



**YAĞLAMA YAĞINDA KATKI MADDESİ OLARAK  
FARKLI MORFOLOJİLERE SAHİP KARBON  
MALZEMELERİN KULLANIMI VE TRİBOLOJİK  
ÖZELLİKLERİ**

**2023  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

**Zafer ŞAHİN**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Hamza ŞİMŞİR**

**YAĞLAMA YAĞINDA KATKI MADDESİ OLARAK FARKLI  
MORFOLOJİLERE SAHİP KARBON MALZEMELERİNİN KULLANIMI  
VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİ**

**Zafer ŞAHİN**

**Tez Danışmanı  
Doç.Dr. Hamza ŞİMŞİR**

**T.C.  
Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK  
Ocak 2023**

Zafer ŞAHİN tarafından hazırlanan “YAĞLAMA YAĞINDA KATKI MADDESİ OLARAK FARKLI MORFOLOJİLERE SAHİP KARBON MALZEMELERİN KULLANIMI VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Hamza ŞİMŞİR .....  
Tez Danışmanı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 16/01/2023

<u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u>	<u>İmzası</u>
Başkan : Doç. Dr. Mehmet AKKAŞ (KÜ)	.....
Üye : Doç. Dr. Hamza ŞİMŞİR (KBÜ)	.....
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Yasin AKGÜL (KBÜ)	.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Müslüm KUZU .....  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Zafer ŞAHİN

## ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

### **YAĞLAMA YAĞINDA KATKI MADDESİ OLARAK FARKLI MORFOLOJİLERE SAHİP KARBON MALZEMELERİN KULLANIMI VE TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİ**

**Zafer ŞAHİN**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Doç. Dr. Hamza ŞİMŞİR**

**Ocak 2023, 41 sayfa**

Bu tezin amacı, aşınmaya maruz kalan malzemelerin aşınma hızını azaltabilmek için katı yağlayıcı olarak kullanılabilir karbon-bazlı malzemelerin etkilerini incelemektir. Bu amaç doğrultusunda; grafit, karbon nanotüp ve iki farklı hidrotermal karbon katı yağlayıcıların bor yağı içerisine ilave edilmesi ile kolloidal süspansiyonlar hazırlanmıştır. Konsantrasyon etkisini inceleyebilmek için her bir karbon türü üç farklı oranda ilave edilmiş ve toplamda on iki adet süspaniyon hazırlanmıştır. Aşınma deneylerinde altlık malzeme olarak farklı uygulama alanlarında aşınmaya sıkça maruz kalan AlSi16 alaşımı kullanılmıştır. Bu alaşımın tribolojik özellikleri hazırlanan süspansiyonlar içerisinde, oda sıcaklığında, 50 N yük altında ve 3000 m yol mesafesinde yapılan aşınma testleri sonunda incelenmiştir. Elde edilen bulgular aşınma mekanizmaları ile detaylı bir şekilde tartışılmıştır. Bu sonuçlara göre; karbon katkısının artan konsantrasyonu ile aşınma hızının azaldığı, özellikle partikül

morfolojisi daha küçük boyutlarda olan karbon katkıların daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

**Anahtar Sözcükler :** Aşınma, triboloji, katı karbon yağlayıcı, AlSi16

**Bilim Kodu** : 91529

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **THE USING AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF CARBON MATERIALS WITH DIFFERENT MORPHOLOGIES AS ADDITIVES IN LUBRICATING OIL**

**Zafer ŞAHİN**

**Karabük University  
Institute of Graduate Programs  
Department of Metallurgy Education**

**Thesis Advisor:**

**Assoc. Prof. Dr. Hamza ŞİMŞİR**

**December 2023, 41 pages**

The aim of this thesis is to examine the effects of carbon-based materials that can be used as solid lubricants to reduce the wear rate of materials exposed to abrasion. In accordance with this purpose, colloidal suspensions were prepared by adding graphite, carbon nanotube, and two different hydrothermal carbon solid lubricants into boron oil. To examine the concentration effect, each type of carbon was added at three different rates and a total of twelve suspensions were prepared. AlSi16 alloy, which is frequently exposed to abrasion in different application areas, was used as the substrate material in the wear tests. The tribological properties of this alloy were investigated at the end of the wear tests in the prepared suspensions, at room temperature, under 50 N applied load, and 3000 m sliding distance. The findings were discussed in detail with the wear mechanisms. According to these results, it has been determined that the wear

rate decreases with the increasing concentration of the carbon additive, and especially the carbon additives with smaller particle morphology give better results.

**Key Word** : Wear, tribology, solid carbon lubricant, AlSi16 alloy.

**Science Code** : 91529



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren, tüm yorumlama gerektiren kısımlarda çok büyük destek olan Sayın Hocam Doç. Dr. Hamza ŞİMŞİR'e sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Bu tez alıőması Karabük Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüęü tarafından KBÜBAP-22-YL-069 proje numarası ile desteklenmiőtir. Tezime vermiőt olduğu desteklerden dolayı KBÜ BAP Koordinatörlüęüne teőekkürlerimi sunarım.

Testlerin yapılması sırasında yardımlarını esirgemeyen Karabük Üniversitesi Demir elik Enstitüsü çalıőanlarına teşekkür ederim.

Sevgili aileme tez çalıőmam boyunca maddi ve manevi hiçbir yardımı esirgemedен yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

2019 yılında Yüksek Lisans'a başlarken yanımda olan ve 2021 yılında vefat eden canımdan çok sevdiğim babaannem Őerife ŞAHİN'e de hep destek olduğu için, beni hep çok sevdiğini için sonsuz teşekkür ederim. İyi ki vardı ve iyi ki benim yanımdaydı.

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xiv
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	2
AŞINMA.....	2
2.1. AŞINMA MEKANİZMALARI.....	3
2.1.1. Adheziv Aşınma .....	4
2.2.2. Abrazif Aşınma.....	5
2.2.3. Eroziv Aşınma .....	7
2.2.4. Sürtünme Aşınması.....	8
2.2.5. Yorulma/Delaminasyon Aşınması.....	8
2.2.6. Korozif/Oksidatif Aşınma.....	9
2.2.7. Deformasyon ve Sürme .....	9
2.2. AŞINMA HIZINI DÜŞÜREN YAĞLAYICILAR VE KATKI MADDELERİ .....	10
2.2.1. Yağlayıcılar.....	10
2.2.1.1. Katı Yağlayıcılar .....	11
2.2.1.2. Karbon Bazlı Katı Yağlayıcılar .....	11
2.2.1.3. Karbon Bazlı Katı-Sıvı Etkileşimli Yağlama Malzemeleri .....	12
2.2.1.4. Hidrotermal Karbonlar.....	14

	<b><u>Sayfa</u></b>
2.2.2. Yağlayıcının Tribolojik Özelliklerine Etki Eden Nanopartikül Parameteleri.....	14
2.2.2.1. Nanoparçacık Boyutu Etkisi .....	14
2.2.2.2. Nanoparçacık Formu Etkisi .....	15
2.2.2.3. Dahili Nanoyapı Etkisi .....	15
2.2.2.4. Yüzey İşlevselleştirme Etkisi.....	16
2.2.2.5. Nanoparçacık Konsantrasyonu Etkisi .....	16
BÖLÜM 3 .....	17
ALÜMİNYUM SİLİSYUM (AL-Sİ) ALAŞIMLARI.....	17
3.1. AL-Sİ ALAŞIMLARININ AŞINMA MEKANİZMASI.....	18
BÖLÜM 4 .....	19
DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	19
4.1. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI .....	19
4.2. HIDROTERMAL KARBONLARIN SENTEZİ.....	20
4.3. AŞINMA TESTİ .....	21
BÖLÜM 5 .....	24
DENEYSEL SONUÇLAR .....	24
5.1. KARBON KATI YAĞLAYICILARIN KARAKTERİZASYONU .....	24
BÖLÜM 6 .....	34
SONUÇLAR.....	34
KAYNAKLAR .....	35
ÖZGEÇMİŞ .....	41

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Şekil 2.1. Yüzeý hasarları ve aşınma olayının sınıflandırılması.....	3
Şekil 2.2. Adhezif aşınma mekanizmasını gösteren şematik bir diyagram. ....	4
Şekil 2.3. Mikro kaynaklanma ve adhezyon oluşumu. ....	5
Şekil 2.4. Aşındırıcı aşınma mekanizmasının şematik diyagramı (a) Tek gövdeli aşındırıcı, (b) İki gövdeli aşındırıcı .....	6
Şekil 2.5. Eroziyon aşınma mekanizması. ....	8
Şekil 2.6. Yüzeý yorulmasında çatlak oluşumu ve ilerlemesi. ....	9
Şekil 2.7. Yağlama yöntemleri (a) Hidrodinamik yağlama (b) Sınır yağlama ve (c) Karışık yağlama.....	10
Şekil 2.8. Karbon bazlı katı-sıvı kompozit kaplamalar (DLC/IL/grafen+CNT'ler) için olası yağlama mekanizmasının şematik diyagramı .....	13
Şekil 4.1. Numune hazırlamada kullanılan; (a) Numune kesme cihazı(diskaton) ve (b) Zımparalama ve parlatma cihazı.....	20
Şekil 4.2. Hidrotermal karbonların üretildiği otoklav (a) ve fırın (b). ....	20
Şekil 4.3. (a) UTS Tribometer aşınma test cihazı, (b) Numunenin içerisinde olduğu görsel. ....	21
Şekil 4.4. Aşınma testi şematik gösterimi.....	22
Şekil 4.5. Mitutoyo SJ-410 profilometre. ....	22
Şekil 5.1. Yağlayıcı katkı malzemelerinin SEM görüntüleri (a) Grft, (b) HTC-K, (c) HTC-G, ve (d) KNT. ....	25
Şekil 5.2. Karbonlara ait FT-IR spektrumları (a) Grft, (b) HTC-K, (c) HTC-G, ve (d) KNT. ....	26
Şekil 5.3. Yağlayıcı tipine göre altlık malzemesinin aşınma oranlarındaki değişim. ....	27
Şekil 5.4. AlSi16 altlık malzemesinin aşınmış yüzeýlerinin iki boyutlu profilometre görüntüleri (a) GRFT, (b) HTC-K, (c) HTC-G, (d) KNT .....	28
Şekil 5.5. AlSi16 Alaşımının saf bor yağındaki SEM görüntüsü. ....	29
Şekil 5.6. AlSi16 alaşımının GRFT-Bor yağı süspansiyonundaki aşınma sonrası SEM görüntüsü. ....	30
Şekil 5.7. AlSi16 alaşımının HTC-K-Bor yağı süspansiyonundaki aşınma sonrası SEM görüntüsü.....	31
Şekil 5.8. AlSi16 alaşımının HTC-G-Bor yağı süspansiyonundaki aşınma sonrası SEM görüntüsü.....	32

**Sayfa**

Şekil 5.9. AlSi16 alaşımının KNT-Bor yağı süspansiyonundaki aşınma sonrası SEM görüntüsü. .... 33

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 2.1. Abrasif aşınma davranışını etkileyen faktörler. ....	7
Çizelge 4.1. AlSi16 Alaşımının kimyasal bileşimi .....	19
Çizelge 5.1. Numunelerin aşınma izi hacimleri ve aşınma hızları.....	27

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

Al	: Alüminyum
Cu	: Bakır
Ag	: gümüş
Sn	: Kalay
Au	: Altın
mg	: Miligram
mL	: Mililitre
°	: Derece
Hv	: Vicker Sertliği
gr	: Gram
mm	: Milimetre
m	: Metre
N	: Newton
ağ	: Ağırlıkça
µm	: Mikrometre
V	: Hacim Kaybı
l	: Aşınma Mesafesi
MPa	: Mega Pascal
GPa	: Giga Pascal
TPa	: Tera Pascal <sup>22</sup>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: Alümina
ZrO <sub>2</sub>	: Zirkonyum Dioksit
SiC	: Silisyum
NiO	: Nikel Oksit
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: Krom Oksit
MoS <sub>2</sub>	: Molibden Disülfür

WS<sub>2</sub> : Tungsten Disulfür  
HBN : Hidroje Bor Nitrür  
MgB<sub>2</sub> : Magnezyum Borid  
ZnB<sub>2</sub> : Çinko Borid  
Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>: Nikel Demir Oksit

## **KISALTMALAR**

SEM : Scanning Electrone Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)  
EDX : Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi)  
IL : Ionic Liquid (İyonik Sıvı)  
DLC : Diamond-Like Carbon (Elmas Benzeri Karbon)  
MWCNT : Multi-Walled Carbon Nanotube (Çok Duvarlı Karbon Nanotüp)  
pH : Potential of Hydrogen (Hidrojenin Gücü)  
MMC : Metal Matrix Composite (Metal Matrisli Kompozit)  
GRFT : Grafit  
HTC-G : Glukoz  
HTC-K : Kitosan  
KNT : Karbon Nanotüp  
FTIR : Fourier Dönüşümlü Kızılötesi



## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Aşınmaya maruz kalan malzemelerin kullanım ömrü zamanla azalmakta ve kullanıldığı alanda iş yapabilme kabiliyetleri kaybolmaktadır. Bu durumu önleyebilmek ve malzemelerin aşınma hızlarını düşürebilmek için sayısız çalışma yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir. Bu doğrultudan yapılan çalışmalardan en kolay ve etkili yöntemlerden bir tanesi yağlayıcı sıvılar kullanmaktır. Bu sıvılar malzemelerin aşınma hızlarında önemli bir iyileştirme sağlasalar bile yeterli bulunmayıp mevcut özelliklerini geliştirebilmek amacıyla ilave katkı maddelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Böylece içersinde katı katkı maddesi bulunan yağlayıcılar çok daha iyi sonuçlar ortaya çıkarabilmektedirler. Bu katkı maddelerinden, kendinden yağlama özelliğine sahip, topaklanma eğiliminde olmayan ve ucuz üretim maliyetine sahip olanlar daha büyük bir potansiyel ortaya koymaktadır. Bu özellikleri ile en uygun adaylardan bir tanesi olarak karbon bazlı katkı malzemeleri öne çıkmıştır.

Bu tez çalışmasında; dört farklı katı karbon yağlayıcının ilave edildiği bor yağı içersinde, AlSi16'nin tribolojik özellikleri incelenmiştir. Bu karbonlar birbirinden farklı morfolojik yapıda ve partikül büyüklüğünde olan grafit, karbon nanotüp ve iki farklı hidrotermal karbondur. Bu karbon katkıların konsantrasyonun etkilerini inceleyebilmek için her bir karbon üç farklı oranda bor yağı içersine katılmıştır. Yapılan SEM ve SEM-EDX analizleri, yüzey profilometer görüntüleri, ve aşınma hızı hesaplamaları ile tüm bu etkiler aşınma mekanizmaları üzerinden detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre bu karbon katkıların kullanımının altlık malzemenin aşınma hızını düşürdüğü, ayrıca morfolojinin farklı etkilere sebep olduğu belirlenmiştir.

## BÖLÜM 2

### AŞINMA

Aşınma, bir birleşme yüzeyi ile etkileşim içinde olan madde ya da maddeler arasındaki izafi malzeme kaybı olarak tanımlanır. Tanımda malzeme kaybı ifadesi yer almasına rağmen, ağırlıkta veya hacimde herhangi bir değişim olmamasına karşılık malzemenin cisim üzerindeki yer değişimi de yine aşınma olarak tanımlanır. Aşınma, yüzey üzerinden malzeme kaybının yanı sıra makine aksamlarının yüzey yapılarını bozarak onların iş yapma kabiliyetlerinin azalmasına ve zaman içerisinde yok olmasına sebep olur. Aşınmanın miktarı madde yüzeylerinin mekanik ve kimyasal özelliklerine, madde yüzeylerinin topografyasına, yağlayıcıya ve çalışma şartlarına bağlıdır. [1,2] Aşınma hızları, kullanım koşullarına göre değişkenlik gösterebilmektedir [3]. Aşınma yüzeyleri genel olarak iki şekilde korunabilir.

- Yağlayıcı kullanılarak yüzeylerin ayrılması
- Yüzey modifikasyonu.

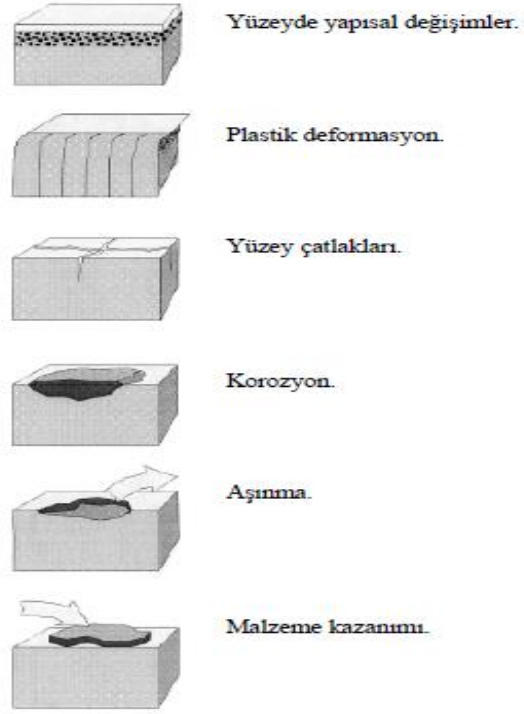
Bir olaya aşınma denilmesi için aşağıdaki şartların gerçekleşmesi gereklidir.

- Mekanik bir etkinin olması
- Sürtünmenin (izafi hareket) olması
- Yavaş olabilir ancak sürekli olması
- Malzemenin yüzeyinde değişikliğin oluşması
- İstenilmeyen bir durumda meydana gelmesi

Bu şartlardan birisi sağlanmıyorsa aşınma meydana gelmemiştir [4].

Aşınmayı spesifik bir malzeme özelliği olarak düşünmeyip, olayı bir sistem bütünlüğü içerisinde ele almak gerekmektedir. Bu sisteme de literatürde tribolojik sistem denilmektedir.

Triboloji; sürtünme, yağlama ve aşınma kavramlarını kapsayan bir bilim dalıdır. Tribolojik sistem ise; karşılıklı etkileşim halinde olan malzemelerde (ana malzeme, karşı malzeme, ara malzeme) hız, termal koşullar ve yükün birleşimiyle gerçekleşen aşınma olayını inceler. Şekil 1.1’de triboloji biliminde önemli olarak kabul edilen yüzey hasar tipleri gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Yüzey hasarları ve aşınma olayının sınıflandırılması.

## 2.1. AŞINMA MEKANİZMALARI

Mevcut literatüre ve ilgili araştırmacıların bilgisine göre farklı metal çiftleri için yedi önemli aşınma mekanizması türü sergilenmektedir.

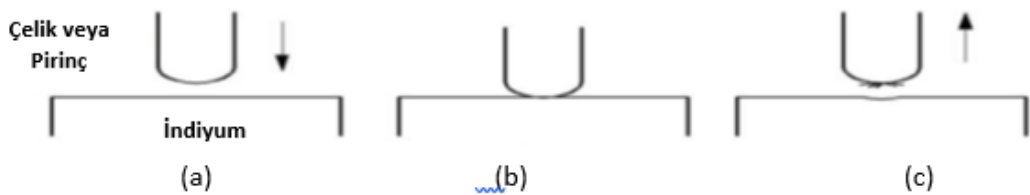
### 2.1.1. Adheziv Aşınma

Adheziv aşınma, pürüzlerin malzemenin bir yüzeyden başka bir yüzeye aktarılmasından kaynaklanır. Yüzeyde çukurlar, boşluklar, tepeler veya vadiler bırakır [3]. Bu aşınma, yapışkan bağ nedeniyle oluşur. Temas noktalarında yapışkan bağ, çiftin daha zayıf malzemesinin yapışkan bağından daha güçlüdür. Normal olarak, iki benzer kimyasal bileşim metali temas halinde olduğunda veya temas yüzeyinde oksit tabakası bulunmadığında yapışma meydana gelir[5].

İncelemeler neticesinde adhezyonun genellikle metal-metal aşınma kombinasyonlarında ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Benzer iki malzeme atomlarının kimyasal bağ geliştirebilecek şekilde yaklaşması sonucunda meydana gelmiştir. Malzemelerin benzerliği ne kadar fazla olursa adhezyonda o kadar yüksek olacaktır[6].

Malzemenin yapısal özelliklerinin adheziv aşınmaya etkisi incelendiğinde kübik metallere hegzagonal sıkı paket metallere kıyasla daha yüksek adheziv aşınma ve sürtünme davranışı gösterdikleri belirlenmiştir bunun sebebi ise hegzagonal sıkı paket metallere sınırlı sayıda kayma düzlemine sahip olmalarıdır [7].

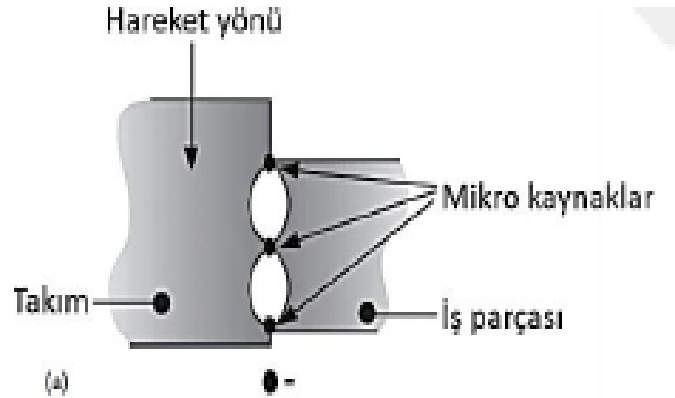
Tane sınırı kavramının adheziv aşınmaya etkisi şu şekilde açıklanabilir: tane sınır bölgeleri yüzeydeki yüksek enerjili bölgelerdir. Tane sınırlarının polikristalin malzemelerdeki varlığı adheziv aşınmayı, sürtünmeyi, yüzey kırılmasını ve aşınmayı etkiler. Polikristalin malzemelerin yüksek tane sınırı yoğunluklarına sahip olması, nispeten daha düşük tane sınırı yoğunluklarına ve ya tek kristalli malzemelere sahip olanlardan daha yüksek aşınma oranlarını ortaya çıkardığı gözlemlenmiştir[8].



Şekil 2.2. Adhezif aşınma mekanizmasını gösteren şematik bir diyagram.

Benzer şekilde, dökme demir, demir bazlı alaşımlardan daha iyi tribolojik özelliğe sahiptir. Bunun nedeni, karbonun temas bölgesi üzerine bulaşması ve bir yağlayıcı film sağlamasıdır [5]. Birbirine benzemeyen metaller söz konusu olduğunda, karşılıklı olarak çözünmeyen metaller birbirleriyle temas ettiğinde genellikle zayıf yapışma sergilerler [9,10]. Ancak yüzeyler atomik olarak temizse, bu durumda da yapışma güçlü olacaktır. Çözünürlükten bağımsız olarak, yumuşaklık derecesi de yapışmada önemli bir rol oynar. Yumuşak metaller, yüksek yapışmadan sorumlu olan geniş bir gerçek temas alanı sergiler [9]. Temas yüzeylerinde yağlayıcıların kullanılması yüzey enerjisini azaltsa da, sıvı film veya önceden var olan filmin yoğunlaşması yapışmayı önemli ölçüde artırabilir [10,11].

Adheziv aşınma çoğunlukla Şekil 2.3'te gösterildiği gibi küçük noktalarda gerçekleşir ve temas halindeki ara yüzeyler kaydığında, yerel olarak yapışan bölgelerin ayrılması neticesinde meydana gelir[12].

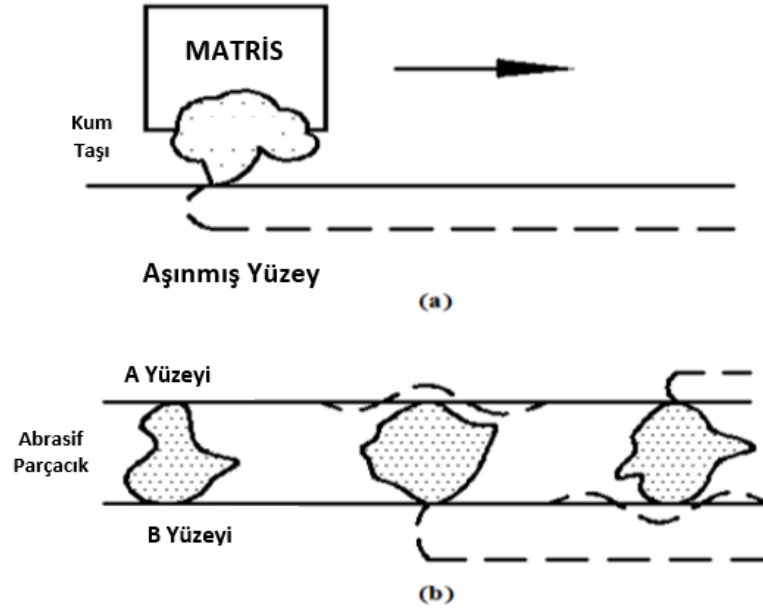


Şekil 2.3. Mikro kaynaklanma ve adhezyon oluşumu.

### 2.2.2. Abrazif Aşınma

Aşınma, yumuşak katı bir yüzey boyunca kayan sert parçacıklar veya çıkıntılar nedeniyle oluşur. Sürme, kama ve kesme olaylarıyla sonuçlanır. Sürme (sırt oluşumu olarak da adlandırılır) işleminde, malzeme her iki taraftan yer değiştirir ve malzeme çıkarılarak veya kaldırılmadan bir oluk oluşturur. Temel aşındırıcı aşınma mekanizması Şekil 2.4'de gösterilmektedir. Aşındırıcı aşınmanın iki modu vardır: (1) Bir yüzeyde aşındırıcı izlerin oluşacağı tek gövdeli aşındırıcı aşınma (Şekil 2.4(a)).

Tek gövdeli aşındırıcı aşınmanın pratik örneği taşlama, kesme ve işlemedir. (2) Her iki yüzeyde de aşındırıcı izlerin oluşmaktadır (Şekil 2.4(b)). Tribolojik sistemlerde debriz, temas yüzeyleri arasında sıkışıp kalır ve temas yüzeylerinden birinde veya her ikisinde oluklar oluşturur [5].



Şekil 2.4. Aşındırıcı aşınma mekanizmasının şematik diyagramı (a) Tek gövdeli aşındırıcı, (b) İki gövdeli aşındırıcı [5].

Parlatma işlemi gibi bazı pratik uygulamalarda, aşındırıcı parçacıklar cilalı yüzeyler ürettiği için faydalı veya arzu edildir. Aşınma veya sürme işlemi sırasında oluşan sırtlar, tekrarlanan döngüsel sistem nedeniyle belirli bir kayma mesafesinden sonra düzleşir ve kırılır [13,14]. Ayrıca yüzey altı deformasyonuna ve yüzeyin yanı sıra yüzey altı çatlak çekirdeklenmesine neden olur. Sertlik, aşınmayı kontrol etmek için önemli bir özelliktir. Deneysel kanıtlar, bu aşınma türünde, aşınma oranının birçok saf metal için sertlik [15] ile ters orantılı ve normal yük ve aşındırıcı parçacık boyutu ile doğru orantılı olduğunu bildirmiştir [16].

Bununla birlikte, alaşımlar için karmaşık davranış gözlemlenmiştir [17,18]. Tavlanmış saf metallerin aşınma direnci de sertlikleri ile doğru orantılıdır ancak alaşımlar için daha karmaşıktır [15]. Daha uzun aşınma mesafesine sahip deneylerde aşınma hızının

azalmasının nedeni (a) aşındırıcı yüzeylerin körelmesi ve (b) aşındırıcı yüzeyin aşınma artıkları tarafından tıkanması olarak bildirilmiştir [19].

Abrasif aşınma; sert şişliklerin veya sert partiküllerin, karşıdaki malzemenin yüzeyi üzerinden parça kaldırarak aşınmasına yol açması olarak tanımlanabilir. Çizelge 2.1’de abrasif aşınmada etkili olan faktörler ele alınmıştır. Bu çizelgeden yola çıkarak, hem aşındıran hem de aşınmaya maruz kalan malzemede, mekanik özellikler çok önemlidir. Ayrıca aşınmada direkt önem arz eden çevre şartları da unutulmamalıdır.

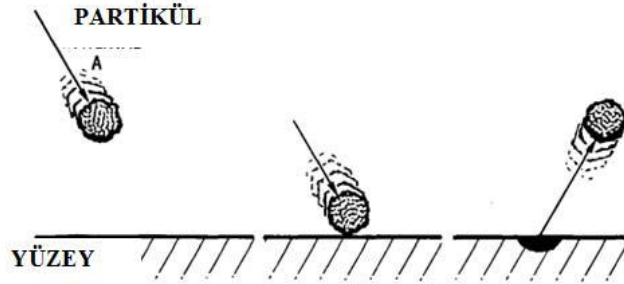
Çizelge 2.1. Abrasif aşınma davranışını etkileyen faktörler [20].

Abrasifin Özellikleri	Etkileşim Koşulları	Aşındırılan Malzemenin Özellikleri
Partikül büyüklüğü	Kuvvet	Sertlik
Partikül şekli	Hız	Akma gerilmesi
Sertlik	Darbe	Elastiklik modülü
Akma gerilmesi	Kayma	Süneklik
Kırılma özellikleri	Sıcaklık	Tokluk
Konsantrasyon	Nemlilik	Mikro yapı
		Kırılma tokluğu
		Korozyon direnci
		İşleme sertliği

### 2.2.3. Eroziv Aşınma

Katı yüzey ile sıvı arasındaki mekanik etkileşimden veya sıvı veya katı partiküllerin çarpmasından kaynaklanan aşınmaya eroziv aşınma denir. Eroziv aşınma benzerlik açısından abrasif aşınmayla karıştırılabilir, aralarında temel farklılık ise abrasif aşınmada sert partiküllerin yüzeyi kazınmasından kaynaklı bir aşınma varken eroziv aşınmada sert partiküllerin yüzeye çarpması sonucunda aşınma olayı gerçekleşir. Eroziv aşınma mekanizması Şekil 2.5’te gösterilmiştir [8]. Metal yüzeyine bir miktar hız ile parçacıklar çarptığında, metal yüzeyinde çukurlar ve büyük ölçekli yüzey altı deformasyonu meydana gelir. En iyi örnek, farklı hızlardaki yağmur damlacıklarının normal dünya yüzeyine çarpması; yüzeyi kaldırır ve eroziv aşınmaya neden olur.

Pratik açıdan, erozif aşınma önemlidir. Ancak seramik yüzeylerle yapılan bazı deneylerde silisyum karbür parçacıklarının yüksek hızda çarpması lokal yüzey erimesine neden olur [21]. Malzeme kaybı ile metalin kohezyonlu bağlanma enerjisi arasında temel bir ilişki vardır. Kohezyonlu olarak daha güçlü metallerin, kohezyonlu olarak daha zayıf metallere daha düşük aşındırıcı aşınma gösterdiği kanıtlanmıştır [22].



Şekil 2.5. Erozif aşınma mekanizması.

#### 2.2.4. Sürtünme Aşınması

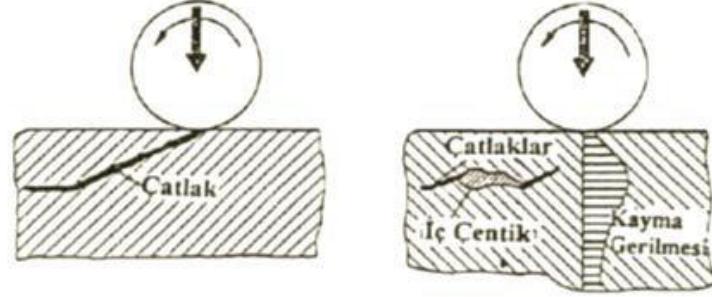
İki yüzey arasındaki küçük salınımlı veya ileri geri hareketten kaynaklanan aşınma, sürtünme aşınması olarak bilinir. İki aşamalı bir mekanizmadır. Başlangıçta, iki yüzeyin sürtünmesi nedeniyle adheziv aşınma meydana gelir ve daha sonra aşınma partiküllerinde depolanan büyük miktarda enerji nedeniyle oksitlenirler[8].

#### 2.2.5. Yorulma/Delaminasyon Aşınması

Döngüsel yükleme nedeniyle yüzey yorgunluğundan kaynaklanan kırılmanın neden olduğu aşınmaya Yorulma/Delaminasyon aşınması denir. Bir dizi çukur veya boşlukla sonuçlanır. Genellikle rulmanlar, yollar vb. gibi yuvarlanan veya kayan temas gövdelerinde oluşur. Tekrarlanan döngüsel yüklemelerden sonra, yüzeyde veya yüzey altında bir çatlak gözlemlenir. Yeraltı çatlakları yayılır, diğer çatlaklarla birleşir, yüzeye ulaşır ve aşınma parçacıkları oluşturur. Benzer şekilde, yüzey çatlakları yığın halinde aşağı doğru hareket eder, diğer çatlaklarla birleşir ve bir aşınma parçacığını serbest bırakır. Çatlak yayılımı bir dizi faktörden etkilenir. Havadaki bağıl nem önemli faktörlerden biridir. Çatlak büyümesinin kuru havadan ziyade yüksek nemli ortamlarda hızlı bir şekilde meydana geldiği deneysel olarak rapor edilmiştir. Şekil



2.6'da yüzey yorulmasında çatlak oluşumu ve ilerlemesinin örnek gösterimi verilmiştir [23].



Şekil 2.6. Yüzey yorulmasında çatlak oluşumu ve ilerlemesi.

### 2.2.6. Korozif/Oksidatif Aşınma

Korozif aşınma, korozif veya oksidatif ortamda kayma meydana geldiğinde meydana gelir. Kuru kayma sırasında da normal ortamdaki oksijen veya ortamda bulunan diğer gazlar katı yüzey ile reaksiyona girebilir. Aşınma önleyici katkı maddelerinin veya diğer kimyasal maddelerin aşırı varlığı da korozif aşınmaya neden olabilir. Yüksek sıcaklıkta oksijen, kayma yüzeyi ile etkileşebilir ve oksidatif aşınma adı verilen oksitleri oluşturabilir. Örneğin, Inconel'in (bir miktar demir içeren nikel-krom alaşımları) oksidasyonu 100°C'de meydana gelir ve bu da nikel oksit (NiO) ve krom oksit ( $Cr_2O_3$ ) oluşumuna neden olur. Bununla birlikte, sıcaklık 280°C'ye yükseltildiğinde, yüzey, yüzeye yakın  $NiFe_2O_4$  ve metal ara yüzüne yakın  $Cr_2O_3$  spinel içerir [24]. Zayıf, mekanik olarak uyumsuz aşındırıcı/oksit tabakasının oluşmasına neden olur.

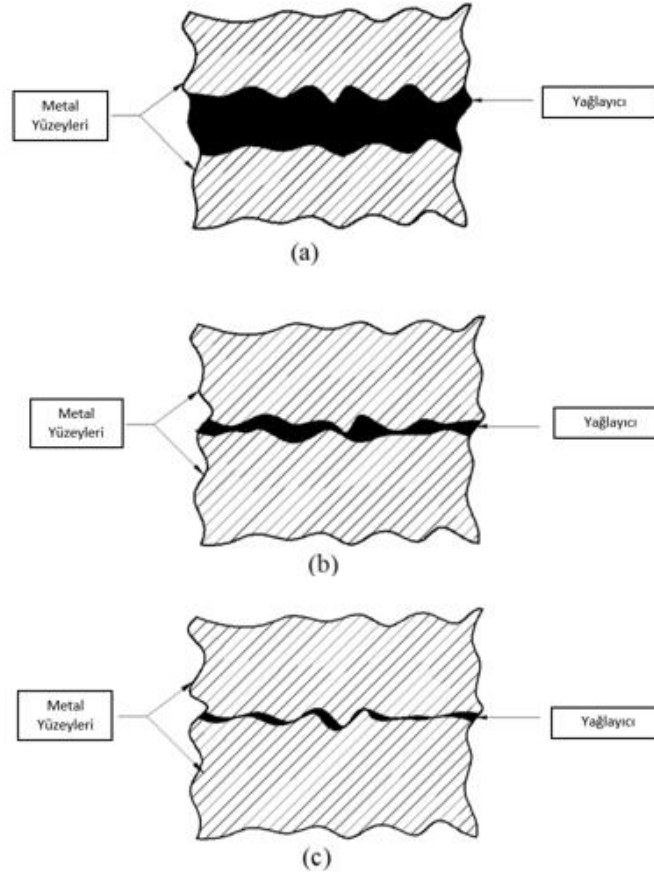
### 2.2.7. Deformasyon ve Sürme

Sert pürüzlü yüzey yumuşak bir metal yüzey üzerinde kaydığında, sürtünme direnci esas olarak yumuşak malzemeyi süren sert yüzey pürüzleri tarafından geliştirilir [25]. Daha yumuşak malzemenin plastik akışı için gereken kuvvet, sürtünme katsayısını temsil eder. Yüzeylerin sert pürüzler ve aşınma parçacıkları tarafından sürülmesi, çoğu kayma durumunda en önemli mekanizma olarak bulunmuştur [26].

## 2.2. AŞINMA HIZINI DÜŞÜREN YAĞLAYICILAR VE KATKI MADDELERİ

### 2.2.1. Yağlayıcılar

Yağlama, sürtünme kuvvetini azaltmak için temas yüzeyleri arasında yağlayıcı madde sokma işlemidir. Aşınmaya karşı koymak için en etkili ve basit yöntemlerden birisidir. Yağlayıcının temel özelliği, çok daha düşük kesme mukavemeti üretmesi ve kayma yüzeyleri arasında bir tabaka oluşturmasıdır [27]. Bazı yağlama sistemlerinde, yağlayıcı film pürüzlü kontakları tamamen ayırmasa da oluşan bağlantıların gücünü azaltır. Diğer durumlarda, yağlayıcı film yüzeyleri tamamen ayırır ve hiçbir pürüzlü bağlantı oluşmaz. Yağlama rejimleri normalde mekanik sistemde yer alan baskın yağlama mekanizması ile ilişkilidir. Üç ana yağlama yöntemi Şekil 2.7’de : (1) hidrodinamik (veya tam film) yağlama, (2) sınır yağlama ve (3) karışık yağlama olarak gösterilmiştir [28].



Şekil 2.7. Yağlama yöntemleri (a) Hidrodinamik yağlama (b) Sınır yağlama ve (c) Karışık yağlama [28].

Hidrodinamik yağlamada, göreceli hareket halindeki iki temas yüzeyi arasında yeterli sıvı basıncı sağlanır. Akışkan katmanları, temas yüzeylerini tamamen ayırır ve yükü destekler. Sınır yağlama rejiminde, hidrodinamik yağlamaya kıyasla yüksek sürtünme katsayısı ve aşınma değerlerine yol açan sık pürüzlü temas arasında ince tek katmanlı sıvı film oluşur. Karışık film yağlama, tam film yağlama ve sınır yağlamanın birleşimidir. Sınır yağlama, ortalama film kalınlığının kompozit pürüzlülüğünden daha az olduğu rejim olarak tanımlanabilir.

### **2.2.1.1. Katı Yağlayıcılar**

Katı yağlama malzemeleri, farklı koşullar altında düşük sürtünme ve aşınma elde etmek için endüstriler tarafından uzun süredir kullanılmaktadır. Molibden disülfür ( $\text{MoS}_2$ ), tungsten disülfür ( $\text{WS}_2$ ), altıgen bor nitrür (HBN) ve boridler ( $\text{MgB}_2$  ve  $\text{ZnB}_2$ ), benzersiz yapıları ve fizikokimyasal özellikleri nedeniyle yağlayıcı katkı maddeleri veya gelişmiş vakum işlemleriyle biriktirilen güçlü bağlı koruyucu kaplamalar olarak kullanılmıştır. Bu malzemeler, geliştirilmiş sürtünme azaltma ve aşınma direnci performansı için sürtünme çiftlerinin doğrudan temas etmesini önlemek üzere koruyucu bir film oluşturur [29,30]. Cu, Ag, Sn ve Au gibi bazı yumuşak metaller de düşük kayma mukavemetlerinden dolayı düşük sürtünme katsayıları sağlamak için kaygan yüzeylerde yağlayıcı katkı maddesi olarak veya yumuşak metalik filmler olarak kullanılmaktadır [31,32]. Bununla birlikte, diğer katı yağlayıcılarla karşılaştırıldığında, üstün özellikleri nedeniyle karbon oldukça ilgi çekmiştir. Karbonun birden fazla formu vardır ve her formun özelliği kendine özgü yapısına bağlıdır [33].

### **2.2.1.2. Karbon Bazlı Katı Yağlayıcılar**

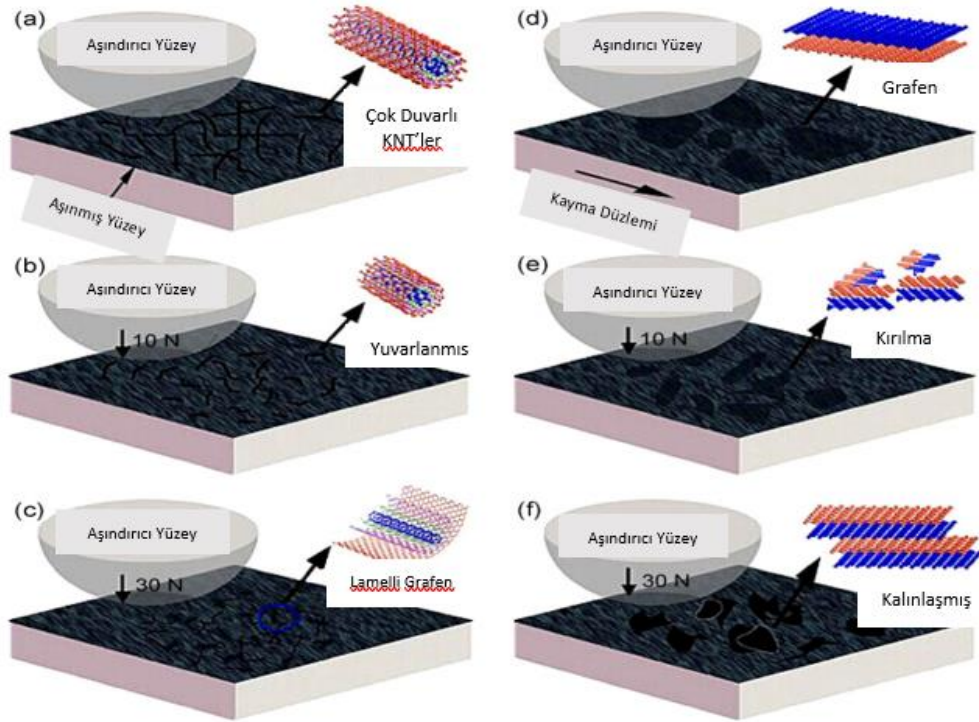
Mekanik sistemlerin yağlama verimliliğini daha da artırmak için yüksek performanslı yağlama katkı maddeleri geliştirmek için dünya çapında çabalar sarf edilmiştir. Grafen, ince tabaka yapısı ve üstün termal iletkenlik ( $\sim 5.000 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ), yüksek taşıyıcı hareketliliği ( $27.000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 'e kadar) dahil olmak üzere özellikleri nedeniyle yağlama sorunlarını çözmek için gelecek vaat eden bir aday olarak ortaya çıkmıştır[34,35]. Son zamanlarda, bazı araştırmacılar tek ve birkaç katmanlı grafenin

nanomekanik ve nanotribolojik özelliklerine odaklanmış ve birkaç katmanlı grafenin ince katmanlı yapısı nedeniyle mekanik sistemlerde sürtünmeyi azaltma ve aşınma önleme davranışlarını önemli ölçüde iyileştirebileceğini göstermiştir.[36] Grafen, mükemmel mekanik mukavemeti ve kolay kesme kapasitesi nedeniyle tribolojik uygulamalar için büyük umut vaat etmektedir [36]. Ek olarak, düşük yüzey enerjisine sahip, atomik olarak pürüzsüz iki boyutlu bir malzeme olarak grafen, yeni bir koruyucu kaplama olarak kullanılabilir ve çeşitli temas yüzeyleri arasındaki sürtünmeyi ve yapışmayı azaltmak için geleneksel katı filmlerin yerini alabilir [37]. Karbon nanotüpler (KNT'ler) son teknoloji ürünü bir karbon nanomalzemedir ve üstün mekanik güçleri ve elektriksel ve termal iletkenlikleri nedeniyle nanoelektronik, kompozit imalat, gaz depolama, optik ve elektronik cihazlarda çok çeşitli uygulamalar için büyük umut vaat etmektedir [38]. Esasen, altıgen olarak düzenlenmiş  $sp^2$ -hibritleştirilmiş karbon atomlarına sahip sarılmış grafen levhalar olarak kabul edilirler. Yoğun araştırma faaliyetleri, nanoyapılı malzemelerin geliştirilmesinde dikkate değer bilimsel ve teknolojik ilerleme sağlamıştır. Birçok araştırmacı, KNT'leri, sınırlı geometri, hareketsiz ultra pürüzsüz yüzeyler, küçük tüpler arası mesafe ve yüksek mekanik mukavemet, yüksek elastik modül (Young modülü 1.8 TPa, bükülme mukavemeti 14.2 GPa kadar yüksek), büyük elastik gerinim ve kırılma gerilmesini sürdürme yeteneği gibi özellikler içeren özel yapıları nedeniyle nanodan mikro ölçeklere sürtünmeyi incelemek için ilgi çekici bir sistem olarak önerrilmiştir.

### **2.2.1.3. Karbon Bazlı Katı-Sıvı Etkileşimli Yağlama Malzemeleri**

Kompozit kaplamaların tribolojik performansını daha da iyileştirmek için Wang'ın grubu, yüksek mekanik mukavemetleri, yüksek termal iletkenlikleri ve termal kararlılıkları nedeniyle iyonik sıvı yağlayıcı katkı maddeleri olarak karbon nanomalzemeleri (grafen ve karbon nanotüp) kullanmıştır. Baz yağ için grafen ve KNT bazlı katkı maddeleri detaylı olarak incelenmiştir ve sonuçlar; ısıya dayanıklı, mekanik dayanımlı ve kendi kendini yağlayan özellikte oldukları için yağlayıcının tribolojik özelliklerini ve ömrünü önemli ölçüde iyileştirebileceklerini göstermektedir [39,40]. Wang'ın grubu ilk olarak iyonik sıvı (IL) ile grafen ve yağlayıcı katkı maddesi olarak KNT'lerden ve DLC filmlerinden (DLC/IL/grafen ve DLC/IL/grafen+KNT'ler) oluşan kompozit yağlama sistemleri üretmiş ve uzay tribolojisi için potansiyellerini

değerlendirmiştir. Sonuçlar, 0.075 mg/mL grafen içeren DLC/IL/grafen sisteminin, sürtünme çiftleri arasında florlu yağ içeren karbon açısından zengin tribo filmlerin oluşması nedeniyle yüksek vakum ve ışınlama ortamlarında en düşük sürtünmeyi ve aşınmayı sağladığını göstermiştir. DLC/IL/grafen+KNT sisteminin sonuçları, KNT'lerin düşük uygulanan yüklerde sürtünmeyi azaltmada daha etkili olduğunu, yüksek uygulanan yüklerde ise grafenin daha etkili olduğunu göstermektedir. Bu farklılıklar temel olarak sürtünme işlemi sırasında KNT'ler ve grafen arasındaki mikroyapısal varyasyonların yanı sıra grafen ve KNT'lerin aktarımından kaynaklanmaktadır [41,42]. Şekil 2.8'de, DLC/IL/grafen+KNTs sistemi için olası yağlama mekanizmasının şematik diyagramını gösterilmiştir. Grafen nano tabakaları, düşük uygulanan yükler altında sürtünme testinden sonra kolayca istiflenir ve kalınlaşır ve yüksek vakumda uzun süreli sürtünme testinden sonra IL'ler tarafından çapraz bağlanan grafen tabakalarının sandviç yapısını oluşturmakta böylece, grafen katmanları arasında kayma için de faydalı olabilmektedir.



Şekil 2.8. Karbon bazlı katı-sıvı kompozit kaplamalar (DLC/IL/grafen+KNT'ler) için olası yağlama mekanizmasının şematik diyagramı [42].

Çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT'ler) ayrıca yuvarlanma ve açılma kolaylığı nedeniyle tribolojik özelliklerin iyileştirilmesinde önemli bir rol oynar MWCNT'ler ve

sürtünme nedeniyle grafen benzeri parçalar, sürtünme yüzeylerinin doğrudan temasını önleyen fiziksel bir koruyucu film oluşturabilir ve aşınma direncini önemli ölçüde artırır [42].

#### **2.2.1.4. Hidrotermal Karbonlar**

Hidrotermal karbonlar; karbonhidrat türevleri, selülozik biyokütleler, deniz ürünleri, doğal atıklar gibi doğadaki organik tüm biyokütlelerden su içerisinde hidrotermal karbonizasyon ile meydana gelmektedir. Hidrotermal karbonizasyon işlemi otoklav içerisinde su buharı ile kendiliğinden oluşan basınç altında biyokütle türüne bağlı olarak 180-350°C'de 3-48 saat gibi sürede meydana gelmektedir[43,44]. Bu metot, reaksiyon ortamında su kullanılması, ucuz maliyetli olması ve düşük sıcaklıklarda çalışılması gibi avantajları ile tercih sebebi olmaktadır. Ayrıca hidrotermal karbonizasyon ile sıcaklık, basınç, kimyasal madde konsantrasyonu, başlangıç pH'ı ve işlem süresi gibi parametrelerinin ayarlanması, partikül boyutu, morfolojisi ve yüzey kimyasal özellikleri gibi faktörlerin ayarlanmasını mümkün kılmaktadır. Hidrotermal karbonlar enerji depo malzemeleri, nano kompozitler, yakıt hücrelerinde, katalitik ve fotokatalitik reaksiyonlarda, adsorbsiyon malzemeleri gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır [44–47].

#### **2.2.2. Yağlayıcının Tribolojik Özelliklerine Etki Eden Nanopartikül Parameteleri**

Nanopartiküller, yağlayıcıların tribolojik özelliklerini etkileme yeteneğine sahiptir. Bu onların boyutları ve diğer özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Nanopartikül esaslı yağlayıcıların tribolojik özelliklerini etkileyen en önemli parametrelerin büyüklük, şekil, yapı, fonksiyonel yüzey grupları ve nanopartikül konsantrasyonu olduğu görülmüştür[48,49].

##### **2.2.2.1. Nanoparçacık Boyutu Etkisi**

İlk olarak, nanoparçacıkların boyutu, onların tribolojik özelliklerini etkileyen iç mekanik ve fiziko-kimyasal özelliklerini belirler. Ancak nanoparçacıklar sürtünme yüzeylerinden daha sertse, bu aşınmaya neden olabilir. Bu nedenle, nano katkı maddesi

ile modifiye edilmiş bir yağlayıcı geliştirirken nanoparçacık boyutunun neden olduğu değişiklikleri hesaba katmak gerekir. İkincisi, sürtünme yüzeylerinin pürüzlülüğüne dikkat edilmelidir, çünkü nanoparçacık yarıçapı düzensizliklerin boyutundan daha büyükse, o zaman nano katkı maddesinden tribolojik avantajlar gelmeyecektir. Bununla birlikte, yüzey pürüzlülüğü nanoparçacık yarıçapından çok daha büyükse, o zaman nano katkı maddesi düzensizlikleri dolduracak, böylece sürtünme yüzeylerini yapay olarak düzleştirecek ve sonuç olarak tribolojik özelliklerde bir iyileşmeye yol açacaktır [50]. Üçüncüsü, yağlayıcı bileşimin homojenliği nanoparçacık boyutuna bağlıdır. Stokes yasasına göre, nanoparçacık boyutunda bir azalma ile dispersiyon stabilitesinde potansiyel bir iyileşme meydana gelir [51].

#### **2.2.2.2. Nanoparçacık Formu Etkisi**

Nanoparçacıkların şekli, nanomodifiye yağlayıcıların geliştirilmesi bağlamında dikkate alınması gereken bir diğer önemli parametredir. Örneğin, belirli bir yükte, nano-küreler, nanoplakalara kıyasla daha fazla basınca maruz kalacaklardır, çünkü birincisinin temas yüzey alanı birçok kez daha küçüktür. Böylece, katmanlı nanoparçacıklar kullanıldığında, sürtünme yüzeylerinin deformasyonu en düşük olasılığa sahip olacaktır[52].

#### **2.2.2.3. Dahili Nanoyapı Etkisi**

Nanopartiküllerin iç yapısı, mekanik özelliklerini ve dolayısıyla tribolojik özelliklerini etkileyebilir. Örneğin, nanomalzemelerdeki boşluklar (Schottky kusuru olarak adlandırılır) dislokasyonların hareketini engeller, böylece mekanik mukavemeti artırır [53,54]. Bu nedenle, sınırlı sayıda atomik boşluğun varlığı, nanomalzemelerin mekanik mukavemetini artırabilir ve sonuç olarak, tribolojik özellikler üzerinde faydalı bir etkiye sahip olabilir. Bununla birlikte, aşırı miktarda kusur, nanomalzemelerin mekanik mukavemetini azaltabilir. Örneğin, çekme mukavemeti ve Young modülü, bir nanotüpün her atomik kusuru ile kademeli olarak azalacaktır [55,56].

#### **2.2.2.4. Yüzey İşlevselleştirme Etkisi**

Yüzey işlevselleştirme, nano modifiye yağlayıcıların geliştirilmesi bağlamında da önemli bir rol oynar. İşlevselleştirilmemiş nano-parçacıklar, güçlü van der Waals kuvvetleri tarafından meydana gelen çekim ve etkileşimler nedeniyle genellikle topaklanma eğilimindedir. Bu bağlamda, baz yağda kolloidal stabilitenin artırılması ve nanopartiküllerin homojen dağılımının gerekli olduğu durumlarda yüzey işlevselleştirmesi gerekli bir koşuldur [57].

#### **2.2.2.5. Nanoparçacık Konsantrasyonu Etkisi**

Çalışmalar, baz yağlardaki nanoparçacık miktarının, yağlayıcıların tribolojik özelliklerini güçlü bir şekilde etkilediğini göstermiştir. Ancak minimum sürtünme katsayısı için optimum konsantrasyonu bulmak için çalışma sisteminin tüm parametrelerini göz önünde bulundurmak gerekir [58].



## BÖLÜM 3

### ALÜMİNYUM SİLİSYUM (AL-Sİ) ALAŞIMLARI

Alüminyum-silisyum alaşımları ve alüminyum bazlı metal matris kompozitler, adhezif aşınmanın (veya kuru kayma aşınmasının) baskın bir süreç olduğu silindir blokları, pistonlar ve piston ek halkaları gibi çeşitli otomotiv motor bileşenlerinin imalatında uygulama bulmuştur [59].

Çözünürlük sınırının üzerindeki miktarlarda silikon içeren alüminyum gibi yerinde kompozit yapılar katılaşma ile oluşturulur. Bununla birlikte, iki fazın bileşimleri ve nispi miktarları, büyüme kinetiği ve denge koşulları tarafından kontrol edilen dar bir aralıkla sınırlıdır. Yapay kompozit yapılar, bileşimde bu sınırlamaları göstermez. Bu metal matrisli kompozitler (MMC'ler), toz metalurjisi, sıvı metalurjisi ve sıkıştırılmalı döküm gibi çeşitli tekniklerin kullanılmasıyla matrise bir takviye fazının eklenmesiyle üretilir [60].

Takviye fazı genellikle aşağıdakilerden biridir: bor veya grafit lifler veya kesintili partikül veya SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gibi sert partiküller. Güçlendirilmiş parçacıkların hacim oranı genellikle %10-30 aralığındadır. 2000, 5000, 6000 ve 7000 alaşım serileri gibi alüminyum alaşımları, kompozit üretiminde en yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. Alüminyum kompozitler havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [60–62]. Otomotiv motor bileşenlerinin imalatında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, partiküller veya SiC partikülleri içeren A356 (Al,7Si,0-3Mg) gibi hiper ötektik Al-Si bazlı kompozitler kullanılmaktadır[63,64]. Alüminyum döküm dizel pistonların aşınma direnci ve çalışma özellikleri, alüminyum bazlı kompozit piston segman eklerinin kullanılmasıyla geliştirilmiştir[65]. Alüminyum esaslı kompozitler ayrıca fren rotorları, pistonlar, silindir gömlekleri ve silindir kapaklarının imalatında kullanılmaktadırlar [64].

### 3.1. AL-SI ALAŞIMLARININ AŞINMA MEKANİZMASI

İki Al-Si alaşımının (%10,9 ve %22,1 Si) bir çelik karşı yüzeye karşı kuru kayma aşınması üzerine yapılan bir çalışmada, iki aşınma rejimi gözlemlenmiştir. İlk aşınma rejimi, Archard yasasına uyulan karışık bir elastik-plastik temas modu olarak tanımlanmıştır. Uygulanan kritik bir yükte etkinleştirilen ikinci rejim, aşınma hızının yük ile doğru orantılı olmadığı brüt plastik akış ile karakterize edilmiştir. Ayrıca ötektik üstü alaşımın yüksek bir aşınma oranına sahip olduğu belirtilmiştir [66].

Al-17Si alaşımının kuru kayması üzerinde Krishna Kanth ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma, uygulanan basınca bağlı olarak aşınma oranında bir geçişin varlığını doğrulamıştır [67]. İncelenen uygulanan basınç aralığı 1-30 MPa'di. Rejim I, derin aşınma olukları, kraterler içeren ve aktarılmış demir açısından zengin bir tabakaya dair hiçbir kanıt içermeyen aşınmış bir yüzeyle karakterize edilmiştir. Bu aşınma rejiminde, abrazyon ve delaminasyon aşınma mekanizmaları baskın olarak kabul edilmiştir. 13.1 MPa'lık uygulanan basınçta, aşınma süreci sonunda aşınma hızı artmış ve aşınma yüzeyi geniş plastik deformasyon ve düzgün bir topografya geliştirmiştir.

Shivanath ve ark. Al-Si alaşımlarının kuru kaymasındaki iki aşınma mekanizmasını oksidatif ve metalik aşınma olarak sınıflandırmıştır [68]. Düşük uygulanan yüklerde oksidatif aşınma meydana gelmiştir. Bu aşınma işleminde hem aşınan Al-Si yüzeyinde hem de karşı yüzeyde bir alüminyum oksit tabakası (10-80 µm) oluşur. Aşınma, ilk olarak pürüzlerin oksidasyonu ve daha sonra oksitlenmiş aşınma kalıntılarının kırılması ile meydana gelmiştir. Kaldırılan metal miktarının oksit oluşumunun kalınlığıyla sınırlı olması nedeniyle aşınma oranı düşüktür. Alt tabakanın bazı lokalize deformasyonu ve Si parçacıklarının kırılması gözlemlenmiştir. Oksidatif aşınmanın genellikle Si içeriğinden veya Si parçacık boyutundan bağımsız olduğu kabul edilmiştir. Metalik aşınma, daha yüksek uygulanan yüklerde baskın aşınma süreci haline gelmiştir. Al-Si aşınma yüzeyi, plastik deformasyon ve kırılma, kayan yüzeyler arasında önemli miktarda malzeme transferi ve aşınma döküntüsü oluşumu ile karakterize edilmiştir. Plastik deformasyon miktarı ve yüksek aşınma oranı oksit tabakası oluşumunu engellemiştir. Daha yüksek bir Si içeriğinin, bu aşınma rejiminin aktif olduğu yükü arttırdığı bildirilmiştir.

## BÖLÜM 4

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 4.1. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI

Bu çalışmada aşınma deneyinde kullanılmak üzere sertliği  $75.8 \pm 4.6$  Hv olan ve Çizelge 4.1’de kimyasal bileşimi verilen AlSi16 alaşımı kullanılmıştır. Aşınma ve mikroyapı analizleri yapılabilmesi için numunelere kesme, zımparalama ve parlatma işlemleri uygulanmıştır. Yüzey hazırlama işlemleri Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü Malzeme Araştırma ve Geliştirme merkezi cihazlarında gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.1. AlSi16 Alaşımının kimyasal bileşimi [69].

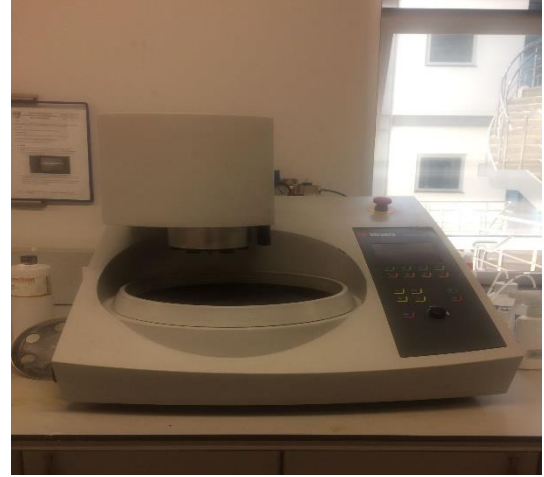
Elementler	Si	Fe	Mg	Mn	Cu	Zn	Al
% Bileşim	16.37	0.53	0.28	0.10	0.07	0.05	Kalan

Zımparalama işlemi için numunelere sırasıyla 400-600-800-1200-2000’lik zımparalarla su takviyesiyle birlikte zımparalanmıştır. Her bir zımpara arasındaki geçişte numune  $90^\circ$ ’lik açıyla çevrilmiş ve bu sayede bir önceki zımparadan kalan izler yok edilmiştir.

Zımparalama işlemi sonrasında parlatma keçeleri kullanılarak parlatma işlemi yapılmıştır. Parlatma aşındırıcısı olarak alümina çözeltisi kullanılmıştır. İşlem sonrasında numune yüzeyi saf su ile yıkanmış ve ardından kurutulmuştur. Kesme, zımparalama ve parlatma işlemlerinin yapıldığı cihazlar Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.1. Numune hazırlamada kullanılan; (a) Numune kesme cihazı(diskaton) ve (b) Zımparalama ve parlatma cihazı.

#### 4.2. HIDROTERMAL KARBONLARIN SENTEZİ

Paslanmaz çelikten imal edilmiş iki ayrı otoklavın içinde bulunan 50 ml hacimli teflon kaba 1,5 gr glukoz (Sigma-Aldrich) ve kitosan (Merck) konulmuştur. Daha sonra üzerine ise 20 ml deiyonize su ilave edilmiştir. Kapağı kapatılan otoklav 210 °C sıcaklıktaki fırında 30 saat bekletilmiştir. Fırından çıkartılan otoklav oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Daha sonra katı ve sıvı karışımı 300 ml deiyonize su ile yıkanarak filtre kağıdından süzölmüştür. Filtre kağıdı üzerinde kalan katı karbonlar 105 °C sıcaklıkta 2 saat kurutulduktan sonra saklanmıştır. Şekil 4.2’de hidrotermal karbonların üretildiği otoklav ve fırın gösterilmiştir.



(a)

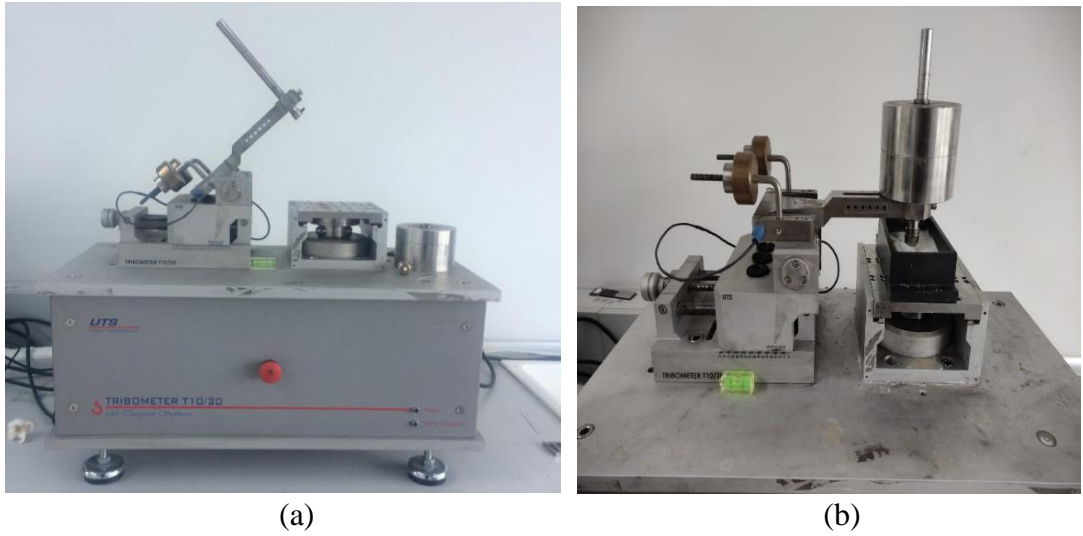


(b)

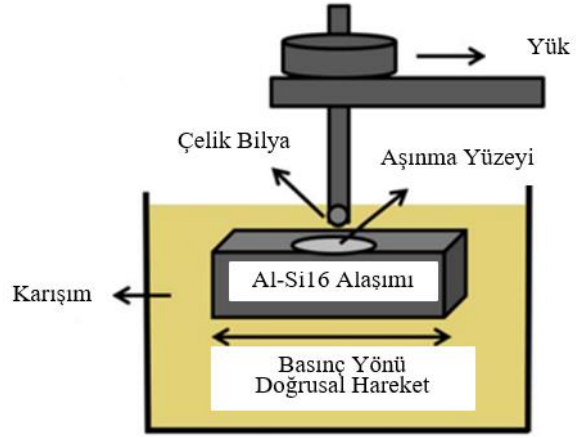
Şekil 4.2. Hidrotermal karbonların üretildiği otoklav (a) ve fırın (b).

### 4.3. AŞINMA TESTİ

Aşınma deneyi hem döner hem de ileri-geri hareket modülüne sahip UTS Tribometer T10/20 Şekil 4.3’de gösterilen aşınma test cihazı kullanılarak gerçekleştirildi. Aşınma numunelerinin ölçüleri 5x6 mm uzunlukta ve 3 mm yükseklikte hazırlandı. Numuneler 3 mm/s. aşınma hızında, oda sıcaklığında, 50 N’luk yük uygulanarak, ve 3000 m yol alınarak yapılmıştır. Aşınma yağı olarak ağırlıkça %5 bor yağı süspansiyon ve dört farklı katı yağlayıcı özellikli karbon kullanılmıştır. Bu karbonlar; grafit (Nanografi), karbon nanotüp (Nanografi) ve iki farklı morfolojiye sahip (glukoz ve kitosandan elde edilmiş) hidrotermal karbonlardır. Bu karbonlar sırasıyla GRFT, HTC-G, HTC-K ve KNT olarak kısaltılmıştır. Her bir karbon yağlayıcı üç farklı oranda (0.05, 0.1 ve 0.2 %ağ.) bor yağına eklenmiş ve aşınma testleri yapılmıştır. Yapılan her testin sonunda katı yağlayıcı içeren süspansiyonlar ve bilyalar değiştirilmiştir. Aşınma testleri için 6 mm çapında AISI 52100 paslanmaz çelik bilyalar kullanılmıştır. Aşınma testinin şematik gösterimi Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. (a) UTS Tribometer aşınma test cihazı, (b) Numunenin içerisinde olduğu görsel.



Şekil 4.4. Aşınma testi şematik gösterimi.

Aşınma deneyleri sonrası aşınmış yüzeylerin alan hesabı, Mitutoyo SJ-410 profilometre aleti kullanılarak hesaplanmıştır (Şekil 4.5). Aşınma oranı, Archad katsayı Denklem 1 formülü ile kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Aşınma oranı} = V/l \quad (4.1)$$

V: Hacim kaybı ( $\text{mm}^3$ )

l: Aşınma mesafesi (m)



Şekil 4.5. Mitutoyo SJ-410 profilometre.

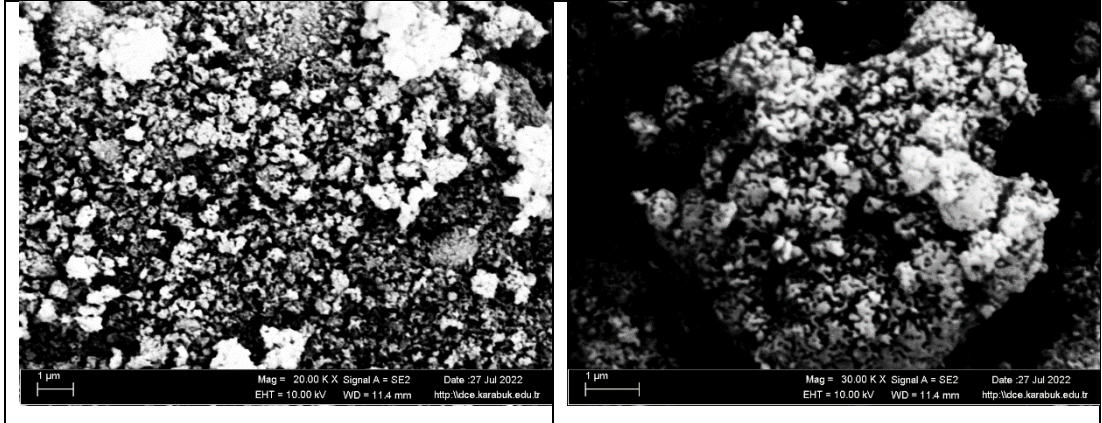
Aşınma testi sonrası meydana gelen izleri aşınma mekanizmasının belirlenmesi için Carl Zeiss Ultra Plus Gemini FESEM model taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir.

## BÖLÜM 5

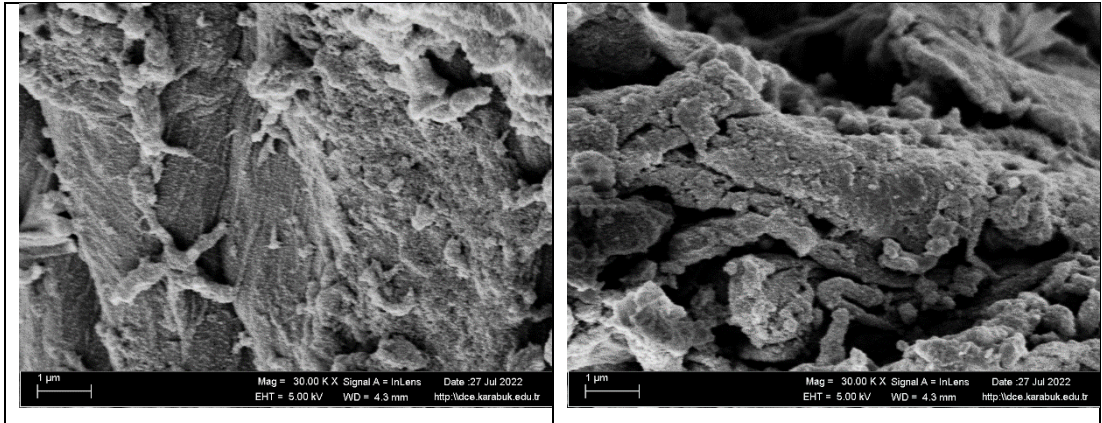
### DENEYSEL SONUÇLAR

#### 5.1. KARBON KATI YAĞLAYICILARIN KARAKTERİZASYONU

Aşınma deneylerinde kullanılan Grft, HTC-K, HTC-G ve KNT karbon malzemelerin SEM görüntüleri Şekil 5.1’de verilmiştir. Grft’in morfolojik yapısının geometrik olarak düzensiz bir yapıda, HTC-K’nın üzerinde yumrular olan fiber yapıda, HTC-G’nin  $846 \pm 92$  nm çapında küresel morfolojide, KNT’nin ise nano boyutta tüplerden ve fiber yapıda oluştuğu belirlenmiştir.

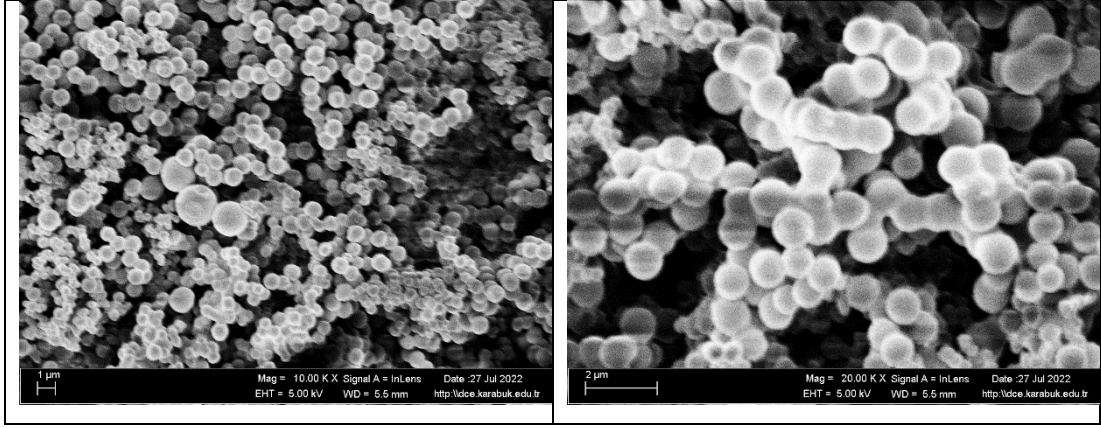


(a)

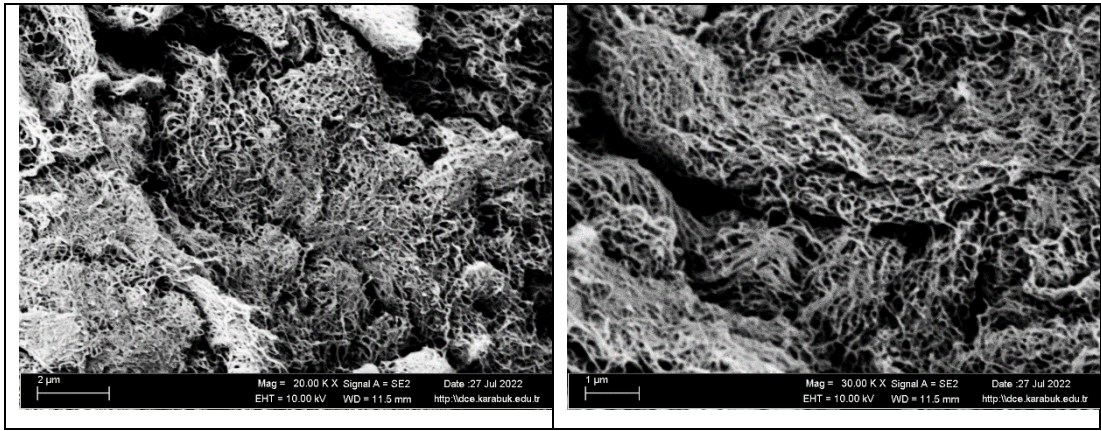


(b)





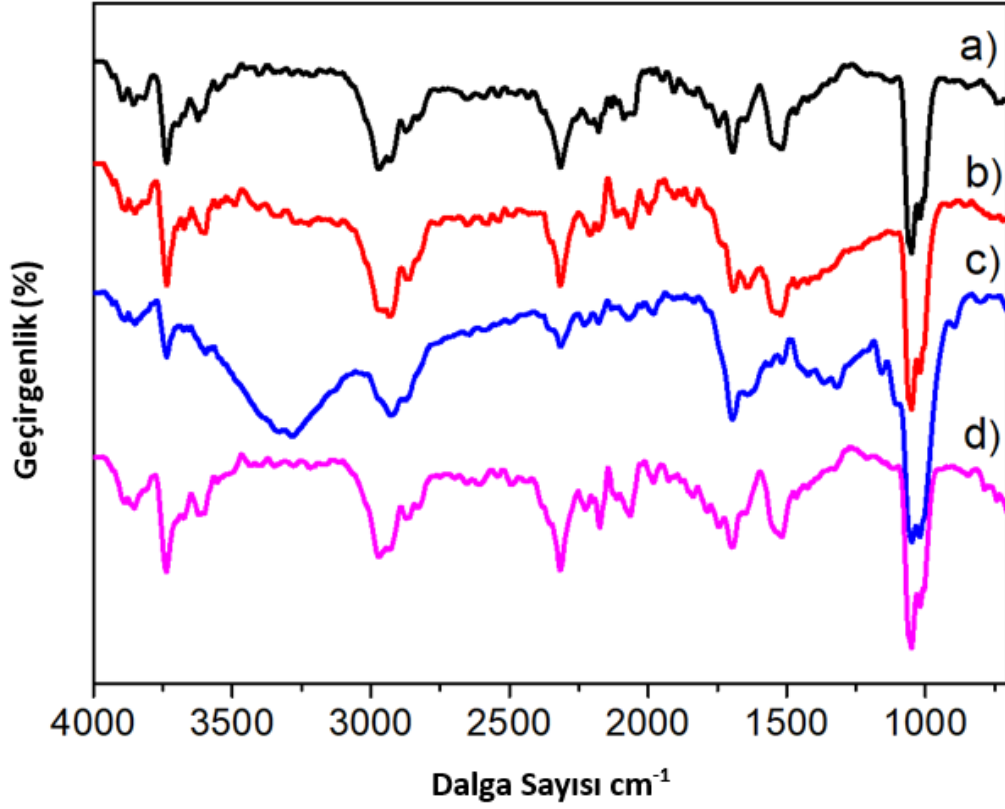
(c)



(d)

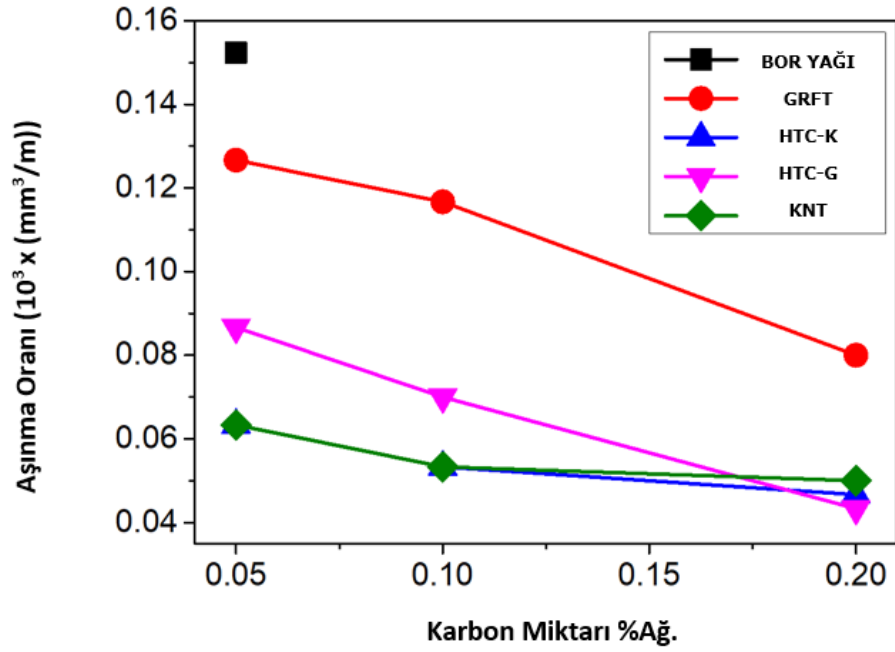
Şekil 5.1. Yağlayıcı katkı malzemelerinin SEM görüntüleri (a) Grft, (b) HTC-K, (c) HTC-G, ve (d) KNT.

Aşınma deneylerinde kullanılan Grft, HTC-K, HTC-G ve KNT karbon malzemelerin FTIR spektrumları Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Tüm karbonlarda (C–C)  $1013\text{ cm}^{-1}$ , (C–O)  $1050\text{ cm}^{-1}$ , (C=O)  $1685\text{ cm}^{-1}$ , (C=N)  $2315\text{ cm}^{-1}$ , (C–H)  $2973\text{ cm}^{-1}$ , ve (OH)  $3737\text{ cm}^{-1}$  dalga boylarında pikler görülmüştür. HTC-G karbonunda ise (C=N)  $2315\text{ cm}^{-1}$  pikinin şiddeti oldukça azalmış ve (OH)  $3281\text{ cm}^{-1}$  piki yayvan ve belirgin bir pik oluşmuştur. Elde edilen bulgular literatürde yayınlanmış çalışmalar ile benzerlik göstermiştir [43,70].



Şekil 5.2. Karbonlara ait FT-IR spektrumları (a) Grft, (b) HTC-K, (c) HTC-G, ve (d) KNT.

Katı yağlayıcı türüne göre altlık malzemesinin aşınma oranlarındaki değişiklikler Şekil 5.2'de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde genel olarak katkı malzemelerinin Bor yağına eklenmesiyle ve karbon miktarlarının artmasıyla birlikte aşınma oranlarının önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin katkı malzemelerinin altlık malzemesi yüzeyinde koruyucu tribofilm oluşturması olarak açıklanabilir. Katkı malzemesi oranının artması yine yüzeyde koruyucu tribofilm performansını olumlu yönde etkilediği de söylenebilir [71,72]. Özellikle partikül boyutları daha düşük olan karbon malzemelerde sonuçların GRFT'e ve HTC-K'ya oranla çok daha iyi olduğu belirlenmiştir.



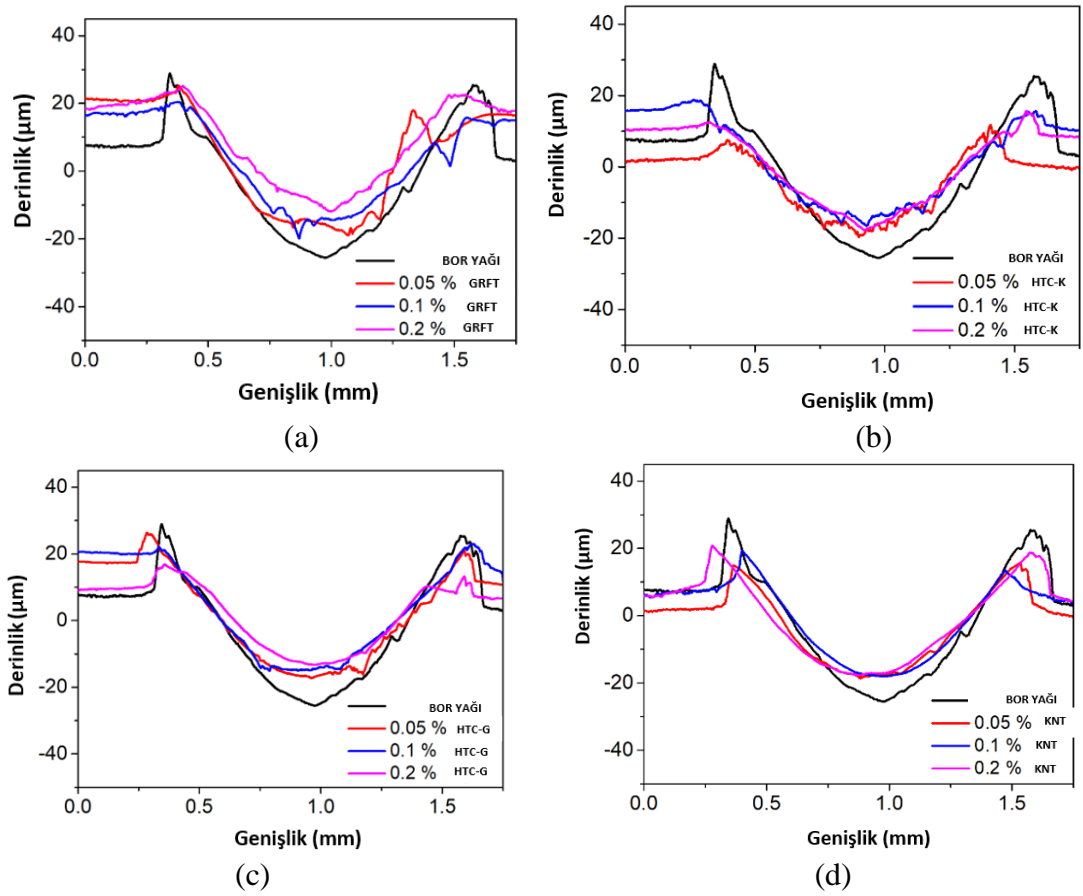
Şekil 5.3. Yağlayıcı tipine göre altlık malzemesinin aşınma oranlarındaki değişim.

Çizelge 5.3’de altlık malzeme olan AlSi16’nin bor yağı ve bor yağı-karbon içeren süspansiyonlardaki aşınma izi hacmi ve aşınma hızları verilmiştir. Sonuçlara göre %ağ. 0.2 oranında karbon ilavesinde en iyi sonuçların elde edildiği görülmüştür. Özellikle GRFT ve HTC-G’de yüksek oranda karbon yağlayıcı ilavesinin aşınma hızını önemli derecede azalttığı belirlenmiştir.

Çizelge 5.1. Numunelerin aşınma izi hacimleri ve aşınma hızları.

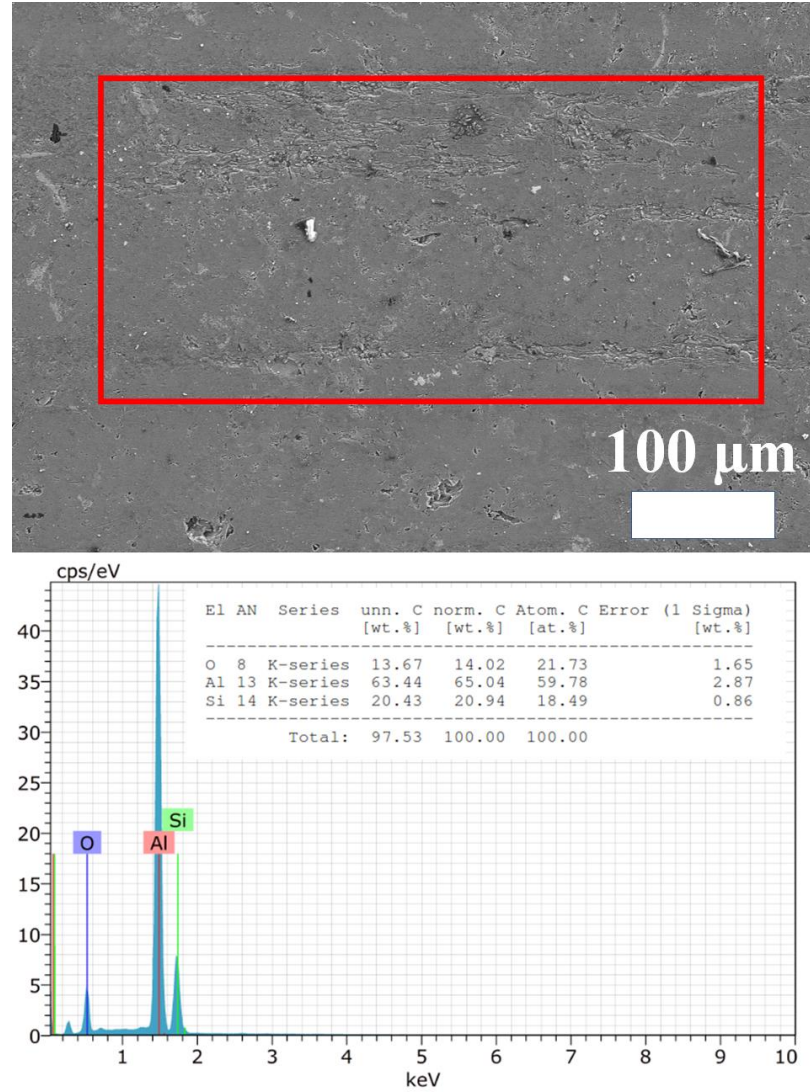
	Aşınma İzi Hacmi	Numunelerin Aşınma Hızları
<b>Bor Yağı</b>	0.047 mm <sup>3</sup>	0,156
<b>GRFT % 0.05</b>	0,038 mm <sup>3</sup>	0,126
<b>GRFT % 0.1</b>	0,035 mm <sup>3</sup>	0,113
<b>GRFT % 0.2</b>	0,014 mm <sup>3</sup>	0,084
<b>HTC-K % 0.05</b>	0,019 mm <sup>3</sup>	0,063
<b>HTC-K % 0.1</b>	0,014 mm <sup>3</sup>	0,053
<b>HTC-K % 0.2</b>	0,026 mm <sup>3</sup>	0,046
<b>HTC-G % 0.05</b>	0,026 mm <sup>3</sup>	0,086
<b>HTC-G % 0.1</b>	0,081 mm <sup>3</sup>	0,072
<b>HTC-G % 0.2</b>	0,013 mm <sup>3</sup>	0,043
<b>KNT % 0.05</b>	0,015 mm <sup>3</sup>	0,063
<b>KNT % 0.1</b>	0,019 mm <sup>3</sup>	0,053
<b>KNT % 0.2</b>	0,016 mm <sup>3</sup>	0,055

AlSi16 altık malzemenin yüzeyinden aşınma sonrası alınan profilometre görüntüleri Şekil 5.4’de verilmiştir. Profilometre görüntüleri detaylı incelendiğinde tüm aşınma deneylerinde saf Bor yağında yapılan ilk testlerin en derin aşınma izine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Karbon katkıların ilavesi ile çukur derinliğinin azaldığı fakat izlerin üzerinde bir miktarın girinti çıkıntının olduğu görülmüştür. Özellikle, GRFT ve HTC-K kullanılan numunelerin yüzelerinde net bir şekilde görülmektedir (Şekil 5.4.a, b). Aşınma sonrası yapılan SEM analizlerinde parça yüzeyinden kopan parçaların yüzeye yapışmasından dolayı olduğu görülmüştür (Şekil 5.6). Bu sonuçlara göre karbon yağlayıcıların bir miktar abrezif aşınmaya sebep olduğunu göstermektedir. Katı yağlayıcı olarak HTC-G ve KNT’nin kullanıldığında ise numune yüzeyindeki bozulmanın en az miktarda olduğu belirlenmiştir. Bunun sebebinin ise boyut morfolojisinin en küçük olduğu katkı malzemesi olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.4. AlSi16 altık malzemesinin aşınmış yüzeylerinin iki boyutlu profilometre görüntüleri (a) GRFT, (b) HTC-K, (c) HTC-G, (d) KNT

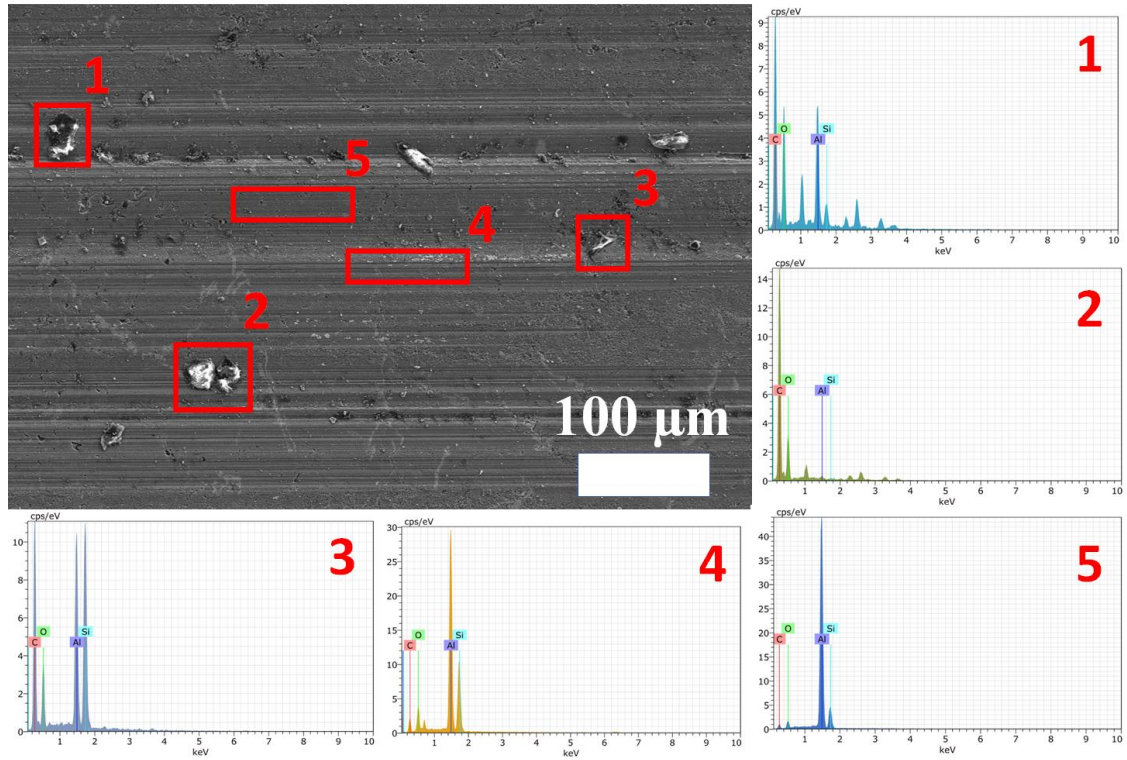
Şekil 5.5'te bor yağının kullanıldığı deney sonucunda aşınma yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü verilmiştir. Malzeme yüzeyinden küçük parçacıklar halinde malzemelerin koptuğu kopan bu debrislerin abresif aşınma mekanizmasının oluşumuna sebep olduğu görülmektedir. Fakat diğer taraftan numune yüzeyinde belirgin bir aşınma izi görülmemektedir. Bunun sebebinin yüzeyde oluşan oksit tabakasından olduğu SEM-EDX analizi gösterilmiştir. Bunun yanında kısmen adhezif ve oksidatif parçaların da olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.5. AlSi16 Alaşımının saf bor yağındaki SEM görüntüsü.

Şekil 5.6'te Grft katkılı yağlayıcının kullanıldığı deney sonucu aşınma yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü verilmiştir. Görüntüdeki 1,2 ve 3 bölgelerinde ise oksitlenme eğiliminde olan birikintilerin (debris) olduğu görülmektedir. EDX

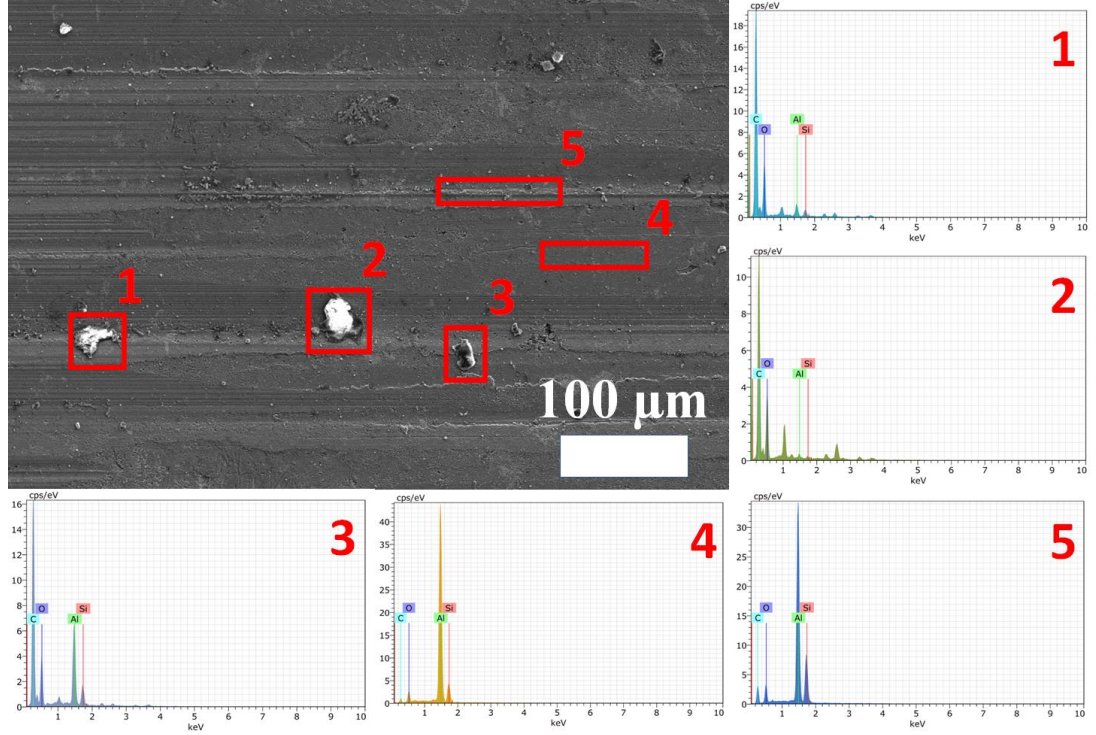
görüntülerindeki oksijen pikleri de bu durumu desteklemektedir. 4 ve 5 bölgelerinde ise kayma doğrultusunda oyuk (grooves) mekanizmalarının olduğu görülmektedir. Bor yağı ortamında oluşan aşınma mekanizmalarına kıyasla deformasyon aşınma çizgileri belirginleşmiştir. Bunun sebebinin GRFT'in adhezif etki altık malzeme üzerinde yağlayıcı film tabakası oluşturmasıdır. Bu tabaka da malzeme yüzeyine etki eden kuvvetin azalmasını sağlamaktadır. Karbon tabakaları arasında zayıf van der Waals bağının olması sebebiyle tabakaların birbiri üzerinde kayması kolaylaşmakta ve bu durum grafitte kendinden yağlama özelliği kazandırarak aşınmayı azaltmaktadır [71]. Diğer karbon malzemelerin kullanılması ile benzer aşınma mekanizması oluşmuştur.



Şekil 5.6. AlSi16 alaşımının GRFT-Bor yağı süspansiyonundaki aşınma sonrası SEM görüntüsü.

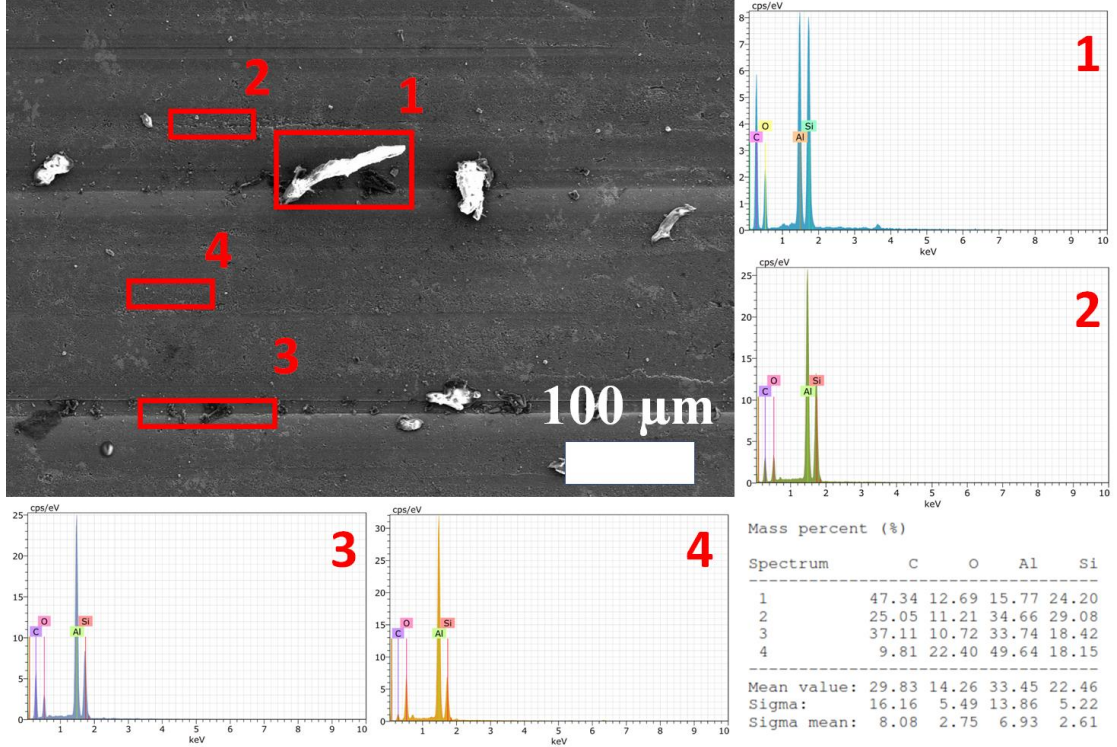
Şekil 5.7'da HTC-K katkılı yağlayıcının kullanıldığı deney sonucu aşınma yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü verilmiştir. SEM görüntüsündeki 1,2 ve 3 bölgelerinde oksitlenmiş karbon birikintileri, 4 ve 5 bölgelerinde kayma yönüne paralel çiziklerin olduğu görülmektedir. Aşınma esnasında oluşan sıcaklık nedeniyle karbon ve oksijenin bağlandığı söylenebilir. EDX görüntülerinde karbon ve oksijen oranları da

bu durumu desteklemektedir. GRFT kullanılmasına benzer şekilde bir abrezif ve adhezif aşınmanın mekanizmalarının baskın olduğu görülmüştür.



Şekil 5.7. AlSi16 alaşımının HTC-K-Bor yağı süspansiyonundaki aşınma sonrası SEM görüntüsü.

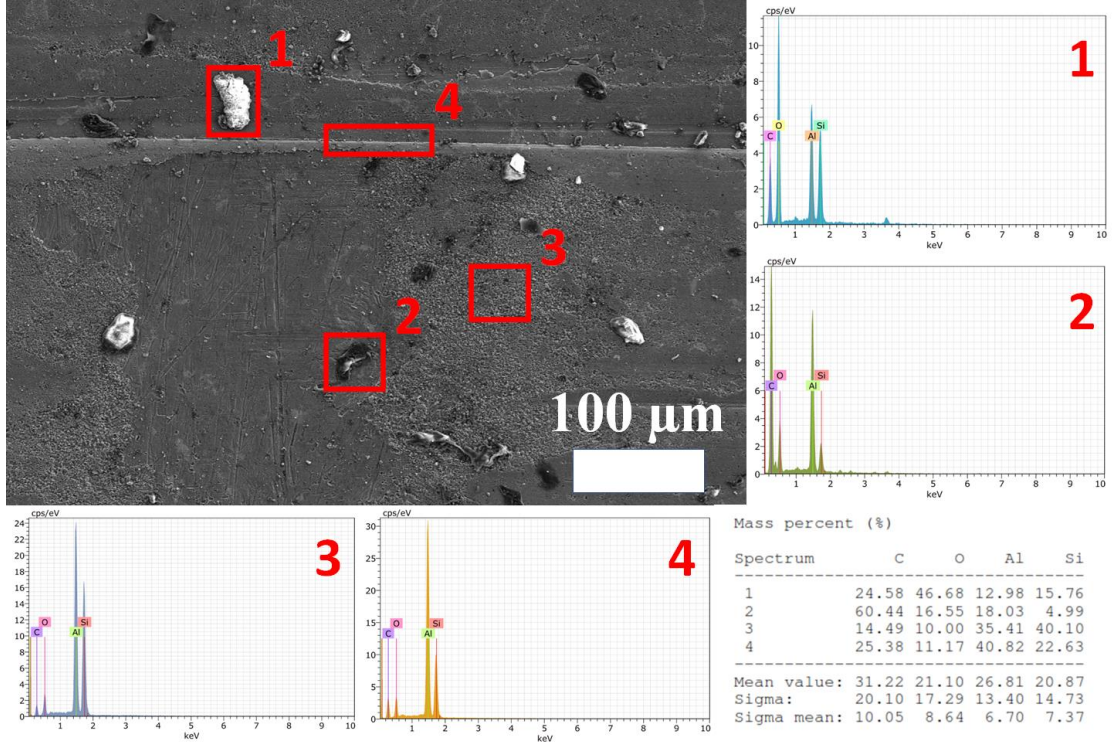
Şekil 5.8’de HTC-G katkılı yağlayıcının kullanıldığı deney sonucu aşınma yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü verilmiştir. Önceki karbonların kullanıldığında elde edilen bulgular ile benzer bulgular elde edilmiştir. Yapılan SEM-EDX analizlerine göre yüzeyde topaklanmış debriz-karbon bileşiklerinin oluştuğu belirlenmiştir. İncelenen tüm yüzeylerde en az %ağ. 9.81 karbon olduğu belirlenmiştir. HTC-G morfolojisinin nano boyutta partiküllerden oluştuğu SEM analizinde açıklanmış idi (Şekil 5.1.). Oluşan oyukların HTC-G karbonları ile doldurulduğunu ve ayrıca yüzeyde bir tribolfilm tabakasının oluştuğunu düşünülmektedir. Bundan dolayı da aşınma hızında en büyük düşüş elde edilmiştir (Çizelge 5.1).



Şekil 5.8. AlSi16 alaşımının HTC-G-Bor yağı süspansiyonundaki aşınma sonrası SEM görüntüsü.

Şekil 5.9’da KNT katkılı yağlayıcının kullanıldığı deney sonucu aşınma yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü verilmiştir. Diğer karbon yağlayıcılar benzer şekilde oksitlenmiş karbon birikintileri (1 nolu bölge) görülmüştür. HTC-G kullanıldığında olduğu gibi aşınma izlerinin belirginliği ve adhezif aşınma mekanizmasının azaldığı görülmektedir. Bu durum diğer karbonlara göre daha küçük boyutlardaki morfolojiye sahip KNT’nin tıpkı HTC-G’de olduğu gibi kopan debrizlerin ve oluşan oyuk yerlerin doldurmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [73].





Şekil 5.9. AlSi16 alaşımının KNT-Bor yağı süspansiyonundaki aşınma sonrası SEM görüntüsü.

## BÖLÜM 6

### SONUÇLAR

Bu çalışma ile dört farklı morfolojide ve boyutta karbon katı yağlayıcıların AlSi16 alaşımının tribolojik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Karbon malzemeler üç farklı oranda bor yağının içerisine karıştırılmıştır. Karbon ilavesinin her oranda aşınma hızını azalttığı, en yüksek oranda (%ağ. 0,2) karbon ilavesi ile en düşük aşınma hızları elde edilmiştir. Bunun sebebinin oluşan tribofilm tabakasının kalınlaşması olduğu düşünülmektedir. Karbon malzemeler kendi arasında kıyaslandığında ise en iyi sonuçların KNT ve HTC-G kullanımı ile elde edildiği belirlenmiştir. Bunun sebebinin ise, her iki malzemenin de nano boyutlarda partikül morfolojisine sahip olmasından dolayı aşınma testin boyunca oluşan oyukların doldurmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

1. Koraman, E., "Al-Fe-V-Si Alaşımlarının Yüksek Sıcaklık Aşınma zelliklerinin İncelenmesi", PhD Thesis, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2011).
2. Karagöz, Y., "Metallerde Aşınma Yorulması", *İzmir, Mart*, (2004).
3. Bhushan, B., "Modern Tribology Handbook, Two Volume Set", *CRC Press*, (2000).
4. GK, M. S., "Taneleri incelti miş mangan ıslah eliđinin aşınma davranışlarının araştırılması/An Investigation on the wear behaviour of a fine grained by a heat treatment amended manganese steel", (2001).
5. Buckley, D. H., "Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear, and Lubrication", *Elsevier*, (1981).
6. Ferrante, J. and Smith, J. R., "A theory of adhesion at a bimetallic interface: overlap effects", *Surface Science*, 38 (1): 77–92 (1973).
7. Rabinowicz, E. and Tanner, R. I., "Friction and wear of materials", *Journal Of Applied Mechanics*, 33 (2): 479 (1966).
8. Bhushan, B., "Principles and Applications of Tribology", *John Wiley & Sons*, (1999).
9. Keller, D. V., "Adhesion between solid metals", *Wear*, 6 (5): 353–365 (1963).
10. Krupp, H., "Recent results in particle adhesion: UHV measurements, light-modulated adhesion and the effect of adsorbates", *The Journal Of Adhesion*, 4 (1): 83–86 (1972).
11. Israelachvili, J. N., "Intermolecular and Surface Forces", *Academic Press*, (2011).
12. Waterhouse, R. B. and Handbook, A. S. M., "Friction, lubrication and wear technology", *ASM Handbook, Henry, SD (Eds.), 18, ASM International. USA*, 242: (1992).
13. Stout, K. J., King, T. G., and Whitehouse, D. J., "Analytical techniques in surface topography and their application to a running-in experiment", *Wear*, 43 (1): 99–115 (1977).
14. Suh, N. P., "Tribophysics Prentice-Hall", *Englewood Cliffs, NJ*, (1986).
15. Khrushov, M. M., "Resistance of metals to wear by abrasion, as related to hardness", *Proc. Conf. Lubrication And Wear*, 655: (1957).

16. Misra, A. and Finnie, I., "Some observations on two-body abrasive wear", *Wear*, 68 (1): 41–56 (1981).
17. Moore, M. A. and King, F. S., "Abrasive wear of brittle solids", *Wear*, 60 (1): 123–140 (1980).
18. Mulhearn, T. O. and Samuels, L. E., "The abrasion of metals: a model of the process", *Wear*, 5 (6): 478–498 (1962).
19. Rabinowicz, E., "The determination of the compatibility of metals through static friction tests", *ASLE TRANSACTIONS*, 14 (3): 198–205 (1971).
20. Boynueyri, D., "Pvd yöntemi ile ince kaplanmış kesici takımların mikro ölçekli aşınma testi ile aşınma dayanımının belirlenmesi", Master's Thesis, *Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2019).
21. Yust, C. S. and Crouse, R. S., "Melting at particle impact sites during erosion of ceramics", *Wear;(Netherlands)*, 51: (1978).
22. Vijh, A. K., "Resistance of metals to erosion by solid particles in relation to the solid state cohesion of metals", *Wear*, 39 (1): 173–175 (1976).
23. Endo, K. and Goto, H., "Effects of environment on fretting fatigue", *Wear*, 48 (2): 347–367 (1978).
24. McIntyre, N. S., Zetaruk, D. G., and Owen, D., "XPS study of the initial growth of oxide films on Inconel 600 alloy", *Applications Of Surface Science*, 2 (1): 55–73 (1978).
25. Bowden, F. P., Bowden, F. P., and Tabor, D., "The Friction and Lubrication of Solids", *Oxford University Press*, (2001).
26. Kim, D. E. and Suh, N. P., "On microscopic mechanisms of friction and wear", *Wear*, 149 (1–2): 199–208 (1991).
27. KC, L., "Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology", *Ann Arbor: CRC Press, Inc, Boca Raton*, (1996).
28. Stachowiak, G. W. and Batchelor, A. W., "Engineering Tribology", *Butterworth-Heinemann*, (2013).
29. Mitchell, P. C., "Oil-soluble Mo-S compounds as lubricant additives", *Wear*, 100 (1–3): 281–300 (1984).
30. Rapoport, L., Leshchinsky, V., Lapsker, I., Volovik, Y., Nepomnyashchy, O., Lvovsky, M., Popovitz-Biro, R., Feldman, Y., and Tenne, R., "Tribological properties of WS<sub>2</sub> nanoparticles under mixed lubrication", *Wear*, 255 (7–12): 785–793 (2003).

31. Zhou, J., Yang, J., Zhang, Z., Liu, W., and Xue, Q., "Study on the structure and tribological properties of surface-modified Cu nanoparticles", *Materials Research Bulletin*, 34 (9): 1361–1367 (1999).
32. Fan, X., Wang, L., and Xia, Y., "Oil-soluble lithium salts as novel lubricant additives towards improving conductivity and tribological performance of bentone grease", *Lubrication Science*, 27 (6): 359–368 (2015).
33. Lettington, A. H., "Applications of diamond-like carbon thin films", *Thin Film Diamond*, 117–126 (1994).
34. Geim, A. K. and Novoselov, K. S., "The rise of graphene", *Nanoscience and Technology: A Collection of Reviews from Nature Journals*, *World Scientific*, 11–19 (2010).
35. Chen, Y., Zhang, B., Liu, G., Zhuang, X., and Kang, E.-T., "Graphene and its derivatives: switching ON and OFF", *Chemical Society Reviews*, 41 (13): 4688–4707 (2012).
36. Berman, D., Erdemir, A., and Sumant, A. V., "Few layer graphene to reduce wear and friction on sliding steel surfaces", *Carbon*, 54: 454–459 (2013).
37. Berman, D., Erdemir, A., and Sumant, A. V., "Graphene: a new emerging lubricant", *Materials Today*, 17 (1): 31–42 (2014).
38. Bourlon, B., Glattli, D. C., Miko, C., Forró, L., and Bachtold, A., "Carbon nanotube based bearing for rotational motions", *Nano Letters*, 4 (4): 709–712 (2004).
39. Berman, D., Deshmukh, S. A., Sankaranarayanan, S. K., Erdemir, A., and Sumant, A. V., "Extraordinary macroscale wear resistance of one atom thick graphene layer", *Advanced Functional Materials*, 24 (42): 6640–6646 (2014).
40. Fan, X., Xia, Y., Wang, L., and Li, W., "Multilayer graphene as a lubricating additive in bentone grease", *Tribology Letters*, 55 (3): 455–464 (2014).
41. Liu, X., Pu, J., Wang, L., and Xue, Q., "Novel DLC/ionic liquid/graphene nanocomposite coatings towards high-vacuum related space applications", *Journal Of Materials Chemistry A*, 1 (11): 3797–3809 (2013).
42. Zhang, L., Pu, J., Wang, L., and Xue, Q., "Frictional dependence of graphene and carbon nanotube in diamond-like carbon/ionic liquids hybrid films in vacuum", *Carbon*, 80: 734–745 (2014).
43. Simsir, H., Eltugral, N., and Karagoz, S., "Hydrothermal carbonization for the preparation of hydrochars from glucose, cellulose, chitin, chitosan and wood chips via low-temperature and their characterization", *Bioresource Technology*, 246: 82–87 (2017).

44. Simsir, H., Eltugral, N., and Karagoz, S., "Effects of acidic and alkaline metal triflates on the hydrothermal carbonization of glucose and cellulose", *Energy & Fuels*, 33 (8): 7473–7479 (2019).
45. Roman, S., Nabais, J. V., Ledesma, B., González, J. F., Laginhas, C., and Titirici, M. M., "Production of low-cost adsorbents with tunable surface chemistry by conjunction of hydrothermal carbonization and activation processes", *Microporous And Mesoporous Materials*, 165: 127–133 (2013).
46. Simsir, H., Eltugral, N., Frohnhoven, R., Ludwig, T., Gönüllü, Y., Karagoz, S., and Mathur, S., "Anode performance of hydrothermally grown carbon nanostructures and their molybdenum chalcogenides for Li-ion batteries", *MRS Communications*, 8 (2): 610–616 (2018).
47. Titirici, M.-M., White, R. J., Falco, C., and Sevilla, M., "Black perspectives for a green future: hydrothermal carbons for environment protection and energy storage", *Energy & Environmental Science*, 5 (5): 6796–6822 (2012).
48. Xue, Q., Liu, W., and Zhang, Z., "Friction and wear properties of a surface-modified TiO<sub>2</sub> nanoparticle as an additive in liquid paraffin", *Wear*, 213 (1–2): 29–32 (1997).
49. Hu, Z. S., Dong, J. X., Chen, G. X., and He, J. Z., "Preparation and tribological properties of nanoparticle lanthanum borate", *Wear*, 243 (1–2): 43–47 (2000).
50. Narayanunni, V., Kheireddin, B. A., and Akbulut, M., "Influence of surface topography on frictional properties of Cu surfaces under different lubrication conditions: Comparison of dry, base oil, and ZnS nanowire-based lubrication system", *Tribology International*, 44 (12): 1720–1725 (2011).
51. Liss, S. N., Droppo, I. G., Leppard, G. G., and Milligan, T. G., "Flocculation in Natural and Engineered Environmental Systems", *CRC Press*, (2004).
52. Ali, I., Kucherova, A., Memetov, N., Pasko, T., Ovchinnikov, K., Pershin, V., Kuznetsov, D., Galunin, E., Grachev, V., and Tkachev, A., "Advances in carbon nanomaterials as lubricants modifiers", *Journal Of Molecular Liquids*, 279: 251–266 (2019).
53. Morris, D. G., Joye, J. C., and Leboeuf, M., "Hardening and strain-ageing by vacancies and their aggregates in FeAl", *Philosophical Magazine A*, 69 (5): 961–980 (1994).
54. Jhi, S.-H., Louie, S. G., Cohen, M. L., and Ihm, J., "Vacancy hardening and softening in transition metal carbides and nitrides", *Physical Review Letters*, 86 (15): 3348 (2001).
55. Pugno, N. M., "Young's modulus reduction of defective nanotubes", *Applied Physics Letters*, 90 (4): 043106 (2007).

56. Bernholc, J., Brenner, D., Buongiorno Nardelli, M., Meunier, V., and Roland, C., "Mechanical and electrical properties of nanotubes", *Annual Review Of Materials Research*, 32 (1): 347–375 (2002).
57. Min, Y., Akbulut, M., Kristiansen, K., Golan, Y., and Israelachvili, J., "The role of interparticle and external forces in nanoparticle assembly", *Nanoscience And Technology: A Collection of Reviews from Nature Journals*, *World Scientific*, 38–49 (2010).
58. Akbulut, M., Belman, N., Golan, Y., and Israelachvili, J., "Frictional properties of confined nanorods", *Advanced Materials*, 18 (19): 2589–2592 (2006).
59. Deuis, R. L., Subramanian, C., and Yellup, J. M., "Dry sliding wear of aluminium composites—a review", *Composites Science And Technology*, 57 (4): 415–435 (1997).
60. Terry, B. and Jones, G., "Metal matrix composites: current developments and future trends in industrial research and applications", *Elsevier Advanced Technology, Mayfield House, 256 Banbury Rd, Oxford OX 2 7 DH, UK, 1990. 154*, (1990).
61. Charles, D., "Metal matrix composites: ready for take-off?", *Metals And Materials*, 6 (2): 78–82 (1990).
62. Zedalis, M. S., Bryant, J. D., Gilman, P. S., and Das, S. K., "High-temperature discontinuously reinforced aluminum", *JOM*, 43 (8): 29–31 (1991).
63. Sanders, R. N. and Valdo, A. R., "Aluminum-silicon composite", *Google Patents*, (1976).
64. Vaccari, J. A., "Cast aluminum MMCs have arrived", *American Machinist*, 135: 42–46 (1991).
65. Feest, E. A., "EXPLOITATION OF THE METAL MATRIX COMPOSITES CONCEPT.", *Metals Mater.*, 4 (5): 273 (1988).
66. Clarke, J. and Sarkar, A. D., "Wear characteristics of as-cast binary aluminium-silicon alloys", *Wear*, 54 (1): 7–16 (1979).
67. Kanth, V. K., Bai, B. P., and Biswas, S. K., "Wear mechanisms in a hypereutectic aluminium silicon alloy sliding against steel", *Scripta Metallurgica Et Materialia*, 24 (2): 267–271 (1990).
68. Shivanath, R., Sengupta, P. K., and Eyre, T. S., "Wear of aluminum-silicon alloys", *Paper From "Wear Of Materials 1977"*, *ASME, New York. 1977, 120-126.*, (1977).
69. Rządkosz, S., Zych, J., Piękoś, M., Kozana, J., Garbacz-Klempka, A., Kolczyk, J., and Jamrozowicz, \L, "Influence of refining treatments on the properties of Al-Si alloys", *Metalurgija*, 54 (1): 35–38 (2015).

70. Țucureanu, V., Matei, A., and Avram, A. M., "FTIR spectroscopy for carbon family study", *Critical Reviews In Analytical Chemistry*, 46 (6): 502–520 (2016).
71. Zhang, L., Pu, J., Wang, L., and Xue, Q., "Frictional dependence of graphene and carbon nanotube in diamond-like carbon/ionic liquids hybrid films in vacuum", *Carbon*, 80: 734–745 (2014).
72. Liu, X., Pu, J., Wang, L., and Xue, Q., "Novel DLC/ionic liquid/graphene nanocomposite coatings towards high-vacuum related space applications", *Journal Of Materials Chemistry A*, 1 (11): 3797–3809 (2013).
73. Narayanunni, V., Kheireddin, B. A., and Akbulut, M., "Influence of surface topography on frictional properties of Cu surfaces under different lubrication conditions: Comparison of dry, base oil, and ZnS nanowire-based lubrication system", *Tribology International*, 44 (12): 1720–1725 (2011).



## **ÖZGEÇMİŞ**

Zafer ŞAHİN, ilköğretim ve lise eğitimini Üsküdar’da tamamladıktan sonra 2013 yılında Karabük Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği lisans eğitimine başladı ve 2018 yılında onur öğrencisi olarak mezun oldu. 2019 yılında Karabük Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Anabilim Dalında Yüksek Lisansa başladı. Şu anda bir döküm fabrikasında Kalite ve Kontrol Mühendisi olarak çalışmaktadır.