

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**ALÜMİNYUM/PERLİT-UÇUCUKÜL/GRAFEN HİBRİT
KOMPOZİTLERİN AŞINMA
DAVRANIŞLARI VE KARAKTERİZASYONU**

Selin BAYDEMİR

Yüksek Lisans Tezi

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

OCAK, 2021

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

ALÜMİNYUM/PERLİT-UÇUCUKÜL/GRAFEN HİBRİT
KOMPOZİTLERİN AŞINMA
DAVRANIŞLARI VE KARAKTERİZASYONU

Tez Yazarı
Selin BAYDEMİR

Danışman
Prof. Dr. Mehtap MURATOĞLU

OCAK, 2021
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı:	Alüminyum/Perlit-Uçucukül/Grafen Hibrit Kompozitlerin Aşınma Davranışları Ve Karakterizasyonu
Yazarı:	Selin BAYDEMİR
İlk Teslim Tarihi:	5.1.2021
Savunma Tarihi:	28.1.2021

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

	<i>İmza</i>	
Danışman:	Prof. Dr. Mehtap MURATOĞLU Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Başkan:	Dr. Öğr. Üyesi Akın ODABAŞI Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Doç. Dr. Hülya DEMİRÖREN Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza

Doç. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Alüminyum/Perlit-Uçucukül/Grafen Hibrit Kompozitlerin Aşınma Davranışları Ve Karakterizasyonu” yüksek lisans tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

28.01.2021

Selin BAYDEMİR



ÖNSÖZ

Bu çalışmada, akademik bilgilerin yanında, maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen danışman hocam Prof. Dr. Mehtap MURATOĞLU' na, katkılarından dolayı Y. Müh. Erdoğan KARİP' e, laboratuvar olanaklarıyla ve desteğini hiç esirgemeyen hocam Doç. Dr. Mehmet Deniz TURAN ve Dr. Öğr. Üyesi Mustafa BOYRAZLIYA, analizler esnasında yardımını esirgemeyen hocam Prof. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU' na, çalışmalar esnasında yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarım Tuğçe ÖZCAN, Büşra ÖNCE' ye, teknik bilgileri ile yardımcı olan tekniker İhsan ASUTAY' a, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

Bu çalışma, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü" nün MF.18.53 numaralı FÜBAP projesi tarafından desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı FÜBAP birimi çalışanlarına teşekkür ederim.

Selin BAYDEMİR

ELAZIĞ, 2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vi
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Özeti	2
2. KOMPOZİT MALZEMELER	7
2.1. Takviye Elamanına Göre Kompozitler	8
2.1.1. Elyaf Takviyeli Kompozitler	9
2.1.2. Parçacık Takviyeli Kompozitler	9
2.1.3. Tabakalı Kompozitler	10
2.1.4. Hibrit (Karma) Kompozitler	10
2.2. Matris Elemanına Göre Kompozitler	11
2.2.1. Polimer Matrisli Kompozitler	11
2.2.2. Seramik Matrisli Kompozitler	12
2.2.3. Metal Matrisli Kompozitler	12
2.3. Kompozit Yüzey Kaplama Yöntemleri	13
2.3.1. Hidrotermal Yöntem	14
2.3.2. Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD)	20
2.3.3. Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD)	21
2.3.4. Termal Sprey Kaplama	21
3. AŞINMA	23
3.1. Triboloji	24
3.2. Aşınmaya Etki Eden Faktörler	25
3.3. Aşınmanın Oluşum Safhaları	25
3.4. Aşınma Mekanizmaları	26
3.4.1. Adhezif Aşınma	26
3.4.2. Abrazif Aşınma	31
3.4.3. Yorulma ve Tabakalı (Delaminasyon) Aşınması	34

3.4.4. Eroziyon Aşınması.....	35
3.4.5. Korozyon Aşınması.....	36
3.5. Sürtünme.....	38
3.5.1. Sürtünme Katsayısı.....	38
3.5.2. Sürtünmenin Sınıflandırılması.....	40
4. MATERYAL VE METOT.....	46
4.1. Materyaller.....	46
4.1.1. Toz Materyaller.....	46
4.1.2. Al6013 Alüminyum Alaşımının Hazırlanması.....	47
4.2. Deneyde Kullanılan Hidrotermal Yöntem.....	49
4.3. SEM ve EDX Analizi.....	51
4.4. X-Işını Difraksiyonu (XRD) Analizi.....	51
4.5. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri.....	52
4.6. Mikro-Sertlik Ölçümleri.....	53
4.7. Aşınma Testi.....	55
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	57
5.1. Kompozit Kaplamalara Ait SEM ve EDX Analizi Sonuçları.....	57
5.2. XRD Analizi Sonuçları.....	72
5.3. Mikro-sertlik Ölçümleri.....	73
5.4. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri.....	74
5.5. Aşınma Testi.....	75
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	93
KAYNAKLAR.....	95
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Alüminyum/Perlit-Uçucukül/Grafen Hibrit Kompozitlerin Aşınma Davranışları ve Karakterizasyonu

Selin BAYDEMİR

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Ocak 2021, Sayfa xv+101

Bu çalışmada, alüminyum alaşımı üzerine hidrotermal yöntem ile grafen/uçucukül-genleştirilmiş perlit kombinasyonlarında hazırlanan solüsyonlar ile kaplama yapılması amaçlanmıştır. Grafen /uçucu kül-genleştirilmiş perlit (%10, %20 ve %30) ile farklı kombinasyonlarda kaplama solüsyonları hazırlanmıştır. Al6013 alaşımı numuneleri, hidrotermal cihazda bu solüsyonlar kullanılarak 24 saat 240°C’ de kaplama işlemine tabi tutulmuştur. Kaplanan numunelere 450°C sıcaklıkta 1 saat boyunca sinterleme ısıl işlemi uygulanmıştır. Al6013 Alüminyum alaşımı üzerine yapılan kompozit kaplamaların, taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji yayımlı X-ışını analizi (EDX), X-ışını kırınım analizi (XRD), yüzey pürüzlülüğü, mikro-sertlik ve aşınma testleri yapılmıştır. Sonuç olarak SEM, EDX ve XRD analizi ile A6013 Alüminyum alaşımı üzerinde kompozit kaplama oluşmuştur. Grafen, uçucu kül veya genleştirilmiş perlitte oluşan kaplama yüzeyde, katmanlı ve birbirine benzer rast gele dağılmış ince katmanlar şeklinde, grafen benzeri bir yapıda görülmüştür. Mikro-sertlik ölçümleri incelendiğinde en yüksek sertlik %30 genleştirilmiş perlit takviyeli numunede görülmüştür. Aşınma testleri ile takviye edilen uçucu kül oranı arttıkça aşınma direnci azalmıştır. Takviye edilen genleştirilmiş perlit oranı arttıkça ise aşınma direnci artmıştır. Numunelere takviye edilen uçucu kül ve genleştirilmiş perlitli numunelerden en iyi aşınma direncini uçucu kül takviyeli numune göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Grafen, Genleştirilmiş Perlit, Uçucu Kül, Hidrotermal Kaplama

ABSTRACT

Wear Behavior and Characterization of Aluminum / Perlite-Flyash/ Graphene Hybrid Composites

Selin BAYDEMİR

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metallurgical and Materials Engineering
January 2021, Page xv+101

In this study, it is aimed to coat aluminum alloy with solutions prepared in graphene / volatile-expanded perlite combinations by hydrothermal method. Coating solutions were prepared in different combinations with graphene / fly ash-expanded perlite (10%, 20% and 30%). Al6013 alloy samples were coated for 24 hours at 240°C using these solutions in a hydrothermal device. Sintered heat treatment was applied to the coated samples for 1 hour at 450°C. Al6013 Aluminum alloy was placed in the hydrothermal device and added to the solutions prepared separately for each sample. The samples were coated in the hydrothermal device at 240°C for 24 hours. The coated samples were sintered heat treated at 450°C for 1 hour. Scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive X-ray analysis (EDX), X-ray diffraction analysis (XRD), surface roughness, micro-hardness and wear tests of composite coatings made on Al6013 aluminum alloy were performed. As a result, composite coating was formed on A6013 Aluminum alloy by SEM, EDX and XRD analysis. The coating consisting of graphene, fly ash or expanded perlite was seen on the surface in the form of layered and similarly distributed thin layers, with a graphene-like structure. When the micro-hardness measurements were examined, the highest hardness was seen in the 30% expanded perlite reinforced sample. Abrasion resistance decreased as the rate of fly ash increased with the abrasion tests. As the reinforced expanded perlite ratio increased, the wear resistance increased. The fly ash reinforced sample showed the best abrasion resistance among samples with fly ash and expanded perlite reinforced to the samples.

Keywords: Graphene, Expanded Perlite, Fly Ash, Hydrothermal Coating

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Kompozitlerin takviye elamanına göre sınıflandırılması	8
Şekil 2.2	Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.....	9
Şekil 2.3.	Kompozit malzemelerin matris elemanına göre sınıflandırılması.....	11
Şekil 2.4.	Hidrotermal cihaz	15
Şekil 2.5.	Boksit cevherinden alüminyum eldesi	16
Şekil 2.6.	Alüminyum alaşımları	17
Şekil 2.7.	Karbon esaslı malzemeler.....	19
Şekil 2.8.	Termal sprey kaplama.....	21
Şekil 3.1.	Tribolojik sistemin gösterimi	24
Şekil 3.2.	Aşınmanın safhaları	26
Şekil 3.3.	Adheif aşınma	27
Şekil 3.4.	Adhesif aşınma gösterimi	29
Şekil 3.5.	Pürüz tepciklerinin ayrılması	29
Şekil 3.6.	Abrasif aşınma mekanizmaları.....	32
Şekil 3.7.	a) Düşük ve orta gerilimli abrazif aşınma, b)yüksek gerilimli abrazif aşınma [106].....	33
Şekil 3.8.	Yüzey yorulmasında çatlak oluşumu ve ilerlemesi.....	35
Şekil 3.9.	Erozyon aşınması	36
Şekil 3.10.	Korozif aşınma.....	37
Şekil 3.11.	Kristal kafes yapısının elastik deformasyonu	38
Şekil 3.12.	Coulomb' un sürtünme modeli	39
Şekil 3.13.	Sürtünme katsayısının tanımı.....	39
Şekil 3.14.	Stribeck eğrisi	41
Şekil 3.15.	Sürtünme çeşitleri	42
Şekil 3.16.	Kuru sürtünme halinde yüzeylerin durumu.....	43
Şekil 3.17.	Sınır sürtünmesi	44
Şekil 3.18.	Sıvı sürtünme	44
Şekil 4.1.	Genleştirilmiş perlitte ait farklı büyütme SEM görüntüleri	47
Şekil 4.2.	Al6013 Alüminyum alaşımı.....	48
Şekil 4.3.	Numune üretimi akım şeması	50
Şekil 4.4.	Taramalı elektron mikroskobu	51
Şekil 4.5.	X-Işını difraksiyon cihazı	52
Şekil 4.6.	Portatif yüzey pürüzlülüğü cihazı	52
Şekil 4.7.	Vickers mikro-sertlik ölçüm cihazı	54
Şekil 4.8.	Aşınma düzeneğine ait teknik resim	55
Şekil 5.1.	K numunesinin kaplama yüzeyine ait; a) 500X, b) 2000X ve c) 5000X büyütmede SEM görüntüleri ve d) kaplama yüzeyinin EDX analizi.....	58
Şekil 5.2.	K numunesinin kaplama yüzeyine ait; a) 500X büyütme SEM görüntüsü ve b) yan kesit SEM görüntüsü	58
Şekil 5.3.	A1 numunesinin kaplama yüzeyine ait; a) 500X, b) 2000X ve c) 5000X büyütmede SEM görüntüleri ve d) kaplama yüzeyinin EDX analizi.....	59
Şekil 5.4.	A1 numunesine ait bölgesel EDX analizleri	59
Şekil 5.5.	A1 numunesinin kaplama yüzeyine ait; a) 500X büyütme SEM görüntüsü ve b) yan kesit SEM görüntüsü	60

Şekil 5.6.	A2 numunesinin kaplama yüzeyine ait; a) 500X, b) 2000X ve c) 5000X büyütmede SEM görüntüleri ve d) kaplama yüzeyinin EDX analizi.....	60
Şekil 5.7.	A2 numunesine ait bölgesel EDX analizleri	61
Şekil 5.8.	A2 numunesinin kaplama yüzeyine ait; a) 500X büyütme SEM görüntüsü ve b) yan kesit SEM görüntüsü	61
Şekil 5.9.	A3 numunesinin kaplama yüzeyine ait; a) 500X, b) 2000X ve c) 5000X büyütmede SEM görüntüleri ve d) kaplama yüzeyinin EDX analizi.....	62
Şekil 5.10.	A3 numunesine ait bölgesel EDX analizleri	62
Şekil 5.11.	A3 numunesinin kaplama yüzeyine ait; a)500X büyütme SEM görüntüsü ve b) yan kesit SEM görüntüsü	63
Şekil 5.12.	B1 numunesinin kaplama yüzeyine ait; a) 500X, b) 2000X ve c) 5000X büyütmede SEM görüntüleri ve d) kaplama yüzeyinin EDX analizi.....	64
Şekil 5.13.	B1 numunesine ait bölgesel EDX analizleri.....	65
Şekil 5.14.	B1 numunesinin kaplama yüzeyine ait; a) 500X büyütme SEM görüntüsü ve b) yan kesit SEM görüntüsü	65
Şekil 5.15.	B2 numunesinin kaplama yüzeyine ait; a)500X, b)2000X ve c)5000X büyütmede SEM görüntüleri ve d) kaplama yüzeyinin EDX analizi.....	66
Şekil 5.16	B2 numunesine ait bölgesel EDX analizleri	66
Şekil 5.17.	B2 numunesinin kaplama yüzeyine ait; a)500X büyütme SEM görüntüsü ve b) yan kesit SEM görüntüsü	67
Şekil 5.18.	B3 numunesinin kaplama yüzeyine ait; a)500X, b)2000X ve c)5000X büyütmede SEM görüntüleri ve d)kaplama yüzeyinin EDX analizi.....	67
Şekil 5.19.	B3 numunesine ait bölgesel EDX analizleri.....	68
Şekil 5.20	B3 numunesinin kaplama yüzeyine ait; a)500X büyütme SEM görüntüsü ve b)yan kesit SEM görüntüsü	68
Şekil 5.21	A serisi numunelerinin kaplama yüzeyine ait; a) A1, 2.00 K.X büyütme SEM görüntüsü b) A1, yan kesit SEM görüntüsü, c) A2, 2.00 K.X büyütme SEM görüntüsü, d) A2, yan kesit SEM görüntüsü, e) A3, 2.00 K.X büyütme SEM görüntüsü ve f)A3, yan kesit SEM görüntüsü.....	70
Şekil 5.22.	B serisi numunelerinin kaplama yüzeyine ait; a) B1, 2.00 K.X büyütme SEM görüntüsü, b) B1, yan kesit SEM görüntüsü, c) B2, 2.00 K.X büyütme SEM görüntüsü, d) B2, yan kesit SEM görüntüsü, e) B3, 2.00 K.X büyütme SEM görüntüsü ve f)B3, yan kesit SEM görüntüsü.....	71
Şekil 5.23.	Numunelere ait XRD analizleri; a) A2 numunesi b) B2 numunesi c) B3 numunesi.....	72
Şekil 5.24.	Al6013 Alüminyum alaşımı, K, A serisi ve B serisi numunelerine ait mikro-sertlik değerleri	73
Şekil 5.25.	Numunelere ait yüzey pürüzlülüğü grafiği	75
Şekil 5.26.	K numunesi aşınma yüzeyi SEM görüntüleri; a)1.00 K.X, b) 500X büyütmede, c) bölgesel EDX analizi ve d) ortalama bölgesel EDX analizi.....	76
Şekil 5.27.	A1 numunesi aşınma yüzeyi SEM görüntüleri; a)1.00 K.X, b) 500X büyütmede, c) bölgesel EDX analizi ve d) ortalama bölgesel EDX analizi.....	77
Şekil 5.28.	A2 numunesi aşınma yüzeyi SEM görüntüleri; a)1.00 K.X, b) 500X büyütmede, c) bölgesel EDX analizi ve d) ortalama bölgesel EDX analizi.....	78
Şekil 5.29.	A3 numunesi aşınma yüzeyi SEM görüntüleri; a)1.00 K.X, b) 500X büyütmede, c) bölgesel EDX analizi ve d) ortalama bölgesel EDX analizi.....	79
Şekil 5.30.	B1 numunesi aşınma yüzeyi SEM görüntüleri; a)1.00 K.X, b) 500X büyütmede, c) bölgesel EDX analizi ve d) ortalama bölgesel EDX analizi.....	82
Şekil 5.31.	B2 numunesi aşınma yüzeyi SEM görüntüleri; a)1.00 K.X, b) 500X büyütmede, c) bölgesel EDX analizi ve d) ortalama bölgesel EDX analizi.....	83
Şekil 5.32.	B3 numunesi aşınma yüzeyi SEM görüntüleri; a)1.00 K.X, b) 500X büyütmede, c) bölgesel EDX analizi ve d) ortalama bölgesel EDX analizi.....	84

Şekil 5.33. Al6013 Alüminyum alaşımı, K ve A serisi numunelerine ait sürtünme katsayısı-zaman grafiği.....	86
Şekil 5.34. Al6013 Alüminyum alaşımı, K ve B serisi numunelerine ait sürtünme katsayısı-zaman grafiği.....	87
Şekil 5.35. A serisi ve B serisi numunelerine ait grafikler; a)A1 ve B1 numunesi sürtünme katsayısı, b) A2 ve B2 numunesi sürtünme katsayısı ve c) A2 ve A3 numunesi sürtünme katsayısı	89
Şekil 5.36. K numunesi A serisi ve B serisi numunelerine ait kütle kaybı grafiği.....	91



TABLULAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Alüminyum alaşımları	18
Tablo 4.1. Genleştirilmiş Perlitin Kimyasal Kompozisyonu (%).....	46
Tablo 4.2. Uçucu külün kimyasal kompozisyonu (%)	47
Tablo 4.3. Al6013 Alüminyum Alaşımının Kimyasal Bileşimi (%)	48
Tablo 4.4. Al6013 Alüminyum Alaşımının Mekanik Özellikleri	48
Tablo 4.5. Numunelere uygulanan kaplamanın içerikleri ve kodları	51
Tablo 4.6. Numunelerden Alınan Yüzey Pürüzlülüğüne Ait Ra, Rz, Rq ve Rt Değerlerinin Ortalaması ..	53
Tablo 4.7. Mikro-sertlik değerleri	54
Tablo 4.8. Numunelerin; aşınma sonrası kütle farkı değerleri	56

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Al6013	: Alüminyum Alaşımı
C	: Karbon
Si	: Silisyum
Ti	: Titanyum
Al	: Alüminyum
Zr	: Zirkonyum
Mg	: Magnezyum
Mn	: Mangan
Na	: Sodyum
Fe	: Demir
Cl	: Klor
F	: Flor
W	: Tungusten
Cu	: Bakır
Zn	: Çinko
Ni	: Nikel
Co	: Kobalt
Mo	: Molibden
μ	: Mikrometre
mg	: Miligram
Fe	: Demir
Cl	: Klor
atm	: Normal Hava Koşullarında <i>Atmosfer</i> Basıncı
T	: Sıcaklık
P	: Basınç
sp^2	: Molekül Hibritleşme Orbitali
L9	: Taguchi Yöntem Dizisi
V_a	: Aşınan Malzemenin Hacmi
k_a	: Kaynak Birleşim Noktalarının Aşınmaya Katılan Kısmı
A_h	: Yüğü Taşıyan Alan
L	: Kayma Mesafesi
DF _n	: Normal Kuvveti
DF _s	: Sürtünme Kuvveti
Fr	: Yuvarlanma Sırasındaki Sürtünme Direnci
Q	: Pürüz Taban Açısını
n	: Minimum Yağ Filmi Kalınlığını
R_a	: Ortalama Pürüzlülüğü
S	: Malzemenin Kesme Gerilmesi,
A_r	: Gerçek Temas Eden Alan
k	: Malzeme ve Yüzey Şartlarına Bağlı Sabit
W	: Yüğü
D	: Silindir veya Kürenin Çapı
n, m	: Deneysel Sabitlerdir

Δm : KütLe Kaybı
mg : Miligram

Kısaltmalar

AISI : Amerikan Demir Ve Çelik Enstitüsü
ASTM : Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
ANN : Yapay Sinir Ağı Tekniğı
ANOVA : Tek Yönlü Varyans Analizi
RGO : İndirgenmiş Grafen Oksit
PAT : Poli (2-Aminotiazol)
WVL : Aşınma Hacmi Kaybı
COF : Sürtünme Katsayısı
GNP : Grafen Nanoplatelet
IN625 : Inconel 625 Kalite Nikel Alaşım
IADS : Uluslararası Alaşım Tanımlama Sistemine
CVD : Kimyasal Buhar Biriktirme
PVD : PVD Fiziksel Buhar Biriktirme
SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD : X Işını Kırınımı
EDX : Enerji Dağıtılmış X-Işını
FTIR : Fourier Dönüşümlü Infrared Spektrofotometre

1. GİRİŞ

Aşınma, malzemelerin yüzeyinde mekanik temas sonucu meydana gelen bir hasar türüdür. Aşınan yüzeyde malzeme kaybı oluşur ve temas sonucu yüzeyde hasar meydana gelir. Aşınma genel olarak iki grupta toplanabilir bunlar; oksidasyon ve mekanik aşınma veya kimyasal bir aşınma gibi olan korozyondur. Aşınma, metal olan ya da metal olmayan malzemelerde temas sonucu rastlanabilir [1].

Aşınma; makine, madencilik, tarım, gibi farklı sektörlerde kullanılan malzemelerin kullanım ömrünü azaltarak büyük bir ölçüde ekonomik kayıpların ortaya çıkmasıyla sonuçlanmaktadır. Aşınmanın incelenmesi ilk kez Mısır ve Sümer uygarlıklarında, sonraları da G. Amontons (1663-1705) ve Leonardo da Vinci (1452-1519) tarafından incelenmiş ve ana prensipleri belirlenmiştir. [2].

Mühendislikle ilgili çalışmalarda aşınma problemlerini gidermek için iki hedef belirlenmiştir. Bu hedeflerden birincisi malzeme yüzeyindeki aşınma direncini arttırmaya çalışmak, ikinci hedef ise malzeme yüzeyinin sürtünme davranışlarını iyileştirmeye çalışmaktır [3].

Aşınma Triboloji biliminin bir konusudur. triboloji; rölatif harekette birbirine sürtünen cisimlerin, sürtünme, yağlama ve aşınma mekanizmalarını ve olaylarını inceleyen bilim dalı olarak tanımlanır [4]. Triboloji kapsamına giren konuların başında, sürtünmenin en aza indirilmesi gelmektedir. Çünkü sürtünme, önemli oranda enerji kaybına yol açar.

ASTM 1997'ye göre triboloji, mühim iki parametresi olan sürtünme ve aşınmayı optimize eder. Bunlara bağlı olarak malzeme seçiminin iyi yapılması ve malzemelerin aşınmaya dayanımının artması ve bunların çeşitli alanlarda uygulanması maliyetin azalması açısından önemli bir rol oynar [5]. Aşınmayı etkileyen tek faktör malzeme seçimi değildir. Keskin'in [6] çalışmasında belirttiği gibi bu faktörler şunlardır; pürüzlülük, sertlik, yüzey işlemleri, yağlama, temas geometrisi, zaman ve çevredir. Bu faktörler dışında aşınmayı azaltıcı bazı çözüm önerileri bulunmuştur. Bu çözüm önerileri karşımıza yüzey mühendisliği yöntemleri olarak çıkmaktadır. Yüzey mühendisliği; malzemenin kullanım özelliklerini arttırmak için bazı yöntemler kullanmıştır. Bu yöntemler; Dönüşüm sertleşmesi yöntemleri, sert dolgu, yüzey eritme yöntemleri, termo kimyasal yöntemler, kaplama ve anodlama yöntemi, eritme yöntemi ve buhar fazı yöntemleridir [7].

Bu çalışmada, Al6013 numunesinin aşınma davranışlarını iyileştirmek için hidrotermal yöntemle "grafen, uçucu kül ve genişletilmiş perlit" içeren solüsyonlarla kaplama yapılmıştır. Kaplama ile hibrit kompozit malzeme elde edilmiştir. Bu kaplamada solüsyonlara eklenen grafen, uçucu kül ve genişletilmiş perlitin numune yüzeyinde koruma sağlayarak, aşınmayı azaltıcı etki oluşturması amaçlanmıştır. Bunun için öncelikle alt malzeme olarak kullanılan Al6013 numunelerinin yüzey temizliği yapılmıştır. Daha sonra farklı oranlardaki grafen, uçucu kül ve ya

genleştirilmiş perlit ile hazırlanan solüsyon hidrotermal cihazda 240°C' de 24 saat de kaplanmıştır. Kaplama işleminden sonra numuneler, 450° C de 1 saat boyunca sinterlenmiştir. Yapılan deneyler sonrası kaplanan numunelere; SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu), EDX (Enerji yayımlı X-ışını Analizi), mikro-sertlik, yüzey pürüzlülüğü ve metal-metal aşınma deneyi yapılarak incelemeler yapılmıştır.

1.1. Literatür Özeti

Bu-Qian Wang, biyokütle yakıtlı bir kazanda iki farklı çeliğin (AISI 1018 düşük karbonlu çelik ve 304 paslanmaz çelik) üzerine termal spreyle kaplama yapmıştır. Bu kaplamanın erozyona karşı davranışlarını incelenmiştir. Biyokütle yakıtlı kazan da; uçucu külün, yüksek konsantrasyonda kimyasal olarak aktif alkali, kükürt, fosfor ve klor içeren bileşimleri nedeni ile nispeten yüksek erozyon davranışı sergilediği bulunmuştur. Malzeme de meydana gelen firenin sebebi erozyonla uyarılmış korozyon ve korozyonla uyarılmış erozyon mekanizmalarının olduğu bulunmuştur. Kaplamaların morfolojisi ve bileşimi ile birlikte uçucu kül parçacıklarının fiziksel ve kimyasal özellikleri kaplamaların erozyon ve korozyona uğramaları ile malzemeden fire verilmesinin ilişkili olduğu bulunmuştur [8].

J.R.Sunil ve arkadaşları uçucu kül - titanyum kompozit kaplama için termal spreyle deneylerin tasarımı kullanılarak proses parametrelerinin optimizasyonuna odaklanmaktadır. Standoff mesafesi, ilerleme hızı ve akım yoğunluğu optimize edilecek proses değişkenleri olarak kabul edilmiş ve bağlanma mukavemeti, gözeneklilik ve sertlik yanıt özellikleri olarak incelenmiştir. Deneysel tasarımı için Taguchi'nin L9 dik dizisi kullanıldı. Önemli proses parametrelerini tanımlamak için varyans analizi yapıldı. Bağ kuvveti için en önemli parametre akım yoğunluğu idi; bunun ardından% 41 oranında durma mesafesi ve toz besleme hızı gelmektedir. Gözeneklilik için; akım yoğunluğu; bunu takiben% 54 ile soğukluk ve toz besleme hızı ve sertlik için toz besleme hızı; % 35'i ile uzaklaşma mesafesi ve akım yoğunluğu takip etmektedir. Doğrulama deneyleri, optimum proses parametrelerinin performansını doğrulamaktadır [9].

Mishra S.C ve arkadaşları, metal yüzeyler üzerinde plazma spreyle kaplama geliştirilmesinde uçucu kül kullanıldığı belirtilmiştir. %5 oranında alüminyum tozlarına sahip uçucu kül ve uçucu kül ile çeşitli çalışma koşullarında paslanmaz çelik ve alüminyum yüzeyler üzerine plazma spreyle yöntemi ile kaplama yapılmıştır. Bunun sonucunda uçucu küle eklenen alüminyum tozu yüzeyde yapışmanın arttığı gözlemlenmiştir [10].

Ajit B. Ve Mishra plazma spreyle yöntemi kullanarak bakır substratlar üzerinde uçucu kül + kuvars + illümenit kompozit kaplamalar geliştirilmiştir. Kompozit kaplamaların kalitesinin, plazma spreyle yönteminin gücü sayesinde önemli ölçüde etkilendiğini bulmuşlardır [11].

T. Shijitha ve arkadaşları yeni bir akımsız yöntem kullanarak uçucu kül parçacıklarının yüzeyini, bakır gibi iletken bir metal ile kaplamaya çalışmıştır. Yeni yüzey duyarlaştırma ve yüzey aktivasyonu kullanılarak uçucu kül olmayan partiküllerin, bakır kaplama mekanizması, uçucu kül partiküllerinin yüzey morfolojisi, yüzey kimyası ve yüzey yapısındaki değişiklikler kullanılarak sistematik olarak incelenmiştir. Yeni akımsız yöntemin, uçucu partiküllerin titanyum fotokatalisti ile sol-jel ile kaplandığını ortaya çıkarmıştır. Yeni katalizör sistemi kullanılarak uçucu kül partiküllerinin yüzey duyarlaştırma ve yüzey aktivasyonu için önerilen mekanizma, geleneksel katalizör sistemi kullanan yöntem ile karşılaştırılmıştır. Kaplama başarı ile yapılmıştır [12].

Kumud Deshmukh ve arkadaşları, yumuşak çelik plakalar üzerinde kaplama malzemesi olarak uçucu kül bazlı jeopolimer malzemenin beş farklı bileşimi üzerinde çalışmıştır. Kaplanmış yumuşak çelik plakalar; yapışma mukavemeti, ısı direnci, yangın direnci, su emme ve korozyon direnci özellikleri açısından test edilmiştir. Geliştirilen kaplama malzemesi bileşimlerinde bulunan çeşitli fonksiyonel grupların mineralojisi, morfolojisi ve titreşimleri, sırasıyla XRD, SEM ve FTIR analizleri ile değerlendirilmiştir. Geliştirilen kaplama malzemesi, iyi bir ısı direnci, korozyon direnci ve mekanik özelliklere sahip olduğu bulunmuştur. Sonuçlar, kaplama malzemesi bileşimlerinin 500 ° C sıcaklığa kadar kararlı olduğunu göstermiştir. Elektrokimyasal ölçümler, kaplanan malzemenin korozyona karşı güçlü olduğunu göstermiştir. SEM görüntüleri kaplama malzemesinin (jeopolimer) ve substratın (yumuşak çelik) güçlü bağlandığını göstermiştir [13].

R. Escelera-Lozano ve arkadaşları SiCp, uçucu kül (FA) ve geri dönüştürülmüş alüminyum ile üretilen Al / SiCp / spinel kompozitlerin korozyon özellikleri deneysel olarak incelemiştir. Sıvı alüminyumun SiC, uçucu külde bulunan SiO₂ varlığı ile Al₄C₃ fazının oluşması engellenmiştir. Kalsine uçucu kül kullanılarak kompozitlerin kimyasal bozunması önlenmiştir. Bu nedenle Mg₂Si oluşumunun kontrolü (agresif) yoğun meydana gelen korozyonu önlemek için kritik bir parametre haline gelmiştir [14].

Soorya Prakash K. ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, sabit miktarda uçucu kül (% 10) ve farklı oranlarda grafit (% 2,% 4 ve% 6) ile güçlendirilerek iki aşamalı birleştirme yöntemi ile metal matrisli hibrit kompozit malzeme imal edilip karakterizasyonu incelenmiştir. Morfolojik analiz sonucunda Al7075 matrisde uçucu kül ve grafit homojen olarak dağılmıştır. Sertlik ve gerilme mukavemeti, grafit ilavesi ve uçucu kül ilavesiyle ters orantılı şekilde artış göstermiştir. Uçucu kül ilavesi ile aşınma direnci önemli ölçüde artmıştır. Ayrıca grafitin kendinden yağlamalı özelliğinden dolayı aşınma oranı daha da düşmüştür. Geliştirilen hibrit kompozitin işlenebilirlik (tornalama) karakteristikleri, Yapay sinir ağı (ANN) tekniği ile parametreler ayrıntılı olarak incelenmiştir ve optimize edilmiştir. ANOVA (tek yönlü varyans analizi) sonuçlarına dayanarak, kesme hızı ve farklı oranlarda eklenen grafit ilavesi ile kompozitin yüzey pürüzlülüğünün en aza indiği bulunmuştur [15].

Hatem Akbulut ve arkadaşları iki farklı WC ve grafen takviyesinin, bakır matrisinde yapısal ve tribolojik özellikler hakkında araştırma yapmıştır. Cu / WC, Cu / grafen ve hibrit Cu / WC / grafen nanokompozitlerin, hem elektriksel hem de tribolojik davranışları iyileştirilmeye çalışılmıştır. WC ve grafen takviyeli nanokompozitlerin; Al₂O₃ bilyesine karşı, sürtünme ve aşınma davranışları, kuru kayma aşınma koşulları altında incelenmiştir. Tribolojik test sonuçları, az miktarda grafen ilavesinin, mükemmel katı yağlama etkisi nedeniyle hibrid bakır matrisli nanokompozitlerinin aşınma önleyici özelliklerini büyük ölçüde geliştirebildiğini ortaya koymuştur. Aşınma mekanizması araştırması, WC ve grafenin birlikte yüzeyde biriktirilmesi, Cu matrisinin aşınma mekanizmalarının değişmesine neden olmuştur [16].

Shuai Zhang ve arkadaşları grafen oksit / ZnS (RGO / ZnS) hidrotermal yöntemle sentezlenen hibrit kompozitlerin tribolojik özelliklerini geliştirmek istemişlerdir. Hibrit kompozitlerin fiziksel karakterizasyonu, ZnS nanoparçacıklarının RGO nanosheets ile iyi bir şekilde birleştiğini göstermiştir. Epoksi kaplamalı ZnS, RGO ve RGO / ZnS' nin tribolojik özellikleri sistematik olarak araştırılmıştır. Tribolojik çalışmanın sonuçları karşılaştırılmıştır; RGO / ZnS hibrit kompozitin, ZnS veya RGO kompozitlerinden daha düşük sürtünme katsayısı ve daha yüksek aşınma direncine sahip olduğu bulunmuştur. Aşınma test sonuçlarına ek olarak, RGO / ZnS hibrit kompozitlerine uygulanan yük artmasına rağmen iyi bir stabilite göstermiştir [17].

Shihui Qiu ve arkadaşları yapmış olduğu çalışmada; aralarında π - π etkileşimi ve bazal düzlem kusurları olan poli (2-aminotiazol) (PAT) ile fonksiyonelleştirilmiş birkaç katman grafen elde edilmiştir. Grafen bazlı kaplamanın aşınması sürtünme testi ile incelenmiştir. Grafen içeren hibrit kompozit kaplama, grafen ve poli (2-aminotiazol)'un pasif etkisi ile mükemmel korozyon önleme performansı sergilemiştir. Sonuç olarak optimize edilmiş PAT-G_{0.5%} örneği, 80 günlük daldırma sırasında üstün bir bariyer özelliği ve en düşük aşınma oranını göstermiştir. PAT ile fonksiyonelleştirilmiş grafen bazlı kaplamanın aşınma oranının azalması, sürtünme testi ile araştırılmıştır. Geliştirdikleri grafen bazlı çok işlevli kompozit kaplamaların, sadece korozyon veya aşınma azaltma alanında değil, aynı zamanda elektromanyetik girişim koruması, antistatik ve antimikrobiyal kaplamalar gibi diğer alanlarda da potansiyel uygulamaları olabileceğini göstermiştir [18].

Zhang ve Liang (2017) çalışmalarında, grafen nano tabaka katkılı titanyum matrisli kompozitler toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiştir. Üretimde sinterleme esnasında farklı olarak vakum ark ergitme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin kompozit numune üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Saf titanyum sertlik değeri (150 HV), ağı. %0.3 grafen nano tabaka katkılı kompozit sertlik değeri (197 HV) ile karşılaştırıldığında artış görülmektedir [19].

Pradeep Sambyal ve arkadaşları, poli (anilin-ko-o-toluidin)/uçucu kül bileşiğinin ileri korozyon koruma özellikleri incelenmiştir. Kopolimer kompozit kaplamalar, epoksi reçine içine yerleştirilerek geliştirilmiştir. Kaplamalar FTIR, XRD, TGA ve SEM teknikleri ile karakterize

edilmiştir. Ağırlıkça %3.5 NaCl içerisinde yapılan elektrokimyasal karakterizasyonlar, kopolimer kompozitlerle epoksi kaplamaların korozyon direncinde kayda değer bir gelişme göstermiştir. Kaplama için; bileşimin epoksi toz kaplama formülasyonu: reçine {epoksi (bisfenol A + polyester) (ağırlıkça% 70), akış ajanı (D-88, ağırlıkça% 2.3), gaz giderici ajan (benzoin, ağırlıkça% 0.7), ve kaplama amacıyla dolgu maddeleri (TiO₂ ve BaSO₄, ağırlıkça% 27)} kullanılmıştır. Harmanlanmış toz kaplama formülasyonu, alt tabakaya (topraklanmış) göre 67.4 kV potansiyelinde tutulan bir elektrostatik püskürtme tabancası kullanılarak yumuşak çelik numuneler üzerine uygulandı. Uçucu kül ağırlıkça % 1, 2, 3 ve 4 olarak takviye edilmiştir. Toz kaplı yumuşak çelik numuneler bir fırında 150° C'de kürlendi. Epoksi kaplamalarda bulunan kopolimer kompozitin pasivasyon davranışı incelenmiştir. Kaplanmış yüzeylerin korozyon sonuçları ve SEM mikrografları, poli (anilin-co-o-toluidin) / uçucu kül içeren kompozitin pasifleşme etkisi açıkça gösterilmiştir. Bu da korozyon akım yoğunluğunun azalmasına neden olmuştur. Tuz püskürtme testi sonuçları, hızlandırılmış test koşulları altında kopolimer kompozitin üstün korozyon direnci ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak poli (anilin-ko-o-toluidin)/uçucu kül kompozit içeren epoksi kaplamaların, toz kaplama tekniği kullanılarak yumuşak çelik substrat üzerinde başarıyla kaplanmıştır. Kopolimer kompozit kaplamaların, homojen yapıda olduğu gözlemlenmiştir [20].

P. Vijaya Kumar Raju ve arkadaşları metal matrisli kompozit, Cu tozunun (ortalama partikül büyüklüğü 105µm) Al-ağırlıkça% 5 Cu hazırlanıp ve alaşımında dağıtılması işlemi ile karıştırarak üretmişlerdir. Metal matris kompozitlerin aşınma ve sürtünme özellikleri, bir disk üzerine pim aşınma test cihazı kullanılmıştır ve kuru kayma aşınma testi yapılarak aşınma davranışları incelenmiştir. Deneyler, Taguchi'nin tekniğiyle oluşturulan plana dayanarak gerçekleştirilmiştir. Verilerin analizi için bir L9 ortogonal dizi seçilmiştir. Her yanıt için regresyon denklemi, MiniTab-17 kullanılarak hem alaşımlar hem de kompozit için geliştirilmiştir. Aşınma örneklerinin SEM ve EDAX analizi de morfoloji değişiklikleri açısından incelenmiştir. Çalışmanın amacı, alüminyum bakır alaşım matrisinde takviye olarak fabrikasyon alüminyum bakır alaşımlarının ve bakır tozu parçacıklarının kuru kayma aşınma davranışını incelemektir. Aşınma oranı ve sürtünme katsayısı, farklı kayma hızları ve kayma mesafeleri ile 10N, 20N ve 30N olarak uygulanan yükler dikkate alınarak belirlenmiştir. Aşınma hacmi kaybı (WVL) ve sürtünme katsayısı (COF) için matematiksel model, test parametreleri için lineer regresyon ile kontrol parametreleri açısından geliştirilmiştir. Sonuç olarak kompozitin sertliği her iki alaşım ile karşılaştırıldığında yüksektir. Kayma mesafesi ve uygulanan yük, hem alaşımlar hem de kompozit için aşınma oranı üzerinde en yüksek etkiye sahip olduğunu tahmin etmişlerdir. Benzer şekilde, uygulanan yük hem alaşımlar hem de kompozit malzeme için sürtünme katsayısını büyük ölçüde etkileyen bir parametre olduğu bulunmuştur [21].

Vikram Kumar ve arkadaşları, farklı sert ara katmanlar (elmas benzeri karbon, tungsten karbür ve titanyum alüminyum nitrür) D2 çeliğinde biriktirme işlemi yapmışlardır. D2 çeliğine sert DLC, WC ve TiAlN kaplamaları uygulanmıştır ve sürtünme ve aşınma katsayıları 10 N ve 15 N

normal yüklerde ve 0.063 m / s doğrusal kayma hızında kuru ve yağlanmış ara yüzey koşulları altında değerlendirilmiştir. Karşı yüzey, 4 mm' lik çelik bir bilye olarak seçilmiştir. Tüm çift kaplamaların aşınma ömrü 2 x 10⁵ devirden fazla olduğu görülmüştür. Sonuç olarak 10 N yükteki tüm çift kaplamalar arasında, DLC ara katmanı ile çift kaplamanın sürtünme katsayısı (COF) en düşük (0.09) olarak belirlenmiştir. Yağlanmış durumda TiAlN için ara katman (0.07) olarak en düşük seviyede olduğu görülmüştür. Kuru ortamda DLC ara katmanı veya bilye karşı yüzü üzerinde, 2 × 10⁵ kayma çevriminden sonra, çift kaplamada aşınma veya ihmal edilebilir aşınma söz konusu değildir. Ancak 10 N ve 15 N normal yüklerde baz yağla yağlanan koşulda bilye karşı yüzeyinde küçük çizikler görülmüştür [22].

Pingshun Deng ve arkadaşları grafen nanoplateletler (GNP'ler) üzerine, akımsız saf nikel kaplamanın yenilikçi ve basitleştirilmiş bir yöntemi kaplama yapmıştır. Nikel kaplı grafen nanoplateletler (NiGNP'ler), bilyalı öğütme yoluyla 1: 9 oranında Inconel 625 (IN625) tozunda eşit olarak dağıtılmıştır. NiGNP'lerin varlığı, çökmüş faz morfolojisi, enine kesit boyunca mikro sertlik ve aşınma direnci oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklar altında incelenmiştir. Sonuçlar, GSMH'lerin EDS alan taraması ve Raman spektrumları ile kaplamalı kaplamaya başarıyla kaplandığını kanıtlamıştır. Kaplamaların dendritik mikroyapısı, mikro sertlik ve aşınma direnci sistematik olarak araştırılmıştır. GSMH'ler lazerle kaplama işlemi sırasında erimiş havuzda kalabilir ve açık ve kaynaklı GSMH olarak tanımlanabilmiştir. IN625-10NiGNP'lerin kompozit kaplamasının aşınma direnci, hem oda hem de yüksek sıcaklıklarda daha az sürtünme katsayısı ve aşınma oranı olduğu görülmüştür. Aşınma sonrasında, aşındırıcı yüzey üzerinde kırışık, kiremitli ve haddelenmiş GSMH'ler de bulunmuştur [23].

Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasında, Al6013 Alüminyum alaşımının yüzeyi, Hidrotermal yöntem kullanılarak grafen/uçucu kül-genleştirilmiş perlit kaplanması hedeflenmiştir. İlk olarak Al6013 Alüminyum alaşımının yüzeyi, 600, 800, 1000 ve 1200 numaralı zımpara kağıtlarıyla düzeltilip son olarak kaplama kalitesini arttırabilmek için 240 numaralı zımpara kağıdı ile zımparalanmıştır. Yüzey temizliğinin son aşamasında ise yüzeydeki istenmeyen kalıntıları gidermek için saf su ile yıkayıp, etil alkol ile silinerek kaplamaya hazır hale getirilmiştir. Numuneler için hazırlanan farklı kombinasyonlarda ki solüsyonlarla Hidrotermal kaplama yapılmıştır. Elde edilen kompozit kaplamalar daha sonra 450° C' de 1 saat boyunca ısıl işleme tabi tutulmuştur. Uçucu kül yerine alternatif olarak genleştirilmiş perlitin, takviye miktarlarının kaplamada ve aşınma direncinde ne gibi değişiklikler yapacağı, bu tezde tartışılması hedeflenmektedir.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit, iki veya daha fazla birbirinden farklı materyalden imal edilen malzeme anlamına gelmektedir [24, 25]. Kompozit malzemeyi meydana getiren materyaller genellikle özelliklerini korumaktadırlar [25]. Kompozit malzemeler iki bileşenden meydana gelmektedir bunlar; matris ve takviye elemanıdır [26]. Kompozit malzemeler genel olarak düşük dayanımlı metalik matris malzemesi ya da reçineden oluşan bir yapıyı dayanıklı hale getirmek amacıyla ilave edilen takviye elemanından oluşur. Bu şekilde imal edilen kompozit malzemedeki amaç ana materyal olan matris malzemesinin bütün halinin korumasıdır. Takviye elemanının, ana matrise tutunarak yapının mukavemetini ve yük taşıma kapasitesini arttırması gerekmektedir [27].

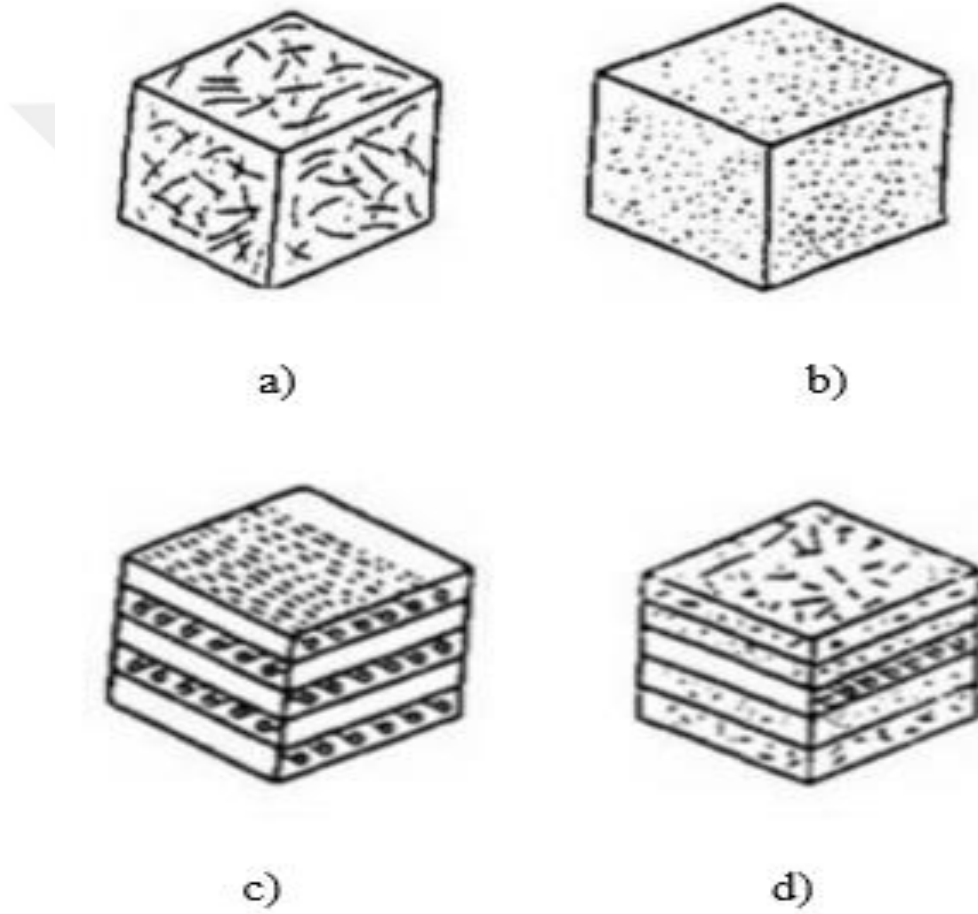
Moleküler ve atomal düzeyde bir araya gelen malzemeler ya da alaşım malzemeler mikroskopik olarak incelendiğinde homojen bir yapı sergiledikleri için bu malzemeler kompozit denilmemektedir. Böyle bir malzemeye örnek, çelik üretiminde vanadyum ve kromla karışım oluşturulur ve homojen şekilde bir karışım meydana geldiğinden kompozit malzeme olarak değil de alaşım olarak adlandırılır [27]. Kompozit malzemeler, kendisine benzer olan malzemelerden farklıdır ve avantajları vardır.

Kompozit malzemelerin avantajları; farklı birçok malzemeye göre dayanıklı ve hafiftir. Karmaşık yapılu ürün imal etmek daha kolaydır çünkü kalıplara yerleştirilmeleri oldukça kolaydır. Ayrıca kalıplama tekniği ile imal edilen kompozit malzemeler, üretim esnasında kalıbın farklı kısımların da farklı işlemler uygulanabilir. Böylelikle farklı işlemler uygulanan noktalarda sertlik, dayanım, iletim gibi değişiklik yapabilmeye avantajı vardır. Birbirine uygun malzemeler kullanılarak uygun şartlarda elektrikli iletim ve yalıtımda üstün özellikler sergileyebilmektedirler. Kırılmaya dayanıklı oluşu ve süneklik gibi özellikleri bir arada bulundurduğundan ani gelişen şokları daha kolay karşılayabildiği gibi çatlak ilerlemesi de diğer malzemelere göre yavaş ve az görülmektedir. Kimyasal maddelere karşı dayanıklı oluşları ile malzemenin korozyona karşı dayanıklı olmasını sağlamaktadırlar [27].

Kompozit malzemelerin avantajları olduğu gibi dezavantajları da söz konusudur. Kompozit malzemeler yapısı bakımından 2 veya daha fazla materyalin kimyasal bir çözünme olmaksızın bir araya gelmesinden yapılar arasında hava boşlukları gibi boşluklar oluşmaktadır. Bu küçük boşluklar kompozit malzemenin yapısını mekanik anlamda olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca farklı farklı malzemelerin bir araya gelmesi ile ısı genleşme sonucu malzemedeki kompozitler farklı değerler gösterebilir. Böylelikle sıcaklık değişimi gibi bir durumda iç hasar meydana gelerek kompozit malzemenin yapısını bozabilmektedir. Bahsedilen avantaj ve dezavantajlara eklemeler yapılabilir yeni imal edilen kompozit malzemeler ile gün geçtikçe sayı artacaktır [27].

Kompozit malzemeleri matris elemanına göre ve takviye elemanlarına göre ve birçok farklı şekilde sınıflandırma yapılabilmektedir. Kompozit malzemeleri takviye elemanlarına göre sınıflandırmak şu şekilde mümkündür ve Şekil 2.1.'de gösterilmiştir.

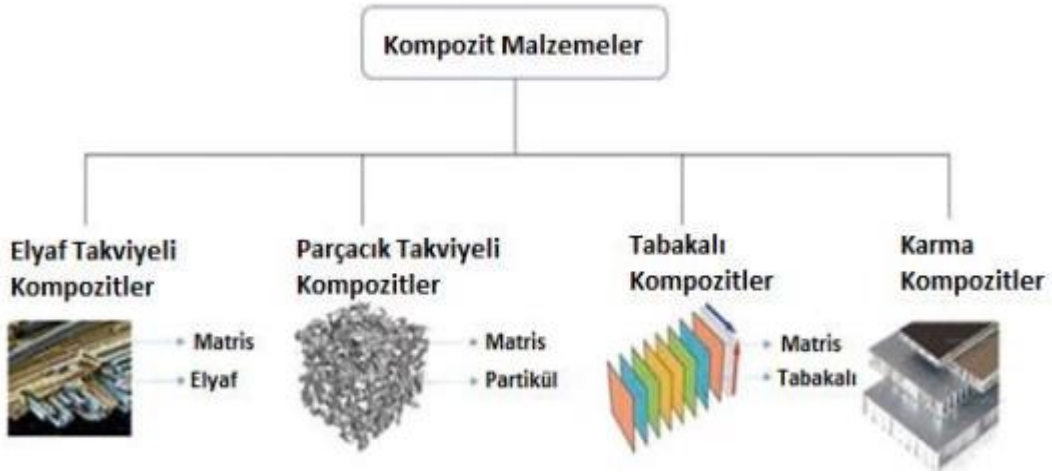
- Karma (hibrit) kompozitler
- Elyaf takviyeli kompozitler
- Parçacık takviyeli kompozitler
- Tabakalı kompozitler



Şekil 2.1. Kompozitlerin takviye elemanına göre sınıflandırılması; a) elyaf takviyeli kompozit, b) parçacık takviyeli kompozit, c) tabakalı kompozit ve d) karma (hibrit) kompozit

2.1. Takviye Elemanına Göre Kompozitler

Takviye elemanlarına göre kompozitlerin sınıflandırılması Şekil 2.2' de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması [28]

2.1.1. Elyaf Takviyeli Kompozitler

Takviye malzemesi elyaftan olan kompozit malzemeler, sünek bir matrisde, elastik modülü yüksek ve mukavemeti iyi olan bir malzemenin ilavesi ile elde edilir. Elyaf takviyeli kompozitlerin yük taşıyabilme yetenekleri oldukça yüksektir. Takviye edilen elyaf malzemeler dokuma kumaş, uzun kesilmiş elyaf veya farklı biçimlerde kesilerek elde edilen şekilleri olabilir. Bu malzeme çeşidinde en fazla takviye edilen elyaf türü camdır [25, 30]. Elyaf malzemenin mukavemeti imal edilen kompozit için büyük önem taşımaktadır. Bu durumda elyaf yapının mukavemetinin iyi olması ise kullanılan elyafın hatasız olması gerekmektedir [29]. Örneğin uzun elyafların matris içerisine paralel yerleştirilmesi elyaf doğrultusunda mukavemeti artırırken elyafa dik doğrultuda düşük mukavemet sağlanır. İki boyutlu yerleştirilmiş takviyelerde iki yönde de eşit mukavemet sağlanır ve kısa elyafların matris içine homojen dağılımı ile de izotrop bir yapı meydana getirmektedir. Elyafalarda uzunluk/çap oranları da kompozitin özelliklerini etkiler. Zira bu oran arttıkça matrisin takviyeye ilettiği yük miktarı artış gösterir [31].

2.1.2. Parçacık Takviyeli Kompozitler

Matris malzemesi içinde başka bir malzemenin parçacıklar şeklinde bulunan yapıya parçacık takviyeli kompozit malzeme denilir [29]. Parçacık takviyeli kompozit malzemelerde, malzemenin performansını etkileyen birçok etken vardır. Performansı etkileyen etkenler; hacimsel oran, takviye edilen malzemenin homojen dağılıp dağılmadığı, yüzey enerjileri gibidir. Ayrıca takviye edilen parçacıkların küresel, kübik veya farklı geometrilerde oluşu da kompozit malzeme için önem taşımaktadır. Takviye edilen parçacıklar genel olarak sertlik değerlerinde artış gösterirken, kompozit malzemenin dayanımını artırma konusunda pek etkili değildir. Bu tip kompozit malzemeler, düşük maliyet ve gösterdiği yüksek performanstan ötürü öne çıkmaktadır [25].

2.1.3. Tabakalı Kompozitler

Tabakalı kompozitler, bilinen en eski ve en çok kullanıma sahip kompozit çeşididir. Tabakalara yerleştirilen elyafların farklı yönlenmeleri ile çok yüksek mukavemet sağlanabilmektedir. Metal malzemelere göre tabakalı kompozitler ısıya ve neme karşı dayanıklı oluşu ile bilinmektedirler. Ayrıca metal malzemeler tercih edilme sebeplerinden bir diğeri ise hafifliğine rağmen yüksek mukavemet sağlamalarıdır [29, 25]. Ayrıca, uçak yapılarında yaygın bir kullanım alanı olan sandviç yapılar da tabakalı kompozit malzemeye örnektir. Sandviç yapıların elde edilmesi, yük taşımayarak sadece izolasyon özelliğine sahip olan düşük yoğunluklu bir çekirdek malzemenin alt ve üst yüzeylerine mukavemetli levhaların yapıştırılmasıyla olmaktadır [32].

2.1.4. Hibrit (Karma) Kompozitler

Hibrit malzemeler, iki veya daha fazla farklı takviye elemanının bir araya gelmesiyle edilen malzemelerdir. İlk komponentlerinin yapılarından farklı spesifik yapılara sahiptirler. Ancak çoğu zaman onların bazı motiflerini ve fonksiyonlarından oluşurlar [33].

Temel komponenti organikse (polimer, v.s.) hibrit kompozit 'inorganik-organik', temel komponentin inorganik olduğu hale 'organik-inorganik hibrit denir (kompleks metal iskeletli yapılar, klay bazlı modifiye malzemeler, v.s.). Bazı özel durumlarda dağıtılmış fazlar içeren malzemeler de (kompozitler, nanokompozitler gibi) hibrit olarak düşünülür. Örneğin, nanopartiküller veya nanoteller bir polimer matriste dağıtıldığında elde edilen kompozit, komponentler arasındaki kimyasal etkileşimlerle karakterize edilebildiğinde, bir hibrit malzeme sınıfına dahil olur. Bu tanımlama metal kompleksler gibi pek çok supramoleküler bileşiği de kapsar. Fakat bunlar genellikle ayrı bir malzeme sınıfı olarak kabul edilir. Bazen kimyasal modifiye yüzeyli nanopartiküllere de hibrit malzeme denilebilmektedir [33].

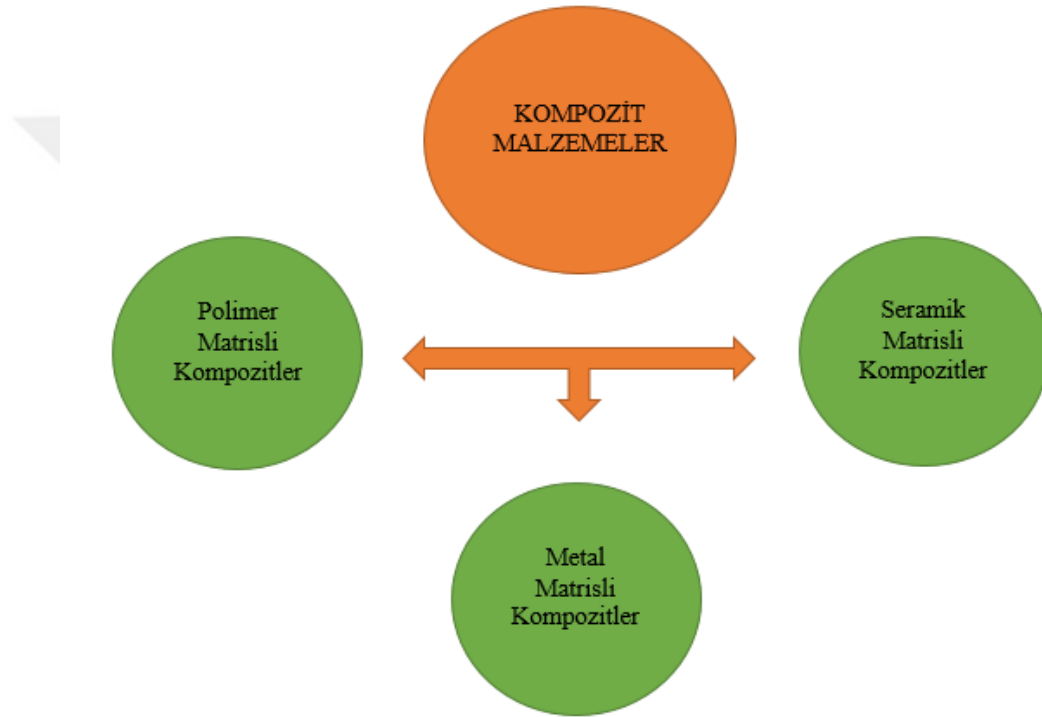
Hibrit malzemelerin üretiminde, uygulanan metotlar arasında interkalasyon, templat sentez, sol-jel proses ve hidrotermal sentezler yer alabilir. Doğal yapılı kompozitlerde inorganik partiküllerin boyutu birkaç mikrondan birkaç milimetreye kadardır. Dolayısıyla malzeme (bazen gözle de görülebilecek seviyede) düzensiz bir yapıdadır. Böyle bir malzemede inorganik partiküllerin boyutu, malzemedeki organik kısmın moleküllerin boyutuna kadar küçültüldüğünde (birkaç nanometre) kompozitin homojenliği yükselir. Hatta bazen yepyeni özellikler kazandığı görülür. Bu tür kompozitlere hibrit nanomalzemeler denir [33].

Çizilmeye ve yüksek mekanik kuvvet, sıyrılmaya karşı dirençli hibrit malzemelere dayanan çeşitli kaplamalar bu kompozit malzemede yapılabilir. Hibritler, içerdiği inorganik komponentleriyle yeterli mekanik kuvvete ve organik molekülleri ile de iyi biyouyumlulukları nedeniyle eskiden beri tıpta protez yapımında kullanılır. Hibrit malzemeler katı elektrolitler, çeşitli

organik molekülerin iyon ve elektron-iletkenlik özelliklerini, inorganik matrislerinin dayanıklılıkları ve ısıya dirençleriyle birleştirerek bir arada kullanım sağlar [33].

2.2. Matris Elemanına Göre Kompozitler

Kompozit malzemeler içeriklerine göre ya da özelliklerine göre birçok sınıflandırma yapılabilmektedir. Bu sınıflandırmadan birisi matris malzemesine bağlı olarak sınıflandırılması Şekil 2.3.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Kompozit malzemelerin matris elemanına göre sınıflandırılması

2.2.1. Polimer Matrisli Kompozitler

Kompozit kelimesi genel olarak; iki veya daha fazla farklı parçadan imal edilmiş anlamındadır [24]. Fazlardan en az birinin (örneğin matris fazı) polimer olması durumunda sistem polimer kompoziti adını almaktadır. Yapılarında farklı özelliklere sahip çeşitli malzemeler bulundurabilen kompozit malzemelerin sınıflandırılmasında kesin sınırlar çizmek mümkün olmamakla birlikte, yapıdaki malzemelerin biçimlerine göre görülen sınıflandırmanın yapılması mümkündür.

Matris, sürekli faz durumunda olup farklı maddeleri içerisinde bulunduran ve bunları bir arada tutan ortam görevi yapan (polimerik) malzemedir. Matrisin özellikleri: kuvvetleri takviye

malzemesine iletir, dolgu ve takviye malzemesini dış etkilere korur, kompozit içerisindeki elyaf kopması gibi hasarların etkilerinin yerel olarak kalmasını sağlar [34].

Polimer matrisli malzemeler, kimyasal bağ ile bağlanan çok sayıda benzer ya da farklı atomik grupların bir araya gelerek meydana getirdiği uzun molekül zincirine sahip malzemelerdir. Bu malzemelerin korozyona uğramamaları, şekil verilebilmelerinin kolay olması, şeffaf olması, kolayca imal edilebilmesi ve ayrıca da hafifliği ile tercih sebebidir [35].

Polimerlerin mekanik özellikleri yapı malzemeleri olarak kullanmak için yeterli değildir ve üretilen kompozitler polimerlerin kolay üretimi ile geliştirilmiş özellikleri avantajlarını bir arada sunmaktadır. Polimer malzemelerin üretimi yüksek sıcaklık ve basınç ihtiyacı olmadan yapılabilir ve karmaşık şekilli parçaların üretimi kolaydır [36]. Ayrıca düşük sıcaklık sayesinde takviye elemanlarında herhangi bir bozunma oluşmaz. Polimer matrisli kompozit parçaların üretimi çeşitli yöntemlerle yapılabilmektedir. Üretilen parçanın kalitesine, istenilen özelliklere, miktarına ve maliyetine göre uygun yöntem seçilebilir. Sıklıkla kullanılan açık kalıplama yöntemleri; elle yatırma (kontakt kalıplama) yöntemi, püskürtme yöntemi, otoklav ile kalıplama yöntemi, elyaf sarma yöntemi ve Kapalı kalıplama yöntemleri ise; reçine transfer kalıplama yönteminden oluşmaktadır [37,38].

2.2.2. Seramik Matrisli Kompozitler

Metal olmayan malzemelerden meydana gelen seramikler, inorganik bileşiklerin bir araya gelmesinden oluşmaktadır. Seramik malzemeler, doğada dışarıdan bir etki ile parçalanarak elde edilen kaolen, kil gibi maddelerin yüksek sıcaklıkta pişirilmesi ile elde edilen malzemelerdir. Seramik malzeme içeriği, alüminatlar, metal oksit ve silikatlardan oluşmaktadır [39, 40]. Seramik malzemeler, yüksek sıcaklığa dayanıklı olması nedeni ile tercih edilme sebebidir. Seramik malzemeler sert ve kırılabilir bir yapıda oldukları için kopma uzaması ve tokluğu oldukça düşüktür. Yüksek elastiklik modülü, düşük yoğunluk gibi özelliklere sahiptir. Bunun yanında dezavantaj olarak termal şoklara karşı dayanıksız malzemelerdir [41].

Seramik matrisli kompozitler; seramik malzemelerin sahip olmadığı bazı özelliklerin geliştirilmesi için bir veya daha fazla farklı seramik fazın bir diğerine eklendiği kompozit malzeme grubundadır. Seramik matris kompozitlerin geliştirilme amacı kırılabilir olan geleneksel seramiklerin dayanıklılığını arttırmaya çalışmaktır [39, 40].

2.2.3. Metal Matrisli Kompozitler

Metal malzemeler ve onlardan elde edilen alaşımları, çoğunlukla polikristal yapıda ve inorganik olan maddelerden meydana gelmektedir. Doğada genel olarak oksitli bileşikler, kükürtlü bileşikler ya da karbonatlı bileşikler halinde bulunmalarının yanında homojen bir yapıya sahiptirler.

Kompozit malzemelerin, ana yapısı metal veya metal alaşımı olan çeşidine metal matrisli kompozit adı verilmektedir [39, 40].

Metal matris olarak kullanılan; Al, Ti, Fe, Ni, Cu, Co, Mo ve Mg metalleri ve bunlardan elde edilen alaşımları örnek verilebilmektedir. Metal matrisli kompozit malzemelerde, matris olarak kullanılan malzemenin mühim olan fonksiyonu, kompozit malzemeye gelen yükü homojen olarak takviye elemanına iletmeğdir. Genellikle takviye elemanı olarak ise organik maddeler veya seramik malzemeler kullanılmaktadır [40, 42].

Metal alaşımı olan malzemelerin kendine ait performansını arttıran özellikleri vardır ve böylece seramik malzemelerle veya sert metal parçacıkları ile dayanıklı metal matrisli kompozit malzemelerin yüksek oranda gösterdiği performansından ötürü gün geçtikçe popülerite kazandırmıştır. Bu gibi kompozit malzemelerin kullanım yerine göre sağladığı bazı avantajlar söz konusudur. Sağlanan avantajlardan bazıları şunlardır; “yüksek mukavemet/yoğunluk oranı, yüksek sertlik/yoğunluk oranları, daha yüksek mukavemet, termal genişleme katsayıları, daha iyi yorulma direnci ve daha iyi aşınma dayanımı”dır [43].

2.3. Kompozit Yüzey Kaplama Yöntemleri

Malzemelerin yüzey özelliklerini geliştirme işlemine kaplama denilmektedir, görülen ve beklenen her türlü koşullara dayanıklı özelliklerin geliştirilmesi imal edilen bir iş parçasının dış yüzeyi için önemli bir rol oynamaktadır. Malzemelerin dış yüzeylerinin olumsuz etkilerini ve etkileşimlerini ortadan kaldırmak için bilinçli ve kontrollü olarak yapılan dış yüzeyindeki fiziksel ve kimyasal değişim de denilebilmektedir. Yüzey kaplamanın amacı, malzemeyi aşınmaya dayanıklı bir duruma getirmek, mukavemet sağlamak, sertliğini arttırmak kısaca mekanik özelliklerini iyileştirmeye çalışmaktır. Kaplama işlemi bazen de dış görünüşünde farklılık yaratmak için dekoratif amaçlı olarak da kullanılabilir. Malzeme üzerinde uygulanma biçimine göre kaplama yönteminde de farklılıklar söz konusudur. Son zamanlarda yoğun bir şekilde metalik kaplamalar kullanılmaktadır. Yüzeyde bariyer oluşturma veya başka bir deyişle yüzeyi koruma amaçlı ergitme ya da difüzyon esaslı kaplama yöntemleri kullanılmaktadır. Kaplama yapısının farklılığını, uygulanan yöntemin maliyeti ve uygulanış kolaylıkları gibi yapılacak kaplamanın amacı, uygulanan malzemenin cinsi, kaplama kalınlığının ölçüsü gibi birçok sebep ortaya koymaktadır [44].

Kaplanacak yüzeylerin, kaplama işlemine geçilmeden önce temizlenmesi ve kaplamaya hazır hale getirilmesi gerekmektedir. Bu işlemler mekanik ve kimyasal yöntemlerle yapılır. Mekanik işlemler, kumlama, aşındırma, tel fırça ile fırçalamayı kapsarken; kimyasal işlemler ise solvent yardımıyla, alkaliler ve asitler ile temizlemeyi kapsamaktadır [45].

2.3.1. Hidrotermal Yöntem

Jeokimyanın gelişimiyle birlikte adından da anlaşılacağı üzere sulu çözeltilerin kullanıldığı hidrotermal yöntem gelişmeye başlamıştır. İngiliz jeolog Sir Roderick Murchison (1792-1871) yer kabuğundaki çeşitli kaya ve minerallerin doğal oluşumu sırasında yüksek sıcaklık ve basınçta suyun hareketini anlamak için gözlem yapan ilk kişidir. Bu gözlemler sonucunda, suyun varlığında yüksek sıcaklık ve basınç koşulları altında, farklı aşamalarda oluşan minerallerin çoğunun hidrotermal kaynaklı olduğunu söylemiştir [46].

Hidrotermal sentez yöntemini ifade etmek için çeşitli literatür çalışmalarında farklı tanımlara yer verilmiştir. Laudise'e göre ortam veya ortam şartlarında sulu çözeltilerden büyüme olarak görüldüğü için hidrotermal büyüme olarak adlandırılmıştır [47]. Lobachev'e göre kristalleşmenin, sulu çözeltilerde aşırı ısıtılmış ve yüksek basınçlara ulaşılarak gerçekleştirildiği bir yöntemdir [48]. Byrappa'nın yaptığı tanımlama da hidrotermal yöntem, sulu bir ortamda oda sıcaklığından yüksek bir sıcaklık ve 1 atm'den daha büyük bir basınçta oluşan heterojen bir reaksiyondur. Yoshimura da hidrotermal sentezi kapalı bir sistemde, sulu çözeltilerde yüksek sıcaklık ve yüksek basınç ($T > 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P > 1\text{ atm}$) koşullarında meydana gelen reaksiyonlar olarak tanımlamıştır [49]. Yapılmış olan bütün tanımlamalara göre sıcaklık ve basınç için alt limit olan bu parametreler için kesin bir değer belirlenmediği bilinmektedir. Hidrotermal yöntem ile yapılan çalışmalar incelendiğinde hemen hemen birçoğunda $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin ve 1 atm basıncın üzerinde uygulandığı bilinmektedir [50].

Yapılan tüm çalışmalar neticesinde hidrotermal yöntem, pek çok bilim dalıyla ilgilenen bilim insanları tarafından kimyagerler, jeologlar, mineraloglar, fizikçiler, seramikçiler, malzeme bilimcileri ve mühendisleri ile hidrometalurjistler gibi bilimin daha ileri teknoloji malzemelerinin verimli bir şekilde üretilebilmesi adına dikkat çeken bir yöntem haline gelmiştir [51].

Seramik toz malzeme sentezinde yaygın şekilde tercih edilen hidrotermal yöntem, kapalı bir otoklav sistemde reaksiyonların meydana getirdiği sıvı hal reaksiyonları sınıfında yer alan bir üretim yöntemidir. Normal koşullar da kararsız olan fazlar yüksek basınç yardımıyla serbest enerjisinin düşmesi sonucunda kararlı hale geçmektedir. Bunun için sulu bir çözelti içerisinde, normal şartlar altında ($T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 1\text{ atm}$) çözülmesi, sentezlenmesi mümkün olmayan malzeme sistemlerinin, oda sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda ve normal atmosferik basınçtan daha yüksek bir basınç da ($P \geq 1\text{ atm}$) sentezlenmesi mümkün olmaktadır [52]. Uygulanan geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında, hidrotermal yöntem ile karmaşık yapıları sistemlerin sentezi daha düşük sıcaklıklarda yapılabilmektedir [53].

Hidrotermal yöntem istenen malzeme sistemi sentezlenirken reaksiyonlar birbirini takip eder ve şu şekildedir; I. Doğrudan dönüşüm ve II. Çözünme-çökelme mekanizması ile meydana gelmektedir. İlk aşamada (I), çözelti içerisinde karıştırılarak dağılan kimyasal ürünlerin doğrudan faz dönüşümü gerçekleşmektedir. İkinci aşamada (II) ise faz dönüşümü gerçekleşen kimyasal ürünlerin, çözünme ve çökelme mekanizması gerçekleşmektedir. Bu çözünme mekanizması ise şu

şekilde açıklanabilmektedir; kullanılan malzemeler çözücü madde içerisinde çözülür ve belirli bir doygunluğa erişir ve ardından da çökler [52]. Bu tez çalışmasında kullanılan Hidrotermal cihaz Şekil 2.4' de gösterilmiştir.



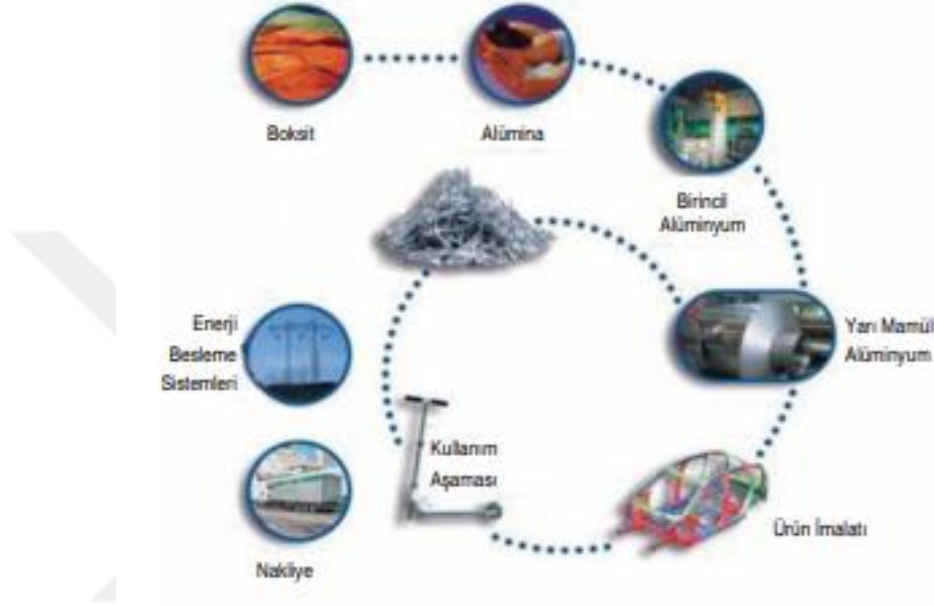
Şekil 2.4. Hidrotermal cihaz

Hidrotermal kaplama, suyun ya da sulu bir çözeltinin basınç altında kaynama noktasından daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirdiği kaplama yöntemidir. Hidrotermal yöntemde madde sentezi ve kaplama yapmak için otoklav veya bomb denilen yüksek sıcaklık ve basınç cihazları kullanılmaktadır [54]. Yapılan literatür çalışmalarında genel olarak madde sentezi yapılmışsa da son dönemlerde kaplama çalışmaları artış göstermiştir. Bu kaplama yönteminin sol- jel yönteminden farkı jelleşmeye geçmeden hazırlanan solüsyon yüksek sıcaklık ve basınç altında gerçekleşmesidir. Bu yöntemin avantajları proses süresi çoğu yöntemle göre kısa sürelidir. Ancak reaktörün haznesinin küçük olması kaplanacak alt malzemenin boyutlarını kısıtlamaktadır. Diğer bir dezavantaj ise reaktörün maliyetinin yüksek olması ve yüksek basıncın tehlike oluşturmasıdır [55].

a) Kaplamada Kullanılacak Malzemeler

Alüminyum ilk 1808 yılında İngiltere de bulunmuştur. İlk olarak endüstriyel alanda uygulanması ise 1886 yılında elektroliz yöntemi ile başlangıç yapılmıştır. Alüminyumun üretiminin

tamamlanması için 5 kademede ilerleyen bir işlem sırası vardır. Öncelikle boksit madeni işlenir, boksit madeninden alümina elde edilir, elektroliz yöntemi ile alüminadan sıvı alüminyum üretilir, sıvı alüminyum ya saf olarak ya da alaşımlandırılarak dökülüp, ekstrüzyon, haddeleme gibi işlemlerle yarı ürün veya uç ürün üretimi tamamlanmış olur [26, 56]. Boksit cevherinden, alüminyum üretim akım şeması Şekil 2.5’ de gösterilmektedir.



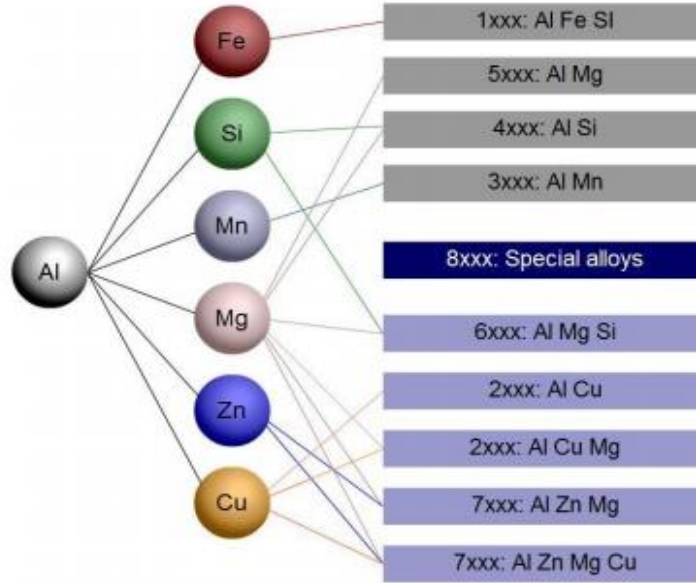
Şekil 2.5. Boksit cevherinden alüminyum eldesi [57]

Alüminyum dünyada imal edilişi ve tüketimi ile demir ve çelikten sonra ikinci sırada yer alan metal ve metal alaşım sınıfında yer almaktadır. Havacılık, uzay, otomotiv gibi sanayilerde en çok tercih edilme sebebi hafif ve kolay şekillendirilebiliyor olmasıdır. Ancak bunun yanı sıra bazı özelliklerinden ötürü tercih edilemeyebilmektedir. Bu özelliklerden bazıları şunlardır: düşük sertlik, ergime sıcaklığının düşük olması, aşınmaya karşı dayanıksız oluşudur. Olumsuz özellikleri azaltmak için alüminyum matrisli ve seramik esaslı takviye elemanı ile sağlamlaştırılmış yeni kompozit malzemeler üretilmektedir. Yeni imal edilen kompozit malzemelerde mukavemet, sertlik ve aşınma gibi parametrelerde olumlu yönde değişim gözlenmiştir [58].

Saf alüminyum, atom numarası 13 olan yüzey merkezli kübik (YMK) kristal yapısına sahip bir metaldir. Ergime sıcaklığı 660.2°C, yoğunluğu (20°C’ de) 2.698 g/cm³ ve ısıl iletkenliği 237 WK⁻¹/m olan bir malzemedir [26]. Alüminyum ve alüminyumdan elde edilen alaşımları, sıkça kullanılan bir malzeme çeşididir. Bunun sebebi ise yüksek elektrik iletimi, korozyona karşı dayanım, şekillendirilmesinin kolay olması gibi etkenlerdir. Alüminyum alaşımı yapılırken, Mg,

Mn, Si ve Zn gibi elementler en sık kullanılır. Bu elementlerden ya biri ile ya da bir kaç ile alaşım yapılabilir [40].

Alüminyum bir malzeme kullanılacağına oluşabilecek problemleri, eklenen alaşım elementi sayesinde ve ek olarak yapılan ısıl işlemlerde dezavantajların kısmen üstesinden gelinmektedir. Alüminyum alaşımları, iyi derecede dayanıklılık gösteren ve hafif olan bir malzemelerdir. Alüminyum alaşımlarını oluşturmak için kullanılan malzemeler; silisyum (Si) eklenmesi ile korozyon direnci, malzemede kaynak kabiliyeti ve ayrıca da korozyon direncinde artma olur. Bakır (Cu) eklenmesi ile işlenebilirlik yeteneği, sertlik değerlerinde ve korozyon direncinde artma olur. Manganez (Mn) ilavesi ile alaşımları alüminyumda katı eriyik mukavemetinden ötürü mekanik özelliklerde olumlu gelişmeler görülür ve alaşımların tokluk ve süneklik gibi özellikleri artış gösterir. Ayrıca eklenen magnezyum (Mg) ise yüksek mukavemet, korozyon direnci ve kaynak kabiliyetinde artış gösterir [59]. Şekil 2.6.'da işlenmiş alüminyum alaşımlarının Uluslararası Alaşım Tanımlama Sistemine (IADS) göre sınıflandırılması açıklanmaktadır [60].



Şekil 2.6. Alüminyum alaşımları [61]

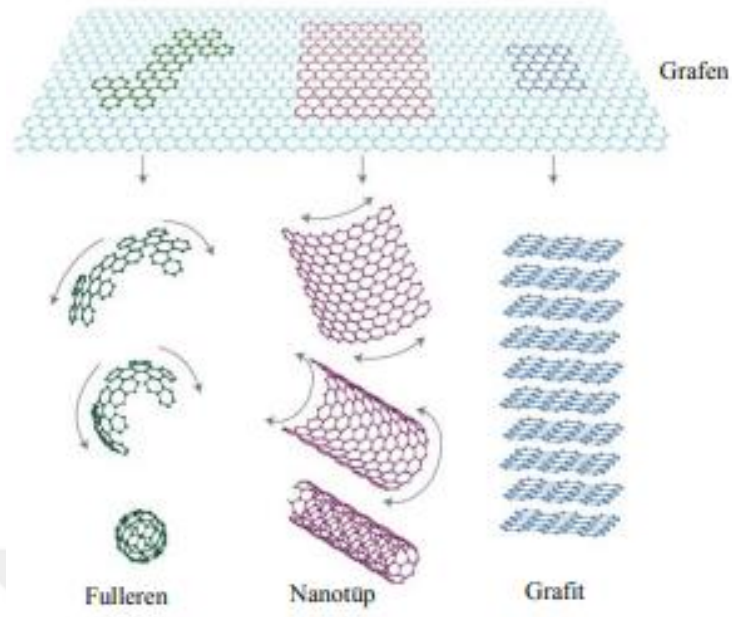
Alüminyum alaşımları serilerden oluşmaktadır. Bu seriler içerisine eklenen elementler ve ağırlıkça yüzdesine göre 1xxx-2xxx-5xxx şeklinde isimlendirilmektedirler. İki grupta inceleme yapmak mümkündür, döküm ya da dövme ile imal edilebilen alüminyum alaşımlarıdır. Dövme ile üretilen alüminyum alaşımları veya döküm ile üretilen alüminyum alaşımları kendi gruplarında ısıl işlem yapılabilen ve ısıl işlem yapılamayan alaşımlar olarak ayrılmaktadır. Yapılan gruplandırma Tablo 2.1.'de gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Alüminyum alaşımları [62]

Döküm Alaşımlar		Isıl İşlem	Dövme Alaşımlar		Isıl İşlem
1xxx	Ticari Saflıkta (> %99 Al)	Yaşlandırılmaz	1xxx	Ticari Saflıkta (> %99 Al)	Yaşlandırılmaz
2xxx	Al-Cu	Yaşlandırılabilir	2xxx	Al-Cu	Yaşlandırılabilir
3xxx	Al-Si veya Al-Mg-Si	Kısmen Yaşlandırılabilir	3xxx	Al-Mn	Yaşlandırılmaz
4xxx	Al-Si	Yaşlandırılmaz	4xxx	Al-Si veya Al-Mg-Si	Magnezyum varsa
5xxx	Al-Mg	Yaşlandırılmaz	5xxx	Al-Mg	Yaşlandırılmaz
6xxx	Al-Mg-Si	Yaşlandırılabilir	6xxx	Al-Mg-Si	Yaşlandırılabilir
7xxx	Al-Zn-Mg	Yaşlandırılabilir	7xxx	Al-Zn-Mg	Yaşlandırılabilir
8xxx	Al-Sn	Yaşlandırılabilir			

6XXX: Bu seride temel alaşım elementleri magnezyum ve silisyumdur. Alüminyuma eklenen, magnezyum ve silisyum magnezyum-silisit (Mg_2Si) bileşiğini meydana getirerek ısıl işlem uygulanarak sertleşebilen ve ayrıca çökeltme sertleşmesi işlemi uygulanabilen malzemeler imal edilmiş olur. Bu serideki alaşımlar, yaygın olarak alüminyum ekstrüzyon endüstrisinde kullanılmaktadırlar. Ayrıca yüksek korozyon dayanımı, iyi kaynak edilebilirlik ve orta derece dayanım gibi özelliklere sahiptir. Genel olarak kullanım alanları birçok yapısal imalatlar ve teknelerdir [62, 63].

Grafen: Bu tez çalışmasında kaplama malzemesi olarak grafen, uçucu kül ve genişletilmiş perlit kullanılmıştır. İlk kez 2004 yılında Manchester Üniversitesi'nden Andre Geim ve Konstantin Sergeevich Novoselov isimli iki bilim insanının keşfi ile ortaya çıkan grafen yeni bir malzeme olarak karşımıza çıkmıştır. Grafen, iki boyutlu sp^2 bağlı karbon atomlarının hegzagonal latiste bir araya gelmesiyle oluşmuş, karbon elementinin bal peteği örgülü yapıları ile birlikte tek tabakalı yapıda olan bir malzemedir. İki boyutlu bir malzeme yapısına sahip olan nanokarbon tabakası, bu altı adet karbon atomundan meydana gelmektedir. Karbon esaslı malzemelerden olan karbon nanotüp ve fullerenden grafenden farklı özelliklere sahiptirler ve atom dizilişleri ile de farklılık göstermektedir. Grafen ve karbon esaslı malzemelere ait yapı Şekil 2.7' de gösterilmektedir [64].



Şekil 2.7. Karbon esaslı malzemeler [64].

Grafen, kolayca esneyebilen ve değişik formlardaki malzemelerin yüzeyine kolayca kaplanabilen bir malzemedir. Bilinen en ince malzeme olmasının yanında, güçlü karbon bağları, grafeni bilinen en güçlü malzeme olarak da tanıtmaktadır [65, 66]. İki boyutlu altıgen bir yapıda dizilmiş karbon atomlarının bu formu, doğada iki boyutlu tek malzeme örneğini oluşturmasının yanı sıra, grafene olağanüstü özellikler de sağlayabilmektedir. Tüm bu ve birçok başka sebeplerden dolayı grafen, dünyada çok önemli değişikliklere sebep olabilecek bir malzeme olarak ele alınabilmektedir [67, 68].

Grafenin kullanım alanlarından biri, yüksek mukavemete sahip kompozit malzemelerin geliştirilmesidir ve alüminyum, titanyum, magnezyum gibi matris malzemelerine grafen katkısı yapılarak otomotiv, tramvay, hızlı tren, gemi, uçak, uzay ve havacılık sektöründe kullanılacak yeni nesil kompozitler üretilebilecektir [68].

Uçucu Kül: Tez çalışması kapsamında kaplamada kullanılan diğer bir malzeme ise uçucu küldür. Uçucu kül Pulverize kömürün yanması sonucunda termik santrallerin baca gazlarındaki elektro filtrelerle tutulan bir atık malzemedir. Uçucu küllerin, santral bacasından çıkarak havaya karışması önlenir çünkü çevre kirliliği oluştururlar. Bu amaçla toplanan uçucu küller santral çevresinde veya başka uygun yerlerde depolanmaktadır. Zaman geçtikçe biriken küller, kapladığı alandan ötürü problem oluşturmaktadır.

Dünya’da ortaya çıkan uçucu kül miktarı yılda 600 milyon ton civarını bulmaktadır. Türkiye’de halen Afşin-Elbistan, Çatalağzı, Kangal, Kemerköy, Orhaneli, Seyitömer, Soma,

Tunçbilek, Yatağan ve Yeniköy santralleri olmak üzere 11 termik santral faaliyet göstermektedir ve bu santrallerden yıllık uçucu kül üretimi ortalama 13 milyon ton kadar olmaktadır. Ancak doğalgaz santrallerinin devreye girmesi ile bu miktar yıldan yıla değişim göstermektedir. Ülkenin enerji üretiminde dışa bağımlılığını azaltmanın bir yolu da endüstrinin diğer kesimlerinde yararlanılamayan düşük kalorili linyit kömürlerini termik santrallerde kullanılması ile olmaktadır. Yıllık uçucu kül miktarlarının bu şekilde gelecekte daha fazla artacağı düşünülmektedir [69].

Kompozit malzeme üretiminde iyi mekanik özellik gösteren, uygulanan üretim yöntemi, kullanılan takviye elemanına bağlı olarak teknolojiye ve yüksek maliyete ihtiyaç duyulur. Kompozit malzeme üretiminde bu gibi faktörlerin elimine edilmesi gerekmektedir. Bu sebeple daha düşük maliyetli takviye elemanlarına ve üretim yöntemlerine yönelme söz konusu olmuştur [70, 71]. Düşük maliyetli kompozit malzeme üretiminde son zamanlarda yapılan çalışmalar ilerleme göstermiştir. kompleks olmayan üretim yöntemlerinde düşük maliyetli takviye elemanları kullanılmıştır. uçucu küller bu kapsamda en popüler takviye elemanlarından birisidir [72].

Genleştirilmiş Perlit: Tez çalışması kapsamında takviye olarak kullanılan bir diğer malzeme ise genleştirilmiş perlitir. Perlitin bazı tiplerinin kırıldığı zaman inci parlaklığında küçük küreler meydana geldiğinden inci anlamına gelen “perle” kelimesinden gelmektedir. Perlit içeren bazı kayaların, 20. yüzyılda hızlı bir şekilde ısıtma yapıldığında genleştiği görülmüştür ve belirli bir biçimi olmayan yapıda olan perlitin, yumuşama sıcaklığı aralığı olan 760-1090 °C’ye ısıtıldığında orijinal hacminin yaklaşık 20 katı kadar genleşebildiği görülmüştür. Perlitin bu yüksek sıcaklıklardaki alev şoku ile suyunu kaybedip 20 katı kadar büyümüş haline genleştirilmiş perlit denilmektedir. Genleştirilmiş perlitin boyutları kullanılacağı yere göre farklı tane boyutlarında elde edilebilmektedir. Perlit üreten ülkelerden en önemlileri; Türkiye, Yunanistan ve ABD’dir. Dünyadaki perlit rezervinin yaklaşık olarak 700 milyon ton olduğu tahmin edilirken, Türkiye bu rezervin yaklaşık olarak %70’ine sahiptir. Silika oranı %70’ den fazla olan Perlit adsorpsiyon özelliği göstermektedir. Perlit, yanıcılıkta kendisine rekabet edebilecek organik kökenli yapay malzemelere oranla yanmazlık üstünlüğüne sahiptir. Bu özelliğinin yanı sıra yüksek sıcaklıklara uzun süre bozulmadan dayanabilme ve ısı yalıtım özellikleri bulunduğundan, yangında zarar görmesi istenmeyen önemli yapı elemanlarının korunması alanında da kullanılabilir [73].

2.3.2. Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD)

Gaz fazda kimyasal reaksiyonlar gerçekleşmesi yöntemi ile yüzey kaplama işlemine kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemi denilmektedir. Bu yöntem yüzeyde oluşturulacak yeni fazın, altlık parça yüzeyinde biriktirilmesi esasına dayanmaktadır. En eski zamanlarda endüstriyel alanda uygulanan bir yöntemdir. Temel olarak buhar fazındaki reaktantların, katı bir tabaka halinde altlık malzeme yüzeyinde kimyasal reaksiyonların sonucu biriktirilmesidir. Öncelikle kaplanacak

olan malzeme ısıtılır ve istenilen kimyasal reaksiyonun gerçekleşebilmesi ve termodinamik özelliklerine uygun olacak şekilde yüksek sıcaklıklarda ısıtmanın yapılması gerekmektedir. Yüksek sıcaklıklara çıkılması altlık malzeme de bazı deformasyonlara (mekanik özellikler, difüzyonda problem vb.) sebep olabilmektedir. Ancak son zamanlarda gelişen teknoloji ile bu yöntem plazma desteği kullanılarak çok yüksek sıcaklıklara çıkılmadan düşük sıcaklıklarda da uygulanabilmektedir [74].

2.3.3. Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD)

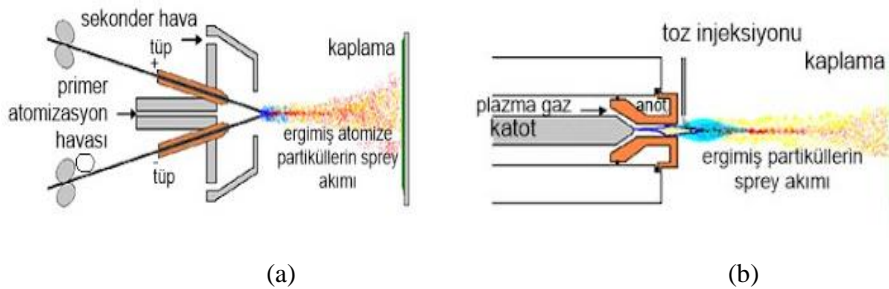
Fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemi, vakumlu ortamda kaplama malzemesinin atomik boyutlara geçirilerek ya da buhar fazına dönüştürerek altlık malzeme yüzeyinde biriktirilmesi işlemidir. Kaplama malzemesinin buhar fazına geçirilmesi üç şekilde;

- Buharlaştırma,
- Sıçratma,
- Plazma,

mümkün olabilmektedir. Ortam koşullarına, elektrik akım çeşidine ve kullanılacak olan cihaza göre isimlendirilmektedir [74].

2.3.4. Termal Sprey Kaplama

Termal sprey kaplama, farklı birçok yöntemin bir araya gelerek oluşturulduğu kaplama yöntemidir. Kaplama, yüksek sıcaklıkta kaplama malzemesi genellikle toz veya tel ergitilerek, yüzeyi hazırlanmış altlık malzemesine püskürtülerek yapılmaktadır. Endüstriyel alanda diğer kaplama yöntemlerine kıyasla yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, metal ve metal alaşım yüzeylerinde aşınmaya dayanıklı, koruyucu bir kaplama tabakası oluşturmak amaçlanır. Termal sprey kaplama yöntemi ile kaplanan malzemelerde; yüksek sıcaklık dayanımı, kolay şekillendirilebilme, tokluk, korozyon ve aşınma dayanımı gibi özellikler kazanabilmektedir [75]. Şekil 2.8’ de termal sprey kaplamanın şematik hali verilmiştir.



Şekil 2.8. Termal sprey kaplama; a) ark sprey prosesi, ve b) plazma sprey prosesi [76]

Plazma püskürtme, gaz-alev püskürtme ve elektrikli ark püskürtme termal püskürtme metotları arasında en çok kullanılan metotlardır. Katı partiküllerin yüksek kinetik enerjisinden dolayı bir kaplamanın oluşturulduğu soğuk toz püskürtmede metot grubundandır. Bu tür kaplamalarda kullanılan kaynak malzemeleri, metal, polimer, seramik ve metal-seramik tozları ve bazı durumlarda metal telden oluşur [76].



3. AŞINMA

Aşınma, yüzeylerin birbirine temas etmesi sonucu; fiziksel, kimyasal ve mekanik etkilerden dolayı meydana gelen malzeme kaybıdır. Malzeme kaybının etkisiyle de malzeme yüzeyindeki istemsiz değişimdir. Aşınma sonucu malzeme kaybının yanı sıra, makine elamanlarına ait yüzeylerde şekil bozukluğuna sebep olarak, makinaların iş yapabilme yeteneğini azaltır. Zaman geçtikçe, bu durum makine elemanlarını çalışamaz hale getirir [77].

Aşınma için birçok tanım yapılmıştır, bunlardan bazıları;

“Mekanik zorlamalar ile bazı durumlarda da kimyasal reaksiyonlar sonucunda, malzeme yüzeyinden küçük parçacıkların kopmasıyla meydana gelen değişimdir” [78].

“Aşınma, malzeme yüzeylerinde mekanik temas sonucu meydana gelen bir hasar çeşididir. Aşınmış olan yüzeydeki malzeme kaybı hasarı oluşturur” [79].

“Bir biri ile izafi harekette bulunan malzemelerin yüzeylerinin birinde veya her iki yüzeyde de meydana gelen malzeme kaybına aşınma denir” [80].

“Malzeme yüzeyinde temas sırasında katı, sıvı ve gazların etkileşimi sonucu; malzeme yüzeyinde mikro yapıların ayrılmasıyla meydana gelen bir yüzey bozulmasıdır” [81].

Aşınma, bir veya birkaç etkenin bir araya gelip zamanla oluşan istemsiz malzeme kaybıdır. Bu etkenler; kayma, darbe, yüksek veya düşük sıcaklıklarda meydana gelen korozif ortamlar, tekrar eden şok patlamalar ve yuvarlanmadır [82].

Yüzeylerden talaş kaldırılarak işlemek, yüzey taşlaması veya yüzeyin parlatılması gibi işlemler aşınma olarak kabul edilmez. Kabul edilmeyişinin sebebi ise bu gibi işlemlerin istemli ve kontrollü bir şekilde yapılmasıdır. Gerçekleşen olayın aşınma olarak kabul edilebilmesi için şu şartları sağlaması gerekmektedir; mekanik bir etkinin olması, bir sürtünme etkisinin olması, devam eden bir hareketin olması ve malzeme yüzeyinde hasar meydana gelmesidir [83].

Aşınma sırasında malzeme kaybının yanı sıra makine parçalarında enerjiden kayıp da söz konusudur. Makine elemanlarında aşınmanın istenememesinin sebebi neden olduğu birden fazla kayıpla ülke ekonomisine zarar vermesidir. Aşınmanın önüne geçmek için malzeme yüzeylerine uygulanan işlemler, yağlama, malzeme seçimi gibi seçeneklerde ilerleme görülecektir [84].

Aşınmayı, malzemeye bütün etki eden faktörler ele alınarak incelemek gerekmektedir. Triboloji olarak adlandırılan; aşınma, sürtünme ve yağlamayı içeren sistemin bütünüyle incelenmesi gerekmektedir [85]. Tribolojik sistem şu elemanlardan oluşmaktadır:

a)Aşınan malzeme: Daima katı halde olan ve aşınması beklenen malzemedir.

b)Karşı malzeme: Aşındırıcı yapıda, katı, sıvı ve gaz halinde olabilen malzemedir.

c) Ara malzeme: Aşınan ve aşındırıcı yüzey arasında kalan kısımdır. Bu yüzey bazen katı, sıvı veya gaz halinde olabilir, bazen de bunların karışımı halinde bir şekilde bulunabilen bir malzemedir.

d) Yük: Aşınmada yük önemli bir rol oynamaktadır. Tribolojik sistemde bazen yük artan veya azalan şeklinde, bazen de titreşimli, darbeli, dinamik ve statik olabilir.

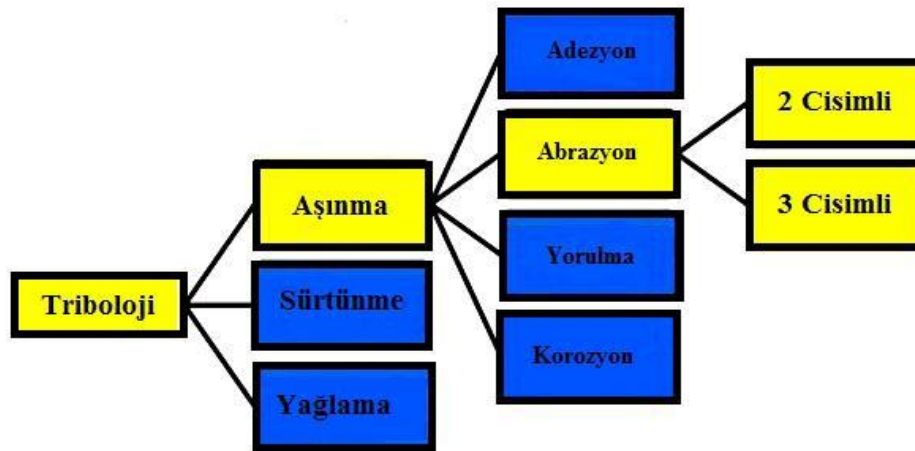
e) Hareket: Triboloji de önemli faktörlerden birisi de aşınan malzeme ile aşındırıcı yüzeyinin birbiriyle yaptığı bağlı harekettir. Hareket kayma, yuvarlanma, çarpma veya kaymalı yuvarlanma şeklinde olabilir.

f) Çevre: Tribolojik sistemin içerisinde bulunduğu ortamdır.

3.1. Triboloji

Triboloji; sürtünme, aşınma ve yağlama konularını içeren ve bu konularla ilgili fiziksel olayları inceleyen bir bilim dalıdır [86]. Şekil 3.1.'de tribolojik sistemin gösterimi verilmektedir. Dünya üzerinde triboloji Jost ile 1996' da ilk kez duyulmuştur. Triboloji; Yunanlılar tarafından "tribos" olarak kullanılan kelimedenden gelir ve literatürde "sürtünme bilimi" olarak çevirilebilir. Triboloji sözlüklerde bir biri ile temas halinde hareket eden yüzeylerin, hareket sonucu etkileşimini inceleyen bilim ve teknoloji dalı olarak anlatılmaktadır. Ancak bir triboteknik sistemde ara yüzeyde meydana gelen etkileşimleri anlayabilmek için malzeme bilimi, makine dizaynı, katı mekaniği, uygulamalı matematik, kimya, yağlama, ısı transferi, fizik gibi birçok bilim dalına gereksinim duyulur [87].

Triboloji, yüzeylerin birbirine temas durumu için sürtünmeyi ve aşınmayı optimize etmeyi amaçlar. Bu durumda gerekli işlevi yerine getirmenin yanı sıra, mümkün olan üretim, montaj ve en düşük bakım maliyetlerinde, yüksek verimlilik ve yeterli güvenilirlik sağlama anlamına gelmektedir [86].



Şekil 3.1. Tribolojik sistemin gösterimi [88]

3.2. Aşınmaya Etki Eden Faktörler

Aşınma, değişik türden birçok faktörden etkilenmektedir. Bu faktörlerden bazı önemli olanlarını kısaca şöyle açıklanmaktadır [89].

- **Malzeme seçimi:** Aşınma büyük bir çoğunlukla malzeme seçimiyle direk alakalıdır. Seçilen yanlış malzeme, maddi kayıplara sebep olduğu gibi istenilen performansında elde edilmesinin önüne geçmektedir [82]. Birbiri ile bağlı hareket sonucu etkileşim halinde çalışan makine elemanlarında, aşınma dayanımını arttırmak için malzemeye ait mekanik özelliklerin iyi bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir [90].
- **Sürtünme:** Sürtünme genel olarak temas halindeki yüzeylerde veya yüzeylerin hareket edebilme ihtimaline karşılık gösterilen dirence denilmektedir [91, 92]. Sürtünme ile aşınma arasındaki ilişki göz önüne alınmayarak, bazı metallerin sürtünme katsayısı düşük olmasına rağmen yüksek oranlarda aşınmaya sebebiyet vermektedir. Bazı durumlarda ise sürtünme katsayısı çok yüksek olmasına rağmen aşınma oranının az olması durumu gözlemlenebilmiştir [93].
- **Yüzeğe Uygulanan Yük:** Aşınma ile yüzeğe uygulanan yük yapılan deneysel çalışmalar sonrasında doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir [93].
- **Sürtünme Mesafesi:** Aşınma sırasında sürtünme mesafesinin artmasıyla aşınma oranında da zamanla artma gözlemlenmiştir [93].
- **Yüzey Sertliği:** Malzeme özelliklerinde diğer parametreler sabit bırakılarak sertlik arttırıldığında aşınma miktarında azalma meydana gelir. Sertleştirme işlemi yapılmamış olan malzemelerde, deformasyon sertleşmesi uygulanan kısımlarda mikro yapılar oluşur ve malzeme bu mikro yapılardan dolayı sünekliği azalarak kopar. Alaşımlandırma veya ısıtma işlemi yüzey sertleştirilerek aşınma dayanımı arttırılmalıdır [90].
- **Yağlama:** Aşınmada en önemli parametrelerden biri yağlamadır. Yağlama birbiri ile etkileşim halindeki yüzeylerde metal ile metal teması ve soğuk kaynaklanmanın önüne geçilebilir [93].

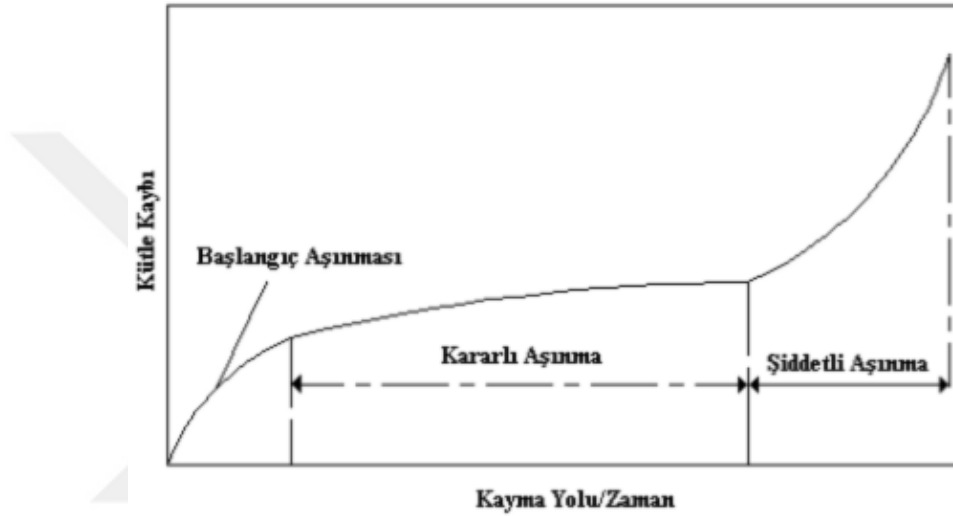
3.3. Aşınmanın Oluşum Safhaları

Aşınmanın meydana geliş hızı ve biçimi açısından ikiye ayrılır; zamanla gelişen ve aniden meydana gelen aşınmadır. Zaman içerisinde gerçekleşen aşınma türünde makine elemanında üç aşamada aşınma gerçekleşir, normal çalışma ömrünü kendiliğinden tamamlar. Aşınma safhaları Şekil 3.2.'de gösterilmektedir.

Başlangıç Aşınması: Bu aşamaya aynı zamanda Rodaj aşaması da denilmektedir ve birbirine alıştırma aşamasıdır. İlk safha olduğu için şiddetli ve hızlı bir aşınma söz konusudur ve bu kısımda iyi bir alıştırma yapmak en önemli şarttır. Başlangıç aşaması en kısa tutularak, en az

yükte (bu aşamaya ait özel ağırlıklar kullanılır) ve normalde olan hızından biraz daha yavaş bir hızla tamamlanmalıdır. Yağlayıcılar kullanılarak alıştırma kolaylaştırılmaktadır [89, 94].

Kararlı (Asıl) Aşınma: Rodaj aşınmasından sonraki aşamadır. Makine elemanının ömrünü belirleyen asıl aşınma safhasıdır ve bu safhada aşınma hızı çok azdır, ilk aşama safhasına göre daha yavaş ilerlemektedir. Ancak zamanla aşınma oranı artmakta ve şiddetli aşınmalar bu aşamadan sonra meydana gelmektedir. Başlangıç aşaması ne kadar iyi yapılmışsa makine elemanının ömrü o kadar uzun olmaktadır.



Şekil 3.2. Aşınmanın safhaları [89]

Aşırı (Şiddetli) Aşınma Safhası: Bir makine elemanının normal çalışma ömrü belirli bir aşınma sınırına kadar devam eden aşınma süresidir. Aşırı aşınma safhasında, aşınma hızı artmaktadır ve bu nedenle şiddetli bir şekilde aşınmalar meydana gelmektedir. Bu şiddetli aşınma sonrasında kurulu sistemde ciddi hasarlar meydana gelebilmektedir [94]. Parçayı tamir edebilmek veya zamanı gelinde değiştirebilmek için makine elemanının çalışma koşullarına bağlı olarak bir aşınma sınırı A (em) belirlenir ve aşınma zaman grafiğinden normal çalışma ömrü belirlenebilmektedir [89, 95].

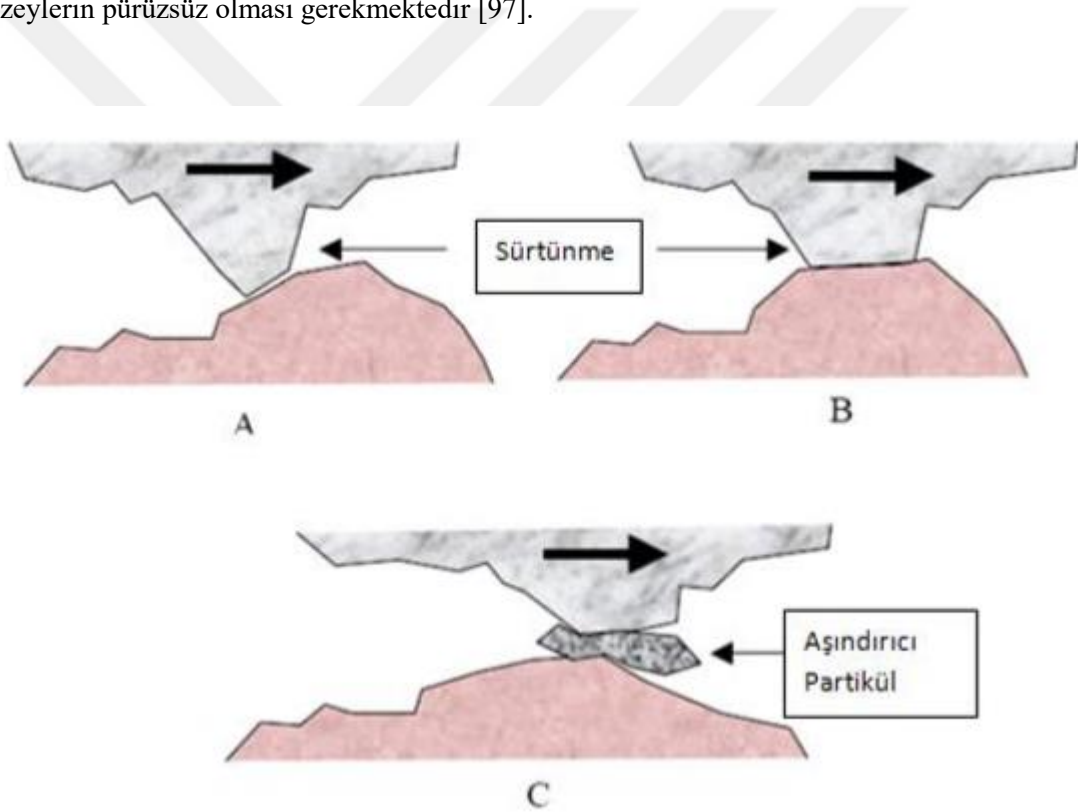
3.4. Aşınma Mekanizmaları

3.4.1. Adhezif Aşınma

Adhezif aşınma iki düzgün katı cismin yağlamalı ve yağlamasız ortamda kayma teması ile oluşmaktadır ve kayma veyahut yapışma aşınması olarak da bilinmektedir. Adhezif aşınma ara yüzeydeki pürüzlerin birbirine değmesiyle meydana gelmektedir. Temas eden noktalar kayma ile

kesilir ve bu aşınmada bir yüzeyden kopan parçalar diğer yüzeye yapışabilmektedir. Yüzeyler birbiri üzerinde kayarken diğer yüzeye yapışmış olan parçalar tekrar esas yüzeye yapışabilmektedir veya her iki yüzeyden bağımsız partiküller halinde ortamda bulunabilmektedir. İki yüzeyden de kopan partiküller, yeni temas alanı oluşturmaktadır. Kopan partiküllerin birbirleriyle temaslarının artmasıyla bu parçalar topaklanma yapmaktadır. İki yüzey arasında topaklanarak büyüyen parçalar, malzemeye uygulanan yükün de etkisi ile levha haline gelmektedir. Sonuç olarak kompozit bir yapıda levha tipi aşınma partikülleri, iki yüzey arasında meydana gelmektedir [87, 96]. Şekil 3.3.' de adhezif aşınmanın nasıl olduğu gösterilmektedir

Yüzeydeki gerilmenin üzerine etki eden düşük yüklerde bile akma sınırını geçmesi muhtemeldir ve soğuk ortamda malzemenin yüzeyinden parçalar koparak yapışabilmektedir. Ayrıca soğuk durumda metal malzeme yüzeylerinde adhezif aşınmanın biraz daha az olması için yüzeylerin pürüzsüz olması gerekmektedir [97].



Şekil 3.3. Adhezif aşınma [98]

Bu tip aşınma, eş çalışan yüzeyler arasındaki yükü taşıyan yüzey pürüzlülüklerinin arasında oluşan mikro kaynakların kesme olayı sonucunda ortaya çıkmaktadır [98]. Bununla birlikte bir yüzeyden kopan parçalar diğer yüzeye yapışabilirler ve kayma devam ettiğinde diğer yüzeye yapışmış olan parçalar tekrar orijinal yüzeye yapışabilir veya her iki yüzeyden bağımsız aşınma parçacığı olabilirler. Metalografik olarak, kafes yapıları birbirine benzeyen metallerin korozyon ile aşınma esasına dayanmaktadır çünkü birbirinden farklı kristalografik yapıya sahip aşınma

çiftinde kaynaklaşma olayının oluşumu düşünülmemelidir. Bu tip aşınma genelde iki yüzeyi ayıran film kalınlığının başarısızlığı sonucu meydana gelmektedir. Bu başarısızlık yüksek sıcaklık yüksek basınç ve yüksek kayma hızına sebep olur. Adhezif aşınmaya ait karakteristik örnek motor yataklarının sarmasıdır.

Adezif aşınma ile ilgili deneylerden elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

1. Adezif aşınma, benzer veya kolay alaşım yapabilen malzemeler arasında meydana gelmektedir.

2. Aşınma olayı, yüzeylerin izafi hızına ve normal kuvvete bağlıdır. Pratik uygulamalarda nispeten yüksek hızlarda ve yüklerde görülen bir aşınma şeklidir.

3. Adezif aşınma, sürtünmenin olduğu bütün kaynak birleşmelerinde meydana gelmemektedir. Eşitlik (3.1)' de verilen kaynak noktalarının aşınmaya katılan kısmı k_a ile gösterilirse, aşınan malzeme hacmi [99];

$$V_a = k_a \cdot A_h \cdot L \quad (3.1)$$

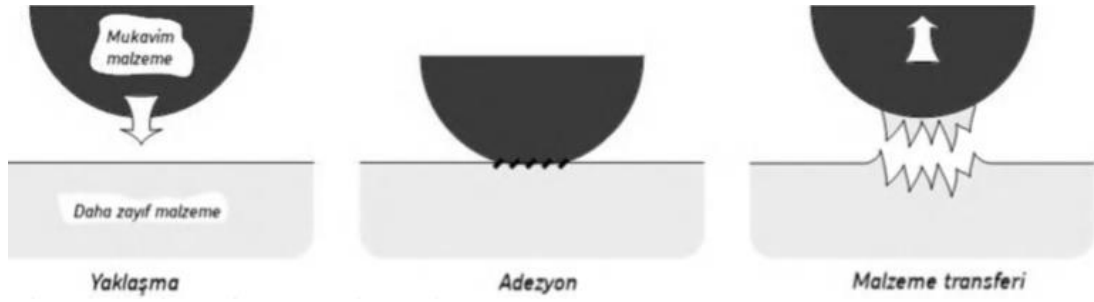
V_a = Aşınan malzemenin hacmi, k_a = Kaynak birleşim noktalarının aşınmaya katılan kısmı, A_h = Yükü taşıyan alan, L = Kayma mesafesi, Metallerin adezif aşınmasında $10^{-7} < k_a < 10^{-2}$ arasında olur.

4. Yüzeylerden birinin sertliği diğerine göre nispeten büyük ise kaynak bağlarının kopması yumuşak malzemelerde olur ve yumuşak malzeme sert malzemenin yüzeyine transfer edilir.

5. Adezif aşınmada yağlamanın etkisi çok büyüktür. Sınır sürtünme bölgesinde dahi yüzeylere yapışmış yağ tabakası büyük ölçüde adezyon aşınmasını önler ve yüksek hız ve basınç altındaki yüzeyler arasına katkılı bir yağ konursa aşınma önlenir.

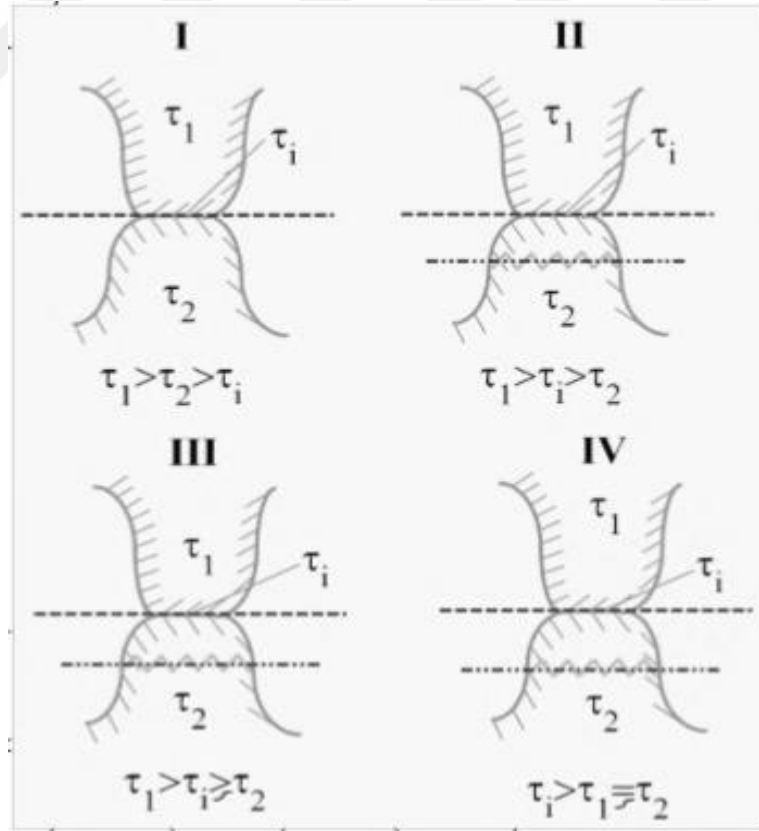
6. Oksit veya nemden oluşan doğal tabakanın aşınma olayı üzerindeki etkisi büyük olduğu görülmüştür.

Altın, platin gibi asal metaller dışında bir oksit tabakası her zaman mevcuttur ve çok ince olduğu için gözle görülmeyen bu film gerçek metalsel teması engellemektedir. Bu nedenle vakum altında yapılan testlerde metalsel adezyonun çok büyük olduğu bulunmuştur yani, yüzeyler arasındaki adezif kuvvet, temas kuvvetinden epey büyüktür ve bu şekilde zayıf olan malzemenin, mukavim olana doğru bir transfer gerçekleşir ve Şekil 3.4' da gösterilmiştir [100].



Şekil 3.4. Adhesif aşınma gösterimi [100].

Kuru ve sınır sürtünme halindeki fonksiyon yüzeylerinin birbiri ile temas halinde olan pürüz tepeleri bulunmaktadır. Özellikle akma sınırı aşıldığında kuvvetli bir adeziv veya sıcaklık etkisi ile teşvik edilen kohezif bir bağ meydana gelmektedir ve bu bağ, metal değme yüzeyleri ne kadar temiz ise o oranda kuvvetlidir. Pürüz tepecikleri arasında bu tür bağlar oluşmuş olan iki yüzey birbirine göre hareket ettirildiğinde bağlanmış tepeciklerin birbirinden ayrılması dört şekilde olabilir. Pürüz tepeciklerinin ayrılması Şekil 3.5' de gösterilmiştir [100].



Şekil 3.5. Pürüz tepeciklerinin ayrılması [100]

- I. Ara yüzeyin kesme direnci, malzemelerin kesme dirençlerinden (τ_1 , τ_2) daha küçüktür ve burada ayrılma ara yüzeyden (veya oluşan kaynak bağından) olur. Bu tür adezif aşınmada aşınma miktarı en azdır ve örnek olarak, Çelik/kalay çifti gösterilebilir.
- II. Ara yüzeyin kesme direnci, 1 numaralı malzemeden küçük, 2 numaralı malzemeden büyüktür. Örnek olarak çelik/kurşun çiftine bu tür aşınmaya rastlanır ve ayrıca benzer aşınma hali kurşun bronzu/çelik arasında da gözlenir.
- III. Ara yüzeyin kesme direnci, yüzey malzemelerinden birinden küçük, diğerinden ise çok az farklı, heterojen yapıda olan ikinci malzemeye ise yer yer eşit olabilir ve bu durumda gene yumuşak malzemeden sert malzemeye bir madde geçişi vardır ancak bazı noktalarda parçacık kopmaları kendini gösterecektir. Madde geçişi yanında madde ayrılmaları suretiyle daha büyük bir madde kaybı ortaya çıkacaktır ve Buna örnek olarak çelik/bakır çifti gösterilebilir.
- IV. Ara yüzeyin kesme direnci her iki yüzey malzemesinin kesme direncinden büyüktür. Ayrıca kuvvetli bir plastik şekil değişimi sonucu pekleşmiş ve kırılgan hale gelmiştir. Belirli bir kayma mesafesinde yüzeyden kopup ayrılacak, kuvvetli bir aşındırıcı olarak yüzeyler arasında adeziv aşınmaya ek olarak bir abraziv aşınmaya sebep olacaktır. Bunun sonucu her iki yüzeyde de kuvvetli bir aşınma meydana gelecektir. Mukavemet özellikleri birbirine yakın malzemeler arasında (örnek olarak çelik/çelik) bu tip adezif kökenli aşınma hallerine sıklıkla rastlanır.

Adhezif aşınmanın metal – metal temasıyla oluşan bir aşınma olarak 4 farklı şekilde gerçekleşmektedir. Şekil 3. 2’de Adhezyon aşınma modelleri gösterilmiştir [82].

- Fretting Aşınması
- Galling Aşınması
- Scuffing Aşınması
- Oksidasyon Aşınması

Yenme (Fretting) veya Kazımalı Aşınma: Kazımalı aşınma, temas halinde çalışan iki metalik yüzeyin yağlayıcının işlevini görmediği veya varlığını sürdüremeyeceği için kullanılmadığı durumlarda, titreşimleriyle doğal salınım ile gözle görülmeyecek kadar küçük genlikli ve tekrarlı kayma hareketlerinin sonucu meydana gelen aşınma türüne denilmektedir [82].

Galling Aşınması: Temas gerilmelerinde meydana gelen, yüksek temas sıcaklıklarının ortaya çıkmadığı düşük hızlarda gelişen bir adezif aşınma türüdür. Temas halinde çalışan iki metalik yüzey arasında yağ filminin olmaması veya işlev görmemesi durumunda sürtünme etkisinden doğan sıcaklığın artması ile oluşan kaynamalarla aşınma meydana gelir [82].

Scuffing (Sürümeli) Aşınma: Sistemin çalışma ortamında yağ filmi olmamasından ve sürtünme etkisi ile artan sıcaklıkla oluşan şiddetli kaymalarda meydana gelen adezif aşınma

çeşididir. Bu aşınma türünde Galling aşınmasından farklı olan yanı yüksek çalışma hızlarında yükselen sıcaklıkla ve temas gerilmesinde meydana gelmesi ve buna ek olarak çok hızlı gelişmesidir. Sürümelili aşınma; eş çalışan yüzeylerinden sert olan malzemede çok hafif yenme, yumuşak olan diğer yüzeyde ise şiddetli yenme şeklinde kendini göstermektedir [82].

Oksidasyon Aşınması: Metalik malzemelere üzerinde havanın etkisiyle şekillenmiş çok ince bir oksit tabakası taşır ve iki metal arasında oluşan sürtünme kuvvetinin etkisiyle bu oksit tabakası zamanla dökülür ve hava ile temasta tekrar şekillenir. Oksit tabakası kendisini yenileyemeyecek düzeye geldiğinde korozyon ürünleri metalden içeri nüfuz ederler ve metali korozyona uğratarlar [82].

3.4.2. Abrasif Aşınma

Abrasif aşınma, sert parçacıkların katı yüzeye çarpması ya da bu yüzey üzerinde sürtünmesi ile gerçekleşir, dolayısıyla aşınma, katı parçacıkların yüzeye zarar vermesi ile oluşur ve genellikle malzeme hacminin ya da ağırlığının azalması şeklinde gözlemlenir. Abrasif aşınma genelde endüstriyel alanlarda yaygın olan bir aşınma türü olup, katı malzemeler ya da hammaddelerin, taşınması, stoklanması, yüklenmesi ve boşaltılması sırasında sıkça ortaya çıkmaktadır. Aşınmayı gerçekleştiren parçacıkların ve aşınan metalin sertliği abrasif aşınma direncini önemli ölçüde etkiler. Metal sertliğinin abrasif aşındırıcı sertliğine oranı arttıkça abrasif aşınma hızı düşmektedir [101]. Abrasif aşınma sert yabancı parçacıkların, sürtünen iki yüzey arasında bulunmasından kaynaklanır. Sert ve keskin kenarlı tanelerin mikroskobik talaş kaldırması ve genellikle malzeme içinde oldukça derinlerde değişiklikler meydana getirmesidir.

Abrasif aşınma, yüzey pürüzlülüklerinin yüzey veya sert parçacıklar tarafından plastik deformasyona uğratılması koparılması ile oluşur ve kırılma tokluğu yüksek olan yumuşak metaller, seramikler kayma esnasında sert parçacıklar tarafından plastik akışa uğratar. Kırılma tokluğu düşük olan gevrek malzemeler bulunur ve yüzey pürüzlülüğü kırılması ile madde kaybına uğrar. Abrasif aşınma, sert bir cismin, yüzeyden parça kopararak malzeme kaybına sebep olmasına denilmektedir. Taşlama, zımparalama ve parlatma işlemlerinde bu aşınma meydana gelir ve ayrıca iki yumuşak malzemenin arasına sert bir parça girerse, parça yumuşak parçanın içine gömülür ve diğer parçayı zımpara gibi aşındırır. Aşınmayı önlemek için yağlamanın yanında, parçalardan biri sert diğeri yumuşak malzemedendir olması gerekir [102, 103].

Genel olarak abrasif aşınma olayı iki grupta incelenebilir. İki cisimli abrasif aşınma, pürüzlü bir yüzeyin veya keskin kenarlara sahip abrasif partiküllerin bir yüzey üzerinde kaymasıyla esnek yüzeylerden partikül kopması oluşur ve meydana gelen kopma sonucu talaş oluşumu sürekli metal kesme işlemine benzemektedir. Bu aşınma tipine çoğunlukla malzemenin yüzey işlemleri, taşlama, zımparalama ve kumlama gibi aşamalarda görülür. Bir diğeri abrasif aşınma ise üç cisimli abrasif

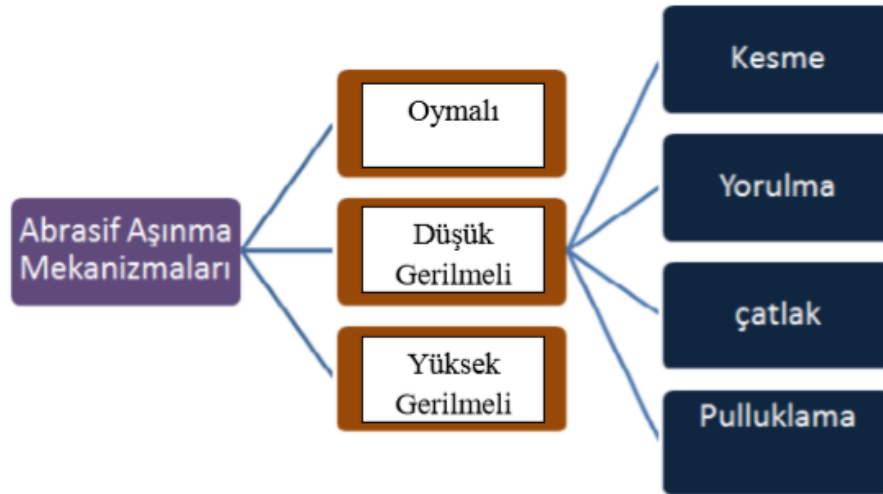
aşınmadır. Sert parçacıkların temas eden yüzeyler arasında serbestçe kayma ya da yuvarlanma şeklinde hareket etmesi ile meydana gelir.

Üç cisimli abrasif aşınmadaki aşınma oranı, iki cisimli abrasif aşınmaya göre daha düşüktür çünkü hareketli taneciklerin zamanın %90'ını kesme etkisi meydana getirilmeden yuvarlanma eğiliminde olmasıdır [104].

Abrasif aşınma;

- ✓ Sert partiküllerin yüzey ile yaptığı darbe ve kayma gibi temaslarla yüzeyden malzeme kaldırması,
- ✓ İki pürüzlü yüzeyin düşük temas basınçlarında birbiri üzerinde yaptığı kayma hareketiyle sadece pürüzlerin aşınması ile meydana gelen bir aşınma türüdür.

Dört çeşit abrazyon aşınması modeli vardır. Bunlar, oymalı abrasif aşınma, yüksek gerilmeli abrasif aşınma, düşük gerilmeli abrasif aşınmadır [82]. Şekil 3.6.' da abrazyon aşınma mekanizmaları verilmektedir.

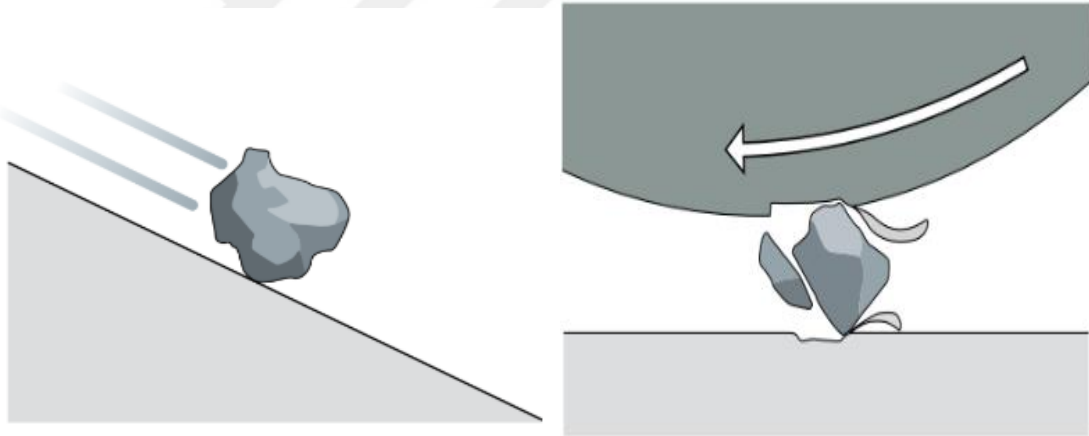


Şekil 3.6. Abrasif aşınma mekanizmaları [82]

Oymalı Abrasif Aşınma: Genellikle çarpma ile oluşan bu tip aşınma yüksek gerilme ile meydana gelmektedir. Oymalı abrasif aşınma sonucu yüzeyde önemli ölçüde mikro deformasyonlar görülür. Aşındırıcı yüzey genellikle sabittir ve bulunduğu yerde sıkıca durmaktadır ve aşınmanın etkisi burada çok kuvvetlidir. Ağır aşındırıcı parça metal malzeme üzerinde basınçla etki eder. Yükün ve basıncın etkisi ile metal malzemeyi oyar. Bu tip aşınmada aşındırıcı parçalar kesme aletleri gibi parçayı aşındırır ve oyma türü aşınmalara karşı karbür içeren alaşımlar kullanılır. Özellikle belli bir tokluğu olan manganlı östenitik çelik matriste dağılmış karbür içeren alaşımlar başarılı bir şekilde uygulanır. Oymalı abrasif aşınmaya maruz kalan parçalara örnek olarak Kazıcı

kepçeler, ekskavatör kovaları, çeneli kırıcılar, döner kaya kırıcıları ve silindir kırıcılar verilebilmektedir.

Düşük Gerilmeli Abrasif Aşınma: Düşük gerilim, hafif yüklenmiş abrasif parçacıklar aşınma yüzeyine çarptığı ve yüzey boyunca hareket ettiği takdirde mikroskobik ölçekte kesme ve pulluklama meydana gelir. Sulu ya da nemli çevre koşullarında, korozyon toplam aşınma miktarına katkıda bulunabilir. Her iki durum da düşük gerilimli abrazyon aşınmanın birincil türüdür ve metal kalınlığının aşınma oranı düşük gerilim altında günden güne azalır. Düşük gerilimli çizici abrasif aşınma mikro kesme, mikro pulluklama, mikro yorulma ve mikro çatlak şeklinde dört farklı mekanizma şeklinde karşımıza çıkmaktadır. Yüksek gerilmeli öğütücü abrazyona göre aşındırıcı partikül daha küçük boyuttadır ve aşındırıcı partikül üzerine etkiyen kuvvet, partikülün ezilmesine veya kırılmaya sebebiyet vermez. Düşük gerilmeli abrasif aşınmadan korunmak için orta sertliğe sahip ve aşınmaya dayanıklı bir malzeme seçmek yeterli olur [82, 105]. Düşük gerilmeli abrasif aşınma; kesme, yorulma, çatlak ve pullanma olarak kendini göstermektedir ve Şekil 3.7.' de gösterilmektedir.



Şekil 3.7. a) Düşük ve orta gerilimli abrasif aşınma, b) yüksek gerilimli abrasif aşınma [106]

- a) **Kesme;** abrasif aşınma mekanizmaları önceden direkt olarak gösterilemiyordu. Ancak gelişen teknoloji ile birlikte Taramalı Elektron Mikroskopunun gelişmesi ile abrasif aşınma ayrıntılı olarak incelenebilmektedir. Taramalı Elektron Mikroskobu ile analizde aşınma izleri, mikro boyuttaki kesme hatları kendini göstermektedir ve kesme mekanizması iki cisimli abrasif aşınmaya benzerlik göstermektedir. Sivri uçlu aşındırıcı, aşınan malzeme üzerinde hareket ederek yüzeyden parçacık kopmasına sebep olur [104].
- b) **Yorulma;** Malzeme yüzeyinin belli bir alanında aşındırıcılar tarafından hasara neden olan sürekli gerilme ile metal de yorulma görülür ve abrasif aşınma formu yavaş veya daha

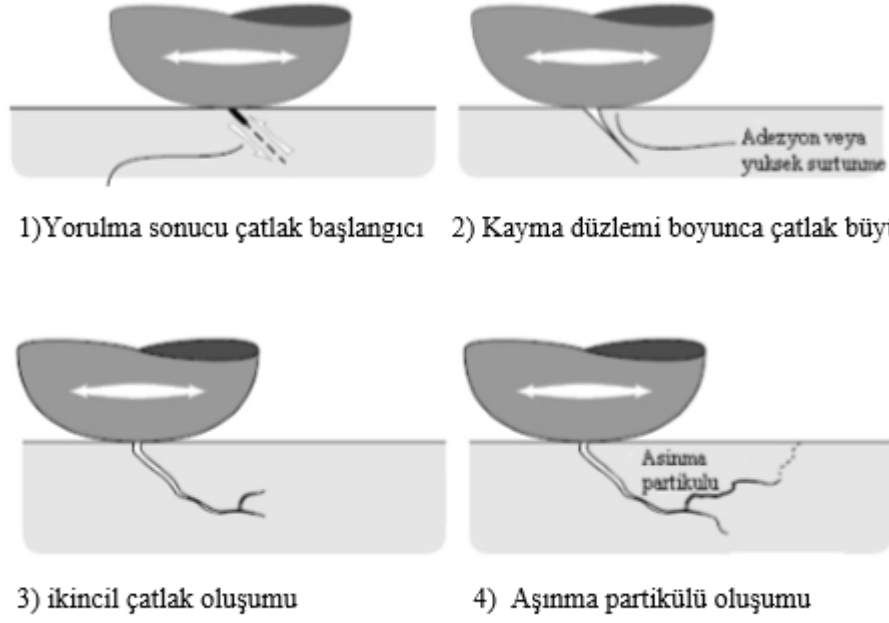
yumuşak olduğunda malzeme tekrarlı deformasyona uğrar ve aşınma parçacıkları yüzeyde görülür [107].

- c) **Pulluklanma;** Pulluklama, aşınma parçacıkları üretmeden metalin yer değiştirmesine denilmektedir. Kayma hareketi eğer iki yüzey birbirlerine eğimli ya da eğrisel ise temasta bulunur. Pulluklamanın sonucu malzeme yüzeyinden bir miktar hacim kaybı olur ve abrasif oyuk zayıf olan bu yüzeyde kendini gösterir. Tek temas noktalı sert, keskin aşındırıcının yüzeye teması söz konusu olduğunda yüzey üzerinde pulluklama ile oyuk oluşur. Pulluklama durumunda aşınma parçacığı tek kayma hareketiyle oluşamaz bunun için biraz tekrar ediyor olması gerekir [104].

3.4.3. Yorulma ve Tabakalı (Delaminasyon) Aşınması

Adhezif ve abrasif aşınmada sürekli bir temas mevcut iken, çevrimsel bir temasın söz konusu olduğu durumlarda, farklı bir aşınma mekanizması ortaya çıkar ve çevrimsel temaslar sonucu oluşan aşınma türüne yorulma aşınması denilmektedir.

Eğer çevrim sayısı yüksek ise, yüksek çevrimli yorulma aşınması, çevrim sayısı düşük ise düşük çevrimli yorulma aşınmasının oluşur, dönen yapı elemanları için genellikle parçalar arasında elastik bir şekilde temas eder ve bu noktada ana aşınma mekanizması yüksek çevrimli yorulma aşınması meydana gelir. İki malzeme arasında plastik bir temas varsa yorulma aşınması pullaşma olarak görülür. Bu tip aşınma, yapı üzerinde tek bir çevrimde meydana gelmemekte, aşınmanın oluşabilmesi için tekrarlı bir çevrim olması gerekmektedir. Bir yorulma aşınması türü olan tabakalı (delaminasyon) aşınma, yüzey pürüzlerinin kayma noktalarında birbirleri üzerinde devamlı hareketi sonucu olan bir aşınma türüdür. Yüzeyin altında küçük çatlaklar meydana gelmesi görülür ve temas noktasının hemen altındaki üç eksenli basma gerilmesinden dolayı, çatlak çekirdeklenmesi olur. Yüzey yorulması çatlak oluşumu ve yüzeyde ilerleyişi Şekil 3.8.'de gösterilmektedir. Eğer çevrim devam ederse yük ile birlikte, deformasyon çatlakların büyümesine sebep olur ve komşu çatlaklar ile birleşerek büyür [108, 109]. Yorulma aşınmasına örnek olarak; yuvarlama hareketi yapan rulmanlı yataklarda, dişli çarklarda ve kam mekanizması gibi yüzeylerde görülür [110].

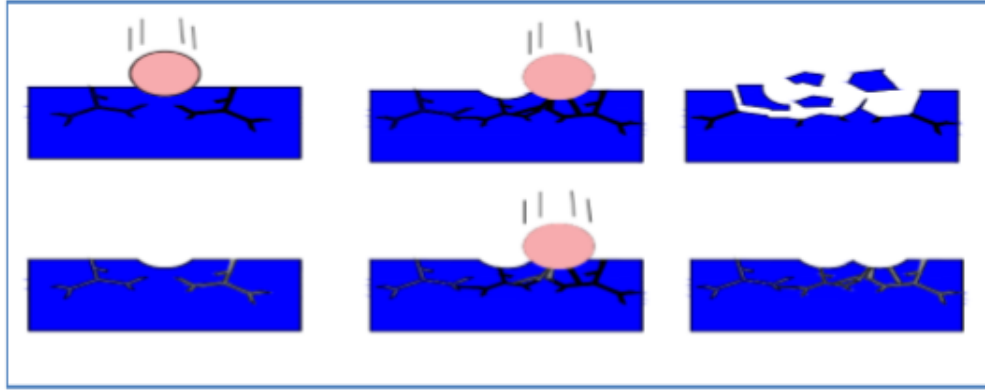


Şekil 3.8. Yüzey yorulmasında çatlak oluşumu ve ilerlemesi [108]

3.4.4. Eroziyon Aşınma

Eroziyon aşınma, abrasiv aşınmayla bazı yönlerden benzer özellik göstermektedir ancak burada çalışma mekanizması farklıdır. Sert partiküller yüzeyi kazımak yerine burada aşınma çarpma şeklinde gerçekleşmektedir ve bir diğer fark ise sert partiküllerin bağıl hareketleri katı yüzeye paralel olduğunda abrasiv aşınma, sert partiküllerin bağıl hareketleri yüzeye dik olduğunda ise çarpma yoluyla erozyon gerçekleşmektedir [111, 112].

Eroziyon aşınma denilince akla, karşı malzeme ile malzeme arasındaki tribolojik zorlamalardan dolayı sonucu oluşan kimyasal reaksiyonlar, malzeme yüzeyinin hava ile reaksiyonu girmesi sonucu meydana gelen oksit tabakaları aşınmayı azaltır. Fakat bu oksit tabakaları erozyon aşınması nedeniyle özelliklerini değiştirir. Böylece aşınmayı mekanizması hızlanmış olur. Metalik malzeme yüzeylerinde genellikle erozyon aşınması meydana gelmektedir [113]. Şekil 3.9' da erozyon aşınması gösterilmektedir.



Şekil 3.9. Erozyon aşınması [113]

Erozyon aşınması; katı partikül erozyonu, sıvı su damlası erozyonu, katı partikül taşıyan akışkan ortam erozyonu, kativasyon aşınması ve elektro erozyon olarak incelenebilmektedir.

Katı Partikül Erozyonu; sıvı ya da gaz ortamında hareketlendirilen aşındırıcı tanelerin ya da partiküllerin yüksek hızlarla bir katı yüzey üzerine sürekli çarpması sonucu darbe etkisiyle meydana gelen aşınmadır.

Sıvı Su Damlası Erozyon; hareket halindeki sıvı (su) damlarının yüksek hız yardımıyla bir katı yüzeyine tekrar edecek şekilde çarpması sonucu meydana gelen şok dalgalarının oluşturduğu tahribat sayesinde oluşan bir aşınma türüdür.

Katı Partikül Taşıyan Akışkan Ortam Erozyonu; yüksek hızlarda hareket halinde bulunan bir katının, kendisinden daha az yavaş olan su damlalarının tekrarlı çarpması sonucunda oluşan şok dalgalarının tahribatı neticesinde oluşan aşınmalardır.

Kativasyon Aşınması; genellikle su ve kalorifer borularında rastlanan bir aşınma türü olup, gaz kabarcıklarının yüksek basınçlar yardımıyla malzeme yüzeyinde tekrarlı bir şekilde patlaması ile oluşur.

Elektro Erozyon; katot ve anot şeklinde kutuplanan elektiriksel yüklü iki parça arasındaki akımsal boşalım etkisiyle meydana gelen aşınma türü olup, aşağıda belirtilen hasarların oluşmasıyla tanımlanabilir [113].

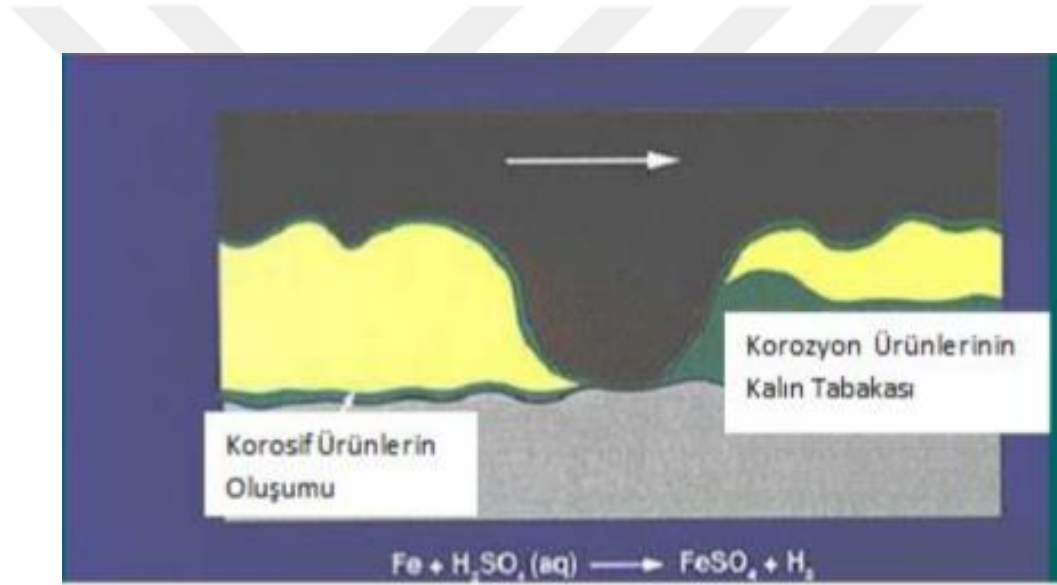
3.4.5. Korozyon Aşınması

Korozif bir ortam söz konusu olduğunda parçaları oluşturan metal ve alaşımlar bileşik oluşturmak için çevre ile kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyona girerler ve çeşitli bileşikler oluşturarak metalin içyapısında bir zayıflama yaratırlar. Oluşan bu bileşiklerin ana metalle bağlantıları zayıflar ve bileşikler ana metalden koparlar [114]. Korozyon aşınması, metallerde hem korozyon hem de aşınmanın birlikte meydana gelmesi şeklinde tanımlanabilir. Korozyonlu aşınmada meydana gelen malzeme kaybı, bu mekanizmaların ayrı ayrı meydana gelmesi halinde

ortaya çıkan malzeme kaybının toplamından daha fazladır. Korozyon aşınmasında, aşınma olayı iki kademedeyi gerçekleştirir:

Temas halindeki yüzeyler ortama reaksiyona girer ve reaksiyon ürünleri yüzeyde bir tabaka oluşturur,

Daha sonra, temas noktasında çatlak oluşumu ve/veya abrasif etkilerden dolayı reaksiyon tabakası hasara uğrar. Bu aşınma türünde olumsuz çevre koşulları çok önemlidir. Ayrıca korozyon aşınması sonucu oluşan korozyon ürünleri korozyon dolayısıyla aşınma hızını arttıran bir etkidir. Korozyon genel olarak mekanik aşınmaya neden olmakta, ancak mekanik aşınma her zaman korozyon mekanizmasını tetiklememektedir. Korozyon aşınmasında 3 cisimli abrasif aşınma mekanizmasına bağlı olarak aşınma oranının artmasıyla kayan ve sürtünen yüzeyler arasındaki sert oksit tabakaları aşındırılmış olur. Şematik korozyon aşınma gösterimi Şekil 3.10' de gösterilmektedir.



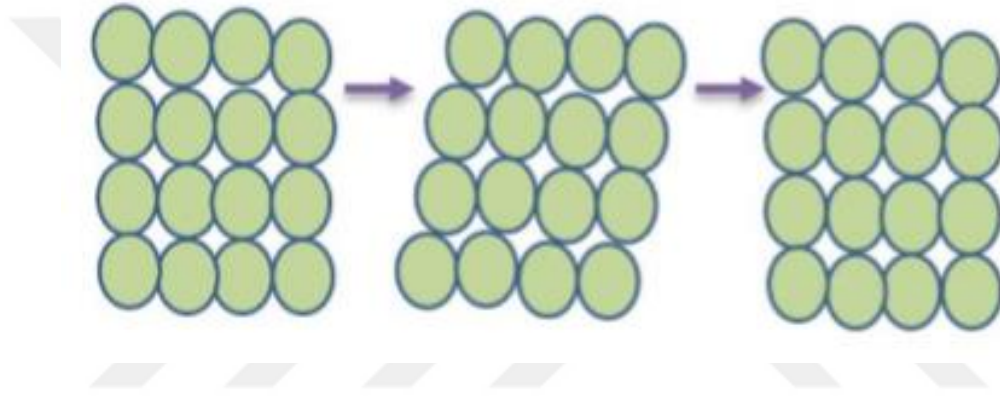
Şekil 3.10. Korozyon aşınma [88]

Sıcaklık ve ortama bağlı olarak korozyon aşınma sekiz farklı şekilde meydana gelebilir [88].

- ✓ Oksitlenme
- ✓ Karbürlenme ve metal tozlaşması
- ✓ Nitrürlenme
- ✓ Halojen korozyonu
- ✓ Sülfürlenme
- ✓ Kül (tuz) çökeleği korozyonu
- ✓ Erimiş tuz korozyonu
- ✓ Sıvı metal korozyonu

3.5. Sürtünme

Sürtünme harekete karşı gösterilen direncin adına denilir. Sürtünme, temas eden ve birbirine göre bağıl hareket yapan makine parçalarında harekete karşı olan direncin adı olarak tanımlanabilir [115]. Burada bahsedilen mekanik direncin asıl sebebi, temas halindeki yüzeylerde kayma ile birlikte kafes yapısındaki hareketlenmedir. Birbiriyle temas eden ve kristal kafes yapıları, atomik düzeyde dengede olan yüzeylerin birinden diğerine kayma gerilmesi uygulanır. Bu kayma gerilmesi kristal kafes de elastik deformasyona (Şekil 3.11.) sebep olur. Kayma şiddeti artış gösterdikçe kararsız olan kristal kafes yapısı yeni oluşan yapıda, yeni bir denge konumuna geçiş yapar [116].



Şekil 3.11. Kristal kafes yapısının elastik deformasyonu [116]

3.5.1. Sürtünme Katsayısı

Sürtünme katsayısı boyutsuzdur ve kullanılan malzemeye göre değişiklik gösterir. İki cisim arasındaki cisimlerin birbirine yaptığı kuvvetlerin oranı ile belirlenir [117].

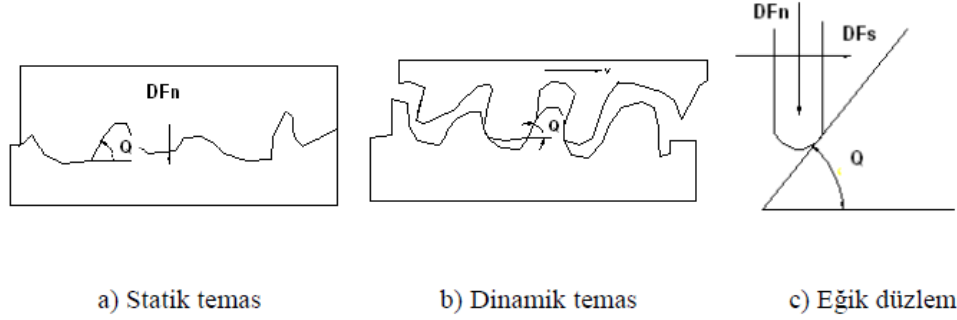
Sürtünme olayı gerçekleştiği sırada, sürtünmenin cinsini, kuvvetini ve sürtünmenin nasıl dağıldığını bilmek gerekir [118].

Sürtünmeyi açıklayan birçok teori vardır. Bowden ve Tabor'un kaynak bağları teorisi, bu teorilerden gerçeğe en yakın olanıdır. Temel olarak üç başlık altında toplanan bu teori maddeler halinde aşağıda sıralanmıştır [118].

- Sürtünme kuvveti belli temas ortamına bağlı değildir.
- Sürtünme kuvveti, normal yük ile orantılıdır.
- Kinetik sürtünme kuvveti hıza bağlı değildir ve statik sürtünme kuvvetinden azdır.

Bu teorilerden bir diğeri ise Amontons Coulomb isimli Fransız bir bilim adamı tarafından ortaya konulmuştur. Amontons'un teorisine göre cisimlerin üzerine uygulanan normal yükte artış meydana gelirse sürtünme kuvvetinde de artış gözlemlenir [119, 120]. Coulomb'a göre kayma hızının sürtünme kuvvetine bir etkisi olmadığını ve cisim hareket ettirmek için yeterli kuvvetten

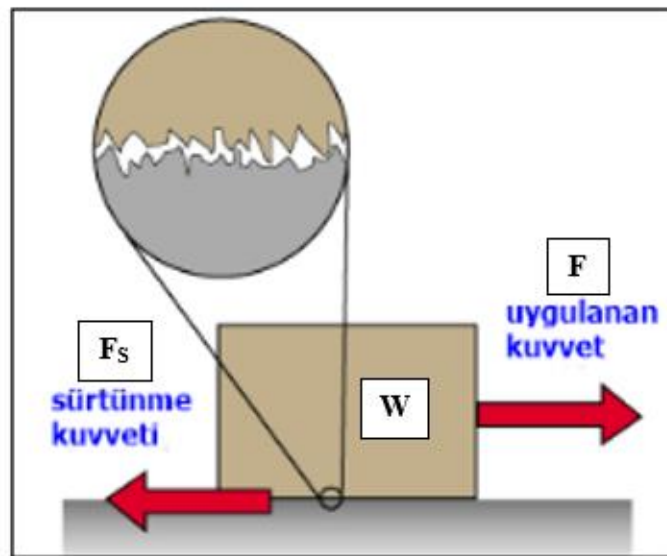
büyük olması gerektiğini savunmuştur [119, 120]. Coulomb' un sürtünme modeli Şekil 3.12.' de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Coulomb' un sürtünme modeli [121]

Şekil 3.12.' de gösterilen DF_n : normal kuvveti, DF_s : sürtünme kuvveti ve Q : pürüz taban açısını ifade etmektedir. Dinamik sürtünmede, statik sürtünmeye göre sürtünme kuvveti daha azdır. Bunun sebebi ise pürüzler temas sırasında birbirini sıçrayarak hareket ederler. Statik sürtünmede bu durum tam tersidir pürüzler birbirini tam kavradığından ötürü daha fazla sürtünme kuvveti gerektirir. Sonuç olarak statik haldeki sürtünme kuvveti, dinamik haldeki sürtünme kuvvetinden daha büyüktür [121].

Şekil 3.13.'de gösterilen F kuvveti uygulanmış, ağırlığı W kadar olan cisimde kayma olayı gerçekleşmez. Bunun nedeni ise temas eden bölgede statik sürtünmenin, cisme uygulanan F kuvvetine eşit olmasıdır ve buna da Newton'un etki-tepki prensibi denir [119].



Şekil 3.13. Sürtünme katsayısının tanımı [122]

Eşitlik (3.2)' de verilen Newton'un etki-tepki prensibine göre;

$$F = F_s \quad (3.2)$$

Eşitlik (3.3)' de verilen sürtünme kuvveti (F_s), normal yük altında bağıl hareketi olan iki cismin birbirine temas eden yüzeyleri arasında, normal kuvvetin zıt yönünde meydana gelir.

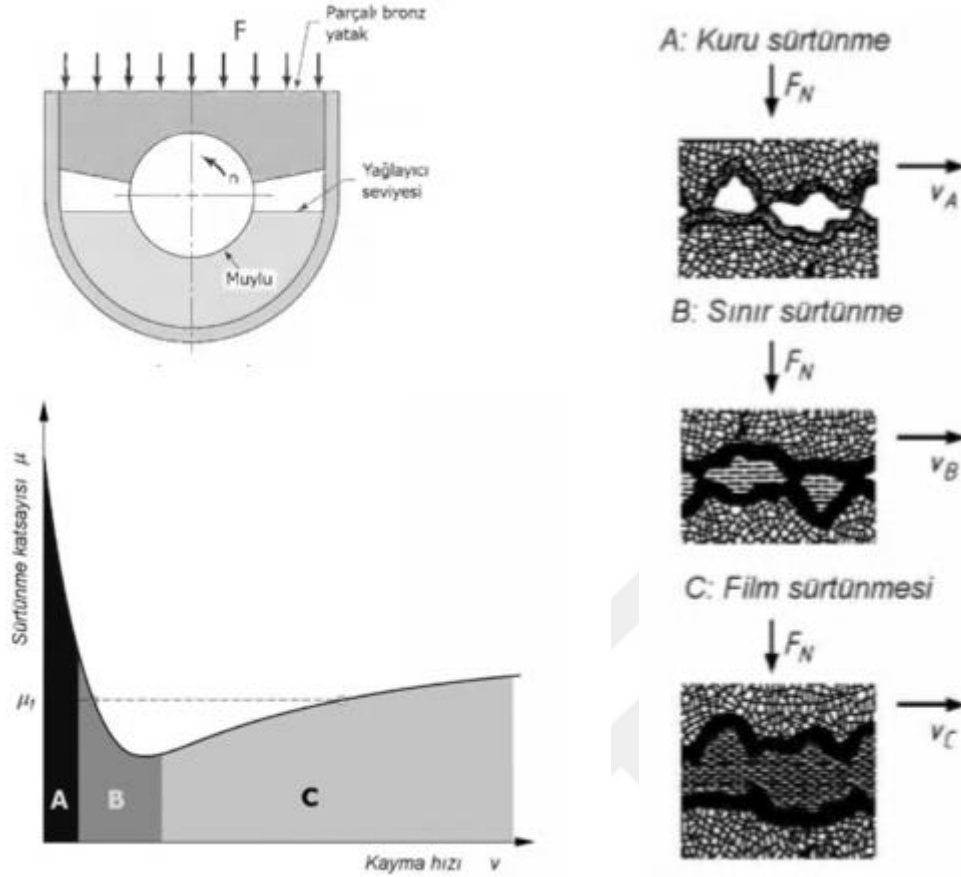
$$F_s = \mu \cdot W \quad (3.3)$$

Buradan çıkan sonuca göre; birinci olarak F_s , kayma hızından ve bulunduğu yerde geometrik alandan bağımsızdır. İkinci olarak F_s , normal yük ile doğru orantılıdır. Üçüncü olarak ise cismi hareket ettirmek için gereken kuvvet, harekete devam etmek için gereken kuvvetten daha büyüktür [119].

3.5.2. Sürtünmenin Sınıflandırılması

Sürtünme, yüzeylerin yağlanma durumuna (yüzeysel şartlara) göre ve bağıl hareketine (dinamik şartlara) göre sınıflandırılır. Yağlama durumuna göre sürtünme; katı cisim sürtünmesi, sıvı cisim sürtünmesi, katı yağlı sürtünme, gaz sürtünmesi, sınır sürtünmesi ve tüm şartların beraber görülebildiği sürtünme olarak sınıflandırılabilir. Bağıl hareketlere göre sürtünmede ise; kaymalı sürtünme, yuvarlanmalı sürtünme ve kaymalı-yuvarlanmalı sürtünme olarak sınıflandırılabilir.

Birbiri ile izafi hareket yapan iki yüzeyi yük altında kaydırabilmek için sürtünmenin etkisiyle meydana gelen bir direnci, aşması gerektiğini ve yüzeylere yağlayıcı bir madde uygulanmasıyla birlikte meydana gelen bu direncin azaldığı herkesçe yapılan deneyler sonucu elde edilen bir deneyimdir. Radyal bir kaymalı yatağın üç farklı mekanizmada çalışan sürtünmesi Stribeck tarafından 1901 yılında ortaya konulmuştur ve Şekil 3.14.' de gösterilmiştir. Stribeck eğrisi dönme hızı ve sürtünme katsayısı arasındadır [100].



Şekil 3.14. Stribeck eğrisi [100]

Stribeck eğrisinde meydana gelen sürtünme çeşitlerinin; kuru sürtünme, sınır sürtünmesi ve film sürtünmesi gibi isim verebilmek için bir oran kullanılır. Eşitlik (3.4)' de verilen bu oran birbirine temas yüzeylerde minimum yağ filmi kalınlığı ve birbirine temas eden yüzeylerden alınan ortalama yüzey pürüzlülüğünü içermektedir [100].

$$\lambda = \frac{h_{m_i} \cdot n}{R_a} \quad (3.4)$$

Eşitlik (3.5)' de verilen bu oranda verilen “ h_{mi} ” minimum yağ filmi kalınlığını, “ R_a ” ise ortalama pürüzlülüğü ifade etmektedir. Eğer iki yüzeyin pürüzlülüğü bir birinden farklı değerler ise

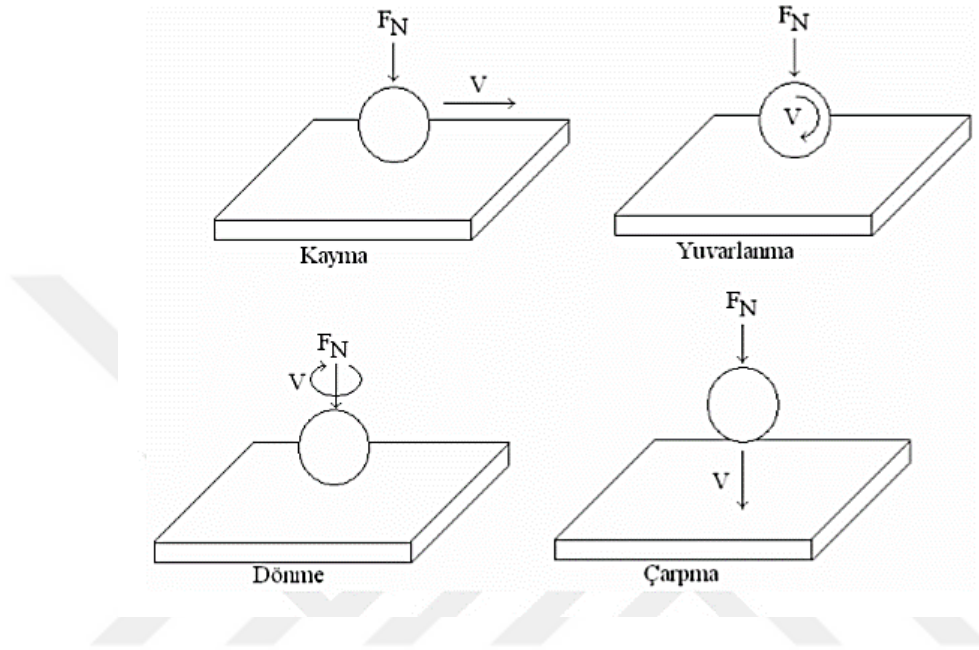
$$R = 0,5 \cdot (R_{a1} + R_{a2}) \quad (3.5)$$

Ortalama pürüzlülük yukarıdaki formül ile hesaplanır. Sonuç olarak hesaplanan “ λ ” değerlerine göre;

- $\lambda < 0,2$; Sınır sürtünme hali

- $0,2 < \lambda < 3$; Karışık film sürtünmesi (çoğunlukla film yüzeyde mevcut)
- $\lambda > 3$; film sürtünmesi şeklinde elde edilen değerler ile isimlendirilmektedir [100].

Sürtünme sırasında birbirine temas eden hareketli yüzeylerde kayma, yuvarlanma, dönme ve çarpma gibi hareket meydana gelir. Bu sürtünme çeşitleri Şekil 3.15.' da gösterilmektedir [89].



Şekil 3.15. Sürtünme çeşitleri [89]

a) Kayma Sürtünmesi

Sürtünme sırasında gerçek temas sadece küçük pürüzlerin uç noktalarında görülür. Birbirine temas eden ya da birbiri üzerinde kayma hareketi yapan iki cisim, hassas bir şekilde işlenmiş olsa bile gerçek temas alanı görünür temas alanının 0.01 ile 0.1' i kadardır. Yüzeylerde kayma esnasında teğetsel kuvvetin artışıyla, uç noktalarda temas eden kısımlar birbiri üzerinde kaymaya başlar. Bu durumda eşitlik (3.6)' da verilen; “S” malzemenin kesme gerilmesi, “A_r” gerçek temas eden alan ve “F_s” kesme için gerekli olan sürtünme kuvveti olarak tanımlanmıştır.

$$F_s = A_r \cdot S \quad (3.6)$$

b) Yuvarlanma Sürtünmesi

Yuvarlanma sürtünmesi, üzerinde yük bulunan bir silindirin veya kürenin düz bir kütle yüzeyinde sürtünmesi sonucunda meydana gelmektedir. Yük altında olan silindir veya kürenin yuvarlanma hareketi yapması ile sürtünme direnci, silindirin merkezine uygulanmış olur. Eşitlik (3.7)' de verilen orantıda “k” malzeme ve yüzey şartlarına bağlı sabit, “W” yük, “F_r” yuvarlanma sırasındaki sürtünme direnci, “D” silindir veya kürenin çapı ve “n, m” deneysel sabitlerdir [123].

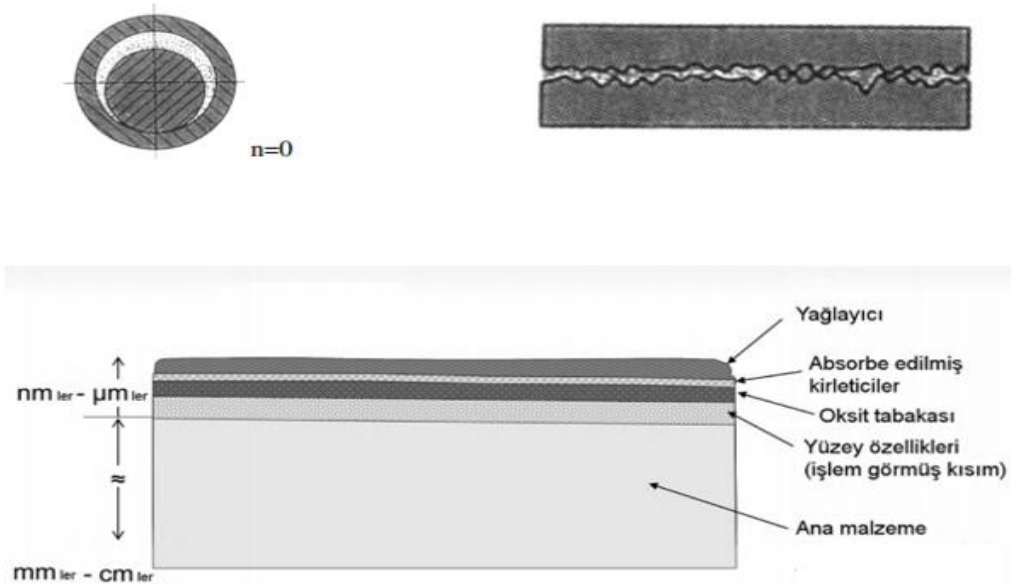
$$F_r = \frac{kW_n}{D_m} \quad (3.7)$$

Bağıl hareket yapan yüzeyler arasında bir yağlayıcı madde konulması veya konulmaması bakımından sürtünme kuru, sıvı ve sınır sürtünmesi olarak üç halde incelenmektedir [124].

c) Kuru Sürtünme

Kuru sürtünme, fiziksel olarak yalnızca vakumlu bir ortamda meydana gelebilir. Kuru sürtünme incelenirken yüzeylerin tamamen temiz olmadığı ve pürüzlü olduğu göz önünde bulundurulur. Kuru sürtünme sonucunda aşınma, malzemede sıcaklık artışı, enerjiden kayıp gibi olaylardan biri veya bir kaçı gözlemlenmektedir. Teoride kuru sürtünme " $F_s = \mu \cdot F_n$ " şeklinde ifade edilmektedir. Burada; F_s = sürtünme kuvveti, μ = sürtünme katsayısı ve F_n =cisme uygulanan normal kuvveti ifade etmektedir [125].

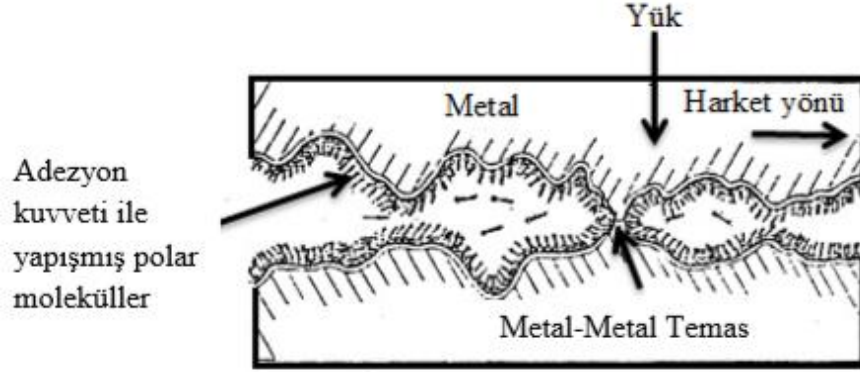
Birbiri ile temas halinde bulunan yüzeylerde, çevresel durumlardan ötürü su buharı, yağ oksit gibi tabakalar meydana gelmektedir. Bu tabakalar yüzeyden ancak kimyasal ve fiziksel yollarla temizlenebilir. Sürtünme mekanizması yüke maruz kalmadan önce Şekil 3.16.' de gösterildiği gibi aralarında bir bağ oluşur. Oluşan tabakalar arasındaki izafi hareket sonucunda metal-metal teması, bu bölgede soğuk kaynamaların oluşmasına sebebiyet vermektedir. Sürtünme esnasında bu kaynamalar ve bağlar gerçekleşmeye çalışan hareketi engeller. Bu hareketteki engellenmeden ötürü; yüzeyden parça kopmasıyla, makine elemanlarında oluşan deformasyon sonucu kullanılamaz hale gelmektedir [126].



Şekil 3.16. Kuru sürtünme halinde yüzeylerin durumu [100]

d) Sınır Sürtünmesi

Birbirine temas eden yüzelerde yağlayıcı madde olmasına rağmen sıvı sürtünme halinin gerçekleşmediği durumlarda meydana gelen sürtünme çeşididir [124]. Stribeck eğrisinden yola çıkacak olursak teorik kuru sürtünme ile film sürtünmesi arasında kalan bölge sınır sürtünmesi olarak adlandırılmaktadır ve Şekil 3.17.' de gösterilmektedir [100].

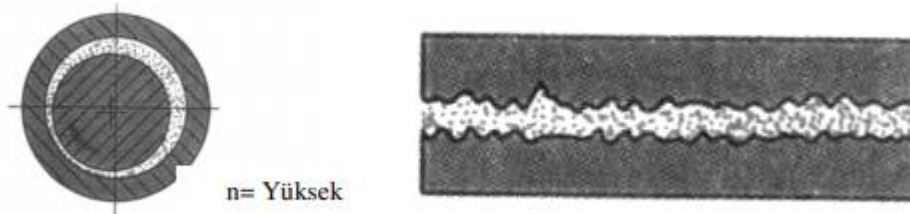


Şekil 3.17. Sınır sürtünmesi [126]

e) Sıvı Sürtünmesi

Bu sürtünme çeşidinde ise yüzeler tamamen birbirinden ayrılmış durumdadır. Bunun sebebi iki yüzey arasında birbirine değmeyi engelleyen yağ tabakası mevcuttur. Madeni yüzeyler ile direkt temasta bulunan yağ tabakası, adsorpsiyon ile malzeme yüzeylerine komple tutunmuş olduğu görülür [89].

Sıvı sürtünmede birbirine temas eden parçaların girinti ve çıkıntıları birbirine sürtmek yerine arada bulunan yağ tabakası ile sürtünme meydana gelmektedir. Tabi ki buradaki sürtünme kuru sürtünme ile kıyaslanacak olursa, yüzeylerin bir birlerinin hareketine karşı gösterdiği direnç çok daha azdır [127]. Şekil 3.18'de sıvı sürtünmesi gösterilmektedir.



Şekil 3.18. Sıvı sürtünme [127]

Sıvı sürtünmenin meydana gelişinde asıl rol yağ tabakasında oluşan basınçtır. Burada meydana gelen basıncı hidrodinamik ve hidrostatik olarak iki durumda nitelendirebiliriz. Hidrostatik sıvı sürtünme durumunda, dış kuvvetlerin dengeye gelmesi ile yüzeyleri birbirinden ayırmak için gerekli olan basınç pompa ile sağlanır. Burada meydana gelen basınç ile yağ yüzeyler arasına gönderilmiş olur. Birbiri ile izafi harekette olan tüm sistemlerde yüzeylerin kinematik ve geometrik özelliklerinden bağımsız olarak statik sıvı sürtünmesi uygulanabilir. Ancak hidrodinamik sıvı sürtünmesinde, yüzeylerin kinematik ve geometrik özelliklerine bağlı olarak arada bulunan yağ tabakasında bir basınç meydana gelir. Bu tür sürtünmede izafi hareketin başlamasında ve durduğuna kuru sürtünme ve sınır sürtünmesi oluşur [126].



4. MATERYAL VE METOT

Tez çalışmasının temel amacı, Al6013 Alüminyum alaşımlı malzemenin, hidrotermal yöntemle kaplanması ve bu yöntemle elde edilen hibrit kompozitin, karakterizasyonu ve metal-metal aşınma davranışının incelenmesidir. Öncelikle hibrit kompozitin eldesi için, hidrotermal yöntemle kaplama işlemi yapılmıştır. Alüminyum alaşımlı alt malzemeye; grafene ek olarak, farklı oranlarda takviye edilen uçucu kül ve geliştirilmiş perlit ile iki grup oluşturularak kaplama işlemi yapılmıştır. Yapılan deneyler sonrası kaplanan numunelere; Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Enerji yayımlı X-ışını Analizi (EDX), X-ışını Difraksiyonu (XRD), mikro-sertlik, yüzey pürüzlülüğü ve metal-metal aşınma deneyi gibi incelemeler yapılmıştır.

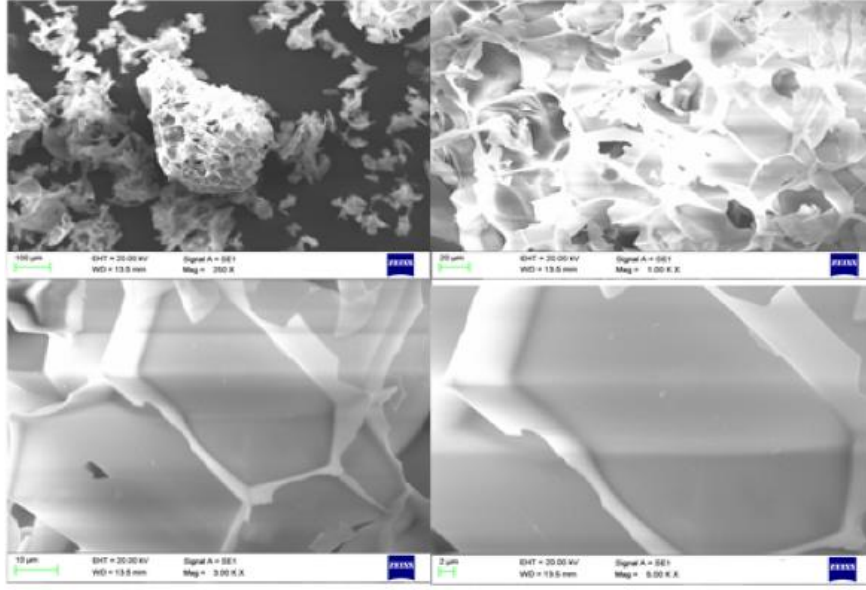
4.1. Materyaller

4.1.1. Toz Materyaller

Deneyde kullanılan, 5-10 µm boyutunda, 5-10 nm kalınlığında ve %99 saflıkta olan grafen ve 50 mikron boyutundaki geliştirilmiş perlit Nanografi Nano Teknoloji Bilişim İmalat ve Danışmanlık Ltd. şirketinden (Ankara) temin edilmiştir. Geliştirilmiş perlitte ait SEM görüntüsü Şekil 4.1' de ve kimyasal kompozisyonu ise Tablo 4.1' de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Geliştirilmiş Perlitin Kimyasal Kompozisyonu (%)

<i>Bileşik</i>	<i>İçerdiği % Oran</i>
SiO ₂	74
Al ₂ O ₃	14,33
K ₂ O	4,95
MgO	0,28
CaO	0,5
Fe ₂ O ₃	0,97
Na ₂ O ₃	2,9
TiO ₂	0,12
MnO ₂	0,07
SO ₃	0,03
FeO	Eser Miktar
Cr	Eser Miktar
Ba	Eser Miktar
PbO	Eser Miktar



Şekil 4.1. Genleştirilmiş perlite ait farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri

Deneyisel çalışmada kullanılan diğer bir malzeme ise uçucu küldür. Uçucu kül, İskenderun Atlas Termik Santralinden temin edilmiştir. Uçucu küle ait kimyasal kompozisyon Tablo 4.2.'de verilmiştir.

Tablo 4.2. Uçucu külün kimyasal kompozisyonu (%)

<i>Bileşik</i>	<i>İçerdiği % Oran</i>
SiO ₂	42,14
CaO	29,96
Al ₂ O ₃	13,38
Fe ₂ O ₃	4,64
MgO	1,78
K ₂ O	1,13
SO ₃	2,43
Cl	0,001
Serbest CaO	4,34
Kızdırma Kaybı	1,34

4.1.2. Al6013 Alüminyum Alaşımının Hazırlanması

Deneyde, Al6013 Alüminyum alaşımı alt malzeme olarak kullanılmıştır ve Simitçioğlu Metal Paslan. İnş. San. Ticltd. Şti. firmasından temin edilmiştir. Alüminyum alaşımına ait kimyasal

kompozisyon Tablo 4.3' de verilmiştir. Çekme mukavemeti (N/mm²), akma mukavemeti (N/mm²), yüzde uzama ve sertlik (HB) gibi mekanik özellikleri ise Tablo 4.4.' de gösterilmektedir.

Tablo 4.3. Al6013 Alüminyum Alaşımının Kimyasal Bileşimi (%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Diğerleri	Al
0,89	0,47	0,85	0,50	1,02	0,15	0,01	0,02	0,01	96,08

Tablo 4.4. Al6013 Alüminyum Alaşımının Mekanik Özellikleri

Çekme Mukavemeti (N/mm ²)	Akma Mukavemeti (N/mm ²)	% Uzama	Sertlik (HB)
390	360	6	110 - 120

Temin edilen Al6013 Alüminyum alaşımı 10x10x15 mm şeklinde kesilerek boyutlandırıldı. Numunenin boyutlandırılmadan önceki resmi Şekil 4.2' de gösterilmektedir. Kesilen numunelerin yüzeyi, 600, 800, 1000 ve 1200 numaralı zımpara kağıtlarıyla düzeltilmiştir. Kaplama işlemi yapılmadan önce yüzeyin aktif bir hale getirilmesi gerekmektedir. Yüzeyde aktiveleştirme yapılmazsa, kaplama altık malzeme yüzeyine ya düşük bağ mukavemeti oluşturur ya da bağlanamaz. Yüzey düzeltildikten sonra, kaplamanın yüzeye daha iyi nüfuz edebilmesi ve kaplama kalitesini arttırabilmek için yalnızca 240'lık zımpara kağıdı ile zımparalanıp, yüzey pürüzlü hale getirilmiştir. Yüzey pürüzlü hale getirildiğinde, parçacıklar pürüzlü yüzeylere daha sağlam tutunmaktadır [128]. Yüzey temizliğinin son aşamasında ise yüzeydeki istenmeyen kalıntıları gidermek için saf su ile yıkandı ve etil alkol ile silinerek kaplamaya hazır hale getirildi.



Şekil 4.2. Al6013 Alüminyum alaşımı

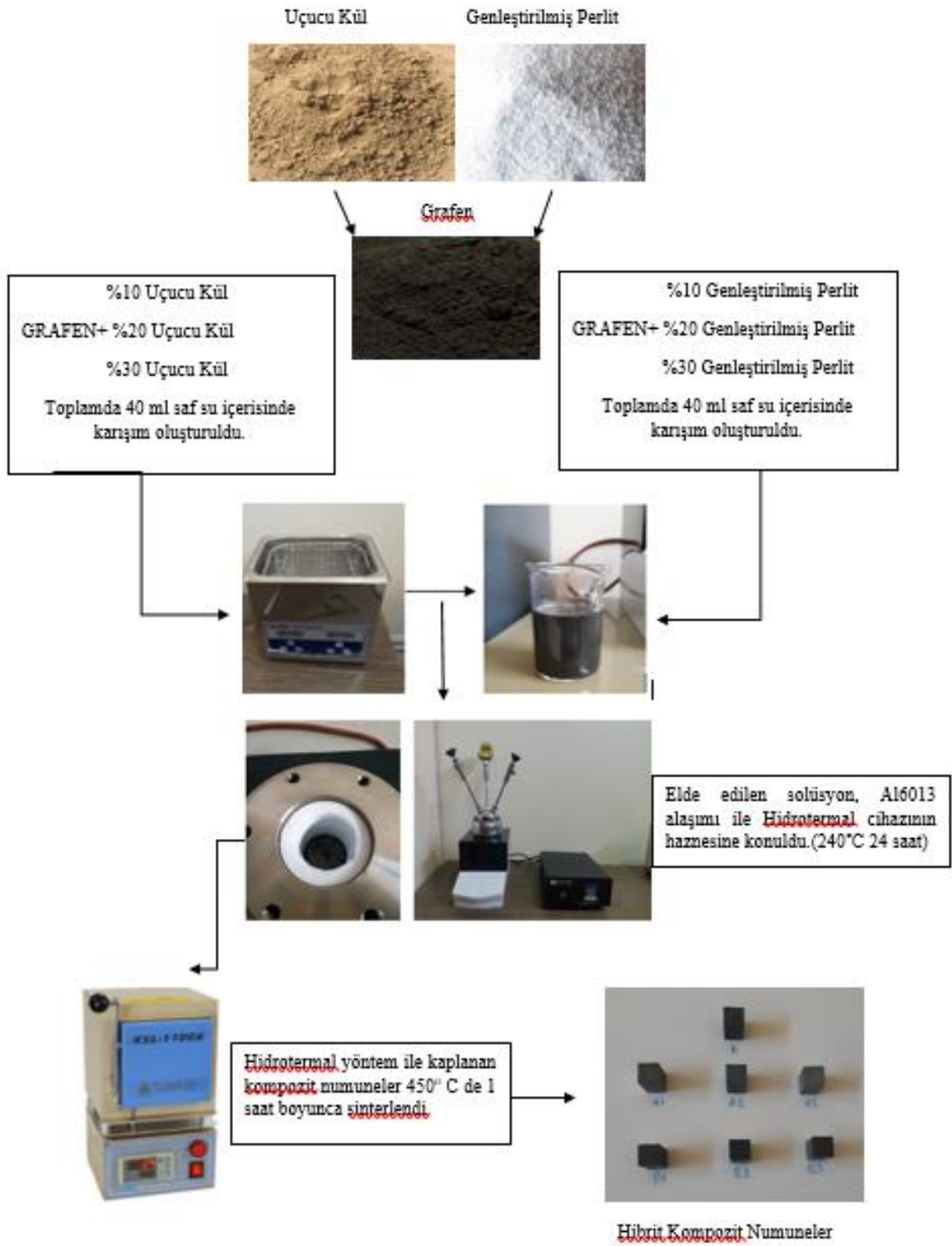
4.2. Deneyde Kullanılan Hidrotermal Yöntem

Bu çalışmada, Fytronix Elektronik Teknolojileri A.Ş. firması tarafından üretilen Fytronix marka hidrotermal cihazı ile numuneler kaplanmıştır. Bu cihaz, bir adet sıcaklık ve zaman kontrol paneli ve bir adet hidrotermal reaktöründen oluşmaktadır. Hidrotermal reaktörü paslanmaz çelikten imal edilmiştir ve reaktörün iç kısmı 100 ml' lik bir teflon kabın girebileceği şekildedir. Sistem, iç basıncını sıcaklık ve çözelti hacmine göre otomatik olarak ayarlamaktadır. Reaktör kapağında, gaz giriş ve çıkışını sağlamak için iki adet vana ve bir adet basıncı gösteren dijital göstere yer almaktadır. Reaksiyon süresi tamamlandığında sistem, hava soğutma sistemi tarafından otomatik olarak soğutulmaktadır.

Kaplama işleminin yapılabilmesi için öncelikle grafen, uçucu kül ve genişletilmiş perlit tozları ile farklı kombinasyonlarda solüsyonlar hazırlanmıştır. Deneyde kullanılan tüm numunelerde grafen sabit oranda kullanılmıştır. Kompozit kaplamanın solüsyonları, iki grup oluşturularak hazırlanmıştır.

- İlk aşamada kontrol numunesi için, 40 ml saf su içerisine % 0,1 grafen eklenip manyetik banyoda karıştırılmıştır (K).
- Birinci grup; iki ayrı beher içerisinde eşit miktarda bulunan 20 ml saf su içerisine %0,1 grafen ve farklı kombinasyonlar da ağırlıkça %10, 20 ve 30 oranında uçucu kül takviye edilip 30 dakika boyunca manyetik banyoda karıştırılmıştır (A serisi).
- ikinci grup; iki ayrı beher içerisinde eşit miktarda bulunan 20 ml saf su içerisine %0,1 grafen ve farklı kombinasyonlar da ağırlıkça %10, 20 ve 30 oranında genişletilmiş perlit takviye edilip 30 dakika boyunca manyetik banyoda karıştırılmıştır (B serisi).

Birinci grup (A serisi) ve ikinci grup (B serisi) için hazırlanan kaplama solüsyonlarının devamında, her grup numuneleri kendi içerisinde birbirine ilave edilip 30 dakika daha manyetik banyoda karıştırılmıştır. Toplamda her numune için ayrı ayrı 40 ml kompozit kaplama solüsyonu elde edilmiştir. Yüzey temizliği yapılan altlık malzeme Al6013 Alüminyum alaşımı hidrotermal cihaza yerleştirilmiş ve kaplama solüsyonu ilave edilmiştir. Hidrotermal kaplama işlemi için cihaz 240°C sıcaklıkta ve 24 saat süre ile çalıştırılmıştır. Bütün numunelerde kaplamanın yüzeye daha iyi tutunması ve kaplama kalınlığını arttırabilmek amacıyla hidrotermal cihaz içerisinde aynı şartlar altında 3 kez kaplama işlemine tabi tutulmuştur. Hidrotermal kaplama işlemi tamamlanan numuneler 450° C' de 1 saat boyunca MTİ Corporation KSL-110X marka fırın ile sinterleme ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Kaplanan numunelere ait bilgi Tablo 4.5' de verilmiştir. Şekil 4.3' de gösterilen deneysel akım şemasında, kaplama hazırlığında kullanılan solüsyon ve cihazlara ait görseller verilmiştir.



Şekil 4.3. Numune üretimi akım şeması

Tablo 4.5. Numunelere uygulanan kaplamanın içerikleri ve kodları

K	Grafen		
A1	%0,1 Grafen + %10 Uçucu Kül	B1	%0,1 Grafen + %10 Genleştirilmiş Perlit
A2	%0,1 Grafen + %20 Uçucu Kül	B2	%0,1 Grafen + %20 Genleştirilmiş Perlit
A3	%0,1 Grafen + %30 Uçucu Kül	B3	%0,1 Grafen + %30 Genleştirilmiş Perlit

4.3. SEM ve EDX Analizi

Yapılan deneysel çalışmada; sadece grafen ile kaplanan kontrol numunesi (K), farklı oranlardaki uçucu kül takviyeli numuneler (A1, A2 ve A3) ve farklı oranlardaki perlit takviyeli numunelere (B1,B2 ve B3) SEM ve EDX analizi yapılmıştır. Bu analizi yapmak için Şekil 4.4.' de gösterilen ZEISS marka EVA/ MA10 model taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Ayrıca aynı numunelerin yan kesitinden görüntü alınarak ortalama kalınlıkları ölçülmüştür.



Şekil 4.4. Taramalı elektron mikroskobu

4.4. X-Işını Difraksiyonu (XRD) Analizi

X- Işını kırınım cihazı ile minerallerin, kristal ve amorf malzemelerin, organik ve inorganik malzemelerin, ince filmlerin ve polimerlerin nitel ve nicel incelemeleri yapılabilmektedir. Bunların yanında ince film ve kaplamalarda tabaka kalınlığı ve stres ölçümleri yapılabilmektedir. XRD analizi ile malzemedeki kristal yapıya zarar vermeden ölçüm yapılmaktadır [129]. Numunelerimizden, Şekil 4.5' de gösterilen PANalytical Empyrean marka cihaz ile Erzurum

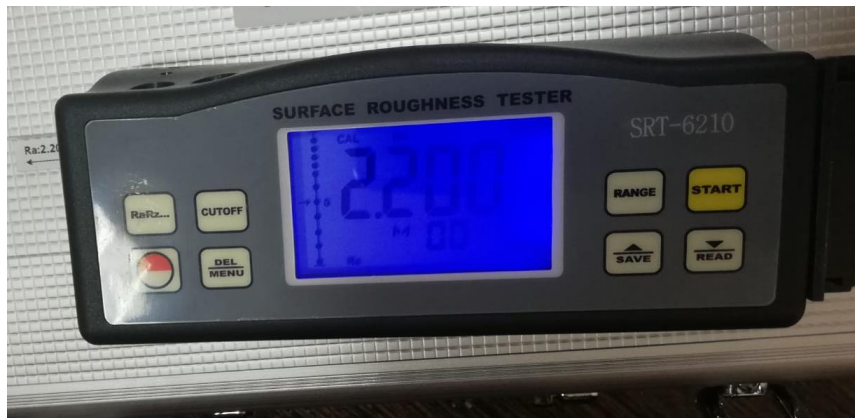
Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinden (DAYTAM) analiz alınmıştır. XRD analizi 5kV/40mA' de her bir numune için 4°/dk tarama hızında, 2θ-θ ve 10-90° açı aralığında yapılmıştır. Kaplama işlemi sonucu elde edilen hibrit kompozit kaplamaların A2, B2 ve B3 kodlu numunelerden XRD analizi alınmıştır.



Şekil 4.5. X-Işını difraksiyon cihazı

4.5. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

Hibrit kompozitlerden yüzey pürüzlülüğü, DTI-SRT-6210 marka Surface Roughness Tester portatif cihaz ile alınmıştır. Yüzey pürüzlülüğü cihazına ait resim Şekil 4.6.' da gösterilmiştir. Al6013 alaşımının kaplamadan önce ve kaplama işleminden sonra yüzey pürüzlülüğü alınmıştır. Ölçüm yapılırken oluşabilecek hataları önleyebilmek amacıyla 5 defa ölçüm alınıp ortalamaları hesaplanmıştır.



Şekil 4.6. Portatif yüzey pürüzlülüğü cihazı

Yüzey pürüzlülüğü alınırken öncelikle cihaz kalibre edilir ve numune düz bir şekilde zemine yerleştirilir. Cihazın üzerindeki ölçüm ucu numunenin yüzeyine paralel olacak şekilde konumlandırılmıştır. Cihaza başla komutu verildikten sonra ölçüm ucu numune üzerinde yatay bir şekilde ilerleyerek ölçümünü tamamlamıştır. Ölçüm ucundaki elmas numune üzerinde dikey olarak aşağı ve yukarı giderek pürüzlülük sonucu Ra, Rz, Rq ve Rt değerleri ekrandan okunarak kaydedilmiştir. Kaydedilen veriler Tablo 4.6’ da gösterilmiştir. Buradaki Ra= Aritmetik ortalama sapma, Rz (JIS)= 5 tane en yüksek 5 tane en alçak noktanın ortalaması, Rt= Tüm ölçüm uzunluğu için maksimum yükseklik ile maksimum derinliğin toplamı ve Rq= Aritmetik ortalama sapsmaların karekökünü ifade eden parametrelerdir.

Tablo 4.6. Numunelerden Alınan Yüzey Pürüzlülüğüne Ait Ra, Rz, Rq ve Rt Değerlerinin Ortalaması

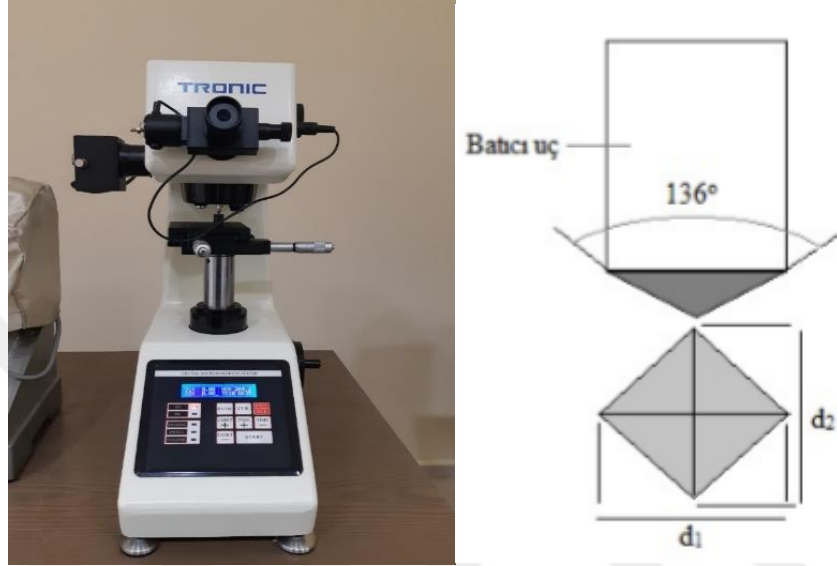
	Ra	Rz	Rq	Rt
Al6013	0,197	0,559	0,261	0,565
K	0,593	2,003	0,690	2,077
A1	0,908	2,568	0,955	2,242
A2	0,913	2,583	0,961	2,255
A3	0,954	2,697	0,879	2,807
B1	1,384	0,445	1,289	0,372
B2	1,292	3,657	3,848	3,048
B3	1,315	3,720	1,285	3,647

4.6. Mikro-Sertlik Ölçümleri

Vickers sertlik testi, yumuşak malzemeler, özel yöntemlerle sertleştirilmiş çok sert malzemeler gibi birçok malzemenin sertlik ölçümünde kullanılabilir. Malzemenin sertliği ölçülürken; parçanın yüzeyine, tabanı kare piramit olan bir ucun yük ile batırılması ve yük kaldırıldıktan sonra meydana gelen izin köşegenlerinin ölçülmesidir. Kullanılan elmas kare piramit uç, 136° tepe açıdadır. Kare piramit ucun, malzeme kalınlığı ve cinsine bağlı olarak seçilen yük ile malzeme yüzeyinde oluşan izin optik olarak ölçülme esasına dayanır. Piramidin bıraktığı izin köşegeni (d), her iki köşegen uzunluğunun mikroskopla ölçülmesinde ve ortalamasının alınması ile tespit edilmektedir. Yüzeyde oluşan izin köşegeni ile vickers sertliği Eşitlik 4.1 deki gibi hesabı yapılmaktadır. Vickers sertlik de uygulanan yük F, ortalama iz çapı ise d (mm) dir [130].

$$HV = 1,854 \left(\frac{F}{d^2} \right) \quad (4.1)$$

Hidrotermal kaplama yöntemiyle elde edilen hibrit kompozitlerin mikro-sertlikleri Şekil 4.7.' de gösterilen Vickers mikro-sertlik TRONIC test cihazı kullanılarak ölçümleri yapılmıştır. Hibrit kompozitlerden mikro-sertlik ölçümü alınırken, 0,98 N bir yük ile 10 saniye boyunca uygulanmıştır. Yüze uygulanan yükün etkisiyle meydana gelen iz üzerinden ölçümler tamamlanmıştır.



Şekil 4.7. Vickers mikro-sertlik ölçüm cihazı

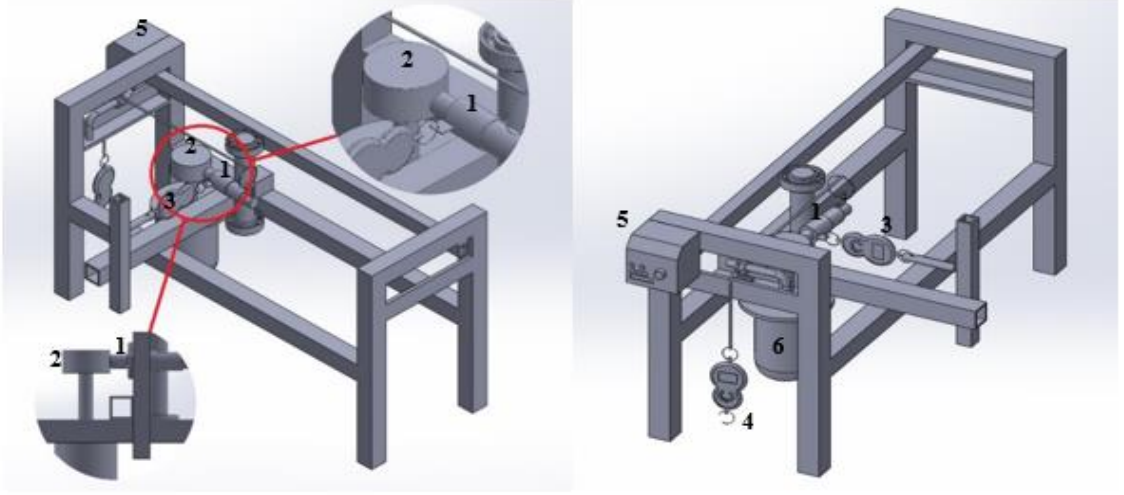
Mikro-sertlik alınırken oluşabilecek hataları önlemek amacıyla her numuneden 6 kez ölçüm alınmıştır ve bu ölçümlerin ortalaması alınarak gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Numunelerden alınan mikro-sertlik değerleri Tablo 4.7' de gösterilmiştir.

Tablo 4.7. Mikro-sertlik değerleri

	1 (HV)	2 (HV)	3 (HV)	4 (HV)	5 (HV)	6 (HV)	Ortalama (HV)
K	189.9	197.8	174.3	157.6	199.4	176.3	182.55
A1	173.6	235.5	197.8	219.6	191.5	238.5	209.41
A2	211.3	206.1	238.7	212.2	233.4	201.9	217.26
A3	344.9	364.3	383.2	358.2	340.1	360.4	358.5
B1	250.9	269.2	250.9	237.6	260.4	258.2	254.53
B2	289.5	267.9	275.7	289.5	271.7	290.9	280.86
B3	381.0	401.2	354.0	350.6	389.8	370.4	374.5

4.7. Aşınma Testi

Kompozit kaplamaların aşınma davranışları, metal-metal aşınması altında incelenmiştir. Bunun için Fırat Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde tasarlanan aşınma deney düzeneği kullanılmıştır. Aşınma testi düzeneğine ait Solid Works çizimi Şekil 4.8’ da gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Aşınma düzeneğine ait teknik resim

Solid Works’ ile çizilen aşınma deney düzeneğinde numaralandırma yapılmış parçalar aşağıda verilmektedir;

1. Numune Tutucu
2. Döner Çelik Disk
3. Elektronik Dijital El Kantarı (numune yüzeyine uygulanan dik kuvveti ölçmek için)
4. Elektronik Dijital El Kantarı (numuneye uygulanacak yükün asıldığı kol)
5. İnverter
6. Redüktör

Aşınma deney numuneleri, dikdörtgenler prizması şeklinde ve 10mm x 10mm x 15mm boyutlarındadır. Aşınma deney düzeneği, plaka-silindir (block-ring) sistemine göre çalışmaktadır. Metal-metal aşınmaya uygun olacak biçimde karşı aşındırıcı yüzey olarak SAE 1050 çeliğinden üretilmiş çelik diskler seçilmiştir. Çelik diskin ortalama sertliği Rc 55 dir. Yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi numune sabit ve çelik disk döner durumdadır. Aşınmaya tabi tutulan her deney numunesi için ayrı çelik disk kullanılmıştır. Böylece yapılan aşınma deneyi daha sağlıklı hale getirilmiştir.

Aşınma sonucu kütle kaybını hesaplayabilmek için 4.2’ de verilen eşitlikten faydalanılmıştır. Bu eşitlikteki Δm ; kütle kaybını, m_i ; numunenin aşınmadan önce kütlesi ve m_s ; numunenin aşınmadan sonraki kütlesini vermektedir.

$$\Delta = m_i - m_s \quad (4.2)$$

Kompozit kaplama yapılan deney numuneleri, cihaza bağlanmadan önce ve aşınma testi yapıldıktan sonra 10^{-5} gr ağırlığa duyarlı hassas terazide tartılmıştır. Numunelerin aşınmadan önce ve sonraki kütleleri Tablo 4.8’ de gösterilmiştir. Bütün numunelere uygulanan aşınma testi; 5N yük altında, 250 dev/dk sabit dönüş hızında, toplamda 1000 devirde ve yaklaşık olarak 200 m yol ile tamamlanmıştır. Deney düzeneğinde numuneye uygulanan dik kuvveti 20 gr ölçüm hassasiyetli WeiHeng marka taşınabilir elektronik dijital el kantarı ile ölçülmüştür. Aşınma testi boyunca numune yüzeyine uygulanan dik kuvvet değerleri kaydedilerek sürtünme katsayısı hesaplanmış ve grafiklendirilmiştir.

Tablo 4.8. Numunelerin; aşınma sonrası kütle farkı değerleri

	m_i Aşınmadan Önceki Kütlesi (gr)	m_s Aşınmadan Sonrası Kütlesi (gr)	Δm Kütle Farkı (mg)
Al6013 Alaşımı	4,53241	4,33121	201,2
K	4,35957	4,16067	198,9
A1	4,12201	4,12147	0,54
A2	4,11855	4,11792	0,63
A3	4,01561	4,00301	12,6
B1	4,13043	3,93283	197,6
B2	4,29192	4,13922	152,7
B3	4,15111	4,01851	132,6

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

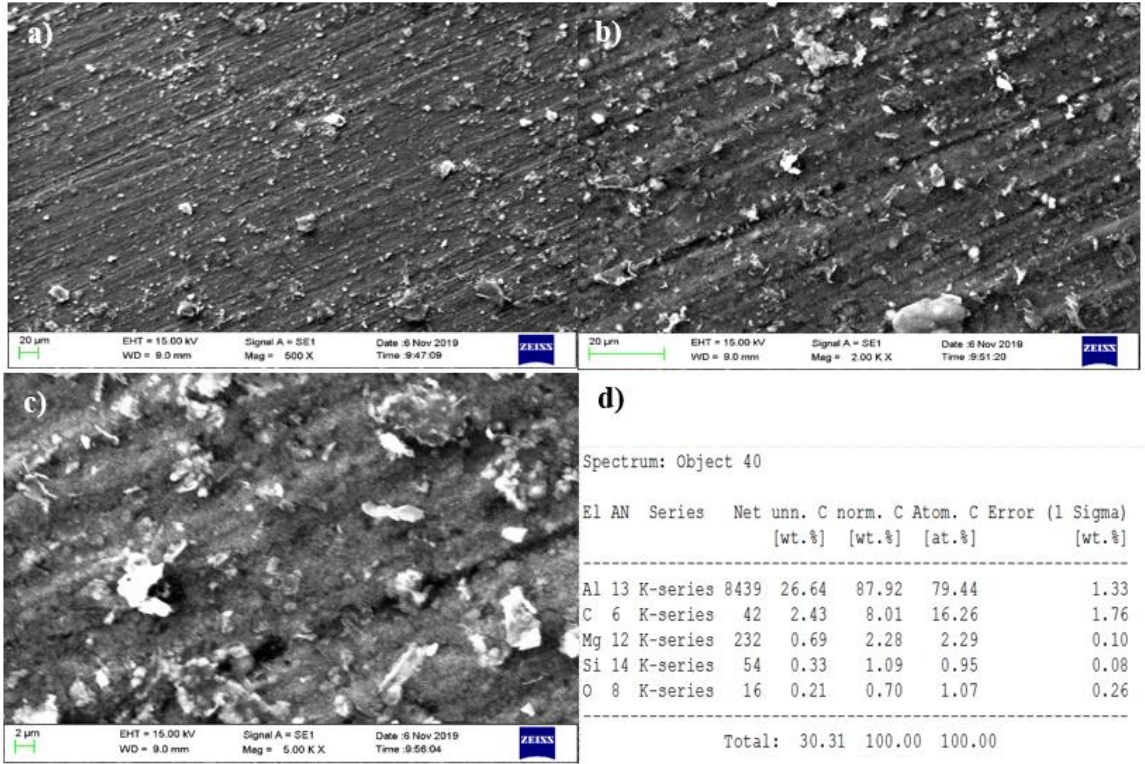
Tez çalışmasının bu bölümünde, Hidrotermal yöntemle kompozit kaplama yapılan numunelere uygulanan ölçümler, gözlemlenen sonuçlar ve bu sonuçlar hakkındaki yorumlara yer verilmiştir. İlk olarak kompozit kaplamada kullanılan grafenin, genleştirilmiş perlitin ve uçucu külün kullanım gereksinimlerine değinilmiştir. A serisi ve B serisi numune gruplarının sonuçlarının karşılaştırılması için SEM, EDX, XRD, mikro-sertlik, yüzey pürüzlülüğü gibi ölçümlere yer verilmiş ve aşınma testleri sonuçları irdelenmiştir.

Yapılan literatür çalışmalarında; grafen, grafit ve MoS₂ gibi tabakalı yapıya sahip olan malzemeler yaygın bir şekilde katı yağlayıcı olarak kullanılmaktadır [131]. Grafenin en önemli kullanım sahalarından biri yüksek mukavemetli kompozit malzemelerin geliştirilmesi olarak bilinmektedir. Bu çalışmada grafenin tercih edilme sebebi, kompozit malzemelerde sıklıkla kullanılması, mukavemet sağlaması ve ayrıca yağlayıcı özellik göstermesidir [26, 131]. Takviye edilen, baca külü olarak bilinen uçucu kül yanmadan oluşan atıklardan biridir [69]. Literatür çalışmaları incelendiğinde, takviye edilen uçucu külün aşınma davranışlarında iyileştirme ve malzemenin sertliğinde artış sağladığı görülmüştür ancak bazen de takviye edilen uçucu kül oranı arttıkça sürtünme katsayısını arttırdığı gözlemlenmiştir [132, 133]. Takviye edilen bir diğer malzeme de genleştirilmiş perlitir. Genleştirilmiş perlit ülkemizde, dünya rezervi ile kıyaslandığında çok yüksek bir rezerve sahip ve temin edilmesi kolay bir malzemedir. Genleştirilmiş perlitin kimyasal bileşimine bakıldığında uçucu kül ile benzerlik göstermektedir. Ayrıca ekonomik bakımdan atık bir maddenin değerlendirilmesi açısından ve uçucu kül yerine alternatif olarak genleştirilmiş perlit kullanımı değerlendirilmiştir.

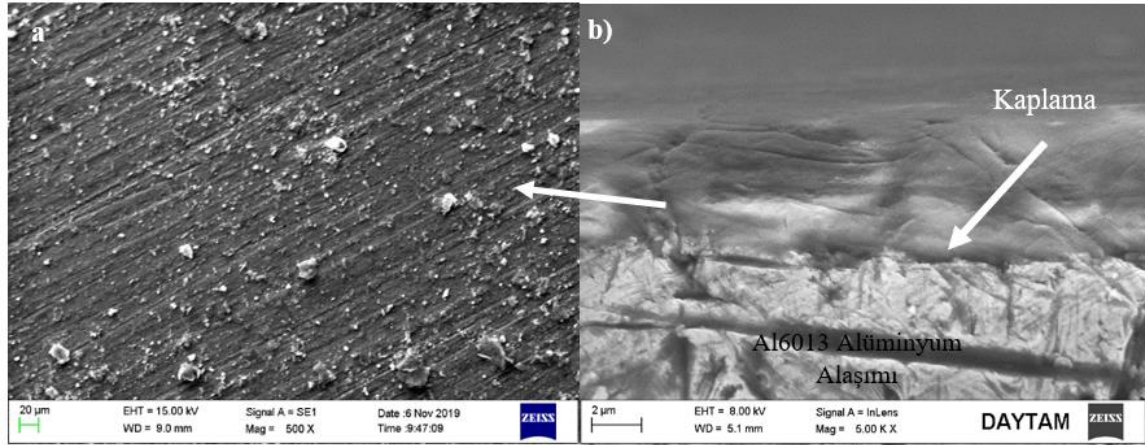
5.1. Kompozit Kaplamalara Ait SEM ve EDX Analizi Sonuçları

Kompozit kaplamaların 500-2000-5000X büyütmelede SEM analizi alınmıştır. Her numuneye ait EDX analizi ve yan kesitinden alınan SEM analizleri verilmiştir.

Yapılan bu çalışmada yalnızca grafen ile kaplanan, K numunesinin SEM ve EDX analizi Şekil 5.1' de ve yan kesit SEM analizi Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



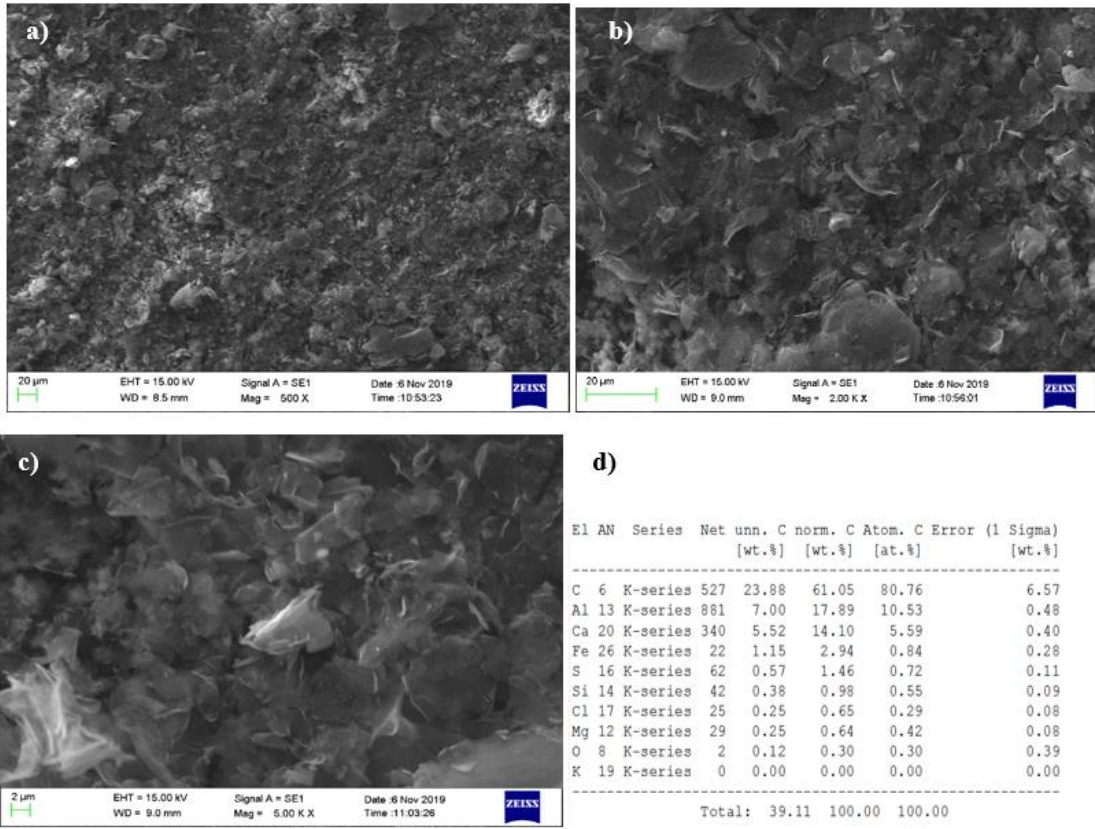
Şekil 5.1. K numunesinin kaplama yüzeyine ait; a) 500X, b) 2000X ve c) 5000X büyütmede SEM görüntüleri ve d) kaplama yüzeyinin EDX analizi



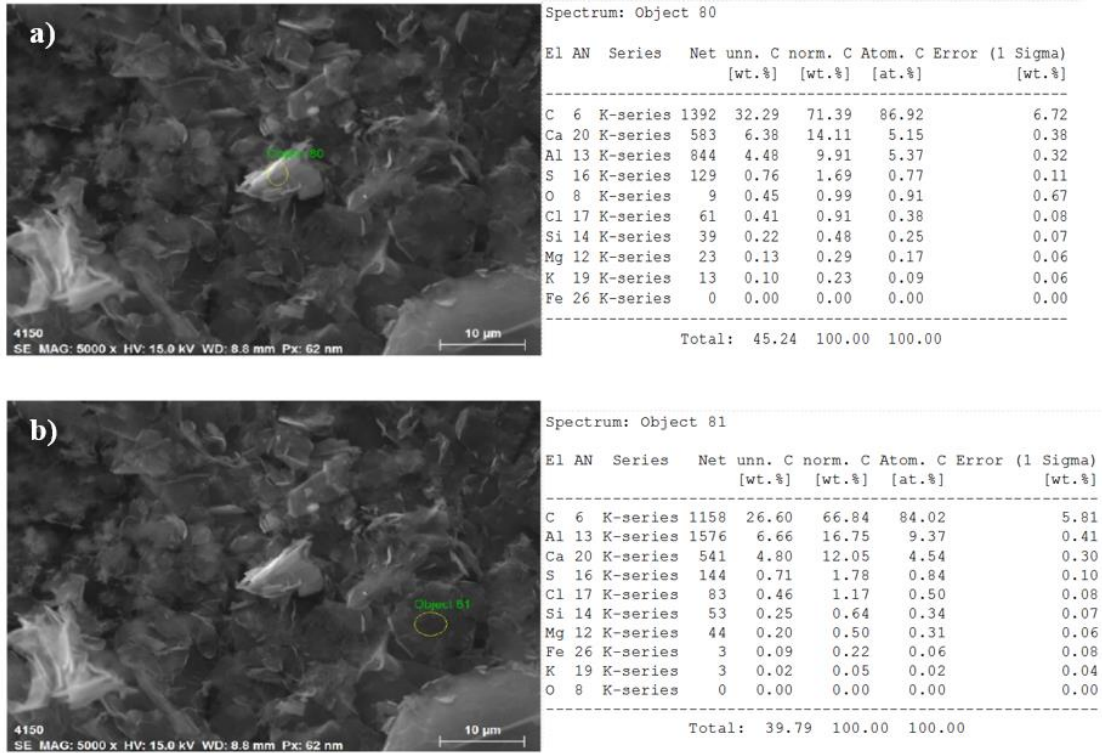
Şekil 5.2. K numunesinin kaplama yüzeyine ait; a) 500X büyütme SEM görüntüsü ve b) yan kesit SEM görüntüsü

K numunesinin yüzeyinde kaplama olduğu görülmüştür. Ancak bu kaplama SEM ve EDX analizinden de anlaşılacağı gibi yüzeyde uniform bir dağılım göstermemektedir. Yan kesit SEM analizinden alınan görüntüde kaplama kalınlığı yaklaşık 1,11 µm olarak ölçülmüştür.

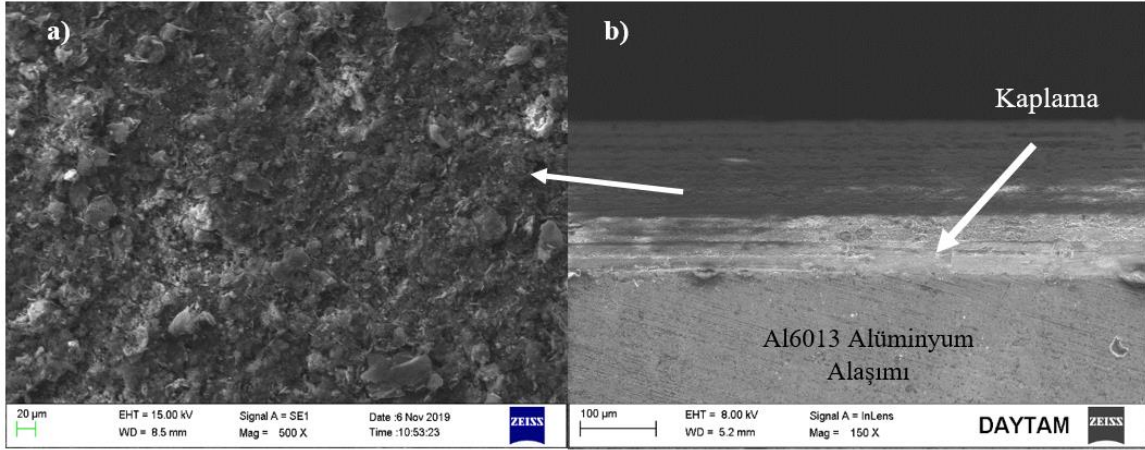
Grafen ve uçucu kül takviyeli A serisi numunelerine ait SEM, EDX analizleri ve numunelerin yan kesit SEM analizleri Şekil 5.3- 5.11' de gösterilmektedir.



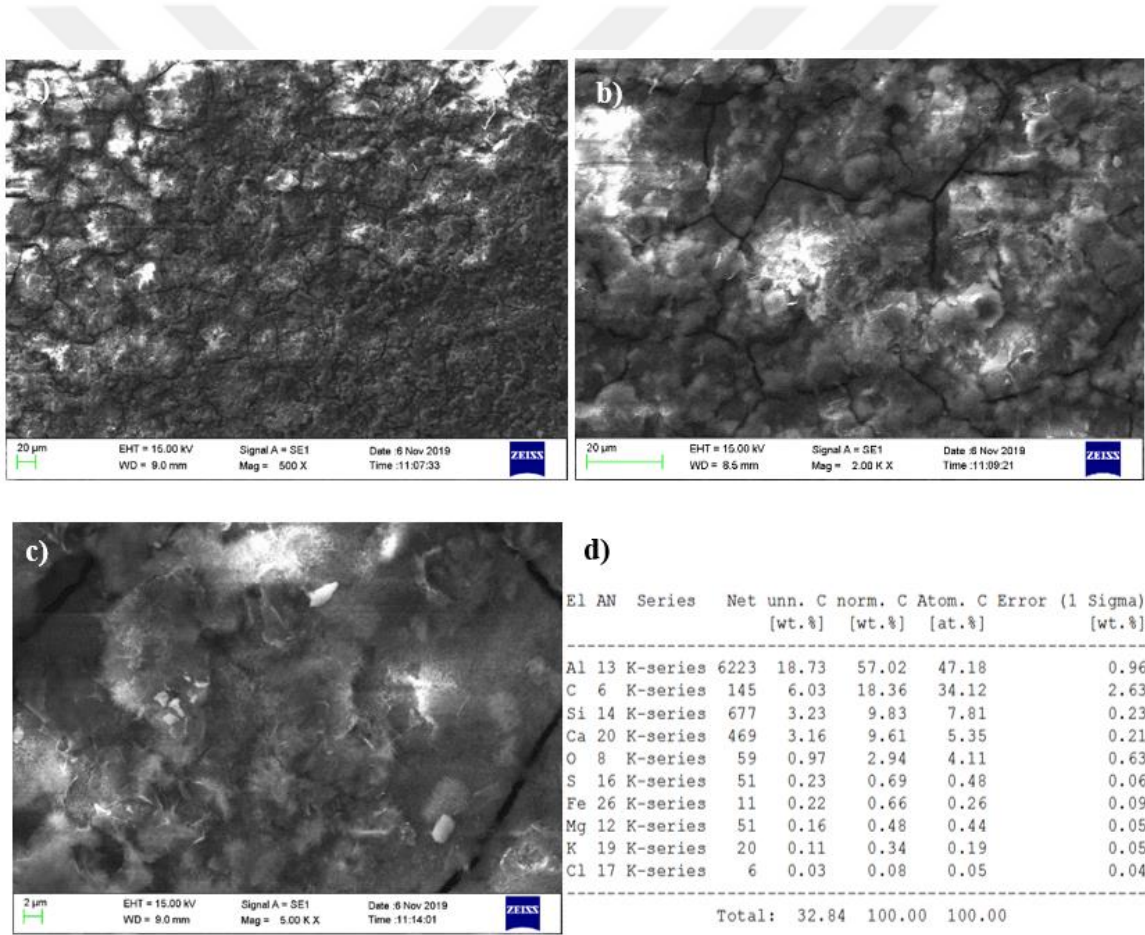
Şekil 5.3. Al numunesinin kaplama yüzeyine ait; a) 500X, b) 2000X ve c) 5000X büyütmede SEM görüntüleri ve d) kaplama yüzeyinin EDX analizi



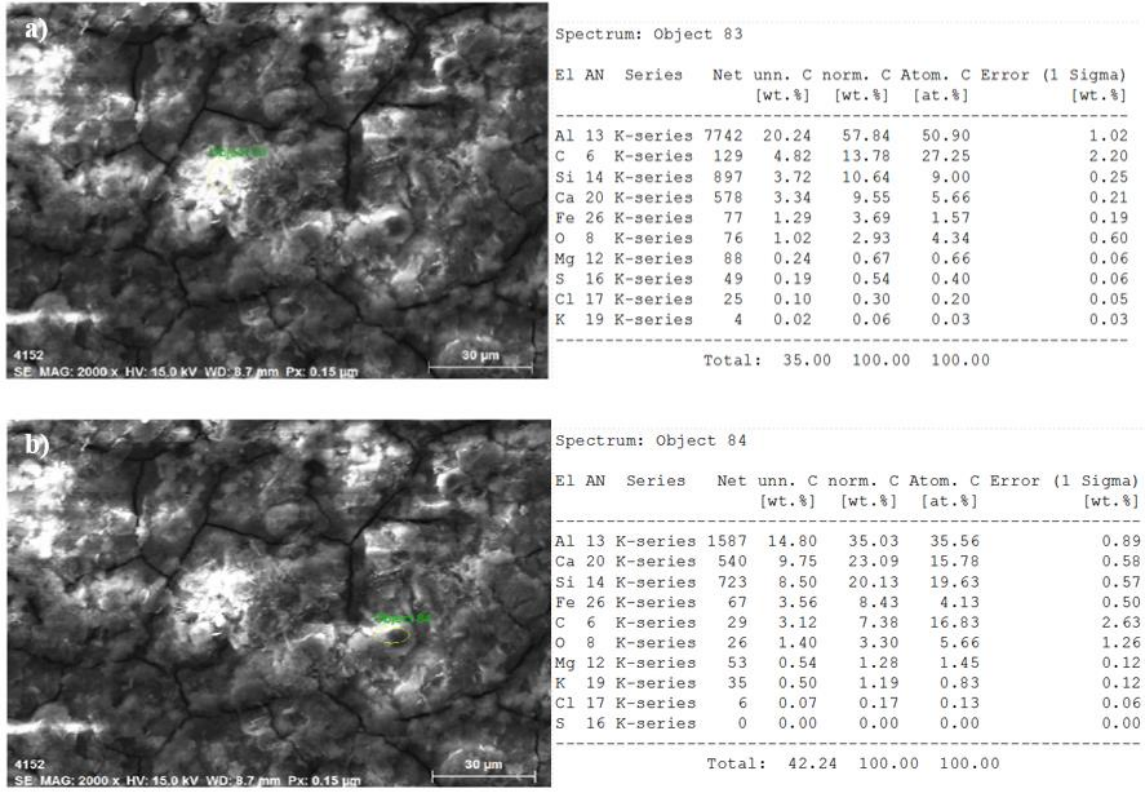
Şekil 5.4. Al numunesine ait bölgesel EDX analizleri



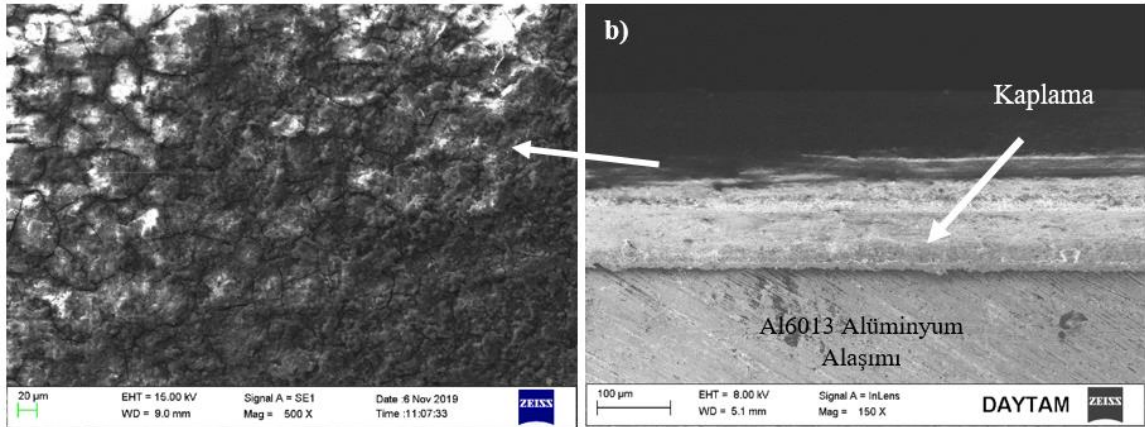
Şekil 5.5. A1 numunesinin kaplama yüzeyine ait; a) 500X büyütme SEM görüntüsü ve b) yan kesit SEM görüntüsü



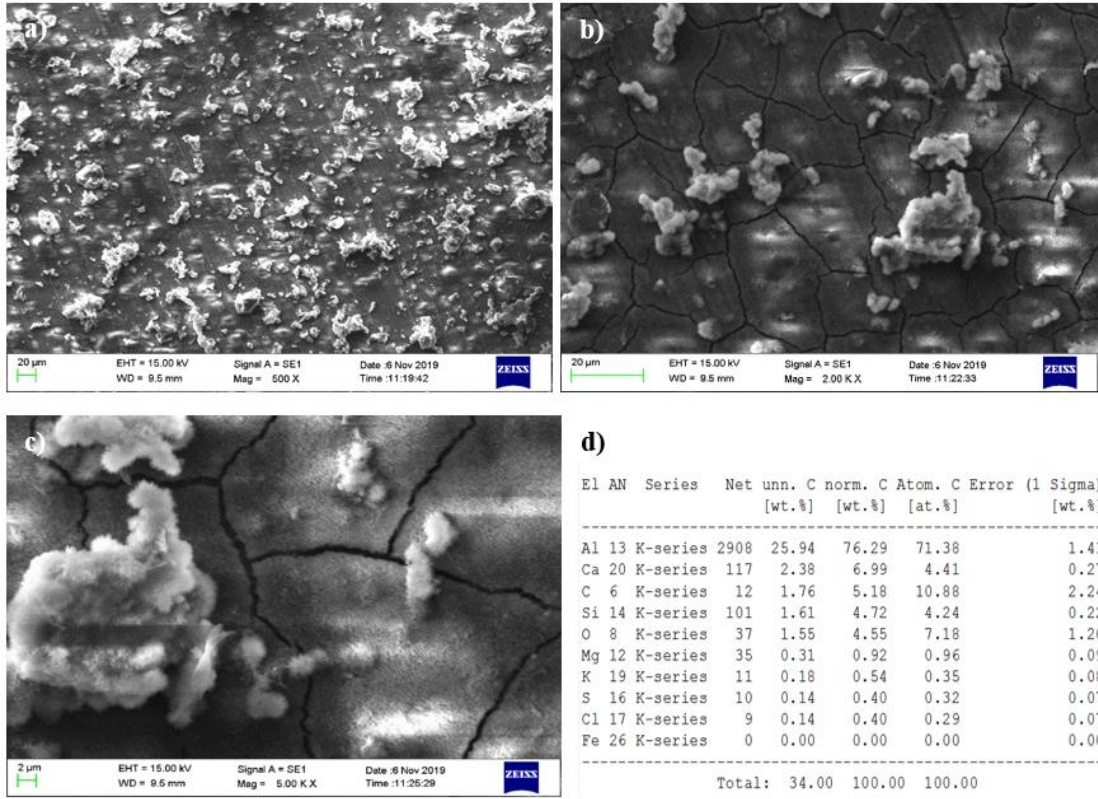
Şekil 5.6. A2 numunesinin kaplama yüzeyine ait; a) 500X, b) 2000X ve c) 5000X büyütmede SEM görüntüleri ve d) kaplama yüzeyinin EDX analizi



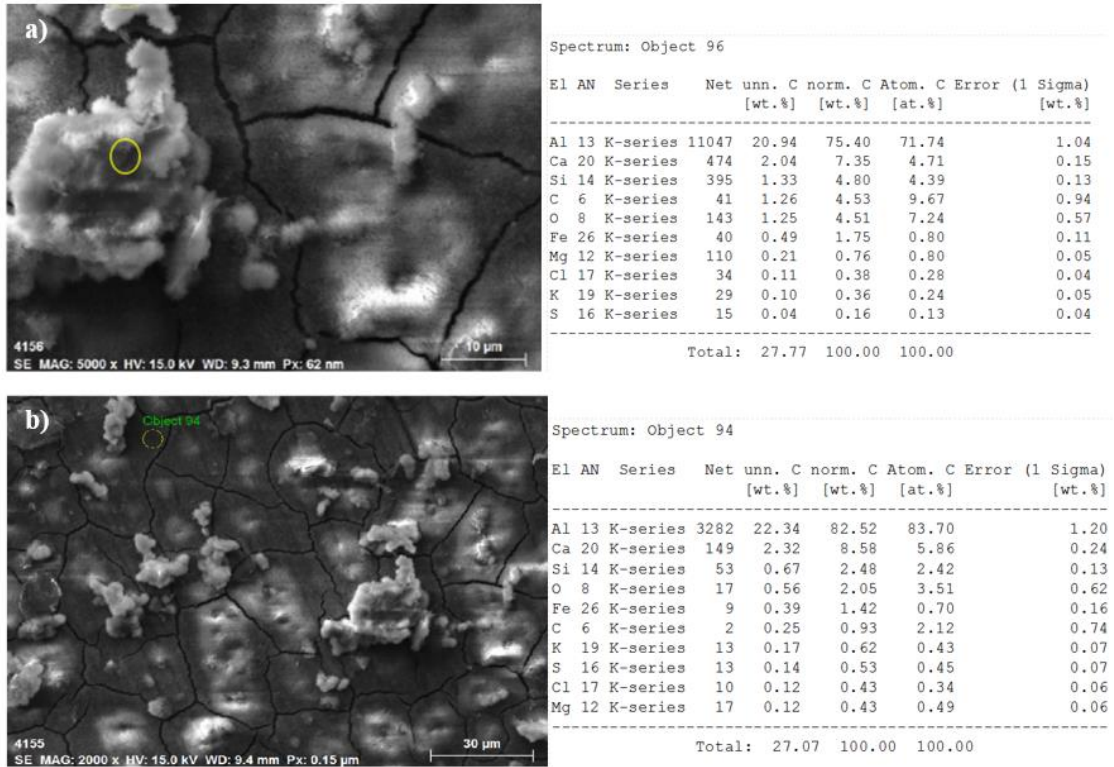
Şekil 5.7. A2 numunesine ait bölgesel EDX analizleri



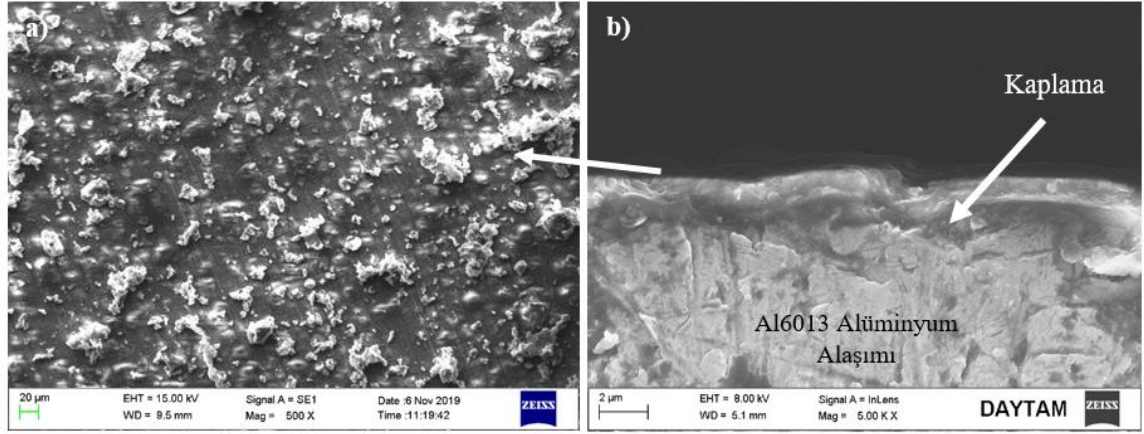
Şekil 5.8. A2 numunesinin kaplama yüzeyine ait; a) 500X büyütme SEM görüntüsü ve b) yan kesit SEM görüntüsü



Şekil 5.9. A3 numunesinin kaplama yüzeyine ait; a) 500X, b) 2000X ve c) 5000X büyütmede SEM görüntüleri ve d) kaplama yüzeyinin EDX analizi



Şekil 5.10. A3 numunesine ait bölgesel EDX analizleri

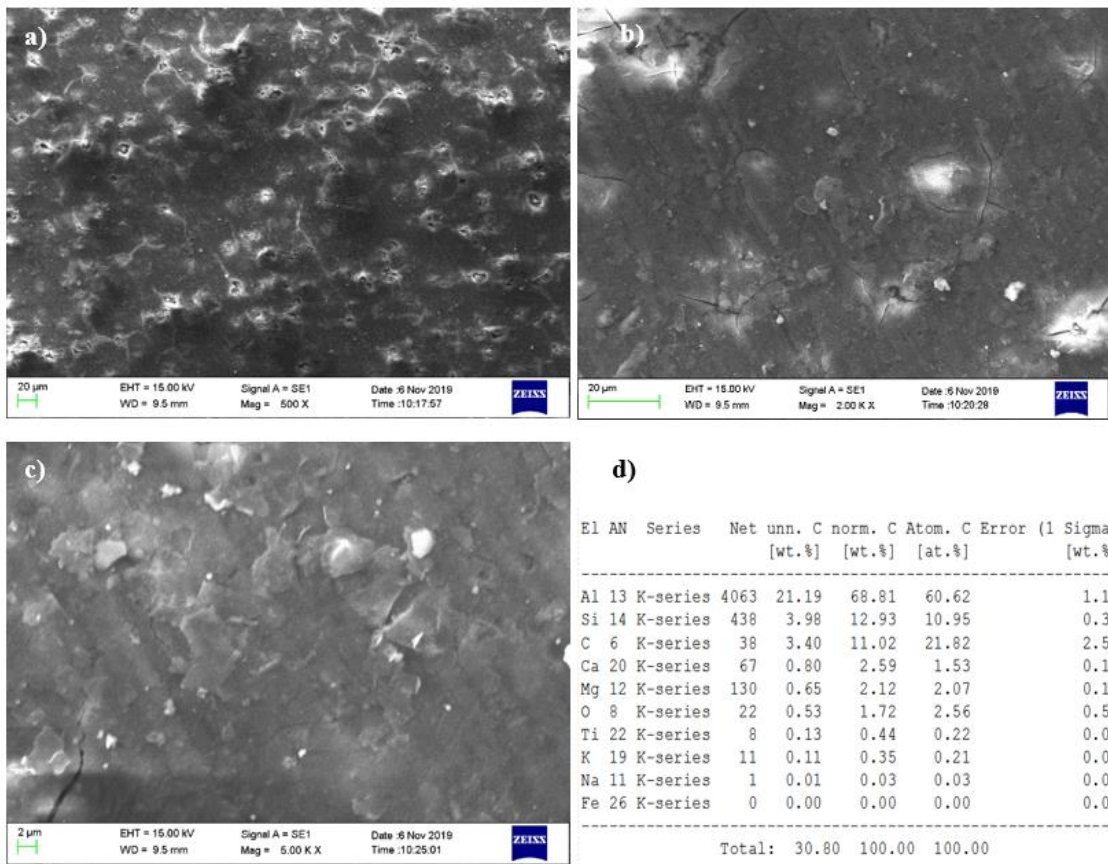


Şekil 5.11. A3 numunesinin kaplama yüzeyine ait; a)500X büyütme SEM görüntüsü ve b) yan kesit SEM görüntüsü

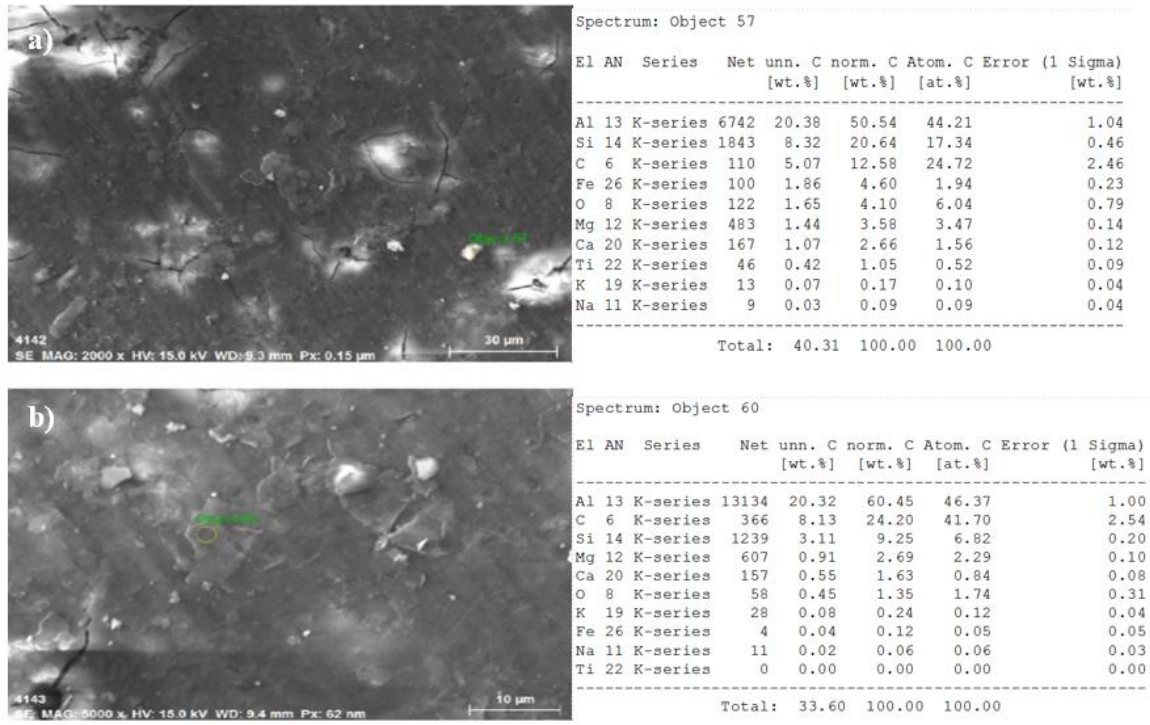
A serisi numunelerinin SEM analizleri incelendiğinde grafen ile uçucu külden oluşan kaplama, katmanlı ve birbirine benzer rast gele dağılmış ince katmanlar şeklinde görülmektedir [134]. Grafen tabakaları 2-boyutlu düzlemler halinde kıvrılmış, katlanmış şekilde görülmektedir. Bu kıvrımların oluşmasının sebebi grafen ve oksijen içeren (uçucu külden) fonksiyonel gruplardan ve bunun sonucu oluşan yapısal kusurlardan kaynaklanmaktadır [135]. Hidrotermal yöntem ile 3 kez kaplama işlemi yapılan yüzeylerde kaplama, grafen benzeri yapılar şeklinde görülmüştür. Ayrıca yapılan XRD ve bölgesel EDX analizleri bu yapıların grafen benzeri yapıda olan kaplamaya (Şekil 5.4 a ve b) ait olabileceğini destekler niteliktedir. EDX analizleri sonucu yüzeyde C, Si, Al, Ca ve O gibi elementlere rastlanmıştır. EDX analizinde rastlanan elementlerden yola çıkarak altlık malzeme olarak kullanılan Al6013 Alüminyum alaşımı yüzeyinde kaplama oluşmuştur. A1 ve A2 numunelerinde yüzeyden alınan SEM analizi ve yan kesitlerinden alınan SEM analizlerinden (Şekil 5.5 ve Şekil 5.8), kaplamanın yüzeyde uniform bir şekilde olduğu görülmektedir [20]. A serisi numunelerinde takviye oranı arttıkça kaplama kalınlığı artma ve azalma göstermiştir. A1 numunesine kaplama kalınlığı yaklaşık olarak 70,9 µm ve artan %20 uçucu kül takviyesiyle kaplama kalınlığı yaklaşık 111,6 µm' ye artış göstermiştir. A1 ve A2 numunelerinin yüzeyinde kaplama oluşumunun uniform olduğu görülmüştür [13, 20]. Buradan yola çıkarak artan uçucu kül takviyesi ile A3 numunesinde, kaplama kalınlığının artması beklenirken yüksek oranda azalma göstermiştir. A3 numunesinde kaplamanın (Şekil 5.11); yan kesit SEM analizinde kalınlığı yaklaşık 2.0 µm olarak ölçülmüştür. A3 numunesinin yüzeyinden alınan SEM analizinde ve yan kesitine ait SEM analizinde belirgin ve net bir şekilde kaplamanın az olduğu görülmüştür. Kaplamaların yüzey morfolojisi, SEM, EDX ve XRD analizleri ile incelendiğinde A1 numunesinde yoğun bir şekilde grafen benzeri yapıda kaplamanın olduğu görülmüştür (Şekil 5.3). A2 numunesinde artan uçucu kül takviyesi ile birlikte yine yoğun bir şekilde grafen benzeri yapıların arttığı görülmüştür (Şekil

5.6). A3 numunesinde, A1 ve A2 numunesinde görülen uniform bir kaplamanın aksine yüzeyde kaplamanın, yer yer kümeleşme şeklinde ve uniform olmadığı görülmüştür. A3 numunesinde kaplamanın az olmasının sebebi, yüzeyde artan uçucu kül takviyesi ile birlikte XRD analizi sonucu oluşan CaCO_3 fazının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yüzeyde sert kabuk oluşturan CaCO_3 fazının [136, 137] artmasının (A3 numunesinde) yüzeyde tutunmayı azalttığı düşünülmektedir.

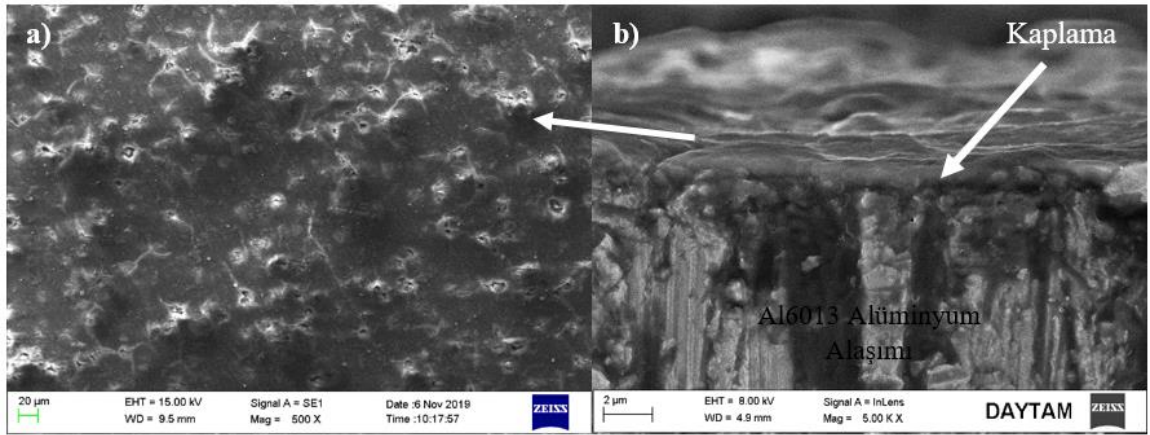
Grafen ve genişletilmiş perlit takviyeli B serisi numunelerine ait SEM, EDX analizleri ve numunelerin yan kesit SEM analizleri Şekil 5.12- 5.20' de gösterilmektedir.



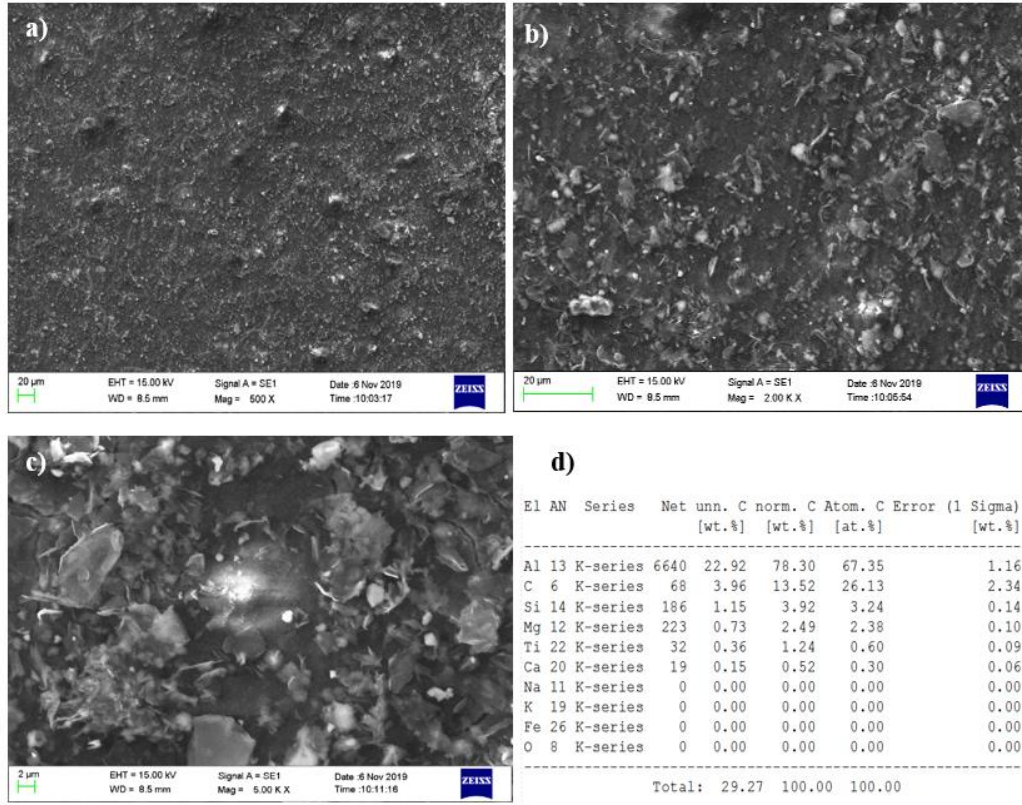
Şekil 5.12. B1 numunesinin kaplama yüzeyine ait; a) 500X, b) 2000X ve c) 5000X büyütmede SEM görüntüleri ve d) kaplama yüzeyinin EDX analizi



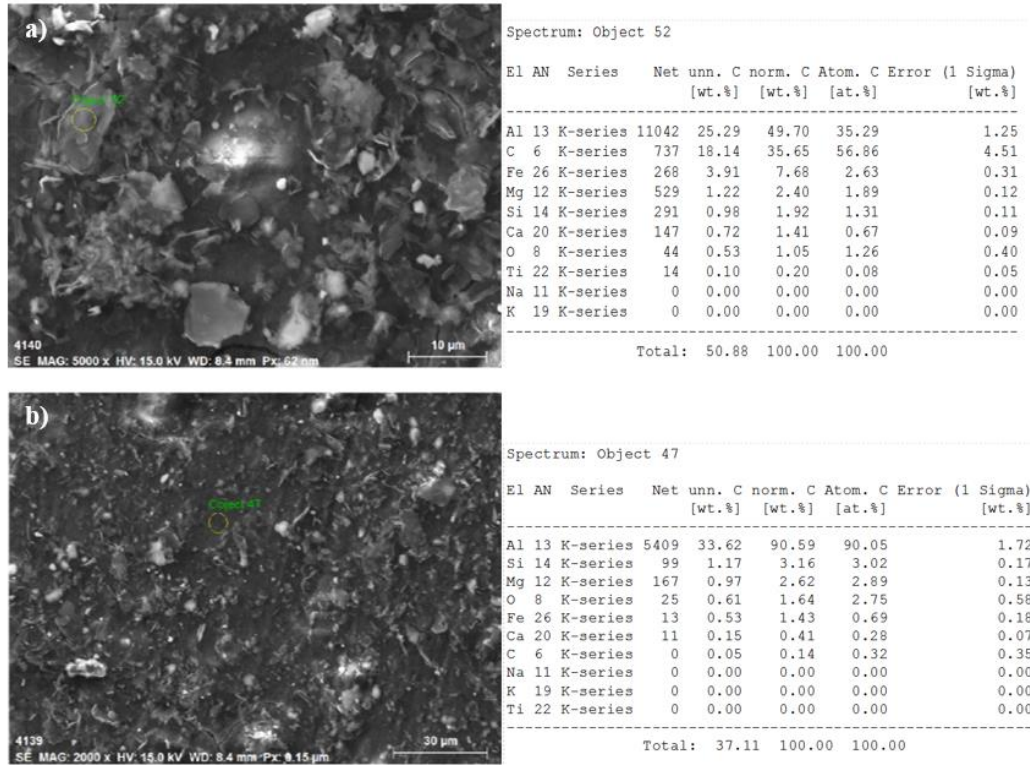
Şekil 5.13. B1 numunesine ait bölgesel EDX analizleri



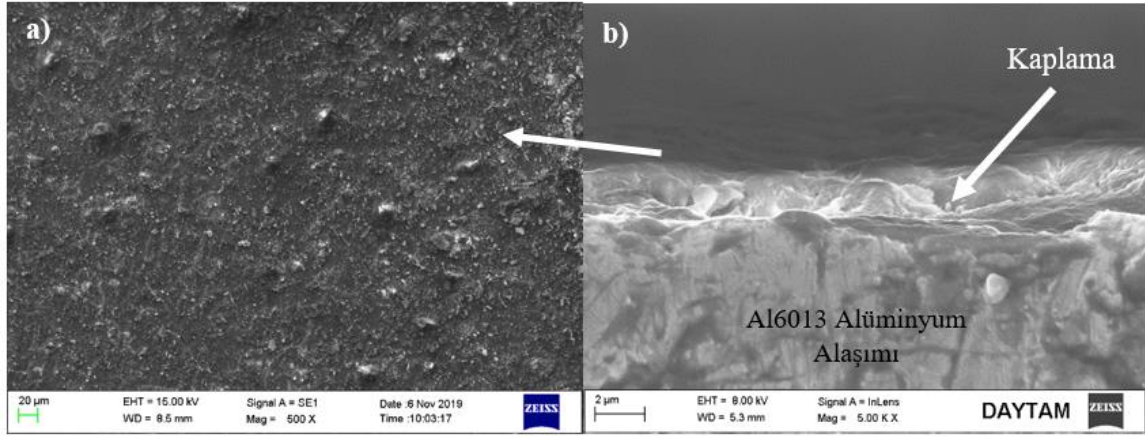
Şekil 5.14. B1 numunesinin kaplama yüzeyine ait; a) 500X büyütme SEM görüntüsü ve b) yan kesit SEM görüntüsü



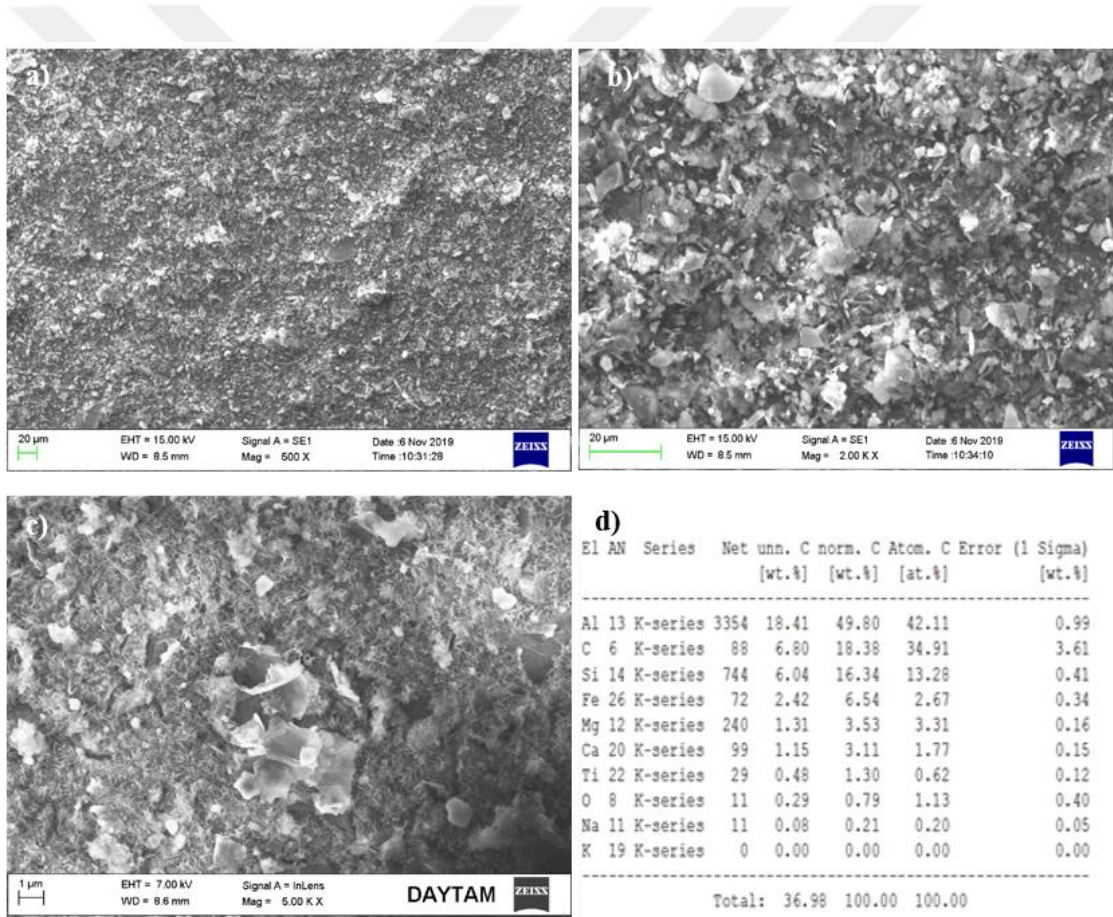
Şekil 5.15. B2 numunesinin kaplama yüzeyine ait; a)500X, b)2000X ve c)5000X büyütmede SEM görüntüleri ve d) kaplama yüzeyinin EDX analizi



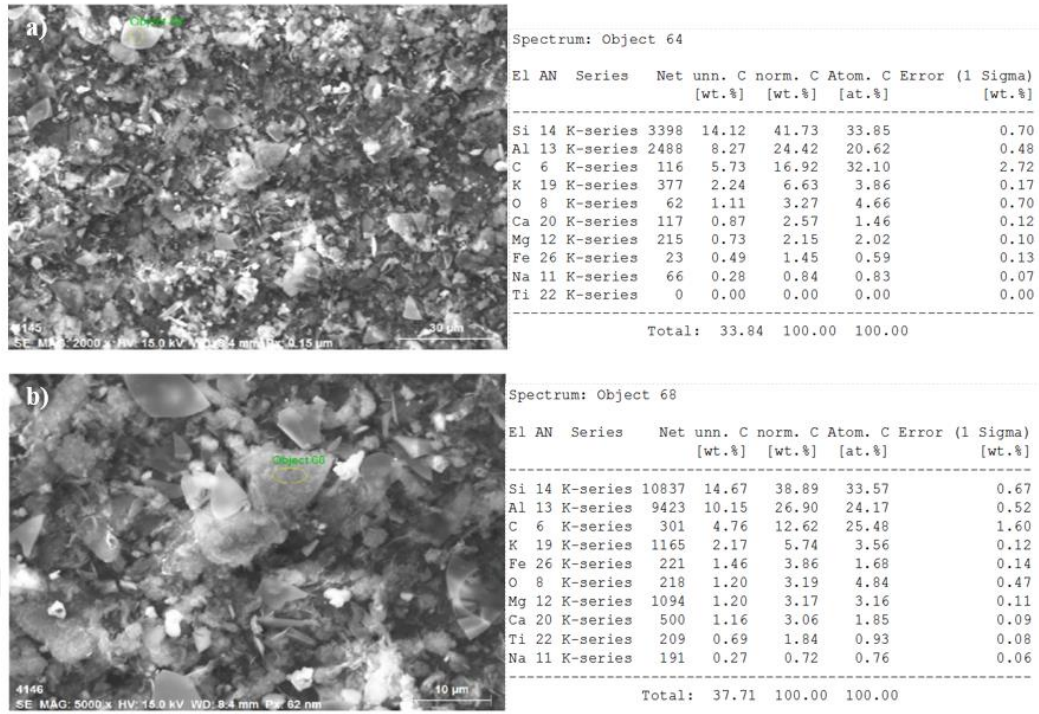
Şekil 5.16 B2 numunesine ait bölgesel EDX analizleri



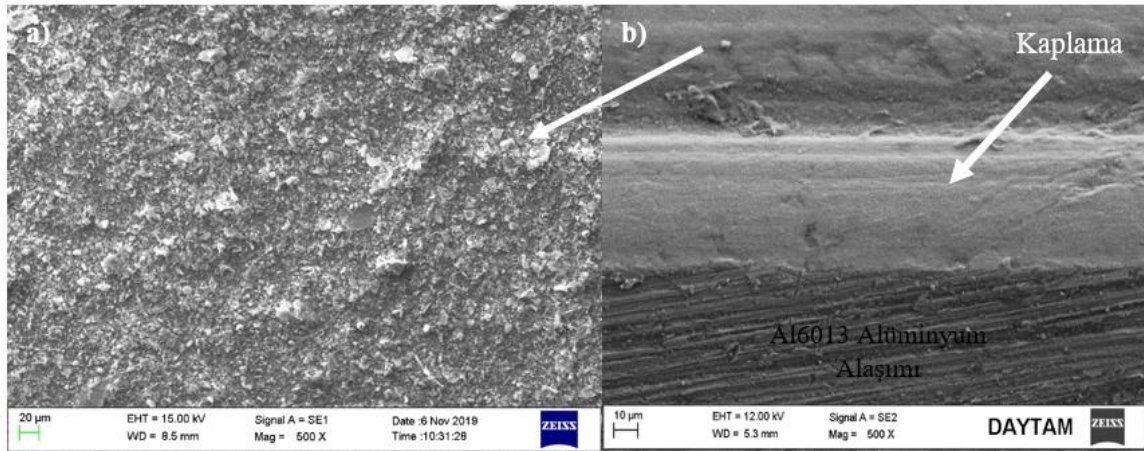
Şekil 5.17. B2 numunesinin kaplama yüzeyine ait; a)500X büyütme SEM görüntüsü ve b) yan kesit SEM görüntüsü



Şekil 5.18. B3 numunesinin kaplama yüzeyine ait; a)500X, b)2000X ve c)5000X büyütmede SEM görüntüleri ve d)kaplama yüzeyinin EDX analizi



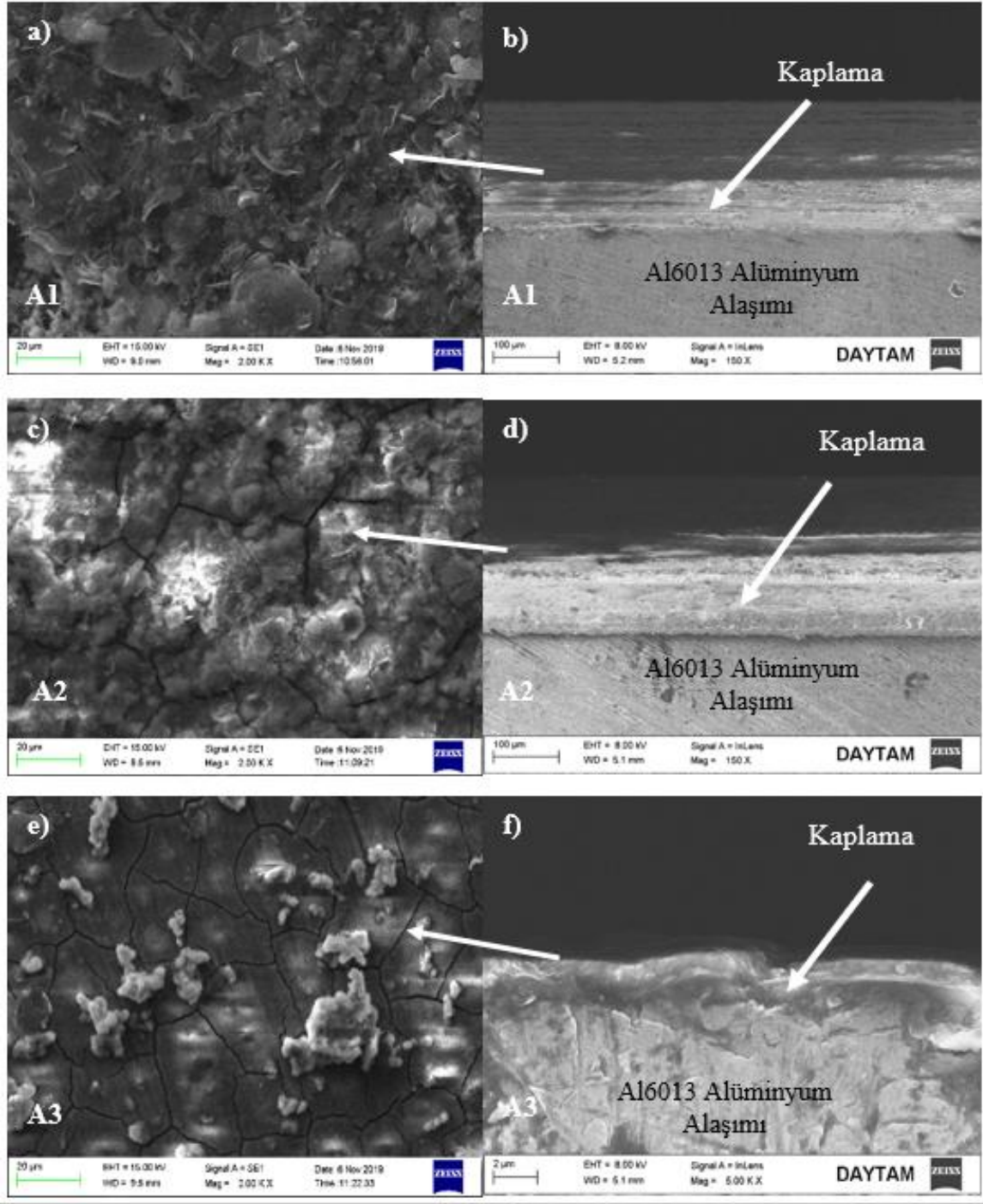
Şekil 5.19. B3 numunesine ait bölgesel EDX analizleri



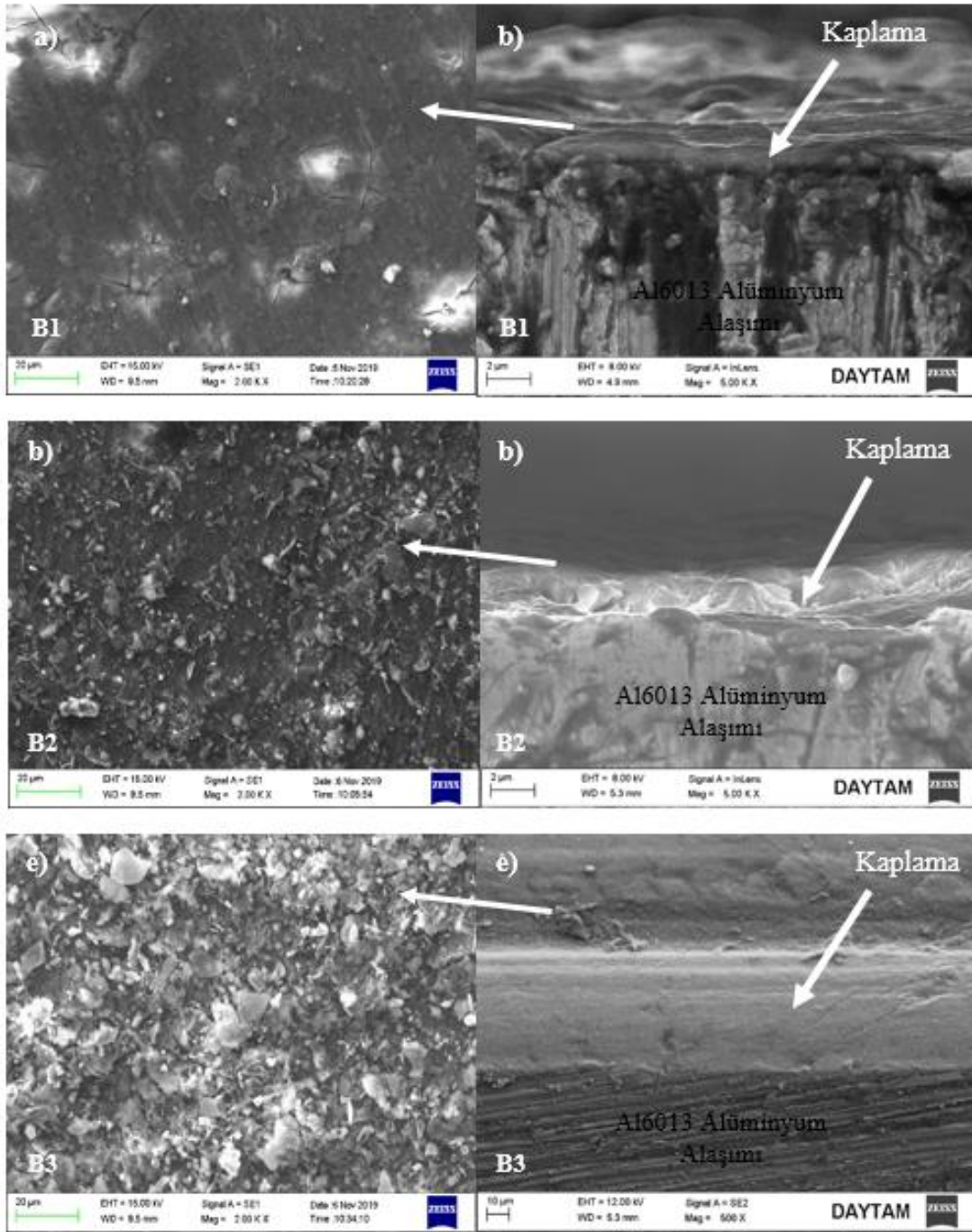
Şekil 5.20 B3 numunesinin kaplama yüzeyine ait; a)500X büyütme SEM görüntüsü ve b)yan kesit SEM görüntüsü

B serisi numunelerinin SEM ve EDX analizleri incelendiğinde, A serisi numunelerinde olduğu gibi grafen ile geliştirilmiş perlitten oluşan kaplama, katmanlı ve birbirine benzer rast gele dağılmış ince katmanlar şeklinde yüzeyde görülmektedir [134]. Hidrotermal yöntem ile 3 kez kaplama işlemi yapılan yüzeylerde kaplama, grafen benzeri yapılar şeklinde görülmüştür. Ayrıca yapılan XRD ve bölgesel EDX analizi sonucu bu yapıların, grafen benzeri yapıda olan kaplamaya (Şekil 5.13 b ve Şekil 5.16 a) ait olabileceğini destekler niteliktedir. EDX analizi sonucu yüzeyde C, Si, Al, Ca ve O gibi elementlere rastlanmıştır. EDX analizinde rastlanan elementlerden yola

çıkarak altlık malzeme olarak kullanılan Al6013 Alüminyum alaşımı yüzeyinde kaplama oluşmuştur. Genleştirilmiş perlit ve uçucu kül içerikleri kısmen benzer olduğundan B serisi numunelerinde de A serisi numunelerindeki gibi bu yapılara rastlanmıştır. B serisi numunelerinde yüzeyden ve yan kesitinden alınan SEM analizinden; B1 (Şekil 5.14 a ve b) ve B2 (Şekil 5.17 a ve b) numunelerinde yüzeyde yer yer kümeleşme şeklinde ve uniform olmayan kaplamanın; B3 numunesinde (Şekil 5.20 a ve b) yüzeyde yoğun bir mikro yapının yanı sıra uniform bir kaplama olduğu görülmektedir. B serisi numunelerinin yan kesit SEM analizinden ölçülen kaplama kalınlığı; B1 numunesinde yaklaşık 1,41 μm dir. Genleştirilmiş perlit takviyesi %20' ye çıktığında kaplama kalınlığı yaklaşık 2,21 μm olarak bir miktar artış göstermiştir. B3 numunesinde en iyi kaplama kalınlığı elde edilmiştir ve yan kesit SEM analizinde de net bir şekilde görülmektedir. Bu numunede %30' a çıkan genleştirilmiş perlit takviyesi ile birlikte kaplama kalınlığı yaklaşık 50,6 μm olarak ölçülmüştür. Buradan yola çıkarak takviye edilen genleştirilmiş perlit oranı arttıkça yüzeyde kaplama kalınlığının arttığı görülmüştür. Yüzey morfolojisi incelendiğinde B1 ve B2 numunesinde yüzeyde kaplamaya rastlanmıştır. Ancak bu numunelerin, yan kesitinden ve yüzeyinden alınan SEM analizinden de anlaşılacağı gibi yüzeyde tutunma B3 numunesine göre çok az olmuştur. B3 numunesinde ise artan genleştirilmiş perlit ile yüzeyde daha fazla birikmenin olduğu yoğun bir mikroyapı görülmüştür. Bu numunede takviye edilen genleştirilmiş perlit oranının artmasıyla ihtiva ettiği SiO_2 'nin oranı da artmıştır. SiO_2 ' nin iyon ve molekül yüzeylerinde tutunma ve yapışma eğilimi göstermesi ile birlikte yüzeyde tutunmanın arttığı görülmüştür [138].



Şekil 5.21 A serisi numunelerinin kaplama yüzeyine ait; a) A1, 2.00 K.X büyütme SEM görüntüsü b) A1, yan kesit SEM görüntüsü, c) A2, 2.00 K.X büyütme SEM görüntüsü, d) A2, yan kesit SEM görüntüsü, e) A3, 2.00 K.X büyütme SEM görüntüsü ve f) A3, yan kesit SEM görüntüsü



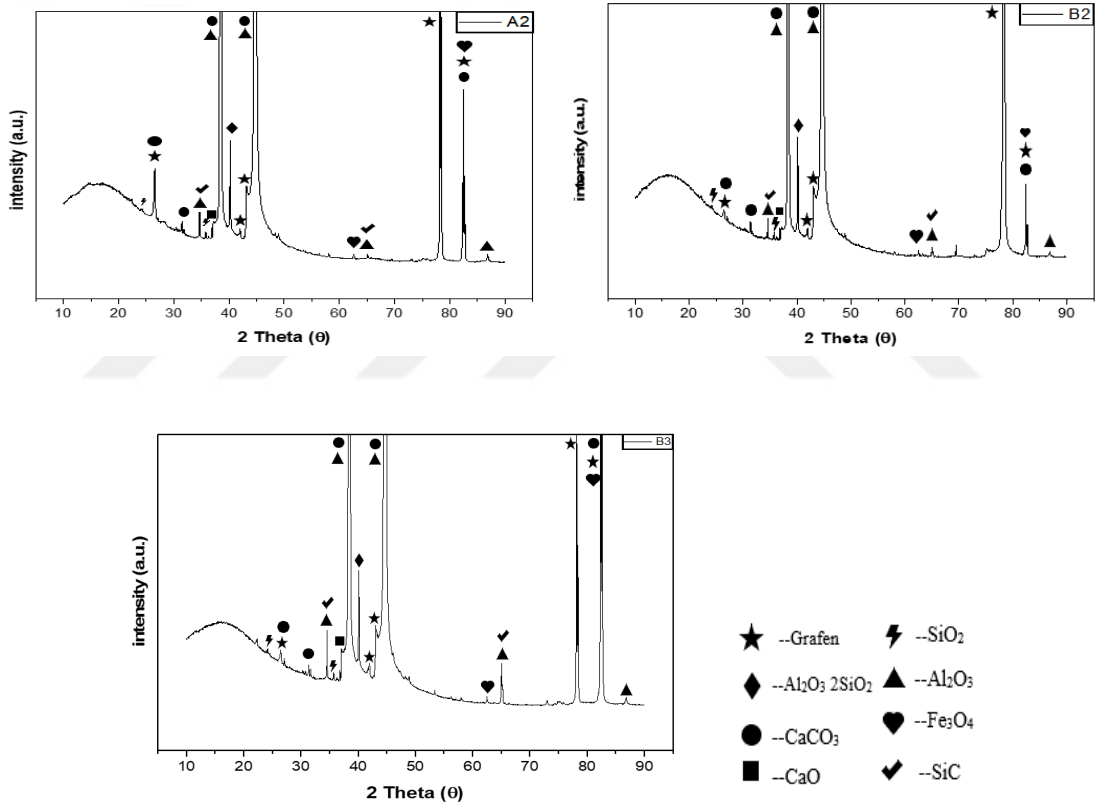
Şekil 5.22. B serisi numunelerinin kaplama yüzeyine ait; a) B1, 2.00 K.X büyütme SEM görüntüsü, b) B1, yan kesit SEM görüntüsü, c) B2, 2.00 K.X büyütme SEM görüntüsü, d) B2, yan kesit SEM görüntüsü, e) B3, 2.00 K.X büyütme SEM görüntüsü ve f) B3, yan kesit SEM görüntüsü

Genel olarak A ve B serisi numuneleri yüzey yan kesit SEM analizi incelendiğinde (Şekil 5.21 ve Şekil 5.22) en iyi kaplama kalınlığı A2 numunesinde ve en az kaplama kalınlığı B1 numunesinde görülmüştür. B serisi numunelerinde takviye edilen genişletilmiş perlit oranı arttıkça SiO_2 'nin iyon ve molekül yüzeylerinde tutunma ve yapışma eğilimi göstermesi ile birlikte yüzeyde tutunma artmıştır. [138]. En iyi kaplama B3 numunesinde gözlemlenmiştir. Ancak uçucu kül

takviye edilen numunelerde de SiO₂ oranı artmasıyla takviye oranı %20 olan numunede kaplama kalınlığı artmasına rağmen, takviye oranı %30 olan numunede tutunma oranında yüksek bir düşüş görülmüştür. Bunun sebebinin XRD analizi sonucu oluşan CaCO₃ fazı olduğu düşünülmektedir. CaCO₃ fazı %20 uçucu kül içeren numuneye kadar yüzeyde yapışmayı sağlarken, bu oran %30' a yükseldiğinde yüzeyde tutunmayı azalttığı düşünülmektedir [136, 137].

5.2. XRD Analizi Sonuçları

A2, B2 ve B3 kodlu numunelerinden alınan XRD analizine ait grafik Şekil 5.23' de gösterilmiştir.



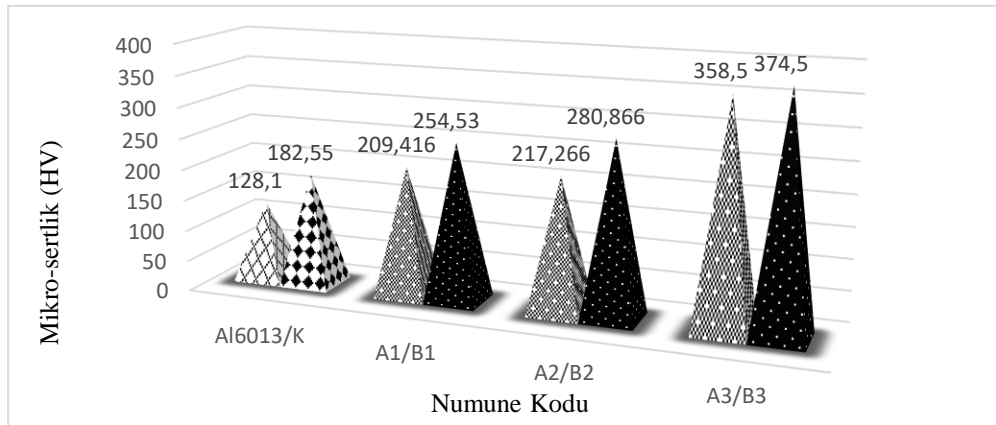
Şekil 5.23. Numunelere ait XRD analizleri; a) A2 numunesi b) B2 numunesi c) B3 numunesi

Yapılan XRD analizi sonucu elde edilen grafiklerde, grafen, SiO₂, CaCO₃, Al₂O₃, Fe₃O₄, CaO, SiC ve mullit fazları görülmüştür. Ayrıntılı bir şekilde gösterilen XRD analiz grafiğinde; CaCO₃ ve Al₂O₃ sırası ile 38,784 ve 38,958 de birbirine çok yakın olduğu için pikler çakışmıştır. Bir diğer noktada yine CaCO₃ 44,763 de ve Al₂O₃ ise 44,764 de pik vererek bir noktada tek pik göstermiştir.

Kimyasal bileşenleri birbirine kısmen benzer olan uçucu kül ve genişletilmiş perlit ile grafen kaplama sonucu üç numunede de hemen hemen aynı fazlara rastlanmıştır. Grafen, 2θ $26,426^\circ$ de yoğun ve geniş bir tepede kendini göstermiştir [139]. Grafikte uçucu kül ve genişletilmiş perlitten gelen bileşiklerden ötürü üç numunede de; 2θ açısında, $16,29^\circ$, $40,02^\circ$ de iyi tanımlanmış mullit (alüminyum silikat, $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) zirveleri, 2θ açısında, $20,86^\circ$, $26,58^\circ$, $35,13^\circ$ ve $49,96^\circ$ da kuvars ve $33,4^\circ$ de kalsit ($CaCO_3$) pikleri görülmüştür. Ayrıca uçucu kül kristalli fazların, bir alüminsilikat jeline dönüşmeden, kaplama bileşiminde değişmeden kaldığı görülmüştür [20, 140]. Uçucu kül takviyeli A2 numunesinde $CaCO_3$ fazı B2 ve B3 numunesine göre daha yüksek pik vermiştir. Bunun sebebi uçucu kül genişletilmiş perlitte kıyasla daha fazla CaO içermektedir. $CaCO_3$ Kristal halde camsı parlaklıkta, renksiz saydam yapıda bir malzemedir ve birçok sektörde aşındırıcılık ve aşınmaya karşı direnç kazandırma özellikleri nedeniyle kullanılan bir maddedir [141]. İleriki 5.5 Aşınma Testleri başlığı altında anlatılan aşınma sonuçlarından yola çıkarak, kompozit kaplama içerisinde oluşan $CaCO_3$ fazı aşınma direncindeki iyileşmeye katkı sağladığı düşünülmektedir. B2 ve B3 numunelerinde ise SiC fazı A2 numunesine göre daha yüksek pik vermiştir. Bunun sebebi ise genişletilmiş perlit, uçucu küle kıyasla daha fazla SiO_2 içermektedir.

5.3. Mikro-sertlik Ölçümleri

Bu kısımda kompozit kaplamaların mikro-sertlik ölçümlerine ait grafikler verilmiştir. Al6013 Alüminyum alaşımı, K, A serisi ve B serisi numunelerine ait mikro-sertlik grafiği Şekil 5.24' de gösterilmiştir.



Şekil 5.24. Al6013 Alüminyum alaşımı, K, A serisi ve B serisi numunelerine ait mikro-sertlik değerleri

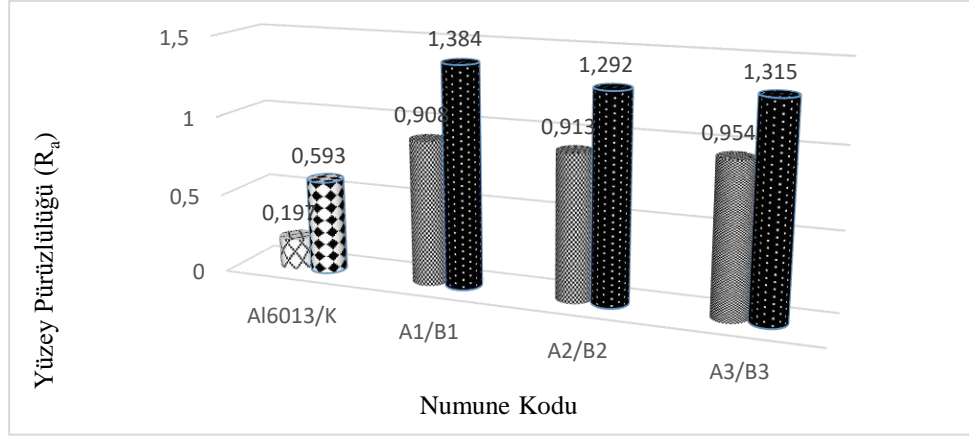
Kompozit kaplamada kullanılan grafen, kaplama tabakasının sertliğini artırmıştır [142, 143] Grafen bulunduğu mikroyapı içerisinde parçacıkların hareketini engellediği ve plastik akışa direnç göstererek mukavemet sağlamaktadır [144, 145]. Grafen ile uçucu kül takviyeli olan A serisi

numunelerinde; artan uçucu kül takviyesi ile birlikte mikro-sertlik değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Bu numunelerde en yüksek mikro-sertlik değeri 358,5 HV (A3) olarak %30 uçucu kül içeren numuneden ölçülmüştür. Uçucu kül takviyesi ile mikro-sertliğin artmasının sebebi esas olarak kaplama yüzeyindeki seramik takviye parçacıklarının artmasından kaynaklanmaktadır. Bu tür sert yüzey partiküllerin varlığı plastik deformasyona karşı direnç sağlar. Böylelikle kompozit malzemenin sertliğinde artış gözlemlenir [15]. Ayrıca mikro-sertlik değerlerinin bir diğer artma sebebinin de XRD analizi ile yüzeyde tespit edilen, CaCO_3 ve SiC gibi sert bileşiklerin meydana gelmesidir. Genellikle CaCO_3 sert kabuk oluşumuna sebep olan yapışkan bir malzemedir ve SiC de mukavemet sağlayan bir seramik malzemedir [136, 137, 146]. Grafen ile geliştirilmiş perlit takviyeli olan B serisi numunelerinde ise artan geliştirilmiş perlit takviyesi ile birlikte mikro-sertlik değerlerinde artış gözlemlenmiştir. B serisi numuneleri içerisinde en düşük mikro-sertlik %10 geliştirilmiş perlit içeren numunede ve en yüksek mikro-sertlik ise %30 geliştirilmiş perlit içeren numunede 374,5 HV olarak görülmüştür. Geliştirilmiş perlit takviyesi ile mikro-sertliğin artmasının sebebi yine uçucu kül içeren numunelerdeki gibi kaplama yüzeyindeki seramik takviye parçacıklarının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü sert yüzey partikülleri plastik deformasyona karşı sağladığı dirençle malzemenin sertliğini arttırmaktadır [15].

Grafen, uçucu kül ve geliştirilmiş perlitin, sertlik değerini arttırdığı bilinmektedir ve ayrıca sertlik ve aşınma direnci birbiri ile ilişkilidir [147, 148]. Aşınma direncini etkileyen faktörlerin başında malzemenin sertliği gelmektedir. Sertlik ile aşınma direnci arasındaki ilişki belirli bir düzeye kadar doğrusal değişim göstermektedir. Böylelikle sertliğin artmasıyla aşınma direnci de artış gösterir. Ancak belirli bir değerden sonra sertlik aşınmaya karşı yeterli direnci sağlayamaz [149]. Bu nedenle A serisi numunelerinde artan takviye oranıyla artış gösteren mikro-sertlik değerleri, aşınma direncini azaltırken; B serisi numunelerinde artan takviye oranıyla artış gösteren mikro-sertlik değerleri, aşınma direncini arttırmaktadır.

5.4. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

Yüzey pürüzlülüğü ölçümünden elde edilen, ortalama “Ra: Aritmetik ortalama sapma” parametresi üzerinden Al6013 Alüminyum alaşımı A serisi ve B serisi numunelerine ait grafik Şekil 5.25’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.25. Al6013 Alüminyum alaşımı, K, A serisi ve B serisi numunelerine ait yüzey pürüzlülüğü grafiği

Bu grafikten yola çıkarak A1 numunesinde 0,908, A2 numunesinde 0,913 ve A3 numunesinde 0,954 olarak ölçülmüştür. A serisi numunelerinde artan uçucu kül takviyesi ile birlikte yüzey pürüzlülüğünde artış gözlemlenmiştir. A3 numunesinde yüzey pürüzlülüğünün bu kadar artmasının sebebi homojen bir dağılım göstermemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. A serisi numunelerinde artan uçucu kül takviyesi ile birlikte yüzey pürüzlülüğü artmıştır ve bu durumda sürtünme katsayısını artırarak, aşınma oranını arttırmıştır. B serisi numunelerinde; B1 numunesinde 1,384, B2 numunesinde 1,292 ve B3 numunesinde 1,315 olarak ölçülmüştür. B1 ve B2 numunesinde kaplama yüzeye homojen olarak dağılmadığından yüzey pürüzlülüğü değerlerindeki artma ve azalmada dengesizlik görülmüştür. Ancak B3 numunesinde kaplama homojen bir dağılım göstermiştir. Yüzey pürüzlülüğünün düşük olması sürtünme katsayısını düşürür [150]. Ancak burada yüzey pürüzlülüğü B2 numunesinde az olmasına rağmen homojen bir kaplama yüzeyi ve kalınlığı elde edilemediğinden, B3 numunesinde artan takviye oranı ile kaplama yüzeye daha iyi tutunması ve sertliğin de artmasıyla en iyi aşınma direnci bu numunede görülmüştür [150].

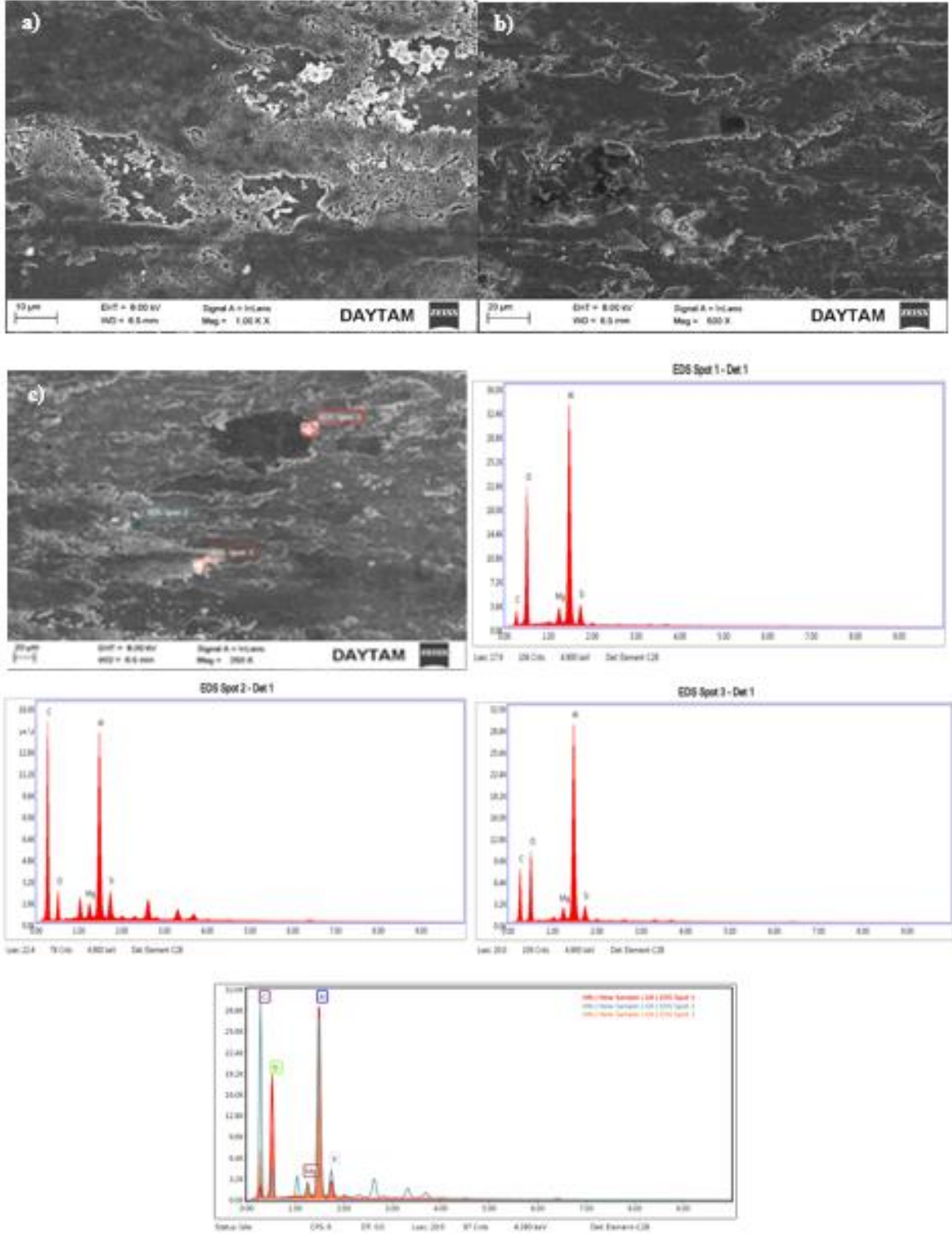
A serisi ve B serisi yüzey pürüzlülük değerleri incelendiğinde genel olarak B serisinde yüzey pürüzlülük değerleri daha yüksektir. Numunelerde yüzey pürüzlülüğünün düşük olması sürtünme katsayısını düşürür [150]. Bu sebeple B serisi numunelerinin aşınma oranı daha yüksektir.

5.5. Aşınma Testi

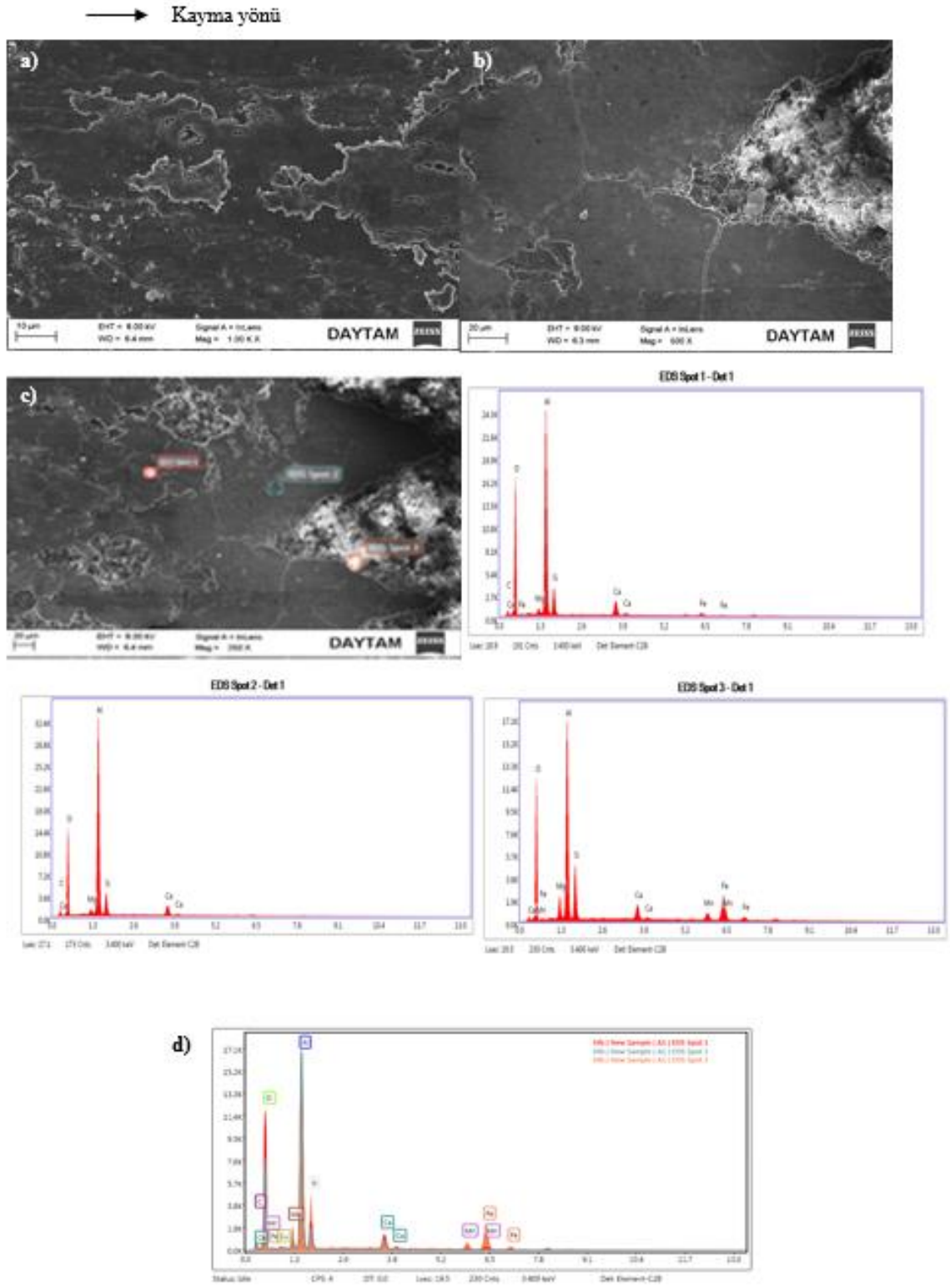
Hidrotermal yöntem ile kaplama yapılan numunelerin, 5N yük ve 250 dev/dk da yaklaşık 200 m yol aldıktan sonra, aşınma test sonuçlarına ait SEM görüntüleri, sürtünme katsayısı ve kütle kaybı gibi parametreler bu kısımda verilmiştir.

Aşınma testinden sonraki K, A1, A2 ve A3 numunelerinin SEM ve EDX analizleri sırasıyla Şekil 5.26, Şekil 5.27, Şekil 5.28 ve Şekil 5.29' da gösterilmektedir.

→ Kayma yönü

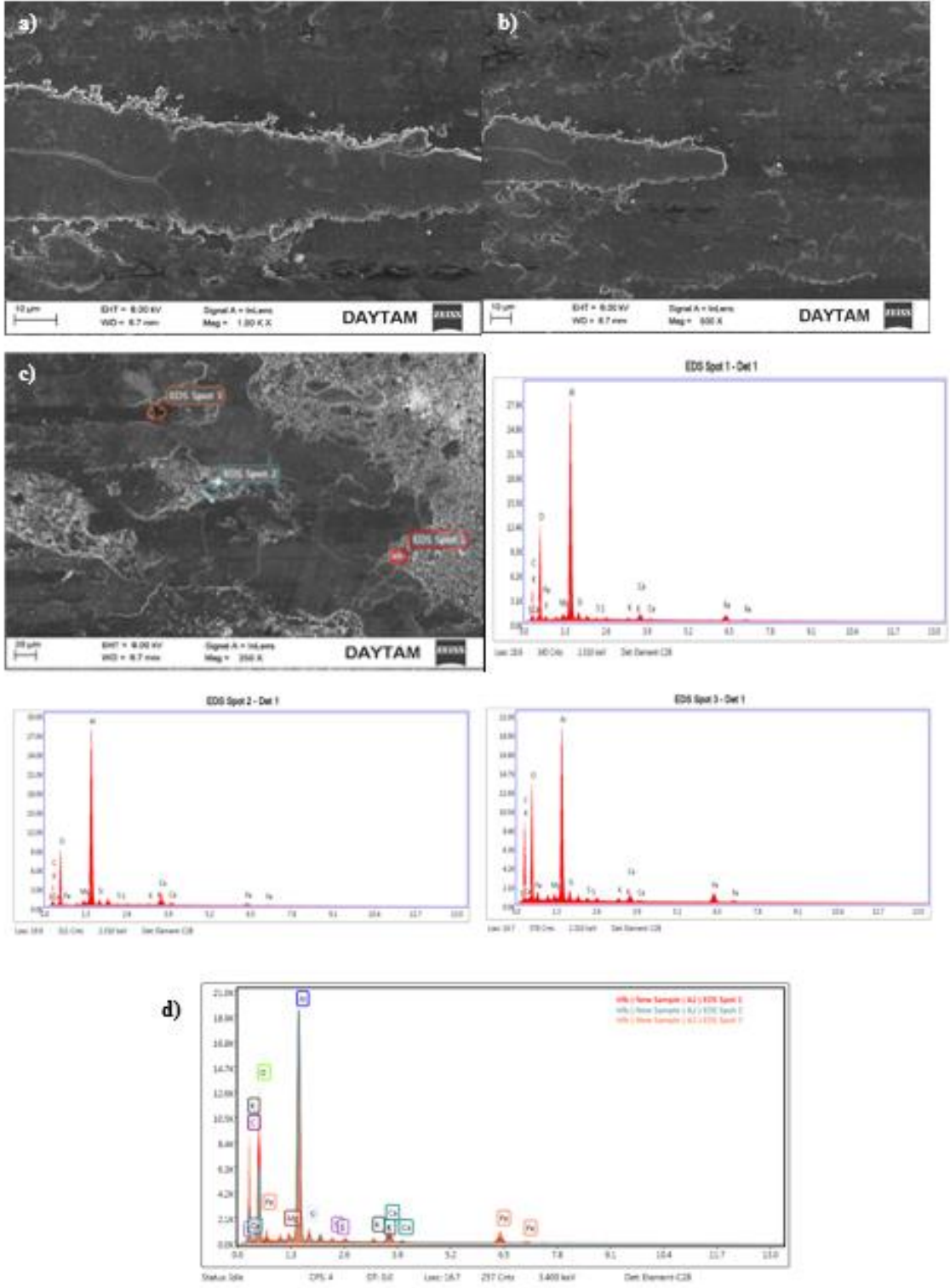


Şekil 5.26. K numunesi aşınma yüzeyi SEM görüntüleri; a)1.00 K.X, b) 500X büyütmede, c) bölgesel EDX analizi ve d) ortalama bölgesel EDX analizi

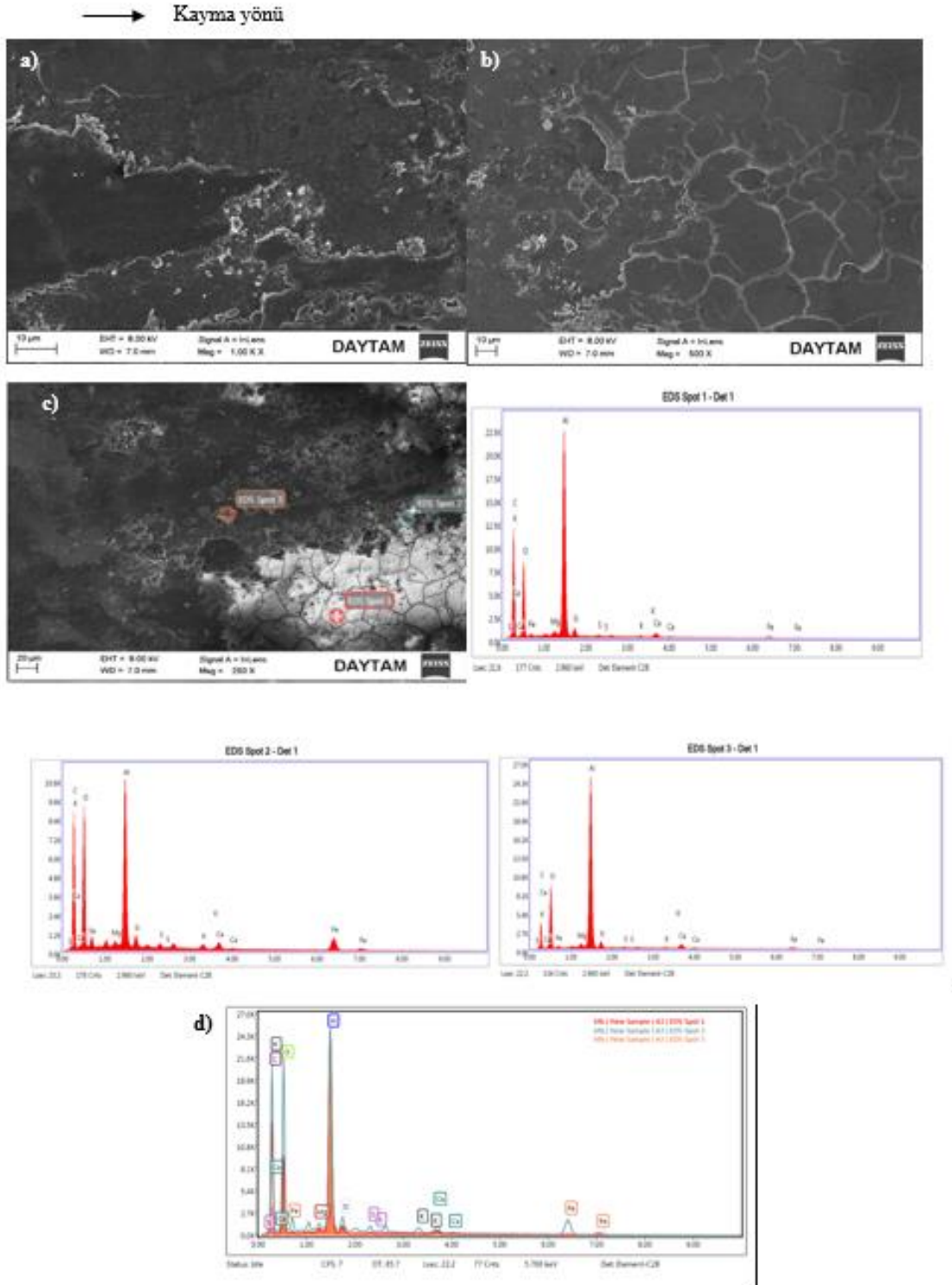


Şekil 5.27. Al numunesi aşınma yüzeyi SEM görüntüleri; a)1.00 K.X, b) 500X büyütmede, c) bölgesel EDX analizi ve d) ortalama bölgesel EDX analizi

→ Kayma yönü



Şekil 5.28. A2 numunesi aşınma yüzeyi SEM görüntüleri; a)1.00 K.X, b) 500X büyütmede, c) bölgesel EDX analizi ve d) ortalama bölgesel EDX analizi



Şekil 5.29. A3 numunesi aşınma yüzeyi SEM görüntüleri; a) 1.00 K.X, b) 500X büyütmede, c) bölgesel EDX analizi ve d) ortalama bölgesel EDX analizi

Temas halinde olan ve birbirilerine göre izafi hareket yapan kuru kayma yüzeylerinde, daima bir aşınma söz konusudur. Kayma aşınması olarak da bilinen adhezif aşınma, kayma ara yüzeylerinde metal-metal temas noktalarının soğuk kaynak oluşturması ile yüzeyde meydana

gelmiştir [119]. Yapılan bu çalışmada, K numunesi ve A serisi numunelerine ait aşınmış yüzey SEM görüntüleri verilmektedir. Birbiri üzerinde kayan, çok küçük yüzeylerdeki gerilmeler küçük yüklemelerde dahi akma gerilmesi sınırına erişirler ve geçerler. Böylece bu yüzeyler arasında yapışma kuvveti ortaya çıkar [151]. A serisi numunelerine ait SEM analizlerinden yola çıkarak yüzeyde genel olarak adhezif aşınmanın olduğu açıkça görülmektedir. Kaplamada kullanılan grafenin sertlik değerini arttırdığı bilinmektedir. Ayrıca sertlik ve aşınma direnci birbiri ile ilişkilidir. Yağlayıcı bir malzeme olan grafenin dahil edilmesi ile hibrit kompozit malzemenin aşınma direncinde artış olacağı düşünülmektedir [147, 148]. Ayrıca takviye olarak kullanılan uçucu külün, yapılan literatür araştırmaları sonucunda aşınma direncini arttırdığı görülmüştür [132, 152]. Şekil 5.26' de gösterilen K numunesinin aşınma yüzeyi incelendiğinde aşınmanın, yüzeyde kayma yönüne paralel genellikle geniş dalgalar şeklinde, sıyrılarak parça kopması olduğu ve yüzeyde yer yer katarlerin, pullanmaların olduğu görülmüştür. Yüzeyden kopan parçacıkların sürtünme esnasında açığa çıkan ısınmada etkisi ile yüzeye sıvandığı düşünülmektedir. K numunesinin aşınmadan önceki SEM analizi ile kıyaslandığında yüzeyde bulunan partiküler şeklindeki grafenin sürtünmenin de etkisi ile sıvandığını kanıtlar niteliktedir. Ayrıca alınan noktasal EDX analizi sonucunda, K numunesinin yüzeyinde grafene ait C atomlarının varlığını gösterirken kaplamanın yüzeyden tamamen kalkmadığının da bir kanıtıdır. Şekil 5.27' de gösterilen A1 numunesi incelendiğinde yüzeyde, kayma yönüne paralel tabakaların sıvandığı, K numunesine göre çok daha az adhezif aşınma gösterdiği ve yer yer kırılıp döküldüğü görülmektedir. Bu durumun, A1 numunesinin aşınmaya karşı dayanıklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü aşınma sonuçları incelendiğinde en yüksek aşınma direncine sahip numune, A1 numunesidir. Ayrıca A1 numunesinin aşınmadan önceki SEM analizi ile kıyaslandığında kabuksu yapının yer yer korunduğu görülmektedir. Şekil 5.28' da gösterilen A2 numunesinin SEM analizi incelendiğinde, aşınmanın genellikle geniş dalgalar halinde, sıyrılarak parça kopması şeklinde olduğu görülmektedir. Yüzeyde yer yer pullanmalar ve aşınma kalıntılarına rastlanmıştır. Şekil 5.29' da gösterilen A3 numunesinin SEM analizi incelendiğinde, aşınmanın genellikle yüzeyden kırılıp dökülmeler şeklinde olduğu görülmektedir. Aşınma sonuçları incelendiğinde A serisi içerisinde en düşük aşınma direncine ve aynı zamanda en fazla kütle kaybının görüldüğü numune, A3 numunesidir.

Aşınma deneylerinde aşınan malzeme aşındırıcı üzerinde zedelenmeye sebebiyet verdiğinden aşındırıcıdan malzemeye demir elementi geçişi olur. Ayrıca aşındırıcıdan malzemeye geçen Fe ve malzemedan kopan Al parçaları malzemede Fe-, O- ve Al- içerikli fazların oluşmasına neden olur. Oluşan bu fazlar malzeme yüzeyine yerleşerek malzemede gerilmeyi artırır [151]. A serisi numunelerine ait EDX analizleri incelendiğinde aşındırıcıdan malzeme yüzeyine geçen demir elementine rastlanmıştır.

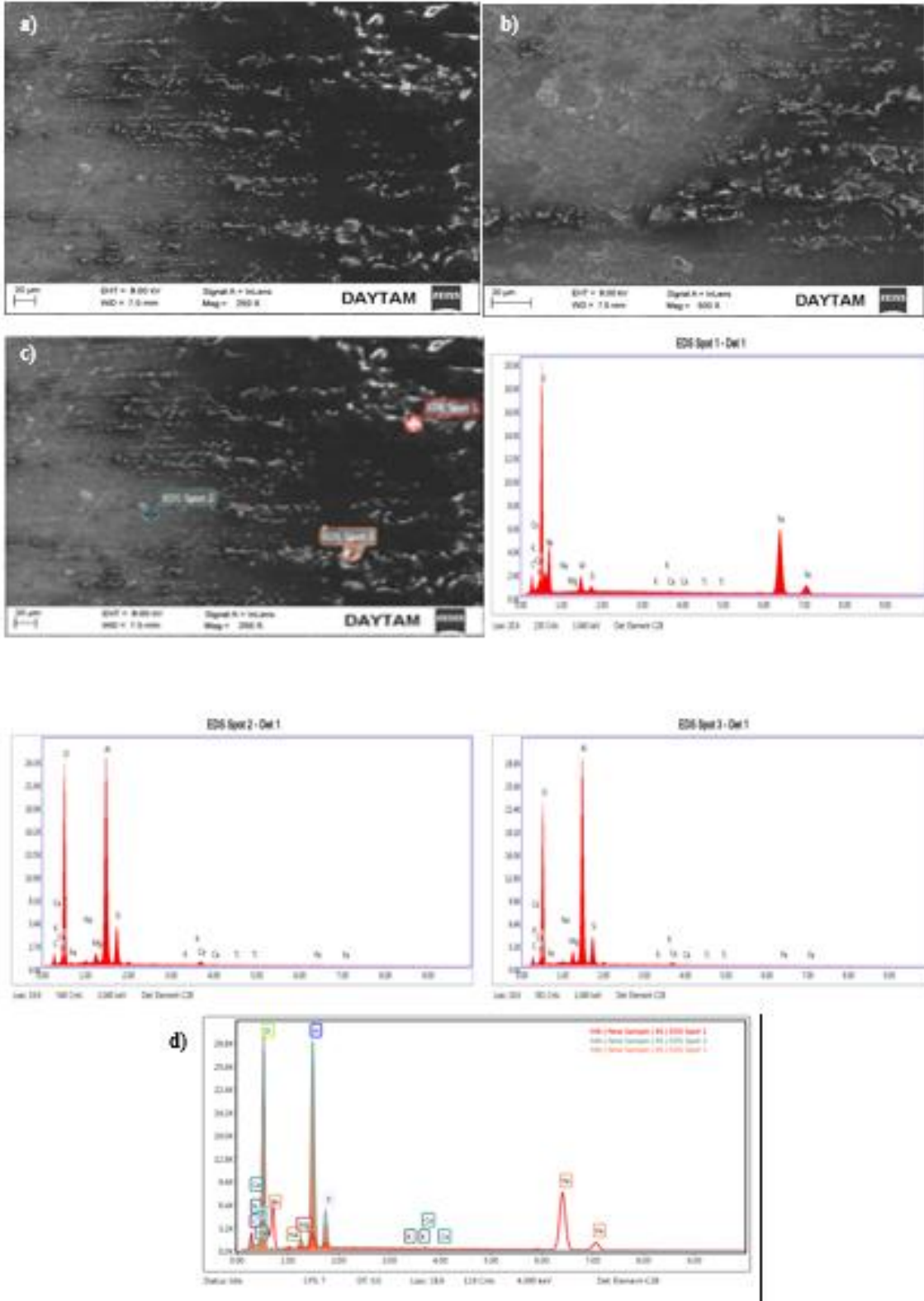
Genel olarak aşınma testleri için malzeme yüzeyleri her ne kadar pürüzsüz hale getirilmeye çalışılsa da pratikte bu durum mümkün olmamaktadır. Bu sebepten ötürü iki yüzey birbiri ile temas halindeyken gerçek temas eden kısım, pürüzlülüklerin birbirine değdiği noktada gerçekleşir. Yüzeyle etki eden yük, yalnızca pürüzlülüklerin birbirine değdiği noktadan destek alır ve yüzey alanının küçük bir kısmı yükü taşımış olur. Böylelikle pürüz tepelerinde plastik deformasyon meydana gelir [150]. Temas eden yüzeylerde, plastik deformasyon hasarlarının etkisi önemli rol oynamaktadır. Yüzeyler birbiri üzerinde kayarken, yüzey pürüzlülükleri plastik deforme olan iki malzemenin birbirinin hareketine karşı bir direncin ortaya çıktığı görülmektedir. Ara yüzey sıcaklığı yükselmeksizin kayma meydana geldiğinde kimyasal özelliklerden çok mekanik özelliklerin sürtünme davranışını etkilediği görülmüştür. Sürtünmeye; pürüzlerin deformasyonu, yapışma ve çizilme olmak üzere üç temel mekanizmanın etki ettiği görülür [91]. Yapmış olduğumuz bu tez çalışmasında uçucu kül takviyeli olan A serisi numunelerinde SEM görüntüleri ile yüzey pürüzlülüğü, sürtünme katsayısı ve kütle kaybı gibi parametreler birbirini destekler niteliktedir. Ortalama sürtünme katsayısı; A1 numunesinde 0,063, A2 numunesinde 0,096 ve A3 numunesinde ise 0,334'dür. A serisi numunelerinden aşınma testinden önce ve aşınma testinden sonra yapılan tartım işleminden hesaplanan kütle kaybı değerleri; A1 numunesinde 0,54 mg, A2 numunesinde 0,63 mg ve A3 numunesinde ise 12,6 mg'dir. Bu değerlerden yola çıkarak takviye edilen uçucu kül oranı arttıkça yüzey pürüzlülüğü değerleri artış göstermiştir. Aynı doğrultuda sürtünme katsayısı ve kütle kaybı değerleri de artış göstermiştir. Ayrıca mikro-sertlik değeri de aşınmayı etkileyen bir parametredir. A serisi mikro-sertlik değerleri; A1 numunesinde 209.41 HV, A2 numunesinde 217.266 HV ve A3 numunesinde 358.5 HV olarak ölçülmüştür. Ancak burada mikro-sertlik değerlerinin artışıyla aşınmanın daha az olması beklenirken, aynı zamanda artan yüzey pürüzlülüğü ve düşük kaplama kalınlığı sebebiyle aşınma direncinin azaldığının ve kütle kaybının arttığı görülmüştür.

A serisi numunelerinde uçucu kül takviye oranı arttıkça aşınma direncinde azalma görülmüştür. Ancak tüm numuneler içerisinde aşınma direnci en yüksek olan numune %10 uçucu kül içeren A1 numunesidir. Çünkü bütün numuneler içerisinde en düşük kütle kaybı (0,54 mg) bu numunede görülmüştür.

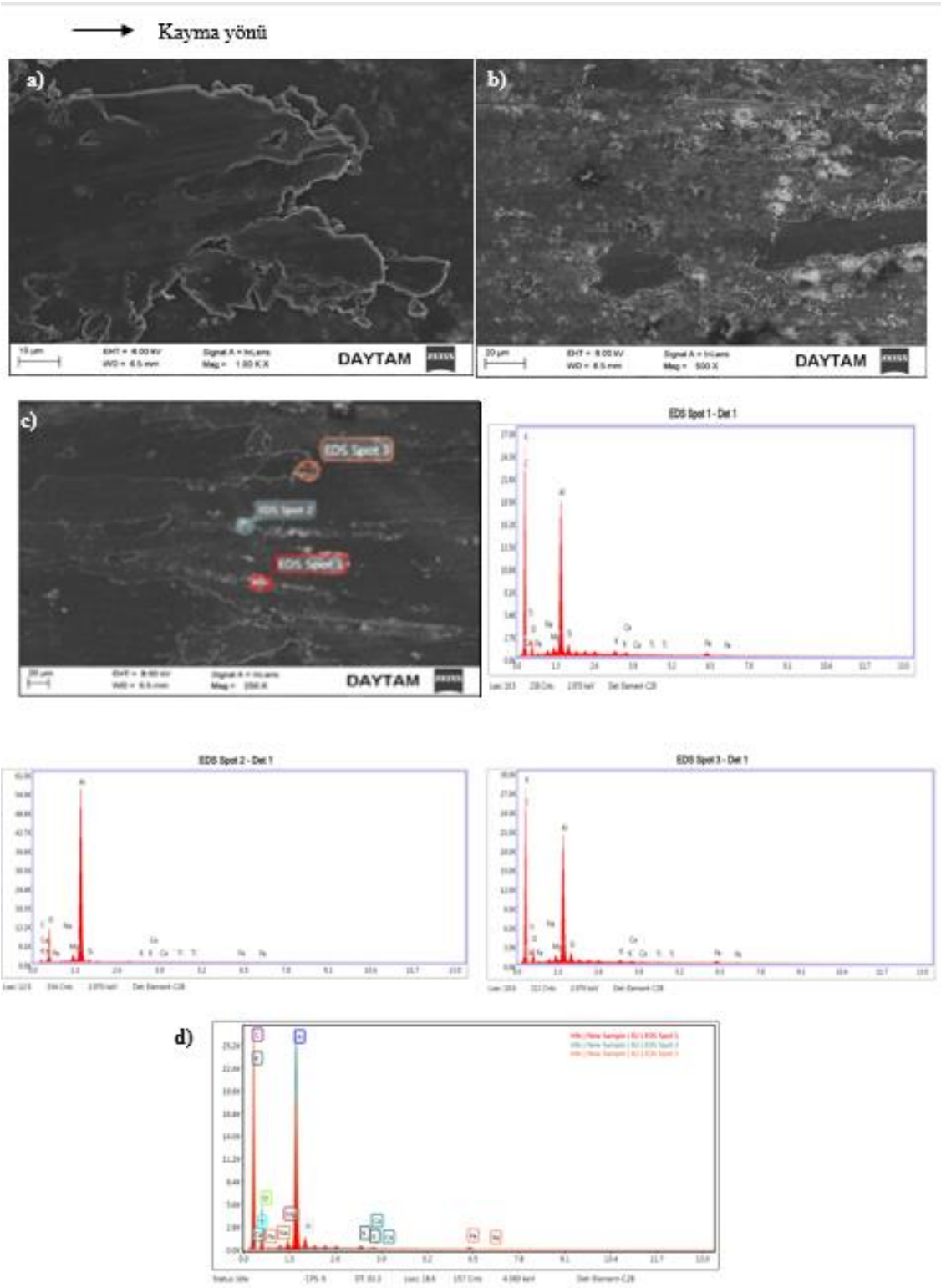
Grafen ile takviye edilen uçucu kül (A serisi), takviyesiz K numunesiyle kıyaslandığında, genel olarak aşınma dayanımını arttırdığı gözlemlenmiştir. Hidrotermal kaplama yöntemi ile elde edilen hibrit kompozit malzeme, 5N yük altında 4 dakika boyunca aşınma testine dayanıklı kaldığı görülmüştür. Kaplamanın kalkıp sıyrıldığı tüm durumlar için plastik deformasyon söz konusudur [153]. Aşınma sonrası yapılan EDX analizi ile yüzeyde kaplamanın tamamen kalkmadığı tüm numunelerde görülmektedir.

Aşınma testinden sonraki B1, B2 ve B3 numunelerinin SEM ve EDX analizleri sırasıyla; Şekil 5.30, Şekil 5.31 ve Şekil 5.32' de gösterilmiştir.

→ Kayma yönü

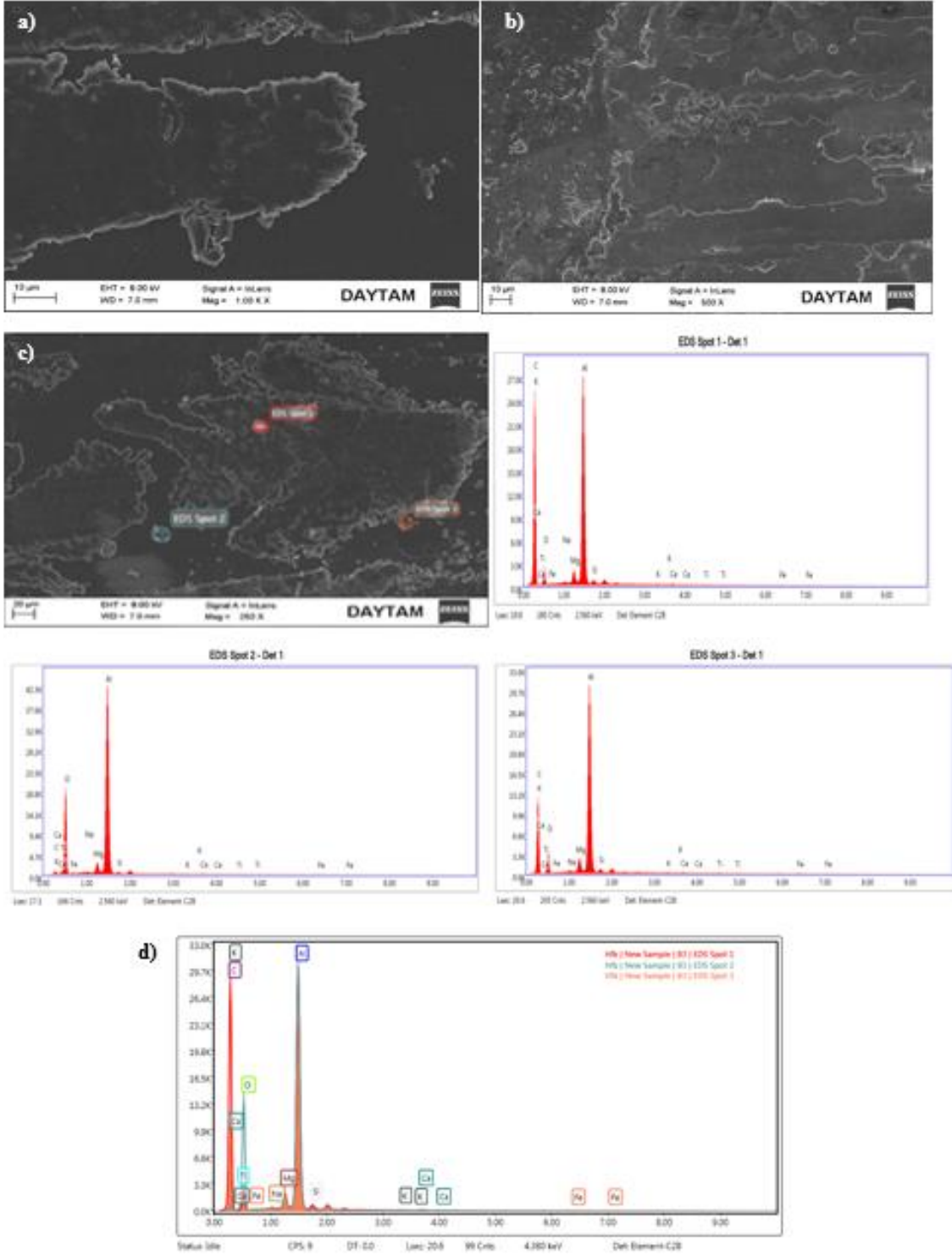


Şekil 5.30. B1 numunesi aşınma yüzeyi SEM görüntüleri; a)1.00 K.X, b) 500X büyütmede, c) bölgesel EDX analizi ve d) ortalama bölgesel EDX analizi



Şekil 5.31. B2 numunesi aşınma yüzeyi SEM görüntüleri; a)1.00 K.X, b) 500X büyütmede, c) bölgesel EDX analizi ve d) ortalama bölgesel EDX analizi

→ Kayma yönü



Şekil 5.32. B3 numunesi aşınma yüzeyi SEM görüntüleri; a)1.00 K.X, b) 500X büyütmede, c) bölgesel EDX analizi ve d) ortalama bölgesel EDX analizi

Aşınma testi sonucunda B serisi numunelerinden alınan SEM analizi sonucu, metal-metal teması ile yüzeyde genel olarak sıyrılma, kopma ve adhezif aşınma izleri görülmüştür. Sırasıyla Şekil 5.30 ve Şekil 5.31’ de gösterilen B1 ve B2 numunelerinde aşınma testi sonucu malzeme yüzeyinde bulunan oksit tabakalardan kopan partiküllerin temas eden yüzeyler arasında birikmesi ve üçüncü bir cisim gibi davranarak, oluşan tribomekanik etkileşim sebebi ile kayan yüzeylerde abrazif aşınmayı tetiklediği düşünülmektedir [154]. B1 ve B2 numunelerinde plastik deformasyonun etkileri net bir şekilde görülmektedir. B serisi numunelerinde, SiO₂ oranı arttıkça numunelerin aşınma yüzeyinde plastik deformasyonun daha az olduğu görülmüştür [155]. Yapmış olduğumuz bu çalışmada kullanılan geliştirilmiş perlitin yüksek oranda SiO₂ içermesi ile takviye oranı arttıkça plastik deformasyonda azalma olduğu görülmüştür. Şekil 5.32’ de gösterilen B3 numunesinde ise aşınma izleri B1 ve B2 numunesine kıyasla kesme şeklinde değil de yine adhezif aşınma mekanizmasına dönüşmüştür. B serisi numunelerinde genel olarak SEM analizlerinde aşınma yüzeyinde kısmen döküntüler meydana gelmiştir. Bunun sebebi ise kayma esnasında numune yüzeyinde veya yüzeyin hemen altında yorulma sonucu çatlakların oluşması ve aşınma testi ilerlerken bu çatlak çevresinden kopan parçacıklara ait olduğu düşünülmektedir [156]. B serisi numunelerinde en iyi aşınma direncini B3 numunesi göstermiştir. Bunun nedeni B3 numunesinin, B1 ve B2 numunesine göre hem kaplama kalınlığı hem de mikro-sertlik değeri artma göstermiştir.

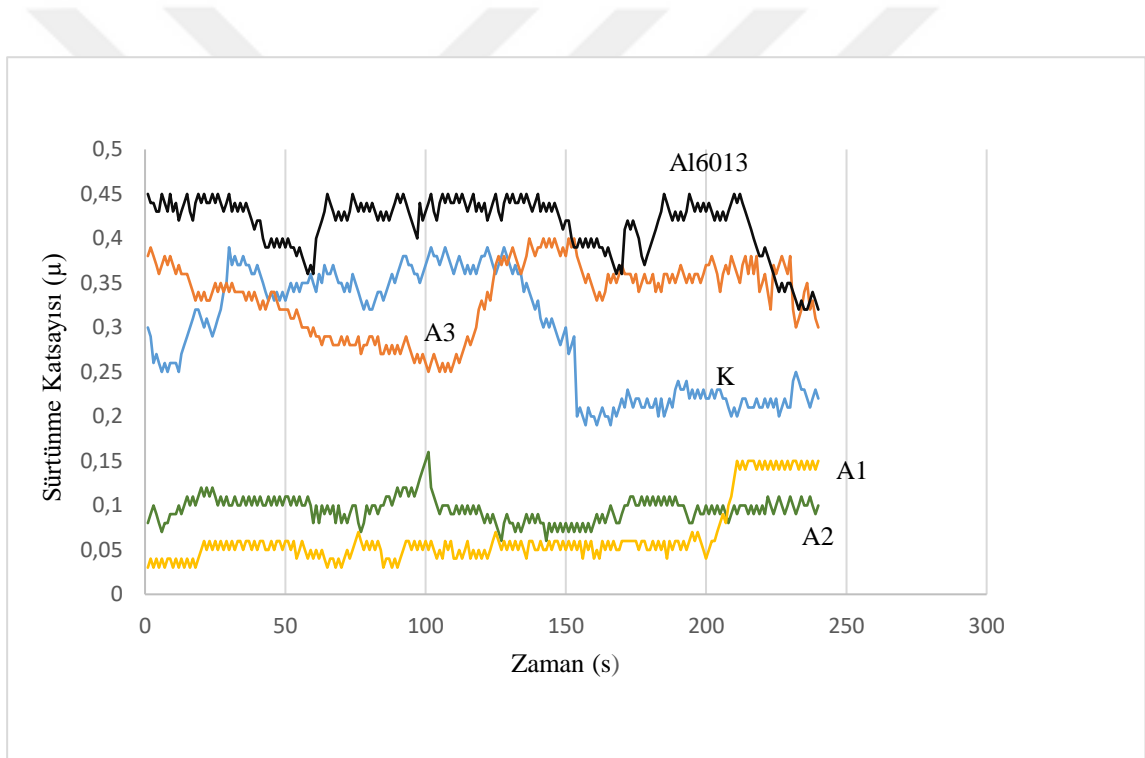
Aşınma deneylerinde aşınan malzeme aşındırıcı üzerinde zedelenmeye sebebiyet verdiği için aşındırıcıdan malzemeye demir elementi geçişi olur. Ayrıca aşındırıcıdan malzemeye geçen Fe ve malzemedeki kopan Al parçaları malzemedeki Fe-, O- ve Al- içerikli fazların oluşmasına neden olur. Oluşan bu fazlar malzeme yüzeyine yerleşerek malzemedeki gerilmeyi artırır [151]. B serisi numunelerine ait EDX analizleri incelendiğinde geliştirilmiş perlit takviye oranı arttıkça, aşındırıcıdan malzeme yüzeyine geçen demir elementi azalma göstermiştir.

B serisi numunelerinde de A serisi numunelerindeki gibi SEM analizleri ile yüzey pürüzlülüğü, sürtünme katsayısı ve kütle kaybı parametreleri birbirini destekler niteliktedir. Ortalama sürtünme katsayısı; B1 numunesinde 0,164, B2 numunesinde 0,145 ve B3 numunesinde ise 0,128’dir. B serisi numunelerinden aşınma testinden önce ve aşınma testinden sonra yapılan tartım işleminden hesaplanan kütle kaybı değerleri; B1 numunesinde 197,6 mg, B2 numunesinde 152,7 mg ve B3 numunesinde ise 132,6 mg’dir. Bu değerlerden yola çıkarak takviye edilen geliştirilmiş perlit oranı arttıkça yüzey pürüzlülüğü değeri azalmıştır ve aynı doğrultuda sürtünme katsayısı ve kütle kaybı parametreleri de azalma göstermiştir.

Aşınma ile mikro-sertlik değerleri de birbiri ile ilişkilidir. B serisi mikro-sertlik değerleri; B1 numunesinde 254.53 HV, B2 numunesinde 280.886 HV ve B3 numunesinde 374.5 HV olarak ölçülmüştür. Numunelere takviye edilen geliştirilmiş perlit oranı arttıkça sertlik değerleri de artış göstermiştir. Mikro-sertlik ölçüm kısmında verilen sertlik sonuçlarından da anlaşılacağı gibi artan geliştirilmiş perlit oranı ile birlikte sertlik değerleri de artış göstermiştir. Sertlik değeri arttıkça

malzeme yüzeyindeki plastik deformasyon azalmaktadır. Şimşek vd. (2019) yapıda bulunan SiO_2 'nin sertliği arttırdığını raporlamışlardır [155]. B serisi numunelerinde genişleştirilmiş perlit takviye oranı arttıkça mikro-sertlik değerinin artması ve kütle kaybının azalması, bu açıklamayı destekler niteliktedir.

Aşınma SEM ve EDX analizlerinden sonra bu aşamada sürtünme katsayısı ve kütle kaybı verileri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen hibrit kompozit numuneler ile SAE 1050 çeliğinden yapılan disk arasındaki kuru sürtünme katsayısı, aşınma testleriyle belirlenmiştir. Yürütülen testler neticesinde, her saniyede bir veri olmak üzere 240 sürtünme katsayısı verisi elde edilmiştir. Sürtünme verilerine karşılık kayma mesafesi (L) yaklaşık 200 m (0.2 km) olarak hesaplanmıştır. Al6013 Alüminyum alaşımı, K ve A serisi numunelerine ait sürtünme katsayısı grafiği Şekil 5.33'de gösterilmektedir.



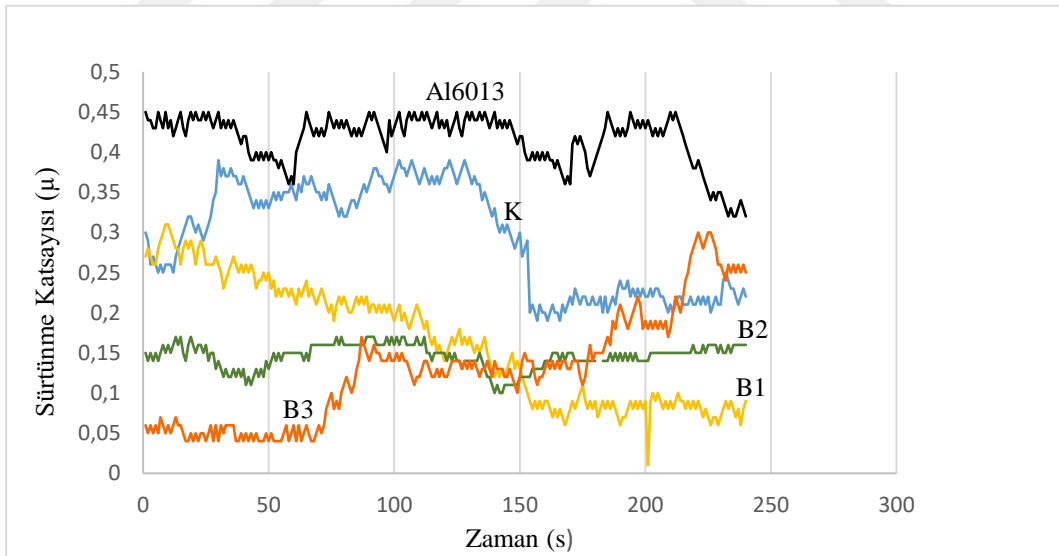
Şekil 5.33. Al6013 Alüminyum alaşımı, K ve A serisi numunelerine ait sürtünme katsayısı-zaman grafiği

A serisi numunelerinde takviye edilen uçucu külün sürtünme katsayısında azalma sağladığı gözlemlenmiştir [152]. Ancak belirli bir miktardan sonra uçucu külün artması sürtünme katsayısını da arttırdığı görülmüştür [132]. A serisi numunelerinde ise %10 uçucu kül içeren (A1) numunesinde ortalama sürtünme katsayısı 0,063, % 20 uçucu kül içeren (A2) numunesinde sürtünme katsayısı ortalama 0,096 ve % 30 uçucu kül içeren (A3) numunesinde ise sürtünme katsayısı ortalama 0,334 olarak hesaplanmıştır. A serisi numunelerinde takviye oranı arttıkça sürtünme katsayısı artış göstermiştir. A serisi numunelerinde takviye edilen uçucu kül oranı %20' ye kadar olan (A1 ve A2)

numunelerin sürtünme katsayısı, yalnızca grafen ile kaplanan K numunesine kıyasla çok daha az sürtünme katsayısı göstermiştir. Ancak uçucu kül takviyesi %30 (A3) olan numunede sürtünme katsayısı, K numunesine kıyasla bir miktar artış göstermiştir. Bunun bir sebebi; A3 numunesinin, A1 ve A2 numunesine göre kaplama kalınlığı çok düşüktür. Bir diğer sebep, A3 numunesinin yüzey pürüzlülüğü değerleri; A1 ve A2 numunesine göre artış göstermiştir. Bir diğer sebep ise artan uçucu kül takviyesi ile aşındırıcı diske temas eden uçucu külün arttığını ve böylelikle sürtünme katsayısını arttırdığını bilinmektedir [132].

Sürtünme katsayısında önemli parametreler olan mikro-sertlik ve yüzey pürüzlülüğü grafikleri göz önünde bulundurularak; numunede sertliğin yüksek ve yüzey pürüzlülüğünün düşük olması sürtünme katsayısını düşürür [150]. A serisi numunelerinde takviye oranı arttıkça mikro-sertlik değeri ve yüzey pürüzlülük değerleri de artış göstermiştir. A3 numunesinin A1 ve A2 numunesine kıyasla sertliğinin artması ile sürtünme katsayısının düşmesi beklenirken, A3 numunesinin yüzeyde uniform bir kaplama göstermemesi ve artan yüzey pürüzlülüğü değerlerinin sürtünme katsayısını arttırdığı görülmüştür.

Kaplama yapılmamış Al6013 Alüminyum alaşımı, K numunesi ve B serisi numunelerine ait sürtünme katsayısı-zaman grafiği Şekil 5.34' de gösterilmektedir.



Şekil 5.34. Al6013 Alüminyum alaşımı, K ve B serisi numunelerine ait sürtünme katsayısı-zaman grafiği

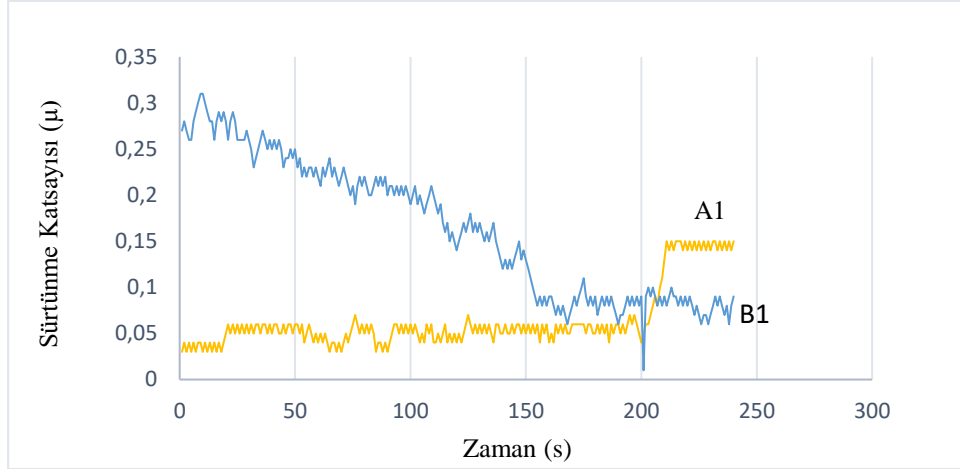
B serisi numunelerinde ise %10 genişletilmiş perlit içeren (B1) numunesinde sürtünme katsayısı 0,164, % 20 genişletilmiş perlit içeren (B2) numunesinde sürtünme katsayısı ortalama 0,145 ve % 30 genişletilmiş perlit içeren (B3) numunesinde sürtünme katsayısı ortalama 0,128 olarak hesaplanmıştır. B serisi numunelerinde, genişletilmiş perlitin takviye oranı arttıkça sürtünme katsayısında azalma gözlemlenmiştir. Bunun sebebi B serisi numunelerinde artan

genleştirilmiş perlit takviyesi ile birlikte kaplamanın yüzeyde tutunması artış göstermiştir ve sürtünme katsayısında azalma gözlemlenmiştir. B serisi numuneleri K numunesi ile kıyaslandığında ise sürtünme katsayısında yine azalma göstermiştir.

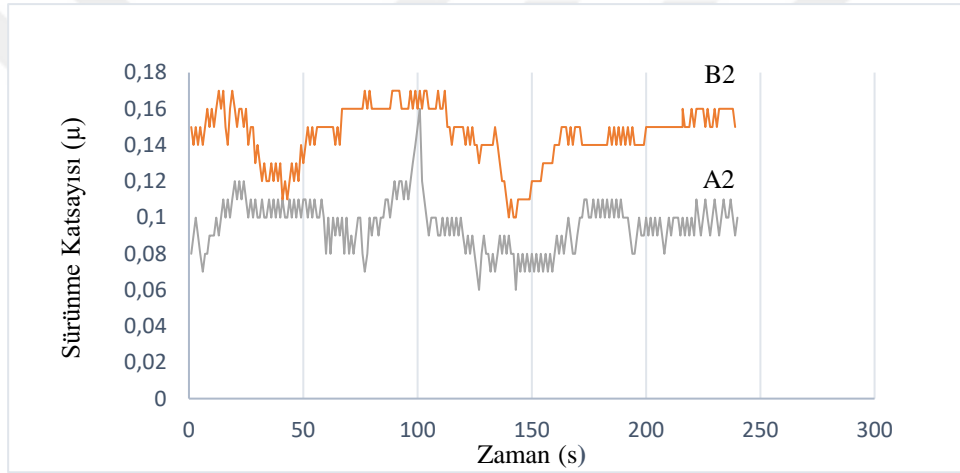
Sürtünme katsayısında mikro-sertlik ve yüzey pürüzlülüğü önemli parametrelerdir. B serisi numunelerinde yüksek sertliğin ve düşük yüzey pürüzlülüğünün sürtünme katsayısını düşürdüğü görülmüştür [150]. Genleştirilmiş perlitin takviye oranı arttıkça mikro-sertlik değeri artmıştır ve yüzey pürüzlülük değerleri önce azalmış ve sonra bir miktar artış göstermiştir. B3 numunesinde artan sertlik değeri ve düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri, B serisi numuneleri içerisinde en az sürtünme katsayısını göstermektedir. B serisi numuneleri, A serisi numunelerine göre yüksek sürtünme katsayısı ve dolayısıyla düşük aşınma direnci sergilemiştir. Bunun sebebi B serisi numunelerinin yüzey pürüzlülük değerleri A serisindeki numunelere göre fazladır.

Genel olarak aşınma testleri için malzeme yüzeyleri her ne kadar pürüzsüz hale getirilmeye çalışılsa da pratikte bu durum mümkün olmamaktadır. Bu sebepten ötürü iki yüzey birbiri ile temas halindeyken gerçek temas eden kısım, pürüzlülüklerin birbirine değdiği noktada gerçekleşir. Yüzeye etki eden yük, yalnızca pürüzlülüklerin birbirine değdiği noktadan destek alır ve yüzey alanının küçük bir kısmı yükü taşımış olur. Böylelikle pürüz tepelerinde plastik deformasyon meydana gelir [150].

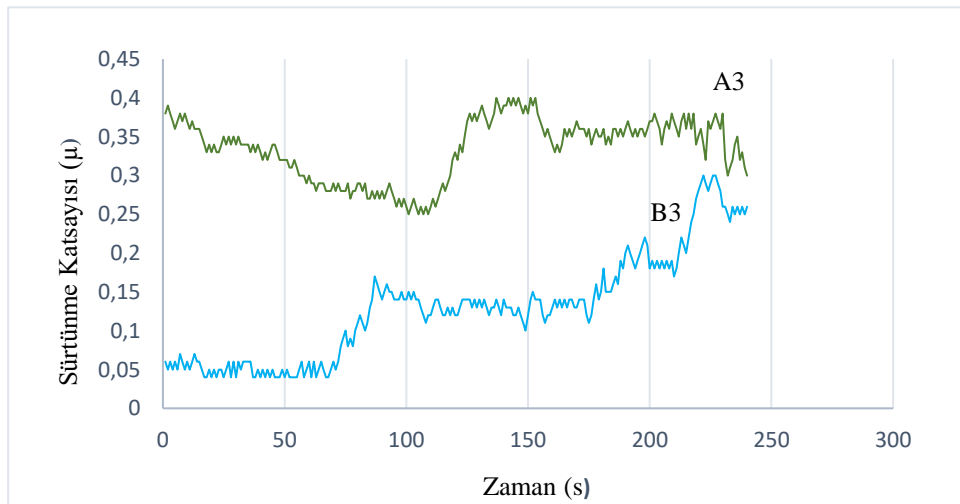
A serisi ve B serisi numunelerine ait sürtünme katsayısı grafikleri Şekil 5.35' de gösterilmektedir.



(a)



(b)



(c)

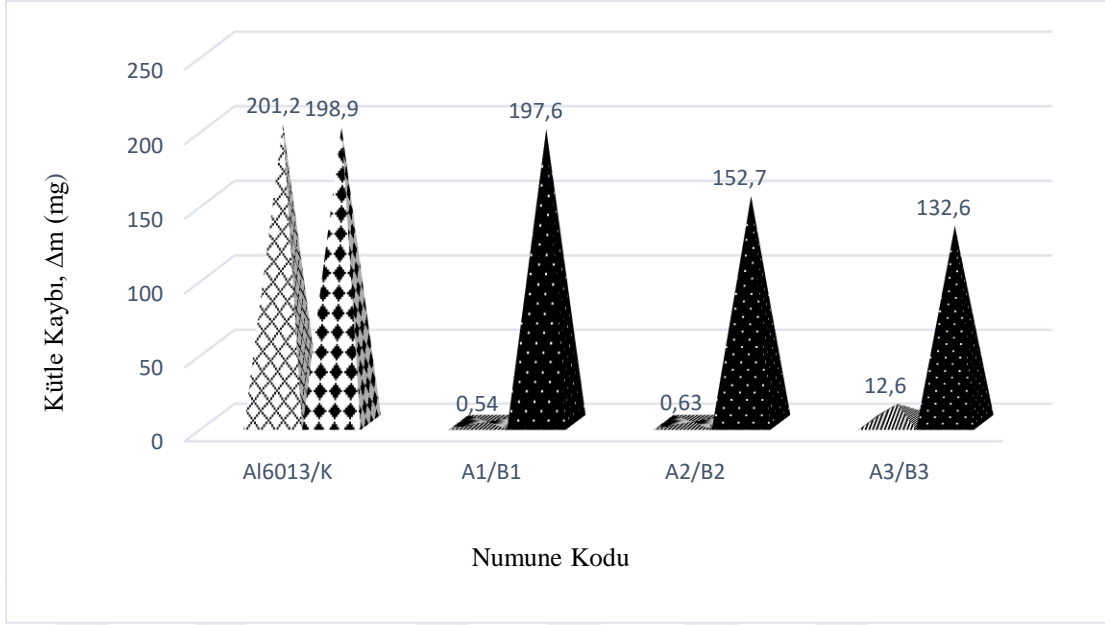
Şekil 5.35. A serisi ve B serisi numunelerine ait grafikler; a)A1 ve B1 numunesi sürtünme katsayısı, b) A2 ve B2 numunesi sürtünme katsayısı ve c) A2 ve A3 numunesi sürtünme katsayısı

Genel olarak A serisi ve B serisi numunelerinin sürtünme katsayıları incelendiğinde, aşınma testi sonucunda hesaplanan ortalama sürtünme katsayısı, %10 uçucu kül içeren (A1) numunesinde ortalama 0,063 ve %10 genişletilmiş perlit içeren numunede (B1) ortalama sürtünme katsayısı 0,164 olarak hesaplanmıştır. Yapılan aşınma testi sonucunda hesaplanan ortalama sürtünme katsayısı, %10 uçucu kül içeren (A1) numunesinde ortalama 0,063 ve %10 genişletilmiş perlit içeren numunede (B1) ortalama sürtünme katsayısı 0,164 olarak hesaplanmıştır. Buradan yola çıkarak genişletilmiş perlit içeren numunede sürtünme katsayısı artmıştır. Bunun sebebi, hem kaplama kalınlığı hem de yüzey pürüzlülüğü olduğu düşünülmektedir. A1 numunesinde kaplama kalınlığı yaklaşık 70,9 µm iken B1 numunesinde ise yaklaşık 1,41 µm dir. İki yüzey birbiri ile temas ederken, gerçekte temas eden kısım pürüz tepcikleridir [150]. Böylelikle B1 numunesinde sürtünme katsayısının artış sebebi, A1 numunesine göre düşük kaplama kalınlığı ve yüksek yüzey pürüzlülüğü değerinden olabileceği düşünülmektedir (Şekil 5.35 a).

Aşınma testi sonucu elde edilen sürtünme katsayısı grafiğinden % 20 uçucu kül içeren (A2) numunesinde ortalama sürtünme katsayısı 0,096 ve % 20 genişletilmiş perlit içeren (B2) numunesinde ise ortalama sürtünme katsayısı 0,145 olarak hesaplanmıştır. Burada da sürtünme katsayısının artmasının sebebi hem kaplama kalınlığına hem de yüzey pürüzlülüğüne bağlıdır. A2 numunesinde kaplama kalınlığı yaklaşık 111,6 µm iken B2 numunesinde kaplama kalınlığı yaklaşık 2,21 µm dir. Genleştirilmiş perlit içeren numunede, sürtünme katsayısının artmasının sebebi hem kaplama kalınlığının az olması hem de hem de yüzey pürüzlülüğü değerinin bir miktar fazla olmasıdır (Şekil 5.35 b).

Şekil 5.35 c' de gösterilen A3 numunesinin ortalama sürtünme katsayısı 0,334 ve B3 numunesinin ortalama sürtünme katsayısı ise 0,128 olarak hesaplanmıştır. Burada da diğer numunelerdeki gibi sürtünme katsayısını, kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü değerleri etkilemektedir. A3 numunesinde kaplama kalınlığı yaklaşık 2,009 µm iken B3 numunesinde kaplama kalınlığı yaklaşık 50,6 µm dir. Takviye oranları %10 ve %20 olan numunelerdekinin aksine, genişletilmiş perlit içeren numunede yüzey pürüzlülük değeri artmış olmasına rağmen uçucu kül içeren numunede kaplama kalınlığının az olmasının da etkisi ile sürtünme katsayısı artış göstermiştir.

Bu tez çalışmasında aşınma testi önce ve sonrasında numuneler hassas terazi yardımı ile tartılmıştır. Bunun sonucunda elde edilen verilerle; kütle kaybı-numune kodu grafiği Şekil 5.36' da gösterilmiştir.



Şekil 5.36. K numunesi A serisi ve B serisi numunelerine ait kütle kaybı grafiği

A serisi numunelerinde; A1 numunesinde kütle kaybı 0,54 mg ve %20' ye artan uçucu kül takviyesi ile A2 numunesindeki kütle kaybı 0,63 mg dir. Uçucu kül takviyesi %30 olan A3 numunesindeki kütle kaybı ise 12,6 mg olarak hesaplanmıştır. A serisi numunelerinde takviye edilen uçucu kül oranı arttıkça kütle kaybı Δm (mg), artış göstermiştir. Kütle kaybı verilerinden yola çıkarak en iyi aşınma direncini sağlayan A1 numunesi ve en düşük aşınma direnci gösteren A3 numunesidir. A3 numunesinin kaplamasının iyi olmaması, yüzey pürüzlülüğü değerinin artması ve buna bağlı olarak sürtünme katsayısındaki artış aşınma oranının en fazla olmasının nedenidir.

B serisi numunelerinde; B1 numunesinde kütle kaybı 197,6 mg, B2 numunesinde kütle kaybı 152,7 mg ve B3 numunesindeki kütle kaybı ise 132,6 olarak hesaplanmıştır. B serisi numunelerinde artan geliştirilmiş takviyesi ile birlikte kütle kaybında azalma görülmüştür. Genleştirilmiş perlit içeriğindeki SiO_2 ' nin oranı arttıkça malzemenin sertliğinin arttığı ve aşınmaya karşı direnç göstererek ağırlık kaybında da azalma olduğu gözlemlenmiştir [155]. Kütle kayıp verilerinden yola çıkarak B serisi numunelerinde en düşük aşınma direncini B1 ve en yüksek aşınma direncini ise B3 numunesi göstermiştir.

Bütün numuneler içerisinde en yüksek kütle kaybı, Al6013 Alüminyum alaşımında yani hiç kaplama yapılmamış numunede görülmüştür en az kütle kaybı A1 numunesinde 0,54 mg olarak hesaplanmıştır. En yüksek kütle kaybı ise Al6013 Alüminyum alaşımında 201,2 mg olarak hesaplanmıştır. A serisine takviye edilen uçucu kül ve B serisine takviye edilen geliştirilmiş perlit genel olarak kütle kaybında azalmaya sebep olmuştur.

A ve B serisi numuneleri içerisinde aşınma direnci en yüksek olan numune, A1 numunesi 0,54 mg kütle kaybı ve en düşük olan ise B1 numunesi 197,6 mg olarak hesaplanmıştır. B1

numunesinin, kaplama kalınlıđının dűşűk ve bununla birlikte yűzey pűrűzlűlűđű deđerinin artması aşınnma oranının diđer numunelerden daha fazla olmasına sebep olmuştur.



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında, Al6013 Alüminyum alaşımı üzerine Hidrotermal yöntem kullanılarak, farklı kombinasyonlarda grafen/uçucu kül-genleştirilmiş perlit ile hibrit kompozit kaplama yapılmıştır. Hibrit kompozit kaplamanın, karakterizasyonu ve aşınma davranışlarının incelenmesi ile elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanmıştır;

- Hibrit kompozit kaplamanın SEM ve EDX analizleri incelendiğinde; grafen, uçucu kül veya genleştirilmiş perlitten oluşan kaplamaların, yüzeyde grafen benzeri katmanlı bir yapıda olduğu görülmüştür. Uçucu kül takviyeli %10 ve %20 içerikli hibrit kompozit kaplamaların yüzeyde uniform olduğu görülmüştür. %30 uçucu kül takviyeli numunede ise XRD analizi sonucu yüzeyde CaCO₃ fazının artmasıyla sertleşip kabuk oluşturarak, uniform olmayan bir kaplama sergilemiştir. Genleştirilmiş perlit takviyeli numunelerde ise takviye oranı arttıkça yüzeyde uniform bir kaplama görülmüştür. Hibrit kompozit kaplamanın yüzeyde uniform bir dağılım göstermesi için, takviye edilen uçucu kül maksimum %20 iken takviye edilen genleştirilmiş perlitin minimum %30 olması önerilebilir.
- ❖ Numunelerin mikro-sertliği incelendiğinde, uçucu kül veya genleştirilmiş perlit takviye edilen numunelerde takviye oranı arttıkça mikro-sertlik değerleri artış göstermiştir. Uçucu kül takviye edilen numunelerde en yüksek mikro-sertlik değeri, %30 uçucu kül içerikli numunede ölçülmüştür. Tüm numuneler içerisinde en yüksek mikro-sertlik değerini ise %30 genleştirilmiş perlit içeren numune göstermiştir. Numunelere takviye edilen uçucu kül veya genleştirilmiş perlit oranı arttıkça mikro-sertlik değerlerinin artma sebebi, kaplama yüzeyindeki seramik takviye parçacıklarının artmasına bağlanmıştır. Yalnızca grafen ile kaplanan numunede ise uçucu kül ve genleştirilmiş perlit takviyeli numunelerden daha düşük bir mikro-sertlik değeri görülmüştür.
- ❖ Aşınma testleri sonrası numunelerden alınan SEM analizi sonucunda, kaplama yapılan bütün numunelerde adhezif aşınma mekanizması baskın olarak görülmüştür.
- ❖ Uçucu kül içeren numunelerde takviye oranı arttıkça yüzey pürüzlülüğü değerleri artmıştır ve dolayısıyla sürtünme katsayısı da artış göstermiştir. Genleştirilmiş perlit içeren numunelerde ise takviye oranı arttıkça yüzey pürüzlülüğü değerleri azalma göstermiştir ve buna bağlı olarak sürtünme katsayısı da azalma göstermiştir.
- ❖ Uçucu kül içerikli numunelerde takviye oranı arttıkça sürtünme katsayısı artış göstermiştir. Genleştirilmiş perlit içerikli numunelerde ise takviye oranı arttıkça sürtünme katsayısı azalmıştır. Sürtünme katsayısındaki artma ve azalmaları, aşınma testinden önce alınan yüzey pürüzlülüğü değerlerinin tetiklediği görülmüştür.

- ❖ Aşınma testi sonucunda kütle kaybı değerlerinden yola çıkarak; uçucu kül içeren numunelerde takviye oranı arttıkça aşınma oranı da artmıştır. Genleştirilmiş perlit içeren numuneler de ise takviye oranı arttıkça aşınma oranı azalmıştır. Sadece grafen ile kaplanan numunede ise aşınma oranı, genleştirilmiş perlit veya uçucu kül takviyeli numunelere göre fazladır.
- ❖ Bütün numuneler içerisinde en yüksek aşınma direnci gösteren %10 uçucu kül takviyeli numunedir. Uçucu kül içeren numunelerde takviye oranı arttıkça aşınma direnci azalmıştır. Genleştirilmiş perlit içeren numunelerde ise takviye oranı arttıkça malzemenin aşınma direnci artmıştır. Buradan yola çıkarak aşınma direncinde iyi sonuç alabilmek için takviye edilen uçucu kül oranı maksimum %10 iken, uçucu küle alternatif genleştirilmiş perlit takviye oranı ise minimum %30 olması önerilebilir.



KAYNAKLAR

- [1] Stachowiak, G. W. & Batchelor, A. W. (2005). Engineering Tribology, 3th edition.
- [2] J. Wojnarowicz, R. Mukhovskiy, E. Pietrzykowska, S. Kusnieruk, J. Mizeracki, W. Lojkowski (2016), Microwave Solvothermal Synthesis and Characterization of Manganese-doped ZnO Nanoparticles, Beilstein Journal of Nanotechnology, 7, 721–732.
- [3] C. Aktürk (2013), ZnO Nano Sistemlerinin Sentezlenmesi ve Manyetik Özelliklerinin Elektron Paramanyetik Rezonans (EPR) Spektroskopisi ile İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı.
- [4] Anonim, “Automotive Handbook”, Robert Bosch GmbH, p329, (2002)
- [5] E. Wolska-Kornio, J. Kaszewski, B.S. Witkowski, L. Wachnicki, M. Godlewski (2016), The Effect of Annealing on Properties of Europium Doped ZnO Nanopowders Obtained by a Microwave Hydrothermal Method, Optical Materials.
- [6] Terkeşli, M.H. (2017). APS Yöntemi İle Üretilen WC ve Mo Kaplamaların Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [7] Sarı, N.Y., Akay, S. ve Kaluç, E. (1997). Aşınmayı önlemede etkili yöntemler. TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi, 38 (448), 19-24.
- [8] Wang, B; (1995). Erosion-corrosion of coatings by biomass-fired boiler fly ash. Wear 188 (1995) 40-48.
- [9] Sunila, J, Keshavamurthy, R. (2015). Optimization of Process Parameters for Plasma Sprayed Flyash-Titania Composite Coatings, Materials Today: Proceedings 2 (2015) 2482 – 2490
- [10] Mishra S.C., Mishra P.C., Rout K. C. and Anantapadmanabahn P.V., Fly Ash as a Coating Material for Plasma Spray Coating, Fly Ash Utilization for Value Added Products, pp.131-135.
- [11] Ajit B. and Mishra S.C. (2012), Application of Fly-ash Composite in Plasma Surface Engineering.
- [12] Shijitha, T, Baiju, K. (2009). Novel electroless process for copper coating of flyash using titania/ultraviolet-radiation/metal catalyst-system, Applied Surface Science 255 (2009) 6696–6704. doi:10.1016/j.apsusc.2009.02.066
- [13] Deshmukh, K, Parsai, R. (2017). Studies on fly ash based geopolymeric material for coating on mild steel by paint brush technique, International Journal of Adhesion and Adhesives 75 (2017) 139-144. doi.org/10.1016/j.ijadhadh.
- [14] Escalera-Lozano, R, Gutiérrez, C, (2007). Corrosion characteristics of hybrid Al/SiCp/MgAl2O4 composites fabricated with fly ash and recycled aluminum, Materials Characterization 58 (2007) 953–960. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh>.
- [15] Kumarasamy, S, Vijayananth, K, (2017). Investigations on mechanical and machinability behavior of aluminum/flyash cenosphere/Gr hybrid composites processed through compocasting, Journal of Applied Research and Technology 15 (2017) 430–441. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jart.2017.05.005>
- [16] Akbulut, H, Hatipoglu, G, (2015). Co-deposition of Cu/WC/graphene hybrid nanocomposites produced by electrophoretic deposition, Surface & Coatings Technology 284 (2015) 344–352 <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.07.080>
- [17] Zhang, S, Yang, J, One-step hydrothermal synthesis of reduced graphene oxide/zinc sulfide hybrids for enhanced tribological properties of epoxy coatings, Surface & Coatings Technology 326 (2017) 87–95 <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat>.
- [18] Qiu, S, Liu, G, Noncovalent exfoliation of graphene and its multifunctional composite coating with enhanced anticorrosion and tribological performance, Journal of Alloys and Compounds 747 (2018) 60-70 <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.03.007>
- [19] Zhang, Z. and Liang, Y. (2017). Fabrication of Titanium Metallic Composites Reinforced with Graphene Nanosheets. 2nd International Conference on Architectural Engineering and New Materials (ICAENM 2017), 25-26 February, 205-209, China.

- [20] Sambyal, P, Ruhi, G, Advanced anti corrosive properties of poly(aniline-co-o-toluidine)/ flyash composite coatings, *Surface & Coatings Technology* 272 (2015) 129–140 <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.04.013>
- [21] Rajua, P, Rajesha, S, Tribological behavior of Al-Cu alloys and innovative Al-Cu metal matrix composite fabricated using stir-casting technique, (2016). *Materials Today: Proceedings* 5 (2018) 885–896.
- [22] Kumara, V, Sinhab, S, Tribological studies of dual-coating (intermediate hard with top epoxygraphene-base oil composite layers) on tool steel in dry and lubricated conditions, (2018). *Tribology International*; 127 (2018) 10-23. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.05.011>
- [23] Denga, P, Yaoa, C, Enhanced wear resistance of laser cladde graphene nanoplatelets reinforced Inconel 625 superalloy composite coating, (2018). *Surface & Coatings Technology*: 335 (2018) 334-344.
- [24] Berthelot J.M., *Composite Materials*, 3rd ed., Springer, New York-USA, 1999.
- [25] A. ihsan Kaya (2016) „Kompozit Malzemeler ve Özellikleri“ Mehmet Akif Ersoy Üni. Teknik Bilimler Dergisi Temmuz - Ağustos - Eylül 2016
- [26] M. Can Şenel, M. Gürbüz, E. Koç (2015) „Grafen takviyeli alüminyum matrisli yeni nesil kompozitler“ *Mühendis ve Makina*, cilt 56, sayı 669, s. 36-47.
- [27] Aktaş, M., 2007. Hibrit Kompozit Plakaların Darbe Davranışına Sıcaklığın Etkisi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 136s, İzmir.
- [28] Kaya, A.İ., (2016). “Kompozit Malzemeler ve Özellikleri”, *Putech&Composites*, 38-45.
- [29] Bağcı M., Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Erozyon Aşınma Davranışının İncelenmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2010, 276337.
- [30] C. Yanen,2016,„Tabakalı hibrit kompozitlerin bireysel zırh malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması“ Yüksek Lisans Tezi Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 01-2016
- [31] Nas, E., H. Gökkaya and G. Sur (2013). "Sıcak Presleme Yöntemi Kullanılarak Kompozit Malzemelerin Üretilebilirliği Üzerine Bir Değerlendirme." *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi* 3(2): 56-65.
- [32] <https://www.bilgiustam.com/kompozit-malzemelerin-ozellikleri-ve-siniflandirilmesi/>
- [33] <http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/hibrid-malzemeler-hybrid-materials.html>
- [34] Taşçı, G. (2017). Metal Katkılı Polimer Matrisli Hibrit Kompozitler, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [35] Uygunoglu, T., Gunes, I. and Brostow, W. 2015. Physical and Mechanical Properties of Polymer Composites with High Content of Wastes Including Boron. *Materials Research-Ibero-American Journal of Materials*, 18:6, 1188-1196.
- [36] M. Balasubramanian, *Composite Materials and Processing*, CRC Press, 2013.
- [37] A. Brent Strong, *Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications*, SME, 2008.
- [38] K. K. Chawla, *Composite Materials: Science and Engineerig*, Springer, 2012.
- [39] Klarova, M. 2015. *Composite Materials*, VSB - Technical University of Ostrava, 43, Ostrava.
- [40] Şahin, Y. 2006. *Kompozit Malzemelere Giriş*. Seçkin Yayınevi, 424, Ankara.
- [41] A. Sunay Kalaycıoğlu, 2010, „SiC tane katkılı Alüminyum kompozitlerin toz metalurjisi ile üretimi ve karakterizasyonu“ Yüksek Lisans Tezi Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir,07-2010
- [42] Erdoğan, M. 2005. “Çelik Takviyeli Alüminyum Kompozit Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.

- [43] Kumar, S. and Theerthan, J.A. 2008. Production and Characterisation of Aluminium Fly Ash Composite Using Stir Casting Method. Bachelor Degree, National Institute of Technology Metallurgical & Materials Engineering, 57, Rourkela.
- [44] Liu, Y.F., (2005). Microstructure and wear behavior of (Cr,Fe)₇C₃ reinforced composite coating produced by plasma transferred arc weld- surfacing process, *Surface & Coatings Technology*, 201, 863-867.
- [45] Ezz, T., Crouse, P., Li, L., Liu, Z., 2006. Combined laser/sol-gel synthesis of Si/O/C coatings on mild steel, *Surface & Coatings Technology*, 200, 6395-6399
- [46] Byrappa, K. ve Adschiri, T., 2007, Hydrothermal technology for nanotechnology, *Progress in crystal growth and characterization of materials*, 53 (2), 117-166.
- [47] Laudise, R. A., 1970, *The growth of single crystals*, Prentice Hall, p
- [48] Lobachev, A., 2013, *Crystallization processes under hydrothermal conditions*, Springer Science & Business Media, p.
- [49] Yoshimura, M. ve Suda, H., 1994, Hydrothermal processing of hydroxyapatite: past, present, and future, *Hydroxyapatite and Related Compounds*. Boca Raton (EE. UU.): CRC Press Inc, 45-72.
- [50] Eral, L., 2006, Hydrothermal synthesis and characterization of transition metal (Mn and V) oxides containing phosphates, *İzmir Institute of Technology*.
- [51] Byrappa, K. ve Yoshimura, M., 2012, *Handbook of hydrothermal technology*, William Andrew, p.
- [52] Riman, R. E., Suchanek, W. L. ve Lencka, M. M., 2002, Hydrothermal crystallization of ceramics, *Annales de Chimie Science des Matériaux*, 15-36.
- [53] Fang, J., Huang, A., Zhu, P., Xu, N., Xie, J., Chi, J., Feng, S., Xu, R. ve Wu, M., 2001, Hydrothermal preparation and characterization of Zn₂SnO₄ particles, *Materials Research Bulletin*, 36 (7-8), 1391-1397.
- [54] Byrappa, K., (2001), *Handbook of Hydrothermal Technology*, Noyes Publications, U.S.A.
- [55] Avcıata O.(2009) Nano Tozların Sentezi ve Karakterizasyonu Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [56] Türkiye Demir ve Demir Dışı Metaller Meclisi Sektörü Raporu. 2012. Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği (TOBB) Yayınları, Ankara.
- [57] http://www.alcoa.com/sustainability/en/info_page/products_design_lifecycle.asp, son erişim tarihi: 12.06.2015
- [58] H. Arık, P. Semerci, G. Kırmızı (2017) „Sıcak Presleme ile Alüminyum Matrisli ve Al₂O₃ Takviyeli Toz Metal Kompozit Malzeme Üretimi ve Aşınma Davranışının Araştırılması“ Gazi Üni. Fen Bilimleri Dergisi Part C, 5(4):87-97 (2017)
- [59] E. Arslan Ateğ, 2012, „Toz metalurjisi ile üretilen AA2014-Al₄C₃ sistemlerine yaşlandırma ısıl işleminin uygulanması ve mikroyapısal özelliklerinin araştırılması“ Yüksek lisans Tezi Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 09-2012
- [60] Callister, William D., 2007. *Material Science and Engineering—an Introduction*, John Wiley & Sons Inc.
- [61] Erbaş, O. (2014). *Experimental and Numerical Analysis of Deep Drawability of Aluminium Alloys AA5754-H22 and AA6061-T6*, Yüksek Lisans Tezi, Türk Alman Üniversitesi
- [62] B. Burak Gündüz, 2017, „6082-T6 alüminyum alaşımının MIG kaynağında mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması“ Yüksek Lisans Tezi Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 11-201
- [63] George, E. and MacKenzie, D., 2003. *Handbook of Aluminum, Physical Metallurgy and Processes*. Marcel Dekker Inc., New York, 1309, USA.
- [64] Randviir, E. P., Brownson, D. A. C., Banks, C. E. 2014. “A Decade of Graphene Research: Production, Applications and Outlook,” *Materials Today*, vol. 17, no. 9, p. 426-432.
- [65] Savage, N. 2012. “Materials Science: Super Carbon,” *Nature*, vol. 482, p. 30-31.

- [66] Singh, V., Joung, D., Zhai, L., Das, S., Khondaker, S. I. 2012. "Graphene Based Materials: Past, Present and Future," Progress in Materials Science, vol. 56, no. 8, p. 1178–1271.
- [67] Adams, J., Pendlebury, D. 2011. Global Research Report Materials Science and Technology, Thomsons Reuters, UK.
- [68] Başçı, M. 2015. "Geleceğin Malzemesi Grafen," Bilişim Dergisi, sayı 177, s. 156-165.
- [69] <http://www.teknomin.com.tr/ucucu-kul/ucucu-kul-nedir/>
- [70] KAMAT, S.V., HIRTH J.P. ve MEHRABIAN R. Mechanical Properties of Particulate Reinforced Aluminum Matrix Composites,, Acta Metallurgica et Materialia, Vol. 37, 2395-2402, 1989
- [71] ARSENAULT R.J., TAYA, M., "Metal Matrix Composites", 209-225, 1989
- [72] ROHATGI, P.K., "Low Cost Fly Ash Containing Aluminium Matrix Composite", JOM 55-59, Nov. 1994
- [73] <https://insapedia.com/perlit-nedir-ham-ve-genlestirilmis-perlit-nedir>
- [74] Keleşoğlu, E., 2011, Sert Kaplamalar. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 121 s
- [75] Wu, Y., Niu, Y., (2005). Microstructure and hardness of laser cladding nickel-based alloy doped with WC on Q235 steel, Materials Protection, 2, 11-14
- [76] <http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/termal-spreyleme-thermal-spraying.html>
- [77] Topuz, A. (2012). Döküm Ve Toz Metalurjisi Yöntemleri ile Üretilen AA 2014-Al4C3 Metal Matrisli Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [78] Yurderi, F., "Aşınmaya Dayanıklı Malzemelerin Aşınma Özelliklerine Metalurjik ve Diğer Faktörlerin Etkileri" Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 8-21, (1982).
- [79] Kosa, E. (2016). Çeliklerin Eroziyon-Abrazif Aşınmasında Aşındırıcı Tane Büyüklüğünün Aşınma Direncine Etkisi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [80] Gürleyik, M.Y., "Hasar Bilgisi", K.Ü. Mak. Müh. Yayın, 3:, 131-143, Trabzon, (1976).
- [81] Moore, M.Y., "A Review of Two –Body Abrasive Wear",17, Wear, (1974).
- [82] Sarıkaya, Ö. (2007). Aşınmaya karşı yüzey mühendisliği yöntemleri. (Birinci baskı). Sakarya, 1-90
- [83] Akkurt, M. (1986). Makina Elemanları ve Konstrüksiyonu Kürsüsü, Cilt 2, İstanbul: Birsen Yayınevi.
- [84] Yu, H.J. and Bhole, S.D. (1990). Development of a Prototype Abrasive Wear Tester for Tillage Tool Materials, Triboloji International, 5: 309-316.
- [85] Uetz, H. and Fohl J. (1978). Wear as an energy transformation process, Wear, 49 (3): 253-264.
- [86] Gesellschaft für Tribologie e.V.: GfT Arbeitsblatt 7: Tribologie - Verschleiß, Reibung, Definitionen, Begriffe, Prüfung (GfT, Moers 2002), in German
- [87] Brushan, B., (1999). Principles and Applications of Tribology, Wiley – Interscience Publication, San Francisco, ABD.
- [88] Kobrick, R.L. (2010). Characterization and Measurement Standardization of Lunar Dust Abrasion for Spacecraft Design and Operations, A thesis submitted to the Faculty of the Graduate School of the University of Colorado in partial Doktora tezi, Uzay bilimler departmanı
- [89] Karabaşoğlu, M.,(2008), Aşınma Deney Cihazı Tasarımı Ve İmalatı, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [90] Keskin, İ. (2012). Yüksek Mekanizmaların Aşınma Ve Elastohidrodinamik Yağlama. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Konstrüksiyon Programı, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 15-26s.
- [91] F.Yılmaz, "Sürtünme ve aşınma, 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi", İstanbul, Türkiye, 229-247, 1997.
- [92] M.F.Ashby, and D. R. H.Jones, "Engineering materials 1, 2nd edition", Butterworth, Heineman, 1996.

- [93] Jarrel, D. J. ve Bejbl, F., (1999). Understanding Wear And Friction In Medical- Grade Stainless Steels, Medical Device & Diagnostic Industry Magazine Mddi Article Index.
- [94] Şafak, H.E., 2008, Yüzeyi PVD yöntemiyle kaplanmış metallerde tribolojik özelliklerin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [95] Demiral, M., “C95200 ve C95300 Alüminyum Bronzların Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,3-10; Haziran, (2005).
- [96] Bhushan, B., “Introductionto Tribology”, Wear, 332-333; (2002).
- [97] Misra, A. and Finnie I. (1982). A review of the abrasive wear of metals, Journal of Engineering Materials and Technology, 2: 94-101.
- [98] N.Gemalmayan, “Sürtünme Malzemelerinin Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi”, Gazi Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara 1984
- [99] Bhushan, B. (2000). Wear mechanisms, chapter 7. In modern tribology handbook, Crc press, United States of Amererica, pp. 273-279.
- [100] Vedat Temiz, Makine Elemanları I, Triboloji slaytı
- [101] TMMOB. (2003). II. Ulusal Demir-Çelik Sempozyumu ve Sergisi: Bildiriler Kitabı, Yay. No: E/2003/336, Ankara.
- [102] Onaran K. (2003). Malzeme Bilimi, Bilim Teknik Yayınları, İstanbul.
- [103] Can A. Ç., (2006). Tasarımcı Mühendisler İçin Malzeme Bilgisi, Birsen Yayınları, İstanbul.
- [104] Stachowiak, G.W. Batchelor, A.W. (1993). Engineering Tribology, Tribology Series, 24, Elsevier
- [105] Bayer, R.G. (1994). Mechanical Wear Prediction and Prevention, New York: Marcel Dekker Yayınevi.
- [106] <https://weldwolf.com/asinma-nedir-asinma-tipleri-nelerdir/>
- [107] Vingsbo, O. & Hogmark, S. (1981). Wear of Steels, ASM Materials Science Seminar on Fundamentals of Friction and Wear of Materials, 4-5, Pittsburg, Pennsylvania, Metals Park, Ohio, Publ. ASM,373-408.
- [108] Askeland, D. R., (2002). Malzeme Bilim ve Mühendislik Malzemeleri, Cilt 1, Nobel Yayınları, Ankara.
- [109] Hutchings, I. M., (1992). Friction and Wear of Engineering Materials, Holder & Sloughton Publications, İngiltere.
- [110] Büyükkelleci, Ü., (2008). Yeni Bir Aşınma Test Cihazı Tasarımı ve Bazı Metallerin Aşınma Davranışlarının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı, Elazığ.
- [111] Soydan, Y., Ulukan, L., “Triboloji:Sürtünme, Aşınma, Yağlama Bilimi ve Teknolojisi”, Teknoloji Araştırma ve Geliştirme Merkezi Teknolojik Yayınlar Serisi, 1:, Sakarya, (2003).
- [112] Halling, J., “Introduction to Tribology”, 1st Ed., Wykeham Publications Ltd., London, (1976).
- [113] Demir, A. (2012). Farklı Çelik Yorulma Aşınmasında Malzeme Sertliğinin Aşınma Üzerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trakya Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Edirne, 69s.
- [114] Karadeniz, S.(2005) Tamir Bakım Kaynağında Dolgu Maddesi Seçimi. II. Bakım Teknolojileri Kongresi ve Sergisi.
- [115] Ertiryaki İ., (1990). Malzeme Bilgisi, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Ders Kitapları Yayınları, Sakarya.
- [116] Sugözü, İ. (2009). Bor Katkılı Asbestsiz Otomotiv Fren Balatası Üretimi ve Frenleme Karakteristiğinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 58-59.
- [117] <https://www.muhendisbeyinler.net/surtunme-kuvveti-nedir/>.

- [118] Bhushan, B. (2000). Modern Tribology Handbook, CRC Yayınevi.
- [119] Karaoğlu, Y. (2006). Bir Aşınma Test Cihazının Tasarımı ve İmalatı, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 3-6.
- [120] Bortoletto, E.M., Rovani, A.C., Seracopi, V., Profito, F.J., Zachariadis, D.C., Machado, I.F., Sinatora, A., Souza, R.M. (2012). Experimental and numerical analysis of dry contact in pin on disc test. *Wear*, 19-26.
- [121] D. Tabor, “Friction the present state of our understanding”, Transactions of the asme, Journal of Lubrication Technology, pp.169-179, 2001.
- [122] <http://bilgioloji.com/pages/fen/fizik/hareket/surtunme-kuvveti-nedir/>
- [123] Uludağ, M., (2011). Farklı Şartlarda Dökülmüş Modifiyeli Al – 12Si Alaşımlarında Yapı ve Özellikler, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [124] Ölmez, S. (2016). Alüminyum Esaslı Alaşımların Yüksek Sıcaklıkta Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [125] Weissbach W., (1993). Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, 6. Baskı, Birsen Yayınları, İstanbul.
- [126] Ghasemi Owsalou, R. (2012). Aşınmaya Maruz Parçaların Aşınma Dayanımlarının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [127] Staudt W (2000) Motorlu Taşıt Tekniği. MEB Basımevi, İstanbul.
- [128] Kahraman, M. (2009). Yüzeysel Toz Alev Püskürtme Yöntemi ile Kaplanan (WC, B4C, B4C - NiCrBSi) AISI 1040 Çeliğinin Aşınma Mekanizmalarının Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [129] <https://daytam.atauni.edu.tr/cihazlar/x-isini-kirimi-xrd/>
- [130] Mutuk, T. (2019). Grafen-Si3N4 Takviyeli Titanyum Hibrit Kompozit ile Prototip İmplant Üretimi, Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [131] <https://lubricant-world.com/2d-nano-malzemeli-katki-maddeleri/>
- [132] Vipin K. Sharma, (2017). Effect of flyash particles with aluminium melt on the wear of aluminium metal matrix composites. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jestch.2017.08.004> 221
- [133] Coşkun, Y., Aslan, S., Akbulut, H., (2003). Uçucu Kül Takviyeli Metal Matriksli Kompozit Malzemelerin Aşınma Davranışı. SAÜ Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Esentepe/Sakarya
- [134] A. Shalaby, D. Nihtianova, P. Markov, A. D. Staneva, R. S. Iordanova ve Y. B. Dimitriev, “Structural analysis of reduced graphene oxide by transmission electron microscopy”, *Bulgarian Chemical Communications*, cilt 47, no. 1, pp. 291- 295, 2015.
- [135] Ramanathan, T., Abdala, A.A., Stankovich, S., Dikin, D.A., Herrera-Alonso, M., Piner, R.D., Adamson, D.H., Schniepp, H.C., Chen, X., Ruoff, R.S., Nguyen, S.T., Aksay, I.A., Prud'Homme, R.K., Brinson, L.C. 2008. Functionalized grapheme sheets for polymer nanocomposites. *Nature Nanotechnology*, 3 : 327-331
- [136] Kjellin, P., Holmberg, K. ve Nydén, M., (2001). “A New Method for the Study of Calcium Carbonate Growth on Steel Surfaces”, *Colloid Surface A*, 194,49-55.
- [137] Andritsos, N., Karabelas, A.J. ve Koutsoukos P.G., (1997). “Morphology and Structure of CaCO3 Scale Layers Formed under Isothermal Flow Conditions” *Langmuir*, 13: 2873-2879.
- [138] Matsunami N., Hosono H., 1993. Colloid formation effects on depth profile of implanted Ag in SiO2 glass. *Appl Phys Lett*, 63:2050–2
- [139] C.M. Praveen Kumar, T.V. Venkatesha, R. Shabadi, Preparation and corrosion behavior of Ni and Ni-graphene composite coatings, *Mater. Res. Bull.* 48 (2013) 1477–1483.
- [140] Mishra D, Mudgal M, Chouhan RK, Padmakaran P, Lahiri S, Khan MA, Amritphale SS, Chandra N. Development of fly ash based geopolymeric cementitious materials for new millennium. *J Indian Chem Soc* 2014;91:1751–6.

- [141] Akın, M., 2009. Kalsit katkılı betonların geçirimsizlik ve dayanıklılık deneyleri, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 122.
- [142] Mindivan, F., Aydın, K., Mindivan, H., (2019). Elektrolitik Kaplanmış Nikel/Grafen Kompozit Kaplamaların Üretimi ve Karakterizasyonu. Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi (2019), 8(IMSMATEC Özel Sayı) 29-36
- [143] Algul, H., Tokur, M., Ozcan, S., Uysal, M., Cetinkaya, T., Akbulut, H., Alp, A., “The effect of graphene content and sliding speed on the wear mechanism of nickel–graphene nanocomposites”, Applied Surface Science, 359, 340-348, 2015.
- [144] Praveen, B. M., Venkatesha, T. V., (2009). Electrodeposition and properties of Zn-Ni-CNT composite coatings. J Alloys Compd.482 (2009) 53-57
- [145] Li, N., Zhang, L., Xu, M., Xia, T., Ruan, X., Song, S., Ma, H. (2016). Preparation and mechanical property of electrodeposited Al-graphene composite coating. Materials Design
- [146] E. Demirkesen, Kompozit Malzemeler, İ.T.Ü. Yayın No:3, 1991
- [147] A. Nieto, A. Bisht, D. Lahiri, C. Zhang, A. Agarwal, Int. Mater. Rev., (2016) 1-62. 10.1080/09506608.2016.1219481.
- [148] A. Sharma, S. Sagar, R.P. Mahto, B. Sahoo, S.K. Pal, J. Paul, Surf. Coat. Tech., 337 (2018) 12-23. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.12.059>.
- [149] Uetz, A. and Föhl, J. (1979). Tribologie-Stand der Erkenntnisse undnutzen. VDI-Berichte no-333, 1-5.
- [150] Gökşahin, E. (2007). Sert Elokso ile Kaplanmış 6XXX Serisi Alüminyum Alaşımlarının Aşınma Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [151] Demirel, M., (2007). Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Metal Matrisli Kompozitlerde Ni3Al Metallerarası Bileşik Takviyesinin Aşınma Davranışına Etkilerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [152] M. Ramachandra, K. Radhakrishna. (2007). Effect of reinforcement of flyash on sliding wear, slurry erosive wear and corrosive behavior of aluminium matrix composite. 0043-1648/doi:10.1016/j.wear.2007.01.026
- [153] Yaparel, A. (2015). Makina Elemanlarının Aşınma Problemlerinin Giderilmesi İçin Sert Seramik Kaplamaların Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [154] Priya, R., Mallika, C. ve Mudali, U.K. (2014). Wear and tribocorrosion behaviour of 304L SS, Zr-702, Zircaloy-4 and Ti-grade2. Wear, 310, 90-100.
- [155] Şimşek, İ., Yıldırım, M., Özyürek, D. (2019). Basıncısız infiltrasyon yöntemiyle üretilen SiO₂ t akviyeli alüminyum kompozitlerin aşınma davranışlarının incelenmesi. Politeknik Dergisi DOI: 10.2339/politeknik.389637
- [156] Yılmaz R., Özyürek D., Kibar E., “The effect of retrogression parameters on hardness and wear behaviors of 7075 aluminum alloys”, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 27(2): 429-438, (2012).

ÖZGEÇMİŞ



KİŞİSEL BİLGİLER

ARAŞTIRMACI BİLGİLERİ



EĞİTİM BİLGİLERİ

Lisans : Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
Lise : Sümer Lisesi

AKADEMİK FAALİYETLER

(2016) : M. Deniz Turan ,Mustafa Gürbüz, , Tuğçe Özcan, Selin Baydemir Ümit Demir, Veysi Yelken, Z. Abidin Sarı, ,2016, '' Improving the efficiency of chalcopyrite leaching via milling in ring mill'' presented at the International Black Sea Mining and Tunnelling Symposium.

(2017) :Hydroxyapatite-Perlite Composite Biyometarials Production

(2018): Investigation of Natural and Synthetic Hydroxyapatite Composites Obtained by Reinforced Perlite, P₂O₅, MgO and ZrO₂

(2018): Production of Hybrid Aluminum Foam Using Different Supplements by Powder Metallurgy Method

(2019): Hybrid Aluminum Foam Using Different Supplements with Powder Metallurgy Method Generation (Mardin Artuklu International Multidisciplinary Works Congress)

(2019): Expanded Perlite, P₂O₅, MgO and ZrO₂ Investigation of Synthetic Hydroxyapatite Composites (Mardin Artuklu International Multidisciplinary Works Congress)

(2019): Yumurta Kabuğu/TiO₂ Takviyeli Hidroksiapatit Kompozitlerin İncelenmesi (1st International Malatya Applied Science Congress)

(2019): Alüminyum Esaslı Hibrit Kompozit Malzemede Mermer Tozunun Köpürmeye Etkisi (1st International Malatya Applied Science Congress)

Tezden Çıkan Yayınlar

(2020): Hidrotermal Yöntem Kullanılarak Grafen/Genleştirilmiş Perlit ile Kaplanan Al6013 Alaşımının İncelenmesi (5st International Mersin Symposium)

Projeler: Fırat Üniversitesi BAP (FÜBAP) MF.18.53 numaralı Yüksek Lisans tezi projesi