



**METALİK MALZEMELERİN MİKRO VE İKİ
BOYUTLU NANO PARTİKÜL ORTAMLARINDAKİ
AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**2024
DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

Muhammed Salih GÜL

**Tez Danışmanları
Prof. Dr. Refik POLAT
Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN**

**METALİK MALZEMELERİN MİKRO VE İKİ BOYUTLU NANO
PARTİKÜL ORTAMLARINDAKİ AŞINMA DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

Muhammed Salih GÜL

**Tez Danışmanları
Prof. Dr. Refik POLAT
Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN**

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Şubat 2024**

Muhammed Salih GÜL tarafından hazırlanan “METALİK MALZEMELERİN MİKRO VE İKİ BOYUTLU NANO PARTİKÜL ORTAMLARINDAKİ AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Refik POLAT
Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN
2. Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 02/02/2024

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu) İmzası

Başkan : Doç. Dr. Safa POLAT (KBÜ)

Üye : Prof. Dr. Refik POLAT (KTMÜ)

Üye : Doç. Dr. Recep DEMİRSÖZ (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Fuat KARTAL (KÜ)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Emin ÇETİN (NEÜ)

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

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN
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.”

Muhammed Salih GÜL

ÖZET

Doktora Tezi

METALİK MALZEMELERİN MİKRO VE İKİ BOYUTLU NANO PARTİKÜL ORTAMLARINDAKİ AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Muhammed Salih GÜL

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanları:

Prof. Dr. Refik POLAT

Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN

Şubat 2024, 165 sayfa

Çelik, alüminyum ve magnezyum gibi ticari olarak kullanılan metalik malzemeler, otomotiv endüstrisinden inşaat, elektronikten havacılığa kadar geniş bir yelpazede uygulama alanlarına sahiptir. Ancak, bu malzemelerin birçoğu günlük kullanımda sürekli olarak erozif, abrasif ve adhezif aşınmaya maruz kalırlar. Bu tez çalışmasında ise bahsi geçen metalik malzemelerin mikro ve nano partikül ortamlardaki aşınma davranışlarının iki bölümde incelenmesi amaçlanmıştır. Mikro partikül aşınma deneyleri için sulu erozif ortam, nano partikül ortamı aşınma deneyleri için ise nano partikül katkılı motor yağı (MY) ortamı belirlenmiştir.

Çalışmanın ilk bölümünde, AISI 1015 ve AISI 304 çeliklerinin özel tasarlanmış aşınma düzeneğinde, deney tasarım parametreleri Taguchi kesirli faktöriyel

yönteminin L9 ortogonal matrisine göre belirlenen, üç seviyeli konsantrasyon oranında (%5, %15, %25), üç seviyeli çarpma hızında (265, 397,5, 530 rpm) ve üç seviyeli çarpma açısında (30°, 60°, 90°) erozif aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerin ardından her bir numunenin aşınma oranları, ağırlık kaybı ve yüzey pürüzlülüğü alınarak değerlendirilirken, deney parametrelerinin aşınma yüzeylerindeki etkileri ise SEM ve 3D topografya analizleri ile incelenmiştir. Bu sonuçlar aynı zamanda sinyal/gürültü (S/N) ve varyans analizi (ANOVA) kullanılarak istatistiki olarak da analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre AISI 304 malzemesinin, yüzey pürüzlülüğü ve ağırlık kaybı sonuçları esas alındığında en iyi aşınma direnci gösterdiği tespit edilmiştir. S/N grafiğine göre ise optimum konsantrasyon, çarpma açısı ve hızı sırasıyla %5, 90° ve 265 rpm olarak bulunmuştur. Yüzey pürüzlülüğü değerini etkileyen temel faktör konsantrasyon parametresi iken, ağırlık kaybını etkileyen temel faktör ise çarpma hızı olarak tespit edilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde ise AISI 1015 çeliği, MgZn ve AlSi alaşımlarının saf ve nano partikül katkılı motor yağı (MY) ortamlarındaki aşınma davranışları incelenmiştir. Katkı maddesi olarak 25 mg ve 50 mg olmak üzere ayrı ayrı demir oksit (Fe_2O_3), MXene ($Ti_3C_2T_x$) ve grafitik karbon nitrür ($g-C_3N_4$) bileşenleri kullanılmıştır. Aşınma testleri, ileri geri ball-on-flat yöntemi ile 100 m yol, 10 mm stroke mesafesi, 5 Hz frekans ve 20 N yük altında gerçekleştirilmiştir. Her bir testin ardından aşınma izleri 2D profilometre ile ölçülerek aşınma hacim kayıpları belirlenmiş ve aynı zamanda aşınma test cihazından alınan verilere göre sürtünme katsayısı değerleri ölçülmüştür. Aşınma testleri esnasında numunelere termokupl bağlanarak ortam ısısı da ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre bu partiküllerin, çelik ve magnezyum alaşımında aşınma kaybını sırasıyla yaklaşık %30 ve %50 oranında iyileştirdiği, alüminyum alaşımında ise yaklaşık %20 oranında olumsuz etkilediği tespit edilmiştir. Sürtünme katsayısı bakımından ise yine çelik ve magnezyum için %25 ve %20 civarında düşüş gözlenirken, alüminyum numunede ise yaklaşık %10 oranında artış gözlenmiştir. En iyi aşınma sonuçlarının (sürtünme katsayısı, hacimsel kayıp, aşınma izi alanı, sıcaklık artışı) 25 mg katkılı nano partikül ortamlar olduğu belirlenmiştir. Kullanılan nano partiküller arasında aşınma direncini arttıran en iyi nano partikül MXene olarak tespit edilmiştir. Bu partikülün aynı zamanda ortam sıcaklığını da yaklaşık %5 oranında düşürerek önemli bir katkı sağladığı belirlenmiştir.

Sonuç olarak elde edilen bulgular, nano partiküllerin geometrik şekli, etkileşime girdiği bileşenlerin türü ve kimyasal bileşimi açısından literatürdeki bilgilerle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Anahtar Sözcükler : Nano partiküller, Mikro partiküller, Taguchi, Tribolojik performans, Nano demir oksit, MXene, Grafitik karbon nitrür.

Bilim Kodu : 91529



ABSTRACT

Ph. D. Thesis

INVESTIGATION OF WEAR BEHAVIORS OF METALLIC MATERIALS IN MICRO AND TWO DIMENSIONAL NANO PARTICLES ENVIRONMENT

Muhammed Salih GÜL

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisors:

Prof. Dr. Refik POLAT

Assoc. Prof. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN

February 2024, 165 pages

The metallic materials, commercially utilized such as steel, aluminum, and magnesium, have a wide range of applications spanning from the automotive industry to construction, electronics, and aviation. However, many of these materials are constantly subjected to erosive, abrasive and adhesive wear in daily use. In this thesis study, it is aimed to examine the wear behaviour of the mentioned metallic materials in micro and nano particle environments in two sections. Slurry erosive environment for micro particle wear experiments, and nano particle added engine oil (MY) environment was determined for nano particle wear experiments.

In the first part of the study, erosion wear experiments were conducted on AISI 1015 and AISI 304 steels in a specially designed wear pot tester. The experimental design

parameters were determined according to the Taguchi fractional factorial method's L9 orthogonal matrix, including three levels of concentration ratio (5%, 15%, 25%), three levels of impingement velocity (265, 397.5, 530 rpm), and three levels of impingement angle (30°, 60°, 90°). After the experiments, the wear rates, weight loss, and surface roughness of each sample were evaluated. The effects of experimental parameters on the wear surfaces were examined through SEM and 3D topography analyses. These results were also statistically analyzed using signal-to-noise (S/N) and analysis of variance (ANOVA) methods. According to the results, AISI 304 material exhibited the best wear resistance when considering surface roughness and weight loss results. According to the S/N graph, the optimum concentration, impact angle and impact velocity were found to be 5%, 90° and 265 rpm, respectively. While the main factor affecting the surface roughness value is the concentration parameter, the main factor affecting the weight loss was determined to be the impact velocity.

In the second part of the study, the wear behaviour of AISI 1015 steel, MgZn and AlSi alloys in pure and nano particle added engine oil (MY) environments was examined. As additives, 25 mg and 50 mg of iron oxide (Fe_2O_3), MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$) and graphitic carbon nitride (g- C_3N_4) components were used separately. Wear tests were carried out with the reciprocating ball-on-flat method under 100 m distance, 10 mm stroke distance, 5 Hz frequency, and 20 N load. After each test, wear scars were measured with a 2D profilometer, wear volume losses were determined, and friction coefficient values were measured according to the data received from the wear test device. Ambient temperature during wear tests was measured by attaching thermocouples to the samples. According to the results obtained, it was determined that these particles improved the wear loss in steel and magnesium alloys by approximately 30% and 50%, respectively, while they negatively affected the wear loss in aluminum alloy by approximately 20%. In terms of friction coefficient, a decrease of about 25% and 20% was observed for steel and magnesium, respectively, while an increase of about 10% was observed for aluminum samples. The best wear results (friction coefficient, volume loss, wear scar area, temperature increase) were determined to be in environments with 25 mg nano particle additives. Among the used nano particles, MXene was identified as the best nano particle that increased wear resistance.

Additionally, this particle was found to contribute significantly by reducing the ambient temperature by approximately 5%.

The findings obtained as a result were evaluated by comparing them with the information in the literature in terms of the geometric shape of the nano particles, the type of components they interact with and their chemical composition.

Key Word : Nano particles, Micro particles, Taguchi, Tribological performance, Nano iron oxide, MXene, Graphitic carbon nitride.

Science Code : 91529

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocalarım Prof. Dr. Refik POLAT ve Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Gerçekleştirilen deneyler esnasında yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Recep DEMİRSÖZ'e, tezimin şekillenmesinde ve nano partiküllerin üretimlerinde destek olan Doç. Dr. Safa POLAT'a, deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesinde yardımcı olan tüm MARGEM laboratuvarı çalışanlarına, bilgisi, desteği ve fikirleriyle yol gösteren mesai arkadaşım Dr. Öğr. Üyesi Sena KABAVE KILINÇARSLAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince maddi ve manevi desteğini her zaman hissettiğim sevgili Eşime, bu günlere gelmemde büyük emekleri olan sevgili annem ve babama tüm kalbimle teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinatörlüğü tarafından KBÜBAP-23-DS-116 proje numarası ile desteklendiğinden KBÜ BAP birimine teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vii
TEŞEKKÜR.....	x
İÇİNDEKİLER	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xx
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
1.1. LİTERATÜR TARAMASI.....	4
BÖLÜM 2	16
TRİBOLOJİ	16
2.1. SÜRTÜNME.....	17
2.2. AŞINMA	19
2.3. AŞINMA MEKANİZMALARİ.....	21
2.3.1. Abrasif Aşınma.....	21
2.3.2. Adhezif Aşınma.....	22
2.3.3. Eroziv Aşınma.....	23
2.4. AŞINMAYA ETKİ EDEN FAKTÖRLER	23
2.3. YAĞLAYICI BİLEŞENLER.....	24
2.3.1. Yağ Katışıkları.....	25
2.3.1.1. Korozyon Önleyiciler.....	26
2.3.1.2. Köpük Önleyiciler.....	26
2.3.1.3. Aşırı Basınç Katkıları.....	26
2.3.1.4. Nano Partikül Katkıları	26

BÖLÜM 3	28
NANO PARTİKÜLLER.....	28
3.1. NANO PARTİKÜL ÜRETİM YÖNTEMİ VE KARAKTERİZASYONU ..	29
3.2. 2D DEMİR OKSİT NANO PLAKALAR.....	31
3.3. 2D MXENE NANO PLAKALAR	32
3.4. 2D GRAFİTİK KARBON NİTRÜR NANO PLAKALAR.....	34
 BÖLÜM 4	 35
MATERYAL VE METOT	35
4.1. EROZİF ORTAM AŞINMA DENEYLERİ	35
4.1.1. Aşındırıcı Ortam ve Aşındırıcı Parçacıkların Hazırlanması	37
4.1.2. Malzemelerin Seçimi ve Hazırlanması	39
4.1.3. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi.....	41
4.1.4. Erozif Aşınma Deney Düzeneği	42
4.1.5. Erozif Aşınma Deneylerinin Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi.....	44
4.1.6. Mikroyapı Analizleri	47
4.1.7. Yüzey Pürüzlülüğü ve 3D Topografya Analizleri	48
4.2. İKİ BOYUTLU NANO PARTİKÜL ORTAMINDA AŞINMA DENEYLERİ	48
4.2.1. Nano Partiküllerin Seçimi ve Hazırlanması	49
4.2.1.1. İki Boyutlu Demir Oksit Nano Partikül Sentezi	50
4.2.1.2. İki Boyutlu MXene Sentezi	51
4.2.1.3. İki Boyutlu g-C ₃ N ₄ Sentezi	52
4.2.2. Nano Partiküllerin Karakterizasyon İşlemleri	54
4.2.3. Aşınma Deneylerinde Kullanılan Yağlayıcıların Hazırlanması	57
4.2.4. Nano Partikül Ortamı Aşınma Deneyleri ve Parametreleri	59
 BÖLÜM 5	 63
BULGULAR VE TARTIŞMA	63
5.1. EROZİF ORTAM AŞINMA DENEYLERİ	63
5.1.1. Aşındırıcı Partiküllerin Erozif Aşınma Sonrası Değerlendirilmesi	63
5.1.2. Sertlik Deneyi Sonuçları.....	64

	<u>Sayfa</u>
5.1.3. AISI 1015 Eroziyon Aşınma Deneyi Sonuçları	65
5.1.4. AISI 304 Eroziyon Aşınma Deneyi Sonuçları	76
5.1.5. AISI 1015 ve AISI 304 Malzemelerinin Kıyaslanması ve Tartışma	87
5.2. İKİ BOYUTLU NANO PARTİKÜL ORTAMI AŞINMA DENEYLERİ	90
5.2.1. Nano Partiküllerin Karakterizasyonu	91
5.2.1.1. XRD Analizleri	91
5.2.1.2. Mikroyapı Analizleri.....	93
5.2.2. Deney Numunelerinin Sertlik Sonuçları.....	95
5.2.3. Aşınma Deneyi Sonuçları	95
5.2.3.1. AISI 1015 Numunesi Aşınma Deneyi Sonuçları	98
5.2.3.2. MgZn Master Alaşımı Numunesi Aşınma Deneyi Sonuçları	111
5.2.3.3. AlSi18 Alaşımı Numunesi Aşınma Deneyi Sonuçları.....	125
5.2.4. Aşınma Deneyi Sonuçlarının Genel Olarak Değerlendirilmesi.....	137
 BÖLÜM 6	 141
SONUÇLAR	141
6.1. EROZİYON ORTAM AŞINMA DENEYLERİ SONUCU	142
6.2. İKİ BOYUTLU NANO PARTİKÜL ORTAMI AŞINMA DENEYLERİ SONUCU.....	143
KAYNAKLAR	145
 ÖZGEÇMİŞ	 165

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Tribolojik bir sistemin şematik gösterimi.	16
Şekil 2.2.	Sürtünme çeşitleri. a) kayma sürtünmesi, b) kayma-yuvarlanma Sürtünmesi.	18
Şekil 2.3.	Sürtünme çeşitleri. a) kuru Sürtünme, b) yarı-sıvı sürtünme c) sıvı sürtünme [108].	19
Şekil 2.4.	Aşınma-zaman ilişkisi.	20
Şekil 2.5.	Sürtünme katsayısı-hız ilişkisi (Stribeck eğrisi).	21
Şekil 2.6.	Abrasif aşınma.	22
Şekil 2.7.	Adhezif aşınma.	22
Şekil 3.1.	Nano partikül üretim yöntemleri.	29
Şekil 3.2.	Demir oksit nano plaka SEM görüntüsü [150].	32
Şekil 3.3.	MXene nano partikülü SEM görüntüsü [162].	33
Şekil 3.4.	g-C ₃ N ₄ nano partikülü SEM görüntüsü [174].	34
Şekil 4.1.	Erozif aşınma deney setinin metodolojisi.	37
Şekil 4.2.	Aşınma deneylerinde kullanılan aşındırıcı tozların boyutlarına ve geometrilerine ilişkin SEM görüntüleri. a) 100x yakınlaştırma oranında eleme öncesi parçacık boyutları, b) 250x yakınlaştırma oranında eleme öncesi parçacık boyutları, c) 100x yakınlaştırma oranında eleme sonrası parçacık boyutları, d) 250x yakınlaştırma oranında eleme sonrası parçacık boyutları.	39
Şekil 4.3.	30 x 6 x 5 mm boyutlarında hazırlanan deney numunesine ait görüntü.	40
Şekil 4.4.	Numunelerin parlatma işlemlerinde kullanılan parlatma cihazı.	41
Şekil 4.5.	Hassas terazi.	41
Şekil 4.6.	Mikro sertlik ölçme cihazı.	42
Şekil 4.7.	Erozif aşınma tezgahı [1].	43
Şekil 4.8.	Erozif aşınma tezgahı üç boyutlu model görüntüsü [1].	44
Şekil 4.9.	Deneysel kurulum ve aşamaları.	47
Şekil 4.10.	SEM cihazı.	48
Şekil 4.11.	Nano partikül ortamındaki aşınma deneylerinin metodolojisi.	49
Şekil 4.12.	Aşınma deneylerinde kullanılan numuneler.	50

Şekil 4.14.	MXene üretim aşamaları. a) MAX fazının elde edilmesi, b) HF sıvısı ile MAX fazının manyetik karıştırıcıda karıştırılması, c) elde edilen çözeltinin pH derecesinin düşürülmesi için saf su ile karıştırılması, d) pH derecesi düşürülen nano partiküllerin çökelme işlemi için beklenilmesi.	52
Şekil 4.15.	g-C ₃ N ₄ nano partikülü elde edilmesi. a) melamin tozunun hazırlanması, b) melamin tozu ısıtma işlemi sonrası elde edilen partiküller, c) öğütme işlemi sonrası kullanıma hazır hale gelen nano partiküller.....	53
Şekil 4.16.	Üretilen nano partiküller. a) MXene nano partikülü, b) g-C ₃ N ₄ nano partikülü, c) Fe ₂ O ₃ nano partikülü.	53
Şekil 4.17.	Nano partikül üretim yöntemleri.....	54
Şekil 4.18.	XRD cihazı.	55
Şekil 4.19.	Hassas kesme cihazı.....	55
Şekil 4.20.	Makro sertlik ölçüm cihazı.	56
Şekil 4.21.	Ultrasonik banyo/temizleyici.	57
Şekil 4.22.	Aşınma deneylerinde kullanılan yağlayıcılar.	59
Şekil 4.23.	Aşınma cihazı.	59
Şekil 4.24.	Ball-on-flat aşınma deneyleri şematik görüntüsü.	60
Şekil 4.25.	Aşınma deney düzeneği.	61
Şekil 5.1.	Aşındırıcı partiküllerin SEM görüntüleri. a) elenmiş SiO ₂ partiküllerinin 100x büyütmede alınan görüntüsü, b) elenmiş SiO ₂ partiküllerinin 250x büyütmede alınan görüntüsü, c) aşınma sonrası SiO ₂ partiküllerinin 100x büyütmede alınan görüntüsü, d) aşınma sonrası SiO ₂ partiküllerinin 250x büyütmede alınan görüntüsü.	64
Şekil 5.2.	AISI 1015 malzemesi için gerçekleştirilen S/N analizi sonuçları. a) konsantrasyon, b) çarpma hızı, c) çarpma açısı.	67
Şekil 5.3.	AISI 1015 malzemesi için S/N analizi sonrası en iyi aşınma koşullarında elde edilen SEM ve EDX görüntüleri. a) 2kx yakınlaştırma oranında alınan görüntü, b) 4kx yakınlaştırma oranında alınan görüntü, c) en iyi aşınma koşulu için EDX görüntüsü.	71
Şekil 5.4.	AISI 1015 malzemesi için S/N analizi sonrası orta aşınma koşullarında elde edilen SEM ve EDX görüntüleri. a) 2kx yakınlaştırma oranında alınan görüntü, b) 4kx yakınlaştırma oranında alınan görüntü, c) en iyi aşınma koşulu için EDX görüntüsü.	72
Şekil 5.5.	AISI 1015 malzemesi için S/N analizi sonrası en kötü aşınma koşullarında elde edilen SEM ve EDX görüntüleri. a) 2kx yakınlaştırma oranında alınan görüntü, b) 4kx yakınlaştırma oranında alınan görüntü, c) en iyi aşınma koşulu için EDX görüntüsü.	73

Şekil 5.6.	AISI 1015 malzemesi için S/N analizi sonrası belirlenen parametrelere göre elde edilen 3D Topografya görüntüleri. a) en iyi aşınma koşulları, b) orta aşınma koşulları, c) en kötü aşınma koşulları.	75
Şekil 5.7.	AISI 304 malzemesi için gerçekleştirilen S/N analizi sonuçları. a) konsantrasyon, b) çarpma hızı, c) çarpma açısı.	78
Şekil 5.8.	AISI 304 malzemesi için S/N analizi sonrası en iyi aşınma koşullarında elde edilen SEM ve EDX görüntüleri. a) 2kx yakınlaştırma oranında alınan görüntü, b) 4kx yakınlaştırma oranında alınan görüntü, c) en iyi aşınma koşulu için EDX görüntüsü.	82
Şekil 5.9.	AISI 304 malzemesi için S/N analizi sonrası orta aşınma koşullarında elde edilen SEM ve EDX görüntüleri. a) 2kx yakınlaştırma oranında alınan görüntü, b) 4kx yakınlaştırma oranında alınan görüntü, c) en iyi aşınma koşulu için EDX görüntüsü.	83
Şekil 5.10.	AISI 304 malzemesi için S/N analizi sonrası en kötü aşınma koşullarında elde edilen SEM ve EDX görüntüleri. a) 2kx yakınlaştırma oranında alınan görüntü, b) 4kx yakınlaştırma oranında alınan görüntü, c) en iyi aşınma koşulu için EDX görüntüsü.	84
Şekil 5.11.	AISI 304 malzemesi için S/N analizi sonrası belirlenen parametrelere göre elde edilen 3D Topografya görüntüleri. a) en iyi aşınma koşulları, b) orta aşınma koşulları, c) en kötü aşınma koşulları.	86
Şekil 5.12.	Aşındırıcı parçacıkların oluşturduğu mikro kesme etkisi. a) pürüzlülük tepeleri boyunca erozif aşınma mekanizması, b) sert aşındırıcı parçacıkların oluşturduğu mikro kesme etkisi.	87
Şekil 5.13.	Fe ₂ O ₃ XRD analizi.	91
Şekil 5.14.	MXene XRD analizi.	92
Şekil 5.15.	g-C ₃ N ₄ XRD analizi.	93
Şekil 5.16.	Fe ₂ O ₃ nano partikülünün 5kx büyütmedeki SEM görüntüsü.	94
Şekil 5.17.	MXene nano partikülünün 5kx büyütmedeki SEM görüntüsü.	94
Şekil 5.18.	g-C ₃ N ₄ nano partikülünün 5kx SEM görüntüsü.	95
Şekil 5.19.	AISI 1015 numunesinin çeşitli nano partikül ortamlarındaki sürtünme katsayısı verileri sütun grafiği.	99
Şekil 5.20.	AISI 1015 sürtünme katsayısı verileri. a) farklı konsantrasyondaki Fe ₂ O ₃ sürtünme katsayısı grafiği, b) farklı konsantrasyondaki MXene sürtünme katsayısı grafiği, c) farklı konsantrasyondaki g-C ₃ N ₄ sürtünme katsayısı grafiği.	100
Şekil 5.21.	AISI 1015 profilometre ölçüm verileri. a) farklı konsantrasyondaki Fe ₂ O ₃ profilometre verisi, b) farklı konsantrasyondaki MXene profilometre verisi, c) farklı konsantrasyondaki g-C ₃ N ₄ profilometre verisi.	102
Şekil 5.22.	AISI 1015 numunesinin çeşitli nano partikül ortamlarındaki hacim kaybı verileri.	103

Şekil 5.23.	AISI 1015 numunesinin Fe_2O_3 ortamındaki aşınma deneylerinde oluşan sıcaklık değişimi grafiği.....	104
Şekil 5.24.	AISI 1015 numunesinin MXene ortamındaki aşınma deneylerinde oluşan sıcaklık değişimi grafiği.....	104
Şekil 5.25.	AISI 1015 numunesinin g- C_3N_4 ortamındaki aşınma deneylerinde oluşan sıcaklık değişimi grafiği.....	105
Şekil 5.26.	AISI 1015 aşınma izlerinin makro boyuttaki SEM görüntüleri. a) 50 ml MY, b) 50 ml MY + 25 mg Fe_2O_3 , c) 50 ml MY + 50 mg Fe_2O_3 , d) 50 ml MY + 25 mg MXene, e) 50 ml MY + 50 mg MXene, f) 50 ml MY + 25 mg g- C_3N_4 , g) 50 ml MY + 50 mg g- C_3N_4	106
Şekil 5.27.	AISI 1015 numunesinin MY ve Fe_2O_3 ortamlarındaki SEM görüntüleri.	108
Şekil 5.28.	AISI 1015 numunesinin MXene ortamındaki SEM görüntüleri.....	109
Şekil 5.29.	AISI 1015 numunesinin MXene ortamındaki map görüntüsü.....	110
Şekil 5.30.	AISI 1015 numunesinin g- C_3N_4 ortamındaki SEM görüntüleri.	111
Şekil 5.31.	AISI 1015 numunesinin g- C_3N_4 ortamındaki EDX harita görüntüsü.	111
Şekil 5.32.	MgZn Master alaşımının çeşitli nano partikül ortamlarındaki sürtünme katsayısı verileri sütun grafiği.....	113
Şekil 5.33.	MgZn Master alaşımı sürtünme katsayısı verileri. a) farklı konsantrasyondaki Fe_2O_3 sürtünme katsayısı grafiği, b) farklı konsantrasyondaki MXene sürtünme katsayısı grafiği, c) farklı konsantrasyondaki g- C_3N_4 sürtünme katsayısı grafiği.	114
Şekil 5.34.	MgZn Master profilometre ölçüm verileri. a) farklı konsantrasyondaki Fe_2O_3 profilometre verisi, b) farklı konsantrasyondaki MXene profilometre verisi, c) farklı konsantrasyondaki g- C_3N_4 profilometre verisi.....	116
Şekil 5.35.	MgZn Master alaşımının çeşitli nano partikül ortamlarındaki hacim kaybı verileri.	117
Şekil 5.36.	MgZn Master alaşımının Fe_2O_3 ortamındaki aşınma deneylerinde oluşan sıcaklık değişimi grafiği.....	118
Şekil 5.37.	MgZn Master alaşımının MXene ortamındaki aşınma deneylerinde oluşan sıcaklık değişimi grafiği.	119
Şekil 5.38.	MgZn Master alaşımının g- C_3N_4 ortamındaki aşınma deneylerinde oluşan sıcaklık değişimi grafiği.	119
Şekil 5.39.	MgZn aşınma izlerinin makro boyuttaki SEM görüntüleri. a) 50 ml MY, b) 50 ml MY + 25 mg Fe_2O_3 , c) 50 ml MY + 50 mg Fe_2O_3 , d) 50 ml MY + 25 mg MXene, e) 50 ml MY + 50 mg MXene, f) 50 ml MY + 25 mg g- C_3N_4 , g) 50 ml MY + 50 mg g- C_3N_4	121
Şekil 5.40.	MgZn alaşımının MY ve Fe_2O_3 ortamlarındaki SEM görüntüleri.	123
Şekil 5.41.	MgZn alaşımının MXene ortamındaki SEM görüntüleri.	124

Şekil 5.42.	MgZn alaşımının g-C ₃ N ₄ ortamındaki SEM görüntüleri.....	125
Şekil 5.43.	AlSi alaşımının farklı nano partikül ortamlarındaki sürtünme katsayısı verileri sütun grafiği.....	126
Şekil 5.44.	AlSi alaşımının sürtünme katsayısı verileri. a) farklı konsantrasyondaki Fe ₂ O ₃ sürtünme katsayısı grafiği, b) farklı konsantrasyondaki MXene sürtünme katsayısı grafiği, c) farklı konsantrasyondaki g-C ₃ N ₄ sürtünme katsayısı grafiği.....	127
Şekil 5.45.	AlSi profilometre ölçüm verileri. a) farklı konsantrasyondaki Fe ₂ O ₃ profilometre verisi, b) farklı konsantrasyondaki MXene profilometre verisi, c) farklı konsantrasyondaki g-C ₃ N ₄ profilometre verisi.	129
Şekil 5.46.	AlSi alaşımının çeşitli nano partikül ortamlarındaki hacim kaybı verileri.	130
Şekil 5.47.	AlSi alaşımının Fe ₂ O ₃ ortamındaki aşınma deneylerinde oluşan sıcaklık değişimi grafiği.	131
Şekil 5.48.	AlSi alaşımının MXene ortamındaki aşınma deneylerinde oluşan sıcaklık değişimi grafiği.	132
Şekil 5.49.	AlSi alaşımının g-C ₃ N ₄ ortamındaki aşınma deneylerinde oluşan sıcaklık değişimi grafiği.	132
Şekil 5.50.	AlSi aşınma izlerinin makro boyuttaki SEM görüntüleri. a) 50 ml MY, b) 50 ml MY + 25 mg Fe ₂ O ₃ , c) 50 ml MY + 50 mg Fe ₂ O ₃ , d) 50 ml MY + 25 mg MXene, e) 50 ml MY + 50 mg MXene, f) 50 ml MY + 25 mg g-C ₃ N ₄ , g) 50 ml MY + 50 mg g-C ₃ N ₄	134
Şekil 5.51.	AlSi numunesinin MY ve Fe ₂ O ₃ ortamlarındaki SEM görüntüleri. ...	135
Şekil 5.52.	AlSi numunesinin MXene ortamındaki SEM görüntüleri.	136
Şekil 5.53.	AlSi numunesinin g-C ₃ N ₄ ortamındaki SEM görüntüleri.....	137
Şekil 5.54.	Al-Si alaşımlarındaki (yumuşak matrisli) ultra hafif aşınma mekanizmalarının şematik gösterimi. a) aşınmadan önce aşındırılmış bir yüzey üzerinde h yüksekliğine sahip bir silisyum parçacığının kesit görünümü, b) parçacıkların batması [229].	139

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 1.1. İki boyutlu malzemelerin triboloji alanında kullanımlarına ilişkin mevcut literatür incelemelerinin özeti.	8
Çizelge 1.2. İki boyutlu nano partikül ortamı aşınma deneyleri sonuçları.	13
Çizelge 4.1. ASTM 11:82 standardına göre yapılan eleme işleminde kullanılan aşındırıcı partiküllerin boyutsal dağılımı.	38
Çizelge 4.2. Çalışma kapsamında kullanılan numunelerin kimyasal kompozisyonları.	40
Çizelge 4.3. Eroziyon aşınma parametreleri.	45
Çizelge 4.4. Taguchi L9 ortogonal matrisi deney tasarımı.	46
Çizelge 4.5. AISI 304 numunesi için doğrulama deney tasarımı.	46
Çizelge 4.6. AISI 1015 numunesi için doğrulama deney tasarımı.	46
Çizelge 4.7. Kullanılan motor yağının katalog değerleri.	57
Çizelge 4.8. Hazırlanan aşınma ortamları.	58
Çizelge 4.9. Aşındırıcı bilyanın mekanik özellikleri.	60
Çizelge 4.10. Aşınma deney parametreleri.	62
Çizelge 5.1. AISI 1015 malzemesi için L9 ortogonal matrisine göre gerçekleştirilen deney tasarımı ve sonuçları.	66
Çizelge 5.2. AISI 1015 malzemesi için S/N analizi sonucunda elde edilen aşınma parametrelerine göre deney sonuçları.	68
Çizelge 5.3. AISI 1015 malzemesi yüzey pürüzlülüğü ANOVA sonuçları.	69
Çizelge 5.4. AISI 1015 malzemesi ağırlık kaybı ANOVA sonuçları.	69
Çizelge 5.5. AISI 304 malzemesi için L9 ortogonal matrisine göre gerçekleştirilen deney tasarımı ve sonuçları.	77
Çizelge 5.6. AISI 304 malzemesi için S/N analizi sonucunda elde edilen aşınma parametrelerine göre deney sonuçları.	78
Çizelge 5.7. AISI 304 malzemesi yüzey pürüzlülüğü ANOVA sonuçları.	79
Çizelge 5.8. AISI 304 malzemesi ağırlık kaybı ANOVA sonuçları.	79
Çizelge 5.9. Malzemelerin kıyaslanması.	90
Çizelge 5.10. Numunelerin sertlik ölçüm sonuçları.	95
Çizelge 5.11. AISI 1015 malzemesinin aşınma deney sonuçları.	96
Çizelge 5.12. MgZn Master alaşımının aşınma deney sonuçları.	97
Çizelge 5.13. AlSi18 alaşımının aşınma deney sonuçları.	97

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

SiO ₂	: Silisyum oksit
Fe ₂ O ₃	: Demir oksit
g-C ₃ N ₄	: Grafitik karbon nitrür
Cr	: Krom
Ni	: Nikel
C	: Karbon
Si	: Silisyum
Al	: Alüminyum
Mg	: Magnezyum
Cu	: Bakır
Ag	: Gümüş
Au	: Altın
Mo	: Molibden
CuO	: Bakır oksit
MgZn	: Magnezyum çinko alaşımı
AlSi	: Alüminyum silisyum alaşımı
Ti ₃ C ₂	: Titanyum karbür
MoS ₂	: Molibden disülfid
h-BN	: Altıgen bor nitrür
µm	: Mikrometre
N	: Newton
rpm	: Dakikadaki devir sayısı
dk	: Dakika
sn	: Saniye
gr	: Gram
mm	: Milimetre

mg	: Miligram
kW	: Kilowatt
mA	: Mili amper
kV	: Kilo volt
Hz	: Hertz
HBW	: Brinell sertlik birimi
HV	: Vickers sertlik birimi
HRC	: Rockwell sertlik birimi
Ra	: Yüzey pürüzlülüğü
R-sq	: Regresyon katsayısı
R-sq(adj)	: Düzeltilmiş regresyon katsayısı
P:	: İstatistiksel anlam
F	: İstatistiksel test oranı

KISALTMALAR

AISI : American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)

ASTM: American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu)

MY : Motor Yağı

2D : 2 Boyutlu

3D : 3 Boyutlu

EDS : Enerji Dağılım Spektroskopisi

XRF : X Işını Floresans spektrometresi

SS : Kareler Toplamı

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Mühendislik biliminde metalik malzemeler önemli oranda yer almaktadır. Mühendislik uygulamalarında; otomotiv sanayinde ve endüstriyel alanlarda kullanılan ekipmanların aşınmaları karşılaşılan büyük problemlerden biridir [1–4]. Çalışma koşulları nedeniyle aşınan malzemelerin, aşınma mekanizmalarının belirlenmesi, bu bileşenlerin servis ömürleri için oldukça önemlidir. Mühendislik malzemelerinde aşınmaya maruz kalan bileşenlerin uğradıkları hasarları azaltmak için önemli çalışmalar gerçekleştirilmektedir [1,2,4].

Bu tez çalışmasında, aşınma ortamlarında mikro ve nano partikül etkileriyle meydana gelen aşınma hasarlarını incelemek ve iyileştirmek amacıyla iki farklı deney seti belirlenmiştir. İlk bölümde, mikro partiküllerin etkisinin incelenmesi için erozif aşınma deney seti oluşturulmuş, mikro partikül olarak silika tozu (SiO_2) kullanılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde ise nano partikül etkisi ball-on-flat aşınma tezgahında, motor yağı (MY) ortamına, sentezlenerek katkı olarak eklenen Fe_2O_3 , MXene ve $\text{g-C}_3\text{N}_4$ nano partikülleriyle incelenmiştir.

Mikro ortamda gerçekleşen aşınma türleri genel olarak erozif aşınma ortamında meydana gelmektedir. Erozif aşınma, yüksek hızlı sıvı veya katı parçacıkların malzeme yüzeyine çarpması nedeniyle malzemenin bozulması olarak adlandırılmaktadır [5–10]. Bu aşınma mekanizmasında, malzeme yüzeyi ile temas eden akışkanlar kavitasyona ve darbe erozyonuna, akışkan içindeki katı parçacıklar ise çamur erozyonuna neden olmaktadır [6,8,9,11]. Buhar kazanları, sondaj ekipmanları, borular, türbinler ve pompalar çalışma sırasında erozif aşınmaya maruz kalmaktadırlar [11–13].

Tez çalışmasının ikinci bölümünde nano partikül ortamındaki aşınma davranışları incelenmiştir. Erozif ve abrasif aşınma mekanizmalarına maruz kalan makine ve motor parçalarının aşınmalarının önlenmesi amacıyla sayısız çalışmalar yürütülmüş olup günümüzde hala bu konu hakkında araştırmalar devam etmektedir. Mekanik alanlarda meydana gelen enerji kayıplarının çok büyük bir kısmı motor bileşenlerinde bulunan hareketli elemanların ve diğer temas yüzeylerinin arasında meydana gelen sürtünme ve aşınmalar sebebiyle oluşmaktadır. Aşınma, parça değişimi veya onarımı nedeniyle üretim maliyetlerini doğrudan etkilemektedir [14]. Sürtünme ve aşınmanın minimize edilmesi için birden fazla çözüm yolu bulunmaktadır. Sürtünen yüzeyler arasında yağlayıcı kullanımı da aşınmayı düşürmektedir. Yağlayıcıların seçiminde sahip oldukları viskozite, film mukavemeti, mekanik ve termal gerilimlere karşı direnç gibi faktörler belirleyici olmaktadır. Çoğu durumda baz yağlar tek başına yeterli tribolojik performansı sergileyememektedir. Nano teknolojinin gelişmesi ve nano partiküllerin sahip olduğu üstün özellikler sayesinde, sürtünme ve aşınma problemlerinin birçoğu yağlayıcılara nano katkı ekleyerek çözüme kavuşmaktadır [15]. Nano partiküller temas yüzeyleri arasında meydana gelen ısı oluşumunu azaltmada, temas yüzeylerini birbirinden ayırarak kararlı bir yağ filmi oluşturmada, yük taşıma kapasitesinin artırılmasında oldukça etkilidir. Bununla birlikte nano partiküllerin sahip olduğu morfolojiye bağlı olarak yüzeyler arasında yuvarlanma etkisi oluşturabilmekte, pürüzleri doldurarak ve/veya onarak yüzey kalitesinin artmasına katkı sağlamaktadır [16]. Bu doğrultuda yağlayıcı katkı maddeleri olarak genellikle metal veya karbon esaslı nano partiküller kullanılmaktadır [17]. Molibden disülfid, grafitik bor nitrür, grafit, fullerene, Cu, CuO, işlevselleştirilmiş grafen, silikon oksit, karbon nanotipler, nano gümüş, nano bakır, nano demir oksit vb. gibi nano partiküllerin temas yüzeyleri arasında aşınma ve sürtünmeyi önemli ölçüde azalttığı literatür çalışmalarında vurgulanmaktadır [18–21]. Kullanılan nano partiküllerin sahip olduğu morfoloji, termal iletkenliği, korozyon direnci, kararlılığı gibi mekanik ve kimyasal özellikleri tribolojik performansın artırılmasında önemli rol oynamaktadır.

Bu kapsamda, ilk bölümde incelenen mikro partikül ortamında aşınma tiplerine örnek olarak entegre demir çelik tesislerinde boru malzemesi olarak kullanılan karbon çeliği ve yüksek alaşımlı çelik malzemelerin sulu ortam erozif aşınma davranışının parametrik olarak incelenmesi, aşınma parametrelerinin niceliksel analizi ve aşınmayı

minimumuna indirecek ortam koşullarının belirlenmesi bu çalışmanın özgünlüğünü ifade etmektedir. Çalışma kapsamında, çarpma hızı, çarpma açısı ve konsantrasyon parametreleri gerçekçi ortamlarda simüle edilmiş ve ortaya çıkan aşınma özellikleri bu değişkenlere göre analiz edilmiştir. Sayısal verilerin 3 boyutlu topoğrafya görüntüleri ile doğrulanması da çalışmanın önemini arttırmaktadır. Aşınma ortamı için farklı konsantrasyonlarda bulamaç hazırlamak için parçacık boyutları $\sim 302,5 \mu\text{m}$ olan silika tozu kullanılmıştır. Deney tasarım parametreleri, Taguchi kesirli faktöriyel yönteminin L9 ortogonal matrisine göre 3 seviyeli çamur konsantrasyonu (ağırlıkça %5, ağırlıkça %15 ve ağırlıkça %25), 3 seviyeli çarpma hızı (265, 397,5 ve 530 rpm) ve 3 seviyeli çarpma açısı olarak belirlenmiştir (30° , 60° ve 90°). Ölçülen ağırlık kaybı ve yüzey pürüzlülüğü değerleri, sinyal/gürültü (S/N) analizi ve varyans analizi (ANOVA) yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Deneyler sonucunda en iyi, orta ve en kötü sonuçları veren parametrelere göre performans testleri yapılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağıtıcı X-ışını spektroskopisi (EDX) ve 3D topoğrafya analizleri ile aşınma bölgeleri detaylı bir şekilde incelenmiştir.

İkinci bölümde ise aşınmaya maruz kalan otomotiv motor ekipmanlarında ve partikül transferinin gerçekleştiği ortamlarda kullanılan üç farklı malzeme (AISI 1015, MgZn, AlSi18), belirlenen üç farklı MY ortamında aşınma deneylerine tabi tutulmuştur. Çalışma kapsamında belirlenen üç farklı nano partikül sentezlenerek elde edilmiş, karakterizasyonları ise X ışını kırınımı (XRD) ve SEM analizleri ile gerçekleştirilmiştir. Üç farklı nano partikül (Fe_2O_3 , MXene, $\text{g-C}_3\text{N}_4$), iki farklı konsantrasyon oranında (25 mg ve 50 mg) MY içerisine eklenmiştir. Ball-on-flat aşınma deneyleri her bir numune için toplamda yedi ayrı aşınma ortamında (MY, 25 mg Fe_2O_3 + MY, 50 mg Fe_2O_3 + MY, 25 mg MXene+ MY, 50 mg MXene + MY, 25 mg $\text{g-C}_3\text{N}_4$ + MY, 50 mg $\text{g-C}_3\text{N}_4$ + MY) gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri esnasında sıcaklık ve sürtünme katsayısı ölçülmüş, aşınma sonrasında malzemelerin hacim kaybı hesaplanmıştır. Ayrıca aşınma bölgeleri 2D profilometre, SEM ve EDX analizleri ile incelenmiştir.

1.1. LİTERATÜR TARAMASI

Erozif aşınma esas olarak endüstriyel koşullarda borunun iç aşınması olarak tanımlanabilir. Endüstriyel yüklerin büyüklüğü, boru hatlarının uzun süreli kullanımı, sıcak malzeme taşınması ve maliyet faktörü göz önüne alındığında kütle aktarımı için demir esaslı malzemelerden yapılmış borular tercih edilmektedir. Ancak demirli malzemelerde sürtünme kaynaklı abrasif aşınma, çarpma kinetik enerjisinin neden olduğu yorulma aşınması, çukurlar, korozyon aşınması ve sıcak koşullarda adhezif aşınma mekanizmaları nedeniyle yüzey deformasyonları meydana gelir. Demir bazlı malzemelerin yüksek sertliği (>150 HB), tekrarlanan ve karmaşık aşınma mekanizmalarına karşı koymak için yetersizdir. Boru içinde taşınan parçalarda oluşan oksit, karbür ve nitrür bazlı sert parçacıklar da deformasyonun hızlanmasına ve yıkıcı deformasyonlara neden olur. Bu nedenle erozif aşınmaya maruz kalan malzemelerde aşınmayı etkileyen parametrelerin tanımlanması ve oluşan aşınma özelliklerinin belirlenmesi, aşınma direncinin artırılmasına odaklı bir çözüm üretilmesi açısından önemlidir.

Erozif aşınma mekanizmasında aşınma oranını etkileyen önemli faktörler vardır. Bu faktörler; çarpma açısı, çarpma hızı, katı parçacıkların geometrisi, boyutu, konsantrasyonu ve aşındırılan malzemenin özellikleri olarak sıralanabilir [8,9,22–29]. Erozif aşınma parametrelerinden biri olan çarpma açısı 0° ile 90° arasında değişebilmektedir. Düşük darbe açılarıyla yüzeye çarpan parçacıklar yüzey boyunca hareket ederek malzemeyi deformasyona uğratmaya devam etmektedir. Bu durum abrasif aşınma mekanizmasına benzer bir etki oluşturmaktadır [9,12,24,29]. Yüksek çarpma açılarında yüzey boyunca çatlaklar meydana gelmekte ve devam eden akışla birlikte malzeme yüzeyi yorulmanın neden olduğu kırılmaya uğramaktadır [22,29]. Çarpma açısının erozif aşınma üzerindeki etkisi, hedef malzemenin sünek veya kırılkan olmasına bağlı olarak da değişmektedir. Gevrek malzemeler (seramik bazlı vb.), temas yüzeylerinde, yüksek çarpma açılarında, düşük çarpma açılara göre daha fazla momentum üretmektedir. Oluşan momentuma bağlı olarak malzemenin çatlama ve ufalanma şeklinde deforme olması kuvvetle muhtemeldir [30]. Gevrek malzemeler düşük darbe açılarında momentum etkisinden ziyade sürtünme davranışı sergilemektedir. Kırılkan malzemelerin yüksek sertliği nedeniyle sürtünmeden

kaynaklanan aşınma kayıplarının minimum düzeyde olması beklenmektedir. Belirtilen koşullara bağlı olarak, kırılğan malzemelerin yüksek darbe açılarında yıkıcı deformasyona maruz kalma olasılığı daha yüksektir [31,32]. Literatürde sünek malzemelerin düşük darbe açılarında daha hızlı deforme olduğu, kırılğan malzemelerin ise yüksek darbe açılarında daha hızlı deforme olduğu rapor edilmiştir [22,29,33–35].

Aşındırıcı parçacıkların çarpma hızı, aşınma miktarını doğrudan etkileyen bir diğer faktördür. Parçacıkların hızının artması kinetik enerjilerinin de artması anlamına gelir; bu enerji arttıkça yüzeydeki deformasyon da artmaktadır [6,36]. Düşük çarpma hızı yüzeyde ani plastik deformasyona neden olmasa da tekrarlanan darbelerden dolayı yorulmaya neden olmaktadır [37]. Katı parçacıkların boyutu ve geometrisi değerlendirildiğinde keskin kenarlı ve büyük parçacıkların malzemeyi daha hızlı aşındırdığı görülmektedir [22]. Küçük boyutlu katı parçacıklar sıvının içinde asılı kalarak yüzeye çarpmadan ilerleyebilirken, büyük boyutlu partiküller daha yüksek kinetik enerjiye sahip olup malzeme yüzeyinde daha fazla aşınmaya neden olmaktadır [22,38]. Katı parçacıkların konsantrasyonu arttıkça sıvı daha viskoz hale gelmektedir. Malzeme yüzeyine temas eden parçacıkların sayısı arttıkça aşınma oranı da artmaktadır [6,8,22,34].

Çelik alaşımları erozif aşınmaya maruz kalan alanlarda kullanılan başlıca malzemelerdir. Bu nedenle literatürde aşınma parametrelerinin etkileri genellikle çelik alaşımlarının tribolojik davranışları üzerinden yorumlanmaktadır [6,36,39–41]. Çelik malzemelerde darbe açısının aşınmaya etkisini inceleyen çalışmalar, yüzey altı ve yüzey kırılmaları şeklinde maksimum aşınmanın düşük darbe açılarında meydana geldiğini bildirmiştir. Çoğu çelik alaşımı sünek malzeme özelliklerine sahiptir [38,42].

Burstein ve Sasaki, AISI 304 paslanmaz çeliğin erozyon-korozyon davranışını inceleyerek darbe açısının aşınma üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmaları sonucunda maksimum erozyonun 40° ile 50° arasındaki açılarda meydana geldiğini tespit etmişlerdir [43].

Andrews ve ark. AISI 316 paslanmaz çelik ve Stellite 6 malzemesinin bulamaç erozyon davranışını araştırmışlardır. Sünek malzemenin (AISI 316 paslanmaz çelik) 45°'lik bir çarpma açısında ve kırılğan malzemenin (Stellite 6) 60°'lik bir çarpma açısında maksimum erozyona uğradığını belirtmişlerdir [44].

Khullar ve ark. AISI 304, 316 ve 420 paslanmaz çeliğin çamur erozyonu davranışı hakkında araştırma yapmışlardır. Araştırmalarında malzeme sertliğinin, aşınma hızına, kırılma tokluğunun ise çatlak oluşumunda etkili olduğu vurgulanmıştır [6].

Elemuren ve ark. potasyum işleme tesislerinde kullanılan AISI 1018 çeliğinin erozyon-korozyon aşınma davranışını araştırmışlardır. Çalışmaları, erozyon ve korozyon arasındaki etkileşimden kaynaklanan toplam deformasyonun, erozyon ve korozyon aşınmasının ayrı ayrı neden olduğu deformasyondan daha yüksek olduğunu bildirmiştir. Ayrıca, artan akış hızının ve katı konsantrasyonunun, parçacıkların test edilen dirsekler üzerindeki mekanik etkilerini arttırdığını ve dolayısıyla dirseklerin erozyon-korozyon oranlarını arttırdığını belirtmişlerdir. [45].

Chauhan ve ark. su türbinlerinde kullanılacak paslanmaz çeliğin aşınma direncinin, darbe ve yorulma dayanımının yüksek olması gerektiğini savunmuştur [46]. Bu çalışmalar değerlendirildiğinde çelik malzemelerin karakteristik özellikleri ile aşınma parametrelerinin etkileşim içerisinde olduğu görülmektedir. Bu nedenle malzeme seçiminde aşınma direncinin yanı sıra korozyon direnci, kırılma tokluğu, mukavemet ve işlenebilirlik de önemli parametrelerdir. Özellikle ilaç, gıda ve kimya endüstrilerinde östenitik paslanmaz çelikler korozyon direnci açısından diğer çeliklerden üstün görünmektedir [46,47]. Düşük alaşımlı/alaşımsız yapısal çelik malzemeler, hafif olmaları, kolay işlenebilmeleri ve yüksek kaynaklanabilirlikleri nedeniyle tarımsal sulama, jeotermal ısıtma, yüksek fırın uygulamaları ve boru tesisatlarında yaygın olarak kullanılmaktadır [4,41,42].

Demir çelik sektöründe oluşan sıvı cürufun taşınmasında, cüruf içerisinde SiO₂ tozunun bulunması nedeniyle ciddi aşınmalar gözlemlenmektedir. Bu aşınma iş kesintilerine yol açmakta ve onarım faaliyetlerinin yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu çalışmada, Türkiye'deki entegre demir çelik tesisleri bünyesinde aktif sıvı cüruf

transfer ünitesinde kullanılan AISI 1015 ve AISI 304 çelik boruların aşınma özellikleri incelenmiştir. Literatürde daha önce yapılan çalışmalarda KARDEMİR Demir Çelik Sanayinde kullanılan borularda karşılaşılan erozif aşınma mekanizmaları incelenmiş ve aşınmayı azaltıcı parametreler belirlenmiştir [4].

Nano partiküller, sahip oldukları morfolojiye ve boyut sayısına göre sınıflandırılabilir. İki boyutlu nano partiküler (2D) son yıllarda sahip oldukları benzersiz fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri ile yüksek yüzey alanları nedeniyle oldukça dikkat çekmektedir [16]. 2D nano partiküllerin esnekliği, esnek elektronik ve sensörlerin tasarımında son derece faydalıdır. Örneğin geleneksel yarı iletken ve metal bazlı gerinim sensörleri kırılğan ve katıdır, bu durum bunların giyilebilir elektronik tasarımında uygulanmasını zorlaştırmaktadır. Yüksek esneklik nedeniyle 2D nano partiküller esnek sensörler ve diğer elektronik cihazların geliştirilmesi için son derece önemlidir [48,49]. Ultra ince olan 2D nano partiküller alışılmamış optik özelliklere sahiptir. Bunlar arasında, ışık hassasiyeti, emisyon ve absorpsiyon yer almaktadır. 2D nano partikül olan grafen, %97,7 oranında mükemmel optik şeffaflık göstermiştir. $Ti_3C_2T_z$ ince filmleri de neredeyse grafene eşit oranda (%97) optik şeffaflık sergilemiştir. 2D nanomalzemelerin dış ortama duyarlılığı ve optik özellikleri, optik sensörlerin geliştirilmesinde büyük rol oynamaktadır [50–52]. 2D nano partiküllerin yüksek Young modülüne sahip olduğu rapor edilmiştir dolayısıyla mükemmel mekanik dayanıklılık sergilemektedirler. 2D nano partiküllerin birçoğunda Young modülü değeri 150 ila 400 GPa arasında ortaya çıkmıştır. MXene ($Ti_3C_2T_x$) partikülü için Young modülü yaklaşık 333 ± 30 GPa olarak ölçülmüştür ki bu değer 2D nano partiküller arasında en yüksek değerlerden biridir [53,54]. Genel itibarıyla, 2D nano partiküllerin, kompozitlerin mekanik özelliklerini katkı olarak kullanıldığında geliştirdiği ve yüksek mekanik stabiliteye sahip, gelişmiş makine parçaları için iyi bir seçim olacağı düşünülmektedir. Bu malzemeler, atomik katmanlar arasında kolay kaymayı gerçekleştirdiği, dolayısıyla düşük sürtünme sağladığı için katı yağlayıcılar olarak da kullanılmaktadır [55]. 2D nano partiküllerin tribolojik etki mekanizması genel olarak ele alınırsa şu şekilde açıklanabilir; ilk olarak nano partiküller, çok ince tabaka yapısına sahip olması sayesinde sürtünen yüzeyler arasındaki ara boşluklara nüfuz edebilmektedir. Yük ve bağlı hareket etkisi altında kalan nano tabakaların ara katmanlarında kayma meydana gelmekte ve sürtünen yüzeyler arasındaki sürtünme

azalmaktadır. 2D nano partiküllerin tribolojik performansı, sahip oldukları atomik katman sayısı ve katmanlar arası kesme kuvvetiyle ilişkilidir [20]. İkinci olarak yağ içerisinde dağılan, yüksek yüzey alanına sahip nano partiküller, yüzeyde meydana gelen tribo filmin kararlılığını artırarak temas eden yüzeylerin birbirinden ayrılmasına ve sürtünmenin azalmasına katkı sağlamaktadır. Son olarak, aşınmış yüzeylerde meydana gelen mikro/nano çatlakları doldurarak yüzey kalitesinin iyileşmesine olanak sağlamaktadır [56]. Ayrıca bu nano partiküller, küresel morfolojiye sahip oldukları durumlarda yüzeyler arasında bilya etkisi göstermekte ve bu sayede oluşan yuvarlanma etkisiyle sürtünme katsayısının azalmasına sebep olmaktadır [20]. 2D nano partiküllerin kullanım alanları Çizelge 1.1’de verilmiştir.

Çizelge 1.1. İki boyutlu malzemelerin triboloji alanında kullanımlarına ilişkin mevcut literatür incelemelerinin özeti.

Çalışma Yılı	2D Nano Partikül Türü	İncelenen Alanlar	Referanslar
2021	Grafen, MoS ₂ , h-BN	Kompozitlerde takviye	[55]
2020	Grafen, MoS ₂ , WS ₂ , h-BN	Yağlayıcı katkı maddeleri	[56]
2021	MXene	Kompozitlerde takviye	[57]
2023	Grafen, MXene, WS ₂	Katı yağlama katkı maddeleri	[58]
2023	MXene	Yağlayıcı katkı maddesi	[59]
2023	MXene	Kaplamalarda yağlayıcı katkı maddesi	[60]
2023	Grafen	Yağlayıcı katkı maddesi	[61]

Nano partiküllerin sağladığı avantajların yanı sıra dikkat edilmesi gereken faktörler de bulunmaktadır. Nano partiküller, küçük boyutları ve yüksek yüzey enerjileri sebebiyle topaklanma eğilimine sahiptir [20,62]. Bu topaklanma sonucunda baz yağda birikmeye ve stabilizasyonun bozulmasına yol açmaktadır. Metal çiftlerinin ara yüzünde birikme yapan nano partiküller, yağ filmini bloke edebilir ve etkili bir yağlamanın gerçekleşmesini engelleyebilir. Bu durum, sürtünme katsayısını artıracak gibi yüzeyler arasında üç cisimli aşınma mekanizmasının meydana gelmesine de sebep olabilir [62]. Dolayısıyla nano partiküllerin kullanımında optimum konsantrasyon oranının belirlenmesi oldukça önem arz etmektedir.

Bu çalışma kapsamında, 2D nano partiküllerden Fe_2O_3 , MXene ve $\text{g-C}_3\text{N}_4$ seçilmiştir. Bu üç farklı nano partikülün tribolojik alanlarda kullanımı ile yüksek tribolojik performans elde edilmektedir.

Nano Fe_2O_3 , metal oksit yapılı bir nano malzeme olup aynı zamanda sürtünme çiftinin yüzeyine yapışma özelliğine sahiptir. Dolayısıyla metal temasını engelleyerek, düşük kesme gerilimine sahip koruyucu bir katman oluşturarak sürtünmenin düşmesine sebep olmaktadır. Ayrıca 2D yapısı sayesinde birden fazla katman halinde oluşan yağ filmi, kendini yenileyerek kararlılığını sürdürmektedir [63]. 2D nano partiküller, yüksek yük taşıma kapasitelerinin yanı sıra yüksek sıcaklık uygulamaları için de idealdirler. Özellikle demir alaşımları üzerinde tribo katman oluşturma kabiliyetleri yüksektir [64].

Xiang ve arkadaşları, baz yağa iki boyutlu demir oksit (Fe_3O_4) nano partiküllerin eklenmesinin sürtünme önleme performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Aşınma deneyleri 0-48 saat sürelerle, 392 N yük altında 1450 rpm'de dört Bilyalı tribo test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ağırlıkça %1,5 Fe_3O_4 nano partikül katkısı içeren SAE 40 baz yağı için ortalama sürtünme katsayısı ve aşınma izi çapı, herhangi bir katkı maddesi içermeyen saf SAE 40 baz yağıyla karşılaştırıldığında sırasıyla %18,06 ve %11,2 oranında düşüş göstermiştir [65].

Saeid ve arkadaşları, gerçekleştirdikleri çalışmada Fe_2O_3 nano partikülünü parafin yağı içerisine ağırlıkça %0,4, %0,8 ve %1,2 oranında katkı olarak ekleyerek aşınma performansındaki değişimleri gözlemlemişlerdir. Aşınma deneyleri dört bilyalı test ortamında ASTM D4172-94 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri sonucunda aşınma izi çapı ağırlıkça %0,8 oranında nano partikül katkılı yağ ortamında %38,6 oranında düşüş göstermiştir [66].

MXene'ler ise geçiş metal karbür, karbonitrür ve nitrür malzemelerden meydana gelen katmanlı 2D nano malzemelerdir. Bu malzemeler grafen benzeri katmanlı yapı, düşük kesme mukavemeti, kendi kendini yağlayabilme kabiliyeti ve kararlı film oluşturma kabiliyeti sayesinde üstün tribolojik performans sergilerler [67].

Jin Yang ve arkadaşları gerçekleştirdikleri çalışmada, AISI 440C numunesine, 8-30 N arasında değişen çeşitli yüklerde, parafin yağına katkı maddesi olarak Ti_3C_2 (ağırlıkça %0,5-6) eklenmesiyle oluşturulan yağ ortamında tribolojik performansını test etmişlerdir. Baz yağ ile karşılaştırıldığında Ti_3C_2 eklenen yağ arasında sürtünme azalmış ve aşınmaya karşı dirençli davranışlar görülmüştür [68].

Zhang ve arkadaşları gerçekleştirdikleri çalışmada baz yağa ağırlıkça %1 oranında $Ti_3C_2(OH)_2$ eklemişlerdir. 5-50 N yük arasında değişen yüklerle aşınma deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sonucunda MXene katkılarının muhteşem aşınma direnci ve sürtünmeyi azaltma iyileştirmelerini tespit etmişlerdir. 2D $Ti_3C_2(OH)_2$ ile güçlendirilmiş yağlayıcılar için sürtünme yüzeyinde ince ve homojen bir tribofilm oluşumu gördüklerini, bunun kayma gerilimini büyük ölçüde azalttığını, yüklerin büyük bir kısmını taşıdığını ve doğrudan teması önlediğini belirtmişlerdir [69]. Ayrıca hidrofilik ve yüksek negatif zeta potansiyelleri nedeniyle su ve polar sıvılarda kolaylıkla dağılabilirler. Ayrıca sürtünme çifti yüzeyleri ile reaksiyona girerek tribofilm oluşturabilirler [60].

Liu ve arkadaşları, $Ti_3C_2T_x$ nano partikülünü PAO8 yağına katkı maddesi olarak ağırlıkça %0,4, %0,8, %1,2 ve %1,6 oranında ekleyerek 32100 rulman çeliği malzemesinin tribolojik performansını, 10 N yük, 240 rpm hız ve 90 dk süreyle pin on disk ortamında test etmişlerdir. Minimum sürtünme katsayısı ve aşınma hacmini %0,8 katkı oranında eklenen yağlayıcıda tespit etmişlerdir. Aşınma hacminin azalmasını yüksek derecede pul pul dökülmüş olan MXene nano tabakaların yüzeyleri doğrudan birbiriyle etkileşimden korumasına bağlamışlardır [70].

Xue ve arkadaşları, hazırladıkları Ti_3AlC_2 nano partikülünü 100SN baz yağ içine katkı olarak ağırlıkça %1, %2, %3 ve %5 oranlarında eklemişlerdir. Nano partikül katkılı yağ ortamında 250 dev/dk hızda, 200 m kayma mesafesinde ve 5-80 N yükler altında aşınma deneylerini 440C paslanmaz çelik bilya aşındırıcıyla çelik disk üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Optimum sürtünme katsayısı ve aşınma direnci değerleri %5 katkılı nano partikül ortamında ve 15 N yük altında gerçekleştirilen aşınma deneylerinde gözlenmiştir [71].

Lian ve arkadaşları, bakır diskler üzerine 200 nm kalınlığında bir Ti_3C_2 filmini spreyle kaplamayla uygulamışlardır. Bu numunelere 0,5 ile 1,5 N yüklerde, 200 dev/dk hızda, 10 dk süreyle uygulanan pin on disk aşınma deneyleri uygulanmıştır. Aşınma deneyleri sonrasında ölçülen sürtünme katsayısı değerinin 3 kat, spesifik aşınma oranı değerinin ise 10 kat azaldığını belirtmişlerdir [72].

Xue ve arkadaşları sentezledikleri $Ti_3C_2T_x$ nano partikülünü baz yağa ağırlıkça %0,6, %1, %3 ve %5 oranlarında katkı olarak eklemişlerdir. Nano partikül katkılı yağ ortamındaki aşınma deneyleri 150 rpm hızda, 10 dk süreyle, 5 ve 50 N yük altında gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri sonrasında 20 N yük ve ağırlıkça %1 oranında katkı olarak eklenen nano partikül katkılı yağ ortamının optimum değerleri verdiği belirlenmiştir [73].

Rosenkranz ve arkadaşları, ürettikleri $Ti_3C_2T_x$ nano partiküllerini 0,4 mg/ml konsantrasyon oranında aseton içerisine katkı olarak eklemişlerdir. Sonrasında bu nano partikül katkılı karışım çelik numune üzerine kaplanmıştır. Çelik numuneye 0,6 mm stroke mesafesi, 1 mm/s kayma hızı, 100 mN yük parametreleriyle aşınma deneyleri uygulanmıştır. Aşınma deneyleri sonrası nano partikül kaplanmış numunelerde, kaplanmamış numuneler göre %300 oranında sürtünme katsayısı düşüşü gözlenmiştir [74].

Feng ve arkadaşları, sentezledikleri MXene nano partikülünü, hint yağı içerisine ağırlıkça %0,05, %0,1, %0,15 ve %0,2 oranlarında katkı olarak eklemişlerdir. Nano partikül katkılı hint yağı ortamında 10 N yük altında, 2 Hz frekansta ve 30 dk süreyle yüksek hızlı pistonlu aşınma test cihazında aşınma deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Aşınma deneyleri sonucunda ağırlıkça %0,1 katkılı aşınma ortamının optimum değerler gösterdiği gözlenmiştir. Aşınma deneyleri sonucunda sürtünme katsayısı değeri %27,9, aşınma oranı ise %55,1 oranında düşüş göstermiştir [75].

Cui ve arkadaşları, ürettikleri Cu nano partikül bağlı MXene nano partiküllerini MXene@Cu olarak adlandırmışlardır. Üretilen nano partiküllerin tribolojik performansını belirlemek için, ileri geri hareket eden aşınma cihazında, 50 N – 700 N aralığında yük altında, 5 – 50 Hz frekansta deneyler gerçekleştirmişlerdir. Aşınma

deneylerinde aşındırıcı olarak AISI 52100 çeliği belirlenmiştir. Aşınma deneyleri sonucunda hacim kaybı değerinin %88,1 oranında düştüğü belirlenmiştir [76].

Guo ve arkadaşları, nano partiküllerin aşınma dayanımına olan etkilerini incelemek amacıyla perfloropolieter (PFPE) içine katkı olarak MXene nano partikülünü ağırlıkça %0,1, 0,2, 0,5, 0,8, 1 ve 2 oranlarında eklemişlerdir. Aşınma deneylerinde aşındırıcı ve aşınan malzeme olarak GCr15 rulman çeliği kullanılmıştır. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda sürtünme katsayısı ve aşınma hacmi değerleri için optimum aşınma, ağırlıkça %2 oranında katkılı ortamda gözlenmiştir [77].

g-C₃N₄ de grafit benzeri katmanlı bir yapıya olup yüksek termal stabilite ve yüzey alanına sahiptir. Nano tabakalarının yüksek mekanik özellikleri ile zayıf ara katman van der Waals kuvvetleri sayesinde yağlama katkı maddesi olarak üstün performans sergilerler. Ayrıca yüksek sıcaklıklar altında toksik maddeler açığa çıkarmadan kararlılığını koruyabilir [78,79].

Kumar ve arkadaşları, yağlayıcı katkı maddesi olarak oktadesilamin aşılınmış 2D g-C₃N₄ nano partikülünün tribolojik performansını incelemişlerdir. Gerçekleştirdikleri çalışmada baz yağa sırasıyla ağırlıkça %0,1, 0,15, 0,2, 0,25 ve 0,3 oranında nano partikül katkısı eklenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre g-C₃N₄ katkısı optimum konsantrasyona kadar aşınma direncinde ve sürtünmede iyi sonuçlar vermiştir. Aşınma izi genişliği değeri ise en düşük %0,2 oranında katkılı yağ ortamındaki deneylerde ortaya çıkmıştır. Bu yağlayıcı ortamda, sürtünme katsayısı baz yağa göre % 44, aşınma oranı ise % 28 oranında düşüş göstermiştir [80].

Zhai ve arkadaşları, 2D g-C₃N₄ nano partikülünü gresin içerisine katkı olarak ekleyerek tribolojik performansını araştırmışlardır. Sentezlenen 2D g-C₃N₄ ağırlıkça %0,02-0,1 arası değişken oranda gresin içerisine katkı olarak eklenmiştir. Gerçekleştirilen dört top aşınma testleri sonucunda elde edilen COF değeri, katkısız grese göre %27,87 oranında düşüş göstermiştir [79]. Hareketli motor bileşenleri sınır yağlama koşullarında çalışmaktadır. Bu durum da yağlayıcının sürtünme çiftleri arasında sürekli bir yağ filmi oluşturamadığı ve pürüzlerin birbiri ile temas halinde olduğu anlamına gelir. g-C₃N₄ kullanımı ile sürtünme yüzeylerini ayırmaya yetecek

kalınlıkta yağ filmi oluşturulabildiğini dolayısıyla sürtünme ve aşınmayı minimize edebildiğini literatürde yapılan çalışmalar vurgulamaktadır [78].

Zhong ve arkadaşları, g-C₃N₄ nano partikülünü ağırlıkça %0,5 oranında beyaz yağ içerisine katkı olarak eklemişlerdir. Nano partikül katkılı yağ ortamında gerçekleştirilen aşınma deneylerinde elde edilen sürtünme katsayısı değeri, baz yağ ortamında gerçekleştirilen deneylere kıyasla %68,06 oranında düşüş göstermiştir. Ayrıca nano partikül katkısının film oluşturma verimliliği gösterdiği belirtilmiştir [81].

Ping Yu ve arkadaşları, sentezledikleri g-C₃N₄ nano partikülünü saf epoksi matrisi içerisine eşit şekilde dağıtmışlar ve bu kompozitin aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Saf epoksiye kıyasla %1 oranında g-C₃N₄ nano partikül katkılı epoksi katkılı numune için sürtünme katsayısı %27, aşınma oranı ise %83'e kadar düşüş göstermiştir [82].

Zhang ve arkadaşları, sentezledikleri iki boyutlu g-C₃N₄ nano partikülünü parafin yağı içerisine ağırlıkça %0,5, %1, %3 ve %5 oranında katkı olarak eklemişlerdir. Nano partikül katkılı ortamda gerçekleştirilen aşınma deneylerinin parametreleri, 10-60 N arasında değişen yükler, 60 dk süre, 50-400 rpm arasında değişken hızlar olarak belirlenmiştir. Aşındırıcı ve aşınan yüzey 440C paslanmaz çelik malzeme seçilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda nano partikül katkılarının yüzeyler arasındaki doğrudan teması engellediği, yüzeylerde film tabakası oluşturduğu ve bu şekilde aşınma oranını düşürdüğü gözlenmiştir. Optimum aşınma değerinin ise %1 katkılı nano partikül ortamında gerçekleştiği belirtilmiştir [83]. İncelenen literatür çalışmalarına göre 2D nano partiküllerinin kullanıldığı yağlayıcı ortamlar Çizelge 1.2'de verilmiştir.

Çizelge 1.2. İki boyutlu nano partikül ortamı aşınma deneyleri sonuçları.

Aşınma Ortamı	Katkı Maddesi	Test Koşulu	Tribolojik Sonuçlar	
			COF	Aşınma
Hint yağı [75]	%1 TDPA-Ti ₃ C ₂	Ball-on-flat, 10 N, 2 Hz, 30 dk	~0,062	Aşınma Oranı: ~1,41 × 10 ⁻⁵ mm ³ /Nm

Çizelge 1.2. (devam ediyor).

SN 100 yağı [69]	%1 Ti ₃ C ₂ (OH) ₂	Ball-on-disk, 200 rpm, 15 N, 10 dk	~0,080	Aşınma izi genişliği: ~0,2 mm
PAO8 yağı [84]	%0,01 TDPA ve MXene	Dört top aşınma, 1200 rpm, 100 N, 30 dk	~0,072	Aşınma Oranı: ~2,3 × 10 ⁻¹¹ mm ³ /Nm
İyonik nano akışkan [85]	%1 Ti ₃ C ₂ Tx	Pin-on disk, 85 MPa, 240 rpm	~0,052	Aşınma Oranı: ~1,75 × 10 ⁻⁵ mm ³ /Nm
PAO yağı [86]	MXene	GCr15 ball (ball-on-disk, 4 N, 200 rpm, 309,62 MPa, 3600 s)	~0,0089	Aşınma izi genişliği: ~102,2 µm
PAO8 yağı [87]	%0,05- 0,2 CaCo ₃ ve % 0,1-0,2 CeF ₃	Üç pim üzeri bilya, 20 N, 213 rpm, 3400s	~0,139- 0,121	Aşınma izi genişliği: ~392 – 283 µm
Motor yağı 15W40 [88]	%0,1- 0,5 Grafen	Dört top aşınma, 3600 s	~ 0,055- 0,110	Aşınma izi genişliği: ~1300-1800 µm
Otomatik şanzıman yağı [89]	%0,05 – 0,2 Al ₂ O ₃	Üç pim üzeri bilya, 20 N, 213 rpm, 3400s	~ 0,123- 0,116	Aşınma izi genişliği: ~158-289 µm
Su bazlı yağlayıcı (Trietanolamin) [90]	%0,05-0,3 g-C ₃ N ₄	Ball-on-flat, 40-120 N, 5 Hz, 20-120 dk	~ 0,18- 0,42	Aşınma hacmi: 4 x 10 ⁻⁴ mm ³ – 1,8 x 10 ⁻³ mm ³
PAO20 [91]	%0-10 Fe ₃ O ₄	Dört top aşınma, 1200 rpm, 392 N, 60 dk	%45 düşüş	Aşınma hacmi: %30 düşüş
Su [92]	%0,02-0,1 g-C ₃ N ₄ ve GO	Üç pim üzeri bilya, 10-35 N, 25-125 mm/s, 7,5 mm stroke	%37 düşüş	Aşınma izi: %19 düşüş
Parafin yağı [66]	%0,4-1,2 Fe ₂ O ₃	Dört top aşınma, 1200 rpm, 392 N	%0,8 düşüş	Aşınma izi: %38,6 düşüş

Literatür taraması incelendiğinde, aşınma ortamlarında bulunan sert mikro partiküllerin, erozif aşınma etkisi gösterdiği ve bu etkinin minimize edilmesi amacıyla çeşitli çalışmalar yapıldığı gözlenmiştir. Aşınma mekanizmalarından biri olan erozif aşınma, yüzeylere akışkanlar, partiküller veya hızlı hareket eden diğer katı yüzeyler tarafından neden olan bir aşınma türüdür. Bu aşınma türünde, yüzeylere çarpan,

sürtünen partiküllerin veya akışkanların etkisiyle yüzeyde malzeme kaybı oluşmaktadır. Bu tür bir aşınma genellikle demir esaslı makine parçalarında ve motor parçalarında yaygın bir şekilde meydana gelmektedir [93–98]. Bunun muhtemel sebebi ise çalışma ortamında yüzeylerden koparak meydana gelen mikro, nano partiküller olarak düşünülmektedir.

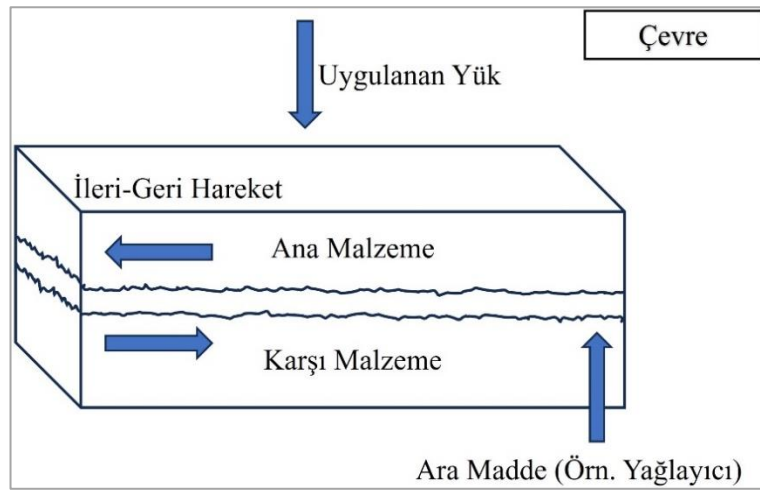
Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda aşındırıcı olarak, dışarıdan eklenen sert seramik partiküllerin kullanıldığı gözlenmiştir. Mikro partikül etkisinin parametrik olarak incelenmesi bu tez çalışması kapsamında özgün değer olarak belirlenmiştir.

Mikro partiküllerin yanı sıra nano partikül katkılı sıvı aşınma ortamların, aşınmaya maruz kalan malzemeler üzerinde saf sıvı ortamına göre aşınma kayıplarını minimize etmesi beklenmektedir. Nano partikül katkılı çeşitli yağ ortamlarının da aşınmaya maruz kalan malzemeler üzerinde olumlu etkileri literatürde belirtilmiştir. Ayrıca literatür incelemesine göre nano partiküller, ağırlıkça düşük konsantrasyon oranlarında, yüksek konsantrasyon oranına göre daha iyi tribolojik performanslar göstermektedir. Literatür incelendiği zaman metalik malzemelerin yüzeylerinde nano boyutlu demir oksit meydana gelmesi ve bunun aşındırıcı etkisinin incelenmesi, aynı zamanda metalik malzemelerde aşınmayı azaltıcı yönde MXene ve g-C₃N₄ nano partikülleri hakkında yeterli çalışmalar bulunmadığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple bu çalışmada, aşınma ortamında kullanılmak üzere Fe₂O₃ nano partikülleri ve yine bu ortamlarda yağlayıcı özellikleri açısından üstün olan MXene ve g-C₃N₄ nano partikülleri sentezlenmiştir. Sentezlenen nano partiküller motor yağı ortamlarında kullanılan otomotiv motor malzeme ve ekipmanlarından AISI 1015 malzemesi, MgZn ve AlSi alaşım malzemelerinin aşınma ortamlarına motor yağına katkı olarak eklenmiş ve bu malzemelerin aşınma mekanizmaları belirlenmiştir. Bu sayede, bu tez çalışmasında incelenen 3 farklı hedef malzemenin ve iki farklı konsantrasyon oranında MY içerisine eklenen 3 farklı nano partikülün aşınma performanslarına olan etkisi ve aşınma mekanizmalarının belirlenmesi çalışmanın özgünlüğünü ifade etmektedir.

BÖLÜM 2

TRİBOLOJİ

Triboloji bilim dalı, birbirleriyle bağıl hareket eden ve temas halinde bulunan malzemelerin yüzeylerinde oluşan sürtünme, aşınma ve yağlama davranışlarını incelemektedir. Bu bilim dalı, makine, kimya ve malzeme mühendisliği alanlarında önemli bir rol oynamaktadır. Triboloji bilim dalının temel amacı malzemelerdeki veya sistemlerdeki sürtünme ve aşınma kayıplarını en aza indirgeyerek, malzemelerin maksimum performansta, uzun servis ömrüyle, enerji tüketimi ve işletme maliyetini düşürerek çalışmasını sağlamaktır. Sürtünme, aşınma ve yağlama, tribolojinin ana odak noktalarıdır. Tribolojik sistem, birbirine temas eden yüzeyleri, kullanılan malzemeleri, uygulanan yükleri, yüzeylerin birbirleriyle olan hareket koşullarını ve çevresel faktörleri incelemektedir (Şekil 2.1). Aşınan ve aşındırıcı malzeme, tribolojik sistemdeki aşınma çiftlerini oluşturmaktadır [99]. Tribolojik sistem kuru ortamda da yağ ve su gibi çeşitli sıvı ortamlarda da bulunabilmektedir. Bu ortamlar, malzemelerin çalışma şartlarındaki aşınma kayıplarını en aza indirmek için çeşitli optimizasyonlarla iyileştirilmeye çalışılmaktadır.

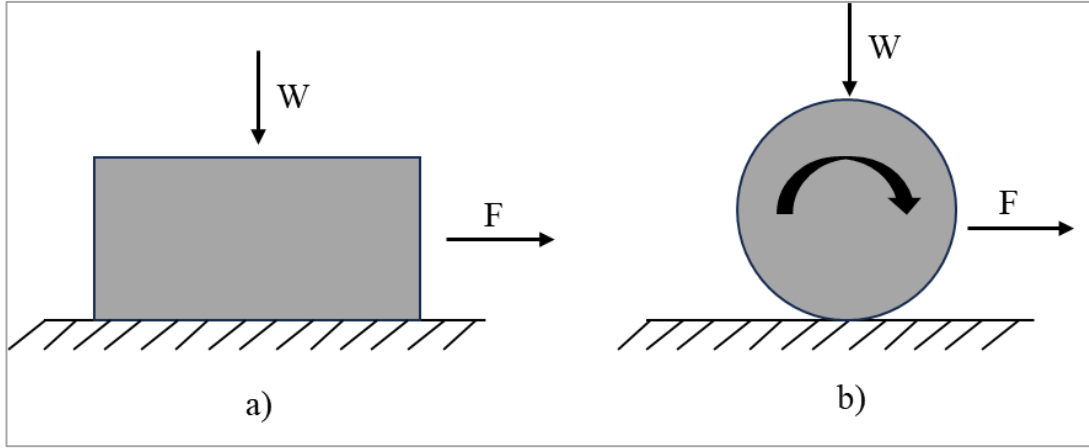


Şekil 2.1. Tribolojik bir sistemin şematik gösterimi.

2.1. SÜRTÜNME

Temas halindeki nesnelerin bağıl hareket karşısında yüzeylerinde karşılaşılan dirence sürtünme adı verilmektedir [100,101]. Hareket yönüne zıt yönde oluşan bu dirence sürtünme kuvveti adı verilmektedir. Temas eden yüzeyler arasında oluşan sürtünme kuvveti, sürtünme katsayısı adı verilen bir sabite de bağlı gelişmektedir. Sürtünme katsayısı, simgesi μ olan bu değer, sürtünme kuvveti ile yüzeye dik uygulanan kuvvet arasındaki ilişkiyi ölçen bir katsayıdır (Eşitlik 2.1). Sürtünme katsayısı, kayma mesafesi, kayma hızı, temas eden malzemelerin sertliği ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [101,102]. Sürtünme, şanzımanlar, rulmanlar, valfler, tekerlekler ve frenler gibi tüm mekanik sistemlerde meydana gelmektedir. Bu nedenle sürtünmeyi azaltmak için çeşitli yağlayıcılar veya kendini yağlama özelliğine sahip kaplamalar kullanılmaktadır [102,103].

Sürtünme temel olarak, statik ve dinamik sürtünme olmak üzere iki türde gerçekleşmektedir. Statik sürtünme, birbirine göre hareket etmeyen iki veya daha fazla nesne arasındaki sürtünme olarak adlandırılmaktadır. İki katı yüzey arasında hareketin başlaması için gerekli olan teğetsel kuvvet, üzerlerine uygulanan yük ile ilişkilidir. Bu kuvvete statik sürtünme kuvveti denir ve genellikle F_s olarak ifade edilmektedir. Hareket başladıktan sonra devam etmesi için gereken kuvvete ise kinetik sürtünme kuvveti adı verilir ve genellikle F_k olarak ifade edilmektedir. Çoğu durumda, kayma hareketi başladıktan sonra sürtünme kuvveti azalmaktadır. Bu sebeple, statik sürtünme kuvveti genellikle dinamik sürtünme kuvvetinden büyüktür veya ona eşittir. Dinamik sürtünme ise birbirine göre hareket eden iki veya daha fazla nesne arasındaki sürtünmedir. Dinamik sürtünmede temas eden yüzeyler birbirine göre hareket ederken, statik sürtünmede ise etkileşen yüzeyler arasında izafi bir hareket bulunmamaktadır. Temas halinde olan nesneler birbiri üzerinde kayma şeklinde öteleme hareketinde bulunuyorsa kayma sürtünmesi, yuvarlanma şeklinde öteleme hareketinde bulunuyorsa kayma-yuvarlanma sürtünmesi olarak adlandırılmaktadır (Şekil 2.2) [104].



Şekil 2.2. Sürtünme çeşitleri. a) kayma sürtünmesi, b) kayma-yuvarlanma sürtünmesi.

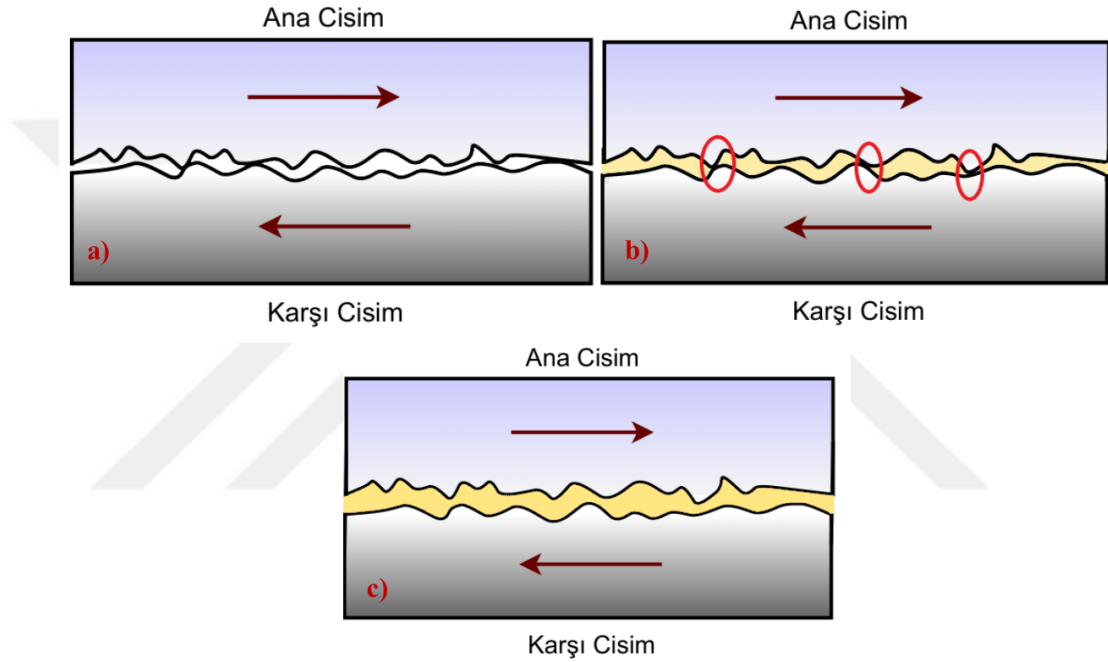
$$\mu = F/N \quad (2.1)$$

Sürtünme, kuru sürtünme, yarı-sıvı sürtünme ve sıvı sürtünme olmak üzere üç grupta incelenmektedir (Şekil 2.3). Temas eden yüzeyler arasında yağlayıcının bulunmaması durumunda bu sürtünme çeşidine kuru sürtünme adı verilmektedir. Bu sürtünme çeşidinde birbirleriyle temas eden yüzeylerin pürüzlülükleri büyük önem taşımaktadır. Sürtünme halinde olan nesnelere, yük etki ettiğinde yüzeylerdeki pürüzlülük tepecikleri birbirleriyle temas haline geçerek plastik deformasyona uğramaktadır. Bu sebeple iki yüzeyde de kaynaklanmalar ve kopmalar oluşmaktadır. Bu durum, tribolojik sistemdeki parçaların malzeme kaybına uğramasına dolayısıyla ekipmanların faydalı çalışma ömrünün azalmasına neden olmaktadır [18,105,106].

Yarı-sıvı sürtünmede temas eden yüzeyler arasında ince bir yağ tabakası vardır. Ancak çalışma durumuna göre temas eden yüzeylerdeki pürüzlülük tepecikleri bazı durumlarda birbirleriyle temas ederek kuru sürtünmeye benzer şekilde kaynaklanmalar oluşturabilmektedir. Yine de kuru sürtünmeye göre sürtünme direnci yarı-sıvı sürtünme durumunda daha düşük olmaktadır. Bu yüzden yarı-sıvı sürtünme durumunda oluşan aşınma durumu da kuru sürtünmeye göre daha az miktarlarda gerçekleşmektedir [102].

Sıvı sürtünme durumunda ise temas eden yüzeyler arasında bulunan yağlayıcının kalınlığı nesnelerin maksimum yüzey pürüzlülüğü değerinden daha kalın değerde

olmaktadır. Dolayısıyla bu nesneler birbirleriyle temas etmeden minimum aşınma ortamında çalışmaktadırlar [107]. Sıvı sürtünme durumunda, temas eden yüzeyler arasında kullanılan yağlayıcının viskozite değeri oldukça önemlidir. Yüzeyler arasında iki farklı yağlayıcı filmi oluşmaktadır. Oluşan yağ filmi, malzemelerin yüzey hareketlerinden kaynaklanıyorsa, bu duruma hidrokinamik yağlama denilmektedir. Diğer bir durumda ise yağ filmi, dışardan örneğin, bir pompa vasıtasıyla sağlanıyorsa, bu yağlama şekli hidrostatik yağlama olarak adlandırılmaktadır [108].

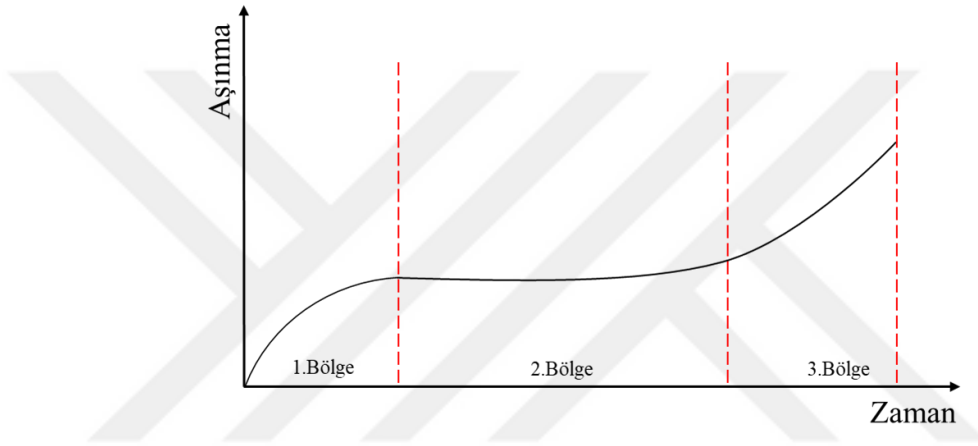


Şekil 2.3. Sürtünme çeşitleri. a) kuru sürtünme, b) yarı-sıvı sürtünme c) sıvı sürtünme [109].

2.2. AŞINMA

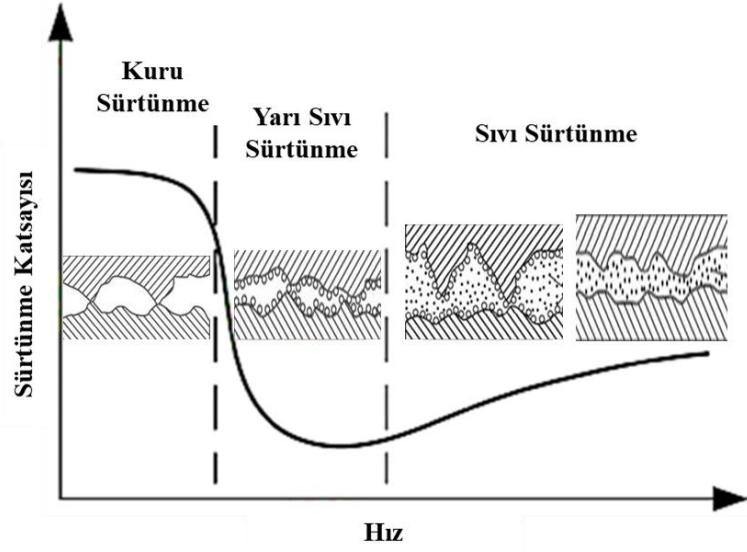
Aşınma, karşılıklı harekete maruz kalan, mekanik tesislerin ve ekipmanların arızalanmasına, parça hasarına, servis ömürlerinin kısılmasına neden olan sorunların çözümüne yönelik cevaplar bulmaya çalışan triboloji bilim dalının altında yer alan bir konudur. Aşınma mekanizmalarının belirlenmesi, aşınmaya maruz kalan parçaların servis ömürlerinin belirlenmesi için önemlidir. Mühendislik malzemelerinde aşınmaya maruz kalan bileşenlerin aşınma hasarlarını azaltmak için önemli çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Aşınma, ilk olarak birbirlerine temas eden yüzeylerde başlamaktadır [104]. Bu sebeple yüzey topografyası da aşınan malzemelerde önemli

rol oynamaktadır [104]. Aşınma sorunlarının çözümü yüzeyde başladığı için yüzeylerin doğrudan birbiriyle temasının azaltılması amacıyla yağlayıcılar kullanılmaktadır [110]. Aşınma zamana bağlı üç aşamada değişkenlik göstermektedir (Şekil 2.4). İlk aşamada temas eden yüzeylerde yüzey topografyasına da bağlı olarak yüksek oranda aşınma gerçekleşmektedir. Bu aşınma bölgesi, temas eden yüzeyler birbirine alışana kadar devam eder ve rodaj olarak adlandırılır. İkinci aşamada temas eden yüzeyler, aşınmaya doğal olarak devam etmektedir. Üçüncü aşama ise en yüksek oranda aşınmanın görüldüğü bölgedir.



Şekil 2.4. Aşınma-zaman ilişkisi.

Sürtünme ve yağlama konusunda çalışmaları bulunan Richard Stribeck, 19. yüzyılın sonlarında kaymalı yataklarda yağ viskozitesi, temas alanı ve mil dönme hızı arasındaki ilişkiyi inceleyerek, yağlama rejimlerine etkilerini analiz etmiştir [111,112]. Şekil 2.5'te gösterilen Stribeck eğrisi incelendiğinde, aşınma hızının en düşük olduğu bölgede sürtünme katsayısı maksimum değerdedir. Bu bölgeye kuru sürtünme bölgesi adı verilmiştir. Bu bölge, mil ile yatak malzemelerinin birbirleriyle temasta olduğu bölgedir. Yarı sıvı sürtünme bölgesinde ise ince katman şeklinde film tabakası oluşmaktadır. Bu bölgede mil hızının artmasıyla sürtünme katsayısında önemli bir azalma gözlenmiştir. Sıvı sürtünme bölgesinde ise hidrodinamik yağlama gerçekleşmektedir. Bu bölgede, sürtünme katsayısı minimum değere düşerken yağın iç basıncı nedeniyle aşınmanın ilerleyen sürecinde artışa geçmektedir [113].



Şekil 2.5. Sürtünme katsayısı-hız ilişkisi (Stribeck eğrisi).

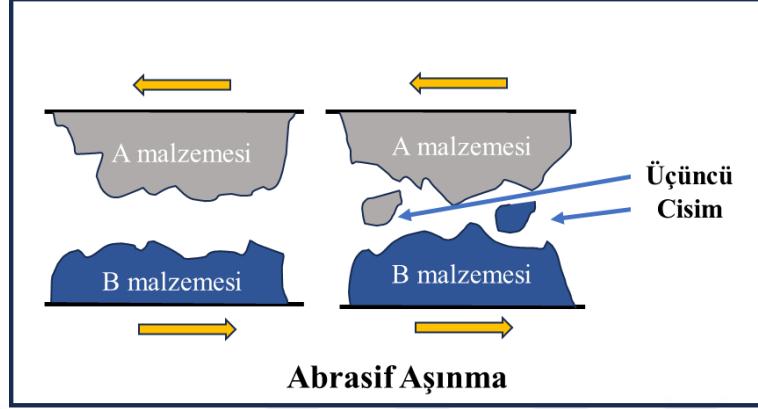
2.3. AŞINMA MEKANİZMALARI

Aşınmaya maruz kalan malzeme, elemental özelliklerine, çevresel etkenlere ve servis koşullarına bağlı olarak farklı aşınma mekanizmaları göstermektedir. Aşınma mekanizmaları genellikle birbirleriyle ilişkilidir. Aşınan malzemenin yüzeyinde birden fazla aşınma mekanizması aynı anda oluşabilmektedir. Temel olarak, aşınma mekanizmaları abrasif, adhezif ve erozif aşınma başlıklarıyla incelenebilir.

2.3.1. Abrasif Aşınma

Abrasif aşınma, temas eden iki cisimden biri diğerinden daha sert olduğunda, pürüzlü tepecikler veya taneler vasıtasıyla diğer cismin yüzeyinden mikron ölçeğinde parça çıkarılma süreci olarak adlandırılmaktadır. Temas eden malzemelerden sertlik ve yüzey pürüzlülük değeri yüksek olan, izafi hareket ve temas basıncı etkisiyle karşı cismin yüzeyini plastik deformasyona uğratarak yüzeyde hasar oluşturmaktadır. Bu durum iki cisimli aşınma olarak tanımlanmaktadır. Eğer iki cisim arasında serbestçe hareket edebilen aşındırıcı tanecikler mevcut ise (öteleme ve dönme hareketi yapabilen), bu durum üç cisimli aşınma olarak adlandırılmaktadır. Bu tanecikler, aşınma ortamına dışardan bir etkiyle girebilecekleri gibi, aşınma bölgesinden kopan partiküllerin de yüzeyde serbest kalarak malzemeleri aşındırması şeklinde

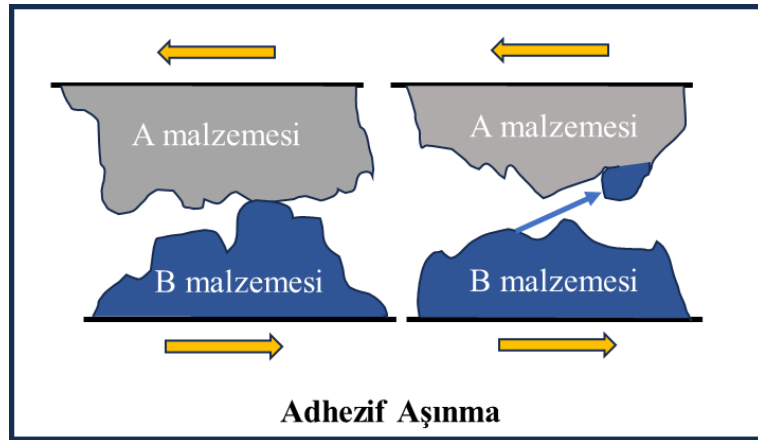
gerçekleşebilmektedir (Şekil 2.6). Abrasif aşınma mekanizmasında yüzeyde yırtılmalar ve derin çizikler görülmektedir [109].



Şekil 2.6. Abrasif aşınma.

2.3.2. Adhezif Aşınma

Adhezif aşınma mekanizmasında birbirine benzer mikro yapılara sahip genellikle düşük hızlarda, sürtünmeye maruz kalan yüzeylerin pürüzlülük temas noktalarında ısı artışı ortaya çıkmaktadır. Artan ısıyla beraber malzemelerin yüzeylerinde yapışmalar, mikro kaynak oluşumları ve parça transferleri meydana gelir. Bu aşınma mekanizması adhezif aşınma olarak adlandırılmaktadır (Şekil 2.7). Bu aşınma mekanizmasında parça yüzeylerinde mikron boyutta çukurcuklar ve tepe noktaları görülmektedir [109].



Şekil 2.7. Adhezif aşınma.

2.3.3. Eroziyon Aşınma

Eroziyon aşınma, yüksek hızlı sıvı veya katı parçacıkların malzeme yüzeyine sürekli olarak çarpması nedeniyle malzemenin bozulmasıdır. Bu aşınma mekanizmasında, malzeme yüzeyi ile temas eden akışkanlar kavitasyona ve darbe erozyonuna, akışkan içindeki katı parçacıklar ise çamur erozyonuna neden olmaktadır. Özellikle endüstriyel sistemlerde, boru hatlarında, pompalarda ve motor parçalarında sıklıkla görülmektedir. Eroziyon aşınma mekanizmasında aşınma oranını etkileyen önemli faktörler vardır. Bu faktörler, çarpma açısı, çarpma hızı, katı parçacıkların geometrisi, boyutu, konsantrasyonu ve aşınan malzemenin özellikleri olarak sıralanabilir [2]. Sünek malzemeler için düşük çarpma açılarında ve yüksek konsantrasyon oranında aşındırıcı bulunan ortamlarda eroziyon aşınma yoğun olarak görülmektedir. Gevrek malzemeler için ise yüksek çarpma açısı ve yüksek konsantrasyon eroziyon aşınma oranını arttırmaktadır [102].

2.4. AŞINMAYA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Malzemelerde meydana gelen aşınmaya etki eden faktörler, malzemenin kullanıldığı koşullar, malzemenin özellikleri ve çevresel etmenler ile ilişkilidir. Temas eden malzemelerin yüzeyleri arasında oluşan sürtünme kuvveti, malzemelerin aşınma sürecini doğrudan etkilemektedir. Sürtünme kuvvetinin yüksek olması malzemelerin daha hızlı aşınmasına sebep olmaktadır. Sürtünme kuvvetinin yüksekliği, malzeme üzerine uygulanan yük ile doğrudan ilişkilidir. Birbirleriyle izafi harekette bulunan malzemelerin kimyasal kompozisyonları, tane boyutları ve kristal yapıları, sertlik ve elastisite modülü değerleri aşınmayı etkileyen faktörler arasında yer almaktadır. Aşınan malzemelerin çalıştığı ortamın sıcaklık ve nem koşulları da aşınmayı etkileyen faktörler arasında yer almaktadır. Malzemelere uygulanan kaplamalar da aşınma direncini artırma yönünde etkiler göstermektedir. Aşınma direncinin artması ile malzemelerin servis ömürleri de uzamaktadır. Aynı zamanda temas eden yüzeylerin yüzey pürüzlülük değerleri de aşınmayı etkileyen bir diğer faktör olarak düşünülmektedir. Yüzey pürüzlülüğünün düşük olması, yüzeyde tepecik ve çukurcukların az olması sebebiyle aşınan malzemelerin birbiriyle olan ilişkisini azaltarak aşınma oranını düşürmektedir. Ayrıca aşınan yüzeyler arasına eklenen

yağlayıcılar da malzemelerin birbirleriyle olan temasını azaltarak, aşınma kayıplarını düşürmektedir. Malzemelerin maruz kaldığı yüklerin büyüklüğü ve sürekli olması da aşınma direncini etkilemektedir.

Aşınma kayıplarını minimize etmek için malzeme seçimi, tasarımı ve üretimi süreçlerinde bu faktörler önemli roller oynamaktadır. Aşınma yüzeylerinin analizleri morfolojik ve sayısal olarak değerlendirilmektedir. Aşınma mekanizmaları, aşınan yüzeyi farklı metotlarla görüntüleme yöntemleriyle belirlenmektedir. Aşınmada malzemelerin fiziksel kayıpları, sürtünme katsayısı, hacimsel kayıp ve ağırlık kaybı hesaplamalarıyla ölçülmektedir [109].

2.3. YAĞLAYICI BİLEŞENLER

Birbirleriyle temas halinde olan makine parçalarının yağlanması temel amacı, yağlayıcı adı verilen üçüncü bir etkenin temas halindeki yüzeyler arasına eklenmesi yoluyla bu yüzeylerin arasında oluşan sürtünmeyi azaltmaktır. Bu sayede makine parçalarında oluşabilecek hasarlar minimize edilerek servis ömrü uzatılmaktadır. Yağlayıcının etkinliği, aşınmayı önleme ve sürtünmeyi azaltma kapasitesiyle ölçülmektedir. Yağlayıcılar karşılıklı hareket eden yüzeylerin temaslarını ayırarak sürtünme azaltıcı bir tribo film oluştururlar. Ayrıca yağlayıcılar, yüzeylerde oluşan ısıyı aktarma, kiri ve malzeme kalıntılarını yüzeyden uzaklaştırma, korozyonu önleme gibi önemli etkilere sahiptir. Bu sebeple makine parçalarında sürtünmeyi azaltmak için yağlayıcı seçimi oldukça önemlidir [107,114]. Yağlayıcılara ihtiyaç duyulan çalışma alanlarında yağlayıcıların etkisini arttırmak amacıyla çeşitli katkılar yapılmaktadır [114]. Yağlama verimliliğini arttırmak için günümüzde nano partiküller katkı olarak yağların içerisine sıklıkla eklenmektedir [86,110,115]. Yağlayıcılar genel olarak katı yağlayıcılar, sıvı yağlayıcılar ve yarı katı yağlayıcılar olmak üzere üç ayrı grup altında incelenmektedir [102].

Katı yağlayıcılar, diğer yağlayıcıların görevlerini yüksek sıcaklık, radyoaktivite ve vakum gibi zorlu koşullarda yerine getiremedikleri durumlarda tercih edilmektedir. Bu yağlayıcılar, tabakalı bir yapı oluşturarak korozyonu önlemekte ve aşınmaya maruz kalan parçaların daha fazla yük taşıma kapasitesine sahip olmalarını sağlamakta

dolayısıyla aşınma kayıplarını düşürmektedir. Katı yağlayıcıların seçimi, uygulama alanlarındaki kimyasal uyumluluk, termal kararlılık ve nüfuz etme davranışı gibi kriterlere bağlıdır. Yağlayıcı sayesinde yüzeylerde oluşan tribo film, yüksek hız, temas basıncı ve sıcaklık koşullarında zarar görebilmektedir. Aşınma hareketinin şekli de yağlayıcı sisteme etki eden bir diğer faktördür. Kayma hareketi sırasında sürtünme artışı, yuvarlanma hareketine kıyasla daha fazladır. Yağlayıcının kimyasal özellikleri ve yüzeyde oluşturduğu film kalınlığı, yağlayıcıların zarar görmemesi için önemlidir. Bu nedenle, sistemde oluşan film kalınlığı, yağlayıcının tribolojik davranışını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Yağlayıcıların önemli işlevlerinden birisi de metalik yüzeylerde oluşan aşınma mekanizmalarında ortaya çıkan yüksek ısıyı ortamdan uzaklaştırarak soğutucu etki göstermesidir.

Yağlayıcıların bir diğer türü olan sıvı yağlayıcılar, katı yağlayıcılara göre yüksek ısı iletkenlik, uzun faydalı ömür ve yüksek nüfuziyet sağlama özellikleri sebebiyle daha çok tercih edilmektedir. Sıvı yağlayıcıların katkı maddeleriyle tribolojik özelliklerinin geliştirilme imkanı daha yüksek olduğu için endüstriyel alanlarda nispeten yaygın biçimde kullanılmaktadır. Yağların seçiminde, çalışma şartlarına uygunluğu bakımından genelde, özgül ağırlık, viskozite değerleri, parlama ve akma noktaları dikkate alınmaktadır.

2.3.1. Yağ Katışıkları

Sürtünme ve aşınma, makine ve motor parçaları gibi mekanik sistemlerin hasar görmesinin ve enerji tüketiminin en önemli nedenlerinden biridir. Yayımlanan bilgilere göre dünyadaki birincil enerji tüketiminin üçte biri ve makine ekipmanlarındaki arızaların %60'ı sürtünme ve aşınmadan kaynaklanmaktadır. Makine parçalarındaki tahribatın %50'den fazlası ise aşırı aşınma ve uygunsuz yağlama durumunda meydana gelmektedir [116]. Sürtünme ve aşınmanın, verim, direnç, çevresel faktörler üzerindeki zararlı etkileri nedeniyle, mühendislik uygulamalarında aşınma ve sürtünmeden kaynaklanan mekanik arızalar üzerine birçok çalışma yapılmasına sebep olmuştur. Mekanik sistemlerin tribolojik özelliklerini iyileştirmek amacı ile aşınma ortamlarında kullanılan yağlayıcılara farklı türlerde katkı maddeleri eklenmektedir.

2.3.1.1. Korozyon Önleyiciler

Temas yüzeylerinde meydana gelen aşınma mekanizmasından dolayı parçaların korozyona uğramasını engellemek amacı ile yağlayıcılara katkı olarak eklenen maddeler korozyonu engellemektedir. Korozyon, aşınmanın olduğu yüzeylerde aşınma hızını arttırmaktadır. Korozyon önleyici katkı maddeleri, yüksek oranda alkalın içeren organik bileşiklerden meydana gelmektedir [117].

2.3.1.2. Köpük Önleyiciler

Köpük önleyici veya köpük gidericiler, yağlayıcılarda oluşan köpükleri engelleyen veya köpük oluştuğunda çökmesini hızlandıran katkı maddeleridir. Köpük, yağın, hava veya diğer gazlarla sürekli karıştırılması sonucu ortaya çıkmaktadır. Yağlayıcılarda oluşan köpük durumu, ısı iletkenliğini düşürdüğü için malzemelerin aşınma oranlarını arttırmaktadır. Köpük önleyici maddeler, yağlayıcı içinde çözünmezler. Polisiloksan ve polimetilsiloksan, köpük önleyici kimyasallara örnek olarak verilebilir [118].

2.3.1.3. Aşırı Basınç Katkıları

Dişli ve yatak malzemelerinin aşınma ortamlarında, yüksek sıcaklık ve basınç olduğu için sürtünmeyi ve aşınmayı azaltmak amacıyla aşırı basınç katkı maddeleri kullanılmaktadır. Bu maddeler, metal yüzeyler arasında kaynamayı engelleyen pürüzlülüklerin içlerini doldurmakta ve bu şekilde temas alanını arttırmaktadır. Sistemde var olan yükü, daha fazla temas alanına dağıtan aşırı basınç katkı maddeleri sayesinde aşınma oranı düşmekte ve daha düzgün bir morfoloji elde edilmektedir. Bu katkı maddeleri genellikle kükürt, fosfor, klor vb. elementleri içermektedir [18,118].

2.3.1.4. Nano Partikül Katkıları

Günümüzde gerçekleştirilen araştırmalar, tribolojik özelliklerin çok düşük oranda nano partikül eklenerek geliştirilebileceğini göstermiştir [119]. Yağlayıcılara nano partiküllerin eklenmesiyle, sürtünme ve aşınmanın azaltılması sonucunda makinelerin

ömrünün artması, daha az enerji kaybı ve çevrenin korunması sağlanmaktadır. Düşük miktarda nano katkı maddesi eklenmesi yağlayıcıların birçok özelliğini iyileştirmektedir [120]. Yüksek yüzey aktivitesi, küçük boyut, termal stabilite ve çeşitli parçacık türleri, nano partiküllerin nano katkı maddesi olarak kullanılmasının avantajlarıdır. Yağlayıcılara katkı maddesi olarak kullanılan nano partiküller, metal, metal oksit, metal sülfidler, boratlar, seramikler, karbon malzemeleri ve nadir toprak bileşikleri gibi çeşitli gruplara ayrılmaktadır [121]. Bir sonraki bölümde nano partiküllerden ayrıntılı olarak bahsedilecektir.



BÖLÜM 3

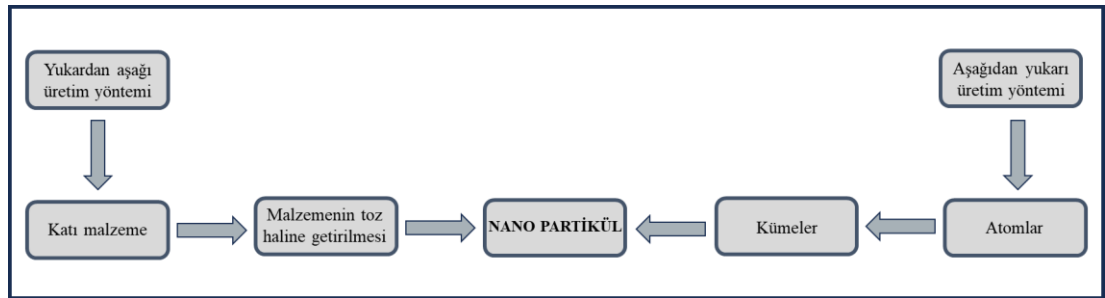
NANO PARTİKÜLLER

Nano partiküller, boyutları 1 ile 100 nanometre (nm) arasında olan karbon, polimer, metal, seramik veya kompozit bazlı maddelerden oluşan parçacıklardır [122]. Nano partiküller, daha yüksek boyuttaki diğer parçacıklarla karşılaştırıldıklarında sahip oldukları hacme göre, büyük yüzey alanları, stabilite, yüksek oranda dayanımları nedeniyle benzersiz fiziksel ve kimyasal özellikler sergilemektedir [123]. Bu sebeple nano partiküller, makine, kimya, elektronik ve tıp gibi birçok alanda kullanılmaktadır [123–125]. Nano partiküller, küresel, silindirik, pul veya katmanlı yapılar gibi farklı şekiller göstermektedirler [126–128]. Nano teknolojinin ve nano partiküllerin kullanımlarının temel amacı, daha sağlam, daha uzun servis ömürlü, daha ucuz, daha hafif ve daha küçük boyutlu ürünlerin geliştirilmesinin önünü açmaktır.

Bileşimlerine göre nano partiküller genellikle üç sınıfa ayrılmaktadır [125]. Birinci sınıf olan organik nano partiküller, protein, karbonhidrat, lipit, polimer veya farklı organik bileşenlerden oluşan nano partikülleri içermektedir. Bu sınıf nano partiküller toksik özellik göstermeyip, biyolojik olarak parçalanabilmektedir. Bu nedenle, biyomedikal alanlarda kullanılmaktadır [122]. İkinci sınıf olan karbon bazlı nano partiküller, karbon atomlarından oluşan nano partiküllerden meydana gelmektedir. Bu sınıf nano partiküller, benzersiz elektriksel iletkenlikleri, yüksek mukavemetleri, optik ve termal özellikleri nedeniyle ilaç, enerji ve mekanik alanlarında tercih edilmektedirler [129,130]. Diğer bir sınıf nano partiküller ise inorganik nano partiküllerdir. İnorganik nano partiküller, genellikle metal, metal oksit veya seramik nano partiküllerinden oluşmaktadır. Günümüzde metal nano partiküllerin boyut, şekil ve yüzey kontrollü sentezi, ileri teknoloji malzemeleri oluşturmak için önemlidir. Bu tip nano partiküller, elektronik cihazlarda, yüksek stabilite nedeniyle biyomedikal uygulamalarında, makine ve endüstri sanayilerinde sıklıkla kullanılmaktadır [125,131].

3.1. NANO PARTİKÜL ÜRETİM YÖNTEMİ VE KARAKTERİZASYONU

Nano partikül üretim yöntemlerinde iki farklı uygulama bulunmaktadır. Bunlardan biri yukarıdan aşağıya üretim, diğeri ise aşağıdan yukarıya üretilmektedir. Yukarıdan aşağıya üretim olarak bilinen yaklaşım, kullanılmakta olan ürünün boyutunun öğütme vb. işlemlerle küçültülmesidir. Bu yöntem, nano partiküller üretmek için kaba parçacıkları yapısal olarak bozarak, plastik deformasyona uğratmayı amaçlamaktadır [132]. Yukarıdan aşağıya olarak adlandırılan bu üretim yöntemi, elementel, karmaşık ve amorf yapıdaki partikül tozlarının üretimleri için idealdir [133]. Aşağıdan yukarıya üretim yaklaşımı ise kimyasal işlemlerle atom ve moleküllerinin bir araya getirilerek partikül boyutunun büyümesi sonucu malzemenin sentezlenmesini içermektedir. Atomik ve moleküler bileşenler, daha büyük sistemler, kümeler, organik kafesler, çok moleküllü yapılar ve sentetik makromoleküller oluşturmak için düzenlenmiş koşullar altında bir araya getirilir (Şekil 3.1). Yukarıdan aşağıya üretim yaklaşımında, püskürtme yöntemi ve bilyeli öğütme işlemi gibi fiziksel metotlar kullanılmaktadır [134]. Aşağıdan yukarıya üretim yaklaşımında ise kimyasal yöntemler, katı faz, sıvı faz ve gaz fazında gerçekleştirilen işlemler olarak tanımlanabilir [135]. Bu yöntemler arasında, aerosol prosesleri, sol-jel yöntemi, fiziksel buhar biriktirme yöntemi, kimyasal buhar biriktirme yöntemi, hidrotermal yöntem yer almaktadır [125,130,131].



Şekil 3.1. Nano partikül üretim yöntemleri.

Hidrotermal yöntem, saf metal oksit nano partiküllerinin üretilmesi için en etkili yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir. Bu yöntemde, yüksek sıcaklık ve basınçta heterojen bir reaksiyondan faydalanarak, normal sıcaklık ve basınç altında çözünmeyen bileşiklerin oluşumu gerçekleştirilmektedir. Kristal üretme işlemi, çelik bir basınçlı kap olan otoklavlarda gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde erime noktası

düşük, buhar basıncı yüksek ve termal bozulmaya sahip nihai ürün elde edilmektedir. Bu yöntemdeki büyük dezavantajlar, maliyeti yüksek otoklavlara sahip olmak, reaksiyon süresi boyunca olası güvenlik tehlikeleri ve reaksiyonu görmek için herhangi bir yöntemin bulunmamasıdır [136].

Nano partiküller, boyut seçeneklerine göre farklı gruplara ayrılmıştır. Sıfır boyutlu nano partiküllere (0D) örnek olarak kuantum noktaları verilebilir. Yüksek yüzey alanı/hacim oranına sahip, gelişmiş optik ve elektronik özellikleri olan bu nano partiküller, özellikle biyosensörlerde ve ilaç sanayisinde kullanılmaktadır [137]. 0 boyutlu nano partiküllerin 3 boyutu da nano boyutta olduğu için 0 (sıfır) boyut olarak adlandırılmaktadır. Tek boyutlu nano partiküllere (1D) örnek olarak nanoteller, nanotüpler ve nanofiberler verilebilir. Nanoteller genellikle silindirik, nanotüpler boru şeklinde ve nanofiberler ise uzun ince lifler olarak görülmektedir. Bu tip nano partiküller tek yönde büyüebilmektedirler. Yüksek en boy oranına sahip olan bu nano partiküller, yüksek mekanik özelliklere sahiptir [138]. İki boyutlu nano partiküllere (2D) örnek olarak grafen, altıgen bor nitrür ve MXene nano partikülleri verilebilir. Bu tip nano partiküller, ultra ince yapılara sahip olmasının yanında yüksek yüzey alanıyla beraber önemli derecede mekanik dayanım göstermektedirler [139]. İki boyutta da genişleyebilme özelliğine sahip bu tip nano partiküller, grafitin pul pul ayrılarak grafenin keşfedilmesiyle ortaya çıkmıştır [140]. Üç boyutlu nano partiküllere (3D) örnek olarak ise nano demetler ve çoklu nano katmanları verilebilir. Bu tip nano partiküller, geniş yüzey alanı, karmaşık iç yapısıyla beraber yüksek mekanik dayanım göstermektedirler [141].

İki boyutlu nano partiküller, aşınma mekanizmalarında yüksek derecede öneme sahiptir. İlk olarak, nano tabakaların çok küçük boyutta olmasından dolayı, sürtünen yüzeylerin ara boşluklarına nüfuz edebilmektedir. Normal kuvvet altında, sürtünen yüzeylerin göreceli hareketi, nano tabakaların ara katmanlarının kaymasına yol açan gerekli kesme gerilimini sağlayarak, sürtünme ve aşınmayı azaltmaktadır. İkinci olarak, kayan yüzeylerin temas alanında tribofilm oluşumu meydana gelmektedir [142,143]. Başlangıçta oluşan tribofilm, iki sürtünme yüzeyini doğrudan temastan ayıran koruyucu bir film görevi görmektedir. Ancak kayma devam ettikçe artan ısı, yağlayıcılar ile altlık arasındaki temas yüzeylerinde, tribokimyasal bir reaksiyon

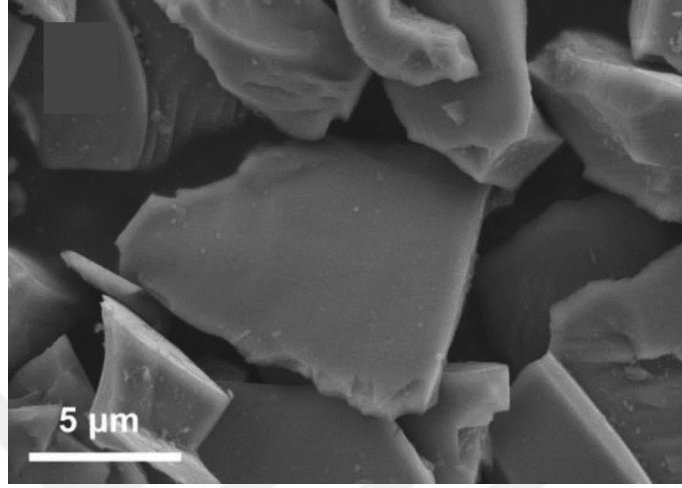
tetiklenir, bu durum koruyucu filmin yırtılmasına ve yeni bir filmin tekrar oluşmasına yol açmaktadır. Bu yeni filmin, tribolojik davranışı önemli ölçüde arttırdığı bilinmektedir [144]. Ayrıca, kayma sırasında oluşan yüksek sıcaklık, nano tabakaları eriterek temas yüzeylerindeki mikro delikleri, boşlukları ve iç bükey alanları doldurmalarını sağlayarak sürtünmeyi ve aşınmayı azaltmaktadır [145].

Sentezlenen nano partiküllerin boyutları, stabiliteleri, morfolojileri, kristal yapıları, elementel bileşimleri vb. karakterizasyon işlemlerinin yapılması, kullanım amaçlarına göre seçim kriterlerini belirlemede önemli rol oynamaktadır. Karakterizasyon işlemlerinde, nano partiküllerin partikül miktarları, stabilitesi ve optik özelliklerini belirlemek için UV-VIS analizi gerçekleştirilmektedir. Konsantrasyonu, yüzey analizi için FT-IR analizi, morfoloji, boyut ve kristal yapı için geçirimli elektron mikroskobu (TEM) ve SEM analizleri, yüzey topolojisi, pürüzsüzlüğü, yüzey alanı ve hacim dağılımı için AFM analizi, nano partikül kristalindeki elektron yoğunluğunu ve düzlemlerini inceleyebilmek için XRD analizi, elemental bileşim ve film kalınlığı analizi için EDS ve XRF analizleri kullanılmaktadır [125,146].

3.2. 2D DEMİR OKSİT NANO PLAKALAR

Düşük maliyetleri, toprakta bol miktarda bulunması ve nispeten düşük çevresel etkileri nedeniyle demir oksitler, günümüzde ağırlıklı olarak optik, elektronik, manyetik ve mekanik alanlarda kullanılan cazip malzemelerdir [147,148]. Bilinen en eski fonksiyonel materyallerden olmasına rağmen nano boyuttaki demir oksitlerin üretimi ve sonucunda ortaya çıkan yeni özellikler, gelişen teknolojiyle beraber farklı alanlarda kullanılmaktadır. Nano boyutta demir oksitler, süper kapasitörlerde, lityum iyon pillerde, biyomedikal ve endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır [149,150]. Partiküller atom boyutuna indirildiğinde, yoğunlukları ortadan kalkmakta ve oluşan filmler kendi özellikleriyle farklı fazlar olarak kabul edilmektedir. Nano boyuttaki demir oksitler, metal oksit yapıları bir nano malzeme olup, sürtünme çiftinin yüzeyine yapışma özellikleri bulunmaktadır. Dolayısıyla metal temasını engelleyerek ve düşük kesme gerilimine sahip koruyucu bir katman oluşturarak sürtünmenin düşmesine sebep olmaktadır. Ayrıca 2D yapısı sayesinde birden fazla katman halinde oluşan yağ filmi kendini yenileyerek kararlılığını sürdürmektedir [63]. Yüksek yük

taşıma kapasitelerinin yanı sıra yüksek sıcaklık uygulamaları için de idealdirler. Özellikle demir alaşımları üzerinde tribo katman oluşturma kabiliyetleri yüksektir [64]. Demir oksit nano plakaların SEM görüntüleri Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Demir oksit nano plaka SEM görüntüsü [151].

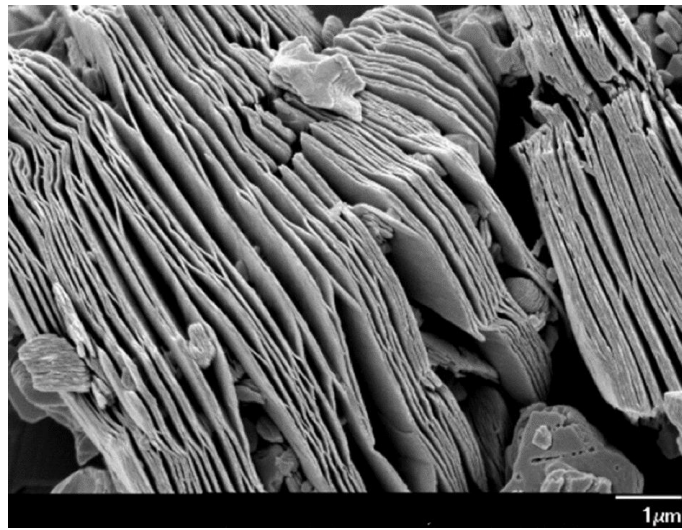
3.3. 2D MXENE NANO PLAKALAR

MXene ($Ti_3C_2T_x$), iki boyutlu bir nano partikül olup 2011 yılında Naguib ve arkadaşları tarafından keşfedilen geçiş metali karbürleri, nitrürleri ve/veya karbonitrürleridir [152].

MXene nano partikülünün genel formülü $M_{n+1}X_nT_z$ ($n = 1, 2$, ya da 3) ya da $M_{1.33}XT_z$ olarak ifade edilmektedir. Formülde bulunan “M” bir erken geçiş metalini, “X” ise C veya N elementini, “T_z” ise hidroksil, oksijen ve flor molekülleri gibi farklı kompozisyonları belirtmektedir. MXene nano partiküllerinin yapısı, karbon ve ek nitrojen katmanlarıyla serpiştirilmiş 2-4 aralıklı katmanlardan oluşmaktadır [153,154]. Yüksek elektrik iletkenliği, yüksek termal kararlılık, geniş yüzey alanı ve mekanik mukavemet gibi olağanüstü özelliklerinden dolayı büyük ilgi görmektedir [153,155]

MXene nano partikülleri aynı zamanda geçiş metali ile karbon ve nitrojen gibi diğer elementler arasındaki güçlü kovalent bağdan kaynaklanan yüksek mekanik özelliklere sahiptir. Birçok çalışma, MXene nano partiküllerinin mekanik özelliklerini açıklamış

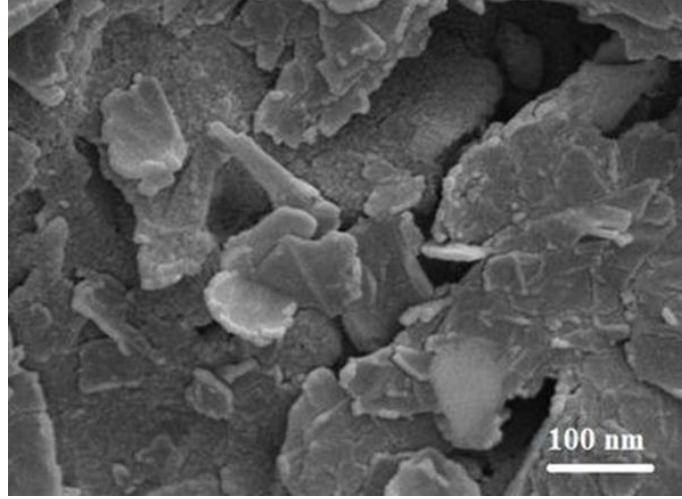
ve MXenelerin üretimlerinin gerçekleştirildiği MAX fazına kıyasla sertliğini ortaya koymuştur [153]. Al atomlarının çıkarılması yoluyla MXene'deki M-X bağının dayanıklılığında önemli bir artış nedeniyle, birkaç fonksiyonelleştirilmemiş ve fonksiyonelleştirilmiş MXene için yüksek elastik sabit değerleri elde edilmiştir. OH, F ve O atomları ile MXenelerin fonksiyonelleştirilmesi sonrasında elastik sabit değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir [153]. Özellikle, Ti_2CO_2 , tek eksenli ve çift eksenli gerilmeler altında büyük bir deformasyon göstermiştir. Ayrıca, MXene nano partiküllerinin kırılma dayanımı ve Young modülü sırasıyla 17.3 ± 1.6 ve 333 ± 30 GPa'dır, bu da MXene'nin diğer 2D nano malzemelere (grafen oksit ve MoS_2) göre daha yüksek Young modülüne sahip olduğunu göstermektedir. MXene nano partikülünün bu olağanüstü özellikleri, piller, süper kapasitörler, elektromanyetik koruma, kompozitler ve nanoakışkanlar gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmasına olanak sağlamıştır [156–159]. İlk MXene ($Ti_3C_2T_x$) 2011'de keşfedilmiştir [152]. Ancak MXene nano partikülleri üç yıl sonra ilk kez sıvı yağlamada kullanılmıştır [68]. 2016'da MXene ($Ti_3C_2T_x$), ilk kez katı yağlamada ve polimerde bir güçlendirme aşaması olarak kullanılmış ve kompozitlerde de olağanüstü tribolojik ve mekanik özellikler sergilemiştir [160]. 2018'de MXene nano partikülü, katı bir yağlayıcı olarak kullanılmıştır [72]. Son yıllarda MXene nano partikülleri tribolojide de hızla gelişmiştir. 2021'de MXene nano partikülleri hem katı hem de sıvı yağlamada süper yağlamayı başarıyla gerçekleştirmiş, olağanüstü yağlama etkileri göstermiştir [161,162]. MXene nano partikülünün SEM görüntüsü Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. MXene nano partikülü SEM görüntüsü [163].

3.4. 2D GRAFİTİK KARBON NİTRÜR NANO PLAKALAR

Karbon nitrür, C ve N atomlarından oluşan bir malzeme sınıfını ifade eder. “Karbon nitrür” terimi, değişen kimyasal yapılara ve özelliklere sahip birkaç farklı bileşiği ifade etmektedir [164]. Grafitik karbon nitrür (g-C₃N₄), grafit benzeyen tek katmanlı bir yapıdadır. Yüksek termal ve kimyasal stabiliteye sahip olması ve suda kolayca dağılması nedeniyle birçok alanda yeni bir 2D nano malzeme olarak büyük ilgi görmektedir [165,166]. g-C₃N₄, katmanlar arası hidrojen bağı nedeniyle yüksek Young modülüne (310–350 GPa) ve sertlik değerine (20–25 GPa) sahiptir [167,168]. g-C₃N₄'ün C ve N atomlarından gelen güçlü kovalent bağlara ve zayıf ara katman van der Waals kuvvetine sahip katmanlı yapısı, onu tribolojik uygulamalar için çekici bir nano malzeme haline getirmektedir [169]. Ayrıca yüksek sıcaklıklar altında toksik maddeler açığa çıkarmadan kararlılığını koruyabilir [78,79]. g-C₃N₄ nano partikülü güneş pillerinde [170], süper kapasitörlerde [171], foto katalizörlerde [172], pillerde [173] ve nano katkı maddeleri olarak [80] kullanılmaktadır [174]. g-C₃N₄ nano partikülünün SEM görüntüsü Şekil 3.4’te verilmiştir.



Şekil 3.4. g-C₃N₄ nano partikülü SEM görüntüsü [175].

BÖLÜM 4

MATERYAL VE METOT

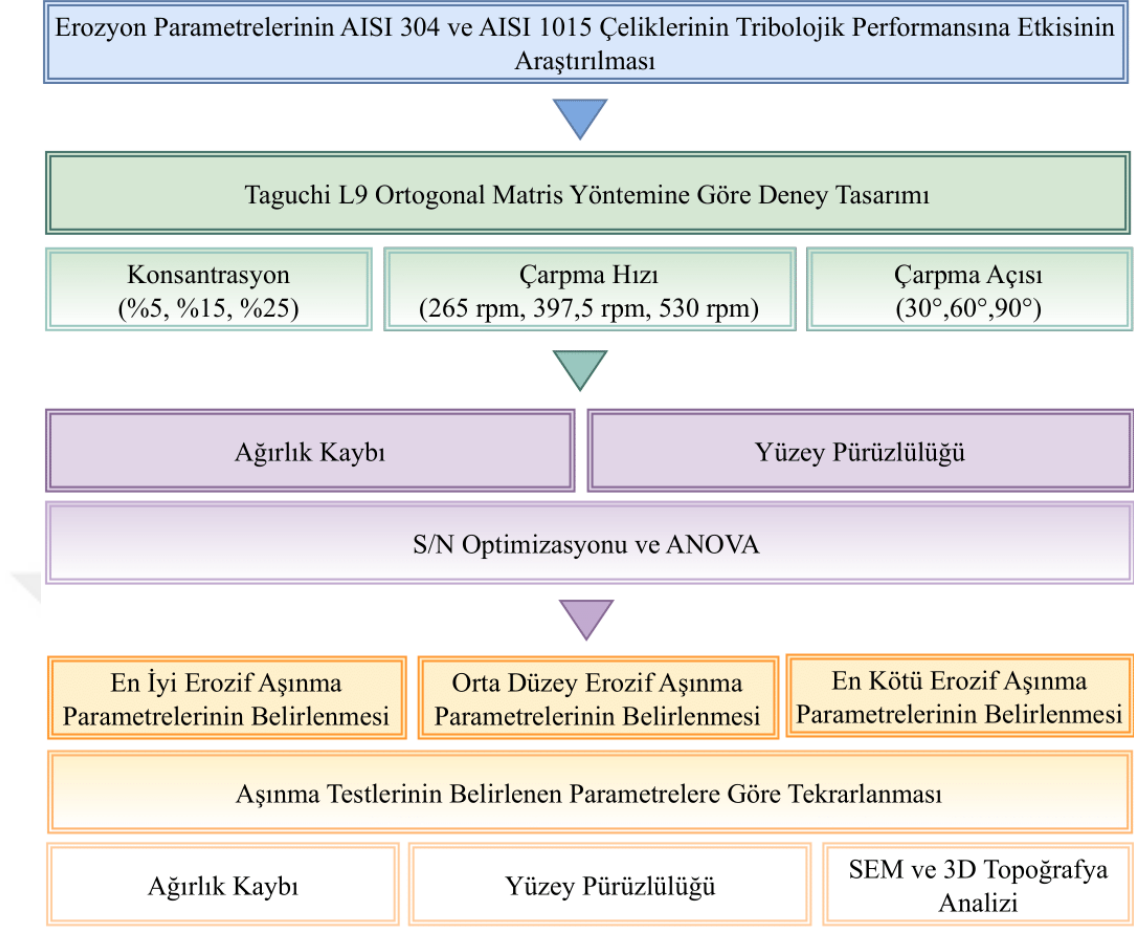
Bu çalışma iki ayrı aşınma deney setinden oluşmaktadır. Birinci deney setinde, ticari olarak elde edilen AISI 1015 ve AISI 304 numuneleri, mikro boyutta aşındırıcı olan SiO_2 'nin kullanıldığı sulu ortam erozif aşınma deneylerine tabi tutulmuşlardır. İkinci deney setinde ise ticari olarak elde edilen AISI 1015, MgZn ve AlSi18 numuneleri, sentezlenen üç farklı nano partikülün (Fe_2O_3 , MXene ve g- C_3N_4) MY içerisine eklendiği nano partikül katkılı MY ortamında ball-on-flat aşınma deneylerine tabi tutulmuşlardır.

4.1. EROZİF ORTAM AŞINMA DENEYLERİ

Partiküllerin, akışkan ortamda taşınması daha güvenli, daha uygun maliyetli ve alternatif sistemlere göre daha az bakım gerektirdiğinden, birçok endüstriyel tesis bunu kullanmayı tercih etmektedir. Taşıma ortamı, uygulama çeşidine bağlı olarak gaz veya sıvı olabilir. Bu sistemler, yüksek fırınlardan çıkan granül cürufun, termik santrallerdeki atık küllerin ve madencilik sektöründe cevherlerin uzun mesafelere taşınmasında tercih edilmektedir. Bu sistemlerin etkinliğini artırmak ve tesisin aksama süresini azaltmak için ekipmanın maruz kalacağı partikül aşınma direnci üzerine araştırmalar yapılmıştır.

Bu araştırmaların deneysel ölçekte yapılması, potansiyel açıdan büyük harcamaların önlenmesinin yanı sıra, malzemelerin kullanım ömrüne odaklı bir yaklaşımın uygulanmasını da kolaylaştırdığı düşünülmektedir.

Erozif aşınma karakterizasyonu için izlenen metodoloji Şekil 4.1'de verilmiştir. Belirlenen bu metodolojiye göre çalışma, iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, parçacık çarpma açısı, çarpma hızı ve konsantrasyon parametrelerinin AISI 1015 ve 304 çeliği üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla Taguchi yönteminin L9 ortogonal matrisine göre bir deney tasarımı yapılmıştır. Element etkisi ile aşındırıcı davranış arasındaki ilişki, her iki malzeme için elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak belirlenmiştir. 3 seviyeli bulamaç konsantrasyonu (ağırlıkça %5, %15, %25), 3 seviyeli darbe hızı (265 rpm, 397,5 rpm, 530 rpm) ve 3 seviyeli darbe açısı (30°, 60°, 90°) giriş parametreleri olarak seçilmiştir. Ağırlık kaybı ve yüzey pürüzlülüğü sonuçları S/N ve ANOVA kullanılarak analiz edilmiştir. İstatistiksel analiz sonucunda en iyi, orta ve en kötü deney parametreleri belirlenerek çalışmanın ikinci aşamasına geçilmiştir. Aşınma testlerinin bu parametrelerle tekrarlanmasıyla yüzey pürüzlülüğü ve ağırlık kaybı sonuçları sayısal olarak elde edilmiştir. Ayrıca aşınma yüzeyleri, SEM, EDX ve 3D topografya yöntemleriyle incelenmiş, yorumlanmış ve tartışılmıştır.



Şekil 4.1. Erozyon aşınma deney setinin metodolojisi.

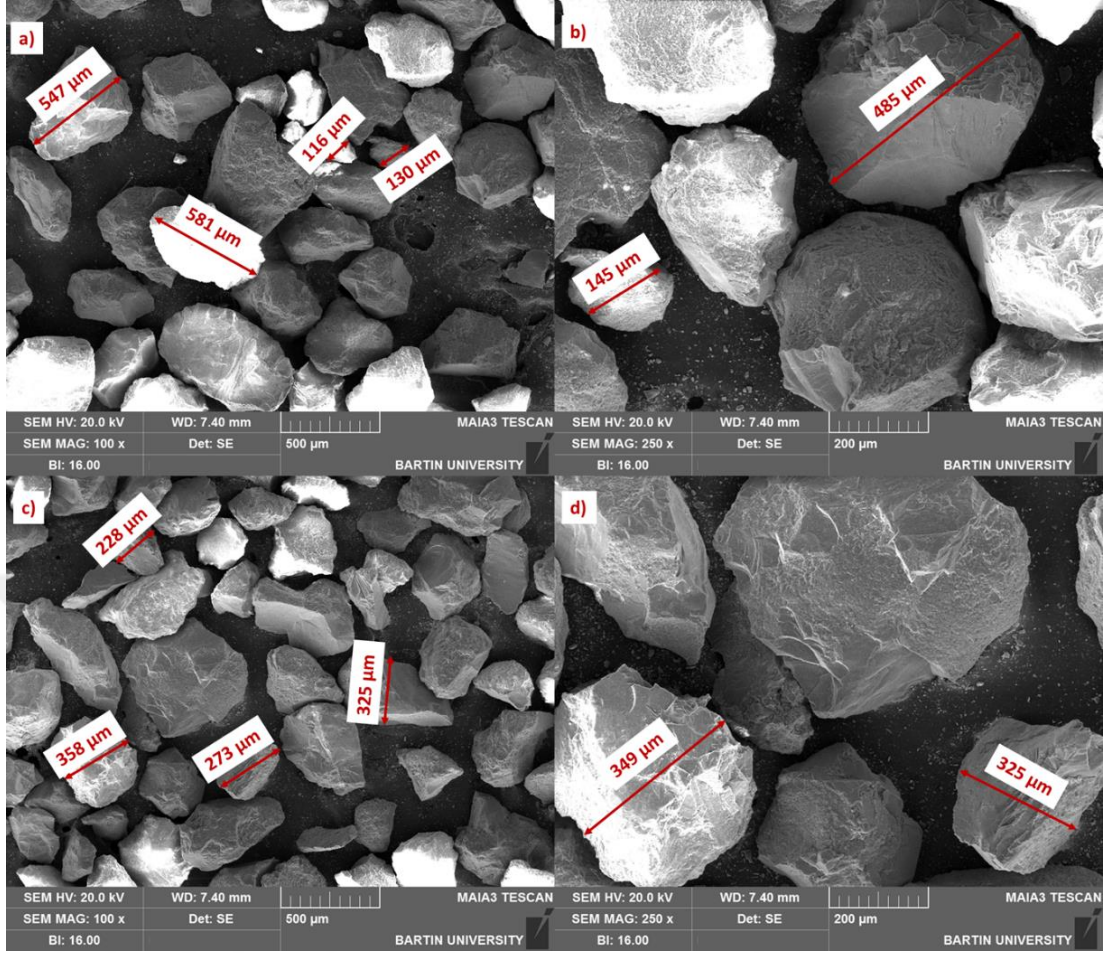
4.1.1. Aşındırıcı Ortam ve Aşındırıcı Parçacıkların Hazırlanması

Çalışma kapsamında erozyon aşındırıcı olarak SiO_2 kullanılmıştır. SiO_2 sertliği sayesinde boru içerisinde partikül taşıyan sistemlerin simülasyonunda kullanılabilir. Özellikle deniz kumu, yüksek fırın cürufu ve tahıl gibi yüksek sertlikteki malzemelerin taşıma sırasındaki aşınma etkisi SiO_2 kullanılarak modellenilebilir. Sulu çamur karışımını hazırlamak için ilk olarak kuru elek analiz yöntemi ile silika tozunun tane boyut dağılımı belirlenmiştir. Eleme işlemi, partiküllerin boyutlarına göre sınıflandırılması, belirli bir boyutlu delik veya açıklıktan geçme veya orada kalma kapasitelerine dayanarak gerçekleştirilen bir süreçtir. Bu süreç, partikül boyutunu belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Eleme işleminde, delik sayısını birim alan başına gösteren mesh kavramı kullanılarak elekler boyutlarına göre sınıflandırılmaktadır. Eleme sürecine en büyük mesh boyutuyla başlanmakta ve daha sonra daha ince mesh boyutlarıyla devam edilmektedir. Eleme işleminden sonra her bir elek üzerinde kalan

malzemenin tartılması ile onun toplam miktarına olan oranını hesaplanmış ve böylece parçacık boyutu tespit edilmiştir. ASTM 11:82 standardına göre laboratuvar ortamında gerçekleştirilen eleme işlemi Çizelge 4.1’de verilmiştir. Analiz sonucunda boyut dağılımının yaklaşık %66’sının 180 µm ile 425 µm arasında olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 4.1). Daha sonra silika partikülleri sırasıyla 425 µm ve 180 µm açıklıklı eleklerden kuru elek yöntemiyle elenmiştir. Eleme işlemi sonrasında ~ 302,5 µm boyutuna sahip partiküller elde edilmiştir. Silika parçacıklarının ağırlıkça %5, %15 ve %25 konsantrasyonda suyla karıştırılmasıyla bir bulamaç karışımı elde edilmiştir. Her deneyden sonra bulamaçtaki katı parçacıklar, temizlenmiş ve elenmiş yeni parçacıklarla değiştirilmiştir. Kullanılan aşındırıcı parçacıkların boyutları ve geometrileri Karabük Üniversitesi MARGEM laboratuvarında bulunan Carl Zeiss Ultra Plus Gemini marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi ile incelenmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde partiküllerin keskin köşeleri bulunan, düzenli ve boşluksuz bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Eleme işlemi öncesi ve sonrasında aşındırıcı silika tozunun tane boyutlarının birbirine yakın boyutlarda elde edildiği Şekil 4.2’de görüntülenmiştir.

Çizelge 4.1. ASTM 11:82 standardına göre yapılan eleme işleminde kullanılan aşındırıcı partiküllerin boyutsal dağılımı.

Elek Açıklığı (µm)	Ağırlık (gr.)	Fark (%)	Elek Altındaki Parçacık Kümülatif (%)	Elek Üstündeki Parçacık Kümülatif (%)
+600	0,15	0,4	100,00	0,14
-600 +500	2,25	2,06	99,86	2,20
-500 +425	7,71	7,07	97,80	9,28
-425 +355	13,16	12,07	90,72	21,55
-355 +180	53,00	48,62	78,65	69,97
180 +150	10,80	9,91	30,03	79,88
-150 +106	12,18	11,17	20,12	91,06
-106	9,75	8,94	8,94	100,00
TOPLAM	109,00	100,00		

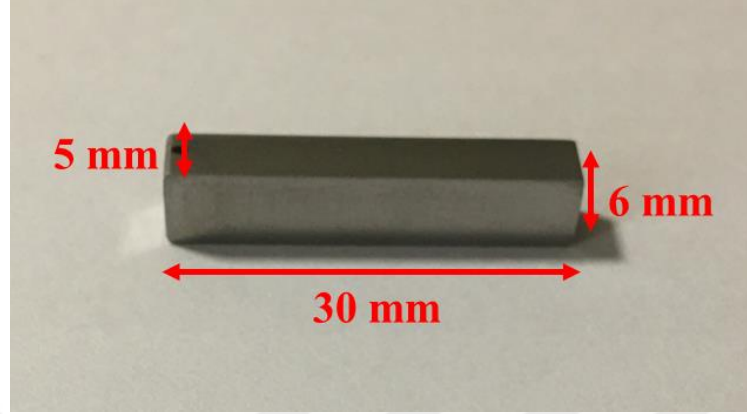


Şekil 4.2. Aşınma deneylerinde kullanılan aşındırıcı tozların boyutlarına ve geometrilerine ilişkin SEM görüntüleri. a) 100x yakınlaştırma oranında eleme öncesi parçacık boyutları, b) 250x yakınlaştırma oranında eleme öncesi parçacık boyutları, c) 100x yakınlaştırma oranında eleme sonrası parçacık boyutları, d) 250x yakınlaştırma oranında eleme sonrası parçacık boyutları.

4.1.2. Malzemelerin Seçimi ve Hazırlanması

Malzeme seçimi erozif aşınmayı kontrol etmenin önemli bir aşamasıdır. Bu çalışma kapsamında mevcut literatür taramasına dayanarak seçilen malzemeler kullanılmıştır. AISI 1015 ve AISI 304 numuneleri erozif aşınma deneylerinde kullanılmıştır. Bu malzeme tiplerinin seçilmesinin ana nedeni ise türbin kanatları, sıvı veya cüruf taşıyan boru hatları, dirsekler vb. gibi su içerisinde katı parçacık ileten bileşenlerde, pompa malzemelerinde ve çarklarında tercih edilmesidir [176–179]. Kullanılan malzemeler yoğun erozif aşınmanın olduğu endüstriyel koşullarda tercih edilmektedir. Seçilen

numuneler 30 x 5 x 6 mm boyutlarında hazırlatılarak ticari olarak elde edilmiştir (Şekil 4.3). Kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

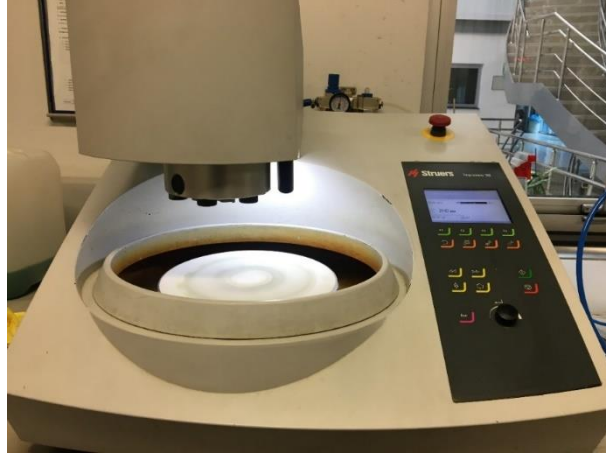


Şekil 4.3. 30 x 6 x 5 mm boyutlarında hazırlanan deney numunesine ait görüntü.

Çizelge 4.2. Çalışma kapsamında kullanılan numunelerin kimyasal kompozisyonları.

AISI 304								
Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
% Ağırlık	0,23	0,77	1,02	0,01	0,02	16,83	0,04	7,48
AISI 1015								
Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
% Ağırlık	0,17	0,49	0,64	0,05	0,08	0,01	0,03	0,07

Hazırlanan numuneler, deneyler öncesi ve sonrasındaki mikro yapı incelemeleri için Struers marka otomatik zımpara-parlatma cihazında 180-1200 μm partikül boyutlarına sahip SiC zımpara kağıdı ile zımparalanmış ve sonrasında 3-1 μm boyutlu elmas solüsyon ile aynı cihazda parlatılmıştır (Şekil 4.4). Parlatılan numuneler saf su ile temizlenmiş ve sıcak hava ile kurutulmuştur. Başlangıç ağırlıkları 0,1 mg hassasiyette KERN marka hassas terazide ölçülmüştür (Şekil 4.5).



Şekil 4.4. Numunelerin parlatma işlemlerinde kullanılan parlatma cihazı.



Şekil 4.5. Hassas terazi.

4.1.3. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Ticari olarak elde edilen numunelerin erozif aşınma testleri ve bu testler sonucu ağırlık kaybı, yüzey pürüzlülüğü sonuçlarının kıyaslanması amacıyla mekanik özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu sebeple numuneler Karabük Üniversitesi MARGEM laboratuvarında bulunan QNESS10 A+ markalı tam otomatik mikro sertlik ölçüm cihazı ile ASTM E384 standardına göre 15 s. bekleme süresiyle 500 g yük altında Vickers sertlik ölçme metodu kullanılarak ve her bir numune için 5 adet ölçüm alınarak

gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümlerin ortalaması alınarak numunelerin mikro sertlik değerleri belirlenmiştir. Mikro sertlik ölçme cihazı Şekil 4.6’da verilmiştir.

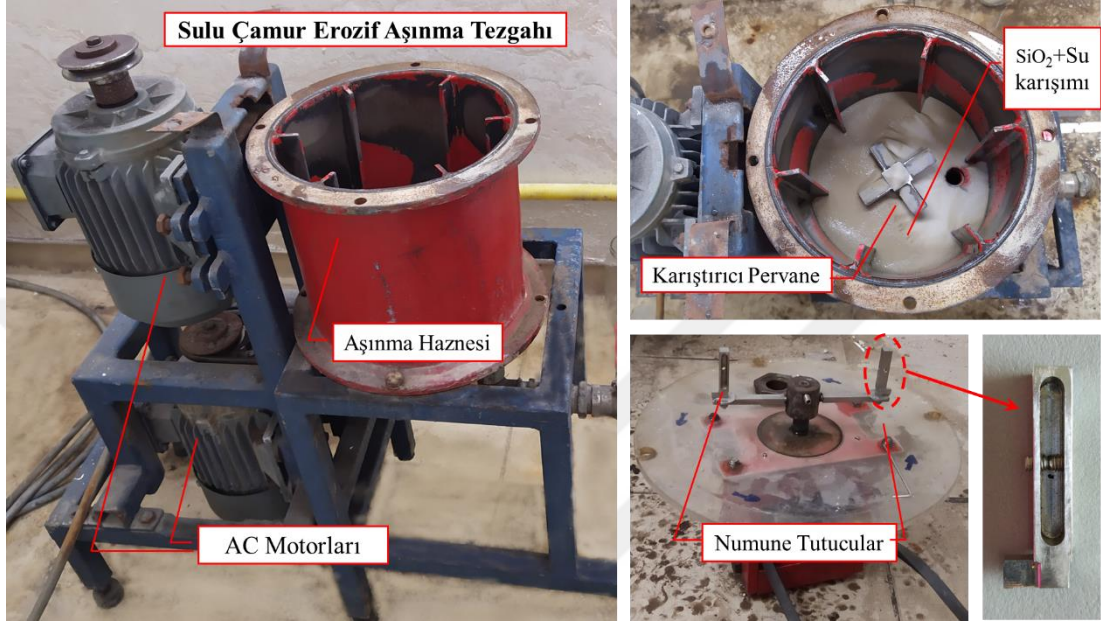


Şekil 4.6. Mikro sertlik ölçme cihazı.

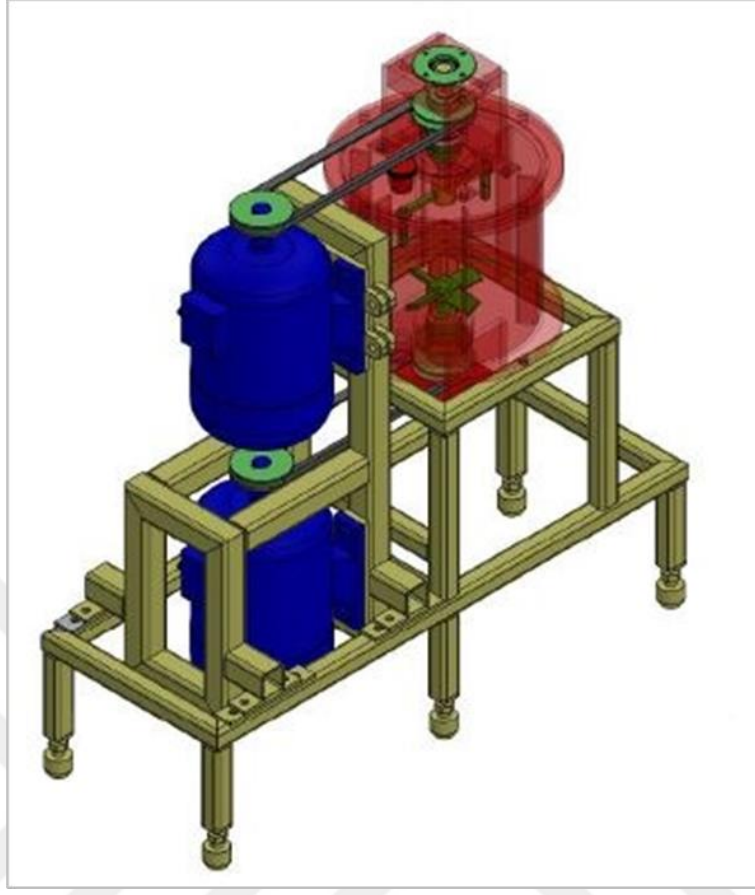
4.1.4. Eroziyon Aşınma Deney Düzenekleri

Eroziyon aşınma deneyleri Moore ve arkadaşları tarafından tasarlanan deney düzeneklerinin bir benzeri olan sulu çamur eroziyon aşınma tezgahında gerçekleştirilmiştir [180]. Eroziyon aşınma tezgahındaki 10 L hacme sahip haznenin iç çapı 240 mm’dir. Haznenin taban bölümünde bulunan karıştırıcı pervane, katı parçacıkların su içerisindeki sürekli hareketini sağlayarak, eroziyon aşınma deneyleri esnasında çökmesini engellemektedir. Karıştırıcı pervane hazne dışından kayış kasnak mekanizmasıyla 1,1 kW gücünde hızı ayarlanabilen bir AC motorla çalıştırılmaktadır. Eroziyon aşınma tezgahında 30 x 5 x 6 mm boyutlarına sahip, 30°’lik partikül çarpma açısına göre sabitlenebilen numune tutucular yer almaktadır. Numuneler, eroziyon aşınma tezgahının kapağına sabit şekilde eklenen aparatlara bağlanmıştır. Kapak malzemesi akrilikten oluşmaktadır. Ayrıca akrilik kapakta bulunan numune tutucular, tezgahın alt kısmındaki karıştırıcı pervanenin ters yönünde dönen 1,1 kW gücünde ikinci bir AC motor bağlı çalışmaktadır. Deneyler, eroziyon aşınma tezgahı haznesine su ile birlikte çeşitli yüzde oranlarıyla aşındırıcı olarak eleme işlemi yapılan SiO₂ mikro partikülleri eklenerek

gerçekleştirilmiştir. Eklenen sulu bulamaç akrilik kapakla kapatılmış ve deneyler başlatılmıştır. Her deney sonrası sulu bulamaç boşaltılmış hazne su ile temizlenmiş sonrasında yapılacak deneyler için yeni bir sulu karışım hazırlanmıştır. Eroziyon aşınma tezgahı ve üç boyutlu model görüntüleri Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.7. Eroziyon aşınma tezgahı [1].



Şekil 4.8. Erozif aşınma tezgahı üç boyutlu model görüntüsü [1].

4.1.5. Erozif Aşınma Deneylerinin Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi

Deneylerde kullanılacak numuneler, Şekil 4.7’de verilen numune tutuculara bağlanarak erozif aşınma testleri başlatılmıştır. Deneyler oda sıcaklığında, 3 tekrarlı olarak, 1 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. Deney numunelerinin, deney öncesi ve sonrası 0,1 mg hassasiyete sahip KERN marka hassas terazide tartılarak ortalama ağırlık kaybı verileri hesaplanmıştır. Deney sonuçları ilk aşamada yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve ağırlık kaybı (gr.) ölçümlerine göre değerlendirilmiştir. Aşınma deneyleri sonrasında elde edilen veriler, SEM, EDX ve 3D topografya görüntüleri ile analiz edilmiştir. Deney parametreleri, Minitab 18 ticari yazılımı kullanılarak, Taguchi kesirli faktöriyel yönteminin L9 ortogonal matrisine göre belirlenmiştir (Çizelge 4.4). Deney parametrelerinde, giriş parametreleri olarak üç seviyeli ağırlıkça SiO₂ konsantrasyon oranı (%5, %15, %25), üç seviyeli çarpma hızı (265 rpm, 397,5 rpm, 530 rpm) ve üç seviyeli partikül çarpma açısı (30°, 60°, 90°), çıkış parametreleri olarak

da ağırlık kaybı (gr.) ve ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) verileri incelenmiştir. Aşınma parametreleri Çizelge 4.3'te verilmiştir. Parametrelerin seçimi, sulu çamur erozif aşınma testlerinde kullanılan literatüre bağlı olarak gerçekleştirilmiştir [176,177,180,181].

Çizelge 4.3. Erozif aşınma parametreleri.

Aşınma Parametreleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Konsantrasyon (%)	5	15	25
Hız (rpm)	265	397,5	530
Çarpma Açısı (°)	30	60	90

Deneyssel veriler sinyal/gürültü (S/N) ve varyans analizi (ANOVA) kullanılarak analiz edilmiştir. Giriş parametrelerinin çıkış parametreleri üzerindeki etkisi ANOVA testi ve sayısal modelleme kullanılarak analiz edilmiştir. Analizler sonucunda en iyi, orta, en kötü deney parametreleri belirlenmiş ve bu analizlerin doğrulama deneyleri, her bir numune çeşidine göre ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir (Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6). Deney tasarımı giriş parametrelerinin anlamlılığı “p” değeri ile ifade edilmektedir. Değişkenlerin %95 güven aralığında anlamlı sayılabilmesi için p değerinin 0,05’ten küçük olması gerekmektedir. 0,05 ile 0,1 arasındaki değerlerin kabul edilebilir düzeyde anlamlılığa sahip olduğu söylenmektedir [105,182]. Belirlenen parametrelerin etki oranları, her bir kareler toplamı (SS) değerinin toplam SS değerine bölünmesiyle hesaplanmıştır. Regresyon katsayısı (R-Sq) ve genişletilmiş regresyon katsayısı (R-Sq (adj)) değerleri deneyssel modele analiz sonucunda ortaya çıkan sonuçları açıklama yeteneği kazandırmaktadır. R-Sq (adj) değerinin %70’ten büyük olması deneyssel modelin anlamlılığı için yeterli kabul edilmektedir [13,183]. S/N analizi ise Taguchi yönteminin temel ölçüm kriteridir [184–186]. Yüksek S/N oranı, hedef fonksiyona (maksimizasyon veya minimizasyon) yakınlığı ve deneyssel önemi göstermektedir. Bu çalışmada, ağırlık kaybı ve yüzey pürüzlülüğü parametreleri için hedef fonksiyon, minimizasyondur. Başka bir deyişle yüksek S/N oranı, ağırlık kaybı ve yüzey pürüzlülüğü verilerinin minimizasyon hedefine yaklaştığını göstermektedir. Buradan hareketle, bu çalışma için S/N analizi yapılırken hedef olarak “minimizasyon” seçilmiştir. En düşük yüzey pürüzlülüğü ve ağırlık kaybını sağlayan

parametreler en yüksek S/N oranını göstermektedir. Taguchi yönteminin minimizasyon fonksiyonu Eşitlik 4.1’de verilmiştir.

$$\frac{S}{N} = -10 \log\left[\frac{1}{n}(\sum_{i=1}^n y_i^2)\right] \quad (4.1)$$

Eşitlik 5.1’deki “n” değeri deney sayısını, “y_i” değeri ise test sonuçlarını temsil etmektedir.

Çizelge 4.4. Taguchi L9 ortogonal matrisi deney tasarımı.

Deney No	Konsantrasyon (%)	Hız (rpm)	Çarpma Açısı (°)
1	5	265	30
2	5	397,5	60
3	5	530	90
4	15	265	60
5	15	397,5	90
6	15	530	30
7	25	265	90
8	25	397,5	30
9	25	530	60

Çizelge 4.5. AISI 304 numunesi için doğrulama deney tasarımı.

Deney Adı	Konsantrasyon (%)	Hız (rpm)	Çarpma Açısı (°)
En İyi	5	265	60
Orta	15	397,5	90
En Kötü	25	530	30

Çizelge 4.6. AISI 1015 numunesi için doğrulama deney tasarımı.

Deney No	Konsantrasyon (%)	Hız (rpm)	Çarpma Açısı (°)
En İyi	5	265	90
Orta	15	397,5	60
En Kötü	25	530	30

Bu çalışmada yer alan deneysel kurulum ve deney parametrelerinin olduğu şematik görsel Şekil 4.9’da verilmiştir.

gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde, aşındırıcı partiküllerin geometrisi ve boyutları, aşınan numunelerinin de aşınma mekanizmaları gözlemlenmiştir. Ayrıca SEM cihazı üzerinde bulunan EDX dedektörü ile noktasal ve bölgesel olarak analizler gerçekleştirilerek eroziv aşınma sonrası numunelerdeki aşınma karakterizasyonu tespit edilmiştir. Mikroyapı analizlerinde kullanılan SEM cihazı Şekil 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.10. SEM cihazı.

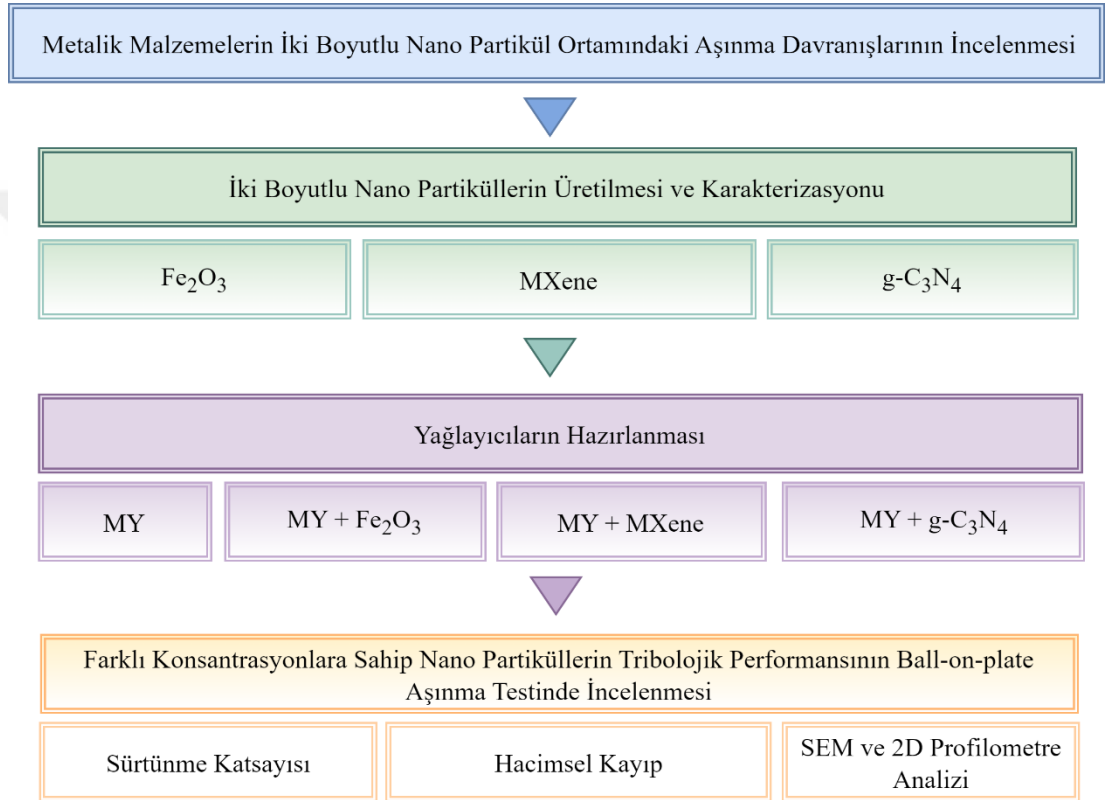
4.1.7. Yüzey Pürüzlülüğü ve 3D Topografya Analizleri

Aşınma deneyleri sonrası numunelerin yüzeylerinin pürüzlülük değerleri, Mitutoyo SurfTest SJ 304 marka yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile üç tekrarlı ölçüm yapılarak belirlenmiştir. 3D topografya analizleri ise Phaseview Zeoscope 3D mikroskop kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Topografya analizinde 2000 μm x 2000 μm alan taranarak renklenme ve pürüzlülük değerleri mikrograflar halinde gösterilmiştir. Renklendirme metodolojisinde kırmızı tonlar yükselteleri, mavi tonlar derinlikleri, sarı-yeşil tonlar ise düzlemsel bölgeleri ifade etmektedir.

4.2. İKİ BOYUTLU NANO PARTİKÜL ORTAMINDA AŞINMA DENEYLERİ

Tezin bu bölümünde, metalik malzemelerin iki boyutlu nano partikül ortamındaki aşınma karakterizasyonunu belirlemek amacıyla izlenen metodoloji Şekil 4.11’de

verilmiştir. Belirlenen bu metodolojiye göre çalışmanın ilk aşamasında, nano partiküllerin üretilmesi ve karakterizasyonu yapılmıştır. İkinci olarak, sentezlenen nano partiküllerin, seçilen aşındırıcı ortam olan MY içerisine farklı konsantrasyonlarla karıştırılma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Son olarak ise farklı nano partikül aşınma ortamlarında deneyler yapılarak tribolojik performanslar gözlemlenmiş ve analiz edilmiştir.

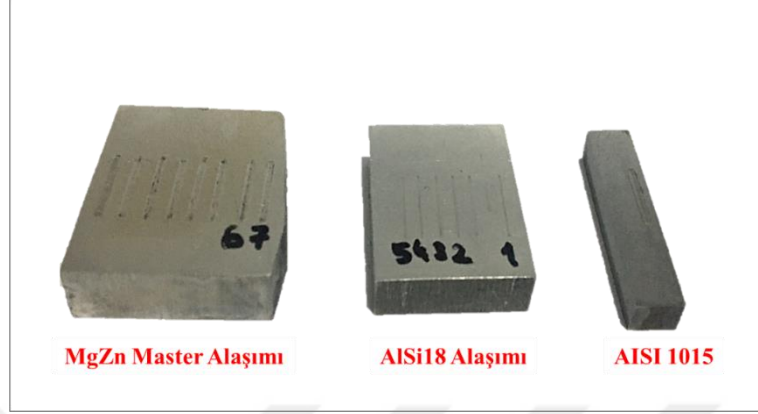


Şekil 4.11. Nano partikül ortamındaki aşınma deneylerinin metodolojisi.

4.2.1. Nano Partiküllerin Seçimi ve Hazırlanması

Bu çalışmada, aşınma ortamında kullanılmak üzere Fe_2O_3 nano partikülleri ve yine bu ortamlarda yağlayıcı özellikleri açısından üstün olan MXene ve $\text{g-C}_3\text{N}_4$ nano partikülleri sentezlenmiştir. Sentezlenen nano partiküller yağlayıcı ortamının içerisine eklenmiş ve aşınma performanslarına olan etkisi gözlemlenmiştir. Makine parçalarındaki aşınma tiplerini modellemek amacıyla bu deney setinde, aşınan numune olarak, AlSi18 alaşımı, MgZn Master alaşımı ve erozif aşınma deneylerinde de

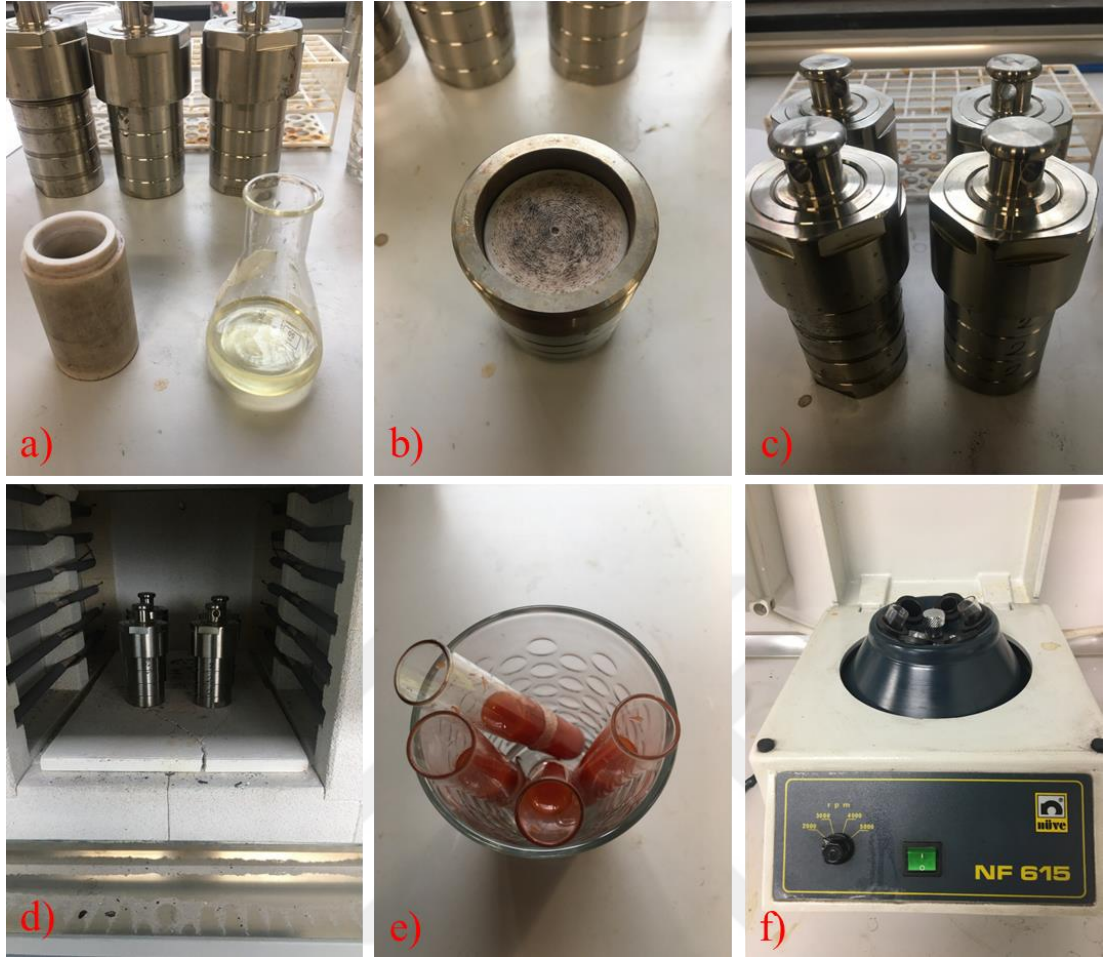
kullanılan AISI 1015 olmak üzere üç ayrı malzeme kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin görselleri Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12. Aşınma deneylerinde kullanılan numuneler.

4.2.1.1. İki Boyutlu Demir Oksit Nano Partikül Sentezi

Demir oksit partiküllerinin üretimleri hidrotermal yöntemle gerçekleştirilmiştir [130]. Bu amaçla teflon astar ve paslanmaz çelik otoklav kullanılmıştır. Öncelikle bir behere 20 ml saf su eklenmiştir. Daha sonra 30:60 g olacak şekilde $FeCl_3$ ve üre tartılarak bu beherlere eklenmiştir. $FeCl_3$ ve üre mikro partikülleri, Rokim marka olup ticari olarak elde edilmiştir. Eklenen bu bileşenler çözünene kadar mekanik olarak karıştırılmıştır. Çözünme işlemi gerçekleştikten sonra her bir beherdeki çözelti teflon astara aktarılmış ve ağzı sıkıca kapatılarak paslanmaz çelik otoklavlara eklenmiştir. Otoklavlar ise Protherm PLF 120/45 markalı yüksek sıcaklık kül fırınına aktarılmış ve fırın içerisinde $10\text{ }^{\circ}C/dk$ aralığında ısıtılarak sıcaklığı $150\text{ }^{\circ}C$ 'ye getirilmiştir. Bu sıcaklıkta 6 saat bekletildikten sonra oda sıcaklığına kadar dışarıda soğuması beklenmiştir. Soğuma işleminin ardından, içindeki çözeltiler cam tüplere aktarılarak 3000 rpm’de 20 dakika boyunca Nüve NF 615 marka santrifüj cihazında santrifüj işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem, çözeltilerde oluşan nano partiküllerin çökmesi için gerçekleştirilmiştir. Daha sonra cam tüplerin içindeki su kalıntısı dökülmüş ve kalan nano partiküller, kuruması için etüvde $60\text{ }^{\circ}C$ 'de bir gün boyunca bekletilmiştir. Üretim işlemi aşamaları Şekil 4.13’te verilmiştir.



Şekil 4.13. Hidrotermal üretim yöntemi işlem aşamaları. a) su, FeCl_3 ve üre karışımının hazırlanması, b) hazırlanan karışımın teflon astara aktarılması, c) teflon astarın paslanmaz çelik otoklava yerleştirilmesi, d) otoklavların kül fırınına yerleştirilmesi, e) fırından çıkan çözeltilerin görüntüsü, f) çözeltilerin santrifüj edilmesi.

4.2.1.2. İki Boyutlu MXene Sentezi

MXene yapısı ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$), MAX fazındaki A katmanının uzaklaştırılması ile elde edilen katmanlı boşluk içeren yapıdır. Bu yapının elde edilmesi için Mahmood ve arkadaşlarının uyguladığı yöntem kullanılmıştır [187]. Bu yapının incelenmesi için ticari olarak Nanografi firmasından elde edilen, %99'luk saflıkta ve 325 mesh partikül büyüklüğüne sahip mikro partikül MAX fazı olan Ti_3AlC_2 tozundan 2 gram alınarak ağzı kapaklı polietilen kaba aktarılmış ve üzerine 20 ml %40 konsantrasyonunda HF sıvısı damla damla eklenmiştir. Daha sonrasında polietilen kabın ağzı kapatılmış ve 24 saat süre boyunca 300 rpm hızda Velp ARE marka manyetik karıştırıcı ile karıştırılarak aşındırma (etching) işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemin ardından oluşan sıvı çözelti,

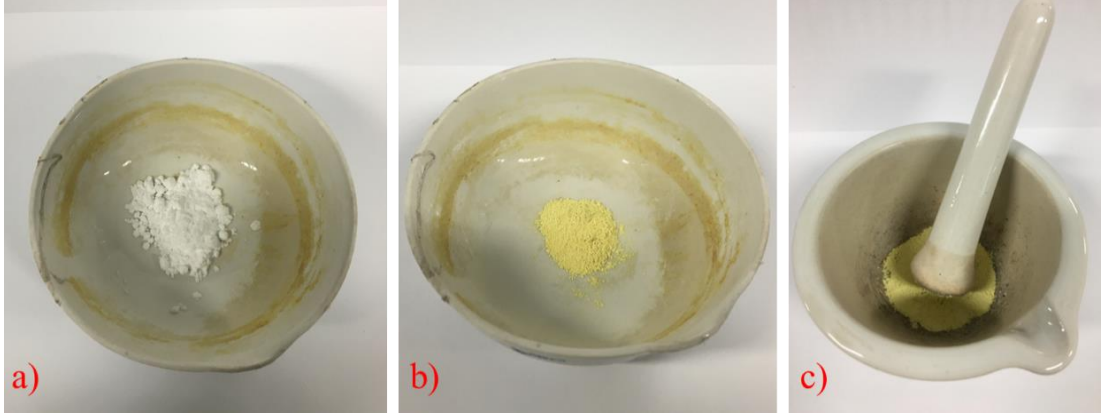
pH değeri 7 oluncaya kadar saf su ile yıkama işlemine tabi tutulmuştur. pH değeri istenen seviyeye geldiğinde ise çözelti 2000 rpm’de 5 dakika süreyle Nüve NF 615 marka santrifüj cihazında santrifüj işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra santrifüj işleminden çıkan cam tüplerin içindeki su kalıntısı dökülmüş ve kalan nano partiküller kuruması için etüvde 80 °C’de iki gün boyunca bekletilmiştir. Üretim işlemi aşamaları Şekil 4.14’te verilmiştir.



Şekil 4.14. MXene üretim aşamaları. a) MAX fazının elde edilmesi, b) HF sıvısı ile MAX fazının manyetik karıştırıcıda karıştırılması, c) elde edilen çözeltinin pH derecesinin düşürülmesi için saf su ile karıştırılması, d) pH derecesi düşürülen nano partiküllerin çökelme işlemi için beklenilmesi.

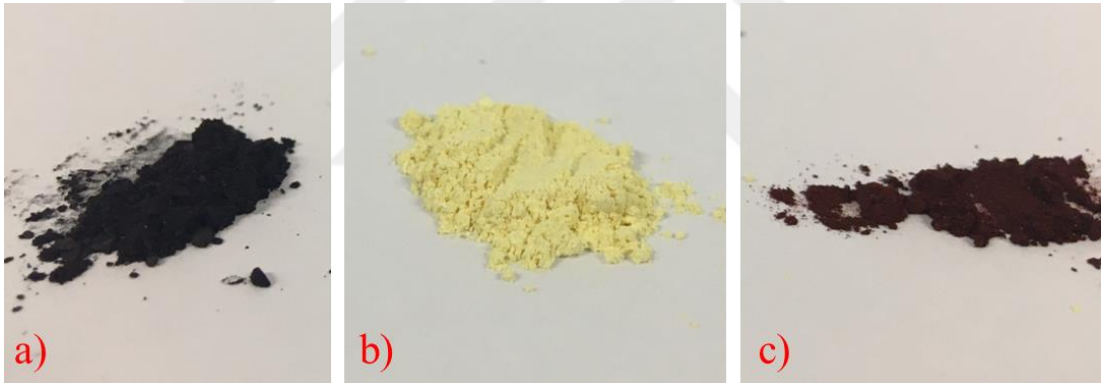
4.2.1.3. İki Boyutlu g-C₃N₄ Sentezi

Saf g-C₃N₄ tabakaları piroliz yöntemi ile sentezlenmiştir. Bu yöntemde kısaca, 5 g melamin tozu seramik bir krozeyle yerleştirilmiştir ve daha sonra 5 °C/dk ısıtma hızında 550 °C'ye kadar ısıtılmıştır. Bu sıcaklıkta 2 saat bekletildikten sonra elde edilen tozlar havanda öğütülerek katkısız g-C₃N₄ tabakası deneylerde kullanılmak üzere hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.15) [130].



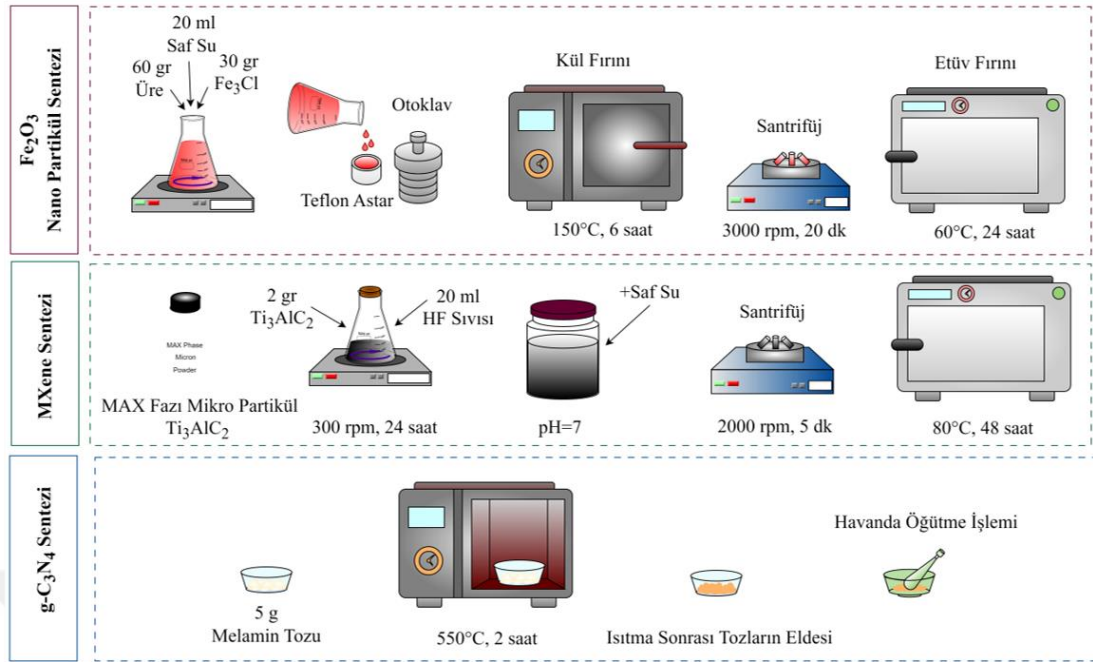
Şekil 4.15. g-C₃N₄ nano partikülü elde edilmesi. a) melamin tozunun hazırlanması, b) melamin tozu ısıtma işlemi sonrası elde edilen partiküller, c) öğütme işlemi sonrası kullanıma hazır hale gelen nano partiküller.

Üretimleri yapılan ve aşınma deneylerinde kullanılacak olan tüm 2 boyutlu nano partiküllerin görselleri Şekil 4.16’da verilmiştir.



Şekil 4.16. Üretilen nano partiküller. a) MXene nano partikülü, b) g-C₃N₄ nano partikülü, c) Fe₂O₃ nano partikülü.

Sentezleri gerçekleştirilen nano partikül çeşitlerinin üretim yöntemlerini gösteren şematik görsel Şekil 4.17’de verilmiştir.



Şekil 4.17. Nano partikül üretim yöntemleri.

4.2.2. Nano Partiküllerin Karakterizasyon İşlemleri

Üretimi gerçekleştirilen nano partiküllerin bileşenlerinin literatüre göre doğruluklarını teyit etmek amacıyla XRD ile faz analizleri yapılmıştır. XRD analizleri, Karabük Üniversitesi MARGEM laboratuvarında bulunan Cu bazlı Rigaku Ultima IV marka XRD cihazıyla, 30 kV voltaj ve 20 mA akım değerlerinde, 10-90° aralığındaki açılarda, 2°/dk tarama hızında gerçekleştirilmiştir. XRD analizlerinde kullanılan cihazın görseli Şekil 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4.18. XRD cihazı.

Aşınma deneylerinde kullanılacak AISI 1015, MgZn Master alaşımı ve AlSi18 alaşımı olarak belirlenen numuneler, aşınma testleri için uygun boyutlarda Struers marka hassas kesme cihazı ile elmas disk yardımıyla kesilerek hazırlanmıştır (Şekil 4.19). Uygun boyutlara getirilen numuneler, Struers marka otomatik zımpara parlatma cihazı ile 180-800 μm partikül boyutlarında değişkenlik gösteren SiC zımpara kağıtlarıyla yüzeyleri zımparalanmış ve sonrasında 1 μm elmas solüsyon yardımıyla parlatma işlemine tabi tutulmuşlardır (Şekil 4.4).



Şekil 4.19. Hassas kesme cihazı.

Aşınma deneylerinde kullanılan, AISI 1015, MgZn Master alaşımı ve AlSi18 alaşımı numunelerinin statik yüklere karşı dayanımlarını belirlemek için sertlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçüm işlemlerinden önce her bir numune, aşınma testleri için uygulanan metalografik işlemlere tabi tutulmuştur. Bu işlemlerden sonra Karabük Üniversitesi MARGEM Laboratuvarında bulunan QNESS Q250M Makro sertlik ölçüm cihazı ile sertlik ölçümleri yapılmıştır (Şekil 4.20). Sertlik ölçüm işlemi ASTM E10 standardına göre AISI 1015 numunesi ve AlSi18 numunesi için 62,5 kg yük altında 15 sn bekleme süresiyle Brinell sertlik ölçüm metoduna göre 5 adet ölçüm alınarak gerçekleştirilmiştir. MgZn Master numunesi için ise 15,625 kg yük altında 15 sn bekleme süreli ve 5 tekrarlı ölçüm yapılmıştır. Yapılan ölçümlerin aritmetik ortalaması alınarak, ortalama sertlik değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.20. Makro sertlik ölçüm cihazı.

Aşınma deneylerinde kullanılan nano partiküllerin boyutlarını, geometrilerini ve bileşenlerini tespit etmek, aşınmaya maruz kalan numunelerin ise yüzeylerindeki aşınma mekanizmalarını belirlemek amacı ile Karabük Üniversitesi MARGEM laboratuvarında bulunan Carl Zeiss Ultra Plus Gemini marka SEM cihazı ve SEM cihazı üzerinde bulunan EDX dedektörü ile noktasal ve bölgesel olarak incelemeler gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.10).

4.2.3. Aşınma Deneylerinde Kullanılan Yağlayıcıların Hazırlanması

Bu çalışmada gerçekleştirilen aşınma deneylerinde, sıvı ortam olarak motor yağı (MY) kullanılmıştır. Kullanılan motor yağının karakteristik özellikleri Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Kullanılan motor yağının katalog değerleri.

	Birim	Standart	Değer
Özgül ağırlık @ 15 °C	kg/m ³	ASTM D-4052	885
Viskozite @ 40 °C	mm ² /s	ASTM D-445	71,24
Viskozite @ 100 °C	mm ² /s	ASTM D-445	9,4
Viskozite İndeksi	-	ASTM D-2270	112
Parlama Noktası	°C	ASTM D-92	244
Akma noktası	°C	ASTM D- 97	-27

Sentezlenen nano partiküllerin etkisini, aşınma deneylerinde tespit edebilmek için iki farklı konsantrasyon oranındaki nano partiküller, motor yağına karıştırılarak farklı yağlayıcı ortamlar hazırlanmıştır. Karıştırma işlemi için Şekil 4.21’de verilen ultrasonik banyo/temizleyici kullanılmıştır. Hazırlanan MY ve farklı oranlardaki nano partiküller ultrasonik temizleyicide 1 saat süreyle karıştırılarak homojen bir karışım elde edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 4.21. Ultrasonik banyo/temizleyici.

Her deney setinde 50 ml MY kullanılmıştır, ilk aşamada aşınma ortamında ticari olarak elde edilen katalog değerleri Çizelge 4.7’de verilen 50 ml MY katkısız şekilde kullanılmıştır. İkinci aşınma ortamında, 50 ml MY içine 25 mg Fe₂O₃ nano partiküller eklenerek kullanılmıştır. Üçüncü aşınma ortamında ise 50 ml MY içine 50 mg Fe₂O₃ nano partiküller eklenerek kullanılmıştır. Dördüncü aşınma ortamında 50 ml MY içine 25 mg MXene nano partiküller eklenerek kullanılmıştır. Beşinci aşınma ortamında ise 50 ml MY içine 50 mg MXene nano partiküller eklenerek kullanılmıştır. Altıncı aşınma ortamında 50 ml MY içine 25 mg g-C₃N₄ nano partiküller eklenerek kullanılmıştır. Yedinci aşınma ortamında ise 50 ml MY içine 50 mg g-C₃N₄ nano partiküller eklenerek kullanılmıştır. Hazırlanan aşınma ortamları Çizelge 4.8’de belirtilmiştir.

Çizelge 4.8. Hazırlanan aşınma ortamları.

Aşınma Ortamları	
1	50 ml MY
2	50 ml MY+25 mg Fe ₂ O ₃
3	50 ml MY+50 mg Fe ₂ O ₃
4	50 ml MY+25 mg MXene
5	50 ml MY+50 mg MXene
6	50 ml MY+25 mg g-C ₃ N ₄
7	50 ml MY+25 mg g-C ₃ N ₄

Aşınma ortamlarında kullanılan yağlayıcıların hepsi ayrı plastik kaplara doldurulmuş ve her deney numunesi için ayrı bir yağlayıcı seti hazırlanmıştır. Hazırlanan yağlayıcıların görseli Şekil 4.22’de verilmiştir.



Şekil 4.22. Aşınma deneylerinde kullanılan yağlayıcılar.

4.2.4. Nano Partikül Ortamı Aşınma Deneyleri ve Parametreleri

Aşınma deneyleri, ASTM G133 standardına göre doğrusal yönde ileri geri hareket eden pim üzeri plaka (ball-on-flat) tipi UTS Tribometer T10/20 markalı aşınma test cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.23).

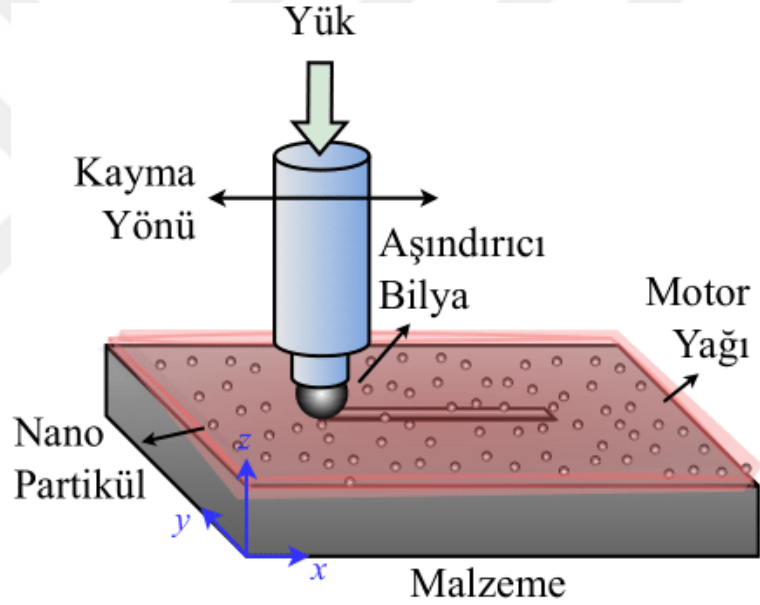


Şekil 4.23. Aşınma cihazı.

Tüm aşınma testleri oda sıcaklığında ve üç tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Aşındırıcı karşı malzeme olarak 6 mm çapında, 52100 çelik bilyalar kullanılmıştır [188]. Kullanılan bilyaların mekanik özellikleri Çizelge 4.9’da belirtilmiştir. Aşınma deneylerinin şematik görüntüsü Şekil 4.24’te verilmiştir.

Çizelge 4.9. Aşındırıcı bilyanın mekanik özellikleri.

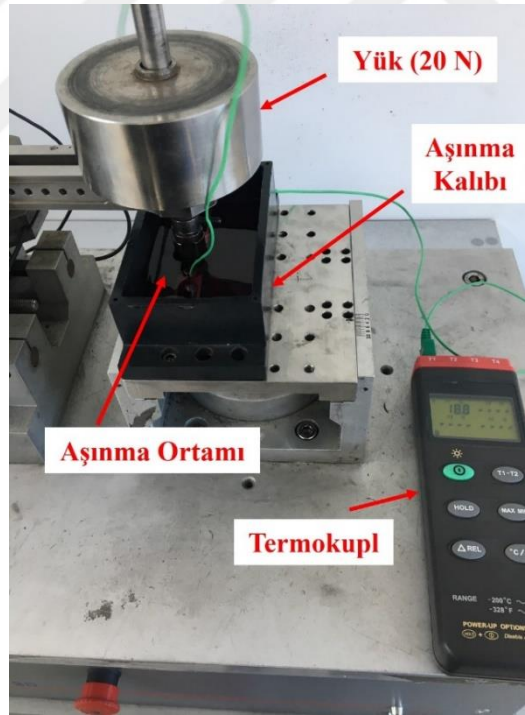
Çap	Sertlik	Çekme Dayanımı	Basma Dayanımı	Elastisite Modülü
6mm	62/66 HRC	2235 MPa	2029 MPa	203 MPa



Şekil 4.24. Ball-on-flat aşınma deneyleri şematik görüntüsü.

Bu testler esnasında, yük parametresi her numune için 20 N olarak belirlenirken, frekans ve kayma hızı sırasıyla 5,0 Hz ve 0,08 m/s’de sabit tutulmuştur. Aşınma testleri 10 mm kurs boyu (stroke mesafesi) ve toplam aşınma yolu ise 100 m olarak belirlenmiştir. Aşınma deney parametrelerinin tribolojik etkisi, sürtünme katsayısı, hacimsel kayıp ve deney esnasında ölçülen sıcaklık değişimi değerleri ile detaylı bir şekilde irdelenmiştir. Ayrıca, aşınan yüzeylerde oluşan aşınma mekanizmaları SEM ve EDX analizleriyle tespit edilmiştir. Her numunenin aşınma hacmi, aşınma izinin enine yönünde 2 boyutlu eğriler altındaki stroke mesafesi ve kesit alanı çarpılarak

belirlenmiştir. 2D alan, Mitutoyo SJ-410 cihazı kullanılarak aşınma izinin derinliğine (h) ve genişliğine (L) bağlı olarak üç farklı noktada 2 mm çapında standart bir prob kullanılarak ölçülmüştür. Ölçümler ISO 4287-1997 standardına göre yapılmış ve cihaz tarafından 2 boyutlu alan hesaplanmıştır. Hesaplanan 2 boyutlu alan ile stroke mesafesi çarpılarak aşınma deneyleri sonucunda oluşan hacimsel kayıp tespit edilmiştir. Aşınma deneyleri esnasında oluşan sıcaklık değerleri her bir deney için 9 adet veri alınarak belirlenmiştir. Deney esnasında malzeme üzerinde oluşan sıcaklık değerlerinin, katkısız MY kullanılan aşınma deneyleri referans alınarak, yağlayıcı içine nano partikül takviyesi yapılan deneylere göre kıyaslaması yapılmıştır. Sıcaklık ölçümleri, ~ -200 °C ile 1370 °C aralığında çalışabilen bir termokupl vasıtasıyla ölçülmüştür. Aşınma deneyleri, poliamid aşınma kalıbı içerisinde gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan aşınma deney düzeneğinin görüntüsü Şekil 4.25'te verilmiştir. Aşınma deneylerinde her bir numune için belirlenen parametreler Çizelge 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.25. Aşınma deney düzeneği.

Çizelge 4.10. Aşınma deney parametreleri.

Deney No	Aşınma Ortamı	Aşınan Malzeme	Yük (N)	Yol (m)
1	50 ml MY	AISI 1015/ MgZn Master/AlSi18	20	100
2	50 ml MY+25 mg Fe ₂ O ₃	AISI 1015/ MgZn Master/AlSi18	20	100
3	50 ml MY+50 mg Fe ₂ O ₃	AISI 1015/ MgZn Master/AlSi18	20	100
4	50 ml MY+25 mg MXene	AISI 1015/ MgZn Master/AlSi18	20	100
5	50 ml MY+50 mg MXene	AISI 1015/ MgZn Master/AlSi18	20	100
6	50 ml MY+25 mg g-C ₃ N ₄	AISI 1015/ MgZn Master/AlSi18	20	100
7	50 ml MY+25 mg g-C ₃ N ₄	AISI 1015/ MgZn Master/AlSi18	20	100

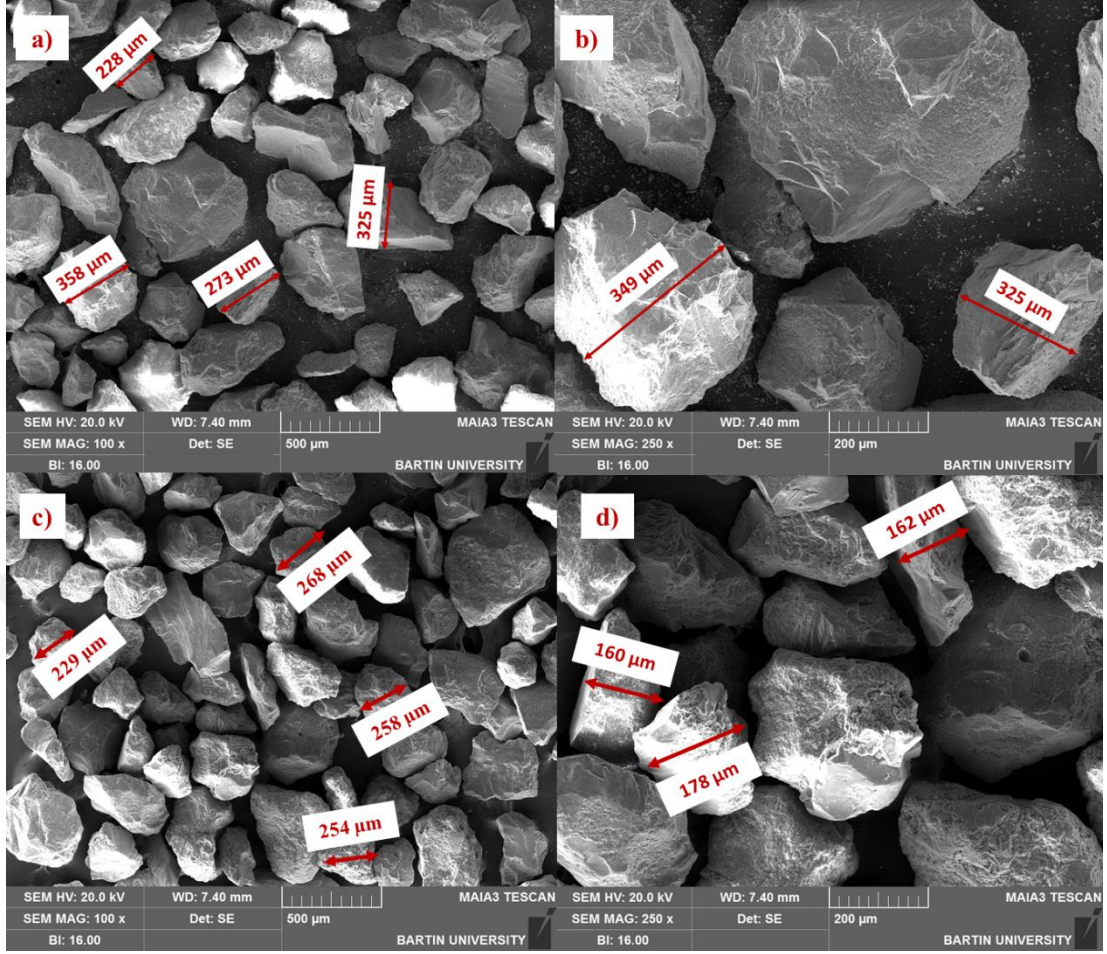
BÖLÜM 5

BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. EROZİF ORTAM AŞINMA DENEYLERİ

5.1.1. Aşındırıcı Partiküllerin Erozif Aşınma Sonrası Değerlendirilmesi

Sulu ortamda gerçekleştirilen erozif aşınma deneyleri sonucunda, kullanılan aşındırıcı SiO_2 mikro partiküllerinin parçacık-malzeme ve parçacık-parçacık etkileşimine bağlı olarak boyutları küçülmüştür. Aşındırıcı partiküllerin kenarlarının deneyler öncesinde keskin ve düzensiz bir yapıya sahip olduğu görünürken, deneyler sonrasında ise kenarlarının yuvarlaklaştığı SEM görüntüleriyle belirlenmiştir (Şekil 5.1). Keskin kenarlarını aşınma deneylerinde kaybeden numunelerin, aşındırıcı özellikleri azalmaktadır [1,176,178,189,190]. Bu nedenle, erozif aşınma deneyleri 1 saat süreyle sınırlı tutulmuştur. Yapılan her deneyden sonra aşındırıcı tozların olduğu sulu çamur karışım boşaltılarak hazne temizlenmiştir. Bir sonraki deneye geçilirken o deney için ayrı bir aşındırıcı-su karışımı hazırlanmıştır.



Şekil 5.1. Aşındırıcı partiküllerin SEM görüntüleri. a) elenmiş SiO₂ partiküllerinin 100x büyütmede alınan görüntüsü, b) elenmiş SiO₂ partiküllerinin 250x büyütmede alınan görüntüsü, c) aşınma sonrası SiO₂ partiküllerinin 100x büyütmede alınan görüntüsü, d) aşınma sonrası SiO₂ partiküllerinin 250x büyütmede alınan görüntüsü.

5.1.2. Sertlik Deneyi Sonuçları

Yapılan sertlik ölçümleri sonucuna göre, AISI 1015 malzemesinin sertlik değeri 142 HV olarak tespit edilirken, AISI 304 malzemesinin sertlik değeri ise 214 HV olarak belirlenmiştir. AISI 1015 ve AISI 304 numunelerinin sertlik değerleri ile erozif aşınma deney sonuçları arasındaki ilişki, çarpma hızı parametresine bağlı olarak tartışılmaktadır. Aşındırıcı parçacıkların hedef malzeme yüzeyine daha hızlı bir şekilde çarpması, malzeme yüzeyinde momentumdaki artışa neden olmaktadır. Kuvvetin yüzeyde yaratacağı deformasyon, aşınmaya maruz kalan yüksek sertlikteki malzeme tarafından minimize edilmektedir. ANOVA sonuçlarına göre (Çizelge 5.9) AISI 304 numunesinin, Ra ve ağırlık kaybı açısından hız parametresinden etkilenmesi,

AISI 1015 numunesinden daha az olduğu görülmüştür. Bu duruma bağlı olarak, yüksek sertlik değerine sahip malzemelerin, aşınma direnci açısından daha yüksek performansa sahip olduğu söylenebilir [26,38,178,191]. Ayrıca, aşınma deneylerindeki konsantrasyon parametresi, çarpma hızıyla birlikte momentum oluşturmada etkilidir. Sertlik ve erozif aşınma arasındaki momentum etkileşimi sonucunda, aşındırmaya maruz kalan malzemelerin direncinin, çarpma hızı arttıkça azaldığı, ancak artan malzeme sertliği sayesinde hız etkisinin minimize edildiği belirlenmiştir.

5.1.3. AISI 1015 Eroziyon Aşınma Deneyi Sonuçları

AISI 1015 malzemesi için Taguchi L9 ortogonal matrisine göre gerçekleştirilen deney tasarımı ve sonuçları Çizelge 5.1’de verilmiştir. Deney tasarımında, giriş parametreleri olarak 3 seviyeli konsantrasyon, 3 seviyeli çarpma hızı ve 3 seviyeli çarpma açısı belirlenmiş ve bunun sonucunda 9 adet deneysel kombinasyon oluşturulmuştur. Taguchi ortogonal matris yöntemi sayesinde az sayıda deneyle istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar elde edilmektedir. Deneyler sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü ve ağırlık kaybı sonuçları, S/N metoduna göre birlikte analiz edilmiştir (Şekil 5.2). Analiz sonucunda en düşük yüzey pürüzlülüğü ve ağırlık kaybı sonuçlarını veren konsantrasyon değerleri sırasıyla %5, %15 ve %25 olarak bulunmuştur (Şekil 5.2.a). Bu durum yüzey pürüzlülüğü ve ağırlık kaybı açısından beklenen bir durumdur. Konsantrasyonun artması, aşındırıcı partikül miktarının artmasını ifade etmektedir. Yüzeyde birim alana etki eden aşındırıcı partikül sayısının artması, aşınma miktarını da doğru oranda arttırmaktadır. Dolayısıyla ağırlık kaybı ve yüzey pürüzlülüğü de artmaktadır. En düşük yüzey pürüzlülüğü ve ağırlık kaybı sonuçlarını veren çarpma hızı parametreleri, sırasıyla 265 rpm, 397,5 rpm ve 530 rpm olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.2.b). Çarpma hızının artması, aşındırıcı partiküllerin kinetik enerjisinin artmasını bu da yüzeyde meydana gelen deformasyon miktarını arttırmaktadır. Artan deformasyon miktarı, yüzey pürüzlülüğü ve ağırlık kaybını arttırmaktadır. En düşük yüzey pürüzlülüğü ve ağırlık kaybı sonuçlarını veren çarpma açısı parametreleri sırasıyla 90°, 60° ve 30° olarak bulunmuştur (Şekil 5.2.c). Çarpma açısının erozif aşınma üzerindeki etkisi, malzemenin yapısına ve diğer parametrelerle etkileşimine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Genellikle 90° gibi dik açılarda meydana gelen

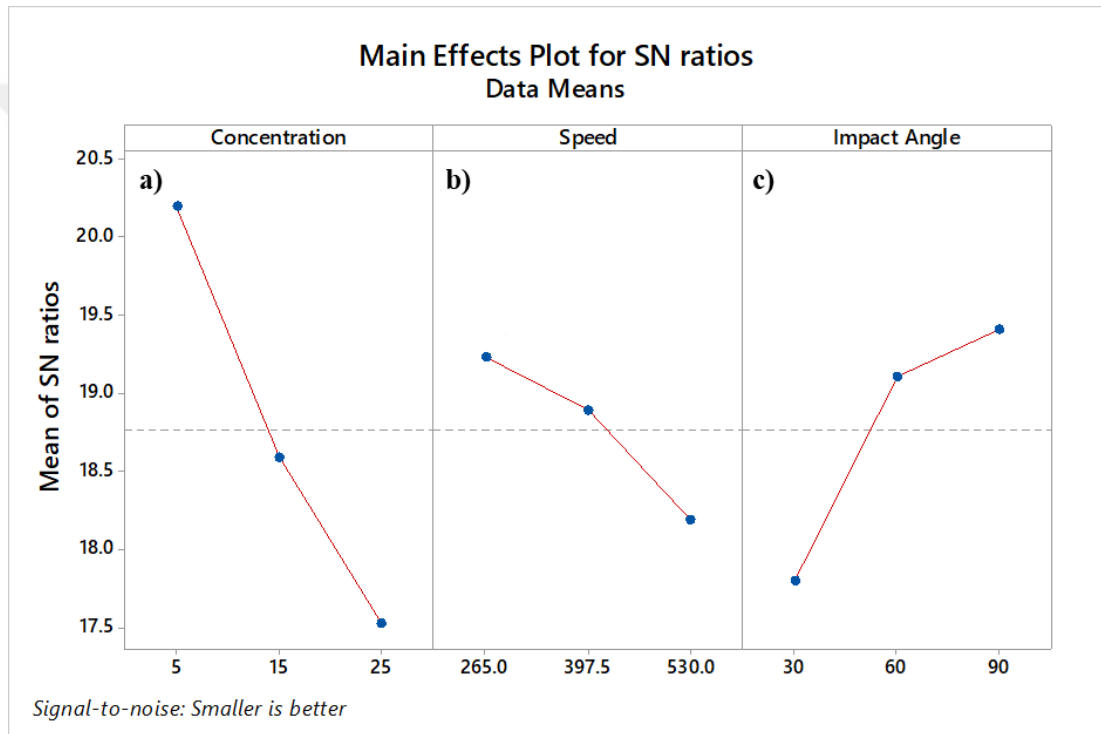
çarpmalar, yüzeyde çatlak ve çukur oluşumuna sebep olmaktadır [38,186,192]. 30° gibi düşük açılar ise partiküllerin abrasif aşınmaya benzer bir mekanizma ile yüzeyi aşındırması ile sonuçlanmaktadır [38,193]. Ayrıca literatürde belirtildiği üzere, çelik malzemelerin sahip olduğu mekanik özellikler sebebiyle düşük çarpma açılarında daha fazla deformasyon meydana gelmektedir [38,45,176,181,191,192].

Çizelge 5.1. AISI 1015 malzemesi için L9 ortogonal matrisine göre gerçekleştirilen deney tasarımı ve sonuçları.

Deney No	Konsantrasyon (% Ağırlık)	Hız (rpm)	Çarpma Açısı (°)	Deney Sonuçları	
				Ağırlık Kaybı (gr.)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra-μm)
1	5	265	30	0,0007 ^{±0,03}	0,154 ^{±0,02}
2	5	397,5	60	0,0026 ^{±0,05}	0,129 ^{±0,03}
3	5	530	90	0,0033 ^{±0,01}	0,133 ^{±0,04}
4	15	265	60	0,0014 ^{±0,03}	0,147 ^{±0,01}
5	15	397,5	90	0,0026 ^{±0,06}	0,160 ^{±0,05}
6	15	530	30	0,0065 ^{±0,05}	0,196 ^{±0,02}
7	25	265	90	0,0010 ^{±0,02}	0,163 ^{±0,06}
8	25	397,5	30	0,0054 ^{±0,01}	0,201 ^{±0,03}
9	25	530	60	0,0063 ^{±0,06}	0,203 ^{±0,02}

S/N analizi sonucunda en iyi aşınma parametreleri, konsantrasyon oranı için %5, çarpma hızı için 265 rpm, çarpma açısı için ise 90° olarak belirlenmiştir. Orta seviyeli aşınma parametreleri, konsantrasyon oranı için %15, çarpma hızı için 397,5 rpm, çarpma açısı için ise 60° olarak belirlenmiştir. En kötü aşınma parametreleri ise konsantrasyon oranı için %25, çarpma hızı için 530 rpm, çarpma açısı için ise 30° olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu aşınma parametreleri ile doğrulama deneyleri yapılmıştır. Elde edilen yüzey pürüzlülüğü ve ağırlık kaybı sonuçları Çizelge 5.2’de verilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar, Taguchi analizinden elde edilen tahmin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ağırlık kaybı verilerinde gerçek deney sonuçları ile tahmin değerleri arasında en iyi, orta ve en kötü parametreler için sırasıyla %0, %13,33 ve %26,80 oranlarında fark bulunmuştur. Fark değerlerinin yüksek veya çok düşük olması sebebiyle sonuçların tutarsız olduğu düşünülebilir. Fakat ağırlık kaybı verilerinin aritmetik ortalaması 0,00331, standart sapma değeri 0,00224 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan standart sapma değerinin ortalama değere kıyasla çok yüksek seviyede olduğu görülmektedir. Bu sebeple tahminleme uygulaması tutarlı

sonuçlar vermemiştir. Bu durumda deneysel sonuçların anlamlılığı için regresyon analizinin yeterli olduğu iddia edilebilir. Yüzey pürüzlülüğü verilerinde ise gerçek deney sonuçları ile tahmin değerleri arasında en iyi, orta ve en kötü parametreler için sırasıyla %7,25, %0, %11,16 oranlarında fark bulunmuştur. Bu verilerin aritmetik ortalaması 0,165, standart sapma değeri ise 0,028 olarak bulunmuştur. Yüzey pürüzlülüğü için elde edilen fark ve standart sapma değerlerinin kabul edilebilir sınırlarda olduğu görülmektedir. Genel itibarıyla, deneysel sistemden elde edilen sonuçların, fiziksel ve istatistiksel açıdan anlamlı ve güvenilir olduğu görülmektedir.



Şekil 5.2. AISI 1015 malzemesi için gerçekleştirilen S/N analizi sonuçları. a) konsantrasyon, b) çarpma hızı, c) çarpma açısı.

Çizelge 5.2. AISI 1015 malzemesi için S/N analizi sonucunda elde edilen aşınma parametrelerine göre deney sonuçları.

Deney Adı	Konsantrasyon (%)	Hız (rpm)	Çarpma Açısı (°)	Deneylerin Doğrulaması					
				Ağırlık Kaybı (gr)			Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)		
				Gerçek	Tahmini	Fark	Gerçek	Tahmini	Fark
En İyi	5	265	90	0,0020 ±0,0003	0,0020	-	0,124 ±0,02	0,115	%7,25
Orta	15	397,5	60	0,0026 ±0,0006	0,0030	%13,33	0,160 ±0,03	0,160	-
En Kötü	25	530	30	0,0097 ±0,0011	0,0071	%26,80	0,197 ±0,02	0,219	%11,16

AISI 1015 malzemesi için belirlenen aşınma parametrelerinin, yüzey pürüzlülüğü ve ağırlık kaybı üzerindeki etkisini incelemek için varyans analizi (ANOVA) gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.3 yüzey pürüzlülüğü, Çizelge 5.4 ise ağırlık kaybı için yapılan ANOVA sonuçlarını vermektedir. Çizelge 5.3'te konsantrasyon parametresinin, yüzey pürüzlülüğü üzerinde fiziksel olarak yüksek seviyede anlamlı bir etkisinin olduğu görülmektedir (%95 güven aralığında). Aşınma parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkileri sırasıyla %58,98 oranında konsantrasyon, %25,21 oranında çarpma açısı, %12,08 oranında çarpma hızı olarak hesaplanmıştır. Analiz sonucunda hata oranı %3,74 olarak bulunmuştur. Hata oranı, deneyler esnasında deney tasarımına dahil olmayan ve kontrol edilemeyen faktörlerin sahip olduğu etkiyi ifade etmektedir. Yüzey pürüzlülüğü için elde edilen R-Sq ve R-Sq (adj) değerleri sırasıyla %96,26 ve %85,04 oranında çıkmıştır. Çizelge 5.4'te bulunan p değerleri belirlenen tüm aşınma parametrelerinin ağırlık kaybı üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Aşınma parametrelerinin ağırlık kaybı üzerinde etkileri sırasıyla %15 oranında konsantrasyon, %70 oranında çarpma hızı, %12,5 oranında çarpma açısı olarak bulunmuştur. Hata oranı %2,5 olarak bulunmuştur. Ağırlık kaybı için elde edilen R-Sq ve R-Sq (adj) değerleri sırasıyla %99,86 ve %99,45 oranında çıkmıştır. R-Sq (adj) değerlerinin %70'ten büyük çıkması aşınma parametrelerinin yüzey pürüzlülüğünü ve ağırlık kaybını açıklamak için yeterli olduğunu göstermektedir [13,182,183].

Çizelge 5.3. AISI 1015 malzemesi yüzey pürüzlülüğü ANOVA sonuçları.

Parametreler	Serbestlik Derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler Ortalaması (MS)	F değeri	P değeri	% Etki
Konsantrasyon	2	0,003830	0,001915	15,77	0,060	58,98
Hız (rpm)	2	0,000785	0,000392	3,23	0,236	12,08
Çarpma Açısı	2	0,001638	0,000819	6,74	0,129	25,20
Hata	2	0,000243	0,000121			3,74
Toplam	8	0,006495				100
R-sq	%96,26		R-sq(adj)	%85,04		

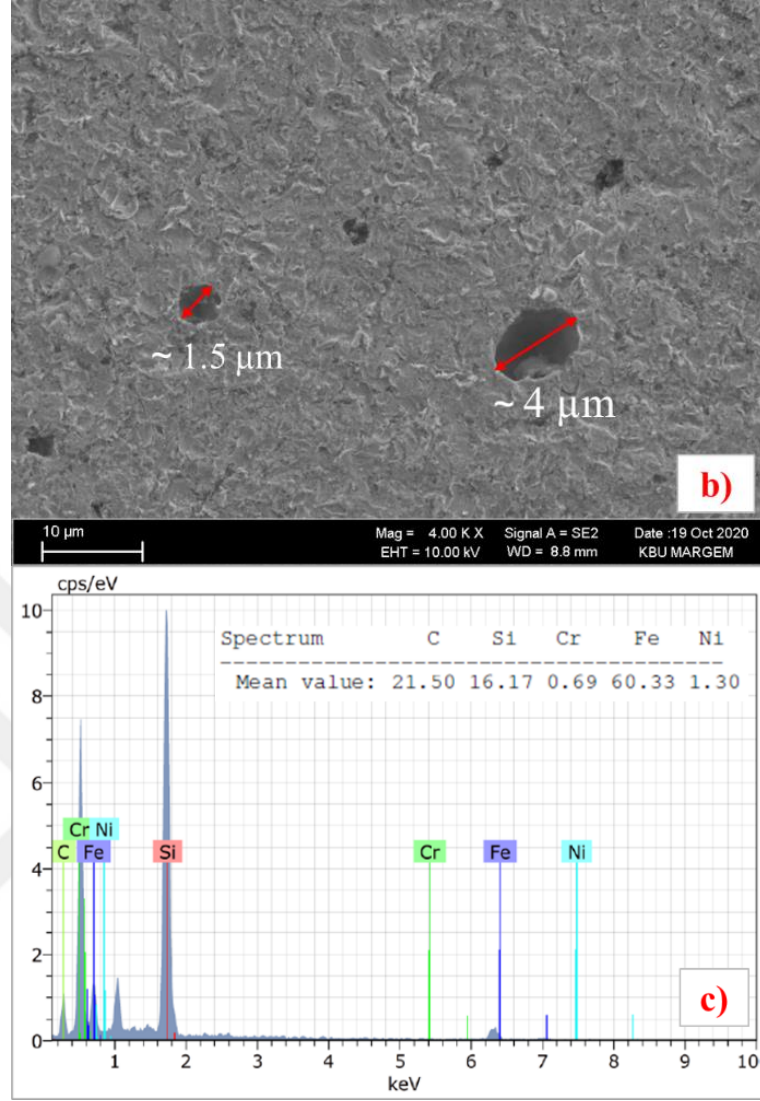
Çizelge 5.4. AISI 1015 malzemesi ağırlık kaybı ANOVA sonuçları.

Parametreler	Serbestlik Derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler Ortalaması (MS)	F değeri	P değeri	% Etki
Konsantrasyon	2	0,000006	0,000003	114,25	0,009	15
Hız (rpm)	2	0,000028	0,000014	511	0,002	70
Çarpma Açısı	2	0,000005	0,000003	98,68	0,010	12,5
Hata	2	0,000001	0,000000			2,5
Toplam	8	0,000040				100
R-sq	%99,86		R-sq(adj)	%99,45		

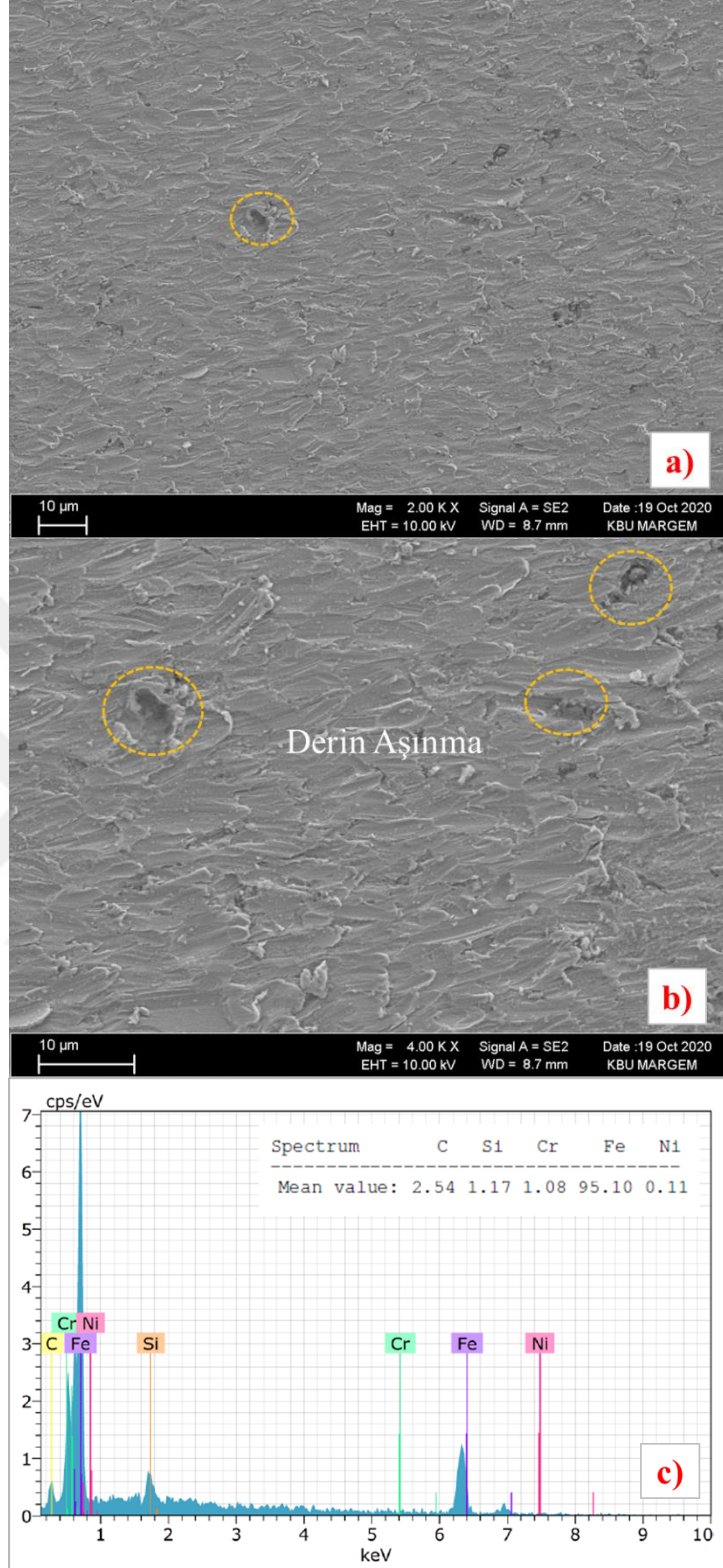
S/N analizine göre, en iyi aşınma koşullarında (%5 oranında konsantrasyon, 265 rpm çarpma hızı ve 90° çarpma açısı) elde edilen SEM görüntüleri Şekil 5.3'te verilmiştir. Aşınma yüzeyinde gerçekleştirilen EDX analizi sonuçları ise Şekil 5.3.c'de verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde, yüzeyde 90°'lik çarpma açısının etkisi ile meydana gelen deformasyon izleri görülmektedir (Şekil 5.3.a). Bu erozyon mekanizmasında aşındırıcı partiküller, yüzeye dik bir şekilde çarparak saplanmış ve bunun sonucunda yüzeyde gevrek kırılmaya, çukurlaşmaya ve yüzey altı deformasyonlara sebep olmuştur. Silika partiküllerinin yüzeye gömülmüş olmaları Şekil 5.3.c'de verilen EDX analizinde görünen Si elementinin varlığı ile de anlaşılmaktadır. Bu deney setinde, konsantrasyon ve çarpma hızı parametrelerinin düşük olması, yüzeyde meydana gelen deformasyonun boyutunu azaltmış, noktasal alanlarda yüzey pürüzlülüğü ve ağırlık kaybına sebep olmuştur. Orta seviyeli aşınma koşullarında (%15 oranında konsantrasyon, 397,5 rpm çarpma hızı ve 60° çarpma açısı) elde edilen SEM görüntüleri Şekil 5.4.a ve Şekil 5.4.b'de verilmiştir. Aşınma yüzeyinde gerçekleştirilen EDX analizi sonuçları ise Şekil 5.4.c'de verilmiştir. Şekil 5.4.a incelendiğinde artan konsantrasyon ve çarpma hızı parametreleri ile yüzeyin

genelinde pürüzlülüğün arttığı görülmektedir. Çarpma açısının azalması ile aşındırıcı partiküller eğik açıda yüzeye daha fazla nüfuz ederek çarpma yönünde aşınma izleri meydana getirmiştir. Ancak bu partiküllerin yüzeyde gömülü kalmadan yüzeyi aşındırdığı tespit edilmiştir. Yapılan EDX analizi sonucunda da Si elementinin yüzeyde az miktarda bulunduğu görülmektedir (Şekil 5.4.c). En kötü aşınma koşullarında (%25 oranında konsantrasyon, 530 rpm çarpma hızı ve 30° çarpma açısı) elde edilen SEM görüntüleri Şekil 5.5.a ve Şekil 5.5.b’de verilmiştir. Aşınma yüzeyinde gerçekleştirilen EDX analizi sonuçları ise Şekil 5.5.c’de verilmiştir. Şekil 5.5.a incelendiğinde, yüksek konsantrasyon ve çarpma hızının etkisiyle yüzeyde pürüzlülüğün ve aşınma bölgelerinin arttığı görülmektedir. Yüksek konsantrasyonlu aşındırıcı partiküller, düşük çarpma açısının da etkisiyle yüzeyde abrasif aşınma mekanizması oluşturmuştur. Tekrar eden çarpmalar sonucunda yarık ve çatlak bölgeler büyüyerek derin krater oluşumu meydana gelmiştir. Ayrıca bu durum, aşınma bölgesinde partiküllerin saplanıp kalmasına sebep olmuştur. EDX analizinde tespit edilen yüksek miktardaki Si elementi, yüzeyde gömülü olan partiküllerin varlığını kanıtlamaktadır (Şekil 5.5.b).

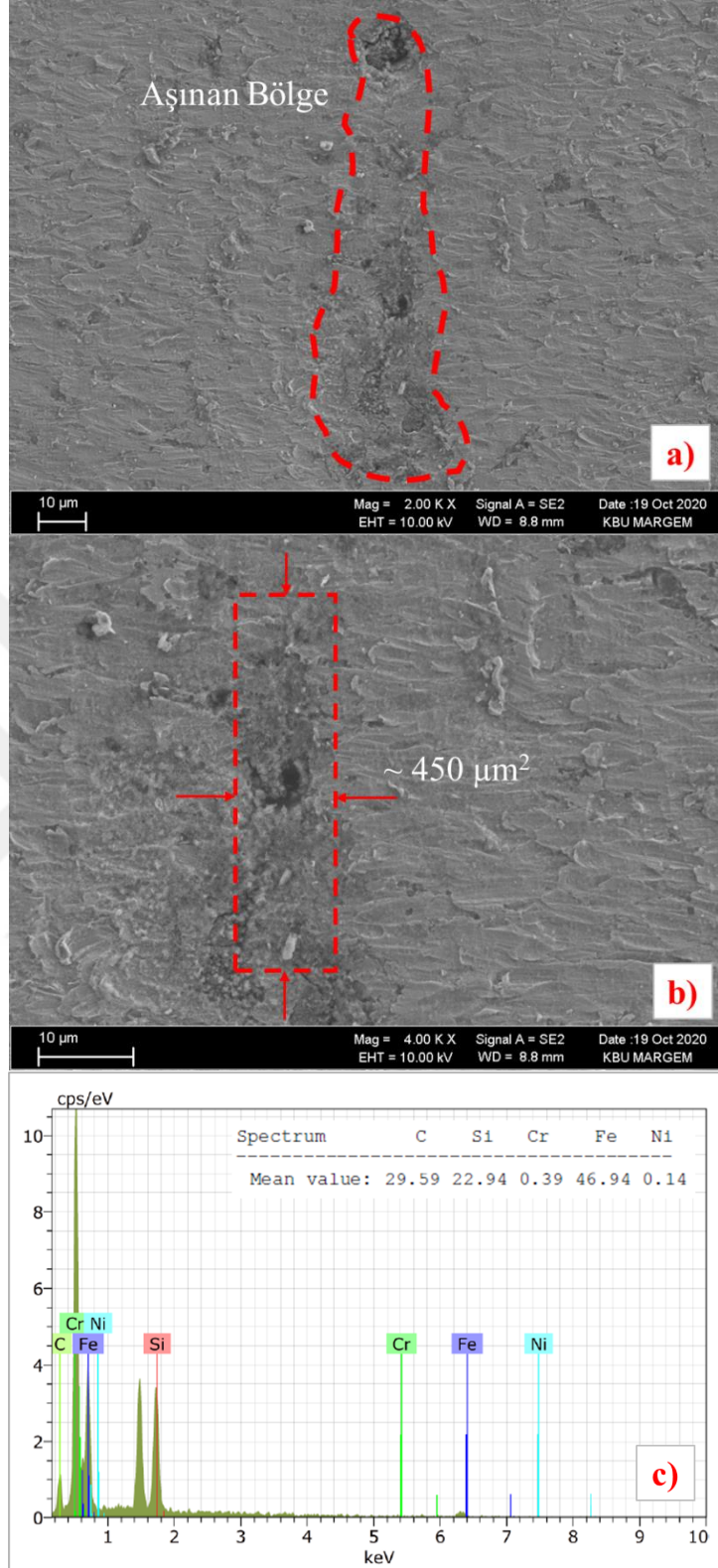




Şekil 5.3. AISI 1015 malzemesi için S/N analizi sonrası en iyi aşınma koşullarında elde edilen SEM ve EDX görüntüleri. a) 2kx yakınlaştırma oranında alınan görüntü, b) 4kx yakınlaştırma oranında alınan görüntü, c) en iyi aşınma koşulu için EDX görüntüsü.

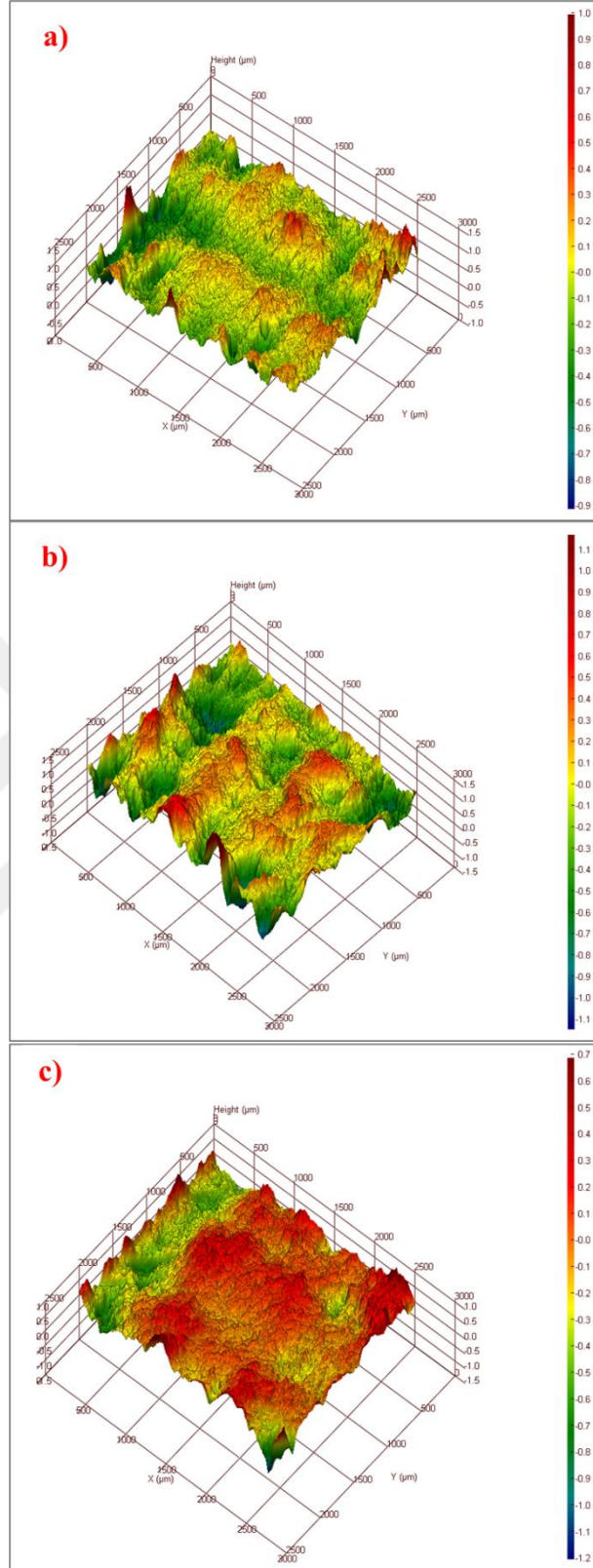


Şekil 5.4. AISI 1015 malzemesi için S/N analizi sonrası orta aşınma koşullarında elde edilen SEM ve EDX görüntüleri. a) 2kx yakınlaştırma oranında alınan görüntü, b) 4kx yakınlaştırma oranında alınan görüntü, c) en iyi aşınma koşulu için EDX görüntüsü.



Şekil 5.5. AISI 1015 malzemesi için S/N analizi sonrası en kötü aşınma koşullarında elde edilen SEM ve EDX görüntüleri. a) 2kx yakınlaştırma oranında alınan görüntü, b) 4kx yakınlaştırma oranında alınan görüntü, c) en iyi aşınma koşulu için EDX görüntüsü.

S/N analizine göre en iyi aşınma koşullarında (%5 oranında konsantrasyon, 265 rpm çarpma hızı ve 90° çarpma açısı) elde edilen 3D Topografya görüntüleri, Şekil 5.6'da verilmiştir. 3D Topografya görüntülerinde mavi tonlarının bulunması, aşınma izi derinliğini, kırmızı tonlarının bulunması ise yüzeydeki pürüzlülüğünün fazlalığını ifade etmektedir. Sarı ve yeşil tonlar kırmızı tonlara kıyasla yüzeyde daha az pürüzlülüğün bulunduğunu göstermektedir. Şekil 5.6.a incelendiğinde sarı ve yeşil tonlarının baskın olduğu görülmektedir. Kırmızı tonlarının az miktarda bulunması yüzey pürüzlülüğünün az olduğunu göstermektedir. Konsantrasyon ve çarpma hızının düşük olması ile aşındırıcı partiküllerin yüzeye dik bir şekilde çarpması yüzeyde lokal bölgelerde pürüzlülüğe sebep olmuş, genel olarak yüzeyin düzlemselliği bozulmamıştır. Orta seviyeli aşınma koşullarında (%15 oranında konsantrasyon, 397.5 rpm çarpma hızı ve 60° çarpma açısı) elde edilen 3D Topografya görüntüleri Şekil 5.6.b'de verilmiştir. Şekil 5.6.b incelendiğinde konsantrasyon ve çarpma hızının artması ile yüzeydeki kırmızı tonlarının arttığı, dolayısıyla da yüzey pürüzlülüğünün arttığı anlaşılmaktadır. Ayrıca aşındırıcı partiküllerin yüzeye 60° eğik bir açıyla ve yüksek hızla çarpması, yüzeyde mikro boyutta tepeler meydana getirmiştir. Bu durum, yüzeyin dalgalı bir görünüme sahip olmasına ve yüzey morfolojisinin bozulmasına sebep olmuştur. En kötü aşınma koşullarında (%25 oranında konsantrasyon, 530 rpm çarpma hızı ve 30° çarpma açısı) elde edilen 3D topografya görüntüleri Şekil 5.6.c'de verilmiştir. Şekil 5.6.c incelendiğinde yüzeyde kırmızı tonlarının hâkim olduğu dolayısıyla yüzey pürüzlülüğünün diğer deney setlerine nazaran oldukça arttığı görülmektedir. Yüksek çarpma hızına sahip düşük açılı partiküller, yüzeyi boydan boya aşınmaya maruz bırakmış ve maksimum pürüzlülük seviyesine ulaştırmıştır. Elde edilen yüzey pürüzlülük ve ağırlık kaybı sonuçları da bu bulguları doğrular niteliktedir.



Şekil 5.6. AISI 1015 malzemesi için S/N analizi sonrası belirlenen parametrelere göre elde edilen 3D Topografya görüntüleri. a) en iyi aşınma koşulları, b) orta aşınma koşulları, c) en kötü aşınma koşulları.

5.1.4. AISI 304 Erozif Aşınma Deneyi Sonuçları

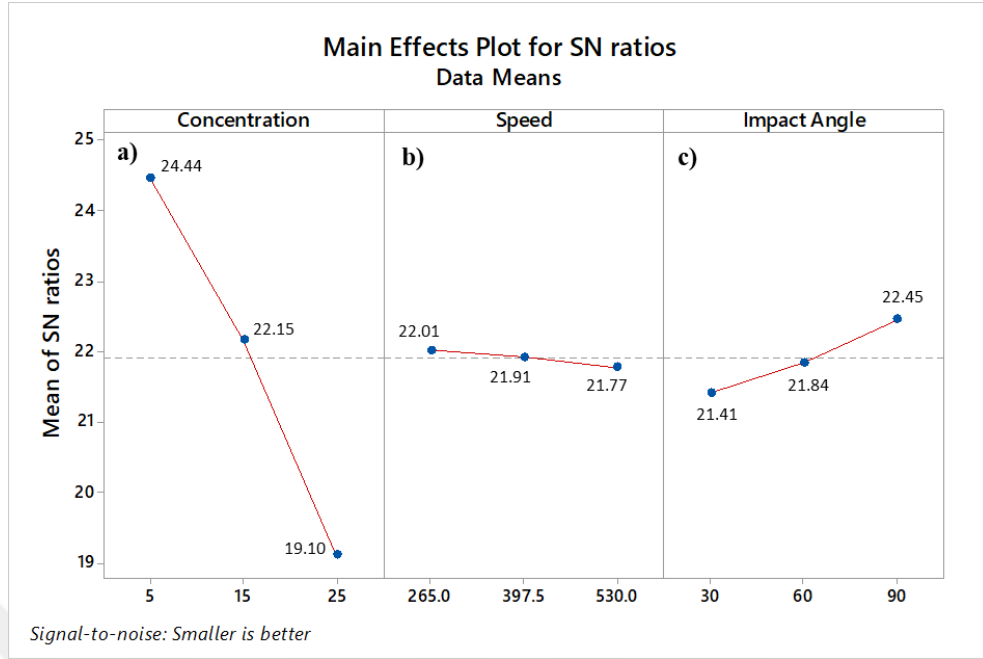
Paslanmaz çelik numunesinde krom (Cr) ve nikel (Ni) elementlerinin miktarı önemli ölçüde yüksektir. AISI 304, östenitik bir paslanmaz çeliktir. Östenit yapısının oda sıcaklığındaki stabilitesi Ni elementi tarafından sağlanmaktadır. Östenit yapıda çözülmüş karbon (C) oranının perlit yapıya göre daha yüksek olması, AISI 304 malzemesinin aşınma direncinin daha yüksek olmasını ve sürtünme koşullarında daha stabil davranış göstermesini sağlamaktadır. Çünkü östenit fazı, ferrit fazına kıyasla şekillendirme ve işlemeye daha uygundur [194]. Aşınma ortamında meydana gelen deformasyonlar mikro şekillendirme işlemi olarak tanımlanabilir. Cr elementi ise karbür oluşturma sebebiyle metalik malzemelerin aşınma direncini önemli ölçüde arttırmaktadır [195,196].

AISI 304 çeliği için L9 ortogonal matrisine göre gerçekleştirilen deney tasarımı ve elde edilen deneysel sonuçlar Çizelge 5.5'te verilmiştir. AISI 304 çeliği için elde edilen yüzey pürüzlülüğü ve ağırlık kaybı sonuçları, S/N metoduna göre birlikte analiz edilmiştir (Şekil 5.7). Analiz sonucunda en düşük yüzey pürüzlülüğü ve ağırlık kaybı sonuçlarını veren konsantrasyon değerleri sırasıyla %5, %15 ve %25 olarak bulunmuştur (Şekil 5.7.a). Bu sıralama, AISI 1015 çeliği için elde edilen deney sonuçları ile uyumludur. Konsantrasyonun artması ile AISI 304 çeliğinin yüzey pürüzlülüğü ve ağırlık kaybı değerleri artış göstermiştir. En düşük yüzey pürüzlülüğü ve ağırlık kaybı sonuçlarını veren çarpma hızı parametreleri sırasıyla, 265 rpm, 397,5 rpm ve 530 rpm olarak bulunmuştur (Şekil 5.7.b). Çarpma hızının artması ile parçacıkların sebep olduğu deformasyon miktarı artmakta, dolayısıyla yüzey pürüzlülüğü ve ağırlık kaybı da artmaktadır. AISI 304 çeliği için elde edilen çarpma hızı sonuçları, AISI 1015 çeliğinin deney sonuçlarını desteklemektedir. En düşük yüzey pürüzlülüğü ve ağırlık kaybı sonuçlarını veren çarpma açısı parametreleri, sırasıyla 90°, 60° ve 30° olarak bulunmuştur (Şekil 5.7.c). AISI 304 çeliği de AISI 1015 çeliğinde olduğu gibi düşük çarpma açılarında daha fazla deformasyona uğramıştır. Bu durum iki malzemenin de sünek malzeme karakteristiğine sahip olması ile ilişkilendirilebilir. Her iki malzeme için elde edilen analiz sonuçları literatür çalışmaları ile uyumludur [22,33,38]. Buna göre analiz sonucunda en iyi aşınma parametreleri, konsantrasyon oranı için %5, çarpma hızı için 265 rpm, çarpma açısı

için ise 90° olarak belirlenmiştir. Orta seviyeli aşınma parametreleri, konsantrasyon oranı için %15, çarpma hızı için 397,5 rpm, çarpma açısı için ise 90° olarak belirlenmiştir. En kötü aşınma parametreleri ise konsantrasyon oranı için %25, çarpma hızı için 530 rpm, çarpma açısı için ise 30° olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu parametrelere göre deneyler tekrar edilerek (güvenilirlik deneyleri) yüzey pürüzlülüğü ve ağırlık kaybı değerleri ölçülmüştür (Çizelge 5.6). Deneysel sonuçlar, Taguchi analizinden elde edilen tahmin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ağırlık kaybı verilerinde gerçek deney sonuçları ile tahmin değerleri arasında en iyi, orta ve en kötü parametreler için sırasıyla %25, %16,66 ve %4,28 oranlarında fark bulunmuştur. Ağırlık kaybı verilerinin aritmetik ortalaması 0,0033, standart sapma değeri ise 0,0021 olarak hesaplanmıştır. AISI 1015 çeliğinden elde edilen sonuçlara benzer şekilde fark değerleri standart sapma kaynaklı olarak anlamsız çıkmıştır. Bu sebeple ağırlık kaybı sonuçlarının deneysel anlamlılığı için regresyon analizi baz alınacaktır. Yüzey pürüzlülüğü verilerinde ise gerçek deney sonuçları ile tahmin değerleri arasında en iyi, orta ve en kötü parametreler için sırasıyla %17,04, %20, %14,48 oranlarında fark bulunmuştur. Yüzey pürüzlülüğü için elde edilen fark değerleri deneysel sonuçların anlamlılığı ve güvenilirliği açısından kabul edilebilir seviyededir.

Çizelge 5.5. AISI 304 malzemesi için L9 ortogonal matrisine göre gerçekleştirilen deney tasarımı ve sonuçları.

Deney No	Konsantrasyon (% Ağırlık)	Hız (rpm)	Çarpma Açısı (°)	Deney Sonuçları	
				Ağırlık Kaybı (gr.)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra-μm)
1	5	265	30	0,0009 ^{±0,04}	0,095 ^{±0,03}
2	5	397,5	60	0,0022 ^{±0,01}	0,082 ^{±0,04}
3	5	530	90	0,0028 ^{±0,06}	0,078 ^{±0,02}
4	15	265	60	0,0009 ^{±0,02}	0,106 ^{±0,06}
5	15	397,5	90	0,0030 ^{±0,01}	0,111 ^{±0,05}
6	15	530	30	0,0055 ^{±0,03}	0,114 ^{±0,03}
7	25	265	90	0,0018 ^{±0,04}	0,140 ^{±0,04}
8	25	397,5	30	0,0057 ^{±0,04}	0,160 ^{±0,01}
9	25	530	60	0,0069 ^{±0,07}	0,172 ^{±0,05}



Şekil 5.7. AISI 304 malzemesi için gerçekleştirilen S/N analizi sonuçları. a) konsantrasyon, b) çarpma hızı, c) çarpma açısı.

Çizelge 5.6. AISI 304 malzemesi için S/N analizi sonucunda elde edilen aşınma parametrelerine göre deney sonuçları.

Deney Adı	Konsantrasyon (%)	Hız (rpm)	Çarpma Açısı (°)	Deneylerin Doğrulaması					
				Ağırlık Kaybı (gr.)			Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)		
				Gerçek	Tahmini	Fark	Gerçek	Tahmini	Fark
En İyi	5	265	90	0,0004 ±0,001	0,0003	%25	0,088 ±0,02	0,073	%17,0 4
Orta	15	397,5	60	0,0030 ±0,001	0,0035	%16,66	0,140 ±0,01	0,112	%20
En Kötü	25	530	30	0,0070 ±0,002	0,0073	%4,28	0,145 ±0,02	0,166	%14,48

AISI 304 malzemesi için belirlenen aşınma parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve ağırlık kaybı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla varyans analizi (ANOVA) gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.7 yüzey pürüzlülüğü, Çizelge 5.8 ise ağırlık kaybı sonuçları için yapılan ANOVA değerlerini vermektedir. Çizelge 5.7’de bulunan p değerleri ($p < 0,05$ anlamlılık seviyesi) incelendiğinde konsantrasyon parametresinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Aşınma parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkileri, sırasıyla, %91,89 oranında

konsantrasyon, %3,34 oranında çarpma açısı, %1 oranında çarpma hızı olarak bulunmuştur. AISI 304 malzemesi için de konsantrasyon parametresi, yüzey pürüzlülüğü üzerinde diğer aşınma parametrelerine kıyasla daha etkili rol oynamıştır. Analiz sonucunda hata oranı %3,77 olarak bulunmuştur. Yüzey pürüzlülüğü için elde edilen R-Sq ve R-Sq (adj) değerleri sırasıyla %96,23 ve %84,92 oranında çıkmıştır. R-Sq (adj) değerinin, %70'ten büyük çıkması aşınma parametrelerinin yüzey pürüzlülüğünü açıklamak için yeterli olduğunu göstermektedir. Çizelge 5.8'de bulunan p değerleri, konsantrasyon ve çarpma hızı parametrelerinin ağırlık kaybı üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Aşınma parametrelerinin ağırlık kaybı üzerindeki etkileri sırasıyla, %58,97 oranında çarpma hızı, %30,76 oranında konsantrasyon, %7,69 oranında çarpma açısı değerlerinde tespit edilmiştir. Hata oranı ise %0 olarak bulunmuştur. Ağırlık kaybı için elde edilen R-Sq ve R-Sq (adj) değerleri, sırasıyla %98,95 ve %95,82 oranında çıkmıştır. R-Sq (adj)> %70 olarak bulunması, aşınma parametrelerinin ağırlık kaybını açıklamak için yeterli olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.7. AISI 304 malzemesi yüzey pürüzlülüğü ANOVA sonuçları.

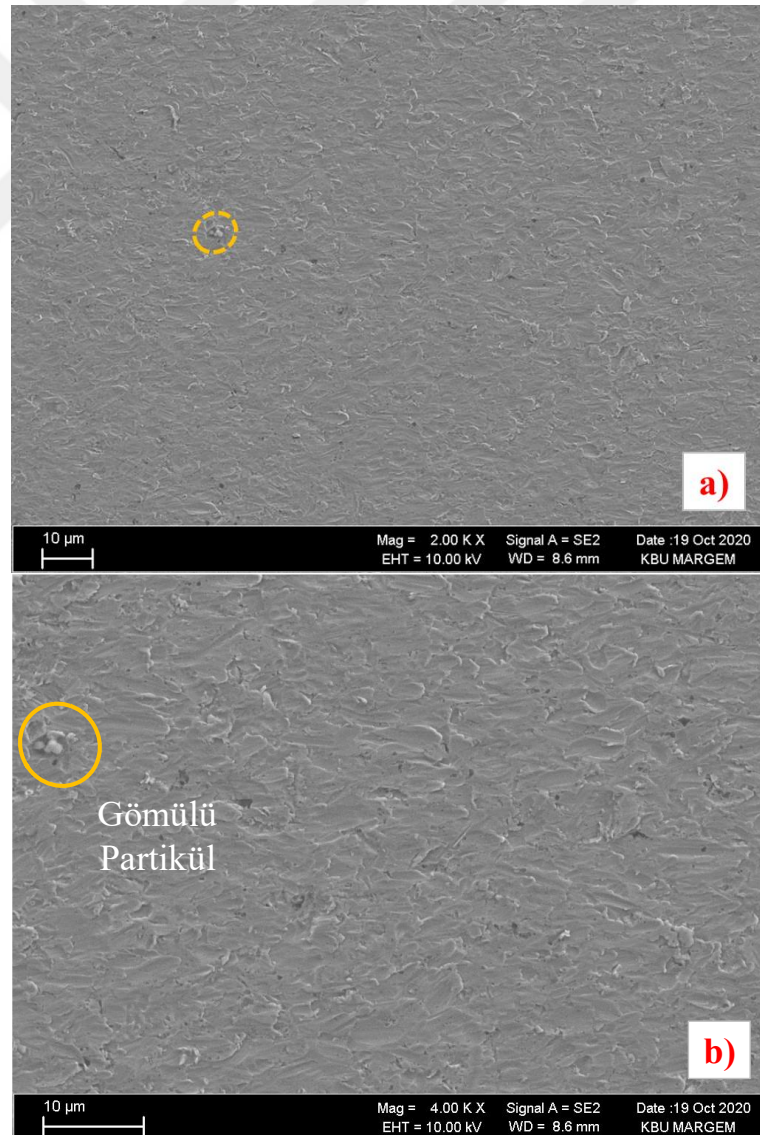
Parametreler	Serbestlik Derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler Ortalaması (MS)	F değeri	P değeri	% Etki
Konsantrasyon	2	0,008083	0,004041	24,38	0,039	91,89
Hız (rpm)	2	0,000088	0,000044	0,27	0,790	1
Çarpma Açısı	2	0,000294	0,000147	0,89	0,530	3,34
Hata	2	0,000332	0,000166			3,77
Toplam	8	0,008796				100
R-sq	%96,23		R-sq(adj)	%84,92		

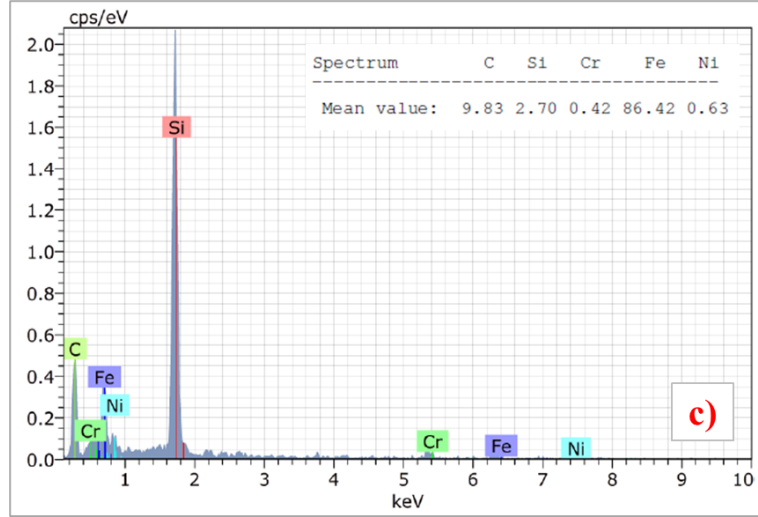
Çizelge 5.8. AISI 304 malzemesi ağırlık kaybı ANOVA sonuçları.

Parametreler	Serbestlik Derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler Ortalaması (MS)	F değeri	P değeri	% Etki
Konsantrasyon	2	0,000012	0,000006	29,92	0,032	30,76
Hız (rpm)	2	0,000023	0,000011	56,38	0,017	58,97
Çarpma Açısı	2	0,000003	0,000002	8,31	0,107	7,69
Hata	2	0,000000	0,000000			0
Toplam	8	0,000039				100
R-sq	%98,95		R-sq(adj)	%95,82		

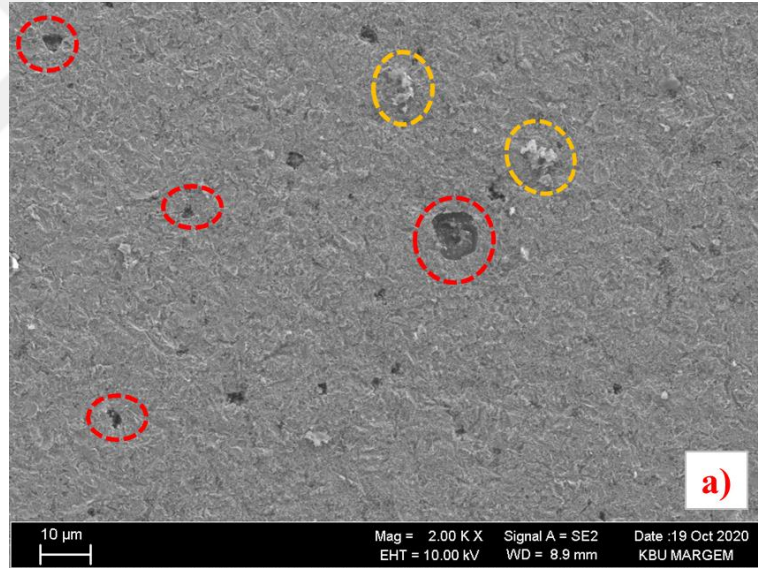
S/N analizine göre en iyi aşınma koşullarında (%5 oranında konsantrasyon, 265 rpm çarpma hızı ve 90° çarpma açısı) elde edilen SEM görüntüleri, Şekil 5.8.a ve Şekil 5.8.b’de verilmiştir. Aşınma yüzeyinde gerçekleştirilen EDX analizi sonuçları ise Şekil 5.8.c’de verilmiştir. Şekil 5.8.a incelendiğinde yüzey morfolojisinin genel olarak düzgün olduğu görülmektedir. Noktasal bölgelerde, partiküllerin yüzeye dik açıyla çarpmasından kaynaklı gömülmeler oluşmuştur. Ancak AISI 1015 malzemesinde gerçekleştiği kadar çukurlaşma ve partikül gömülme durumuna rastlanılmamıştır. Yapılan EDX analizi de bu bulguları desteklemektedir (Şekil 5.8.c). Bunun sebebi olarak AISI 304 çeliğinin (214 HV) AISI 1015 çeliğine (142 HV) kıyasla daha sert bir yüzeye sahip olması gösterilebilir. Yüzeydeki sertlik arttıkça aşınmaya karşı olan direnç artmaktadır. Orta seviyeli aşınma koşullarında (%15 oranında konsantrasyon, 397,5 rpm çarpma hızı ve 60° çarpma açısı) elde edilen SEM görüntüleri Şekil 5.9.a ve Şekil 5.9.b’de verilmiştir. Aşınma yüzeyinde gerçekleştirilen EDX analizi sonuçları ise Şekil 5.9.c’de verilmiştir. Şekil 5.9.a incelendiğinde yüzeydeki genel görünümün bozulduğu, çukurcukların ve ufak boyutlarda da olsa krater aşınmasının olduğu görülmektedir. Ayrıca bu deney setinde gömülmüş partiküllerin miktarı da artmıştır. Bunun sebebi olarak çarpma hızı ve konsantrasyonun artması, partikül çarpma açısının ise düşmesi gösterilebilir. Bu parametrelerin etkileşimi, yüzeydeki aşınma miktarının artmasına sebep olmuştur. En kötü aşınma koşullarında (%25 oranında konsantrasyon, 530 rpm çarpma hızı ve 30° çarpma açısı) elde edilen SEM görüntüleri Şekil 5.10.a ve Şekil 5.10.b’de verilmiştir. Aşınma yüzeyinde gerçekleştirilen EDX analizi sonuçları ise Şekil 5.10.c’de verilmiştir. Şekil 5.10.a incelendiğinde yüzey formunun diğer deney setlerine nazaran oldukça bozulduğu görülmektedir. Ayrıca yüzeyde yüksek çarpma hızı ve düşük çarpma açısı parametrelerinin etkileşiminden kaynaklı ploughing aşınması meydana gelmiştir. Bu aşınma mekanizmasında aşındırıcı partiküller öncelikle yüzeyi deformasyona uğratarak çatlak ve yarık oluşumuna sebep olmaktadır. Devam eden tekrarlı akış sebebiyle meydana gelen çatlaklar, yorulma kaynaklı büyüyerek ploughing aşınmasını meydana getirmektedir [6]. Bu deney setinde de yüzeyde gömülü partiküllerin varlığı oldukça artmıştır. Bu durum EDX analizi ile de desteklenmektedir. Genel olarak her iki malzemeye ait SEM görüntüleri incelendiğinde AISI 304 malzemesine ait deney setlerinde daha az hasarın meydana geldiği tespit edilmiştir. Aynı koşullar altında aşınmaya maruz bırakılmış iki malzemenin tribolojik performansını belirlemede mekanik özellikleri önemli rol

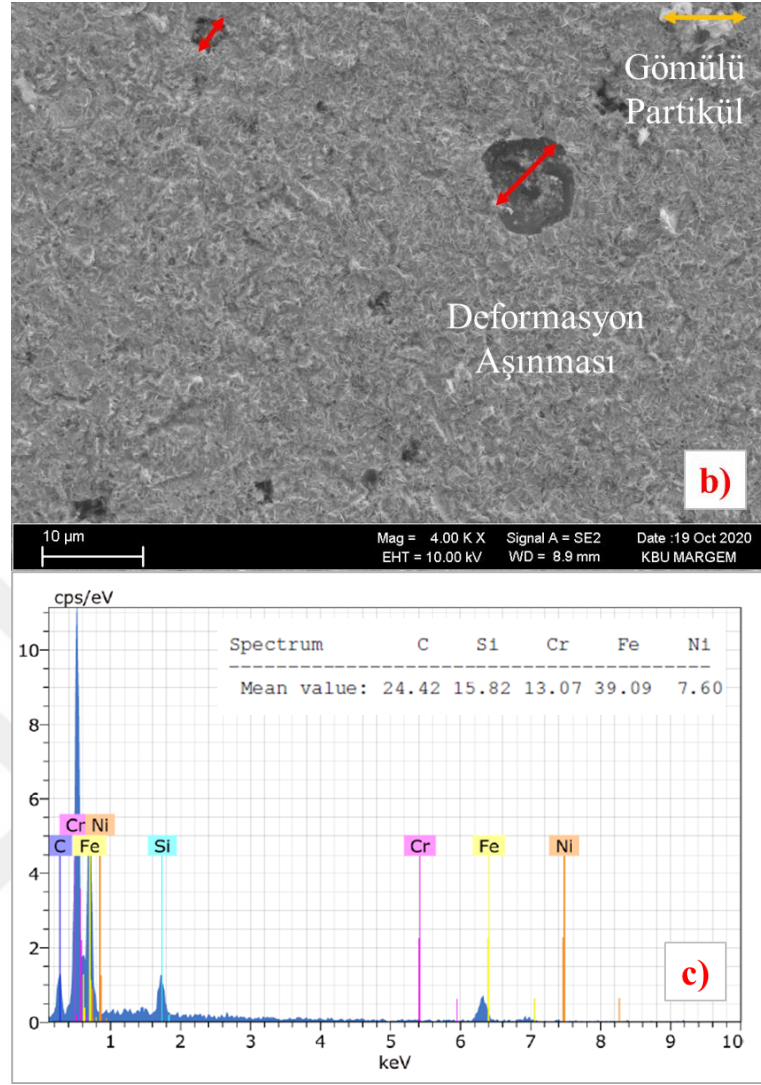
oynamıştır. AISI 304 malzemesinin sahip olduğu yüksek sertliğin yanı sıra korozyon direnci de erozif aşınmaya karşı direncini oldukça arttırmaktadır. Sulu ortamlarda gerçekleştirilen aşınma deneylerinde, malzeme yüzeyinin oksitlenmeye maruz kalması, aşınma direncini azaltmakta ve çatlak oluşumuna sebep olmaktadır. Tekrarlayan mekanik yüklemeler sonucunda, yüzeydeki çatlaklar büyümekte ve plastik deformasyon meydana gelmektedir. Erozyon ve korozyon aşınmaları temelde farklı olgular olsalar dahi sulu çamur erozyon aşınma mekanizmasında her iki aşınma tipi eş zamanlı gerçekleşmektedir [6]. Bu sebeple malzemenin korozyon direncinin erozif aşınma performansı üzerinde belirleyici bir rolü vardır. SEM görüntülerinin yanı sıra bu malzemelere ait elde edilen ağırlık kaybı ve yüzey pürüzlülüğü sonuçları bu bulguları desteklemektedir (Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.6).



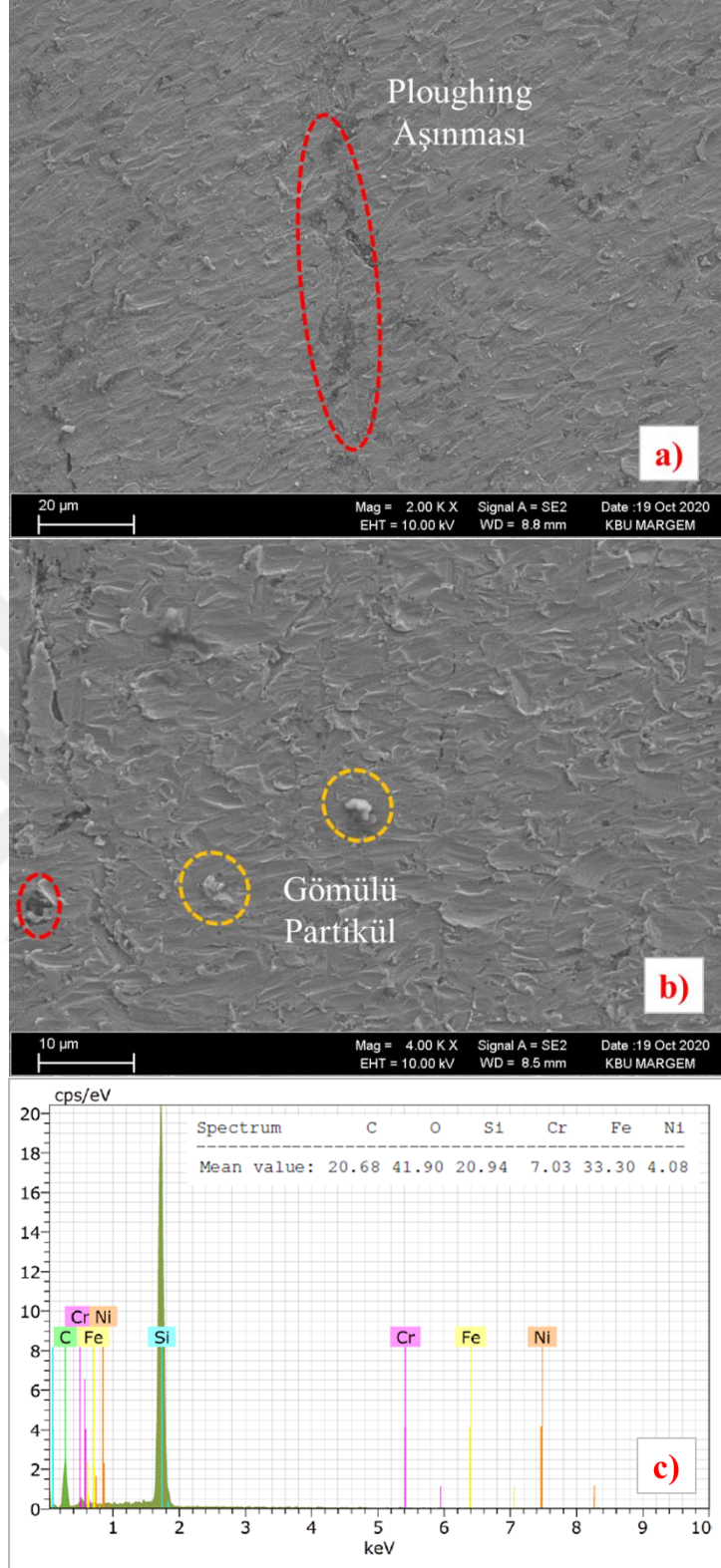


Şekil 5.8. AISI 304 malzemesi için S/N analizi sonrası en iyi aşınma koşullarında elde edilen SEM ve EDX görüntüleri. a) 2kx yakınlaştırma oranında alınan görüntü, b) 4kx yakınlaştırma oranında alınan görüntü, c) en iyi aşınma koşulu için EDX görüntüsü.



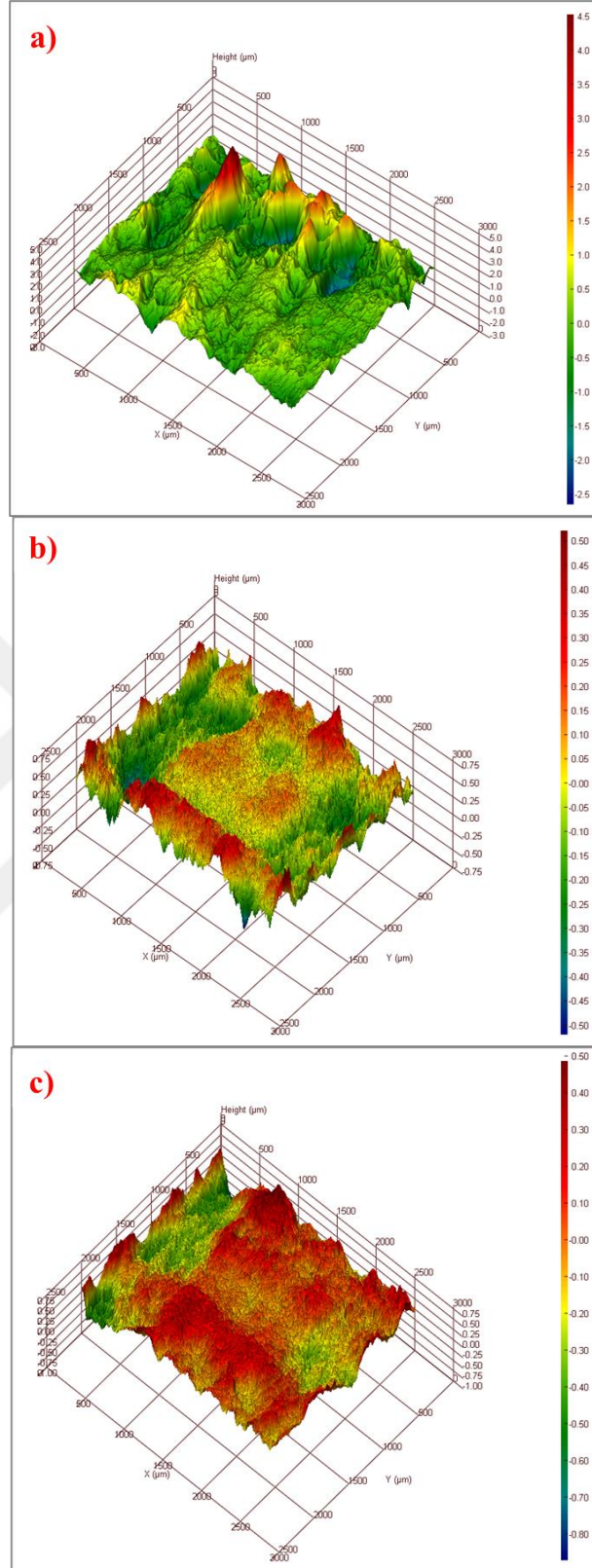


Şekil 5.9. AISI 304 malzemesi için S/N analizi sonrası orta aşınma koşullarında elde edilen SEM ve EDX görüntüleri. a) 2kx yakınlaştırma oranında alınan görüntü, b) 4kx yakınlaştırma oranında alınan görüntü, c) en iyi aşınma koşulu için EDX görüntüsü.



Şekil 5.10. AISI 304 malzemesi için S/N analizi sonrası en kötü aşınma koşullarında elde edilen SEM ve EDX görüntüleri. a) 2kx yakınlaştırma oranında alınan görüntü, b) 4kx yakınlaştırma oranında alınan görüntü, c) en iyi aşınma koşulu için EDX görüntüsü.

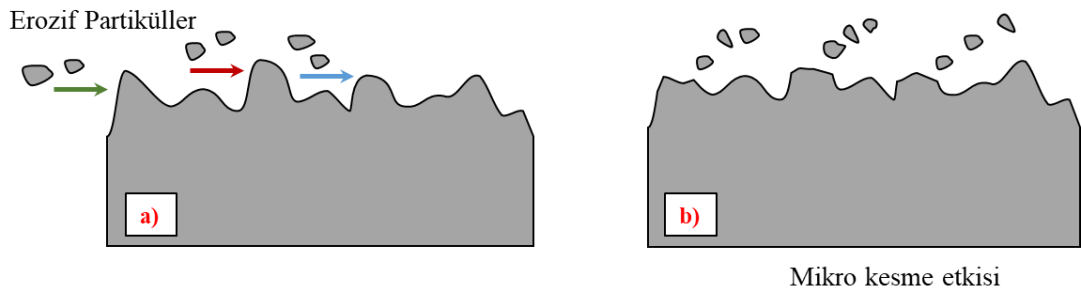
S/N analizine göre en iyi aşınma koşullarında (%5 oranında konsantrasyon, 265 rpm çarpma hızı ve 90° çarpma açısı) elde edilen 3D Topografya görüntüleri Şekil 5.11.a'da verilmiştir. Şekil 5.11.a incelendiğinde, yüzeyde hâkim rengin yeşil olduğu, ancak minimal düzeyde tepecik ve çukurcukların bulunduğu görülmektedir. SEM görüntülerinde olduğu gibi AISI 304 malzemesine ait bu görüntülerde de AISI 1015 malzemesine (Şekil 5.6.a) nazaran daha düzgün bir yüzey morfolojisi ortaya çıkmıştır. Bu durumun oluşmasında malzeme sertliğinin yanı sıra sünekliğin de etkisi oldukça büyüktür. AISI 304 malzemesinin sahip olduğu yüksek süneklik sayesinde [197] yüzeyde lokal deformasyonlar meydana gelmiş ancak aşındırıcı parçacıkların kinetik enerjisi kısmen sönümlenmiştir [46]. Bu sayede yüzeyde derin deformasyon izleri meydana gelmemiş böylelikle yüzey morfolojisi korunmuştur. Orta seviyeli aşınma koşullarında (%15 oranında konsantrasyon, 397,5 rpm çarpma hızı ve 60° çarpma açısı) elde edilen 3D Topografya görüntüleri Şekil 5.11.b'de verilmiştir. Şekil 5.11.b incelendiğinde, artan çarpma hızı ve konsantrasyon ile yüzeyde kırmızı tonlarının arttığı görülmektedir. Bu durum AISI 1015 malzemesi için de aynı şekilde gerçekleşmiştir (Şekil 5.6.b). En kötü aşınma koşullarında (%25 oranında konsantrasyon, 530 rpm çarpma hızı ve 30° çarpma açısı) elde edilen 3D Topografya görüntüleri Şekil 5.11.c'de verilmiştir. Şekil 5.11.c incelendiğinde, Şekil 5.6.c benzeri bir sonuç elde edilmiştir. Düşük çarpma açısı, yüksek çarpma hızı ve yüksek aşındırıcı konsantrasyonu parametrelerinin etkileşimi sonucu yüzey pürüzlülüğü maksimum seviyesine ulaşmıştır. Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular genel olarak değerlendirildiğinde, çarpma hızı ve konsantrasyon parametrelerinin artışı ile aşınma miktarının, dolayısıyla da yüzey pürüzlülüğü ve ağırlık kaybının arttığı gözlemlenmiştir. Çarpma açısı parametresinin düşmesi ise çelik alaşımlarının aşınması üzerinde olumsuz bir etki oluşturmuştur. Genel itibarıyla her iki malzemenin tribolojik davranışı benzerlik göstermiştir. Ancak AISI 304 malzemesinin sahip olduğu yüksek sertlik, süneklik ve korozyon direnci, erozif aşınma mekanizmasında daha iyi performans göstermesini sağlamıştır.



Şekil 5.11. AISI 304 malzemesi için S/N analizi sonrası belirlenen parametrelere göre elde edilen 3D Topografya görüntüleri. a) en iyi aşınma koşulları, b) orta aşınma koşulları, c) en kötü aşınma koşulları.

5.1.5. AISI 1015 ve AISI 304 Malzemelerinin Kıyaslanması ve Tartışma

İki farklı çelik alaşımına ait istatistiksel analiz sonuçları Çizelge 5.9’da verilmiştir. İki alaşım birbirinden sertlik ve metalografik açıdan farklı olmasına rağmen ANOVA sonuçları hariç diğer istatistik verilerin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Bu durum her iki malzemenin, giriş parametrelerinden farklı seviyelerde etkilenseler bile erozif aşınma ortamında benzer davranış göstereceğini ve güvenle kullanılabileceğini göstermektedir. Yüzey pürüzlülüğü ortalama değerleri her iki malzemede de parlatma ile elde edilebilecek yüzey kalitesi seviyesindedir. Bu değerler, malzemeye çarpan sert partiküllerin tıraşlama etkisi ile açıklanabilir. Erozif aşındırıcı konsantrasyon oranı arttıkça, pürüzlülük değerlerinin arttığı Şekil 5.2 ve Şekil 5.7’de görülmektedir. Konsantrasyon oranı arttıkça malzeme yüzeyine çarpan ve geri dönen malzeme miktarı da artacaktır. Bu duruma bağlı olarak, konsantrasyon arttıkça pürüzlülük değerleri maksimum 0,1 μm artış göstermiştir. Abrasif ortam koşulları itibarıyla 0,1 μm ’lik bir artışın ihmal edilebilir seviyede olduğu söylenebilir. SiO_2 parçacıklarının sert yapısı sayesinde pürüzlülük tıraşlama etkisi göstermeleri de yüksek yüzey kalitesi eldesi açısından önemlidir. Bu durum, pürüzlülük tepeleri boyunca abrasif aşınma mekanizması oluşumuyla açıklanabilir (Şekil 5.12.a). Mukavemeti düşük olan tepe noktalarına temas eden sert erozif partiküllerin oluşturduğu mikro kesme etkisi ile yüzey düzlemselliğinin sağlandığı söylenebilir (Şekil 5.12.b). Genel olarak erozif aşınmanın yüzey kalitesini artırıcı etki gösterdiği; yüksek alaşımlı çelik malzemelerde ise yüzey kalitesi artışının daha hissedilir seviyede olduğu görülmektedir. Bu nedenle erozif aşınmanın etkisi ağırlık kaybı açısından değerlendirilmelidir.



Şekil 5.12. Aşındırıcı parçacıkların oluşturduğu mikro kesme etkisi. a) pürüzlülük tepeleri boyunca erozif aşınma mekanizması, b) sert aşındırıcı parçacıkların oluşturduğu mikro kesme etkisi.

Dinamik şekilde yüzeye etki eden erozif parçacıkların oluşturduğu yorulma etkisi ve abrasif aşınma etkisiyle kopan partiküller sebebiyle kütle kayıplarının oluşması kaçınılmazdır. Her iki malzemede de benzer miktarda ağırlık kaybı oluşması, elementel farklılığın ağırlık kaybı üzerinde anlamlı bir etki oluşturmadığını göstermektedir. Ortalama ağırlık kaybı miktarı AISI 304 malzemesinde 0,00331 g, AISI 1015 malzemesinde ise 0,00334 g olarak bulunmuştur (Çizelge 5.9). Fakat iki malzeme arasında ciddi seviyede sertlik farklılığı bulunması, ağırlık kaybı sonuçları ile fiziksel açıdan tutarlı değildir. Sert yüzeylerde atomsal boşlukların minimum seviyede bulunması sebebiyle, malzeme deformasyonunun daha zor ve az olması beklenmektedir. Bu durum, AISI 1015 malzemesine temas eden sert partiküllerin yüzeye saplanması ile açıklanabilir. AISI 1015 malzemesinde yüzeye saplanan sert erozif partiküller sebebiyle ağırlık kaybı minimum seviyede gerçekleşmiştir. Yüzeyden malzeme kaybı olsa bile, deformasyon sonrası oluşan yüzey altı yumuşak bölgeyi erozif partiküller doldurmuştur. Şekil 5.3, Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te verilen EDX görüntüleri, bu durumu doğrular niteliktedir. AISI 304 malzemesinde ise yüksek yüzey sertliği nedeniyle erozif partiküller daha az miktarda yüzeye saplanma etkisi göstermiş ve ağırlık kaybı minimum seviyede kalmıştır. Bu sonuçların sayısal olarak ve SEM, EDX görüntüleri ile ele alınması gerekmektedir. SEM görüntüleri incelendiğinde (Şekil 5.3, Şekil 5.4, Şekil 5.5), AISI 1015 malzemesinde daha fazla gömülü partiküller olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca AISI 1015 malzemesinin kimyasal kompozisyonundaki Si miktarı, AISI 304 malzemesine göre daha düşük olmasına rağmen (Çizelge 4.2), EDX analizinde Si oranı daha yüksek çıkmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ve ağırlık kaybı açısından benzer sonuçlar ortaya çıkmasına rağmen paslanmaz çeliğin korozyon dayanımı sayesinde daha uzun servis ömrüne sahip olması beklenmektedir.

Çizelge 5.9'a göre ANOVA analizinde oluşan farklılıklar yüzey pürüzlülüğü açısından dikkat çekici seviyededir. Yüzey pürüzlülüğü açısından konsantrasyon oranının AISI 304 malzemesinde %91,89, AISI 1015 malzemesinde ise %58,98 oranında etkili olduğu ve her iki malzeme içinde konsantrasyon arttıkça, yüzey pürüzlülüğünün artış trendi gösterdiği belirlenmiştir. İki malzeme arasındaki fark, sertlik ile açıklanabilir. Paslanmaz çelik malzeme daha sert olduğu için yüzeye çarpan parçacıklar, yüksek bir enerji ile geri saçılıp, yeni gelen tanelere çarparak entropiyi arttırmış ve bu duruma

bağlı olarak minimum ve maksimum değer arasında daha fazla fark oluşmuştur. Fark artışına bağlı olarak da AISI 304 malzemesindeki konsantrasyon etkisi, AISI 1015'e göre %32,91 oranında daha yüksek çıkmıştır. Diğer parametreler incelendiğinde ise hız ve açı değişiminin, AISI 1015'te yüzey pürüzlülüğü değişimi üzerinde daha etkili olduğu, fakat AISI 304'ün yüzey pürüzlülüğü üzerinde ihmal edilebilir seviyede etkileri olduğu görülmektedir. Konsantrasyona bağlı olarak yüzeyde oluşan kararlı atomlar ve oksit tabakaları sebebiyle AISI 304 hız ve açı değişimine duyarsız hale gelmiştir. Aşım elementlerinin yüksek olması da oksit tabakalarının oluşumunu hızlandırmıştır. AISI 1015 malzemesinin daha düşük aşım elementine sahip olması sebebiyle yüzeyde koruyucu tabaka oluşumu AISI 304 kadar gerçekleşmemiş ve erozif partiküllerin açı ve hız değişimlerinden fiziksel açıdan belirli bir seviyede etkilenmiştir.

Çarpma hızı ve çarpma açısı etkisi ağırlık kaybında ciddi bir şekilde görülmüştür. AISI 1015 malzemesi, çarpma hızından %70, çarpma açısından %12,5 oranında etkilenerek AISI 304 malzemesinden farklılaşmıştır. AISI 304 malzemesinin yüzeyinde oluşan koruma tabakaları sayesinde, ağırlık kaybı açısından hız ve açı parametrelerinden AISI 1015'e göre daha düşük seviyede etkilenmiştir (Çizelge 5.9). AISI 1015 malzemenin yüzeyine etki eden erozif parçacıkların hızlarının yani enerjilerinin artmasıyla, malzemede plastik şekil değişimi oranı artmıştır. Erozif aşınma esnasında tekrarlı yük nedeniyle yorulan yüzey ve yüzey altı bölgeleri, yüzeye etkiyen çarpma hızının artmasıyla daha kolay deforme olmuştur. AISI 1015 malzemesi açı değişiminden de fiziksel olarak incelenmesi gereken bir seviyede etkilenmiştir. Açı değeri 90°'den 30°'ye düştükçe ağırlık kaybının arttığı görülmektedir (Şekil 5.2). Bu durum, 90° konumunda sadece yorulma aşınmasının oluşumu, 30° konumunda ise hem yorulma hem de abrazyon aşınmasının varlığı ile açıklanabilir. Açı değeri düştükçe yüzeye temas eden parçacıklar kayma ve yuvarlanma hareketi yaparak, abrasif aşınmaya sebebiyet vermiştir. AISI 1015 malzemesi, AISI 304 malzemesine kıyasla, partikül temas açısının azalması sebebiyle yüzeyde oluşan yorulma ve abrasif aşınma mekanizmalarına direnç gösterememiştir.

Çizelge 5.9. Malzemelerin kıyaslanması.

	AISI 1015 (142 HV)	AISI 304 (214 HV)
Yüzey Pürüzlülüğü R-sq(adj)	%85,04	%84,92
Ağırlık Kaybı R-sq(adj)	%99,45	%95,82
Yüzey Pürüzlülüğüne Etki Oranı	Konsantrasyon: %58,98 Çarpma Hızı: %12,08 Çarpma Açısı: %25,20	Konsantrasyon: %91,89 Çarpma Hızı: %1 Çarpma Açısı: %3,34
Ağırlık Kaybına Etki Oranı	Konsantrasyon: %15 Çarpma Hızı: %70 Çarpma Açısı: %12,5	Konsantrasyon: %30,76 Çarpma Hızı: % 58,97 Çarpma Açısı: %7,69
Yüzey Pürüzlülüğü Ortalama Değeri ve Standart Sapması	Ortalama Değer: 0,1650 μm Standart Sapma: 0,028	Ortalama Değer: 0,1175 μm Standart Sapma: 0,0313
Ağırlık Kaybı Ortalama Değeri ve Standart Sapması	Ortalama Değer: 0,00334 gr Standart Sapma: 0,0022	Ortalama Değer: 0,00331 gr Standart Sapma: 0,0021

5.2. İKİ BOYUTLU NANO PARTİKÜL ORTAMI AŞINMA DENEYLERİ

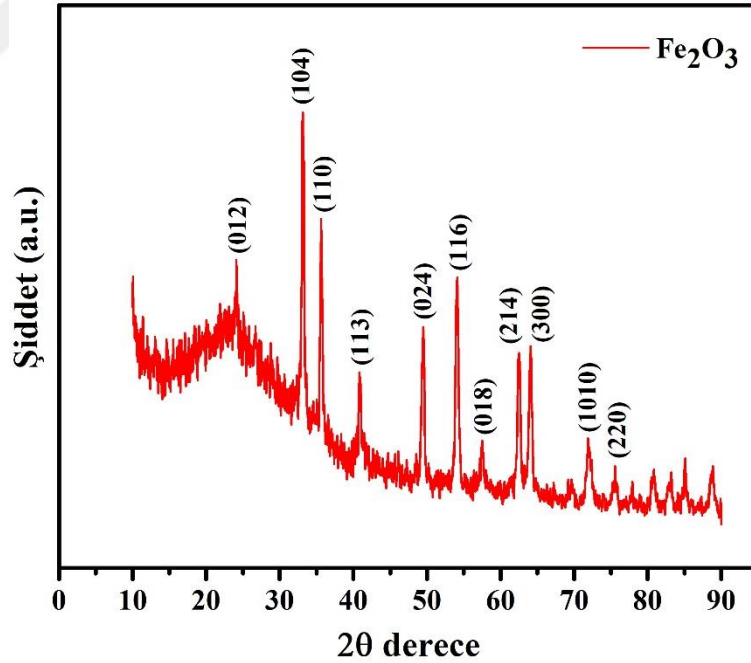
Bu tez çalışmasında iki farklı deney düzeneği üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Birinci ortam, mikro partikül ortamındaki sıvı erozif aşınma test düzeneği ile gerçekleştirilirken, ikinci deney düzeneğinde nano partikül katkılı motor yağı ortamında tribolojik deneyler gerçekleştirilmiştir.

Geleneksel motor yağları aşırı sıcak ortamlarda ve yük taşıma kapasitelerine göre yetersiz kalmaya başlamıştır [198,199]. Günümüzdeki yağlayıcılarda da partikül katkıları kullanılmaya başlanmıştır [75,76,200,201]. Endüstride de kullanılan makinelerin ve makine parçalarının ömrünü uzatmak ve enerji tüketimini azaltmak amacıyla, üstün yağlayıcı performansına sahip pratik uygulamalar kullanılmaktadır [198,202]. Son yıllarda kapsamlı bir şekilde araştırılan, yağlayıcı katkı maddesi olarak kullanılan nano partiküller; nano boyutları ve fizikokimyasal özellikleri sebebiyle dikkat çekici bir konumdadır. Özellikle metal ve karbon bazlı nano partiküller, yağlayıcıların sahip olduğu tribolojik özellikleri önemli derecede iyileştirmiştir [75,76,80,92,161,200,202,203]. Bu deney setinde, yağlayıcı bulunan aşınma ortamlarındaki nano partikül etkisi araştırılmıştır. Sentezlenen Fe_2O_3 , MXene ve g- C_3N_4 nano partikülleri aşınma ortamındaki yağlayıcılara katkı maddesi olarak eklenmiştir.

5.2.1. Nano Partiküllerin Karakterizasyonu

5.2.1.1. XRD Analizleri

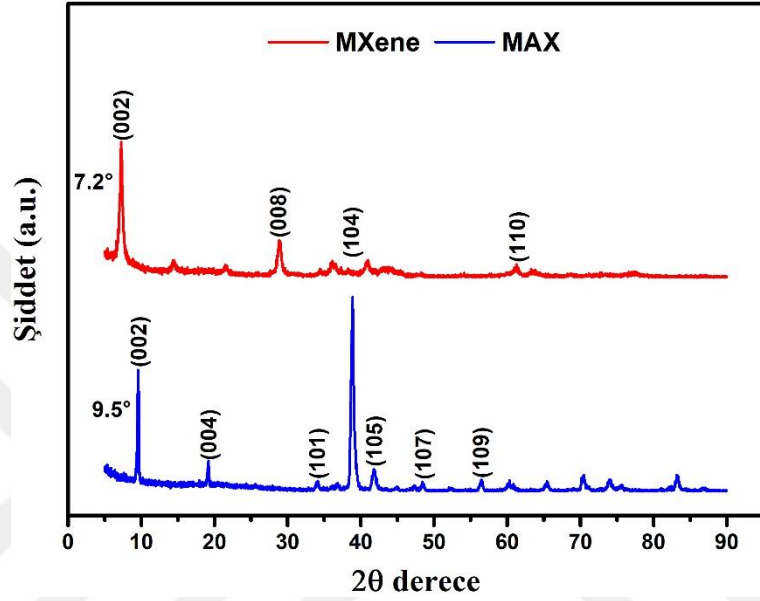
Bu bölümde sentezlenen nano partiküllerin XRD analiz yöntemiyle kristallik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen grafikler, literatür verilene dayandırılarak yorumlanmıştır. İlk olarak Fe_2O_3 nano partikülünün Şekil 5.13'te verildiği üzere XRD grafiği elde edilmiştir. Şekil 5.13'te verilen XRD analiz sonucuna göre, 2θ değerleri yaklaşık olarak, $24,2^\circ$, $33,2^\circ$, $35,5^\circ$, $40,9^\circ$, $49,5^\circ$, $54,1^\circ$, $57,6^\circ$, $62,2^\circ$, $64,2^\circ$, 72° , $75,3^\circ$ 'lerde bariz olarak görülen ve belirtilen piklerin, hekzagonal yapıdaki Fe_2O_3 pikleri olduğu ve sırasıyla (012), (104), (110), (113), (024), (116), (018), (214), (300), (1010) ve (220) kristal düzlemlerine ait olduğu düşünülmektedir [126,148,204–206]. XRD grafiğindeki güçlü ve keskin tepe noktaları Fe_2O_3 nano partikülünün yüksek kristallliğini göstermektedir.



Şekil 5.13. Fe_2O_3 XRD analizi.

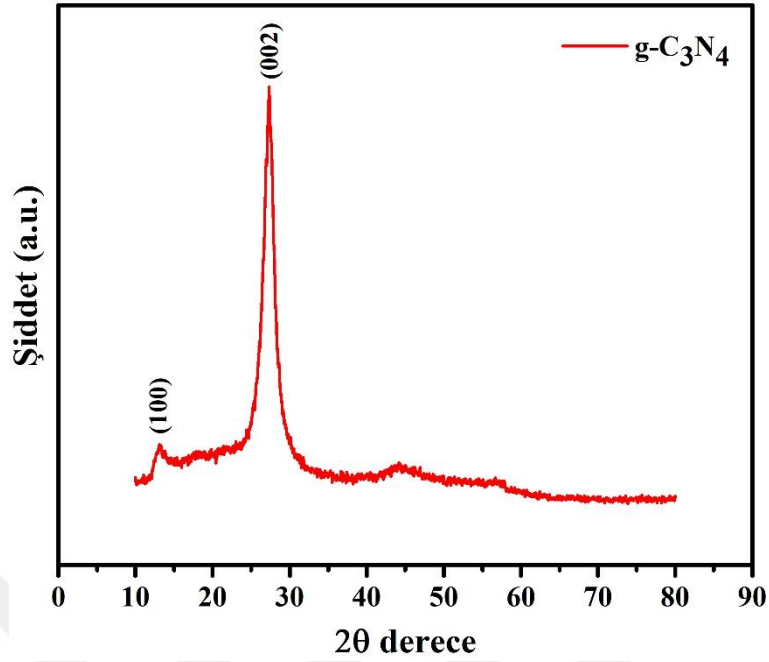
İkinci olarak MAX fazından MXene'ye dönüşüm sürecinin karakterize edilmesi amaçlanmaktadır. MXene nano partikülünün Şekil 5.14'te verilen XRD grafiği elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre MAX fazını oluşturan $\text{Ti}_3\text{Al}_2\text{C}_3$ 'ün 2θ değeri yaklaşık

olarak 10° , 20° , 35° , 39° , 41° , 48° ve 56° 'dir. Sırasıyla (002), (004), (101), (104), (105), (107) ve (109) düzlemlerine ait pikler gözlenmiştir. MAX fazının MXene'ye dönüşümü, içindeki alüminyumun çözünmesidir ve bunun en önemli işareti pikin 10° sola kaymasıdır. Bu kayma yaklaşık $9,5^\circ$ ile $7,2^\circ$ arasında değişmektedir. Bu nedenle üretimin başarılı olduğu düşünülmektedir [152,207].



Şekil 5.14. MXene XRD analizi.

Son olarak g-C₃N₄ nano partikülünün Şekil 5.15'te verildiği üzere XRD grafiği elde edilmiştir. XRD grafiği incelendiği zaman iki adet belirgin tepe noktası görülmektedir. Şekil 5.15'te verilen XRD analiz sonucuna göre, 2θ değerleri yaklaşık olarak $13,1^\circ$ ve $27,5^\circ$ 'de bariz olarak görünen g-C₃N₄ pikleri olduğu ve düzlem içi yapısal paketlemeye karşılık gelen (100) ve katmanlar arası yapısal paketlemeye karşılık gelen (002) düzlemlerine ait olduğu düşünülmektedir [92,130,165,208,209].

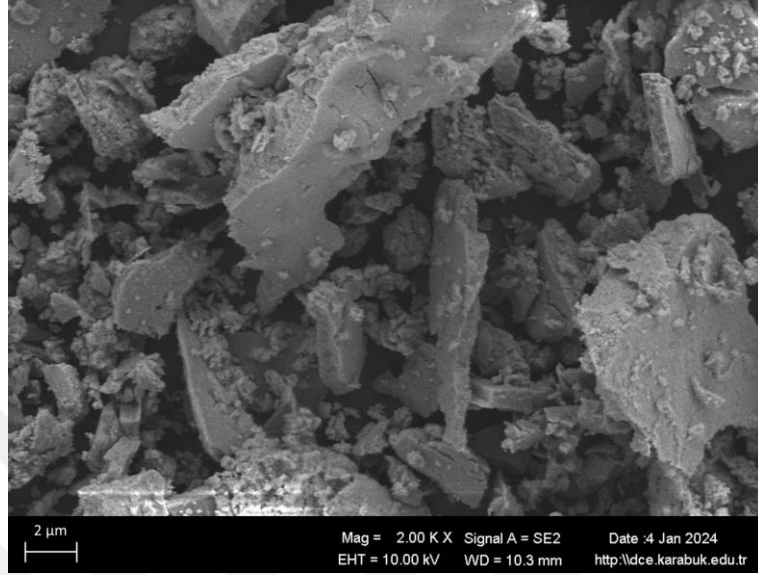


Şekil 5.15. g-C₃N₄ XRD analizi.

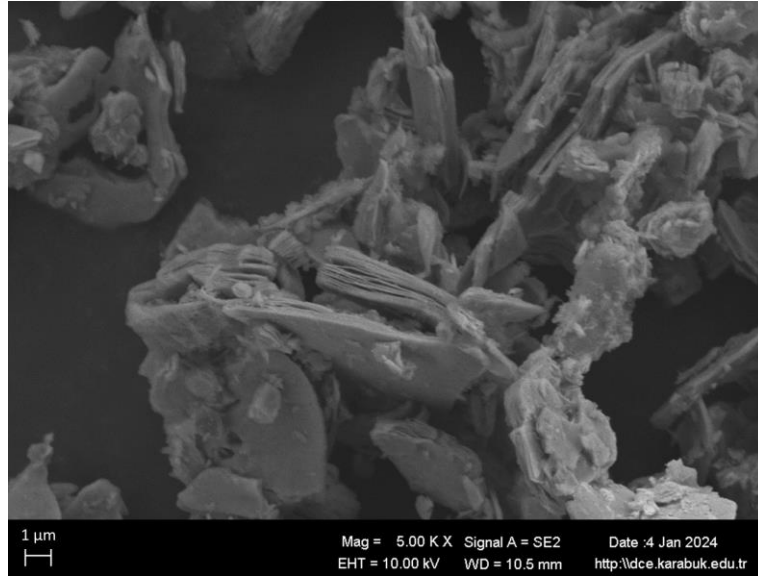
5.2.1.2. Mikroyapı Analizleri

Bu bölümde, sentezlenen Fe₂O₃, MXene ve g-C₃N₄ nano partiküllerinin mikroyapı görüntüleri incelenmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde Fe₂O₃ partiküllerinin ortalama partikül boyutunun yaklaşık 100 nm olduğu görülmüştür (Şekil 5.16). Fe₂O₃ partiküllerin iki boyutlu tabaka halinde sentezlenmiş olduğu da SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır [127,162,204,205]. Şekil 5.17’de verilen SEM görüntülerinde MXene nano partikülü görülmektedir. MXene nano partikülünün ortalama boyutları yaklaşık 100 nm olarak hesaplanmıştır. MXene nano partikülü, literatürle de uyumlu olarak katı ve çok katmanlı ve istiflenmiş olarak görüntülenmiştir [73,152,154,207,210,211]. Şekil 5.18’de ise sentezlenen g-C₃N₄ nano partiküllerinin SEM görüntüleri verilmiştir. g-C₃N₄ nano partiküllerinin kalınlık değerlerinin ortalaması yaklaşık 50 nm olarak hesaplanmıştır. İki boyutlu g-C₃N₄ nano partiküllerinin plaka şeklinde üretilmiş olması literatürle de uyumlu olduğunu göstermektedir [127,130,209,212]. Aşınma deneylerinde kullanılan nano partiküllerin yağlayıcı özellikleri nano tabakaların boyutlarına da bağlıdır. Nano tabakalar ne kadar ince olursa, numune yüzeylerinin morfolojisindeki bozukluklara daha iyi nüfuz ederek sürtünme katsayısıyla beraber

aşınma kaybını da minimize etmektedirler [213]. Bu sebeple sentezlenen partiküllerin boyutları büyük önem taşımaktadır.



Şekil 5.16. Fe₂O₃ nano partikülünün 5kx büyütmedeki SEM görüntüsü.



Şekil 5.17. MXene nano partikülünün 5kx büyütmedeki SEM görüntüsü.



Şekil 5.18. g-C₃N₄ nano partikülünün 5kx SEM görüntüsü.

5.2.2. Deney Numunelerinin Sertlik Sonuçları

Deney numunesi olarak kullanılan AISI 1015, MgZn Master alaşımı ve AlSi18 alaşımının sertlik değerleri Çizelge 5.10’da verilmiştir.

Çizelge 5.10. Numunelerin sertlik ölçüm sonuçları.

Numune	Brinell Sertlik Değeri (HBW)
AISI 1015	110
MgZn Master	25
AlSi18	130

5.2.3. Aşınma Deneyi Sonuçları

Malzemelerin mekanik özelliklerini tanımlayabilmek amacıyla aşınma deneyleri kullanılan uygulamalardan biridir. Bu deney setinde, 20 N yük, 100 m yol ve 10 mm stroke mesafesi sabit olarak tutulmuştur. Deney parametrelerinde değişken olarak, 3 farklı numune, her bir numune için 3 farklı nano partikül katkılı yağlayıcı ortam, 3 farklı konsantrasyon oranı belirlenmiştir. Aşındırıcı olarak ise 52100 çelik bilya tercih edilmiştir. Aşınma deneyleri sonrasında ortaya çıkan sürtünme katsayısı verileri, aşınma test cihazından elde edilmiştir. Aşınan yüzeylerden alınan profilometre ölçümü ile aşınma alanı bulunmuş ve stroke mesafesiyle çarpılarak hacimsel kayıp

hesaplanmıştır. Ayrıca aşınma numunelerinin deney başlangıç ve bitiş sıcaklıkları arasında 9 adet ölçüm yapılarak nano partikül katkısının ortam sıcaklığına olan etkisi ölçülmeye çalışılmıştır. Gerçekleştirilen deneyler sonrası sürtünme katsayısı, hacimsel kayıp ve sıcaklık değişim değerleri AISI 1015 malzemesi için Çizelge 5.11’de, MgZn Master alaşımı için Çizelge 5.12’de ve AlSi18 alaşımı için ise Çizelge 5.13’de verilmiştir.

Çizelge 5.11. AISI 1015 malzemesinin aşınma deney sonuçları.

Deney No	Aşınma Ortamı	Aşınan Malzeme	Yük (N)	Yol (m)	Ortalama Sürtünme Katsayısı	Hacimsel Kayıp (mm ³)	Sıcaklık Değişimi (%)
1	MY	AISI 1015	20	100	0,19	0,21	9,94
2	MY+25 mg Fe ₂ O ₃	AISI 1015	20	100	0,15	0,15	3,86
3	MY+50 mg Fe ₂ O ₃	AISI 1015	20	100	0,182	0,20	5,52
4	MY+25 mg MXene	AISI 1015	20	100	0,145	0,14	6,07
5	MY+50 mg MXene	AISI 1015	20	100	0,183	0,19	7,73
6	MY+25 mg g-C ₃ N ₄	AISI 1015	20	100	0,173	0,17	6,62
7	MY+25 mg g-C ₃ N ₄	AISI 1015	20	100	0,177	0,18	7,18

Çizelge 5.12. MgZn Master alaşımının aşınma deney sonuçları.

Deney No	Aşınma Ortamı	Aşınan Malzeme	Yük (N)	Yol (m)	Ortalama Sürtünme Katsayısı	Hacimsel Kayıp (mm ³)	Sıcaklık Değişimi (%)
1	MY	MgZn Master	20	100	0,126	0,17	7,18
2	MY+25 mg Fe ₂ O ₃	MgZn Master	20	100	0,112	0,10	4,41
3	MY+50 mg Fe ₂ O ₃	MgZn Master	20	100	0,114	0,103	4,97
4	MY+25 mg MXene	MgZn Master	20	100	0,110	0,07	4,41
5	MY+50 mg MXene	MgZn Master	20	100	0,0115	0,103	5,52
6	MY+25 mg g-C ₃ N ₄	MgZn Master	20	100	0,111	0,08	4,41
7	MY+25 mg g-C ₃ N ₄	MgZn Master	20	100	0,118	0,11	6,07

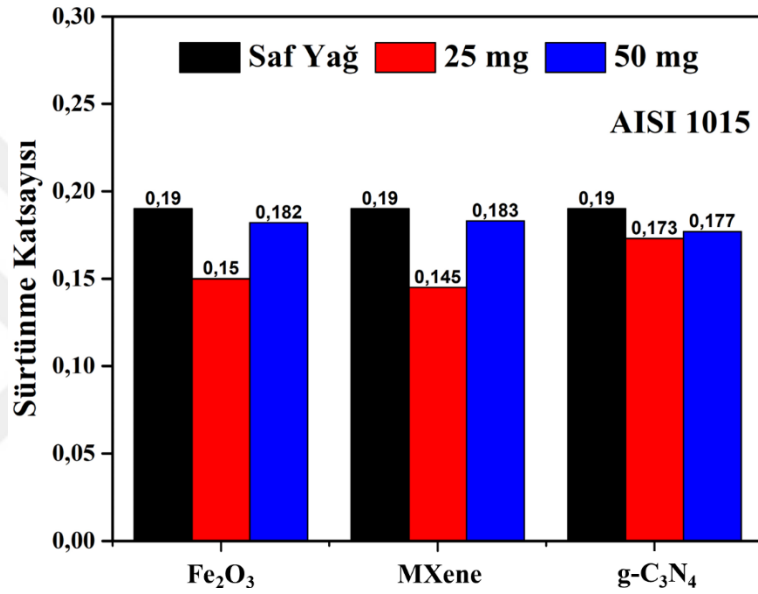
Çizelge 5.13. AlSi18 alaşımının aşınma deney sonuçları.

Deney No	Aşınma Ortamı	Aşınan Malzeme	Yük (N)	Yol (m)	Ortalama Sürtünme Katsayısı	Hacimsel Kayıp (mm ³)	Sıcaklık Değişimi (%)
1	MY	AlSi18	20	100	0,112	0,0023	3,86
2	MY+25 mg Fe ₂ O ₃	AlSi18	20	100	0,120	0,0026	4,41
3	MY+50 mg Fe ₂ O ₃	AlSi18	20	100	0,122	0,0031	4,97
4	MY+25 mg MXene	AlSi18	20	100	0,120	0,0026	4,41
5	MY+50 mg MXene	AlSi18	20	100	0,129	0,0033	6,07
6	MY+25 mg g-C ₃ N ₄	AlSi18	20	100	0,122	0,0030	4,41
7	MY+25 mg g-C ₃ N ₄	AlSi18	20	100	0,124	0,0032	5,52

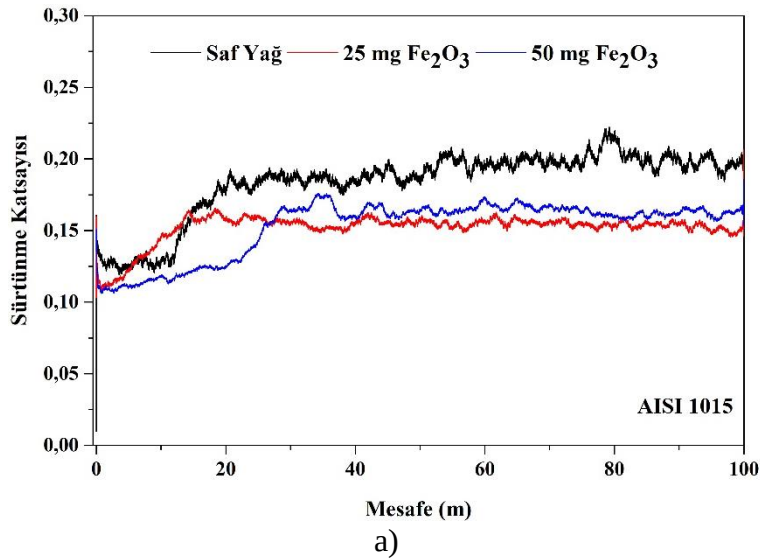
5.2.3.1. AISI 1015 Numunesi Aşınma Deneyi Sonuçları

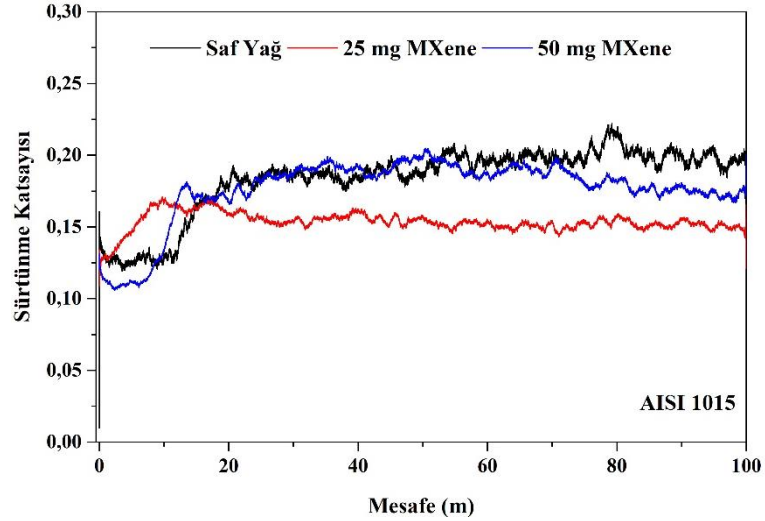
AISI 1015 malzemesinin, 50 ml MY ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerindeki ortalama sürtünme katsayısı değeri 0,19 olarak bulunmuştur. 50 ml MY + 25 mg Fe₂O₃ yağlayıcı ortamında 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan ortalama sürtünme katsayısı değeri 0,15 iken 50 ml MY + 50 mg Fe₂O₃ yağlayıcı ortamında 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan ortalama sürtünme katsayısı değeri ise 0,182 olarak görülmektedir. 50 ml MY + 25 mg MXene yağlayıcı ortamında 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan ortalama sürtünme katsayısı değeri 0,145 iken 50 ml MY + 50 mg MXene yağlayıcı ortamında 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan ortalama sürtünme katsayısı değeri ise 0,183 olarak görülmektedir. 50 ml MY + 25 mg g-C₃N₄ yağlayıcı ortamında 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan ortalama sürtünme katsayısı değeri 0,173 iken 50 ml MY + 50 mg g-C₃N₄ yağlayıcı ortamında 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan ortalama sürtünme katsayısı değeri ise 0,177 olarak görülmektedir. Sürtünme katsayıları grafikleri Şekil 5.19'da ve Şekil 5.20'de verilmiştir. Şekil 5.20'de görüldüğü üzere deneyler başladıktan yaklaşık 10 m aşınma mesafesine kadar olan grafikler, düşükten yükseğe değişik oranlarda görülmektedir. Bu durumun ardından grafikler, alıştırma aşamasını bitirerek, dengeli durum göstermişlerdir. Bu durum, rodaj olarak adlandırılabilir. Bu süreç tüm test sürecinin küçük bir kısmını gösteren dengesiz bir aşınma olarak görünmektedir. Dengesiz aşınma olarak görünmesinin nedeni, testte kullanılan çelik bilya ve karşı malzeme yüzeyinde belirli bir pürüzlülük derecesinin bulunmasıdır. Aışmanın ilk aşamasında, temas halindeki parçaların yüzeyinde sadece birkaç kontur tepe noktası mevcut olduğundan, temas yüzeyindeki gerçek gerilim yüksektir. Gerçek gerilimin yüksekliği, temas kontur tepe noktalarının ezilmesine ve plastik olarak deforme olmasına sebep olur. Bu da temas halindeki parçaların yüzeyinde keskin bir artışa neden olmaktadır [75]. Fe₂O₃ nano partikül katkılı aşınma ortamlarında ortalama sürtünme katsayısı değeri, 50 ml MY + 25 mg Fe₂O₃ ortamında, 50 ml MY ortamına göre %26,6 oranında, 50 ml MY + 50 mg Fe₂O₃ ortamında ise 50 ml MY ortamına göre %4,39 oranında düşüş göstermiştir. MXene nano partikül katkılı aşınma ortamlarında ortalama sürtünme katsayısı değeri, 50 ml MY + 25 mg MXene ortamında, 50 ml MY ortamına göre %31,03 oranında, 50 ml MY + 50 mg MXene ortamında ise 50 ml MY ortamına göre %3,82 oranında düşüş

göstermiştir. $g-C_3N_4$ nano partikül katkılı aşınma ortamlarında ortalama sürtünme katsayısı değeri, 50 ml MY + 25 mg $g-C_3N_4$ ortamında, 50 ml MY ortamına göre %9,82 oranında, 50 ml MY + 50 mg $g-C_3N_4$ ortamında ise 50 ml MY ortamına göre %7,34 oranında düşüş göstermiştir. Ortalama sürtünme katsayısı değeri, MY içine çeşitli nano partiküllerin eklenmesiyle genel olarak AISI 1015 malzemesi için düşüş göstermiştir. Bu durum nano partiküllerin aşınmayı ve sürtünmeyi azaltmak amacıyla belirli bir yük taşıdığını göstermektedir [69,73,83,154,162,213–216].

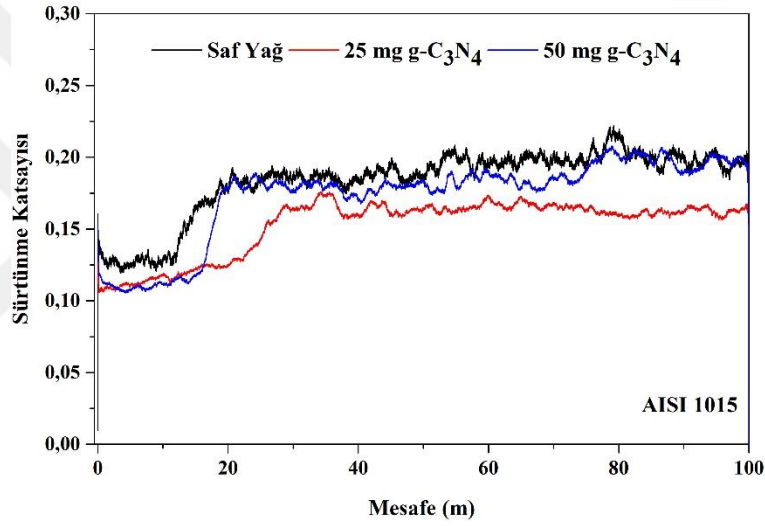


Şekil 5.19. AISI 1015 numunesinin çeşitli nano partikül ortamlarındaki sürtünme katsayısı verileri sütun grafiği.





b)

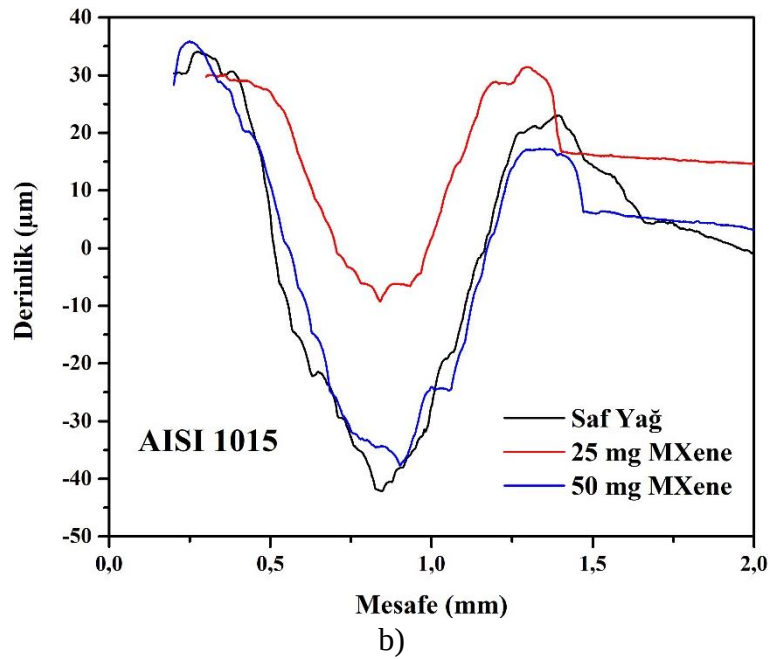
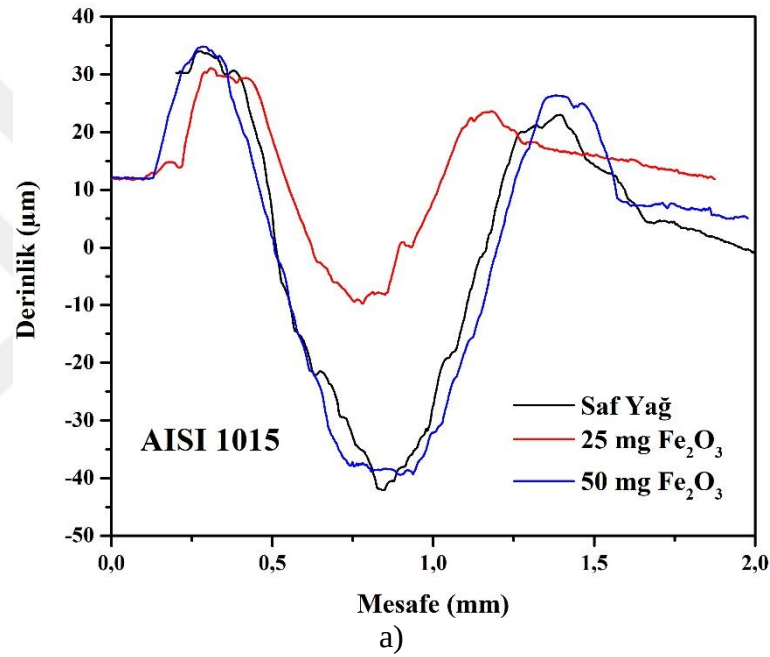


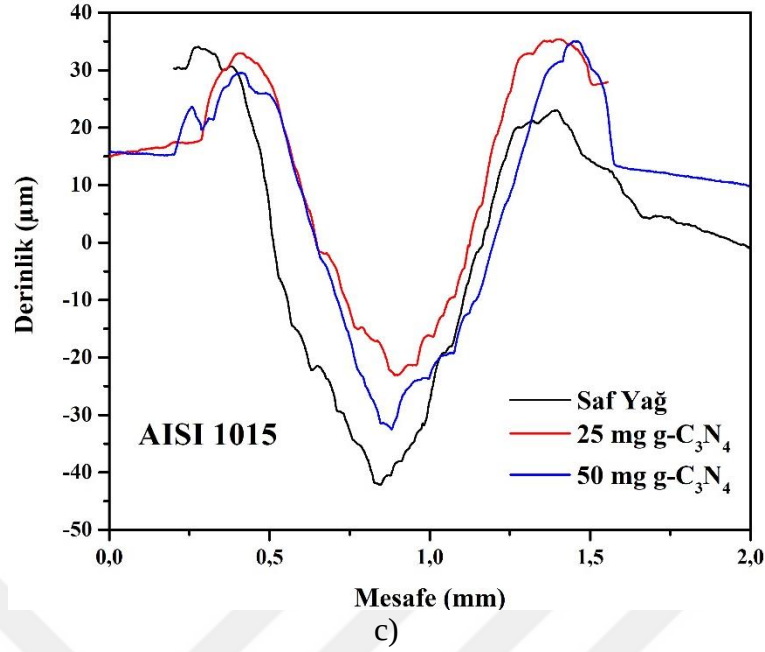
c)

Şekil 5.20. AISI 1015 sürtünme katsayısı verileri. a) farklı konsantrasyondaki Fe_2O_3 sürtünme katsayısı grafiği, b) farklı konsantrasyondaki MXene sürtünme katsayısı grafiği, c) farklı konsantrasyondaki $\text{g-C}_3\text{N}_4$ sürtünme katsayısı grafiği.

AISI 1015 malzemesinin aşınma izlerinden, 2D profilometre ile alınan ölçüm verilerinin grafikleri Şekil 5.21’de verilmiştir. Profilometre ölçümlerinden elde edilen aşınma derinliklerinin alan hesapları, aşınan numunelerin aşınma hacminin tespit edilmesinde kullanılmaktadır. AISI 1015 malzemesinin 50 ml MY ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerindeki aşınma izinin alanı $0,216 \text{ mm}^2$ olarak tespit edilmiştir. 50 ml MY + 25 mg Fe_2O_3 yağlayıcı ortamında 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan aşınma izinin alanı $0,153 \text{ mm}^2$ iken 50 ml MY + 50 mg Fe_2O_3 yağlayıcı ortamında 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan aşınma izinin alanı

ise 0,206 mm² olarak tespit edilmiştir. 50 ml MY + 25 mg MXene yağlayıcı ortamında 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan aşınma izinin alanı 0,146 mm² iken 50 ml MY + 50 mg MXene yağlayıcı ortamında 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan aşınma izinin alanı ise 0,19 mm² olarak tespit edilmiştir. 50 ml MY + 25 mg g-C₃N₄ yağlayıcı ortamında 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan aşınma izinin alanı 0,176 mm² iken 50 ml MY + 50 mg g-C₃N₄ yağlayıcı ortamında 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan aşınma izinin alanı ise 0,18 mm² olarak tespit edilmiştir.

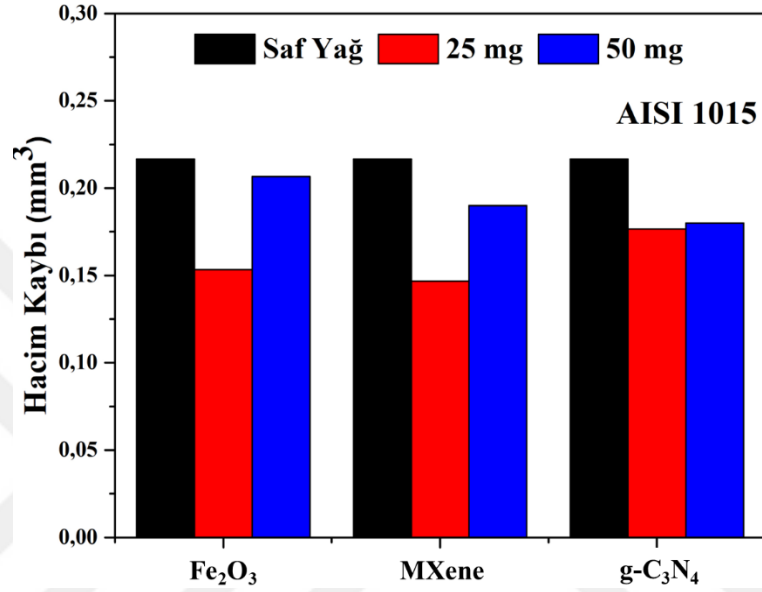




Şekil 5.21. AISI 1015 profilometre ölçüm verileri. a) farklı konsantrasyondaki Fe_2O_3 profilometre verisi, b) farklı konsantrasyondaki MXene profilometre verisi, c) farklı konsantrasyondaki $\text{g-C}_3\text{N}_4$ profilometre verisi.

AISI 1015 malzemesinin 50 ml MY ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerindeki hacimsel kayıp değeri $0,216 \text{ mm}^3$ olarak tespit edilmiştir. 50 ml MY + 25 mg Fe_2O_3 yağlayıcı ortamında 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan hacimsel kayıp değeri $0,153 \text{ mm}^3$ iken 50 ml MY + 50 mg Fe_2O_3 yağlayıcı ortamında 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan hacimsel kayıp değeri ise $0,206 \text{ mm}^3$ olarak tespit edilmiştir. 50 ml MY + 25 mg MXene yağlayıcı ortamında 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan hacimsel kayıp değeri $0,146 \text{ mm}^3$ iken 50 ml MY + 50 mg MXene yağlayıcı ortamında 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan hacimsel kayıp değeri ise $0,19 \text{ mm}^3$ olarak tespit edilmiştir. 50 ml MY + 25 mg $\text{g-C}_3\text{N}_4$ yağlayıcı ortamında 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan hacimsel kayıp değeri $0,176 \text{ mm}^3$ iken 50 ml MY + 50 mg $\text{g-C}_3\text{N}_4$ yağlayıcı ortamında 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan hacimsel kayıp değeri ise $0,18 \text{ mm}^3$ olarak tespit edilmiştir. AISI 1015 numunesinin hacim kaybı grafiği Şekil 5.22’de verilmiştir. Fe_2O_3 nano partikül katkılı aşınma ortamlarında hacimsel kayıp, 50 ml MY + 25 mg Fe_2O_3 ortamında, 50 ml MY ortamına göre %29,16 oranında, 50 ml MY + 50 mg Fe_2O_3 ortamında ise 50 ml MY ortamına göre %4,62 oranında düşüş göstermiştir. MXene nano partikül katkılı aşınma ortamlarında ortalama hacimsel kayıp değeri, 50 ml MY + 25 mg MXene ortamında, 50 ml MY ortamına göre %32,40 oranında, 50 ml MY +

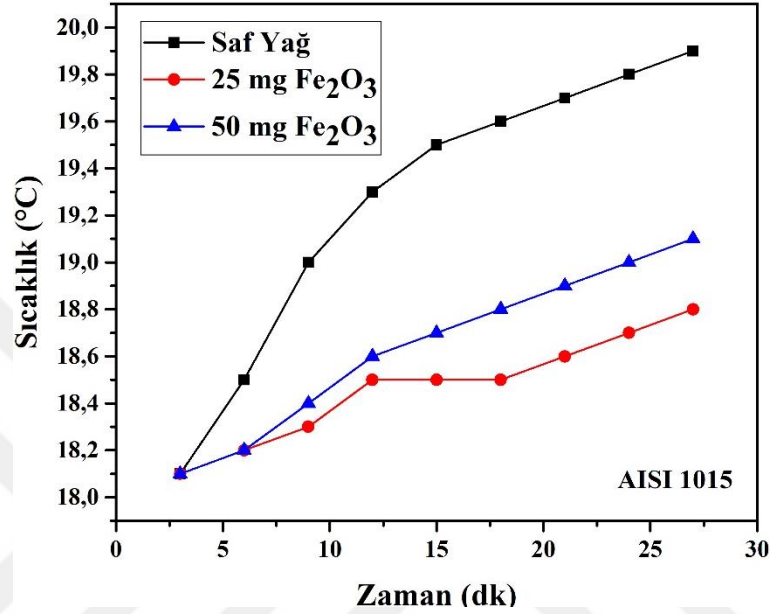
50 mg MXene ortamında ise 50 ml MY ortamına göre %12,03 oranında düşüş göstermiştir. g-C₃N₄ nano partikül katkılı aşınma ortamlarında hacimsel kayıp değeri, 50 ml MY + 25 mg g-C₃N₄ ortamında, 50 ml MY ortamına göre %18,51 oranında, 50 ml MY + 50 mg g-C₃N₄ ortamında ise 50 ml MY ortamına göre %16,66 oranında düşüş göstermiştir.



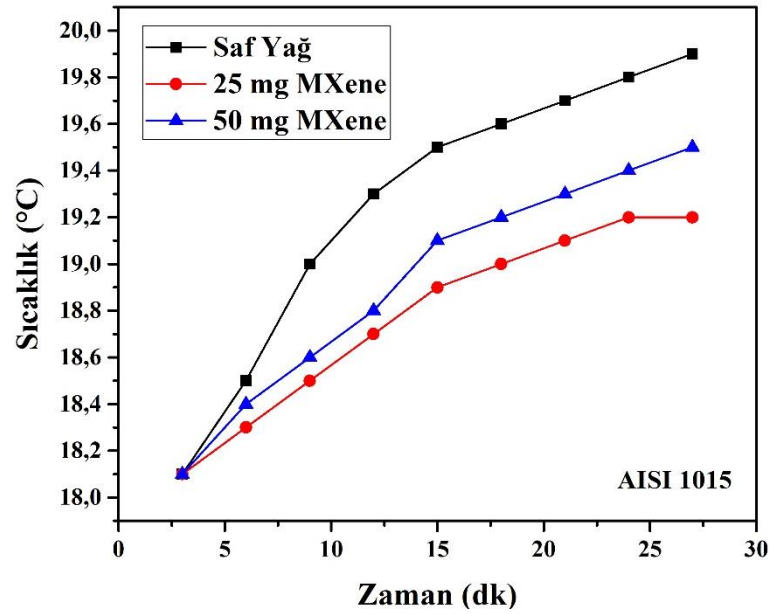
Şekil 5.22. AISI 1015 numunesinin çeşitli nano partikül ortamlarındaki hacim kaybı verileri.

Aşınma deneyleri gerçekleştirilirken, aşınmaya maruz kalan numunelerin sıcaklık değişimleri de ölçülmüştür. Ölçülen sıcaklık değerleri başlangıç ve bitiş sıcaklıkları kıyaslanmış ve numunelerdeki sıcaklık değişimleri yüzde olarak belirtilmiştir. AISI 1015 numunesinin, 50 ml MY yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneyleri esnasında sıcaklık değeri %9,94 oranında artış göstermiştir. 50 ml MY + 25 mg Fe₂O₃ yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneyleri esnasında sıcaklık değeri %3,86 oranında artış gösterirken, 50 ml MY + 50 mg Fe₂O₃ yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneyleri esnasında sıcaklık değeri %5,52 oranında artış göstermiştir. 50 ml MY + 25 mg MXene yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneyleri esnasında sıcaklık değeri %6,07 oranında artış gösterirken, 50 ml MY + 50 mg MXene yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneyleri esnasında sıcaklık değeri %7,73 oranında artış göstermiştir. 50 ml MY + 25 mg g-C₃N₄ yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneyleri esnasında sıcaklık

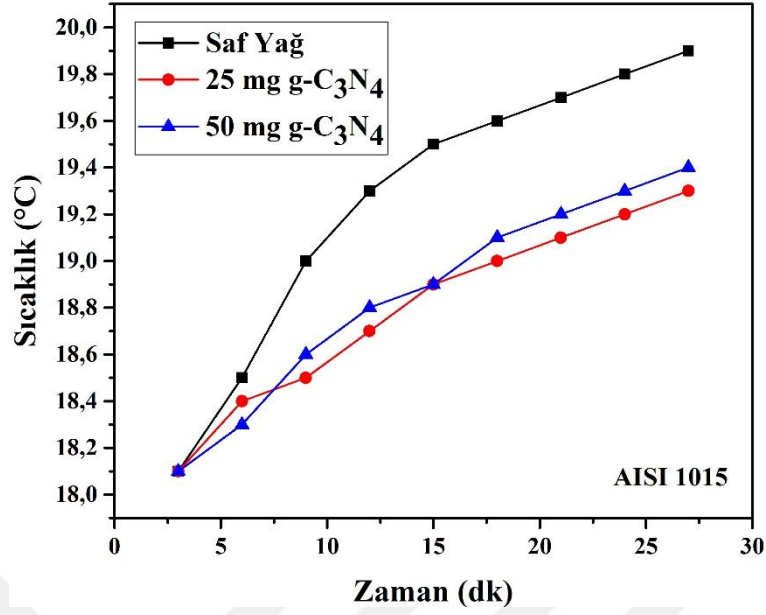
değeri %6,62 oranında artış gösterirken, 50 ml MY + 50 mg g-C₃N₄ yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneyleri esnasında sıcaklık değeri %7,18 oranında artış göstermiştir. Sıcaklık değişim grafikleri, Şekil 5.23, Şekil 5.24 ve Şekil 5.25'te verilmiştir.



Şekil 5.23. AISI 1015 numunesinin Fe₂O₃ ortamındaki aşınma deneylerinde oluşan sıcaklık değişimi grafiği.

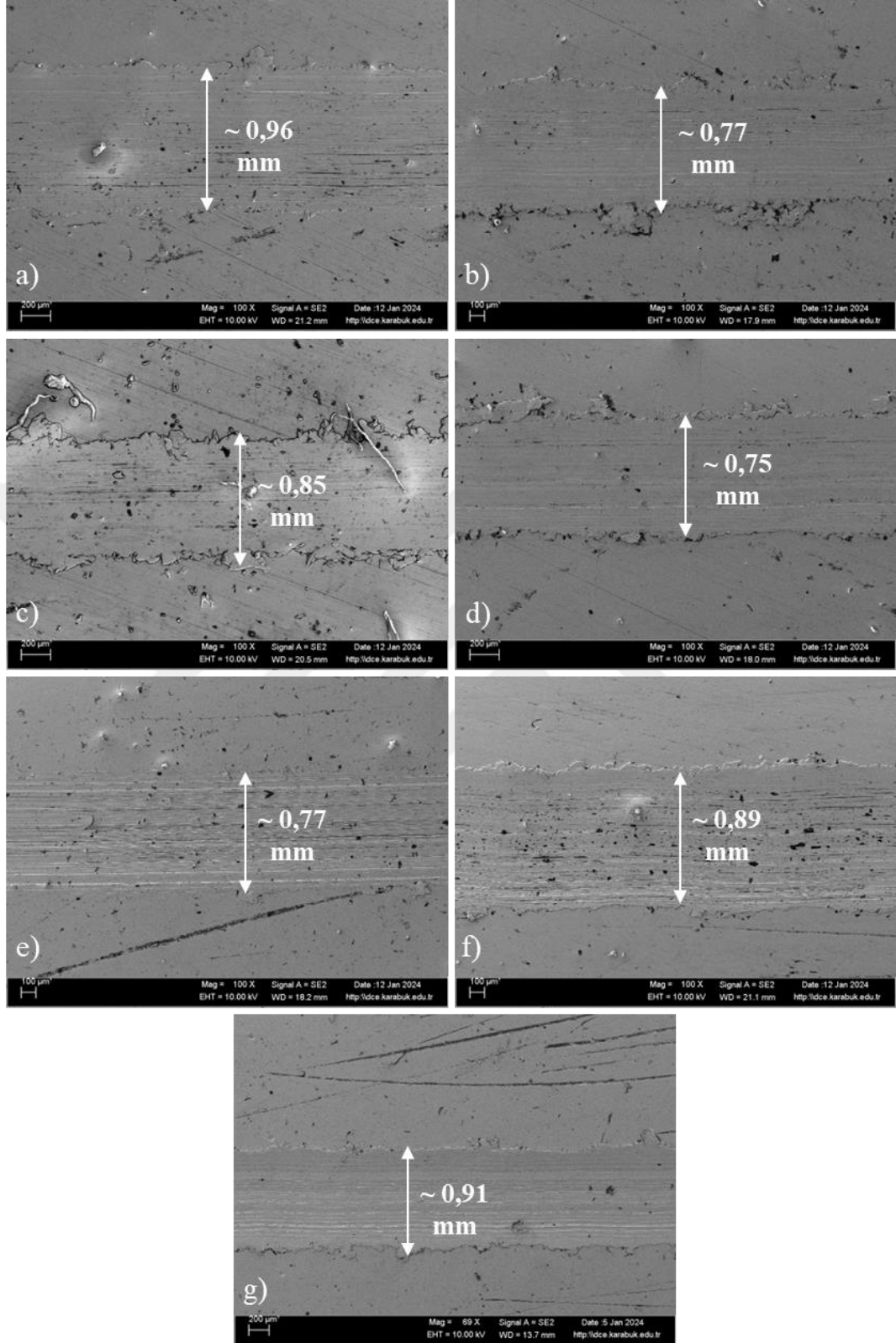


Şekil 5.24. AISI 1015 numunesinin MXene ortamındaki aşınma deneylerinde oluşan sıcaklık değişimi grafiği.



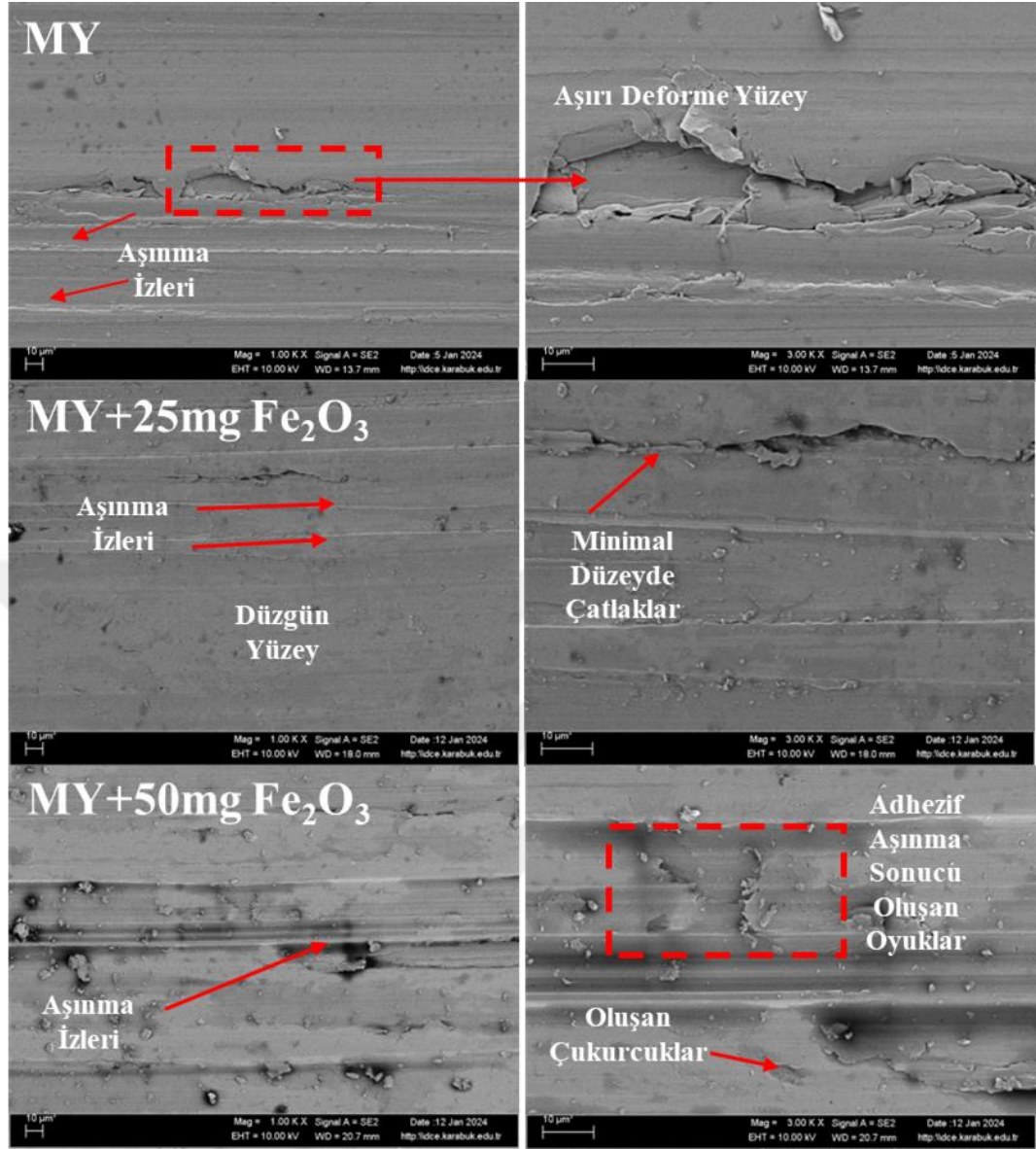
Şekil 5.25. AISI 1015 numunesinin g-C₃N₄ ortamındaki aşınma deneylerinde oluşan sıcaklık değişimi grafiği.

Aşınma kayıpları, matematiksel hesaplamalarla ifade edilmiştir. Aşınma kayıplarının matematiksel ifadesini, morfolojik analizlerle desteklemek, bu çalışmanın doğruluğunu ve tutarlılığını arttıracaktır. AISI 1015 malzemesi çeşitli nano partikül ortamlarında farklı aşınma mekanizmaları göstermiştir. Öncelikle Şekil 5.26'de verilen makro boyuttaki SEM görüntüleri, AISI 1015 malzemesinin farklı nano partikül ortamlarındaki aşınma deneyleri sonucu yüzeylerinde oluşan aşınma izlerini göstermektedir. 50 ml MY ortamında, ~ 0,96 mm boyutunda olan aşınma izinin genişliği, 50 ml MY + 25 mg Fe₂O₃ yağlayıcı ortamındaki aşınma deneyinde ~ 0,77 mm, 50 ml MY + 50 mg Fe₂O₃ yağlayıcı ortamında ise ~ 0,85 mm olarak hesaplanmıştır. 50 ml MY + 25 mg MXene yağlayıcı ortamında gerçekleştirilen aşınma deneylerindeki aşınma izi ~ 0,75 mm, 50 ml MY + 50 mg MXene yağlayıcı ortamında ise ~ 0,77 mm olarak hesaplanmıştır. 50 ml MY + 25 mg g-C₃N₄ yağlayıcı ortamında gerçekleştirilen aşınma deneylerinde ise aşınma izi ~ 0,89 mm, 50 mg g-C₃N₄ yağlayıcı ortamında ise ~ 0,91 mm olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.26'da görünen makro yüzeylerdeki aşınma izi genişlikleri daha öncesinde bahsedilen aşınma verilerini doğrular niteliktedir. Aşınma izinin genişliği, profilometre ile ölçülen aşınma alanına doğru oranda etki ederek, aşınma miktarının yüksek olduğunu göstermektedir [109,217,218].



Şekil 5.26. AISI 1015 aşınma izlerinin makro boyuttaki SEM görüntüleri. a) 50 ml MY, b) 50 ml MY + 25 mg Fe_2O_3 , c) 50 ml MY + 50 mg Fe_2O_3 , d) 50 ml MY + 25 mg MXene, e) 50 ml MY + 50 mg MXene, f) 50 ml MY + 25 mg g- C_3N_4 , g) 50 ml MY + 50 mg g- C_3N_4 .

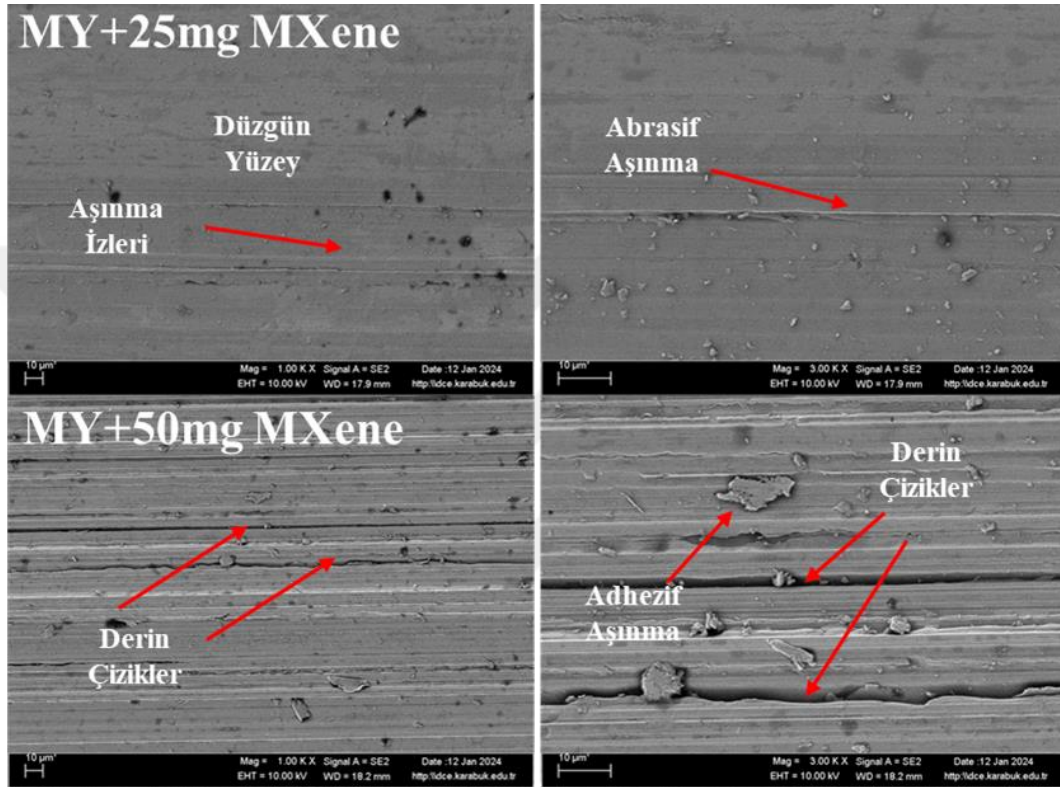
Aşınma bölgelerindeki aşınma mekanizmalarını daha ayrıntılı inceleyebilmek amacıyla, 1000x ve 3000x yakınlaştırma oranıyla alınan SEM görüntüleri, Şekil 5.27’de verilmiştir. SEM görüntülerindeki aşınma mekanizmaları incelendiğinde, aşınma ortamında MY kullanıldığı zaman yüzeyde oluşan aşırı deformasyon ve fazla oranda kırılmalar/kopmalar olduğu görülmüştür. MY + 25 mg Fe₂O₃ ortamındaki aşınma yüzeyleri incelendiğinde, aşınma izlerinin daha az belirgin olduğu, burada nano partiküllerin etkisiyle yağlama rejiminin arttığı ve düşük bir aşınma oranının olduğu görülmektedir. MY + 50 mg Fe₂O₃ ortamındaki aşınma yüzeyleri incelendiği zaman, MY ortamına göre, aşırı deforme yüzey oluşmadığı ancak bir miktar sıcaklık artışıyla beraber, adhezif aşınma mekanizmalarının olduğu ve 25 mg Fe₂O₃ ortamına göre daha derin aşınma izlerinin bulunduğu görülmektedir. Partikül konsantrasyonun artmasıyla aşınma izleri belirgin hale gelmiştir. Bu durum, yağ filminin kararlılığını bozmuş, etkili bir yağlama mekanizmasının oluşmasını engellemiştir. Yüzeyler arasında aşınan parçacıkların etkisi sebebiyle, yüzeyde abrasif aşınma meydana gelmiş, sıcaklığın artması ile de adhezif aşınma meydana gelmiştir.



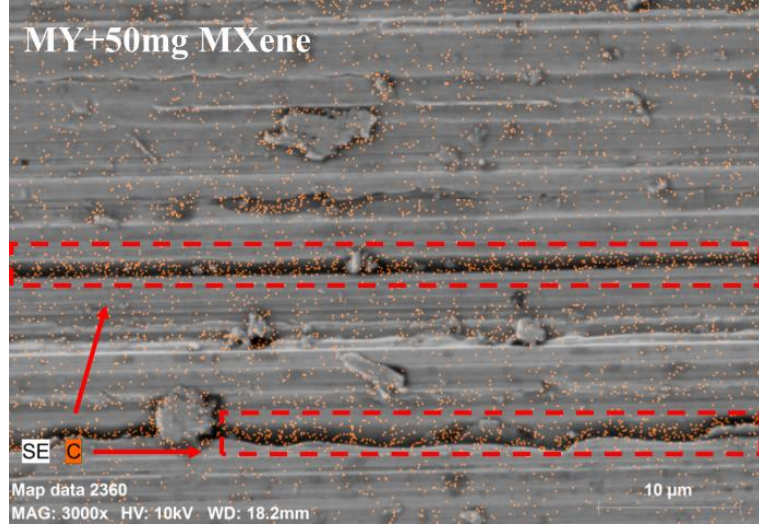
Şekil 5.27. AISI 1015 numunesinin MY ve Fe_2O_3 ortamlarındaki SEM görüntüleri.

Şekil 5.28’de MY + 25 mg MXene ortamındaki aşınma deneyleri incelendiği zaman düşük oranda oluşan aşınma izleri ve abrasif aşınma mekanizması görülmektedir. Yağlamanın etkisini göstermesi, yüzeyin minimal düzeyde aşınmasına olanak sağlamıştır. MXene, grafen benzeri katmanlı yapısı, düşük kesme mukavemeti, kendi kendini yağlayabilme kabiliyeti sayesinde üstün yağlama performansı sergilemiştir. MY + 50 mg MXene ortamındaki aşınma deneyleri incelendiğinde ise MY + 25 mg MXene ortamına göre daha derin aşınma çiziklerinin görüldüğü ve artan sıcaklıkla beraber mikro kaynak oluşumunun gerçekleştiği görülmektedir. Topaklanan nano partiküller yüzeydeki aşınmanın artmasına, dolayısıyla sıcaklığın da artmasına sebep

olmuştur. Bu da yüzey yapısının bozulmasına sebep olmuştur. Oluşan derin çiziklere MXene nano partikülünde bulunan C az miktarda dolmuştur. (Şekil 5.29) Çiziklere nano partiküllerin dolması, normal şartlarda yüzey yapısını onarıcı bir etkiye sahiptir ancak yağlayıcıda partikül yoğunluğunun fazlalığı metalik yüzeyler arasında üç cisimli aşınma etkisi oluşumuna sebebiyet vermektedir.

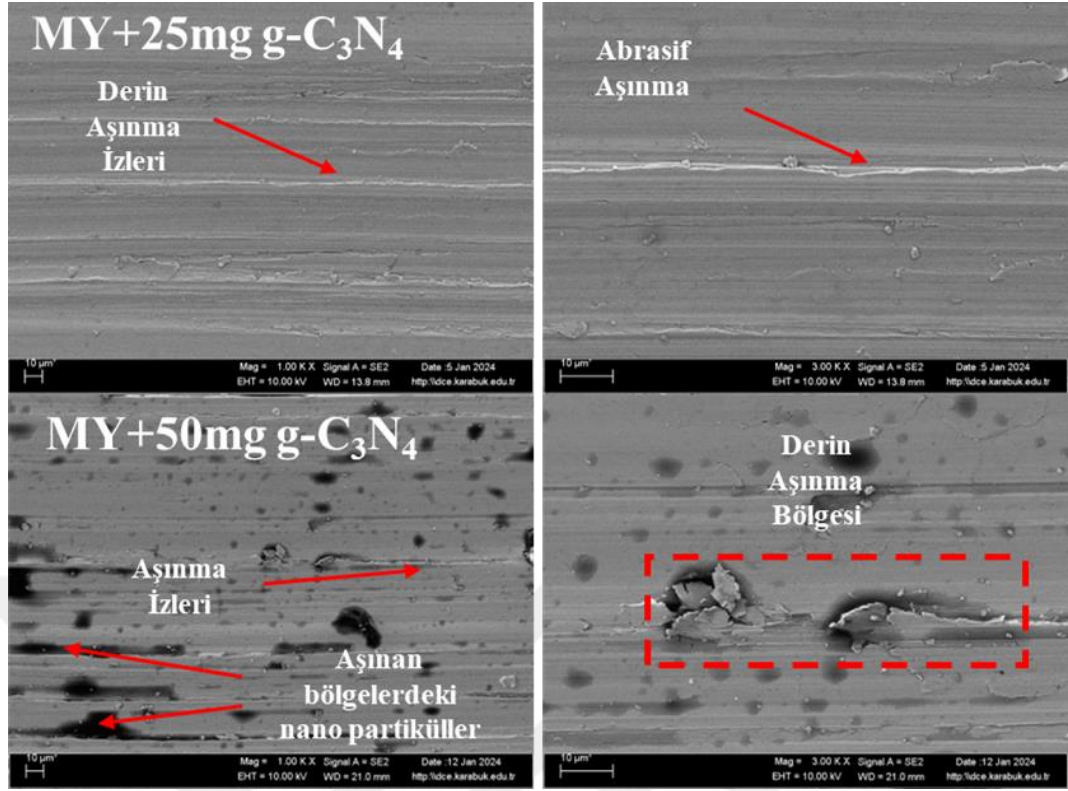


Şekil 5.28. AISI 1015 numunesinin MXene ortamındaki SEM görüntüleri.

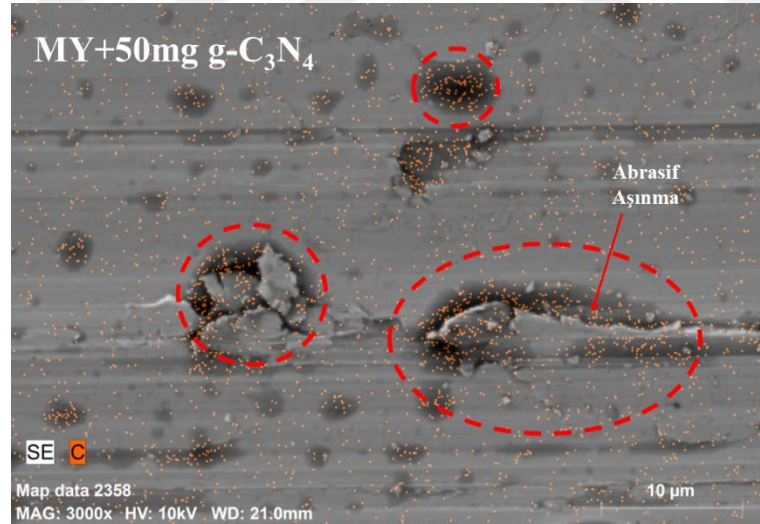


Şekil 5.29. AISI 1015 numunesinin MXene ortamındaki map görüntüsü.

MY + 25 mg g-C₃N₄ ortamındaki aşınma deneyleri görüntüsü incelendiği zaman MY + 25 mg MXene ortamına göre daha derin aşınma izlerinin olduğu görülmüştür (Şekil 5.30). Bu durumda MXene ile daha etkili bir yağlama mekanizmasının olduğu anlaşılmaktadır. g-C₃N₄ kullanımı, MY ile aşınma şartlarına göre aşınmayı minimize etmiş, ancak nano partiküller arasında en az etkili sonucu vermiştir. MY + 50 mg g-C₃N₄ ortamındaki aşınma deneylerinde daha derin aşınma bölgeleri görülmektedir. Nano partikül konsantrasyonunun artması topaklanmaya ve yağ filminin sürekliliğinin bozulmasına sebep olmuştur. Sürekliliğin bozulduğu noktalarda metal-metal teması gerçekleşmiş dolayısıyla sıcaklık artmıştır. Şekil 5.31’de görünen EDX harita sonuçlarına göre aşınma bölgelerinde yüksek miktarda C bulunmuştur.



Şekil 5.30. AISI 1015 numunesinin g-C₃N₄ ortamındaki SEM görüntüleri.

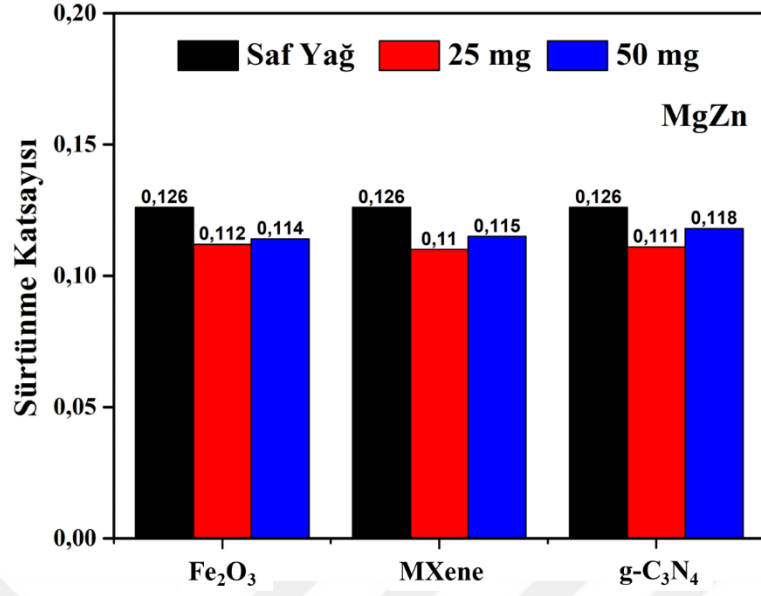


Şekil 5.31. AISI 1015 numunesinin g-C₃N₄ ortamındaki EDX harita görüntüsü.

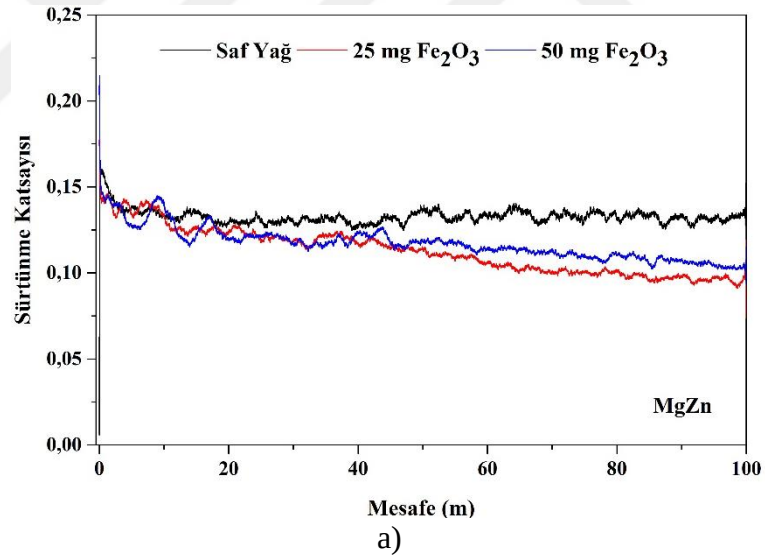
5.2.3.2. MgZn Master Alaşımı Numunesi Aşınma Deneyi Sonuçları

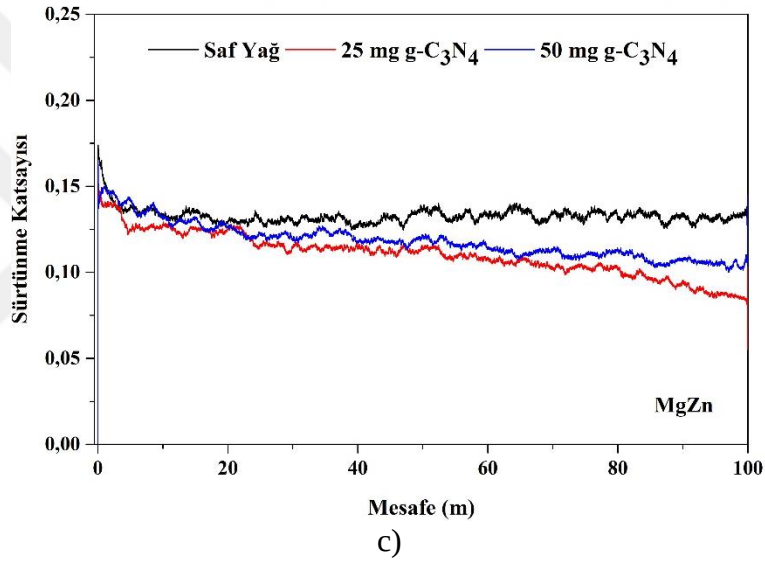
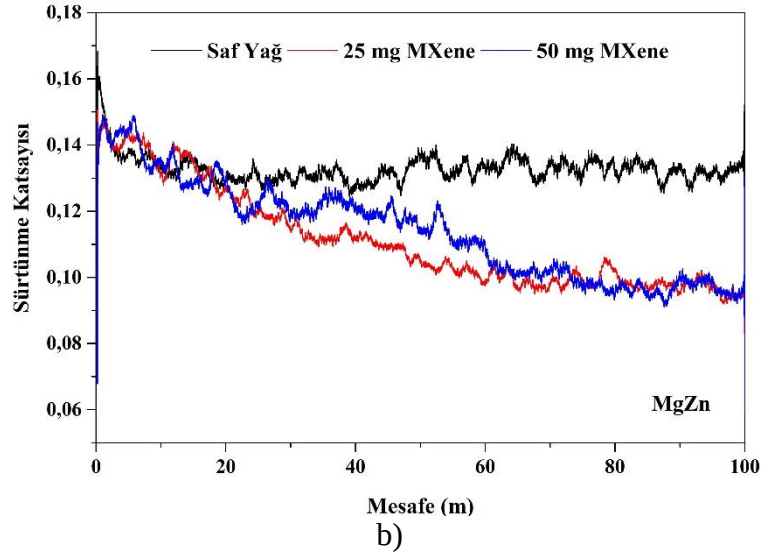
MgZn Master alaşımının, 50 ml MY ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerindeki ortalama sürtünme katsayısı değeri 0,126 olarak bulunmuştur. 50 ml

MY + 25 mg Fe₂O₃ yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan ortalama sürtünme katsayısı değeri 0,112 iken, 50 ml MY + 50 mg Fe₂O₃ yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan ortalama sürtünme katsayısı değeri ise 0,114 olarak görünmektedir. 50 ml MY + 25 mg MXene yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan ortalama sürtünme katsayısı değeri 0,110 iken, 50 ml MY + 50 mg MXene yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan ortalama sürtünme katsayısı değeri ise 0,115 olarak görünmektedir. 50 ml MY + 25 mg g-C₃N₄ yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan ortalama sürtünme katsayısı değeri 0,111 iken, 50 ml MY + 50 mg g-C₃N₄ yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan ortalama sürtünme katsayısı değeri ise 0,118 olarak görünmektedir. Sürtünme katsayıları grafikleri, Şekil 5.32’te ve Şekil 5.33’te verilmiştir. Fe₂O₃ nano partikül katkılı aşınma ortamlarında, ortalama sürtünme katsayısı değeri, 50 ml MY + 25 mg Fe₂O₃ ortamında, 50 ml MY ortamına göre %12,49 oranında, 50 ml MY + 50 mg Fe₂O₃ ortamında ise 50 ml MY ortamına göre %10,52 oranında düşüş göstermiştir. MXene nano partikül katkılı aşınma ortamlarında, ortalama sürtünme katsayısı değeri, 50 ml MY + 25 mg MXene ortamında, 50 ml MY ortamına göre %14,54 oranında, 50 ml MY + 50 mg MXene ortamında ise 50 ml MY ortamına göre %9,56 oranında düşüş göstermiştir. g-C₃N₄ nano partikül katkılı aşınma ortamlarında, ortalama sürtünme katsayısı değeri, 50 ml MY + 25 mg g-C₃N₄ ortamında, 50 ml MY ortamına göre %13,51 oranında, 50 ml MY + 50 mg g-C₃N₄ ortamında ise 50 ml MY ortamına göre %6,77 oranında düşüş göstermiştir.



Şekil 5.32. MgZn Master alaşımlarının çeşitli nano partikül ortamlarındaki sürtünme katsayısı verileri sütun grafiği.

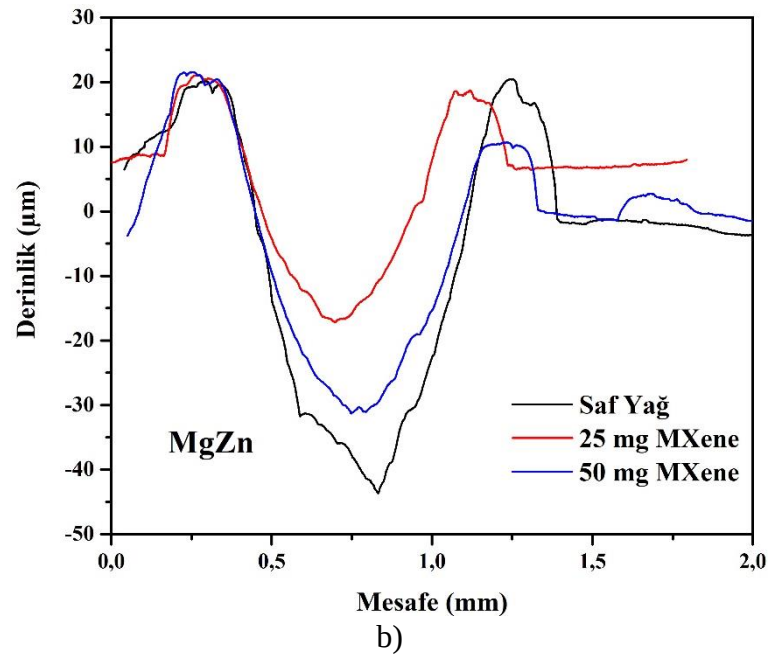
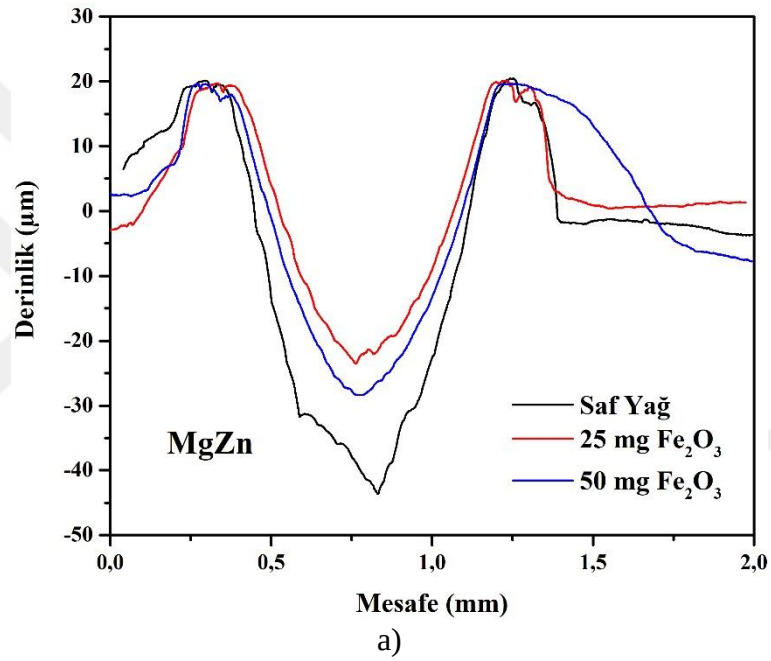


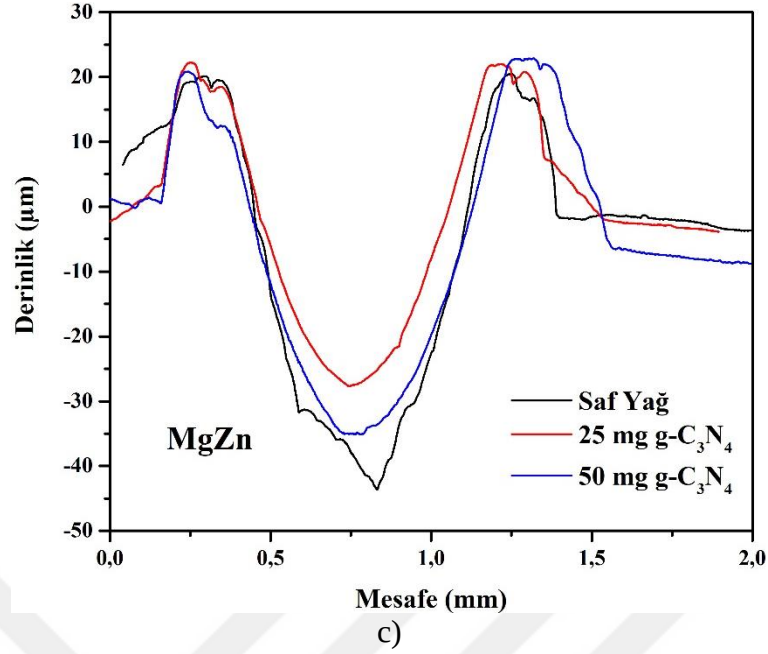


Şekil 5.33. MgZn Master alaşımı sürtünme katsayısı verileri. a) farklı konsantrasyondaki Fe_2O_3 sürtünme katsayısı grafiği, b) farklı konsantrasyondaki MXene sürtünme katsayısı grafiği, c) farklı konsantrasyondaki $\text{g-C}_3\text{N}_4$ sürtünme katsayısı grafiği.

MgZn Master alaşımının aşınma izlerinden, 2D profilometre ölçümleriyle belirlenen verilerin grafikleri, Şekil 5.34'te verilmiştir. Profilometre ölçümlerinden elde edilen aşınma derinliklerinin alan hesapları, aşınan numunelerin aşınma hacminin tespit edilmesinde kullanılmaktadır. MgZn Master alaşımının 50 ml MY ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerindeki aşınma izinin alanı $0,17 \text{ mm}^2$ olarak tespit edilmiştir. 50 ml MY + 25 mg Fe_2O_3 yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan aşınma izinin alanı $0,10 \text{ mm}^2$ iken, 50 ml MY + 50 mg Fe_2O_3 yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan aşınma izinin

alanı ise $0,103 \text{ mm}^2$ olarak tespit edilmiştir. 50 ml MY + 25 mg MXene yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan aşınma izinin alanı $0,07 \text{ mm}^2$ iken, 50 ml MY + 50 mg MXene yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan aşınma izinin alanı ise $0,103 \text{ mm}^2$ olarak tespit edilmiştir. 50 ml MY + 25 mg g-C₃N₄ yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan aşınma izinin alanı $0,08 \text{ mm}^2$ iken, 50 ml MY + 50 mg g-C₃N₄ yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan aşınma izinin alanı ise $0,110 \text{ mm}^2$ olarak tespit edilmiştir.

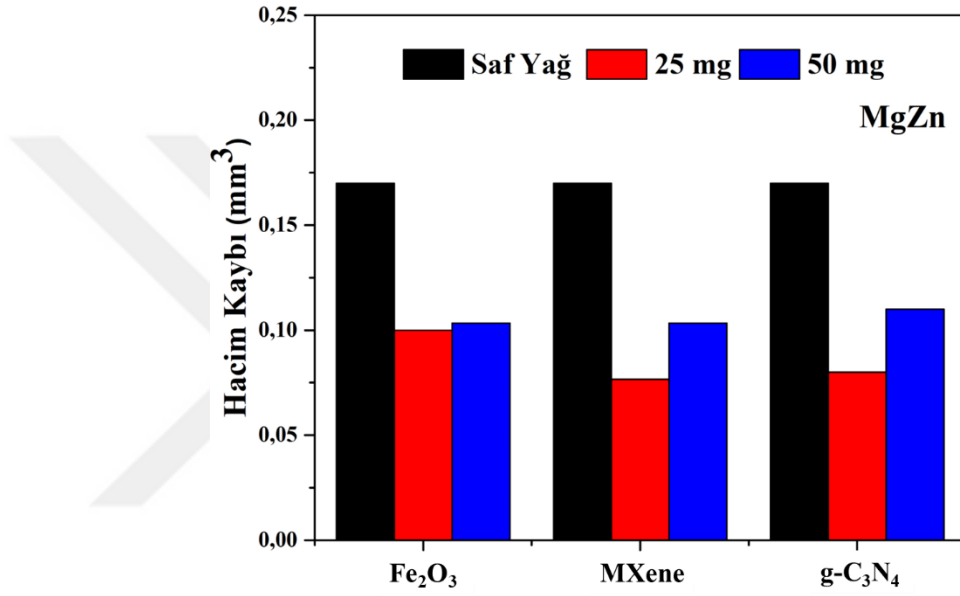




Şekil 5.34. MgZn Master profilometre ölçüm verileri. a) farklı konsantrasyondaki Fe_2O_3 profilometre verisi, b) farklı konsantrasyondaki MXene profilometre verisi, c) farklı konsantrasyondaki $\text{g-C}_3\text{N}_4$ profilometre verisi.

MgZn Master alaşımının 50 ml MY ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerindeki hacimsel kayıp değeri, $0,17 \text{ mm}^3$ olarak tespit edilmiştir. 50 ml MY + 25 mg Fe_2O_3 yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan hacimsel kayıp değeri $0,10 \text{ mm}^3$ iken, 50 ml MY + 50 mg Fe_2O_3 yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan hacimsel kayıp değeri ise $0,103 \text{ mm}^3$ olarak tespit edilmiştir. 50 ml MY + 25 mg MXene yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan hacimsel kayıp değeri $0,07 \text{ mm}^3$ iken, 50 ml MY + 50 mg MXene yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan hacimsel kayıp değeri ise $0,103 \text{ mm}^3$ olarak tespit edilmiştir. 50 ml MY + 25 mg $\text{g-C}_3\text{N}_4$ yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan hacimsel kayıp değeri $0,08 \text{ mm}^3$ iken, 50 ml MY + 50 mg $\text{g-C}_3\text{N}_4$ yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan hacimsel kayıp değeri ise $0,110 \text{ mm}^3$ olarak tespit edilmiştir. MgZn Master alaşımının hacim kaybı grafiği, Şekil 5.35'te verilmiştir. Fe_2O_3 nano partikül katkılı aşınma ortamlarında hacimsel kayıp, 50 ml MY + 25 mg Fe_2O_3 ortamında, 50 ml MY ortamına göre %41,17 oranında, 50 ml MY + 50 mg Fe_2O_3 ortamında ise 50 ml MY ortamına göre %39,41 oranında düşüş göstermiştir.

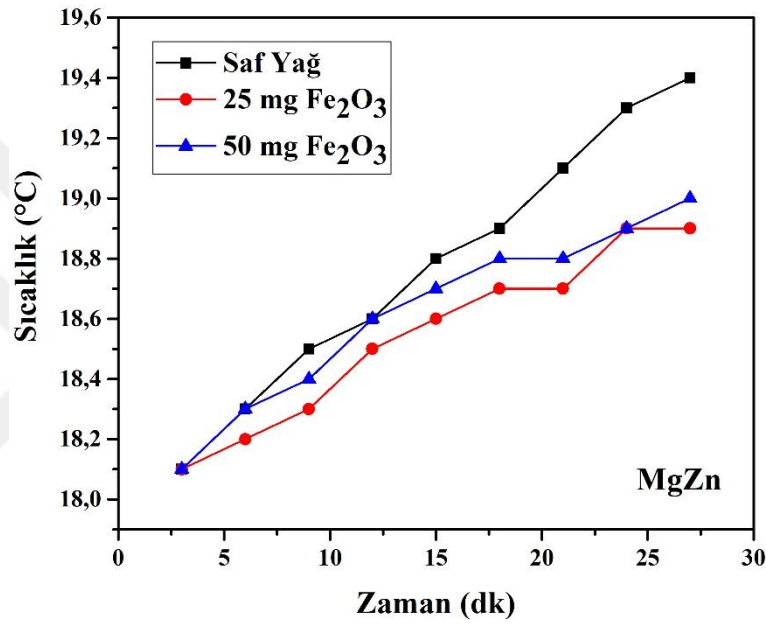
MXene nano partikül katkılı aşınma ortamlarında ortalama sürtünme katsayısı değeri, 50 ml MY + 25 mg MXene ortamında, 50 ml MY ortamına göre %58,82 oranında, 50 ml MY + 50 mg MXene ortamında ise 50 ml MY ortamına göre %39,41 oranında düşüş göstermiştir. g-C₃N₄ nano partikül katkılı aşınma ortamlarında ortalama sürtünme katsayısı değeri, 50 ml MY + 25 mg g-C₃N₄ ortamında, 50 ml MY ortamına göre %52,94 oranında, 50 ml MY + 50 mg g-C₃N₄ ortamında ise 50 ml MY ortamına göre %35,29 oranında düşüş göstermiştir.



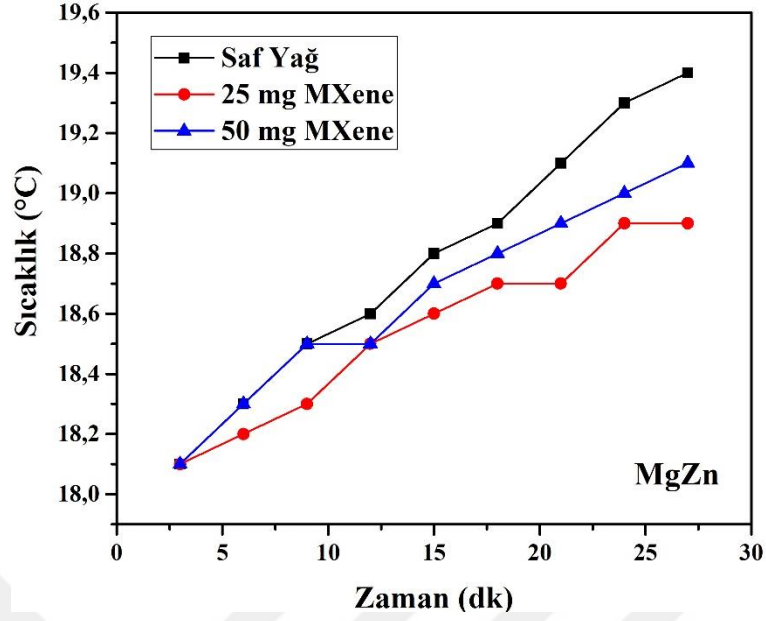
Şekil 5.35. MgZn Master alaşıminin çeşitli nano partikül ortamlarındaki hacim kaybı verileri.

Aşınma deneyleri gerçekleştirilirken, aşınmaya maruz kalan numunelerin sıcaklık değişimleri de ölçülmüştür. Ölçülen sıcaklık değerleri, başlangıç ve bitiş sıcaklıkları kıyaslanmış ve numunelerdeki sıcaklık değişimleri yüzde olarak belirtilmiştir. MgZn Master alaşıminin 50 ml MY yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneyleri esnasında sıcaklık değeri %7,18 oranında artış göstermiştir. 50 ml MY + 25 mg Fe₂O₃ yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneyleri esnasında sıcaklık değeri %4,41 oranında artış gösterirken, 50 ml MY + 50 mg Fe₂O₃ yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneyleri esnasında sıcaklık değeri %4,97 oranında artış göstermiştir. 50 ml MY + 25 mg MXene yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneyleri esnasında sıcaklık değeri %4,41 oranında artış gösterirken, 50 ml

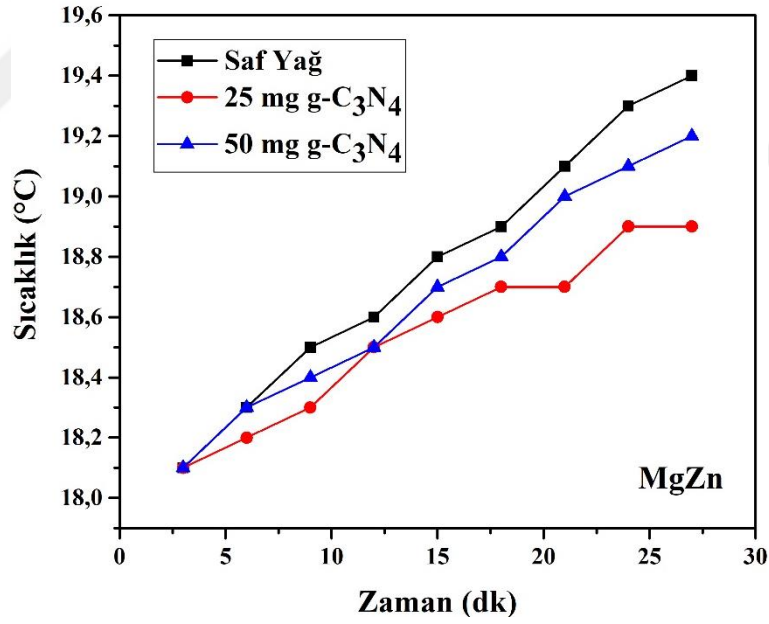
MY + 50 mg MXene yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneyleri esnasında sıcaklık değeri %5,52 oranında artış göstermiştir. 50 ml MY + 25 mg g-C₃N₄ yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneyleri esnasında sıcaklık değeri %4,41 oranında artış gösterirken, 50 ml MY + 50 mg g-C₃N₄ yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneyleri esnasında sıcaklık değeri %6,07 oranında artış göstermiştir. Sıcaklık değişim grafikleri, Şekil 5.36, Şekil 5.37 ve Şekil 5.38'de verilmiştir.



Şekil 5.36. MgZn Master alaşımının Fe₂O₃ ortamındaki aşınma deneylerinde oluşan sıcaklık değişimi grafiği.



Şekil 5.37. MgZn Master alaşımlarının MXene ortamındaki aşınma deneylerinde oluşan sıcaklık değişimi grafiği.

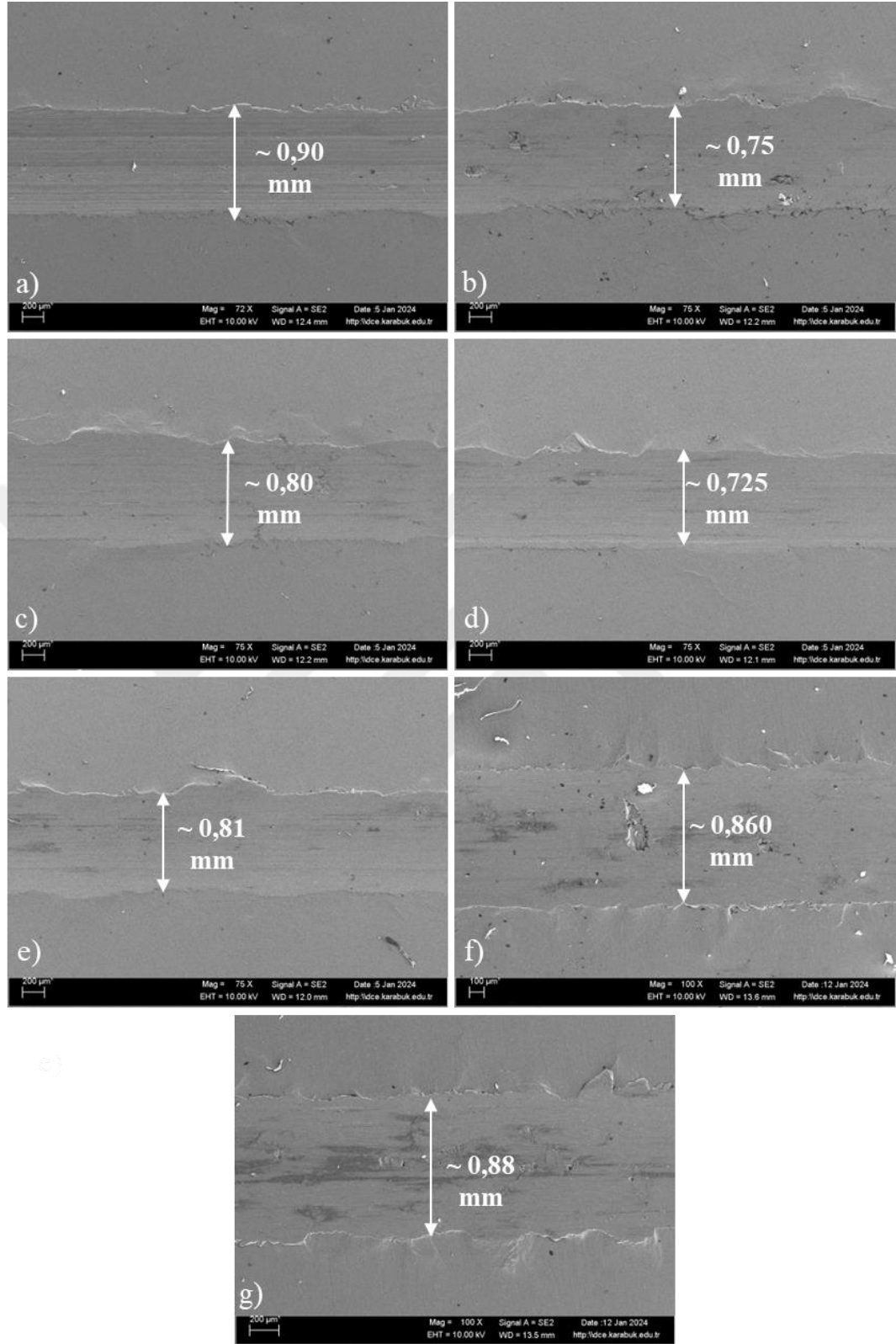


Şekil 5.38. MgZn Master alaşımlarının g-C₃N₄ ortamındaki aşınma deneylerinde oluşan sıcaklık değişimi grafiği.

MgZn malzemesi, çeşitli nano partikül ortamlarında, farklı aşınma mekanizmaları göstermiştir. Öncelikle Şekil 5.39’da verilen makro boyuttaki SEM görüntüleri, MgZn malzemesinin farklı nano partikül ortamlarındaki aşınma deneyleri sonucu yüzeylerinde oluşan aşınma izlerini göstermektedir. 50 ml MY ortamında ~ 0,90 mm boyutunda olan aşınma izinin genişliği, 50 ml MY + 25 mg Fe₂O₃ yağlayıcı

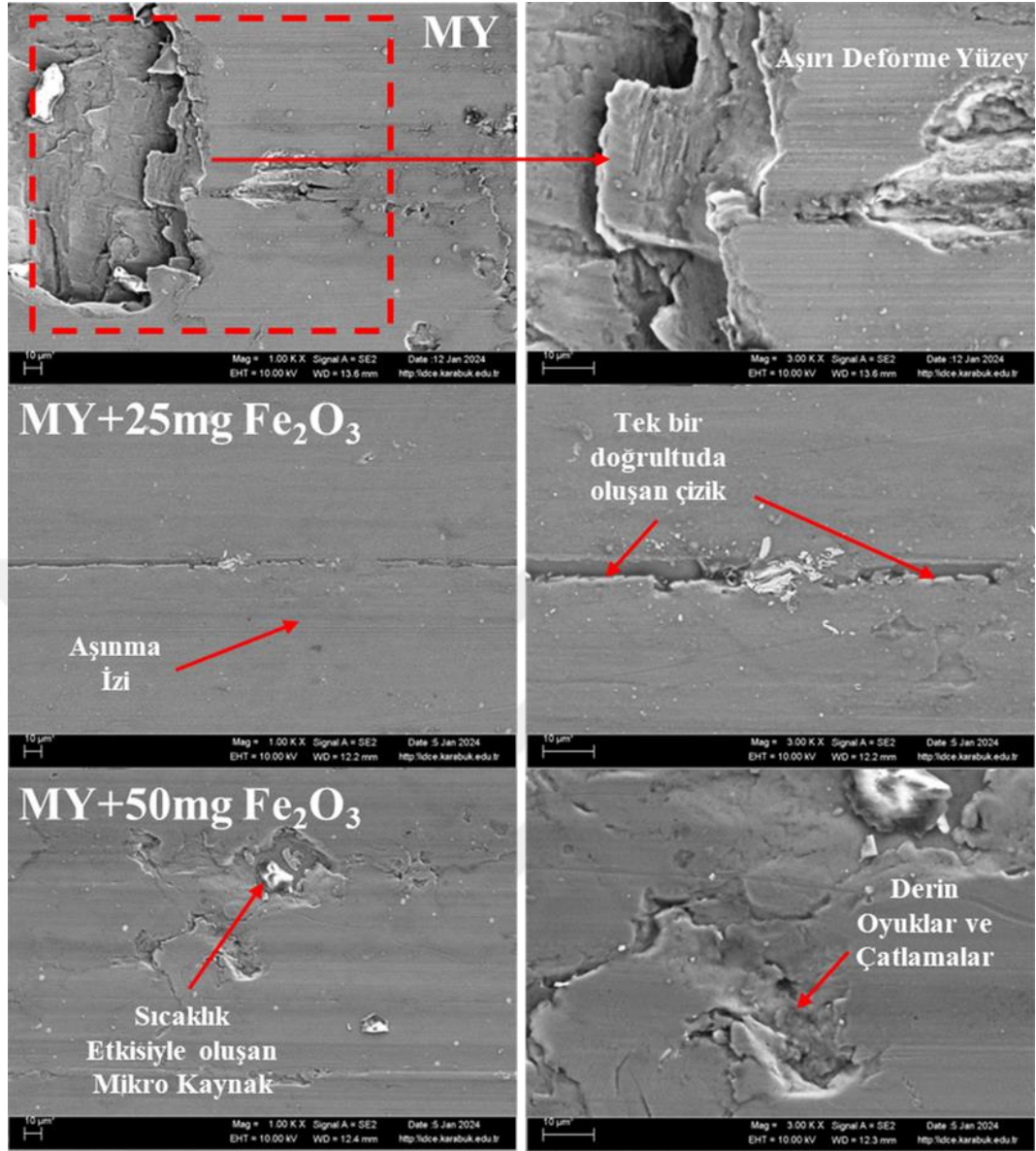
ortamındaki aşınma deneyinde $\sim 0,75$ mm, 50 ml MY + 50 mg Fe_2O_3 yağlayıcı ortamında ise $\sim 0,80$ mm olarak hesaplanmıştır. 50 ml MY + 25 mg MXene yağlayıcı ortamında gerçekleştirilen aşınma deneylerindeki aşınma izi, $\sim 0,725$ mm, 50 ml MY + 50 mg MXene yağlayıcı ortamında ise $\sim 0,81$ mm olarak hesaplanmıştır. 50 ml MY + 25 mg g- C_3N_4 yağlayıcı ortamında gerçekleştirilen aşınma deneylerinde ise aşınma izi, $\sim 0,86$ mm, 50 ml MY + 50 mg g- C_3N_4 yağlayıcı ortamında ise $\sim 0,88$ mm olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.39’da görünen makro yüzeylerdeki aşınma izi genişlikleri, daha öncesinde bahsedilen aşınma verilerini doğrular niteliktedir.





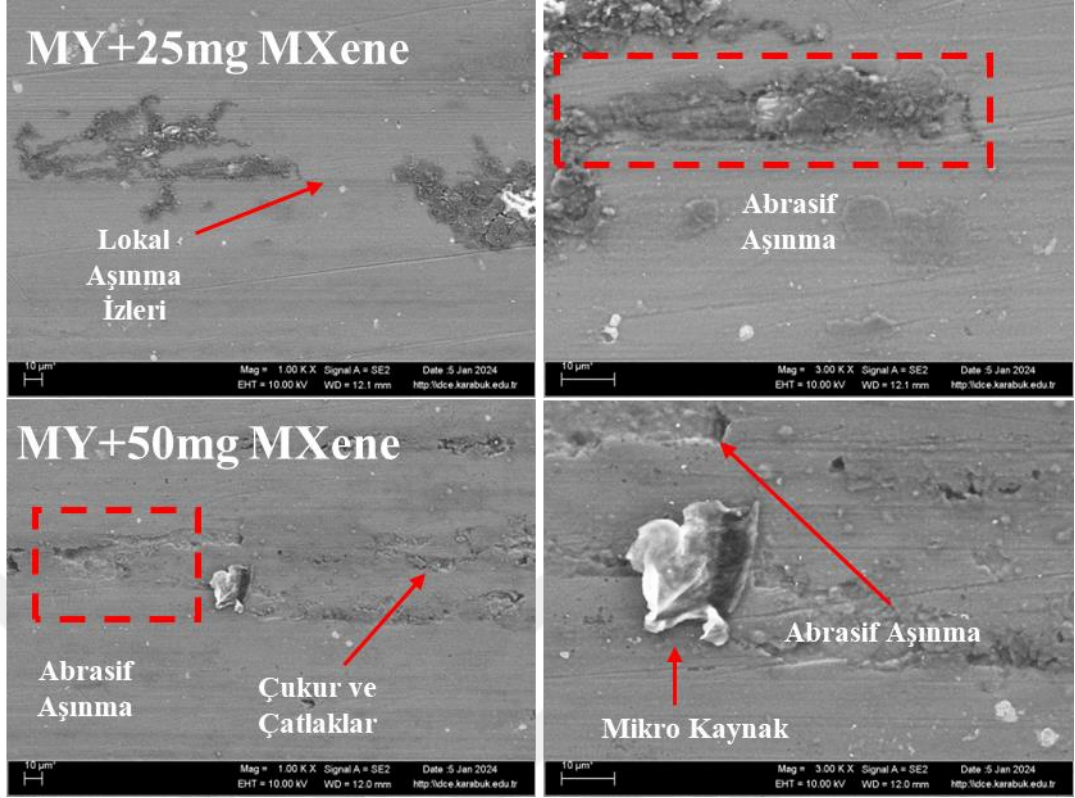
Şekil 5.39. MgZn aşınma izlerinin makro boyuttaki SEM görüntüleri. a) 50 ml MY, b) 50 ml MY + 25 mg Fe₂O₃, c) 50 ml MY + 50 mg Fe₂O₃, d) 50 ml MY + 25 mg MXene, e) 50 ml MY + 50 mg MXene, f) 50 ml MY + 25 mg g-C₃N₄, g) 50 ml MY + 50 mg g-C₃N₄.

Aşınma bölgelerindeki aşınma mekanizmalarını daha ayrıntılı inceleyebilmek için 1000x ve 3000x yakınlaştırma oranıyla alınan SEM görüntüleri Şekil 5.40'da verilmiştir. SEM görüntülerindeki aşınma mekanizmaları incelendiği zaman, MY aşınma ortamında, yüzey yapısının yüksek oranda deformasyona uğradığı görülmektedir. Yüzey yapısında kırılma, kopma ve yapışmaların meydana geldiği görülmektedir. MY + 25 mg Fe₂O₃ ortamındaki aşınma yüzeyleri incelendiğinde, tek bir çizgi halinde aşınmanın meydana geldiği gözlenmiştir. Bu durum nano partikül kullanımı sayesinde yağlama mekanizmasının etkili bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. MY + 50 mg Fe₂O₃ ortamındaki aşınma yüzeyleri incelendiğinde de MY ortamında gerçekleşen deneyler kadar deformasyon meydana gelmediği ancak 25 mg Fe₂O₃ ortamına göre daha derin aşınma izlerinin bulunduğu görülmektedir. Sıcaklık artışıyla beraber adhezif aşınma mekanizmalarının olduğu, buna bağlı olarak da çeşitli yüzeylerde mikro kaynak, çatlak ve oyukların meydana geldiği görülmektedir.



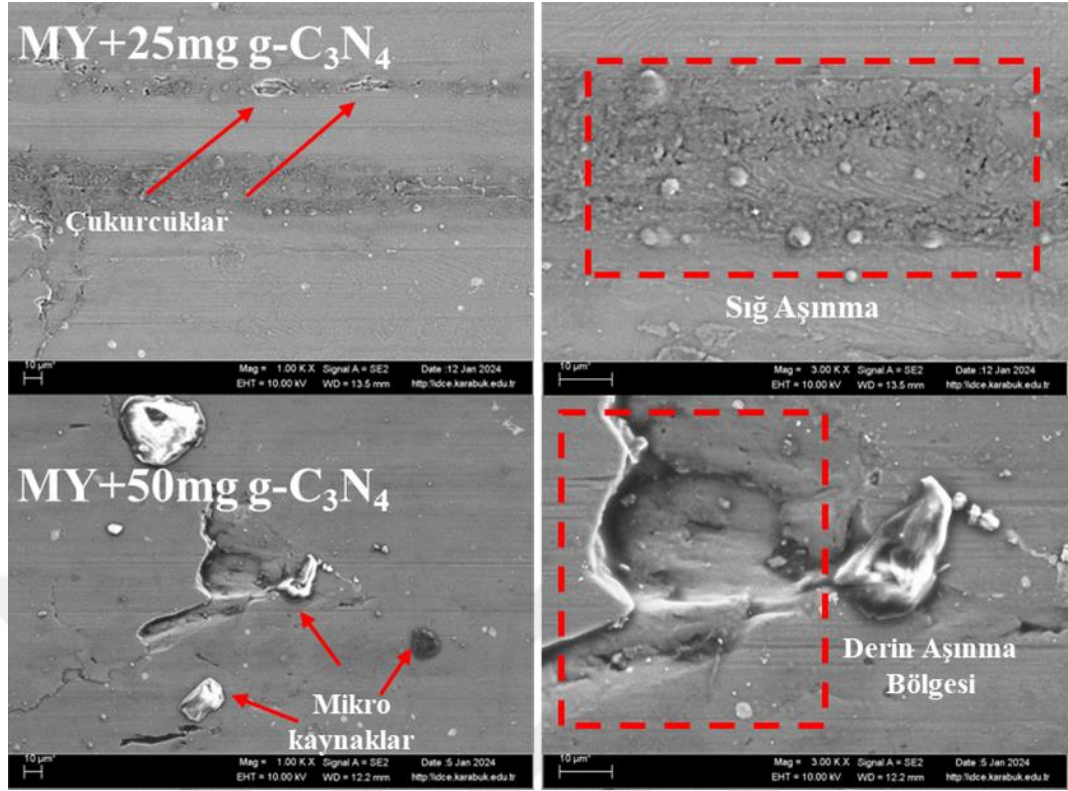
Şekil 5.40. MgZn alaışımının MY ve Fe_2O_3 ortamlarındaki SEM görüntüleri.

Şekil 5.41’de MY + 25 mg MXene ortamındaki aşınma deneyleri incelendiği zaman aşınma izlerinin lokal bölgelerde düşük oranda olduğu görülmektedir. MY + 50 mg MXene ortamındaki aşınma deneyleri incelendiğinde ise MY + 25 mg MXene ortamına göre çukur ve çatlakların meydana geldiği aynı zamanda artan sıcaklıkla beraber mikro kaynak oluştuğu görülmektedir. Yağ filminin yapısının bozulduğu ve sıcaklığın arttığı bölgelerde mikro kaynak oluşumu meydana gelmektedir.



Şekil 5.41. MgZn alaşımının MXene ortamındaki SEM görüntüleri.

Şekil 5.42’de verilen MY + 25 mg g-C₃N₄ ortamındaki aşınma deneyleri incelendiğinde, minimal düzeyde çukurcukların olduğu ancak bu deformasyonların sığ bir alanda gerçekleştiği görülmektedir. Aşınma derinliğinin az olması, nano partikül kullanımının yanı sıra MgZn alaşımının içeriğindeki çinko sebebiyle olabilir. Aynı zamanda çinko, yüksek yağlayıcılık özelliği sebebiyle, kaymalı yatak malzemelerinin üretiminde yaygın olarak kullanılan bir elementtir. Dolayısıyla bu deney setinde meydana gelen aşınma miktarı, diğer deney setlerine göre oldukça azdır. MY + 50 mg g-C₃N₄ ortamındaki aşınma deneylerinde ise daha derin aşınma bölgeleri görülmektedir. Diğer deney sonuçlarında olduğu gibi bu durum nano partikül yoğunluğunun fazlalığının bir sebebidir. Yüksek konsantrasyonlarda kullanılan nano partiküller, topaklanma eğilimine sahiptir. Bu da yağlama rejiminin bozulmasına sebep olmaktadır. AISI 1015 ve MgZn malzemelerinin aşınma testlerinde 25 mg nano partikül kullanımının, katkısız MY ve 50 mg nano partikül kullanımına oranla daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Elde edilen tüm sayısal ve görsel sonuçlar bu durumu ispatlamaktadır.

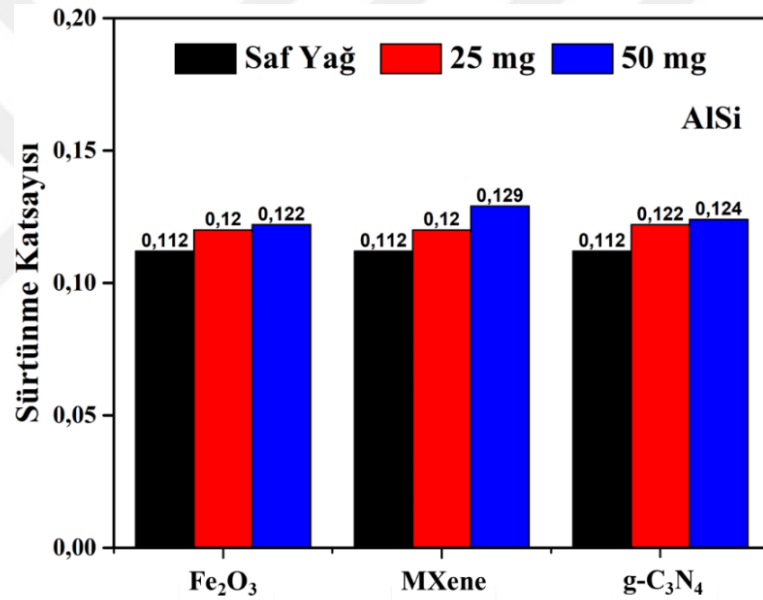


Şekil 5.42. MgZn alaşımının g-C₃N₄ ortamındaki SEM görüntüleri.

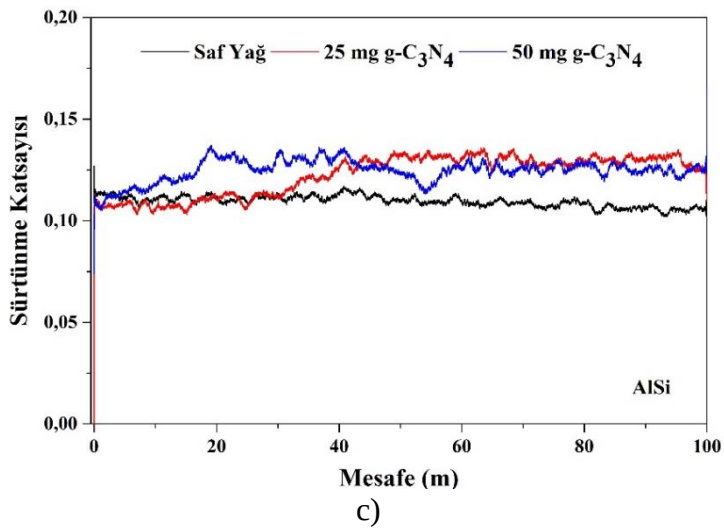
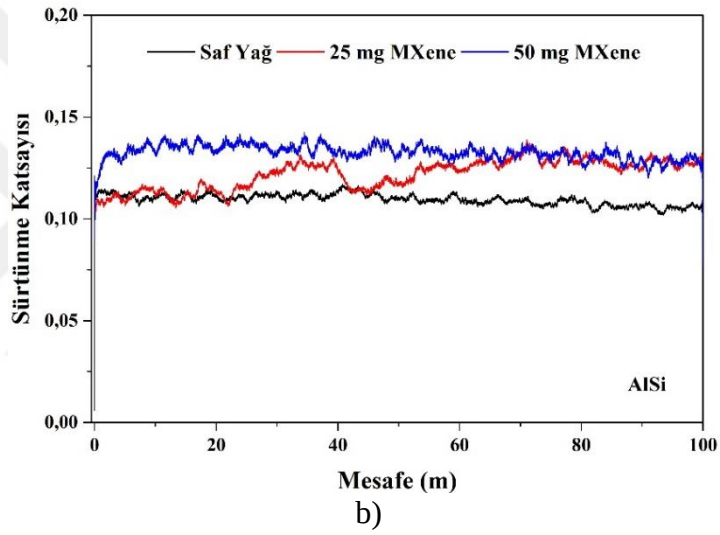
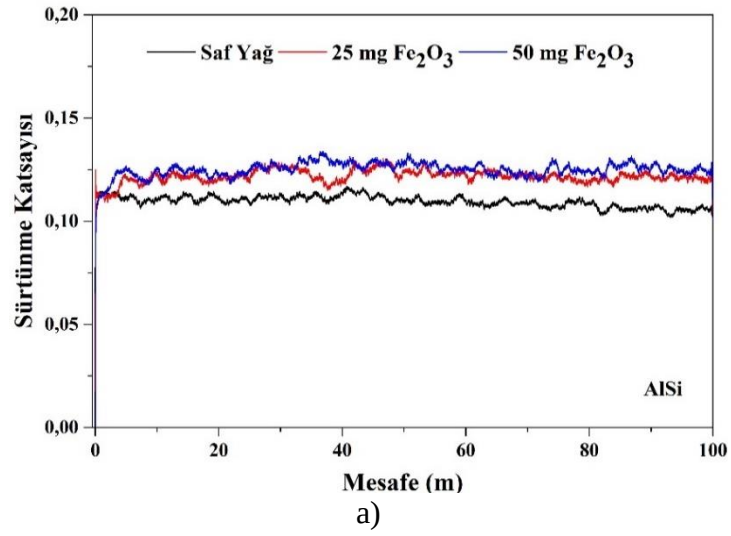
5.2.3.3. AlSi18 Alaşımı Numunesi Aşınma Deneyi Sonuçları

AlSi18 alaşımının 50 ml MY ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerindeki ortalama sürtünme katsayısı değeri 0,112 olarak bulunmuştur. 50 ml MY + 25 mg Fe₂O₃ yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan ortalama sürtünme katsayısı değeri 0,120 iken, 50 ml MY + 50 mg Fe₂O₃ yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan ortalama sürtünme katsayısı değeri ise 0,122 olarak görünmektedir. 50 ml MY + 25 mg MXene yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan ortalama sürtünme katsayısı değeri 0,120 iken, 50 ml MY + 50 mg MXene yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan ortalama sürtünme katsayısı değeri ise 0,129 olarak görünmektedir. 50 ml MY + 25 mg g-C₃N₄ yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan ortalama sürtünme katsayısı değeri 0,122 iken, 50 ml MY + 50 mg g-C₃N₄ yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan ortalama sürtünme katsayısı değeri ise 0,124 olarak görünmektedir. Sürtünme katsayısı grafikleri, Şekil 5.43 ve Şekil 5.44'te verilmiştir. Fe₂O₃ nano partikül katkı

aşınma ortamlarında, ortalama sürtünme katsayısı değeri, 50 ml MY + 25 mg Fe_2O_3 ortamında, 50 ml MY ortamına göre %7,14 oranında, 50 ml MY + 50 mg Fe_2O_3 ortamında ise 50 ml MY ortamına göre %8,92 oranında artış göstermiştir. MXene nano partikül katkılı aşınma ortamlarında, ortalama sürtünme katsayısı değeri, 50 ml MY + 25 mg MXene ortamında, 50 ml MY ortamına göre %7,14 oranında, 50 ml MY + 50 mg MXene ortamında ise 50 ml MY ortamına göre %15,17 oranında artış göstermiştir. g- C_3N_4 nano partikül katkılı aşınma ortamlarında, ortalama sürtünme katsayısı değeri, 50 ml MY + 25 mg g- C_3N_4 ortamında, 50 ml MY ortamına göre %8,92 oranında, 50 ml MY + 50 mg g- C_3N_4 ortamında ise 50 ml MY ortamına göre %10,71 oranında artış göstermiştir.

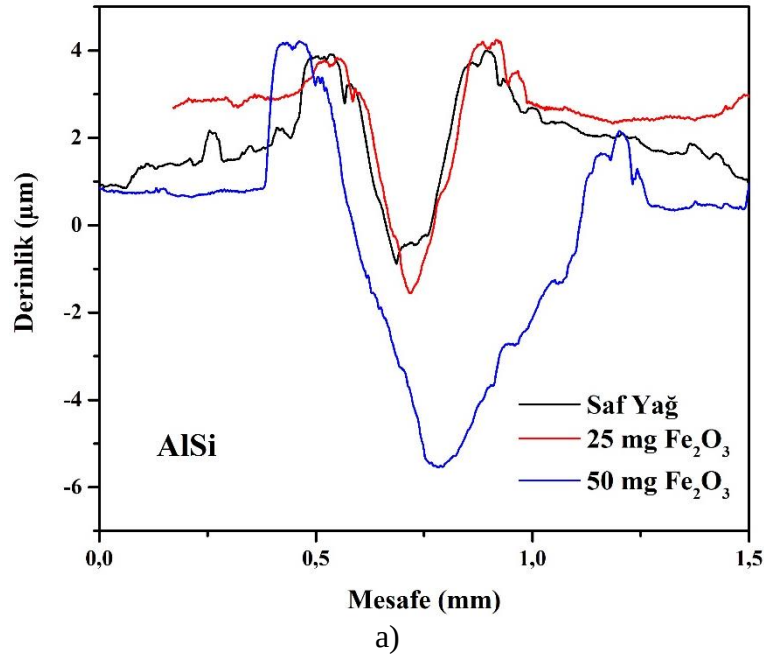


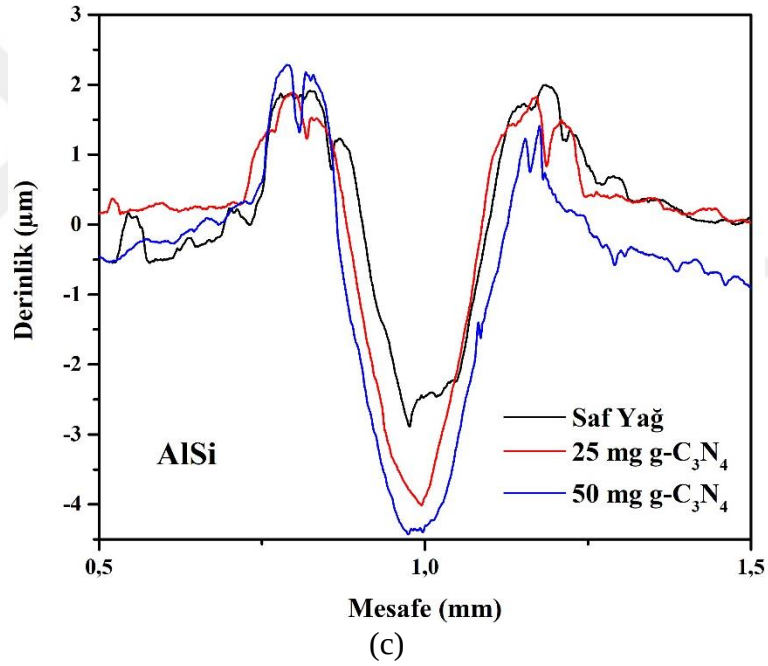
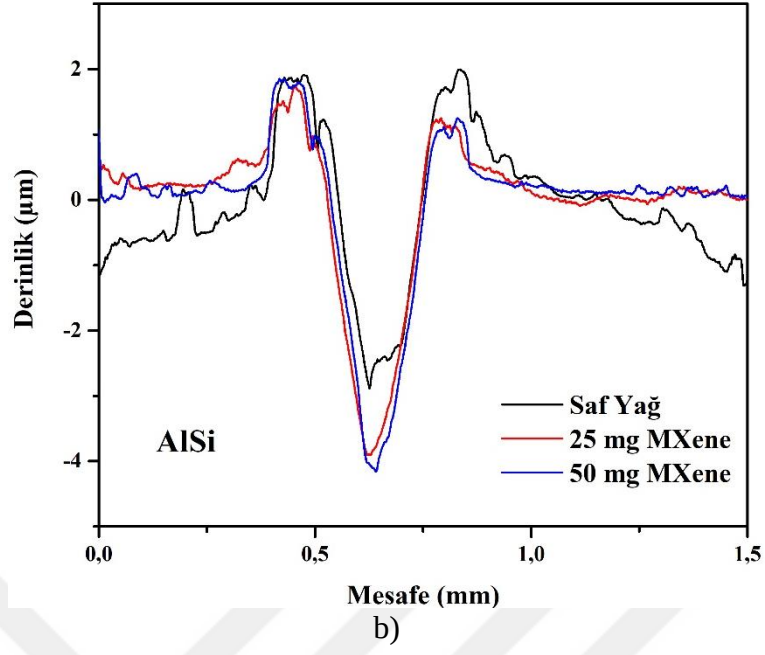
Şekil 5.43. AlSi alaşımının farklı nano partikül ortamlarındaki sürtünme katsayısı verileri sütun grafiği.



Şekil 5.44. AlSi alaşımının sürtünme katsayısı verileri. a) farklı konsantrasyondaki Fe_2O_3 sürtünme katsayısı grafiği, b) farklı konsantrasyondaki MXene sürtünme katsayısı grafiği, c) farklı konsantrasyondaki $\text{g-C}_3\text{N}_4$ sürtünme katsayısı grafiği.

AlSi18 alaşımlarının aşınma izlerinden 2D profilometre ölçümleriyle belirlenen verilerin grafikleri, Şekil 5.45'te verilmiştir. Profilometre ölçümlerinden elde edilen aşınma derinliklerinin alan hesapları, aşınan numunelerin aşınma hacminin tespit edilmesinde kullanılmaktadır. AlSi18 alaşımlarının 50 ml MY ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerindeki aşınma izinin alanı 0,00023 mm² olarak tespit edilmiştir. 50 ml MY + 25 mg Fe₂O₃ yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan aşınma izinin alanı 0,00026 mm² iken, 50 ml MY + 50 mg Fe₂O₃ yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan aşınma izinin alanı ise 0,00031 mm² olarak tespit edilmiştir. 50 ml MY + 25 mg MXene yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan aşınma izinin alanı 0,00026 mm² iken, 50 ml MY + 50 mg MXene yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan aşınma izinin alanı ise 0,00033 mm² olarak tespit edilmiştir. 50 ml MY + 25 mg g-C₃N₄ yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan aşınma izinin alanı 0,0003 mm² iken, 50 ml MY + 50 mg g-C₃N₄ yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan aşınma izinin alanı ise 0,00032 mm² olarak tespit edilmiştir.

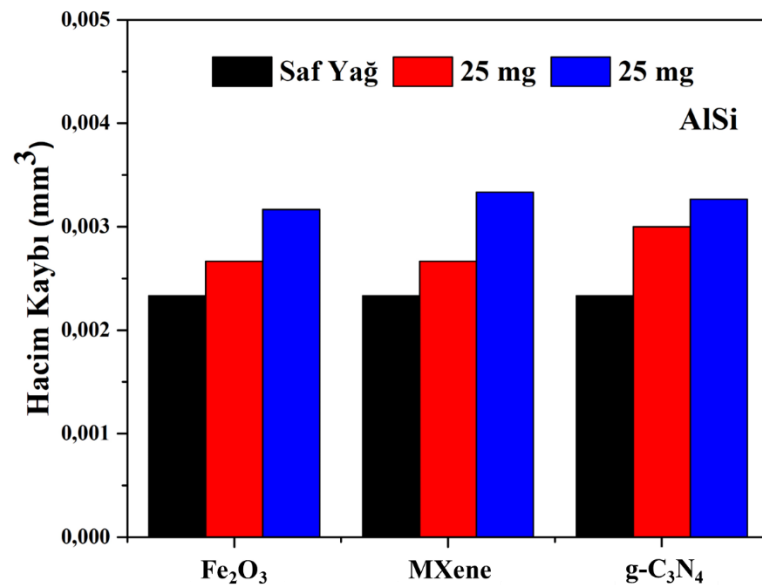




Şekil 5.45. AlSi profilometre ölçüm verileri. a) farklı konsantrasyondaki Fe_2O_3 profilometre verisi, b) farklı konsantrasyondaki MXene profilometre verisi, c) farklı konsantrasyondaki $\text{g-C}_3\text{N}_4$ profilometre verisi.

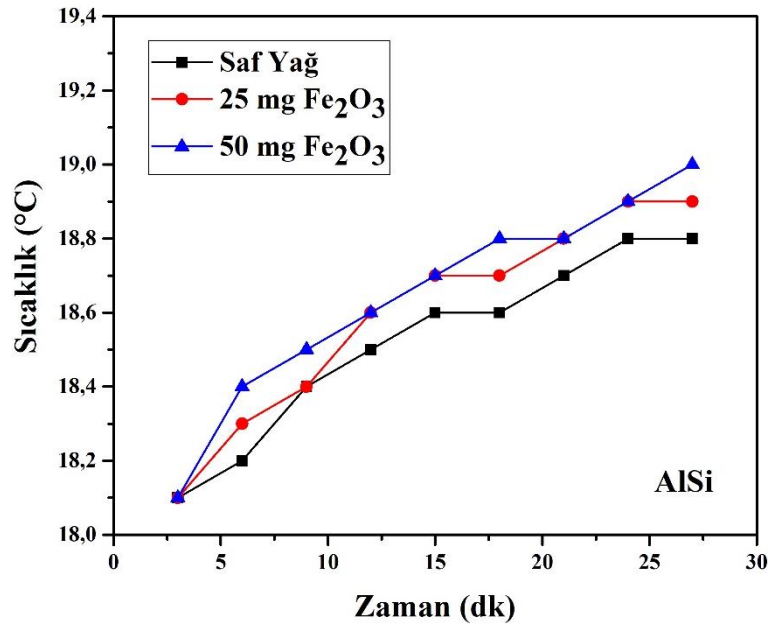
AlSi18 alaşımının 50 ml MY ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerindeki hacimsel kayıp değeri $0,00233 \text{ mm}^3$ olarak tespit edilmiştir. 50 ml MY + 25 mg Fe_2O_3 yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan hacimsel kayıp değeri $0,00267 \text{ mm}^3$ iken, 50 ml MY + 50 mg Fe_2O_3 yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan hacimsel kayıp değeri ise $0,00317 \text{ mm}^3$ olarak

tespit edilmiştir. 50 ml MY + 25 mg MXene yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan hacimsel kayıp değeri 0,00267 mm³ iken, 50 ml MY + 50 mg MXene yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan hacimsel kayıp değeri ise 0,00333 mm³ olarak tespit edilmiştir. 50 ml MY + 25 mg g-C₃N₄ yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan hacimsel kayıp değeri 0,003 mm³ iken, 50 ml MY + 50 mg g-C₃N₄ yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneylerinde oluşan hacimsel kayıp değeri ise 0,00327 mm³ olarak tespit edilmiştir. AlSi18 alaşımının hacim kaybı grafiği, Şekil 5.46'da verilmiştir. Fe₂O₃ nano partikül katkılı aşınma ortamlarında hacimsel kayıp, 50 ml MY + 25 mg Fe₂O₃ ortamında, 50 ml MY ortamına göre %14,59 oranında, 50 ml MY + 50 mg Fe₂O₃ ortamında ise 50 ml MY ortamına göre %36,05 oranında artış göstermiştir. MXene nano partikül katkılı aşınma ortamlarında, ortalama sürtünme katsayısı değeri, 50 ml MY + 25 mg MXene ortamında, 50 ml MY ortamına göre %14,59 oranında, 50 ml MY + 50 mg MXene ortamında ise 50 ml MY ortamına göre %42,91 oranında artış göstermiştir. g-C₃N₄ nano partikül katkılı aşınma ortamlarında, ortalama sürtünme katsayısı değeri, 50 ml MY + 25 mg g-C₃N₄ ortamında, 50 ml MY ortamına göre %28,75 oranında, 50 ml MY + 50 mg g-C₃N₄ ortamında ise 50 ml MY ortamına göre %40,34 oranında artış göstermiştir.

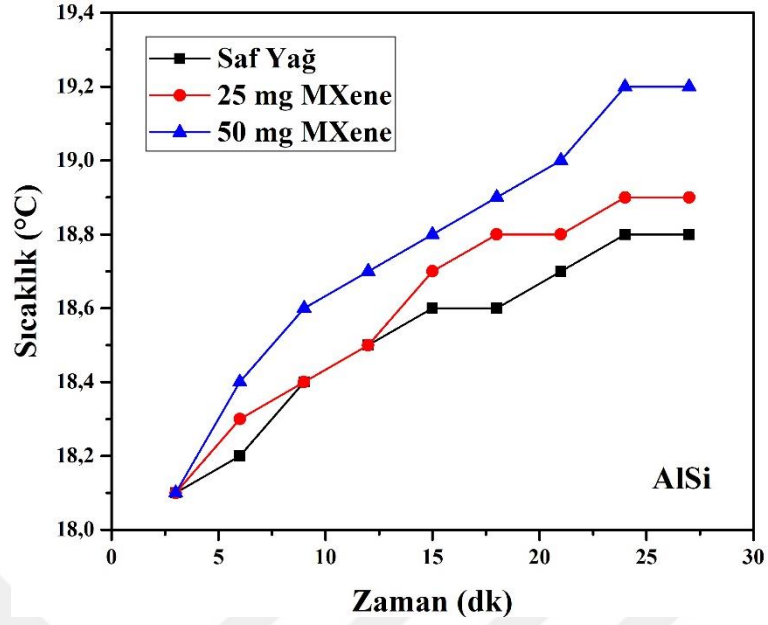


Şekil 5.46. AlSi alaşımının çeşitli nano partikül ortamlarındaki hacim kaybı verileri.

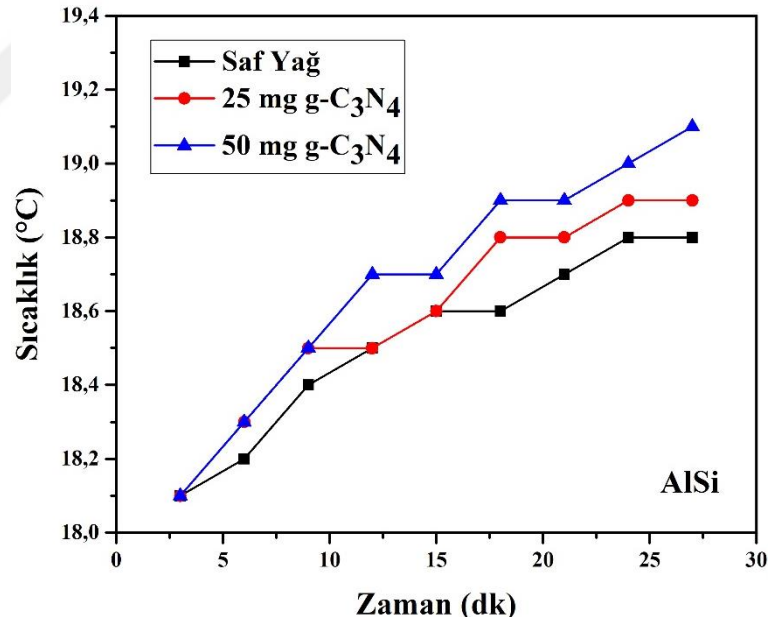
Aşınma deneyleri gerçekleştirilirken, aşınmaya maruz kalan numunelerin sıcaklık değişimleri de ölçülmüştür. Ölçülen sıcaklık değerleri başlangıç ve bitiş sıcaklıkları kıyaslanmış ve numunelerdeki sıcaklık değişimleri yüzde olarak belirtilmiştir. AlSi18 alaşımının 50 ml MY yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneyleri esnasında sıcaklık değeri %3,86 oranında artış göstermiştir. 50 ml MY + 25 mg Fe₂O₃ yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneyleri esnasında sıcaklık değeri %4,41 oranında artış gösterirken 50 ml MY + 50 mg Fe₂O₃ yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneyleri esnasında sıcaklık değeri %4,97 oranında artış göstermiştir. 50 ml MY + 25 mg MXene yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneyleri esnasında sıcaklık değeri %4,41 oranında artış gösterirken 50 ml MY + 50 mg MXene yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneyleri esnasında sıcaklık değeri %6,07 oranında artış göstermiştir. 50 ml MY + 25 mg g-C₃N₄ yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneyleri esnasında sıcaklık değeri %4,41 oranında artış gösterirken 50 ml MY + 50 mg g-C₃N₄ yağlayıcı ortamında, 20 N yük altındaki aşınma deneyleri esnasında sıcaklık değeri %5,52 oranında artış göstermiştir. Sıcaklık değişim grafikleri, Şekil 5.47, Şekil 5.48 ve Şekil 5.49’da verilmiştir.



Şekil 5.47. AlSi alaşımının Fe₂O₃ ortamındaki aşınma deneylerinde oluşan sıcaklık değişimi grafiği.



Şekil 5.48. AlSi alaşımının MXene ortamındaki aşınma deneylerinde oluşan sıcaklık değişimi grafiği.

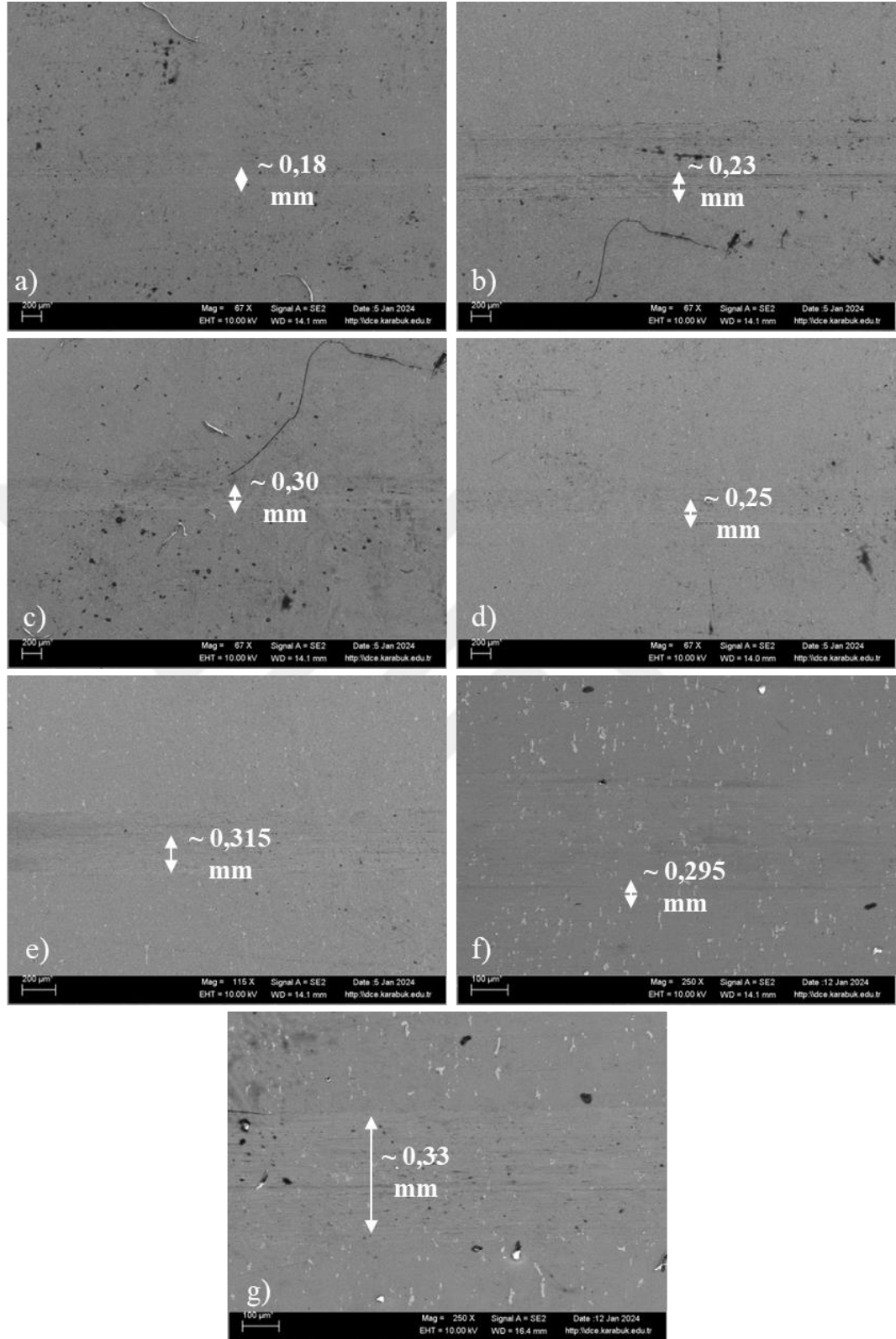


Şekil 5.49. AlSi alaşımının g-C₃N₄ ortamındaki aşınma deneylerinde oluşan sıcaklık değişimi grafiği.

AlSi18 malzemesi, çeşitli nano partikül ortamlarında, farklı aşınma mekanizmaları sergilemiştir. Öncelikle Şekil 5.50’de verilen makro boyuttaki SEM görüntüleri, AlSi18 malzemesinin farklı nano partikül ortamlarındaki aşınma deneyleri sonucu yüzeylerinde oluşan aşınma izlerini göstermektedir. 50 ml MY ortamında ~ 0,18 mm boyutunda olan aşınma izinin genişliği, 50 ml MY + 25 mg Fe₂O₃ yağlayıcı

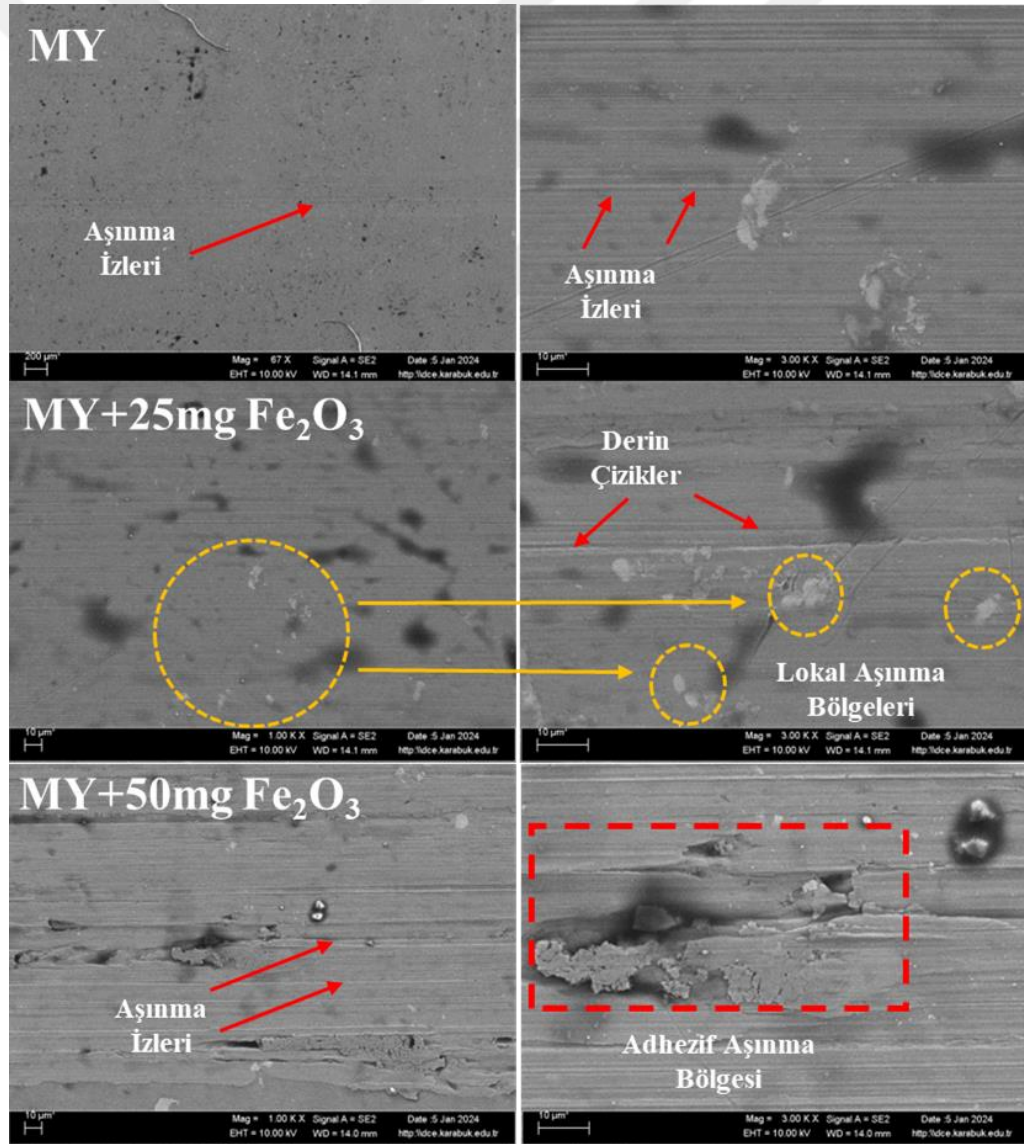
ortamındaki aşınma deneyinde $\sim 0,23$ mm, 50 ml MY + 50 mg Fe_2O_3 yağlayıcı ortamında ise $\sim 0,30$ mm olarak hesaplanmıştır. 50 ml MY + 25 mg MXene yağlayıcı ortamında gerçekleştirilen aşınma deneylerindeki aşınma izi $\sim 0,25$ mm, 50 ml MY + 50 mg MXene yağlayıcı ortamında ise $\sim 0,315$ mm olarak hesaplanmıştır. 50 ml MY + 25 mg g- C_3N_4 yağlayıcı ortamında gerçekleştirilen aşınma deneylerinde ise aşınma izi $\sim 0,295$ mm, 50 ml MY + 50 mg g- C_3N_4 yağlayıcı ortamında ise $\sim 0,33$ mm olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.50’de görünen makro yüzeylerdeki aşınma izi genişlikleri, daha öncesinde bahsedilen aşınma verilerini doğrular niteliktedir.





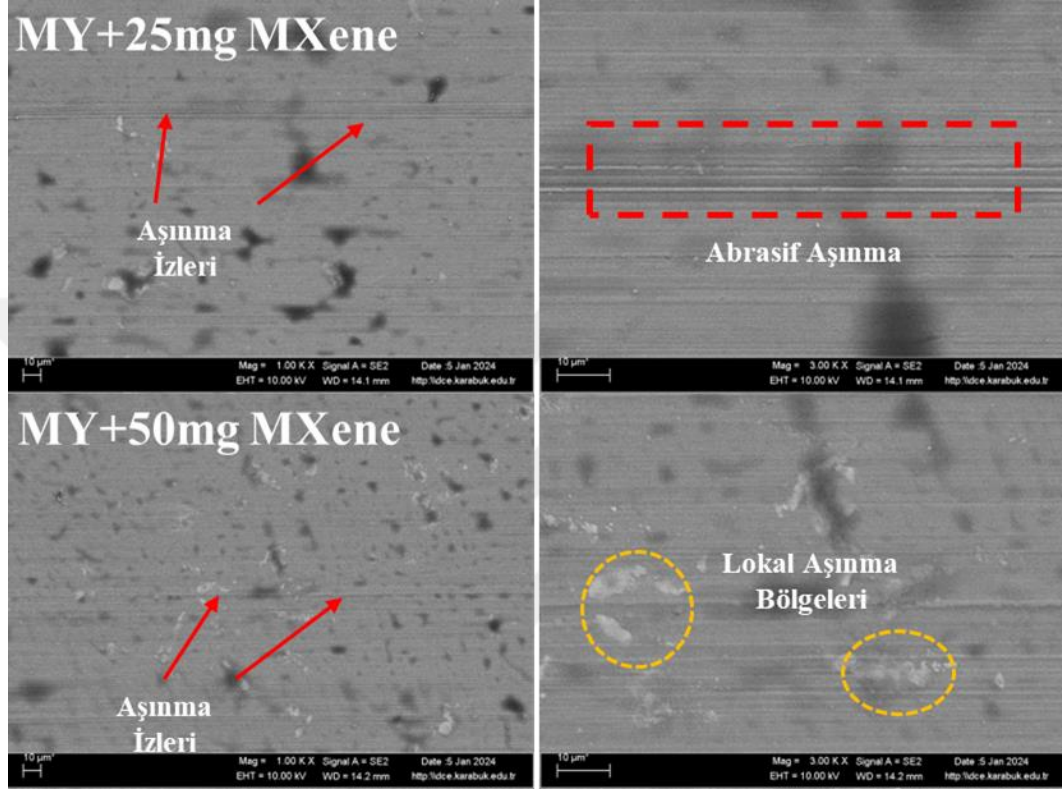
Şekil 5.50. AlSi aşınma izlerinin makro boyuttaki SEM görüntüleri. a) 50 ml MY, b) 50 ml MY + 25 mg Fe₂O₃, c) 50 ml MY + 50 mg Fe₂O₃, d) 50 ml MY + 25 mg MXene, e) 50 ml MY + 50 mg MXene, f) 50 ml MY + 25 mg g-C₃N₄, g) 50 ml MY + 50 mg g-C₃N₄.

Aşınma bölgelerindeki aşınma mekanizmalarını daha ayrıntılı inceleyebilmek için 1000x ve 3000x yakınlaştırma oranıyla alınan SEM görüntüleri Şekil 5.51’de verilmiştir. SEM görüntülerindeki aşınma mekanizmaları incelendiğinde aşınma ortamında MY kullanıldığı zaman yüzeyde çok düşük aşınma izleri görülmüştür. MY + 25 mg Fe₂O₃ ortamındaki aşınma yüzeyleri incelendiğinde ise aşınma izlerinin biraz daha belirgin olduğu, burada nano partiküllerin etkisiyle aşınma oranının yükseldiği görülmektedir. MY + 50 mg Fe₂O₃ ortamındaki aşınma yüzeyleri incelendiğinde, MY ortamına göre bir miktar sıcaklık artışıyla beraber adhezif aşınma mekanizmasının oluştuğu ve 25 mg Fe₂O₃ ortamına göre daha derin aşınma izlerinin bulunduğu görülmektedir.



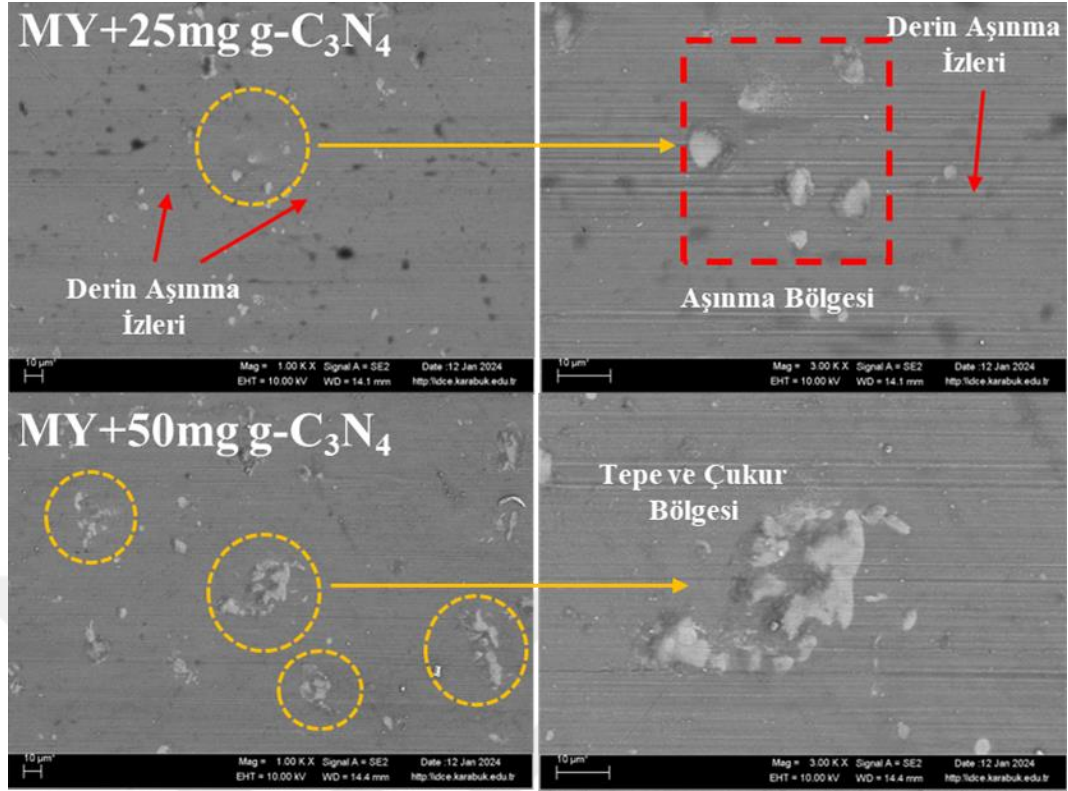
Şekil 5.51. AISi numunesinin MY ve Fe₂O₃ ortamlarındaki SEM görüntüleri.

Şekil 5.52’de MY + 25 mg MXene ortamındaki aşınma deneyleri incelendiği zaman, düşük oranda abrasif aşınma izleri görülmektedir. MY + 50 mg MXene ortamındaki aşınma deneyleri incelendiğinde ise MY + 25 mg MXene ortamına göre artan sıcaklıkla beraber partikül yapışmalarının olduğu gözlenmiştir.



Şekil 5.52. AlSi numunesinin MXene ortamındaki SEM görüntüleri.

MY + 25 mg g-C₃N₄ ortamındaki aşınma deneyleri görüntüsü incelendiğinde, MY + 25 mg MXene ortamına göre daha çok aşınmanın meydana geldiği anlaşılmaktadır. MY + 50 mg g-C₃N₄ ortamındaki aşınma deneylerinde ise partikül konsantrasyonun artması ile aşınmanın daha da arttığı görülmektedir (Şekil 5.53). AlSi18 malzemesinin, tüm deney setlerinde saf MY ile daha iyi sonuçlar alınmış, nano partikül kullanımı aşınmayı artırmıştır. Bu durum kullanılan malzemenin içeriğinde bulunan silisyum sebebiyle olabilmektedir. AlSi18 malzemesinin aşınma deneylerinde nano partikül kullanımı, yüzeyde eroziv aşınma etkisi oluşturmuş olabilir. Buradan hareketle, AlSi18 malzemesinde nano partikül kullanımının araştırılması için çok düşük nano partikül konsantrasyon oranları ile deneylerin yapılması gerektiği kanaatine varılmıştır.



Şekil 5.53. AISi numunesinin g-C₃N₄ ortamındaki SEM görüntüleri.

5.2.4. Aşınma Deneyi Sonuçlarının Genel Olarak Değerlendirilmesi

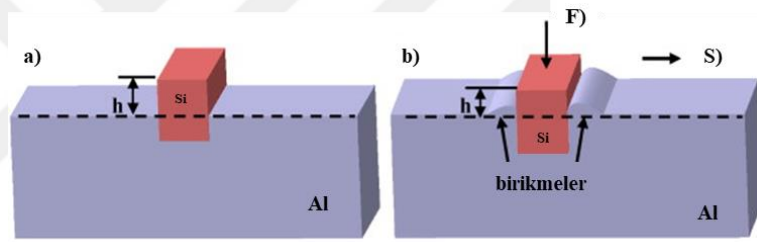
Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde, AISI 1015, MgZn Master ve AISi18 malzemeleri, 20 N yük, 10 mm stroke mesafesi, 100 m mesafe ve üç farklı nano partikül (Fe₂O₃, MXene, g-C₃N₄) katkılı motor yağı koşullarında aşınma deneylerine tabi tutulmuştur. Deneyler sonucunda sürtünme katsayısı, hacim kaybı ve sıcaklık değişimi hesaplanmış, SEM ve 2D profilometre ile morfolojik analizler gerçekleştirilmiştir. AISI 1015 malzemesinin aşınma sonuçlarına göre 2D nano partikül kullanımı, saf MY kullanımına göre sürtünme katsayısının, hacim kaybının ve sıcaklık oluşumunun azalmasına sebep olmuştur. Nano partikül katkısı sayesinde aşınan yüzeyler arasındaki ısı oluşumunun azalması, hem yağlayıcının kararlılığını daha iyi koruyabilmesine hem de malzeme yüzeylerinin aşınmaya karşı daha dirençli olmasına olanak sağlamıştır. Ancak nano partikül kullanımında konsantrasyon artışı sürtünme katsayısı, hacim kaybı ve sıcaklık artışı üzerinde negatif etki oluşturmuştur. Nano partiküllerin yüksek konsantrasyonda kullanımının topaklanmaya sebep olması, yüzeyler arasında üç cisimli aşınma mekanizmasının oluşmasıyla aşınma oranının

artmasına sebep olmuştur. Literatürde, yağlayıcılara katkı olarak nano partikül eklenirken %0,01-30 arasında çeşitli oranlar kullanılmıştır [110,120,155,213,217,219–222]. Dolayısıyla aşınma direncinin artırılmasında 50 ml MY içine daha düşük oranda (25 mg) nano partikül katkısı en iyi sonucu vermiştir. AISI 1015 malzemesinin aşınmasında kullanılan 2D nano partiküller kendi içinde değerlendirildiğinde Fe_2O_3 ve MXene ile daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Fe_2O_3 partiküllerinin sert oluşu ve yük taşıma kapasitesi sayesinde özellikle demir alaşımlarında üstün tribolojik performans sağladığı literatürde vurgulanmaktadır [64,161,162,223]. MXene ise katmanlı, pul pul yapısı, düşük kesme mukavemeti, kendi kendini yağlayabilme kabiliyeti sayesinde üstün yağlama performansı sergilemiştir.

MgZn malzemesinin aşınma sonuçları incelendiğinde, katkısız MY kullanımına nazaran 2D nano partikül kullanımı, sürtünme katsayısının, hacim kaybının ve sıcaklık oluşumunun azalmasına sebep olduğu görülmüştür. Nano partikül kullanımı ile tribolojik performansın artışı, temas eden yüzeyler arasında ısı artışının engellenmesi, kararlı yağ filminin oluşması sebebiyle olmaktadır. Bu durum AISI 1015 malzemesindeki sonuçlar ile paralellik göstermektedir. Ancak her iki malzeme karşılaştırıldığında, MgZn malzemesinde daha düşük sürtünme katsayısı ve hacim kaybı sonuçlarının elde edildiği görülmektedir. Buna sebep olarak MgZn alaşımının içeriğinde bulunan çinkonun yüksek yağlayıcılık özelliği gösterilebilir [224,225]. Bu alaşım AISI 1015 malzemesine göre nispeten yumuşak olmasına rağmen aşınma performansı açısından daha iyi sonuç göstermiştir. Çinko, özellikle kaymalı yatak malzemelerinin üretiminde sıklıkla kullanılan bir malzemedir [225–228]. Dolayısıyla çinkonun yüksek yağlayıcılık özelliği sayesinde MgZn alaşımı, AISI 1015'e göre daha düşük sürtünme ve aşınma ile sonuçlanmıştır. MgZn malzemesinin aşınmasında kullanılan nano partiküller değerlendirildiğinde, sürtünme katsayısı bakımından üç nano partikülün de benzer, hacim kaybı açısından ise MXene ve g- C_3N_4 partiküllerinin daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. MXene ve g- C_3N_4 partiküllerinin ortak noktası katmanlı bir yapıya sahip olmaları ve kendi kendini yağlama özelliklerinin yüksekliğidir. Bu durum da aşınma esnasında katmanlı ve kararlı bir yağ filminin oluşmasını sağlamış, yüzeyler arasındaki teması keserek, sürtünmenin azalmasına yol açmıştır. Konsantrasyon parametresi ele alındığında ise AISI 1015 malzemesine

benzer şekilde konsantrasyon parametresinin artışı ile aşınma davranışının olumsuz etkilendiği görülmektedir.

AlSi18 alaışımının aşınma sonuçları incelendiğinde, katkısız MY kullanımına göre 2D nano partikül kullanımı, sürtünme katsayısının, hacim kaybının ve sıcaklık oluşumunun artmasına sebep olduğu gözlenmiştir. Al-Si alaşımlarında bulunan Si içeriği, numunenin sertlik ve mukavemet özelliğinde artışa neden olmaktadır [229–231]. Aşınmanın ilk evresinde, aşındırıcının temas noktalarında oluşan basınç ve sıcaklık, AlSi alaşımlarında, Al kristaline göre yüksek konumda yer alan Si kristallerine etki etmektedir (Şekil 5.54) [229,230]. Sıcaklık ve basınç etkisiyle serbest kalan Si kristalleri, aşınan parçacıklarla beraber nispeten daha yumuşak olan Al matrisine gömülmeye başlamaktadır (Şekil 5.54) [229,230].



Şekil 5.54. Al-Si alaşımlarındaki (yumuşak matrisli) ultra hafif aşınma mekanizmalarının şematik gösterimi. a) aşınmadan önce aşındırılmış bir yüzey üzerinde h yüksekliğine sahip bir silisyum parçacığının kesit görünümü, b) parçacıkların batması [230].

Bu mekanizma, sürtünme kaynaklı dispersiyon sertleşmesi olarak tanımlanabilir [229]. Yüksek sertlik değerine (130 HBW) sahip olan AlSi alaışımındaki Si parçacıklarının, yüzey katmanında çatlama veya kırılmaya maruz kalmadan gömülü olduğu yerde sağlam kaldıkları ve aşınma direncini arttırdıkları bilinmektedir [230,232]. AlSi18 malzemesinin aşınma deneylerinde, buna benzer bir etkileşimin meydana geldiği ve nano partiküllerin Si kristallerinin dolması beklenen matrislere dolduğu düşünülebilir. Bu durum da aşınma direncinin düşmesine sebep olmuş olabilir. Ayrıca Al-Si alaşımlarındaki Si, sert bir takviye olması nedeniyle aşınma deneyleri esnasında, çok az miktarda aşınma kaybına neden olmaktadır. Yumuşak bir malzeme olmasından dolayı Al elementi daha hızlı aşınmaktadır. Al-Si alaşımlarının, aşınma deneyleri esnasında yağlayıcıların içerisine eklenen nano partiküller Al

elementini aşındırmış olabilir. Fe_2O_3 ve MXene nano partikülleri seramik, ve $\text{g-C}_3\text{N}_4$ nano partikülü karbon bazlı özellik gösteren nano partiküllerdir [128,233]. Bu sebeple, bu partiküller Al-Si alaşımlarında Si katkısından çok daha fazla Al elementini aşındırma özelliği göstererek, saf MY ortamına göre daha fazla aşındırıcı etkiye sahip olmuşlardır. Si elementinin sertliğinin yüksek olması ve seramik-seramik etkileşiminden dolayı daha düşük miktarda aşınmaya uğraması bunu açıklamaktadır. Bu etki sebebiyle, malzemenin saf MY koşullarında aşınması sonucunda düşük sürtünme katsayısı, hacim kaybı ve sıcaklık artışı elde edilmiş ancak nano partikül kullanımı ile bu değerler artış göstermiştir. Bu deney setinde de nano partikül konsantrasyonunun artışı ile tribolojik performansın da düştüğü görülmektedir.



BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında, metalik malzemelerin maruz kaldığı aşınma ortamlarında mikro ve nano partikül etkileriyle meydana gelen aşınma hasarları incelenmiştir. Bu sebeple iki ayrı deney seti oluşturulmuştur. İlk deney setinde, mikro partiküllerin aşınmaya olan etkilerinin parametrik olarak incelenmesi, aşınma parametrelerinin niceliksel analizleri ve aşınmayı minimuma indirecek ortam koşullarının belirlenmesi için erozif aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Erozif aşınma deneylerinde sıvı cüruf transfer ünitelerinde kullanılan AISI 1015 ve AISI 304 boru malzemeleri kullanılmıştır. Erozif aşınma deneyleri sulu ortamda çamur erozyon aşınması olarak simüle edilmiştir. Bu kapsamda deney tasarım parametreleri Taguchi kesirli faktöriyel yönteminin L9 ortogonal matrisine göre mikro partiküllerin 3 seviyeli konsantrasyon oranı (ağırlıkça %5, ağırlıkça %15 ve ağırlıkça %25), 3 seviyeli çarpma hızı (265, 397,5 ve 530 rpm) ve 3 seviyeli çarpma açısı olarak belirlenmiştir (30°, 60° ve 90°). Gerçekleştirilen deneyler sonucunda ölçülen ağırlık kaybı ve yüzey pürüzlülüğü değerleri, S/N ve ANOVA kullanılarak analiz edilmiştir. Analizler sonucunda en iyi, orta ve en kötü sonuçları veren parametrelere göre performans testleri yapılmıştır. SEM, EDX ve 3D topografya analizleri ile aşınma bölgeleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. İkinci deney setinde ise nano partiküllerin aşınmaya olan etkilerini incelemek amacıyla, 3 farklı nano katkılı yağ ortamı, 3 farklı konsantrasyon oranı, 3 farklı hedef malzeme (AISI 1015, MgZn Master, AlSi18) belirlenerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda deneylerde kullanılacak olan 2D nano partiküller (Fe_2O_3 , MXene, g- C_3N_4) sentezlenerek elde edilmiş, saf MY, 25 mg katkılı MY ve 50 mg katkılı MY olmak üzere 3 ayrı ortamda ball-on-flat tipi aşınma tezgahında 20 N yük sabit yük, 100 m sabit yol, 10 mm stroke mesafesi koşullarıyla aşınma deneylerine tabi tutulmuşlardır. Aşınma deneyleri esnasında sıcaklık, sürtünme katsayısı değerleri ölçülmüştür. Deneyler sonrasında hacimsel kayıp hesaplanmıştır. Deneyler sonucunda aşınma bölgeleri 2D profilometre, SEM ve EDX analizleriyle

detaylı bir şekilde incelenmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen veriler aşağıda maddelendirilmiştir.

6.1. EROZİF ORTAM AŞINMA DENEYLERİ SONUCU

1. Çalışma kapsamında incelenen her iki malzemenin de erozif aşınma koşullarında, istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar verdiği görülmüştür.
2. Farklı alaşım oranlarına sahip çelik esaslı malzemelerin, erozif aşınma koşullarında yüksek aşınma direnci gösterdiği belirlenmiştir.
3. AISI 304 ve AISI 1015 malzemeleri karşılaştırıldığında, AISI 304 malzemesinin, yüzey pürüzlülüğü ve ağırlık kaybı açısından daha yüksek aşınma direnci gösterdiği tespit edilmiştir.
4. Erozif aşınma testlerinde seçilen parametrelerin, AISI 1015 malzemesinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi sırasıyla, %58,98 konsantrasyon, %25,21 çarpma açısı ve %12,08 çarpma hızı olarak ortaya çıkmıştır. Ağırlık kaybı üzerindeki etkileri ise sırasıyla, %15 konsantrasyon, %70 çarpma hızı ve %12,5 çarpma açısı olarak bulunmuştur.
5. AISI 304 malzemesi için aşınma parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri sırasıyla, %91,89 konsantrasyon, %3,34 çarpma açısı ve %1 çarpma hızı olarak tespit edilmiştir. Ağırlık kaybı üzerindeki etkileri ise sırasıyla %58,97 çarpma hızı, %30,76 konsantrasyon ve %7,69 çarpma açısı olarak bulunmuştur.
6. 90° dik açıda meydana gelen çarpma, yüzeyde çatlak ve çukur oluşumuna sebep olmaktadır. 30° gibi düşük açılar ise partiküllerin abrasif aşınmaya benzer bir mekanizma ile yüzeyi aşındırması şeklinde sonuçlanmaktadır.
7. S/N analizi sonucunda en iyi aşınma parametreleri, ağırlıkça konsantrasyon oranı için %5, çarpma hızı için 265 rpm, çarpma açısı için ise 90° olarak belirlenmiştir. Orta seviyeli aşınma parametreleri, ağırlıkça konsantrasyon oranı için %15, çarpma hızı için 397,5 rpm, çarpma açısı için ise 90° olarak belirlenmiştir. En kötü aşınma parametreleri ise ağırlıkça konsantrasyon oranı için %25, çarpma hızı için 530 rpm, çarpma açısı için ise 30° olarak belirlenmiştir.

8. Yüzey pürüzlülüğü değerini etkileyen temel faktör, konsantrasyon parametresi iken ağırlık kaybını etkileyen en önemli faktör ise çarpma hızı olarak tespit edilmiştir.

6.2. İKİ BOYUTLU NANO PARTİKÜL ORTAMI AŞINMA DENEYLERİ SONUCU

1. Aşınma parametreleri incelendiği zaman AISI 1015 ve MgZn malzemeleri için en düşük hacimsel kaybı, en düşük sürtünme katsayısını, en düşük aşınma iz derinliğini ve en düşük sıcaklık artışını gösteren aşınma ortamının MY + 25 mg nano partikül katkılı ortamlar olduğu belirlenmiştir.
2. AISI 1015 ve MgZn malzemelerinin aşınma sonuçları değerlendirildiğinde, katkı olarak eklenen nano partiküller arasında aşınma direncini arttıran en iyi nano partikülün MXene olduğu tespit edilmiştir.
3. AISI 1015 ve MgZn hedef malzemeleri üzerinde gerçekleştirilen, MY + 25 mg MXene nano partikül katkılı aşınma deneylerinde, MY ortamında gerçekleştirilen aşınma deneylerine kıyasla sürtünme katsayısı değeri sırasıyla %31,03 ve %14,54 oranında düşüş göstermiştir. Hacimsel kayıp değeri ise %32,4 ve %58,82 oranında azalmıştır.
4. Ayrıca deneyler esnasında ölçülen sıcaklık değeri, AISI 1015 ve MgZn malzemeleri için sırasıyla MY ortamında %9,94 ve %7,18 oranında artış gösterirken, MY+ 25 mg MXene nano partikül ortamında gerçekleştirilen aşınma deneyleri esnasında sırasıyla, %6,07 ve %4,41 oranında artış göstermiştir. Bu durum, nano partikül takviyesiyle ortamda oluşan aşınmaya bağlı sıcaklığın uzaklaştırıldığını göstermektedir.
5. AISI 1015 ve MgZn malzemelerinin 2D yüzey profilometre ölçümlerine göre en düşük aşınma iz alanının MXene nano partikül katkılı ortamlarda gerçekleştiği gözlenmiştir.
6. AISI 1015 ve MgZn malzemelerinin SEM ve EDX analizlerine göre nano partikül katkılı ortamlarda daha ince aşınma izlerinin, daha düzgün (kırılma/kopma olmayan) yüzeylerin oluştuğu ve minimal aşınmaların gerçekleştiği gözlenmiştir.

7. Kullanılan hedef malzemelerde ise en düşük aşınma kaybına uğrayan malzeme AlSi alaşımı olmuştur.
8. Nano partikül katkılı aşınma ortamlarının, AlSi alaşımı üzerinde erozif etki gösterdiği, bu sebeple aşınmayı arttırdığı görülmüştür.
9. Sonuç olarak, nano partikül katkıların ağırlıkça düşük konsantrasyonlarda kullanılması, yüksek konsantrasyonlardaki kullanıma kıyasla aşınma davranışı üzerinde daha olumlu etki göstermiştir. Yüksek konsantrasyonda kullanılan nano partiküllerin, topaklanmaya ve yüzeyler arasında üç cisimli aşınma mekanizmasının oluşumuna sebebiyet vermesi, aşınma üzerinde olumsuz etki göstermiştir.



KAYNAKLAR

1. Demirsöz, R., "Granül Cüruf Taşımada Kullanılan Boruların İç Yüzeyinin Aşınma Özelliklerinin İyileştirilmesi", (2018).
2. Gul, M. S., Demirsöz, R., Kabave Kilincarslan, S., Polat, R., and Cetin, M. H., "Effect of Impact Angle and Speed, and Weight Abrasive Concentration on AISI 1015 and 304 Steel Exposed to Erosive Wear", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 1–19 (2024).
3. Çetin, Ö., "Nano-Grafen Oksit Katkılı Motor Yağının Tribolojik Özelliklerinin ve Motor Performansına Etkilerinin İncelenmesi", (2021).
4. Demirsöz, R., Polat, R., Türk, A., and Erdoğan, G., "Yüksek fırın granüle cürufunun sert kaplama uygulanmış ve uygulanmamış çeliklere karşı erozif aşındırma davranışının incelenmesi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 103–113 (2018).
5. Grewal, H. S., Agrawal, A., and Singh, H., "Slurry erosion mechanism of hydroturbine steel: Effect of operating parameters", *Tribology Letters*, 52 (2): 287–303 (2013).
6. Khullar, P., "Evaluation of Erosion Wear of Turbine Steels in Hydropower Plants", (2014).
7. Boggarapu, V., Gujjala, R., and Ojha, S., "A critical review on erosion wear characteristics of polymer matrix composites", *Materials Research Express*, 7: 22002 (2020).
8. Patel, M., Kumar, A., Pardhi, B., and Pal, M., "Erosive and Corrosive Wear in Slurry Pumps-A Review Article", *International Research Journal Of Engineering And Technology*, (2020).
9. Singh, J., Kumar, S., and Gill, H. S., "Review on testing facilities assisting in development of numerical models for erosion calculation in centrifugal slurry pumps", *International Journal On Interactive Design And Manufacturing*, (2023).
10. Ali, S. I. and Ahmad, S. N., "Erosion Behavior of Zn-Ni-Cu and Zn-Ni-Cu-TiB₂ Coated Mild Steel", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 32 (16): 7406–7417 (2022).
11. El-Emam, M. A., Zhou, L., Yasser, E., Bai, L., and Shi, W., "Computational Methods of Erosion Wear in Centrifugal Pump: A State-of-the-Art Review", *Archives Of Computational Methods In Engineering*, 29 (6): 3789–3814 (2022).

12. Singh, J. P., Kumar, S., and Mohapatra, S. K., "Modelling of two phase solid-liquid flow in horizontal pipe using computational fluid dynamics technique", *International Journal Of Hydrogen Energy*, 42 (31): 20133–20137 (2017).
13. Cetin, M. H. and Korkmaz, S., "Investigation of the concentration rate and aggregation behaviour of nano-silver added colloidal suspensions on wear behaviour of metallic materials by using ANOVA method", *Tribology International*, 147: (2020).
14. Silva, S. C., Silva, L. L., Câmara, M. A., Rodrigues, P. C. M., and Abrão, A. M., "The Effect of Heat Treatment on the Performance of Antiwear Steel Coatings Deposited on AISI 1015 Steel Substrates", *Tribology Transactions*, 65 (1): 14–24 (2022).
15. Işık, M. İ., "Alev Sentezi ile Nano-Borik Asit Üretimi", (2009).
16. Taha-Tijerina, J., Peña-Paras, L., Narayanan, T. N., Garza, L., Lapray, C., Gonzalez, J., Palacios, E., Molina, D., García, A., Maldonado, D., and Ajayan, P. M., "Multifunctional nanofluids with 2D nanosheets for thermal and tribological management", *Wear*, 302 (1–2): 1241–1248 (2013).
17. Radhika, P., Sobhan, C. B., and Chakravorti, S., "Improved tribological behavior of lubricating oil dispersed with hybrid nanoparticles of functionalized carbon spheres and graphene nano platelets", *Applied Surface Science*, 540 (P2): 148402 (2021).
18. Abushrenta, H. M. S., Kabave Kilincarslan, S., Korkmaz, Ş., Şirvan, O. C., and Çetin, M. H., "Jelatin ve PVA kaplı nanopartiküller ile EP yağ katkısının tribolojik performanslarının araştırılması", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38 (4): 2213–2230 (2023).
19. Rosenkranz, A., Liu, Y., Yang, L., and Chen, L., "2D nano-materials beyond graphene: from synthesis to tribological studies", *Applied Nanoscience*, 10 (9): 3353–3388 (2020).
20. Sidh, K. N., Jangra, D., and Hirani, H., "An Experimental Investigation of the Tribological Performance and Dispersibility of 2D Nanoparticles as Oil Additives", *Lubricants*, 11 (4): (2023).
21. Marian, M., Berman, D., Rota, A., Jackson, R. L., and Rosenkranz, A., "Layered 2D Nanomaterials to Tailor Friction and Wear in Machine Elements—A Review", *Advanced Materials Interfaces*, 9 (3): (2022).
22. Prashar, G., Vasudev, H., and Thakur, L., "Performance of different coating materials against slurry erosion failure in hydrodynamic turbines: A review", *Engineering Failure Analysis*, 115 (May): 104622 (2020).
23. Kumar, S., Gandhi, B. K., and Mohapatra, S. K., "Performance characteristics of centrifugal slurry pump with multi-sized particulate bottom and fly ash

- mixtures", *Particulate Science And Technology*, 32 (5): 466–476 (2014).
24. Verma, R., Agarwal, V K, Pandey, R K, and Gupta, Piyush, "Erosive wear reduction for safe and reliable pneumatic conveying systems: review and future directions", *Life Cycle Reliability And Safety Engineering*, 7: 193–214 (2018).
 25. Kumar, K., Kumar, S., Tripathi, C. B., Sharma, H., and Prasad, S. B., "Parametric optimization of slurry erosion behaviour of brass", *Materials Today: Proceedings*, 26: 1604–1609 (2020).
 26. Singh, S., Goyal, D. K., Kumar, P., and Bansal, A., "Influence of laser cladding parameters on slurry erosion performance of NiCrSiBC + 50WC claddings", *International Journal Of Refractory Metals And Hard Materials*, 105 (March): 105825 (2022).
 27. Yu, J., Li, H., Yu, Y., Liu, X., Xu, W., Wang, H., and Liu, P., "Numerical investigation of liquid-solid erosion in unbonded flexible pipes", *International Journal Of Pressure Vessels And Piping*, 199 (July): 104743 (2022).
 28. Gietzen, E., Karimi, S., Goel, N., Shirazi, S. A., Keller, M., and Otanicar, T., "Experimental investigation of low velocity and high temperature solid particle impact erosion wear", *Wear*, 506–507 (July): 204441 (2022).
 29. Li, Z., Li, Y., Li, J., Li, F., Lu, H., Du, J., Ran, X., and Zhang, X., "Effect of NiCr content on the solid particle erosion behavior of NiCr-Cr₃C₂ coatings deposited by atmospheric plasma spraying", *Surface And Coatings Technology*, 381 (November 2019): 125144 (2020).
 30. Yu, R., Dong, X., Jing, Z., Fan, M., and Li, Z., "Meshfree modeling of brittle surface erosion by sharp-angled particle impact with Johnson–Holmquist-II(JH-2) model", *Tribology International*, 187 (June): 108710 (2023).
 31. Budur, A. İ. and Gedikli, H., "Ti-6Al-4V Alaşımının Katı Parçacık Erozyon Davranışının Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi", *6th International Symposium On Innovative Technologies In Engineering And Science*, (November): 682–691 (2018).
 32. Cheng, J., Yang, Z., Wang, C., Zhao, L., Chen, M., Wang, J., Li, Y., Xu, Q., Liu, Z., and Xu, H., "Effect of scratches on the damage characteristics of fused silica optics under extremely-high impact load", *International Journal Of Mechanical Sciences*, 219 (September 2021): 107099 (2022).
 33. Thakur, P. A., Khairnar, H. S., Deore, E. R., and More, S. R., "Development of Slurry Jet Erosion Tester to Simulate the Erosion Wear due to Solid-Liquid Mixture", *International Journal Of Novel Research In Engineering And Science*, 2 (1): 14–20 (2015).
 34. Tarodiya, R. and Levy, A., "Surface erosion due to particle-surface interactions - A review", *Powder Technology*, 387: 527–559 (2021).

35. Zhang, X., Li, F., Li, Y., Lu, Q., Li, Z., Lu, H., Ran, X., and Qi, X., "Comparison on multi-angle erosion behavior and mechanism of Cr₃C₂-NiCr coatings sprayed by SPS and HVOF", *Surface And Coatings Technology*, 403 (July): 126366 (2020).
36. Javaheri, V., Porter, D., and Kuokkala, V. T., "Slurry erosion of steel – Review of tests, mechanisms and materials", *Wear*, 408–409: 248–273 (2018).
37. Sadighi, M. and Alderliesten, R., "Impact fatigue, multiple and repeated low-velocity impacts on FRP composites: A review", *Composite Structures*, 297 (May): (2022).
38. Sharma, S. and Gandhi, B. K., "Erosion Wear Behavior of Martensitic Stainless Steel Under the Hydro-Abrasive Condition of Hydropower Plants", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 29 (11): 7544–7554 (2020).
39. More, S. R., Bhatt, D. V., and Menghani, J. V., "Recent Research Status on Erosion Wear - An Overview", *Materials Today: Proceedings*, 4 (2): 257–266 (2017).
40. Lata Sinha, S., Kumar Dewangan, S., and Sharma, A., "A review on particulate slurry erosive wear of industrial materials: In context with pipeline transportation of mineral-slurry", *Particulate Science And Technology*, 35 (1): 103–118 (2017).
41. Bansal, A., Goyal, D. K., Singh, P., Singla, A. K., Gupta, M. K., Bala, N., Kolte, J., and Setia, G., "Erosive wear behaviour of HVOF-sprayed Ni-20Cr₂O₃ coating on pipeline materials", *International Journal Of Refractory Metals And Hard Materials*, 92: (2020).
42. Jindal, C., Sidhu, B. S., Kumar, P., and Sidhu, H. S., "Performance of hardfaced/heat treated materials under solid particle erosion: A systematic literature review", *Materials Today: Proceedings*, 50: 629–639 (2021).
43. Burstein, G. T. and Sasaki, K., "Effect of impact angle on the slurry erosion-corrosion of 304L stainless steel", *Wear*, 240 (1–2): 80–94 (2000).
44. Andrews, N., Giourntas, L., Galloway, A. M., and Pearson, A., "Effect of impact angle on the slurry erosion-corrosion of Stellite 6 and SS316", *Wear*, 320 (1): 143–151 (2014).
45. Elemuren, R., Evitts, R., Oguocha, I., Kennell, G., Gerspacher, R., and Odeshi, A., "Slurry erosion-corrosion of 90° AISI 1018 steel elbow in saturated potash brine containing abrasive silica particles", *Wear*, 410–411 (April): 149–155 (2018).
46. Chauhan, A. K., Goel, D. B., and Prakash, S., "Solid particle erosion behaviour of 13Cr-4Ni and 21Cr-4Ni-N steels", *Journal Of Alloys And Compounds*, 467 (1–2): 459–464 (2009).

47. Altan Özbek, N., Çiçek, A., Gülesin, M., and Özbek, O., "AISI 304 ve AISI 316 Östenitik Paslanmaz Çeliklerin İşlenebilirliğinin Değerlendirilmesi", *El-Cezeri Fen Ve Mühendislik Dergisi*, (November): 42–49 (2015).
48. Zheng, Q., Lee, J., Shen, X., Chen, X., and Kim, J.-K., "Graphene-based wearable piezoresistive physical sensors", *Materials Today*, 36: 158–179 (2020).
49. Peng, X., Peng, L., Wu, C., and Xie, Y., "Two dimensional nanomaterials for flexible supercapacitors", *Chemical Society Reviews*, 43 (10): 3303 (2014).
50. Devi, M., "Application of 2D Nanomaterials as Fluorescent Biosensors", *Adapting 2D Nanomaterials for Advanced Applications*, 117–141 (2020).
51. Dillon, A. D., Ghidui, M. J., Krick, A. L., Griggs, J., May, S. J., Gogotsi, Y., Barsoum, M. W., and Fafarman, A. T., "Highly Conductive Optical Quality Solution-Processed Films of 2D Titanium Carbide", *Advanced Functional Materials*, 26 (23): 4162–4168 (2016).
52. Zheng, Y., Sun, F., Han, X., Xu, J., and Bu, X., "Recent Progress in 2D Metal-Organic Frameworks for Optical Applications", *Advanced Optical Materials*, 8 (13): (2020).
53. Jiang, H., Zheng, L., Liu, Z., and Wang, X., "Two-dimensional materials: From mechanical properties to flexible mechanical sensors", *InfoMat*, 2 (6): 1077–1094 (2020).
54. Carey, M. and Barsoum, M. W., "MXene polymer nanocomposites: a review", *Materials Today Advances*, 9: 100120 (2021).
55. Manu, B. R., Gupta, A., and Jayatissa, A. H., "Tribological properties of 2D materials and composites- A review of recent advances", *Materials*, 14 (7): (2021).
56. Uzoma, P. C., Hu, H., Khadem, M., and Penkov, O. V., "Tribology of 2D nanomaterials: A review", *Coatings*, 10 (9): (2020).
57. Wyatt, B. C., Nemani, S. K., and Anasori, B., "2D transition metal carbides (MXenes) in metal and ceramic matrix composites", *Nano Convergence*, 8 (1): 16 (2021).
58. Zaharin, H. A., Ghazali, M. J., Thachnatharen, N., Ezzah, F., Walvekar, R., and Khalid, M., "Progress in 2D materials based Nanolubricants: A review", *FlatChem*, 38 (October 2022): 100485 (2023).
59. Malaki, M., Jiang, X., Wang, H., Podila, R., Zhang, H., Samorì, P., and Varma, R. S., "MXenes: from past to future perspectives", *Chemical Engineering Journal*, 463: 142351 (2023).

60. Rosenkranz, A., Righi, M. C., Sumant, A. V., Anasori, B., and Mochalin, V. N., "Perspectives of 2D MXene Tribology", *Advanced Materials*, 35 (5): (2023).
61. Marlinda, A. R., Thien, G. S. H., Shahid, M., Ling, T. Y., Hashem, A., Chan, K.-Y., and Johan, M. R., "Graphene as a Lubricant Additive for Reducing Friction and Wear in Its Liquid-Based Form", *Lubricants*, 11 (1): 29 (2023).
62. Tang, G., Su, F., Xu, X., and Chu, P. K., "2D black phosphorus dotted with silver nanoparticles: An excellent lubricant additive for tribological applications", *Chemical Engineering Journal*, 392 (October 2019): 123631 (2020).
63. Matsui, M. and Yamada, A., "RIE 法によりマイクロ加工した Fe_3O_4 磁性電極をもつ $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{BNEuT}$ 複合体薄膜の 構造及び強誘電特性", 41 (C): (2017).
64. Pardue, T. N., Acharya, B., Curtis, C. K., and Krim, J., "A Tribological Study of $\Gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ Nanoparticles in Aqueous Suspension", *Tribology Letters*, 66 (4): 1–13 (2018).
65. Xiang, L., Gao, C., Wang, Y., Pan, Z., and Hu, D., "Tribological and tribochemical properties of magnetite nanoflakes as additives in oil lubricants", *Particuology*, 17: 136–144 (2014).
66. Majeed, F. S. A., Bin Mohd Yusof, N., Azlan Suhaimi, M., Mejid Elsiiti, N., and Norbiha bt A. Aziz, S., "Effect of paraffin oil with XGnP and Fe_2O_3 nanoparticles on tribological properties", *Materials Today: Proceedings*, 27: 1685–1688 (2020).
67. Chhattal, M., Rosenkranz, A., Zaki, S., Ren, K., Ghaffar, A., Gong, Z., and Grützmaier, P. G., "Unveiling the tribological potential of MXenes-current understanding and future perspectives", *Advances In Colloid And Interface Science*, 321 (October): 103021 (2023).
68. Yang, J., Chen, B., Song, H., Tang, H., and Li, C., "Synthesis, characterization, and tribological properties of two-dimensional Ti_3C_2 ", *Crystal Research And Technology*, 49 (11): 926–932 (2014).
69. Zhang, X., Xue, M., Yang, X., Wang, Z., Luo, G., Huang, Z., Sui, X., and Li, C., "Preparation and tribological properties of $\text{Ti}_3\text{C}_2(\text{OH})_2$ nanosheets as additives in base oil", *RSC Advances*, 5 (4): 2762–2767 (2015).
70. Liu, Y., Zhang, X., Dong, S., Ye, Z., and Wei, Y., "Synthesis and tribological property of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ nanosheets", *Journal Of Materials Science*, 52 (4): 2200–2209 (2017).
71. Xue, M., Tang, H., and Li, C. S., "Preparation and tribological behaviour of laminated Ti_3AlC_2 crystals as additive in base oil", *Advances In Applied Ceramics*, 113 (4): 245–250 (2014).

72. Lian, W., Mai, Y., Liu, C., Zhang, L., Li, S., and Jie, X., "Two-dimensional Ti_3C_2 coating as an emerging protective solid-lubricant for tribology", *Ceramics International*, 44 (16): 20154–20162 (2018).
73. Zaharin, H. A., Ghazali, M. J., Khalid, M., Nagarajan, T., Pin, W. W., Ezzah, F., Gerard, O., Walvekar, R., and Rasheed, A. K., "Tribological, Oxidation and Thermal Analysis of Advanced Microwave–Hydrothermal Synthesised $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene as Additives in Outboard Engine Oil", *Lubricants*, 11 (6): (2023).
74. Rosenkranz, A., Grützmacher, P. G., Espinoza, R., Fuenzalida, V. M., Blanco, E., Escalona, N., Gracia, F. J., Villarroel, R., Guo, L., Kang, R., Mücklich, F., Suarez, S., and Zhang, Z., "Multi-layer $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ -nanoparticles (MXenes) as solid lubricants – Role of surface terminations and intercalated water", *Applied Surface Science*, 494: 13–21 (2019).
75. Feng, Q., Deng, F., Li, K., Dou, M., Zou, S., and Huang, F., "Enhancing the tribological performance of Ti_3C_2 MXene modified with tetradecylphosphonic acid", *Colloids And Surfaces A: Physicochemical And Engineering Aspects*, 625: 126903 (2021).
76. Cui, Y., Xue, S., Chen, X., Bai, W., Liu, S., Ye, Q., and Zhou, F., "Fabrication of two-dimensional MXene nanosheets loading Cu nanoparticles as lubricant additives for friction and wear reduction", *Tribology International*, 176: 107934 (2022).
77. Guo, J., Wu, P., Zeng, C., Wu, W., Zhao, X., Liu, G., Zhou, F., and Liu, W., "Fluoropolymer grafted $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene as an efficient lubricant additive for fluorine-containing lubricating oil", *Tribology International*, 170: 107500 (2022).
78. Liu, W., Li, W., Li, R., Lu, Z., Li, D., Zhang, G., and Wu, Z., "Green oil additive g- C_3N_4 : A feasible strategy to enhance the tribological properties of DLC film", *Materials Research Express*, 6 (11): (2019).
79. Zhai, H., Jia, L., Yang, W., Wu, P., He, J., Liu, C., and Jiang, W., "Effect of g- C_3N_4 morphology on its performance as lubricating additive for grease", *Colloids And Surfaces A: Physicochemical And Engineering Aspects*, 660 (October 2022): 130831 (2023).
80. Kumar, A., Thakre, G. D., Arya, P. K., and Jain, A. K., "2D Structured Nano-Sheets of Octadecylamine Grafted Graphitic-Carbon Nitride (g- C_3N_4) as Lubricant Additives", *Macromolecular Symposia*, 376 (1): 1700009 (2017).
81. Zhong, W., Dong, J., Chen, S., and Tong, Z., "The Synergistic Lubrication Effects of h-BN and g- C_3N_4 Nanoparticles as Oil-Based Additives for Steel/Steel Contact", *Materials*, 16 (14): 4979 (2023).
82. Yu, P., Zhang, D., Zhang, L., He, R., Li, G., Myshkin, N. K., and Zhang, G., "Significance of g- C_3N_4 nanosheets for enhancing tribological performance of

- epoxy subjected to starved lubrication", *Tribology International*, 174: 107762 (2022).
83. Zhang, F., Tang, G., Xu, J., and Li, C., "Solvothermal preparation and tribological performance of g-C₃N₄ /TiO₂ hybrids as oil-based lubricant additives", *Micro & Nano Letters*, 14 (13): 1355–1360 (2019).
 84. Wen, G., Wen, X., Cao, H., Bai, P., Meng, Y., Ma, L., and Tian, Y., "Fabrication of Ti₃C₂ MXene and tetradecylphosphonic acid@MXene and their excellent friction-reduction and anti-wear performance as lubricant additives", *Tribology International*, 186: 108590 (2023).
 85. Liu, M., Zhang, Z., Yang, M., Li, P., Wang, Y., He, Y., and Yuan, J., "Novel design of MXene@UiO-66-NH₂ hybrid nanofluids towards promoting the mechanical and tribological performance of fabric composites", *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 161: 107122 (2022).
 86. Shan, Z., Jia, X., Wang, D., Tian, Q., Yang, J., Su, Y., and Song, H., "MXene/PFW@PDA confined by micro/nano cellulose network in PAO based oil to achieve macroscopic super-lubrication of engineered steel surface", *Tribology International*, 187: 108708 (2023).
 87. Liñeira del Río, J. M., Alba, A., Guimarey, M. J. G., Prado, J. I., Amigo, A., and Fernández, J., "Surface tension, wettability and tribological properties of a low viscosity oil using CaCO₃ and CeF₃ nanoparticles as additives", *Journal Of Molecular Liquids*, 391: 123188 (2023).
 88. Nowduru, R., Pant, H., Padya, B., Jain, P. K., and Srikanth, V. V. S. S., "Novel top-down kg-scale processing of 2D multi-layered graphene powder and its application as excellent lubricating additives in commercial engine oils", *Diamond And Related Materials*, 141: 110634 (2024).
 89. Liñeira del Río, J. M., López, E. R., and Fernández, J., "Tribological behavior of electric vehicle transmission oils using Al₂O₃ nanoadditives", *Journal Of Molecular Liquids*, 397: 124036 (2024).
 90. Tang, W., Zhang, Z., Li, C., Liu, H., Li, Y., Zhu, W., and Bai, L., "Tribological performance and lubrication mechanism of carbon nitride nanosheets as novel and high-efficiency additives for water lubrication", *Journal Of Molecular Liquids*, 388: 122721 (2023).
 91. Trivedi, K., Parekh, K., and Upadhyay, R. V., "Nanolubricant: magnetic nanoparticle based", *Materials Research Express*, 4 (11): 114003 (2017).
 92. He, A., Huang, S., Yun, J.-H., Jiang, Z., Stokes, J. R., Jiao, S., Wang, L., and Huang, H., "Tribological Characteristics of Aqueous Graphene Oxide, Graphitic Carbon Nitride, and Their Mixed Suspensions", 66: 42 (2018).
 93. Om Prakash Sondhiya, A. K. G., "Wear Debris Analysis of Automotive Engine

- Lubricating Oil Using By Ferrography Om", *International Journal Of Engineering And Innovative Technology (IJEIT)*, 2 (5): 46–54 (2012).
94. Tiwari, A. and Dubey, S. P., "Analysis of Wear Rate of Internal Combustion Engine Using Ferrography Technique", *International Research Journal Of Engineering And Technology (IRJET)*, 4 (6): 2212–2220 (2017).
 95. Goode, P. D., "Wear mechanisms in ferrous alloys", *Nuclear Instruments And Methods In Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials And Atoms*, 39 (1–4): 521–530 (1989).
 96. Kaplan, M., Klimek, K., Maj, G., Zhuravel, D., Bondar, A., Lemeshchenko-Lagoda, V., Boltianskyi, B., Boltianska, L., Syrotyuk, H., Syrotyuk, S., Konieczny, R., Filipczak, G., Anders, D., Dybek, B., and Wałowski, G., "Method of Evaluation of Materials Wear of Cylinder-Piston Group of Diesel Engines in the Biodiesel Fuel Environment", *Energies*, 15 (9): (2022).
 97. Wu, N., Hu, N., Zhou, G., and Wu, J., "Tribological properties of lubricating oil with micro/nano-scale WS₂ particles", *Journal Of Experimental Nanoscience*, 13 (1): 27–38 (2018).
 98. Paul, G., Hirani, H., Kuila, T., and Murmu, N. C., "Nanolubricants dispersed with graphene and its derivatives: An assessment and review of the tribological performance", *Nanoscale*, 11 (8): 3458–3483 (2019).
 99. Czichos, H., "Introduction to Friction and Wear", *Composite Materials Series*, 1 (C): 1–23 (1986).
 100. Jost, H. P., "Tribology — Origin and future", *Wear*, 136 (1): 1–17 (1990).
 101. Hutchings, I., "Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, 2nd. Ed.", United Kingdom, (2017).
 102. Korkmaz, Ş., "Nanogümüş Katkılı Kolloidal Süspansiyonların Tribolojik Performanslarının Araştırılması", (2019).
 103. Li, S., Yang, X., Kang, Y., Li, Z., and Li, H., "Progress on Current-Carry Friction and Wear: An Overview from Measurements to Mechanism", *Coatings* **2022**, Vol. 12, Page 1345, 12 (9): 1345 (2022).
 104. Bhushan, B., "Contact Mechanics of Rough Surfaces in Tribology: Single Asperity Contact", *Applied Mechanics Reviews*, 49 (5): 275–298 (1996).
 105. Kilincarslan, E., Kabave Kilincarslan, S., and Cetin, M. H., "Evaluation of the clean nano-cutting fluid by considering the tribological performance and cost parameters", *Tribology International*, 157: (2021).
 106. Polat, S., Sun, Y., Çevik, E., Colijn, H., and Turan, M. E., "Investigation of wear and corrosion behavior of graphene nanoplatelet-coated B₄C reinforced Al–Si

- matrix semi-ceramic hybrid composites", *Journal Of Composite Materials*, 53 (25): 3549–3565 (2019).
107. Gangopadhyay, A. and Qureshi, F., "Rear Axle Lubrication", Handbook of Lubrication and Tribology: Volume I Application and Maintenance, Second Edition, 3-1-3–21 (2006).
 108. Bouyer, J., Wodtke, M., and Fillon, M., "Experimental research on a hydrodynamic thrust bearing with hydrostatic lift pockets: Influence of lubrication modes on bearing performance", *Tribology International*, 165: 107253 (2022).
 109. Kabave Kılınçarslan, S., "Polimer Matrisli Kemik Tozu Takviyeli Kompozit Malzemelerin Üretimi, Karakterizasyonu ve Tribolojik Performansının İncelenmesi", *Karabük Üniversitesi*, (2023).
 110. Abud, Z., Ali, A. A., Takhakh, A. M., and Al-Waily, M., "A review of use of nanoparticle additives in lubricants to improve its tribological properties", *Materials Today: Proceedings*, 52 (3): 1442–1450 (2022).
 111. Bartel, D. and Deters, L., "Calculation of a Stribeck curve of a journal bearing", 231–240 (1999).
 112. Bovington, C., Korcek, S., and Sorab, J., "The importance of the stribeck curve in the minimisation of engine friction", Tribology Series, 205–214 (1999).
 113. Patil, H. S., Patel, D. C., and Patil, C. S., "Experimental Analysis of Oil Film Pressure and Temperature on EN31 Alloy Steel Journal Bearing", *American Journal Of Materials Engineering And Technology*, 7 (1): 7–11 (2019).
 114. Na, D. E. C., Hipertensiva, C., and Stachowiak, G. W., "Wear - Materials, Mechanisms and Practice", *John Wiley & Sons, Ltd*, (2005).
 115. Waqas, M., Zahid, R., Usman Bhutta, M., Khan, Z. A., and Saeed, A., "Materials A Review of Friction Performance of Lubricants with Nano Additives", (2021).
 116. Wang, W., Xie, G., and Luo, J., "Black phosphorus as a new lubricant", *Friction*, 6 (1): 116–142 (2018).
 117. Rudnick, L. R., "Lubricant Additives: Chemistry and Applications", *CRC Press Taylor & Francis Group*, (2010).
 118. Onur Can ŞİRVAN, "Kolloidal Süspansiyon Formundaki Ligand Bağlı Nano-Bakırın Tribolojik Performansının İncelenmesi", (2022).
 119. Ahmadpour, A., Bozorgian, A., Eslamimanesh, A., and Mohammadi, A. H., "Photocatalytic treatment of spontaneous effluent of petrochemical effluents by TiO₂ CTAB synthetic nanoparticles", *Desalination And Water Treatment*, 249:

297–308 (2022).

120. Zilabi, S., Shareei, M., Bozorgian, A., Ahmadpour, A., and Ebrahimi, E., "A review on Nanoparticle Application as an Additive in Lubricants", ***Advanced Journal Of Chemistry, Section B***, 4 (3): 209–221 (2022).
121. Shahnazar, S., Bagheri, S., Bee, S., and Hamid, A., "Enhancing lubricant properties by nanoparticle additives", ***International Journal Of Hydrogen Energy***, 41: 3153–3170 (2016).
122. Ealias, A. M. and Saravanakumar, M. P., "A review on the classification, characterisation, synthesis of nanoparticles and their application", ***IOP Conference Series: Materials Science And Engineering***, 263 (3): (2017).
123. Yeeles, A., Sosalla-Bahr, K., Ninete, J., -, A., Moore, R. L., Tiwari, S. K., Panesar, N. K., Mittal, J., Batra, A., Singh, A., and Mohan Sharma, M., "Phytofabrication of nanoparticles through plant as nanofactories", ***Adv. Nat. Sci: Nanosci. Nanotechnol***, 5: 43002 (2014).
124. Mubarik, N., Iqbal, S., Shahmeel, M., Ahad Hussain, A., Razzaq, K., and Nasir Akram, M., "Different Methods, Novel Tools towards the Synthesis of Nanoparticles and Applications in Engineering, Chemical, Physical Sciences and Technology", ***Physical Sciences And Technology. Sch Bull***, 8 (2): 71–74 (2022).
125. Joudeh, N. and Linke, D., "Nanoparticle classification, physicochemical properties, characterization, and applications: a comprehensive review for biologists", ***Joudeh And Linke Journal Of Nanobiotechnology***, 20: 262 (2022).
126. Zheng, Y., Cheng, Y., Wang, Y., and Bao, F., "Synthesis and shape evolution of α -Fe₂O₃ nanophase through two-step oriented aggregation in solvothermal system", ***Journal Of Crystal Growth***, 284 (1–2): 221–225 (2005).
127. Xu, Q., Zhu, B., Jiang, C., Cheng, B., and Yu, J., "Constructing 2D/2D Fe₂O₃/g-C₃N₄ Direct Z-Scheme Photocatalysts with Enhanced H₂ Generation Performance", ***Solar RRL***, 2 (3): 1–10 (2018).
128. Gokul, V., Nair, M., Swapna, S., Ambadas, G., and Sankararaman, S. I., "Development of semiconducting graphitic carbon nitride nanofluid for heat transfer applications: A mode mismatched thermal lens study", ***Diamond & Related Materials Journal***, 138 (110215): 1–9 (2023).
129. Mauter, M. S. and Elimelech, M., "Environmental Applications of Carbon-Based Nanomaterials", ***Environmental Science And Technology***, 42 (16): 5843–5859 (2008).
130. Polat, S. and Mashrah, M., "Synthesis and electrochemical performance of MgFe₂O₄ with g-C₃N₄ on Ni-foam as composite anode material in

- supercapacitors", *Journal Of Materials Science: Materials In Electronics*, 33 (30): 23427–23436 (2022).
131. Thomas, S., Harshita, B. S. P., Mishra, P., and Talegaonkar, S., "Ceramic Nanoparticles: Fabrication Methods and Applications in Drug Delivery", *Current Pharmaceutical Design*, 21 (42): 6165–6188 (2015).
 132. MOREY, G. W., "Hydrothermal Synthesis", *Journal Of The American Ceramic Society*, 36 (9): 279–285 (1953).
 133. Hayashi, H. and Hakuta, Y., "Hydrothermal Synthesis of Metal Oxide Nanoparticles in Supercritical Water", *Materials*, 3: 3794–3817 (2010).
 134. Alshameri, A. W. and Owais, M., "Antibacterial and cytotoxic potency of the plant-mediated synthesis of metallic nanoparticles Ag NPs and ZnO NPs: A review", *OpenNano*, 8: 100077 (2022).
 135. Ghidui, M., Lukatskaya, M. R., Zhao, M.-Q., Gogotsi, Y., and Barsoum, M. W., "Conductive two-dimensional titanium carbide “clay” with high volumetric capacitance", *Nature*, 516: (2014).
 136. Yang, G. and Park, S.-J., "Conventional and Microwave Hydrothermal Synthesis and Application of Functional Materials: A Review", *Materials*, 12 (1177): 1–18 (2019).
 137. Guo, Y., Chen, B., Ren, X., and Wang, F., "Recent Advances in All-Inorganic Zero-Dimensional Metal Halides", *ChemPlusChem*, 86 (12): 1577–1585 (2021).
 138. Gao, T., Duan, P., Zhang, Q., and Yuan, S., "Application of One-Dimensional Nanomaterials in Catalysis at the Single-Molecule and Single-Particle Scale", *Frontiers In Chemistry*, 9: (2021).
 139. Baig, N., "Two-dimensional nanomaterials: A critical review of recent progress, properties, applications, and future directions", *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 165: 107362 (2023).
 140. Zhang, H., Chhowalla, M., and Liu, Z., "2D nanomaterials: graphene and transition metal dichalcogenides", *Chemical Society Reviews*, 47 (9): 3015–3017 (2018).
 141. Kolahalam, L. A., Kasi Viswanath, I. V., Diwakar, B. S., Govindh, B., Reddy, V., and Murthy, Y. L. N., "Review on nanomaterials: Synthesis and applications", *Materials Today: Proceedings*, 18: 2182–2190 (2019).
 142. Berman, D., Erdemir, A., and Sumant, A. V., "Graphene: a new emerging lubricant", *Materials Today*, 17 (1): 31–42 (2014).
 143. Hilton, M. R., Bauer, R., Didziulis, S. V., Dugger, M. T., Keem, J. M., and

- Scholhamer, J., "Structural and tribological studies of MoS₂ solid lubricant films having tailored metal-multilayer nanostructures", *Surface And Coatings Technology*, 53 (1): 13–23 (1992).
144. Ratoi, M., Niste, V. B., Walker, J., and Zekonyte, J., "Mechanism of action of WS₂ lubricant nanoadditives in high-pressure contacts", *Tribology Letters*, 52 (1): 81–91 (2013).
 145. Shi, Q., Tang, H., Zhu, H., Tang, G., Zhang, K., Zhang, H., and Li, C., "Synthesis and Tribological Properties of Ti-Doped NbSe₂ Nanoparticles", *Chalcogenide Letters*, 11 (5): 199–207 (2014).
 146. İŞLEK, D., "Çinko Oksit Nanopartiküllerinin Yeşil Sentezi, Karakterizasyonu, Sitotoksitesi ve Antimikrobiyal Aktivitesi", (2023).
 147. Tartaj, P., Morales, M. P., Gonzalez-Carreño, T., Veintemillas-Verdaguer, S., and Serna, C. J., "The Iron Oxides Strike Back: From Biomedical Applications to Energy Storage Devices and Photoelectrochemical Water Splitting", *Advanced Materials*, 23 (44): 5243–5249 (2011).
 148. Lassoued, A., Lassoued, M. S., Dkhil, B., Ammar, S., and Gadri, A., "Synthesis, photoluminescence and Magnetic properties of iron oxide (α -Fe₂O₃) nanoparticles through precipitation or hydrothermal methods", *Physica E: Low-Dimensional Systems And Nanostructures*, 101 (April): 212–219 (2018).
 149. Jin, C. and Kou, L., "Two-dimensional non-van der Waals magnetic layers: functional materials for potential device applications", *Journal Of Physics D: Applied Physics*, 54 (41): 413001 (2021).
 150. Qu, Q., Yang, S., and Feng, X., "2D Sandwich-like Sheets of Iron Oxide Grown on Graphene as High Energy Anode Material for Supercapacitors", *Advanced Materials*, 23 (46): 5574–5580 (2011).
 151. Peng, Y., Guo, X., Yang, J., Xie, T., Wang, J., Wang, Y., and Liu, S., "Design of a α -Fe₂O₃ /SiC heterojunction to improve photocatalytic performance through a Z-scheme electronic transfer", *Journal Of Dispersion Science And Technology*, 43 (5): 629–638 (2022).
 152. Feng, A., Yu, Y., Wang, Y., Jiang, F., Yu, Y., Mi, L., and Song, L., "Two-dimensional MXene Ti₃C₂ produced by exfoliation of Ti₃AlC₂", *Materials & Design*, 114: 161–166 (2017).
 153. Kumar Kailasa, S., Joshi, D. J., Reddy Koduru, J., and Malek, N. I., "Review on MXenes-based nanomaterials for sustainable opportunities in energy storage, sensing and electrocatalytic reactions", *Journal Of Molecular Liquids Journal*, 342: 117524 (2021).
 154. Miao, X., Li, Z., Liu, S., Wang, J., and Yang, S., "MXenes in tribology: Current status and perspectives", *Advanced Powder Materials*, 2 (2): 100092 (2023).

155. Arole, K., Tajedini, M., Sarmah, A., Athavale, S., Green, M. J., and Liang, H., "Effects of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_z$ MXene nanoparticle additive on fluidic properties and tribological performance", *Journal Of Molecular Liquids*, 386: 122435 (2023).
156. Abdolhosseinzadeh, S., Jiang, X., Zhang, H., Qiu, J., and Zhang, C., "Perspectives on solution processing of two-dimensional MXenes", *Materials Today*, 48: 214–240 (2021).
157. Shahzad, F., Alhabeb, M., Hatter, C. B., Anasori, B., Hong, S. M., Koo, C. M., and Gogotsi, Y., "Electromagnetic interference shielding with 2D transition metal carbides (MXenes)", *Science*, 353 (6304): 1137–1140 (2016).
158. Cao, H., Escamilla, M., Arole, K. D., Holta, D., Lutkenhaus, J. L., Radovic, M., Green, M. J., and Pentzer, E. B., "Flocculation of MXenes and Their Use as 2D Particle Surfactants for Capsule Formation", *Langmuir*, 37 (8): 2649–2657 (2021).
159. Jin, W., Jiang, L., Han, L., Huang, H., Zhang, J., Guo, M., Gu, Y., Zhi, F., Chen, Z., and Yang, G., "Investigation of thermal conductivity enhancement of water-based graphene and graphene/MXene nanofluids", *Journal Of Molecular Liquids*, 367: 120455 (2022).
160. Zhang, H., Wang, L., Chen, Q., Li, P., Zhou, A., Cao, X., and Hu, Q., "Preparation, mechanical and anti-friction performance of MXene/polymer composites", *Materials & Design*, 92: 682–689 (2016).
161. Tahmasebi Sulgani, M. and Karimipour, A., "Improve the thermal conductivity of 10w40-engine oil at various temperature by addition of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ nanoparticles", *Journal Of Molecular Liquids*, 283: 660–666 (2019).
162. Galpaya, G. D. P. C., Induranga, D. K. A., Vithanage, V., Mantilaka, M. M. M. G. G. P., and Koswattage, K. R., "Comparative Study on the Thermal Properties of Engine Oils and Their Nanofluids Incorporating Fullerene-C60, TiO_2 , and Fe_2O_3 at Different Temperatures", *Ssrn*, (2023).
163. Internet: ACS, "ACS Material", <https://www.acsmaterial.com/ti3c2tx-mxene-multilayer-nanoflakes.html> .
164. Bahnemann, D. W., Alaghmandfard, A., and Ghandi, K., "A Comprehensive Review of Graphitic Carbon Nitride (g- C_3N_4)-Metal Oxide-Based Nanocomposites: Potential for Photocatalysis and Sensing", *Nanomaterials*, 12: 294 (2022).
165. Wang, Y., Wang, X., and Antonietti, M., "Polymeric Graphitic Carbon Nitride as a Heterogeneous Organocatalyst: From Photochemistry to Multipurpose Catalysis to Sustainable Chemistry", *Angewandte Chemie International Edition*, 51 (1): 68–89 (2012).
166. Goettmann, F., Fischer, A., Antonietti, M., and Thomas, A., "Metal-free

- catalysis of sustainable Friedel-Crafts reactions: direct activation of benzene by carbon nitrides to avoid the use of metal chlorides and halogenated compounds", *Chemical Communications (Cambridge, England)*, (43): 4530–4532 (2006).
167. Wang, D. F. and Kato, K., "Effect of coating thickness on friction for carbon nitride films in repeated sliding against a spherical diamond with nano-scale asperities", *Wear*, 252 (3–4): 210–219 (2002).
 168. Zhou, F., Wang, X., Adachi, K., and Kato, K., "Influence of normal load and sliding speed on the tribological property of amorphous carbon nitride coatings sliding against Si₃N₄ balls in water", *Surface And Coatings Technology*, 202 (15): 3519–3528 (2008).
 169. Adachi, K. and Kato, K., "Tribology of carbon nitride coatings", *Tribology Of Diamond-Like Carbon Films: Fundamentals And Applications*, 329–361 (2008).
 170. Jiang, L.-L., Wang, Z.-K., Li, M., Zhang, C.-C., Ye, Q.-Q., Hu, K.-H., Lu, D.-Z., Fang, P.-F., Liao, L.-S., "Passivated Perovskite Crystallization via g-C₃N₄ for High-Performance Solar Cells", *Advanced Functional Materials*, 28 (7): (2018).
 171. Ghaemmaghami, M. and Mohammadi, R., "Carbon nitride as a new way to facilitate the next generation of carbon-based supercapacitors", *Sustainable Energy & Fuels*, 3 (9): 2176–2204 (2019).
 172. Zhang, C., Li, Y., Shuai, D., Shen, Y., Xiong, W., and Wang, L., "Graphitic carbon nitride (g-C₃N₄)-based photocatalysts for water disinfection and microbial control: A review", *Chemosphere*, 214: 462–479 (2019).
 173. Weng, G.-M., Xie, Y., Wang, H., Karpovich, C., Lipton, J., Zhu, J., Kong, J., Pfefferle, L. D., and Taylor, A. D., "A Promising Carbon/g-C₃N₄ Composite Negative Electrode for a Long-Life Sodium-Ion Battery", *Angewandte Chemie*, 131 (39): 13865–13871 (2019).
 174. Kavita, Singh, A. K., Shukla, N., Kumar, B., Verma, D. K., Maurya, J. L., Singh, S., and Rastogi, R. B., "Improvement of tribo-active behavior of g-C₃N₄ nanosheets using m-LaVO₄ nanoparticles", *Colloids And Surfaces A: Physicochemical And Engineering Aspects*, 663: 131031 (2023).
 175. Ganjali, M. R., Rahmani, A. R., Shokoohi, R., Farmany, A., and Khazaei, M., "A Highly Sensitive and Selective Electrochemical Mercury(II) Sensor Based on Nanoparticles of Hg(II)-imprinted Polymer and Graphitic Carbon Nitride (g-C₃N₄)", *International Journal Of Electrochemical Science*, 14 (7): 6420–6430 (2019).
 176. Desale, G. R., Gandhi, B. K., and Jain, S. C., "Slurry erosion of ductile materials under normal impact condition", *Wear*, 264 (3–4): 322–330 (2008).

177. Desale, G. R., Paul, C. P., Gandhi, B. K., and Jain, S. C., "Erosion wear behavior of laser clad surfaces of low carbon austenitic steel", ***Wear***, 266 (9–10): 975–987 (2009).
178. Desale, G. R., Gandhi, B. K., and Jain, S. C., "Development of correlations for predicting the slurry erosion of ductile materials", ***Journal Of Tribology***, 133 (3): 1–10 (2011).
179. Kosa, E. and Göksenli, A., "Effect of Impact Angle on Erosive Abrasive Wear of Ductile and Brittle Materials", ***World Academy Of Science, Engineering And Technology, International Journal Of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic And Manufacturing Engineering***, 9 (9): 1566–1570 (2015).
180. More, S. R., Nandre, B. D., and Desale, G. R., "Development of Pot Tester to Simulate the Erosion Wear due to Solid-Liquid Mixture", ***International Journal Of Researchers, Scientists And Developers***, 2 (1): 6–12 (2014).
181. Nandre, B. D. and Desale, G. R., "Study the Effect of Impact Angle on Slurry Erosion Wear of Four Different Ductile Materials", ***Materials Today: Proceedings***, 5 (2): 7561–7570 (2018).
182. Khare, J. M., Dahiya, S., Gangil, B., Ranakoti, L., Sharma, S., Huzaifah, M. R., Ilyas, R. A., Dwivedi, S. P., Chattopadhyaya, S., Kilinc, H. C., and Li, C., .
183. Cetin, M. H., Ozcelik, B., Kuram, E., and Demirbas, E., "Evaluation of vegetable based cutting fluids with extreme pressure and cutting parameters in turning of AISI 304L by Taguchi method", ***Journal Of Cleaner Production***, 19 (17–18): 2049–2056 (2011).
184. Hebbale, A. M., Badiger, R. I., and Gajanan, M. S. S., "An Experimental Investigation of Microwave Developed Nickel - Based Clads for Slurry Erosion Wear Performance Using Taguchi Approach", ***Metallography, Microstructure, And Analysis***, 9 (3): 293–304 (2020).
185. Kumar, K., Kumar, A., and Singh, V., "Optimization of Process Parameters for Erosion Wear in Slurry Pipeline", *Advances in Engineering Design*, ***Springer Singapore***, Singapore, 131–140 (2019).
186. Yadav, M., Kumaraswamidhas, L. A., and Singh, S. K., "Investigation of solid particle erosion behavior of Al-Al₂O₃ and Al-ZrO₂ metal matrix composites fabricated through powder metallurgy technique", ***Tribology International***, 172 (February): 107636 (2022).
187. Mahmood, M., Rasheed, A., Ayman, I., Rasheed, T., Munir, S., Ajmal, S., Agboola, P. O., Warsi, M. F., and Shahid, M., "Synthesis of ultrathin MnO₂nanowire-intercalated 2D-MXenes for high-performance hybrid supercapacitors", ***Energy And Fuels***, 35 (4): 3469–3478 (2021).

188. Polat, S., Sun, Y., and Cevik, E., "Wear behavior of TiB₂/GNPs and B₄C/GNPs reinforced AA6061 matrix composites", *Journal Of Tribology*, 143 (11): (2021).
189. Desale, G. R., Gandhi, B. K., and Jain, S. C., "Effect of erodent properties on erosion wear of ductile type materials", *Wear*, 261 (7–8): 914–921 (2006).
190. Desale, G. R., Gandhi, B. K., and Jain, S. C., "Improvement in the design of a pot tester to simulate erosion wear due to solid-liquid mixture", *Wear*, 259 (1–6): 196–202 (2005).
191. Divakar, M., Agarwal, V. K., and Singh, S. N., "Effect of the material surface hardness on the erosion of AISI 316", *Wear*, 259 (1–6): 110–117 (2005).
192. Saleh, B. and Ahmed, S. M., "Effect of Surface Properties Modification on Slurry Erosion – Corrosion Resistance of AISI 5117 Steel", *Journal Of Tribology*, 137 (3) (031105): 1–8 (2015).
193. Abd-Elrhman, Y. M., Abouel-Kasem, A., Emara, K. M., and Ahmed, S. M., "Effect of impact angle on slurry erosion behavior and mechanisms of carburized AISI 5117 steel", *Journal Of Tribology*, 136 (1): 137–157 (2014).
194. Xu, X., Li, Q., Su, F., Sun, J., and Li, W., "In-situ formation of onion-like carbon film by tribo-induced catalytic degradation of hydrocarbon: Effect of lubrication condition and load", *Chemical Engineering Journal*, 459 (January): 141566 (2023).
195. Purba, R. H., Shimizu, K., Kusumoto, K., Todaka, T., Shirai, M., Hara, H., and Ito, J., "Erosive wear characteristics of high-chromium based multi-component white cast irons", *Tribology International*, 159 (March): 106982 (2021).
196. Pourasiabi, H. and Gates, J. D., "Effects of matrix chromium-to-carbon ratio on high-stress abrasive wear behavior of high chromium white cast irons dual-reinforced by niobium carbides", *Tribology International*, 167: 107350 (2022).
197. Çetin, M. H., Korkmaz, Ş., Elgaddafi, K. A. B., and Çuğ, H., "Östenitik Paslanmaz Çelik ile Düşük Karbonlu Çeliğin Kaynak Edilebilirliğinin Araştırılması", *Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 6: 1068–1081 (2018).
198. Yu, Y., Gu, J., Kang, F., Kong, X., and Mo, W., "Surface restoration induced by lubricant additive of natural minerals", *Applied Surface Science*, 253 (18): 7549–7553 (2007).
199. Higgs, C. F. and Wornyoh, E. Y. A., "An in situ mechanism for self-replenishing powder transfer films: Experiments and modeling", *Wear*, 264 (1–2): 131–138 (2008).

200. Markandan, K., Nagarajan, T., Walvekar, R., Chaudhary, V., and Khalid, M., "Enhanced Tribological Behaviour of Hybrid MoS₂@Ti₃C₂ MXene as an Effective Anti-Friction Additive in Gasoline Engine Oil", **Lubricants**, 11 (47): (2023).
201. Huang, H. D., Tu, J. P., Gan, L. P., and Li, C. Z., "An investigation on tribological properties of graphite nanosheets as oil additive", **Wear**, 261 (2): 140–144 (2006).
202. Thampi, A. D., Prasanth, M. A., Anandu, A. P., Sneha, E., Sasidharan, B., and Rani, S., "The effect of nanoparticle additives on the tribological properties of various lubricating oils – Review", **Materials Today: Proceedings**, 47: 4919–4924 (2021).
203. Wang, Y., Lu, Q., Xie, H., Liu, S., Ye, Q., Zhou, F., and Liu, W., "In-situ formation of nitrogen doped microporous carbon nanospheres derived from polystyrene as lubricant additives for anti-wear and friction reduction", **Friction**, 12 (3): 439–451 (2024).
204. Han, S., Hu, L., Liang, Z., Wageh, S., Al-Ghamdi, A. A., Chen, Y., and Fang, X., "One-Step Hydrothermal Synthesis of 2D Hexagonal Nanoplates of α -Fe₂O₃/Graphene Composites with Enhanced Photocatalytic Activity", **Advanced Functional Materials**, 24 (36): 5719–5727 (2014).
205. Jin, Y., Dang, L., Zhang, H., Song, C., Lu, Q., and Gao, F., "Synthesis of unit-cell-thick α -Fe₂O₃ nanosheets and their transformation to γ -Fe₂O₃ nanosheets with enhanced LIB performances", **Chemical Engineering Journal**, 326: 292–297 (2017).
206. Mbebou, M., Polat, S., and Zengin, H., "Cauliflower-Patterned CuFe₂O₄ Electrode Production from Chalcopyrite for Supercapacitor Sustainable Cauliflower-Patterned CuFe₂O₄ Electrode Production from Chalcopyrite for Supercapacitor Applications", **Applications. Nanomaterials**, 13 (2023).
207. Markandan, K., Nagarajan, T., Walvekar, R., Chaudhary, V., and Khalid, M., "Enhanced Tribological Behaviour of Hybrid MoS₂@Ti₃C₂ MXene as an Effective Anti-Friction Additive in Gasoline Engine Oil", **Lubricants**, 11 (47): (2023).
208. Hong, Y., Shi, J., Shi, W., Fang, Z., Chen, R., and Huang, Y., "A facile and scalable route for synthesizing ultrathin carbon nitride nanosheets with efficient solar hydrogen evolution", **Carbon**, 136: 160–167 (2018).
209. Mashrah, M. and Polat, S., "Hydrothermal synthesis and electrochemical performance of GNPs-doped MgFe₂O₄ electrodes for supercapacitors", **Solid State Ionics**, 391 (December 2022): 116107 (2023).
210. Li, Z., Wang, L., Sun, D., Zhang, Y., Liu, B., Hu, Q., and Zhou, A., "Synthesis and thermal stability of two-dimensional carbide MXene Ti₃C₂", **Materials**

Science And Engineering: B, 191 (C): 33–40 (2015).

211. Shi, H., Zhang, P., Liu, Z., Park, S., Lohe, M. R., Wu, Y., Shaygan Nia, A., Yang, S., Feng, X., Shi, J. H., Zhang, P., Park, S., Lohe, M. R., Nia, A. S., Yang, S., Feng, X., Liu, Z., and Wu, Y., "Ambient-Stable Two-Dimensional Titanium Carbide (MXene) Enabled by Iodine Etching", *Angewandte Chemie International Edition*, 60 (16): 8689–8693 (2021).
212. Polat, S. and Faris, D., "Fabrication of $\text{CuFe}_2\text{O}_4@\text{g-C}_3\text{N}_4@\text{GNPs}$ nanocomposites as anode material for supercapacitor applications", *Ceramics International*, 48 (17): 24609–24618 (2022).
213. Kavita, Singh, A. K., Shukla, N., Kumar, B., Verma, D. K., Lal Maurya, J., Singh, S., and Rastogi, R. B., "Improvement of tribo-active behavior of $\text{g-C}_3\text{N}_4$ nanosheets using m-LaVO_4 nanoparticles", *Colloids And Surfaces A: Physicochemical And Engineering Aspects*, 663: 131031 (2023).
214. Zhong, W., Dong, J., Chen, S., and Tong, Z., "Lubrication Effects of h-BN and $\text{g-C}_3\text{N}_4$ Nanoparticles as Oil-Based The Synergistic Lubrication Effects of h-BN and $\text{g-C}_3\text{N}_4$ Nanoparticles as Oil-Based Additives for Steel/Steel Contact", *Materials*, 16: 4979 (2023).
215. Gao, X., Wang, Y., Li, F., Feng, H., Wang, Y., Che, H., and Zhang, X., "In-situ construction of $\text{Cu}@\text{C}_3\text{N}_4$ for oil lubrication", *Materials Today Communications*, 36: 106812 (2023).
216. Singh, Y., Chaudhary, V., and Pal, V., "Friction and wear characteristics of the castor oil with TiO_2 as an additives", *Materials Today: Proceedings*, 26: 2972–2976 (2019).
217. Jacobson, S., Wallen, P., and Hogmark, S., "Correlation Between Groove Size, Wear Rate and Topography of Abraded Surfaces", *Wear*, 115: 83–93 (1987).
218. Zhu, T., Shipway, P. H., and Sun, W., "The dependence of wear rate on wear scar size in fretting; the role of debris (third body) expulsion from the contact", *Wear*, 440–441: 203081 (2019).
219. Jason, Y. J. J., How, H. G., Teoh, Y. H., and Chuah, H. G., "A study on the tribological performance of nanolubricants", *Processes*, 8 (11): 1–33 (2020).
220. Liñeira Del Río, J. M., Alba, A., Guimarey, M. J. G., Prado, J. I., Amigo, A., and Fernández, J., "Surface tension, wettability and tribological properties of a low viscosity oil using CaCO_3 and CeF_3 nanoparticles as additives", *Journal Of Molecular Liquids*, 391: 123188 (2023).
221. Wu, Y. Y., Tsui, W. C., and Liu, T. C., "Experimental analysis of tribological properties of lubricating oils with nanoparticle additives", *Wear*, 262: 819–825 (2007).

222. Pownraj, C. and Valan Arasu, A., "Effect of Dispersing Single and Hybrid Nanoparticles on Tribological, Thermo-Physical, and Stability Characteristics of Lubricants: A Review", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Springer International Publishing*, 1773–1809 (2021).
223. Thampi, A. D., Prasanth, M. A., Anandu, A. P., Sneha, E., Sasidharan, B., and Rani, S., "The effect of nanoparticle additives on the tribological properties of various lubricating oils-Review", *Materials Today: Proceedings*, 47: 4919–4924 (2021).
224. Sadik Ünlü, B., "Investigation of tribological and mechanical properties of metal bearings", (2009).
225. Sadık Ünlü, B. and Atik, E., "Evaluation of effect of alloy elements in copper based CuSn10 and CuZn30 bearings on tribological and mechanical properties", *Journal Of Alloys And Compounds*, 489: 262–268 (2010).
226. Keerti, S., Gokhale, A., Jain, J., and Huang, E. W., "Influence of Zn Addition on Micro-scale Wear of Mg–xZn (x = 1–6 wt%) Alloys", *Tribology Letters*, 65 (4): 1–7 (2017).
227. An, J., Li, R. G., Lu, Y., Chen, C. M., Xu, Y., Chen, X., and Wang, L. M., "Dry sliding wear behavior of magnesium alloys", *Wear*, 265: 97–104 (2008).
228. Kumar, D., Jain, J., Nitya, and Gosvami, N., "Macroscale to Nanoscale Tribology of Magnesium-Based Alloys: A Review", *Tribology Letters*, 70: 27 (2022).
229. Dienwiebel, M., Poehlmann, K. P., and Scherge, M., "Origins of the wear resistance of AlSi cylinder bore surfaces studies by surface analytical tools", *Tribology International*, 40: 1597–1602 (2007).
230. Chen, M., Perry, T., and Alpas, A. T., "Ultra-mild wear in eutectic Al-Si alloys", *Wear*, 263: 552–561 (2007).
231. Polat, S., Sun, Y., Çevik, E., and Colijn, H., "Microstructure and synergistic reinforcing activity of GNPs-B₄C dual-micro and nano supplements in Al-Si matrix composites", *Journal Of Alloys And Compounds*, 806: 1230–1241 (2019).
232. Singh, R. K., Telang, A., and Das, S., "Microstructure, mechanical properties and two-body abrasive wear behaviour of hypereutectic Al–Si–SiC composite", *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 30: 65–75 (2020).
233. Namakka, M., Rahman, M. R., Anwar, K., Said, M. Bin, Mannan, M. A., and Patwary, A. M., "A review of nanoparticle synthesis methods, classifications, applications, and characterization", *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 20 (100900): (2023).

ÖZGEÇMİŞ

Muhammed Salih GÜL ilk, orta ve lise öğrenimini Ankara’da tamamladı. 2009 yılında Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği (%30 İngilizce) bölümünü kazandı, 2014 yılında mezun oldu. 2015 yılında Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde araştırma görevlisi olarak göreve başladı. 2016-2020 yılları arasında Karabük Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı’nda görev yaptı. 2019 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisansını tamamladı. Halen Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde Mekanik Anabilim Dalı’nda araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.