şekilde kaplanabilecektir. TiC bu yöntemde en yaygın olarak görülen kaplama çeşididir bunun yanı sıra TiCN – TiN gibi kaplamalarda uygulanır. CVD yöntemi ile elde edilecek kaplamalar ince film kaplamalardır. Bu film kalınlıkları nanometre (nm) boyutunda olup 1 ile 100 nm arasında değişiklik gösterebilir. Genellikle 10 nm den daha küçük kaplama elde edilmek istendiğinde tercih edilir [40].



Şekil 3.7: CVD kaplama yöntemi [40]



Şekil 3.8: CVD kaplama yönteminin çalışma mekanizması [39]

Şekil 3.8' te gösterilen aşamalar şu şekildedir:

1. Reaktanın substrat yüzeyine difüzyonu
2. Reaktanın substrat yüzeyine absorpsiyonu
3. Reaktan-substrat arası kimyasal reaksiyon
4. Üründen gaz desorpsiyonu
5. Üründen atık gazın uzaklaştırılması

CVD kaplama çeşitleri şu şekildedir [39]:

- Atmosferik Basınçlı Kimyasal Buhar Biriktirme (APCVD),
- Alçak Basınçlı Kimyasal Buhar Biriktirme (LPCVD),
- Metal – Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD),
- Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme (PECVD),
- Lazer Kimyasal Buhar Biriktirme (LCVD).

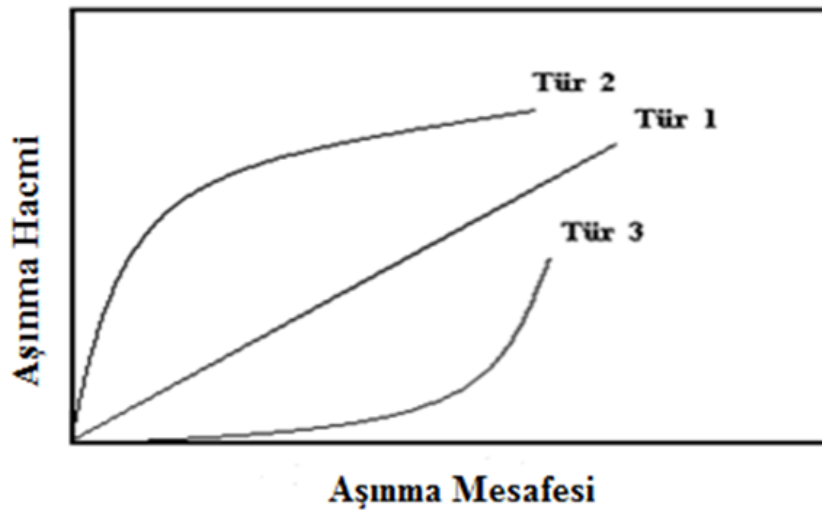
Bu yöntemi diğer yöntemlerden ayıran en önemli avantajlar şu şekildedir [41]:

- Oluşturulmak istenilen reaksiyonun düzenlenmesi daha kolaydır.
- Karmaşık ve iç yüzeyleri olan şekillerin homojen kaplanabilmesini sağlar.
- Aynı anda birçok malzemenin aynı anda kaplanabilmesini sağladığı için avantajlıdır.
- Yüksek saflıkta ve yüksek kalitede filmler elde edilebilmesini sağlar.

4. AŞINMA

Malzeme ömrünü belirleyen en etkili faktörler sürtünme ve buna bağlı oluşan aşınmadır. Sürtünme halinde bulunan yüzeyler üzerinde oluşan aşınmalar oluşmaktadır. Bu aşınmalar istenilmeyen etkiler yaratarak malzeme üzerinden parça kopmasına neden olmaktadır. Aşınma nedeniyle malzemeler ilk baştaki yüzey görünümlerini kaybederler ve parçalar arasında boşluklar oluşmaya başlar.

Aşınma meydana gelmesi için belli bir süre geçmesi gerekmektedir. Bu aşınma üç şekilde gerçekleşebilir. İlk olarak tüm süreç boyunca sabit bir aşınma görülebilir. İkinci tür olarak ilk baştaki yüksek aşınma oranından daha düşük olan sabit aşınmaya kadar olan geçişi gösterebilir. İkinci tür aşınmalar metal parçalarda çok sık rastlanan bir aşınmadır. Üçüncü tür olarak ilk baştaki aşınma oranından daha yüksek bir aşınma oranına geçişi göstermektedir ve bu aşınma türünde malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşmaya başlamaktadır [42]. Buda malzeme ömrü için kötü bir sonuç oluşturmaktadır. Bu türler aşağıdaki şemada gösterilmiştir.

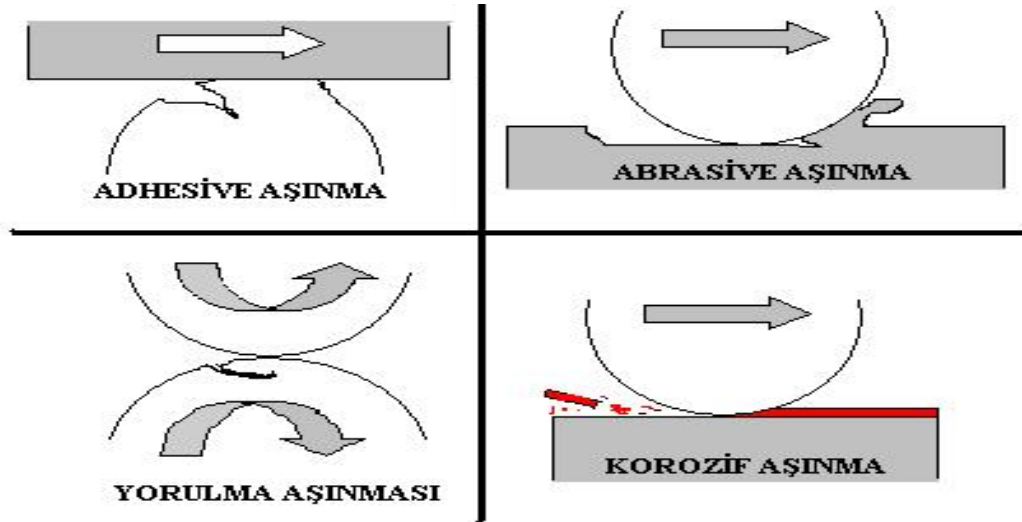


Şekil 4.1: Aşınma türleri şeması [42]

Aşınmaya etki eden başlıca etkenler şunlardır; kullanılan malzeme, yüzeylerin biçimi, kullanılan yağlayıcılar, sistem hızı, kayma yüzeyleri arasındaki basınç, çalışma süresi, aşınmaya neden olacak aşındırıcıların yüzeye temas etme durumu, sertlik vs. Dört çeşit aşınma türü bulunmaktadır bunun en yaygın olanları Adhezyon Aşınma, Abrazyon Aşınma, Yorulma Aşınması, Korozyon Aşınmadır [42, 43].

4.1 Aşınma Çeşitleri

Adhezyon aşınmada pürüzsüz ve çok iyi parlatılmış iki yüzey arasında bile çok küçükte olsa bir temas yüzeyi oluşmaktadır. Uygulanan küçük yüklemelerde bile temas noktasında oluşan gerilmeler malzeme akma sınırını geçebilir ve buda adhezif aşınmayı oluşturur. Abrazyon aşınmada ise malzeme yüzeyinden daha sert olan bir parçacıkla basınç altında yüzeyden parça kopartma şeklinde gerçekleşir ve bunun sonucunda yırtılma ve çizilmeler meydana gelir. Korozyon aşınma ise, hava ile temas eden yüzeylerde aşınmanın şiddetini azaltan oksit ve diğer başka tabakalar oluşmaktadır. Bazı kimyasal ortamlara yakın bulunan makine elemanlarının yüzeylerinde kimyasallarla tepkimeye girerek ince ve sert tabakalar oluşur. Değişken yükler altında bu tabakalar kırılır ve parçalara ayrılarak aşındırıcı etkiyi oluşturur. Reaksiyon oluşmamış temiz yüzeylerde de bu tabakalar oluşarak yük altında tekrar kırılmalar gerçekleşerek bu aşınma türünü oluşturur. Yorulma aşınması ise temas yüzeyinde bulunan çok küçük çukurların oluşturduğu bir aşınma türüdür. Plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarına bağlı olarak malzemede çok küçük boşluklar meydana gelir, bunlar zamanla yüzeye doğru hareket ederek büyür ve yüzeyde çukurlar oluşturur. Bu aşınma çeşidinde malzeme sertliği önem taşımaktadır. Yumuşak malzemelerde yorulma aşınması görülmemektedir [43, 44]. Bizim tez çalışmamızda da olduğu gibi bu aşınmaları önlemek amacıyla malzeme yüzeylerine malzemeye uygun farklı kaplama çeşitleri uygulanmaktadır bir başka aşınma önleyici yöntem ise kaplama yanı sıra yağlayıcı kullanılmasıdır.



Şekil 4.2: Aşınma çeşitleri [42]

4.2 Motor Parçaları ve Motor Parçalarında Aşınma

4.2.1 Motor parçaları

Motor, bir otomotivde güç kaynağıdır. Otomobilde ki motor silindiri, motor performansının en önemli unsurudur. Motorlarda ki silindir gömleği parçası yüksek mukavemetli, sertlik, ısıya dayanıklı ve aşınmaz özellikte olmalıdır [45]. Motorun çeşitli bileşenlerini üretmek için daha hafif ve daha güçlü mühendislik malzemelerinin kullanılması, aynı zamanda motorun ve dolayısıyla otomobilin güç-ağırlık oranını da artırmaktadır. Emisyonları azaltmak ve ekonomik ve çevreye duyarlı çözümler elde etmek için; termal sprey kaplamalar, nano kaplamalar aşınmaya dayanıklı ve düşük sürtünmeli silindir çalışma yüzeyleri üretmek için bir seçenektir. Motor parçalarında kullanılan malzemeler ve tercih edilen kaplamalar, yüzey topografyası ve kalitesi, piston segmanının silindir duvarındaki temas alanındaki tribolojik tepkiyi etkiler [46]. Bu nedenle, silindir gömleği sürtünme yüzeyi, yüksek yanma sıcaklığı ve basıncında piston segmanlarının kayma sürtünmesine dayanacak kadar sert olmalıdır [45,47].

İşlem maliyeti ve istenilen fonksiyonel verime göre motor sürtünme parçalarına farklı yüzey işlemleri uygulanmalıdır. Dökme demir, yüksek performans sıcaklıklarında yüksek mukavemeti ve düşük aşınma hızı nedeniyle silindir gömleği üretiminde yaygın olarak kullanılmıştır. Öte yandan motor yakıt tüketimini artıracak yüksek yoğunluğa sahiptir. Güç kaybını azaltmak ve piston

segmanı sürtünmesine karşı aşınma direncini artırmak için bazı kaplamalara sahip alüminyum alaşımları kullanılır [45,48].



şekil 4.3: Dizel motorun kesiti ve çalışma prensibi [49]

Kam (eksantrik) Mili: Krank milinden aldığı hareket sayesinde bazı motor sistemlerinin çalışmasını sağlayan parçadır [50].

Emme Supapı: Yakıtın silindirlere alınmasını sağlar.

Egzoz Supapı: Egzoz gazlarının basınçlı olarak dışarı çıkarken ki sesini azaltan parça egzoz susturucusudur [50].

Yakıt Püskürtücü Enjektör: Yakıt pompasından basınçlı gelen yakıtı silindir içine zerrecikler şeklinde püskürten parçadır [50].

Piston: Silindir içerisinde hareketli halde bulunan ve hareketin krank miline iletmesine yardımcı olan parçadır [50].

Krank Mili: Pistonların bağlı bulunduğu, motorun çalışması ile elde edilen hareketin ve gücün motordan alınmasına yardım eden mildir. Biyel kolundan gelen pistonun doğrusal hareketini, dairesel (dönüş) hareketine eviren, motorun en önemli parçalarından biridir. Krank mili sayesinde motorun dönüş hareketi sağlanmaktadır [50].

Piston (biyel) Kolu: Pistonun doğrusal hareketinin krank miline aktarılmasını sağlayan parçadır [50].

Motor Yağı: Motorda sürtünmeden kaynaklanan aşınmayı önleyen yağ, aynı zamanda temizlik ve soğutma işlemi de yapar. Motorlarda 20W-50 yağ kullanılması tercih edilir. Belirli aralıklarla belirtilen zamanlarda muhakkak değiştirilmelidir. Hatta günlük bakımda bile kontrol edilir. Silindirde aşınma oluşmuş ise motor yağ yakar, motor yağ yakar ise egzozdan mavi duman çıkar [50]. Motor yağı değiştirilirken zaman zaman motorun sıcak olmasına dikkat edilmelidir.

4.2.2 Motor Parçalarında Aşınmalar

Otomotiv parçalarında aşınma günümüzde büyük bir sorun haline gelmektedir. Özellikle araba motorlarında gelişen bu aşınmalar otomotiv sektörünün üstünde durduğu önemli bir problemdir. Malzemenin aşınma davranışlarının iyileştirilmesi aynı zamanda yüzey kalitesinin artırılmasına ve sürtünme katsayısının düşürülmesine neden olmaktadır [51]. Bu tür aşınmaları azaltmak için malzeme kaplamaları ve yağlama işlemleri birlikte kullanılmalıdır. Malzemelerde aşınma birçok etkene bağlı olarak değişmektedir. Malzeme cinsine, sürtünen yüzeylerin pürüzlülüğüne ve çevrenin kimyasal etkilerine bağlı olarak değişiklik gösterirler. Otomotiv sektöründe bu aşınmalar büyük kayıplara neden olduklarından bu konular üzerinde birçok araştırma yapılmaktadır.



Şekil 4.4: Motor segman aşınması örneği [52]

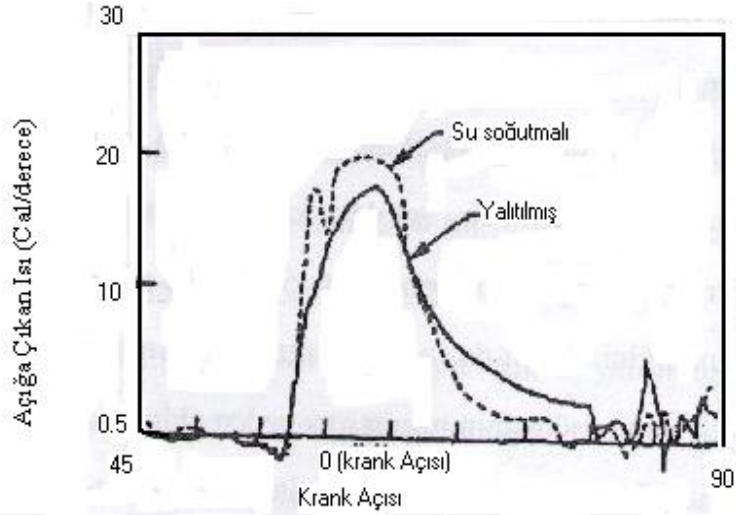


Şekil 4.5: Normal piston ve fazla ısınmadan kaynaklı aşınmış piston örneği [52]

Yüzey kalitesi artırılması çalışmalarında malzeme bilimi etkin bir şekilde rol almaktadır. Malzemelere çeşitli işlemler uygulanarak kalitesi artırılıp, malzeme ömrü uzatılmaktadır. Motor parçalarının birbiri üzerinde sürtünerek hareket etmeleri sonucu motor parçalarında zamanla aşınmalar oluşur. Bunu azaltmak için malzeme yüzeyine bir takım ileri teknoloji kaplama yöntemleri uygulanarak, daha nitelikli makine parça yüzeyleri elde edilmektedir. Bu sürtünmeden meydana gelen kayıp enerjiler ne kadar azaltılır ise motor verimliliği o derece artacaktır [51, 53].

Yüzeyler arasında kullanılan yağlama yağları, piston-silindir ve segman arasında bir yağ filmi oluşturarak metaller arasında oluşan sürtünme temasını önler. Ancak aşınma düzeyini istenilen seviyeye indiremez. Bu nedenle motorların silindir yüzeyleri ileri teknoloji seramik kaplamalarla kaplanarak ana malzeme zarar görmekten kurtarılır birde malzeme ömrü uzamış olur [51]. İçten yanmalı motorlarda toplam enerjinin %30-40 kadarı faydalı enerjiye dönüştürülebilmektedir. Geriye kalan enerji miktarı ise motor parçalarının aşırı ısınmasına karşılık korumak için soğutma sistemi ve egzoz gazları ile atmosfere atılmasına gitmektedir. Eğer egzoz ve soğutma sistemine giden ısıyı azaltmak başarılabılır ise kayıp enerji faydalı enerjiye dönüştürülebilir. Bu ısınmanın azaltılabilmesi için yanma odasını oluşturan parçaların, ısıl iletkenliği düşük, yüksek çalışma sıcaklığına dayanabilen malzemelerden üretilmesi gerekmektedir. Motordaki en çok aşınmaya maruz kalan yanma odası, silindir yüzeyleri ve diğer parçalar seramik malzemeler ile farklı kalınlıklarda kaplanarak en güvenli hale getirilmeye çalışılmaktadır [54].

Düşük ısı iletimi sahip seramik malzemeler fiziksel, termal ve kimyasal özellikleri istenilen şartlara yaklaştırarak bize geniş bir çalışma alanı sağlamaktadır. Seramik malzeme ile kaplanan motor parçaları sayesinde soğutma sistemine giden ısı kayıplarını minimuma indirecek, soğutma sistemi yükünü ve buna harcanan gücü azaltacak, faydalı enerjiyi arttıracak ve böylece motor verimi de yükselmiş olacaktır [54, 55].



Şekil 4.6: Kaplamalı ve kaplamasız su soğutmalı bir dizel motorunda ısı açığa çıkarma prosesinin karşılaştırılması [54, 56]

Şekilde 4.6 da görüldüğü gibi yapılan bir araştırmada bir dizel motorun ısı açığa çıkartması için gerekli olan toplam enerji kaplanmamış olanda %30-40 arasında iken, seramik malzeme ile yalıtılmış motorun %60-65 arasındadır. Kaplama ile kaplanan ve kaplanmayan motorlarda egzoz sıcaklıkları bile farklılık göstermektedir. Örnek vermek gerekirse 400-600 °C iken, kaplanmış motorda 700-900 °C arasındadır. Yapılan çalışmalarda seramik kaplı olan motorlarda görülmüştür ki parçalarda oluşan gerilmeler azalmış, yakıt tüketiminin iyileştiği ve egzoz emisyonlarında ki karbon monoksit (CO) oranının azaldığı tespit edilmiştir. Hatta seramik kaplamalar ile kontrolsüz yanmadan kaynaklanan çalışma esnasında oluşan vuruntu ve gürültünün azaldığı tespit edilmiştir [54].

Aşınmanın görüldüğü bir önemli motor parçası ise silindir gömleğidir. Bu parça aşındığı zaman yine motor fazla miktarda yağ ve yakıt yakmakta ve motor verimi düşmektedir. Motorun en az yağlandığı ya da yağın en az ulaştığı bölge silindirin üst kısmında olduğu için bu bölgede yağlama daha kötüdür ve aşınma burada daha çok meydana gelmektedir. Bunun sonucunda yine termal gerilmeler

ve şoklar bu kısımda artarak aşınmayı hızlandırmaktadır. Tabi ki bu kadar artan olumsuz etki ile yüzeyde oluşan bozulmalar çeşitli çatlakları meydana getirmektedir [57].

4.2.3 Motor parçalarında aşınmayı önlemek için kullanılan seramik kaplamalar

Seramik kaplama seçimi, malzemelerin bazı temel gereksinimleriyle sınırlandırılmıştır. Erime noktaları yüksek, oda sıcaklığı ile çalışma sıcaklığı, düşük ısı iletkenliği, kimyasal inertlik, termal genleşme eşleşmesi metalik alt tabaka ile iyi yapışma, metalik substrat ve düşük sinterleme oranı gözenekli mikro yapı gibi.

Kaplama malzemesi olarak alaşımlar, bazen tek halde bazense birlikte güçlendirilerek kullanılırlar. Bunlardan bazıları şu şekildedir:

- **Zirkonatlar**, düşük sinterleme aktivitesi, düşük termal iletkenlik, yüksek termal genleşme katsayısı ve iyi ısıl döngü direnci gibi bazı avantajlara sahiptirler. Ana problem yüksek termal genleşme katsayısıdır. Kaplamada artık gerilmeye neden olur ve bu kaplamanın delaminasyonuna neden olabilir. % 7-8 yittria stabilize zirkonya yüksek termal genleşme katsayısı, düşük termal iletkenlik ve yüksek termal şok direncine sahiptir [58]. Monolitik (m), tetragonal (t) ve kübik (k) olmak üzere 3 farklı yapıda zirkonya (ZrO_2) bulunmaktadır. Bu yapılar sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Monolitik yapı, 1-170⁰C'ye kadar kararlılık gösterirken bu sıcaklık üzerinde bir sıcaklığa ulaştığında tetragonal yapıya dönüşür. Tetragonal yapıda ise 170⁰C den 2370⁰C'ye kadar kararlı bir yapı göstermektedir. Ancak bu sıcaklığın üzerinde yapı kübiktir. Sıcaklık ile bu dönüşümler yaşanırken seramik malzemeler genelde parçalanmaktadır [58]. Malzemelerin parçalanmasını önlemek ve kararlı yapmak için oda sıcaklığında Kalsiyum Oksit, Magnezya (MgO), Yitriya (Y_2O_3) gibi toprak alkali metaller ve bazı elementlerin oksitleri eklenmiştir. **Zirkonya** iyi korozyon direnci, yüksek kırılma tokluğu ve düşük ısı iletkenlik sayesinde aşınma dirençli malzeme olarak tercih edilmektedir. Zirkonyanın en önemli kullanım alanı, lambda probu katı iyonik malzeme sayesinde içten yanmalı motorlardaki egzoz gazındaki

oksijen miktarı ölçülür ve karbüratöre verilmesi gereken ideal yakıt miktarı belirlenir ve yakıt tasarrufu sağlanır [60].

- **Magnezya** yüksek sıcaklıklar altında rutubete, asit gazlarına ve nötr tuzlara olan direnci oldukça fazladır. En yaygın olarak kullanılan Magnezya mineralleri; manyezit, talk, asbest, dolomit ve spineldir [59].
- **Krom oksitler** aşınma direnci yanı sıra korozyon direncini de sağlayan yeşil renkli bir oksit maddedir. Metal yüzeyler ile iyi bağlanma sağlarlar. Genellikle gemi ve jeneratör dizel motorlarında kullanılırlar. Dizel motorların sübap bölgelerinde aşınma ve korozyonu önlemek için krom oksit kaplamalar kullanılır [60].
- **Alümina (Al_2O_3)** ise refrakter malzemelerin içerisinde orta sıcaklı bir ortamda mekanik yüklere ve kimyasal maddelere karşı en dayanıklı malzeme olarak bilinmektedir [59]. Korozyona dayanıklı oldukları için izolatör malzeme olarak da yaygın olarak kullanılırlar. Rahat ulaşılabilir bir malzeme olması da yaygın kullanılmasını arttırmaktadır. Genellikle Titanya (TiO_2) ile birlikte kullanılır. Ancak Titanya miktarı arttıkça malzeme aşınma direnci düşer bu nedenle titanya miktarı düşük seviyede tutulur [60].
- **Mullite** önemli bir seramik malzemedir düşük yoğunluğu nedeniyle, şiddetli kimyasal ortamlarda kararlılık, düşük termal iletkenlik ve uygun güç ve sürünme davranışına sahiptir. Yittria (Y_2O_3) ile karşılaştırıldığında stabilize Zirkonya (Mullit), çok daha düşüktür termal genleşme katsayısı ve daha yüksek termal iletkenliğe sahiptir. Yittria stabilize Zirkonyaya göre çok daha fazla oksijene dirençlidir. Mullitin düşük termal genleşme katsayısı yittria'ya göre bir avantajdır. Ancak, büyük termal genleşme katsayısında uyumsuzluk metalik substrat ile zayıf yapışmaya neden olur. Mullitin bir diğer dezavantajı ise kristalleşmedir [61].
- Otomobil sektöründe seramik kaplama olarak kullanılan, Nikel (Ni), Titanyum (Ti), ve Alüminyum (Al) alaşımları gibi metal matriksli kompozitler (MMK) yüksek rijitlik, yüksek akma mukavemeti, iyi oksidasyon ve korozyon direncine sahip malzemelerdir. Alüminyum (Al)

alaşımları hafif olmalarının yanında korozyon dirençleri yüksek ve yüksek mekanik özelliklerinden dolayı iyi bir kaplama malzemesi olarak tercih edilmektedir [62].

Çizelge 4.1: Seramik kaplamalar ve kullanım yerleri [60]

KULLANIM AMACI	SERAMİK MALZEME
Aşınmanın Azaltılması	Al_2O_3 , B_4C , Cr_3C , CrB_2 , CrSi_2 , Mo_2C , MoSi_2 , SiC , TiB_2 , TiC , TiN , WC
Sürtünmenin Azaltılması	MoS_2 , BN , BaF_2/Ca_2
Korozyonun Azaltılması	Cr_2O_3 , Al_2O_3 , Si_3N_4 , SiO_2
Isı Koruma	Ca_2Si_4 , MgAl_2O_4 , MgO , ZrO_2
Elektriksel İletkenlik	$\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$
Yarı İletkenlik	GaAs , Si
Elektriksel Yalıtım	SiO_2
Sensörler	SiO_2 , SnO_2 , ZrO_2
Optik iletim veya yansıtma	BaF_2ZnS , CeO_2 , CdS , $\text{CuO}/\text{Cu}_2\text{O}$

Çizelge 4.2: Seramiklerin kaplama yöntemleri [60]

KULLANIM AMACI	SERAMİK MALZEME
CVD	SiO_2 , TiS , SiB , TiN , Si_3N_4
PVD	TiN , TaN , VC , TiC , In_2O_3 , Al_2O_3
Plazma Püskürtme	Al_2O_3 , Cr_2O_3 , ZrN , MoS_2 , CaF_2 , ZrO_2 , TiO_2
Alev Püskürtme	ZrO_2 , Al_2O_3 , Cr_3C_2
Patlamalı Tabanca	Cr_3C_2 , WC , WTiC , Al_2O_3 , TiO_2 , Cr_2O_3
Sol-Jel	CeO_2 , SiO_2
Sıçratma	TiN , Ta_2O_5 , TiO_2 , Fe-Cr-P-C , Cr_3B , Ti_3B
HIP	Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO , SiO_2 , BeO

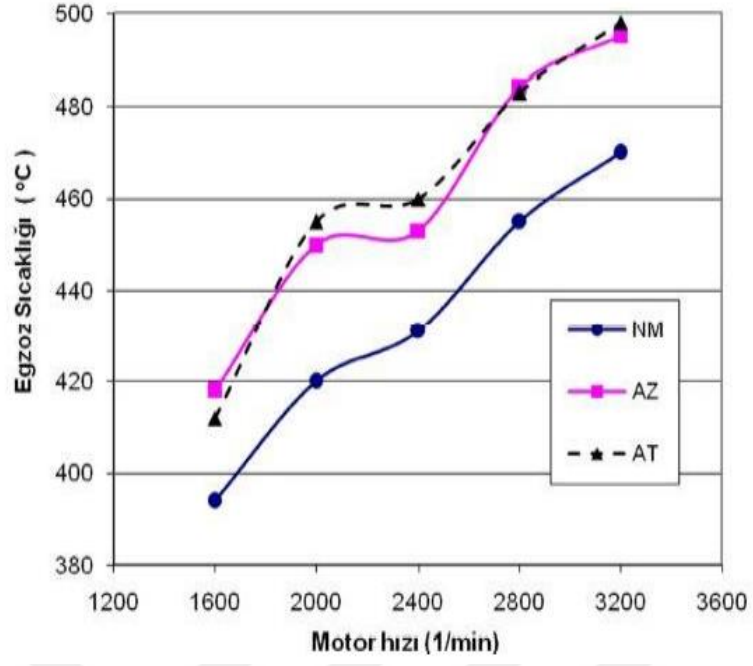
Çizelge 4.3: Oksit seramik kaplamalar ve aşınmaya karşı özellikleri [60]

KULLANIM AMACI	SERAMİK MALZEME
Al_2O_3	Mükemmel elektrik direnci ve düşük sıcaklıklarda aşınmaya dirençli sert ve yoğun kaplamalar
TiO_2	Aşınmaya ve yüksek sıcaklığa direnç
Al_2O_3 - TiO_2	Abrazyon, korozyon, kavitasyon, oksidasyon ve erozyon etkilere karşı direnç
Cr_2O_3	Korozyona, oksidasyona, abrazyon aşınmaya dirençli düzgün yüzeyli ve sert kaplamalar
MgZrO_3	Ergimiş metal erozyonuna, termal şoklara ve yüksek sıcaklıklardaki abrazyon aşınmaya karşı yüksek direnç

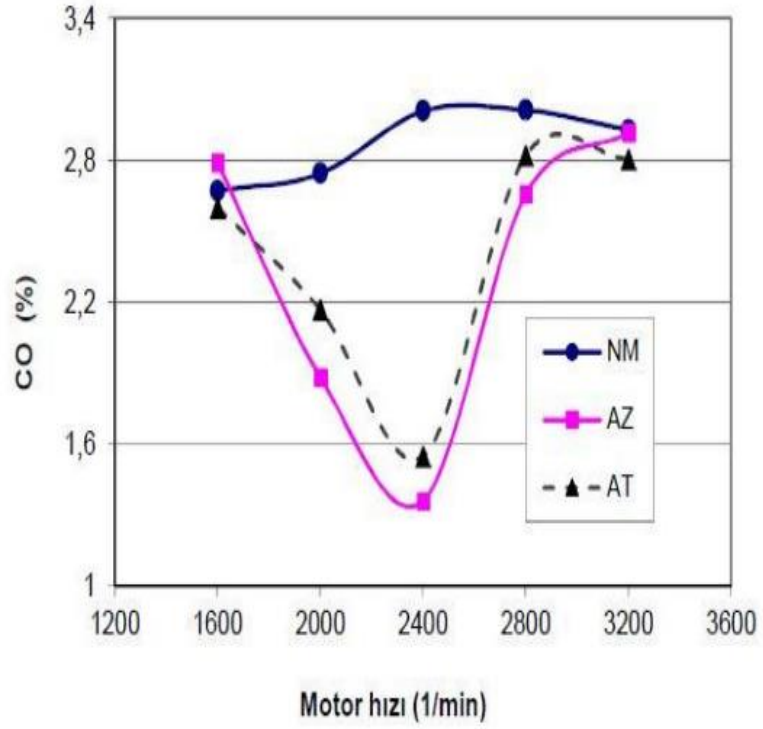
Çizelge 4.4: Bazı seramik kaplama malzemelerinin özellikleri [59]

Malzeme	Ergime Sıcaklığı	Yoğunluk (g/cm ³)	Mukavemet (MPa)	E (GPa)	I/2 (MPa.m)	Sertlik (kg/mm ²)
Cam	500	2,2	48	7,2	0,5	650
Al ₂ O ₃	2050	3,96	250-300	36-40	4,5	1300
ZrO ₂	2700	5,6	113-130	17-25	6-9	1200
SiC	3000	3,2	310	40-44	3,4	2800
S ₃ Z ₄	1900	3,24	410	30,70	5	1300

Aşağıda yapılan bir araştırmada göstermiştir ki kaplamalar motor verimliliğini arttırmaktadır. Bu çalışmada, soğutma sistemindeki soğutucu akışkanın sıcaklığı motor parçalarının sıcaklıklarını belirleyen önemli faktörlerdendir ve soğutma suyunun sıcaklığında ki azalma silindir kapağının ve silindir gömleğinin soğumasına neden olur. Burada oluşan kayıp enerji yine yakıt tüketiminin artmasına neden olur [63, 64]. Bunun yanında silindir gömleği, supap, piston kafası, piston gibi motorun yanma odası elemanlarının yüzeylerinde yanmayan yakıtın birden yanması ile oluşan termal şok, basınç ve yanmış gazların olumsuz etkileri aşınma ve deformasyona neden olmaktadır. Burada uygulanan termal bariyer kaplama yöntemi ile yanma odasında oluşan Karbonmonoksit (CO) oluşumu azaltılmıştır. Seramik kaplamalar ile kaplanmış motorlarda yanma odası daha sıcak olduğundan yanma işlemi daha verimli olur ve Karbonmonoksitin (CO) Karbondioksit (CO₂) dönüşmesi kolaylaşır [63, 65]. Bu termal bariyer kaplamalar ince ve kalın katmanlar halinde malzeme yüzeyine kaplanabilir. İnce katmanlar yaklaşık 0.5 mm kadar, kalın katmanlı kaplamalar ise 5-6 mm'ye kadar olmaktadır [62]. Gaz türbinlerinde, dizel motorların piston tepesinde, silindir kapağı ve supaplarda ince termal bariyer kaplamalar tercih edilir. Bu çalışma da parçalar Alüminyum Oksit-Zirkonyum Oksit (Al₂O₃-ZrO₂) (%20-80), Alüminyum Oksit-Titanyum Oksit (Al₂O₃-TiO₂) (% 87-13) seramik malzemeleri ile kaplanmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlarda kaplamaların etkilerini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.7: Egzoz sıcaklığına kaplamanın etkisi [63]



Şekil 4.8: CO emisyonuna kaplamaların etkisi [63]

Şekil 4.7’de görüldüğü gibi seramik kaplı motorun egzoz gazı sıcaklığının normal motora göre daha yüksek olduğu görülmüştü. Buda bize göstermiştir ki yanma odasında gerçekleşen yanma daha verimli olmuş ve sıcaklığın soğutucu akışkana geçmesi engellenerek egzoz gazı ile dışarı atılmıştır. Alüminyum oksit-Zirkonyum Oksit (AZ) kaplı motorun ve Alüminyum Oksit-Titanyum Oksit (AT) kaplı motorların egzoz gazı sıcaklıklarında artış gözlemlenmişti. Şekil 4.8’de de her iki kaplamada da görüldüğü gibi orta motor hızlarında CO oluşumunun azaldığı, yüksek hızlarda ise yükseldiği görülmüştü. Kaplamalar sayesinde yanma daha iyi gerçekleştiğinden dolayı CO emisyonunda azalma gözlemlendi [63].

Bir başka kaplama ile ilgili araştırmada ise, Tek katmanlı ve çok katmanlı TiN ve CrN kaplamalarla kaplanmış yumuşak çeliğin korozyon direnci incelendi. Yüzey malzemesi, elektron ışınli plazma destekli fiziksel buhar biriktirme (PAPVD) tekniğı ile TiN ve CrN ile kaplandı. Normalde ana TiN veya CrN filminin altında bir ara katman (yaklaşık 100-200 nm) Titanyum (Ti) veya Krom (Cr) içeren "Tek" Titanyum Nitrür (TiN) veya Krom Nitrür (CrN) katmanları hazırlandı; tek katmanlı sürecin dört ardışık tekrarıyla dört katman TiN (veya CrN) üretildi. Mikro yapısal özellikler ve korozyon performansı daha sonra karşılaştırıldı. Dört kat kaplama uygulamanın, PVD yöntemi ile TiN ve CrN kaplamalı yumuşak çeliğın korozyon performansını artırabileceğı gözlemlendi. Korozyon direncindeki iyileşme sadece kalınlıktaki artışa değil, aynı zamanda iç mikro yapıya ve faz bileşimine de atfedilir. Bu, kaplama / substrat ara yüzünde hızlı galvanik saldırıyı önledi. Daha da önemlisi, TiN kaplamaların sütunlu yapısı ile karşılaştırıldığında, ince eş eksenli kristallere sahip yoğun yapı, CrN kaplamalarını korozif ortama daha az geçirgen hale getirdiğı görüldü [66].

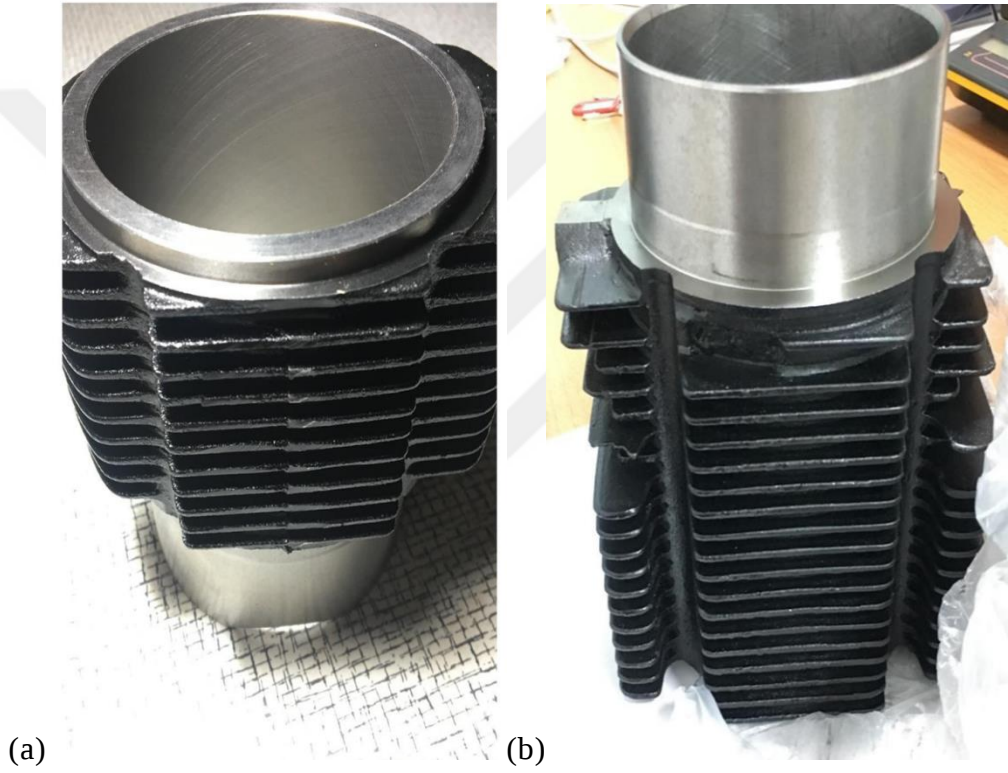
Bizimde çalışmamızda çalıştığımız grafen de nano kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır. Grafenin üretim yöntemlerinden bahsedilecek olursa grafitin mikromekaniksel olarak tabakalara ayrılması, kimyasal buhar biriktirme yöntemi (CVD), Grafen oksitin indirgenmesi ve Epitaksiyel büyütme olarak sıralanabilir. Kendi çalışmamızda CVD yöntemi kullanarak numunelerimizi kapladık. Bu yöntemin grafen kaplamada tercih edilmesinin nedeni daha ucuz, kaliteli ve tekrarlanabilir bir üretim metodu olmasıdır ancak üretim için gerekli

olan ekipmanlar ve cihaz ücreti yüksektir [67]. Elmas, grafit, grafen, amorf karbon (kömür) karbonun allotroplarıdır. Karbon atomu molekül oluştururken hibritleşme meydana getirir. sp , sp^2 ve sp^3 . sp 3 çeşit hibritleşme gerçekleşir. Grafen sp^2 karbon yapısında bulunur. Çelikten 300 kat daha dayanıklı bir malzemedir bunun yanında ince ve esnek bir yapıya sahiptir. Termal iletkenliği ve elektron mobilitesi yüksek bir malzemedir [67, 69]. Düzenli bir kristalin yapına ve yüksek gerilme direncine sahiptir. Karbon atomunun küçük olmasından dolayı kullanım olarak çok avantajlıdır. Yüksek sıcaklıklara (-75 ile +200 °C arasında grafenin özelliklerinde bir değişiklik gözlenmez) dayanıklıdır [69]. Günümüzde bu nedenlerden dolayı otomobil, elektronik, enerji, uçak, polimer kompozit gibi birçok alanda grafen kullanılmaya, araştırılmaya ve bu konu hakkında çalışmalar yapılmaya başlanmıştır.

5. MATERYAL VE METOT

5.1 Kullanılan Motor Silindir Gömleğinin  zellikleri Ve  l   Parametreleri

Öncelikli olarak çalışılacak motor silindir gömleğinin resimleri çekildi, ölçümleri alındı ve teknik resmi hazırlandı.



Şekil 5.1: (a) ve (b) motor silindir gömleğinin dış görünüşleri

Bu deneyde Anadolu motor grubuna ait olan Antor LD 400 motoru kullanılmıştır. Bu motor bi dizel motordur ve tüm deneyler bu motorun silindir gömleğinin i  yüzeyine uygulanacaktır. Bu motorla ilgili tüm detayları aşağıdaki şekilde görebilirsiniz.



Antor 6LD400

Motor	Özellikler
Model dizel	6 LD 400
Silindir hacmi	395 cm ³
Silindir çapı	86 mm
Sıkıştırma oranı	18:1
Motor devri	3600 d/dk
Motor gücü	8,5 BG
Max.Tork	2 kg-m @2200 d/dk
Yakıt depo kapasitesi	4,5 lt
Özgöl yakıt sarfıyatı	220 gr/BG.saat
Yağ tüketimi	13 gr/saat
Karter yağ kapasitesi	1,2 lt
Kuru (boş) ağırlık	45 kg

Şekil 5.2: Deneyde kullanılan Antor LD 400 motorunun genel özellikleri



(a)



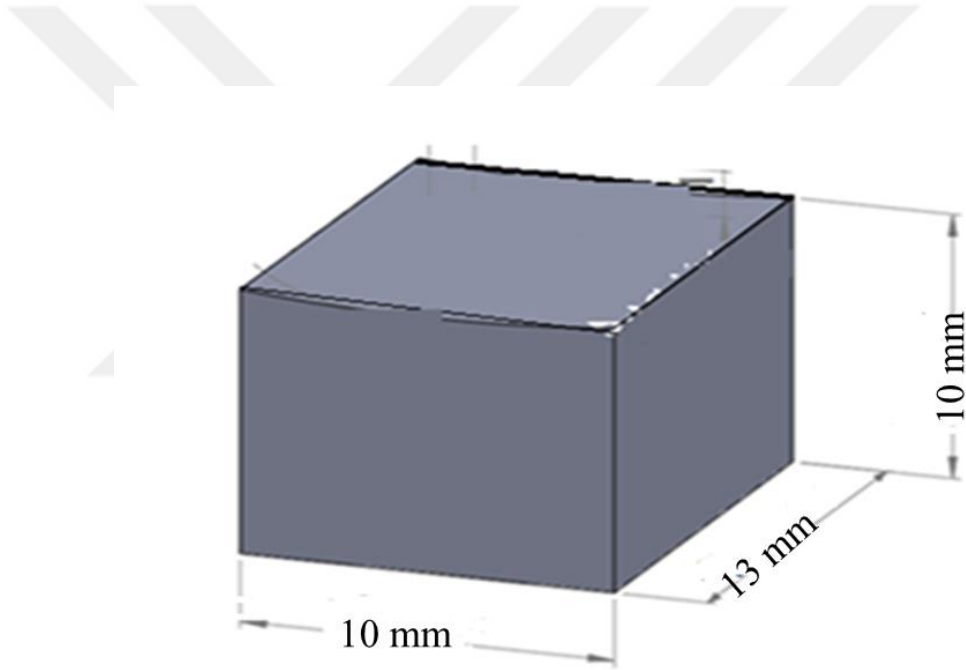
(b)

Şekil 5.3: (a) malzemenin iç yüzeyini göstermektedir ve (b) malzemenin iç yüzeyindeki honlama çizgilerini gösterir

Bizim kaplamak istediğimiz yüzey yukarıdaki şekilde görülen motor silindir gömleğinin iç yüzeyidir. Burada kaplama kalınlığı doğru seçilmelidir, silindir içerisinde honlama çizgileri kaplama ile kapanmalıdır.

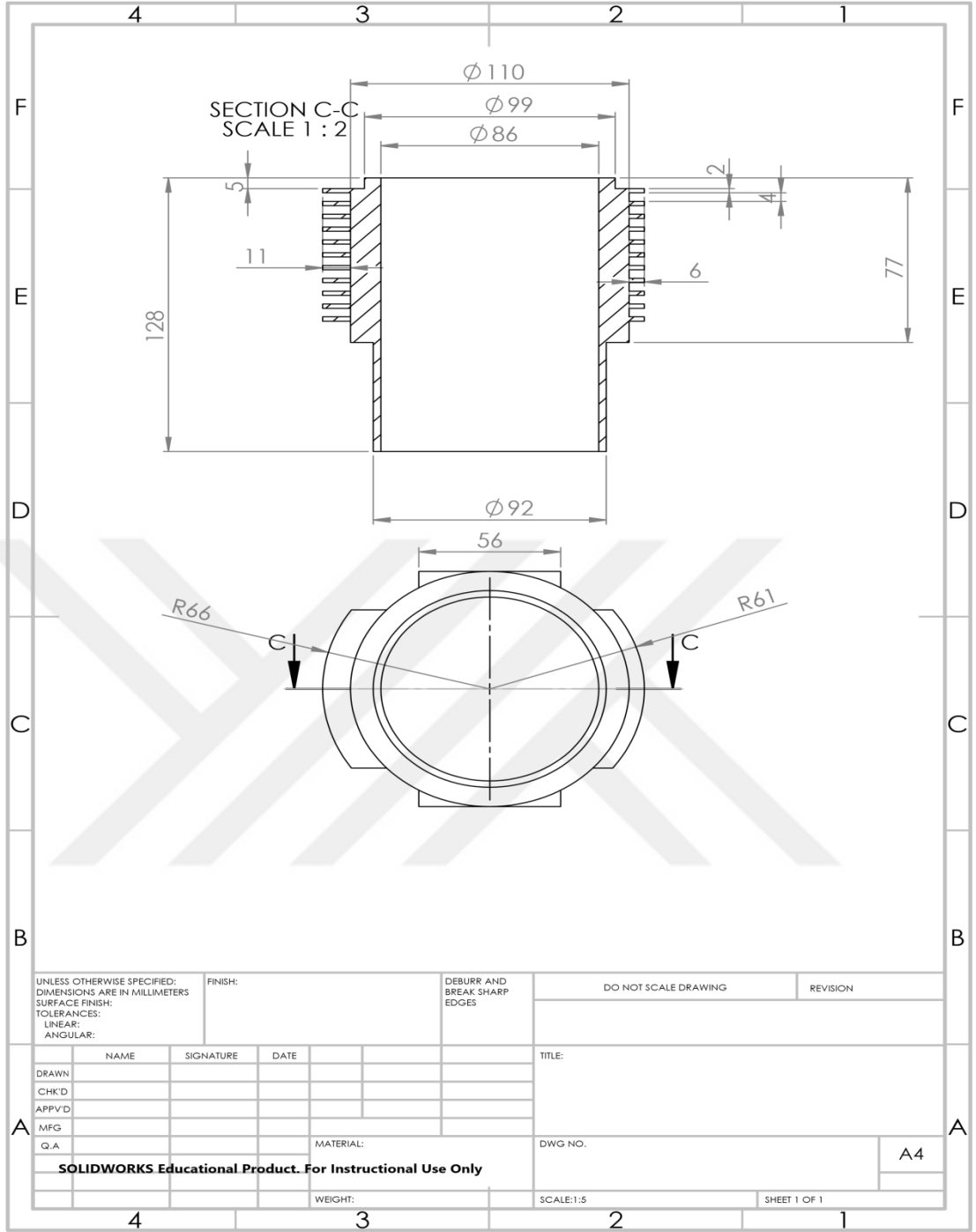


Şekil 5.4: Motorun genel görüntüsünden deney anına kadar olan süreç



Şekil 5.5: Motor silindir gömleğinin Dünya kalıp firması tarafından özel olarak tribometreye göre kesilmiş boyutları

Tribotest makinasına koyulabilmesi daha kolay olması nedeniyle ve deney yapmak daha kolay olacağından dolayı malzeme boyutu 10x10x13 mm olarak Dünya kalıp firması tarafından özel olarak Tribometreye göre kesilmiştir.



Şekil 5.6: Motor silindir gömleği parçasının ölçüleriyle birlikte teknik resmi

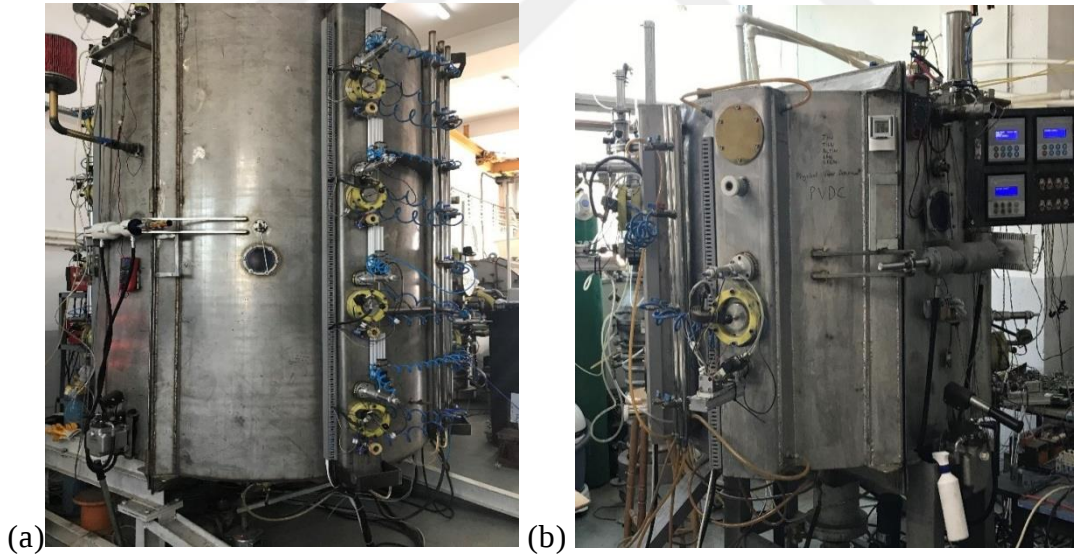
Motor silindir gömleği büyük bir parça olduğu için ve detayların daha iyi görülüp daha düzgün kaplama çalışması yapılabilmesi için motor silindiri gömleği özel kesim yöntemi yardımı ile küçük parçalara ayrıldı.



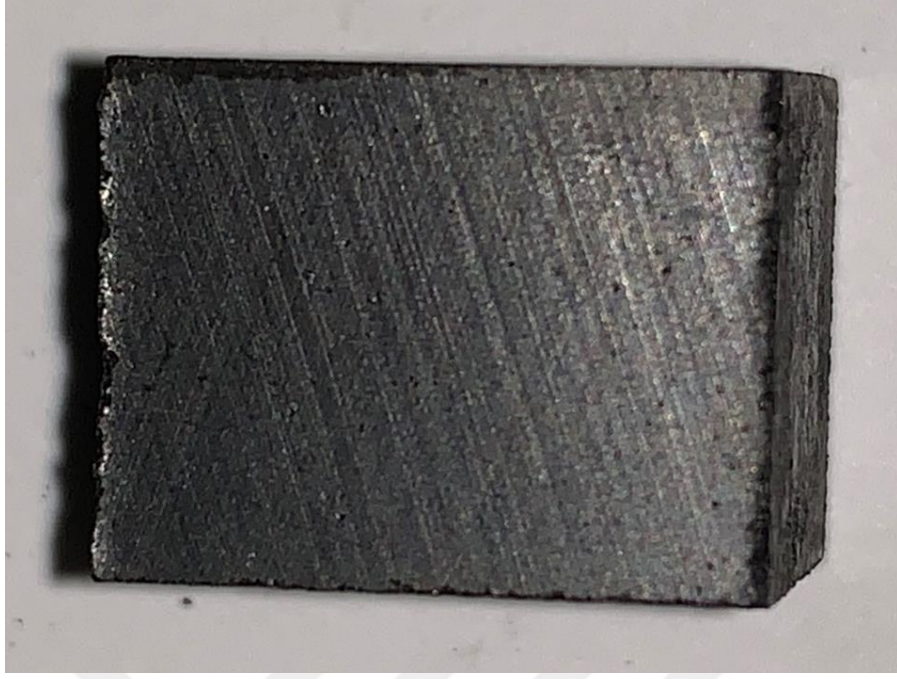
Şekil 5.7: Kaplama öncesi numune görünüşleri

5.2 Silindir Gömleği Parçalarının Kaplanma Prosesi

Silindir gömleğinin küçük ayrılmış numuneleri kimyasal buhar biriktirme (CVD) tekniği kullanılarak grafen ile kaplanmıştır.



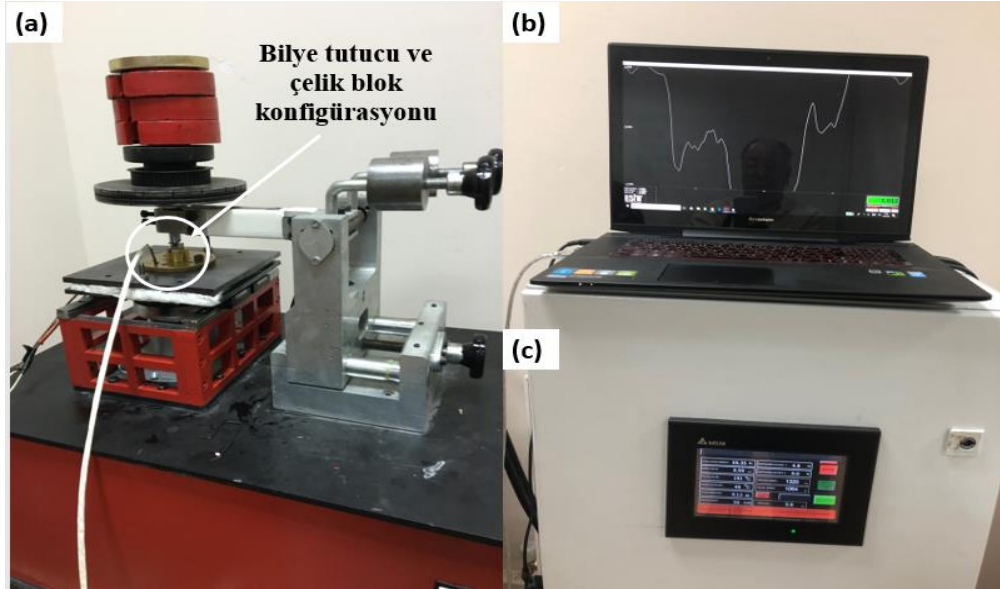
Şekil 5.8: (a) ve (b) CVD kaplama yapılan makine



Şekil 5.9: Kaplama sonrası parça görüntüsü

5.2.1 Deney Düzeneği Hazırlanması Ve Numunelerin Test Edilmesi

Motor silindir gömleği numuneleri Tribometre cihazında test edilmiştir.

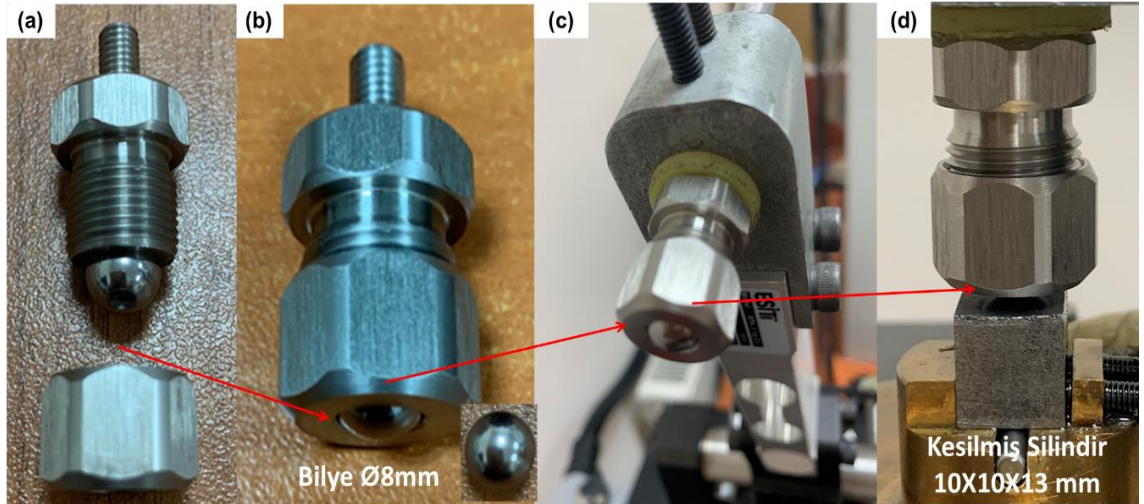


Şekil 5.10: (a) Deney düzeneğinin genel görünümü (b) Sürtünme Kuvveti Eğrileri verilerini toplayan bilgisayar (c) Dijital Sıcaklık Kontrol Panosu

Çizelge 5.1: Tribometre deney düzeneğinin deneysel parametreleri

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

Burada da görüldüğü gibi deney düzeneğinde numune cihaza yerleştirildikten sonra numune üzerine denk gelecek şekilde bilye konumlandırılır. Numune ve bilye üzerinde tribotest koşulları şu şekilde sağlanmıştır, 60 N yük altında, 2 Hz frekansta, 21 dakika boyunca, 99 °C yağ sıcaklığında çalışma yapılmıştır. Numune ile bilye arasına yağ damlatılmıştır. Daha sonra makine çalıştırılarak 21 dakika boyunca bilye kaplama uygulanmış ve kaplama uygulanmamış numune üzerinde ileri geri hareket ettirilmiştir. Bu sırada makinadan makineye bağlı olan bilgisayara veri aktarımı sağlanmaktadır. Her saniyede oluşan değişiklikler bilgisayara veri şeklinde aktarılarak bilgisayarın numune için verilere göre grafik çizmesi sağlanmıştır.

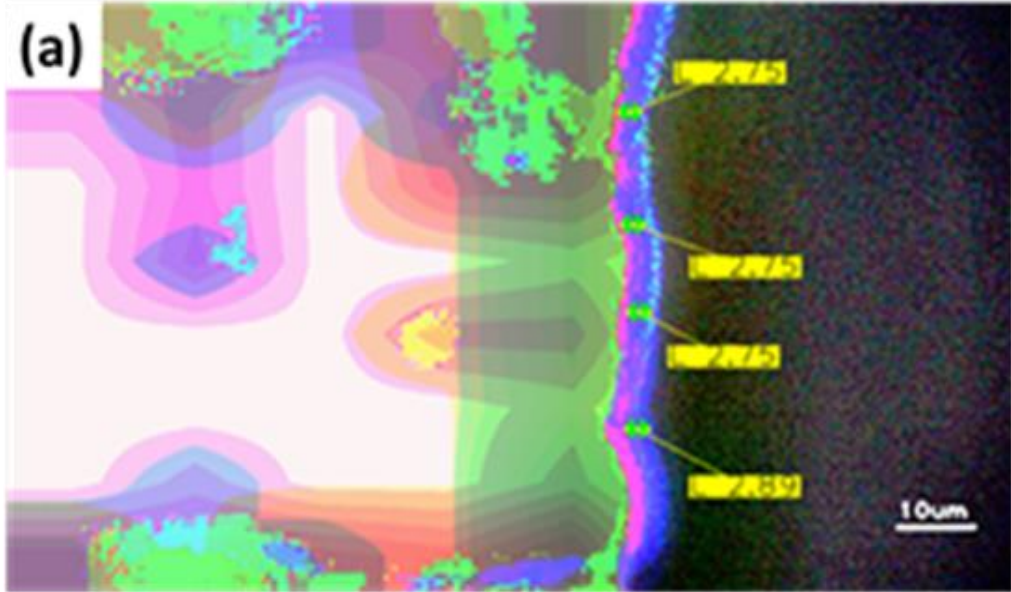


Şekil 5.11: Deney düzeneğinde numune üzerinde hasar oluşturan bilyelerinin hazırlanması

Yukarıda ki şekilde silindir üzerine bilye montajı ve konfigürasyonu gösterilmektedir. Özel olarak hazırlanmış ve kesilmiş silindir gömlekleri üzerine sürtünen 100CrMn6 bilyeler ile sağlanacaktır.



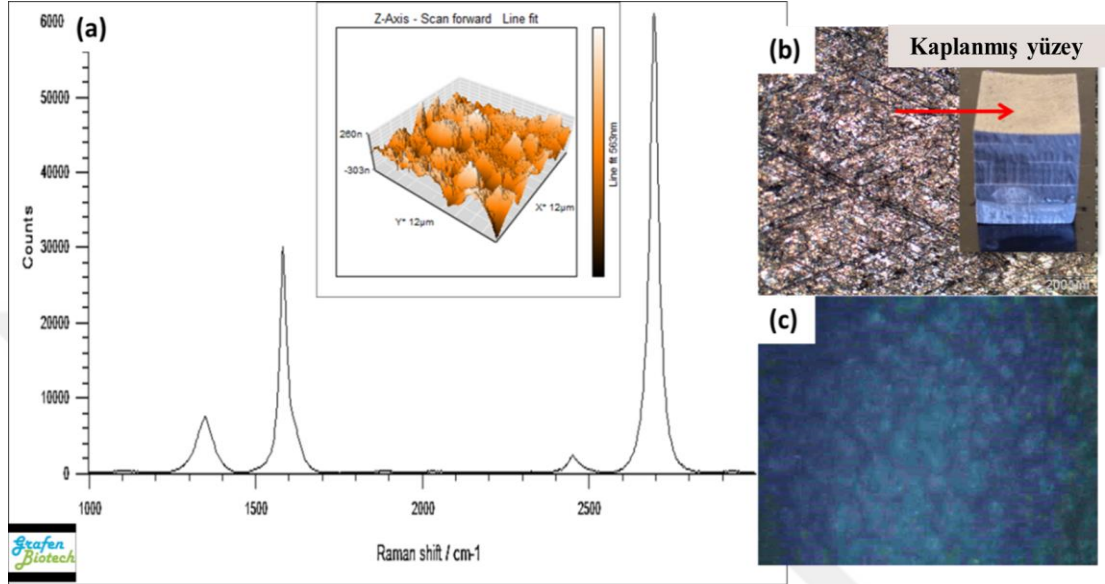
Şekil 5.12: Deney sonrası kaplama ve numune görüntüsü



Şekil 5.13: Kaplama kalınlığının ölçümü görüntüsü

Yukarıda görüldüğü gibi motor silindir üzerine kaplanan grafen malzemesinin kalınlığı Veeco Nanobender 3D HR optik profilometre makinesi ile 2.7 nm olarak ölçülmüştür. Bu ölçüm yüzey karakterizasyonu ölçüm işlemidir.

5.3 Deneyden Elde Edilen Sonuçlar Ve Grafikler:

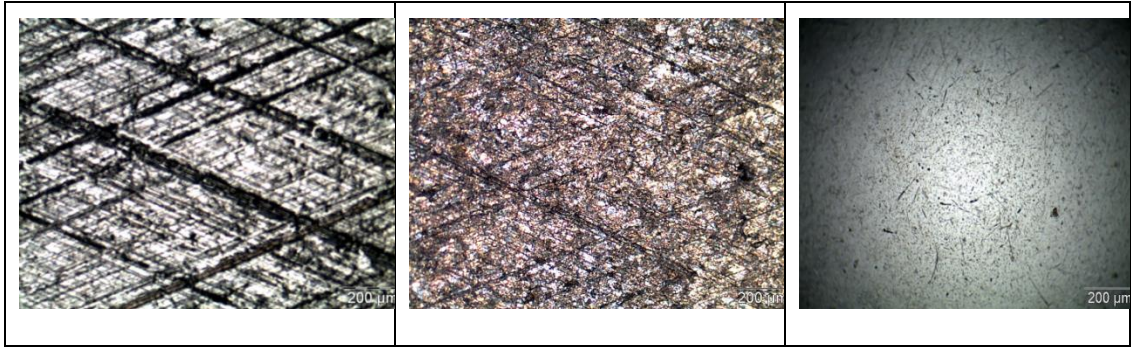


Şekil 5.14: CVD yöntemi ile motor silindir kovanın yüzeyine kaplanmış tek tabaka Grafenin Raman spekleri

Düşük atmosferik basınçta vakum koşullarında CVD yöntemi ile sentezlenmiş başarılı tek tabakalı grafen kaplamanın Raman spektrumları yukarıdaki grafikte görülmektedir. Raman spektrometresi ile Raman ışınları gönderilir bunların uzunlukları 1581 ve 1582 cm⁻¹ bantları gibi oluşan ve 2700 cm⁻¹ bandında oluşan Raman pikleri görülmektedir.

2700 cm⁻¹ bandında oluşan pikler 2D olarak adlandırılır. 1580 cm⁻¹ civarında olanlar D pikleri olarak adlandırılır. Eğer 2D pikleri > D pikleri gibi bir grafik elde edilirse bu tek katmanlı (monolayer) bir kaplama olduğunu göstermektedir. Bizde bu test ile grafeni tek katmanlı olarak katladığımızı kanıtlamış olduk. Bu testler Grafen Biotech firması tarafından ODTÜ’de yaptırılmıştır.

Deney öncesi optik mikroskop analizi görüntüleri



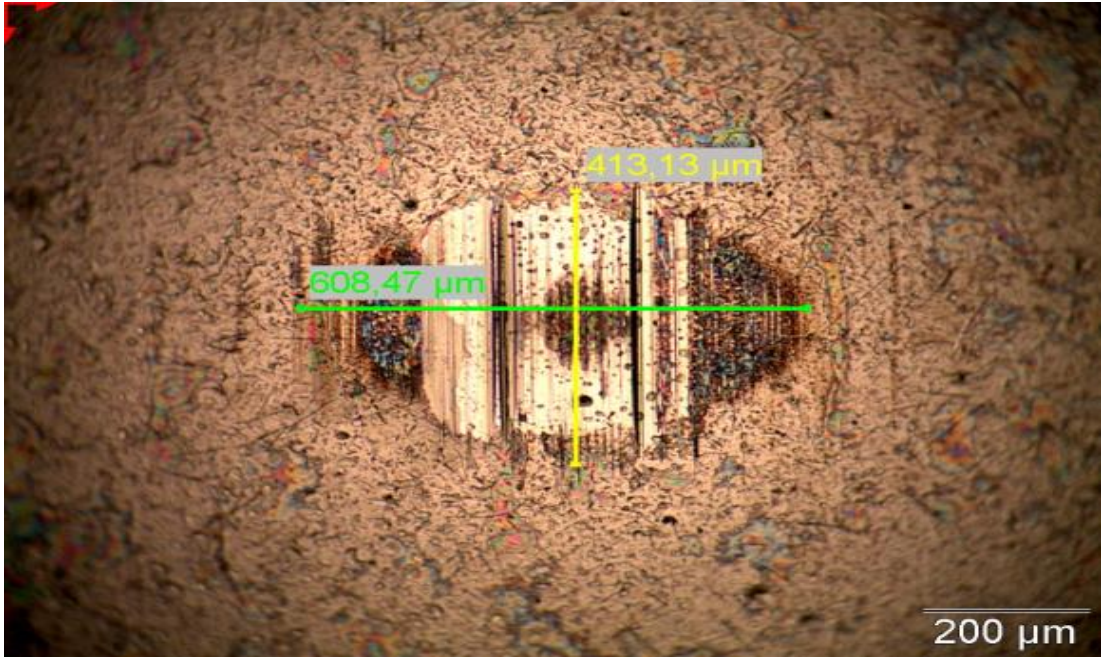
(a)

(b)

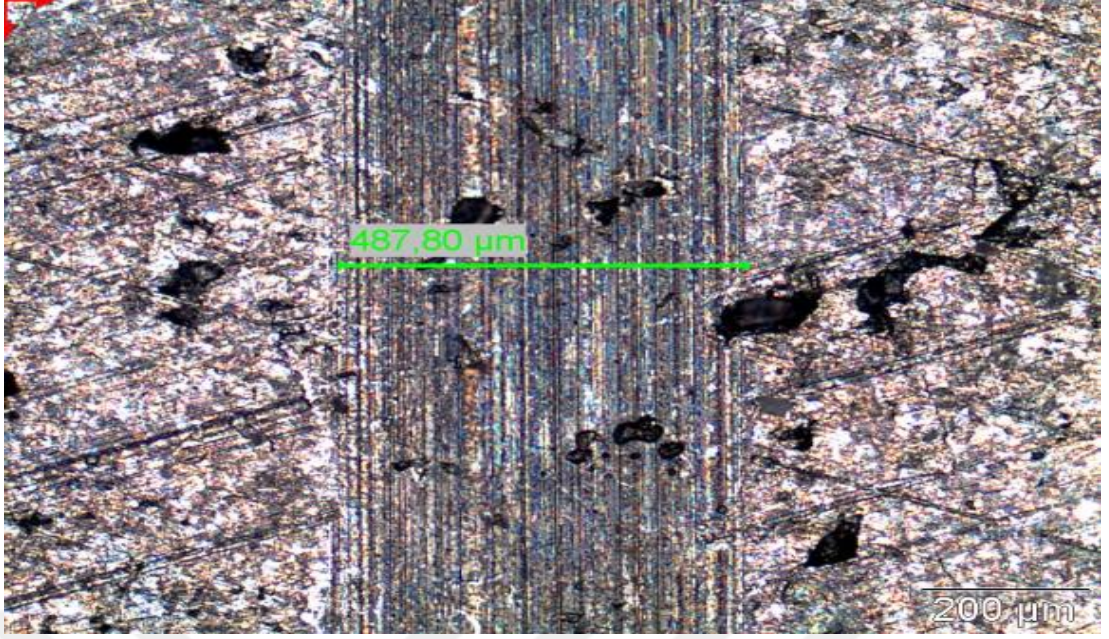
(c)

Şekil 5.15: (a) Yeni Antor silindir gömleği kaplamasız orijinal X5 görüntüsü (b) Yeni Grafen kaplamalı silindir gömleği aşınmamış X10 görüntüsü (c) Yeni bilye X10 görüntüsü

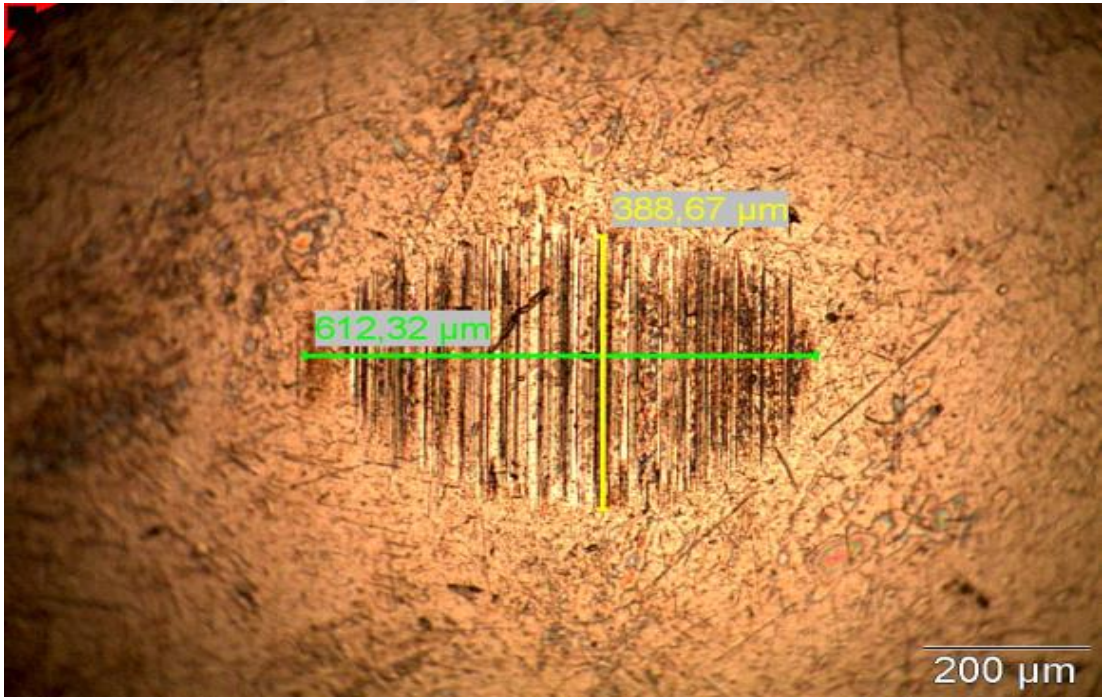
5.4 Deney sonrası optik mikroskop analizi görüntüleri



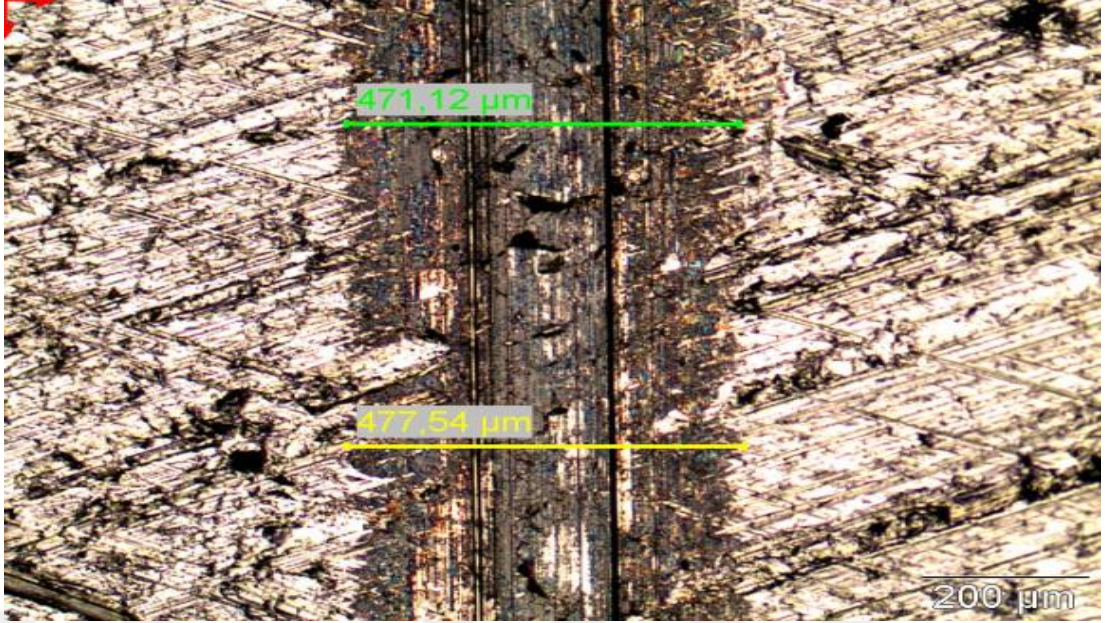
Şekil 5.16: Kaplamasız silindir gömleği X10 üzerinde bilyenin tribotest sonrası optik mikroskop analizi ile alınmış görüntüsü



Şekil 5.17: X10 bilyesinin altındaki kaplamasız silindir numunesini tribotest sonrası optik mikroskop analizi ile alınmış görüntüsü

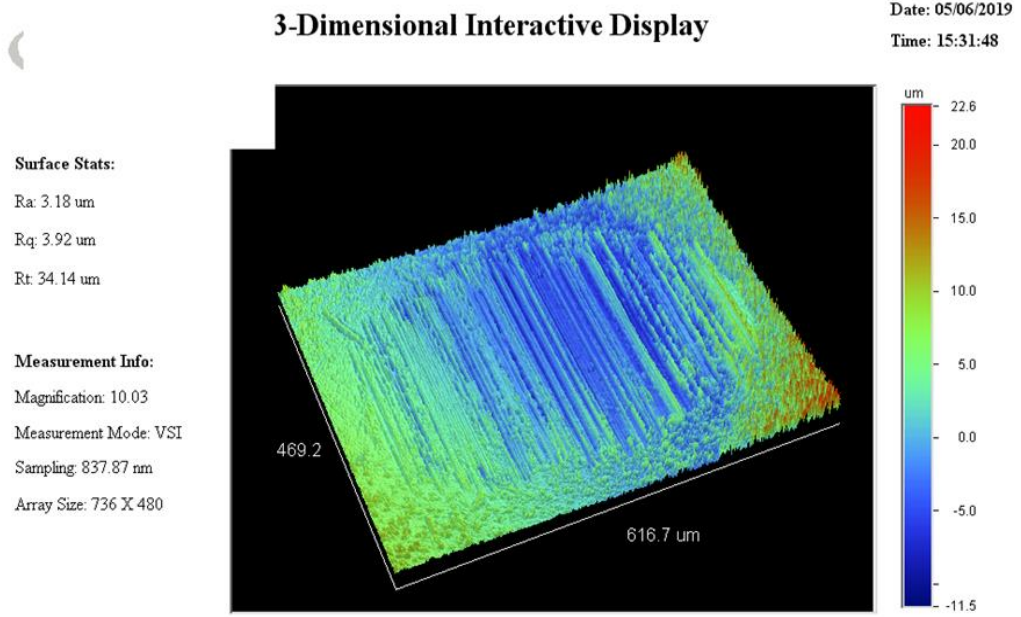


Şekil 5.18: Grafen kaplı silindir gömleği X10 üzerinde ki bilyenin tribotest sonrası optik mikroskop analizi ile alınmış görüntüsü

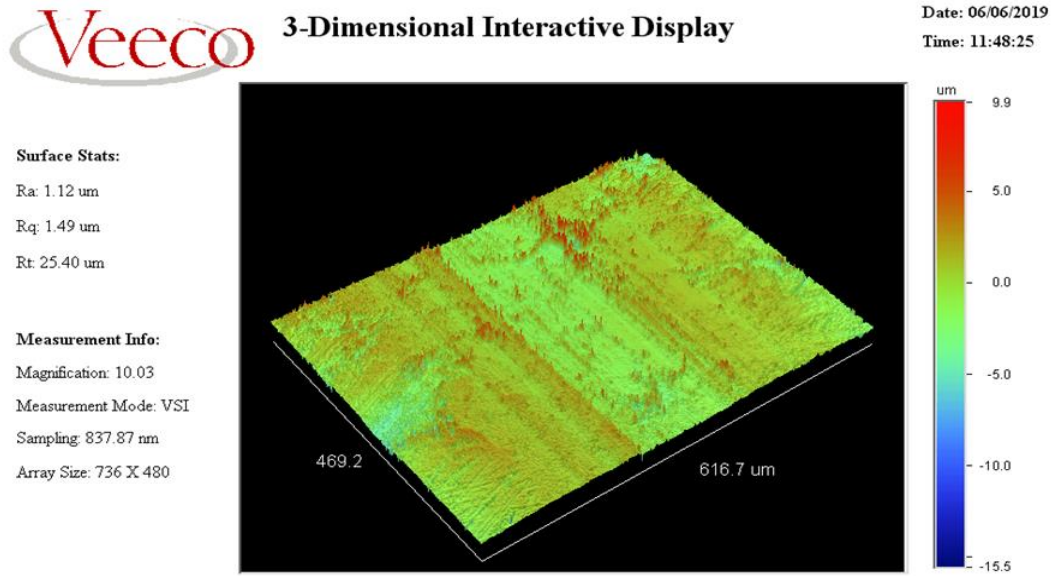


Şekil 5.19: X10 bilyesinin altında Grafen kaplı silindir gömleği numunesin tribotest sonrası optik mikroskop analizi ile alınmış görüntüsü

Yukarıda ki optik mikroskop görüntülerinde görüldüğü gibi, kaplama uygulanan yüzeyde aşınma azalmıştır. Kaplamasız olan silindir gömleği numunesi üzerinde oluşan aşınma yaklaşık olarak $487\ \mu\text{m}$ iken, kaplamalı olan silindir gömleği üzerinde oluşan aşınma yaklaşık olarak $471\ \mu\text{m}$ 'dir. Numuneyi aşındırmak için kullanılan bilyelerde ise kaplamasız silindir numunesi üzerindeki bilye kaplamalı silindir numunesi üzerindeki bilyeye göre daha çok aşınmıştır. Bilyede ölçümler $413\ \mu\text{m}$ 'den $388\ \mu\text{m}$ 'ye düşmektedir. Kaplamanın aşınmaya olan etkisi burada net olarak görülmektedir.



Şekil 5.20: Tribotest sonucunun 3D yüzey pürüzlülüğü görüntüsü
(Kaplamasız silindir gömleğinde ki bilye görüntüsü) X20



Şekil 5.21: Tribotest sonucunun 3D yüzey pürüzlülüğü görüntüsü
(Bilye altında ki kaplamasız silindir gömleği numune görüntüsü) X20

3-Dimensional Interactive Display

Date: 05/06/2019
Time: 16:05:12

Surface Stats:

Ra: 3.06 μm

Rq: 3.84 μm

Rt: 33.16 μm

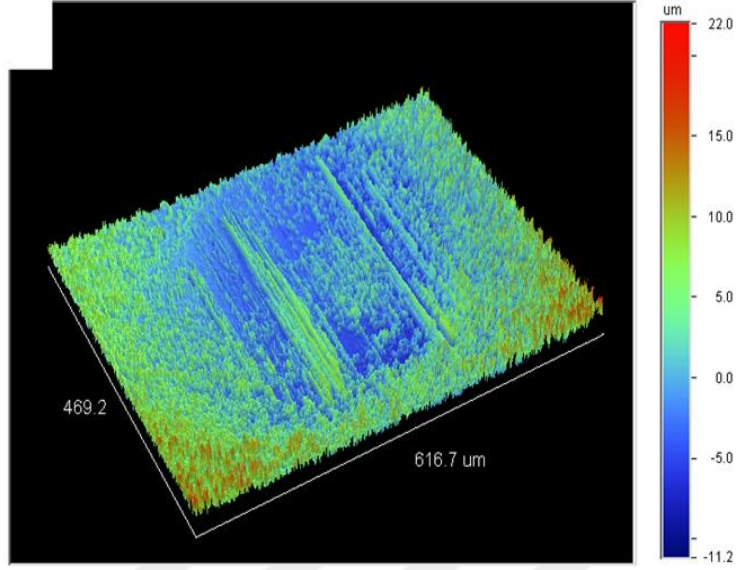
Measurement Info:

Magnification: 10.03

Measurement Mode: VSI

Sampling: 837.87 nm

Array Size: 736 X 480



Şekil 5.22: Tribotest sonucunun 3D yüzey pürüzlülüğü görüntüsü
(Grafen kaplı silindir gömleğinde ki bilye görüntüsü) X20



3-Dimensional Interactive Display

Date: 06/06/2019
Time: 12:35:01

Surface Stats:

Ra: 685.78 nm

Rq: 1.03 μm

Rt: 23.89 μm

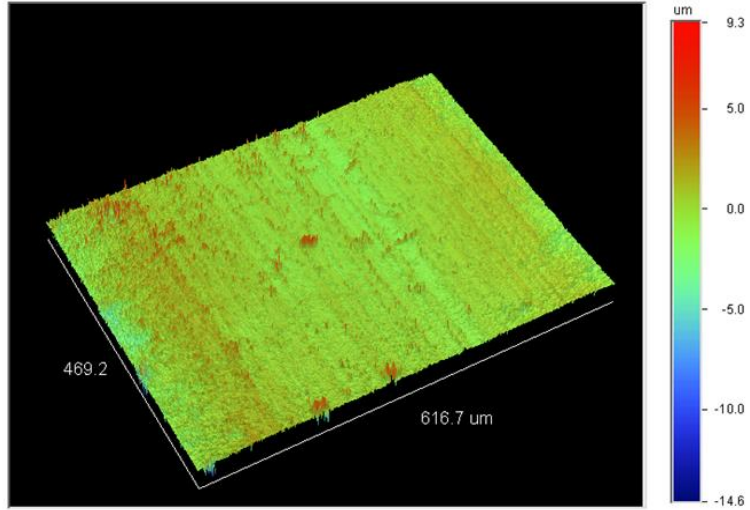
Measurement Info:

Magnification: 10.03

Measurement Mode: VSI

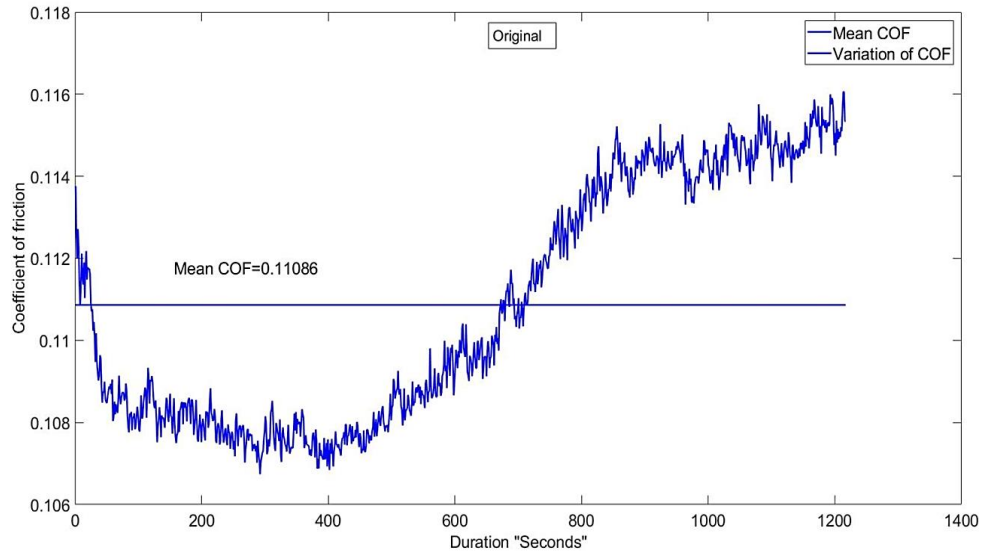
Sampling: 837.87 nm

Array Size: 736 X 480

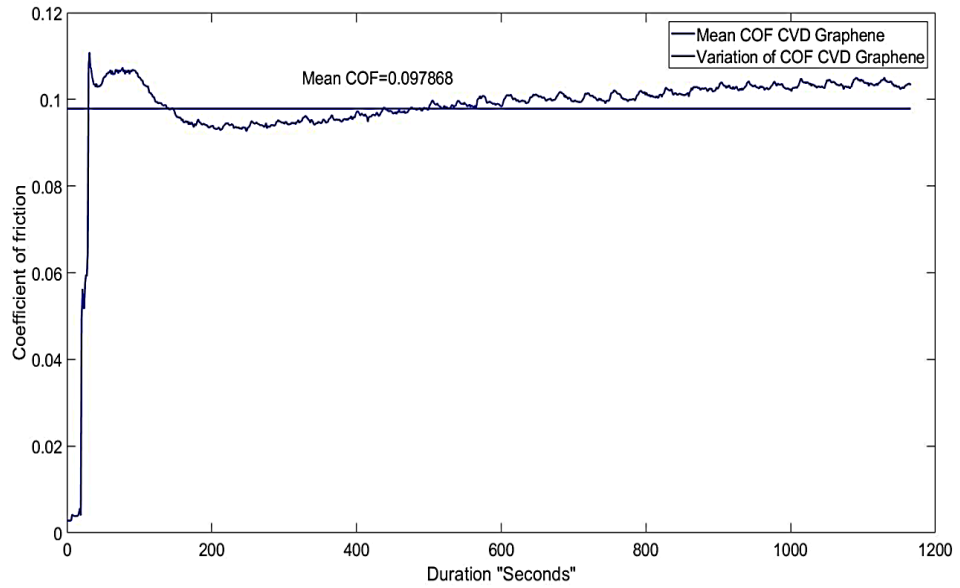


Şekil 5.23: Tribotest sonucunun 3D yüzey pürüzlülüğü görüntüsü
(Bilye altında ki Grafen kaplı silindir gömleği numunesi görüntüsü) X20

5.5 Deney Sonrasında Elde Edilen Grafikler



Şekil 5.24: Kaplamasız numunenin elde edilen grafiği



Şekil 5.25: CVD Grafen kaplamalı numune grafiği

6. SONUÇ

Otomobil motorlarında yakıtın yanması gaz emisyonlarına neden olur ve bu da otomobil üretimi arttığında çevreye zarar verir. Bu sorun ancak motorun verimi artırılarak çözülebilir ve verimlilik arttıkça yakıt tüketimi azalır. Bir motor silindir gömleği, yüksek sıcaklık ve yüksek basınçlı gazdan etkilenir ve her zaman piston segmanları ve piston eteği ile yüksek hızlı kayma sürtünmesine neden olur. Motor silindir kovanı yüzeyleri uygun şekilde yapılandırılırsa, tribolojik davranış elde edilebilir. Fonksiyonel yüzey işlemleri ve kaplamalar, metal yüzeylerin kayma özelliklerinin iyileştirilmesini sağlar. Silindirin iç duvarları daha yüksek yanma basıncına ve daha yüksek piston hızına dayanabilmelidir, böylece silindirin yüzeyi sürtünmeye ve aşınmaya dayanıklı olmalıdır. Günümüzde bu yüzeylere farklı kaplamalar uygulanarak en verimli yüzey kaplaması elde edilmeye çalışılmaktadır. Bu işlem için birçok farklı tipte nano kaplama kullanılmaktadır. Günümüzde nano kaplamalar geleneksel kaplamalara göre daha avantajlı oldukları için tercih edilmektedir.

Bu çalışmada, Dizel motor silindir gömleği yüzeyinin küçük kesilmiş parçaları üzerinde Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) tekniği kullanılarak Grafen ile kaplanmıştır. Yeni tasarım CVD reaktör, heksan buharı kullanılarak hidrojen akış koşulları ile vakum altında tek tabaka olacak şekilde silindir gömleği üzerinde başarıyla biriktirilmiştir. Bu kaplama, Konya'da (Türkiye) bulunan GrafenBioTech Nanoteknoloji mühendislik Ltd. tarafından yapılmıştır.

CVD yöntemi ile grafen kaplanmış motor silindir kovanının sürtünme özellikleri, tribotest cihazı ile deneysel olarak test edilmiştir. Tribometre testleri, sınır yağlama koşulları altında 5w40 sentetik motor yağı kullanılarak kaplanmış ve kaplamasız silindir gömlekleri üzerinde 100CrMn6 bilyeler sürtünerek çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Kaplanmış motor silindir kovanı küresel grafitli bir dökme demirden üretilmiştir. 3D yüzey pürüzlülüğü parametreleri sunulmuştur. Grafen kaplı silindir gömleği, kaplamasız silindir kovanına göre biraz daha düşük sürtünme değeri göstermiştir. Kaplamasız ve

kaplamalı silindir kovanı (koruyucu tabakalı) sürtünme yüzeyinde aşındırıcı aşınma çizgileri oluşurken, bilye yüzeyinde daha az aşınma gözlemlenmiştir.

- Veeco Profilometre ile 3D yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler, X20 hedefi ile yüksek büyütme altında gerçekleştirildi.
- Tribotest yüzeyinin 3D Pürüzlülüğü, Kaplamasız Silindir gömleği numunesi için R_a 1.12 μm ve Grafen Kaplı Silindir numunesi için R_a 685.78 nm olarak görülmüştür. Kaplama burada yine iyi bir etki yaratmış oldu ve sürtünmeyi azalttı. Bilyeler içinde R_a değerinde düşüş gözlemlenmiştir. (3.18 μm -3.06 μm)
- Optik mikroskop görüntüleri de kaplamanın iyi etkilerini kanıtlar niteliktedir. Kaplamasız olan silindir gömleği numunesi üzerinde oluşan aşınma yaklaşık olarak 487 μm iken, kaplamalı olan silindir gömleği üzerinde oluşan aşınma yaklaşık 471 μm 'dir. Numuneyi aşındırmak için kullanılan bilyelerde ise kaplamasız silindir numunesi üzerindeki bilye, kaplamalı silindir numunesi üzerindeki bilyeye göre daha çok aşınmıştır. Bilyede ölçümler 413 μm 'den 388 μm 'ye düşmektedir. Kaplamanın aşınmaya olan etkisi burada net olarak görülmektedir.
- Sonuç olarak grafen kaplamalı silindir gömleği numuneleri için sürtünme katsayı değeri (0.097768) iken, grafen kaplanmamış kovan numuneleri için (0.1186) değerindedir. Kaplama ile sürtünme katsayısında %11,7'lik bir düşme elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

- 1- Keleşoğlu, E. (2011). *Sert Kaplamalar, Üretim Teknikleri ve Özellikleri*. Yıldız Teknik Üniversitesi: <http://www.yildiz.edu.tr/~ergunk> adresinden alındı.
- 2- Vijaya, S. Reddy, K. (2017). *A REVIEW ON NANO COATINGS FOR IC ENGINE APPLICATIONS*. International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET), Volume 8, Issue 9, pp. 70–76, Article ID: IJMET_08_09_007
- 3- Rudolph S. Composition and Application of Coatings Based on Boron Nitride. *Interceram* Vol. 42 No. 5.
- 4- Lee K. M., Oh D. K. , Lee K. (2009). *Characterization of c-BN Coating Films with a Multiple Intermediate Layer Deposited on Cutting Tools by r.f. Sputtering*. Journal of the Korean Physical Society, Vol. 54, No. 3, pp. 1252-1256
- 5- Dahotre, B. Nayak, S. (2005). *Nanocoatings for engine application*. Surface & Coatings Technology, 194, 58– 67.
- 6- Kamenetskikh A. S, Gavrilov N. V. (2017). *BN coatings deposition by magnetron sputtering of B and BN targets in electron beam generated plasma*. 13th International Conference on Films and Coatings, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 857,01201, doi:10.1088/1742-6596/857/1/012017
- 7- Chubarov, M. Pedersen, H. (2013). *Boron nitride: A new photonic material*. Physica B 439 (2014) 29—34
- 8- Tavsanoğlu, T. (2009). *Deposition and characterization of single and multilayered boron carbide and boron carbonitride thin films by different sputtering configurations*. Engineering Sciences. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, English. <NNT: 2009ENMP1641>
- 9- Cesur, H. Kaftanoğlu, B. (2008). *DEPOSITION OF BORON NITRIDE COATINGS ON STEEL SUBSTRATES BY RF MAGNETRON SPUTTERING*. Proceedings of the 7th International Conference 1, Chalkidiki, Greece
- 10- Rupangudi, S. K. Ramesh, C. S. (2014). *Study of Effect of Coating of Piston on the Performance of a Diesel Engine*. doi:10.4271/2014-01-1021
- 11- Sharifzadeh, M. (2006). *Nanotechnology Sector Report*. Cronus Capital Markets, 1st Quarter.
- 12- Luther, W. (2004). *International Strategy and Foresight Report on Nanoscience and Nanotechnology*.
- 13- Ateş H. (2015). *Nano parçacıklar ve nano teller*. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Part:C, Tasarım Ve Teknoloji, GU J Sci Part:C 3(1), 437-442.
- 14- Türkan Y. (2015). *Nanoteknoloji Yatırımları Ve Yatırım Modelleri*. Bingöl Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi Yıl:5, Cilt:5, Sayı:10.
- 15- Vural, İ. Yılmaz, S. (2015). *Mimaride Nano Kaplamaların Kullanımı*. EGE MİMARLIK, ss 12-15.
- 16- Avcı, G. G. (2009). *İşlevsel Nano Kaplamalar*. Bilim ve Teknik Dergisi, sayı: 4, ss.48-49.

- 17- **ÇAYAN, M.** (2013). *TUNGSTEN KARBONİTRÜR (WCN) İNCE FİLMLEİN REAKTİF DOĞRU AKIM MANYETİK ALANDA SIÇRATMA YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU*. İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ' FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ, YÜKSEK LİSANS TEZİ
- 18- **GÜRSÖZLÜ A.** (2017). *TEKSTİL MAMULLERİNE SOL-JEL YÖNTEMİYLE ELEKTRİKSEL ÖZELLİK KAZANDIRILMASI*. YÜKSEK LİSANS TEZİ SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
- 19- **Klein, L. C.** (1988). *Sol-gel technology for thin films, fibers, preforms, electronics, and specialty shapes*. Noyes Publications, 55.
- 20- **Karagöz Z. B.** (2019). *3D (ÜÇ BOYUT) TEKNOLOJİSİ KULLANARAK NANOKAPLI MOTOR SEGMANLARININ SÜRTÜNME VE AŞINMA YÖNÜNDEN İNCELENMESİ*. Yüksek Lisans Tezi, YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
- 21- **Şam, E.** (2007). *Saf Ve Katkılı TiO₂ Filmlerin Optik, Yapısal ve Fotoaktivite Özellikleri*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 120s, İstanbul.
- 22- **Esen, B.** (2011). *Hidrotermal Yöntemle Sentezlenen Nano Metal Oksitlerin Fotokatalitik Özelliklerinin İncelenmesi*. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 73s, Ankara.
- 23- **Evcin A.** (2016). *İnce Film Teknolojisi, Sol-jel Kaplamalar ders notları*. Afyon Kocatepe Üniversitesi.
- 24- **Çinko, U.** (2016). *Tekstil Yüzeylerinin Sol-Jel Yöntemi İle Modifikasyonun Araştırılması*. Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 62s, Bursa.
- 25- **Kurmi S. Z.,** (2018). *Sol-Jel Yöntemiyle TiO₂ VE HAP Kaplanan Ti₆Al₇Nb Alaşımının Mekanik ve Optik Özelliklerinin Araştırılması*. Fırat Üniversitesi, Yüksek lisans tezi.
- 26- **Altuncu E. ,Üstel F.** (2017). *Termal Sprey Kaplama Sektöründe Son Gelişmeler (Teknik yazı)*, Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Metalürji ve Malzeme Mühendisleri Odası dergisi, Sayı:184, sayfa:43-47.
- 27- **Davis, J. R.** (2004). *Introduction to Thermal Spray Processing*. Handbook of Thermal Spray Technology, p 3.
- 28- **Bhatia, A.** (1999). *Thermal Spraying Technology and Applications*. Washington: U.S. Army Corps. of Engineers.
- 29- **Resim web kaynakçası**
http://www.namanhvublast.com/webapp/service_list.php?category_id=11
- 30- **Dorfman, M. R.** (2012). *Thermal Spray Coatings*. in Handbook of Environmental Degradation of Materials (Second Edition), Oxford: William Andrew Publishing, pp. 569–596.
- 31- **Yeşildal R. Günay Y. Z.** (2007). *Plazma Sprey Yöntemi ile Kaplama ve Sprey Karakteristiklerinin İncelenmesi*. DEÜ Müh. Fak. Fen ve Mühendislik Dergisi.
- 32- **Yüksek E.** (2008). *Ark Sprey Teknolojisi ile Şekilli Parça Üretimi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi.
- 33- **David H. K. W. Harper D. H.** *Case Studies in Wear Resistance Using HVOF, PTAW and Spray Fusion Surfacing*, Castolin, Switzerland.

- 34- **Kharlamov, Y.A.** (1986). *Materials Engineering Forum Detanation Spraying of Proctective Coatings*. Voroshilavgrad Machine Building Institute, Voroshilovgrad, U.S.S.R.
- 35- **ÖZTOP, E.** (2006). *FİZİKSEL BUHAR BİRİKTİRME YÖNTEMİ İLE KAPLANAN POLİMER MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ*. YÜKSEK LİSANS TEZİ, İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ.
- 36- **Ondokuz Mayıs Üniversitesi, MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ MALZEME ÜRETİM LABORATUVARI II YÜZEY KAPLAMA TEKNİKLERİ** ders notları, <https://docplayer.biz.tr/47406536-1-fiziksel-buhar-biriktirme-pvd.html>
- 37-**Kolzer, B.** *Pvd Sputtering*, https://kolzer.com/document/doc/UV-PVD-Coating_tur.pdf
- 38- **Aytaç A. , Malayoğlu U.** (2018). *Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemlerinden PVD ve JVD/DVD İnce Film Kaplamaların Karşılaştırılması ve DVD Kaplama Teknolojisinin Endüstriyel Uygulamaları Üzerine Kavramsal, Akademik ve Teorik Bir Analiz*. Savunma Bilimleri Dergisi, Cilt 17, Sayı 1, ISSN (Basılı) : 1303-6831, ISSN (Online): 2148-1776
- 39-**Varol Z.** (2014). *Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) kaplama ders notları*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri teknolojiler ABD dersi, <https://www.slideshare.net/Zzmmrrtt/kimyasal-buhar-biriktirme-cvd>
- 40- **Uslu İ.** (2013). *Yüzey İşlemleri Ders Notları*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüzey İşlemleri dersi, <https://www.slideshare.net/iuslu/yzey-ilemleri>
- 41- **Tuçcu A. , Kaçal A.** *Kesici Takımların Seramik Kaplanması*, DPÜ Mühendislik Fakültesi, Makina Mühensiliği bölümü, Simav/Kütahya, sayfa:152-165 <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/451839>
- 42- **Yıldız T.** (2006). *AŞINMA SİSTEMLERİ*. Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Metal Eğitim Bölümü 23119.
- 43- **Eren, H.** (2005). *Ferritik Paslanmaz Çeliğin Ko-rozyon Davranışına Karbür Yapıcı Alaşım Ele-mentlerinin Etkilerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi F.Ü. Fen Bil. Enst. Elazığ
- 44- **Balyalı H. A.** (2013). *Cam Fiber Takviyeli Polyester Matrisli Kompozitlerin Erozif Aşınma Davranışlarının Taguchi Deney Tasarımı İle İncelenmesi*. Türkiye.
- 45- **Salah H.R.** (2015). *Characterization of Coated Diesel Engine Cylinder Liner Material using Surface Metrology Techniques*, *Journal of Surface Science and Coating Technology*. Volume 1, Issue 1, pp. 1-18.
- 46- **Kaleli E. H. Yüksek L.** (2009) *The Effect and Comparison of Biodiesel Diesel Fuel on Crankcase Oil Diesel Engine Performance*. FME TRANSACTIONS, cilt.37, ss.91-97.
- 46-**Fakaruddin, A. Hafiz, A.** (2012). *Materials Selection for Wet Cylinder Liner*. AOSR Journal of Engineering (IOSRJEN). 2 (9) 23-32.
- 47- **Hariharan, P. Rajendran, R.** (2008) *Study on the Performance of Electroless Nickel Coating on Aluminium for Cylinder Liners*.

- 48- **Sakarya üniversitesi** (2010). *Taşıt emisyonları içten yanmalı motorda temel kavramlar ve çalışma prensipleri*, Sakarya üniversitesi mühendislik fakültesi çevre mühendisliği bölümü ders notları. <https://www.teknoekip.com/icten-yanmali-motorlar-nasil-calisir-37508.html>
- 49- **Çelik S.** (2014). *İÇTEN YANMALI MOTORLAR*. Niğde Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü ders notu, ss: 1-25.
- 50- **Hazar, H. Öner, C.** *CrN Kaplamanın Dizel Motor Silindir Gömleği Aşınmasına Etkisi*. Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü, Mühendis ve Makina Cilt :48 Sayı: 575, syf:14-18.
- 51- <https://www.makinaegitimi.com/motorda-segman-asinmasi/>
- 52- **Hazar, H. Öner, C.** (2004), *The Effects of Thermal Barrier Coating on the Engine Performance*. 8th International Combustion Symposium, Turkey, 125-126.
- 53- **Hazar, H. Öner, C.** *İçten Yanmalı Motorlarda Seramik Kaplamanın Motor Performansına Etkisi*. Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi.
- 54- **Wacker, E. Sander, W.** (1982). *Piston Design for High Combustion Pressure and Reduced Heat Rejection to Coolant*, SAE International Congress, Michian.
- 55- **Parlak, A.** (1999). *Düşük Isı Kayıplı (DIK) Dizel Motorlarında Yapılan Çalışmaların Performans Açısından Değerlendirilmesi*. 6th International Combustion Symposium, İstanbul.
- 56- **Hazar, H. Öner, C.** (2005). *Bir Dizel Motoru Silindir Gömleğinin Aşınması*, Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü, doğu anadolu bölgesi araştırmaları.
- 57- **Aktaş, B. Tekeli, S.** (2008). *NiO / YSZ (Yitriya ile Kararlı Hale Getirilmiş Zirkonya) Seramiklerin Kırılma Tokluğuna Mikro Yapının Etkisi*, Kocaeli Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Te120, V11. Seramik Kongresi Bilimsel Programı, Isbn: 978-975-7150-90-9.
- 58- **Otomotiv Laboratuvarı**, (2020). *Bir otomotiv mühendisinin notları*, Yanma Odası Kaplamalarının Motor Performansına Etkisi, <https://otomotivlab.net/yanma-odasi-kaplamalarinin-motor-performansina-etkisi/>
- 59- **Akın, U.** (2003). *Alüminyum Altlık Üzerine Isıl Püskürtme Yöntemiyle Kaplanan Seramik Ve Seramik-Polimer Kaplamaların Aşınma Davranışlarının İncelenmesi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- 60- **Elmas, E. Yıldız, K.** (2008). *Mekanik Aktivasyonun Alumina-Kuvars Seramik Sisteminde Müllit Oluşumuna Etkisi*, Kocaeli Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Te116, V11. Seramik Kongresi Bilimsel Programı, Isbn: 978-975-7150-90-9.
- 61- **Karagöz, Ş. Yamanoglu, R.** (2008). *Al-Sic Tozlarının Prep Atomizasyonu İle Üretimi*. Production Of Al-Sic Powders By Prep Atomization, Kocaeli Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Te104, V11. Seramik Kongresi Bilimsel Programı, ISBN: 978-975-7150-90-9.

- 62- **Gürbüz, H.** (2014). Gökkaya Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 20, Sayı 1, syf:15-19, doi: 10.5505/pajes.2014.04695.
- 63- **Borat, O. Balcı, M.** (1995). *İçten Yanmalı Motorlar*, Teknik Eğitim Vakfı Yayınları, Cilt 1, Ankara.
- 64- **Çırak, B. Gürbüz, H.** (2012). *Yapay Sinir Ağları Kullanarak Dizel Motorlarda Termal Bariyer Kaplamanın Emisyonlara Etkilerinin İncelenmesi*. Nevşehir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitü Dergisi (1), 24-35.
- 65- **Liu, C. Leyland, A.** (2001). *Corrosion resistance of multi-layered plasma-assisted physical vapour deposition TiN and CrN coatings*, Volume 141, Issues 2–3, Pages 164-173, doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01267-1.
- 66- **Bedeloğlu, A. Taş, M.** *Grafen ve Grafen Üretim Yöntemleri*, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, DOI: 10.5578/fmbd.32173.
- 67- **Ağaçdelen Z. KALELİ E. H.** (2019). *3D Digital Microscopic Examination of Graphene Coated Engine Cylinder Liner Surface*, Automobile 2019 6th International Conference and Exhibition on Automobile Mechanical Engineering, Zürich, İsviçre, 8 - 09 Temmuz 2019
- 68- **Altürk, E.** *Süper Malzeme Grafen*, makale çalışması, www.pagev.org
- 69- **Arseven, M.** (2010). *Nanokarbon ve Formları*, İleri Malzemeler Araştırma Grubu Nanoteknoloji & Nanotıp Anabilim Dalı, İleri Malzemeler Araştırma Grubu sunumu, Beytepe, 1/37

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Zeynep Ağaçdelen

Öğrenim Durumu

Yüksek Lisans: : İstanbul Aydın Üniversitesi
: Makine Mühendisliği 2018-2021

Lisans: : Yeditepe Üniversitesi
: Gıda Mühendisliği 2011-2016

Lise: : Edremit Lisesi
:2007-2011

Mesleki Deneyim

A&T Gıda Laboratuvarı Gıda Mühendisi
2016-2017

**Advanced Granite
Solution** Makine Mühendisi
Temmuz 2017-hala çalışıyorum