



**BOR NİTRÜR VE MXENE KATKILI ALÜMİNYUM
7075 MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK VE
TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**2024
DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

Muhammet Mevlüt KARACA

**Tez Danışmanları
Prof. Dr. İsmail ESEN
Do. Dr. Safa POLAT**

**BOR NİTRÜR VE MXENE KATKILI ALÜMİNYUM 7075 MATRİSLİ
KOMPOZİTLERİN MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Muhammet Mevlüt KARACA

**Tez Danışmanları
Prof. Dr. İsmail ESEN
Doç. Dr. Safa POLAT**

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

**KARABÜK
Haziran 2024**

Muhammet Mevlüt KARACA tarafından hazırlanan “BOR NİTRÜR VE MXENE KATKILI ALÜMİNYUM 7075 MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. İsmail ESEN
Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doç. Dr. Safa POLAT
2. Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 28/06/2024

<u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u>	<u>İmzası</u>
Başkan : Prof. Dr. Selami SAĞIROĞLU (KBÜ)
Üye : Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK (KBÜ)
Üye : Doç. Dr. Mehmet Akif KOÇ (SUBU)
Üye : Doç. Dr. Recep KILIÇ (SUBU)
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ali Tahir KARAŞAHİN (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.”

Muhammet Mevlüt KARACA

ÖZET

Doktora Tezi

BOR NİTRÜR VE MXENE KATKILI ALÜMİNYUM 7075 MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK VE TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Muhammet Mevlüt KARACA

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanları:

Prof. Dr. İsmail ESEN

Doç. Dr. Safa POLAT

Haziran 2024, 107 sayfa

Bu çalışmada, alüminyum alaşımlarının düşük sertlik ve yüksek yapışma eğilimi gibi zayıf tribolojik özelliklerini iyileştirmek amacıyla BN ve MXene ($Ti_3C_2T_x$) ile güçlendirilmiş AA7075 matrisli kompozitler geliştirilmiştir. Üretilen kompozitlerin karakterizasyonu yapıldıktan sonra mekanik, tribolojik, korozyon ve işlenebilirlik özellikleri incelenmiştir. İşlenebilirlik testleri, özel tasarlanmış ve üretilmiş bir dinamometre kullanılarak hızlı ve düşük maliyetli bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Kompozit üretimleri, toz metalurjisi yöntemiyle, BN ve MXene takviyeleri hem birlikte hem de ayrı ayrı farklı oranlarda eklenerek gerçekleştirilmiştir. Takviyeler matrise %2 ve %5 oranlarında eklenmiş, ayrıca %2 oranında her iki takviyenin bir araya getirilmesiyle sinerjik bir etki oluşturulmuştur. MXene malzemesi ($Ti_3C_2T_x$), MAX (Ti_3AlC_2) fazından Al tabakasının delaminasyonu ile sentezlenmiştir.

Kompozitlerin karakterizasyonu için yoğunluk ve porozite ölçümleri yapılmış, ardından XRD ve SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Mekanik özelliklerin belirlenmesi için sertlik, basma, aşınma ve delik delme testleri uygulanmıştır. Mekanik testler sonucunda, %5 BN takviyesi ile %174, %5 MXene takviyesi ile %54 ve %2 BN + %2 MXene takviyesi ile %179 sertlik artışı gözlemlenmiştir. Aşınma testlerinde, %5 BN takviyesi spesifik aşınma oranını %48, %5 MXene takviyesi %42 ve her iki takviyenin %2 oranında eklenmesi %34 azaltmıştır. BN numunesinde ağırlıklı olarak adhezif aşınma gözlenirken, MXene numunesinde abrazif aşınma yoğunluğu dikkat çekmiştir. Ayrıca, MXene takviyesinin matriste daha fazla oksidasyon ve deformasyona neden olduğu tespit edilmiştir. Korozyon testlerinde, %5 BN takviyeli numune en yüksek korozyon direncine sahipken, %5 MXene takviyeli numune en düşük korozyon direncini göstermiştir. %2 BN + %2 MXene kombinasyonu ise saf numuneye kıyasla nispeten daha düşük bir korozyon direnci sergilemiştir. Sonuç olarak, BN takviyesinin korozyon direncini artırdığı ve aşınma oranını azalttığı, MXene'nin ise mekanik özelliklere olumlu etkisi olmakla birlikte korozyon direncini azalttığı belirlenmiştir. Bu çalışma, yenilikçi yağlayıcı partikül takviyelerinin alüminyum matrisli kompozitlerin özelliklerine etkilerini anlamada önemli bilgiler sunmaktadır.

Anahtar Sözcükler : AA7075, MXene ($Ti_3C_2T_x$), Boron Nitrür (BN), Metal matrisli kompozit malzemeler, Toz metalurjisi, Aşınma, Sürtünme, Dinamometre, Delme işlenebilirliği, Korozyon

Bilim Kodu : 91417

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

INVESTIGATION OF MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF BORON NITRIDE AND MXENE DOPED ALUMINIUM 7075 MATRIX COMPOSITES

Muhammet Mevlüt KARACA

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisors:

Prof. Dr. İsmail ESEN

Assoc. Prof. Dr. Safa POLAT

June 2024, 107 pages

In this study, AA7075 matrix composites reinforced with BN and MXene ($Ti_3C_2T_x$) were developed to improve the poor tribological properties of aluminum alloys, such as low hardness and high adhesion tendency. The composites were characterized and their mechanical, tribological, corrosion and machinability properties were investigated. The machinability tests were carried out quickly and cost-effectively using a specially designed and manufactured dynamometer. Composite fabrication was carried out by powder metallurgy method, with BN and MXene reinforcements added both together and separately at different ratios. The reinforcements were added to the matrix at 2% and 5%, and a synergistic effect was created by combining both reinforcements at 2%. MXene material ($Ti_3C_2T_x$) was synthesized by delamination of the Al layer from the MAX (Ti_3AlC_2) phase. For the characterization of the

composites, density and porosity measurements were performed, followed by XRD and SEM analyses. Hardness, compression, abrasion and hole drilling tests were performed to determine the mechanical properties. As a result of mechanical tests, 174% hardness increase was observed with 5% BN reinforcement, 54% with 5% MXene reinforcement and 179% with 2% BN + 2% MXene reinforcement. In wear tests, 5% BN reinforcement reduced the specific wear rate by 48%, 5% MXene reinforcement by 42% and 2% addition of both reinforcements by 34%. The BN specimen showed predominantly adhesive wear, while the MXene specimen showed abrasive wear intensity. It was also found that MXene reinforcement caused more oxidation and deformation in the matrix. In corrosion tests, the 5% BN reinforced sample had the highest corrosion resistance, while the 5% MXene reinforced sample showed the lowest corrosion resistance. The combination of 2% BN + 2% MXene exhibited a relatively lower corrosion resistance compared to the pure sample. As a result, it was determined that BN reinforcement increased corrosion resistance and reduced wear rate, while MXene had a positive effect on mechanical properties but decreased corrosion resistance. This study provides important information in understanding the effects of innovative lubricant particle reinforcements on the properties of aluminum matrix composites.

Key Word : AA7075, MXene ($Ti_3C_2T_x$), Boron Nitride (BN), Metal matrix composite materials, Powder metallurgy, Wear, Friction, Dynamometer, Drilling machinability, Corrosion.

Science Code : 91417

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen saygıdeğer Prof. Dr. İsmail ESEN ve Doç. Dr. Safa POLAT hocalarıma en kalbi dileklerimi sunuyorum.

Deneysel çalıőmalarım sırasında desteklerini esirgemeyen tüm MARGEM Laboratuvar çalıőanlarına en içten teőekkürlerimi sunarım.

Bugünlere gelmemde büyük katkıları olan sevgili anneme ve babama, manevi destekleriyle yanımda olan kardeőlerime ve dostlarıma minnettarım.

Bu zorlu süreçte her zaman yanımda olup bana güç ve ilham veren değerli eőim Ayőe Sevde'ye, moral kaynağım sevgili oğlum Halit Erdem'e ve kızım Elif Erva'ya tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	4
GENEL BİLGİLER	4
2.1. ALÜMİNYUM METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER	4
2.1.1. Kullanım Alanları	4
2.1.1.1. Otomotiv Endüstrisi	5
2.1.1.2. Havacılık ve Uzay Endüstrisi.....	8
2.1.1.3. Savunma Sanayisi	9
2.1.1.4. Spor Malzemeleri Endüstrisi.....	10
2.1.2. Üretim Yöntemleri.....	10
2.1.2.1. Sıvı Hal Üretim Yöntemi	11
2.1.2.2. Katı Hal Üretim Yöntemi.....	11
BÖLÜM 3	17
LİTERATÜR ÇALIŞMALARI	18
3.1. LİTERATÜR ÖZETİ	18

	<u>Sayfa</u>
3.1.1. Aşınma Davranışı ve Mekanik Özellikler	18
3.1.2. İşlenebilirlik (Delik Delme) Davranışı	23
3.1.3. Korozyon Özellikler	27
3.2. ÇALIŞMANIN ÖZGÜN HUSUSLARI	34
BÖLÜM 4	36
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	36
4.1. KULLANILAN MALZEMELER.....	36
4.2. KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ.....	37
4.2.1. MXene Üretimi	37
4.2.2. Kompozitlerin Üretim Adımları	38
4.2.3. Mekanik Alaşımlama İşlemleri	40
4.2.4. Soğuk Pres İşlemleri	41
4.2.5. Sinterleme İşlemleri.....	42
4.2.6. Metalografik İşlemler	43
4.3. YAPISAL KARAKTERİZASYONLAR.....	44
4.3.1. Yoğunluk Ölçümü	44
4.3.2. Kristal Yapı Karakterizasyonu	45
4.3.3. Mikro Yapı Karakterizasyonu	46
4.4. MEKANİK TESTLER	47
4.4.1. Sertlik Testi.....	47
4.4.2. Basma Testi	48
4.5. TRİBOLOJİK TESTLER.....	49
4.5.1. Aşınma Testi.....	49
4.5.2. İşlenebilirlik (Delik Delme) Testi.....	50
4.6. KOROZYON TESTLER.....	52
BÖLÜM 5	53
DİNAMOMETRE CİHAZI TASARIMI VE İMALATI.....	53
5.1. DİNAMOMETRE TASARIM SÜRECİ.....	53
5.1.1. CAD Tasarımı ve Çalışma Prensipleri.....	53
5.1.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Kuvvet ve Deformasyon Analizi	58

	<u>Sayfa</u>
5.2. 3D YAZICI TEKNOLOJİSİ İLE İMALAT	60
5.2.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	60
5.2.2. 3D Yazıcı ile Üretim Süreci ve Yazdırma Parametreleri	60
5.3. DİNAMOMETRE MONTAJI VE DOĞRULAMASI.....	62
5.3.1. Bileşenlerin Montajı	62
5.3.2. Doğrulama Testleri	63
BÖLÜM 6	64
DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	64
6.1. KARAKTERİZASYON İŞLEMİ SONUÇLARI	64
6.1.1. Yoğunluk Ölçümleri	64
6.1.2. XRD Ölçümleri.....	65
6.1.3. Mikro Yapı Karakterizasyonu	67
6.2. MEKANİK TESTLERİN SONUÇLARI.....	71
6.2.1. Sertlik Testi Ölçümleri	71
6.2.2. Basma Testi Ölçümleri	72
6.3. TRİBOLOJİK TESTLERİN SONUÇLARI.....	73
6.3.1. Aşınma Test Sonuçları.....	73
6.3.2. Aşınma Mekanizması	78
6.3.2. İşlenebilirlik (Delik Delme) Testi Ölçümleri	86
6.4. KOROZİF TESTLERİN SONUÇLARI	87
BÖLÜM 7	90
SONUÇLAR VE TARTIŞMA	90
KAYNAKLAR	92
ÖZGEÇMİŞ	107

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	AlMMK'lerin farklı alanlardaki uygulamaları [8].	5
Şekil 2.2.	Toz metalurjisi üretim süreçleri.	12
Şekil 2.3.	Mekanik alaşımlamada kullanılan cihazların hareket tipleri a) Spex tipi, b) Gezegen tipi ve c) Atritör tipi.	15
Şekil 2.4.	a) Tek etkili silindir ve b) çift etkili silindir [51].	16
Şekil 3.1.	a) MAX fazının MXene dönüşümü şematik gösterimi, b ve c) bu dönüşümün SEM görüntüsü [59].	20
Şekil 4.1.	SEM görüntüleri ve ortalama tanecik boyutları a) AA7075, b) h-BN ve c) MXene ($Ti_3C_2T_x$) [59].	37
Şekil 4.2.	MXene üretim aşamaları [59].	38
Şekil 4.3.	Numune üretim adımları.	40
Şekil 4.4.	Mekanik alaşımlama işleminde kullanılan a) gezegen bilyalı değirmen, b) karıştırma kabı ve c) paslanmaz çelik bilyeler.	41
Şekil 4.5.	Soğuk presleme işleminde kullanılan a) 100 tonluk pres, b) tek eksenli kalıp ve c) presleme sonrası oluşan sıkıştırılmış (bulk) numune.	42
Şekil 4.6.	Sinterleme işleminde kullanılan a) ısıl işlem fırını, b) silika kum, c) kroze ve d) üretilen numuneler.	43
Şekil 4.7.	Zımparalama ve parlatma cihazı (Struers Tegramin 30).	44
Şekil 4.8.	Arşimet prensibi ile yoğunluk ölçme kiti.	45
Şekil 4.9.	XRD cihazı.	46
Şekil 4.10.	SEM cihazı.	47
Şekil 4.11.	Sertlik ölçüm cihazı.	48
Şekil 4.12.	Basma testi cihazı.	49
Şekil 4.13.	a) Aşınma testi cihazı, b) ileri-geri aşınma (reciprocating) şematik görünüm ve c) aşınmış numune görseli [59].	50
Şekil 4.14.	Özel tasarım delik delme testi cihazının a) genel görünümü, b) CNC'ye sabitlenen gövdesi ve c) örnek delinmiş numune.	51
Şekil 4.15.	Korozyon test düzeneği.	52
Şekil 5.1.	Dinamometrenin bileşenleri.	55
Şekil 5.2.	Dinamometre cihazı çalışma prensibi.	56
Şekil 5.3.	Dinamometre kuvvet bileşenler üzerinde kuvvet dağılımı.	57
Şekil 5.4.	Dinamometre cihazı teknik resim genel ölçüler (mm).	57

Şekil 5.5.	Sistemin a) sınır şartları, b) mesh işlemi; sistemde oluşan maksimum ortalama gerilmeler c) numune tutucusunda (PLA malzemeler arasında), d) F_z yük hücresinde (yük hücreleri arasında); y eksenindeki deformasyonlar e) genel f) F_z yük hücresinde.	59
Şekil 5.6.	3D yazıcı ve dilimleme program arayüzleri a) Creality marka CR6-SE - Cura b) Zortrax M200 - Z-Suite.	61
Şekil 5.7.	Dinamometre cihazının a) genel görünümü, b) gövde kısmı ve c) kontrol ünitesi.	62
Şekil 5.8.	Zwick ve özel tasarım dinamometre test cihazı (IEMM) ile yük hücresinden 10000 g yük değerine kadar alınan kuvvet-süre grafiğinin karşılaştırılması.	63
Şekil 6.1.	Teorik yoğunluk, deneysel yoğunluk ve porozite sonuçları [59].	65
Şekil 6.2.	XRD desen grafikleri (a) MAX-MXene fazlarının, (b) saf bor nitrürün, (c) tüm numunelerin, (d) 5-MXene'nin sabit zamanlı taramasının (fix time scan) ve (e) 5-BN'nin sabit zamanlı taramasının (fix time scan) [59].	66
Şekil 6.3.	Bilyalı öğütme sonrası (a) saf AA7075, (b) 5-BN, (c-d) 5-MXene eklenmiş numunelerin SEM görüntüleri [59].	68
Şekil 6.4.	(a) AA7075, (b) 2-BN, (c) 5-BN katkılı numunelerin SEM görüntüleri ve (d) EDX sonuçları [59].	69
Şekil 6.5.	(a) 2-MXene, (b) 5-MXene, (c) 2-BN + 2-MXene katkılı numunelerin SEM görüntüleri ve (d) EDX sonuçları [59].	70
Şekil 6.6.	Sertlik sonuçları.	71
Şekil 6.7.	(a) Mühendislik gerilme-gerinme grafiği b) nihai gerilme kuvvetleri ve maksimum yükte deformasyon miktarları sütun grafiği.	73
Şekil 6.8.	(a) Aşınma izlerinin 2D yüzey alanları (a) 5 N, (b) 10 N, (c) 20 N ve (d) tüm numunelerin spesifik aşınma oranı [59].	75
Şekil 6.9.	Mesafeye bağlı sürtünme katsayıları (a) 5 N, (b) 10 N, (c) 20 N ve (d) ortalama sürtünme katsayıları [59].	78
Şekil 6.10.	(a) AA7075, (b) 5-BN, (c) 5-MXene, (d) 2-BN + 2-MXene numunelerinin SEM görüntüleri ve aşınma sonrası (e) 5-MXene, (f) 5-BN EDX spektrumları [59].	80
Şekil 6.11.	(a) AA7075, (b) 5-BN, (c) 5-MXene, (d) 2-BN + 2-MXene numunelerini aşındıran bilyelerin SEM görüntüleri ve (e) 5-BN, (f) 5-MXene EDX spektrumları [59].	82
Şekil 6.12.	(a) 5-BN ve (b) 5-MXene numunelerinin aşınma kalıntılarının EDX spektrumları ile birlikte SEM görüntüleri [59].	84
Şekil 6.13.	(a) Ortalama F_z kuvveti, b) ortalama M_z kuvveti, c) cihazdan alınan F_z kuvveti verileri, d) cihazdan alınan M_z kuvveti verileri ve e) örnek delinmiş numune.	87

Sayfa

- Şekil 6.14. Korozyon sonrası makro görüntüler sırasıyla: (a) AA7075, (b) 5-BN, (c) 5-MXene, (d) 2-BN + 2-MXene; korozyon sonrası SEM görüntüler sırasıyla: (a) AA7075, (b) 5-BN, (c) 5-MXene, (d) 2-BN + 2-MXene. 88
- Şekil 6.15. Tafel grafikleri (anodik ve katodik polarizasyon eğrileri)..... 89

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Mekanik alaşımlama sürecinde kullanılan bazı işlem kontrol katkılarının (İKK) erime ve kaynama noktaları [50].	14
Çizelge 4.1. AA7075'in kimyasal bileşimi.	36
Çizelge 4.2. Üretilen kompozitlerin ağırlıkça % bileşen miktarları.....	39
Çizelge 4.3. Mekanik alaşımlama parametreleri.	40
Çizelge 4.4. Soğuk pres parametreleri.	41
Çizelge 4.5. XRD cihazı parametreleri.	45
Çizelge 4.6. Delik delme parametreleri.....	51
Çizelge 5.1. Cihazdaki bileşenler ve görevleri.....	54
Çizelge 5.2. Porima PLA filament teknik veriler [125].	60
Çizelge 5.3. Yazdırma parametreleri.	61
Çizelge 6.1. AA7075 kompozitlerinin tribolojik özelliklerine ilişkin literatür taraması (*SAO: Spesifik Aşınma Oranı).	85
Çizelge 6.2. Kompozitlerin korozyon testi sonuçları.....	87

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

AA2124	: alüminyum alaşımı 2124
AA2219	: alüminyum alaşımı 2219
AA7075	: alüminyum alaşımı 7075
Al	: alüminyum
Al ₃ BC	: alüminyum karbür bor
AlB ₁₂	: alüminyum borür
AlN	: alüminyum nitrür
Al ₂ O ₃	: alüminyum oksit
Al6061	: alüminyum alaşımı 6061
AZ31	: %3,1 çinko ve %1 alüminyum içeren bir magnezyum alaşımı
B	: bor
B ₄ C	: bor karbür
BN	: bor nitrür
C	: karbon
CH ₄	: metan
CO	: karbon monoksit
CO ₂	: karbondioksit
Cr	: krom
Cu	: bakır
Fe	: demir
F	: flor
Gr	: grafen
hBN	: altıgen bor nitrür
HF	: hidroflorik asit
H	: hidrojen
H ₃ BO ₃	: borik asit

H ₂ CO ₃	: karbonik asit
Mg	: magnezyum
Mn	: mangan
M _{n+1} X _n T _x	: MAX fazı
MoS ₂	: molibden disülfür
NaCl	: sodyum klorür
N	: azot
Nb	: niyobyum
Nb ₃ Sn	: niyobyum-kalay alaşım
NbC	: niyobyum karbür
Ni	: nikel
O	: oksijen
OH	: hidroksil
PPy	: polypyrrole
Si	: silisyum
SiC	: silisyum karbür
SiCp	: silisyum karbür partikülleri
TaC	: tantal karbür
Ti	: titanyum
Ti ₃ AlC ₂	: titanyum alüminyum karbür
TiB ₂	: titanyum diborür
TiC	: titanyum karbür
TiO ₂	: titanyum dioksit
TiN	: titanyum nitrür
WS ₂	: tungsten disülfür
V	: vanadyum
ZK61	: %6 çinko ve %1,1 mangan içeren bir magnezyum alaşımı
Zn	: çinko
ZrB ₂	: zirkonyum diborür
Ø _{dış}	: iç çap
Ø _{iç}	: dış çap
σ _y	: akma mukavemeti
γ-GPS	: γ-glipeidoksipropil (C ₉ H ₂₀ O ₄ Si)

μm	: mikrometre
μA	: mikroamper
ρ_{su}	: saf suyun yoğunluğu
$\rho_{\text{gerçek}}$: numunelerin gerçek yoğunluğu
ε	: gerilme (strain)
2D	: 2 boyutlu
3D	: 3 boyutlu
ağ.	: ağırlıkça
cm	: santimetre
dev	: devir
dk	: dakika
E_{corr}	: korozyon potansiyeli
F_{N}	: uygulanan yük
F_z	: kuvvet (z yönünde)
g	: gram
GPa	: gigapascal
h	: yükseklik
Hz	: hertz
I_{corr}	: korozyon akım yoğunluğu
kJ	: kilojoule
kgf	: kilogram kuvveti
km	: kilometre
l	: uzunluk
m	: metre
M30	: metrik 30
mA	: miliamper
m_{hava}	: numunenin havada ölçülen ağırlığı
ms	: milisaniye
m_{su}	: numunenin suda ölçülen ağırlığı
MHz	: megahertz
mm	: milimetre
MPa	: megapaskal
M_z	: moment (z yönünde)

pH	: asidik/bazik denge
rpm	: dakikadaki devir sayısı
sn	: saniye
V	: volt
W_r	: aşınma hızı

KISALTMALAR

ABS	: Akrilonitril Bütadien Stiren
AISI	: American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)
AlMMK	: Alüminyum Matris Kompozitler
ANOVA	: Analysis of Variance (Varyans Analizi)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu)
ASA	: Akrilonitril Stiren Akrilonitril
CFRP	: Carbon Fiber Reinforced Polymer (Karbon Fiber Takviyeli Polimer)
CNC	: Computer Numerical Control (Bilgisayarlı Sayısal Kontrol)
CNF	: Cellulose Nanofibers (Selüloz Nanofiberler)
COF	: Coefficient of Friction (Sürtünme Katsayısı)
CYS	: Compressive Yield Strength (Basma Akma Dayanımı)
DSC	: Direct Squeeze Casting (Doğrudan Sıkıştırma Dökümü)
EDS	: Energy Dispersive Spectrometry (Enerji Dağılım Spektroskopisi)
EDX	: Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (Enerji Dağılım X-Işını Spektroskopisi)
f-BNNS	: Functionalized Boron Nitride Nanosheet (Fonksiyonelleştirilmiş Boron Nitrid Nano Plakaları)
FT	: Fix Time
FSW	: Friction Stir Welding (Friksiyon Kaynağı)
HV	: Hardness Vickers (Vickers Sertlik Testi)
ISO	: International Organization for Standardization (Uluslararası Standardizasyon Örgütü)
ISC	: Indirect Squeeze Casting (Dolaylı Sıkıştırma Dökümü)
JCPDS	: Joint Committee on Powder Diffraction Standards (Toz Kırınım Standartları Ortak Komitesi)
LDH	: Layered Double Hydroxides (Katmanlı Çift Hidroksitler)
MA	: Mekanik Alaşımlama
MCU	: Microcontroller Unit (Mikrodenetleyici Ünitesi)
PEI	: Polyetherimide (Polieterimid)
PLA	: Polilaktik Asit

PMMA	: Polimetil Metakrilat
PU	: Poliüretan
PVA	: Polivinil Alkol
SAO	: Spesifik Aşınma Oranı
SEM	: Scanning Electron Microscope (Tarama Elektron Mikroskobu)
SPS	: Spark Plasma Sintering (Kıvılcım Plazma Sinterleme)
TM	: Toz Metalurjisi
TPU	: Termoplastik Poliüretan
UART	: Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (Evrensel Asenkron Alıcı Verici)
UHMWPE	: Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene (Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen)
UV	: Ultraviolet (Ultraviyole Işıklar)
WPU	: Water-Based Polyurethane (Su Bazlı Poliüretan)
XRD	: X-ray Diffraction (X-Işını Kırınımı)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Alüminyum alaşımları, üstün mekanik özellikleri ve hafiflikleri nedeniyle havacılık, otomotiv, inşaat ve denizcilik gibi birçok endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. AA7075 alüminyum alaşımı, yüksek mukavemet ve sertlik değerleriyle özellikle tercih edilen bir malzeme olmasına rağmen, zayıf tribolojik özellikleri ve korozyon direnci gibi bazı dezavantajlara sahiptir. Bu dezavantajlar, yüksek performans gerektiren uygulamalarda sınırlayıcı faktörler olabilmektedir.

Literatürde, kendiliğinden yağlayıcı katkı maddelerinin alüminyum matris kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini geliştirdiğine dair çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Kendiliğinden yağlayıcı katkı maddeleri, alüminyum matris kompozitlerinin mekanik ve tribolojik özelliklerini geliştirmede önemli rol oynar. Bu kompozitlerin tribolojik performansı, yağlayıcı parçacıklar ile matris arasındaki arayüz bağlanma mukavemeti, hacim oranı, mekansal dağılım ve yağlayıcı parçacıkların boyutu gibi faktörlerden etkilenir [1]. Çalışmalar, grafen, hekzagonal bor nitrür ve grafit gibi katı yağlayıcıların alüminyum matris kompozitlerine dahil edilmesinin tribolojik davranışta iyileşmeye yol açabileceğini göstermiştir [2–4]. Bunun yanı sıra, WS_2 ve Ti_3SiC_2 gibi birden fazla katı yağlayıcının sinerjik etkileri, alüminyum matris kompozitlerinin tribolojik özelliklerini iyileştirmede faydalı olmuştur [5]. Son zamanlarda geliştirilen en yaygın yeni nesil iki boyutlu bileşenler ise MXene yapılarıdır. MXene yapıları, MAX fazından ayrıştırılarak elde edilen yeni bir 2D malzeme ailesidir ve genellikle Ti_3AlC_2 formunda bulunur [6]. Yüksek elastisite modülüne sahip olan MXene, polimerlerin termal ve elektriksel özelliklerini iyileştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, MXene'nin metal matrisli kompozitlerde takviye malzemesi olarak kullanımı, mekanik dayanımı önemli ölçüde artırabilir, örneğin Hu ve arkadaşlarının çalışmasında %3 MXene eklenmesiyle alüminyum kompozitlerde gözlemlenen iyileşmeler bunu desteklemektedir [7].

Özetle, grafen, hekzagonal bor nitrür, grafit ve çeşitli katı yağlayıcılar gibi kendi kendini yağlayan katkı maddelerinin eklenmesi, alüminyum matris kompozitlerinin mekanik ve tribolojik özelliklerini önemli ölçüde artırabilir, arayüz bağlanmasını iyileştirir, sürtünmeyi ve aşınmayı azaltır ve daha verimli ve dayanıklı kompozit malzemelere yol açar. MXene'nin kompozitlere katılmasıyla ilgili olarak mekanik özellikler, aşınma direnci, işlenebilirlik ve korozyon gibi konularda daha fazla araştırmaya ihtiyaç bulunmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, AA7075 alüminyum alaşımının tribolojik ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için bor nitrür (BN) ve MXene takviyelerinin etkilerini araştırmaktır. Ayrıca, özel tasarlanmış ve üretilmiş bir dinamometre kullanarak bu kompozitlerin işlenebilirlik (delik delme) davranışlarını hızlı ve düşük maliyetli bir şekilde incelemektir.

Bu çalışmada, BN ve MXene ile takviye edilmiş AA7075 kompozitlerinin sertlik, porozite, yoğunluk, aşınma davranışı, işlenebilirlik ve korozyon direnci gibi özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmada gerçekleştirilen hedefler şunlardır:

- Toz metalurjisi yöntemi ile kompozitlerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada, takviye olarak kullanılacak MXene ($Ti_3C_2T_x$) bileşeninin eldesi için MAX fazının temini ve HF ile etching işlemi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, MXene ve bor nitrür takviyeli kompozitlerin hem birlikte hem de ayrı ayrı üretimi yapılmıştır.
- Karakterizasyon işlemleri kapsamında, MAX fazının MXene'ye dönüştürülmesinin XRD ile karakterizasyonu yapılmıştır. Mekanik alaşımlama sonrası MXene ve bor nitrür toz karışımlarının XRD analizleri gerçekleştirilmiş ve üretilen kompozitlerin XRD ile faz analizi yapılmıştır. Ayrıca, üretilen kompozitlerin SEM ile mikroyapı incelemesi yapılmıştır.

- Üretimi tamamlanan kompozitlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi aşamasında, yoğunluk ölçümü, sertlik ölçümü, basma deneyleri ve aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir.
- Delik delme test düzeneğinin kurulması ve testlerin gerçekleştirilmesi aşamasında ise, sistemin bilgisayar destekli çizim ortamında (CAD) Solidworks programı kullanılarak katı modellenmesi yapılmıştır. Sistemi oluşturan parçaların uygun filament ve yazdırma parametreleri seçilerek 3D yazıcıdan çıktı alınmış ve çıktısı alınan parçaların birbiriyle uyum içerisinde çalışacak şekilde montajlanması sağlanmıştır. Tasarım ve üretimi tamamlanan test cihazından üretilmiş olan kompozitlerin delik delme davranışları incelenmiştir.

Bu çalışmanın bulguları, AA7075 alüminyum alaşımının bor nitrür (BN) ve MXene takviyeleri ile geliştirilmesinin, malzemenin tribolojik ve mekanik özelliklerinde belirgin iyileşmeler sağlayabileceğini göstermiştir.

BÖLÜM 2

GENEL BİLGİLER

Bu bölümde, alüminyum matrisli kompozit malzemelerin kullanım alanları ve üretim tekniklerine dair genel bilgiler sunulacaktır.

2.1. ALÜMİNYUM METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER

Alüminyum metal matrisli kompozitler (AIMMK), alüminyum alaşımlarının matris malzemesi olarak kullanıldığı ve genellikle seramik veya diğer metalik parçacıklar, lifler veya tozlar gibi takviye malzemeleri ile güçlendirildiği kompozit malzemelerdir. Bu kompozitler, alüminyumun hafifliği ve dayanıklılığı ile takviye malzemelerinin yüksek mukavemet, sertlik, termal ve mekanik özelliklerini birleştirerek üstün performans özellikleri gösterir.

2.1.1. Kullanım Alanları

Üreticilerin genellikle hafif, orta mukavemetli ve uygun maliyetli malzemelere ihtiyaç duyması bağlamında, AIMMK'ler önemli bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. AIMMK'ler, mühendislik uygulamalarında yeni nesil malzemeler olarak görülmektedir. Çünkü çeşitli takviye malzemeleri kullanılarak istenilen özelliklere sahip kompozitler üretmek mümkündür. Hafif olmalarına rağmen yüksek mekanik dayanıklılık ve aşınma direnci sunan bu malzemeler, özellikle havacılık, mekanik, elektrik, otomotiv, elektronik ve ulaşım endüstrilerinde kullanılmaktadır (Şekil 2.1) [8].



Şekil 2.1. AlMMK'lerin farklı alanlardaki uygulamaları [8].

2.1.1.1. Otomotiv Endüstrisi

Otomotiv sektörü, günümüzde metal matrisli kompozitlerin (MMK'ler) çoğunu özellikle motor parçaları, pistonlar, bağlantı çubukları ve piston pimleri gibi uygulamalar için alüminyum ve alüminyum alaşımlarıyla kullanmaktadır. Titanyum ve magnezyum gibi diğer hafif malzemelerle karşılaştırıldığında, alüminyumun yaygın olarak kullanılmasının temel nedeni hafif ve düşük maliyetli olmasıdır [8].

Şasi bileşenleri, otomobil tasarımında malzeme seçiminde kritik bir rol oynamaktadır. Alüminyum, çeliğin yerine kullanıldığında %50'ye varan ağırlık tasarrufu sağlar ve bu, toplam araç ağırlığında %20-30 oranında bir azalma anlamına gelir. Honda NSX'in gövde yapısında ve dış panellerinde 210 kg, şasi bileşenlerinde yaklaşık 100 kg ve güç aktarma organları ile diğer bileşenlerde 130 kg alüminyum kullanılmıştır. Ayrıca, Renault ve Lotus, çelik otomobillere kıyasla %30-50 daha hafif olan Spider modelini üretmiştir. Jaguar XJ 220 ve GM-EV1 gibi araçlar da alüminyumun avantajlarından yararlanan diğer örneklerdir [9,10].

Silindir kapakları, yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında çalışmaları için yüksek aşınma direnci ve yorulma dayanımı gerektirir. Geleneksel dökme demir silindir kapakları, alüminyum alaşımlarına göre iki kat daha ağırdır ve ısı iletkenliği zayıftır. Bu nedenle, motorun ağırlığını artırarak daha karmaşık soğutma çözümleri gerektirir.

Bu sorunu aşmak için, %12 Al₂O₃ ve %9 karbon içeren hipereutektik alüminyum-silikon (Al-Si) kompozitleri kullanılmıştır. Bu kompozitler, Honda Prelude modelinde 1990 yılında ilk kez uygulanmış ve bu uygulama, dökme demire kıyasla %50 ağırlık tasarrufu sağlamış ve motorun ısıl performansını artırmıştır [11]. Günümüzde, General Motors, Porsche, Audi, Mercedes-Benz, Volkswagen ve BMW gibi üreticiler bu kompozitleri kullanmaktadır. Ayrıca, Toyota Celica 2000 modelinde MMK silindir kapakları, grafit takviyeli alüminyum alaşımlarının ise sürtünme katsayısını düşürdüğü ve aşınmayı azalttığı görülmüştür [12]. Al-Mg veya Al-Si alaşımları, genellikle %30 SiC veya Al₂O₃ ile takviye edilerek kullanılır ve Porsche 911, Boxster, Toyota Celica ve Honda Prelude gibi araçlarda uygulanmaktadır [13]. Bu kompozitlerin kullanımı motorun ağırlığını %20 oranında azaltma potansiyeline sahiptir [12].

Pistonlar, motor içindeki dinamik, sıcak ve mekanik koşullarda yüksek performans gerektiren bileşenlerdir. Piston ve silindir, motorun iç kısmında yüksek mekanik basınç ve termal stres koşullarına dayanmalıdır. Silindirin, hazne içinde yüksek uyum sağlayarak aşırı yanma koşullarına karşı dayanıklı olması gerekir. AIMMK'ler, düşük termal genleşme katsayısı sayesinde hazne bölücü ile silindir arasındaki boşlukları daha iyi kontrol ederek aşınmayı ve deformasyonu azaltır. Alüminyum-silikon (Al-Si) kompozitleri, düşük termal genleşme katsayısı ve yüksek termal iletkenlik gibi özellikleri nedeniyle bu uygulamalar için uygun bir malzeme seçeneği sunar. 1983 yılında Toyota'nın Japonya'da güçlendirilmiş alüminyum silindirleri üretmeye başlaması, bu teknolojinin seri üretim uygulamalarının bir örneğidir [12].

Egzoz valfleri, motorlarda hava-yakıt karışımını silindirlere yönlendirirken ve egzoz gazlarını dışarı atarken yaklaşık 50 Hz frekansta döngüsel mekanik yüklemelere maruz kalır ve 900°C'ye kadar çıkan gaz sıcaklıklarına dayanacak şekilde tasarlanmalıdır [14,15]. Bu komponentler, ayrıca valf kontrolünde kayma aşınmasına karşı yüksek direnç göstermeli ve maksimum basınç bölgelerinde etkili bir şekilde çalışmalıdır. Sürme çubukları, kam milinden valflere hareket ileterek yüksek devirli motorlarda performans sağlamak amacıyla özel malzemelerle üretilir; bu bağlamda, AIMMK'ler, geleneksel 4340 çeliğinden %25 daha yüksek eğilme sertliği ve iki kat daha fazla titreşim sönümlenme kapasitesi sunar. AIMMK malzemedan üretilen itici çubukları (push rod), motor hızını 250 ila 400 rpm artırabilir ve yay ömrünü %600 oranında

uzatılabilir. AlMMK'lerin yüksek performanslı motor uygulamalarında ideal malzemeler olduğu, 3M tarafından ilk kez üretilmiş ve OHV yarış motorlarında kullanılmıştır, bu da AlMMK'lerin motor bileşenlerinde uzun ömürlü ve yüksek performanslı çözümler sunduğunu göstermektedir [16].

Biyel kolları, içten yanmalı motorlarda silindirler ile krank milleri arasındaki enerjiyi ileterek motorun çalışma mekanizmasında kritik bir rol oynar. Biyel kolları, hem basınç hem de gerilme yüklerine maruz kaldığı için hafif ve yüksek performanslı olmaları gerekir. Geleneksel malzemelerle karşılaştırıldığında, alüminyum bazlı kompozitler, SiC (Nissan) veya Al₂O₃ (Dupont, Chrysler) gibi takviyelerle güçlendirilerek biyel kollarında %57 oranında ağırlık azalması sağlar [17]. Bu ağırlık azaltımı, motorun genel gürültü, titreşim ve sertliğini azaltarak daha iyi bir motor performansı sağlar ve yakıt verimliliğini iyileştirir. Ayrıca, hafif biyel kolları krank milinin ve yataklarının üzerindeki yükü azaltarak temas kayıplarını düşürür ve motorun verimliliğini artırır. Son yıllarda, grafit takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin, toz metalurji ve döküm yöntemleriyle üretilen biyel kollarında kullanımıyla yakıt tüketiminin azaltılması ve motor gücünün artırılması hedeflenmektedir [12].

Kardan milleri, yüksek özgül sertlikleri sayesinde AlMMK'ler kullanılarak tasarımında önemli iyileştirmeler sağlanmaktadır. Kardan millerinin temel titreşim hızı, milin uzunluğu, iç ve dış çapı ile özgül sertlik gibi parametrelere bağlıdır ve yüksek dönüş hızlarında dengesizlik sorunlarına neden olabilir. Al6061 alaşımı, Al₂O₃ seramik malzemesi ile güçlendirilerek Kardan millerinin üretiminde kullanılmaktadır. Bu kompozit malzemelerin kullanımı, millerin performansını ve dayanıklılığını artırma amacı taşır. 1997 yılında Chevrolet S-10 ve GMC Sonoma modellerinde, Al6061-Al₂O₃ kompozitlerinden üretilmiş Kardan milleri uygulanmış ve bu uygulama yeni bir teknolojik adım olarak değerlendirilmiştir [12].

Fren diskleri ve kampanaları üretiminde, AlMMK'ler, yüksek aşınma direnci ve yüksek ısı iletkenliği gibi avantajlı özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir; örneğin, Al-Mg ve Al-Si kompozitleri, sert seramik malzemelerle takviye edilerek bu fren bileşenlerinin üretiminde kullanılmaktadır [13]. Sürekli takviyeli AlMMK'ler,

Volkswagen Lupo 3L ve Audi A2'nin fren disklerinde uygulanmakta olup, hibrit ve elektrikli araçlarda da AlMMK'lerden yapılmış fren sistemleri kullanılmaktadır; Toyota RAV4, Ford Escape ve General Motors EV1 gibi modellerde bu teknolojilerden faydalanılmaktadır [18]. Almanya'daki yüksek hızlı trenler, InterCity Express'te kesintisiz takviyeli AlMMK fren diskleri kullanılarak yüksek performans sağlanmakta [19] ve AlMMK'ler (Al 2124/SiC/25p) ise özellikle yarış otomobillerinin fren sistemlerinde, örneğin Porsche 911'de kullanılmaktadır [20]. AlMMKler, hafif ağırlıkları, yüksek aşınma direnci ve üstün ısı iletkenliği özellikleri sayesinde otomotiv endüstrisinde önemli bir yenilik sunmakta ve uzun hizmet ömrü sağlamaktadır; bu nedenle VW Lupo, Toyota RAV4 EV, Dodge Prowler, GM EV1 gibi modeller ve diğer yarış otomobillerinde AlMMKler tercih edilmektedir [21].

2.1.1.2. Havacılık ve Uzay Endüstrisi

Havacılık ve uzay endüstrilerinde, AlMMK'ler önemli bir rol oynamaktadır. Bu kompozitler, uzay araçları gibi zorlu koşullara dayanabilme yetenekleri sayesinde tercih edilmektedir. Özellikle düşük termal genleşme katsayısı, yüksek boyutsal kararlılık, iyi özgül sertlik ve hafiflik gibi avantajlar sunarlar. AlMMK'ler, uçakların kanatları, dümenleri, gövdeleri, motorlardaki fan çıkış kılavuzları gibi çeşitli bileşenlerin yanı sıra uydu yapılarında da kullanılmaktadır. Bu malzemeler, Lockheed-Martin gibi önde gelen şirketler tarafından askeri uçaklarda ilk kez kullanılmış ve endüstriyel uygulamalarda geniş bir kullanım alanı bulmuştur [8]. Örneğin, F-16 savaş uçağının yakıt deposundaki kapı kısmı ve kanatçıkları AlMMK'lerden üretilmiştir. Aynı şekilde, Eurocopter EC 120 ve N4 helikopterlerinin rotor kanatları ile alt ve üst eğik plakaları da bu malzemedен yapılmıştır [22]. Uçak motorlarında, yüksek sıcaklık mukavemeti, sürünme direnci ve sertliği artırmak amacıyla Nextel/Al, Cu-Nb ve Cu-Nb₃Sn gibi MMK'lar kullanılmaktadır. Uçak gövdesinde ise B/Al MMK'lar, mukavemeti ve sertliği artırmak için kullanılmaktadır. Uzay uygulamalarında, uydularda daha düşük termal genleşme katsayısı, daha yüksek sertlik ve yüksek sıcaklık mukavemeti elde etmek için B/Al MMK'lar kullanılmaktadır. Uzay tabanlı Stratejik Savunma sistemleri, daha yüksek termal iletkenlik ve sıcaklık mukavemeti sağladığı için Gr/Al MMK'ları kullanmaktadır. Ayrıca, uzay panelleri, yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet ve düşük yoğunluk sağladığı için Gr/Al ve SiCp/Al

MMK'larını kullanmaktadır [23]. Bu uygulamalar, MMK'ların havacılık bileşenlerinin performansını ve güvenilirliğini artırmada kritik rol oynadığını ve hem uçak hem de uzay sektörlerinde ilerlemelere katkıda bulunduğunu göstermektedir.

2.1.1.3. Savunma Sanayisi

Savunma ve askeri uygulamalarda kullanılan AlMMK'ler, yüksek mukavemet, sertlik, aşınma direnci ve korozyon direnci gibi üstün mekanik özellikler sunar [24–26]. Alüminyum alaşımları alüminyum oksit, silisyum karbür, karbon nanotüpler ve grafen gibi malzemelerle güçlendirilerek tanklar, savaş uçakları ve roketlerdeki kritik bileşenler için ideal hale getirilir [27–29]. Örneğin, AA2219 alüminyum alaşımlı matris kompozitleri, havacılık uygulamalarında kriyojenik roket yakıt tankları ve hafif yapılar gibi geniş bir yelpazede kullanılır [30].

AlMMK'lerin havacılıkta kullanımı, roket iticileri ve uçak motorları gibi kritik bileşenlerde hayati bir rol oynamaktadır [31]. Ayrıca, bor ve alüminyum gibi katkı maddelerinin katı roket iticilerine dahil edilmesi, roket itki gücünün artmasına yardımcı olur [32]. Hibrit alüminyum matris kompozitlerinin geliştirilmesi ise grafit, silisyum karbür ve potasyum feldispat gibi malzemelerin kombinasyonunu içerir ve tanklar, uçak bileşenleri gibi çeşitli uygulamalarda aşınma direncini ve mekanik özellikleri artırmayı hedefler [29,33,34].

AlMMK'lerin üretim süreçleri ve karakterizasyonu, zorlu ortamlarda optimal performans sağlamak için kritik öneme sahiptir. Araştırmalar, bu kompozitlerin özelliklerini belirli uygulamalara göre optimize etmek için karıştırma parametrelerini, ısıl işlemleri ve takviye tekniklerini iyileştirmeye odaklanmıştır [35]. Ayrıca, farklı kompozit malzemelerin değerlendirilmesi ve fiber yüzey yapılarının AlMMK'lerdeki arayüz bağları üzerindeki etkisi, genel performanslarının artırılmasına katkıda bulunur [29].

Sonuç olarak, Alüminyum Matris Kompozitlerinin tanklar, savaş uçakları ve roket bileşenlerindeki kullanımı, araştırma ve yenilikçi üretim teknikleri sayesinde sürekli

olarak geliştirilmektedir. Bu kompozitler, havacılık ve savunma sistemlerinde çeşitli özelliklerin ve verimliliğin artırılmasında kritik bir rol oynar.

2.1.1.4. Spor Malzemeleri Endüstrisi

Spor malzemeleri endüstrisi, AlMMK'lerin kullanımı söz konusu olduğunda hızla gelişiyor. AlMMK'ler, özellikle spor malzemeleri için ilgi çekici bir malzeme olarak kabul edilmektedir. Bu malzemeler genellikle silikon karbür veya bor karbür parçacıklarıyla güçlendirilmiş alüminyum matrisli yapıdan oluşur. Spesifik mukavemetleri ve modülleri, çelik veya karbon/epoksi kompozitlerle karşılaştırıldığında tasarım avantajları sunabilir. Ayrıca, yenilikçi olmaları sebebiyle üst düzey spor ürünleri tüketicileri için büyük pazarlama potansiyeline sahiptirler. Golf, bisiklet, beyzbol, kayak gibi rekreasyon ve rekabetçi sporların yanı sıra kullanılan bu malzemeler, performans odaklı olduğundan maliyetten ziyade performansa değer veren kullanıcılar için çekici gelmektedir [36].

2.1.2. Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemeler, arayüzde sıkıca bağlanan iki veya daha fazla farklı malzemeden oluşur. Bu malzemelerden biri olan takviye, matris adı verilen ana bileşenin özelliklerini geliştirir. Bu şekilde, metal, seramik ve polimer matris kompozitleri gibi çeşitli malzeme grupları birleştirilerek sınırsız çeşitlilik sağlanır. Metal matrisli kompozitler (MMK), tek başına metallere göre daha yüksek spesifik modül, mukavemet, yüksek sıcaklık performansı, düşük termal genleşme katsayısı ve aşınma direnci gibi birçok avantaj sunar. MMK'lar, çoğu polimer matrisli kompozitlerle karşılaştırıldığında daha yüksek mukavemet, sertlik, kesme ve basınç dayanımı ile daha iyi yüksek sıcaklık performansı gibi üstün mekanik özelliklere sahiptir. MMK'ların önemli avantajları arasında düşük nem emme, yanmazlık, yüksek elektriksel ve termal iletkenlik ile radyasyona dayanıklılık gibi fiziksel özellikler bulunur. MMK takviyeleri, sürekli lif takviyeli, kesikli lif takviyeli, kedi bıyığı (Whisker), tel takviyeli ve parçacık takviyeli olarak kategorize edilebilir. Metal matrisli kompozitler (MMK) içinde genellikle seramik parçacıklar veya lifler gibi takviye malzemeleri kullanılır. Bu seramikler, oksitler, karbürler veya nitrürler gibi

malzemelerdir ve genellikle ortam sıcaklığında ve yüksek sıcaklıkta yüksek spesifik mukavemet ve sertlik kombinasyonları sağlamak için seçilirler [37–39].

Üretim süreçleri, sürecin maliyeti, kolaylığı ve kompozitlerin özelliklerinde iyileştirme gibi çeşitli yönleri içerir. Farklı üretim yöntemlerinin avantajları ve dezavantajları vardır ve gereksinimlere göre uygun yöntem seçilebilir. AlMMK'ler birçok yöntemle üretilebilir, ancak en popüler yöntemler sıvı hal ve katı hal üretim yöntemleridir [40].

2.1.2.1. Sıvı Hal Üretim Yöntemi

Sıvı hal üretim yöntemi, MMK'ler için katı hale göre oldukça basittir. Bu yöntemde, takviye malzemeleri tamamen veya kısmen erimiş halde olan matrise eklenir. Bu, genellikle daha güçlü bir bağ oluşturan yakın etkileşimi teşvik eder, ancak gözenekli bir arayüz tabakası da oluşturabilir. Bu yöntem döküm ve infiltrasyon yöntemi olarak ayrılır [41].

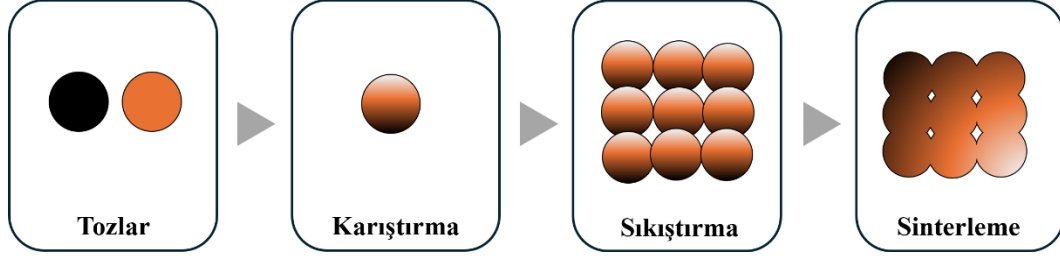
2.1.2.2. Katı Hal Üretim Yöntemi

Katı hal üretim yöntemi, AlMMK'lerin matris ve takviye malzemelerinin katı halde bulunduğu bir süreçtir. Bu yöntemin, matris ve takviye malzemeleri arasındaki istenmeyen arayüz reaksiyonlarını önleme gibi avantajları bulunmaktadır. AlMMK'lerin üretiminde yaygın olarak kullanılan iki katı hal yöntemi difüzyon bağlama ve toz metalurjisi teknikleridir. Sürtünmeli karıştırma işlemi (FSP) de kullanılmaktadır, ancak en sık kullanılan yöntem toz metalurjisidir [40,42].

Toz Metalurjisi

Katı hal üretim yöntemlerinden biri olan toz metalurjisi (TM) adımları, Şekil 2.2'de gösterildiği gibi kısaca şöyledir: İlk olarak, matris ve katkı tozları homojen bir karışım elde etmek için karıştırılır. Ardından, bu karışım, belirli bir basınç altında sıkıştırılarak şekillendirilir. Son olarak, sıkıştırılmış tozlar sinterleme işlemine tabi tutulur; bu

aşamada, yüksek sıcaklıkta uygulanan ısıl işlemle toz partikülleri birbiriyle kaynaşarak nihai ürün elde edilir.



Şekil 2.2. Toz metalurjisi üretim süreçleri.

Toz metalurjisi yöntemi, diğer MMK üretim yöntemlerine göre birçok avantaja sahip olup, bu avantajlar arasında çözünmeyen malzemelerin kompozitlerinin üretilebilmesi, boyutsal hassasiyetin yüksek olması, daha az işlem gerektirmesi, yüksek ergime noktasına sahip kompozitlerin üretilebilmesi, daha az hurda oluşması, gözeneklilik üzerinde daha fazla kontrol sağlanması, kendi kendini yağlayan malzemelerin üretilebilmesi ve üretilen kompozitlerin daha iyi akustik ve titreşim sönümlenme özelliklerine sahip olması yer almaktadır [43]. Bu avantajların yanı sıra, toz metalurjisi yöntemi, enerji tasarrufu ve hammadde verimliliği açısından da geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla önemli üstünlükler sunar. Örneğin, talaşlı imalatta hammaddenin sadece %50'si ürüne dönüşürken, toz metalurjisinde bu oran %95 civarındadır. Ayrıca, 1 kg parça üretimi için talaşlı imalatta yaklaşık 78 MJ enerji gerekirken, toz metalurjisinde bu enerji miktarı, talaşlı işleme kıyasla yarısından daha azdır. Tüm bu nedenlerle, toz metalurjisi, MMK üretiminde en etkili tekniklerden biri olarak kabul edilmektedir [44].

Toz metalurjisini etkileyen başlıca faktörler, toz partikül boyutu, sıkıştırma basıncı, sinterleme sıcaklığı ve süresi, fırın atmosferi, yağlama, toz karışımı ve takviye konsantrasyonu, mikroyapı ve partikül şekli ile sinterleme hızıdır [45].

Partikül Boyutu ve Şekli

Toz parçacıklarının şekilleri ve boyutları, toz metalurjisi parçalarının mekanik özelliklerini ve mikro yapısını önemli ölçüde iyileştirir. Tozlar genellikle mikrometre (1-200 μm) veya nanometre (1-200 nm) ölçeğinde olup, ince partiküller daha yüksek

yoğunluk ve iyileştirilmiş özellikler sağlar. Karışık parçacık boyutları gözenekliliği azaltır ve mikro yapıyı iyileştirir [45].

Karıştırma İşlemi

Toz karıştırma ve öğütme, TM işlemlerinin ilk adımıdır ve genellikle bir bilyalı değirmen kullanılarak yapılır. Öğütme işlemi, toz parçacıklarını homojen bir karışım haline getirir ve aglomerasyonu önler. Karıştırma süresi uzadıkça, yüksek hacim oranına sahip katkı maddeleri ile daha homojen bir toz karışımı elde edilir. Toz karıştırma işlemlerinde, yüksek enerjili bilyalı değirmenler, turbolar, V-şekilli karıştırıcılar, yatay karıştırıcılar, çift konili karıştırıcılar, yüksek hızlı karıştırıcılar ve tamburlu karıştırıcılar kullanılır [46]. Bilyalı değirmenin kullanımı, toz karışımının homojenliğini sağlamanın yanı sıra, toz parçacıklarını daha uygun boyutlara kırar. Bu, mekanik özelliklerin ve mikro yapının iyileşmesine yol açar [45].

Mekanik alaşımlama, yüksek enerjili bilyalı öğütme yöntemiyle toz parçacıklarının tekrar tekrar kırılması, kaynaklanması ve yeniden kırılması sürecini içeren bir işlemdir [47]. Kaynak yapma ve kırılma derecesi, büyük ölçüde toz bileşenlerinin mekanik özelliklerine bağlıdır ve bu bileşenler sünek/sünek, sünek/kırılgan veya kırılğan/kırılgan olarak sınıflandırılabilir [48].

MA'nın en büyük avantajlarından biri, genellikle karışmayan elementlerin birleştirilmesini sağlayarak, başka hiçbir teknikle mümkün olmayan yeni alaşımların sentezlenmesidir. Mekanik alaşımlama, istenen ürün fazı ve mikro yapısına ulaşmak için birçok değişkenin optimize edilmesini gerektiren karmaşık bir süreçtir. Bu süreçte önemli parametreler arasında değirmen tipi, öğütme kabı, öğütme hızı, süre, öğütme ortamı, öğütme ortamının türü, boyutu ve dağılımı, bilye-toz ağırlık oranı, kabın boşluk oranı, atmosfer ve işlem kontrol ajanı, ve sıcaklık yer alır [49].

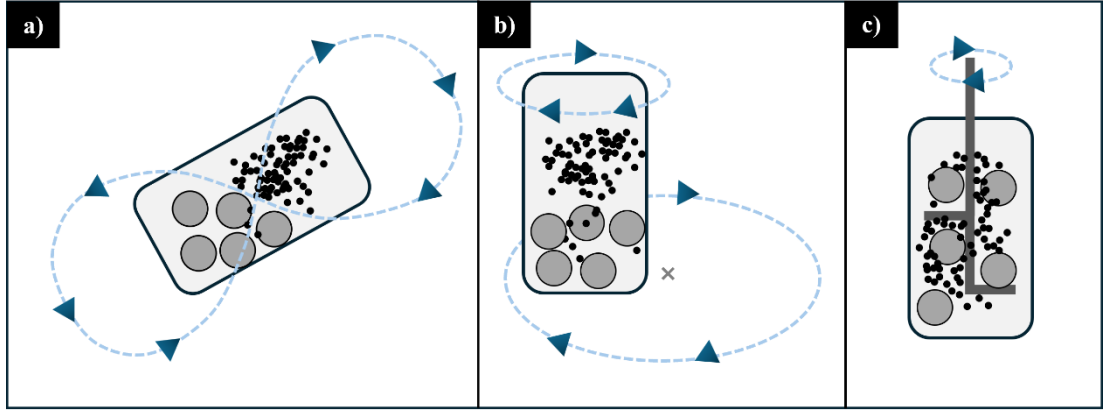
Öğütme sırasında toz parçacıkları, özellikle sünek olduklarında, ağır plastik deformasyon nedeniyle birbirine soğuk kaynakla bağlanır. Ancak, toz parçacıkları arasında gerçek alaşımlama, soğuk kaynak ve parçacıkların kırılması arasında bir denge sağlandığında gerçekleşir. Soğuk kaynağı azaltmak için öğütme sırasında toz

karışımına bir işlem kontrol katkısı (İKK) eklenir. İKK'lar genellikle organik bileşikler olup, yüzey aktif maddeler olarak işlev görür. Bu ajanlar, toz parçacıklarının yüzeyine adsorbe olarak soğuk kaynağı ve aglomerasyonu engeller, ayrıca katı malzemenin yüzey gerilimini düşürür [49].

Çizelge 2.1. Mekanik alaşımlama sürecinde kullanılan bazı işlem kontrol katkılarının (İKK) erime ve kaynama noktaları [50].

İşlem Kontrol Katkısı	Erime Noktası (°C)	Kaynama Noktası (°C)
Metil alkol	-98	64.6
Stearik asit	67-69	183-184
Etil alkol	-130	78
Dodesin	-12	216.2
Heptan	-91	98
Hegzan	-95	68-69
Etil asetat	-84	76.5-77.5
Polietilen glikol	59	205

MA işleminde Spex tipi, atritör tipi ve gezegen tipi yüksek enerjili değirmenler kullanılmaktadır. Şekil 2.3'te hareket tipleri gösterilmektedir. SPEX tipi öğütücüler, hazne içindeki toz ve bilyelerin farklı eksenlerde hareket etmesiyle öğütme yapar, ancak ısı sorunları yaşanabilir; yeni modellerde basınçlı soğutma sistemi kullanılır. Atritör tipi öğütücülerde, silindir hazne içindeki bilyeler güçlü bir motor yardımıyla karıştırıcılar tarafından yüksek enerjiyle çarpıştırılır, bu da tozun boyutunu küçültür ve karışmasını sağlar. Soğutma sıvısı ısıyı azaltır ve atmosfer kontrolü sağlanabilir. Gezegen tipi öğütücüler, dönen bir disk üzerindeki haznenin kendi yörüngesinde dönmesiyle çalışır; bu dönüş, merkez kaç kuvveti ile tozun öğütülmesini sağlar ve daha düşük enerjili bir işlemdir [50].

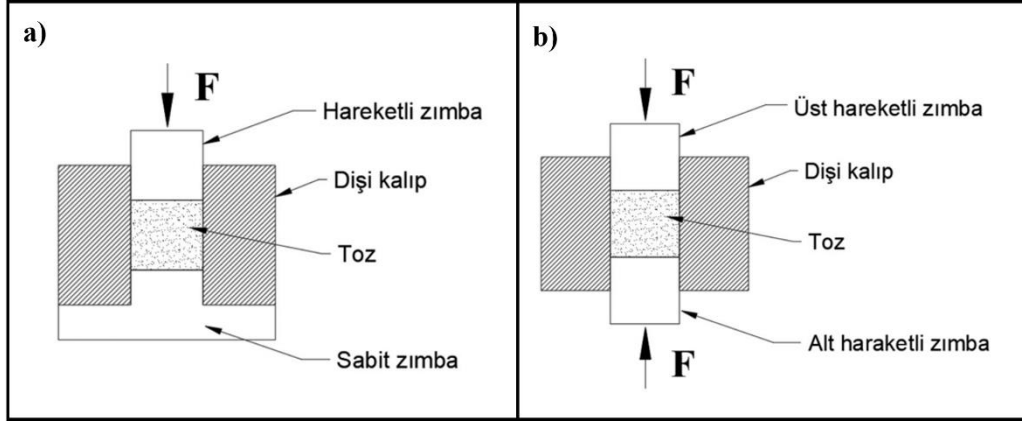


Şekil 2.3. Mekanik alaşımlamada kullanılan cihazların hareket tipleri a) Spex tipi, b) Gezegen tipi ve c) Atritör tipi.

Sıkıştırma İşlemi

Toz karışımları, bir kalıp boşluğuna baskı uygulayarak sıkıştırılarak yeşil kompaktlar haline getirilir. Artan sıkıştırma basıncı, toz parçacıklarının birleşmesini ve soğuk kaynak oluşumunu sağlar. Yeşil kompaktların yüksek yoğunluk ve dayanıklılığı, çıkarılma sırasında kırılmayı önler. Metal parçacıkları ve kalıp duvarları arasındaki sürtünme, yoğunluğu ve basıncı etkileyebilir, bu nedenle yağlayıcılar kullanılır. Çinko stearat, stearik asit gibi yağlayıcılar sürtünmeyi azaltır ve toz akışını iyileştirir, ancak aşırı kullanım, sinterlenmiş kompaktların yoğunluğunu ve mekanik özelliklerini düşürebilir [45].

Kalıpta pres ile sıkıştırma, toz şekillendirmede yaygın olarak kullanılan bir tekniktir ve iki ana türü bulunur: tek yönlü ve çift yönlü presleme (Şekil 2.4). Tek yönlü preslemede, toz bir kalıba konularak sabit alt zımba ve hareketli üst zımba ile sıkıştırılır, bu da parçanın yoğunluğunun üst zimbaya doğru azalmasına neden olabilir ve yüksek kalınlığa sahip parçalar için sorun yaratabilir. Bu yöntem, basit kalıp yapısı ve düşük maliyet avantajı sağlar. Çift yönlü preslemede ise hem alt hem de üst zımba aynı anda çalışarak daha homojen bir yoğunluk elde edilir; ancak, bu yöntem, kademeli kesitli parçalar için uygun olmayabilir, kalıp maliyeti daha yüksek olabilir ve kalıp tasarımı daha karmaşıktır [51].



Şekil 2.4. a) Tek etkili silindir ve b) çift etkili silindir [51].

Sinterleme İşlemi

Sinterleme, toz parçacıklarının yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen ısı bir işlemle birbirine bağlanarak dayanıklılığını artıran ve yüzey alanını azaltan bir tekniktir. Bu süreç, atom difüzyonu yoluyla gerçekleşir ve böylece toz kompaktlarını daha az gözenekli ve sert bir yapıya dönüştürür [44]. Mikrodalga sinterleme, lazer ve kıvılcım plazma sinterleme gibi özel sinterleme yöntemleri de Katı ve sıvı hal sinterleme, toz metalurjisi ve seramik üretiminde yaygın olarak kullanılan iki temel sinterleme yöntemidir. Katı hal sinterleme, toz partiküllerinin ergime sıcaklığının altında ısıtılmasıyla gerçekleşir ve bu süreçte atomların yayınımları ile partiküller arasında bağlanma sağlanır. Bu yöntem, tamamen katı halde gerçekleşir ve parçacıklar arasında boşluklar küçülerek malzemenin yoğunluğu ve mekanik özellikleri artar. Sıvı hal sinterlemede ise, sinterleme sıcaklığında bir sıvı faz oluşur. Bu sıvı faz, partiküller arasında akarak bağlanmayı kolaylaştırır ve malzemenin daha homojen ve yoğun bir yapıya kavuşmasını sağlar. Bu yöntem, özellikle yüksek yoğunluk ve homojen yapı gerektiren uygulamalarda tercih edilir [52]. Teorik olarak, sinterleme sıcaklığı için en ideal aralık, ergime sıcaklığının %60 ile %80'i arasında olmalıdır [53].

Sinterleme, yeşil kompozitlerin özelliklerini iyileştirmek için uygulanan bir ısı işlemidir ve bu süreçte sıcaklık, süre ve fırın atmosferi önemli rol oynar. İdeal yoğunluk ve mekanik özellikler elde etmek için sinterleme sıcaklığı ve süresi optimize edilmelidir. Düşük veya yüksek sıcaklıklar ile kısa veya uzun süreler, tane büyümesine ve zayıf bağlara yol açabilir. Fırın atmosferi, malzeme kontaminasyonunu önlemek ve

özellikleri iyileştirmek için kontrol edilmelidir. Bu amaçla argon, azot ve hidrojen gibi gazlar kullanılabilir. Yapılan araştırmalar, azot atmosferinde sinterlenen örneklerin, argon atmosferinde sinterlenenlere göre daha yüksek fiziksel ve mekanik özellikler gösterdiğini ortaya koymuştur [45].

BÖLÜM 3

LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Bu bölümde, MMK'lerin mekanik, tribolojik ve korozyon özelliklerine ilişkin literatürdeki çalışmalar incelenmiştir.

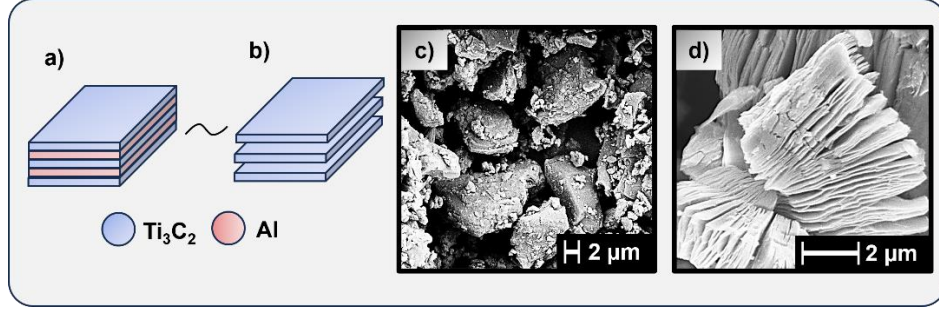
3.1. LİTERATÜR ÖZETİ

3.1.1. Aşınma Davranışı ve Mekanik Özellikler

Metal matrisli kompozitler (MMK), yüksek elastisite modülü, mukavemet ve ısı kararlılık gibi olağanüstü fiziksel ve mekanik özelliklerinden dolayı, havacılık ve otomobil endüstrisindeki uygulamalar için en uygun aday olarak kabul edilmektedir. Bu kompozitler, takviye elemanlarının rijit ve sert yapıdaki özelliklerini, matrisin tok ve sünek yapıdaki özellikleriyle kombinasyonunu sağlamaktadır. Özellikle parçacık takviyeli metal matris kompozitlerde geliştirilmiş mekanik özelliklerinin izotropik olduğu görülmüştür. Bu tür kompozitlerde metalik matrise seramik partikül takviyesi ile termal dayanıklılık ve aşınma direncinde bir miktar önemli artışlar meydana geldiği ifade edilmiştir. Zayed ve arkadaşları karbon nanotüp katkılı Al_2O_3 takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin tribolojik özelliklerini incelemiş ve aşınma dayanımında yaklaşık %45, sürtünme katsayısı değerlerinde ise %48 oranında iyileşme meydana geldiğini belirtmiştir [54]. El-Ghazaly ve arkadaşları ise kendinden yağlayıcı özelliğe sahip kompozitler üretmek amacıyla AA2124 alaşımına ağırlıkça %3 ve %5 oranlarında grafen eklemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre %3 grafen takviyesi ile aşınma hacmi %25 oranında düşerken, sürtünme katsayısını ise %9 oranında düşürmüştür. Mikroyapı incelemesinde en iyi partikül dağılımını %3 takviye ile gerçekleştirdiğini ve bu numunelerde aşınma sonrası tribofilim oluştuğunu tespit etmişlerdir. Gözlenen tribofilmin ise aşınma sonuçlarındaki bu artışın sebebi olduğunu düşünmüşlerdir [55]. Veeravalli ve arkadaşları AA7075 alaşımına 2 μm boyutunda

TiC ekleyerek kuru ortamdaki aşınma davranışlarını incelemişlerdir. 20N yük altında 2 m/s hızla ve 2 km mesafede gerçekleştirdikleri testlerde en iyi performansın %8 TiC takviyesi ile meydana geldiğini belirtmişlerdir [56]. Ağırlıkça %5 bor nitür takviyesinin abrasif aşınma direncine önemli katkı sağladığı belirtilmiştir [57]. Loganathan ve arkadaşları ise AA7075'e sıkıştırılmalı döküm yöntemi ile ZrB₂ ve h-BN takviye etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara saf matrisin karşı malzemeye yapışarak aşınma oranını arttırdığı belirtilmiştir. ZrB₂'nin 40N'a kadar yüksek sertliğinden dolayı aşınma dayanımını arttırdığı ancak 60N'dan sonra parçalanarak daha çok aşındığı ve 80N'da ise siyah bir tribofilm oluşturduğu belirtilmiştir. BN'nin ise aşınma testlerinde stabil bir tribofilm oluşturduğu ve bunun sürtünme katsayısını düşürerek aşınma miktarını azalttığını ifade etmişlerdir. Ayrıca bu tribofimin ise H₃BO₃ kimyasalından oluştuğu kanaatindedirler [58]. Ancak iki boyutlu takviyelerin aksine SiC, B₄C, TiB₂, TiC gibi şekilsiz ve sert seramiklerin matris içine eklendiği matrisin aşınma dayanımını arttırdığı gibi karşı malzemenin de daha fazla aşınmasına sebep olduğu ifade edilmiştir. Bu durum oldukça önemli bir dezavantaj oluşturduğu düşünülmektedir. Öte yandan bor nitür bileşeninin alüminyum gibi metaller ile kompozit oluşturulurken ıslanabilirlik sorunu meydana getirdiği bilinmektedir. Bu sorunun ise şimdiye kadar yapılan çalışmalarda toz metalurjisi, sıkıştırılmalı döküm ve karıştırılmalı döküm gibi yöntemlerle iyileştirilmeye çalışılmıştır. Bunlar arasında toz metalurjisi ile yapılan üretimlerde düşük sıcaklıkta yüksek hızda ve daha az malzeme kaybı meydana geldiği belirtilmiştir. Tüm bu üretim yöntemleri parçanın kullanım alanına göre de değişebilmektedir. Bir diğer önemli husus ise şimdiye kadar yapılan çalışmalarda bor nitürün yine iki boyutlu ikinci bir bileşenle birlikte incelenmemiş olmasıdır. Son zamanlarda geliştirilen en yaygın yeni nesil iki boyutlu bileşenler ise MXene yapılarıdır.

Yeni bir 2D malzeme ailesi olan MXene (Ti₃C₂T_x), MAX (Ti₃AlC₂) fazında olan katmanlı karbürlerden A fazının ayrıştırılmasıyla elde edilir. En yaygın MXene Ti₃AlC₂'dir. Genellikle Al atomlarının hidroflorik asit (HF) kullanılarak Ti₃AlC₂'den aşındırılmasıyla oluşur. MXene yüzeyi çeşitli fonksiyonel gruplar tarafından sonlandırıldığından, M_{n+1} X_n T_x olarak belirtilir, burada T, yüzey sonlandırıcı fonksiyonel grupları (OH, F, O, H, vb.) gösterir [6]. Bu bağlamda şematik ve gerçek MAX ve MXene yapılarının Şekil 3.1'de temsili görseli verilmiştir.



Şekil 3.1. a) MAX fazının MXene dönüşümü şematik gösterimi, b ve c) bu dönüşümün SEM görüntüsü [59].

MXeneler, iyi sertlik ve esneklik özelliklerine sahip inorganik dolgu maddeleridir. Yüzeylerinde bulunan terminal gruplar sayesinde, polar gruplar içeren bazı polimerlerle güçlü bir şekilde bağlanabilirler ve böylece polimer malzemelerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde artırabilirler. Bu mekanik özellikler arasında akma mukavemeti, Young modülü, nihai çekme mukavemeti, kırılma uzaması ve sertlik bulunur [60]. Literatürde polimer matrisle yapılan bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Zhang ve arkadaşlarının [61] çalışmasında, Ti_3C_2 'nin ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ağırlıkça %0,75 Ti_3C_2 eklenmesiyle UHMWPE'nin nihai çekme mukavemeti %8.6 artış göstermiş ve 36.61 MPa'dan 39.65 MPa'ya yükselmiştir. Ayrıca, ağırlıkça %2 Ti_3C_2 eklenmesiyle sürtünme direncinde iyileşme gözlemlenmiş ve sürtünme katsayısı 0.186'dan 0.128'e düşmüştür. Ancak, Ti_3C_2 'nin UHMWPE ile olan etkileşimi zayıf kalmış ve bu durum, MXene'nin polimer üzerindeki güçlendirici etkisini sınırlamıştır.

Zhi ve arkadaşları [62], ağırlıkça %0,5 MXene dolgusu ile poliüretan (PU) polimerinin akma mukavemetinin %70 oranında artış sağladığını bildirmiştir. Bu artış, PU'nun akma mukavemetini 1.3 MPa'dan 2.2 MPa'ya yükseltmiştir. Bu önemli iyileşme, MXene'nin PU ile güçlü etkileşimi ve iyi dağılımından kaynaklanmaktadır.

Liu ve arkadaşlarının [63] araştırmasında, ağırlıkça %2 $Ti_3C_2T_x$ katkılı Nafion membranının Young modülü %23 oranında artmış ve 104,6 MPa'dan 128,4 MPa'ya

çıkıştır. Bu sonuç, $Ti_3C_2T_x$ 'in polimer matrisine eklenmesiyle malzemenin sertliğinin artırılabilceğini göstermektedir.

Chen ve arkadaşları [64], ağırlıkça %0,5 $Ti_3C_2T_x$ eklenmiş polilaktik asidin (PLA) çekme mukavemetinin %33 oranında artış gösterdiğini ve 72 MPa'ya ulaştığını bildirmiştir. Bu önemli artış, MXene'nin PLA ile olan güçlü etkileşimi ve homojen dağılımı sayesinde sağlanmıştır.

Gogotsi ekibi [65], %40 MXene ile hazırlanan polivinil alkol (PVA) nanokompozitlerinin mekanik mukavemetinin saf PVA'nın üç katından fazla arttığını ve 30 MPa'dan 91 MPa'ya yükseldiğini raporlamıştır. Bu büyük artış, yüksek miktarda MXene eklenmesiyle elde edilmiştir ve MXene'nin PVA ile olan güçlü etkileşimi ile mükemmel dağılımı sayesinde gerçekleşmiştir.

Sheng ve arkadaşlarının [66] çalışmasında, ağırlıkça %0,5 MXene eklenmiş termoplastik poliüretan (TPU) polimerinin sertliği %47,1 artış göstermiş ve 14 MPa'dan 20 MPa'ya yükselmiştir. Ayrıca, TPU'nun kırılma uzaması %17,5 artarak %1580'den %1857'ye çıkmıştır. Bu sonuçlar, MXene'nin TPU'nun hem sertlik hem de tokluk özelliklerini iyileştirdiğini ortaya koymaktadır.

Cao ve arkadaşları [67], $Ti_3C_2T_x$ /CNF kompozit kağıdının saf CNF kağıdına göre çekme mukavemetinin %174,6 oranında ve kırılma geriliminin %6,7 oranında arttığını belirtmiştir. Çekme mukavemeti 49,3 MPa'dan 135,4 MPa'ya ve kırılma gerilimi %10'dan %16,7'ye çıkmıştır. Bu iyileşmeler, $Ti_3C_2T_x$ 'in CNF ile olan güçlü etkileşimi ve iyi dağılımı sayesinde sağlanmıştır.

Sobolciak ve arkadaşlarının [68] çalışmasında, ağırlıkça %0,07 Ti_3C_2 nano plakaların ve ağırlıkça %0,07 selüloz nanokristallerinin (CNC) eklenmesiyle saf PVA nanofiberlerinin depolama modülünün %100'den fazla arttığı ve 392 MPa'dan 855 MPa'ya çıktığı gözlemlenmiştir. Bu artış, Ti_3C_2 nano plakaların ve CNC'nin birlikte kullanımının PVA nanofiberlerinin mekanik özelliklerini nasıl iyileştirebileceğini göstermektedir.

Zhang ve arkadaşlarının [69] araştırmasında, MAX nano plakaların eklenmesi (ağ. %0,3) PMMA'nın mekanik mukavemetini %89 artırmış ve 20,5 MPa'dan 38,6 MPa'ya yükseltmiştir. Ayrıca, çekme modülü %397 oranında artış göstererek 0,289 GPa'dan 1,435 GPa'ya çıkmıştır. Bu sonuçlar, MAX nano plakaların PMMA ile güçlü etkileşimi ve iyi dağılımı sayesinde mekanik özelliklerde önemli iyileşmeler sağladığını göstermektedir.

MXene katkılı polimer nanokompozitlerinin, polimerlerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirebileceğini ve çeşitli uygulamalar için uygun olduğunu göstermektedir. Her bir çalışma, farklı polimer ve MXene türleri kullanılarak belirli mekanik özelliklerde önemli artışlar sağlanabileceğini raporlamıştır. Ayrıca MXene'nin metal matris kompozitlere entegre edilmesi, malzeme özelliklerini geliştirme açısından büyük bir potansiyel sunmaktadır. Literatürde bununla alakalı sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir.

Fan ve arkadaşlarının [70] yaptığı çalışmada, farklı boyutlardaki $Ti_3C_2T_x$ pullarının $Ti_3C_2T_x/ZK61$ alaşımlarının mekanik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Yaklaşık 0,67 μm boyutundaki pullarla hazırlanan kompozitte sertlik %16,5, basma akma mukavemeti (CYS) %8,2 oranında artış göstermiştir. Yaklaşık 1,83 μm boyutundaki pullarla hazırlanan kompozitte ise sertlik %7,9, CYS %5,3 oranında artmıştır. Bu sonuçlar, $Ti_3C_2T_x$ pullarının yan boyutunun kontrol edilmesiyle $Ti_3C_2T_x/ZK61$ kompozitlerinin mekanik özelliklerinde önemli iyileşmeler sağlanabileceğini göstermektedir. Küçük boyutlu pullar, büyük boyutlu pullara göre daha fazla iyileşme sağlamıştır.

Si ve arkadaşlarının [71] çalışmada, Cu/ $Ti_3C_2T_x$ kompozitleri, %5, %10 ve %20 hacim oranlarında $Ti_3C_2T_x$ içeriği ile moleküler seviye karıştırma ve kıvılcım plazma sinterleme (SPS) yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. $Ti_3C_2T_x$ içeriğinin artmasıyla, Cu/ $Ti_3C_2T_x$ kompozitlerinin relatif yoğunluğu ve elektriksel iletkenliği azalmış, ancak çekme mukavemeti önce artmış, sonra azalmıştır. %5 $Ti_3C_2T_x$ içeriğinde, Cu/ $Ti_3C_2T_x$ kompozitlerinin çekme mukavemeti saf bakıra göre %43 artış göstermiştir. Tribolojik özellikler, %10 $Ti_3C_2T_x$ eklenmesiyle iyileşmiştir. Cu/ $Ti_3C_2T_x$ kompozitlerinin aşınma

oranı, saf bakırın aşınma oranından daha düşük olup, $2,55 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ olarak ölçülmüştür.

Hu ve arkadaşlarının [72] çalışmada, $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{Al}$ kompozitlerini basınçsız sinterleme ve ardından sıcak ekstrüzyon yöntemleriyle hazırlamışlardır. Elde edilen kompozitlerde $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 'in homojen dağılımı sağlanmıştır. Vickers sertliği ve çekme mukavemeti, $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ takviyesinin miktarına bağlı olarak artış göstermiştir. Ağırlıkça %3 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ içeren Al kompozitinde 0,52 GPa sertlik ve 148 MPa çekme mukavemeti elde edilmiştir. Ayrıca, bu kompozitlerin saf Al ile karşılaştırılan kuru kayma sürtünme özellikleri incelenmiştir; %3 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{Al}$ kompozitinde, saf Al'den iki kat daha düşük olan 0,2 sürtünme katsayısı elde edilmiştir. $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$, katı yağlayıcı olarak işlev görerek kompozitin aşındırıcı aşınmasını azaltmış ve Al matrisli kompozitlerin sürtünme özelliklerini iyileştirmiştir.

Özetle MXene takviyeli metal matrisli kompozitler üzerinde çok az araştırma yapılmaktadır, çalışmaların çoğunda MXene takviyeli polimer matrisli kompozitlere odaklanılmıştır. MXene, bazal düzlemler boyunca yüksek bir elastik modülüne sahiptir, hatta karşılık gelen $\text{M}_{n+1}\text{AX}_n$ 'den daha yüksektir. MXene yüzeyleri büyük miktarda O, OH ve F grupları tarafından sonlandırılır. Bu fonksiyonel gruplar, polimerlerle iyi bir uyumluluk sağlayabilir, ancak bunlar MXene partikülleri ve metal matris arasındaki ıslanabilirlik üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. F metal malzemeler için bile zararlı bir elementtir. Sonuç olarak, özellikle MXene partikül boyutu nano ölçeğe düştüğünde, zayıf ıslanabilirlik nedeniyle metal matriste MXene partiküllerinin ciddi yığılması meydana gelir. Bu nedenle, MXene partiküllerinin metal matris içinde homojen dağılımını sağlayabilen hazırlama yöntemi, dikkate değer mekanik özelliklere sahip kompozitler elde etmek için de önemlidir [73].

3.1.2. İşlenebilirlik (Delik Delme) Davranışı

İşlenebilirlik (Delik Delme) prosesi, metal matrisli kompozitlerin delik açma işleminde verimliliği ve kalitesini belirleyen kritik bir aşamadır. Metal matrisli kompozitlerin havacılık endüstrisinde geniş bir uygulama alanı bulunmaktadır. Bir uçak yapısının montajında milyonlarca delik delme işlemi gerekmektedir. Bu işlem

sırasında matkap, talaş ve uçak gövdesi arasındaki sürtünme nedeniyle oluşan ısı, yüzey pürüzlülüğünü artırarak gerilim yoğunlaşma bölgelerini oluşturur. Bu durum, delik yüzeyi kalitesini olumsuz etkiler ve boyutsal doğruluk hatalarına yol açar. Bu durum, delik yüzeyi pürüzlülüğünü, çapak oluşumunu ve delik boyutundan sapmayı içeren boyutsal doğruluk ve dairesellik hatası olarak bilinen delik yüzey kalitesini olumsuz etkiler [74]. Bu durumun önüne geçmek için kompozitlere kendinden yağlayıcı özelliklere sahip takviye elemanları eklendiğinde, delik delme işlenebilirlik davranışını önemli ölçüde iyileşmektedir. Bu eklentiler, sürtünmeyi azaltarak kesme kuvvetlerini düşürür ve takım aşınmasını azaltır, böylece takım ömrünü uzatır. Aynı zamanda, yüksek termal iletkenlikleri sayesinde ısı dağılımını iyileştirir, bu da termal hasarı ve deformasyonu minimize eder. Ayrıca yüzey kalitesini artırarak daha pürüzsüz ve kusursuz delikler elde edilmesini sağlar. Literatürde bu eklentilerden grafit, grafen, hekzagonal bor nitrür (hBN), molibden disülfür (MoS_2), PTFE (politetrafloroetilen), bor karbür (B_4C) ve silisyüm karbür (SiC) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) yaygın olarak kullanılır [75,76]. Bu eklentiler arasında grafit, molibden disülfür ve altıgen bor nitrür gibi katmanlı yapıya sahip malzemelerde, atomlar güçlü kovalent bağlarla plakalarda bir araya gelirken, ardışık düzlemler zayıf Van der Waals bağlarıyla birbirine bağlanır. Bu yapılar, sürtünme esnasında düşük gerilim değerlerinde ardışık düzlemlerin ayrılmasına izin verir ve temas yüzeyinde kayma sırasında sürekli bir film oluşturarak aşınmayı azaltır [76]. Saravanakumar ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada alüminyum(AA2219) matrise ağırlıkça %4 kendinden yağlamalı grafit (Gr) ve molibden disülfür (MoS_2) ekleyerek kompozitlerin işlenebilirliğini ve yüzey kalitesini iyileştirdiğini ortaya koymuşlardır [77]. Kumar ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada Al6061/SiC/B₄C hibrit kompozitine “talk” eklenmesi sonucu delme işlemi sırasında itme kuvvetinin azalmıştır. Ayrıca yağlama etkisi sayesinde kesme kuvvetini ve pürüzlülüğü azaltarak işlenebilirliği iyileştirmiştir [78].

Sonuç olarak, kendinden yağlayıcı özelliklere sahip takviye elemanlarının kompozitlere eklenmesi, delik delme işlemlerinde sürtünmeyi azaltarak işlenebilirliği ve yüzey kalitesini önemli ölçüde iyileştirirken, takım ömrünü uzatmakta ve termal hasarı minimize etmektedir. Bu iyileştirmeler, havacılık endüstrisi gibi delik delmenin yoğun olduğu sektörlerde daha yüksek performanslı ve güvenilir yapılar üretilmesine katkı sağlamaktadır.

Basavarajappa ve arkadaşlarının [79] yaptığı çalışmada, Al2219/15SiCp ve Al2219/15SiCp-3Gr kompozitlerinde kesme parametrelerinin itme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve çapak oluşumu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Grafitli kompozitler, daha düşük itme kuvveti ve çapak yüksekliği ile daha yüksek yüzey pürüzlülüğü göstermiştir. Grafit, katı yağlama özelliği sayesinde itme kuvvetini azaltırken, yüzey pürüzlülüğünü artırmaktadır. Ayrıca, grafitli kompozitlerde oluşan çipler daha kesintili olup, bu durum avantaj sağlamaktadır.

Saravanakumar ve arkadaşlarının [77] yaptığı çalışmada, Gr ve MoS₂ ile takviye edilmiş Alüminyum alaşımı 2219 kompozitinin delme işlemi sırasında yüzey pürüzlülüğüne etki eden parametreler incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre, yüzey pürüzlülüğü, artan ilerleme oranı ile yükselmiş, artan hız ile azalmıştır. En düşük yüzey pürüzlülüğü (2,13), yüksek hız (1600 rpm) ve düşük ilerleme oranı (75 mm/dak) koşullarında 6 mm matkap ucu kullanılarak elde edilmiştir. Pareto analizi ve Normal olasılık grafiği, yüzey pürüzlülüğüne en fazla etki eden faktörün grafit takviyesi olduğunu, bunu sırasıyla ilerleme oranı, hız ve matkap ucu çapının izlediğini göstermiştir. Sonuç olarak, AA2219 alaşım kompozitlerinin işlenebilirliğinin, grafit takviyesi sayesinde iyileştirilebileceği belirlenmiştir; bu kendiliğinden yağlayıcı takviyeler, kompozitlerin tribolojik performansını ve işlenebilirliğini artırmaktadır.

Zitoune ve arkadaşlarının [80] yaptığı çalışmada, soğutucu kullanılmadan, düz karbür matkaplarla CFRP/Al2024 yığını delinmiş ve itme kuvveti, tork, yüzey pürüzlülüğü, dairesellik ve delik çapı parametreleri izlenerek optimum işlem parametreleri belirlenmiştir. Sonuçlar, düşük ilerleme hızlarında CFRP'de daireselliğin yaklaşık 6 µm iken, ilerleme hızı arttığında 25 µm'ye yükseldiğini göstermektedir. Aşınma testleri, ilk 30 delikte CFRP'deki itme kuvvetinin %90, alüminyumda ise %6 oranında arttığını ortaya koymuştur.

Basavarajappa ve arkadaşlarının [81] yaptığı diğer çalışmada, Al2219/15SiCp ve Al2219/15SiCp-3Gr hibrit metal matris kompozitlerin delme karakteristiklerine kesme parametrelerinin etkisini incelemektedir. Karıştırmalı döküm yöntemiyle üretilen bu kompozitlerin delme işlemi, Taguchi deney tasarımı ve varyans analizi (ANOVA) kullanılarak analiz edilmiştir. 5 mm çapında katı karbür matkaplarla

gerçekleştirilen deneylerde, mil hızı ve ilerleme oranının, ilerleme kuvveti, yüzey kalitesi ve çapak yüksekliği üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, her iki kompozit için de ilerleme oranının, mil hızına kıyasla daha belirleyici olduğunu ve seramik-grafit takviyeli kompozitin daha iyi işlenebilirlik sunduğunu göstermektedir.

Altunpak ve arkadaşlarının [82] yaptığı çalışmada, vortex yöntemiyle üretilen Al/20%SiC/5%Gr ve Al/20%SiC/10%Gr hibrit kompozitlerin delinmesinde kesme parametrelerinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemektedir. Elmas benzeri karbon kaplamalı kesici takımlarla yapılan testler, grafit ilavesinin kesme kuvvetini azalttığını ortaya koymuştur. Besleme oranı, her iki kompozitte de kesme kuvvetini en fazla etkileyen faktördür ve yüzey pürüzlülüğü, besleme oranıyla artarken kesme hızıyla azalır. Al/20%SiC/10%Gr kompoziti, tüm kesme koşullarında daha düşük yüzey pürüzlülüğüne sahiptir.

Karakoç ve arkadaşları [83] yaptığı çalışmada, B₄C takviyesinin alüminyum esaslı kompozit malzemelerin mikroyapısal, mekanik, tribolojik ve sürtünme delme özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada, toz metalurjisi ve sıcak ekstrüzyon yöntemi kullanılarak %5, %10, %15 ve %20 B₄C takviyeli Al 6063 matrisli kompozitler üretilmiştir. Delik delme açısından, B₄C takviyesinin bu kompozitlerin delme davranışlarına olan etkisi değerlendirilmiştir. B₄C takviye oranı arttıkça delme kuvveti, sıcaklık, yüzey pürüzlülüğü, burç profilinde çatlaklar ve yapraklanma gibi olumsuz durumlar artış göstermiştir. Bu etkiler, özellikle %15 ve %20 B₄C takviyeli örneklerde belirgin hale gelmiştir. En iyi burç profili ve pürüzsüz delik yapısı ise %5 ve %10 B₄C takviyeli kompozitlerde elde edilmiştir.

Sonuç olarak, metal matrisli kompozitlere kendinden yağlayıcı takviye elemanlarının eklenmesi, delik delme işlemlerinde sürtünmeyi azaltarak işlenebilirlik ve yüzey kalitesini belirgin şekilde iyileştirmektedir. Bu katkılar, özellikle havacılık endüstrisi gibi yoğun delme işlemlerinin gerçekleştirildiği alanlarda, daha yüksek performanslı ve güvenilir yapılar üretmeye olanak tanımaktadır. Araştırmalar, grafit, molibden disülfür ve altıgen bor nitrür gibi katmanlı yapıya sahip malzemelerin yüzey pürüzlülüğünü azaltarak daha pürüzsüz delikler sağladığını ve kesme kuvvetlerini düşürerek takım aşınmasını önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Ancak, yüksek

takviye oranlarının işlenebilirlik üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceği ve optimum takviye oranlarının dikkatle belirlenmesi gerektiği de vurgulanmaktadır. Bu bulgular, metal matrisli kompozitlerin delme süreçlerinde kendinden yağlayıcı takviye elemanlarının stratejik kullanımının önemini ortaya koymaktadır.

3.1.3. Koroziy Özellikler

Korozyon, çevresel faktörler tarafından tetiklenen kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlar nedeniyle malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinde değişikliklere yol açar [84]. Malzeme yüzeylerinde elektrokimyasal indirgeme-oksidasyon reaksiyonlarını içerir, bu da elektronların serbest kalmasına ve kademeli malzeme bozulmasına neden olur [85]. Nem içeriği, tuz konsantrasyonu, pH ve katodik koruma seviyeleri gibi faktörler çelik yapılarıdaki korozyon oranını önemli ölçüde etkileyebilir [86]. MMK'lerin korozyon direnci, matris alaşımının bileşimi, mikro yapı, takviyelerin dağılımı ve kullanılan üretim teknikleri gibi birçok faktörden etkilenir [87,88]. MMK'lerin korozyon davranışı elektrokimyasal yöntemler, taramalı elektron mikroskopu, enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi ve X-ışını kırınımı gibi çeşitli teknikler kullanılarak araştırılmıştır [89,90]. Bu çalışmalar, lokalize korozyon, çukurlaşma ve çatlak korozyonu gibi MMK'lerin korozyon mekanizmalarına ilişkin bilgiler sağlamıştır [91].

MMK'lerin korozyon direncini artırmak amacıyla uçucu kül [92], Al₂O₃ [93], bor karbür [94], TiO₂ nanoparçacıkları [95], SiC parçacıkları [96] ve grafit [97] gibi malzemelerin eklenmesi, korozyon direncini iyileştirmiştir. Bunun yanı sıra, MMK'lerin korozyon performansını artırmak için 2D malzemelerde yararlanılmaktadır. 2D malzemeler, yüksek yüzey alanları ve üstün mekanik, elektriksel ve termal özellikleri sayesinde metal matrisli malzemelere güç, dayanıklılık ve fonksiyonellik ekleyerek yenilikçi ve yüksek performanslı kompozitlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu özellikleri, 2D malzemelerin, korozyon karşısında etkili koruma sağlayan ve geniş uygulama potansiyeline sahip kompozitler üretmesine olanak tanır. Özellikle, yüksek bariyer performansı, mükemmel mekanik özellikler ve yapı stabilitesi sunduklarından, bu malzemelerden yapılan kompozitler

korozyon direncini artırmada etkilidir [98]. Bu alanda kullanılan katkılara MXene ve bor nitrür de dahildir.

Son yıllarda, bor katkı maddelerinin metal matrisli kompozitler üzerindeki çeşitli olumlu etkileri araştırılmış ve bu katkı maddelerinin sertlik, mekanik performans ve korozyon direncini artırma potansiyeline sahip olduğu gösterilmiştir. Bu kapsamda, bor nitrür (BN) katkı maddelerinin geçirimsizlik ve dirençlilik gibi benzersiz özellikleri, çeşitli metal alaşımlarının korozyon direncini artırma potansiyeline sahiptir [99,100]. Örneğin, h-BN nanofilmlerinin paslanmaz çelik yüzeylerde etkili bariyer kaplamaları olarak korozyon koruması sağladığı gözlemlenmiştir [101]. Ayrıca, BN nano katkıları, polimerik kompozitlerde dolgu maddesi olarak kullanıldığında elektriksel yalıtımı korurken termal iletkenliği artırmıştır [102]. BN nano katkılarının metal matrisli malzemelerde kullanımı, yeşil su bazlı yağlayıcılar ve korozyon inhibitörleri olarak etkili olup, sürtünme katsayılarını azaltmakla kalmayıp korozyon akımı yoğunluklarını da düşürmüştür [103]. Bunun yanı sıra, alüminyum alaşımlarına bor karbür (B₄C) eklenmesinin mekanik performansı ve korozyon davranışını iyileştirdiği bildirilmiştir [94]. Literatürde yapılan bazı çalışmalar bu etkileri desteklemekte ve bor katkı maddelerinin potansiyelini ortaya koymaktadır.

Gopinath ve arkadaşlarının [104] yaptığı çalışmada, Alüminyum 6061 matrisli kompozitlerin mekanik, aşınma ve korozyon özelliklerinin hibrit takviyeler kullanılarak nasıl iyileştirildiği incelenmiştir. Alüminyum 6061 alaşımı, farklı oranlarda bor nitrür (BN), alüminyum oksit (Al₂O₃) ve grafit parçacıkları ile karıştırılmıştır. Korozyon testleri, Al 6061 - 30 BN - 10 Al₂O₃ - 5C kompozitinin diğer kompozitler ve katkısız Al 6061 alaşımına kıyasla daha yüksek korozyon direncine sahip olduğunu göstermektedir. Bu kompozit, -0.526 ± 0.004 V potansiyel ve -0.983 ± 0.004 $\mu\text{A cm}^{-2}$ akım yoğunluğu ile belirgin bir şekilde üstün korozyon direnci sergilemiştir.

Paydar ve arkadaşlarının [105] yaptığı çalışmada, Watt çözeltisi kullanılarak nikel–bor nitrür–bor karbür (Ni–BN–B₄C) kompozitlerinin elektroliz yoluyla kaplanması incelenmiştir. Korozif davranış, hem saf nikel hem de Ni–BN–B₄C kaplamalar için %3.5 NaCl çözeltisinde polarizasyon eğrileri kullanılarak değerlendirilmiştir.

Bulgular, Ni–BN–B₄C kompozit filmlerin, saf nikel kaplamalardan çok daha yüksek korozyon direncine sahip olduğunu göstermiştir .

Ramadoss ve arkadaşları [106], Al7075 alüminyum matrisli hibrit kompozitlerin korozyon direncini artırmak amacıyla çeşitli oranlarda (%3, %6, %9) bor karbür (B₄C) ve sabit %3 bor nitridi (BN) kullanmışlardır. Kompozitlerde takviye parçacıklarının iyi dağıldığı ve Al₃BC, AlB₁₂, AlN gibi ikincil fazların oluştuğu görülmüştür. Bu eklemeler, kompozitlerin sertlik, çekme, basma, aşınma ve korozyon dirençlerini artırmıştır. Korozyon sonrası oluşan koruyucu tabaka, yüksek korozyon direncini desteklemektedir. Sonuçlar, bu kompozitlerin otomotiv ve deniz uygulamaları için uygun olabileceğini göstermektedir.

Adnan ve arkadaşlarının [107] çalışmasında, çeşitli ağırlık yüzdelerinde (%2, %4, %6, %8) nano BN ile güçlendirilmiş çinko alaşımlı metal matris kompozitler karıştırılmalı döküm yöntemiyle üretilmiştir. Korozyon testleri, bu kompozitlerin 3.5 wt.% NaCl çözeltisinde güçlendirilmemiş alaşımlardan daha iyi korozyon direnci gösterdiğini ortaya koymuştur. Nano BN miktarının artması, kompozitlerin korozyon hızını azaltmıştır.

Lu ve arkadaşlarının [108] yaptığı çalışmada, fonksiyonelleştirilmiş boron nitride nanosheet (f-BNNS) ve polipirrol (PPy) içeren epoksi kaplama, 3.5 wt% NaCl çözeltisinde 40 gün boyunca 15 nm/yıl korozyon hızı ve $1.9 \times 10^7 \Omega \text{ cm}^2$ empedans değeri sağlamıştır. Bu değerler, saf epoksiye göre 58 kat daha düşük korozyon hızı ve 100 kat daha yüksek empedans göstermektedir. Kaplamanın üstün korozyon direnci, BNNS'in homojen dağılımı ve polipirrolün sinerjik etkisiyle sağlanmıştır.

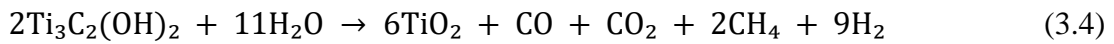
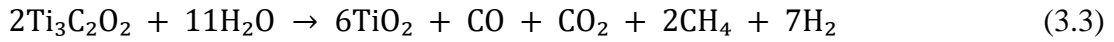
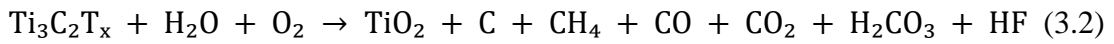
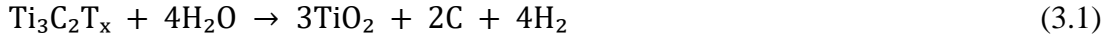
Husain ve arkadaşlarının [109] yaptığı çalışmada, h-BN'in deniz kaplamalarındaki korozyon öncesi uygulamaları incelenmiştir. h-BN/polimer hibrit kaplamaların paslanmaz çelik üzerine uygulanarak simüle edilmiş deniz suyunda elektro kimyasal tekniklerle performansı değerlendirilmiştir. h-BN/polimer kaplama, düşük korozyon akım yoğunluğu ($5,14 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$) ve korozyon hızı ($1,19 \times 10^{-3} \text{ mm/yıl}$) ile etkili korozyon koruması sağlamaktadır. Bu performans, boron nitride'in hidrofobik, inert ve dielektrik doğasına atfedilmektedir. Sonuçlar, kaplamalı paslanmaz çeliğin

iyileştirilmiş korozyon direncini göstermiştir. Korozyon direncinin artış mekanizması, elektro kimyasal empedans spektroskopisi ve potansiyodinamik analiz ile açıklanmıştır.

Sonuç olarak, bor katkı maddelerinin metal matrisli kompozitler üzerindeki etkileri, çeşitli mekanik ve korozyon direnci açısından belirgin avantajlar sunduğunu göstermektedir. Bor nitrür (BN) ve bor karbür (B₄C) gibi bor bazlı katkı maddeleri, metal alaşımlarının performansını önemli ölçüde iyileştirebilmektedir. Bu katkı maddeleri, hem mekanik özellikleri hem de korozyon direncini artırarak, özellikle otomotiv, deniz ve savunma sanayi gibi zorlu uygulamalarda daha uzun ömürlü ve dayanıklı malzemeler sağlamaktadır.

Son araştırmalar, MXene katkı maddelerinin metal matrisli kompozitlerdeki (MMK'lerdeki) korozyon üzerindeki etkisini incelemektedir. MXene, kompozit kaplamaların korozyon önleyici özelliklerini geliştirme potansiyeli göstermekte, ancak bazı olumsuz etkileri de mevcuttur. Özellikle yüksek elektriksel iletkenliği ve hidrofilik doğası, MXene'nin metallerle doğrudan temasında mikroelektrik korozyonu teşvik ederek metal substratların korozyonunu hızlandırabileceğini öne sürmektedir [110]. Bu durum, MXene katkı maddelerinin korozyon önleyici özelliklerini iyileştirme potansiyelini sınırlayabilir [111]. Ayrıca, reçine matrislerinde MXene nano dolgularının zayıf dağılımı, oksidasyonu ve çökmesi gibi zorluklar, bu malzemelerin pratik uygulamalarını kısıtlayabilir [112]. MXene'lerin kaplamaların korozyon direncini artırma potansiyeline rağmen, doğal olarak yeniden istiflenmeleri bu gelişmeyi engelleyebilir [111]. Elektrik iletkenliği ve hidrofilikliğinin, metal alt tabakalarda korozyonu hızlandırabilme riski, MXene'nin uzun vadeli metal korozyon korumasında kullanımını kısıtlayabilir [110]. Bu, korozyon koruması için MXene'lerin kullanımının önemli bir dezavantajını ortaya koymaktadır. Ayrıca, MXene'nin kompozitlere dahil edilmesi, termal iletkenliği, mekanik özellikleri ve yalıtımı etkileyerek malzeme özelliklerinde karmaşık değişikliklere yol açabilir [113]. Bu nedenle, MXene'lerin belirli alanlarda avantajlar sunabilmesine rağmen, entegrasyonlarının kompozit malzemenin genel performansı üzerinde karmaşık etkiler yaratabileceği vurgulanmaktadır. Sonuç olarak, MXene'lerin korozyon önleyici özellikleri geliştirme potansiyeline sahip olmasına rağmen, pratik uygulamaları zayıf

dağılım, doğal yeniden istiflenme ve metal alt tabakalarda korozyonun hızlanması gibi zorluklar nedeniyle sınırlı kalabilir. MXene'lerin oksidasyonu ve bozulması da önemli bir sorundur; oksijen, su ve sıcaklık gibi faktörler MXene'lerin bozulmasına yol açar ve ana oksidasyon ürünü titanyum dioksittir [98]. Bu reaksiyonlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:



Oksidasyon sorunlarının üstesinden gelmek için çeşitli yöntemler önerilmiştir. MAX faz sentezinin optimize edilmesi, MXene'nin yapısını ve bileşimini iyileştirebilir. Hazırlık sürecindeki modifikasyonlar, kararlılığını artırabilir. Düşük sıcaklık, anaerobik ortam ve inert gaz kullanımı gibi depolama koşullarının düzenlenmesi, oksidasyonu ve bozulmayı geciktirebilir. Ayrıca, yüzey modifikasyonu ve koruyucu tabaka sağlanması da etkili stratejiler olarak öne çıkmaktadır [98].

Literatürde, Ti_3C_2 MXene'in farklı metal matrisler ve kaplama malzemeleri üzerindeki korozyon koruma performansını inceleyen çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar, Ti_3C_2 MXene'in epoksi kaplamalardan alüminyum alaşımlarına, poliüretan kaplamalardan bakır matris kompozitlere kadar geniş bir uygulama yelpazesinde etkili korozyon koruma sağladığını ve bu malzemelerin korozyon direncini belirgin şekilde artırdığını ortaya koymaktadır. Bu çalışmalar aşağıda özetlenmiştir:

Yan ve arkadaşlarının [114] yaptığı çalışmada, hazırladıkları Ti_3C_2 nano plakaları epoksi kaplamalarda fiziksel bariyer olarak kullanılmıştır. Potansiyodinamik polarizasyon, EIS analizi, su emme testi ve hızlandırılmış korozyon testi ile değerlendirilen sonuçlar, Ti_3C_2 nano plakaların korozyon direncini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir.

Nie ve arkadaşlarının [115] yaptığı çalışmaya göre, iki boyutlu Ti_3C_2 MXene nanoplakaları, AA2024 alüminyum alaşımı yüzeyindeki γ -glipidoksipropiltrimetoksisilane (γ -GPS) filmine entegre edilerek korozyon direnci artırılmıştır. MXene entegrasyonu, silan filminin kalınlığını ve yoğunluğunu önemli ölçüde artırmış, daha düzgün ve az kusurlu filmler elde edilmiştir. Kompozit filmler, Si-O-Al kimyasal bağları yoluyla alt tabakaya mükemmel yapışma göstermiştir. Film, hem anodik hem de katodik korozyonu engelleyerek korozyon akım yoğunluğunu ve korozyon çözeltisinin metal yüzeyine difüzyon hızını azaltmıştır. Nötr tuz püskürtme testleri, MXene entegreli silan filminin geleneksel kromat kaplamalardan daha iyi korozyon direnci sağladığını göstermiştir. Ayrıca, kompozit filmler, MXene'in antibakteriyel özellikleri sayesinde bakterileri öldürme özelliği de göstermiştir. Bu çalışma, silan filminin korozyon koruma özelliklerini artırırken antibakteriyel özellikler ekleyen basit ve etkili bir strateji geliştirmiştir ve endüstriyel, tıbbi ve evsel uygulamalarda yüksek potansiyel taşımaktadır.

Dong ve arkadaşlarının [116] yaptığı çalışmada, Ti_3C_2 MXene ve TiN nanopartiküllerinin kullanıldığı bir korozyon koruma kaplaması geliştirilmiştir. Farklı sıcaklıklarda kalsine edilen MXene ve TiN dopingli kaplamalar, X-ray ve elektron mikroskopları ile analiz edilmiştir. 450 °C'de kalsine edilen MXene, en iyi fotokatalitik aktiviteyi sağlamıştır. %4 TiN eklendiğinde, kaplama görünür ışıkta daha iyi emilim göstermiş ve enerji bant aralığı azalmıştır. Bu kaplama, 304 paslanmaz çelikle kullanıldığında hem güneş ışığı altında hem de ışık olmadan etkili korozyon koruması sağlamıştır. Performans, TiO_2 ve MXene'in yakın temasından ve TiN'in plazmon etkisinden kaynaklanmaktadır.

Sheng ve arkadaşlarının [117] yaptığı çalışmada, Ti_3C_2 MXene, su bazlı poliüretan (WPU) kaplamalara eklenerek bir kompozit kaplama hazırlanmıştır. İlk olarak, MAX faz materyalleri HF asidi ile işlenmiş ve su ile ayrıştırılarak tek katmanlı MXene nanosheet'leri elde edilmiştir. Daha sonra, bu nanosheet'ler, düşük miktarlarda (%0–0,4 wt) WPU ve izosiyanat sertleştirici ile karıştırılmış ve Q235 yumuşak çeliğe uygulanmıştır. Analizler, tek katmanlı MXene nanosheet'lerinin WPU içinde düzgün şekilde dağıldığını göstermiştir. %0,4 MXene içeren WPU/ Ti_3C_2 kaplamalar, korozyon akımını $2,143 \times 10^{-6}$ A/cm² seviyesine düşürmüştür, bu da boş WPU'nun

1.599×10^{-5} A/cm² değerine göre belirgin bir iyileşme sağladığını göstermektedir. Bu sonuç, Ti₃C₂ MXene'in WPU kaplamalarının korozyon koruma performansını önemli ölçüde artırdığını ortaya koymaktadır.

Song ve arkadaşlarının [118] yaptığı çalışmada, Spark Plasma Sinterleme yöntemi kullanılarak üretilen Ti₃C₂ ve TiC katkılı bakır matris kompozitlerin termal ve korozyon davranışlarını incelenmişlerdir. Elde edilen sonuçlar, Ti₃C₂/Cu kompozitlerinin, TiC/Cu kompozitlerine kıyasla üstün korozyon direnci ve yaklaşık %15 artmış termal iletkenlik sergilediğini göstermektedir. Ağırlıkça %2 Ti₃C₂ içeren kompozitler, TiC/Cu kompozitlerine göre termal iletkenlikte %15'lik bir artış göstermiştir. Bununla birlikte, Ti₃C₂/Cu kompozitlerinin elektriksel direnci, saf Cu'ya kıyasla %100 oranında artış göstermiştir.

Wu ve arkadaşlarının [119] gerçekleştirdiği çalışmada, AZ31 alaşımının korunması amacıyla MgAl-V₂O₇⁴⁻ LDHs ve (PEI/MXene) kaplamaları kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, 10 katmanlı (PEI/MXene) filmlerin LDHs kaplamasını en iyi şekilde koruduğunu ve en yüksek korozyon koruma performansını sağladığını göstermektedir. Ayrıca, PEI ve Ti₃C₂ (MXene) kaplamalarının da korozyon direncini önemli ölçüde artırdığı belirlenmiştir.

Jia ve arkadaşlarının [120] yaptığı çalışmada, Al alaşımı için koruma sağlayan Ti₃C₂Tx/layered double hydroxide (LDH) heteroyapılı kaplama önerilmiştir. Bu kaplama, yerinde büyütme ve batırma kaplama işlemi ile hazırlanmıştır. Karmaşık fonksiyonelleştirme, dağılma ve yapı kontrolü gerektirmeden, heteroyapılı kaplama elektrokimyasal testler ve mikro yapı karakterizasyonları ile geliştirilmiş bir korozyon direnci sunmaktadır. MXene'in eklenmesi, korozyon akım yoğunluğunu yaklaşık 40 kat azaltmış ve kaplama direncini 54 kat artırmıştır. Ayrıca, Ti₃C₂Tx/LDH kaplaması, 3 gün boyunca %3,5 NaCl çözeltisinde bekledikten sonra kendi kendini onarma yeteneği göstermiştir ve bu da Al alaşımının 30 gün boyunca uzun süreli korozyon koruması sağlar. Koruyucu davranış, 2D MXene'nin metallere önce elektrokimyasal korozyon reaksiyonuna katılma ve elektron kaybetme özelliğine atfedilmektedir. Bu strateji, agresif ortamlarda kullanılan Al alaşımı için 2D malzemeler bazlı korozyon kaplamalarının tasarımı için basit ve etkili bir yaklaşım sunmaktadır.

Sonuç olarak, MXene katkılı kaplamalar, metal matrisli kompozitlerde korozyon koruma potansiyeli sunmakla birlikte, oksidasyon, zayıf dağılım ve mikroelektrik korozyonu gibi zorluklarla sınırlı kalmaktadır. Ancak, çeşitli çalışmalar, MXene'in farklı kaplama ve kompozit sistemlerinde korozyon direncini artırma potansiyelini ortaya koymuş ve gelecekteki araştırmalarda bu malzemelerin optimizasyonu ve uygulama alanlarının genişletilmesi gerektiğini göstermektedir.

3.2. ÇALIŞMANIN ÖZGÜN HUSUSLARI

Alüminyum bazlı malzemeler düşük yoğunluğu nedeniyle ticari olarak pek çok alanda kullanılmaktadır. Ancak, bu malzemelerin mekanik dayanımlarının düşük olması önemli bir dezavantajdır. Bu sorunu gidermek için alüminyum, pek çok seramik takviye ile kompozit hale getirilmiştir. Bu takviyelerden biri de 2D geometrili bor nitrür partikülleridir. Ancak, bu partiküllerin düşük ıslanabilirliği önemli bir sorun teşkil etmektedir. Bu sorunu gidermek amacıyla yeni nesil takviyeler geliştirilmektedir. Bu takviyelerden biri de MAX fazından elde edilen MXene yapılarıdır. MXene yapıları, üstün mekanik özellikleri nedeniyle alüminyum bazlı malzemelerin dayanımlarını artırma potansiyeline sahiptir. Ancak, şimdiye kadar yapılan çalışmalarda MXene'nin kullanılmadığı ve literatürde bu konuda önemli bir eksiklik olduğu düşünülmektedir. Bu eksikliği gidermek adına, bu çalışmada alüminyuma MXene takviyesi eklenerek mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, geleneksel bir takviye olan bor nitrür de kullanılarak karşılaştırmalı analizler yapılmıştır. Bu çalışmanın özgünlüğü, literatürde daha önce ele alınmamış ve mevcut bilgi birikimine önemli katkılar sağlayacak birkaç kritik noktayı içermektedir. Öncelikle, elektronik sektöründe ve polimer matrislerde yaygın olarak kullanılan yeni nesil iki boyutlu bileşen olan MXene (Ti_3C_2Tx) yapısının alüminyum matrisli kompozitlerdeki etkisi incelenmiştir. MXene'nin metal matrisle denenmesi, bu çalışmanın yenilikçi bir yönünü oluşturmaktadır. Ayrıca, MXene'nin tek başına ve geleneksel bir iki boyutlu bileşen olan kendinden yağlayıcı bor nitrür ile birlikte kullanılarak alüminyum matrisli kompozitlerin aşınma ve işlenebilirlik davranışlarına olan etkisi, literatürde daha önce ele alınmamış bir konudur. Bu çalışmada, MXene'nin alüminyum matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini nasıl geliştirebileceği ve bor nitrür ile sinerjik bir etki gösterip göstermeyeceği detaylı

olarak araştırılmıştır. Bir diğer yenilikçi yön ise, üretilen kompozitlerin işlenebilirlik (delinebilirlik) testlerinin, 3D yazıcı ile üretilmiş düşük maliyetli bir dinamometre kullanılarak gerçekleştirilmesidir. Bu yaklaşım, mevcut işlenebilirlik test yöntemlerinde kullanılan pahalı ve zaman alıcı test cihazlarının yerine geçerek test süreçlerini hızlandırabilir ve maliyetleri düşürebilir. 3D yazıcı ile üretilmiş düşük maliyetli dinamometre kullanımı, işlenebilirlik testlerinin daha erişilebilir hale gelmesini sağlayarak araştırmacıların ve endüstrinin bu alandaki çalışmalarını daha verimli bir şekilde yürütmelerine olanak tanıyacaktır. Sonuç olarak, bu çalışma bor nitrür ve MXene takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin üretim ve test süreçlerinde önemli yenilikler sunarak literatüre özgün katkılar sağlamıştır. Hem bu yenilikçi malzeme kombinasyonları hem de düşük maliyetli test cihazlarının kullanımı, gelecekteki araştırmalar ve endüstriyel uygulamalar için önemli bilgiler sunacaktır.

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, MMK'lerin mekanik, tribolojik ve korozif özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmalar ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.

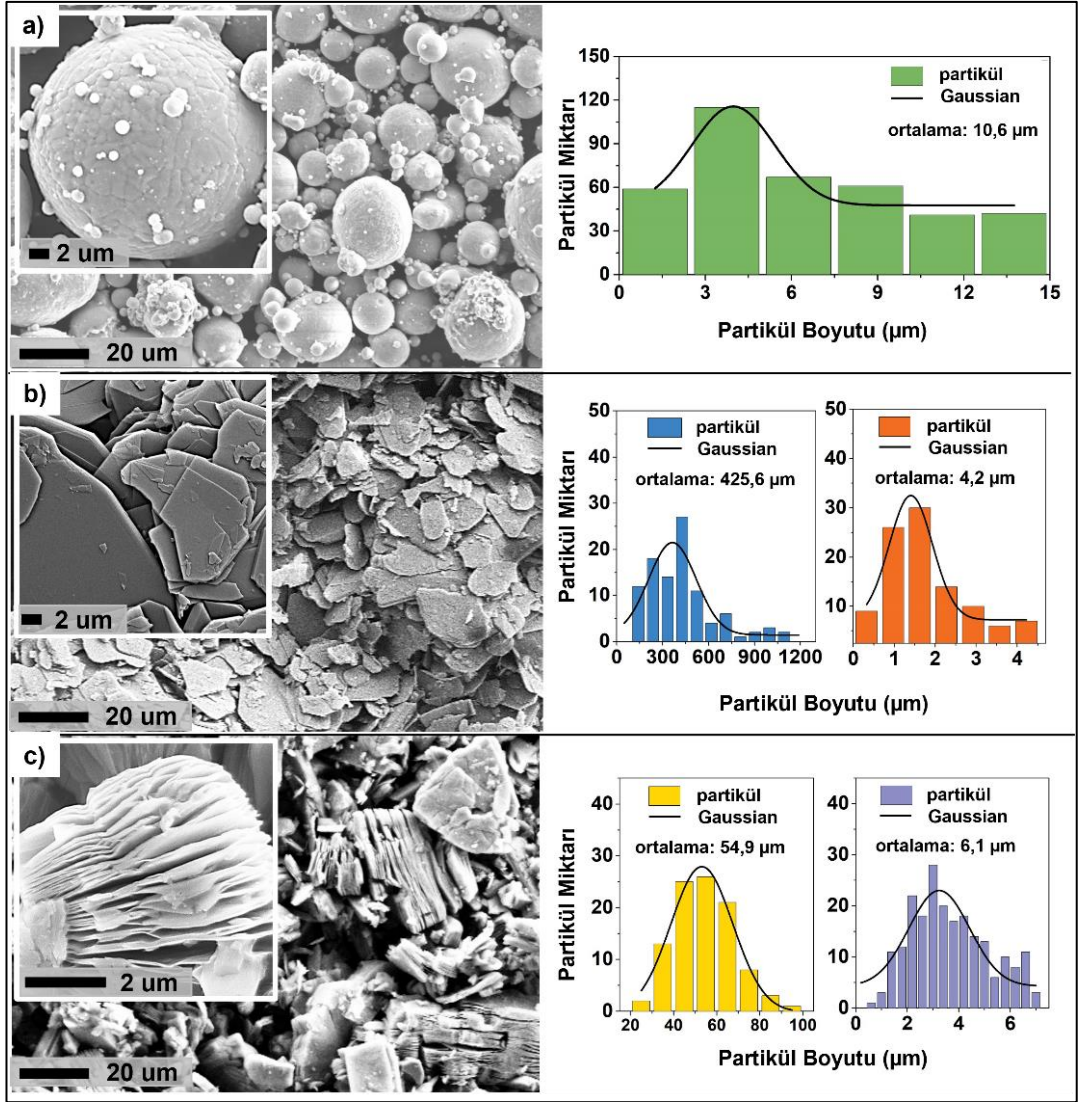
4.1. KULLANILAN MALZEMELER

Bu çalışmada matris malzemesi olarak AA7075 alaşımı, takviye malzemesi olarak ise h-BN (heksagonal bor nitrür) ve MXene (Ti_3C_2) kullanılmıştır. MXene (Ti_3C_2), MAX (Ti_3AlC_2) fazının aşındırılmasıyla üretilmiştir. Bir sonraki bölümde bu süreç detaylı olarak anlatılacaktır. Matris malzemesi olarak kullanılan AA7075 alaşım tozları Çizelge 4.1'deki kompozisyonda olduğu gibi Nanografi firmasından satın alınmıştır. Altıgen bor nitrür partikülleri Henze firmasından temin edilmiştir. MXene ($Ti_3C_2T_x$) partiküllerinin üretimi için kullanılan MAX (Ti_3AlC_2) fazı Nanografi firmasından temin edilmiştir.

Çizelge 4.1. AA7075'in kimyasal bileşimi.

Kompozisyon	Zn	Si	Fe	Ti	Cu	Mn	Mg	Cr	Diğer
Yüzde	5,1-6,1	0,40	0,50	0,20	1,2-2,0	0,30	2,1-2,9	0,18-0,28	0,65

Kullanılan tozların ortalama tanecik boyutları, SEM görüntülerinden yararlanılarak ImageJ programı ile hesaplanmıştır. Tozların SEM görüntüleri ve histogram grafikleri Şekil 4.1'de verilmiştir. AA7075 alaşımının çoğunlukla küresel formda olduğu (Şekil 4(a)) ve ortalama boyutu yaklaşık 10,6 μm olarak hesaplanmıştır. Takviye malzemesi olarak kullanılan bor nitrür (BN), levha benzeri (2D) bir geometriye sahip olduğu (Şekil 4(b)), ortalama genişlik boyutunun 4,2 μm ve kalınlığının 425 nm olduğu belirlenmiştir. Bir diğer takviye malzemesi MXene ($Ti_3C_2T_x$) plakalarının (Şekil 4(c)) ortalama boyutu 6,1 μm , plakaların ortalama kalınlığı ise 54,9 nm olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.1. SEM görüntüleri ve ortalama tanecik boyutları a) AA7075, b) h-BN ve c) MXene ($Ti_3C_2T_x$) [59].

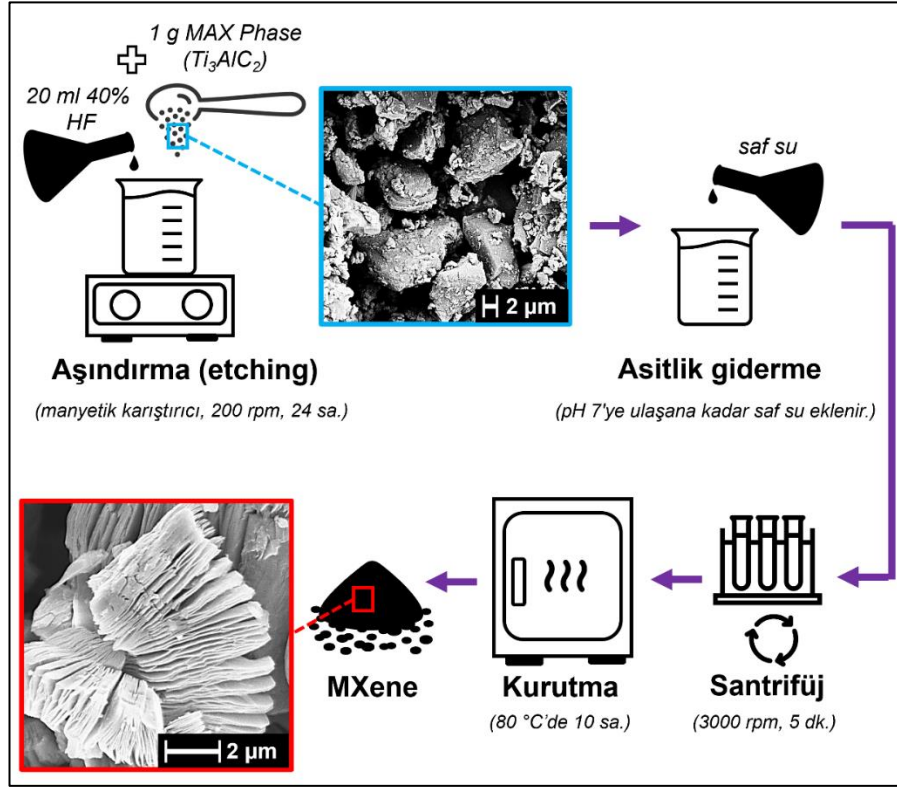
4.2. KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ

Kompozitlerin üretimine geçilmeden önce ilk olarak takviye malzemesi olan MXene (Ti_3C_2) üretilmiş daha sonra üretime aşamalarına geçilmiştir.

4.2.1. MXene Üretimi

Mxene malzemesi ($Ti_3C_2T_x$), MAX (Ti_3AlC_2) fazından Al tabakasının delaminasyonu ile sentezlenmiştir [121]. Başlangıçta, 1 gram Ti_3AlC_2 tozu kapaklı bir polietilen kaba yerleştirildi. Kaba bir manyetik karıştırma çubuğu eklendi ve manyetik bir karıştırıcı

üzerine yerleştirildi. Ardından, 20 ml %40'lık HF çözeltisi kaba yavaşça ilave edildi. Ekleme tamamlandıktan sonra, dağlama işlemi 24 saat boyunca 200 rpm'de karıştırılarak gerçekleştirildi. Elde edilen karışım daha sonra 3000 rpm'de 5 dakika santrifüj edilmiş ve çökelti pH 7'ye ulaşana kadar damıtılmış su ile yıkanmıştır. Elde edilen malzeme son olarak $Ti_3C_2T_x$ fazını elde etmek için 80 °C'de 10 saat boyunca fırında kurutulmuştur. Bu işlemlerin tümü Şekil 4.2'de de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. MXene üretim aşamaları [59].

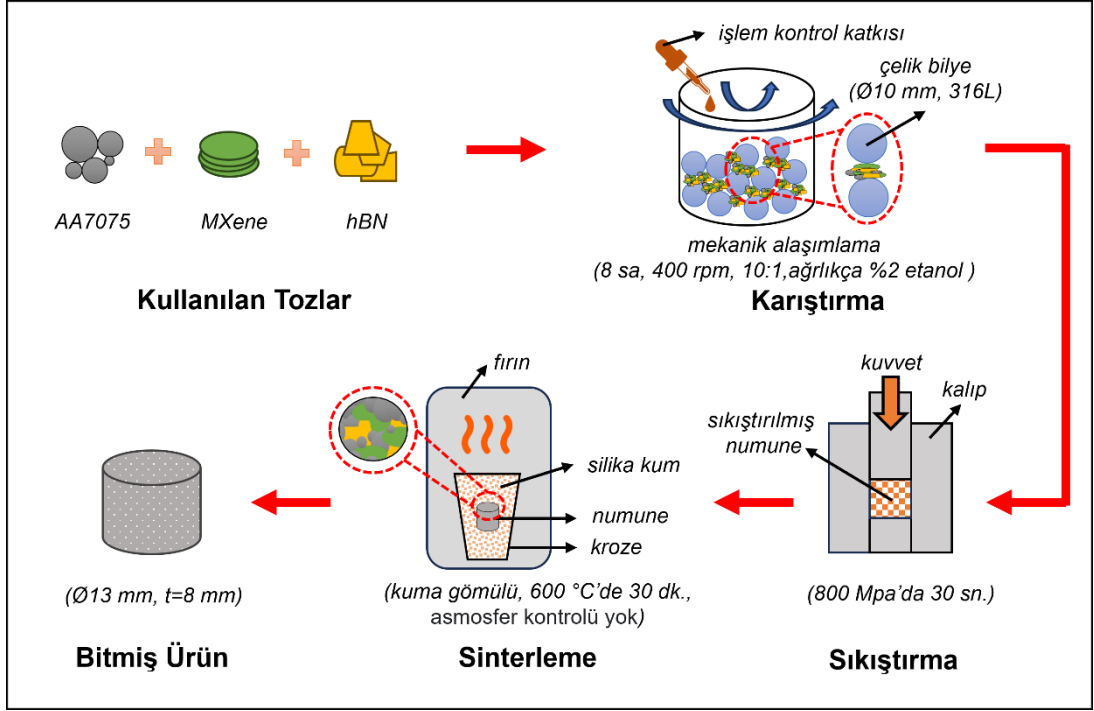
4.2.2. Kompozitlerin Üretim Adımları

Kompozitlerin üretimi üç aşamada gerçekleştirilmiştir: mekanik alaşımlama yoluyla tozların karıştırılması, ardından karışımların soğuk preslenmesi ve son olarak sinterleme. Toz karıştırma işlemi sırasında 1:10 oranında toz karışımı ve 316L çelik bilye kullanılmıştır. İşlem kontrol katkısı olarak ağırlıkça %2 etanol kullanılmıştır. Tozlar 400 rpm'de 10 dakika çalışma ve 5 dakika dinlenme olmak üzere 8 saat karıştırılmıştır. Bu süreçte, AA7075 tozları başlangıçta ağırlıkça %2 hekzagonal bor nitrür ve MXene ile ayrı ayrı karıştırılmıştır. Daha sonra bu oran her iki bileşen için

ağırlıkça %5 olarak yeniden ayarlanmıştır. Son olarak, AA7075 tozu ağırlıkça %2 bor nitrür ve ağırlıkça %2 MXene ile karıştırılmıştır. Daha sonra, bu tozlar 13 mm çapında paslanmaz çelik bir kalıp kullanılarak 800 MPa basınç altında 30 saniyede ayrı ayrı preslendi. Bu işlem sırasında her numune için yaklaşık 3 g toz karışımı kullanıldı. Son olarak, preslenen numuneler sinterleme işlemi için bir fırına aktarılmıştır. Fırın başlangıçta 10°C/dk hızla 600°C'ye kadar ısıtılmış, 30 dakika boyunca bu sıcaklıkta tutulmuş ve ardından numuneler hızla soğutulmuştur. Üretilen kompozitleri karşılaştırmak için aynı koşullar altında saf AA7075 alaşımı da üretilerek üretim süreci tamamlanmıştır. Üretimlerde kullanılan bileşenlerin ağırlık yüzdeleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Tüm bu üretim süreçleri Şekil 4.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Üretilen kompozitlerin ağırlıkça % bileşen miktarları.

Numune	Ağırlıkça bileşim (%)		
	ağ. BN %	ağ. MXene %	ağ. AA7075 %
Numune 1	-	-	100
Numune 2	2	-	98
Numune 3	5	-	95
Numune 4	-	2	98
Numune 5	-	5	95
Numune 6	2	2	96



Şekil 4.3. Numune üretim adımları.

4.2.3. Mekanik Alaşımlama İşlemleri

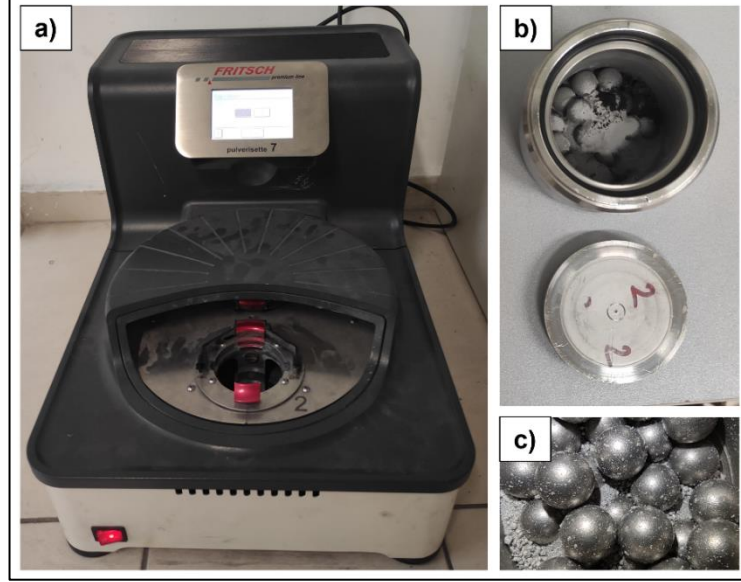
Mekanik alaşımlama işlemi, planet tipi yüksek enerjili Fritsch marka Pulverisette 7 model cihaz ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.4(a)). Cihazda, iki adet 30 ml'lik paslanmaz çelik karıştırma kabı (Şekil 4.4(b)) bulunmaktadır. Karıştırma işleminde 316L kalite bilyeler kullanılmıştır (Şekil 4.4(a)). Mekanik alaşımlama parametreleri Çizelge 4.3'te verilmiştir. İşlem kontrol katkısı (İKK) olarak %2 oranında etanol kullanılmıştır. İKK, tozların öğütme sürecini iyileştirerek topaklanmayı ve soğuk kaynaklanmayı önlemiştir.

Çizelge 4.3. Mekanik alaşımlama parametreleri.

Süre (saat)	Çalışma(dk)- Duraklama(dk)	Hız (rpm)	Bilye Çapı (mm)	Bilye Kalitesi	Oran (Bilye:Toz)	İ.K.K. (ağırlıkça %)
8	10-5	400	10	316L	10:1	2 etanol

Cihaz, öğütme kabının ters yönde dönen bir ana disk üzerinde kendi eksenini etrafında dönmesiyle çalışır. Bu hareket, merkezkaç kuvveti oluşturarak bilyelerin ve

malzemenin çanağın iç duvarına yüksek hızla çarpmasını sağlar, böylece malzemeler hızlıca ezilip öğütülür ve homojen bir şekilde karışır.



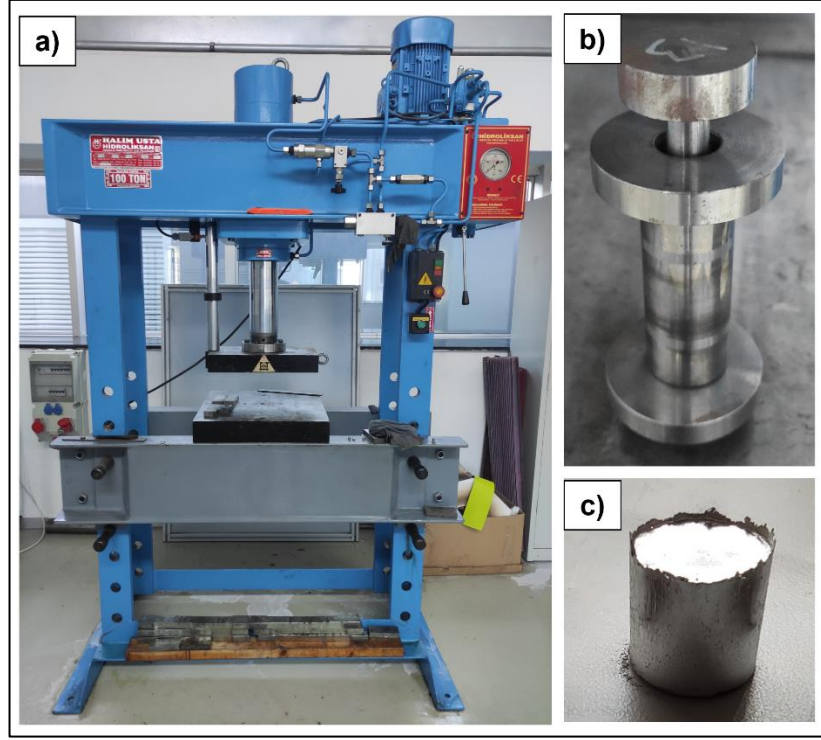
Şekil 4.4. Mekanik alaşımlama işleminde kullanılan a) gezegen bilyalı değirmen, b) karıştırma kabı ve c) paslanmaz çelik bilyeler.

4.2.4. Soğuk Pres İşlemleri

Mekanik alaşımlama sonrası karıştırılan tozlar Hidroliksan firmasına ait 100 tonluk pres kullanılarak (Şekil 4.5(a)), çelik kalıpta (Şekil 4.5(b)) sıkıştırılarak yeşil kompakt numuneler (Şekil 4.5(c)) elde edilmiştir. Presleme işlemine ait parametreler Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Soğuk pres parametreleri.

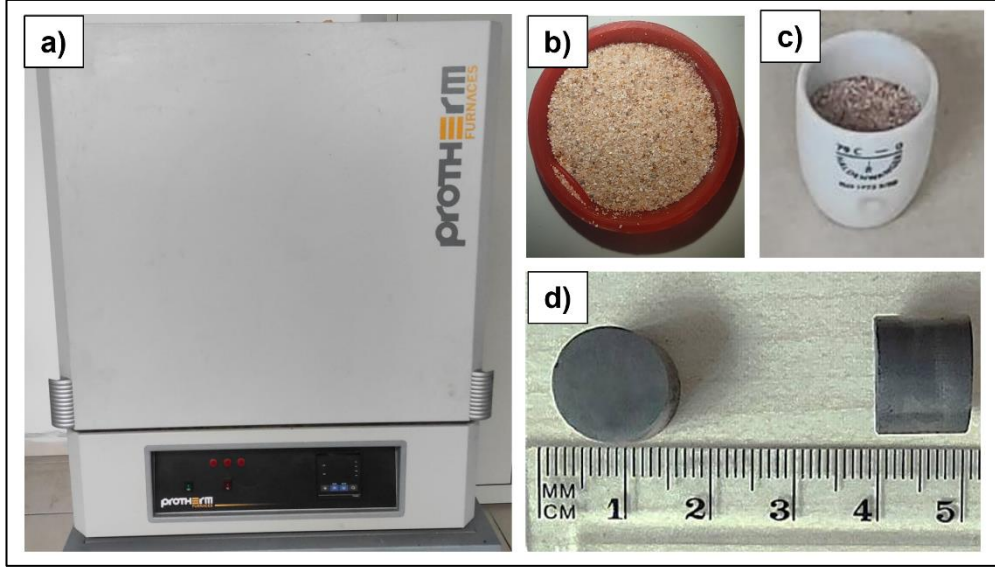
Pres Basıncı (MPa)	Presleme Süresi (sn)	Toz Miktarı (g)	Kalıp Tipi	Deney Sıcaklığı
800	30	3	Tek Eksenli	Oda Sıcaklığı



Şekil 4.5. Soğuk presleme işleminde kullanılan a) 100 tonluk pres, b) tek eksenli kalıp ve c) presleme sonrası oluşan sıkıştırılmış (bulk) numune.

4.2.5. Sinterleme İşlemleri

Soğuk pres işlemi sonrasında yeşil kompakt numunelerin taneciklerinin birbirine daha iyi bağlanması ve gözeneklerin azaltılması için sinterleme işlemine geçildi. Üretim sürecinin son adımı olan sinterleme işlemi, Protherm marka ısı işlem fırınında (Şekil 4.6(a)) silika kum dolu krozeler içine (Şekil 4.6(b)) yerleştirilen numunelerle (Şekil 4.6(c)) gerçekleştirildi. Fırın, $10^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ hızla 600°C 'ye kadar ısıtıldı, bu sıcaklıkta 30 dakika boyunca tutuldu ve ardından numuneler hızla soğutuldu. Sonuç olarak üretilen nihai numuneler 13 mm çapında ve 10 mm yüksekliğinde olup Şekil 4.6(d)'de gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Sinterleme işleminde kullanılan a) ısıl işlem fırını, b) silika kum, c) kroze ve d) üretilen numuneler.

4.2.6. Metalografik İşlemler

Sinterleme işlemi sonrasında numunelerin iç yapısını, bileşimini ve özelliklerini anlamak amacıyla sırasıyla zımparalama ve parlatma işlemleri uygulanmıştır. Dağlama işlemine gerek duyulmamıştır. Zımparalama aşamasında, 600, 800, 1200 ve 2500 grit büyüklüğündeki SiC zımpara kağıtları kullanılmıştır. Parlatma aşamasında ise, başlangıçta 6 ve 3 mikron elmas solüsyonları kullanılmış, ardından 0,3 mikron alümina ile son parlatma gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler, Şekil 4.7'de gösterilen cihazda yapılmıştır.



Şekil 4.7. Zımparalama ve parlatma cihazı (Struers Tegramin 30).

4.3. YAPISAL KARAKTERİZASYONLAR

Karakterizasyon çalışmaları, öncelikle kompozitlerin yoğunluğunun ölçülmesiyle başlamış, ardından XRD ve SEM analizleri yapılmıştır.

4.3.1. Yoğunluk Ölçümü

Yoğunluk ölçümünde Kern marka ACJ 220-4M model hassas tartı ($\pm 0.0001g$) üzerine Arşimed prensibiyle çalışan yoğunluk ölçüm kiti (Şekil 4.8.) yerleştirilerek gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde, önce numune hava içinde tartıldı. Daha sonra aynı numune saf su içine yerleştirilip bir müddet bekledikten sonra su içerisindeki ağırlığı belirlendi. Elde edilen veriler, Eşitlik 4.1'de verilen denklem kullanılarak hesaplandı.

$\rho_{gerçek}$: numunelerin gerçek yoğunluğunu,

m_{hava} : numunenin havada ölçülen ağırlığını,

m_{su} : numunenin suda ölçülen ağırlığını ve

ρ_{su} : saf suyun yoğunluğunu ifade etmektedir[122].

$$\rho_{gerçek} = \frac{m_{hava}}{m_{hava} - m_{su}} \rho_{su} \quad (4.1)$$



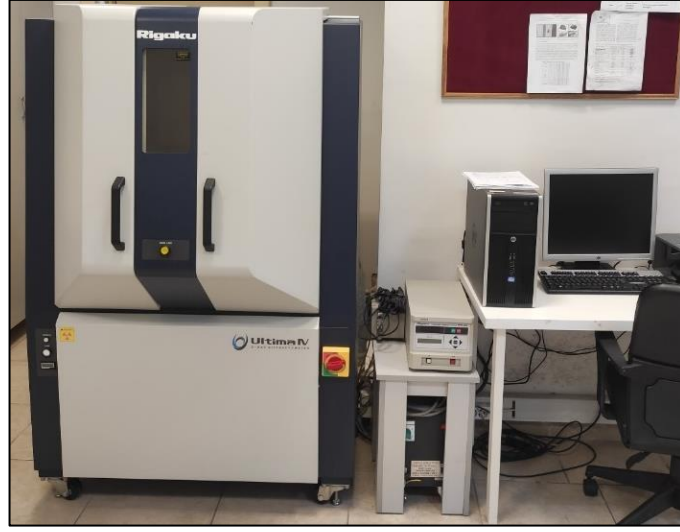
Şekil 4.8. Arşimet prensibi ile yoğunluk ölçme kiti.

4.3.2. Kristal Yapı Karakterizasyonu

Üretilen numunelerin kristal yapılarını doğrulamak için Çizelge 4.5'teki parametrelere göre, Rigaku Ultima IV XRD cihazı (Şekil 4.9.) kullanılmıştır. Çoğu numune için sürekli tarama yöntemi tercih edilmiş olup, "yıldız (*)" işareti ile belirtilen örneklerde ise sabit zamanlı tarama yöntemi kullanılmıştır. Sabit zamanlı tarama, özellikle düşük sinyal yoğunluğuna sahip numunelerin analizinde kullanılan bir tekniktir [123].

Çizelge 4.5. XRD cihazı parametreleri.

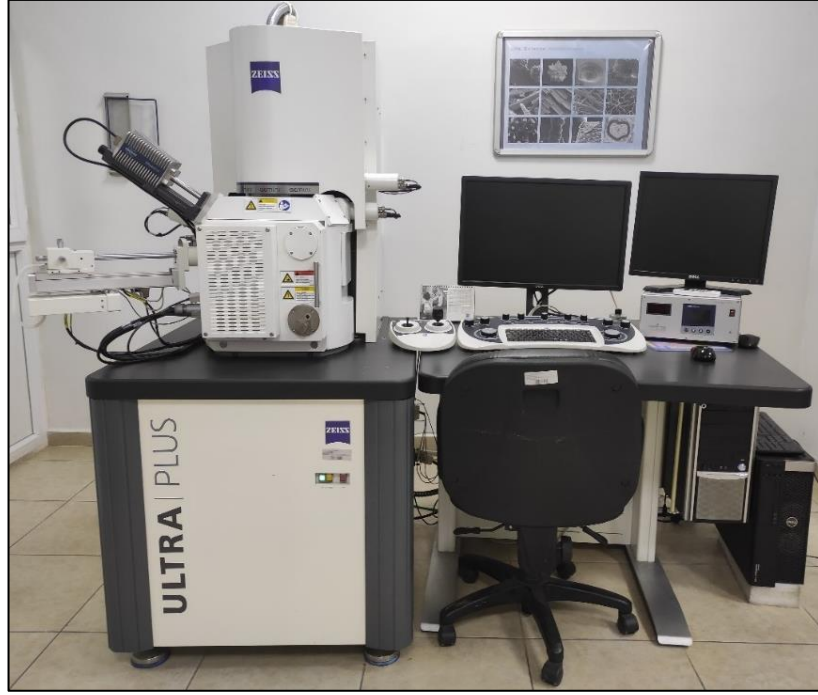
Numune	X-ray	Tarama modu	Adım genişliği	Tarama aralığı
AA7075 tozu, h-BN tozu ve MXene tozu	30 kV/ 20 mA	continuous scan (sürekli tarama)	0,02 °	0 ° - 80 °
Bulk numuneler	30 kV/ 20 mA	continuous scan (sürekli tarama)	0,02 °	0 ° - 80 °
*%5 MXene katkılı bulk numune	30 kV/ 20 mA	fix time scan (sabit zamanlı tarama)	0,05 °	17,0 ° – 19,0 °
*%5 h-BN katkılı bulk numune	30 kV/ 20 mA	fix time scan (sabit zamanlı tarama)	0,05 °	25,5 ° – 27,5 °



Şekil 4.9. XRD cihazı.

4.3.3. Mikro Yapı Karakterizasyonu

Mikroyapı analizi, EDS özellikli Carl Zeiss Ultra Plus taramalı elektron mikroskobu (Şekil 4.10) kullanılarak yapılmıştır. SEM görüntüleri ile, numunenin yüzey morfolojisi ve mikroyapı detayları incelenmiştir. Ayrıca, EDS (veya EDX) analizi ile SEM cihazı birlikte kullanılarak numunenin kimyasal bileşimi belirlenmiş ve elementlerin dağılımı ile konsantrasyonu haritalandırılmıştır. EDS spektrumları, numunede bulunan elementlerin enerji seviyelerine karşılık gelen karakteristik X-ışını piklerini göstererek elementel analiz için kritik bilgiler sağlamıştır.



Şekil 4.10. SEM cihazı.

4.4. MEKANİK TESTLER

Bu bölümde, üretilen kompozit numunelerin mekanik özelliklerini değerlendirerek dayanıklılık ve kullanım amacına uygunluk açısından kritik bilgiler sağlayan sertlik ve basma testleri ele alınmıştır.

4.4.1. Sertlik Testi

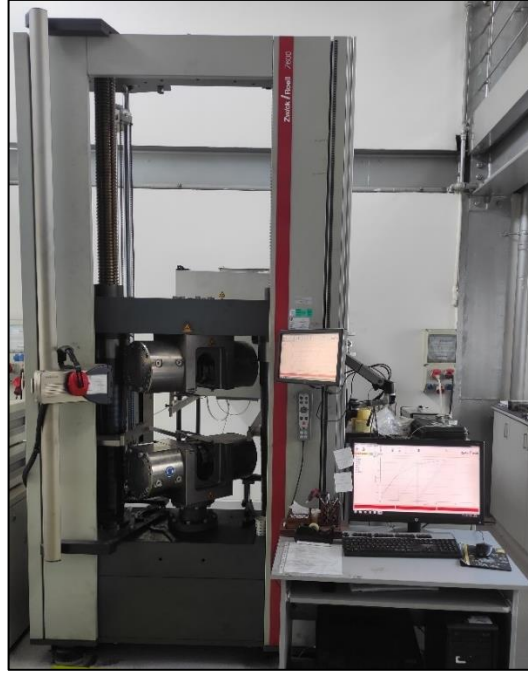
Sertlik testleri, QNESS Q10 A+ Mikro sertlik ölçüm cihazı (Şekil 4.11) kullanılarak Vickers yöntemiyle HV2 parametresinde, yani 2 kilogram kuvvet (kgf) uygulanarak, 10 saniye boyunca gerçekleştirilmiştir. Bu testte elmas uç malzeme yüzeyine bastırılarak oluşturulan iz üzerinden sertlik ölçülür.



Şekil 4.11. Sertlik ölçüm cihazı.

4.4.2. Basma Testi

Basma testleri oda sıcaklığında, Zwick marka Z600 model test cihazında (Şekil 4.12), 5 MPa ön yükleme koşullarında ve 2 mm/dk test hızında gerçekleştirilmiştir. Test çıktısı olarak gerilme-deformasyon grafiği (stress-strain) grafiği elde edilmiştir.



Şekil 4.12. Basma testi cihazı.

4.5. TRİBOLOJİK TESTLER

Bu bölümde, üretilen kompozit numunelerin tribolojik özelliklerini değerlendirmek amacıyla kullanılan aşınma testleri ve işlenebilirlik (delik delme) testleri ele alınmıştır.

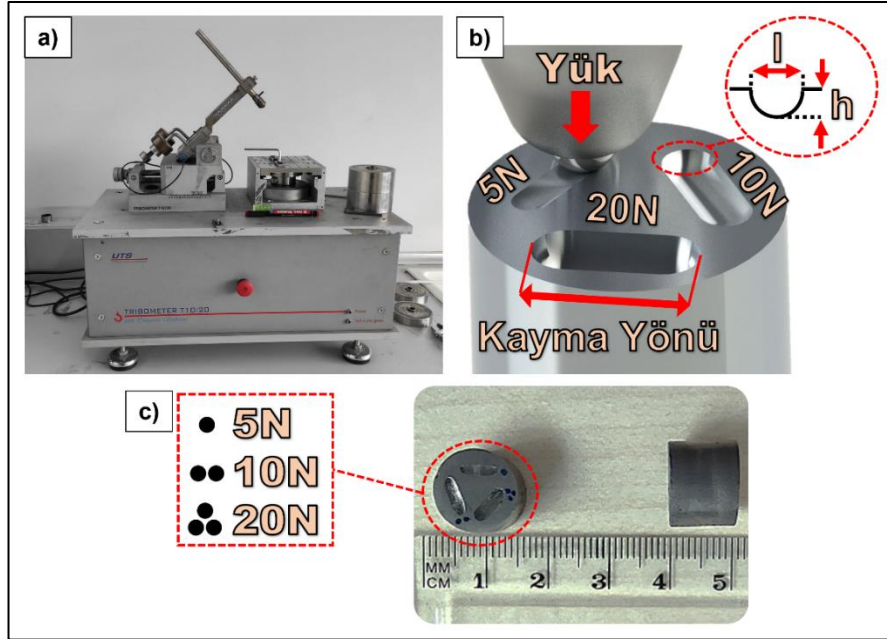
4.5.1. Aşınma Testi

Hazırlanan numunelerin tribolojik özellikleri, ASTM G133-05'te belirtilen prosedür A'ya uygun olarak UTS Tribometre cihazı (Şekil 4.13(a)) kullanılarak ileri geri hareket eden bilye-düz aşınma testleri ile incelenmiştir. Tüm testler, $25\pm 3^{\circ}\text{C}$ oda sıcaklığında ve $\%40\pm 5$ bağıl nemde, numunelerin taban düzlemine paralel yüzeylerinde gerçekleştirilmiştir. Bu denemeler boyunca, yük parametreleri her numune için 5, 10 ve 20 N olarak ayarlanmış, 3,0 Hz'lik sabit bir frekans korunmuştur. Aşındırıcı karşı malzeme olarak 6 mm çapında ve 0,02 mm yüzey pürüzlülüğüne sahip AISI420 Inox çelik bilyeler kullanılmıştır. Bilyenin strok mesafesi 5 mm, toplam kayma mesafesi ise testler boyunca 100 m olarak belirlenmiştir. Sürtünme katsayısı davranışı, deneyler sırasında tribometrenin veri işleme yazılımı tarafından kaydedilmiştir. Ölçümlerin

ardından, spesifik aşınma oranları (W_r) her bir numune için Archard denklemi (Eşitlik 4.2) kullanılarak hesaplanmıştır [123,124].

$$W_r = \frac{W_v}{F_N \times l} \quad (4.2)$$

Denklemden W_r , aşınma hacmini, F_N uygulanan yükü ve l toplam kayma mesafesini göstermektedir. Her bir numune için aşınma hacmi, Şekil 4.13(b)'de görüldüğü gibi aşınma izinin enine yönündeki 2D eğrilerin altındaki strok mesafesi ve kesit alanının çarpımı ile belirlenmiştir. 2D alan, 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 uygun bir Mitutoyo SJ-410 cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve 2D alan cihaz tarafından hesaplanmıştır. Aynı zamanda, üretilen numunenin ve aşınmış yüzeyinin dijital görüntüleri Şekil 4.13(c)'de verilmiştir.



Şekil 4.13. a) Aşınma testi cihazı, b) ileri-geri aşınma (reciprocating) şematik görünüm ve c) aşınmış numune görseli [59].

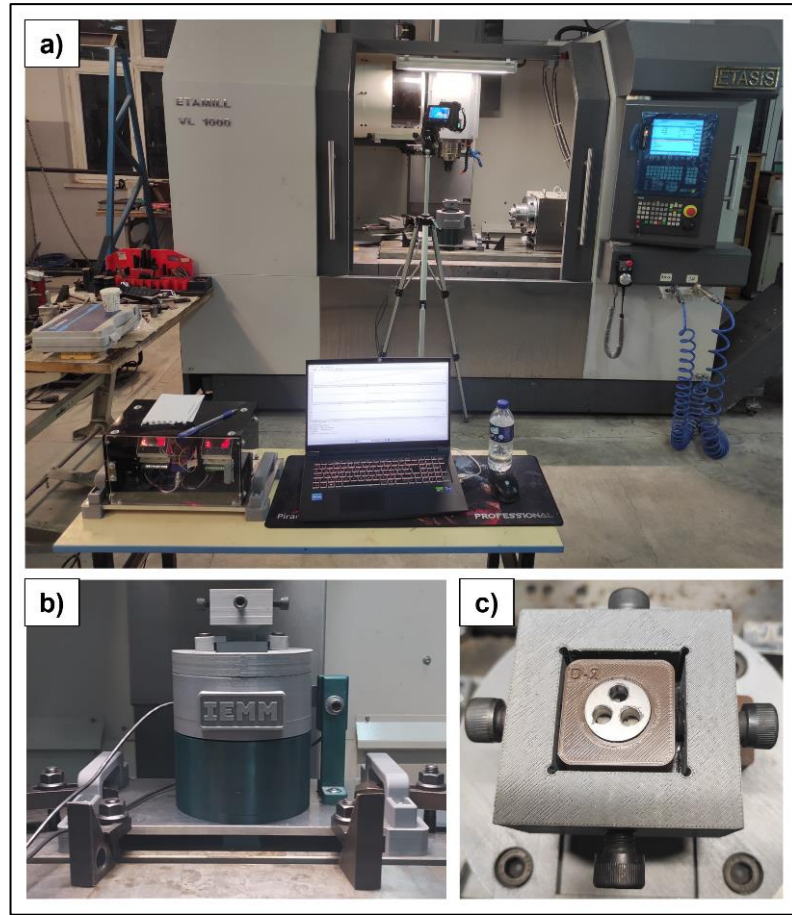
4.5.2. İşlenebilirlik (Delik Delme) Testi

Üretilen kompozit numunelerin delinme işlemi sırasında gösterdiği performansı değerlendirmek özel tasarım düşük maliyetle imal edilmiş dinamometre (Şekil

4.14(a)) kullanılmıştır. Dinamometrenin CNC'ye sabitlenen gövdesi Şekil 4.14(b)'de ve örnek delinmiş numune Şekil 4.14(c)'da verilmiştir. Dinamometreye ait tasarım ve üretim detayları Bölüm 5'te ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Delik delme parametreleri Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Delik delme parametreleri.

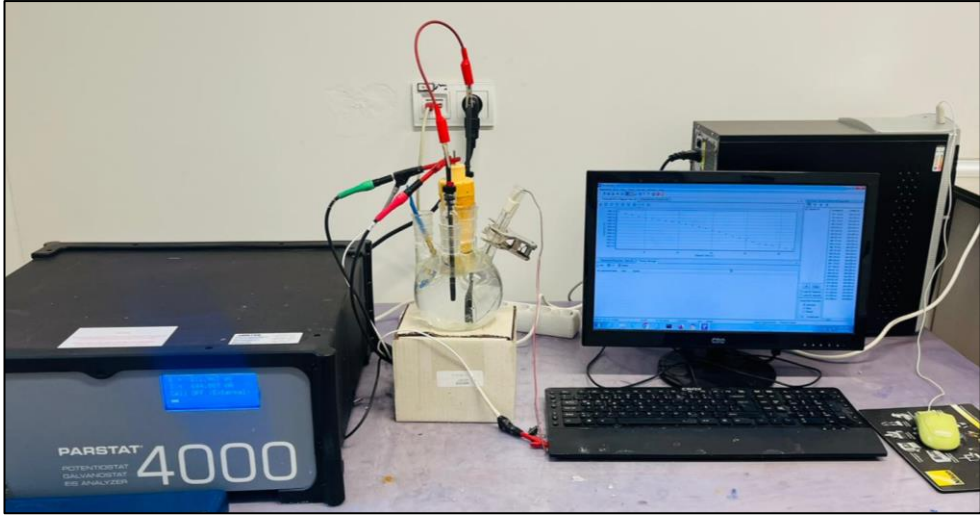
Kesme Hızı (rpm)	İlerleme Hızı (mm/dev)	Matkap Çapı	Matkap Kalitesi	Matkap Ucu Tepe Açısı	Matkap Ucu Eğim Açısı	Matkap Ucu Boşluk Açısı
1326	0,1	6	Kaplamasız Karbür	118°	30°	30°



Şekil 4.14. Özel tasarım delik delme testi cihazının a) genel görünümü, b) CNC'ye sabitlenen gövdesi ve c) örnek delinmiş numune.

4.6. KOROZİF TESTLER

Korozyon testleri, kompozit malzemelerin korozyona karşı dirençlerini değerlendirmek amacıyla %3,5 NaCl çözeltisi içinde gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde, Parstat 4000 potansiyostat cihazı (Şekil 4.15.) kullanılarak potansiyodinamik yöntemler uygulanmıştır. Korozyon testlerinde elde edilen veriler, Tafel eğrileri kullanılarak analiz edilmiştir. Tafel eğrileri, korozyon potansiyeli (E_{corr}) ve korozyon akım yoğunluğunu (I_{corr}) belirlemek için kullanılır. Bu parametreler, malzemenin korozyon hızını ve elektrokimyasal davranışını anlamada kritik öneme sahiptir.



Şekil 4.15. Korozyon test düzeneği.

BÖLÜM 5

DİNAMOMETRE CİHAZI TASARIMI VE İMALATI

3D yazıcı kullanılarak gövde elemanları basılan özel tasarım dinamometre cihazı ile düşük maliyetli üretim, hızlı sonuç alma ve delik delme analizi hedeflenmiştir. Bu yenilikçi tasarım, üretim maliyetlerini azaltırken aynı zamanda prototiplerin hızlı bir şekilde test edilmesine olanak tanımaktadır. Bu bölümde, 3D yazıcı kullanılarak üretilmiş düşük maliyetli bir dinamometre test cihazının tasarım, imalat ve doğrulama adımları detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

5.1. DİNAMOMETRE TASARIM SÜRECİ

Bu bölüm, 3D katı modelleme ve bu modelin sonlu elemanlar yöntemiyle sınır şartları oluşturularak deformasyonun simüle edilmesini kapsamaktadır.

5.1.1. CAD Tasarımı ve Çalışma Prensibi

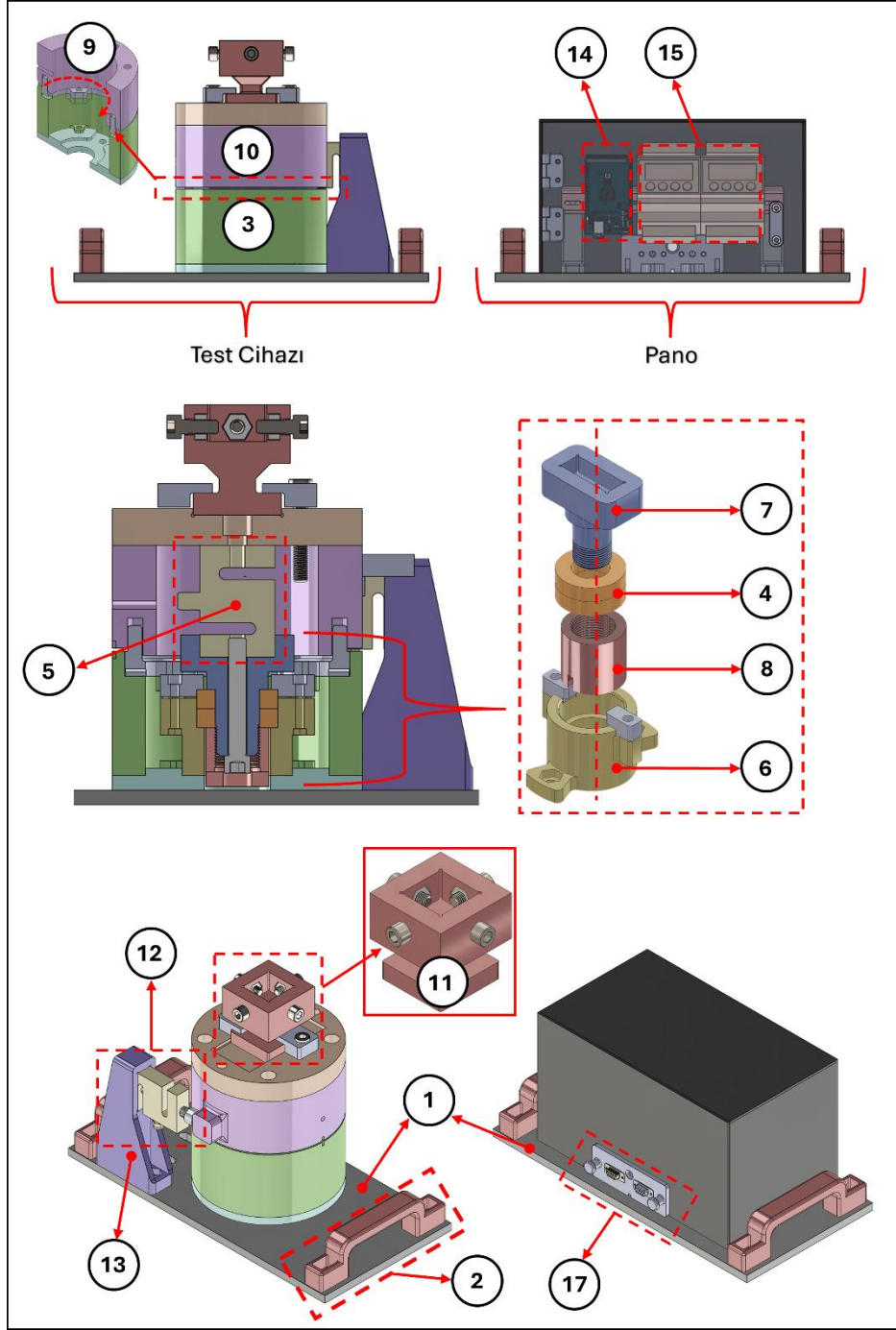
Öncelikle, cihazın tasarım gereksinimleri ve spesifikasyonları belirlenmiş, ardından CAD yazılımı olarak Solidworks kullanılarak detaylı bir modelleme yapılmıştır. Şekil 5.1'de cihazın temel bileşenleri gösterilmektedir. Çizelge 5.1.'de ise bileşenler ve görevleri verilmiştir. Bu tasarımda delme işlemi sırasında oluşan z yönündeki kuvvet (F_z) ve momentin (M_z) ölçümü yük hücreleri ile (yük hücresi) gerçekleştirilmektedir. Metal malzemelerde delme işlemi sırasında oluşan kuvvetler (F_z) ve momentler (M_z), malzeme türüne, delme parametrelerine (matkap ucu çapı, kesme hızı, ilerleme hızı vb.), matkap ucu geometrisine ve delme koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Ancak genel olarak, bu kuvvet ve momentlerin tahmini değerlerini sağlayabilecek ortalama değerler şu şekildedir:

- F_z (Delme kuvveti): Genellikle 100 N ile 2000 N,
- M_z (Delme momenti): Genellikle 0,1 Nm ile 50 Nm arasında olabilmektedir.

Dolayısıyla sistemde kullanılacak yük hücreleri 200 kg kapasiteli olacak şekilde seçilmiştir.

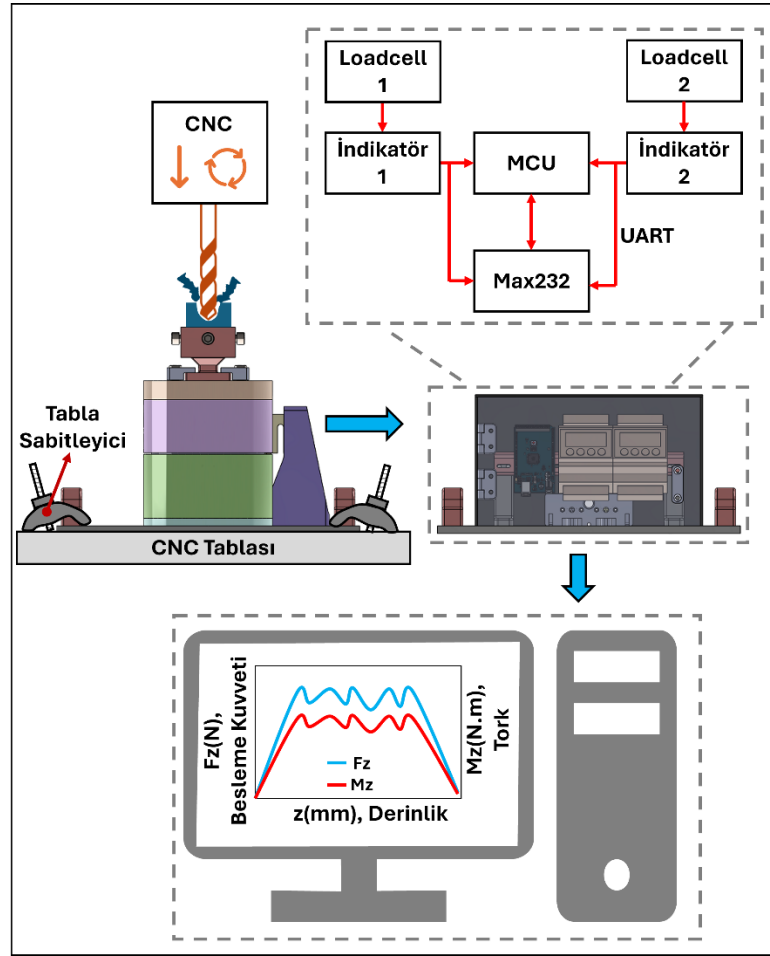
Çizelge 5.1. Cihazdaki bileşenler ve görevleri.

NO	BİLEŞEN	GÖREVİ
1	Aluminyum Kaideler	Cihazın ana gövdesini destekleyen ve sabitleyen zemin parçasıdır.
2	Tutamaçlar	Cihazın taşınması ve yer değiştirilmesi sırasında kolaylık sağlayan parçalardır.
3	Alt Gövde	Gövde elemanlarını muhafaza eder ve üst gövdeyle dönerli eklem oluşturur.
4	2 adet “6006 ZZ Rulman” (Ø_{iç}: 30mm; Ø_{dış}: 55mm; W: 13mm)	Momentin ölçülebilmesinde kullanılan rulmanlar, hareketli parçaların dönme hareketini destekler ve sürtünmeyi azaltırlar.
5	S Tipi Yük hücresi 1	Delme işlemi sırasında “z” yönündeki kuvveti ölçer.
6	Rulman Yatağı	Rulmanların sabitlendiği parçadır.
7	Yük hücresi 1’in Yuvası	Yük hücresi 1’i gövdeye sabitleyen ayrıca rulmanla birleştirerek dönmesini sağlar.
8	M30 Özel Somun	Yük hücresi 1’in rulmanla bağlantısını sabitleyiciler.
9	Döner Eklem (Revolute Joint)	Moment esnasında hareketli parçaların serbestçe dönmesine izin veren parçalardır.
10	Üst Gövde	Gövde elemanlarını muhafaza eder ve alt gövdeyle dönerli eklem oluşturur.
11	Numune Tutucu	Delme işle
12	S Tipi Yük Hücresi 2	Delme işlemi sırasında “z” yönündeki momenti ölçer.
13	Yük Hücresi 2 Sabitleyicisi	Yük hücresi 2’yi zemine sabitleyiciler.
14	Arduino Uno Mikrodenetleyici	Verileri işler ve bilgisayara aktarır.
15	İndikatörler	Kuvvet ölçümlerini görüntüler.
16	MAX232 Entegresi	Lojik seviyeyi ayarlar.
17	RS-232 Protokolü	RS232, iki cihaz arasında seri veri iletişimini sağlayan bir iletişim protokolüdür.
18	MCU (ATMega328P)	Verileri işler ve bilgisayara gönderir.
19	Bağlantı Elemanları (Civata ve Somun)	Cihazın bileşenlerini bir arada tutan ve montajını sağlayan temel bağlantı elemanları.



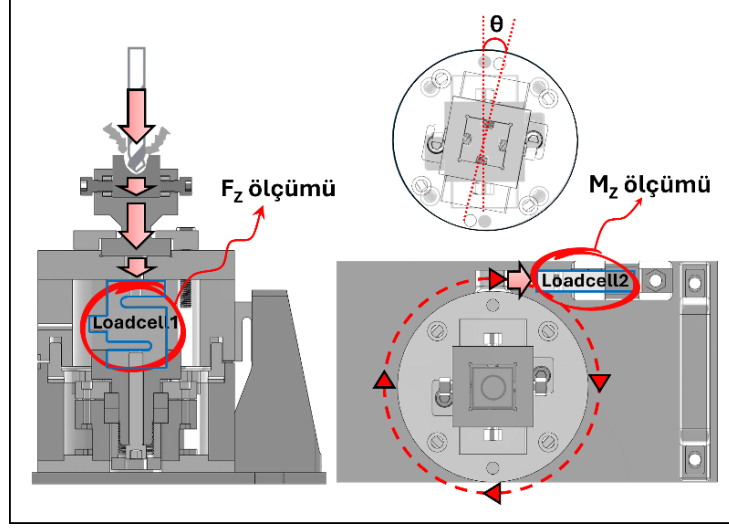
Şekil 5.1. Dinamometrenin bileşenleri.

Şekil 5.2’de gösterildiği üzere çalışma prensibi gösterilmektedir. Burada numune tutucusuna yerleştirilen numunenin delik delme testi esnasında cihazdan alınan verilerin bilgisayara gönderilebilmesi için 8-bit 16 MHz işlem gücüne sahip ATmega328P mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. İndikatör ile mikrodenetleyicinin (MCU) kullanılması için max232 entegresiyle lojik seviye ayarlanmıştır. İndikatörden bilgiler RS-232 protokolüne göre 115200 baud rate hızıyla veriler MCU üzerinden okunmuştur. MCU içerisinde 10 Hz'lik periyodlarla gelen veri parçalanmış ve belirli bir pakete göre bilgisayara gönderilmiştir.



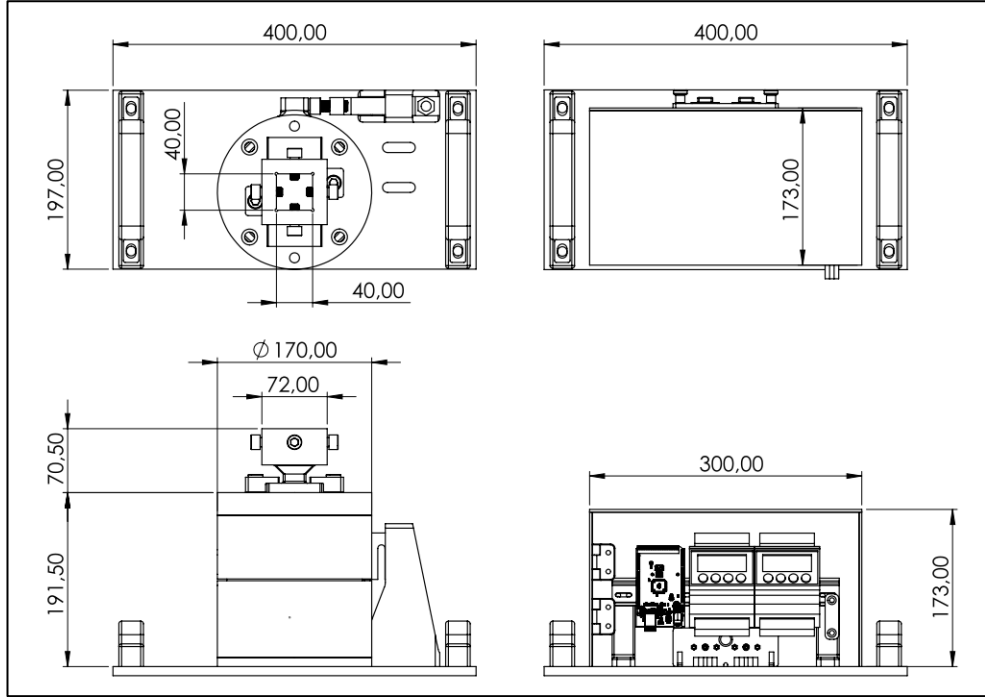
Şekil 5.2. Dinamometre cihazı çalışma prensibi.

Yük hücresi-1 (yük hücresi-1) F_z 'yi, yük hücresi-2 (yük hücresi-2) ise M_z 'yi ölçmektedir. Kuvvetlerin adım adım bileşenler üzerinde iletimi Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.3. Dinamometre kuvvet bileşenler üzerinde kuvvet dağılımı.

Dinamometre cihazına ait genel ölçüler Şekil 5.4'teki teknik resimde mm cinsinden verilmiştir.

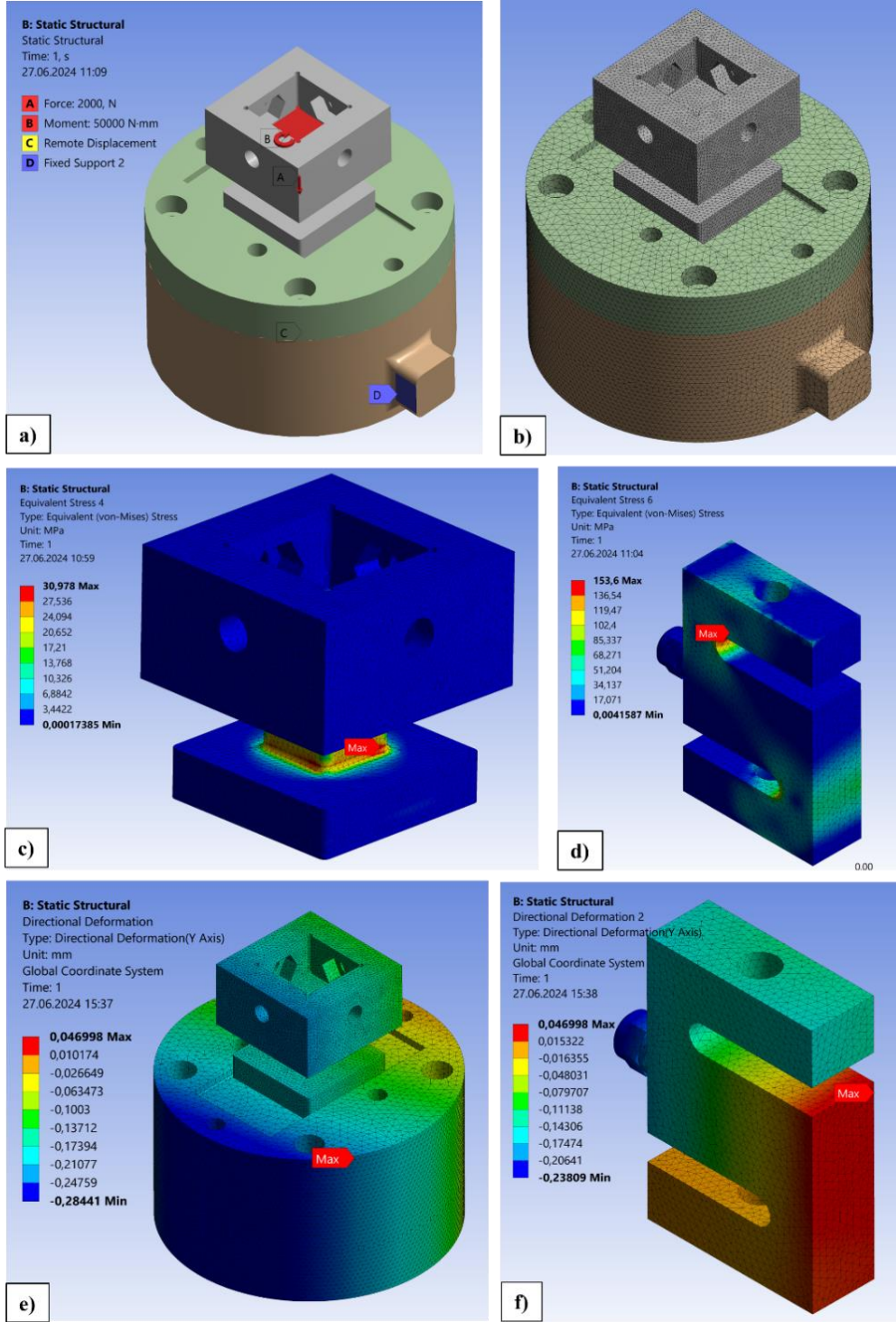


Şekil 5.4. Dinamometre cihazı teknik resim genel ölçüler (mm).

5.1.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Kuvvet ve Deformasyon Analizi

Sistemdeki gerilme ve deformasyonları önizlemek amacıyla ANSYS programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplamalar yapılmıştır. Katı model ANSYS programına yüklenmiş ve analiz sürecini hızlandırmak adına yalnızca kritik ve birbirleriyle bağlantılı parçalar yüklenmiştir. Her bir bileşene ANSYS kütüphanesinden uygun malzemeler atanmıştır. 3D yazıcıda basılan bileşenler için "PLA malzemesi", yük hücreleri için ise "alüminyum alaşımı" kullanılmıştır. Daha sonra, her bir bileşene sınır şartları Şekil 5.5(a)'da gösterildiği gibi tanımlanmıştır. Sınır şartlarında uygulanan kuvvet, 2000 N değerinde olup, bu değer yük hücresinin ölçebileceği maksimum sınırdır. Verilen tork kuvveti ise sistemde deney sırasında oluşabilecek torkun yaklaşık 25 katıdır. Bu şekilde uç kuvvetler verilerek sistem zorlanmış ve ekstra bir güvenlik katsayısı oluşturulmuştur. Sınır şartları tanımlandıktan sonra, hesaplamaların gerçeğe yakınsaması için hassas bir mesh işlemi uygulanmıştır. Şekil 5.5(b)'de gösterildiği gibi, bu işlemde 644,966 düğüm noktası ve 432,445 adet üçgen tipi mesh kullanılmıştır. Analiz kısmında maksimum deformasyon ve gerilmeler hesaplanmıştır. Sonuçlar, maksimum gerilmenin PLA bileşenler arasında 30,978 MPa ile numune tutucuda (Şekil 5.5(c)) olduğunu göstermiştir. Yük hücrelerinde ise Fz ölçümü yapanda (Şekil 5.5(b)) maksimum gerilme 153,6 MPa olarak tespit edilmiştir. Maksimum deformasyon ise pozitif z yönünde 0,047 mm ve negatif z yönünde 0,284 mm yer değişikliği olarak hesaplanmıştır (Şekil 5.5(e) ve Şekil 5.5(f)).

Sonuç olarak, verilen sınır şartlarında bileşenler akma bölgesinde, yani güvenli bölgede kalmışlardır. Bu durum, testin gerçek ortam koşullarında sistemin doğru çalışacağını göstermektedir.



Şekil 5.5. Sistemin a) sınır şartları, b) mesh işlemi; sistemde oluşan maksimum ortalama gerilmeler c) numune tutucusunda (PLA malzemeler arasında), d) F_z yük hücresinde (yük hücreleri arasında); y eksenindeki deformasyonlar e) genel f) F_z yük hücresinde.

5.2. 3D YAZICI TEKNOLOJİSİ İLE İMALAT

3D yazıcı teknolojisi, tasarım esnekliği, hızlı prototip geliştirme, düşük maliyet, minimum atık, çeşitli malzeme seçenekleri ve yerinde üretim imkanı gibi avantajları sayesinde tercih edilmektedir. Bu yöntem, geleneksel üretim süreçlerine göre daha hızlı ve verimli olup, özel tasarımların kolaylıkla gerçekleştirilmesine olanak tanır. Ayrıca, yerel üretim imkanı sayesinde lojistik maliyetleri azaltılarak çevresel etkiler en aza indirilmektedir.

5.2.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

İlk prototiplerde, kolay yazdırılabilirliği, düşük toksisitesi, biyobozunur ve çevre dostu olması, pürüzsüz yüzey kalitesi, yeterli mekanik mukavemeti ve uygun maliyeti nedeniyle PLA malzeme kullanılmıştır. Filament Porima firmasından temin edilmiş olup mekanik ve fiziksel özellikler Çizelge 5.2’de verilmiştir. İlerleyen aşamalarda PLA filament yerine, UV ve mekanik dayanımı daha yüksek olan ABS veya ASA malzemeler tercih edilecektir.

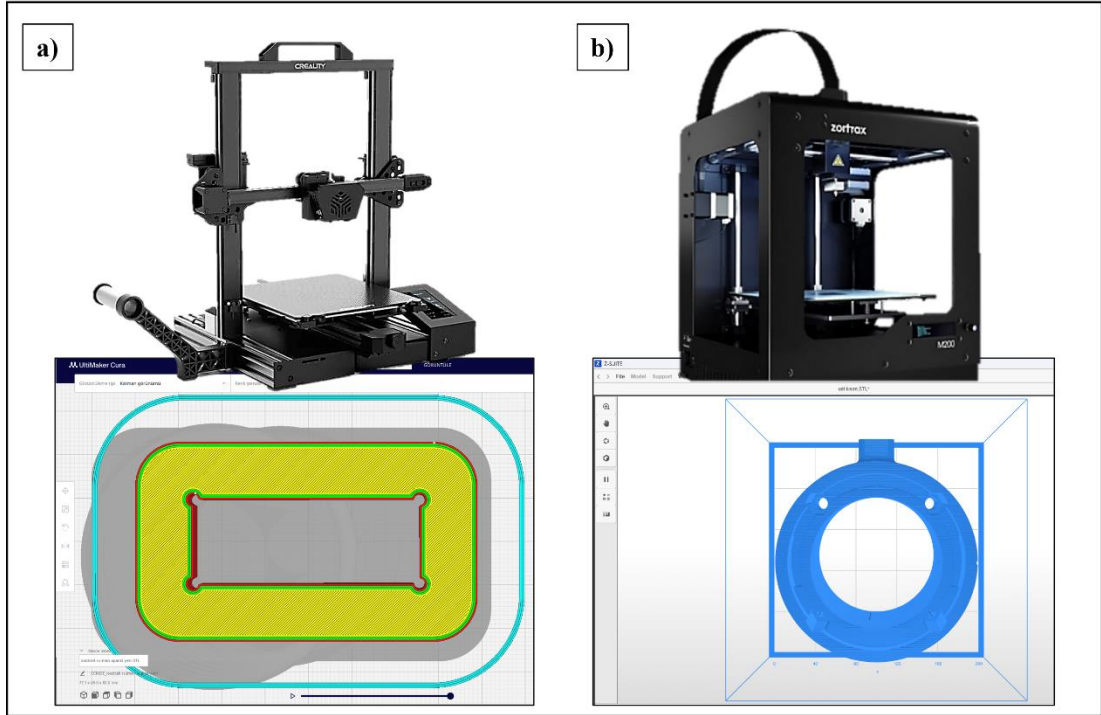
Çizelge 5.2. Porima PLA filament teknik veriler [125].

	Özellikler	Değer	Birim	Test Metodu
Fiziksel Özellikler	Özkütle	1.23	g/cm ³	ISO 1183
	Eriyik Akış İndeksi	17.3	g/10dk	ISO 1183
Mekanik Özellikler	Çekme Mukavemeti	56	MPa	ISO 527
	Elastik Modül	2850	MPa	ISO 527
	Kopma Uzaması	7	%	ISO 527
	Çentikli Darbe Testi	14.2	kJ/m ²	ISO 527

5.2.2. 3D Yazıcı ile Üretim Süreci ve Yazdırma Parametreleri

Dinamometre cihazının küçük gövde parçaları için Creality marka CR6-SE model 3D yazıcıda Cura dilimleme programı kullanılarak, büyük gövde parçaları için ise Zortrax marka M200 model 3D yazıcıda Z-Suite dilimleme programı kullanılarak yazdırma

işlemleri yapılmıştır (Şekil 5.6). Çizelge 5.3'teki yazdırma parametreleri kullanılarak işlemler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.6. 3D yazıcı ve dilimleme program arayüzleri a) Creality marka CR6-SE - Cura b) Zortrax M200 - Z-Suite.

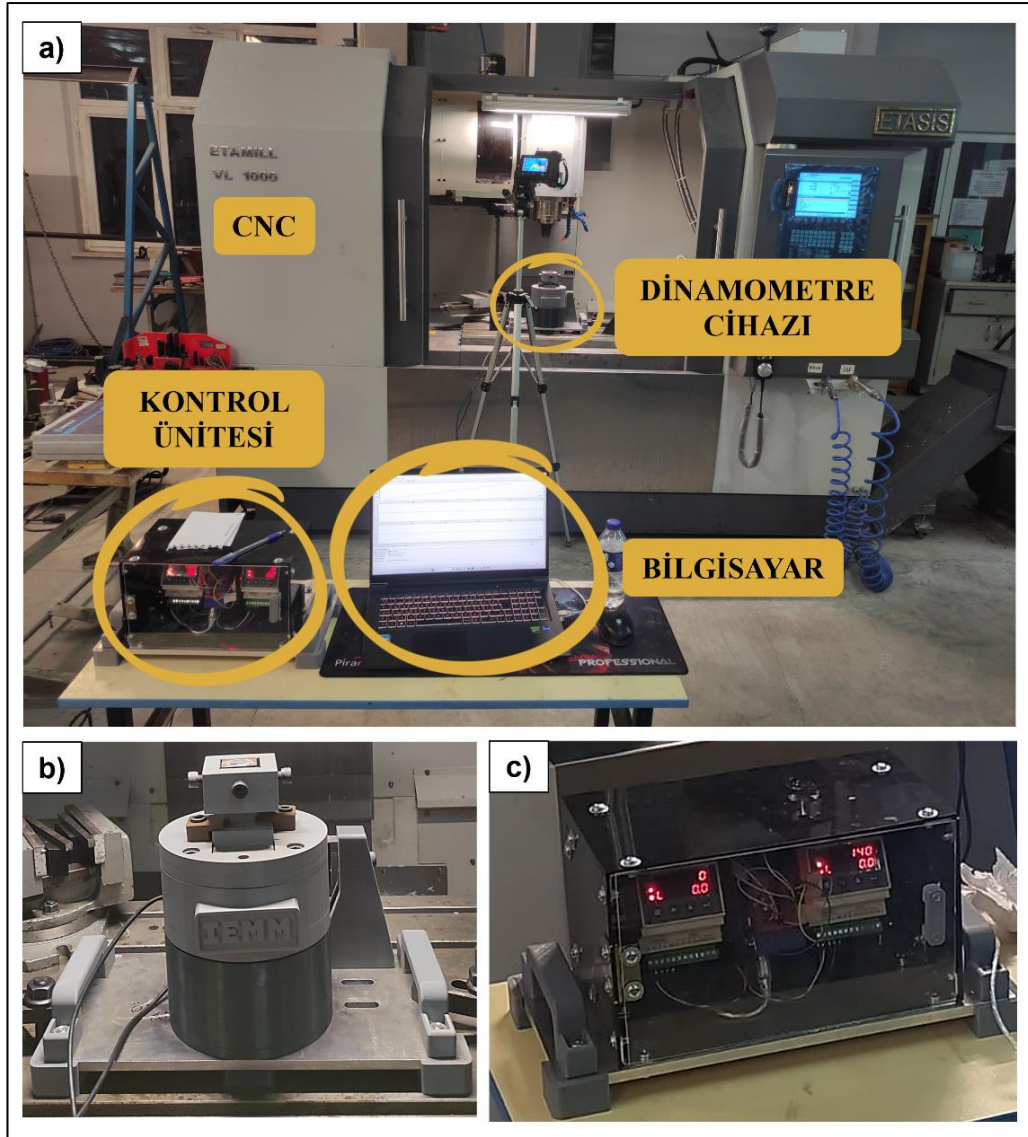
Çizelge 5.3. Yazdırma parametreleri.

Parametreler	Cura	Z-Suite
Kullanılan Malzeme	PLA	PLA
Nozzle Çapı	0,4 mm	0,4 mm
Yazdırma Hassaiyeti	0,1 mm	0,1 mm
Ekstrüder Sıcaklığı	210 °C	210 °C
Tabla sıcaklığı	60 °C	30 °C
Dolgu yoğunluğu	% 100	% 100
Katman Kalınlığı	0,12 mm	0,15 mm
Baskı hızı	50 mm/s	80 mm/s
Dolgu Şekli	Çizgiler	Çizgiler
Duvar Hattı Sayısı	3	3

5.3. DİNAMOMETRE MONTAJI VE DOĞRULAMASI

5.3.1. Bileşenlerin Montajı

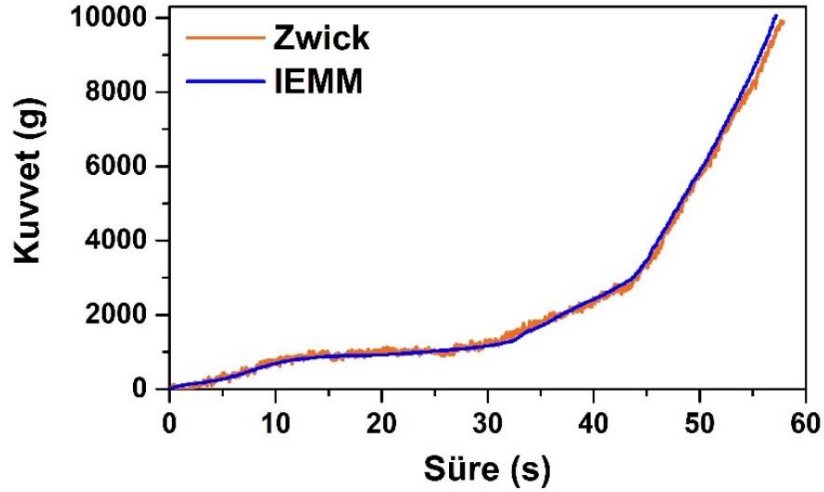
Dinamometre cihazının parçaları 3D yazıcıdan başarılı bir şekilde üretildikten sonra, bu parçalar monte edilerek sistem çalışır hale getirilmiştir. Montaj işlemi sırasında tüm bileşenlerin doğru bir şekilde yerleştirildiği ve cihazın beklendiği gibi performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Cihazın genel görünümü Şekil 5.7(a)'da, gövde kısmı Şekil 5.7(b)'de ve kontrol ünitesi Şekil 5.7(c)'de verilmiştir.



Şekil 5.7. Dinamometre cihazının a) genel görünümü, b) gövde kısmı ve c) kontrol ünitesi.

5.3.2. Doğrulama Testleri

Montajı tamamlanan dinamometrenin delme testi öncesinde doğrulamak amacıyla Zwick Z600 test cihazında basma yönünde 10000 g yük değerine kadar test yapılmıştır. Test sonrası elde edilen grafik Şekil 5.8'de gösterilmiştir. Bu grafikte, IEMM ile belirtilen özel tasarım dinamometre cihazının ölçtüğü veriler yer almaktadır. Zwick cihazından 10 ms aralıklarla veri alınırken, IEMM cihazından 100 ms aralıklarla veri alınmıştır. Zwick cihazından alınan verilerdeki dalgalanmaların sebebi, bu farklı örnekleme aralıklarıdır. Grafikler incelendiğinde, Zwick ve IEMM eğrilerinin birbirine çok benzediği ve genel eğilim açısından neredeyse aynı sonuçları verdiği görülmektedir. Görsel olarak değerlendirildiğinde, her iki grafik arasında belirgin bir fark olmadığı söylenebilir. Doğrulama testlerinin daha büyük kuvvetlerde yapılması ve tekrarlama testlerinin gerçekleştirilmesi, kıyaslamaların daha doğru olmasını sağlayacaktır. Ayrıca, Kistler gibi bilinen dinamometre test cihazlarıyla aynı parametrelerde test yapılarak daha doğru karşılaştırmalar yapılabilir.



Şekil 5.8. Zwick ve özel tasarım dinamometre test cihazı (IEMM) ile yük hüresinden 10000 g yük değerine kadar alınan kuvvet-süre grafiğinin karşılaştırılması.

BÖLÜM 6

DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

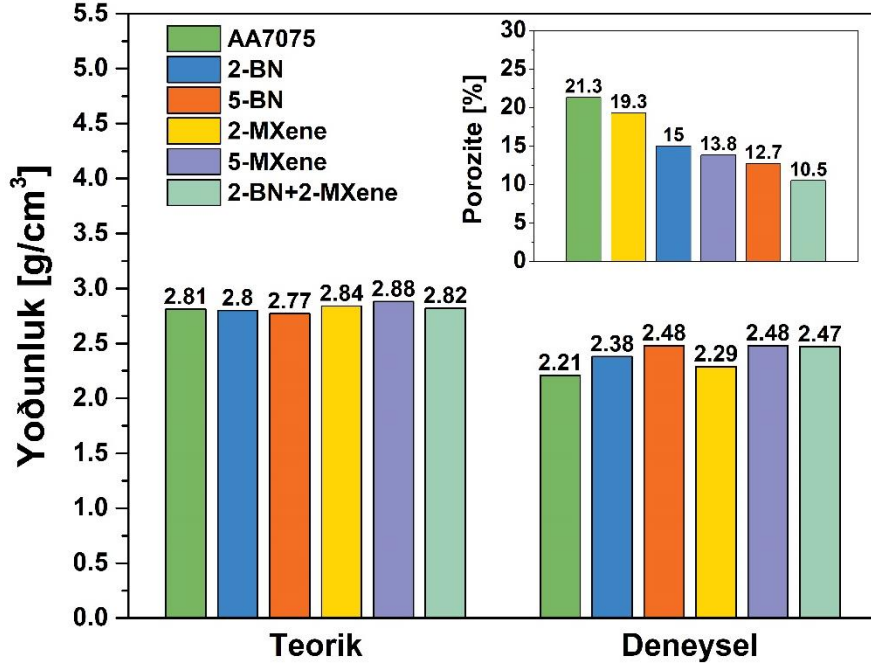
6.1. KARAKTERİZASYON İŞLEMİ SONUÇLARI

Üretilen kompozitlerin karakterizasyonu için öncelikle yoğunluk ölçümleri yapılmış, ardından XRD ve SEM analizleri gerçekleştirilmiştir.

6.1.1. Yoğunluk Ölçümleri

Üretilen her bir kompozitin teorik yoğunlukları öncelikle bileşenlerinin ağırlık yüzdelere göre belirlenmiş, ardından Şekil 6.1'de görüldüğü gibi Arşimet yöntemi kullanılarak deneysel yoğunluklar elde edilmiştir. Teorik hesaplamalara göre AA7075'in teorik yoğunluğu $2,81 \text{ g/cm}^3$ iken deneysel yoğunluk $2,21 \text{ g/cm}^3$ olarak ölçülmüştür. Bu farklılık, hesaplanan gözenekliliğin %21,3 olduğunu göstermektedir. Takviye olarak ağırlıkça %2 ve ağırlıkça %5 BN eklendiğinde, deneysel yoğunluklar sırasıyla $2,38 \text{ g/cm}^3$ ve $2,48 \text{ g/cm}^3$ 'e yükselmiş, buna paralel olarak gözeneklilik seviyeleri %15 ve %10,5'e düşmüştür. MXene ağırlıkça %2 ve ağırlıkça %5 oranlarında takviye olarak eklendiğinde, deneysel yoğunluklar $2,29 \text{ g/cm}^3$ ve $2,48 \text{ g/cm}^3$ civarında kalmış ve buna bağlı gözeneklilik seviyeleri yaklaşık %19,3 ve %13,8 olmuştur. Ayrıca, %2 BN ve %2 MXene birleştirildiğinde, deneysel yoğunluk $2,47 \text{ g/cm}^3$ ve gözeneklilik seviyesi %12,7 olarak ölçülmüştür. Burada, takviye partiküllerinin gözenekliliği azalttığı açıktır. Bunun muhtemel nedeni, alüminyuma kıyasla daha küçük boyutlara sahip bor nitrür (BN) ve MXene partiküllerinin daha fazla boşluğa nüfuz edebilmesi, yoğunluğu artırması ve böylece gözenekliliği azaltması olabilir [126,127]. BN ve MXene karşılaştırıldığında, muhtemelen MXene'in katmanlı yapısının alüminyumun arayüzlere nüfuz etmesini zorlaştırması nedeniyle BN'nin daha etkili olduğu bulunmuştur. MXene takviye edilmiş numunelerin SEM görüntüleri bu olguyu açıkça göstermektedir. Öte yandan,

gözeneklilik miktarındaki artış süreksiz bir matris oluşturmakta ve eklenen takviyenin uygulanan kuvveti karşılamak için yetersiz tepki vermesine neden olmaktadır. Bu nedenle, artan porozite oranına bağlı olarak yoğunluk değerlerinde belirgin değişiklikler gözlenmiştir.

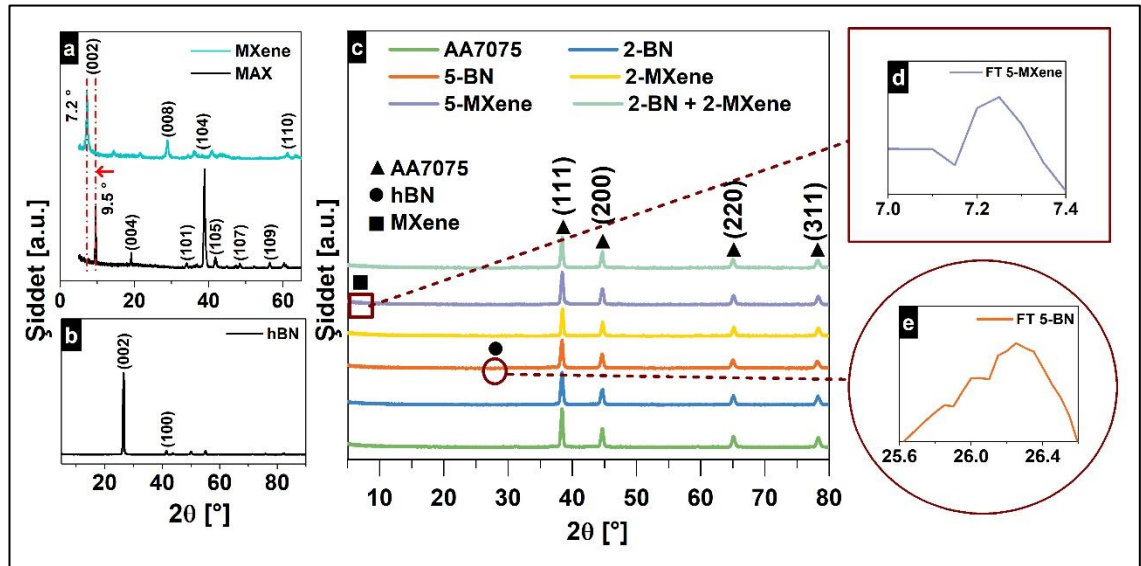


Şekil 6.1. Teorik yoğunluk, deneysel yoğunluk ve porozite sonuçları [59].

6.1.2. XRD Ölçümleri

Üretimde kullanılan takviye tozları ve bulk numuneler Şekil 6.2'deki XRD analizi ile kristalografik olarak karakterize edilmiştir. Bu analizlerde ilk olarak MAX (Ti_3AlC_2) fazı Şekil 6.2(a)'da incelenmiş ve sırasıyla yaklaşık $9,5^\circ$, 13° , 33° , 39° , 41° , 48° ve 56° açılarda (002), (004), (101), (104), (105), (107) ve (109) düzlemlerine karşılık gelen pikler gözlenmiştir [128]. En keskin piklerden biri olan (104) düzlemi, JCPDS kart numarası 52-0875 ile oldukça uyumludur [129]. Aşındırma işleminin ardından, elde edilen MXene ($Ti_3C_2T_x$) aynı görselde gösterildiği gibi sırasıyla (002), (008), (104) ve (110) düzlemlerine karşılık gelen yaklaşık $7,2^\circ$, 33° , 39° ve 61° açılarda pikler vermiştir [128]. HF ile aşındırma işleminden sonra, (002) düzlemini temsil eden kırınım piki yaklaşık $7,2^\circ$ 'ye kaymıştır (Şekil 6.2(a)). Ek olarak, yaklaşık $39,04^\circ$ 'deki

en belirgin pik neredeyse kaybolmuştur, bu da kristal yapıda Ti_3AlC_2 'den Ti_3C_2 MXene geçiş olduğunu göstermektedir. Ti_3C_2 MXene'nin XRD spektrumu, JCPDS kart numarası 032-1383'te belirtilen spektrumla eşleşmekte ve faz geçişini doğrulamaktadır [129]. Şekil 6.2(b)'de takviye olarak kullanılan bor nitrür analiz edilmiştir. Yaklaşık 27° ve 43° 'de gözlemlenen iki pik, sırasıyla (002) ve (100) düzlemlerine karşılık gelmekte ve bor nitrürün karakteristik altıgen yapısını göstermektedir. Bu gözlem JCPDS PDF Card No. 34 - 0421 ile tutarlıdır [130]. Şekil 6.2(c)'de üretilen kompozitlerin analiz sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlara göre, JCPDS Kart No. 98-006-4700 ile uyumlu olarak alüminyumun (111) düzlemlerine karşılık gelen 39° , 44° , 65° ve 77° civarında keskin pikler gözlemlenmiştir [131–133]. Öte yandan, kompozitlerdeki bor nitrür ve MXene takviyeleri nispeten düşük miktarlarda mevcut olduğundan, sürekli tarama yöntemi (continuous time scan) yoluyla gözlemlenmeleri zorlaşmaktadır. Bununla birlikte, görünürlüğü artırmak için sabit zamanlı tarama (fixed time scan) tarama yapılmış ve sonuçlar Şekil 6.2(d) ve (e)'de verilmiştir. Bu görüntülerde, söz konusu takviyelere karşılık gelen ve matris içindeki varlıklarını gösteren pikler gözlemlenmiştir.

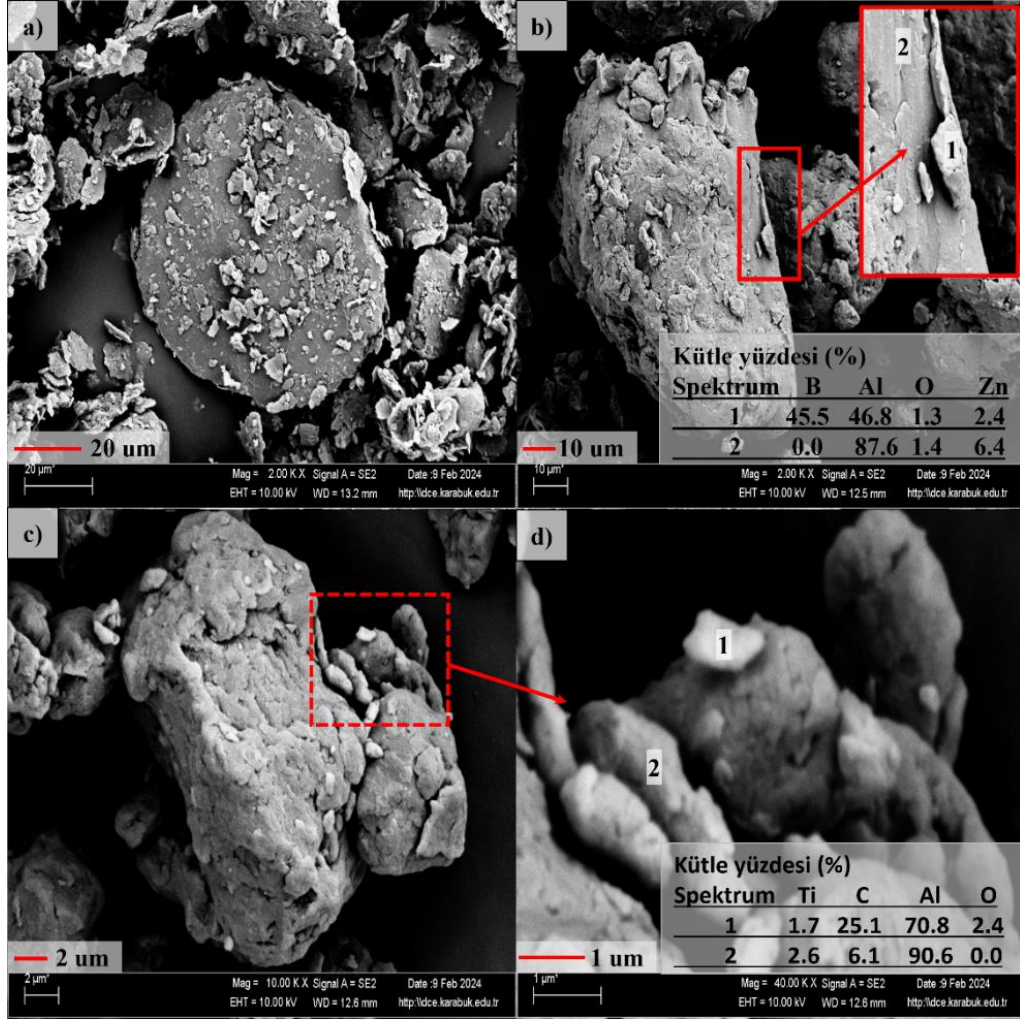


Şekil 6.2. XRD desen grafikleri (a) MAX-MXene fazlarının, (b) saf bor nitrürün, (c) tüm numunelerin, (d) 5-MXene'nin sabit zamanlı taramasının (fix time scan) ve (e) 5-BN'nin sabit zamanlı taramasının (fix time scan) [59].

6.1.3. Mikro Yapı Karakterizasyonu

Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan matris ve takviye tozları, ilk olarak mekanik alaşımlama (MA) işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem sonrasında partikül şekilleri ve yüzeyleri Şekil 6.3'te gösterildiği gibi SEM-EDX analizi ile incelenmiştir. Alüminyum partikülleri işlemde önce küresel bir formdayken (Şekil 4.1(a)), işlemde sonra pul formuna dönüşmüştür (Şekil 6.3(a)). Bu durum, alüminyumdan daha sert olan çelik bilyelerin etkisiyle ortaya çıkmış ve beklenen bir sonuç olmuştur. Alüminyum ve bor nitrür karışımının düşük ve yüksek büyütme SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 6.3(b)'de sunulmuş olup, sıkıca paketlenmiş şekilsiz parçacıkları ortaya koymaktadır. Yüzeylerinde gözlenen bazı katmanların EDX sonuçlarına göre bor içerdiği düşünülmüş ve bu katmanların bor nitrür parçacıkları olduğu tespit edilmiştir. Bu, bor nitrür parçacıklarının alüminyum ile sıkı bir şekilde bağlandığını göstermektedir.

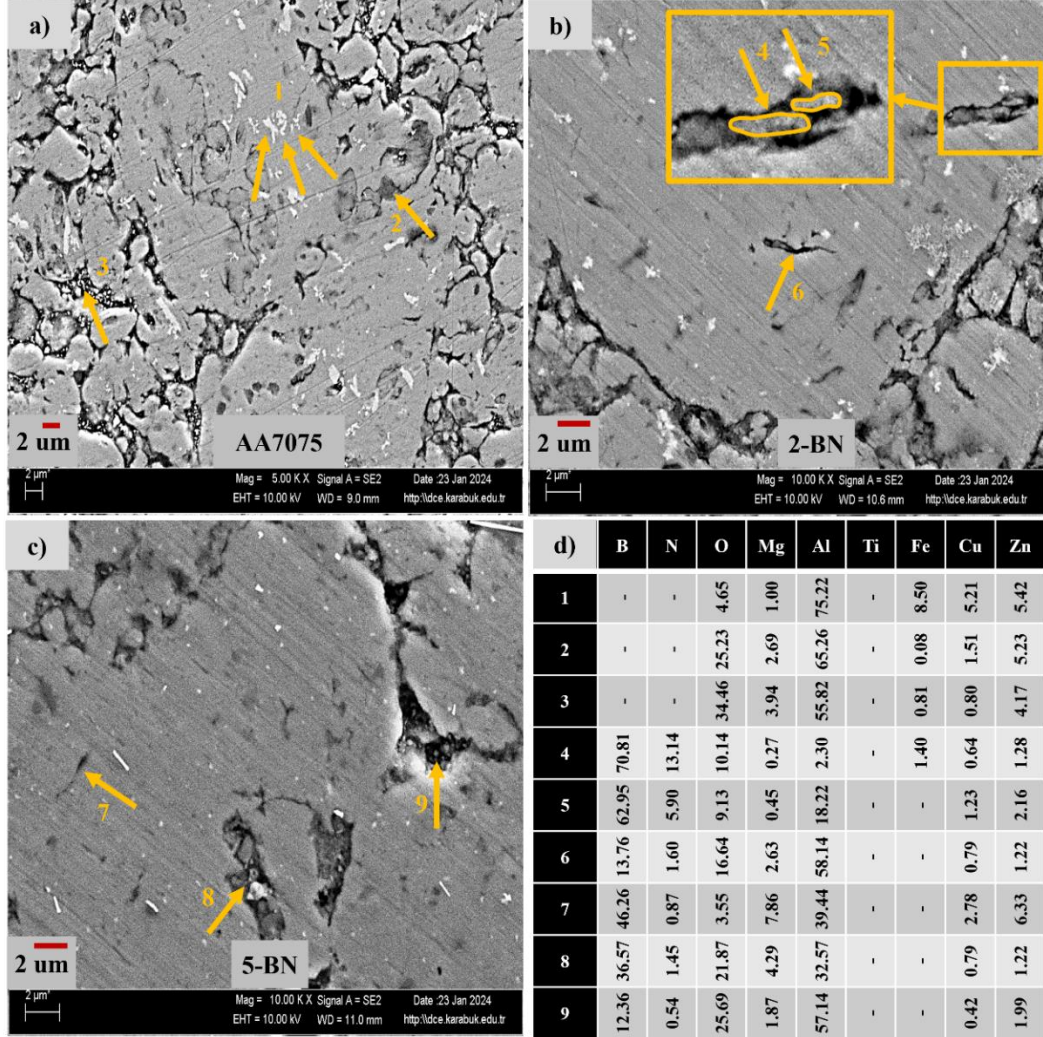
Alüminyum ve MXene karışımının düşük ve yüksek büyütme SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 6.3(c) ve 6.3(d)'de gösterilmiştir. Benzer şekilde, bu karışımlarda da sıkıca paketlenmiş şekilsiz partiküller gözlemlenmiştir. Yüzeylerindeki parlak ve küçük tanecikli bölgelerin titanyum ve karbon içeriklerinden dolayı MXene olduğu düşünülmüştür. Böylece, MXene partikülleri ile alüminyum arasında başarılı bir bağlanma sağlanmıştır.



Şekil 6.3. Bilyalı öğütme sonrası (a) saf AA7075, (b) 5-BN, (c-d) 5-MXene eklenmiş numunelerin SEM görüntüleri [59].

Kompozite dönüştürülen bulk numunelerin mikroyapı incelemeleri taramalı elektron mikroskobu ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (SEM-EDX) kullanılarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen görüntüler Şekil 7'de sunulmuştur. Bu sonuçlara göre, bozulmamış AA7075 matrisinin Şekil 6.4(a)'da 1. noktada açık gri renkte ikincil bir faz içerdiği gözlemlenmiştir. Bu faz esas olarak AA7075'te mevcut olan alaşım elementleri Mg, Fe, Cu ve Zn'den oluşmaktadır. Ek olarak, 2. ve 3. noktalarda gösterildiği gibi, çoğunlukla oksitlenmiş alanları temsil eden koyu gri bölgeler gözlemlenmiştir. Şekil 6.4(b)'de gösterilen, ağırlıkça %2 BN ile güçlendirilmiş kompozitin SEM görüntüsünde, 4 ve 5 noktalarında matris içinde bor nitrid partikülleri ve nispeten oksidasyonu gösteren koyu gri bölgeler gözlemlenmiştir. Şekil 6.4(c)'deki ağırlıkça %5 BN içeren kompozitin görüntüleri, 7, 8 ve 9 noktalarında bor nitrid varlığını ve lamelli uzantıların varlığını ortaya koymaktadır. Bu noktalarda oksijen ve

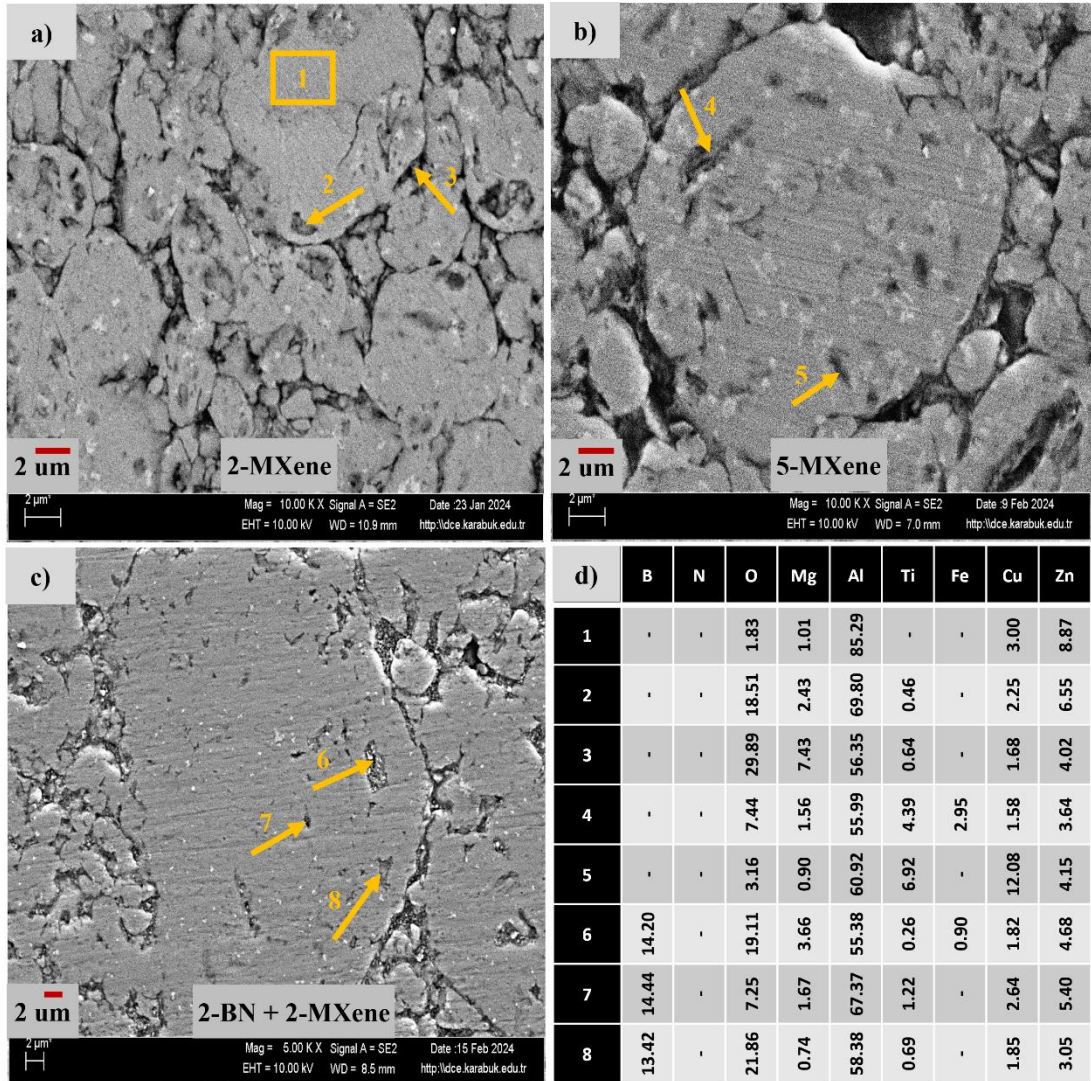
bir miktar bor nitrür de gözlenmiştir. Bu sonuçlara dayanarak, bor nitrür partiküllerinin hem tane sınırlarında hem de matris içinde mevcut olduğu ve matris içinde daha yoğun bir dağılım gösterdiği sonucuna varılabilir.



Şekil 6.4. (a) AA7075, (b) 2-BN, (c) 5-BN katkıli numunelerin SEM görüntüleri ve (d) EDX sonuçları [59].

MXene takviye edilmiş kompozitlerin SEM-EDX görüntüleri Şekil 6.5'te verilmiştir. Matris içerisindeki alaşım elementleri açık gri fazda görülmüştür. Şekil 6.5(a)'da 2. ve 3. noktalarda gözlenen oksijen ve az miktarda titanyumun büyük olasılıkla MXene'den kaynaklandığı düşünülmektedir. Benzer yapılar, Ti miktarının nispeten daha yüksek olduğu Şekil 6.5(b)'deki 5-MXene katkıli numunenin 4 ve 5 noktalarında da gözlemlenmiştir. MXene ilavesinin, muhtemelen MXene'in lameller yapısı nedeniyle, BN ilavesine kıyasla daha deforme olmuş bir yığın yapısıyla sonuçlandırıldığı

belirtilmiştir. Muhtemelen bu nedenle matrisi oluşturan partiküller lamel arayüzlerine yeterince nüfuz etmemiştir. 2-BN + 2-MXene modifiye edilmiş kompozitin (Şekil 6.5(c)) mikroyapısı, MXene modifiye edilmiş olanlara kıyasla daha kusursuz görünmekte ve bor nitrürün bu konudaki avantajını vurgulamaktadır. Ayrıca, bu görüntüdeki 6, 7 ve 8 numaralı noktalar hem bor nitrür hem de MXene'in bir arada bulunduğunu göstermekte ve bu bileşenlerin düşük oranlarda birlikte kullanılmasının daha az kusurlu bir malzeme ile sonuçlandığını düşündürmektedir.



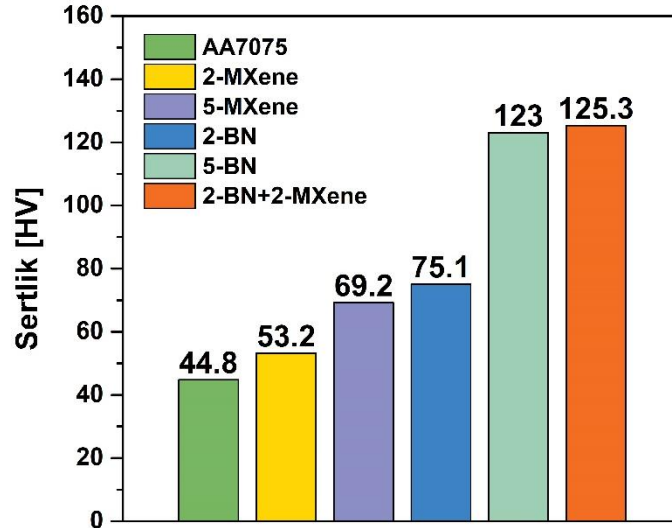
Şekil 6.5. (a) 2-MXene, (b) 5-MXene, (c) 2-BN + 2-MXene katkılı numunelerin SEM görüntüleri ve (d) EDX sonuçları [59].

6.2. MEKANİK TESTLERİN SONUÇLARI

Üretilen kompozitlerin mekanik dayanımlarını deneysel olarak değerlendirmek amacıyla sertlik, basma ve aşınma testleri gerçekleştirilmiştir.

6.2.1. Sertlik Testi Ölçümleri

Üretilen kompozitlerin sertlik değerleri Şekil 6.6'da verilmiştir. Takviye olarak ağırlıkça %2 ve %5 BN eklendiğinde, sertlik değerleri sırasıyla 75,1 HV ve 123 HV'ye yükselmiş, bu da saf AA7075'e kıyasla %67,6 ile %174,6 arasında önemli bir artışı temsil etmektedir. MXene ağırlıkça %2 ve %5 oranlarında takviye olarak eklendiğinde, sertlik değerleri sırasıyla yaklaşık 53,2 HV ve 69,2 HV olarak ölçülmüştür. Bu değerler saf AA7075 ile karşılaştırıldığında %18,8 -54,5 oranında daha yüksek olup, BN takviyeli olanlardan daha düşüktür. Ayrıca, %2 BN ve %2 MXene birleştirildiğinde sertlik 125,3 HV olarak ölçülmüştür ve bu değer, ağırlıkça %5 BN takviyeli olana göre %1,9 daha yüksektir. Artan porozite oranına bağlı olarak sertlik değerlerinde düşüş gözlenmiştir.



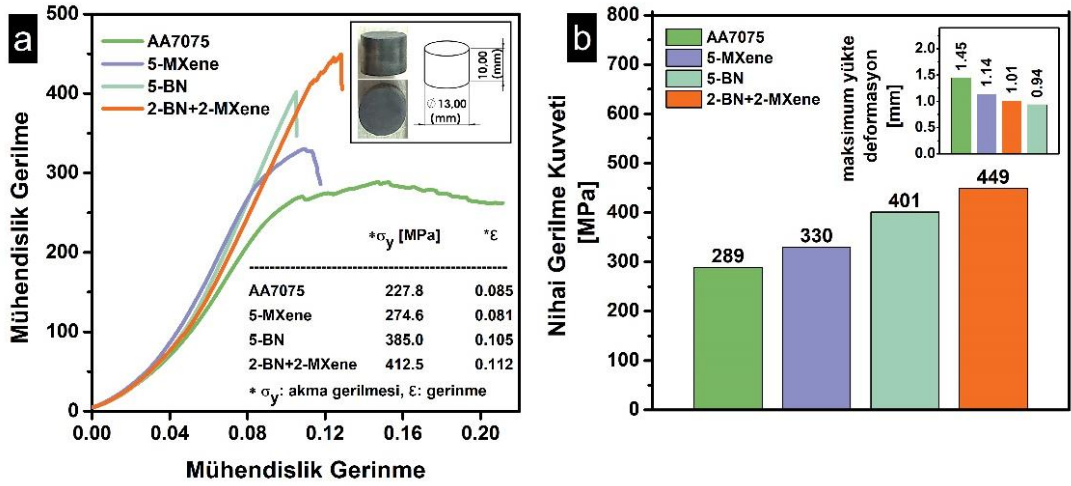
Şekil 6.6. Sertlik sonuçları.

6.2.2. Basma Testi Ölçümleri

Yapılan basma testi ölçümlerinde dört farklı malzemenin mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır: AA7075, 5-MXene, 5-BN ve 2-BN+2-MXene. Şekil 6.7(a), mühendislik gerinme ve mühendislik gerilme ilişkisini göstermektedir. AA7075 malzemesi 227,8 MPa akma gerilmesine ve 0.085 maksimum gerinmeye sahipken, 5-MXene'nin akma gerilmesi 274,6 MPa ve maksimum gerinmesi 0,081'dir. 5-BN malzemesi, 385,0 MPa akma gerilmesi ve 0,105 maksimum gerinme gösterirken, en yüksek değerler 412,5 MPa akma gerilmesi ve 0,112 maksimum gerinme ile 2-BN+2-MXene malzemesinde görülmüştür.

Şekil 6.7(b)'de ise malzemelerin nihai gerilme kuvvetleri karşılaştırılmıştır. AA7075'in nihai gerilme kuvveti 289 MPa, 5-MXene'nin 330 MPa, 5-BN'nin 401 MPa ve 2-BN+2-MXene'nin 449 MPa olarak ölçülmüştür. Ayrıca, maksimum yükteki deformasyon değerleri AA7075 için 1,45 mm, 5-MXene için 1,14 mm, 5-BN için 1,01 mm ve 2-BN+2-MXene için 0,94 mm olarak belirlenmiştir. Bu veriler, 2-BN+2-MXene malzemesinin en yüksek nihai gerilme kuvvetine ve en yüksek akma gerilmesine sahip olduğunu ve diğer malzemelere göre daha az deformasyon gösterdiğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, 2-BN+2-MXene, mekanik olarak daha üstün özellikler sergileyerek, test edilen diğer malzemeler arasında en dayanıklı malzeme olarak öne çıkmaktadır.

AA7075 ve 5-MXene malzemeleri nispeten daha yüksek deformasyon değerlerine sahip oldukları için daha sünek olarak nitelendirilebilir. 5-BN ve özellikle 2-BN+2-MXene ise daha yüksek gerilme kuvvetlerine sahip olup, daha düşük deformasyon gösterdiklerinden dolayı daha gevrek özellikler sergilemektedirler. Bu durum, 2-BN + 2-MXene'nin yüksek mukavemetine rağmen kırılma anında daha az deformasyon yapmasıyla doğrulanmaktadır. Bu veriler, MXene ve BN eklentilerinin AA7075'in mekanik dayanımını artırdığı, ancak deformasyon kapasitesini azalttığını, dolayısıyla malzemeyi daha gevrek hale getirdiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 6.7. (a) Mühendislik gerilme-gerinme grafiği b) nihai gerilme kuvvetleri ve maksimum yükte deformasyon miktarları sütun grafiği.

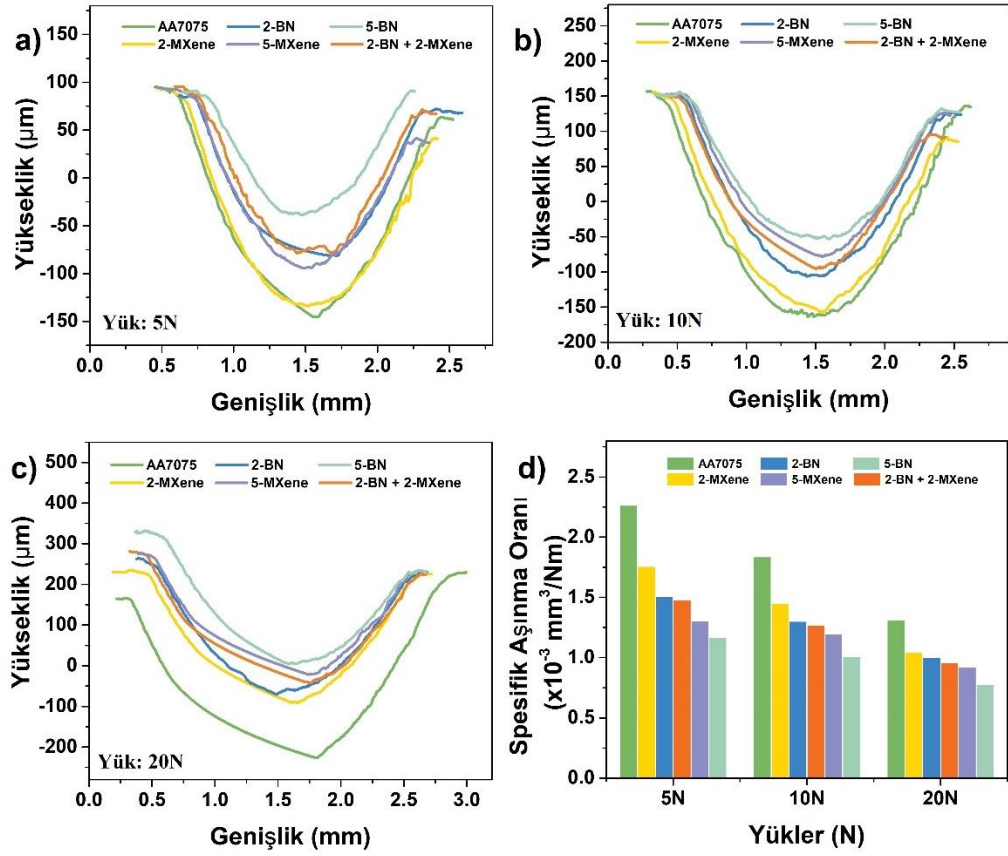
6.3. TRİBOLOJİK TESTLERİN SONUÇLARI

6.3.1. Aşınma Test Sonuçları

Her bir numunenin yüzey alanları aşınma sonrasında bir profilometre kullanılarak ölçülmüş ve sırasıyla 5N, 10N ve 20N için Şekil 6.8(a – c)'de verilmiştir. Yük arttıkça, oluk derinliklerinin ve genişliklerinin belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Oluk profilleri, numune yüzeyindeki aşınmanın önemli deformasyona yol açtığını göstermektedir. Bu deformasyonlara dayanarak, her bir numunenin yüzey alanları hesaplanmış ve Şekil 6.8(d)'de gösterildiği gibi spesifik aşınma oranları buna göre $\times 10^3 \text{mm}^3 / \text{Nm}$ birimlerinde belirlenmiştir. Grafikten, 5N yük altında AA7075'in aşınma oranının 2,263 olduğu görülmüştür. Bu değer, ağırlıkça %2 ve ağırlıkça %5 BN takviyeli kompozitler için sırasıyla 1.508 ve 1.168, ağırlıkça %2 ve ağırlıkça %5 MXene takviyeli kompozitler için ise 1.756 ve 1.303 olarak bulunmuştur. Ağırlıkça %2 BN ve ağırlıkça %2 MXene takviyeleri birleştirildiğinde aşınma oranı 1,480 olarak bulunmuştur. Daha sonra 10N yük altında yapılan testler AA7075'in aşınma oranının 1,836 olduğunu göstermiştir; bu oran ağırlıkça %2 ve ağırlıkça %5 BN takviyeli kompozitler için sırasıyla 1,302 ve 1,008 iken ağırlıkça %2 ve ağırlıkça %5 MXene takviyeli kompozitler için 1,449 ve 1,197'dir. Ağırlıkça %2 BN ve ağırlıkça %2 MXene takviyesi kullanıldığında aşınma oranı 1,268 olarak ölçülmüştür. AA7075, 20N yük altında 1,31'lik bir aşınma oranı sergilerken, ağırlıkça %2 ve ağırlıkça %5

BN takviyeli numuneler için sırasıyla 1,004 ve 0,778 ve ağırlıkça %2 ve ağırlıkça %5 MXene takviyeli kompozitler için 1,045 ve 0,921'lik bir aşınma oranı sergilemiştir. Ağırlıkça %2 BN ve ağırlıkça %2 MXene takviyesi kullanıldığında aşınma oranı 0,957'ye düşmüştür.

Aşınma oranları incelendiğinde, 5N yük altında ağırlıkça %2 ve ağırlıkça %5 BN takviyelerinin sırasıyla yaklaşık %33,4 ve %48,4 iyileştirme sağladığı görülmüştür. Benzer şekilde, ağırlıkça %2 ve ağırlıkça %5 MXene takviyeleri sırasıyla yaklaşık %22,4 ve %42,4 iyileşme göstermiştir. Bununla birlikte, ağırlıkça %2 BN ve ağırlıkça %2 MXene takviyeleri birleştirildiğinde, iyileştirme oranı %34,6 olmuştur. 10N yük altında, ağırlıkça %2 ve ağırlıkça %5 BN takviyeleri sırasıyla yaklaşık %29 ve %45'lik iyileştirmelere yol açarken, ağırlıkça %2 ve ağırlıkça %5 MXene takviyeleri sırasıyla yaklaşık %21,1 ve %34,8'lik iyileştirmeler sergilemiştir. Bununla birlikte, ağırlıkça %2 BN ve ağırlıkça %2 MXene takviyesi kombinasyonu %30,9'a varan bir iyileşme sağlamıştır. Yük 20N'a yükseldiğinde, ağırlıkça %2 ve ağırlıkça %5 BN takviyeleri sırasıyla yaklaşık %23,4 ve %40,6'lık iyileşmeler sağlarken, ağırlıkça %2 ve ağırlıkça %5 MXene takviyeleri sırasıyla yaklaşık %20,2 ve %29,7'lik iyileşmeler göstermiştir. Bununla birlikte, ağırlıkça %2 BN ve ağırlıkça %2 MXene takviyesinin kombinasyonu yaklaşık %27'lik önemli bir iyileşme sağlamıştır. BN ve MXene'in matrise dahil edilmesi nedeniyle aşınma direncindeki artışın birkaç nedeni olabilir. Bunlardan biri, bu takviyelerin yüksek mekanik dayanımıdır. Bu takviyelerin eklenmesi matrisin elastik modülünü, sertliğini, kırılma tokluğunu, eğilme mukavemetini, hacim ve kayma modülünü artırarak kompoziti sürtünme sırasında parça arızasına karşı daha dirençli hale getirebilir [134–136]. Bu tür takviyelerin öncelikle yük aktarım mekanizması aracılığıyla matrise aktarılan yükü dağıtarak mukavemet sağladığı bilinmektedir ve bu durum literatürdeki birçok çalışmada gözlemlenmiştir [134,135,137]. Bu mekanizmanın etkisi daha önce grafen/bor karbür takviyeli kompozitler üzerine yaptığımız çalışmada detaylandırılmıştır [138]. Ayrıca, kompozitlerin alaşımlara kıyasla daha yüksek sertliğe sahip olması, dayanıklılığın arttığına bir göstergesi olarak kabul edilebilir. Ek olarak, bu takviyelerin takviye malzemesi ile matris arasındaki arayüzeyde sürtünme katsayısını azalttığı bilinmektedir ve bu da kompozitlerin aşınma direncindeki artışa katkıda bulunan önemli bir faktör olabilir [76].



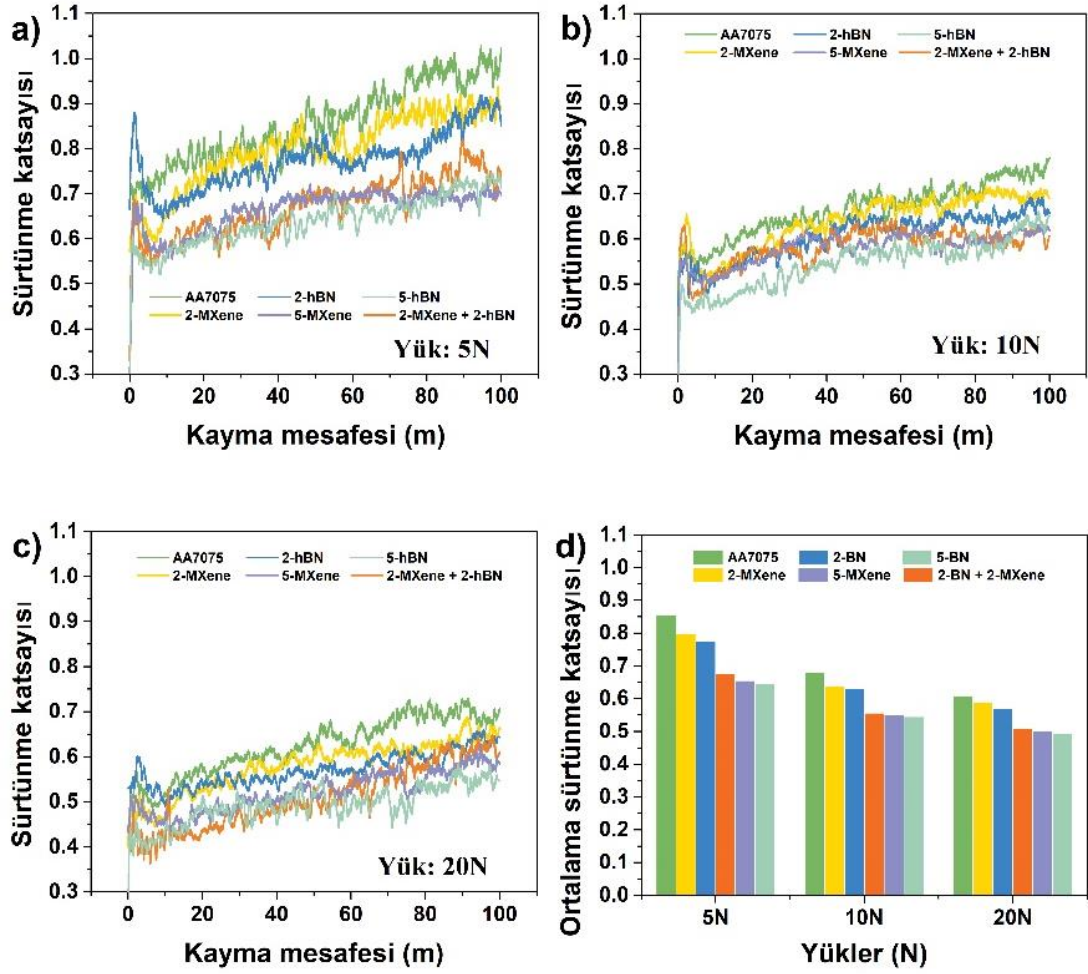
Şekil 6.8. (a) Aşınma izlerinin 2D yüzey alanları (a) 5 N, (b) 10 N, (c) 20 N ve (d) tüm numunelerin spesifik aşınma oranı [59].

Her bir kompozitin aşınma testleri sırasında hem yola hem de yüke bağlı sürtünme katsayıları ölçülmüş ve sonuçlar Şekil 6.9(a – c)'de sunulmuştur. Bulgulara göre, artan mesafe ile katsayıda genel olarak doğrusal bir artış olmuştur. Ayrıca, mevcut literatürle uyumlu olarak, daha yüksek yüklerle birlikte katsayıda tutarlı bir düşüş olmuştur [139,140]. Ayrıca, testin başlangıcında statik sürtünmede kayda değer bir artış kaydedilirken, kinetik sürtünme değerleri test boyunca sabit kalmıştır. Kinetik sürtünme değerlerinin mesafeye bağlı olarak sabit kalması numune içinde homojenlik olduğunu göstermektedir [141]. Statik sürtünmeyi takip eden ilk düşüş, atalet kuvvetinin üstesinden gelindiğini ve hareketin başladığını gösterir (sürtünmeyi sınırlama) [141]. Bunu takip eden keskin düşüş muhtemelen numune içindeki katı yağlayıcı etkilerinin başlangıcına işaret etmektedir. Başlangıçta, katı yağlayıcıların etkisi 5N'de daha az belirgindi, ancak sınırlayıcı sürtünme sonrası düşüşler daha yüksek yüklerle azaldığından, muhtemelen artan yüklerle daha belirgin hale geldi. Bu

sonuçlar Őekil 6.9(d)'de verilen ortalama sűrtűnme katsayısı hesaplamaları ile de analiz edilmiŐtir.

Bu sonuçlara gűre, 5 N yűk altında, iŐlem gűrmemiŐ AA7075 numunesi için Sűrtűnme katsayısı (COF) deęeri 0,855 iken, aęırlıkça %2 ve aęırlıkça %5 BN katkıları ile sırasıyla 0,774 ve 0,645'e dűŐműŐtűr. Benzer Őekilde, aęırlıkça %2 ve aęırlıkça %5 MXene katkısı ile COF deęerleri sırasıyla 0,797 ve 0,655'e dűŐműŐtűr. Aęırlıkça %2 BN ve aęırlıkça %2 MXene katkıları birlikte kullanıldıęında ise COF deęeri 0,675 olarak belirlenmiŐtir. Bu analizler 10 N yűk altında yapıldıęında COF deęerlerinin 0,68'den (AA7075) aęırlıkça %2 ve aęırlıkça %5 BN katkıları ile sırasıyla 0,631 ve 0,545'e, aęırlıkça %2 ve aęırlıkça %5 MXene katkıları ile sırasıyla 0,639 ve 0,549'a dűŐtűęűnű gűstermiŐtir. BN ve MXene bileŐenlerinin her biri %2 oranında birlikte eklendięinde ise bu deęer 0,556 olarak belirlenmiŐtir. Ayrıca, 20 N yűk altında yapılan testlerde, aęırlıkça %2 ve aęırlıkça %5 BN katkısı ile sırasıyla 0,607'den (AA7075) 0,571 ve 0,492'ye ve %2 ve %5 MXene katkısı ile sırasıyla 0,589 ve 0,502 COF deęerleri elde edilmiŐtir. 2 BN ve %2 MXene birlikte eklendięinde bu deęer 0,51 olarak belirlenmiŐtir. Dięer yandan, aęırlıkça %2 ve aęırlıkça %5 BN katkıları 5 N yűk altında COF deęerlerinde sırasıyla %9,5 ve %24,6 iyileŐme saęlarken, aynı oranlarda MXene katkıları sırasıyla %6,8 ve %23,4 iyileŐme saęlamıŐtır. Aęırlıkça %2 BN ve MXene birlikte eklendięinde, iyileŐme oranı %21,1 olarak belirlenmiŐtir. Test prosedűrű sırasında 10 N yűk ile aęırlıkça %2 ve aęırlıkça %5 BN katkılarının COF deęerlerinde sırasıyla %7,2 ve %19,9 iyileŐme saęladıęı, aynı oranlarda MXene katkılarının ise sırasıyla %6,0 ve %19,3 iyileŐme saęladıęı gűzlemlenmiŐtir. Her iki bileŐen de %2 oranında eklendięinde, COF deęerlerindeki iyileŐme %18,2 olmuŐtur. 20 N yűk altında, aęırlıkça %2 ve aęırlıkça %5 BN katkıları ile COF deęerlerindeki iyileŐme sırasıyla %5,9 ve %18,9 iken, MXene katkıları ile %3,0 ve %17,3 olarak gűzlemlenmiŐtir. Her iki bileŐen de aęırlıkça %2 oranında eklendięinde, iyileŐme %16,0 olarak belirlenmiŐtir. Sűrtűnme katsayısı verilerine gűre, h-BN ve MXene ($Ti_3C_2T_x$) takviyelerinin eklenmesi, kompozitlerin sűrtűnme katsayılarını önemli lűde azaltmaktadır. Bu takviyelerin altıgen ve katmanlı yapılarının, uygulanan kuvvet altında kolayca kaymayı saęladıęı bilinmektedir [142]. Bu zellik, alaŐımların sűrtűnme katsayılarının azaltılmasına etkili bir Őekilde katkıda bulunabilir [76]. Benzer sonuçlar, 2D yapılarla sahip bileŐenleri içeren çok sayıda çalıŐmada da

gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, aynı koşul altında saf grafen (0,114) ve MoS₂'de (0,218) görüldüğü gibi bor nitrür ve MXene katı yağlama bileşenleri arasında COF'de kayda değer bir fark gözlenmiştir [143]. Bu farklılık, takviye katmanları arasında sergilenen dirençten veya kayma sırasında matris ve bilye yüzeylerinde meydana gelen değişikliklerden kaynaklanıyor olabilir [144,145]. Bu bağlamda, bazı 2D bileşenlerin deneysel arayüzey kayma mukavemeti değerleri grafen oksit için 5,3 MPa [146], h-BN için 5,2 MPa [147] ve MoS₂ için 25,3 MPa olarak bulunmuştur [146]. Literatürde MXene (Ti₃C₂T_x) ile ilgili herhangi bir arayüzey kayma mukavemeti değerine rastlanmamıştır. Ancak Zhang ve arkadaşlarının MXene'in arayüzey sürtünme katsayısını teorik olarak 0,24 - 0,26 civarında hesapladıkları görülmüştür [148]. Bu değer, 0,066 - 0,087 civarında olan grafenden daha yüksektir [149], bu da MXenin arayüzey kesme mukavemetinin muhtemelen hem grafenden hem de h-BN'den daha yüksek olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, çalışmamızda MXene-modifiye örneklerde daha yüksek sürtünme katsayıları elde edilmesinin muhtemel nedeni bu faktöre atfedilebilir. Bu aynı zamanda 2D bileşenin katman sayısına da doğrudan bağlıdır ve bazı durumlarda [150], özellikle üç katmana kadar, MXene'in grafene kıyasla daha düşük bir sürtünme katsayısı sergilediği gözlemlenmiştir [151]. Bu nedenle, MXene'in tribolojik etkileri konusunda hem teorik hem de deneysel olarak daha kapsamlı araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.



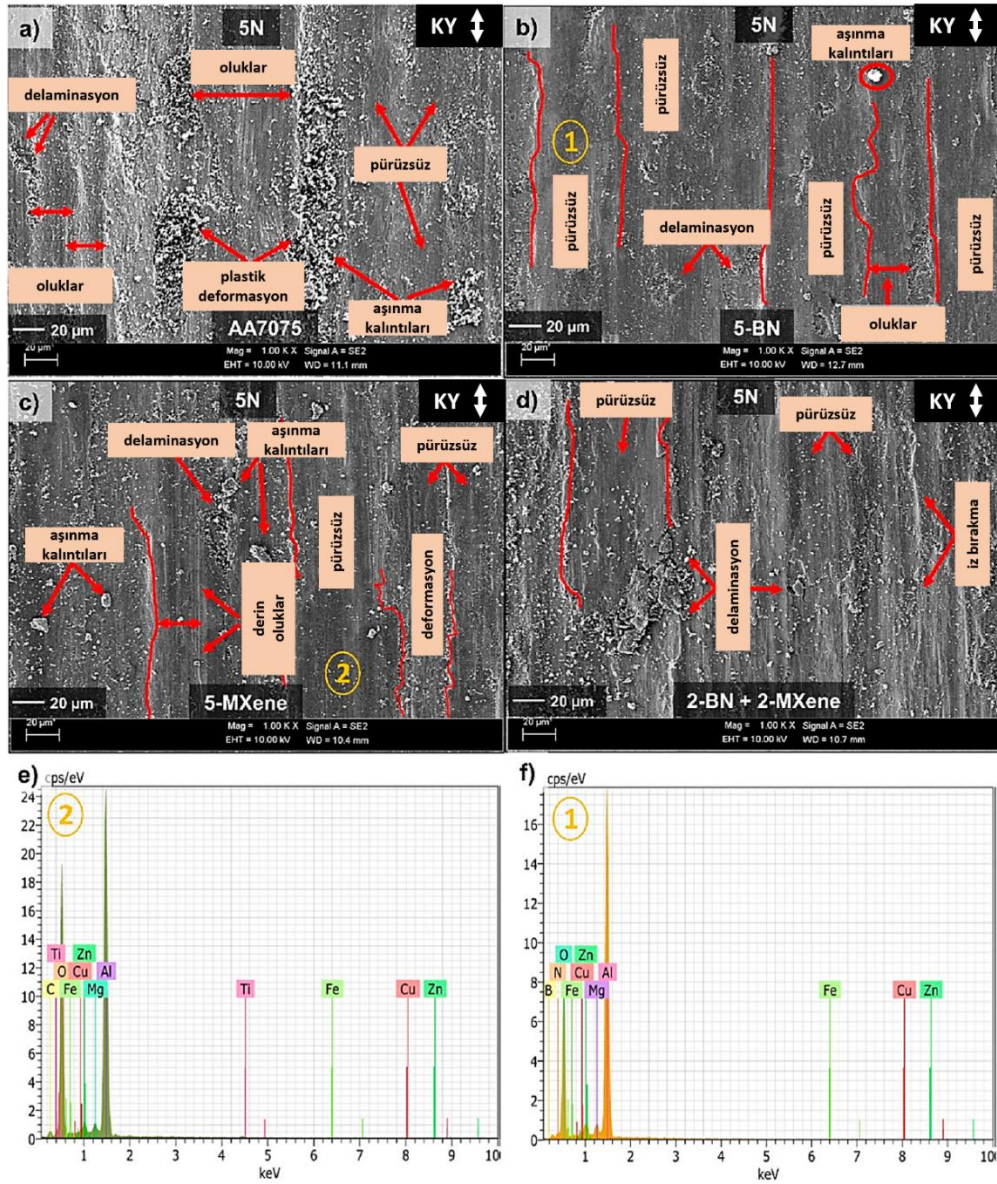
Şekil 6.9. Mesafeye bağlı sürtünme katsayıları (a) 5 N, (b) 10 N, (c) 20 N ve (d) ortalama sürtünme katsayıları [59].

6.3.2. Aşınma Mekanizması

Kompozit numunelerinin aşınmış yüzeylerinin SEM görüntüleri Şekil 6.10'da verilmiştir. Bu görüntülerde, saf alaşımın yüzeyinde oluklar, delaminasyon, aşınma kalıntıları ve çeşitli plastik deformasyonlar gözlemlenmiştir (Şekil 6.10(a)). Alüminyum alaşımlarının elastik ve kayma modülleri çeliğe göre oldukça düşüktür. Bu nedenle, sürtünme sırasında çelik bilye daha yumuşak olan AA7075 malzemesinden parçacıklar koparabilir [152]. Yüzeyde gözlemlenen döküntü ve delaminasyon bu sürecin kanıtı olarak kabul edilebilir [153]. Bu süreç muhtemelen başlangıçta temas eden yüzeylerin pürüzlü kısımlarının kopması (iki gövdeli aşınma) ve ardından kopan parçacıkların aşınmaya dahil olması (üç gövdeli aşınma) şeklinde gerçekleşmiştir [154]. Yüzeyde gözlemlenen oluklar ve döküntüler gerçekten de üç

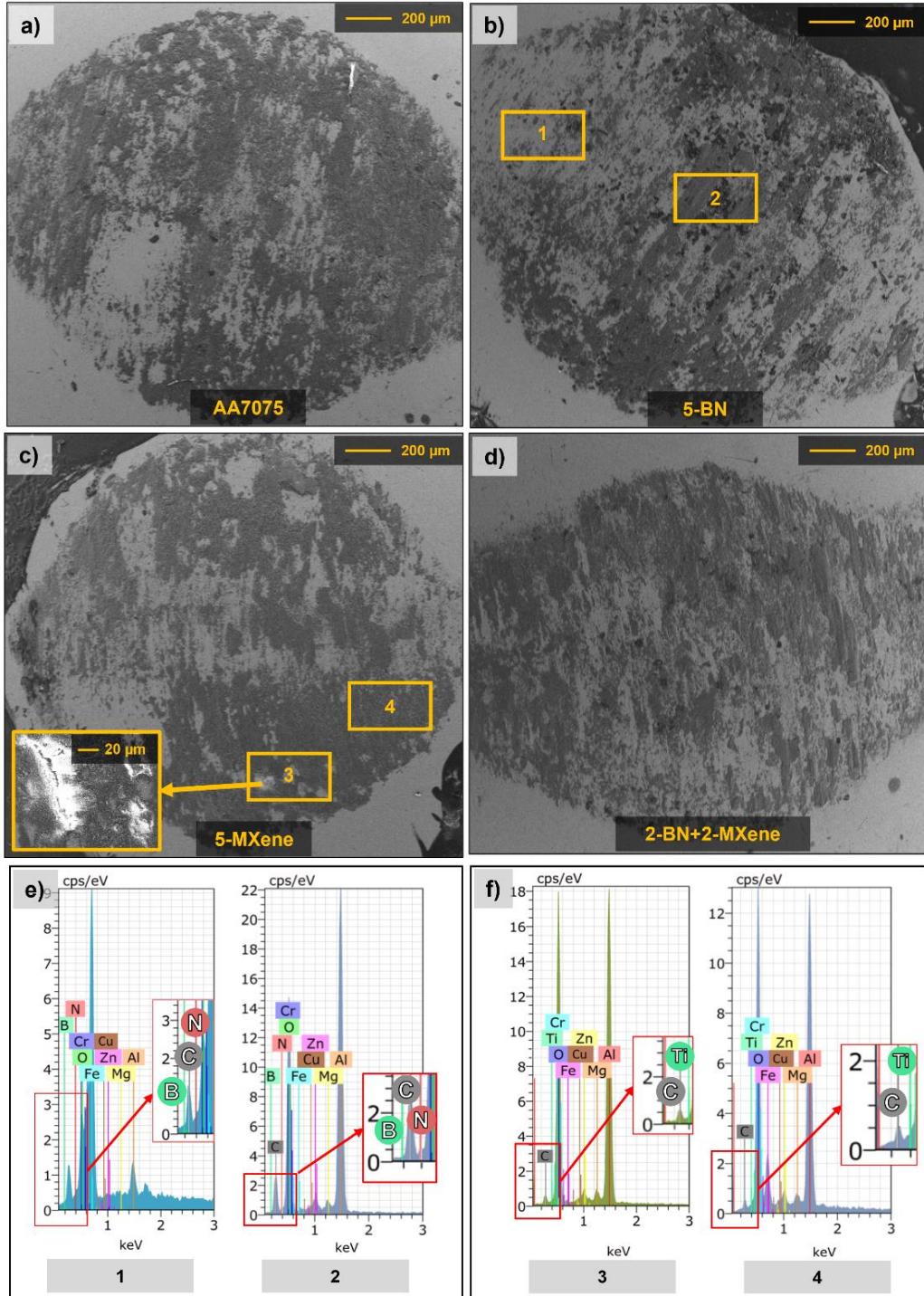
gövdeli aşınmanın göstergesidir [155]. Tüm bu gözlemler, sürtünme sırasında abrasif aşınmanın oldukça aktif olduğunu göstermektedir. Ek olarak, önceki çalışmalarda görüldüğü gibi muhtemelen Mg ve Zn alaşım elementlerinin varlığına atfedilen nispeten yapışkan aşınmanın göstergesi olan pürüzsüz yüzeyler gözlemlenmiştir [156]. 5-BN katkılı numunenin yüzeyinde aşınma kalıntılarının nispeten daha az sıklıkta meydana geldiği, oluk genişliklerinin daha küçük olduğu ve EDX spektrumu ile 1. bölgede daha pürüzsüz yüzeyler olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 6.10(f)). Aşınmanın azaldığına dair bu göstergeler muhtemelen bor nitrürün katı yağlama etkisinden kaynaklanmaktadır (Şekil 6.10(b)). Bununla birlikte, ağırlıkça %5 MXene katkılı numunede (Şekil 6.10(c)), EDX spektrumunda (Şekil 6.10(e)) saf alaşıma kıyasla daha az döküntü ve pürüzsüz bölge görülmesine rağmen, spesifik aşınma oranında görüldüğü gibi ağırlıkça %5 BN'ye kıyasla daha fazla deformasyona sahip bir yüzey gözlemlenmiştir. Bu olgunun birkaç nedeni olabilir. Bunun bir nedeni, MXene takviyeli kompozitlerin BN takviyeli kompozitlere kıyasla daha fazla gözeneklilik içermesi olabilir [157], çünkü daha fazla gözeneklilik süreksiz ve daha az dayanıklı bir matrise yol açar. Diğer bir neden ise, MXene'in arayüzey sürtünme katsayısının veya arayüzey kayma direncinin, spesifik aşınma oranı bölümünde ayrıntılı olarak açıklanan BN'den daha yüksek olması olabilir. Bu durumda, katmanlar ya birbirleri üzerinde ya da matris/bilye üzerinde daha farklı şekilde kayarak temas eden bileşenlerin deformasyonuna neden olur ve bu da sürtünme katsayısı değerleriyle desteklenir. Son olarak, sürtünme sırasında MXene'in kolay oksitlenmesi, aşınmış yüzeylerde zaten gözlemlenen sert ve aşındırıcı bir yüzey oluşumuna yol açabilir. Benzer bir durum BN ve GNPs takviyeli Al5251 kompozitlerinde de araştırılmış olup burada BN takviyesi sürtünme katsayısında daha büyük bir azalma ve matris sertliğinde bir artış ile ilişkilendirilmiştir [158]. Ancak, şimdiye kadar, bu tür 2D bileşenlerin aşınma üzerindeki etkileri ve nedenlerinin ayrıntılı açıklamaları literatürde yeterince çalışılmamıştır. Bu nedenle, bu çalışmanın literatüre önemli bir katkı sağlayacağına inanılmaktadır. Öte yandan, Şekil 6.10(d)'de verilen 2-BN + 2MXene katkılı numunede matris içerisinde bir miktar delaminasyon ve bazı düzgün bölgeler gözlemlenmiştir. Ancak bu sonuçlar, MXene ve BN takviyelerinin sinerjik etkisinin diğerlerine kıyasla önemli bir avantaj sağlamadığını göstermiştir. Bunun nedeni muhtemelen diğerleriyle aynı miktarda takviye içermemesi olabilir. Bununla birlikte, takviye maddeleri diğerleri kadar eklendiğinde, bilyalı öğütme sistemindeki toz

karışımlarının preslenemeyecek ölçüde kümelendiği de gözlemlenmiştir. Sonuç olarak aşınan yüzeylerde BN takviyeli numunenin MXene kıyasla daha az deforme olduğu ve BN numunesinde ağırlıklı olarak adhezif aşınma gözlenirken MXene numunesinde abrazif aşınmanın yoğun olduğu söylenebilir. MXene takviyesi BN'ye kıyasla daha fazla deforme olmuş olsa da yine de saf alaşıma kıyasla daha avantajlı olduğu söylenebilir.



Şekil 6.10. (a) AA7075, (b) 5-BN, (c) 5-MXene, (d) 2-BN + 2-MXene numunelerinin SEM görüntüleri ve aşınma sonrası (e) 5-MXene, (f) 5-BN EDX spektrumları [59].

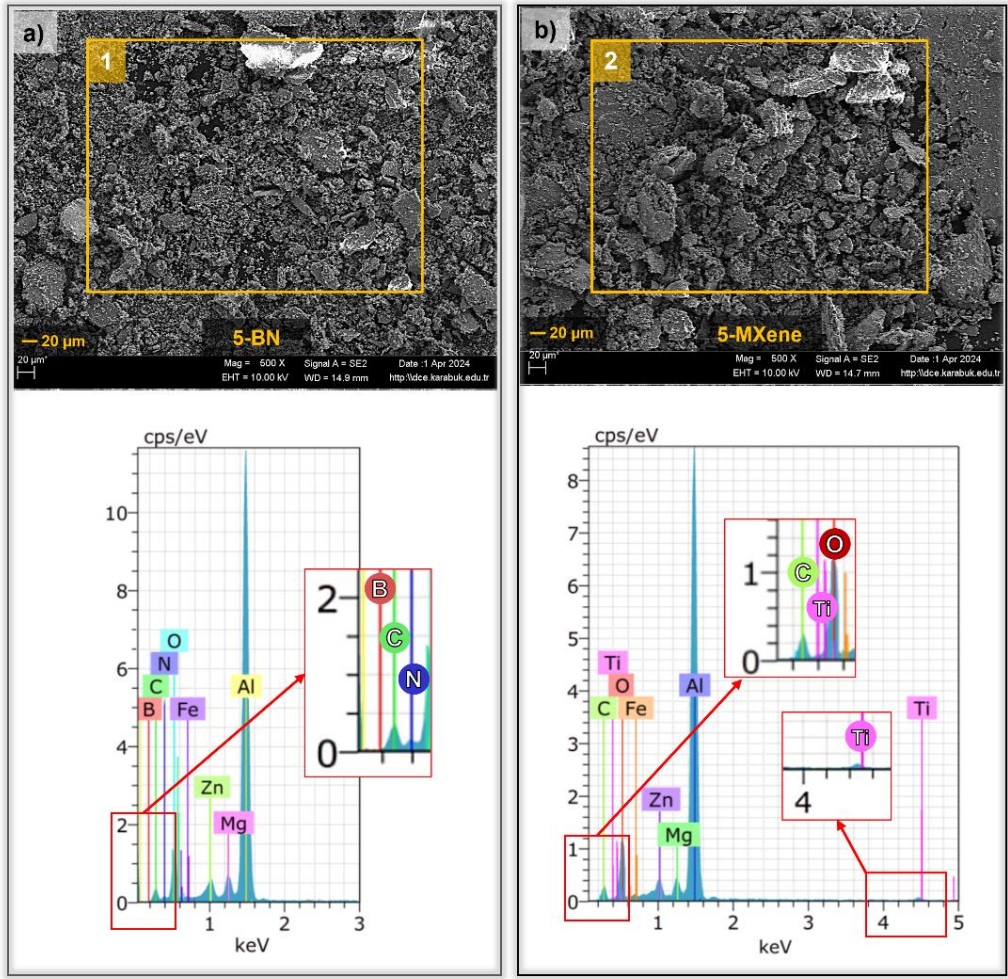
Karşı gövde olarak kullanılan çelik bilyelerin aşınma sonrası yüzey görüntüleri Şekil 6.11'de verilmiştir. Bu görüntüler, çeliğe kıyasla daha yumuşak bir malzeme olan AA7075'in neredeyse tüm bilye yüzeylerinde önemli ölçüde yapıştığını ortaya koymuş ve bilye tarafında yapışkan aşınmasının belirgin etkisini göstermiştir [159]. Öte yandan, bor nitrür (Şekil 6.11(b)) ve MXene (Şekil 6.11(c)) takviyeli numunelerde aşınan malzeme miktarının nispeten daha düşük olması, bu kompozitlerin alaşıma kıyasla aşınmaya daha az eğilimli olduğunu göstermektedir. BN takviyeli bilyenin temas alanında (1- 2) gözlemlenen sürekli/sürekli ve uzun/nispeten ince adhezyonların bor nitrürden kaynaklandığı düşünülmüştür. Bu bölgelerde kısmen gözlenen bor ve azot bu sonucu doğrulamaktadır (Şekil 6.11(e)). Bu nedenle, bor nitrürün esas olarak yapışma mekanizması yoluyla aşınmaya neden olduğu ve yüzeylerde daha az deformasyon sağladığı söylenebilir. Ancak, MXene takviyeli numunede (Şekil 6.11(c)) inset görüntüsünden de anlaşılacağı üzere, EDX spektrumu ile 3. ve 4. bölgelerde görüldüğü gibi önemli ölçüde oksidasyon ve kısmen çatlama gözlenmiştir (Şekil 6.11(f)). Bu bölgelerdeki Ti ve C varlığı özellikle MXene bağlı oksidasyona işaret etmektedir. Literatürde MXene'in çeşitli uygulamalarda oksidasyona duyarlı olduğu belirtilmiştir ve bu durum burada da gözlemlenmiştir. Bu durumda, MXene muhtemelen sürtünme sırasında kolayca oksitlenmiş, daha sert bir yapıya dönüşmüş ve mikroyapı görüntüsünde zaten gözlemlendiği gibi (Şekil 6.11(c)) BN takviyeli numuneye kıyasla daha fazla aşındırıcı aşınmaya neden olmuştur. 2-BN + 2MXene katkılı numunede aşındırıcı bilye yüzeyinde belirgin bir ayırt edici özellik oluşmamasına rağmen (Şekil 6.11(d)), kayma yönünde kısmen daha uzun yapışmalar meydana gelmiştir. Bunlar, numune yüzeyinde daha fazla yapışkan aşınmasının meydana gelmiş olabileceğinin bir göstergesi olarak kabul edilebilir.



Şekil 6.11. (a) AA7075, (b) 5-BN, (c) 5-MXene, (d) 2-BN + 2-MXene numunelerini aşındırın bilyelerin SEM görüntüleri ve (e) 5-BN, (f) 5-MXene EDX spektrumları [59].

Bor nitrid ve MXene takviyeli numunelerin döküntü görüntüleri ve EDX spektrumları Şekil 6.12'de verilmiştir. Bu görüntüler bor-azot (Şekil 6.12(a)) ve titanyum-karbon (Şekil 6.12(b)) varlığını ortaya koymakta, alaşım ve bilyeden gelen elementlere ek

olarak takviyelerin varlığını da göstermektedir. Büyük olasılıkla, bu takviyeler sürtünme sırasında numune yüzeyinden ayrılmış ve matrisle birlikte uzaklaşarak aşınmaya nispeten katkıda bulunmuştur [160]. Ayrıca, aşınmış döküntülerin partikül boyutları da aşındırıcı aşınmanın şiddetini gösterir ve MXene numunesinde nispeten daha büyük partiküller gözlemlenmiştir [161]. Sonuç olarak, bor nitür ve MXene alüminyum matrisinde takviye olarak kullanıldığında, bor nitürün esas olarak yapışkan aşınmaya neden olduğu, MXene'in ise aşındırıcı aşınmaya neden olduğu görülmektedir. Bunun nedeni muhtemelen MXene'in kolay oksitlenmesi ve BN'ye kıyasla daha yüksek yüzeysel sürtünme katsayısıdır. Bu nedenle, MXene alüminyumun aşınma direncine katkıda bulunurken, takviye olarak seçildiğinde neden olduğu abrasif aşınma göz önünde bulundurulmalıdır. Şimdiye kadar AA7075 matrisine bor nitür ve diğer takviyeler hakkında kısa bir literatür taraması yapılmış ve sonuçlar Çizelge 6.1'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre, spesifik aşınma oranı TiO_2 ve BN takviyesi ile %51'e kadar iyileşirken [162], sadece BN takviyesi ile maksimum %40'lık bir iyileşmeye ulaştığı görülmüştür [163]. Bor nitür takviyesi B_4C [164] ve SiC ile birleştirildiğinde, sırasıyla %27 ve %61'e ulaşan iyileşme elde edilmiştir [165]. Ayrıca bu sonuçlardan SiC'nin daha fazla yağlayıcı davranış sergilediği anlaşılırken, B_4C 'nin numuneyi daha fazla sertleştirerek abrasif aşınmaya bağlı iyileşmeyi daha az etkilediği görülmüştür. Ayrıca, ZrB_2 takviyesinin sertliği artırmadan aşınmayı 3 ila 5 kat artırdığı gözlemlenmiştir [166]. Benzer şekilde, TaC ve NbC gibi nadir toprak elementi karbürler bor nitür ile birlikte kullanıldığında [167], B_4C gibi sertliği etkilemedikleri belirtilmesine rağmen, aşınmayı 14 ila 24 kat artırmışlardır. Tüm bu sonuçlar sıvı metal ile çeşitli döküm teknikleri kullanılarak elde edilmiştir. Ancak bizim çalışmamızda toz metalürjisi ve sinterleme gibi bir yöntem kullanılarak malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, sadece ağırlıkça %5 bor nitür takviyesi 5 N'de yaklaşık %48'lik bir iyileşme sağlarken, ağırlıkça %5 MXene takviyesi ile 5 N'de yaklaşık %42'lik bir iyileşme elde edilmiştir. Her ikisi birlikte kullanıldığında, 5 N'de yalnızca yaklaşık %34 iyileşme elde edilmiştir. Sonuç olarak, MXene ilavesinin numuneyi oksidasyona daha yatkın hale getirdiği, bunun da kırılma ve kolay aşınan özelliklere yol açtığı söylenebilir. Bununla birlikte, MXene ilavesi ile %42'ye varan iyileşme önemli bir avantaj olarak kabul edilmektedir. Bor nitür ile birlikte kullanıldığında, aşınma oranındaki iyileşme yükteki artıştan daha az etkilenmektedir.



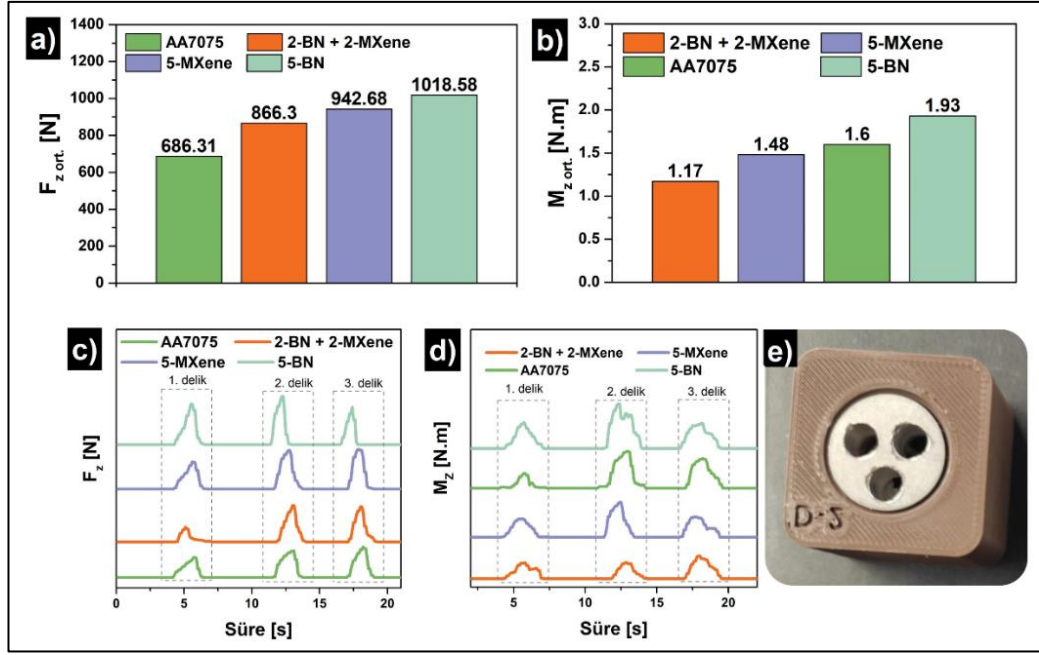
Şekil 6.12. (a) 5-BN ve (b) 5-MXene numunelerinin aşınma kalıntılarının EDX spektrumları ile birlikte SEM görüntüleri [59].

Çizelge 6.1. AA7075 kompozitlerinin tribolojik özelliklerine ilişkin literatür taraması
(*SAO: Spesifik Aşınma Oranı).

Takviyeler	Yöntem	Sertlik	% Sertlik Artışı	SAO*	% SAO Artışı	Ref.
(ağ.) %5 BN	Toz Metalurjisi	123 HV	174	$1,17 \times 10^{-3}$ mm ³ /Nm	5N'de %48.4	Bu çalışma
(ağ.) %5 MXene		69 HV	54	$1,30 \times 10^{-3}$ mm ³ /Nm	5N'de %42.4	
(ağ.) %2 BN+(ağ.) %2 MXene		125 HV	179	$1,48 \times 10^{-3}$ mm ³ /Nm	5N'de %34.6	
(ağ.) %7 SiC (ağ.) %3 BN	Sürtünme Karıştırma İşlemi	160 HV	45	0.7×10^{-3} mg/s	%53-61	[165]
(ağ.) %0,4B4C (ağ.) %0,6 BN	Ultrasonik Karıştırma Dökümü	76 HRB	90	4 mm ³ /dk	-	[168]
(ağ.) %5 ZrB2 +(ağ.) %5 BN	Sıkıştırma Dökümü	102 HB	-4	0.9×10^{-4} mm ³ /Nm	20- 80N'de 3- 5 kat	[169]
(ağ.) %3 B4C +(ağ.) %3 BN	Karıştırma- Sıkıştırma Dökümü	127 HV	116	2.8×10^{-4} mm ³ /m	20N'de %15	[106]
(ağ.) %6 B4C +(ağ.) %3 BN		146 HV	143	2.6×10^{-4} mm ³ /m	20N'de %21	
(ağ.) %9 B4C +(ağ.) %3 BN		160 HV	166%	2.5×10^{-4} mm ³ /m	20N'de %27	
(ağ.) %5 TiO2+(ağ.) %6 BN	Karıştırma Dökümü	93 HV	19	2.4×10^{-3} mm ³ /m	20N'de %51	[170]
(ağ.) %2,5 BN	Karıştırma Dökümü	103 HV	8	2.8×10^{-3} mm ³ /m	20N'de %24	[171]
(ağ.) %5 BN		115 HV	21	2.5×10^{-3} mm ³ /m	20N'de %32	
(ağ.) %7,5 BN		96 HV	1	2.2×10^{-3} mm ³ /m	20N'de %40	
BN/NbC	Sürtünme Karıştırma İşlemi	157 HV	44	0.11×10^{-4} g/s	14-24 kat	[172]
BN/SiC		140 HV	28	0.098×10^{-4} g/s		
BN/TaC		146 HV	33	0.067×10^{-4} g/s		

6.3.2. İşlenebilirlik (Delik Delme) Testi Ölçümleri

Delik delme testleri Bölüm 5'te belirtilen özel tasarım dinamometre cihazında her bir numuneye 3 adet delik (Şekil 6.13(c-e)) açılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.13'te yer alan işlenebilirlik testi ölçümlerine göre, farklı malzemeler için delik delme işlemi sırasında ortaya çıkan ortalama kuvvet (F_{z-ort}) (Şekil 6.13(a)) ve moment (M_{z-ort}) (Şekil 6.13(b)) değerleri analiz edilmiştir. AA7075 malzemesi için ortalama delme kuvveti 686,31 N ve moment değeri 1,60 Nm olarak ölçülmüştür. Bu değerler, AA7075'in nispeten kolay delinebilir bir malzeme olduğunu göstermektedir. 5-BN malzemesi ise en yüksek delme kuvveti (1018,58 N) ve moment değerine (1,93 Nm) sahiptir, bu da bu malzemenin işlenebilirliğinin en zor olduğunu ifade eder. 5-MXene malzemesi için ortalama delme kuvveti 942,68 N ve moment değeri 1,48 Nm'dir; bu da işlenebilirliğinin orta seviyede olduğunu gösterir. 2-BN+2-MXene malzemesi ise ortalama 866,30 N delme kuvveti ve 1,17 Nm moment değeri ile işlenebilirliği en kolay ikinci malzeme olarak öne çıkmaktadır. Bu veriler ışığında, malzemelerin delik delme işlemleri sırasındaki işlenebilirlikleri değerlendirildiğinde, AA7075 ve 2-BN+2-MX malzemeleri daha kolay işlenebilirken, 5-BN malzemesi en zor işlenebilir malzeme olarak belirlenmiştir. Delik delme deneylerinin tekrar edilmesi ve farklı parametrelerin denenmesi, daha doğru sonuçlar elde edilmesi açısından faydalı olacaktır.



Şekil 6.13. (a) Ortalama F_z kuvveti, b) ortalama M_z kuvveti, c) cihazdan alınan F_z kuvveti verileri, d) cihazdan alınan M_z kuvveti verileri ve e) örnek delinmiş numune.

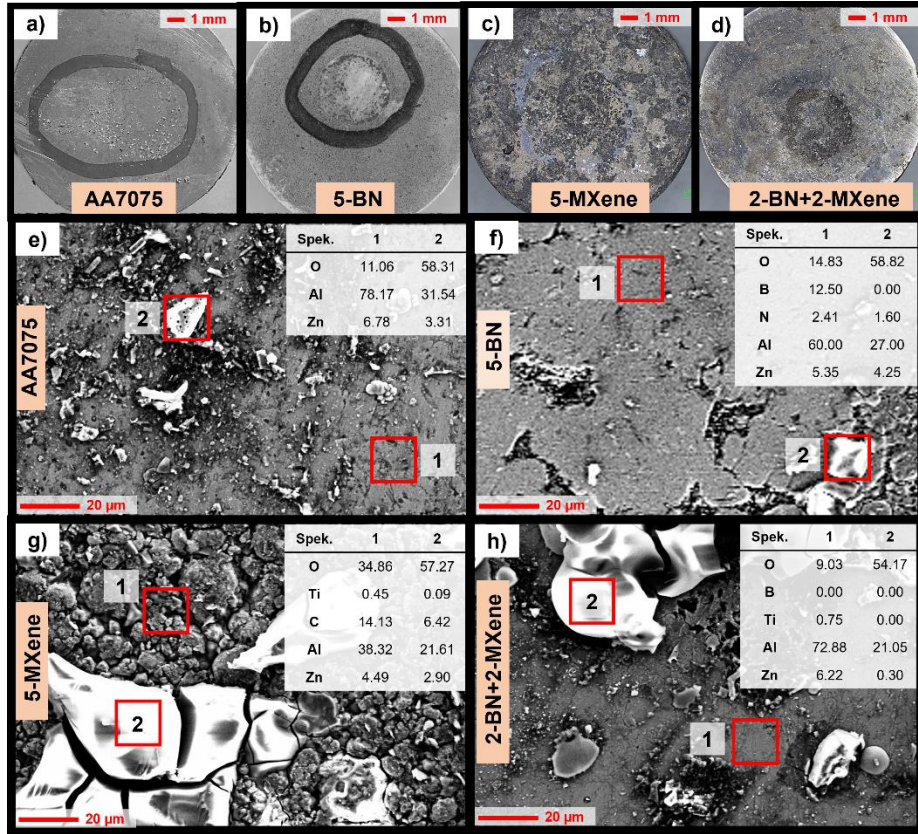
6.4. KOROZİF TESTLERİN SONUÇLARI

Çizelge 6.2’de, AA7075, 5-BN, 5-MXene ve 2-BN + 2-MXene numunelerinin korozyon performanslarını karşılaştırıyor. 5-BN en düşük korozyon akımı, akım yoğunluğu ve korozyon hızına sahip olup en iyi korozyon direncini gösterirken, 5-MXene en yüksek korozyon akımı, akım yoğunluğu ve korozyon hızına sahip olup en kötü korozyon direncine sahiptir. 2-BN + 2-MXene kombinasyonu, tek başına MXene'den daha iyi, ancak tek başına BN'den daha düşük korozyon direncine sahiptir.

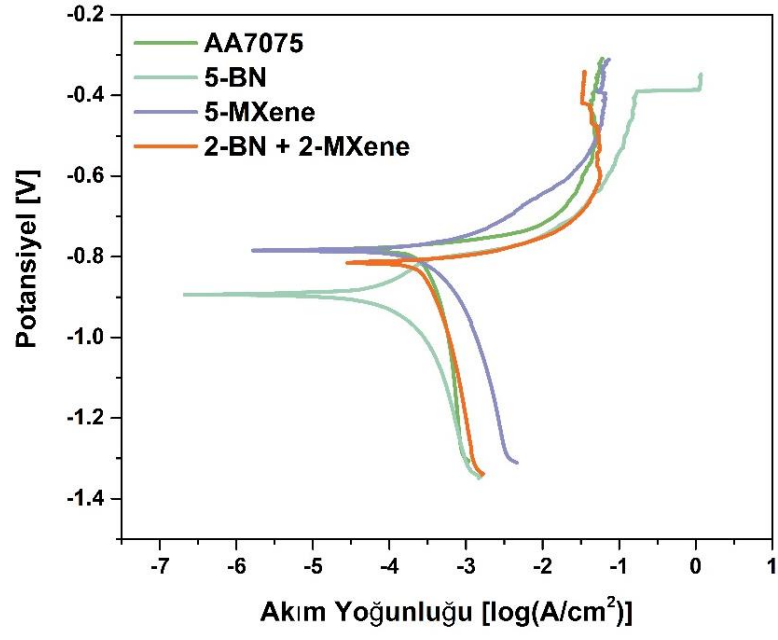
Çizelge 6.2. Kompozitlerin korozyon testi sonuçları.

Numune	Yüzey Alanı (cm ²)	Korozyon Akımı (µA)	Korozyon Akım Yoğunluğu (µA/cm ²)	Korozyon Hızı (mm/yıl)
AA7075	0.12	42.47	353.92	3.71
5-BN	0.12	22.52	187.67	1.99
5-MXene	0.12	89.28	744	7.96
2-BN + 2-MXene	0.12	46.96	391.33	4.15

Şekil 6.14, korozyon sonrası makro ve SEM görüntülerini içermektedir. AA7075, 5-BN, 5-MXene ve 2-BN + 2-MXene numunelerinin korozyon sonrası makro görüntüleri, her bir numunedeki korozyon hasarını göstermektedir. 5-BN numunesi, nispeten daha az korozyon hasarı gösterirken, 5-MXene numunesi yoğun bir korozyon tabakası ile kaplıdır. AA7075 numunesinde oksitlenmiş bölgeler tespit edilmiştir. 5-BN numunesi, bor ve nitrojen zengin bölgeler göstermekte olup, bu elementlerin korozyon direncini artırdığı düşünülmektedir. 5-MXene numunesi, titanyum ve karbon içeriği ile dikkat çekerken, korozyon sonrası oluşan çatlak yapıları gözlemlenmiştir. Şekil 6.15'te ise Tafel grafikleri (anodik ve katodik polarizasyon eğrileri) gösterilmiştir.



Şekil 6.14. Korozyon sonrası makro görüntüler sırasıyla: (a) AA7075, (b) 5-BN, (c) 5-MXene, (d) 2-BN + 2-MXene; korozyon sonrası SEM görüntüler sırasıyla: (a) AA7075, (b) 5-BN, (c) 5-MXene, (d) 2-BN + 2-MXene.



Şekil 6.15. Tafel grafikleri (anodik ve katodik polarizasyon eğrileri).

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, AA7075 alüminyum alaşımının zayıf tribolojik özelliklerini iyileştirmek amacıyla BN ve MXene ile güçlendirilmiş kompozitler geliştirilmiştir. Üretilen kompozitlerin karakterizasyonu, mekanik, tribolojik, işlenebilirlik ve korozyon özellikleri incelenmiştir. Ana bulgular şunlardır:

%5 BN takviyesi ile %174 artış sağlanarak 123 HV sertlik elde edilmiştir. %5 MXene takviyesi ile %54 artış sağlanarak 69 HV sertlik elde edilmiştir. Ayrıca, %2 BN ve %2 MXene takviyesi ile %179 artış sağlanarak 125 HV sertlik elde edilmiştir. Porozite ve yoğunluk ölçümlerinde, BN ve MXene takviyelerinin kompozitlerin yoğunluğunu artırdığı, porozite oranını ise azalttığı gözlemlenmiştir. Bu durumun muhtemel nedeni, bor nitrid (BN) ve MXene partiküllerinin alüminyumdan daha küçük boyutları sayesinde daha fazla boşluğa nüfuz ederek yoğunluğu artırmaları ve böylece gözenekliliği azaltmalarındadır. Yüksek yoğunluk ve düşük porozite, kompozitlerin mekanik dayanımını ve tribolojik performansını olumlu yönde etkilemiştir.

Aşınma davranışı açısından, %5 BN takviyesi ile spesifik aşınma oranı %48 azalmış, %5 MXene takviyesi ile spesifik aşınma oranı %42 azalmış ve her iki takviyenin %2 oranında eklenmesiyle spesifik aşınma oranı %34 düşmüştür. Ayrıca, MXene takviyesinin bor nitride kıyasla matriste daha fazla oksidasyon ve deformasyona neden olduğu gözlemlenmiştir. BN numunesinde ağırlıklı olarak adhezif aşınma gözlenirken, MXene numunesinde abrazif aşınmanın yoğun olduğu söylenebilir.

İşlenebilirlik testlerinde, F_z kuvveti %2 BN + %2 MXene katkılı kompozitte %36, %5 MXene katkılı kompozitte %48 ve %5 BN katkılı kompozitte %60 artmıştır.

Delme işlemi açısından en kolaydan en zora doğru sıralama şu şekildedir: AA7075 < %2 BN + %2 MXene < %5 MXene < %5 BN. Bu sıralamaya göre, AA7075 en kolay işlenebilir malzeme, %5 BN ise en zor işlenebilir malzeme olarak belirlenmiştir. Delik delme deneylerinin tekrarı ve farklı parametrelerin denenmesi, daha doğru sonuçlar elde edilmesi açısından faydalı olacaktır.

Korozyon davranışları incelendiğinde, %5 BN katkılı numunenin en yüksek korozyon direncine sahip olduğu, %5 MXene katkılı numunenin ise en düşük korozyon direncini gösterdiği tespit edilmiştir. %2 bor nitür ve %2 MXene kombinasyonu ise saf numuneye kıyasla biraz daha düşük bir korozyon direnci göstermiştir.

Bu çalışmada kullanılan özel tasarım dinamometre, delik delme analizlerinde işlenebilirlik özelliklerini hızlı ve düşük maliyetli bir şekilde incelemeyi sağlamıştır. Dinamometre, bilgisayar ortamında katı modelleme yapılarak tasarlanmış, ardından gövde elemanları 3D yazıcı ile üretilmiş ve montajlanmıştır. Mikrodenetleyici bağlantıları yapılarak cihaz çalışır hale getirilmiş ve statik kalibrasyon ile doğru ölçüm alabilmesi sağlanmıştır.

Sonuç olarak, BN takviyesi kompozitlerin korozyon direncini artırırken, aşınma oranını önemli ölçüde azaltmıştır. MXene ise mekanik özellikleri iyileştirirken, korozyon direncini olumsuz etkilemiştir. Ayrıca, özel tasarım dinamometre ile yapılan işlenebilirlik testleri, bu kompozitlerin performans değerlendirmesinde önemli bilgiler sağlamıştır. Bu çalışma, yenilikçi yağlayıcı partikül takviyelerinin alüminyum matrisli kompozitlerin özelliklerini geliştirmede önemli bilgiler sunmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Liu, C., Yin, Y., Li, C., Xu, M., Li, R. R., and Chen, Q., "Tribological performance optimization and synergistic lubrication evolution of Pb-free FeS/Cu–Bi composites", *Lubrication Science*, 34 (7): 449–466 (2022).
2. Tabandeh-Khorshid, M., Omrani, E., Menezes, P. L., and Rohatgi, P. K., "Tribological performance of self-lubricating aluminum matrix nanocomposites: role of graphene nanoplatelets", *Engineering Science And Technology, An International Journal*, 19 (1): 463–469 (2016).
3. Mucelin, K. J., da Costa Gonçalves, P., Hammes, G., Binder, R., Janssen, R., Klein, A. N., and Biasoli de Mello, J. D., "Tribological study of self-lubricating composites with hexagonal boron nitride and graphite as solid lubricants", (2014).
4. Omrani, E., Moghadam, A. D., Menezes, P. L., and Rohatgi, P. K., "Influences of graphite reinforcement on the tribological properties of self-lubricating aluminum matrix composites for green tribology, sustainability, and energy efficiency—a review", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 83 (1–4): 325–346 (2016).
5. Zhai, W., Shi, X., Yao, J., Xu, Z., Ibrahim, A. M. M., Zhu, Q., Chen, L., and Xiao, Y., "Synergetic lubricating effect of WS₂ and Ti₃SiC₂ on tribological properties of Ni₃Al matrix composites at elevated temperatures", *Tribology Transactions*, 58 (3): 454–466 (2015).
6. Naguib, M., Mochalin, V. N., Barsoum, M. W., and Gogotsi, Y., "25th anniversary article: MXenes: A new Family of two-dimensional materials", *Advanced Materials*, 26 (7): 992–1005 (2014).
7. Fei, M., Lin, R., Lu, Y., Zhang, X., Bian, R., Cheng, J., Luo, P., Xu, C., and Cai, D., "MXene-reinforced alumina ceramic composites", *Ceramics International*, 43 (18): 17206–17210 (2017).
8. Sharma, A. K., Bhandari, R., Aherwar, A., Rimašauskienė, R., and Pinca-Bretotean, C., "A study of advancement in application opportunities of aluminum metal matrix composites", *Materials Today: Proceedings*, 26: 2419–2424 (2020).
9. Pai, B. C., Rajan, T. P. D., and Pillai, R. M., "Aluminium matrix composite castings for automotive applications", *Indian Foundry Journal*, 50 (9): 30–39 (2004).
10. Allison, J. E. and Cole, G. S., "Metal-matrix composites in the automotive industry: opportunities and challenges", *JoM*, 45: 19–24 (1993).

11. Hunt Jr, W. H. and Miracle, D. B., "Automotive applications of metal-matrix composites", *Composites, ASM International*, 1029–1032 (2001).
12. Srivivas, P. D. and Charoo, M. S., "Application of hybrid aluminum matrix composite in automotive industry", *Materials Today: Proceedings*, 18: 3189–3200 (2019).
13. Stojanović, B. and Ivanović, L., "Application of aluminium hybrid composites in automotive industry", *Tehnički Vjesnik*, 22 (1): 247–251 (2015).
14. Al Mehedi, M., "Aluminium matrix composites in automotive applications", *International Aluminium Journal*, 87 (7–8): 55–57 (2011).
15. Miracle, D. B., "Metal matrix composites—from science to technological significance", *Composites Science And Technology*, 65 (15–16): 2526–2540 (2005).
16. Stojanović, B., "Tribological behaviour of hybrid composites with A356 matrix. Faculty of Engineering. University of Kragujevac", Doktora Tezi, *Kragujevac Üniversitesi*, (2013).
17. Elmarakbi, A., "Advanced Composite Materials for Automotive Applications: Structural Integrity and Crashworthiness", *John Wiley & Sons*, (2013).
18. Daoud, A. and Abou El-khair, M. T., "Wear and friction behavior of sand cast brake rotor made of A359-20 vol% SiC particle composites sliding against automobile friction material", *Tribology International*, 43 (3): 544–553 (2010).
19. Uyyuru, R. K., Surappa, M. K., and Brusethaug, S., "Effect of reinforcement volume fraction and size distribution on the tribological behavior of Al-composite/brake pad tribo-couple", *Wear*, 260 (11–12): 1248–1255 (2006).
20. Natarajan, N., Vijayarangan, S., and Rajendran, I., "Wear behaviour of A356/25SiCp aluminium matrix composites sliding against automobile friction material", *Wear*, 261 (7–8): 812–822 (2006).
21. Adebisi, A. A., Maleque, M. A., and Rahman, M. M., "Metal matrix composite brake rotor: historical development and product life cycle analysis", *International Journal Of Automotive And Mechanical Engineering*, 4: 471–480 (2011).
22. Srinivasan, V., Kunjiappan, S., and Palanisamy, P., "A brief review of carbon nanotube reinforced metal matrix composites for aerospace and defense applications", *International Nano Letters*, 11 (4): 321–345 (2021).
23. Karaoğlu, S. Y., Karaoğlu, S., and Ünal, İ., "Aerospace Industry and Aluminum Metal Matrix Composites", *International Journal Of Aviation Science And Technology*, 02 (02): 73–81 (2021).
24. Kaushik, N. and Singhaal, S., "Mechanical and metallurgical examinations of stir cast aluminum matrix composites: a review study", *International Journal Of Engineering And Technology*, 9 (4): 3203–3217 (2017).

25. Zhang, M., Pan, R., Liu, B., Gu, K., Weng, Z., Cui, C., and Wang, J., "The influence of cryogenic treatment on the microstructure and mechanical characteristics of aluminum silicon carbide matrix composites", *Materials*, 16 (1): 396 (2023).
26. Kumar, V. and Sharma, R., "Experimental, characterisation and evaluation of various composite materials for automobile components", 8 (3): (2018).
27. Pan, Z., Li, R., and Zeng, Q., "Research on mechanical properties of carbon nanotubes (CNTs) reinforced cast aluminum alloy (Zl105)", *Archives Of Metallurgy And Materials*, 1307–1318 (2023).
28. Strojny-Nędza, A., Pietrzak, K., and Węglewski, W., "The influence of Al₂O₃ powder morphology on the properties of Cu-Al₂O₃ composites designed for functionally graded materials (FGM)", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 25 (8): 3173–3184 (2016).
29. Naveed, M., "Effect of heat treatment on sliding wear resistance of hybrid aluminum matrix composite", *Recent Progress In Materials*, 5 (2): 1–10 (2023).
30. Mahamani, A., Karthik, A., Karthikeyan, S., Kathiravan, P., and Kumar, Y. P., "Synthesis, quantitative elemental analysis, microstructure characteristics and micro hardness analysis of AA2219 aluminum alloy matrix composite reinforced by in-situ TiB₂ and sub-micron ZrB₂ particles", (2010).
31. Das, O., Aybarc, U., Yucel Ozturk, Y., Goren Kiral, B., Ozturk, H., Kiral, Z., and Uyulgan, B., "A preliminary study on the manufacturing aluminum–potassium feldspar metal matrix composite materials", *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 54 (1): 109–119 (2023).
32. Sun, Z., Hu, C., Liu, C., Lu, G., and Yu, J., "Optimization of mixing parameters for a cold model system by CFD for aluminum matrix composites synthesis process", *The Canadian Journal Of Chemical Engineering*, 95 (3): 467–474 (2017).
33. Seputra, Y. E. A., "Heat treatment of aluminium matrix composite (AMC) reinforcement organoclay for automotive application", *Jurnal Vokasi Indonesia*, 5 (2): 6 (2017).
34. Singh, J. and Chauhan, A., "Characterization of hybrid aluminum matrix composites for advanced applications–A review", *Journal Of Materials Research And Technology*, 5 (2): 159–169 (2016).
35. Chang, K.-C., Xu, Z.-F., Matsugi, K., and Sasaki, G., "Influence of fiber surface structure on interfacial structure between fiber and matrix in vapor grown carbon fiber reinforced aluminum matrix composites", *Materials Transactions*, 50 (6): 1510–1518 (2009).
36. Nturanabo, F., Masu, L., and Kirabira, J. B., "Novel applications of aluminium metal matrix composites", *Aluminium Alloys And Composites*, (2019).

37. Kainer, K. U., "Basics of metal matrix composites", *Metal Matrix Composites: Custom-Made Materials For Automotive And Aerospace Engineering*, 1–54 (2006).
38. Matthews, F. L. and Rawlings, R. D., "Composite Materials: Engineering and Science", *Woodhead Publishing*, (1999).
39. Rosso, M., "Ceramic and metal matrix composites: Routes and properties", *Journal Of Materials Processing Technology*, 175 (1–3): 364–375 (2006).
40. Sharma, A. K., Bhandari, R., and Pinca-Bretotean, C., "A systematic overview on fabrication aspects and methods of aluminum metal matrix composites", *Materials Today: Proceedings*, 45: 4133–4138 (2021).
41. Sharma, A. K., Rakesh, B., Amit, A., and Camelia, P.-B., "A study of fabrication methods of aluminum based composites focused on stir casting process", 27: (2020).
42. Chawla, K. K., "Metal Matrix Composites", *Composite Materials: Science and Engineering*, *Springer*, New York, NY, 164–211 (1998).
43. Saxena, A., Saxena, K. K., Jain, V. K., Rajput, S. K., and Pathak, B. N., "A review of reinforcements and process parameters for powder metallurgy-processed metal matrix composites", *Materials Today: Proceedings*, (2023).
44. Gökçe, A., Fındık, F., and Kurt, A. O., "Alüminyum ve Alaşımlarının Toz Metalurjisi İşlemleri", *Mühendis Ve Makina*, 58 (686): 21–47 (2017).
45. Edosa, O. O., Tekweme, F. K., and Gupta, K., "A review on the influence of process parameters on powder metallurgy parts.", *Engineering & Applied Science Research*, 49 (3): (2022).
46. Bridgwater, J., "Mixing of powders and granular materials by mechanical means— A perspective", *Particuology*, 10 (4): 397–427 (2012).
47. Benjamin, J. S. and Volin, T. E., "The mechanism of mechanical alloying", *Metallurgical Transactions*, 5 (8): 1929–1934 (1974).
48. Murty, B. S. and Ranganathan, S., "Novel materials synthesis by mechanical alloying/milling", *International Materials Reviews*, 43 (3): 101–141 (1998).
49. Suryanarayana, C., "Mechanical alloying and milling", *Progress In Materials Science*, 46 (1): 1–184 (2001).
50. ARSLAN, E. C., "TiC/AA7075 Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretimi ve Karakterizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *Konya Teknik Üniversitesi*, (2019).
51. Kurt, E., Aydemir, F., and Evren, B., "Çeşitli Toz Sıkıştırma Yöntemlerinin Karşılaştırılması", *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, (45): 100–106 (2022).

52. ÖZTÜRK, S. and Arpacı, K. A., "Toz Metalurjisi Deneyi", Laboratuvar Föyü, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü*, (2015).
53. Rodriguez-Contreras, A., Punset, M., Calero, J. A., Gil, F. J., Ruperez, E., and Manero, J. M., "Powder metallurgy with space holder for porous titanium implants: A review", *Journal Of Materials Science & Technology*, 76: 129–149 (2021).
54. Zayed, A. S., Kamel, B. M., Abdelsadek Osman, T., Elkady, O. A., and Ali, S., "Experimental study of tribological and mechanical properties of aluminum matrix reinforced by Al₂O₃/CNTs", *Fullerenes, Nanotubes And Carbon Nanostructures*, 27 (7): 538–544 (2019).
55. El-Ghazaly, A., Anis, G., and Salem, H. G., "Effect of graphene addition on the mechanical and tribological behavior of nanostructured AA2124 self-lubricating metal matrix composite", *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 95: 325–336 (2017).
56. Veeravalli, R. R., Nallu, R., and Mohiuddin, S. M. M., "Mechanical and tribological properties of AA7075–TiC metal matrix composites under heat treated (T6) and cast conditions", *Journal Of Materials Research And Technology*, 5 (4): 377–383 (2016).
57. Rakshath, S., Suresha, B., Sasi Kumar, R., and Saravanan, I., "Dry sliding and abrasive wear behaviour of Al-7075 reinforced with alumina and boron nitride particulates", *Materials Today: Proceedings*, 22: 619–626 (2020).
58. Loganathan, P., Gnanavelbabu, A., and Rajkumar, K., "Influence of ZrB₂/hBN particles on the wear behaviour of AA7075 composites fabricated through stir followed by squeeze cast technique", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part J: Journal Of Engineering Tribology*, 235 (1): 149–160 (2021).
59. Karaca, M. M., Polat, S., and Esen, İ., "Reciprocating dry sliding wear behaviour of BN@MXene@AA7075 composites", *Journal Of Composite Materials*, 00219983241257665 (2024).
60. Chen, X., Zhao, Y., Li, L., Wang, Y., Wang, J., Xiong, J., Du, S., Zhang, P., Shi, X., and Yu, J., "MXene/Polymer Nanocomposites: Preparation, Properties, and Applications", *Polymer Reviews*, 61 (1): 80–115 (2021).
61. 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).
62. Zhi, W., Xiang, S., Bian, R., Lin, R., Wu, K., Wang, T., and Cai, D., "Study of MXene-filled polyurethane nanocomposites prepared via an emulsion method", *Composites Science And Technology*, 168: 404–411 (2018).

63. Liu, Y., Zhang, J., Zhang, X., Li, Y., and Wang, J., "Ti₃C₂T_x filler effect on the proton conduction property of polymer electrolyte membrane", *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8 (31): 20352–20363 (2016).
64. Chen, K., Chen, Y., Deng, Q., Jeong, S.-H., Jang, T.-S., Du, S., Kim, H.-E., Huang, Q., and Han, C.-M., "Strong and biocompatible poly(lactic acid) membrane enhanced by Ti₃C₂T_z (MXene) nanosheets for Guided bone regeneration", *Materials Letters*, 229: 114–117 (2018).
65. Ling, Z., Ren, C. E., Zhao, M.-Q., and Gogotsi, Y., "Flexible and conductive MXene films and nanocomposites with high capacitance", 111 (47): (2014).
66. Sheng, X., Zhao, Y., Zhang, L., and Lu, X., "Properties of two-dimensional Ti₃C₂ MXene/thermoplastic polyurethane nanocomposites with effective reinforcement via melt blending", *Composites Science And Technology*, 181: 107710 (2019).
67. Cao, W.-T., Chen, F.-F., Zhu, Y.-J., Zhang, Y.-G., Jiang, Y.-Y., Ma, M.-G., and Chen, F., "Binary strengthening and toughening of MXene/Cellulose nanofiber composite paper with Nacre-Inspired structure and superior electromagnetic interference shielding properties", *ACS Nano*, 12 (5): 4583–4593 (2018).
68. Sobolčiak, P., Ali, A., Hassan, M. K., Helal, M. I., Tanvir, A., Popelka, A., Al-Maadeed, M. A., Krupa, I., and Mahmoud, K. A., "2D Ti₃C₂T_x (MXene)-reinforced polyvinyl alcohol (PVA) nanofibers with enhanced mechanical and electrical properties", *PLOS ONE*, 12 (8): e0183705 (2017).
69. Zhang, X., Xu, J., Wang, H., Zhang, J., Yan, H., Pan, B., Zhou, J., and Xie, Y., "Ultrathin Nanosheets of MAX Phases with Enhanced Thermal and Mechanical Properties in Polymeric Compositions: Ti₃Si_{0.75}Al_{0.25}C₂", *Angewandte Chemie International Edition*, 16 (52): 4361–4365 (2013).
70. Fan, Y., Tian, Q., Guo, F., Ye, L., Zhang, Y., and Li, X., "Effects of Ti₃C₂T_x size on mechanical properties of Ti₃C₂T_x/ZK61 alloys", *Ceramics International*, 49 (3): 5446–5455 (2023).
71. Si, X.-Y., Chen, F.-Y., Deng, Q.-H., Du, S.-Y., and Huang, Q., "Preparation and property of MXene/Copper alloy composites", *J. Inorg. Mater.*, 33 (6): 603–608 (2018).
72. Hu, J., Li, S., Zhang, J., Chang, Q., Yu, W., and Zhou, Y., "Mechanical properties and frictional resistance of Al composites reinforced with Ti₃C₂T_x MXene", *Chinese Chemical Letters*, 31 (4): 996–999 (2020).
73. Li, M., Wang, S., Wang, Q., Ren, F., and Wang, Y., "Preparation, microstructure and tensile properties of two dimensional MXene reinforced copper matrix composites", *Materials Science And Engineering: A*, 803: 140699 (2021).
74. Aamir, M., Giasin, K., Tolouei-Rad, M., and Vafadar, A., "A review: Drilling performance and hole quality of aluminium alloys for aerospace applications", *Journal Of Materials Research And Technology*, 9 (6): 12484–12500 (2020).

75. Karabulut, Ş., Gökmen, U., and Cinici, H., "Study on the mechanical and drilling properties of AA7039 composites reinforced with Al₂O₃/B₄C/SiC particles", *Composites Part B: Engineering*, 93: 43–55 (2016).
76. Wozniak, J., Kostecki, M., Cygan, T., Buczek, M., and Olszyna, A., "Self-lubricating aluminium matrix composites reinforced with 2D crystals", *Composites Part B: Engineering*, 111: 1–9 (2017).
77. Saravanakumar, A., Sreenivas, P., Vijaya kumar, S., Pradeep kumar, U., and Rajeshkumar, L., "Optimization of drilling process parameters for self-lubricants reinforced aluminium metal matrix composites", *Materials Today: Proceedings*, 52: 1461–1465 (2022).
78. Ramesh Kumar, C., JaiGanesh, V., and Malarvannan, R. R. R., "Optimization of drilling parameters in hybrid (Al6061/SiC/B₄C/talc) composites by grey relational analysis", *Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering*, 41: 1–10 (2019).
79. Basavarajappa, S., Chandramohan, G., Davim, J. P., Prabu, M., Mukund, K., Ashwin, M., and PrasannaKumar, M., "Drilling of hybrid aluminium matrix composites", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 35 (11): 1244–1250 (2008).
80. Zitoune, R., Krishnaraj, V., and Collombet, F., "Study of drilling of composite material and aluminium stack", *Composite Structures*, 92 (5): 1246–1255 (2010).
81. Basavarajappa, S., Chandramohan, G., and Davim, J. P., "Some studies on drilling of hybrid metal matrix composites based on Taguchi techniques", *Journal Of Materials Processing Technology*, 196 (1): 332–338 (2008).
82. Altunpak, Y., Ay, M., and Aslan, S., "Drilling of a hybrid Al/SiC/Gr metal matrix composites", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 60 (5): 513–517 (2012).
83. Karakoç, H., Bilgin, M., and Karabulut, Ş., "Study on the friction drilling behaviors and tribological properties of aluminum matrix composites", *Materials Today Communications*, 38: 108086 (2024).
84. Zakiah, D., Mariah, Y., Fitriah, D., and Ala, A., "An analysis on influence of sea water salinity and acidity in Jakarta ports towards corrosion rate of steel plate as ship material", *Proceedings of the 1st International Conference on Management, Business, Applied Science, Engineering and Sustainability Development, ICMASES 2019, 9-10 February 2019, Malang, Indonesia, Samarinda, Indonesia*, (2020).
85. Aljeaban, N. A., Goni, L. K. M. O., Alharbi, B. G., Jafar Mazumder, M. A., Ali, S. A., Chen, T., Quraishi, M. A., and Al-Muallem, H. A., "Polymers decorated with functional motifs for mitigation of steel corrosion: An overview", *International Journal Of Polymer Science*, 2020: 1–23 (2020).

86. Balçık, C. and Unal, C., "Evaluation of Corrosion Rate in X 65 Steel Pipes by Taguchi Method Based on Factors Originating from Soil and External Interactions", *Materials Science*, 29 (2): 186–194 (2023).
87. Riquelme, A., Rodrigo, P., Escalera-Rodriguez, M. D., and Rams, J., "Evaluation of the wear resistance and corrosion behavior of laser cladding al/sic metal matrix composite coatings on ze41 magnesium alloy", *Coatings*, 11 (6): 639 (2021).
88. Sun, H. H., Chen, D., Li, X. F., Ma, N. H., and Wang, H. W., "Electrochemical corrosion behavior of Al–Si alloy composites reinforced with in situ TiB₂ particulate", *Materials And Corrosion*, 60 (6): 419–423 (2009).
89. Orth, J. E. and Wheat, H. G., "Corrosion behavior of high energy-high rate consolidated graphite/copper metal matrix composites in chloride media", *Applied Composite Materials*, 4: 305–320 (1997).
90. Sun, H., Koo, E. Y., and Wheat, H. G., "Corrosion behavior of SiCp/6061 Al metal matrix composites", *Corrosion*, 47 (10): 741–753 (1991).
91. Mansfeld, F., Lin, S., Kim, S., and Shih, H., "Pitting and passivation of Al alloys and Al-based metal matrix composites", *Journal Of The Electrochemical Society*, 137 (1): 78 (1990).
92. Lakshmi, R., Radha, H. R., Krupakara, P. V., and Latha, V., "Corrosion characterization of aluminium 2024 metal matrix composites reinforced with ly ash in potassium chloride medium", *International Journal Of Trend In Scientific Research And Development*, 2 (2): 707–710 (2018).
93. Lv, L., Jiang, X., Xiao, X., Sun, H., Shao, Z., and Luo, Z., "Study on corrosion resistance of copper matrix composites reinforced by Al₂O₃ whiskers", *Materials Research Express*, 7 (2): 026534 (2020).
94. Ammar, H. R., Sherif, E. M., Sivasankaran, S., Almufadi, F. A., and Mekky, A. H., "Developing improved corrosion-resistant AA5083—BN/WC composites for tribological applications", *Materials*, 16 (4): 1663 (2023).
95. Saber, D., El-Aziz, K. A., Felemban, B. F., Alghtani, A. H., Ali, H. T., Ahmed, E. M., and Megahed, M., "Characterization and performance evaluation of Cu-based/TiO₂ nano composites", *Scientific Reports*, 12 (1): 6669 (2022).
96. Zakoulla, M., Khan, A. A., and Mukunda, P. G., "Effect of electroless copper coating on the corrosion behavior of aluminium based metal matrix composites reinforced with silicon carbide particles", *Journal Of Minerals And Materials Characterization And Engineering*, 2 (1): (2014).
97. Sunitha, N., Manjunatha, K. G., Khan, S., and Sravanthi, M., "Study of SiC/graphite particulates on the corrosion behavior of Al 6065 MMCs using tafel polarization and impedance", *SN Applied Sciences*, 1 (9): 1024 (2019).

98. Cao, H., "Beyond graphene and boron nitride: why MXene can be used in composite for corrosion protection on metals?", *Composites Part B: Engineering*, 271: 111168 (2024).
99. Singh, A., Debnath, N. K., Kumar, V., Chaturvedi, R. K., and Singh, V. K., "Tribology and surface topographical analysis of insitu formed BN and Si₃N₄ in SiC-Al₂O₃ Ceramic composites", (2023).
100. Zhao, H.-R., Ding, J.-H., and Yu, H.-B., "Phosphorylated boron nitride nanosheets as highly effective barrier property enhancers", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57 (42): 14096–14105 (2018).
101. Tang, X., Wang, H., Liu, C., Zhu, X., Gao, W., and Yin, H., "Direct growth of hexagonal boron nitride nanofilms on stainless steel for corrosion protection", *ACS Applied Nano Materials*, 4 (11): 12024–12033 (2021).
102. Wang, F., Zeng, X., Yao, Y., Sun, R., Xu, J., and Wong, C.-P., "Silver nanoparticle-deposited boron nitride nanosheets as fillers for polymeric composites with high thermal conductivity", *Scientific Reports*, 6 (1): 19394 (2016).
103. Sun, J., Xiao, X., Zhang, Y., Cao, W., Wang, N., and Gu, L., "Universal method to synergistically exfoliate and functionalize boron nitride nanosheets with a large yield and high concentration", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61 (23): 8091–8100 (2022).
104. Gopinath, S., Prince, M., and Raghav, G. R., "Enhancing the mechanical, wear and corrosion behaviour of stir casted aluminium 6061 hybrid composites through the incorporation of boron nitride and aluminium oxide particles", *Materials Research Express*, 7 (1): 016582 (2020).
105. Paydar, S., Jafari, A., Bahrololoom, M. E., and Mozafari, V., "Influence of BN and B₄C particulates on wear and corrosion resistance of electroplated nickel matrix composite coatings", *Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces*, 9 (2): 105–110 (2015).
106. Ramadoss, N., Pazhanivel, K., Ganeshkumar, A., and Arivanandhan, M., "Microstructural, mechanical and corrosion behaviour of B₄C/BN-reinforced Al7075 matrix hybrid composites", *International Journal Of Metalcasting*, 17 (1): 499–514 (2023).
107. Adnan, F. A., Abdulkader, N. J., and Hamza, M. S., "Corrosion Behavior of Zinc Alloy Based Metal Matrix Composites Reinforced with nano BN", *Journal Of Physics: Conference Series*, 1279 (1): 012031 (2019).
108. Lu, F., Liu, C., Chen, Z., Veerabagu, U., Chen, Z., Liu, M., Hu, L., Xia, H., Cha, L., and Zhang, W., "Polypyrrole-functionalized boron nitride nanosheets for high-performance anti-corrosion composite coating", *Surface And Coatings Technology*, 420: 127273 (2021).

109. Husain, E., Narayanan, T. N., Taha-Tijerina, J. J., Vinod, S., Vajtai, R., and Ajayan, P. M., "Marine Corrosion Protective Coatings of Hexagonal Boron Nitride Thin Films on Stainless Steel", *ACS Applied Materials & Interfaces*, 5 (10): 4129–4135 (2013).
110. Yin, X., Li, B., Xue, S., Mu, P., and Li, J., "Fabrication of Ti₃C₂T_x-based superhydrophobic composite coating for reinforcement corrosion resistance of AZ31B Mg alloy", *Advanced Engineering Materials*, 25 (10): 2201573 (2023).
111. Lou, D., Chen, H., Liu, J., Wang, D., Wang, C., Jasthi, B. K., Zhu, Z., Younes, H., and Hong, H., "Improved anticorrosion properties of polyurethane nanocomposites by Ti₃C₂T_x MXene/functionalized carbon nanotubes for corrosion protection coatings", *ACS Applied Nano Materials*, 6 (13): 12515–12525 (2023).
112. Zhang, Y., Chen, C., Chen, Z., Zhang, T., Wang, Y., Cao, S., and Ma, J., "Superior anticorrosion performance of well-dispersed mxene-polymer composite coatings enabled by covalent modification and ambient electron-beam curing", *ACS Applied Materials & Interfaces*, 15 (8): 11099–11110 (2023).
113. Meng, S., Zhao, T., Wang, X., Wang, X., and Zhang, Y., "High-dielectric PVDF/MXene composite dielectric materials for energy storage preparation and performance study", *Polymer Composites*, 45 (4): 3460–3473 (2024).
114. Yan, H., Li, W., Li, H., Fan, X., and Zhu, M., "Ti₃C₂ MXene nanosheets toward high-performance corrosion inhibitor for epoxy coating", *Progress In Organic Coatings*, 135: 156–167 (2019).
115. Nie, Y., Huang, J., Ma, S., Li, Z., Shi, Y., Yang, X., Fang, X., Zeng, J., Bi, P., Qi, J., Wang, S., Xia, Y., Jiao, T., Li, D., and Cao, M., "MXene-hybridized silane films for metal anticorrosion and antibacterial applications", *Applied Surface Science*, 527: 146915 (2020).
116. Dong, Y., Wu, K., Yin, Y., Du, X., and Zhou, Q., "TiN/TiO₂/MXene ternary composite with photocathodic protection for 304 stainless steel", *Chemical Engineering Journal*, 442: 136390 (2022).
117. Sheng, X., Li, S., Huang, H., Zhao, Y., Chen, Y., Zhang, L., and Xie, D., "Anticorrosive and UV-blocking waterborne polyurethane composite coating containing novel two-dimensional Ti₃C₂ MXene nanosheets", *Journal Of Materials Science*, 56 (6): 4212–4224 (2021).
118. "Thermal and corrosion behavior of Ti₃C₂/Copper composites", *Composites Communications*, 22: 100498 (2020).
119. Wu, Y., Wu, L., Zheludkevich, M. L., Chen, Y., Serdechnova, M., Yao, W., Blawert, C., Atrons, A., and Pan, F., "MgAl-V₂O₇ 4- LDHs/(PEI/MXene)₁₀ composite film for magnesium alloy corrosion protection", *Journal Of Materials Science & Technology*, 91: 28–39 (2021).

120. Jia, W., Cao, H., Wang, T., Min, Y., and Xu, Q., "Electrochemical behavior and anti-corrosion property of Ti₃C₂T_x MXene/LDH heterostructured coating on aluminum alloy", *Surface And Coatings Technology*, 463: 129551 (2023).
121. Barsoum, M. W. and Radovic, M., "Elastic and mechanical properties of the MAX phases", *Annual Review Of Materials Research*, 41 (1): 195–227 (2011).
122. Aktaş, B. and Açıkgöz, A., "Malmeme Laboratuvarı 1 Deney Föyü", *Harran Üniversitesi-Makine Mühendisliği Bölümü*, 11–12 .
123. Turan, M. E., "Investigation of mechanical properties of carbonaceous (MWCNT, GNPs and C60) reinforced hot-extruded aluminum matrix composites", *Journal Of Alloys And Compounds*, 788: 352–360 (2019).
124. 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).
125. "Porima PLA Teknik Veri Sayfası", <https://www.porima3d.com/porima-pla-filament-175mm-1kg> .
126. Chand, S., Chandrasekhar, P., Roy, S., and Singh, S., "Influence of dispersoid content on compressibility, sinterability and mechanical behaviour of B₄C/BN reinforced Al6061 metal matrix hybrid composites fabricated via mechanical alloying", *Metals And Materials International*, 27 (11): 4841–4853 (2021).
127. Şenel, M. C. and Gürbüz, M., "Synergistic effect of graphene/boron nitride binary nanoparticles on aluminum hybrid composite properties", *Advanced Composites And Hybrid Materials*, 1–13 (2021).
128. Jin, Y., Fan, Y., Meng, X., Zhang, W., Meng, B., Yang, N., and Liu, S., "Theoretical and experimental insights into the mechanism for gas separation through nanochannels in 2D laminar MXene membranes", *Processes*, 7 (10): 751 (2019).
129. Khot, A. C., Dongale, T. D., Park, J. H., Kesavan, A. V., and Kim, T. G., "Ti₃C₂-Based MXene Oxide Nanosheets for Resistive Memory and Synaptic Learning Applications", *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13 (4): 5216–5227 (2021).
130. Wu, P., Lu, L., He, J., Chen, L., Chao, Y., He, M., Zhu, F., Chu, X., Li, H., and Zhu, W., "Hexagonal boron nitride: A metal-free catalyst for deep oxidative desulfurization of fuel oils", *Green Energy & Environment*, 5 (2): 166–172 (2020).
131. Çanakçı, A., Karabacak, A. H., Çelebi, M., Özkaya, S., and Arpacı, K. A., "A study on the optimization of nano-B₄C content for the best wear and corrosion properties of the Al-based hybrid nanocomposites", *Arabian Journal For Science And Engineering*, (2024).

132. Polat, S., Sun, Y., Çevik, E., and Colijn, H., "Evaluation of thermal conductivity of GNPs-doped B₄C/Al-Si composites in terms of interface interaction and electron mobility", *Diamond And Related Materials*, 98: 107457 (2019).
133. Salur, E., Acarer, M., and Şavkliyildiz, İ., "Improving mechanical properties of nano-sized TiC particle reinforced AA7075 Al alloy composites produced by ball milling and hot pressing", *Materials Today Communications*, 27: 102202 (2021).
134. Lahiri, D., Hadjikhani, A., Zhang, C., Xing, T., Li, L. H., Chen, Y., and Agarwal, A., "Boron nitride nanotubes reinforced aluminum composites prepared by spark plasma sintering: Microstructure, mechanical properties and deformation behavior", *Materials Science And Engineering: A*, 574: 149–156 (2013).
135. Antillon, M., Nautiyal, P., Loganathan, A., Boesl, B., and Agarwal, A., "Strengthening in boron nitride nanotube reinforced aluminum composites prepared by roll bonding", *Advanced Engineering Materials*, 20 (8): 1800122 (2018).
136. Wang, Y., Zhu, Y., Li, R., Liu, H., Liu, W., and He, P., "High-performance aluminum-based matrix composites reinforced with high content of boron nitride nanosheets", *Journal Of Alloys And Compounds*, 906: 164358 (2022).
137. Nautiyal, P., Rudolf, C., Loganathan, A., Zhang, C., Boesl, B., and Agarwal, A., "Directionally aligned ultra-long boron nitride nanotube induced strengthening of aluminum-based sandwich composite", *Advanced Engineering Materials*, 18 (10): 1747–1754 (2016).
138. Polat, S., Sun, Y., Cevik, 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).
139. Chauhan, S. R., Gaur, B., and Dass, K., "Synergistic effects of micro size flyash particulate and glass fiber on friction and wear of vinylester hybrid composites under dry and water lubricated sliding condition", *Intern J Mater Eng*, 2 (3): 23–31 (2012).
140. Charoo, M. S., F Wani, M., Hanief, M., Chetani, A., and Rather, M. A., "Tribological characteristics of EN8 and EN24 steel against aluminium alloy 6061 under lubricated condition", *Advanced Materials Proceedings*, 2 (7): 445–449 (2017).
141. Wójcik, A., Frączek, J., and Niemczewska-Wójcik, M., "The relationship between static and kinetic friction for plant granular materials", *Powder Technology*, 361: 739–747 (2020).
142. Manu, B. R., Gupta, A., and Jayatissa, A. H., "Tribological properties of 2D materials and composites—a review of recent advances", *Materials*, 14 (7): 1630 (2021).

143. Uzoma, P. C., Hu, H., Khadem, M., and Penkov, O. V., "Tribology of 2D nanomaterials: A review", *Coatings*, 10 (9): 897 (2020).
144. Zhang, S., Ma, T., Erdemir, A., and Li, Q., "Tribology of two-dimensional materials: From mechanisms to modulating strategies", *Materials Today*, 26: 67–86 (2019).
145. Qi, W., Huang, P., Chen, X., Jin, J., and Luo, J., "Achieving controllable friction of ultrafine-grained graphite HPG510 by tailoring the interfacial nanostructures", *Applied Surface Science*, 512: 145731 (2020).
146. Daly, M., Cao, C., Sun, H., Sun, Y., Filleter, T., and Singh, C. V., "Interfacial shear strength of multilayer graphene oxide films", *ACS Nano*, 10 (2): 1939–1947 (2016).
147. Wang, S. and Zheng, Y., "Effect of different thickness h-BN coatings on interface shear strength of quartz fiber reinforced SiOCN composite", *Applied Surface Science*, 292: 876–879 (2014).
148. Zhang, D., Ashton, M., Ostadhosseini, A., van Duin, A. C. T., Hennig, R. G., and Sinnott, S. B., "Computational Study of Low Interlayer Friction in Tin+1Cn (n = 1, 2, and 3) MXene", *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9 (39): 34467–34479 (2017).
149. Kim, D.-I., Park, S.-M., Hong, S. W., Jeong, M. Y., and Kim, K. H., "The periodicity in interfacial friction of graphene", *Carbon*, 85: 328–334 (2015).
150. Lee, C., Li, Q., Kalb, W., Liu, X.-Z., Berger, H., Carpick, R. W., and Hone, J., "Frictional Characteristics of Atomically Thin Sheets", *Science*, 328 (5974): 76–80 (2010).
151. Li, Y., Huang, S., Wei, C., Zhou, D., Li, B., Mochalin, V. N., and Wu, C., "Friction between MXenes and other two-dimensional materials at the nanoscale", *Carbon*, 196: 774–782 (2022).
152. Suganeswaran, K., Muthukumar, P., Sathiskumar, R., Parameshwaran, R., and Nithyavathy, N., "Evaluation of microstructural, tribological and tensile characteristics of AA7075 surface composites fabricated through friction stir process", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part E: Journal Of Process Mechanical Engineering*, 095440892311709 (2023).
153. Mao, L. J., He, X., Cai, M. J., and Qian, L. Q., "Influence of contact load on the dry sliding wear performance of 7075 aluminum alloy", *Experimental Techniques*, 47 (2): 357–367 (2023).
154. Zhang, C., Wu, S., Wang, D., Li, G., Chen, J., Lu, K., Li, C., and Mao, C., "Wear mechanism in nano polishing of SiCp/Al composite materials using molecular dynamics", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 131 (5): 3057–3069 (2024).

155. Deng, X., Huang, L., Wang, Q., Fu, T., and Wang, Z., "Three-body abrasion wear resistance of TiC-reinforced low-alloy abrasion-resistant martensitic steel under dry and wet sand conditions", *Wear*, 452: 203310 (2020).
156. Patil, N. A., Pedapati, S. R., and Marode, R. V., "Wear analysis of friction stir processed AA7075-SiC-graphite hybrid surface composites", *Lubricants*, 10 (10): 267 (2022).
157. Karabacak, A. H., Çanakçı, A., Celebi, M., Güler, O., Tunc, S. A., and Arpacı, K. A., "Production of Al2024/h-BN nanocomposites with improved corrosion, wear and mechanical properties", *Materials Chemistry And Physics*, 300: 127566 (2023).
158. Moustafa, E. B., Melaibari, A., Alsuruji, G., Khalil, A. M., and Mosleh, A. O., "Al 5251-based hybrid nanocomposite by FSP reinforced with graphene nanoplates and boron nitride nanoparticles: Microstructure, wear, and mechanical characterization", *Nanotechnology Reviews*, 10 (1): 1752–1765 (2021).
159. Podgornik, B., "Adhesive wear failures", *Journal Of Failure Analysis And Prevention*, 22 (1): 113–138 (2022).
160. Rakshath, S., Suresha, B., Sasi Kumar, R., and Saravanan, I., "Dry sliding and abrasive wear behaviour of Al-7075 reinforced with alumina and boron nitride particulates", *Materials Today: Proceedings*, 22: 619–626 (2020).
161. Zhang, Z., Ling, Y., Hui, J., Yang, F., Zhang, X., Tan, S., Xie, Z., and Fang, F., "Effect of C additions to the microstructure and wear behaviour of CoCrFeNi high-entropy alloy", *Wear*, 530: 205032 (2023).
162. Srivallirani, K. and Rao, M. V., "Assessing the role of reinforcement size and weight percentage on the mechanical and wear characteristics of Al7050-TiO₂-hBN hybrid composites", *Engineering Research Express*, 5 (1): 015049 (2023).
163. Loganathan, P., Arivalagar, A. A., Nadanakumar, V., Paul, R. C., and John, J. G., "Study on microstructure, mechanical and wear behavior of AA7075/hBN composites fabricated via liquid metallurgy", *Materials Today: Proceedings*, (2023).
164. Balaji, M., Thirumaran, V., Kumarasamy, G., and Ravikanth, M., "Studies on wear behavior of hybrid aluminum alloy (7075) reinforced with B₄C and BN", *Materials Today: Proceedings*, 72: 2581–2585 (2023).
165. Moustafa, E. B., Melaibari, A., and Basha, M., "Wear and microhardness behaviors of AA7075/SiC-BN hybrid nanocomposite surfaces fabricated by friction stir processing", *Ceramics International*, 46 (10): 16938–16943 (2020).
166. Loganathan, P., Gnanavelbabu, A., and Rajkumar, K., "Influence of ZrB₂/hBN particles on the wear behaviour of AA7075 composites fabricated through stir followed by squeeze cast technique", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part J: Journal Of Engineering Tribology*, 235 (1): 149–160 (2021).

167. Moustafa, E. B., Mikhaylovskaya, A. V., Taha, M. A., and Mosleh, A. O., "Improvement of the microstructure and mechanical properties by hybridizing the surface of AA7075 by hexagonal boron nitride with carbide particles using the FSP process", *Journal Of Materials Research And Technology*, 17: 1986–1999 (2022).
168. Balaji, M., Thirumaran, V., Kumarasamy, G., and Ravikanth, M., "Studies on wear behavior of hybrid aluminum alloy (7075) reinforced with B₄C and BN", *Materials Today: Proceedings*, 72: 2581–2585 (2023).
169. Loganathan, P., Gnanavelbabu, A., and Rajkumar, K., "Influence of ZrB₂/hBN particles on the wear behaviour of AA7075 composites fabricated through stir followed by squeeze cast technique", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part J: Journal Of Engineering Tribology*, 235 (1): 149–160 (2021).
170. Srivallirani, K. and Rao, M. V., "Assessing the role of reinforcement size and weight percentage on the mechanical and wear characteristics of Al7050-TiO₂-hBN hybrid composites", *Engineering Research Express*, 5 (1): 015049 (2023).
171. Loganathan, P., Arivalagar, A. A., Nadanakumar, V., Christu Paul, R., and Godwin John, J., "Study on microstructure, mechanical and wear behavior of AA7075/hBN composites fabricated via liquid metallurgy", *Materials Today: Proceedings*, (2023).
172. Moustafa, E. B., Mikhaylovskaya, A. V., Taha, M. A., and Mosleh, A. O., "Improvement of the microstructure and mechanical properties by hybridizing the surface of AA7075 by hexagonal boron nitride with carbide particles using the FSP process", *Journal Of Materials Research And Technology*, 17: 1986–1999 (2022).

ÖZGEÇMİŞ

Muhammet Mevlüt KARACA 2012 yılında Büyükkoyuncu Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2017 yılında KTO Karatay Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden lisans derecesini aldı. 2020 yılında Necmettin Erbakan Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimini tamamladı. Karaca'nın 1 adet SCI, 3 adet TR dizininde ve 1 adet TR dizini dışında araştırma makalesi bulunmaktadır. Ayrıca, 5 adet uluslararası bildirisi mevcuttur. 2019 yılında Karabük Üniversitesi'nde çalışmaya başlayan KARACA, şu anda Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü'nde görev yapmaktadır.