



**SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ KULLANILARAK
ÜRETİLEN GÖZENEKLİ Ti6Al4V MATRİSLERE, 2B
MXENE KATKILI EPOKSİ EMDİRİLMESİYLE ELDE
EDİLEN METAL MATRİSLİ KOMPOZİT NUMUNELERİN
FARKLI ORTAM ŞARTLARINDAKİ TRİBOLOJİK
DAVRANIŞLARININ VE KOROZYON DİRENÇLERİNİN
İNCELENMESİ**

Kerem TURALIOĞLU

**Doktora Tezi
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Ali Fatih YETİM**

**2024
Her hakkı saklıdır.**



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
DOKTORA TEZİ**

**SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ KULLANILARAK ÜRETİLEN
GÖZENEKLİ Ti6Al4V MATRİSLERE, 2B MXENE KATKILI EPOKSİ
EMDİRİLMESİYLE ELDE EDİLEN METAL MATRİSLİ KOMPOZİT
NUMUNELERİN FARKLI ORTAM ŞARTLARINDAKİ TRİBOLOJİK
DAVRANIŞLARININ VE KOROZYON DİRENÇLERİNİN İNCELENMESİ**

Kerem TURALIOĞLU

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ali Fatih YETİM

Ana Bilim Dalı: Makine Mühendisliği

Erzurum

2024

Her hakkı saklıdır.

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

13/06/2024

Kerem TURALIOĞLU

ÖZET

DOKTORA TEZİ

SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ KULLANILARAK ÜRETİLEN GÖZENEKLİ Ti6Al4V MATRİSLERE, 2B MXENE KATKILI EPOKSİ EMDİRİLMESİYLE ELDE EDİLEN METAL MATRİSLİ KOMPOZİT NUMUNELERİN FARKLI ORTAM ŞARTLARINDAKİ TRİBOLOJİK DAVRANIŞLARININ VE KOROZYON DİRENÇLERİNİN İNCELENMESİ

Kerem TURALIOĞLU

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ali Fatih YETİM

Günümüzün değişen ve gelişen teknolojileri ve gezegenimizin artan nüfus yoğunluğuyla birlikte enerjiye olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Yeni tür enerji kaynakları arayışının yanında var olan enerji kaynaklarının da verimli bir şekilde kullanılması tüm bilim insanlarının ortak hedefi haline gelmiştir. Bu yüzden endüstri sektöründe üretimi kolay ve uzun ömürlü makine elemanlarına yönelim olmaktadır. Enerji tasarrufu için makine elemanlarının kolay üretiminin yanı sıra kullanılacak yerde tahrik motoruna zıt yönde çalışan kuvvetlerin (sürtünme, kütle ataleti vb) de azaltılması gerekmektedir. Özellikle otomotiv ve havacılık sektöründe kullanılan makine elemanları zorlu (vakum, düşük sıcaklık, korozyon vb.) şartlarda çalışırken bu parçaların hafif olması ve aşınma ve korozyon direncine sahip olması beklenmektedir. Böylelikle makine elemanlarının servis süresi uzun ve taşıtların yakıt verimliliği yüksek olmaktadır. Bu tezde bu amaçla, 2B MXene malzemelerin eşsiz özellikleri ve metal eklemeli imalatın geometrik açıdan tasarım sınırı olmaması avantajları bir araya getirilerek yeni nesil bir metal matrisli kompozit (MMK) malzeme tasarlanarak üretilmiştir. Bu MMK'nın tekstürlü metal matrisinin üretimi Ti6Al4V malzemeyle Seçici Lazer Ergitme (SLE) metoduyla, aşınma ve korozyon dayanımını arttıran takviye elemanının üretimi ise epoksi reçineye (ER) katkılanan 2B MXene ile yapılmıştır. Böylece kütlesi %20 azaltılan MMK'lara farklı ortam şartlarında aşınma ve korozyon ortamda korozyon testleri uygulanmıştır. Tamamen Ti6Al4V'den üretilmiş numunelere oranla ER ve MXene takviyesi sayesinde tüm aşınma ortamlarında birden hem sürtünme kuvvetleri azalmış hem de aşınma oranları düşürülmüştür. Korozyon dayanımı ise yine yalıtkan ER ilavesi sayesinde tekstürsüz numunelere göre oldukça yüksek çıkmıştır.

2024, 147 sayfa

Anahtar Kelimeler: 2B Malzemeler, MXene, Epoksi reçine, SLE, Aşınma, Korozyon

ABSTRACT

PhD Thesis

INVESTIGATION OF TRIBOLOGICAL BEHAVIOR AND CORROSION RESISTANCE IN DIFFERENT ENVIRONMENTAL CONDITIONS OF METAL MATRIX COMPOSITE SAMPLES OBTAINED BY IMPREGNATING 2D MXENE DOPED EPOXY ON POROUS Ti6Al4V MATRICES PRODUCED BY USING THE SELECTIVE LASER MELTING METHOD

Kerem TURALIOĞLU

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ali Fatih YETİM

With today's changing and developing technologies and the increasing population density of our planet, the need for energy is increasing. In addition to the search for new types of energy resources, the efficient use of existing energy resources has become the common goal of all scientists. Therefore, in the industrial sector, there is a trend towards easy-to-produce and long-lasting machine elements. In order to save energy, in addition to the easy production of machine elements, it is necessary to reduce the forces (friction, mass inertia, etc.) working in the opposite direction to the drive motor where they will be used. Especially when the machine elements used in the automotive and aviation industries work under extreme conditions (vacuum, low temperature, corrosive, etc.), these parts are expected to be light and have wear and corrosion resistance. In this way, the service life of the machine elements is long and the fuel efficiency of the vehicles is high. For this purpose in this thesis, a new generation metal matrix composite (MMC) material was designed and produced by combining the unique properties of 2D MXene materials and the advantages of metal additive manufacturing with no geometric design limits. The textured metal matrix of this MMC was produced with Ti6Al4V material by Selective Laser Melting (SLM) method and the reinforcement element that increases wear and corrosion resistance was produced with 2D MXene added to epoxy resin (ER). Thus, wear tests under different environmental conditions and corrosion tests in corrosive environments were applied to MMCs whose mass was reduced by 20%. Compared to samples produced entirely from Ti6Al4V, thanks to ER and MXene reinforcement, both friction forces and wear rates were reduced in all wear environments. Corrosion resistance was significantly higher than the untextured samples, again thanks to the addition of insulating ER.

2024, 147 pages

Keywords: 2D Materials, MXene, Epoxy resin, SLM, Wear, Corrosion

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın tamamlanması için akademik bilgi, vizyon ve tecrübelerini benden esirgemeyen değerli büyüğüm, çok kıymetli hocam Prof. Dr. Ali Fatih YETİM'e göstermiş olduğu ilgi, sabır ve bana ayırmış olduğu kıymetli zamanından ötürü teşekkür eder, saygılar sunarım.

Yapmış olduğum bu çalışmada bana daima yol gösteren, zamanını ve akademik bilgilerini benden esirgemeyen, laboratuvar çalışmalarını birlikte sürdürdüğümüz değerli hocam Prof. Dr. Tuba YETİM'e, tez süreci boyunca fikirlerine başvurduğum saygıdeğer hocam Prof. Dr. Ayhan ÇELİK'e, deneysel laboratuvar çalışmalarım süresince bana laboratuvarını açarak elindeki tüm imkânları sunan değerli hocam Prof. Dr. Güven TURGUT'a, bilgilerinden sıkça faydalandığım hocalarım Doç. Dr. Onur ÇOMAKLI'ya, Doç. Dr. Halim KOVACI'ya ve Dr. Öğr. Üyesi Yusuf Burak BOZKURT'a, laboratuvar çalışmalarında kullandığım teçhizatların kurulumu konusunda mesleki yeteneği ve vizyonu ile devamlı yanımda olan çok kıymetli ağabeyim Öğr. Gör. Erkan ÖZYILMAZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tribolojik testlerin bir kısmını, laboratuvarlarında sürdürmemi sağlayan KTÜ Makine Mühendisliği bölümünden Prof. Dr. Tevfik KÜÇÜKÖMEROĞLU'na ve Dr. Öğr. Üyesi Yaşar SERT'e bana laboratuvarlarını açtıkları için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bilimsel çalışma ortamıma sağladıkları manevi katkılardan dolayı dostlarım Makine Yüksek Mühendisi Merve TAFTALI KÖSEOĞLU'na, Öğr. Gör. Kamer Özge ERİŞMİŞ'e ve Arş. Gör. Ahmet Serdar KOPAR'a teşekkür ederim.

Beni özveriyle yetiştirerek bugüne getiren annem Nurcan ÇELİK'e teyzem Emine ÇELİK'e ve ağabeyim Görkem TURALIOĞLU'na, desteğini her an yanımda hissettiğim ablam Esra Gizem ÖREK TURALIOĞLU'na, hayatıma katmış olduğu anlamlar için yeğenim Naz Gökçe TURALIOĞLU'na, gösterdiği sabır ve anlayış ile bana güç veren sevgili eşim Nur Aleyna KARACA TURALIOĞLU'na sonsuz maddi ve manevi destekleri ve fedakarlıkları için çok teşekkür ederim.

Kerem TURALIOĞLU

Haziran 2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. İki Boyutlu Malzemeler ve Sınıflandırılması.....	1
1.1.1. Grafen.....	2
1.1.2. Metal oksit ve hidroksitler	3
1.1.3. Hegzagonal bor nitrür (h-BN).....	4
1.1.4. Siyah fosfor (BP)	5
1.1.5. Katmanlı çift hidroksitler (LDH)	5
1.1.6. Kovalent organik çerçeveli yapılar (COF).....	6
1.1.7. Geçiş metal dikalkojenitler (TMDc)	6
1.1.8. Geçiş metal karbürleri/nitrürleri/karbonitrürleri (MXene).....	7
1.2. Triboloji Bilimi	14
1.2.1. Katı yağlayıcılar	16
1.2.2. 2B malzemelerin katı yağlayıcı özellikleri	17
1.2.3. Katı yağlayıcı olarak MXene’ler.....	17
1.2.4. Mikro ölçekte sürtünme enerji dağılımı	18
1.3. Eklemeli İmalat	22
1.3.1. Eklemeli imalat yöntemleri	25
2. KAYNAK ÖZETLERİ	33
2.1. 2B Malzemelerle İlgili Literatür Çalışmaları.....	33
2.2. MXene’lerin Tribolojik ve Korozyon Özellikleriyle İlgili Literatür Çalışmaları	38
3. MATERYAL ve YÖNTEM	46
3.1. Kullanılan Materyaller	46
3.2. Metal Matris Tasarımı ve SLE ile Üretimi	50
3.3. MAX Yapısının Seçici Dağlama İle MXene Yapısına Dönüştürülmesi.....	56

3.4. Epoksi Sistemi Karışımının ve MXene-Epoksi Sistemi Karışımının Hazırlanması İşlemleri	59
3.5. Metal Matrise MXene-Epoksi Sisteminin İnfiltrasyonu ve Kürlendirme İşlemi.....	60
3.6. Faz Analizleri ve Yapısal Karakterizasyonlar.....	62
3.6.1. XRD analizleri	62
3.6.2. SEM analizleri.....	62
3.6.3. Mikro sertlik analizleri.....	63
3.6.4. Temas açısı analizleri	63
3.6.5. 3B yüzey profilometre analizleri.....	63
3.7. Triboloji Deneyleri.....	64
3.8. Korozyon Deneyleri	67
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	69
4.1. MAX ve MXene Tozların XRD Analizleri.....	69
4.2. Tozlar ve Metal Matrislere Ait Yapısal İncelemeler.....	70
4.3. Numunelere Ait Sertlik ve Pürüzlülük Değerleri.....	76
4.4. Numunelerin Statik Temas Açısı Analizleri	78
4.5. Tribolojik Test Sonuçları	80
4.5.1. Aşınma ortamına göre sürtünme analizleri	80
4.5.2. Malzemeye göre sürtünme analizleri	89
4.5.3. Aşınma analizleri	96
4.6. Elektrokimyasal Analiz Sonuçları.....	118
4.6.1. OCP ve Tafel analizleri.....	118
4.6.2. Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) analizleri	124
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	132
KAYNAKLAR	134

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
------------------------	------------------------

A	Amper
Å	Angstrom
Dk	Dakika
sn	Saniye
V	Voltaj
°	Derece
%	Yüzde

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
---------------------------	------------------------

2B	İki boyutlu
3B	Üç boyutlu
ASTM	Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
BP	Siyah fosfor
COF	Kovalent organik çerçeveli yapı
DMSO	Dimetilsülfoksit
DT	Dişi tekstürlü
ER	Epoksi reçine
ET	Erkek tekstürlü
h-BN	Hegzagonal bor nitrür
HF	Hidroflorik asit
LDH	Katmanlı çift hidroksit
LN ₂	Sıvı azot
MXene	Geçiş metal karbürleri
SEM	Taramalı Elektron Mikroskopu
SLE	Seçici Lazer Ergitme
STL	Standart üçgen dili
TMDC	Geçiş metal dikalkojen
TSZ	Tekstürsüz
XRD	X-Işını kırınım difraktometresi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Yeni nesil 2B malzeme sınıflandırılması.....	2
Şekil 1.2. Grafen tabakasının şematik görünümü ve grafenin grafitik allotropları	3
Şekil 1.3. Bazı metal oksitler ve hidroksitlerin şematik görünümü.....	4
Şekil 1.4. Tekil h-BN katmanının üst görünüşü	5
Şekil 1.5. LDH'nin şematik görüntüsü	6
Şekil 1.6. TMDc'lerin şematik görüntüsü	7
Şekil 1.7. MAX fazını oluşturan elementlerin periyodik tablodaki yerleri	9
Şekil 1.8. MAX fazlı bileşiklerin kafes yapıları	10
Şekil 1.9. MAX fazından HF ile seçici aşındırma yönteminin şematik prosesi	11
Şekil 1.10. MXene'in ikili temas aşınmasından üçlü temas aşınmasına geçişinin şematik görüntüsü.....	18
Şekil 1.11. Sürtünme enerji dağılımının farklı mikro ölçek mekanizmaları.....	19
Şekil 1.12. Erime noktası değişimiyle potansiyel enerji kuyusunu gösteren grafik	20
Şekil 1.13. Eklemeli imalat üretim proses şeması	24
Şekil 1.14. Metal eklemeli imalat üretim yöntemleri	25
Şekil 1.15. Materyal jetiyle birleştirme yöntemi şematik görünümü.....	27
Şekil 1.16. Doğrudan metal lazer sinterleme yönteminin şematik görünümü	28
Şekil 1.17. Elektron ışını ile ergitme yönteminin şematik görünümü	29
Şekil 1.18. SLE yönteminin şematik görünümü	31
Şekil 2.1. Pirinç üzerine GO kaplama yapılmış numunelere ait tribolojik sonuç grafikleri	34
Şekil 2.2. Çift fazlı epoksi + TiO ₂ nanopartikül karışımı ile elde edilen kompozit numunelere ait tribolojik sonuç grafikleri	35
Şekil 2.3. Saf suya yağlayıcı BP eklenmesiyle yapılan tribolojik deneylerin sonuçları.....	36
Şekil 2.4. 2B MoS ₂ -h-BN nanokompozit numunelerin triboloji ve korozyon deney sonuçları	38
Şekil 2.5. Epoksi/Ti ₃ C ₂ /Al ₂ O ₃ ile oluşturulmuş kompozit malzemelerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranları grafiği	41
Şekil 2.6. CSS-42L taban malzemeye elektrik deşarj yöntemiyle açılan tekstürler	42

Şekil 2.7. Oluşturulan CSS-42L+kalay/gümüş/bakır kompozit malzemeye ait farklı sıcaklık değerlerinde uygulanan aşınma testi sürtünme katsayısı/zaman grafikleri	43
Şekil 2.8. Oluşturulan CSS-42L+kalay/gümüş/bakır kompozit malzemeye ait farklı sıcaklık değerlerinde uygulanan aşınma testi sonucu aşınma verileri grafikleri	44
Şekil 3.1. Tez için yürütülen çalışmaların iş akış şeması	46
Şekil 3.2. Ti6Al4V tozlara ait SEM görüntüsü.....	47
Şekil 3.3. MAX fazlı tozların SEM görüntüleri.....	49
Şekil 3.4. Dişi numuneye ait tasarım görüntüleri	51
Şekil 3.5. Erkek numuneye ait tasarım görüntüleri.....	52
Şekil 3.6. Seçici Lazer Ergitme Cihazı	53
Şekil 3.7. Üretim yönünü gösteren görsel.....	55
Şekil 3.8. Üretimi tamamlanan erkek ve dişi metal matrisli numuneler.....	55
Şekil 3.9. MAX fazının MXene fazına dönüştürülmesinin şematik görseli	58
Şekil 3.10. MXene-epoksi sisteminin hazırlık aşamaları.....	60
Şekil 3.11. MXene-epoksi karışımının metal matrislere infiltrasyon işlemi	61
Şekil 3.12. İnfiltrasyon işlemi tamamlanan erkek ve dişi numuneler	62
Şekil 3.13. Aşınma hacmi hesabı şematik görseli	64
Şekil 3.14. Tribometrelere ait görseller	65
Şekil 3.15. Üçlü elektrot deney düzeneği şematik görünümü	68
Şekil 4.1. MAX ve MXene tozların XRD analizleri.....	70
Şekil 4.2. MXene fazlı tozların SEM görüntüleri	71
Şekil 4.3. MXene fazlı tozların şematik görünümeleri.....	72
Şekil 4.4. SLE ile üretilen Ti6Al4V metal matrislere ait yüzey SEM görüntüleri	72
Şekil 4.5. SLE ile üretilen Ti6Al4V metal matrislere katkısız epoksi reçine emdirilen numunelerin yüzey SEM görüntüleri	74
Şekil 4.6. SLE ile üretilen Ti6Al4V metal matrislere ER+Mo ₃ C ₂ emdirilen numunelerin yüzey SEM görüntüleri	75
Şekil 4.7. SLE ile üretilen Ti6Al4V metal matrislere ER-Ta ₄ C ₃ emdirilen numunelerin yüzey SEM görüntüleri	75
Şekil 4.8. SLE ile üretilen Ti6Al4V metal matrislere ER+Ti ₃ C ₂ emdirilen numunelerin yüzey SEM görüntüleri	76
Şekil 4.9. Statik temas açısı ölçüm sonuçları.....	79

Şekil 4.10. Kuru ortamda yapılan aşınma testlerine ait sürtünme katsayısı/zaman grafikleri.....	82
Şekil 4.11. Tekstürlü numunelerde sürtünme hareketinin başlangıcındaki durumun şematik görseli.....	83
Şekil 4.12. NaCl ortamında yapılan aşınma testlerine ait sürtünme katsayısı/zaman grafikleri.....	84
Şekil 4.13. LN ₂ ortamında yapılan aşınma testlerine ait sürtünme katsayısı/zaman grafikleri.....	86
Şekil 4.14. Düşük vakum ortamında yapılan aşınma testlerine ait sürtünme katsayısı/zaman grafikleri	87
Şekil 4.15. Yüksek vakum ortamında yapılan aşınma testlerine ait sürtünme katsayısı/zaman grafikleri	88
Şekil 4.16. Ti6Al4V Tekstürsüz numunelere ait sürtünme katsayısı/zaman grafiği.....	90
Şekil 4.17. Epoksi reçine (katkısız) emdirilmiş numunelere ait sürtünme katsayısı/zaman grafikleri.....	91
Şekil 4.18. ER+Mo ₃ C ₂ emdirilmiş numunelere ait sürtünme katsayısı/zaman grafikleri	92
Şekil 4.19. ER+Ta ₄ C ₃ emdirilmiş numunelere ait sürtünme katsayısı/zaman grafikleri.....	94
Şekil 4.20. ER+Ti ₃ C ₂ emdirilmiş numunelere ait sürtünme katsayısı/zaman grafikleri	95
Şekil 4.21. Ti6Al4V Tekstürsüz (TSZ) numunelere ait 3B Profilometre görüntüleri.....	97
Şekil 4.22. Kuru ortamda yapılan testlerin 3B Profilometre görüntüleri	98
Şekil 4.23. LN ₂ ortamında yapılan testlerin 3B Profilometre görüntüleri.....	99
Şekil 4.24. NaCl ortamında yapılan testlerin 3B Profilometre görüntüleri.....	100
Şekil 4.25. Düşük vakum ortamında yapılan testlerin 3B Profilometre görüntüleri	101
Şekil 4.26. Yüksek vakum ortamında yapılan testlerin 3B Profilometre görüntüleri ..	102
Şekil 4.27. Aşınma oranları grafikleri	105
Şekil 4.28. MXene katkısının tribolojik olarak Ti6Al4V matrisi ve ER'yi koruma mekanizması.....	106
Şekil 4.29. TSZ numunelerin farklı ortamlarda yapılan aşınma testlerinin izlerine ait SEM görüntüleri.....	107
Şekil 4.30. DT ve ET numunelerin kuru ortamda yapılan aşınma testlerinin izlerine ait SEM görüntüleri.....	109
Şekil 4.31. DT ve ET numunelerin NaCl çözeltisi ortamında yapılan aşınma testlerinin izlerine ait SEM görüntüleri.....	111

Şekil 4.32. DT ve ET numunelerin kriyojenik LN ₂ ortamında yapılan aşınma testlerinin izlerine ait SEM görüntüleri.....	113
Şekil 4.33. DT ve ET numunelerin düşük vakum ortamında yapılan aşınma testlerinin izlerine ait SEM görüntüleri.....	115
Şekil 4.34. DT ve ET numunelerin yüksek vakum ortamında yapılan aşınma testlerinin izlerine ait SEM görüntüleri.....	116
Şekil 4.35. Kuru ortamda DT numunelere yapılmış aşınma testinin aşındırıcı pinine ait SEM görüntüsü.....	117
Şekil 4.36. Numunelerin açık devre potansiyeli ve çevrimsel potansiyodinamik polarizasyon ölçüm grafikleri.....	122
Şekil 4.37. Tekstürlü numunelere ait korozyon bölgeleri şematik görünümü	123
Şekil 4.38. Numunelerin Bode grafikleri	125
Şekil 4.39. Numunelerin Nyquist grafikleri	127
Şekil 4.40. Korozyon sonrası SEM görüntüleri	128
Şekil 4.41. TSZ, DT ve ET numunelerin eşdeğer devre modeli.....	130

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Malzemelerin bağ tipine göre bağlanma enerji ve erime noktası değerleri	22
Çizelge 3.1. Ti6Al4V (CL41 Ti-ELI) toz içeriği	47
Çizelge 3.2. MAX tozlarına ait özellikler	48
Çizelge 3.3. Epoksi karışımına ait özellikler	50
Çizelge 3.4. SLE üretim parametreleri	54
Çizelge 3.5. Triboloji test parametreleri	66
Çizelge 4.1. Üretilen numunelere ait kütle, hacimsel ve alansal veriler	74
Çizelge 4.2. Malzemelerin sertlik değerleri	77
Çizelge 4.3. Numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri	77
Çizelge 4.4. MXene malzemelerin metal elementlerine ait ısı genleşme katsayıları	85
Çizelge 4.5. Korozyon parametreleri	123
Çizelge 4.6. MXene malzemelerin metal elementlerine ait elektrik iletkenlikleri	124
Çizelge 4.7. Eşdeğer devre elemanlarının değer çizelgesi	131

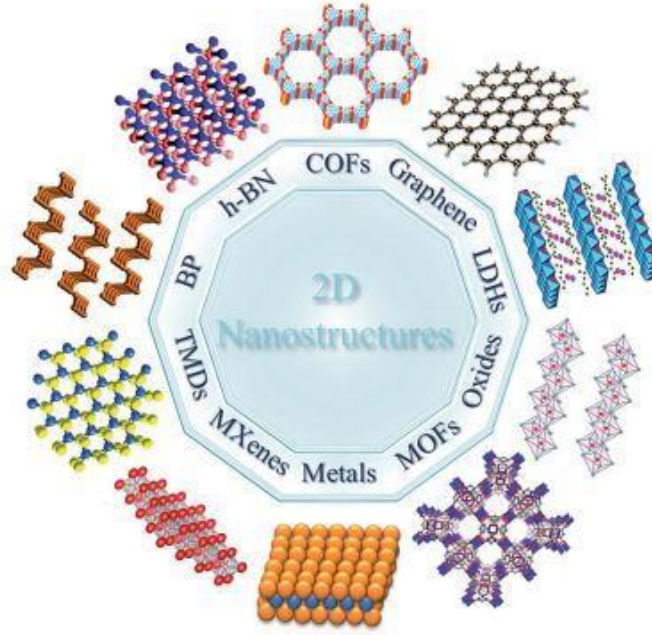
1. GİRİŞ

Malzeme bilimi, malzemelerin keşfi ve geliştirilmesi ile ilgilenen insanlık tarihindeki en eski bilim dallarından biridir. Baş döndürücü bir hızla gelişen teknolojiyle birlikte bilim insanları sürekli yeni malzemelere ihtiyaç duymaktadır. Yeni tür fonksiyonel malzemelere olan ihtiyaç, genellikle daha iyi performans, daha düşük maliyet, daha uzun ömür, daha hafif veya özel bir niteliğin sağlanması gibi nedenlerle ortaya çıkmaktadır. Örneğin, günümüzde elektronik alanında daha verimli güneş panelleri, otomotiv ve üretim alanında daha dayanıklı araç ve teçhizat parçaları veya uzay ve havacılık alanında kullanılacak hafif, dayanıklı ve düşük sıcaklık, vakum vb. normal olmayan ortam şartlarında çalışabilmesi gibi belirli ihtiyaçlara cevap verecek malzemelerin araştırılması ve geliştirilmesi önemlidir. Ayrıca, çevre dostu ve sürdürülebilir malzemelerin bulunması da günümüzün öncelikli konularından biridir. Bu nedenle, malzeme bilimi ve mühendisliği, sürekli olarak yeni ve gelişmiş malzemelerin keşfi ve üretimi üzerine çalışmaktadır. Son dönemlerde popüler olan bir malzeme sınıfı da iki boyutlu (2B) malzemelerdir. 2B malzemeler termal iletkenlik, yük depolama, katı yağlayıcı ve yüksek elastisite modülü gibi önemli özellikleriyle birçok kullanım alanına sahiptir.

1.1. İki Boyutlu Malzemeler ve Sınıflandırılması

2B malzemeler; tabakalar arasında zayıf van der Waals tabaka içerisinde ise güçlü kovalent bağlar ile birbirine bağlı bağımsız tabakalar halinde bulunabilen bir malzeme sınıfı olarak tanımlanır (Cai et al. 2018). Kalınlıkları birkaç angstrom ile birkaç nanometre arasında değişen 2B malzemeler, x ve y eksenlerinde sonsuz yanal (lateral) boyutta olabilirler (Ghidiu 2018).

2004 yılında grafenin keşfiyle birlikte bilim dünyasının ilgisi 2B nano malzemelere kaymıştır. Bugüne kadar araştırmalar çok sayıda 2B malzeme keşfedilmesini sağlamıştır. Günümüzde yeni nesil 2B malzemeler şu şekilde sınıflandırılmaktadır (Şekil 1.1).

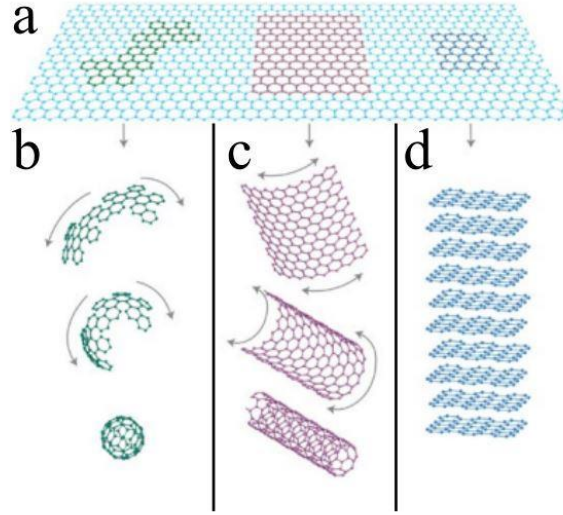


Şekil 1.1. Yeni nesil 2B Malzeme Sınıflandırılması (H. Zhang 2015, Azadmanjiri et al. 2016).

1.1.1. Grafen

Grafen ilk olarak 2004 yılında Manchester Üniversitesi'nde grafitin mekanik yöntemlerle ayrıştırılmasıyla keşfedilmiştir. Bu keşif Andre Geim ve Konstantin Novoselov'a birkaç sene sonra 2010 yılında Nobel ödülü kazandırmıştır. Bu keşiften sonra grafen, malzeme alanında tüm dünyada artan bir ilgiyle karşılanmıştır. Grafen, esasen karbon atomlarının altıgen bir kafes içinde düzenlenmiş sp^2 hibrit karbon atomunun tek bir tabakasından oluşmuştur. Bu hibrit karbon atomlarının arasındaki kovalent bağlar güçlü olduğu için grafen mekanik, elektronik ve termal olarak üstün özellikler sergilemektedir. Dolayısıyla grafenin tıp, elektronik, enerji depolama ve üretim alanlarında kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır (H. Zhang 2015).

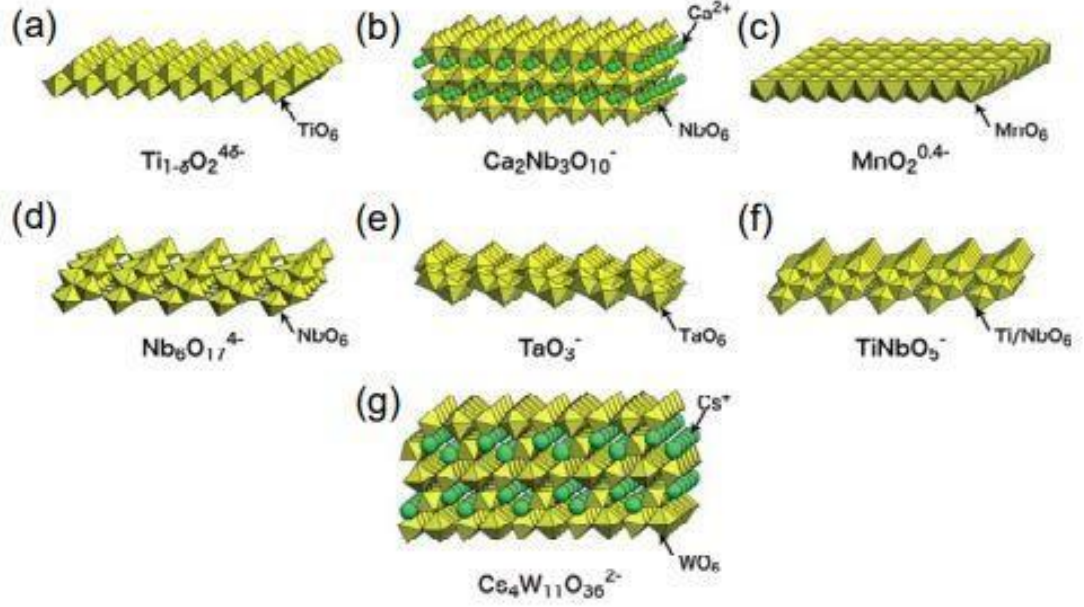
Şekil 1.2'de grafen tek tabakasının ve onun allotroplarının şematik görüntüsü verilmiştir. Grafen tabakası Şekil 1.2.a'da, sarılmış bir grafen topu olan fullerene Şekil 1.2.b'de, grafen rulosu halinde bulunan karbon nanotüp Şekil 1.2.c'de ve grafit yapısı ise Şekil 1.2.d'de görülmektedir.



Şekil 1.2. Grafen tabakasının şematik görünümü ve grafenin grafitik allotropları (Geim and Novoselov 2007, Abdelmalak 2014).

1.1.2. Metal oksit ve hidroksitler

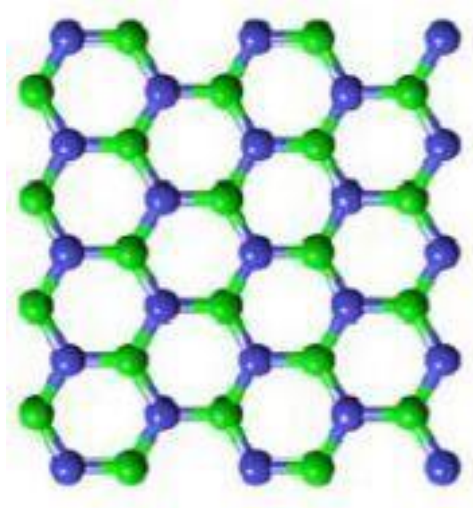
Katmanlı metal oksit ve hidroksit ailesi eğer kil grubu da dahil edilirse en büyük 2B malzeme kategorisi olarak düşünülebilir. Katmanlı metal oksitler Şekil 1.3'te gösterildiği üzere her katman MO_6 'nın negatif yüklü köşesi veya kenar paylaşımlı oktohedral birimlerinden oluşan bir levha olarak kabul edilir. Alkali katyonlarla (K^+ , Rb^+ , Cs^+ vb.) her bir tabakanın katmanlar arası boşlukları doldurulur. Grafen ve geçiş metal dikalkojenitlerin aksine buradaki negatif yüklü iyon bulunduran katmanlar, alkali katyonlar vasıtasıyla elektrostatik olarak birbirini çekerek bağ oluştururlar. Dolayısıyla bu katmanları birbirinden ayırmak için kimyasal bir işlem gerekmektedir. Metal oksitlerden vanadyum oksit (V_2O_5) ve molibden oksit (MoO_3) birer istisnadır. Bunun sebebi tabakalar arasındaki bağın çok zayıf olan van der Waals bağı olmasıdır (Chernova et al. 2009, Kalantar-Zadeh et al. 2010, Ma and Sasaki 2010).



Şekil 1.3. Bazı Metal oksitler ve hidroksitlerin şematik görünümü; (a)Titanyum, (b)Kalsiyum Niyobyum, (c)Manganez, (d)Niyobyum, (e)Tantalyum, (f)Titanyum Niyobyum, (g)Sezyum Tungsten (Ma and Sasaki 2010).

1.1.3. Hegzagonal bor nitrür (h-BN)

Hegzagonal bor nitrür(h-BN) molekül dizilimi olarak grafene çok benzemektedir. Grafen, altıgen molekül yapısının her tarafında karbon-karbon çifti bulundururken, h-BN bor-azot çifti bulundurur. h-BN de grafen gibi altıgen ince tabakalardan oluşan bir 2B malzemedir. h-BN'in tekil tabakasının üstten görünümü Şekil 1.4'te verilmiştir. Şekilde yeşil renkli atomlar Bor'u (B) temsil ederken mavi renkli atomlar Azot'u (N) temsil etmektedir.



Şekil 1.4. Tekil h-BN katmanının üst görünüşü (Gong et al. 2014)

h-BN, grafene benzerliği ve beyaz renkli olmasından dolayı “beyaz grafen” olarak da adlandırılmaktadır. Bor nitrür bileşiğinin en kararlı hali altıgen yapılı olan h-BN’dir. Esasında iyi bir yalıtkan olan h-BN çeşitli konfigürasyonlarla farklı elektronik ve optik özellikler kazandırılarak farklı alanlarda kullanılması bu malzeme için umut vericidir (Zupan and Kolar 1972, Gong et al. 2014).

1.1.4. Siyah fosfor (BP)

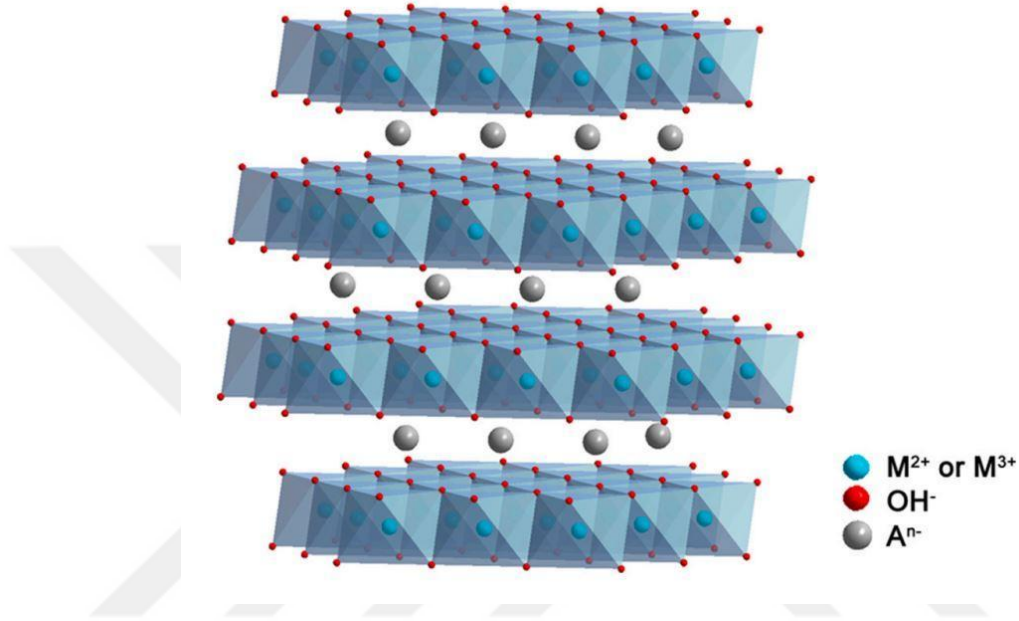
Fosforen olarak da bilinen siyah fosfor, katmanlı ve anizotropik yapıya sahip bir fosfor allotropudur. Siyah fosfor ortorombik kıvrımlı altıgen petek yapısına sahip fosfor (P) atomu katmanlarından oluşmaktadır. Siyah fosfor, fosforun diğer allotropları arasında en az reaktif olanıdır. Bu özelliğiyle özellikle elektronik ve optoelektronik alanında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Rajender et al. 2020).

1.1.5. Katmanlı çift hidroksitler (LDH)

LDH’ler eşkenar dörtgen ve altıgen formlarda bulunan metal katyon katmanlarından (M^{2+} ve M^{3+}) oluşmuştur. Bu katyonlar hidroksit iyonlu oktohedranın merkezlerinde bulunarak sonsuz 2B tabakalarını oluştururlar. LDH’ların genel formülü $[M^{2+}_{1-x}M^{3+}_x(OH)_2]^{x+}(A^{n-})_{x/n} \cdot yH_2O$ şeklindedir. Bu formülde M^{2+} ve M^{3+} sırasıyla iki ve üç değerlikli metal katyonlarını temsil ederken A^{n-} ise yük dengeleyici bir anyondur. LDH’ların genel şematik görüntüsü Şekil 1.5’te verilmiştir. Katmanlı çift hidroksitler son

1. GİRİŞ

zamanlarda özellikle yüksek performanslı membranların tasarımında önemli bir yer tutmaktadır. Buna ek olarak CO₂ adsorpsiyonu sayesinde alev geciktirme amacıyla, katalizör olarak, polimerik modifikasyon özelliği sayesinde polimer sektöründe, elektrokimya alanında ve ilaç üretim sektöründe kullanılmaktadır (Lu et al. 2018, Lu et al. 2020, Li et al. 2022).



Şekil 1.5. LDH'nin şematik görüntüsü (Li et al. 2022)

1.1.6. Kovalent organik çerçeveli yapılar (COF)

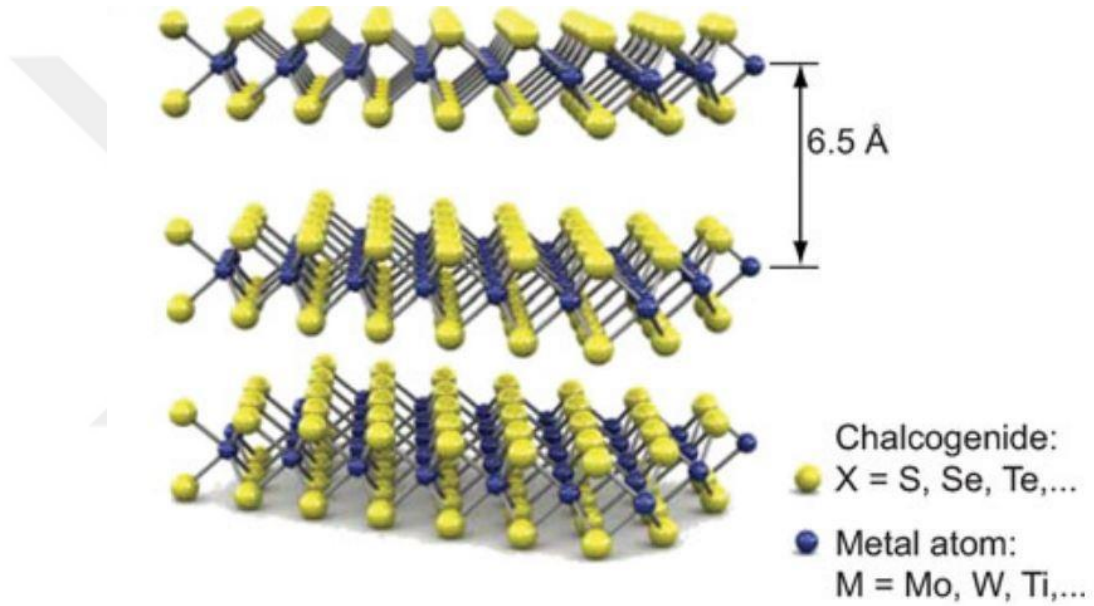
Kovalent organik çerçeveli yapılar, karbon(C), Nitrojen(N) ve Oksijen(O) gibi hafif elementli atomların güçlü kovalent bağı yoluyla oluşan 2B malzemelerin bir çeşididir. Gözenekli yapıları sayesinde elektronik ve optoelektronikte sıklıkla kullanılmaktadır (Kim and Choi 2020).

1.1.7. Geçiş metal dikalkojenitler (TMDC)

Geçiş metal dikalkojenitler genel formülü MX₂ olan bileşiklerdir. Burda “M” Molibden (Mo), Tantalum (Ta), Tungsten (W) ve Niyobyum (Nb) gibi geçiş metallerini temsil ederken “X” Kükürt (S), Selenyum (Se) veya Tellür (Te) gibi kalkojenleri temsil etmektedir. TMDC'leri meydana getiren bir metal atomu ile iki kalkojen atomu birbirleriyle güçlü kovalent bağlarıyla bağlıdır. Bu bağ sayesinde yapı yüksek

1. GİRİŞ

mukavemete ve elastisite modülüne sahiptir. Fakat metal ve kalkojenitlerden meydana gelen bu 2B tabakaların her biri birbirine kesme kuvvetine direnç göstermeyen ve zayıf bağ olan van der Waals bağlarıyla bağlıdır. Bu özellik TMDC'lere eşsiz sürtünme ve aşınma direnci kazandırmaktadır. Sürtünme sırasında kovalent bağlar rijit bir şekilde dururken, tabakalar arası bağlar zayıf olduğundan kolaylıkla ayrılır. Ayrılan tabakalar sürtünme yüzeylerine sıvanarak iki ana malzemeyi de korumuş olurlar (Liu et al. 2019). TMDC'lere ait şematik görüntü Şekil 1.6'da verilmiştir. Şekilde sarı renk ile gösterilen atomlar kalkojenitleri temsil ederken lacivert ile gösterilen atomlar metal atomlarını temsil etmektedir. Tabakalar arası mesafe yaklaşık olarak 6,5 angstrom seviyesindedir.



Şekil 1.6. TMDC'lerin şematik görüntüsü (Kuc et al. 2015)

1.1.8. Geçiş metal karbürleri/nitrürleri/karbonitrürleri (MXene)

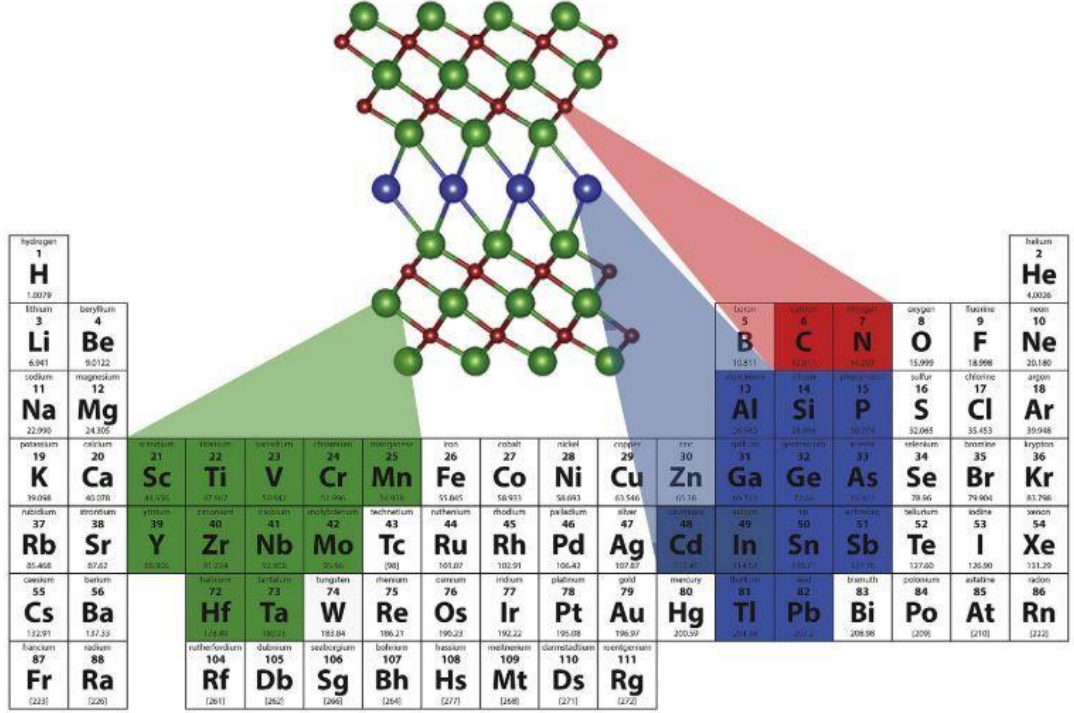
Geçiş Metal Karbürleri/Nitrürleri/Karbonitrürleri (MXene) 2B malzemelerin bir başka üyesidir. Bu malzeme ailesi yığın halde bile yüksek mukavemet ve eşsiz elektronik özelliklere sahiptir. 2011 yılında katmanlı bir yapıda bulunan ana fazları MAX fazından hidroflorik asit (HF) yardımıyla orta kısımda bulunan "A" katmanının yapıdan uzaklaştırılmasıyla elde edilmiştir. Bu teknik ile üretilen malzemelere "MXene" adı verilmiştir. Tek katmanlı MXene'ler, $n=1,2$ veya 3 olan $M_{(n+1)}AX_n$ yapısından "A" tabakası aşındırma yöntemiyle uzaklaştırılır. Burada "M" geçiş metalleri, "A" A grubu elementleri ve "X" C veya N'dir (Naguib et al. 2011, 2013).

1. GİRİŞ

MAX fazları hem metal hem de seramik özellik sergileyen üç tabakalı malzemelerdir. MAX yapısı genellikle altıgen birim hücreye sahiptir. Fazlar, kimyasal formülünde bulunan “n” değerine göre adlandırılmaktadır. Atomlar arası bağlar kovalent ve metal bağ karışımıdır. M ile X arasındaki bağ güçlü kovalent bağlarıyla bağlıdır. M-A bağı ise M-X bağına göre daha zayıf olan metal bağlarıyla bağlıdır. Atom dizilimindeki “A” tabakası bir ayna görüntüsü oluşturarak düzlemleri böler. “A” tabakasının bağları zayıf olduğundan asidik bir ortamda bekletilen MAX fazı, 2 B bir MXene fazına dönüşür. Bu malzemelere MXene adı verilir. MX tabakaları asidik ortamda meydana gelen kimyasal reaksiyonlar sebebiyle yalın MX fazı olarak kalamamaktadır. Genellikle bu tabakalar O, F, OH ile sonlanır. MXene’ler birçok geçiş elementi(M) ve C, N gibi “X” tabakasından meydana gelebilirler. Böylelikle yapısında bulunan elementlere göre mekanik ve elektriksel davranışları değişim gösterir. MXene fazı yüksek sıcaklıkta çalışılan yerler (ısıtma elemanları, ısı değiştiriciler), kaymalı yataklar, aşınma ve korozyon direnci istenilen yerlerde kullanımı yaygınlaşmaktadır (Eklund et al. 2010, Ronchi et al. 2019).

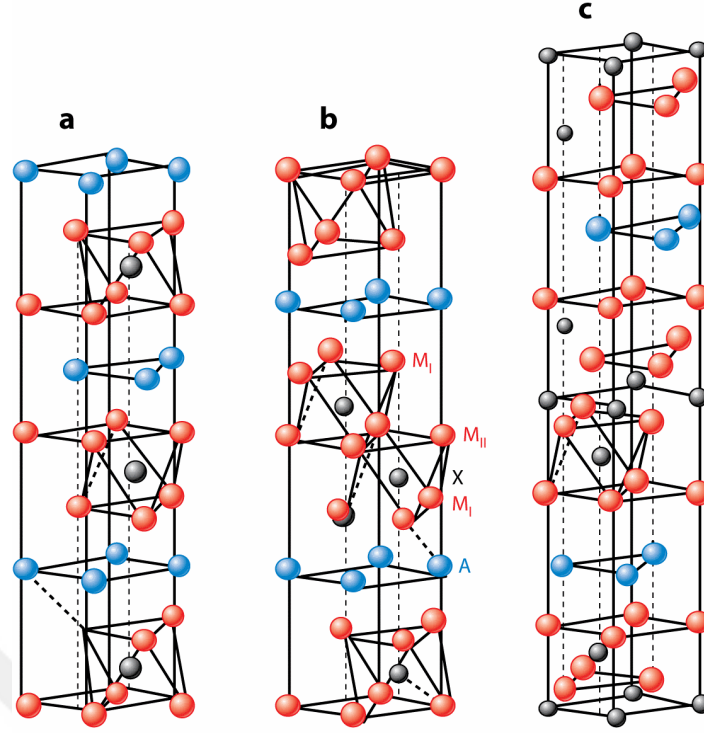
Şekil 1.7’de MAX fazını oluşturabilecek elementler verilmiştir. Periyodik tabloda yeşil renk ile gösterilen elementler geçiş metallerini (“M”), koyu mavi ile gösterilenler 13. ve 16. Grup elementlerini (“A”) ve kırmızı ile gösterilen elementler karbon ve azot veya her ikisini de (“X”) temsil etmektedir.

1. GİRİŞ



Şekil 1.7. MAX fazını oluşturan elementlerin periyodik tablodaki yerleri (Ronchi et al.2019).

MAX fazlı malzemeler stokiometrik oranlarına göre genellikle 211, 312, 413 konfigürasyonundadır. Genel olarak yüzden fazla MAX yapısı olsa da uygulamada genel olarak üç ayrı hegzagonal kristal kafes yapısıyla karşımıza çıkar. Bu kristal kafes yapıları Şekil 1.8’de verilmiştir. Şekilde kırmızı renk ile gösterilen atomlar metal atomlarını (“M”), mavi renk ile gösterilen atomlar 13. ve 16. A grubu elementlerini (“A”) ve siyah renk ile gösterilen atomlar karbon ve azot atomlarını (“X”) temsil etmektedir.



Şekil 1.8. MAX fazlı bileşiklerin kafes yapıları; (a) M_2AX (211), (b) M_3AX_2 (312) (c) M_4AX_3 (413) (Barsoum and Radovic 2011).

MAX fazından MXene fazına dönüşüm

MAX fazından MXene fazına dönüştürme işlemi için kimyasal yöntemlerle “A” elementinin yapıdan ayrılması sağlanmaktadır. Bunun için seçici aşındırma olarak adlandırılan yöntemler kullanılmaktadır. Seçici aşınma genellikle doğrudan veya dolaylı olarak çok kuvvetli bir asit olan HF (Hidroflorik asit) ile yapılmaktadır. MXene ile ilgili ilk literatür çalışmalarından beri HF yaygınlıkla kullanılmaktadır (Wei et al. 2021, Lim et al. 2022).

Hidroflorik asit ile aşındırma

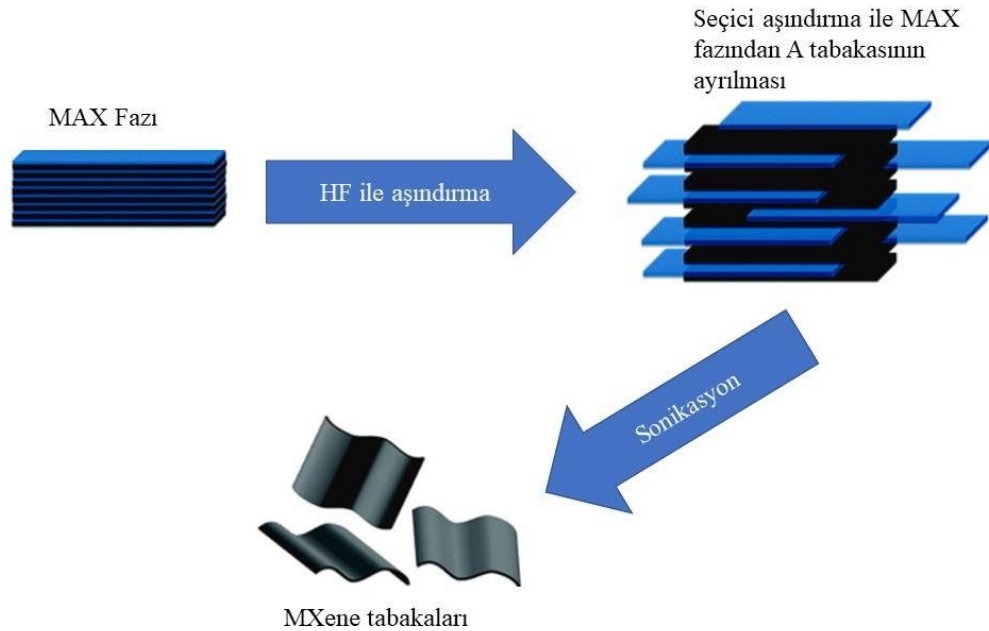
HF ile aşındırma yöntemi genellikle Al içeren MAX fazlarından MXene elde etmek için kullanılmaktadır. Naguib et al. 2011 yılında ilk olarak ağırlıkça %50 HF kullanarak MAX fazlı bileşiğin Al tabakalarını seçici olarak aşındırarak MXene elde etmiştir (Naguib et al. 2011). Bu yöntem HF-saf su çözeltisi ile MAX fazlı tozların oda sıcaklığında karıştırıldıktan sonra çözeltinin santrifüj edilerek MXene tozlarının elde edilmesidir. Elde edilen MXene fazlı tozların asitlik seviyesi düşürülür. Bu işlem elde

1. GİRİŞ

edilen tozlar deiyonize su ile birkaç kez yıkanarak yapılır. Daha sonra kurutulan tozlar sonikasyon işlemi için hazır hale gelir. HF ile aşındırma yapılırken Denklem 1.1'deki gibi bir tepkime oluşur;



Sonikasyon işlemi Al tabakaları çekildikten sonra ortaya çıkan yapışık haldeki MXene tabakalarının birbirinden ayrılması için ultrasonik ses yardımıyla tabakaların hareketlendirilmesiyle yapılmaktadır. Bu işlem genellikle izopropil amin, tetra propil amonyum hidroksit (TPAOH) veya dimetil sülfoksit (DMSO) gibi kimyasallarla yapılmaktadır. HF yöntemi seçici dağlama için oldukça kullanışlı olsa da güçlü bir asit olduğundan uygulama sırasında çözeltinin derişimine ve uygulama zamanına zamana bağlı olarak MXene tabakalarını da aşındırabildiğinden parametrelerin iyi kontrol edilmesi önemlidir (Zhou et al. 2022). MAX fazından MXene elde etmek için seçici aşındırma işleminin şematik prosesi Şekil 1.9'da verilmiştir.



Şekil 1.9. MAX fazından HF ile seçici aşındırma yönteminin şematik prosesi (Zhou et al. 2022).

Florür tuzu ile aşındırma

HF ile aşındırma yönteminin çevreye ve araştırmacılara verdiği zarar nedeniyle 2015 yılında Ghidui et al. doğrudan HF asit kullanmak yerine hidroklorik asit (HCl) ve florür tuzlarını bir reaksiyona sokarak HF asidini işlem sırasında elde etmiş ve direkt HF kullanımına nazaran daha güvenli bir seçici aşındırma yöntemi ortaya koymuşlardır. Araştırmacılar hazırlanan HCl asit ve LiF tuzu çözeltisine MAX tozu ilave ederek HF asit sentezlemiş ve bu asidin seçici olarak MAX fazındaki A tabakasını yapıdan çekmeyi başarmış ve MXene elde etmişlerdir. Bu reaksiyon, Denklem 1.2’de verilmiştir.



Bu yöntemin diğer bir avantajı ise florür tuzlarına ait iyonların MXene tabakalarının arasında kimyasal reaksiyona girmesi sonucu tabakalar arası mesafenin HF asit ile seçici dağılmaya nazaran daha fazla olmasıdır.

Alkali aşındırma

Alkali aşındırma yönteminde MAX fazından MXene fazına dönüşüm potasyum hidroksil veya amonyum hidroksil gibi alkali çözeltilerle yapılmaktadır. Kimyasal reaksiyon sonucu MXene tabakalarının tamamen ayrılması için sonikasyon yapılması gerekmektedir.

MXene’lere genel olarak HF asit kullanılarak seçici aşınma işlemi uygulandığından, yapıları genellikle -OH, -F, -O gibi fonksiyonel gruplarla sonlandırılır. Dolayısıyla MAX fazından MXene fazına dönüştürülünce yapı $M_{n+1}X_nT_x$ şeklinde ifade edilir. Burada T, fonksiyonel grupları temsil eder. Fonksiyonel grubun kimyasal içeriği MXene’e farklı özellikler kazandırır (Kurtoglu et al. 2012). Birçok çalışmada yapısında daha fazla -O fonksiyonel grubunu bulunduran ve daha az -F fonksiyonel grubunun bulunduran MXene’lerin yüksek kapasitans özellikler sağladığı rapor edilmiştir (Rakhi et al. 2015). Yapısında oksijen bulunan (-O, -OH) fonksiyonel gruplu MXene’ler ise hidrofilik özelliktedir (Hu et al. 2017). Ayrıca sonlandırma fonksiyonel grubu -F içeren

1. GİRİŞ

MXene'ler elektrolit iyon taşınımını sınırladığından elektriksel iletkenlikleri zayıftır (Lukatskaya et al. 2016).

Yukarıda verilen bilgilerle MXene'lerin kullanım alanına göre fonksiyonel gruplarının önem arz ettiği anlaşılmaktadır. Süperkapasitör olarak kullanılacak MXene'lerde -F grupları istenmediğinden Xuan et al. %20-30 HF asit ve tetra metil amonyum hidroksit kullanarak alkali aşındırma ile MXene elde etmişlerdir. Fakat elde ettikleri MXene tabakalarının ara boşlukları istenilen seviyede olmadığından verimleri düşük kalmıştır (Xuan et al. 2016).

Ergimiş tuz ile aşındırma

Günümüzde en çok sentezlenen MXene'ler karbür ve karbonitrür bazlı MXene'lerdir. Nitrür bazlı MXene'ler de sentezlenmiş fakat sentezlenme işlemi yukarıda verilen yöntemlerle başarılı olunamamıştır. Yapılan teorik çalışmalar nitrürün karbürden daha düşük polimerizasyon enerjisine ve daha yüksek oluşum enerjisine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Dolayısıyla nitrür içerikli MXene'lerde MX tabakaları ile A tabakasının bağ yapısı, karbür içerikli MXene'lere göre daha kuvvetlidir. Bu durum da A tabakasının seçici dağlama işlemini zor hale getirmektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda geleneksel kimyasal yöntemlerin dışında nitrür içerikli MXene sentezlemek için ergimiş tuz ile aşındırma yöntemi geliştirilmiştir. Yöntemde KF, NaF, LiF gibi flor tuzları ile nitrür içerikli MXene tozu karıştırılarak atmosferden korunaklı bir ortamda yüksek sıcaklıklara ısıtılmaktadır. Bu süreçte flor tuzları eritilerek A tabakası dağlanır ve MXene elde edilir. Yöntemi etkileyen parametre sıcaklık ve ortamdaki oksijen seviyesidir. Eğer yeterli olan sıcaklıktan daha yüksek sıcaklıklara çıkılırsa ve/veya oksijen seviyesi istenilen seviyenin üzerinde olursa oksitlenme olabilir veya ürün kübik faz yapısı olarak sentezlenebilir (Bhattacharjee et al. 2022).

MXene'lerin kullanım alanları

MXene'lerin eşsiz özellikleri, onları uygulamada çok geniş bir perspektifte karşımıza çıkarmaktadır. Bu uygulama alanlarının bazıları şöyle sıralanabilir;

- Enerji depolama ve enerji dönüşümü için uygulamalarda: MXene'ler geniş yüzey alanları ve iyi iletkenlik özellikleri nedeniyle süperkapasitör ve lityum iyon pillerde kullanılır. Bu özellikler uygulamada şarj/deşarj süresini optimize etmek için idealdir (Lukatskaya et al. 2013).
- Katalizör olarak kullanımı: MXene, hidrojen üretimi, oksidasyon reaksiyonları ve organik sentez gibi katalitik uygulamalarda etkili bir şekilde kullanılabilir. Yüksek yüzey alanı ve kimyasal aktivitesi, MXene'nin katalizör olarak kullanımı açısından oldukça avantajlıdır (Jiang et al. 2020).
- Elektronik uygulamalar: Elektronik cihazlarda MXene, iletkenlik, esneklik ve yüksek performans sağlamak için kullanılır. Transistörler, sensörler, akıllı cihazlar ve esnek elektronik sistemler gibi birçok uygulamada MXene'nin potansiyeli bulunmaktadır (Naguib et al. 2011).
- Biyo-elektronik uygulamalar: MXene, biyolojik sistemlerle etkileşimde bulunabilecek biyo-mikroelektronik uygulamalarda kullanılabilir. Biyo-mikroelektronik cihazlar, tıbbi teşhis ve tedavi, biyosensörler ve biyoelektronik gibi alanlarda MXene'nin potansiyeli araştırılmaktadır (Alwarappan et al. 2022).
- Aşınma ve korozyon ve mekanik dayanım direnci istenilen yüzey uygulamaları: MXene'nin mükemmel mekanik dayanıklılığı, katmanlı yapısı ve kimyasal stabilitesi, metal yüzeylerin aşınmaya, korozyona ve mekanik darbelere karşı korunması için kaplama malzemeleri olarak kullanılmasını sağlar (Yin et al. 2019, Hu et al. 2020).

1.2. Triboloji Bilimi

Triboloji; birbirleriyle izafi olarak hareket eden sistemlerin yağlama, sürtünme ve aşınma gibi davranışlarını inceleyen bir bilim dalıdır (Martini et al. 2021). Triboloji, bir bilim dalı olarak her ne kadar 19. ve 20. Yüzyılda sanayi devrimiyle ortaya çıksa da sürtünme kuvvetini yenmek için bir yağlayıcı malzemenin kullanılması M.Ö. 2000'li yıllara dayanmaktadır. Yapılan araştırmalarda Mısır Uygarlığında piramitlerin inşası esnasında kullanılan devasa kayaların taşınmasında su ve zift gibi sıvı malzemelerin kullanıldığı düşünülmektedir. Yeni çağda ise Isaac Newton, Jean Léonard Marie

1. GİRİŞ

Poiseuille, Guillaume Amontons ve Charles Augustin de Coulomb gibi bilim insanları sürtünme üzerine çalışmalar yapmış ve bugün bildiğimiz tribolojik bilgilerin temellerini atmışlardır;

$$F_s = \mu * F_N \quad (1.3)$$

Denklem 1.3'te F_s sürtünme kuvvetini, μ sürtünme katsayısı ve F_N sürtünen yüzeyler arasındaki normal kuvveti temsil etmektedir.

Buna göre sürtünme kuvveti, sürtünen yüzeyler arasındaki temas alanından ve kayma hızından bağımsızken malzemenin yüzey özelliklerine ve yüzeye uygulanan normal kuvvetle ilişkilidir. Dolayısıyla birbirleriyle izafi olarak hareket eden sistemlerin arasındaki sürtünme kuvvetlerini azaltmanın yolu doğru malzeme seçimi ve yağlama işlemi yapılmasından geçmektedir.

Sürekli gelişen teknoloji dünyasının ve artan dünya nüfusunun bir sonucu olarak gezegenimizin ihtiyaç duyduğu enerjinin giderek arttığı kaçınılmaz bir gerçektir. Bu bilinçteki ülkeler yeni enerji kaynaklarına yönelmenin yanı sıra var olan enerji kaynaklarını da verimli bir şekilde kullanmayı birer görev edinmiştir. Enerjiyi tasarruflu kullanmanın en iyi yolu kullanılan makine ve teçhizatları verimli hale getirmektir. Bunun için ise sistemlerin çalışmasına ters yönde etki eden kuvvetleri azaltmak gerekir. Bu kuvvetler bir otomobilde yol ile lastik arasındaki yuvarlanma direnciyken, bir makinede rulmanlar, kaymalı yataklar veya birbirleriyle sürtünen herhangi bir makine elemanındaki sürtünme kuvvetleridir. Söz konusu kuvvetler gereksiz enerji harcadıkları gibi makine elemanlarında da aşınma hasarı meydana getirmektedir. Yapılan araştırmalara göre makine ve teçhizatlarında kullanılan elemanların %70'i aşınma hasarına uğrayarak ömrünü tamamlamaktadır (Tevrüz 2015). Bu hasarı azaltmanın en iyi yöntemlerinden birisi sürtünen yüzeyler arasına bir yağlayıcı malzeme konularak arada koruyucu bir film elde etmektir.

Birbirleriyle temas halinde çalışan sistemlerin yağlama işlemi 1800'lü yıllara kadar hayvansal ve bitkisel yağlar kullanılarak yapılmıştır. 1859 yılına gelindiğinde Amerika Birleşik Devletleri'nde ilk petrol kuyusu açılmış ve yağlama teknolojisi hızla

ilerlemiştir. Bu yıllarda petrol esaslı yağlar pazarlanmaya başlamış ve daha sonrasında bu yağlayıcılara çeşitli katkı maddeleri eklenerek daha stabil ve korozyon özellik sergilemeyen yağların üretimine başlanmıştır. 1930'lu yıllara gelindiğinde teknolojinin gelişmesiyle nispeten yüksek sıcaklıkta çalışan sistemler yaygınlaşmış ve petrol esaslı yağlar viskozitesini kaybettiğinden dolayı bu görevi üstlenememiştir. Bunun sonucu olarak bilim insanları sentetik yağları keşfetmişler fakat bu yağlar da ekstrem sıcaklık ve basınç şartlarında çalışan süpersonik jetler ve uzay araçları gibi teknolojik araçların ihtiyacını giderememiş ve katı yağlayıcılara yönelim olmuştur (Sunil et al. 2016).

1.2.1. Katı yağlayıcılar

Katı yağlayıcı maddeler temas eden yüzeyler arasında düşük kayma direncine sahip malzemelerdir. Sıvı yağlayıcılar genel olarak daha verimli yağlama sağlarlar da salt yüksek veya düşük sıcaklık, değişken sıcaklık ve vakum gibi ekstrem koşullarda yağlama işlemini sağlamakta problem yaşatmaktadır. Örneğin uzay ve havacılık alanında hava ve uzay araçlarının motor ve gövde ekipmanları çok değişken sıcaklık koşullarına maruz kalmaktadır. Bu durum sıvı yağlayıcı madde kullanımını kısıtlamaktadır. Sıvı yağlayıcılar çok dar bir sıcaklık aralığında verimli kullanılabilir. Yüksek sıcaklıklara çıktığında viskozite değerleri artış gösterirken düşük sıcaklıklarda katılaşma sonucu düşük viskozite değerlerine ulaşır. Buna benzer olarak sıvı yağlayıcılar vakum şartlarında da kolay buharlaşmaya uğrayarak çalışma bölgesinden tahliye olmaktadır. Katı yağlayıcıların, sıvı yağlayıcılara göre avantajları bunlarla sınırlı değildir. Radyasyon, sıvı yağlayıcıları etkileyen diğer bir parametredir. Yüksek radyasyon ortamında sıvı yağlayıcıların büyük bir çoğunluğu kimyasal bozunuma uğrarken katı yağlayıcılar genel olarak radyasyona çok daha dirençlidir. Katı yağlayıcı maddeler hem düşük hem de yüksek kayma hızlarında stabil bir yağlayıcı performansı sergilemektedir. Fakat sıvı yağlayıcılar düşük kayma hızlarında yağlayıcı etkisini tam verimli olarak gösteremez. Benzer şekilde inorganik katı yağlayıcıların termal iletkenlikleri sıvı yağlayıcıların çoğuna göre düşük olduğundan inorganik bazlı katı yağlayıcılar çalışma sırasında teçhizatları sıcaklıktan koruyan bir bariyer görevi üstlenirler. Sıvı yağlayıcıların uzun süre depolanması kimyasal olarak bozulmalarına neden olurken katı yağlayıcılarda böyle bir durum söz konusu değildir. Ayrıca sıvı yağlayıcılar çalışma esnasında kimyasal etkileşime maruz kaldıklarında da kimyasal yapıları kolaylıkla bozulabilir. Bu özellikler

1. GİRİŞ

düşünüldüğünde katı yağlayıcıların çoğu uygulamada sıvı yağlayıcılardan daha çok tercih edildiği anlaşılmaktadır (Erdemir 2001)

1.2.2. 2B malzemelerin katı yağlayıcı özellikleri

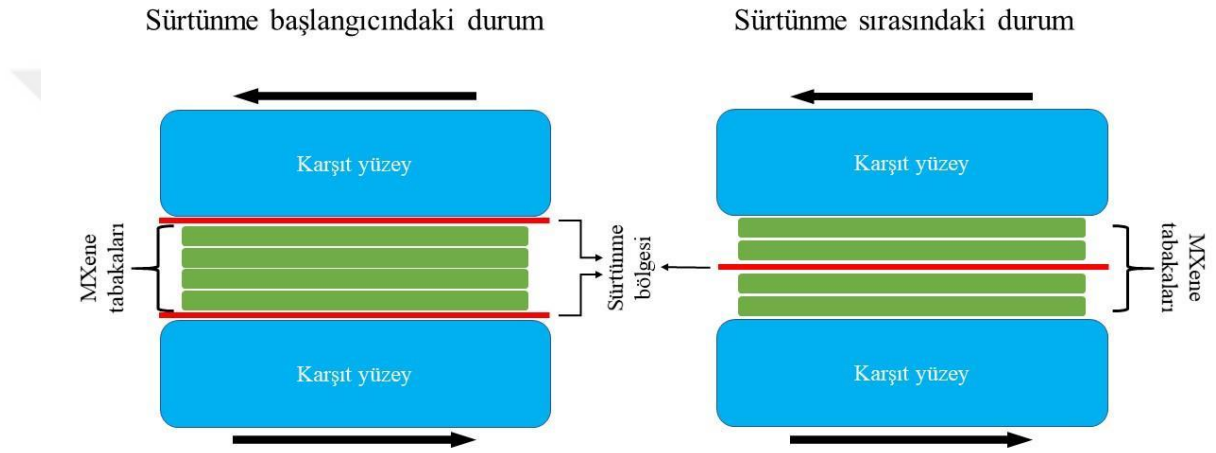
Grafit, katı yağlayıcı olarak veya sıvı yağlayıcılarda katkı maddesi olarak kullanılan en eski malzemelerden biridir. Bu malzeme çoğunlukla katı yağlayıcı olarak kullanılmaktadır ve atomik katmanlar arasında kolay kaymayı sağladığı ve dolayısıyla düşük sürtünme sağladığı için metaller ve alaşımlara göre daha çok tercih edilmektedir. Molibden disülfid (MoS_2), h-BN ve borik asit (BA) diğer 2B katı yağlayıcılardan bazılarıdır (Miyoshi 2007, Scharf and Prasad 2013, Shah et al. 2013). Bunların katmanlı yapıları, birbirine kovalent olarak bağlandığı için malzemelere yağlayıcı özellik kazandırır. Tungsten diselen (WS_2) grafen gibi 2B malzemeler çok düşük sürtünme katsayılarına sahiptir ancak yüksek aşınma oranına sahiptir (Manu et al. 2021). Buna karşın, geçiş metali oksitler, h-BN ve nitrokarbonlar üstün aşınma direncine sahiptir. Fakat bu malzemeler daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir (Mbamara et al. 2016, Manu et al. 2021). 2B malzemeler arasındaki bu çelişkili davranış, her atomik katman arasındaki katman içi bağların doğasından kaynaklanmaktadır. Sürtünme katsayısı çok düşük olan 2B malzemelerde katmanlar, zayıf van der Waals kuvvetleri tarafından birbirine bağlı olduğundan katmanlar arasında kolay kayma hareketi sağlanarak sürtünme azaltılır. Öte yandan, 2D metal oksitler genellikle, katmanlar arası atomların kovalent bağlarla birbirine bağlandığı altıgen tetragonal bir yapıya sahiptir. Bu yapı yüksek katman içi sürtünmeye neden olur, ancak katmanlar arasındaki bölünmeyi kısıtladığından aşınmayı azaltır. Katman içi bağ mukavemetinin artmasıyla sürtünme katsayısı da artar ancak 2B malzemelerdeki aşınma oranı azalır (Manu et al. 2021).

1.2.3. Katı yağlayıcı olarak MXene'ler

MXene malzemeler MAX fazından seçici dağıtma yöntemiyle elde edildikten sonra tabakalı bir yapı sergilerler. Bu tabakalı yapı onlara eşsiz aşınma özellikleri kazandırır. “A” fazı yapıdan uzaklaştırıldıktan sonra “M” ve “X” tabakalarını zayıf bir bağ olan van der Waals bağları bir arada tutmaktadır. MXene'ler katı yağlayıcı olarak kullanıldığında karşıt yüzeyler arasında koruyucu bir tabaka oluşturur. Sürtünme

1. GİRİŞ

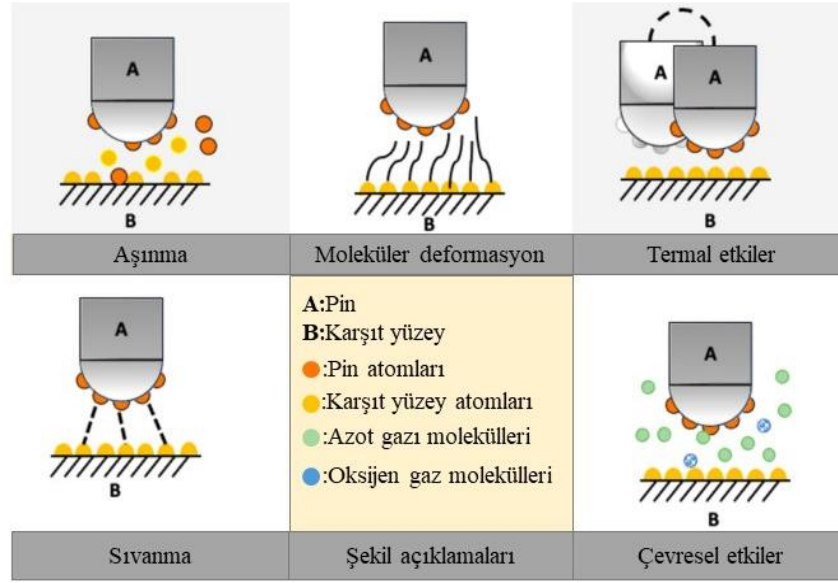
sırasında van der Waals bağları kolaylıkla kırılarak tabakalar birbirinden ayrılır. Ayrılan tabakaların bir kısmı bir yüzeye, bir kısmı ise diğer yüzeye sıvanır. Böylece sürtünme olayı ana malzemeler arasında değil, tabakalar arasında gerçekleşir. Bu durum Şekil 1.10'da gösterildiği gibi hem yüzeyleri korur hem de sürtünme katsayısını azaltır. Sürtünmenin hemen başlangıcında karşıt yüzey-MXene sürtünmesi görülmektedir. Sürtünme hareketinin etkisiyle MXene tabakalarının arasındaki bağlar koparak MXene tabakaları karşıt yüzeye sıvanır. Böylece sürtünme MXene-MXene sürtünmesine dönüşerek karşıt yüzeyleri korur. Böylelikle adeziv aşınma mekanizması ortaya çıkar.



Şekil 1.10. MXene'in ikili temas aşınmasından üçlü temas aşınmasına geçişinin şematik görüntüsü.

1.2.4. Mikro ölçekte sürtünme enerji dağılımı

Makro ölçekte sürtünme, sürtünme katsayısı ve aşınma oranı cinsinden ölçülmektedir. Sürtünme kayıplarının verimli kontrolü için sürtünme kayıplarının altında yatan atomsal mekanizmaların anlaşılması gerekir. Sürtünme, kayan yüzeylerin arasında meydana gelen çeşitli fiziksel, mekanik ve kimyasal etkileşimler nedeniyle üretilen ısıdan kaynaklanır (Bhusan et al. 1995, Adams et al. 2001, Bhushan 2005). Ancak bu etkileşimlerin karmaşıklığı ve tek bir teorik modelin bulunmaması, bu etkileşimlerin her birinin yaptığı göreceli katkıların ölçülmesi günümüz teknolojisiyle çok zordur. Bu bölümde Şekil 1.11'de şematik olarak özetlendiği gibi, sürtünmeye teorik bir bakış sağlamak amacıyla atomik ölçekte kayma nedeniyle ısı oluşumunun altında yatan bilinen çeşitli mekanizmalar incelenecektir.



Şekil 1.11. Sürtünme enerji dağılımının farklı mikro ölçek mekanizmaları

Aşınma

Makro ölçekte aşınma, katı film malzemelerinin plastik deformasyonu ve bunun sonucunda kırılmasından kaynaklanmaktadır. Kırılma sonucu aşınma hasarı, yüzeyi daha pürüzlü hale getirmektedir. Bu durum sürtünme kuvvetinde bir artışa yol açmaktadır. Katı film yağlamada, filmin gevrek kırılmasından ziyade sünek deformasyona uğraması arzu edilir. Sünek malzemeler, sürtünen yüzeylerin hareketi ile plastik deformasyona uğrar. Öte yandan, gevrek kırılma, çatlak başlangıcı ve aşınma mekanizmasının başlamasından sonra daha yüksek bir aşınma oranına yol açar. Bu durumun sebebi yüzeyler arasına giren sert aşınma parçacıklarının yüzeyleri çizerek malzemeyi derin aşınma hasarına uğratmasıdır (Turalıoğlu et al. 2021).

Moleküler deformasyon

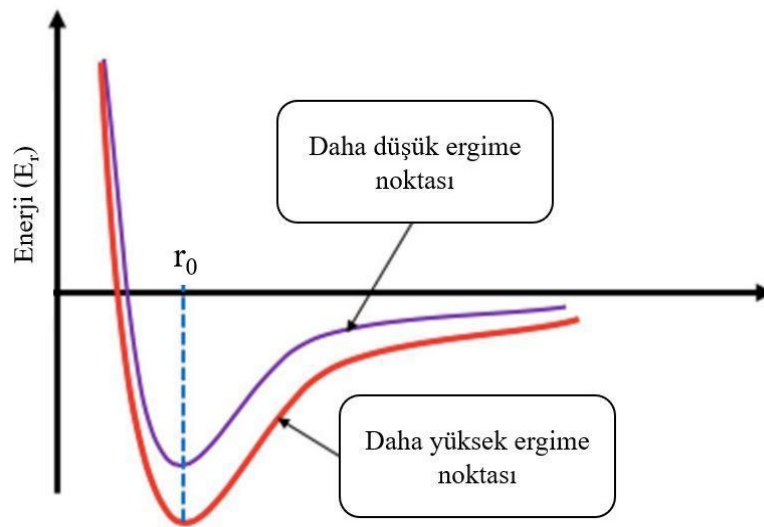
Kayan yüzeylerin ara yüzeylerindeki moleküller birbiriyle karşılaşp etkileşime girdiğinde, ince filmin (katı yağlayıcının) yüzey atomlarının karşıt yüzeye yapıştığı bilinmektedir. 2B malzemeler yatay yönde (tabakalara paralel yönde) düşük sertlikleriyle bilinmektedir (Scarpa et al. 2010). Katı yağlayıcılar, yapışma kuvvetine bağlı olarak kolaylıkla deforme olarak katmanlara ayrılmaktadır. Yapışma nedeniyle 2B katmanların

1. GİRİŞ

bu yanal deformasyonu, atomik dalgalanma olarak bilinir. Atomik dalgalanma moleküler deformasyona ve ısı oluşumuna yol açmaktadır (Smolyanitsky and Killgore 2012).

Termal etkiler

Sıcaklık artışıyla kinetik enerji arttığından ara yüzeyde moleküller ve atomlar hareket etmek için yeterli enerji kazanmaktadır. Bu hareketlerin hızı, çevre sıcaklığı veya sürtünme etkileşimi nedeniyle üretilen ısıya bağlı olarak kinetik enerji değişimiyle artıp azalabilmektedir. Bu dalgalanmaların hızı aynı zamanda atomlar ve moleküller arasındaki etkileşim potansiyeline de bağlıdır. Etkileşim potansiyeli yüksek olduğunda, termal aktivasyonun ısı üretimi üzerindeki genel etkisi azalır (Riedo et al. 2003). Bu durumda bu etkilerin oluşması için daha fazla ısıya ihtiyaç duyulur. Bu durum kaymayı kolaylaştıran çemberleme mekanizmasıyla (hopping) açıklanabilir. Isı üretiminin termal etkisi, kayma ara yüzeyinin kayma hızına ve frekansına bağlıdır (Krylov and Frenken 2014, Smolyanitsky 2015). Şekil 1.12 potansiyel enerjinin atomlar arası mesafeye göre değişimini göstermektedir. Potansiyel kuyusunun derinliğinin yüksek olması atomlar arasındaki çekim kuvvetinin yüksek olması anlamına gelir ve bu potansiyeli aşmak için daha fazla enerji gerekir. Dolayısıyla sürtünme üzerindeki termal etki daha az olur. Ayrıca potansiyel kuyusunun derinliği arttıkça malzemenin erime noktası da artar.



Şekil 1.12. Erime noktası değişimiyle potansiyel enerji kuyusunu gösteren grafik

Sıvanma

Sürtünmedeki artışla ilgili en önemli konulardan biri pürüzlü temas noktalarındaki kimyasal etkileşimlerle ilgilidir. Sürtünen yüzeyler arasında veya çevresel reaktanların varlığında yüzeylere bağlanma meydana gelebilmektedir. Sürtünen yüzeyler arasındaki bağıl hareket sırasında bu bağların oluşması ve kırılması, bağ enerjisinin doğasına bağlı olarak sürtünmenin artmasına veya azalmasına neden olmaktadır (Deng et al. 2012, J. Li and Luo 2017). Aşınma süreci çoğunlukla yüksek bağ ayrışma enerjisi ile metalik bağların kırılmasını içermektedir ve bu reaksiyonlar ekzotermik olduğundan ısı ürettiği bilinmektedir. Ayrıca çevresel reaktanların bir sonucu olarak yüzey oksidasyonu ve korozyon da ekzotermiktir ve ısı oluşumuna yol açmaktadır. Bağ ayrışma enerjisi ne kadar yüksek olursa, üretilen ısı da o kadar yüksek olmaktadır. Çizelge 1.1’de bazı malzemelerin bağlanma enerjileri ve erime noktaları verilmiştir. Çizelge incelendiğinde van der Waals bağının bağlanma enerjisinin diğer bağ çeşitlerine göre oldukça küçük değerlere sahip olduğu görülmektedir.

1. GİRİŞ

Çizelge 1.1. Malzemelerin bağ tipine göre bağlanma enerji ve erime noktası değerleri

Bağ tipi	Malzeme	Bağlanma enerjisi (Kcal/mol)	Erime noktası (°C)
İyonik	NaCl	153	801
	MgO	239	1000
	Si	108	1410
Kovalent	C	170	>3550
	Hg	16	-39
	Al	77	660
Metalik	Fe	97	1538
	W	203	3410
van der Waals	Ar	1,8	-189
	Cl ₂	7,4	-101

Çevresel etkiler

Katı yağlayıcıların performansı büyük ölçüde çevreye bağlıdır. Film ile çevre arasındaki kimyasal ve fiziksel etkileşimler tribolojik performansı büyük ölçüde etkilemektedir (Gallagher et al. 2016, Manu and Jayatissa 2020, Manu et al. 2020). Yapılan çalışmalarda nem oranı artışıyla MoS₂ ve elmas benzeri karbonun (DLC) sürtünme kuvvetinin de arttığını, grafen ve h-BN'nin ise sürtünme kuvvetini düşürdüğü görülmüştür. Ortamdaki azotun ve oksijenin artmasıyla h-BN'in yağlayıcı özelliğini yitirdiği bilinmektedir. Vakum ortamında da aynı şekilde h-BN ve DLC yağlayıcı özelliğini yitirmektedir. Sıcaklığın artışıyla 300 °C'ye kadar MoS₂ suyun desorpsiyonu nedeniyle sürtünme katsayısı azalırken 400 °C'den sonra yapısı bozulduğundan sürtünme katsayısı artmaktadır (Scharf et al. 2008, Kurahashi et al. 2017, Manimunda et al. 2017, Chen et al. 2018).

1.3. Eklemeli İmalat

ASTM F2792-12 standardında belirtildiği şekilde ana malzemedan talaş uzaklaştırma şeklinde değil de buna ters bir biçimde malzemenin üst üste katman şeklinde eklenmesi ile geometrilerin üç boyutlu (3B) tasarımlarının doğrudan elde edilmesi olarak

1. GİRİŞ

tanımlanır. Eklemeli imalat esasen 3B geometrilerin 2B kesitlerinin birbiriyle birleştirilmesi işlemidir. İmalat sırasında her bir 2B kesit kendinden önceki tabakayla ergime veya biriktirme yöntemiyle birleştirilir. Geleneksel yöntemlerle birden çok proseste imal edilebilen geometriler, bu yöntemle tek bir proseste imal edilerek son ürün elde edilir (Gibson et al. 2015).

Eklemeli imalat yöntemi nispeten yeni bir üretim yöntemi olduğu sanılır fakat ilk 3B yazıcılar 1980’li yıllarda geliştirilmiştir. İlk zamanlarda pek verimli çalışmamasına rağmen üretim yönteminin temelleri steryolitografi ile atılmıştır. Bu üretim yöntemiyle farklı laboratuvarlarda birçok patentler alınmıştır. 1980’lerde ultraviyole ışığa duyarlı polimerik reçineler kullanılmaktaydı. Fakat hızla gelişen teknolojiler sayesinde üretim yöntemine lazer, elektron ışını ve plazma gibi enerji kaynakları entegre edilince üretilen malzeme çeşitliliği de artmıştır. Dolayısıyla seramik, metal ve kompozit malzemelerin kullanıldığı havacılık, otomotiv ve sağlık alanlarında popüler bir üretim yöntemi haline gelmiştir.

Eklemeli imalatın geleneksel yöntemlere göre bazı avantaj ve dezavantajları vardır. Avantajları;

- Geleneksel yöntemle üretimin kısıtlarından dolayı bu yöntemle üretilmesi zor ya da imkânsız olan karmaşık geometrilerin üretiminin kolaylığı
- Gözenekli yapı istenilen geometrilerin üretim kolaylığı
- Tek seferde birden çok parçanın üretiminin mümkün olması
- Kullanılan materyalin kolaylıkla alaşımlandırılması
- Üretim parametreleri değiştirilerek istenilen mukavemet değerlerinin ayarlanabiliyor olması
- Tek bir işlemde son ürünün elde edilebiliyor olması

Şeklinde sıralanırken, dezavantajları;

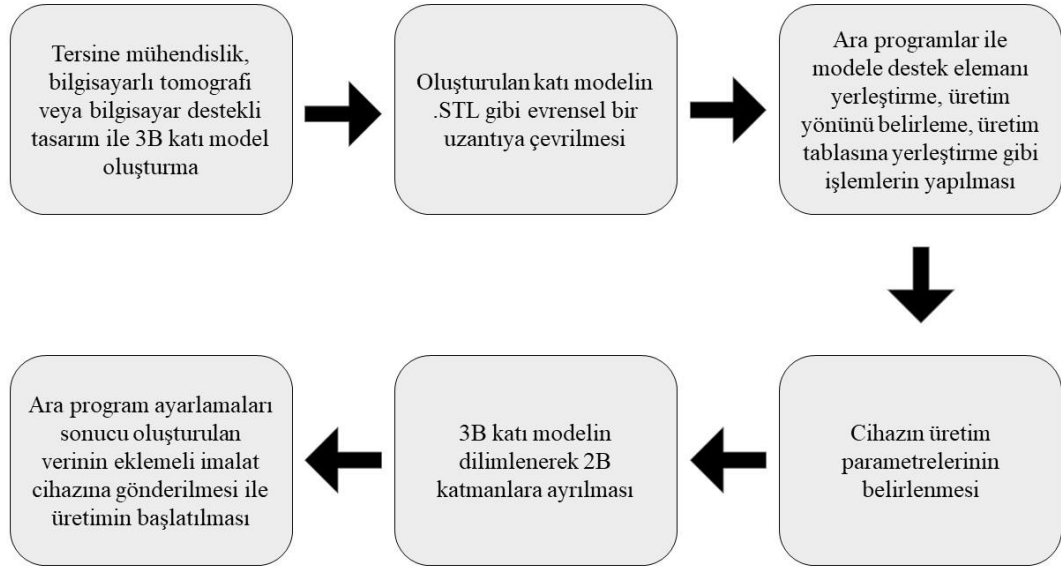
- Üretim boyutlarının nispeten sınırlı olması
- Büyük hacimli geometrilerin üretim süresinin uzun olması

1. GİRİŞ

- Üretimde destek yapıların zorunlu olması sebebiyle bu yapıların yerleştirildiği yüzeylerin kalitesinin düşük olması

Şeklinde sıralanabilir.

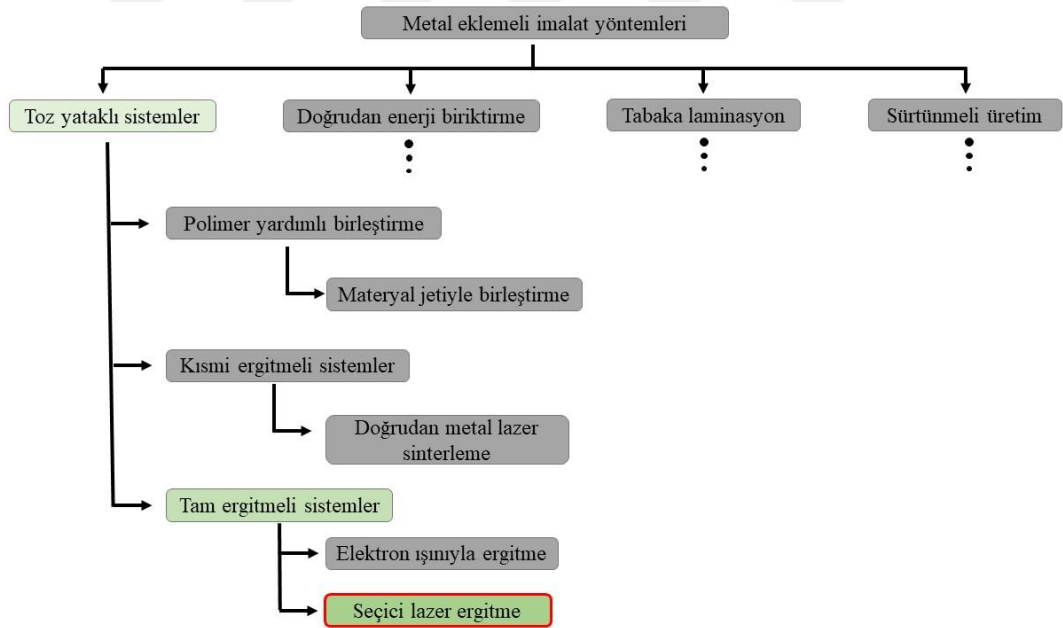
Eklemeli imalatta üretimi planlanan geometriler doğrudan imalat cihazına aktarılamamaktadır. Bir ön işlem olarak 3B model önce genellikle evrensel bir dosya biçimi olan .STL formatına çevrilmektedir. .STL formatı katı modelin üçgen parçacıklara bölünmüş halini ifade etmek suretiyle bu üçgenlerin her köşesinin x, y, ve z koordinatlarını tanımlayan birer vektöre çevirir. Daha sonra .STL dosyası bir ön programda işlenerek destek elemanı yerleştirme, üretim parametreleri seçme, inşa yönü belirleme ve üretim tablasına yerleştirme gibi şeyler ayarlanmaktadır. Bu ön program, yapılan ayarlamalardan sonra 3B katı modeli 2B kesit tabakalarına bölerek üretim cihazının program diline çevirmektedir. Şekil 1.13'te eklemeli imalat prosesinin üretim basamakları verilmiştir.



Şekil 1.13. Eklemeli imalat üretim proses şeması

1.3.1. Eklemeli imalat yöntemleri

Eklemeli imalat polimerik, seramik ve metal gibi birçok hammadde ile üretimin mümkün olduğu bir yöntemdir. Polimerik malzemelerin genel olarak ergime ve şekillendirme sıcaklıkları düşük olduğundan üretimi diğer malzemelere göre çok daha kolay ve yaygındır. Bu yönüyle basit prototipleme için sıklıkla karşımıza çıkmaktadır. Seramiklerin ergime noktaları çok yüksek olduğundan eklemeli imalatla üretimi için genellikle yapıştırıcı elemanlar kullanılmaktadır. Toz haldeki seramik malzemeler yapıştırıcı reçinelerle karıştırılarak biriktirme şeklinde 3B olarak üretilebilir. Buna alternatif olarak püskürtücü bir başlıktan toz halinde püskürtülen toz seramik üzerine sıvı fazdaki yapıştırıcılar sürülerek 3B katı geometriler üretilebilir. Metallerin ise ergime noktaları nispeten yüksek olmasına rağmen yardımcı bağlayıcılara gerek kalmadan hammaddenin doğrudan eritilmesiyle metal 3B katılar üretilebilir. Şekil 1.14'te metal eklemeli imalat üretim yöntemleri verilmiştir. Bu tezde toz yatak birleştirmeli bir sistem olan seçici lazer ergitme yöntemi kullanıldığından bu kısım detaylıca incelenmiştir.



Şekil 1.14. Metal eklemeli imalat üretim yöntemleri (Karthik and Kim 2021)

Toz yataklı sistemler

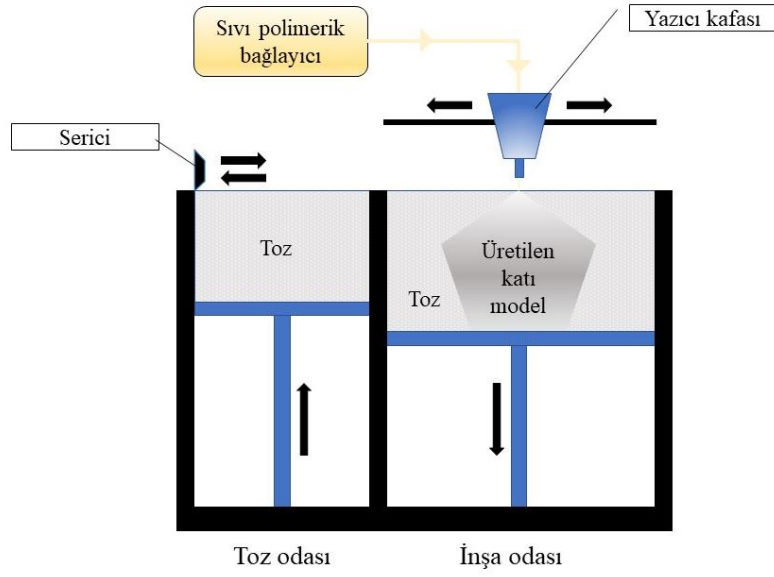
Toz yataklı sistemler, katman katman ekleme ile üretim konseptine dayalı olarak istenen 3B katı model verilerinden gerçek parçaları imal etmek için kullanılabilen

gelişmiş bir üretim teknolojisidir. Üretim yönteminde ana malzeme olarak küçük boyuttaki küresel tozlar kullanılır. Tozların birleştirme işlemi lazer ve elektron ışını gibi ısı kaynaklarıyla tamamen ya da kısmi ergitme yapılarak veya toz püskürtme ve sonrasında püskürtülen tozları birbiriyle bağlamak için bir yapıştırıcı reçine kullanılmasıyla yapılmaktadır. İşlemler oksidasyonu engellemek kapalı bir vakum ortamında yapılmaktadır (Dev Singh et al. 2021).

Materyal jetiyle birleştirme yöntemi

Materyal jetiyle birleştirme prosesinde iki farklı malzeme kullanılmaktadır. Bunlardan birisi toz formda bulunan ana metal veya seramik malzemeyken diğeri sıvı fazda bulunan polimerik bağlayıcı malzemedir. Ana malzeme gövdenin büyük bir bölümünü oluştururken bağlayıcı malzemenin görevi toz formundaki ana malzemenin taneciklerini birbirine bağlayarak katmanları, katmanları da birbirine bağlayarak katı geometriyi oluşturmaktır.

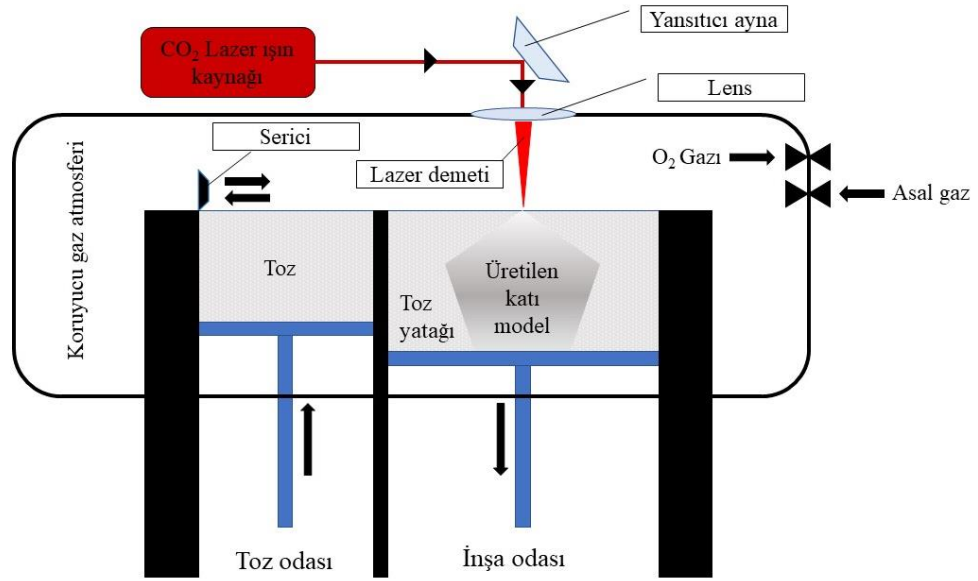
Materyal jetiyle birleştirme metoduyla üretim yapan cihazlarda birer adet toz ve inşa odası bulunmaktadır. Üretim sırasında toz inşa odasına ince ve homojen olarak serilir. İki yönlü hareket kabiliyeti olan bir kafa, haznesinde bulunan sıvı fazlı bağlayıcı polimeri sprej jeti şeklinde katı geometrinin tabakalara ayrılmış dilimlerinden aldığı verilere göre toza sıçratarak tozların birbiriyle bağlanmasını sağlar. Yöntemin şematik görüntüsü Şekil 1.15'te verilmiştir.



Şekil 1.15. Materyal jetiyle birleştirme yöntemi şematik görünümü

Doğrudan metal lazer sinterleme yöntemi

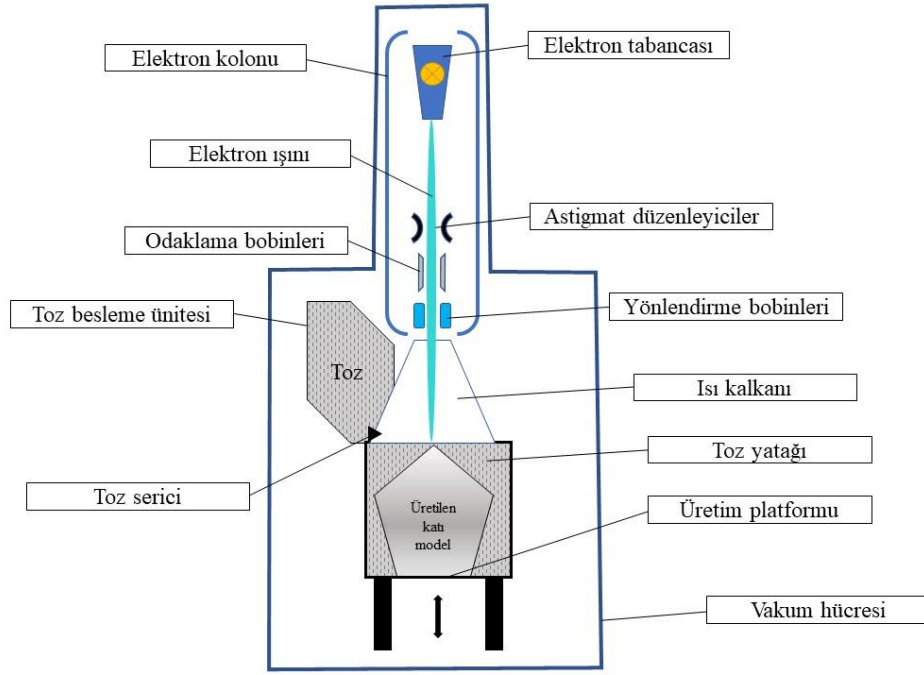
Özellikle metal parçaların katmanlı üretiminde alternatif konumda bulunan bu yöntem, toz yatağına lazer kaynağıyla ısı uygulanması ve toz havuzundaki tozların tam ergimeyerek sinterlenmesi esasına dayanmaktadır. Yöntemde kullanılan tozların boyutu 100 μm ve altındadır. Katman kalınlığı ise 250 μm 'ye kadar artırılabilir. Toz malzeme, boyut ve cinsi ve cihaz parametrelerine göre yüzey kalitesi ve boyut hassasiyeti kontrol edilebilir (Shirazi et al. 2015). Sistemin çalışma adımları diğer toz yataklı sistemlerle aynıdır. Sadece tozların birbiriyle sinterlenmesini sağlayan kaynak, lazer ışınından sağlanan ısıdır. Ayrıca tozların sinterlenmesi sırasında ısı açığa çıktığından malzemenin oksitlenme durumu vardır. Bu durumun önüne geçmek için sinterleme işlemi kapalı bir koruyucu gaz ortamında yapılmaktadır. Yönteme ait şematik görüntü Şekil 1.16'da verilmiştir.



Şekil 1.16. Doğrudan metal lazer sinterleme yönteminin şematik görünümü

Elektron ışını ile ergitme yöntemi

Elektron ışını ile ergitme sistemi, elektron demeti ile toz haldeki metal malzemenin ergimesini sağlayarak katmanlı üretim yapabilen bir başka eklemeli imalat sistemidir. Yöntemde kaynak olarak elektron ışını kullanıldığından ısı girdisi diğer tüm yöntemlere göre fazladır. Bu durum üretim sonrası yapıda homojen bir kalıntı gerilim oluşmasını sağlayarak önemli bir avantaj sunmaktadır. Kullanılan tozların iletken olması ve ortamdaki elektron salınımının önüne geçmek amacıyla işlem vakum ortamında yapılmaktadır. Toz malzemeye yüksek enerji uygulanması uygulanan elektron demetinin manyetik saptırıcılarla odaklanması ve kontrol edilmesi daha hassas pozisyonlama ve daha hızlı üretimi de beraberinde getirmektedir. Buna karşın uygulanan enerjinin fazla olması sebebiyle boyut hassasiyeti diğer toz yataklı sistemlere göre oldukça geride kalmaktadır (Gibson et al. 2015). Yönteme ait şematik görüntü Şekil 1.17’de verilmiştir.



Şekil 1.17. Elektron ışını ile ergitme yönteminin şematik görünümü

Seçici lazer ergitme yöntemi

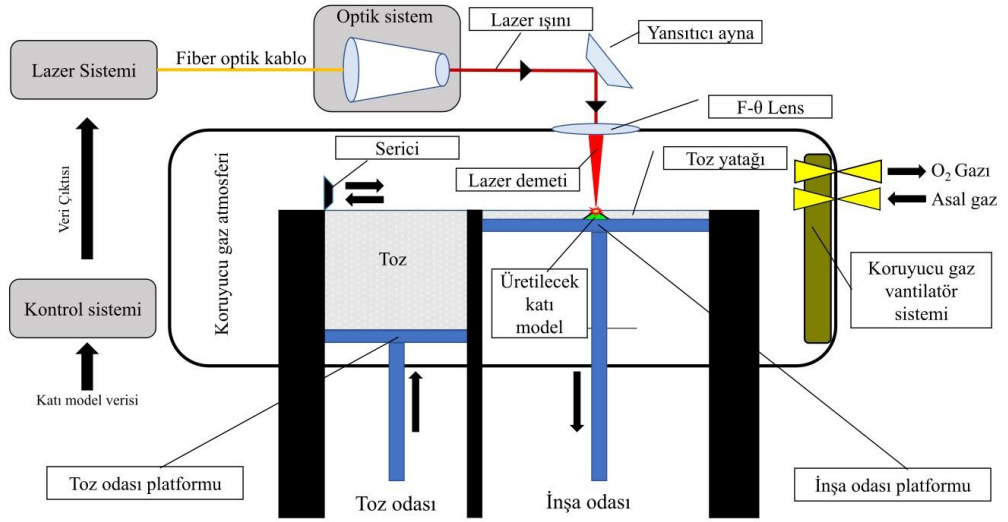
Seçici lazer ergitme (SLE) yöntemi, bir başka toz yataklı eklemeli imalat yöntemlerinden birisidir. Katılaşma öncesi malzemeler tamamen eridiği için doğrudan metal lazer sintirleme yöntemiyle ayrılmaktadır. SLE yönteminde üretim işlemi için vakum ortamına gerek yoktur. Fakat lazer ışınının ortaya çıkardığı ısı sebebiyle koruyucu gaz atmosferine ihtiyaç duyulmaktadır (Ferrari et al. 2012). Yöntemde koruyucu gaz olarak genellikle argon veya azot gazı kullanılır. Tamamen ergime söz konusu olduğundan bir önceki katman da yeni katmanla birlikte kısmen veya ergimektedir. Bu durum her ne kadar kalıntı gerilmelere sebep olsa da katmanlar arası bağlanmayı arttırdığından üretilen katı modelin yoğunluğunu istenilen seviyelere çıkarmaktadır (Kruth et al. 2005, Pinkerton 2016).

SLE yöntemi de toz yataklı diğer sistemlere benzer şekilde çalışmaktadır. Üretim başlangıcında toz odasının platformu en alt seviyeye alınarak belirli boyutlardaki tozlarla doldurulur. İnşa odası üretim başlangıcında en üst seviyede olacak şekilde ayarlanır. Evrensel koordinat sistemine göre bu platformlar “z” yönünde yukarı ve aşağı hareket etmektedir. Üretim esnasında toz odacığına ait platform bir miktar yukarı yönde hareket ederken inşa odasının platformu katman kalınlığı kadar aşağı yönde hareket eder. Her iki

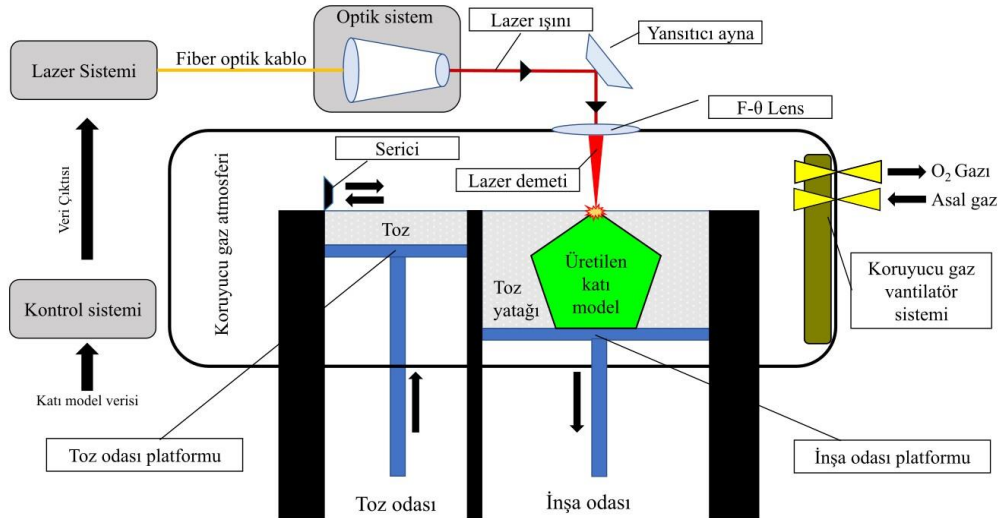
platform da hareketlerini tamamladıktan sonra sağa ve sola “x” yönünde hareket eden bir toz serici, toz odası platformunun yüzeyinde bulunan bir miktar tozu, katman kalınlığı kadar aşağıya indirilmiş olan inşa odası platformunun yüzeyine homojen bir şekilde serer. Optik sistemi sayesinde “x” ve “y” yönünde tarama yapabilen bir lazer kaynağı, katı geometrinin tabakalara ayrılmış dilimlerinden aldığı verilere göre tozu seçici olarak tarayarak tozların birbiriyle bağlanmasını sağlar. Bu işlemler her bir katmanda aynı şekilde devam ederek üretim tamamlanır. Yöntemin proses başlangıç ve bitişine ait şematik görüntüler Şekil 1.18’de verilmiştir. Üretim sonrası, tozlar belirli geçirgenliği olan eleklerle elenerek yeniden kullanılabilir.



a



b



Şekil 1.18. SLE yönteminin şematik görünümü; (a)Üretim başlangıcı, (b)Üretim bitişi

SLE yönteminde üretim sırasında oksijen oranı ağırlıkça %2'nin altında tutulmaktadır. Oksijen oranı arttıkça tozların oksitlenmesi kaçınılmazdır. Ayrıca Titanyum gibi çabuk tutuşan malzemelerin üretimi için oksijen problem meydana getirmektedir. Bu yüzden üretim odasındaki oksijen vakumla çekilerek içeriye koruyucu gaz olarak argon veya azot gazı gibi gazlar gönderilmektedir. SLE'de katman kalınlığı tipik olarak 10-50 μm 'dir (Karthik and Kim 2021). Kullanılan tozlar küreselliğin iyi olması açısından gaz, santrifüj veya plazma atomizasyon yöntemiyle üretilmektedir (Kassym and Perveen 2019). Kullanılan metal tozlara ön alaşımlandırma işlemi yapılabilmekte ve böylece alaşımlandırma için post prosese ihtiyaç duyulmamaktadır.

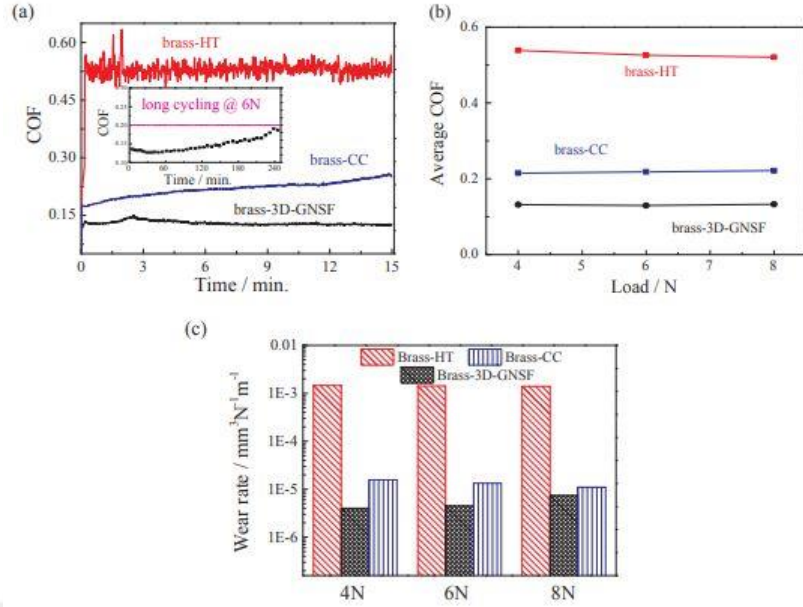
2B malzeme ailesinin eşsiz üyesi MXene'ler ve eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan SLE, son yıllarda malzeme bilimi ve mühendisliği alanlarında büyük ilgi görmektedir. MXene'ler, 2B geçiş metali karbürleri ve nitrürlerinden oluşan yeni bir malzeme sınıfıdır ve yüksek iletkenlik, mekanik dayanım ve korozyon direnci gibi üstün özellikleri ile dikkat çekmektedir. SLE ise, katman katman malzeme ekleyerek karmaşık ve hassas yapılar oluşturma imkânı sunan yenilikçi bir üretim teknolojisidir. Bu iki teknolojinin birleşimi, tribolojik ve korozyon davranışları açısından önemli avantajlar sunabilir. MXene'lerin yüksek yüzey alanı ve reaktif yüzeyleri, sürtünme ve aşınma direncini artırırken, SLE malzeme israfını geleneksel üretim yöntemlerine göre minimize eder ve tasarım esnekliği sağlar. Böylece, MXene'ler ile eklemeli imalatın entegrasyonu, gelişmiş performans ve dayanıklılık özelliklerine sahip yeni nesil malzemelerin geliştirilmesine olanak tanır, bu da özellikle havacılık, otomotiv ve biyomedikal gibi sektörlerde önemli uygulama potansiyeline sahiptir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu tezde SLE ile üretilmiş Ti6Al4V taban malzemesi üzerine uygulanan 2B MXene'lerin aşınma ve korozyon davranışları incelendiğinden literatür özetleri de paralel şekilde genel 2B malzemelerin tribolojik ve korozyon özelliklerinin incelendiği çalışmalardan başlanarak MXene malzemelerin aşınma ve korozyon davranışlarına doğru genelden özele doğru incelenmiştir.

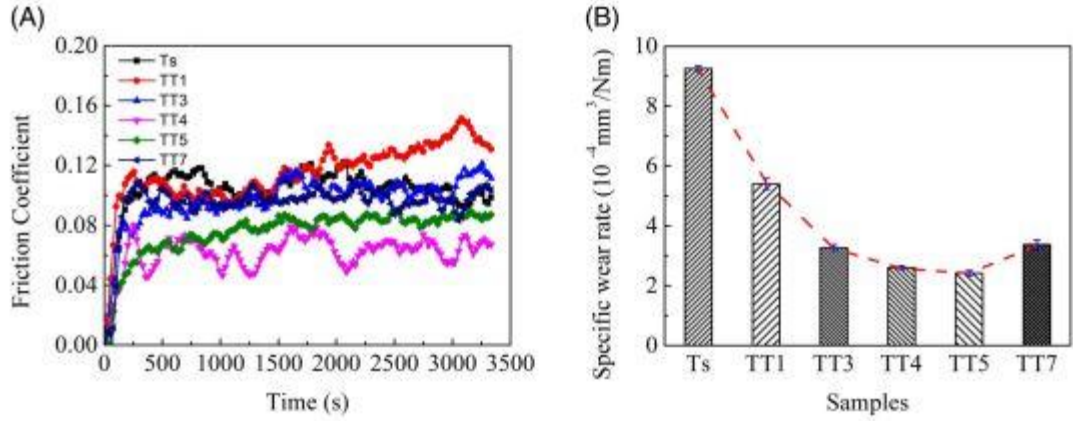
2.1. 2B Malzemelerle İlgili Literatür Çalışmaları

Chen et al. 2019 yılında yaptığı çalışmada pirinç metal altlıklar üzerine “Hummers” metoduyla grafen oksit kaplamışlardır. Ekip, kaplama işlemi için askorbik asit ve grafen oksit (GO) 0,1mg/ml süspansiyonu hazırlamıştır. Kaplanacak pirinç altlıklar bu süspansiyona daldırıldıktan sonra 180°C'de 6 saat ısıtılmıştır. GO'nun etkisi incelemek için kontrol grubu olan diğer pirinç numuneler ise sadece askorbik aside daldırılarak yine aynı sıcaklıkta 6 saat ısıtılmıştır. Kaplaması yapılan numuneler XRD, SEM ve TEM gibi cihazlarla karakterize edilmiştir. Daha sonra tribolojik testler pin-on-disk yöntemiyle 6 mm çapında AISI 52100 karşıt bilyeyle 4N, 6N ve 8N kuvvetle yapılmıştır. Test sonucunda 3B grafen oksit+askorbik asitle kaplaması yapılan numunelerin sürtünme katsayısı değeri, yalnızca askorbik asit uygulanan numunelere göre 2 kat daha düşük çıkmıştır (Şekil 2.1). Grafen oksitli numunelerin aşınma oranı kontrol grubuna göre %15 azalmıştır (Chen et al. 2019).



Şekil 2.1. Pirinç üzerine GO kaplama yapılmış numunelere ait tribolojik sonuç grafikleri (Chen et al. 2019).

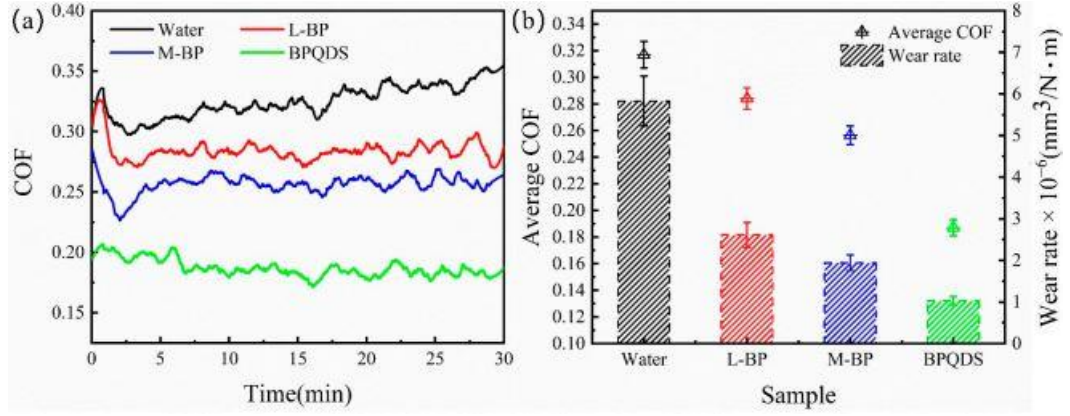
Tian et al. 2021 yılında yaptıkları çalışmada çift fazlı epoksi reçine ile 2B TiO₂ nano partikülleri belirli oranlarda karıştırmışlardır. Karışımın homojenliğini sağlamak amacıyla homojenizatörde 3000 devir/dakika hızda 200 saniye süreyle karıştırmışlardır. Ekip, karışımı çelik döküm kaplarına aktarmış 24 saat oda sıcaklığında bekleterek kürlendirmiş daha sonra kalıptan çıkararak 60°C'de 24 saat daha kürlendirmiştir. Çalışmada üretilen kompozit malzemeler SEM cihazı ile karakterize edilmiş, aşınma oranları 3B mikroskop ile ölçülmüştür. Yapılan çekme ve aşınma testi sonuçlarında epoksi reçineye ağırlıkça %4 oranında TiO₂ nano-partikül ilavesi her iki test sonucunu da olumlu etkilemiş olup, kontrol grubuna göre iyileşmeye sebep olduğu görülmüştür (Şekil 2.2) (Tian et al. 2021).



Şekil 2.2. Çift fazlı epoksi + TiO₂ nanopartikül karışımı ile elde edilen kompozit numunelere ait tribolojik sonuç grafikleri; (a) Sürtünme katsayıları, (b) aşınma oranları (Tian et al. 2021).

Çelik vd. 2013 yılında yaptıkları çalışmada hazırladıkları nano h-BN tozları SAE-10W motor yağına bir katkı maddesi olarak belirli oranlarda karıştırmışlardır. Çalışmada karışımın homojenliğini sağlamak için ultrasonikatör kullanılmıştır. Daha sonra ekip elde edilen yağın, östenitlenmiş AISI 4140 çeliği karşıt malzeme olarak kullanmak suretiyle sıvı aşınma ortamında pin-on disk yöntemiyle tribolojik özelliklerini incelemiştir. Rapor ettikleri sonuçlara göre motor yağına h-BN katkısı yağın viskozitesini değiştirmemiştir. Buna rağmen katkısız SAE-10W motor yağıyla yapılan testlere göre, h-BN ilave edilmiş olan yağ ile yapılan testlerde sürtünme katsayısı ve aşınma oranını sırasıyla %14 ve %65 azalmıştır (Çelik et al. 2013).

Dong et al. 2022 yılında yayınladıkları bir çalışmada su bazlı bir yağlayıcı olarak siyah fosforun etkisini incelemiştir. Çalışmada kırmızı fosfordan farklı boyutlarda (2-4 µm, 300-500 nm, 6-10 nm) siyah fosfor (BP) tabakalar elde etmiş, bu tabakaları ağırlıkça farklı oranlarda (%0,025, 0,05, 0,075 ve 0,1) saf su ile karıştırarak çözeltiler hazırlamıştır. Çalışma ekibi daha sonra Ti6Al4V karşıt malzeme ve GCr15 çelik top kullanarak pin-on disk yöntemiyle bu yağlayıcı çözeltinin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Rapor ettikleri sonuçlara göre 6-10 nm boyutlu, saf suyla ağırlıkça %0,075 oranında karıştırılan siyah fosfor nano toz çözeltisiyle yapılan testlerde aşınma oranı tek başına saf su ile yapılan testlere göre %82 azalırken sürtünme katsayısı ise %42 oranında azalmıştır (Şekil 2.3) (Dong et al. 2022).



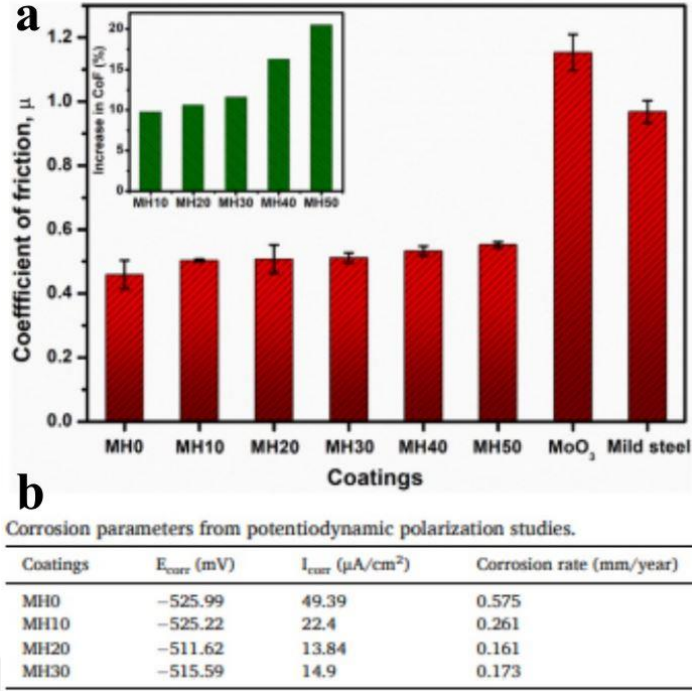
Şekil 2.3. Saf suya yağlayıcı BP eklenmesiyle yapılan tribolojik deneylerin sonuçları; (a)Sürtünme katsayısı, (b) aşınma oranları (Dong et al. 2022).

Wang et al. 2021 yılında yaptıkları çalışmada farklı kimyasal bileşimde hazırlanan LDH 2B malzemelerin baz gres yağına katkılanmasıyla tribolojik davranışlarının değişimini incelemişlerdir. Bu amaçla ZnAl- LDH, MgAl- LDH, NiAl- LDH ve CoAl- LDH tabakalı yapıları farklı topografik özelliklerde reaksiyon koşullarını (molarite, pH derecesi, hacim, sıcaklık ve zaman) kontrol ederek (çiçek benzeri, küresel ve plaka benzeri) sentezlemişlerdir. Çalışmada oluşturulan toz tabakalı yapılar, lityum esaslı baz gres yağıyla homojen bir şekilde karıştırılmış ve karışımın tribolojik özellikleri incelenmiştir. Tribolojik testler 80°C sıcaklıkta 150N yükte pin on-disk yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Hem aşınma topu hem de karşıt yüzey olarak AISI 52100 çelik malzeme kullanılmıştır. Sonuçlara göre gres yağına LDH katkısı tribolojik olarak bariz bir iyileştirme sergilemiştir (Wang et al. 2021).

Mujib et al. 2020 yılında yayınladıkları çalışmada AISI 304 paslanmaz çelik numuneler üzerine MoS₂, BN ve grafit kaplama yaparak bu kaplamaların korozyon davranışlarını incelemişlerdir. MoS tozlarını klorosülfonik asit içinde sonikasyona tabi tutmuş ve daha sonra tozları saf suyla yıkayarak pul pul dökme yöntemiyle tabakalara ayırmışlardır. Ekip, aynı yöntemi izopropil alkol kullanarak BN tozlarına da uygulamıştır. Grafit tabakalar ise hazır satın alınmıştır. Her üç malzeme de elde edildikten sonra bu malzemeler yapıştırıcı-bağlayıcı malzemeler ile (PVDF/ N-metil pirolidon) homojen olarak karıştırılmıştır. Bu karışımlar AISI 304 paslanmaz çelik numune üzerine sıvamayla aktarılmıştır. Oluşturulan kompozit 2B kaplamalara korozyon testleri uygulanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde açık devre potansiyelinden en düşük değer kaplamasız 304 çelik numuneden elde edilirken en yüksek değer MoS₂ kaplanan numuneden elde edilmiştir.

Aynı şekilde potansiyodinamik polarizasyon eğrileri incelendiğinde en yüksek E_{corr} ve en düşük I_{corr} değeri MoS₂ kaplanan numuneden elde edilmiştir. Yüzeyine grafit kaplanan çelik numuneler, iyonların nüfuz edebileceği küçük boşluklar olmadığı için korozyon açısından iyi sonuçlar vermemiştir (Mujib et al. 2020).

Joseph et al. 2022 yılında 2B MoS₂-hBN hibrit kaplamaların tribolojik ve korozyon özelliklerini incelediği bir çalışma yayınlamıştır. Çalışmada pul pul dökülme tekniği kullanılmak üzere izopropil alkol ve su karışımına MoS₂ ve h-BN tozları ilave edilmiş ve çözeltiye ultrasonikatör ile sonikasyon işlemi uygulanmıştır. Daha sonra çözeltinin sıvı fazı santrifüjle bertaraf edilerek nanotabakalar kurutulmuştur. Kurutulan tabakalar belirli oranlarda karıştırılarak bağlayıcı polivinil alkolle yeni bir çözelti hazırlanmıştır. Hazırlanan çözelti ısıtılan yumuşak çelik taban malzemelerin yüzeyine damlatılarak hibrit 2B kompozit kaplamalar tamamlanmıştır. Hazırlanan kompozit malzemelere aşınma ve korozyon testi uygulanmıştır. Aşınma testi 5N yük uygulanarak lineer aşınma şeklinde paslanmaz çelik karşıt bilyeyle yapılmıştır. Korozyon testleri ise Ag/AgCl referans elektrot, grafit rod karşıt elektrot ve kompozit malzeme iş elektrotu olmak üzere üçlü elektrot sistemiyle NaCl çözeltisinde yapılmıştır. Sonuçlara göre 1:1 oranında MoS₂ ile üretilen kompozit malzemeden en düşük sürtünme katsayısı değeri elde edilmiştir. En düşük korozyon oranı ise oransal 1:4 (MoS₂:h-BN) olarak hazırlanan kompozit numuneden elde edilmiştir (0,161 mm/yıl). Çalışmaya ait deneysel sonuçlar Şekil 2.4'te verilmiştir (Joseph et al. 2022).



Şekil 2.4. 2B MoS₂-h-BN nanokompozit numunelerin triboloji ve korozyon deney sonuçları; (a) Sürtünme katsayıları, (b) Potansiyodinamik polarizasyon sonuçları (Joseph et al. 2022).

2.2. MXene'lerin Tribolojik ve Korozyon Özellikleri ile İlgili Literatür Çalışmaları

Marian et al. 2020 yılında yayınlamış olduğu bir makalede Ti₃C₂T_x MXene nano tabakaların farklı bağıl nem koşullarında ve hertzian basınç değerlerinde katı yağlayıcı özelliklerini incelemiştir. Çalışmada hazır satın alınan Ti₃AlC₂ tozları Ti₃C₂ nano tabakaya çevirmek için 100 ml %40'lık HF çözeltisine 10 gr Ti₃AlC₂ tozu ilave ederek karışımı 3 dakika karıştırmış ve sonra iki saat oda sıcaklığında bekletmişlerdir. Daha sonra karışıma saf su ilave ederek santrifüj makinesiyle sıvı fazı uzaklaştırmışlardır. pH değeri 6'ya ulaşana kadar bu işleme devam etmişlerdir. Sıvı fazı uzaklaştırılan nano tabakalar vakum ortamında 24 saat süreyle kurutulmuşlardır. Böylece Al fazını seçici olarak yapıdan uzaklaştırmışlar ve Ti₃C₂ nano tabaka elde etmişlerdir. 2B MXene nano toz, daha sonra asetonla 1.2mg/ml olacak şekilde bir çözelti hazırlanmış ve bu çözelti ultrasonikasyona tabi tutularak tabakaların iyice açılması hedeflenmiştir. Aseton-MXene çözeltisi şırıngaya doldurularak 80°C sıcaklığa ısıtılan 100Cr6 çelik taban malzemelerin yüzeyine damlatılmıştır. Asetonun buharlaşmasıyla yüzeyde Ti₃C₂T_x MXene nano tabakalar biriktirilmiştir. Kaplama işlemi tamamlanan malzemelere pin-on disk yöntemiyle %20 ve %80 bağıl nem koşullarında paslanmaz çelik malzemeden üretilmiş

aşınma topuyla tribolojik testler yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde düşük nem ve hertzian basınç koşullarında aşınma oranı 2,7 kat azaldığı görülmüştür. Yüksek nem koşullarında tabakalar arası mesafede aşırı bir artış meydana geldiğinden sürtünme kuvvetini azalttığı belirlenmiştir (Marian et al. 2020).

Marian et al. 2020 yılında yaptıkları bir başka çalışmada ise HF ile seçici dağlama yöntemiyle sentezlediği Ti_3C_2Tx MXene tozlarının asetonlu çözeltisini çelik esaslı bilyeli rulmanlara damlama yöntemiyle uygulamıştır. Tribolojik özellikler için özel bir tribometre kullanmışlar ve kaplanan rulmanların, işlemsiz olanlarla karşılaştırdıklarında servis ömürlerinin 2,1 kat daha uzun olduğunu rapor etmişlerdir (Marian et al. 2020)

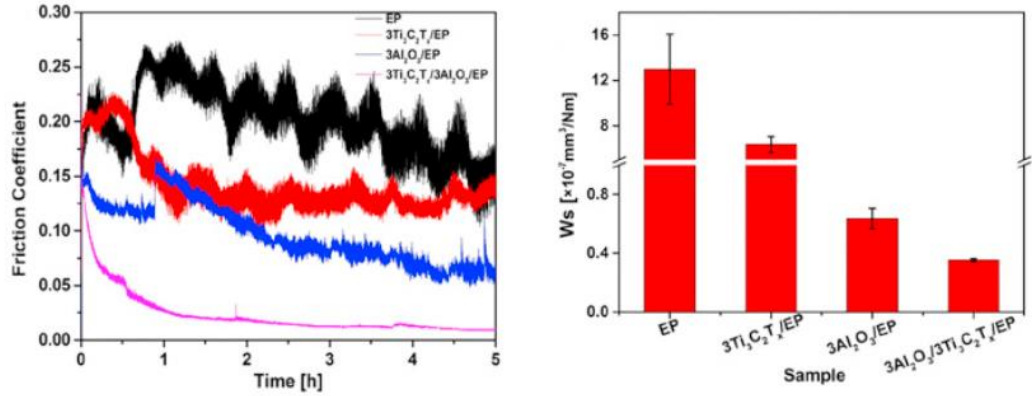
Lian et al. 2018 yılında yayınladıkları bir bilimsel çalışmada MAX fazında bulunan Ti_3AlC_2 tozlarını seçici aşındırma yöntemiyle Ti_3C_2Tx ince tabakalara dönüştürmüştür. Elde edilen tozlar kurutularak TMAOH (tetramethylammonium hydroxide) çözeltisiyle tekrar solüsyon haline getirilmiş ve bakır taban malzeme üzerine spreyle kaplama yöntemiyle kaplamışlardır. Kaplanan numuneler işlemsiz bakır olanlarla karşılaştırıldığında aşınma oranının çarpıcı bir oranda azaldığını rapor etmişlerdir (Lian et al. 2018).

Sheng et al. yaptığı bir çalışmada Q235 çelik üzerine Ti_3C_2Tx MXene ince tabakaları poliüretan kompozitlerle karıştırarak yüzeye aplikatör ile uygulamış daha sonrasında numuneleri kurutarak kaplama işlemini gerçekleştirmiştir. Numunelere korozyon ve UV geçirgenlik testleri yapmıştır. Çıkan sonuçlara göre MXene kaplı numunelerin UV geçirgenliği, işlemsiz olanlara göre yaklaşık %100 düşmüştür. Kaplı olan numunelerin korozyon dirençlerinin ise, işlemsiz numunelere oranla iki kat arttığını rapor etmişlerdir (Sheng et al. 2021).

Wu et al. 2021 yılında yayınladığı bir makalede AZ31 Magnezyum alaşımlı taban malzemeler üzerine $Ti_3C_2/MgAl-LDH$ kaplaması yaparak kompozit bir malzeme elde ederek bu malzemenin korozyon özelliklerini incelemişlerdir. Bu amaçla hazır satın alınan MAX fazlı Ti_3AlC_2 tozları HF ile seçici dağlanarak MXene fazlı Ti_3C_2 'ye dönüştürmüşlerdir. Dönüşümün son evresinde süspansiyon halinde bulunan MXene çözeltisi içerisinde $Y(NO_3)_3$ çözündürmüşlerdir. Karışıma saf su / NH_3 çözeltisi eklenerek

kullanılarak pH'ı 10,5 olarak ayarlanmıştır. Daha önce belirli boyutlarda kesilerek yüzeyleri hazırlanan AZ31 Mg taban malzemeler bu karışıma daldırılarak otoklava atılmıştır. 418K'de 16 saat bekletilen numuneler daha sonra yıkanarak kurutulmuştur. Karakterizasyon işlemleri yapılan kompozit malzemelere daha sonra korozyon testi uygulanmıştır. Testler %3,5'lik NaCl elektrotiyle yapılmış, potansiyodinamik ve elektrokimyasal empedans ölçümleri incelenmiştir. E_{corr} ve I_{corr} değerlerine göre sonuçlarda devasa iyileşmeler söz konusu olmuştur (Wu et al. 2021).

Guo et al. 2021 yılında yayınladıkları bir bilimsel makalede epoksi reçineye hazır MAX fazlı Ti_3AlC_2 tozdan HF ile seçici dağlama yöntemiyle elde ettikleri Ti_3C_2 ve yine hazır satın alınan Al_2O_3 tozlardan belirli oranda katkılama yapmıştır. Bunun için epoksi reçine içerisine Ti_3C_2 ve/veya Al_2O_3 tozlar ekleyerek karışımları kalıplara dökmüşlerdir. Vakum ortamında gazları alınan epoksi sistemler kürlendikten sonra elde edilen numunelere tribolojik testler yapmış ve MXen katkılı numunelerin sürtünme katsayıları ve aşınma oranlarının, katkısız numunelere göre büyük oranda düştüğünü rapor etmişlerdir (Şekil 2.5) (Guo et al. 2021).

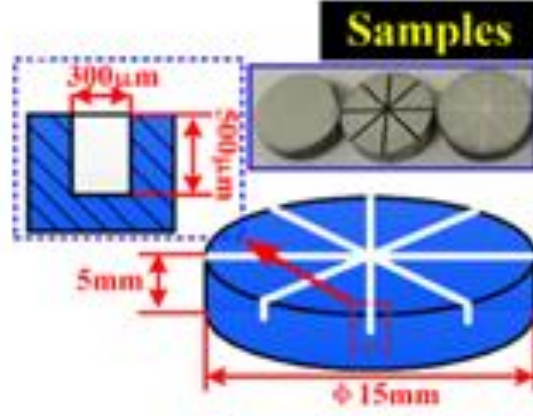


Şekil 2.5. Epoksi/Ti₃C₂/Al₂O₃ ile oluşturulmuş kompozit malzemelerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranları grafiği (Guo et al. 2021).

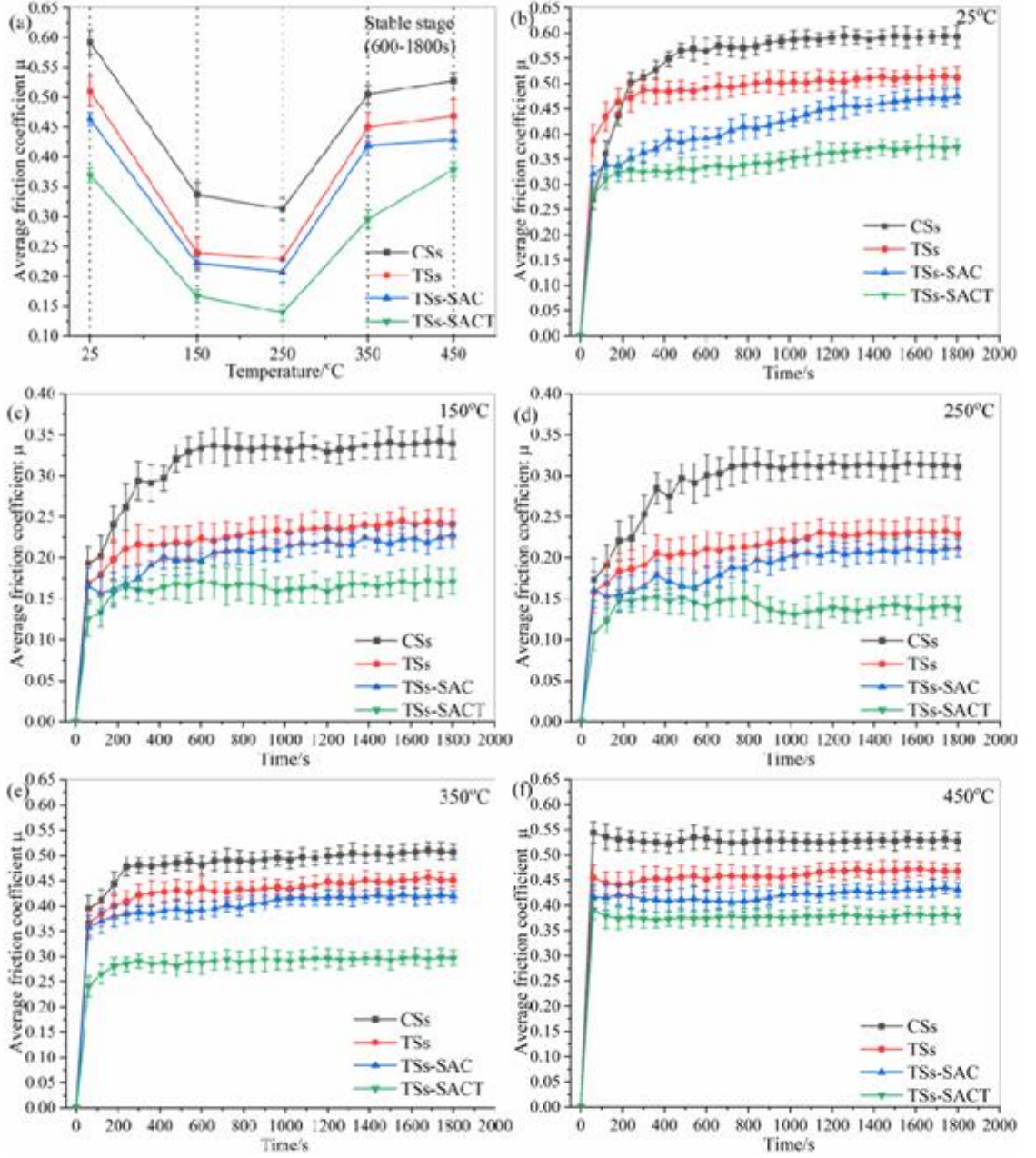
Yan et al. 2019 yılında yayınladıkları bir çalışmada Q345 çelik taban malzemeler üzerine epoksi reçine+Ti₃C₂ MXene kaplayarak taban malzemenin korozyon direncini arttırmayı hedeflemişlerdir. Bunun için HF ile seçici dağlama yöntemiyle Ti₃AlC₂ MAX tozlarını Ti₃C₂ fazına çevirmişlerdir. Daha sonra kurutulan tozlar aseton içerisinde ultrasonikasyon ile iyice dağıtılmıştır. Çözelti içerisinde belirli oranlarda E44 epoksi reçine eklendikten sonra karışımlar homojenlik sağlanana kadar karıştırılmıştır. Daha sonra Aseton buharlaştırılarak kalan kısma epoksi reçine kürleştirici eklenerek karıştırılmaya devam edilmiştir. Oluşturulan karışımların hava kabarcıkları giderilmesi için oda sıcaklığında vakum ortamında tutulmuştur. Daha sonra yüzeyleri parlatılan taban malzemeler üzerine bu karışımlar sürülerek numuneler hazırlanmıştır. Üçlü elektrot sistemiyle korozyon direnci ölçülen malzemelerin OCP, polarizasyon ve elektrokimyasal empedans değerleri incelenmiştir. İşlemsiz taban malzemeye göre epoksi reçineye ağırlıkça %2 MXene eklenerek hazırlanan karışımla oluşturulan numuneler korozyon oranı olarak 10 kat iyileşme göstermiştir (Yan et al. 2019).

Xue et al. 2021 yılında yaptıkları çalışmada bilim insanları, Ti₃AlC₂ tozlara HF ile seçici dağlama prosedürü uygulayarak Alüminyum yapıdan uzaklaştırmış ve MXene fazı olan Ti₃C₂ tozlar elde etmiştir. Bu işlemde ayrı olarak yuvarlak şekilli Kalay/Bakır/Gümüş tozlarını belirli oranlarda karıştırarak başka bir kompozit elde etmişlerdir. Daha sonra Ti₃C₂ tozlar ile Sn/Ag/Cu karışımını %5-%95 oranında karıştırmış ve homojen bir karışım elde etmişlerdir. CSS-42L çelik taban malzemelerin üst yüzeyleri tel elektrik deşarj yöntemi ile tekstür oluşturulmuş (Şekil 2.6) ve toz karışımının son hali bu tekstürlere vakum infiltrasyon yöntemiyle infiltre edilmiştir. İşlem

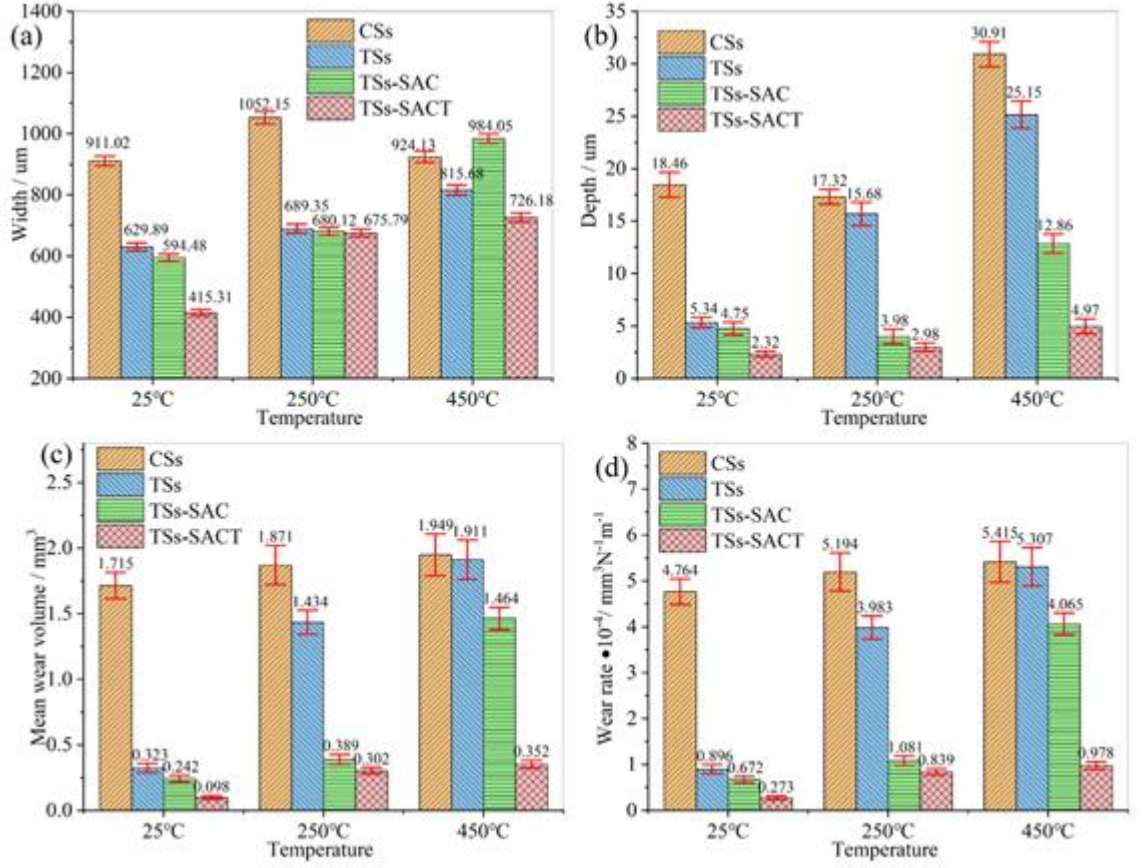
sırasında vakumun da etkisiyle tozların ergiyerek tekstürlerin dolması amaçlanmıştır. Oluşturulan bu numunelere düşük ve yüksek sıcaklık değerlerinde aşınma testi uygulanmıştır. Rapor edilen sonuçlara göre Ti_3C_2 MXene tozlar tüm sıcaklık değerlerinde sürtünme katsayısını ve aşınma oranını düşürmüştür (Şekil 2.7 ve Şekil 2.8) (Xue et al. 2021)



Şekil 2.6. CSS-42L taban malzemeye elektrik deşarj yöntemiyle açılan tekstürler (Xue et al. 2021).



Şekil 2.7. Oluşturulan CSS-42L+Kalay/Gümüş/Bakır kompozit malzemeye ait farklı sıcaklık değerlerinde uygulanan aşınma testi sürtünme katsayısı/zaman grafikleri (Xue et al. 2021).



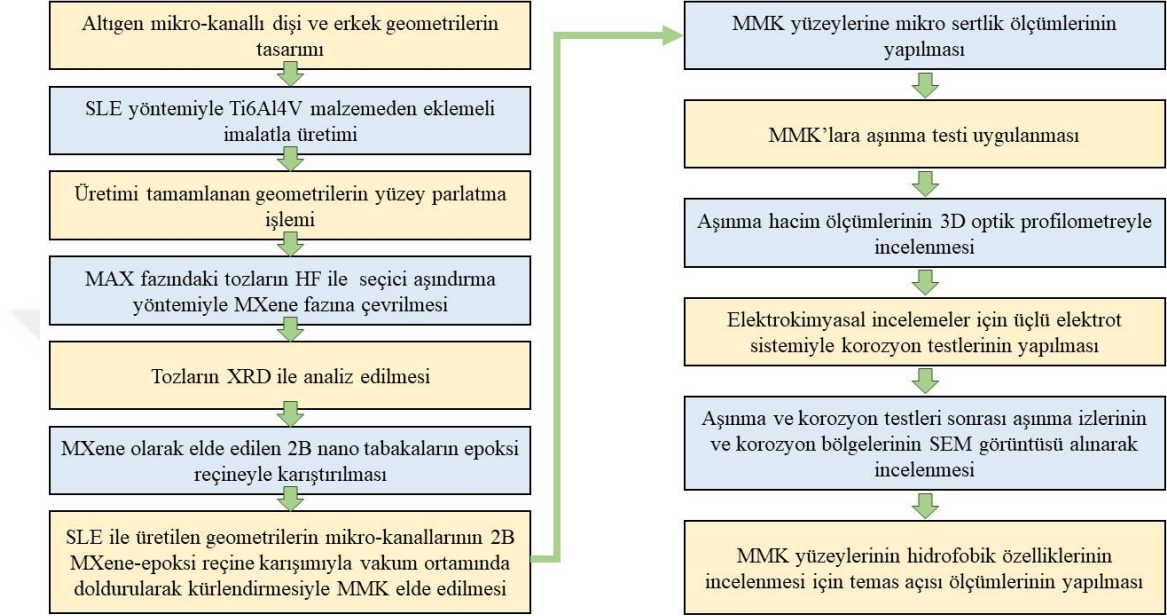
Şekil 2.8. Oluşturulan CSS-42L+Kalay/Gümüş/Bakır kompozit malzemeye ait farklı sıcaklık değerlerinde uygulanan aşınma testi sonucu aşınma verileri grafikleri (Xue et al. 2021).

Literatüre bakıldığında MXene'lerin tribolojik ve korozyon özellikleri ile ilgili çalışmalarda genellikle Ti_3C_2 kullanılmıştır. Fakat MXene'lerin onlarca farklı kombinasyonu bulunmaktadır. Literatürdeki bu açık hemen göze çarpmaktadır. Literatür özetlerine genel olarak bakıldığında özellikle sona verilen çalışmalarda MXene'ler epoksi reçine ve katı yağlayıcı diğer malzemeler ile birlikte kullanılarak kompozit malzeme üretimi şeklinde yapılmıştır (Yan et al. 2019, Guo et al. 2021, Xue et al. 2021) Fakat oluşturulan kompozit malzemelerin ana matrisinin üretimi birkaç farklı proses ile yapılmıştır. Örnek olarak Xue et al. 2021 yılında yayınladıkları makale incelendiğinde geleneksel yöntemle üretilen çelik malzemeler üzerine daha sonradan farklı tekniklerle tekstür açılmış ve bu da hem maliyeti hem de üretimi zorlaştırmıştır. Guo et al. 2020 yılında yayınladıkları makalede ise ana matris olarak epoksi reçinenin kendisi kullanıldığından mekanik dayanımı metal matrislere oranla düşük çıkmıştır. Ayrıca bu ekip de malzeme üretimi için birden çok proses kullanmıştır.

Dolayısı ile bu tez çalışmasında MXene'lerin yağlayıcı özellikte olması ve korozyona karşı dirençli olması gibi avantajları ve SLE yöntemiyle tek proseste istenilen geometrilerin üretilmesi avantajları bir araya getirilerek yeni nesil bir kompozit malzeme üretimi hedeflenmiştir. MXene malzeme olarak literatürdeki açığı kapatmak üzere Ti_3C_2 ile birlikte bundan farklı olarak Ta_4C_3 ve Mo_3C_2 gibi farklı tozlar da kullanılmıştır. Yeni nesil kompozit malzeme üretimi amacıyla CAD programında tasarlanan altıgen tekstürlü Ti6Al4V metal matrislere epoksi reçine ile belirli oranlarda karıştırılan üç farklı MXene toz, vakum ortamında emdirilmiş ve oluşturulan numunelere farklı ortam şartlarında aşınma testi uygulanmıştır. Ayrıca numunelerin korozyon özelliklerini incelemek amacıyla NaCl çözelti ortamında korozyon testleri de yapılmıştır. Bu yönleri ile yapılan tez çalışmasının literatürde özgün olduğu ve önemli katkılarının olduğu düşünülmektedir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu tezde yürütülen çalışmalara ait özet iş akış şeması Şekil 3.1’de kısaca verilmiştir.



Şekil 3.1. Tez için yürütülen çalışmaların iş akış şeması

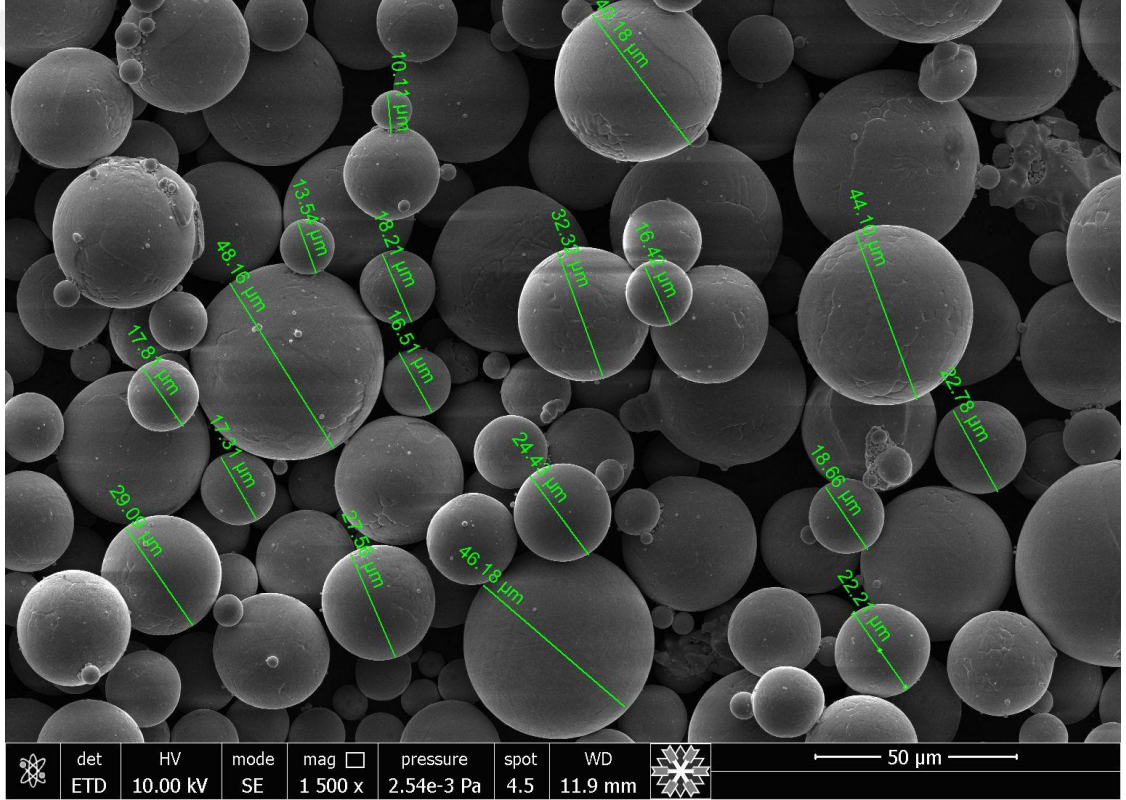
3.1. Kullanılan Materyaller

Tez çalışmasında SLE ile üretimi yapılan metal matris numuneler General Electric Firmasının markası olan Consept Laser’e ait CL 41 Ti-ELI (Ti6Al4V Grade 23) tozla üretilmiştir. Tozlar 10-45 µm arasında bir boyut dağılımına sahip küresel bir yapıdadır. Üretici kataloğundan alınan verilere göre toz içeriği Çizelge 3.1’de verilmiştir. Toz boyutlarını ve tozların küreselliğini gösteren taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüleri ise Şekil 3.2’de verilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Çizelge 3.1. Ti6Al4V (CL41 Ti-ELI) toz içeriği

Bileşen	Değerler (%)
Al	5,5 – 6,5
V	3,5 – 4,5
Fe	0 – 0,25
C	0 – 0,08
O	0 – 0,13
N	0 – 0,05
H	0 – 0,012
Ti	Salt çoğunluk

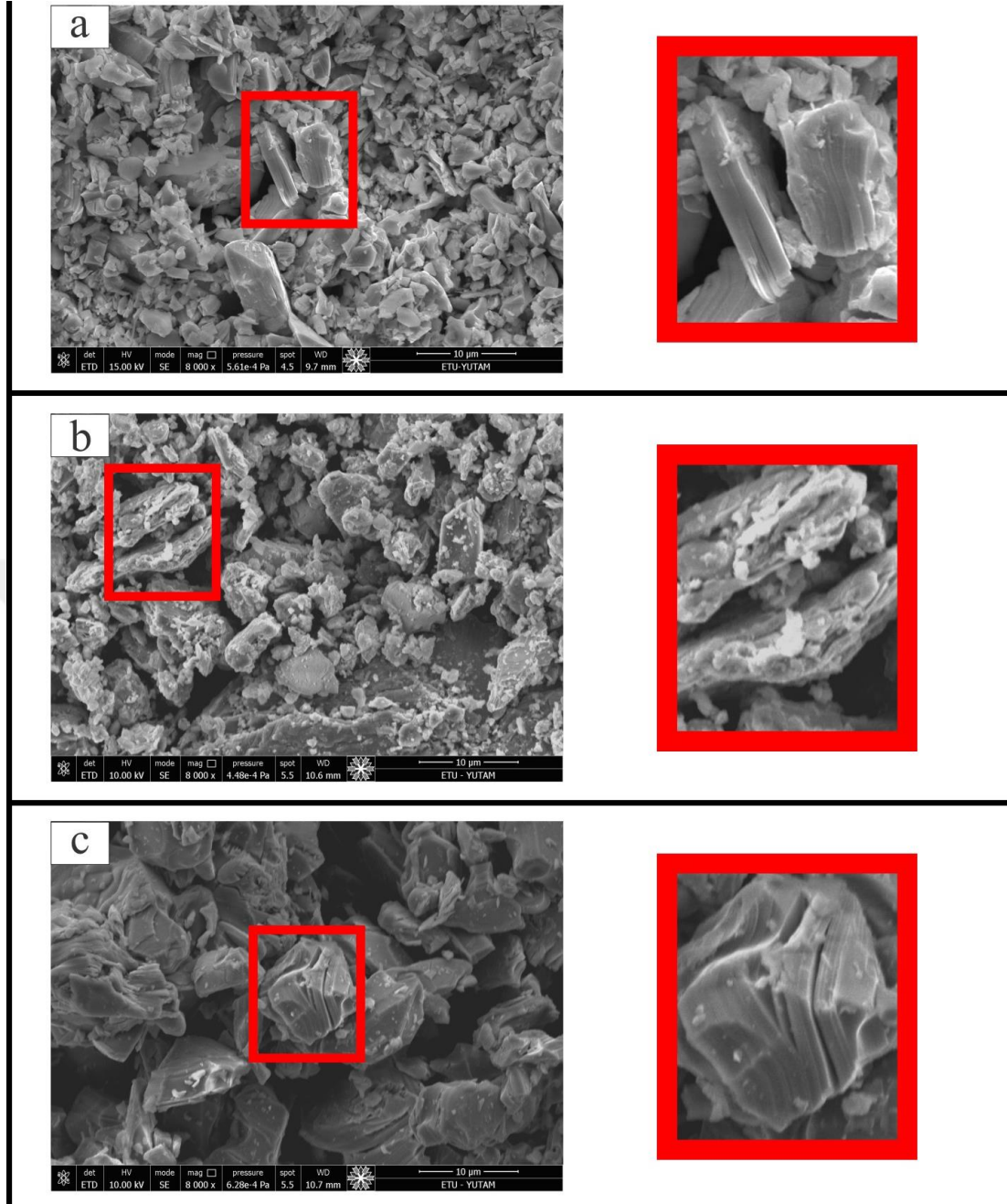


Şekil 3.2. Ti6Al4V tozlara ait SEM görüntüsü

Tezde kullanılan Mo_3AlC_2 , Ta_4AlC_3 ve Ti_3AlC_2 MAX fazlı tozlar, Kanada menşei Nanochemazone firmasından satın alınmıştır. Tozlara ait özellikler üretici kataloğuna göre Çizelge 3.2’de verilmiştir. MAX tozlarının morfolojisini gösteren SEM görüntüsü ise Şekil 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.2. MAX tozlarına ait özellikler (Üretici kataloğuna göre)

Malzeme	Toz Boyutu (μ)	Saflık (%)
Mo_3AlC_2	4-11	>99
Ta_4AlC_3	7-14	>99
Ti_3AlC_2	2-5	>99



Şekil 3.3. MAX fazlı tozların SEM görüntüleri; (a)Mo₃AlC₂, (b)Ta₄AlC₃, (c)Ti₃AlC₂

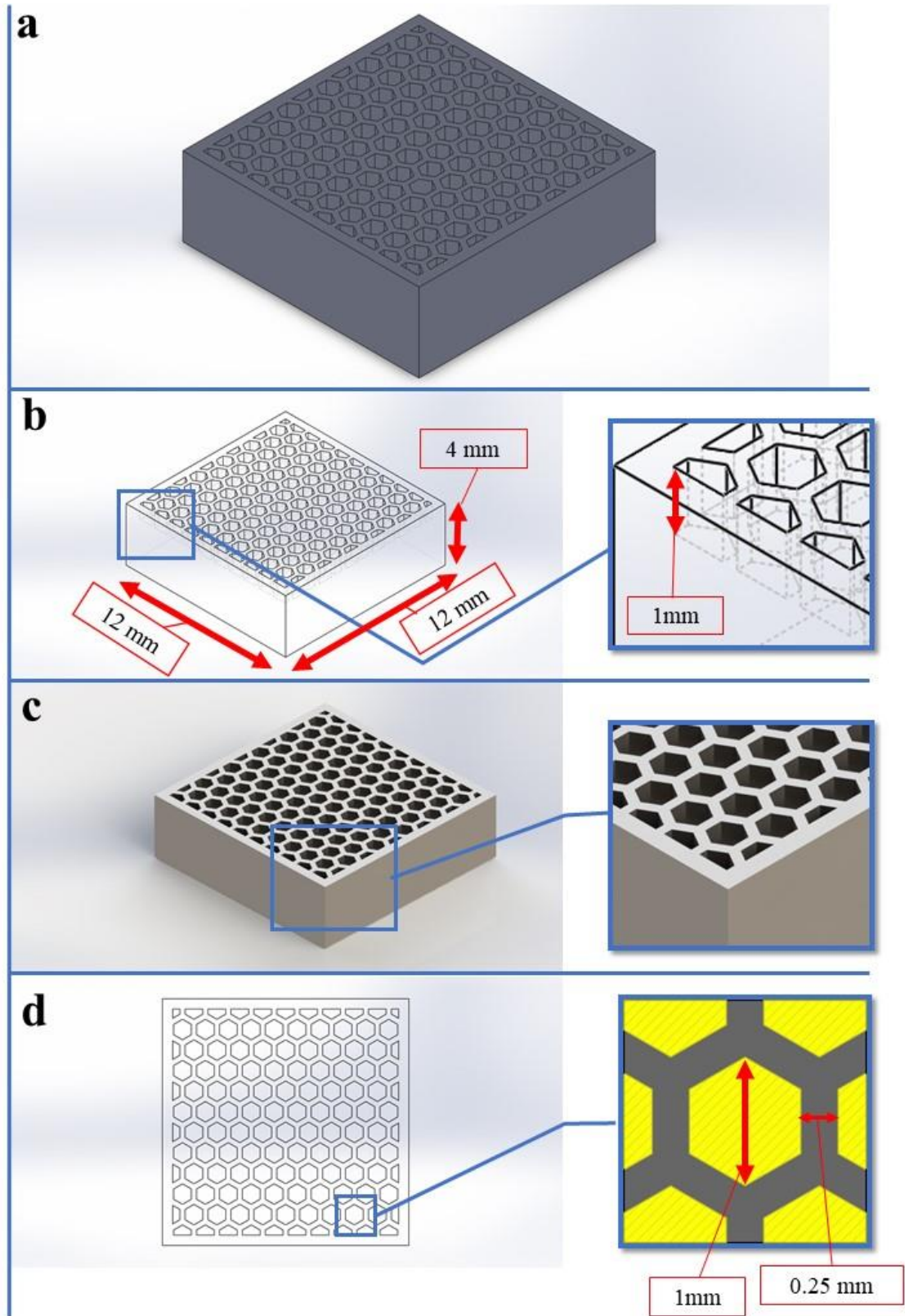
Bu çalışmada kullanılan epoksi reçine ve sertleştirici Duratek firmasından satın alınmıştır. Epoksi reçine modeli DTE 1200 ve sertleştirici modeli DTS 2110'dur. Tezde kullanılan karışım, üreticinin tavsiye ettiği şekilde ağırlıkça 5:1 (Reçine:Sertleştirici) oranında hazırlanmıştır. Epoksi karışımına ait tüketici kataloğundan alınan özellikler Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Epoksi karışımına ait özellikler (Üretici kataloğuna göre)

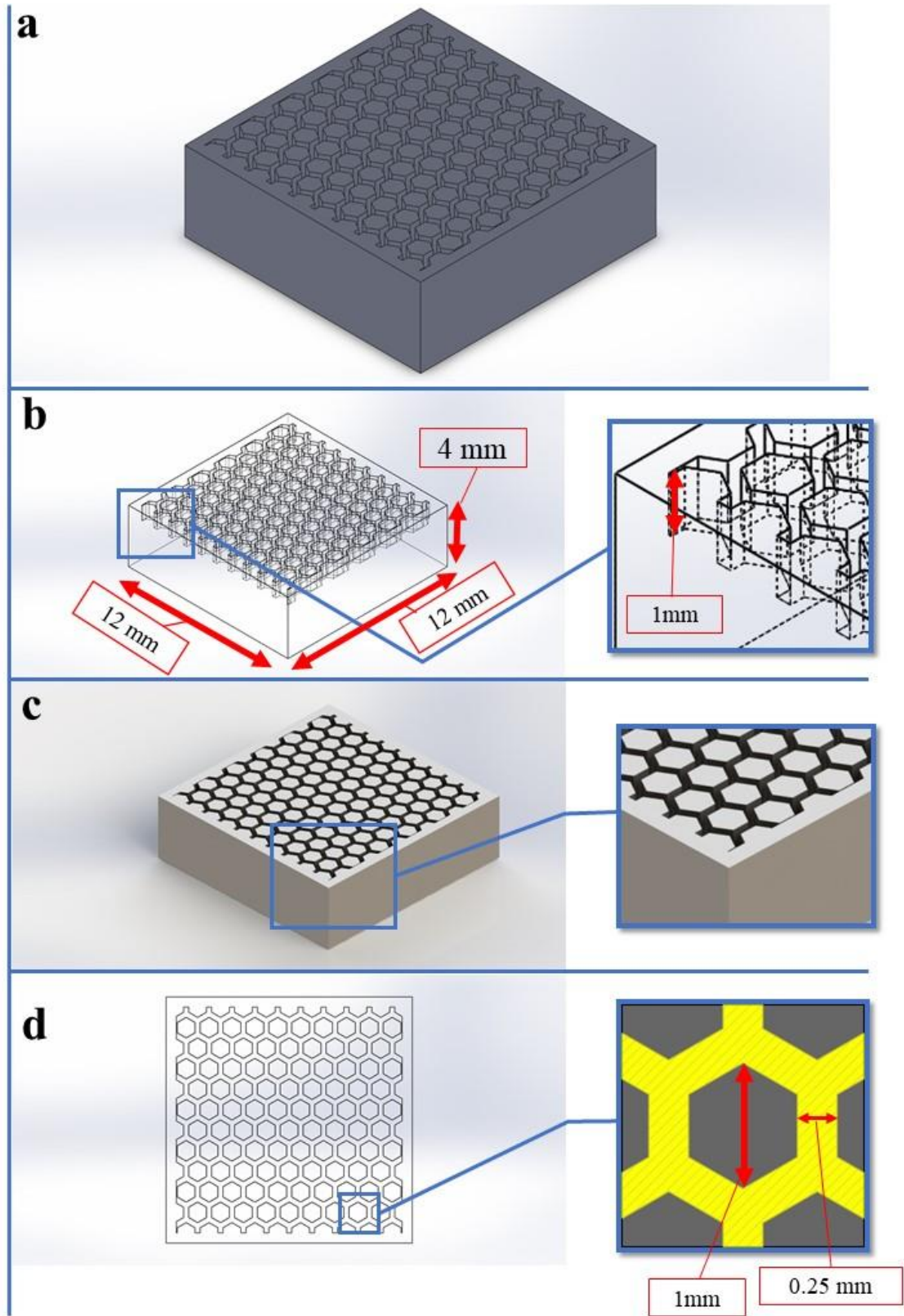
<i>Epoksi karışımı (DTE 1200 + DTS 2110) / Kurlendirme: 50°C'de 16 saat</i>		
Özellik	Birim	Değer
Viskozite	mPas	300±50
Yoğunluk	Kg/lt	1,10±0,05
Çekme mukavemeti	MPa	78-83
Elastisite modülü	MPa	3000-3300
Maksimum çekme uzaması	%	4,5-5

3.2. Metal Matris Tasarımı ve SLE ile Üretimi

Tez çalışmasında, geometrik tasarımlar SolidWorks 2019 CAD yazılımı ile altıgen bal peteği tekstürlü olarak tasarlanmıştır. Tekstürlü üretimdeki amaç sürtünme sırasında karşıt yüzeylerin temas alanını düşürmektir. Ayrıca tekstür geometrisi boyunca oluşturulan mikro kanallar sayesinde metal matrisin ağırlığı azaltılarak, MMK'nın havacılık ve uzay endüstrisinde arzu edilen hafifliğe ulaşması hedeflenmiştir. Tasarımlar erkek ve dişi şeklinde adlandırılan iki farklı katı modelde yapılmıştır. Erkek numune ve dişi numune birbirinin tam anlamıyla tersidir. Erkek numunede metal (Ti6Al4V) olan kısımlar, dişi numunede boşluk iken dişi numunede metal olan kısımlar erkek numunede boşluktur. Tasarımların birbirine zıt yapılmasının sebebi geometri farkının aşınma ve korozyon davranışlarına olan etkisini göz önünde bulundurmak ve bu sayede MXene-reçine kompozisyonunun olumlu veya olumsuz sonuçlarını tam anlamıyla ortaya koymaktır. Dişi ve erkek numuneye ait tasarım görüntüleri sırasıyla Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Dişi numuneye ait tasarım görüntüleri; (a)Katı model izometrik görüntü, (b)Kafes izometrik görüntü, (c)Render izometrik görüntüsü, (d)Kafes üstten görünüm.



Şekil 3.5. Erkek numuneye ait tasarım görüntüleri; (a)Katı model izometrik görüntü, (b)Kafes izometrik görüntü, (c)Render izometrik görüntüsü, (d)Kafes üstten görünüm.

Şekil 3.5'te de görüldüğü gibi numune boyutları 12x12x4 mm'dir. Her iki tasarım için de altıgen geometrilerin uzak köşeleri arası mesafe 1 mm, iki altıgen arasında kalan kısım ise 0,25mm'dir. Tekstürlerin derinlikleri ise 1 mm'dir. Bu tasarımlarla birlikte dişi tasarımın boşluk hacmi 0,07061 ml iken erkek numunelerde bu değer 0,05039 ml'dir. Bu boşluklar ilerleyen bölümde detaylandırılarak anlatılacak işlemlerle MXene-reçine kompozisyonuyla doldurularak MMK elde edilecektir.

Tasarım işlemi tamamlanan katı geometrilerin üretimi Erzurum Teknik Üniversitesi (ETÜ) Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (YÜTAM) bulunan General Electric Firmasının bir markası olan Consept Laser'e ait MLab Cusing R modeli cihaz ile yapılmıştır. Cihazda 100 Watt(W) gücünde Neodyum emdirilmiş İttriyum Alüminyum Garnet (Nd:YAG) lazer sistemi bulunmaktadır. Cihazın üretim kapasitesi 80x80x90 mm'lik bir hacim büyüklüğündedir. Üretim sırasında toz malzemenin oksijen ilgisinden doğabilecek olumsuzlukların azaltılması için metal matrisin üretimi Argon (Ar) gazı atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Cihaza ait görsel Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. Seçici Lazer Ergitme Cihazı (Consept Laser MLab Cusing R)

Eklemeli imalat cihazları genellikle .STL uzantılı katı model dosyasını direkt olarak kullanamaz. Daha öncesinde destek elemanları atma, belirli parametreleri belirleme ve üretim yönünü seçme gibi bazı ön işlemler için ara programlara ihtiyaç duyulur. Bu çalışmada da SolidWorks 2019 CAD yazılımıyla tasarımı yapılan katı metal matris katı modelinin STL uzantılı dosyası AutoFab programı ile üretime hazırlanmıştır. AutoFab’de ilk önce yüzey ve kontur hatalarının giderilmesi sağlanmıştır. Daha sonra numuneler üretim platformu ile paralel olacak şekilde yerleştirilmiş ve platform ile temas eden yüzeylerine destek elemanları atılmıştır. Katman kalınlığı ve tarama şekli de ayarlandıktan sonra Consept Laser MLab R cihazının üretim formatı olan CLS dosyası elde edilerek dosya SLE cihazına gönderilmiş ve üretim yapılmıştır. Üretimde kullanılan parametreler Çizelge 3.4’te, ve üretim yönünü gösteren görsel, Şekil 3.7’de üretimi tamamlanan numunelere ait görsel Şekil 3.8’de verilmiştir.

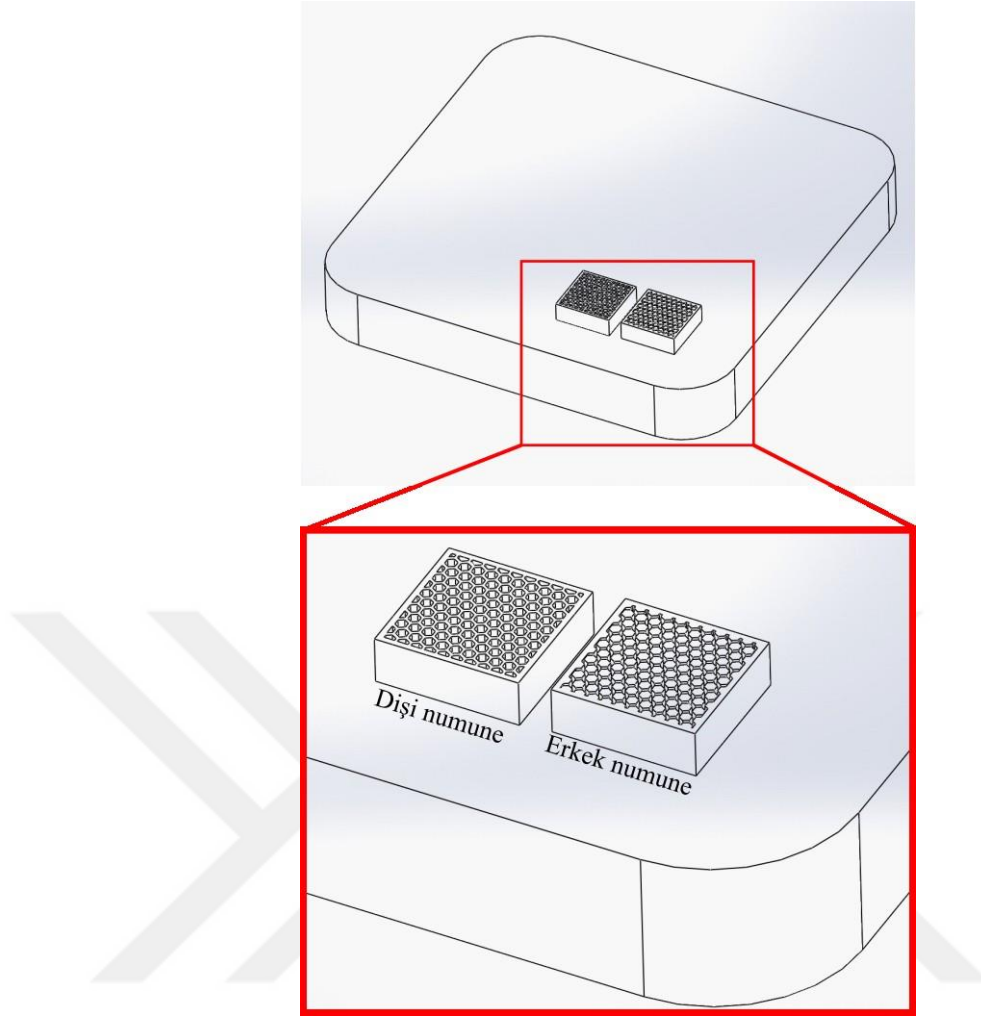
Çizelge 3.4. SLE üretim parametreleri

Lazer Gücü (W)	Tarama hızı (mm/sn)	Katman Kalınlığı(mm)	Yana kayma(mm)
100	1000	0,025	0,050

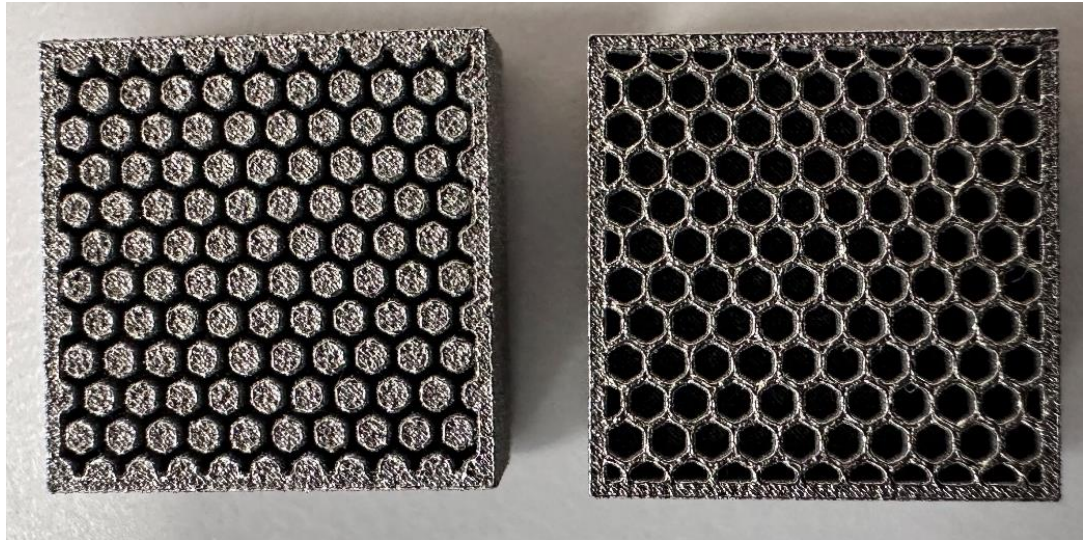
SLE ile üretimde enerji yoğunluğu aşağıda verilen enerji yoğunluğu formülüne göre denklem (3.1) hesaplanmıştır.

$$E = P / (v * h * t) \quad (3.1)$$

Burada; “E” enerji yoğunluğunu (J/mm^3), “P” lazer gücünü(W), “v” tarama hızını(mm), “h” yana kayma mesafesini (mm) ve “t” katman kalınlığını (mm) temsil etmektedir. Dolayısıyla bu çalışmada SLE üretiminde kullanılan lazerin enerji yoğunluğu $80 J/mm^3$ ’tür.



Şekil 3.7. Üretim yönünü gösteren görsel



Şekil 3.8. Üretimi tamamlanan erkek ve dişi metal matrisli numuneler

Üretilen numunelere daha sonra 80, 240, 400, 800, 1200 ve 1500 numaralı sulu zımpara ile yüzey parlatma işlemi uygulanmıştır. Ardından numunelerin tekstrülerinin içerisinde bulunan atık tozlardan ve zımpara işlemi sonrasında zımpara kağıdından transfer olan SiC partiküllerinden arındırılmak üzere ultrasonik banyoda etanol içerisinde 10 dk tutularak basınçlı hava ile iyice kurutulmuştur.

3.3. MAX Yapısının Seçici Dağlama İle MXene Yapısına Dönüştürülmesi

Hazır satın alınan MAX yapıdaki tozlar tezde oluşturulan MMK yapılarda kullanılmak üzere MXene tabakalarına dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm her üç malzeme için de aynı miktarda ve aynı yöntemle yapılmıştır.

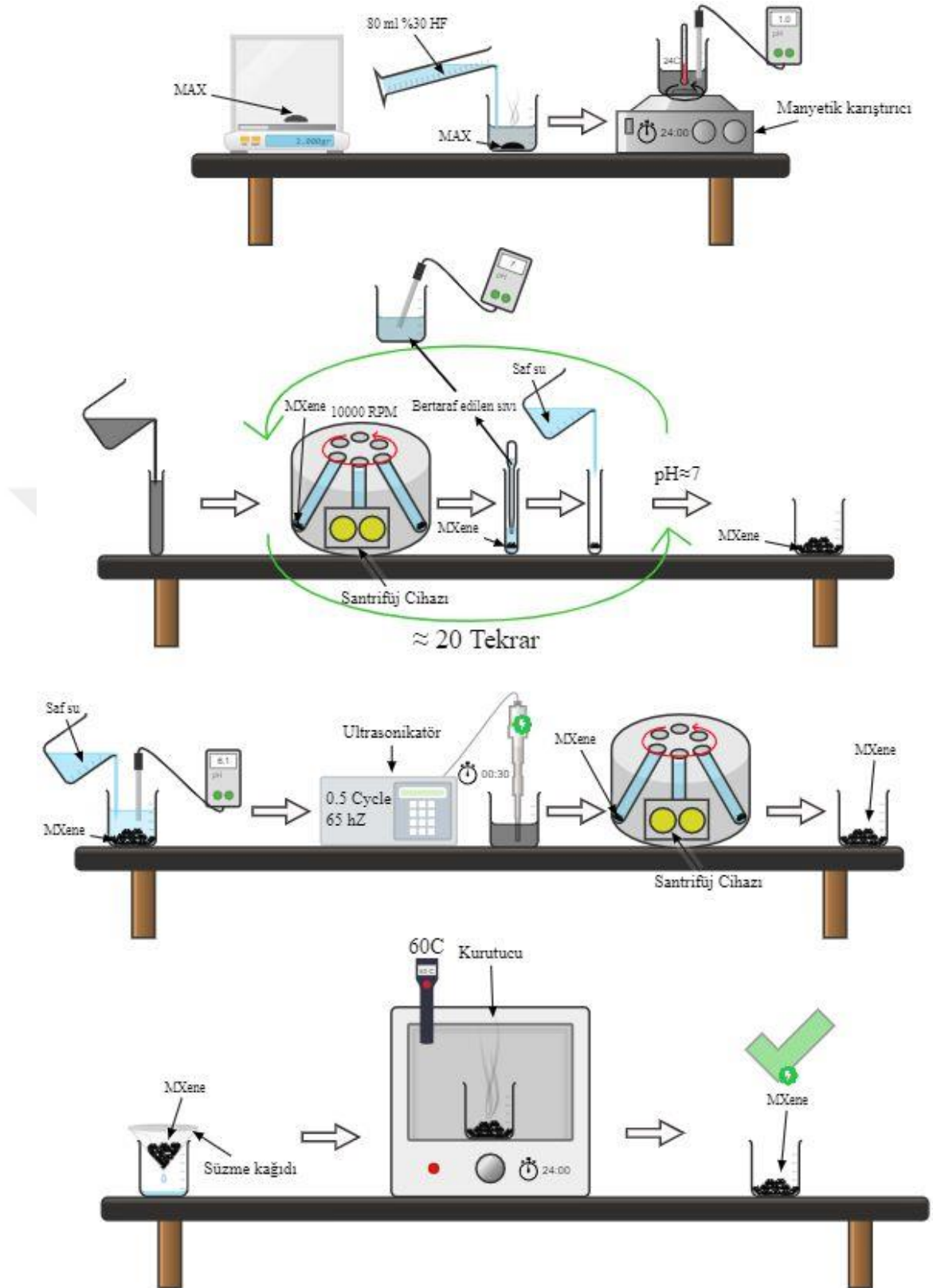
Seçici dağlama için kullanılacak olan %30 derişimli HF hazırlanmak üzere plastik pipetle %40'lık HF'den 50 ml alınarak plastik bir kaba aktarılmıştır. Çözeltinin üzerine 30 ml saf su eklenmiş ve homojenlik sağlanana kadar manyetik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Bu işlemden sonra dönüşüm için 2 gr MAX toz hassas terazi ile tartılmıştır. Tartım işlemi yapılan MAX tozlar dikkatlice %30'luk HF çözeltisine eklenerek manyetik karıştırıcıda oda sıcaklığında bir gün süreyle karıştırılmıştır. Ertesi gün yıkama işlemine geçilmiştir. Yıkama işlemi saf su ile yapılmıştır. Süspansiyon çözeltinin sıvı fazının bertarafı için Hettich Universal 320 R marka ve modelli masaüstü santrifüj cihazı kullanılmıştır.

Yıkama işlemine geçildiğinde süspansiyon çözelti falkon tüplere aktarılmış ve 10.000 rpm dönme hızında 5 dk süreyle santrifüj işlemi yapılmıştır. Tüpün alt kısmına çöken toz malzemeye dokunulmadan sıvı kısım basit bir pipetle çekilmiş ve çekilen sıvı kadar tüpe saf su ilave edilmiştir. Çözelti el ile iyice çalkalandıktan sonra tekrar santrifüj edilmiş ve yine sıvı kısım bertaraf edilmiştir. Bu işlem, bertaraf edilen sıvının pH değeri 7'ye yaklaşıncaya kadar yaklaşık 20 kere devam ettirilmiştir. Son adımda üzerine tekrar saf su ilave edilen çözelti, MXene tabakalarının arası iyice açılması amaçlanarak sonikasyon işlemine tabi tutulmuştur. Ultrasonikasyon için kullanılan cihaz Hielscher firmasına ait UP400S modelli cihazdır. Sonikasyon işlemi 0,5 cycle, 65 Hz parametreleriyle 30 dk süreyle yapılmıştır.

Sonikasyon işlemi tamamlanan çözelti tekrar santrifüj edilerek sıvı kısım ayrıldıktan sonra kalan 2B MXene tabakaları süzme kâğıdı yardımıyla süzülerek tam kuruma için kurutucu etüvde 60°C sıcaklıkta bir gün süreyle kurutulmuştur. Böylece MAX fazının MXene fazına dönüşüm işlemi tamamlanmıştır. Sürece ait işlem basamaklarını gösteren şematik görsel Şekil 3.9’da verilmiştir.



3. MATERYAL ve YÖNTEM

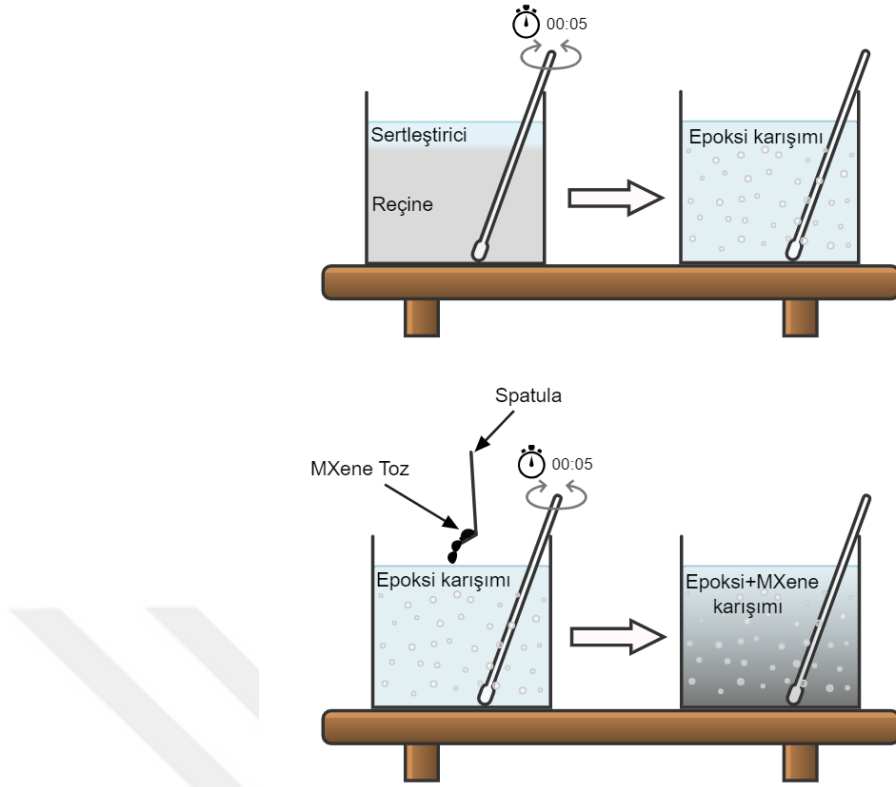


Şekil 3.9. MAX fazının MXene fazına dönüştürülmesinin şematik görseli

3.4. Epoksi Sistemi Karışımının ve MXene-Epoksi Sistemi Karışımının Hazırlanması İşlemleri

Tez kapsamında MXene tozlarla karıştırılmak suretiyle kullanılan epoksi reçine, üretici firma epoksi hazırlama kullanım talimatlarına uygun oranlarda hazırlanmıştır. Bunun için genişçe metal bir kap içine ağırlıkça 4 birim reçineye karşılık, ağırlıkça 1 birim sertleştirici sıvı eklenerek plastik spatula vasıtasıyla el ile hava kabarcığı oluşturulmayacak şekilde yavaşça 5 dk cam baget ile el yordamıyla karıştırılmıştır. Böylece epoksi sistemi MXene ile karıştırmak için hazır hale getirilmiştir. Bu karışımdan ayrı ayrı üç adet hazırlanmıştır. Karışım işleminden sonra karışımların üçünde de az da olsa kabarcık oluşumu görülmüştür.

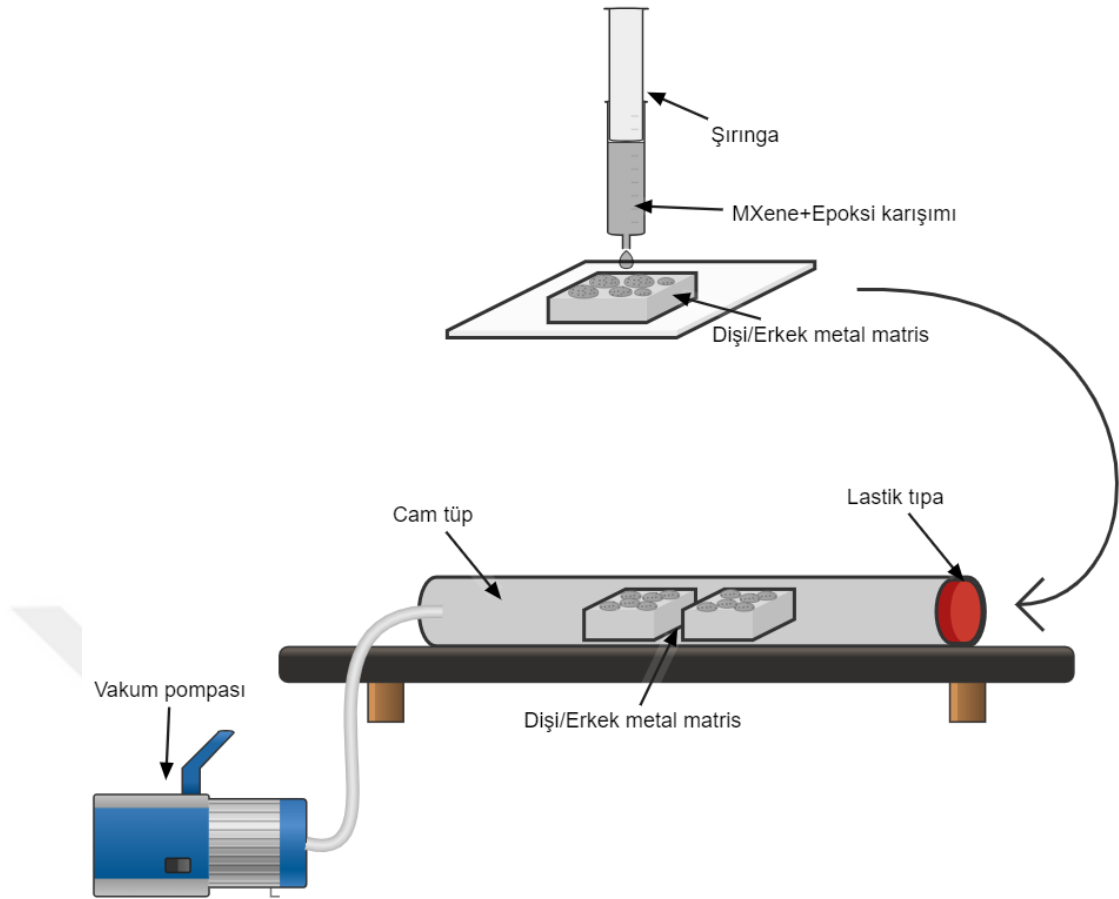
Epoksi karışımının bir bölümü MXene eklenmeden saf epoksili MMK üretimi için ayrıldıktan sonra Bölüm 3.3'te anlatıldığı gibi hazırlanan MXene tozların her üçü de ayrı ayrı aynı oranda epoksi ile karıştırılmıştır. Bunun için, geniş metal kaplar içerisinde hazır olan epoksi sistemlerine spatula yardımıyla her üç toz da ayrı ayrı olmak üzere ağırlıkça 3 birim epoksi sistemi için ağırlıkça 1 birim MXene toz eklenerek tüm karışımlar 5 dakika daha karıştırılmıştır. Böylece epoksi+MXene karışımı, Ti6Al4V metal matrislerine vakumda emdirme için hazırlanmıştır. Hazırlık aşamalarını gösteren şematik görsel Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. MXene-epoksi sisteminin hazırlık aşamaları

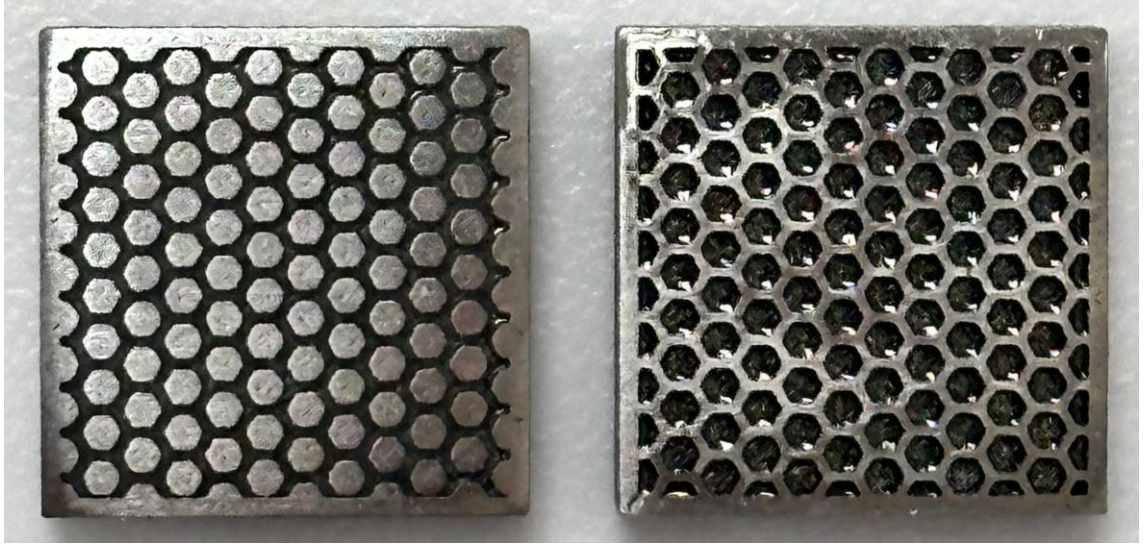
3.5. Metal Matrise MXene-Epoksi Sisteminin İnfiltrasyonu ve Kürlendirme İşlemi

Önceki bölümlerde anlatıldığı gibi hazırlanan MXene-epoksi karışımı şırıngaya transfer edilerek homojen bir şekilde tüm yüzeye damlatılmıştır. Daha sonra boşlukların tam olarak dolması amaçlanarak numuneler vakum sistemine yerleştirilmiştir. Vakum sistemi, bir adet vakum pompası ve bir adet iki tarafı açık cam tüpten oluşmaktadır. Cam tüpün bir tarafı vakum hortumuyla vakum pompasına bağlanmış, diğer ucu ise numuneler tüpün içine yerleştirildikten sonra lastik bir tıpa yardımıyla kapatılmıştır. Vakum pompası çalıştırıldıktan sonra vanası açılarak tüp vakuma alınmış böylece metal matrisin boşluklarından hava çıkışı gözlemlenmiştir. Hava çıkışı bittiğinde vakum kırılarak şırıngayla tekrar yüzeye karışım damlatılmış ve tekrar sistem vakuma alınmıştır. Bu işlem hava çıkışı tamamen bitene kadar devam ettirilmiştir. Son adımda ise yüzeylere son kez damlatılan karışım, plastik keskin bir spatula ile tüm yüzeye sıvanmış ve numune yüzeylerinin homojenliği sağlanmıştır. Aynı işlemler saf epoksi için de yapılmıştır. Böylece tüm numuneler kürlendirme prosesine hazırlanmıştır. Vakum sistemiyle infiltrasyon işlemine ait şematik görsel Şekil 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.11. MXene-epoksi karışımının metal matrislere infiltrasyon işlemi

İnfiltrasyon işlemi yapılan numunelerin MXene-epoksi karışımlarının kürlendirilmesi işlemi, epoksi üreticisi Duratek firmasının önerdiği parametreler kullanılarak yapılmıştır. Buna göre infiltre edilen 45'er dişi ve erkek numune etüve konularak 50°C'de 16 saat tutulmuştur. Böylece MMK üretim prosesleri tamamlanmıştır. Tamamlanan MMK'lara ait görsel Şekil 3.12'de verilmiştir.



Şekil 3.12. İnfiltrasyon işlemi tamamlanan erkek ve dişi numuneler

3.6. Faz Analizleri ve Yapısal Karakterizasyonlar

Bu çalışmada kullanılan malzemelerin ve bu malzemelerle üretilen MMK'ların faz ve yapısal karakterizasyon ölçümleri XRD (X-ışını kırınım difraktometresi), SEM (Taramalı elektron mikroskobu), mikrosertlik, temas açısı ölçüm cihazı ve 3B profilometre ile yapılmıştır.

3.6.1. XRD analizleri

MAX fazlı tozların ve sonrasında bunlardan seçici dağlama yöntemiyle elde edilen 2B MXene malzemenin faz analizleri ETÜ YÜTAM bünyesinde bulunan GNR Explorer X-Ray Difraksiyon cihazı ile 1.5405 Å dalga boylu Cu-K α anot X ışın kaynağı ile yapılmıştır. Ölçümler toz numunelerden alınmış olup elde edilen veriler JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standarts) kartları ile analiz edilmiştir.

3.6.2. SEM analizleri

Çalışmada kullanılan MAX ve MXene'lerin, Ti6Al4V tozların ve bu toz ile SLE cihazında üretilen metal matrislerin ve epoksi-MXene karışımı ile Ti6Al4V metal matrisle üretilen MMK'ların yüzey ve kesit görüntüleri ETÜ YÜTAM'da bulunan FEI marka Quanta FEG-250 model SEM cihazı ile alınmıştır.

3.6.3. Mikro sertlik analizleri

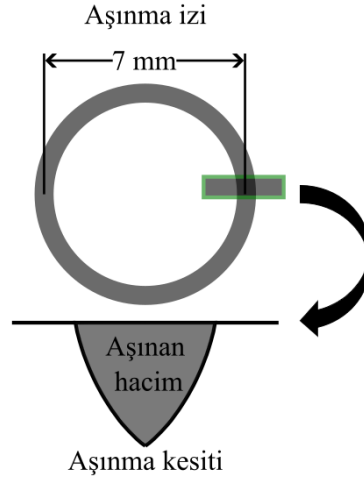
MMK'lara ait yüzey sertlikleri, ETÜ Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi bünyesinde bulunan Shimadzu HVM-G20 marka ve modelli mikro sertlik cihazında ölçülmüştür. Ölçümler Vickers yöntemi kullanılarak 100 gram yük altında 15 saniye beklemek suretiyle numune yüzeyinin hem metal kısmından hem de epoksi takviye elemanı kısmından 10'ar ölçüm yapılarak tamamlanmıştır.

3.6.4. Temas açısı analizleri

Tezde üretilen MMK yüzeylerinin hidrofilik, hidrofobik özellikleri Atatürk Üniversitesi DAYTAM bünyesinde bulunan Biolin Scientific markalı Atension Theta Flex modelli temas açısı ölçüm cihazıyla yapılmıştır. Ölçümler oda sıcaklığında 10 saniyelik sürede 5 µl %3,5'lik NaCl çözelti damlacıklarıyla yapılmıştır.

3.6.5. 3B yüzey profilometre analizleri

MMK'ların üretimi sonrası yüzey pürüzlülük değerleri ve aşınma testleri sonrası aşınma hacmi ölçümleri için ETÜ YÜTAM'da bulunan Bruker marka Contour GT 3B profilometre cihazı kullanılmıştır. Aşınma hacmi hesabı, aşınma izinin çevresi ile bu izin kesit bölgesinin aşınma alanı çarpılarak yapılmıştır (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Aşınma hacmi hesabı şematik görseli

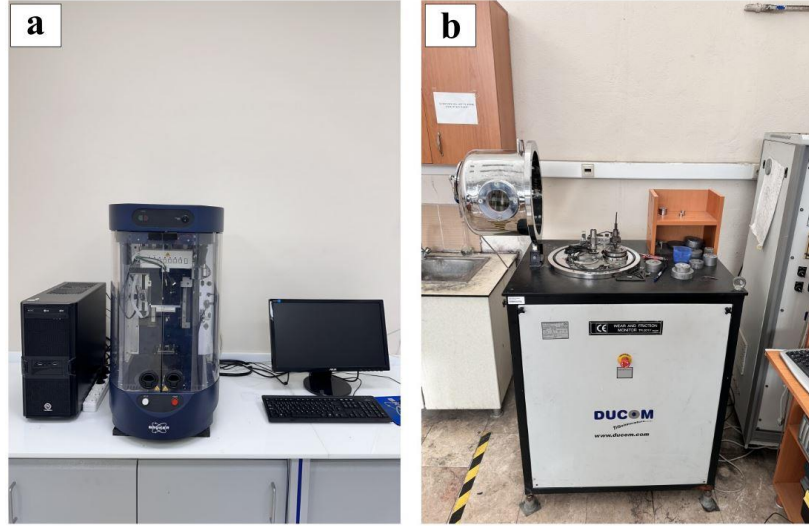
3.7. Triboloji Deneyleri

Bu çalışmada yürütülen triboloji deneyleri; kuru ortamda, %3,5'lik NaCl çözeltisi içerisinde, sıvı azot (LN₂) ortamında ve iki farklı vakum ortamında yapılmıştır. Vakum şartları haricinde tüm ortamlarda yapılan testler ETÜ YÜTAM'da bulunan Bruker UMT tribometre cihazıyla yapılmıştır. Vakum ortamında yapılan testler ise Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümü laboratuvarında bulunan Ducom TR-201V tribometre cihazıyla yapılmıştır. Tüm şartlarda yapılan testler pin-on disk yöntemiyle yapılmış olup, karşıt malzeme olarak Al₂O₃'ten imal edilmiş 6 mm çapındaki seramik bilyeler kullanılmıştır. Cihazlardan sürtünme katsayısına karşılık zaman verileri alınmıştır. Numunelerde meydana gelen aşınma oranı aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır (Denklem 3.2).

$$k = \frac{Q}{W.L} \quad (3.2)$$

Burada “Q” kaybedilen toplam malzeme hacmini (mm³), “L” test boyunca kayma mesafesini (m), ve “W” uygulanan normal yükü (N) temsil etmektedir. “k” değer ise aşınma oranını (mm³/Nm) ifade etmektedir.

Testlerin yapıldığı cihazlara ait görseller Şekil 3.14'te, triboloji testlerinde kullanılan parametreler ise Çizelge 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.14. Tribometrelere ait görseller; (a)Bruker UMT, (b)Ducom TR-201

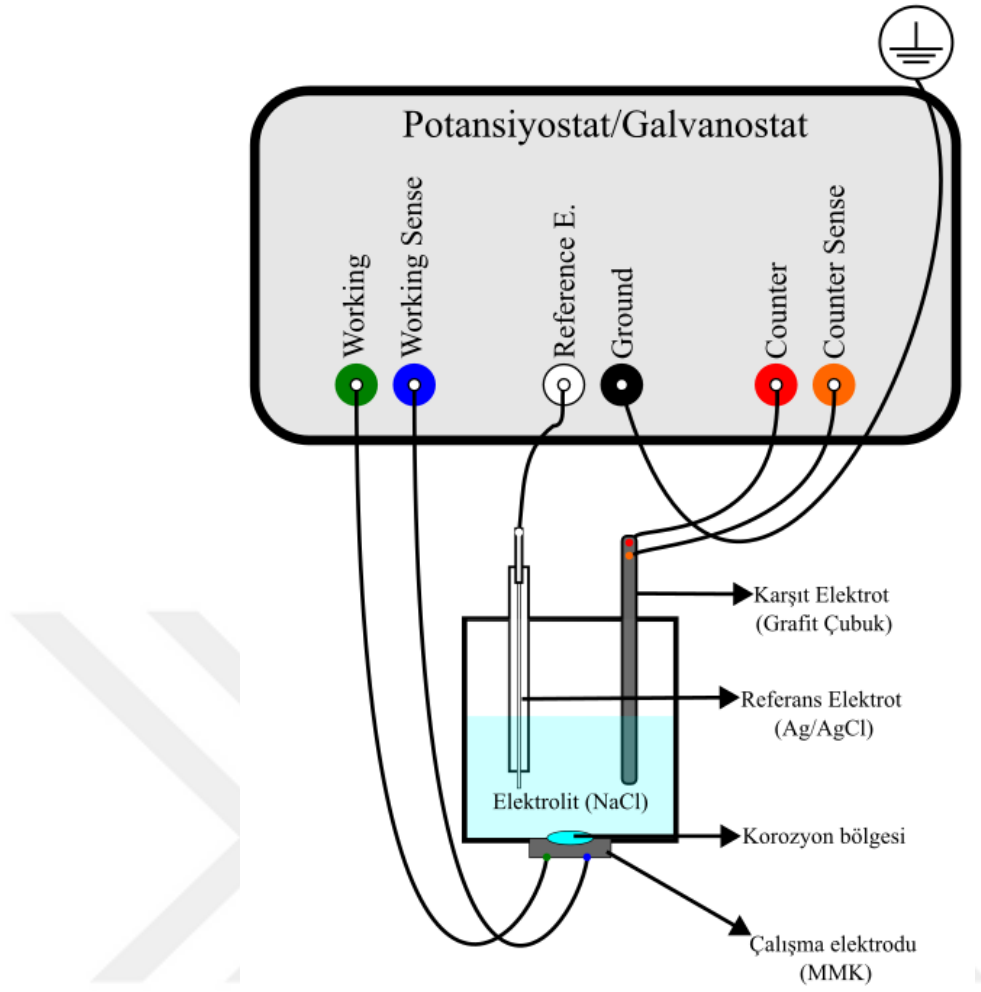
Çizelge 3.5. Triboloji test parametreleri

Ortam	Deney şartları	Değer
Kuru	Uygulanan yük	10 N
	Aşınma izi çapı	7 mm
	Aşınma hızı	200 rpm
	Aşınma mesafesi	65 m
	Sıcaklık değeri	23±2 °C
	Basınç değeri	1 atm
NaCl	Uygulanan yük	10 N
	Aşınma izi çapı	7 mm
	Aşınma hızı	200 rpm
	Aşınma mesafesi	65 m
	Sıcaklık değeri	23±2 °C
	Basınç değeri	1 atm
LN ₂	Uygulanan yük	10 N
	Aşınma izi çapı	7 mm
	Aşınma hızı	200 rpm
	Aşınma mesafesi	65 m
	Sıcaklık değeri	-190±10 °C
	Basınç değeri	1 atm
Düşük vakum	Uygulanan yük	10 N
	Aşınma izi çapı	7 mm
	Aşınma hızı	200 rpm
	Aşınma mesafesi	65 m
	Sıcaklık değeri	23±2 °C
	Basınç değeri	5x10 ⁻² mbar
Yüksek vakum	Uygulanan yük	10 N
	Aşınma izi çapı	7 mm
	Aşınma hızı	200 rpm
	Aşınma mesafesi	65 m
	Sıcaklık değeri	23±2 °C
	Basınç değeri	1x10 ⁻⁵ mbar

3.8. Korozyon Deneyleri

Bu tez kapsamında üretilen MMK'ların elektrokimyasal davranışlarının incelenmesi için açık devre potansiyeli (OCP), çevrimsel polarizasyon taraması ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi deneyleri yapılmıştır. Deneyler Gamry Interface 1010E marka ve modelli potansiyostat/galvanostat cihazı kullanılmıştır.

Deney sisteminde üçlü elektrot deney düzeneği kurulmuştur. Sistemde elektrolit olarak %3,5'lik NaCl çözeltisi, çalışma elektrodu olarak MMK numuneler, karşıt elektrot olarak grafit çubuk ve referans elektrot olarak Ag/AgCl elektrot kullanılmıştır (Şekil 3.15). Deneylerin gerçekleştirildiği sistemde korozyon bölgesi yüzey alanı 0,502 cm²'dir. OCP ölçümleri için gerekli süre 15.000 saniye olarak belirlenmiştir. Elektrokimyasal empedans spektroskopi ölçümleri için başlangıç frekansı 100 kHz, bitiş frekansı ise 0,01 Hz olacak şekilde ayarlanmıştır. Çevrimsel polarizasyon ölçümleri için ise başlangıç empedans değeri -0,8 V'dir. Tüm deneyler aynı elektrolit içerisinde yapılmıştır.

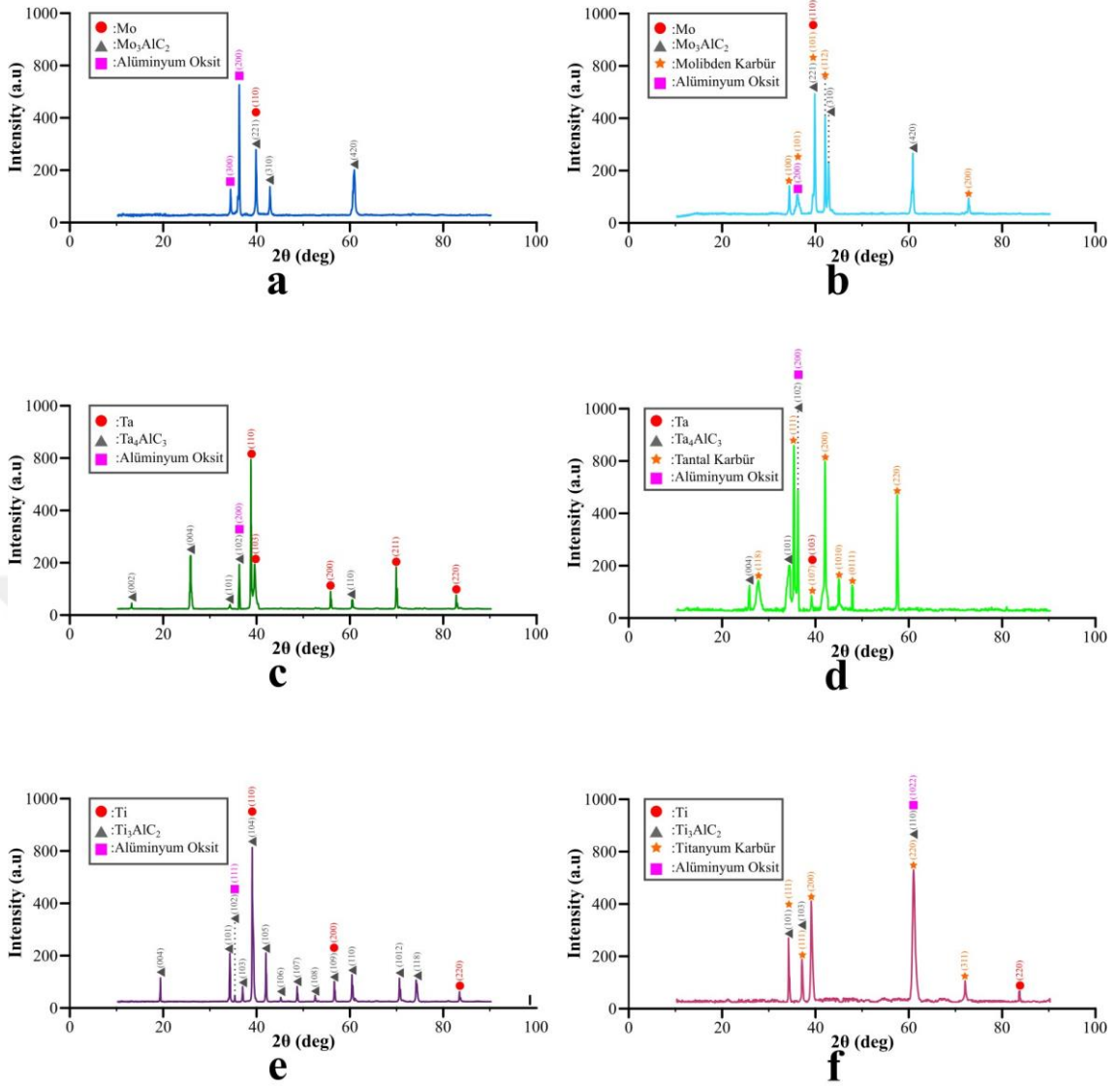


Şekil 3.15. Üçlü elektrot deney düzeneği şematik görünümü

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. MAX ve MXene Tozların XRD Analizleri

Bu tezde kullanılmak üzere hem hazır satın alınan MAX fazlı tozlara hem de bu tozların modifikasyonu ile elde edilen 2B MXene tozlara XRD faz analizi yapılmıştır. Yapılan analizlere ait grafik Şekil 4.1’de verilmiştir. Grafikte; Şekil 4.1a, Şekil 4.1c ve Şekil 4.1e sırasıyla MAX fazlı Mo_3AlC_2 , Ta_4AlC_3 ve Ti_3AlC_2 ’yi göstermektedir. Bunlar incelendiğinde her üç MAX tozun da içerisinde kristal yapıda metal elementlerin bulunduğu görülmektedir. Bu durumun MAX tozların sitokiyometrik olarak istenilen formüle göre uygun oranlarda karıştırılarak daha sonra yüksek sıcaklıkta sinterlenmek suretiyle katı hal reaksiyonu yöntemiyle üretilmesinin bir sonucu olduğu düşünülmektedir. Katı hal yöntemiyle MAX tozu üretiminde kullanılan malzemelerin (Geçiş metalleri, 13A-16A grubu elementleri ve karbon) her birinin kritik buharlaşma basınç ve sıcaklıkları birbirinden farklıdır. Dolayısıyla istenilen sitokiyometriyi elde etmek, üretilen her MAX fazlı malzeme için deneysel bir birikim gerektirir. Üretilen MAX’ların saflık oranı da bu deneysel optimizasyon sürecine göre değişmektedir. Sinterleme işleminde Al, yapıdaki diğer elementlere göre daha çok buharlaşarak yapıdan uzaklaştığı için metal atomlarının bir kısmı metalik bir bağ kurmak için yeterli miktarda Al atomu bulamaz ve az da olsa bir kısmı reaksiyona giremeyerek yapıda kalabilmektedir (Ghasali et al. 2024). Pikler incelendiğinde yine yüksek sıcaklık sonucunda Al elementlerinin bir bölümü oksitlenerek yapıda alüminyum oksit olarak kalmıştır. Grafikte; Şekil 4.1b, Şekil 4.1d ve Şekil 4.1f ise sırasıyla MXene fazlı Mo_3C_2 , Ta_4C_3 ve Ti_3C_2 ’yi göstermektedir. Pikler, literatür çalışmalarıyla analiz edilerek MAX fazından MXene fazına geçişlerde HF ile seçici dağlama sonucu yapılardan Al atomları çekildiğinden Al içerikli fazlar azalmış ve her üç toz için de grafiklerde metal karbür (M_xC_y) piklerinin oluştuğu görülmüştür (Naguib et al. 2011, Griseri et al. 2019, Khot et al. 2021, Ghasali et al. 2024).

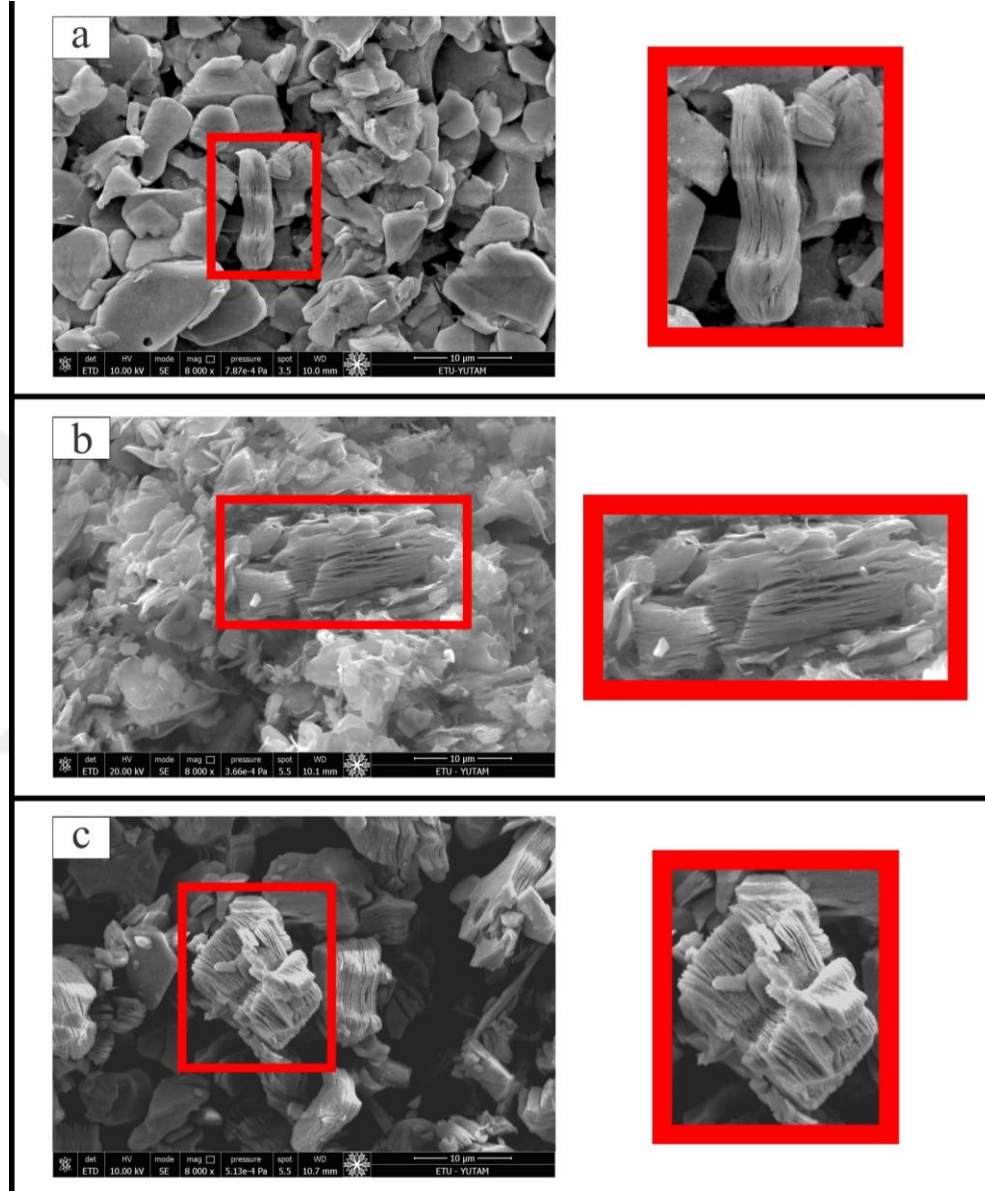


Şekil 4.1. MAX ve MXene tozların XRD analizleri; (a) Mo_3AlC_2 , (b) Mo_3C_2 , (c) Ta_4AlC_3 , (d) Ta_4C_3 , (e) Ti_3AlC_2 , (f) Ti_3C_2 .

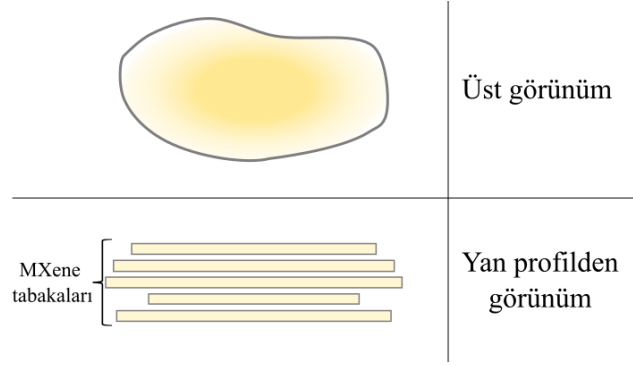
4.2. Tozlar ve Metal Matrislere Ait Yapısal İncelemeler

Bu tez kapsamında MAX fazından HF ile seçici dağlanarak elde edilen 2B MXene tozlara ait SEM görüntüsü Şekil 4.2’de verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde Al yapısının yapıdan uzaklaştırılması ile tabaka görünümü belirginleşmiş, ultrasonikasyon işlemi ile de tabakalar arası mesafelerin iyice arttığı görülmüştür. Özellikle Şekil 4.2c’de verilen Ti_3C_2 ‘ye ait tozda MXene tabakalarının sayıca çokluğu ve tabaka sayısının fazla oluşu dikkat çekmektedir. Giriş bölümünde anlatıldığı gibi Al’nin yapıdan çekilmesiyle her üç malzemede de tabakaları bir arada tutan bağ, zayıf yapıdaki van der Waals bağlarıdır. SEM görüntülerinde tabakalı yapılar her ne kadar az gözükse de aslında

partiküllerin tamamına yakını bu şekildedir fakat tabakalar sadece yan profilden görüldüğü için bu şekilde görülmektedir. Bu durumu anlatan şematik görsel Şekil 4.3'te verilmiştir.

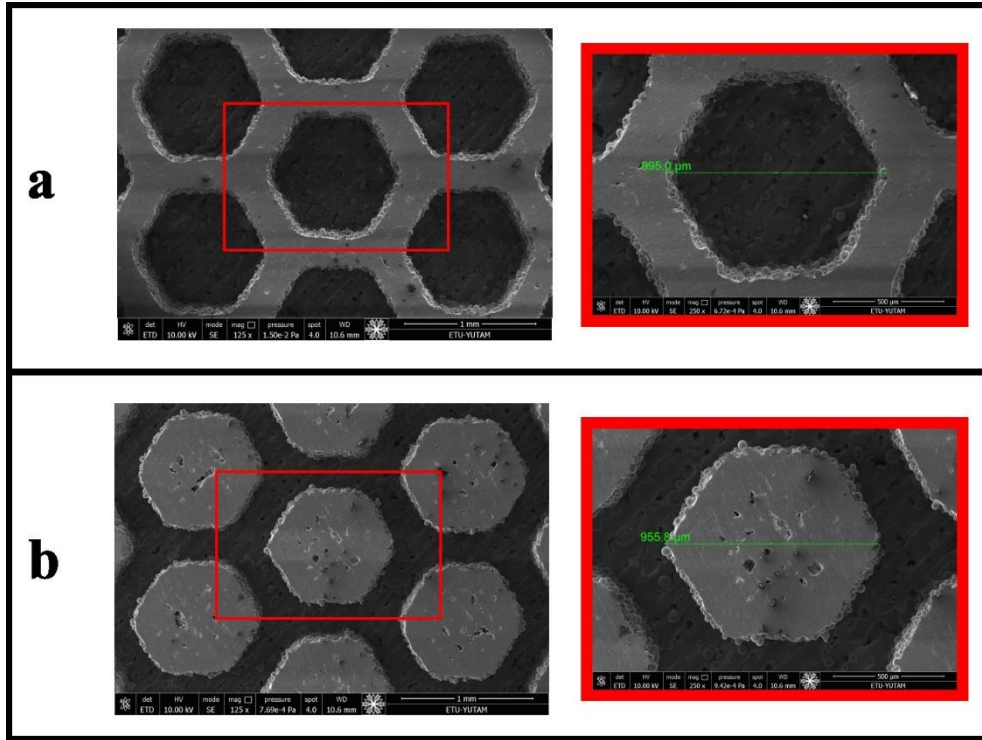


Şekil 4.2. MXene fazlı tozların SEM görüntüleri; (a) Mo₃C₂, (b) Ta₄C₃, (c) Ti₃C₂



Şekil 4.3. MXene fazlı tozların şematik görünümü

SLE yöntemiyle üretilen dişi ve erkek tekstürlü, yüzeyi parlatılmış (infiltrasyona hazır) Ti6Al4V metal matrislere ait yüzey SEM görüntüsü Şekil 4.4’te verilmiştir. CAD programında 1 mm olacak şekilde tasarlanan bal petekleri yaklaşık %0,5 sapmayla üretilmiştir. Bu durumun üretim yönetiminden kaynaklandığı söylenebilir. Ergitme prosesi sırasında Ti6Al4V tozlar katılırken bir miktar çekmeye uğramaktadır. Bu da tasarlanan ölçüyle, üretim sonrası ölçüler arasında çok ufak da olsa farka sebep olmaktadır. Bu fark üretim parametreleriyle önemli ölçüde değişmektedir (Cardaropoli et al. 2012).



Şekil 4.4. SLE ile üretilen Ti6Al4V metal matrislere ait yüzey SEM görüntüleri; (a) Dişi tekstürlü, (b) Erkek tekstürlü.

Daha önceden bahsedildiği gibi dişi ve erkek geometriler yapı olarak birbiriyle zıt bir geometride tasarlanmıştır. Dişi numunelerde altıgen şeklindeki bal peteklerinin içi MXene katkılı/katkısız epoksi reçine ve dışı Ti6Al4V iken erkek numunelerde altıgen bal peteklerinin içi Ti6Al4V ve dışı MXene katkılı/katkısız epoksi reçineden oluşmaktadır. Tekstürsüz düz Ti6Al4V ve tekstürlü numunelere ait bazı kütle, hacimsel ve alansal veriler Çizelge 4.1’de verilmiştir. Çizelge incelendiğinde yapılan tekstürlü tasarımlar sayesinde ağırlık tekstürsüz numunelere göre dişi numunelerde yaklaşık %17, erkek numunelerde ise yaklaşık %15 azaltıldığı görülmektedir. Bu sonuçlarla birlikte tezde tasarlanarak üretilen numunelerin havacılık ve uzay endüstrisinde arzu edilen “hafiflik kriterini” sağladığı görülmektedir. Üst görünümünden yüzey alanlarının incelenmesi ilerleyen kısımlarda yapılacaktır.



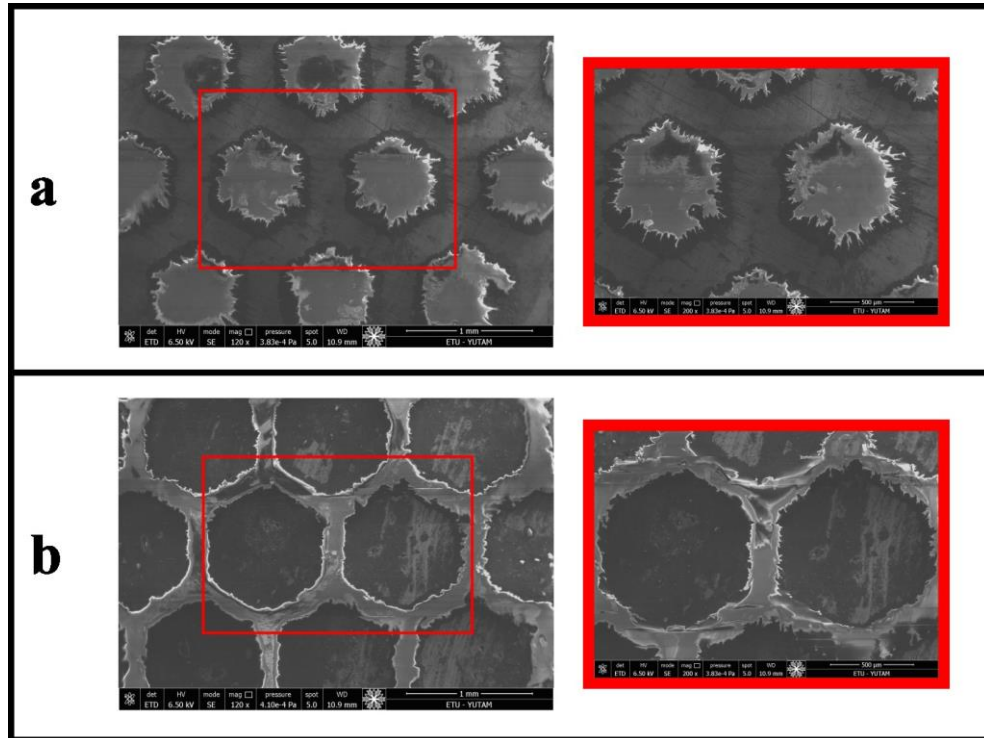
Çizelge 4.1. Üretilen numunelere ait kütle, hacimsel ve alansal veriler

Tekstür Tipi	Epoksi reçine ile doldurulan hacim (%)	Ti6Al4V matrisin hacmi (%)	Epoksi reçine ile doldurulan yüzeyin alanı (Üst görünümünden) (%)	Ti6Al4V matrisin kapladığı yüzey alanı (Üst görünümünden) (%)	Ağırlık (g)
Tekstürsüz	0	100	0	100	2,52
Dişi Tekstürlü	≈12	≈88	≈59	≈41	2,09
Erkek Tekstürlü	≈9	≈91	≈41	≈59	2,13

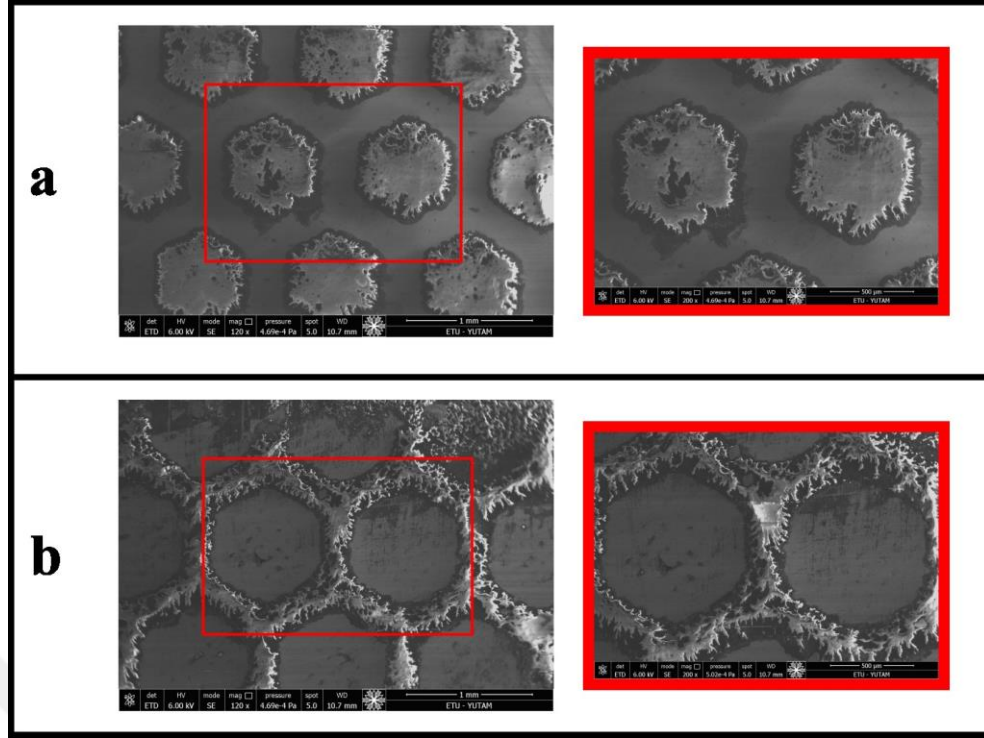
*Tüm numunelerin dış boyutları 12x12x4mm'dir.

*Ağırlık ölçümleri numunelerin SLE ile üretiminden çıkmış şekliyle yapılmıştır.

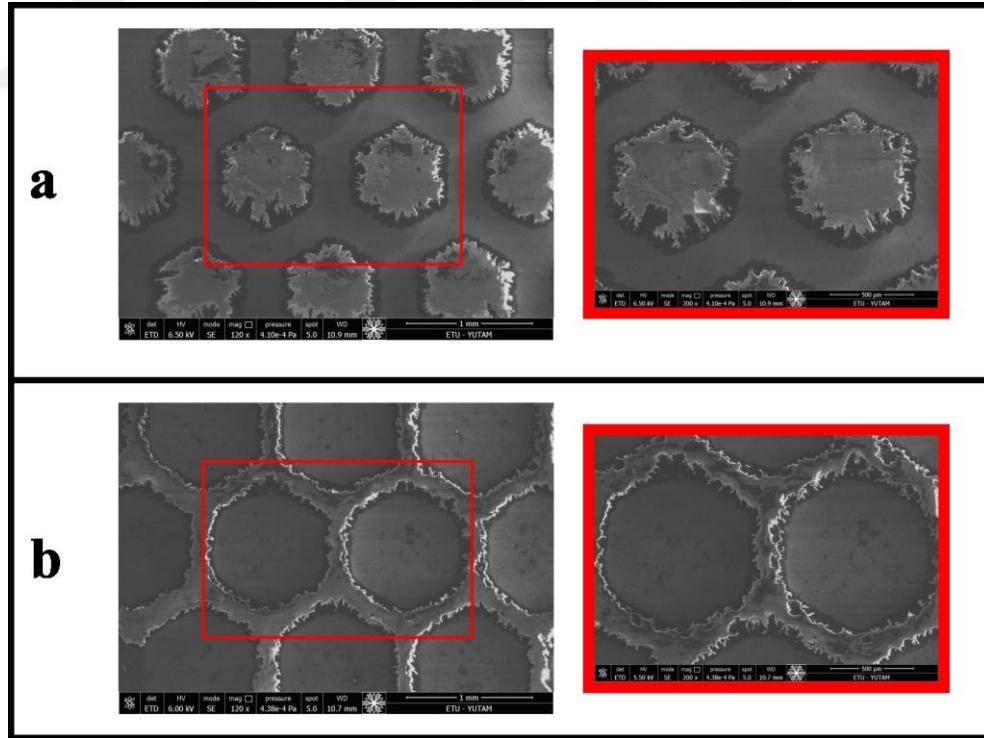
Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de Ti6Al4V metal matrislere sırasıyla katkısız epoksi reçine (ER), ER+Mo₃C₂, ER+Ta₄C₃ ve ER+Ti₃C₂ emdirilmiş numunelere ait yüzey SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde tekstürlerin tamamının dolduğu görülmektedir.



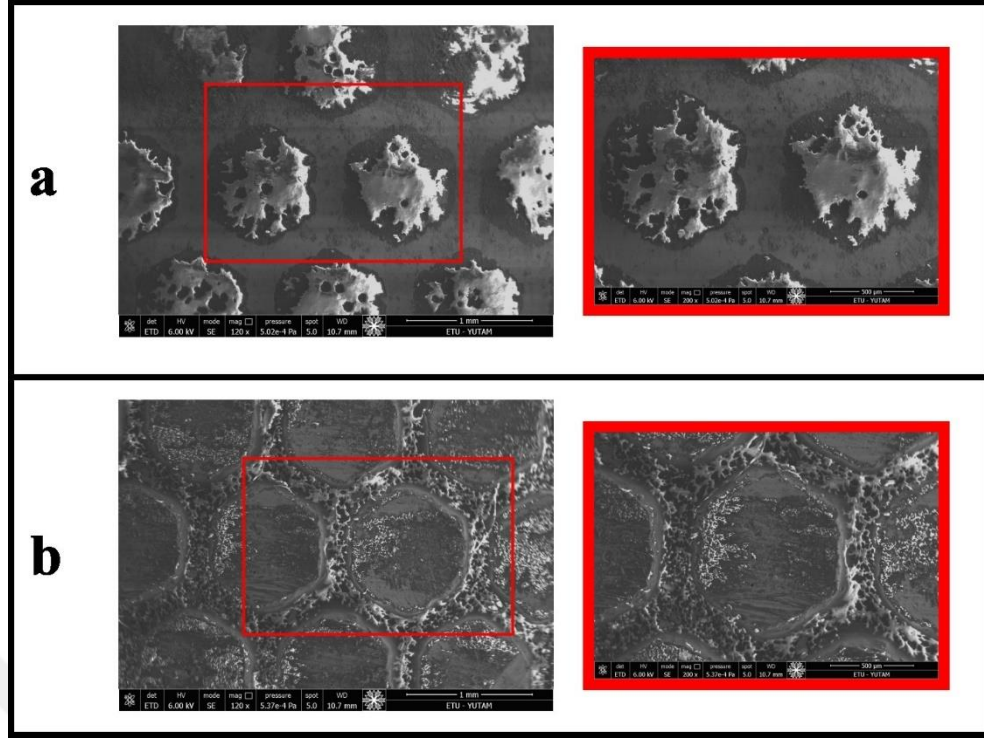
Şekil 4.5. SLE ile üretilen Ti6Al4V metal matrislere katkısız epoksi reçine emdirilen numunelerin yüzey SEM görüntüleri; (a)Dişi tekstürlü, (b)Erkek tekstürlü.



Şekil 4.6. SLE ile üretilen Ti6Al4V metal matrislere ER+Mo₃C₂ emdirilen numunelerin yüzey SEM görüntüleri; (a)Dişi tekstürlü, (b)Erkek tekstürlü.



Şekil 4.7. SLE ile üretilen Ti6Al4V metal matrislere ER+Ta₄C₃ emdirilen numunelerin yüzey SEM görüntüleri; (a)Dişi tekstürlü, (b)Erkek tekstürlü.



Şekil 4.8. SLE ile üretilen Ti6Al4V metal matrislere ER+Ti₃C₂ emdirilen numunelerin yüzey SEM görüntüleri; (a)Dişi tekstürlü, (b)Erkek tekstürlü.

4.3. Numunelere Ait Sertlik ve Pürüzlülük Değerleri

Çizelge 4.2’de numunelere ait sertlik değerleri verilmiştir. Her ne kadar tribolojik deneyler kuru (oda sıcaklığı), LN₂, NaCl ve farklı vakum ortamında yapılsa da sertlik değerleri sadece oda sıcaklığındaki ortam şartlarında ve kriyojenik (LN₂) şartlarda yapılmıştır. Bilindiği üzere sertlik ile elastisite modülü arasında doğru orantı vardır (Yan et al. 2022). Elastisite modülü ise sıcaklık ve kimyasal yapının değişiminden etkilenmektedir. Tribolojik deneylerde vakum ortamları da NaCl ortamı da oda sıcaklığında yapıldığından kuru ortamda yapılan sertlik okuma işlemi, bu iki ortamı da temsil edeceği düşünülmüştür. Sertlik okuma yapılırken farklı tozlarla katkılanmış epoksi reçinelerde kayda değer bir sertlik değişimi görülmemiştir. Bu durum kürleşme sonucu epoksi içine hapsolan tozların batıcı ucun uyguladığı kuvvetle epoksi reçine içine iyice gömülmesiyle açıklanabilir. Bilindiği gibi kullanılan 2B MXene malzemelerin sertlik değerleri, epoksi reçinenin sertlik değerine göre çok fazladır. Dolayısıyla batıcı uç her ne kadar MXene toza denk gelse de toz partikülü plastik şekil değişimine uğramadan kuvveti olduğu gibi epoksi reçineye iletmış ve değer olarak anlamlı bir farklılık okunamamıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Dolayısıyla verilen çizelgede sertlik değerleri Ti6Al4V ve epoksi reçineye göre verilmiştir.

Çizelge 4.2. Malzemelerin sertlik değerleri

Malzeme	Oda sıcaklığı	Kriyojenik Ortam (LN ₂)
Ti6Al4V (Metal Matris)	320-340 HV _{0.1}	420-440 HV
Epoksi Reçine (ER)	25-35 HV _{0.1}	45-55 HV

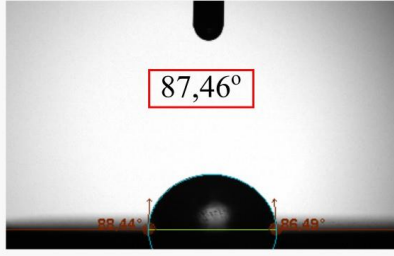
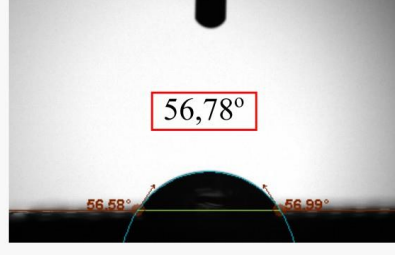
Çizelge 4.3'te numunelerin pürüzlülük değerleri verilmiştir. Pürüzlülük değerleri ölçülürken dişi ve erkek tasarımların her ikisinde de epoksili kısımlar ayrı, Ti6Al4V kısımlar ayrı incelenmiştir. Böylece infiltrasyon sonrası kürleştirme işlemi yapılırken epoksi reçinenin bir miktar kendisini çekmesi sonucu oluşan mikro çöküntülerin pürüzlülük değerlerine olumsuz etkisi devre dışı bırakılmış ve gerçek pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Kullanılan malzemeler her iki geometri için de aynı olduğundan değerler tek başlarına verilmiştir. Ölçüm kolaylığı düşünülerek epoksi reçine ölçümleri her üç epoksi sistemi için de yüzey alanının çoğunluğu epoksi (%59) olan dişi numunelerden, Ti6Al4V için ise yüzey alanının çoğunluğu metal matris olan (%59) erkek numunelerden yapılmıştır. Tablo incelendiğinde katkılı ve katkısız epoksiler içinde en düşük değer katkısız saf epoksi reçine emdirilmiş numunelerden ölçülmüştür. Epoksi reçinenin katkısız olmasıyla yüzey profilindeki süreksizliğin çok az olması bu durumu açıklamaktadır. Epoksiye katkılama yapıldığında yüzey profilinde süreksizlikler meydana gelmiş ve bu durum yüzey pürüzlülüğünü arttırmıştır.

Çizelge 4.3. Numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri

Malzeme	R _a (µm)
Ti6Al4V (Metal Matris)	5,35
Epoksi Reçine (ER)	4,43
ER+Mo ₃ C ₂	7,43
ER-Ta ₄ C ₃	6,76
ER-Ti ₃ C ₂	5,45

4.4. Numunelerin Statik Temas Açısı Analizleri

Şekil 4.9, numunelerin temas açısı ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Damlacıkların numune yüzeyiyle yaptığı açılar sağdan ve soldan ölçülmesiyle bulunan sonuçların aritmetik ortalaması her bir figürün üzerinde görülmektedir. Şekil incelendiğinde tüm numunelerin yüzeyle yaptığı açı 90 dereceden düşük olduğu için tümünün hidrofilik olduğunu söylemek mümkündür. Alınan sonuçlara göre suyu itme özelliği en yüksek olan numune tekstürsüz numunedir. Diğer numunelerin tekstürlü olduğu düşünülürse bu durum normal olarak algılanmaktadır. Damlacığın yüzeyde kapladığı temas alanı, tekstürlü numunelerin tekil gözeneklerinden daha büyük olduğu için damlacık hem Ti6Al4V metal matrisle hem de epoksi sistemiyle temas halindedir. Dolayısıyla tekstürlü numunelerde bu durum göz önüne alınarak yorum yapılması doğru olacaktır. Bilindiği üzere yüzey pürüzlülüğü ile temas açısı arasında bir ilişki vardır. Wenzel modeline göre hidrofilik yüzeylerde pürüzlülüğün artmasıyla temas açısı azalmaktadır (Gün 2017, Wenzel 1949). Dolayısıyla gözenekler lokal olarak düşünüldüğünde her ne kadar yüzey pürüzlülüğü değeri katkısız epoksi reçineli bölgelerde daha küçük olsa da gözeneklerin varlığı toplam pürüzlülük değerini arttırmaktadır. Bu bağlamda tekstürlü numune yüzeylerindeki mikro çukurların, temas açısını etkilediği söylenebilir. Tekstürlü numuneler tekstür şekline göre kendi içinde analiz edildiğinde ise genel olarak dışı tekstürlülerin erkek tekstürlülerden daha fazla hidrofobik davranış gösterdiği görülmektedir. Numunelerde epoksi sisteminin ve metal matrisin üst görünümünden kapladığı alanlar düşünüldüğünde bu durum olağandır. Dışı numunelerin epoksi ile doldurulan yüzeylerinin alanları, Ti6Al4V matrisi olan yüzeylerinden daha fazladır. Malzeme açısından düşünüldüğünde ise katkısız epoksi infiltre edilen numunelerin temas açıları, MXene katkılı epoksi infiltre edilen numunelere göre daha yüksektir. Böylece katkısız olanların daha hidrofobik davrandığı anlaşılmaktadır. Temas açıları, yüzey pürüzlülük değerleri çerçevesinde düşünüldüğünde MXene katkılı epoksi emdirilen numunelerin yüzeyinde bulunan süreksizlikler hidrofobik davranışı olumsuz yönde etkilemiştir.

	Tekstürsüz	
Ti6Al4V Metal Matrix	a 	
	Dişi Tekstür (DT)	Erkek Tekstür (ET)
Epoksi Reçine (ER)	b 	c 
ER+Mo ₃ C ₂	d 	e 
ER+Ta ₄ C ₃	f 	g 
ER+Ti ₃ C ₂	h 	i 

Şekil 4.9. Statik temas açısı ölçüm sonuçları; (a) Tekstürsüz Ti6Al4V, (b) Dişi tekstürlü ER infiltre edilmiş, (c) Erkek tekstürlü ER infiltre edilmiş, (d) Dişi tekstürlü ER+Mo₃C₂ infiltre edilmiş, (e) Erkek tekstürlü ER+Mo₃C₂ infiltre edilmiş, (f) Dişi tekstürlü.

4.5. Tribolojik Test Sonuçları

Aşınma testleri ve bu testlerin sonucunda 3B profilometre ile yapılan aşınma oranı ölçümleri ile aşınma izi SEM görüntüleri bu bölümde incelenmiştir. İncelemelerde aşınma ortamının etkisi, yüzey tekstür geometrisinin etkisi ve MXene katkı türünün etkisi verimli bir şekilde tartışılması açısından sürtünme katsayısı/zaman grafikleri iki farklı kombinasyonda verilmiştir.

Grafiklerde “DT” ifadesi dişi tekstürlü, “ET” ifadesi erkek tekstürlü, TSZ ifadesi tekstürsüz numuneleri ve “ER” ifadesi epoksi reçineyi ifade etmektedir.

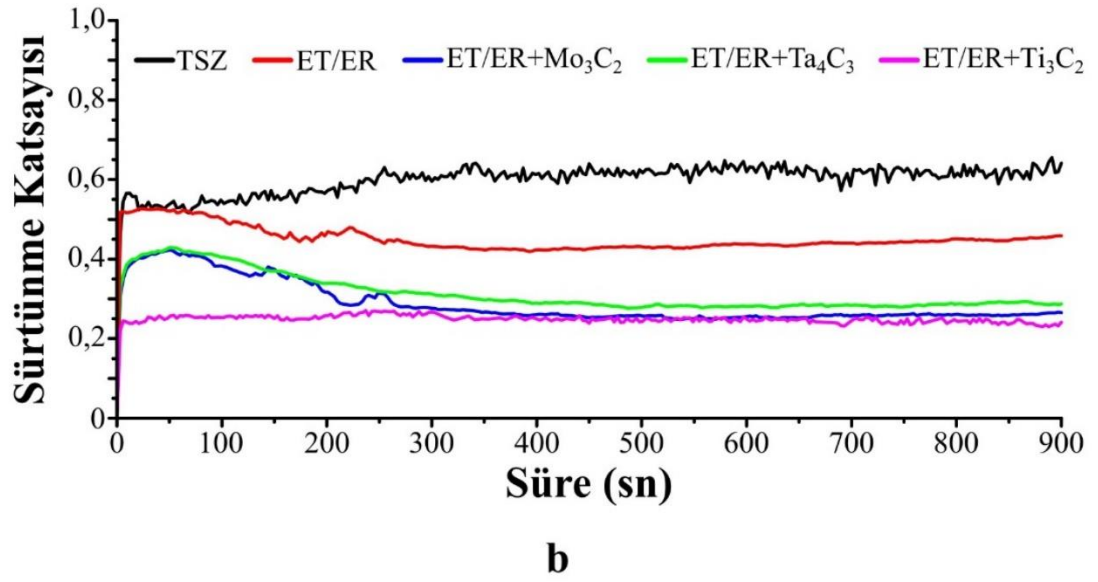
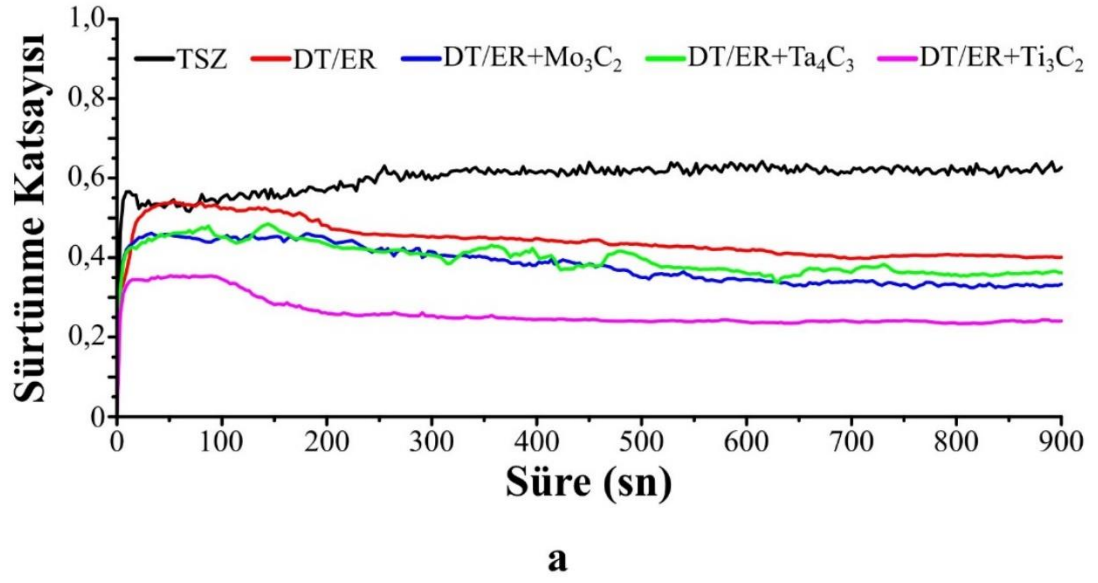
4.5.1. Aşınma ortamına göre sürtünme analizleri

Şekil 4.10’da kuru ortamda ve oda sıcaklığında yapılan testlerin sürtünme katsayısına karşılık zaman grafikleri verilmiştir. Şekil 4.10a’da tekstürsüz numunenin ve dişi tekstürlü numunelerin grafiği gösterilirken Şekil 4.10b’de tekstürsüz numunenin ve erkek tekstürlü numunelerin grafiği gösterilmektedir. Grafikler incelendiğinde kuru şartlarda en yüksek sürtünme katsayısı değeri TSZ Ti6Al4V numunesinden elde edilmiştir ($\approx 0,65$). En düşük sürtünme katsayısı ise 2B Ti₃C₂ katkılı epoksi emdirilen dişi ve erkek numunelerden elde edilmiştir (DT/ER+Ti₃C₂: $\approx 0,25$ ve ET/ER+Ti₃C₂: $\approx 0,26$). Bu durum yüzey pürüzlülüğü ile açıklanabilir. Tezin daha önceki bölümlerinde verildiği üzere ER+ Ti₃C₂’nin yüzey pürüzlülük değerleri diğer tozlara göre düşüktür. Bilindiği üzere sürtünme katsayısı yüzey pürüzlülüğü ile yakından ilişkilidir. Yüzey pürüzlülüğü düşük olan yüzeylerde sürtünme katsayısı da düşüktür (Efeoglu et al. 1993). Yüzey pürüzlülük değeri TSZ numunede daha düşük olsa da yapıya 2B Ti₃C₂ MXene katkılama yapılmasıyla oluşan yağlayıcı etkinin, yüzey pürüzlülüğü etkisine göre baskın olduğu anlaşılmaktadır.

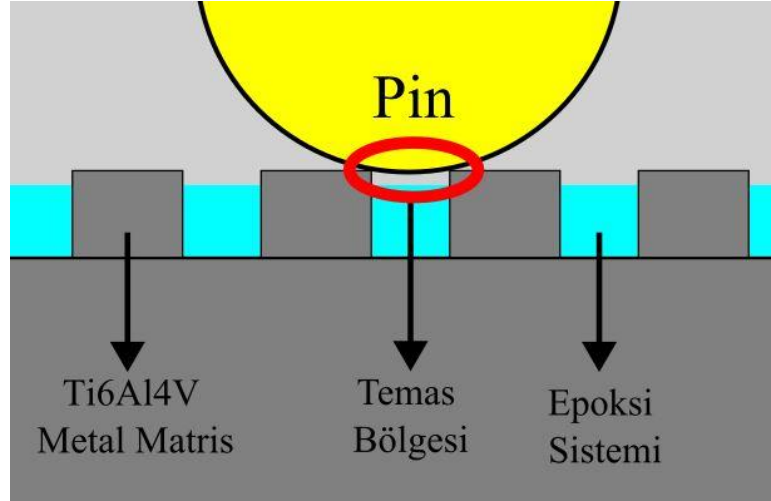
Grafikler bir arada incelendiğinde DT numunelerden alınan sürtünme katsayıları değerleri çok az da olsa ET numunelerden daha düşüktür. Daha önceden Bölüm 4.1’de anlatıldığı üzere DT numunelerin erkek numunelere göre epoksi ile doldurulan kısımların yüzey alanları metal matrisli kısımlara göre fazladır. Dolayısıyla sürtünme sırasında DT numunelerinde pin, tüm hareket boyunca ET numunelere göre epoksi sistemli yüzeylerle

daha fazla temas etmiştir. Hem epoksi sisteminin kendisinin sıvanarak yüzeyi koruması hem de epoksi içerisine katılanan MXene malzemelerin katı yağlayıcı etkisiyle DT numunelerden ET numunelere göre daha düşük sürtünme katsayısı değerleri elde edilmiştir.

Grafiklerde tüm numunelerin sürtünme katsayılarının testin başlangıcında bir miktar arttığı ve sonrasında düştüğü veya sabit kaldığı görülmektedir. Bu artışın sebebi olarak sürtünme hareketinin başlangıcında aşındırıcı pin ile pinin temas ettiği yüzeyin pürüzleri ilk olarak karşılaştığı düşünülmelidir. Bu pürüzlerin de temas yüzeyi düşük olduğundan lokal olarak bu bölgelerde yüksek basınç bölgeleri meydana gelmektedir. Bu olaya Hertzian teması denir (Yetim 2009). Sürtünme hareketinin devam etmesiyle bu pürüzler azalarak kaybolmaktadır ve doğal olarak sürtünme katsayısı değerleri düşmektedir. Bu durum TSZ numunede yaklaşık 20-30 saniye kadar sürmüştür. Diğer numunelerde ise 200 saniyelere kadar sürdüğü görülmektedir. Bu durumun yine pürüzlülükten meydana geldiği düşünülmektedir. Aşınma pini olarak kullanılan topun çapı 6 mm'dir. Tekstürlü yapıların altıgen bal peteklerinin köşegen uzunluğu ise 1 mm'dir. Kürleşme esnasında epoksi reçinenin kendini birazcık çekmesiyle mikro çukurlar olduğundan aşınma topu, hareketin başlangıcında sadece Ti6Al4V metal matrisinin sivri köşeleriyle karşılaşmaktadır (Şekil 4.11). TSZ numunelerde yüzeyler homojen ve düz bir yapıda olduğundan rodaj (alışma) süresinin bu numunede kısa sürdüğü görülmektedir.

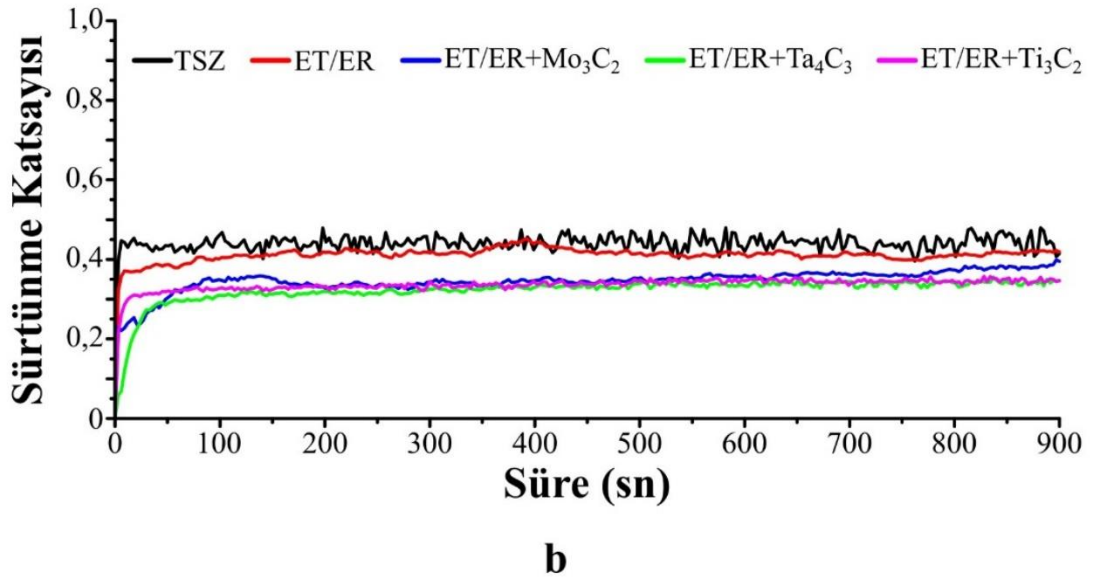
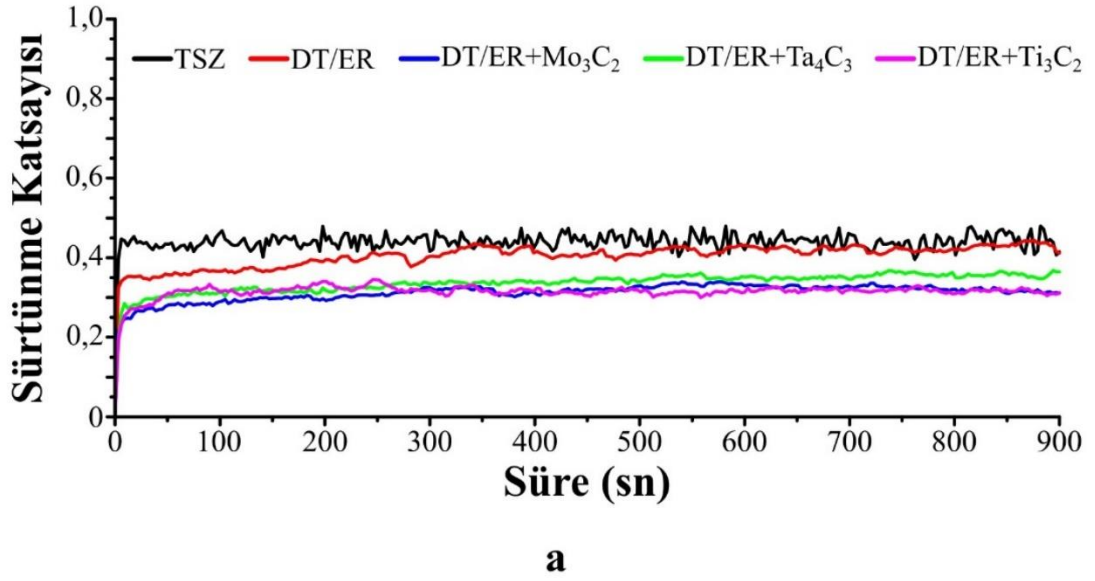


Şekil 4.10. Kuru ortamda yapılan aşınma testlerine ait sürtünme katsayısı/zaman grafikleri; (a) DT numuneler, (b) ET numuneler.



Şekil 4.11. Tekstürlü numunelerde sürtünme hareketinin başlangıcındaki durumun şematik görseli.

Şekil 4.12’de NaCl çözeltisi ortamında ve oda sıcaklığında yapılan testlerin sürtünme katsayısına karşılık zaman grafikleri verilmiştir. Şekil 4.12a’da tekstürlü numunenin ve dişi tekstürlü numunelerin grafiği gösterilirken Şekil 4.12b’de tekstürlü numunenin ve erkek tekstürlü numunelerin grafiği gösterilmektedir. Grafiklere bakıldığında yine en yüksek sürtünme katsayısı değerinin TSZ numuneden elde edildiği görülmektedir ($\approx 0,45$). DT ve ET numunelerin grafiğinde de saf ER infiltre edilen numunelerin sürtünme katsayıları MXene katkılı olanlara göre daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum 2B MXene katkısının sürtünme hareketini kolaylaştırarak katkılama işlemin olumlu sonuç verdiğini işaret etmektedir. Genel anlamda kuru şartlarda olduğu gibi yine DT numuneler ET numunelere göre daha düşük sürtünme katsayısına sahiptir. Numunelerin tümünün kuru şartlara oranla sürtünme katsayı değerlerinin düştüğü görülmektedir. Bu durum testlerin bir çözelti içerisinde yapılmasıyla ilgilidir. Sürtünme sırasında ortaya çıkan aşınma ürünleri (debriler), çözeltinin dinamik hareketi sonucunda temas bölgesinden ayrılarak uzaklaştığı düşünülmektedir. Böylece debriler ara yüzeyde kalıp abraziv bir etkiye sebep olmayarak sürtünme katsayısını düşürmüştür (Yetim et al. 2022).



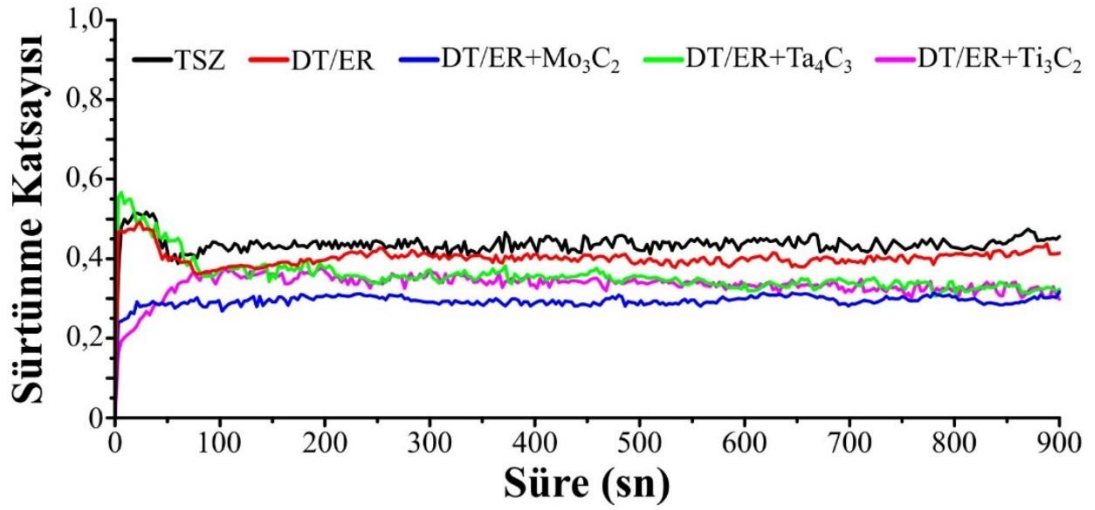
Şekil 4.12. NaCl ortamında yapılan aşınma testlerine ait sürtünme katsayısı/zaman grafikleri; (a) DT numuneler, (b) ET numuneler.

Şekil 4.13'te kriyojenik LN₂ ortamında yapılan testlerin sürtünme katsayısına karşılık zaman grafikleri verilmiştir. Şekil 4.13a'da tekstürsüz numunenin ve dişi tekstürlü numunelerin grafiği gösterilirken Şekil 4.13b'de tekstürsüz numunenin ve erkek tekstürlü numunelerin grafiği gösterilmektedir. Testlerde en yüksek sürtünme katsayısı yine TSZ numuneden elde edilmiştir ($\approx 0,43$). Testlerin tümündeki salınım miktarları diğer ortamlarda yapılan testlere göre fazladır. Bu durumun numune yüzeylerindeki hem epoksi sistemlerinin hem de Ti6Al4V ana malzemenin kriyojenik sıcaklığın etkisiyle gevrekleşerek kırılması ve aşınma yüzeyleri arasına girmesiyle oluştuğu

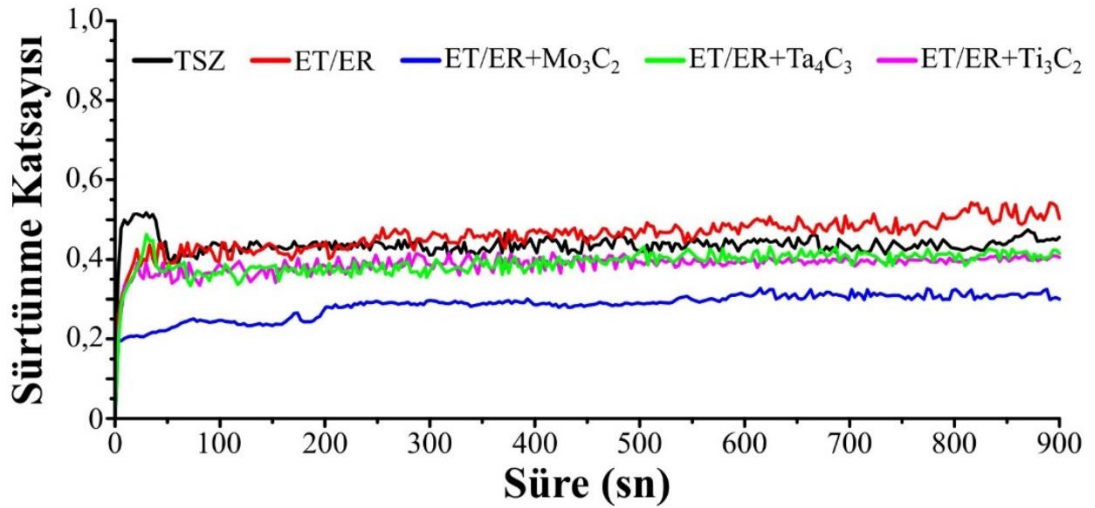
düşünülmektedir. Grafiklerde hem DT hem de ET numunelerde Molibden içerikli ER+Mo₃C₂ emdirilmiş numunelerin sürtünme katsayıları en düşük çıktığı görülmektedir. Bu sonuç Molibden'in ısı genleşme katsayısının, diğer numunelerde kullanılan 2B MXene'lerin metal elementlerinden (Ti ve Ta) daha düşük olmasıyla açıklanabilir (Çizelge 4.4) Bilindiği üzere Molibden esaslı yağlayıcı maddelerin farklı sıcaklık değerlerinde sürtünme ve mukavemet açısından stabilitesini koruduğuyla ilgili literatürde yayınlanan birçok makalede yer almaktadır (Zhang et al. 2008, Hu et al. 2019, Jin et al. 2020). Molibden esaslı malzemelerin bu özelliği sayesinde kriyojenik sıcaklıklarda Mo₃C₂ MXene tozları epoksi reçinenin iyice küçülerek tekstürlere hapsolmasını engellediği düşünülmektedir. Böylece aşınma sırasında Şekil 4.11'de gösterilen şematik görüntüde pin, epoksi sistemine daha yakın olmakta ve aşınma mekanizması testin hemen başlarında pin-Ti6Al4V metal matris sürtünmesi yerine pin-ER+Mo₃C₂ sürtünmesidir.

Çizelge 4.4. MXene malzemelerin metal elementlerine ait ısı genleşme katsayıları (Anonymous 2024).

Malzeme	Isıl Genleşme Katsayısı K ⁻¹
Molibden	4,8x10 ⁻⁶
Tantal	6,3x10 ⁻⁶
Titanyum	8,6x10 ⁻⁶



a

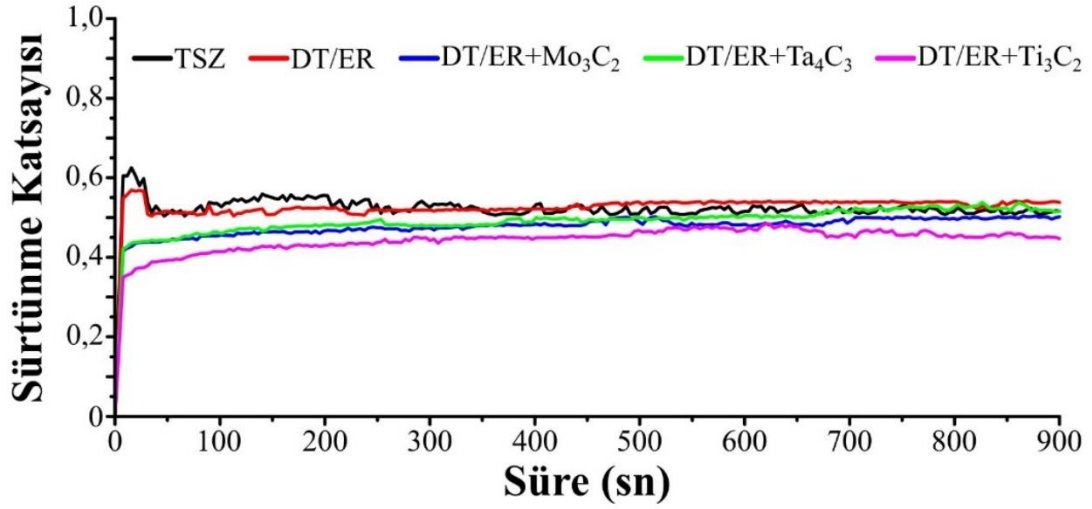


b

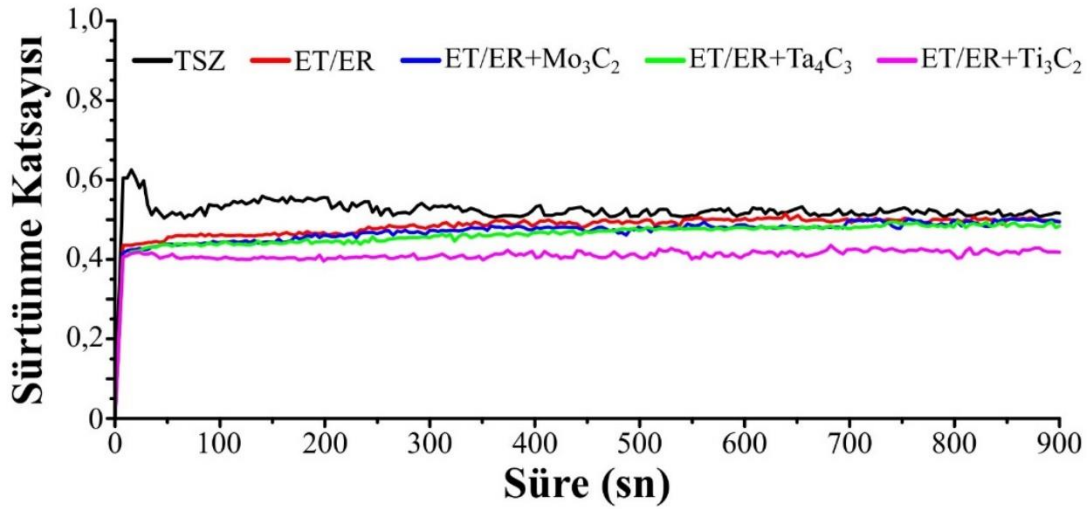
Şekil 4.13. LN₂ ortamında yapılan aşınma testlerine ait sürtünme katsayısı/zaman grafikleri; (a) DT numuneler, (b) ET numuneler.

Şekil 4.14'te düşük vakum ortamında (5×10^{-2} mbar) ortamında yapılan testlerin sürtünme katsayısına karşılık zaman grafikleri verilmiştir. Şekil 4.14a'da tekstürlüz numunenin ve dişi tekstürlü numunelerin grafiği gösterilirken Şekil 4.14b'de tekstürlüz numunenin ve erkek tekstürlü numunelerin grafiği gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde önceki şartlarda olduğu gibi yine en yüksek sürtünme katsayısı değeri TSZ numunelerden ölçülmüştür ($\approx 0,52$). Test sıcaklığı oda sıcaklığında olduğundan sürtünme davranışı eğilimi kuru şartlarla benzer sıralamadır. ER+ Ti₃C₂ emdirilen hem DT hem ET numuneler en düşük sürtünme katsayısı değerine sahiptir. TSZ numunede baskın bir

rodaj gözükmemektedir. Tüm numunelerin sürtünme katsayıları vakum ortamlarında yukarıda verilen ortam şartlarına göre bir miktar artış göstermiştir. Bu durum malzemeye göre sürtünme katsayısı/zaman grafikleriyle birlikte tekrar tartışılacaktır.



a

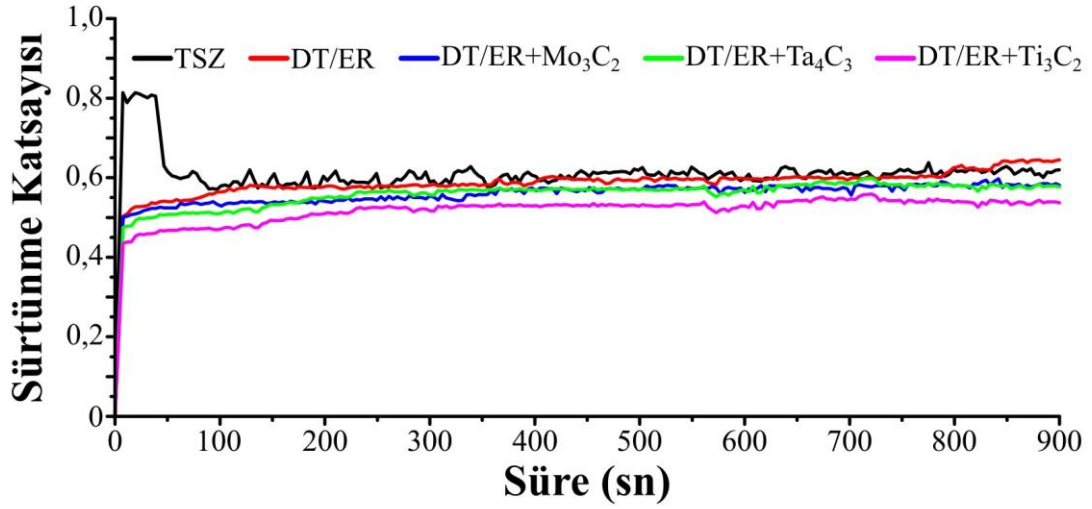


b

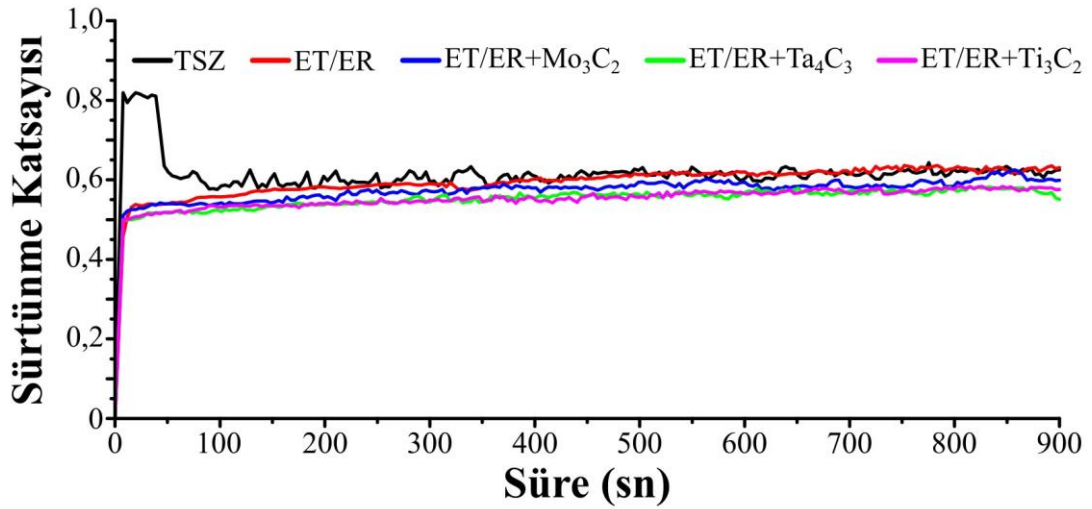
Şekil 4.14. Düşük vakum ortamında yapılan aşınma testlerine ait sürtünme katsayısı/zaman grafikleri; (a) DT numuneler, (b) ET numuneler.

Şekil 4.15'te düşük vakum ortamında (1×10^{-5} mbar) ortamında yapılan testlerin sürtünme katsayısına karşılık zaman grafikleri verilmiştir. Şekil 4.15a'da tekstürsüz numunenin ve dişi tekstürlü numunelerin grafiği gösterilirken Şekil 4.15b'de tekstürsüz

numunenin ve erkek tekstürlü numunelerin grafiği gösterilmektedir. Grafiğe bakıldığında yine en yüksek sürtünme katsayısı değeri TSZ numuneden ($\approx 0,60$) elde edilmesine rağmen tüm numuneler birbirleriyle benzer bir sürtünme davranışı göstermiştir. TSZ numunelerin rodaj süreleri düşük vakum ortamında yapılan testlere göre iyice baskın hale gelmiştir. Tüm numunelerin sürtünme katsayıları düşük vakum ortamına göre dahi daha da artmıştır.



a



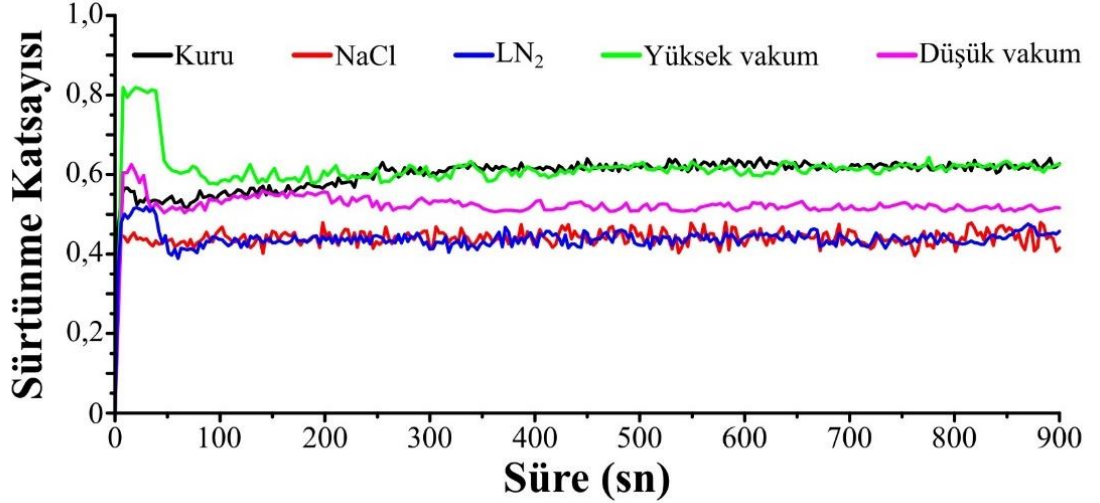
b

Şekil 4.15. Yüksek vakum ortamında yapılan aşınma testlerine ait sürtünme katsayısı/zaman grafikleri; (a) DT numuneler, (b) ET numuneler.

Aşınma ortamına göre verilen tüm grafikler tek bir perspektiften incelenecek olursa genel olarak ER emdirilmiş numuneler, TSZ numunelerinden daha düşük sürtünme katsayısına sahipken 2B MXene katkılanmış tüm numuneler de saf ER emdirilmiş numunelerden daha düşük sürtünme katsayısı değerlerine sahiptir. Dolayısıyla polimerik epoksi reçine ve bu reçineye katkılanan MXene'lerin tümü birden sürtünme katsayısını düşürdüğü söylenebilir. Şartların çoğunda sürtünme kuvvetini en çok azaltan malzemenin Ti_3C_2 katkısı olduğu savunulabilir. Sürtünme açısından kriyojenik şartlarda Mo_3C_2 , Ti_3C_2 'den daha iyi sonuçlar vermiştir. Vakum şartlarında yapılan testlerde tüm numunelere ait sürtünme katsayıları bir miktar artmıştır.

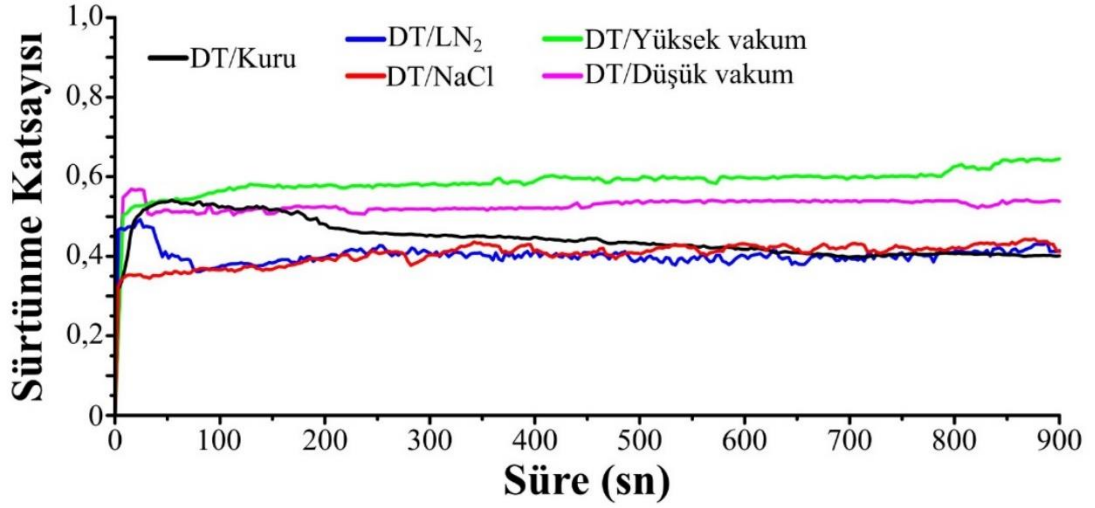
4.5.2. Malzemeye göre sürtünme analizleri

Şekil 4.16'da TSZ numunelerin bütün ortam şartlarında yapılan aşınma testlerinin sürtünme katsayısına karşılık zaman grafikleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde yüksek vakum şartlarında en yüksek sürtünme katsayısı değeri elde edilmiştir ($\approx 0,63$). NaCl çözeltisi ve LN_2 'de yapılan testlerde ise sürtünme katsayısı neredeyse aynıdır ($\approx 0,42$). Tüm şartlarda numunelerde ilk başta artan sürtünme katsayısı testin devamında düşmüş ve stabil bir şekilde testin tamamlandığı görülmüştür. Bu durum daha önceden bahsedildiği gibi rodaj durumudur. Literatürde “run in period” olarak da adlandırılan bu mekanizma sürtünme hareketiyle yüzey pürüzlerinin yok olması sonucu oluşmaktadır (A. F. Yetim 2009). Testlerin tümünün stabil bir şekilde devam etmesi yüzeylerin tekstürsüz olmasıyla açıklanabilir. Aşınma testi sürerken yüzeyin sürekli aynı (homojen) olması analizin test süresince kararlı kalmasını beraberinde getirmiştir.

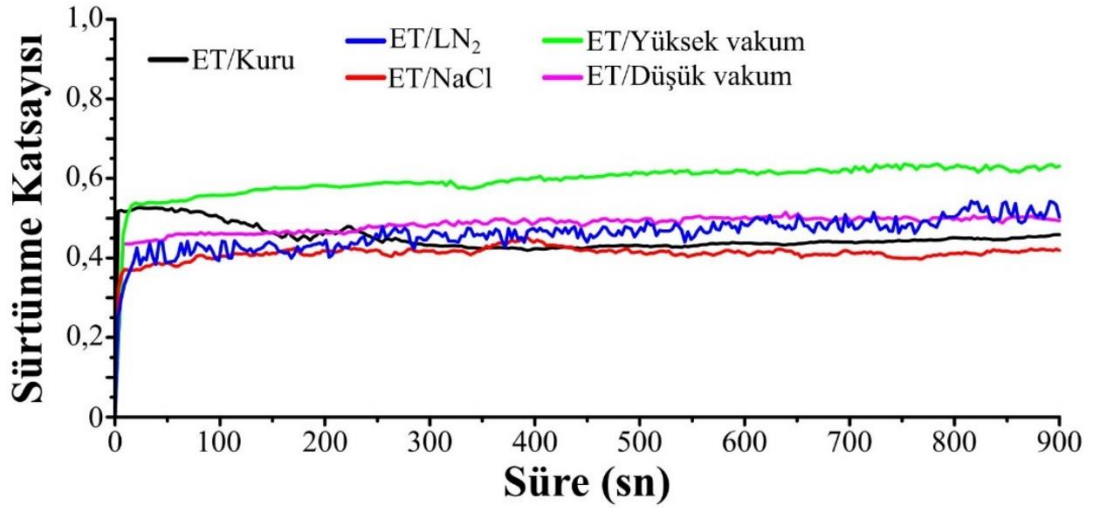


Şekil 4.16. Ti6Al4V Tekstürlüz numunelere ait sürtünme katsayısı/zaman grafiği

Şekil 4.17’de Epoksi reçine (katkısız) emdirilmiş numunelere ait sürtünme katsayısı/zaman grafikleri verilmiştir. Şekil 4.17a’da DT numunelerin grafiği gösterilirken Şekil 4.17b’de ET numunelerin grafiği gösterilmektedir. Grafikte en yüksek sürtünme katsayıları yüksek vakumda yapılan testlerden elde edilmiştir (DT: $\approx 0,56$ ve ET: $\approx 0,58$). Vakum ortamında yapılan testlerde, test ortamında oksijen miktarı yok denilecek kadar az olduğu için aşınmanın başlangıcında Ti6Al4V matrisinin yüzeyinde bulunan ince pasif oksit tabakası sürtünme hareketiyle kırıldıktan sonra iki sürtünme çevrimi sırasında tekrar oluşmaz. Dolayısıyla yüzeyin sertlik değerinde anlık olarak bir düşüş meydana gelir. Böylece vakum ortamında yapılan tribolojik sürtünme testlerinde sürtünme katsayısı değeri, atmosferik şartlarda yapılanlara göre bir miktar daha fazla olabilir (Cheng et al. 2014). Her iki tekstür şeklinde de mavi renkle gösterilen LN_2 ortamında yapılan testlerin grafiğinde bir miktar dalgalanma göze çarpmaktadır. Bu durum pin ile numune arasındaki temas yüzeyleri arasında giren aşınma ürünlerinin varlığının belirtisidir (Bhushan 2001). Testin kriyojenik sıcaklıkta yapılmasının etkisiyle malzeme gevrekleşerek kırılgan bir yapıya dönüştüğünden, yüzeyden parçaların koparak temas bölgesine girmesi oda şartlarında yapılan testlere göre kolaylıkla meydana gelebilmektedir.



a

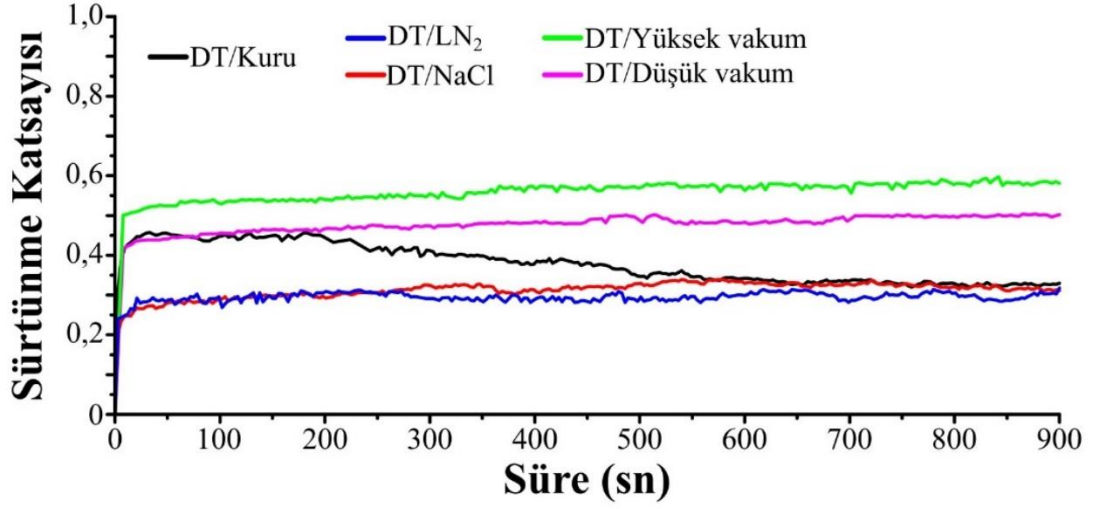


b

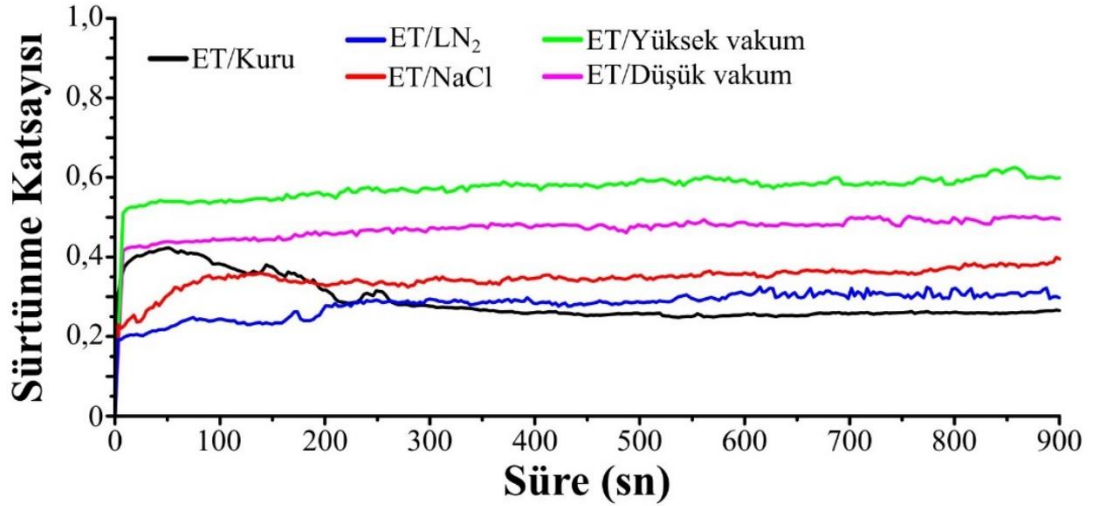
Şekil 4.17. Epoksi reçine (katkısız) emdirilmiş numunelere ait sürtünme katsayısı/zaman grafikleri; (a) DT numuneler, (b) ET numuneler.

Şekil 4.18’de ER+Mo₃C₂ emdirilmiş numunelere ait sürtünme katsayısı/zaman grafikleri verilmiştir. Şekil 4.18a’da DT numunelerin grafiği gösterilirken Şekil 4.18b’de ET numunelerin grafiği gösterilmektedir. Yine en yüksek sürtünme katsayıları sırasıyla yüksek ve düşük vakum ortamlarında yapılan testlerden elde edilmiştir. LN₂ ortamında yapılan testlerin sürtünme katsayıları testin başından sonuna kadar kararlı kalmıştır. Kuru ortamda yapılan testlerin ise testin başında oldukça yüksek olan sürtünme katsayısı, testin devamında azalış göstererek özellikle ET numunelerin gösterildiği grafikte, LN₂ ortamında yapılan testlerden bile daha düşük seviyelere inmiştir. Bu durum testin

başlangıcında ara yüzeye giren nispeten büyük boyutlu aşınma ürünlerinin varlığıyla açıklanabilir. Testin başında salınımın fazlayken daha sonrasında düşmesi de bu durumu desteklemektedir. LN_2 ortamında yapılan testlerde salınım yine göze çarpmaktadır. Kuru ortamda yapılan testlerde ise testin başında rodaj süresinde oluşan salınım, testin devamında azaldığı görülmektedir.



a

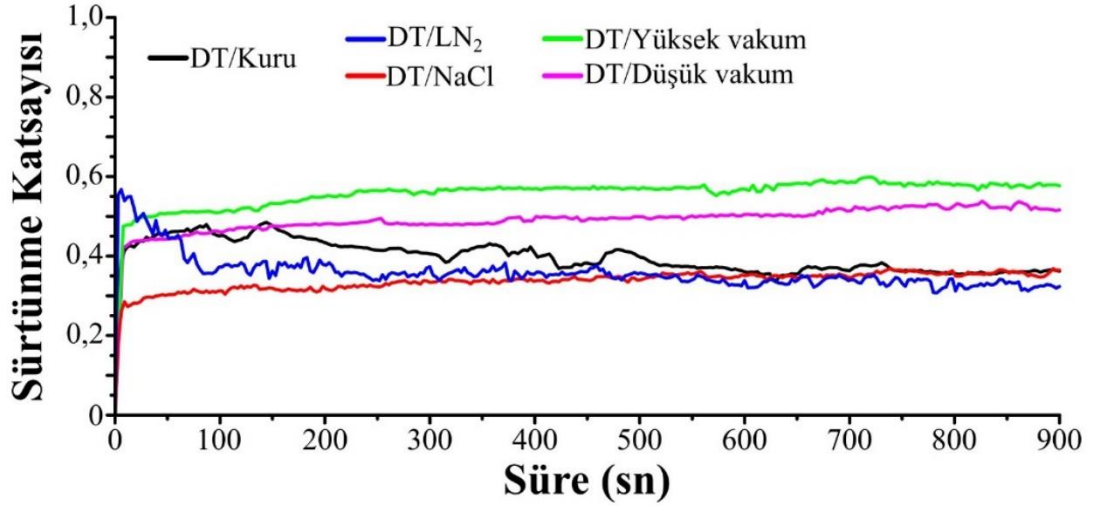


b

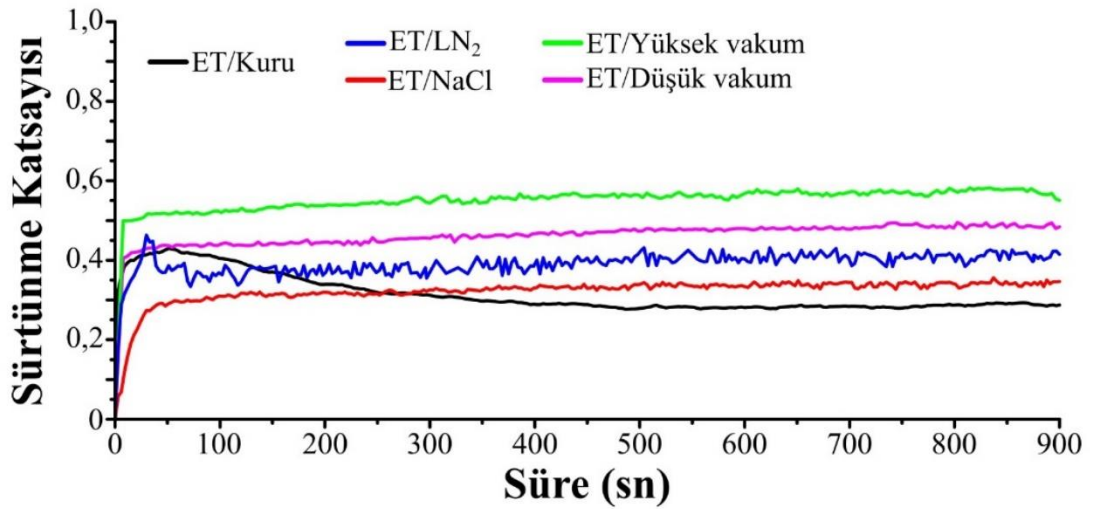
Şekil 4.18. ER+Mo₃C₂ emdirilmiş numunelere ait sürtünme katsayısı/zaman grafikleri; (a) DT numuneler, (b) ET numuneler.

Şekil 4.19’da ER+Ta₄C₃ emdirilmiş numunelere ait sürtünme katsayısı/zaman grafikleri verilmiştir. Şekil 4.19a’da DT numunelerin grafiği gösterilirken Şekil 4.19b’de ET numunelerin grafiği gösterilmektedir. Vakum ortamlarında yapılan testler, ER+Mo₃C₂ numunelerine vakum ortamında yapılan testlerle benzer bir sonuç göstermektedir. Oksijen oranının düşük olduğu vakum ortamında oksidasyonun azalmasıyla sürtünme katsayılarının artış gösterdiği görülmektedir. LN₂ ortamında yapılan testlerde baskın bir rodaj (run in period) süreci göze çarpmaktadır. Hem DT hem de ET numunelerde bu rodaj süresi benzer sürede tamamlanmış ve sürtünme katsayıları nispeten stabil bir davranış sergilemiştir.





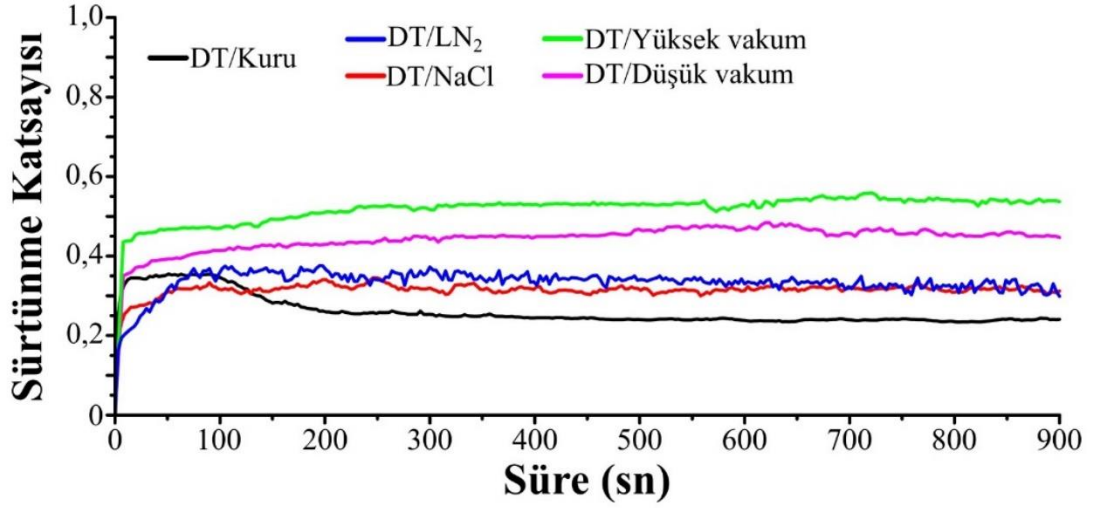
a



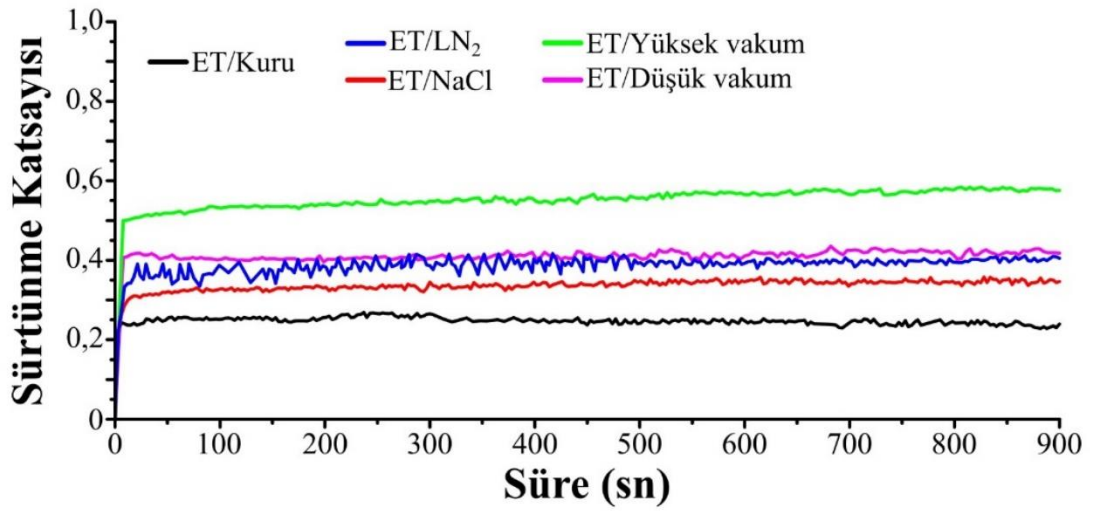
b

Şekil 4.19. ER+Ta₄C₃ emdirilmiş numunelere ait sürtünme katsayısı/zaman grafikleri; (a) DT numuneler, (b) ET numuneler.

Şekil 4.20’de ER+Ti₃C₂ emdirilmiş numunelere ait sürtünme katsayısı/zaman grafikleri verilmiştir. Şekil 4.20a’da DT numunelerin grafiği gösterilirken Şekil 4.20b’de ET numunelerin grafiği gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde yine vakumun etkisiyle artan sürtünme kuvvetleri göze çarpmaktadır. En düşük sürtünme katsayısı kuru ortamda yapılan sürtünme testlerinden elde edilmiştir. ET numunelerde LN₂ ortamı, sürtünme katsayısını iyice artırarak neredeyse düşük vakum ortamında yapılan testle aynı değerlere ulaştırdığı görülmektedir.



a



b

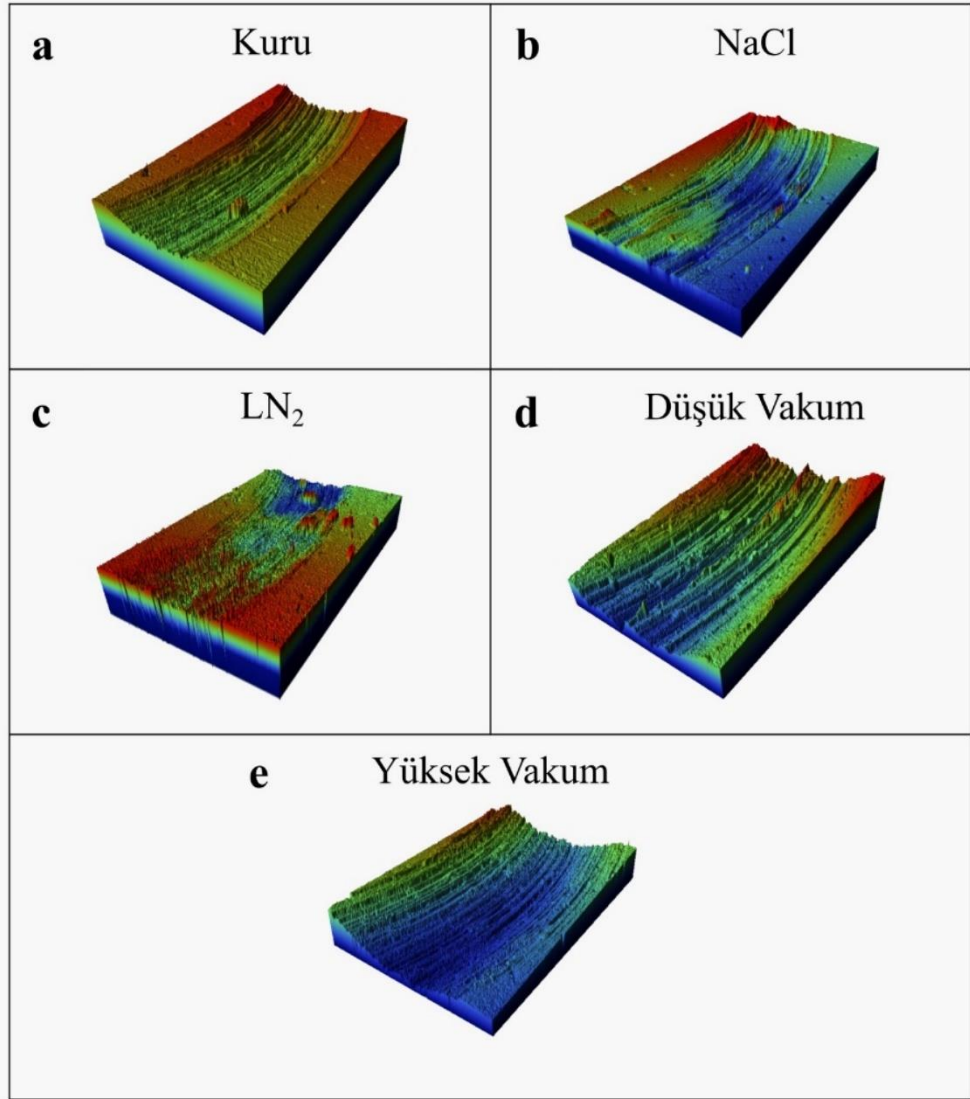
Şekil 4.20. ER+Ti₃C₂ emdirilmiş numunelere ait sürtünme katsayısı/zaman grafikleri; (a) DT numuneler, (b) ET numuneler.

Verilen tüm grafikler tek bir perspektiften incelenecek olursa; genel olarak kuru ve vakum ortamında yapılan testlerde Ti₃C₂, sürtünme açısından en ideal sonuçları verirken, kriyojenik şartlarda Mo₃C₂ daha ideal davranış göstermiştir. NaCl ortamında ise MXene katkılı tüm numuneler benzer sonuçları vermiştir.

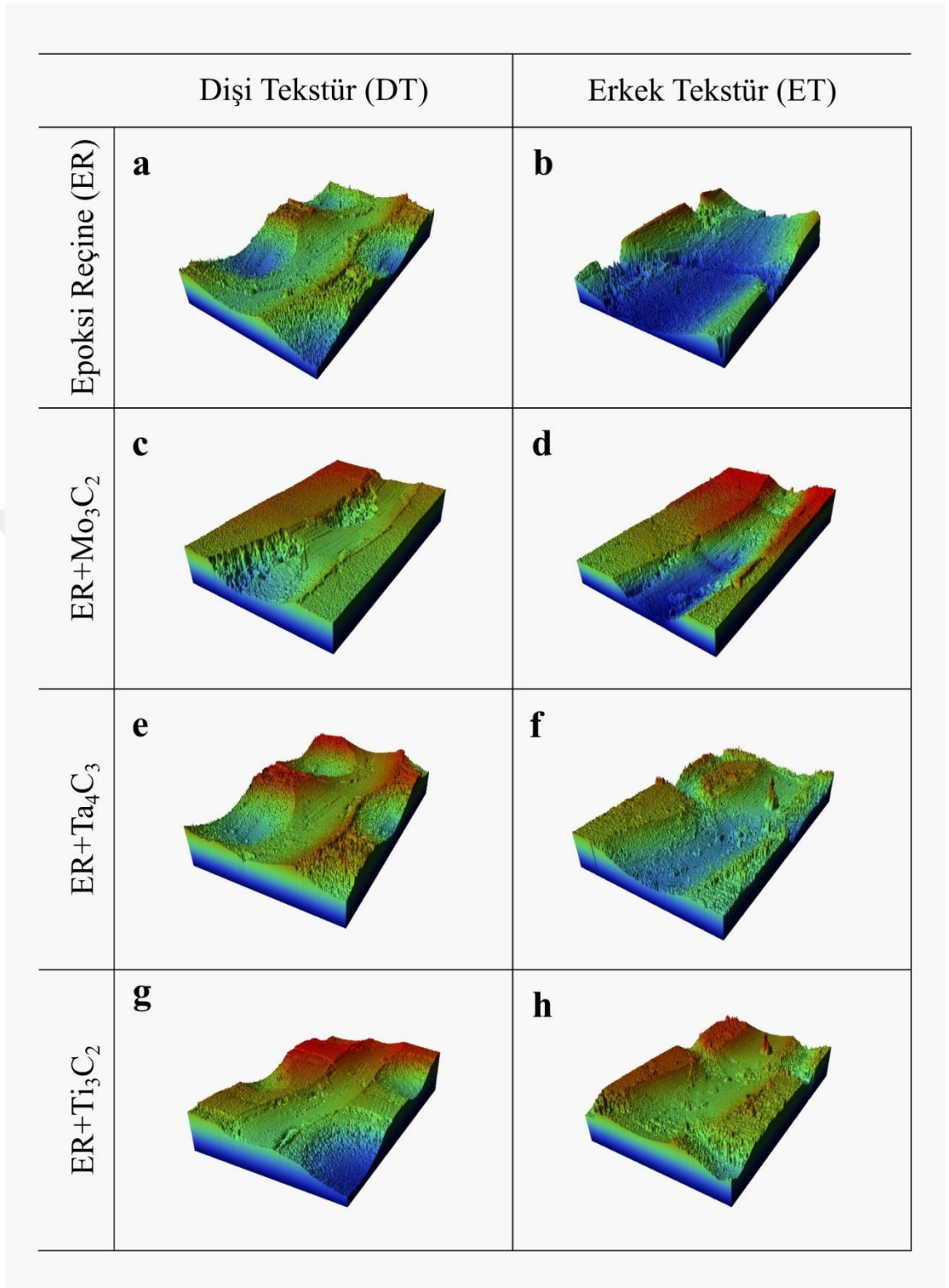
4.5.3. Aşınma analizleri

Şekil 4.21’de TSZ numunelerden elde edilen tüm ortam şartlarındaki, Şekil 4.22’de DT ve ET numunelerden elde edilen kuru ortam şartlarındaki, Şekil 4.23’te DT ve ET numunelerden elde edilen kriyojenik LN₂ ortam şartlarındaki, Şekil 4.24’te DT ve ET numunelerden elde edilen NaCl çözeltisi ortamındaki, Şekil 4.25’te DT ve ET numunelerden elde edilen düşük vakum ortamındaki ve 4.26’da DT ve ET numunelerden elde edilen yüksek vakum ortamındaki aşınma testleri sonrası 3B profilometre görüntüleri verilmiştir. Aşınma oranları bu görüntülerin verilerinden elde edilerek hesaplanmıştır.

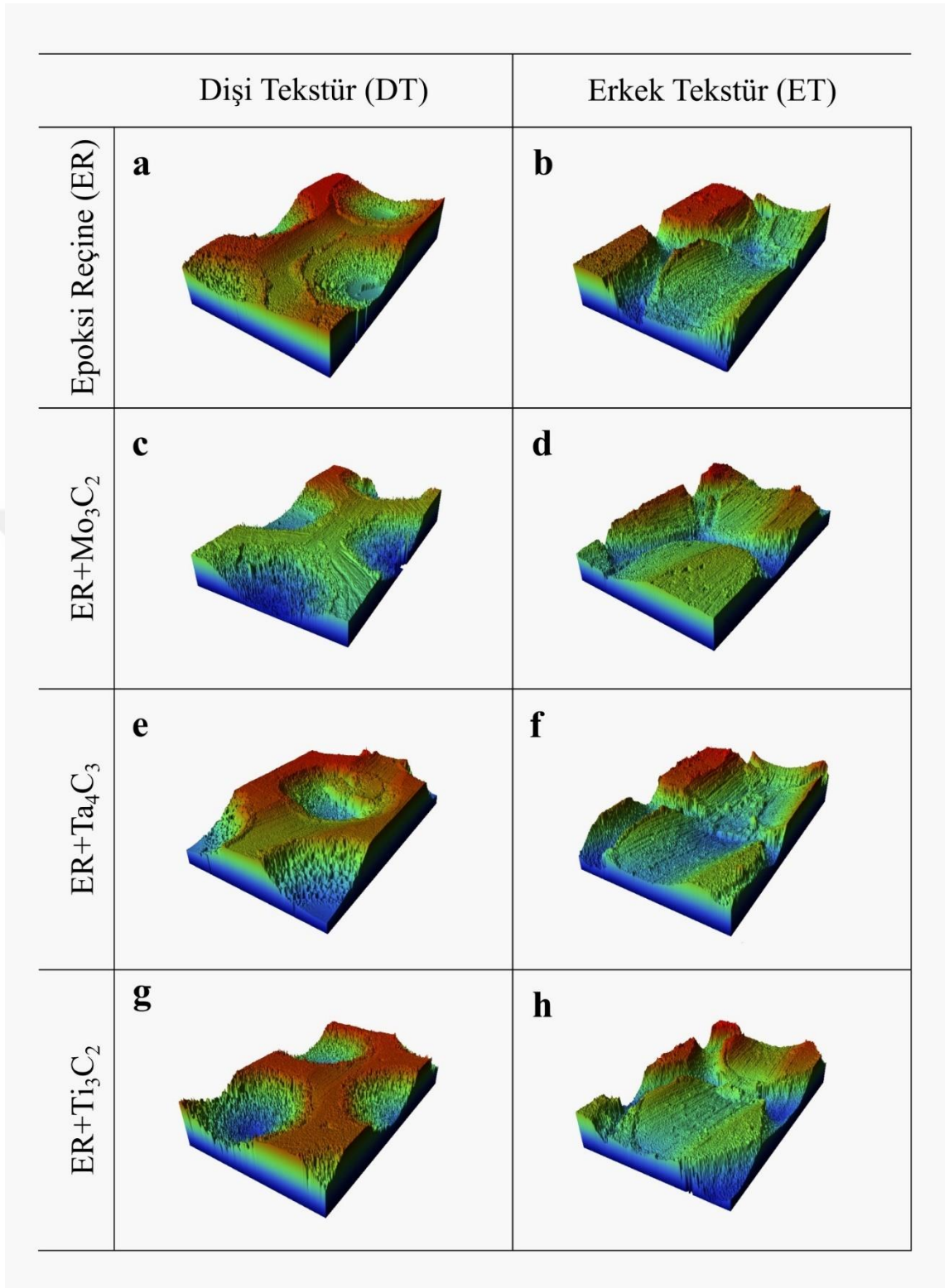




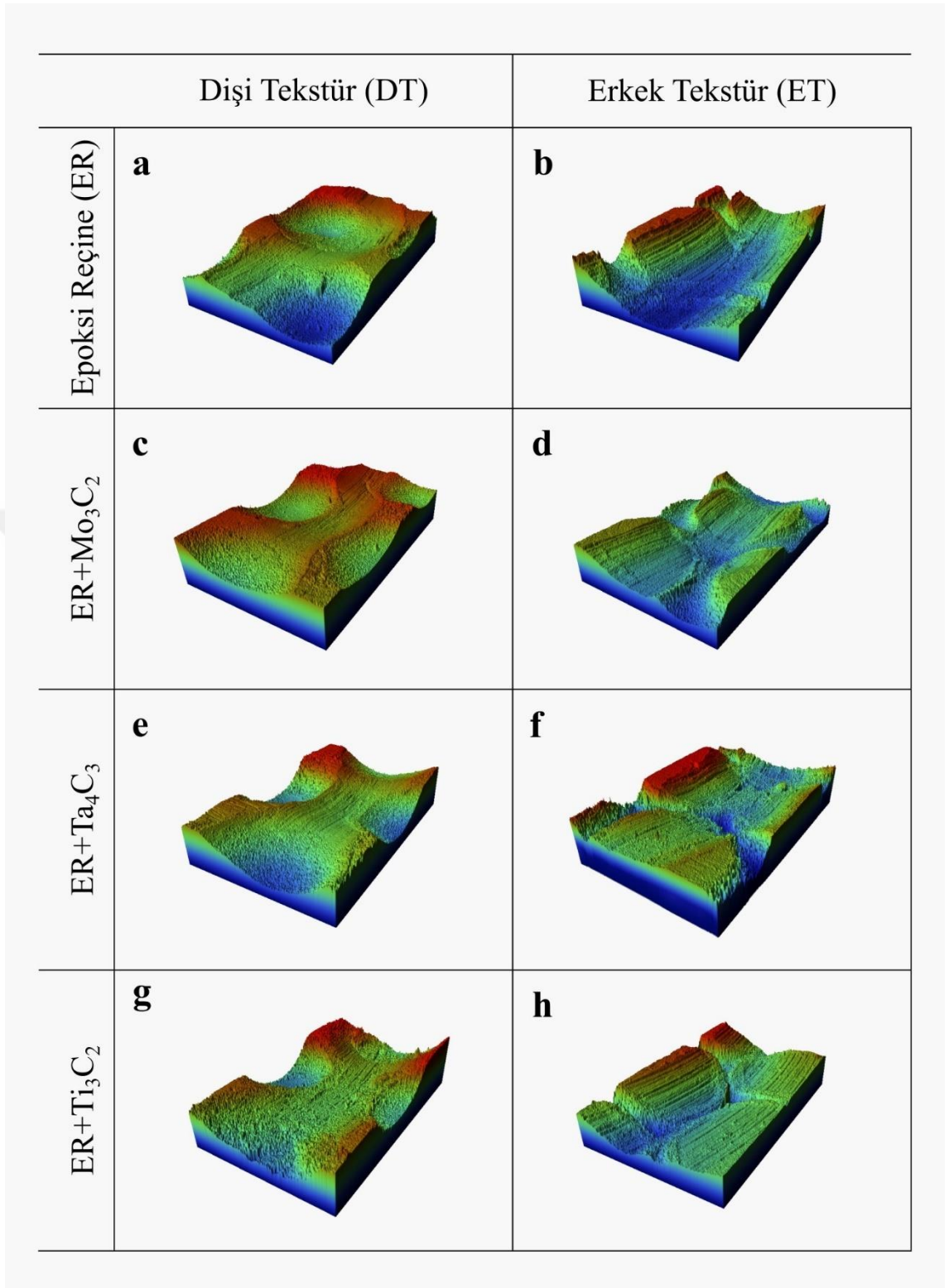
Şekil 4.21. Ti6Al4V Tekstürsüz (TSZ) numunelere ait 3B Profilometre görüntüleri; (a) Kuru, (b) NaCl, (c) LN₂, (d) düşük vakum, (e) yüksek vakum.



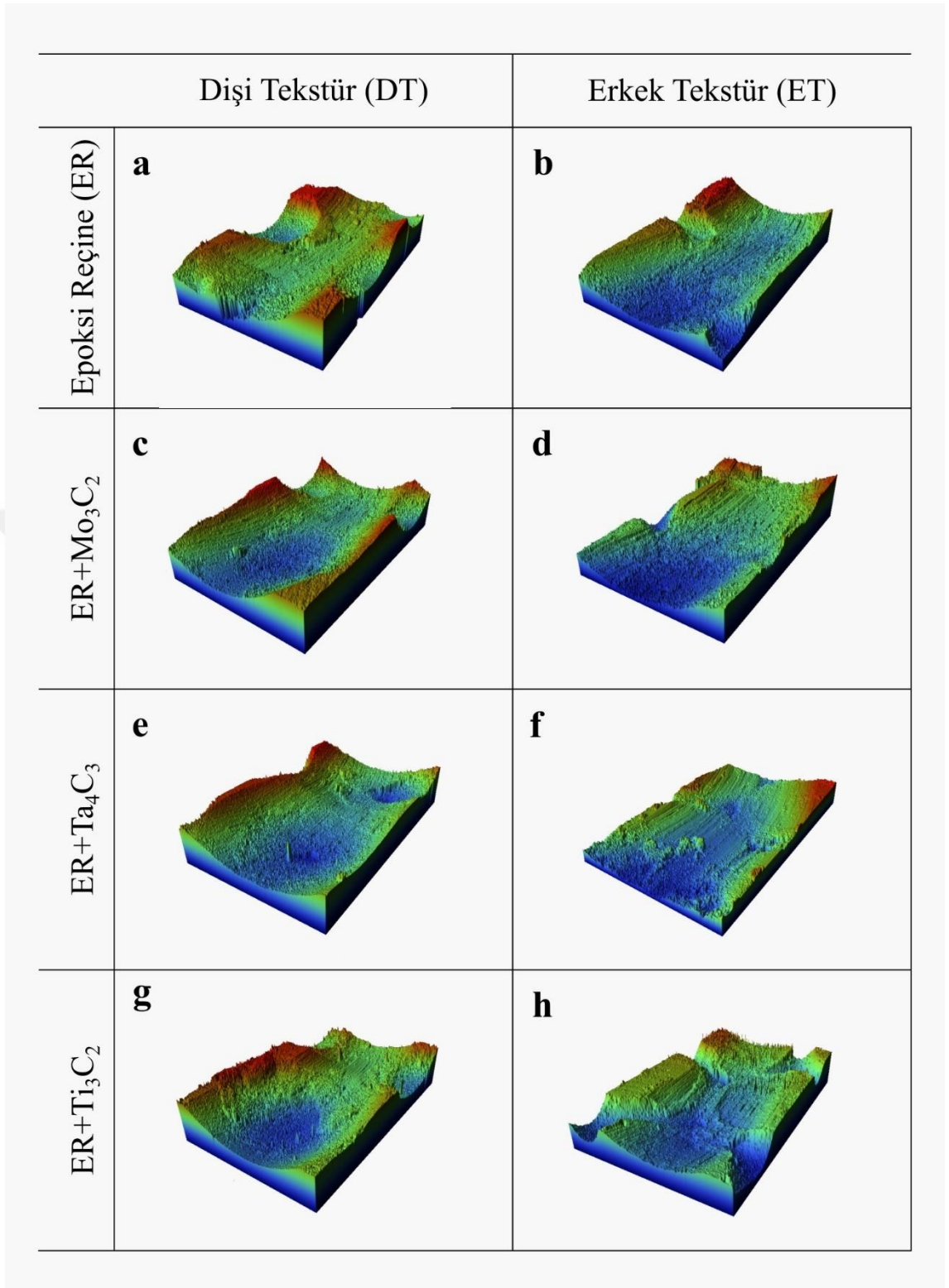
Şekil 4.22. Kuru ortamda yapılan testlerin 3B Profilometre görüntüleri; (a) DT/ER, (b) ET/ER, (c) DT/ER+Mo₃C₂, (d) ET/ER+Mo₃C₂, (e) DT/ER+Ta₄C₃, (f) ET/ER+Ta₄C₃, (g) ET/ER+Ti₃C₂, (h) ET/ER+Ti₃C₂.



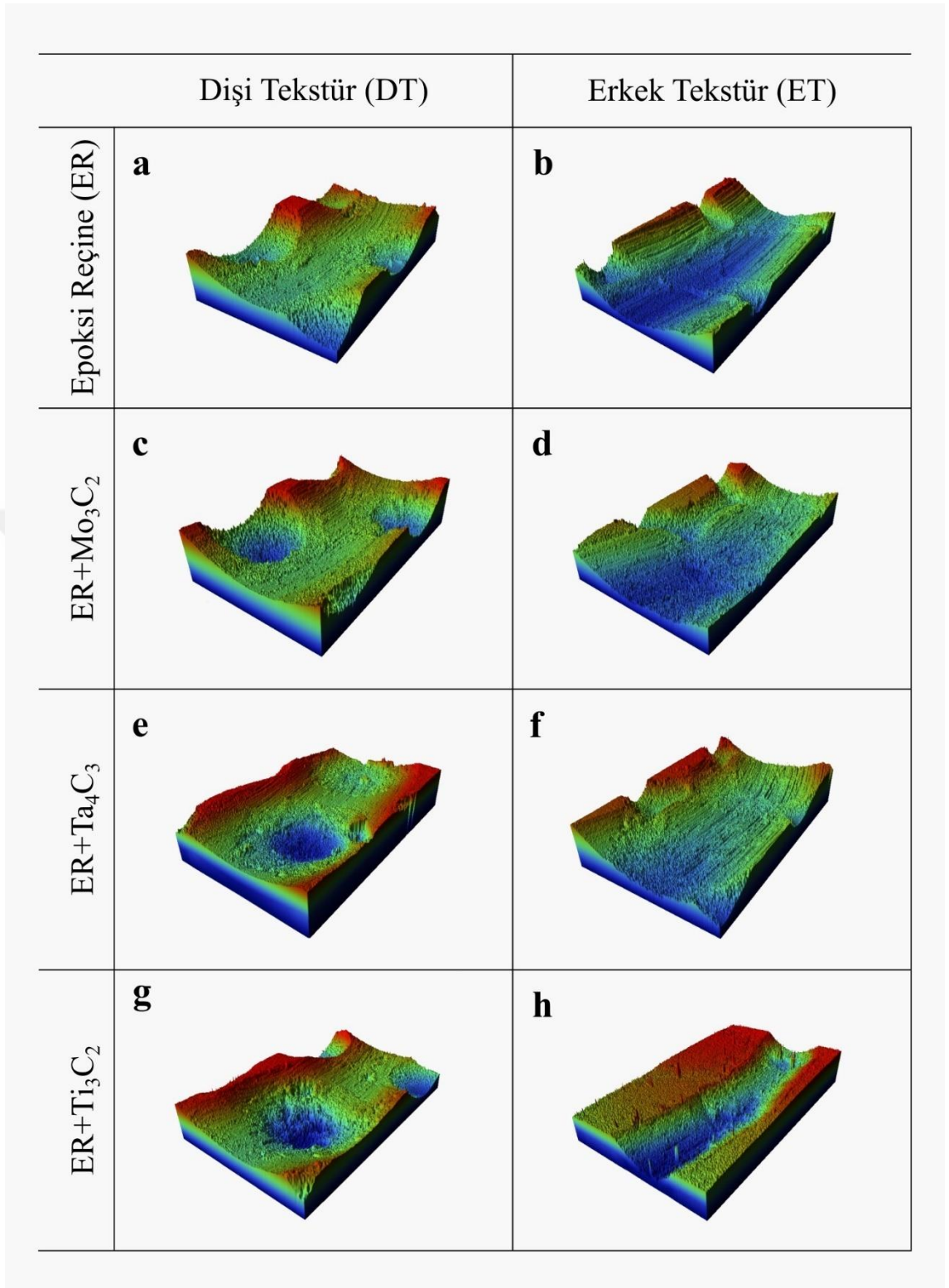
Şekil 4.23. LN₂ ortamında yapılan testlerin 3B Profilometre görüntüleri; (a) DT/ER, (b) ET/ER, (c) DT/ER+Mo₃C₂, (d) ET/ER+Mo₃C₂, (e) DT/ER+Ta₄C₃, (f)ET/ER+Ta₄C₃, (g)ET/ER+Ti₃C₂, (h) ET/ER+Ti₃C₂.



Şekil 4.24. NaCl ortamında yapılan testlerin 3B Profilometre görüntüleri; (a) DT/ER, (b) ET/ER, (c) DT/ER+Mo₃C₂, (d) ET/ER+Mo₃C₂, (e) DT/ER+Ta₄C₃, (f) ET/ER+Ta₄C₃, (g) ET/ER+Ti₃C₂, (h) ET/ER+Ti₃C₂.



Şekil 4.25. Düşük vakum ortamında yapılan testlerin 3B Profilometre görüntüleri; (a) DT/ER, (b) ET/ER, (c) DT/ER+Mo₃C₂, (d) ET/ER+Mo₃C₂, (e) DT/ER+Ta₄C₃, (f) ET/ER+Ta₄C₃, (g) ET/ER+Ti₃C₂, (h) ET/ER+Ti₃C₂.



Şekil 4.26. Yüksek vakum ortamında yapılan testlerin 3B Profilometre görüntüleri; (a) DT/ER, (b) ET/ER, (c) DT/ER+Mo₃C₂, (d) ET/ER+Mo₃C₂, (e) DT/ER+Ta₄C₃.

Şekil 4.27’de aşınma oranları grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde tekstürsüz (TSZ) yapıdaki numunelerin aşınma oranlarının MXene katkılı veya katkısız ER

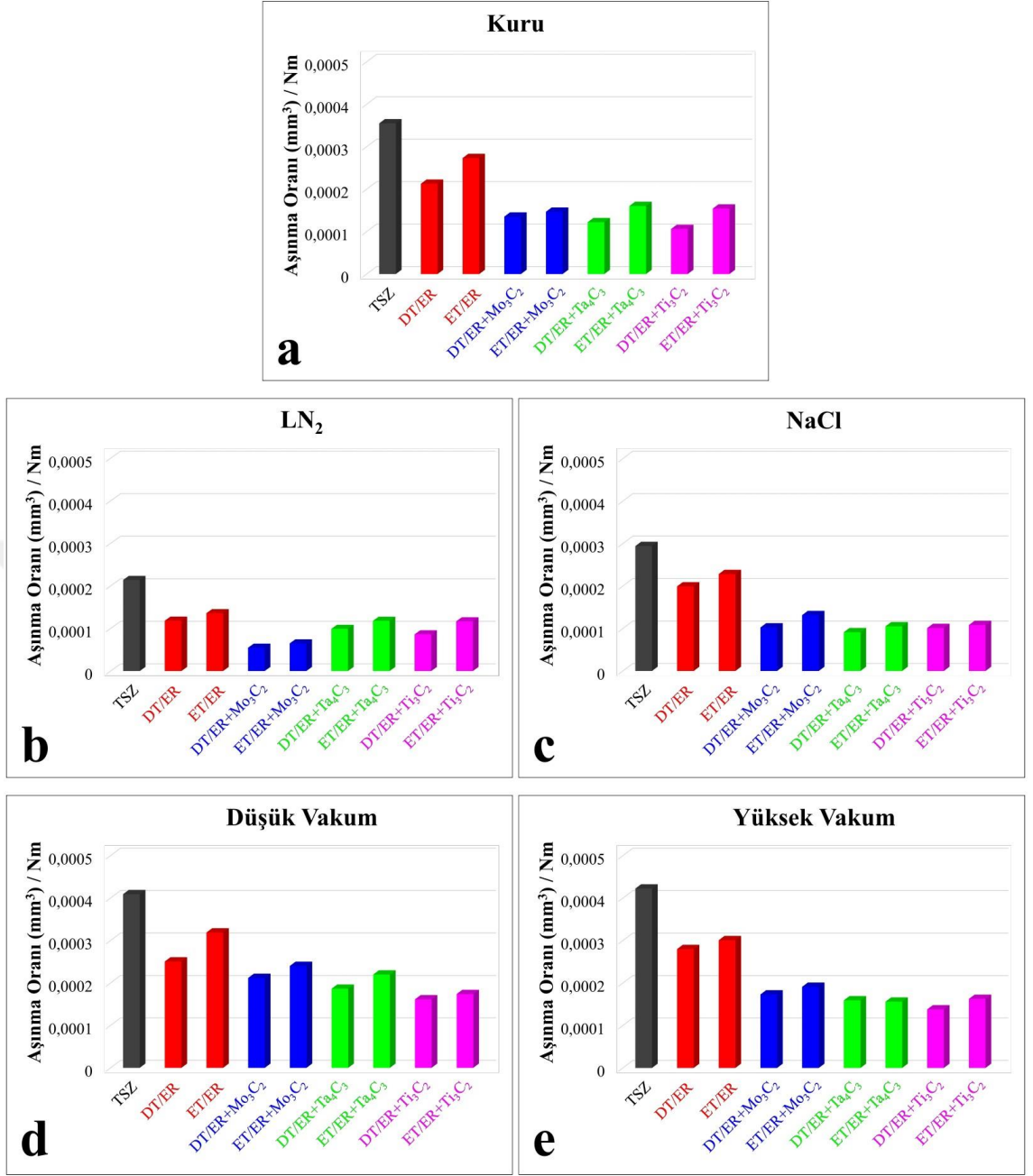
emdirilen tüm numunelere göre net olarak fazla olduğu görülmektedir. Bu sonuç, tezin amacına vardığını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Ayrıca genel olarak vakum ortamında yapılan testlerde aşınma izinin kesit alanının fazla olması sonucu aşınma hacminin ve dolayısıyla da aşınma oranının fazla olduğu görülmektedir. Kuru ortamda yapılan testlerin ise LN_2 ve NaCl çözeltisi ortamında yapılan testlere göre fazla aşınma gösterdiği göze çarpmaktadır.

Grafiklerin DT numuneleri incelendiğinde tek başına ER katkısının kuru ortamda TSZ numuneye göre $\approx 40\%$, kriyojenik LN_2 ortamında $\approx 44\%$, NaCl çözeltisi ortamında $\approx 32\%$, düşük vakum ortamında $\approx 38\%$ ve yüksek vakum ortamında $\approx 33\%$ daha az aşındığı görülmüştür. Yapıya Mo_3C_2 eklendiğinde bu sayılar; kuru ortamda $\approx 61\%$, kriyojenik LN_2 ortamında $\approx 74\%$, NaCl çözeltisi ortamında $\approx 65\%$, düşük vakum ortamında $\approx 48\%$ ve yüksek vakum ortamında $\approx 59\%$ olmaktadır. ER'ye Ta_4C_3 katkılıandığında TSZ numuneye göre kuru ortamda $\approx 65\%$, kriyojenik LN_2 ortamında $\approx 53\%$, NaCl çözeltisi ortamında $\approx 68\%$, düşük vakum ortamında $\approx 54\%$ ve yüksek vakum ortamında $\approx 62\%$ daha az aşındığı görülmüştür. ER+ Ti_3C_2 numunelerde ise TSZ numuneye göre kuru ortamda $\approx 70\%$, kriyojenik LN_2 ortamında $\approx 59\%$, NaCl çözeltisi ortamında $\approx 65\%$, düşük vakum ortamında $\approx 60\%$ ve yüksek vakum ortamında $\approx 67\%$ daha az aşındığı görülmüştür.

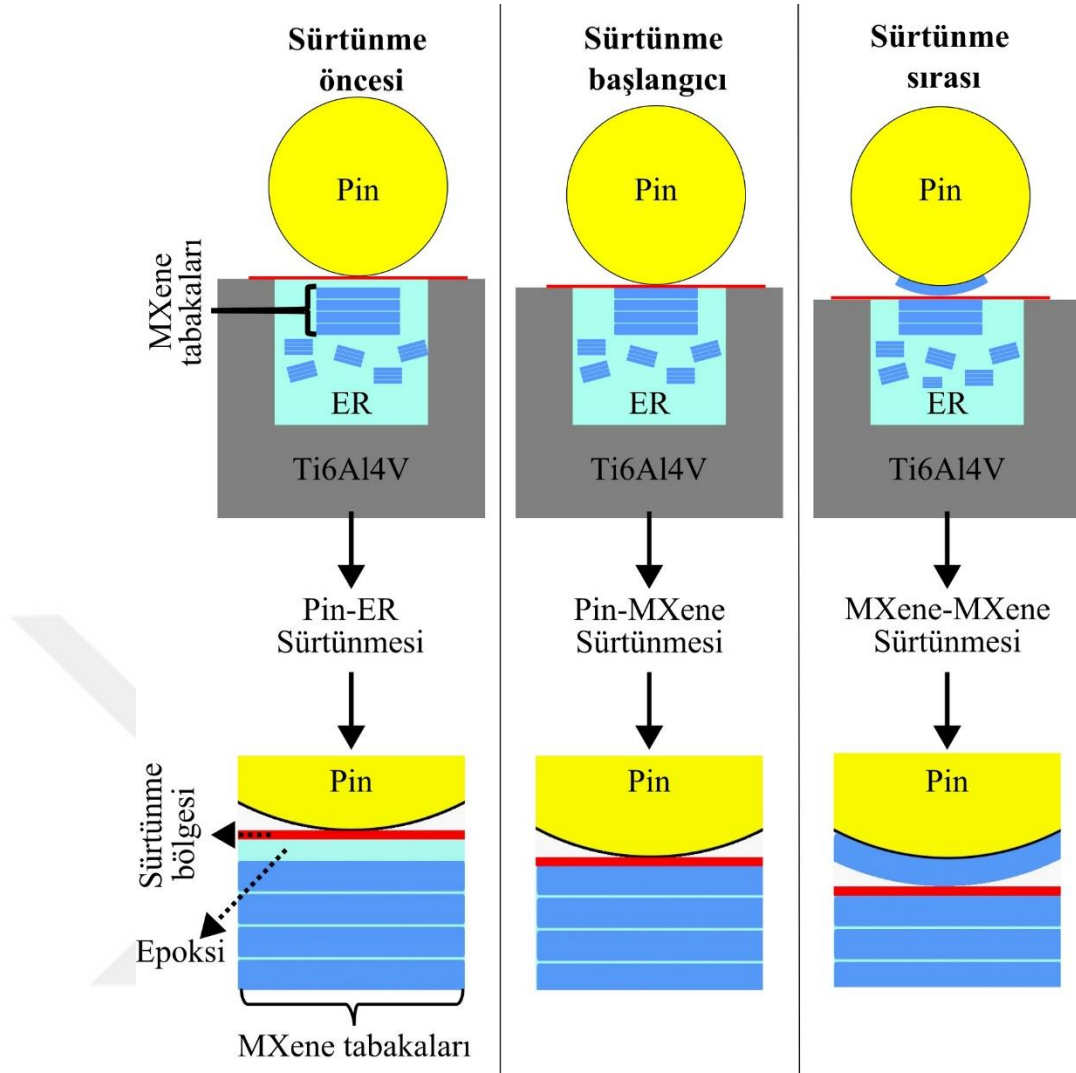
Grafiklerin ET numuneleri incelendiğinde ise sadece ER katkısının kuru ortamda TSZ numuneye göre $\approx 23\%$, kriyojenik LN_2 ortamında $\approx 36\%$, NaCl çözeltisi ortamında $\approx 22\%$, düşük vakum ortamında $\approx 22\%$ ve yüksek vakum ortamında $\approx 28\%$ daha az aşındığı görülmüştür. Yapıya Mo_3C_2 eklendiğinde bu sayılar; kuru ortamda $\approx 58\%$, kriyojenik LN_2 ortamında $\approx 69\%$, NaCl çözeltisi ortamında $\approx 55\%$, düşük vakum ortamında $\approx 41\%$ ve yüksek vakum ortamında $\approx 54\%$ olmaktadır. ER'ye Ta_4C_3 katkılıandığında TSZ numuneye göre kuru ortamda $\approx 54\%$, kriyojenik LN_2 ortamında $\approx 44\%$, NaCl çözeltisi ortamında $\approx 64\%$, düşük vakum ortamında $\approx 46\%$ ve yüksek vakum ortamında $\approx 63\%$ daha az aşındığı görülmüştür. ER+ Ti_3C_2 numunelerde ise TSZ numuneye göre kuru ortamda $\approx 56\%$, kriyojenik LN_2 ortamında $\approx 45\%$, NaCl çözeltisi ortamında $\approx 63\%$, düşük vakum ortamında $\approx 57\%$ ve yüksek vakum ortamında $\approx 61\%$ daha az aşındığı görülmüştür.

Grafiklerde ET numunelerin hepsi DT numunelere göre daha fazla aşındığı görülmektedir. Bu durum ET numunelerin üst görünümünden yüzey alanının DT

numunelere göre daha fazla Ti6Al4V malzemeden oluşmasıyla ilgilidir. Sürtünme grafiklerinde de bahsedildiği gibi hem ER hem de ona katkılanan 2B MXene tozlar katı yağlayıcı görevi görmektedir. ER aşınma sırasında plastik deformasyona uğrayarak yüzeye sıvanmak suretiyle metal matrisi korumaktadır. MXene ise ER'nin plastik deformasyonu sonucu serbest hale geçtiğinden ve aşınma hareketiyle tabakalarının arasındaki zayıf van der Waals bağları koptuğundan tabakaların bir kısmı pine bir kısmı ise numune yüzeyine tutunarak numuneyi korumaktadır. Böylece sürtünmenin gerçekleştiği yüzeyler pin (Al_2O_3) ile ER sürtünmesi yerine çok parçaya bölünen MXene tabakaları arasında MXene-MXene sürtünmesi meydana gelir. Bu olay sonucu aşınma mekanizması ikili temas aşınmasından üçlü temas aşınmasına geçişin bir örneğidir (Gates 1998). Bu durum, mekanizmanın daha anlaşılır şekilde açıklanması için şematik olarak Şekil 4.28'de verilmiştir.



Şekil 4.27. Aşınma oranları grafikleri; (a) Kuru, (b) LN₂, (c) NaCl, (d) düşük vakum, (e) yüksek vakum.



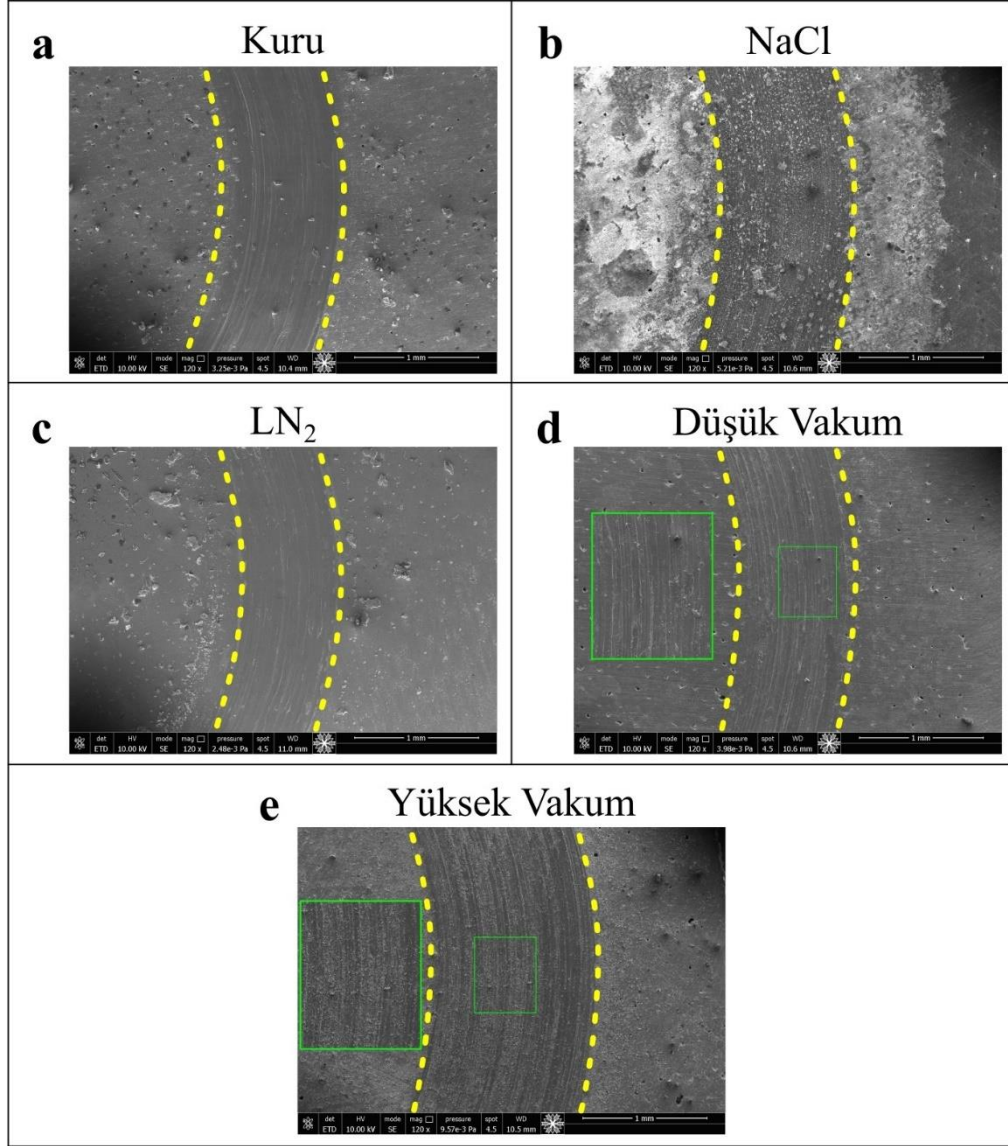
Şekil 4.28. MXene katkısının tribolojik olarak Ti6Al4V matrisi ve ER'yi koruma mekanizması.

Aşınma Bölgesi SEM Analizleri

Şekil 4.29'da TSZ numunelerin farklı ortamlardaki aşınma testleri sonrası aşınma izi SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde aşınma iz genişliği en düşük LN_2 ortamında yapılan teste ait numuneden, en yüksek ise yüksek vakum ortamında yapılan testten elde edildiği görülmektedir. Görüntülere bakıldığında tüm numunelerin yüzeylerinde debriler (kalıntılar) görülmektedir. NaCl ortamında yapılan testlerde Şekil 4.29b) yüzeyde kalıntı NaCl kristalleri ve şiddetli korozyon bölgeleri dikkat çekmektedir. Vakum ortamlarında yapılan testlerde (Şekil 4.29d ve Şekil 4.29e) özellikle çizgisel yüzey çukurlarının varlığı göze çarpmaktadır. Bu durum abraziv aşınmanın belirtisidir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Abraziv aşınma, sürtünme hareketi sonucu ortaya çıkan debrilerin yüzeyi çizmesi sonucu çizgisel çukurların oluşumuyla sonuçlanmaktadır (Y. Li et al. 2023).

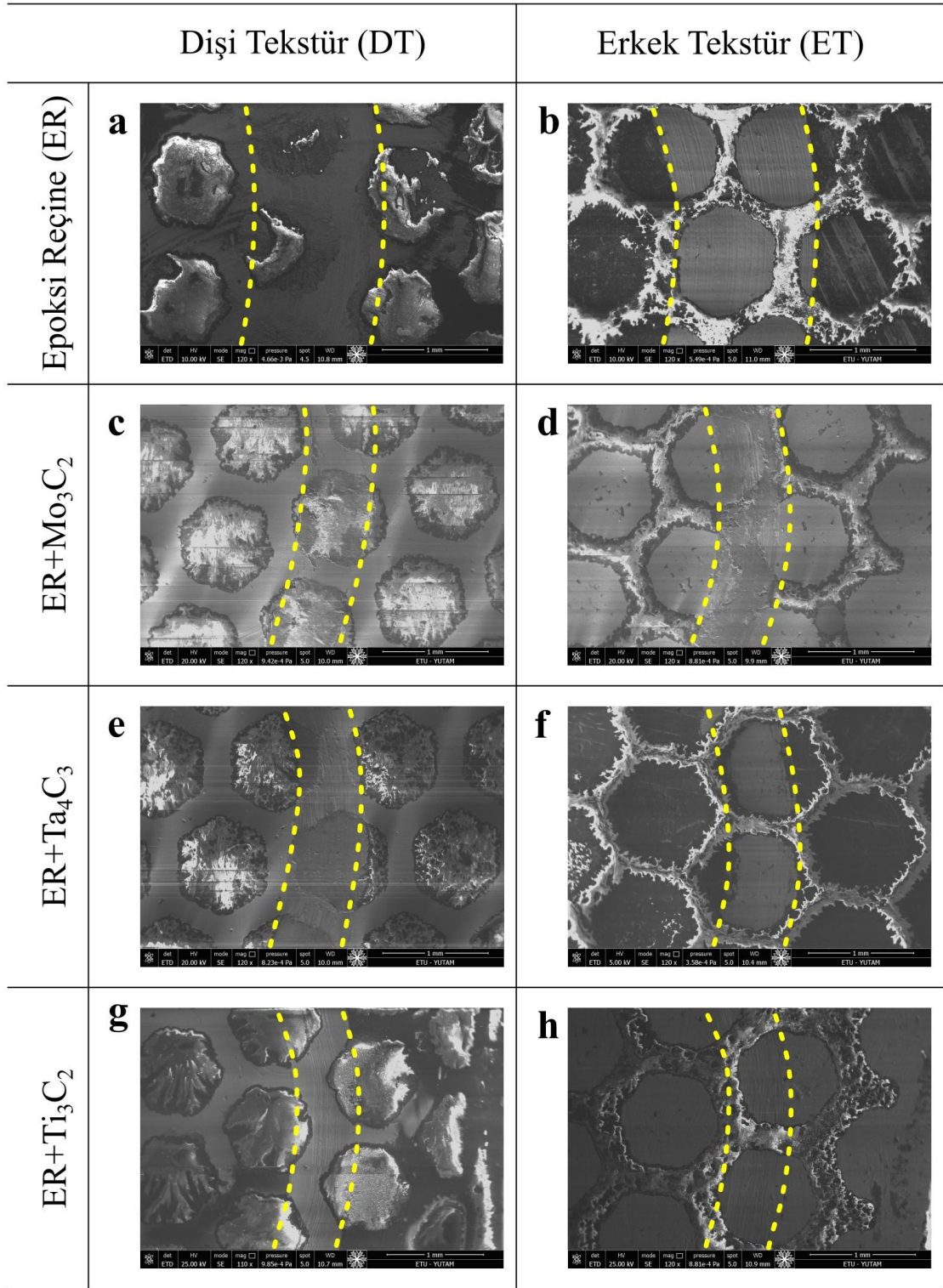


Şekil 4.29. TSZ numunelerin farklı ortamlarda yapılan aşınma testlerinin izlerine ait SEM görüntüleri; (a) Kuru, (b) NaCl, (c) LN₂, (d) düşük vakum, (e) yüksek vakum.

Şekil 4.30'da DT ve ET numunelerin kuru ortamda yapılan aşınma testlerinin izlerine ait SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde numunelerde aşınma izi bölgesinde kalan tekstürlerin içerisindeki MXene katkılı veya katkısız epoksi reçinelerin plastik deformasyona uğrayarak yüzeye sıvandığı göze çarpmaktadır. Bu durum Şekil 4.28'de bahsedilen olayın oluşumudur. Numunelerin genelinde bu olay sonucu adeziv (yapışmalı) aşınma belirtileri daha baskın görülmektedir. Fakat Şekil 4.30b'de verilen

ET/ER numunede abraziv aşınmanın izleri daha baskındır. Bu durum yüzeyden kopan Ti6Al4V parçaların aşınma bölgesine girmesiyle açıklanabilir.

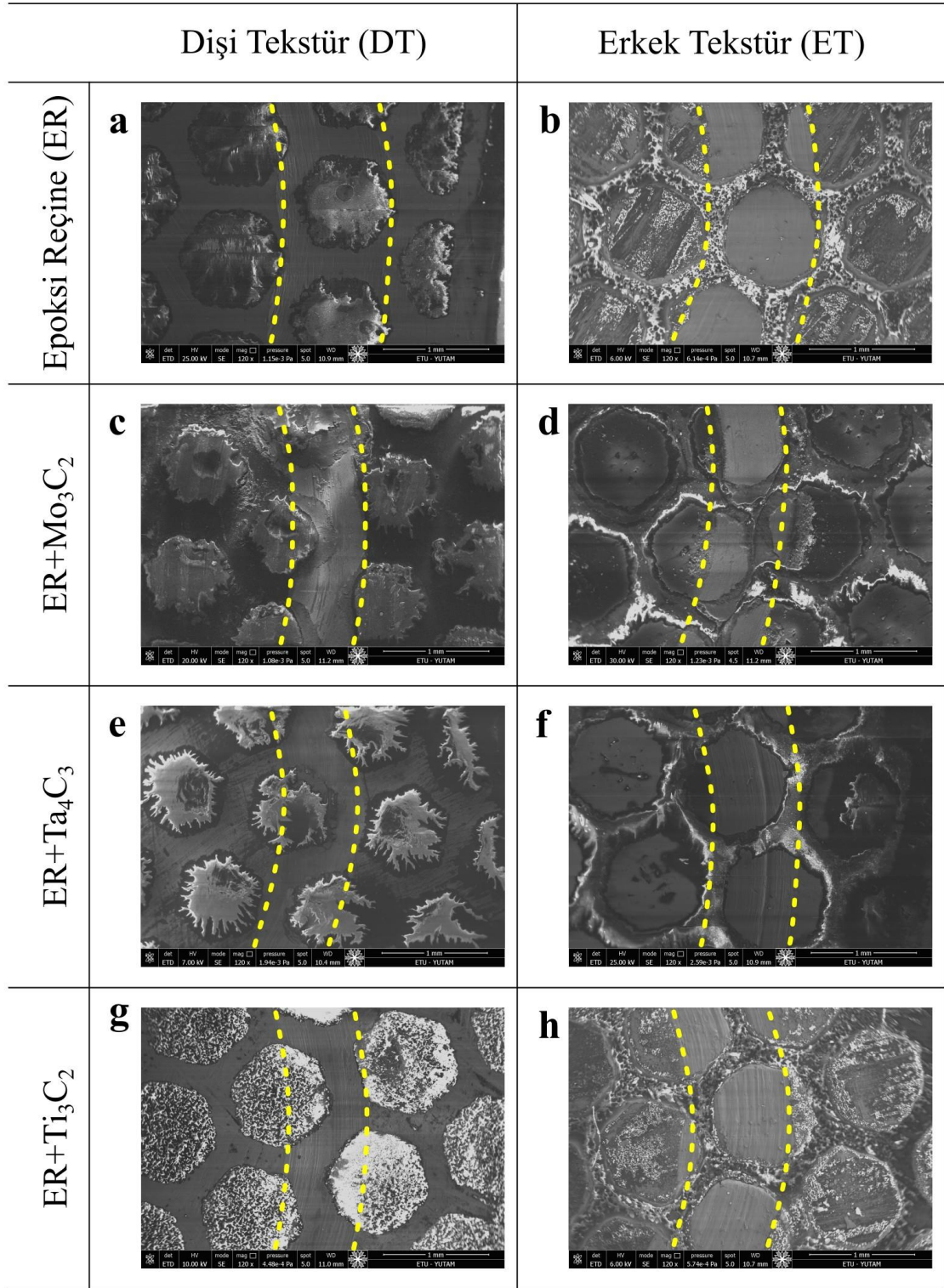




Şekil 4.30. DT ve ET numunelerin kuru ortamda yapılan aşınma testlerinin izlerine ait SEM görüntüleri; (a) DT/ER, (b) ET/ER, (c) DT/ER+Mo₃C₂, (d) ET/ER+Mo₃C₂, (e) DT/ER+Ta₄C₃, (f) ET/ER+Ta₄C₃, (g) DT/ER+Ti₃C₂, (h) ET/ER+Ti₃C₂.

şekil 4.31’de DT ve ET numunelerin NaCl özelti ortamında yapılan aşınma testlerinin izlerine ait SEM görüntüleri verilmiştir. Numunelerin hiçbirinde çizgisel çukur oluşumunun görülmemesi aşınma mekanizmasının adeziv aşınma olduğunu göstermektedir. Bu durum sürtünme katsayıları grafiklerinin anlatıldığı kısımda bahsedildiğı gibi aşınma sonucu oluşan debrilerin, NaCl özeltisinin dinamik hareketiyle temas bölgesinden uzaklaştırılmasının bir etkisidir.

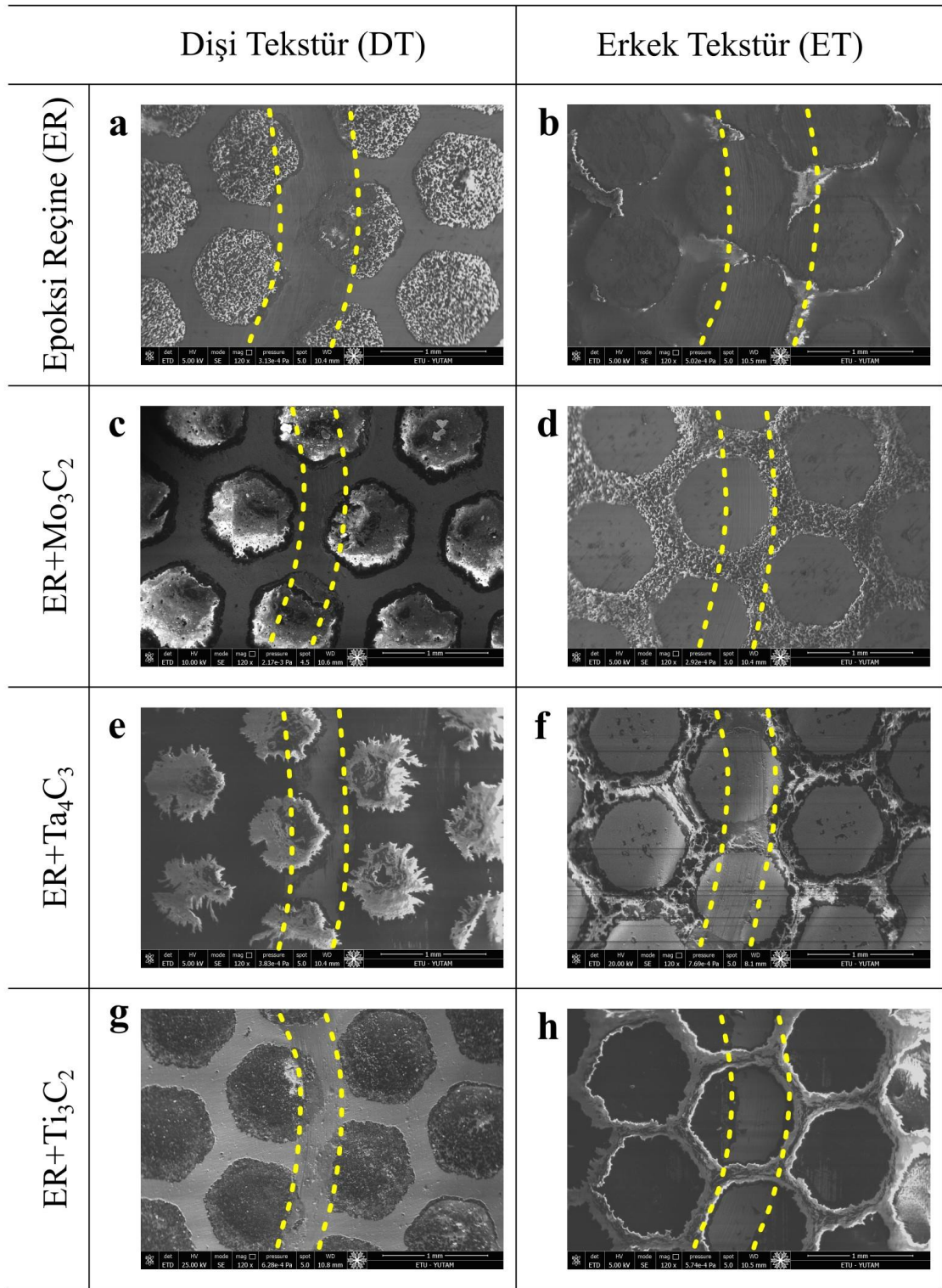




Şekil 4.31. DT ve ET numunelerin NaCl çözeltisi ortamında yapılan aşınma testlerinin izlerine ait SEM görüntüleri; (a) DT/ER, (b) ET/ER, (c) DT/ER+Mo₃C₂, (d) ET/ER+Mo₃C₂, (e) DT/ER+Ta₄C₃, (f) ET/ER+Ta₄C₃, (g)DT/ER+Ti₃C₂, (h) ET/ER+Ti₃C₂.

Şekil 4.32’de DT ve ET numunelerin kriyojenik LN₂ ortamında yapılan aşınma testlerinin izlerine ait SEM görüntüleri verilmiştir. Şekilde ilk dikkat çeken şey aşınma iz genişliğinin diğer ortamlara göre net bir şekilde dar oluşudur. İzler dikkatle incelendiğinde abraziv aşınmanın oluşturduğu çizgisel çukurlar görülmektedir. Bunun yanı sıra özellikle Şekil 4.32a’da DT/ER numunede adeziv aşınmanın belirtisi olan sıvanma da göze çarpmaktadır.

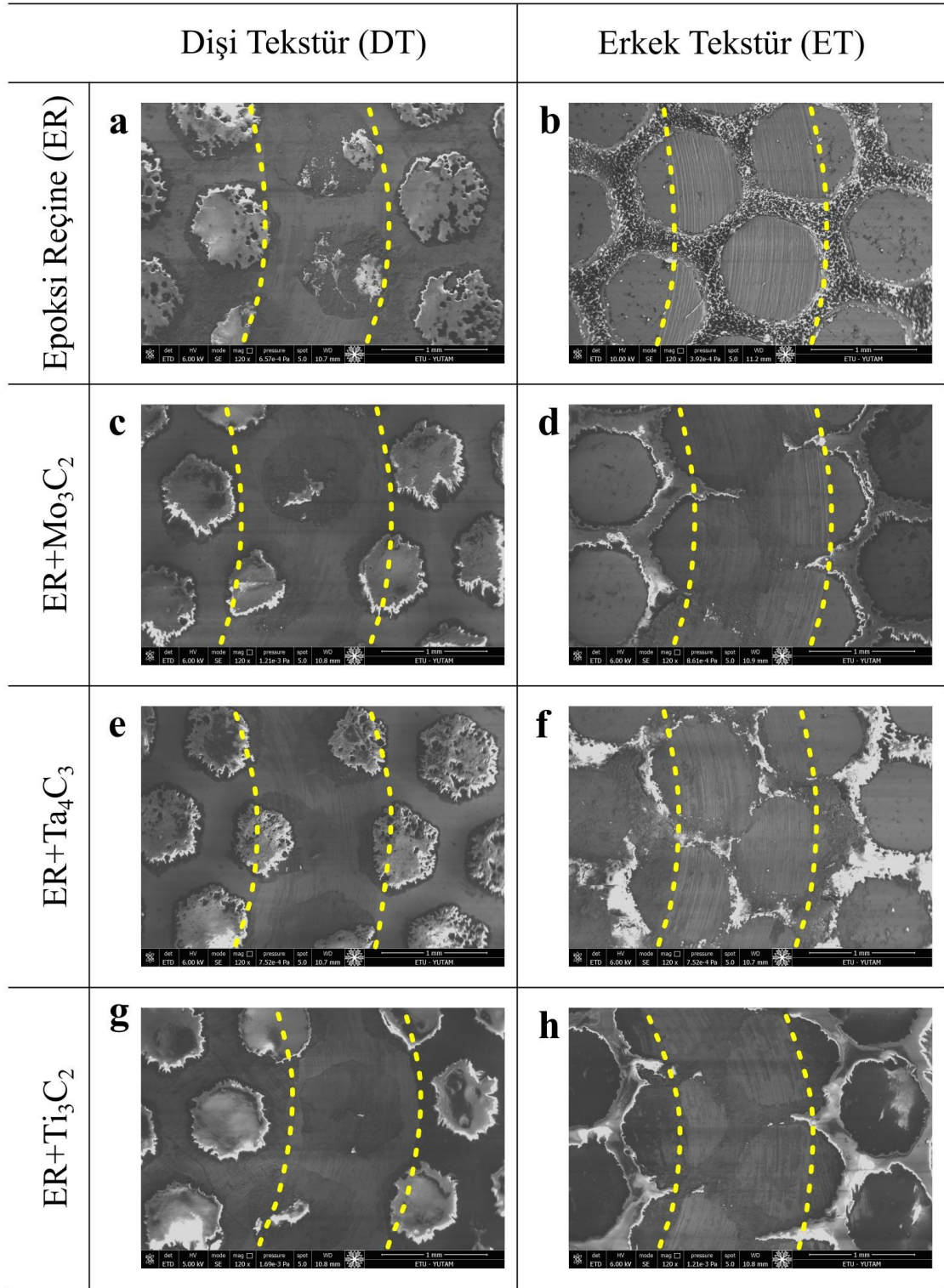




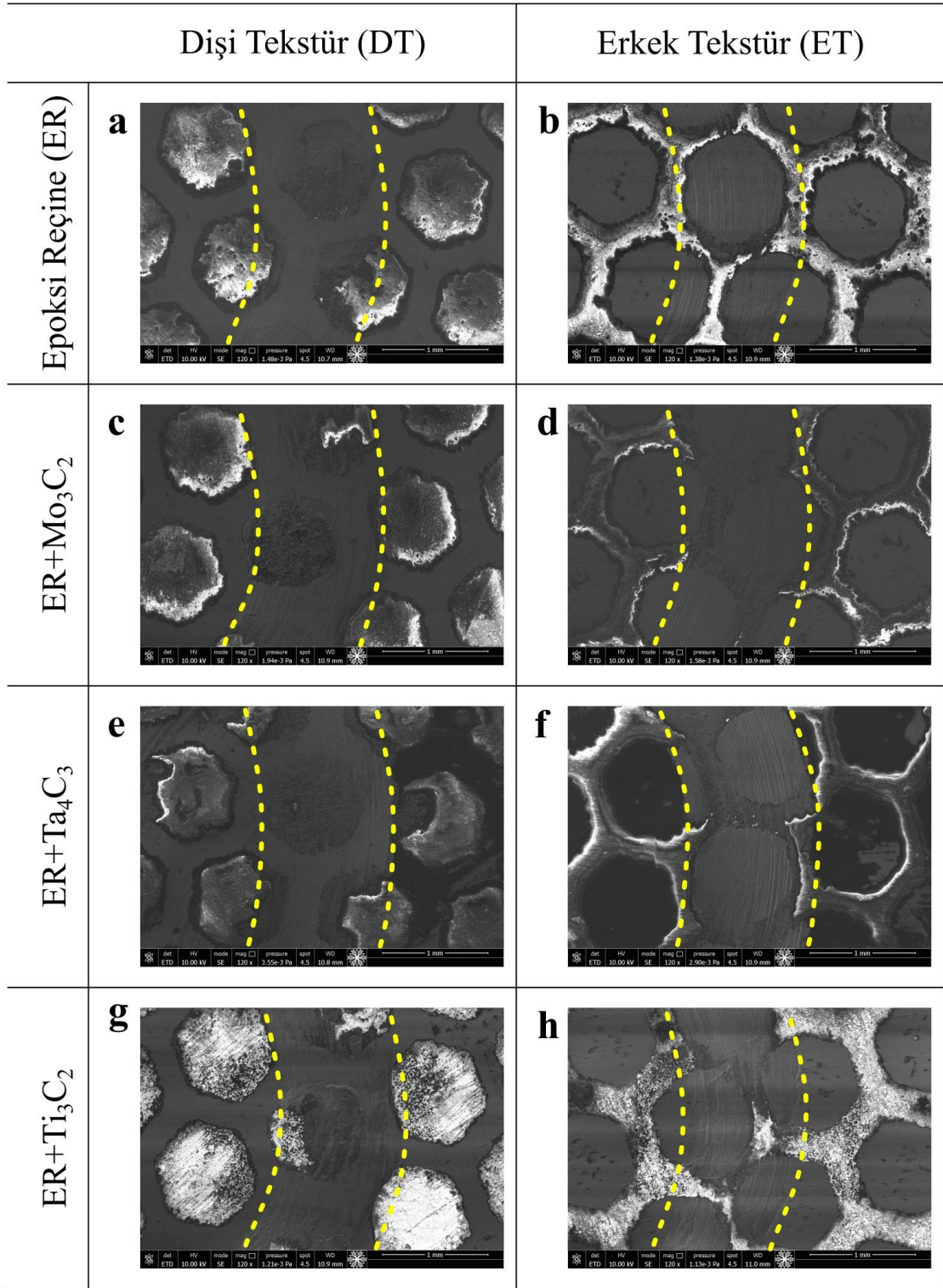
Şekil 4.32. DT ve ET numunelerin kriyojenik LN₂ ortamında yapılan aşınma testlerinin izlerine ait SEM görüntüleri; (a) DT/ER, (b) ET/ER, (c) DT/ER+Mo₃C₂, (d) ET/ER+Mo₃C₂, (e) DT/ER+Ta₄C₃, (f) ET/ER+Ta₄C₃, (g) DT/ER+Ti₃C₂, (h) ET/ER+Ti₃C₂.

Şekil 4.33 ve Şekil 4.34’te DT ve ET numunelerin sırasıyla düşük ve yüksek vakum ortamında yapılan aşınma testlerinin izlerine ait SEM görüntüleri verilmiştir. Vakum ortamının etkisiyle daha önceden bahsedildiği gibi oksidasyonun azalması sonucu yüzeylerde yeniden pasif oksit tabakası oluşmamış ve bu durum sertliği bölgesel olarak düşürerek aşınma oranını arttırmıştır. Buna bağlı olarak da aşınma iz genişlikleri diğer ortamda yapılan testlere göre bariz olarak genişlemiştir. Numunelerin genelinde hem adeziv hem de abraziv aşınma izleri olduğundan heterojen bir aşınma mekanizmasından söz edilmesi mümkündür. Farklı olarak sadece ET/ER numunelerin hem düşük hem de yüksek vakum altında baskın olarak abraziv aşınma eğilimi gösterdiği söylenebilir.



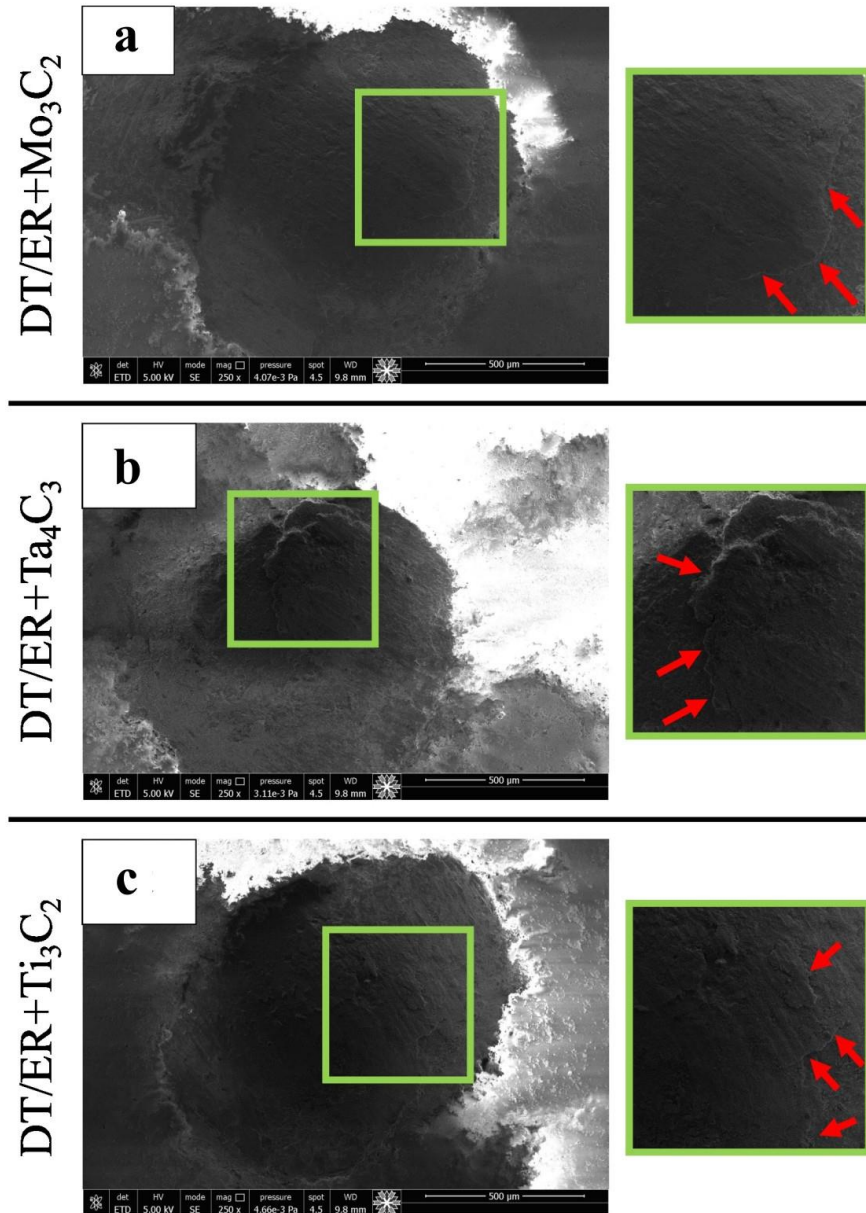


Şekil 4.33. DT ve ET numunelerin düşük vakum ortamında yapılan aşınma testlerinin izlerine ait SEM görüntüleri; (a) DT/ER, (b) ET/ER, (c) DT/ER+Mo₃C₂, (d) ET/ER+Mo₃C₂, (e) DT/ER+Ta₄C₃, (f) ET/ER+Ta₄C₃, (g) DT/ER+Ti₃C₂, (h) ET/ER+Ti₃C₂.



Şekil 4.34. DT ve ET numunelerin yüksek vakum ortamında yapılan aşınma testlerinin izlerine ait SEM görüntüleri; (a) DT/ER, (b) ET/ER, (c) DT/ER+Mo₃C₂, (d) ET/ER+Mo₃C₂, (e) DT/ER+Ta₄C₃, (f) ET/ER+Ta₄C₃, (g) DT/ER+Ti₃C₂, (h) ET/ER+Ti₃C₂.

Şekil 4.35'te kuru şartlarda DT numunelere yapılmış aşınma testinin aşındırıcı pinine ait SEM görüntüsü verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde Şekil 4.28'de anlatılan, aşınma mekanizmasının ikili temas aşınmasından üçlü temas aşınmasına geçişini göstermektedir. Şekilde kırmızı okların gösterdiği yönlere dikkatle bakıldığında ER+MXene malzemelerin, Al_2O_3 aşınma topunun yüzeyine sıvandığı açıkça görülmektedir.



Şekil 4.35. Kuru ortamda DT numunelere yapılmış aşınma testinin aşındırıcı pinine ait SEM görüntüsü; (a) DT/ER+Mo₃C₂, (b) DT/ER+Ta₄C₃, (c) DT/ER+Ti₃C₂.

4.6. Elektrokimyasal Analiz Sonuçları

4.6.1. OCP ve Tafel analizleri

Şekil 4.36’da DT ve ET numunelerin potansiyodinamik polarizasyon ve açık devre potansiyel ölçüm grafikleri verilmiştir. Tekstürsüz Ti6Al4V (TSZ), dişi ve erkek tekstürlü sadece epoksi reçine infiltre edilmiş (ER), dişi ve erkek tekstürlü MXene katkılı epoksi reçine infiltre edilmiş numunelerin tümünün denge potansiyellerinin belirlenmesi amacıyla %3,5’lik NaCl çözeltisi içerisinde 15.000 saniye boyunca açık devre şartlarında tutulmak suretiyle potansiyellerdeki değişimler zamana bağlı olarak ölçülmüştür (OCP). OCP grafiklerine bakıldığında en soy numune DT/ER olduğu görülmektedir. En aktif numune ise ET/ER+Mo₃C₂’dir. Tüm OCP grafiklerinde testin başlangıcına göre potansiyel değerlerin pozitif yönlü bir artışı göze çarpmaktadır. Bu artış yüzeylerin pasifleştiği anlamına gelmektedir. Bütün numunelerde benzer karakterde artış gözlenirken, en belirgin hızlı artış DT/ER numunesinde göze çarpmaktadır. Aynı zamanda TSZ numunesinde belirli bir değere kadar artış gözlendikten sonra ani bir düşüş meydana gelmiştir. Bunun sebebinin, üzerinde herhangi bir koruyucu tabaka olmayan ve yüzeyinin %100 Ti6Al4V alaşımı olması sebebiyle yüzeyde meydana gelmiş olan zayıf pasif oksit tabaksı sayesinde artış ve ani düşüşün olduğu yerde de bu tabakanın ani kırılması ile koruyucu tabakası kalmayan Ti6Al4V’nin yüksek iletkenliğinden kaynaklı olabileceği düşünülmektedir.

Şekil 4.36’da tüm numunelerin potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinde açık devre potansiyel değerlerinin hemen altına ve hemen üzerine kadar olan bölge potansiyel kontrollü bir şekilde taranarak akım yoğunluğu değerleri okunmuştur. Akım yoğunluğu değerleri (I_{corr}), korozyon potansiyelleri (E_{corr}) ve anodik-katodik beta değerlerine bağlı korozyon hızları gibi parametreler Çizelge 4.5’te verilmiştir. Çizelgenin E_{corr} sütununa bakıldığında ET/ER+Mo₃C₂, -495mV korozyon potansiyel değeriyle ilk korozyona uğrayan numune olduğu anlaşılmaktadır. En yüksek mutlak potansiyel korozyon değeri ise DT/ER numuneden okunmuştur (-224mV). Dolayısıyla en geç korozyona uğrayan numunenin bu olduğu söylenebilir. Daha önceden verilen statik temas açılarının değerleri düşünüldüğünde DT/ER (Temas açısı:67,75) numunenin en geç, ET/ER+Mo₃C₂ (Temas açısı:51,54)’nin de en erken korozyona uğraması beklenen bir durumdur. Bilindiği üzere

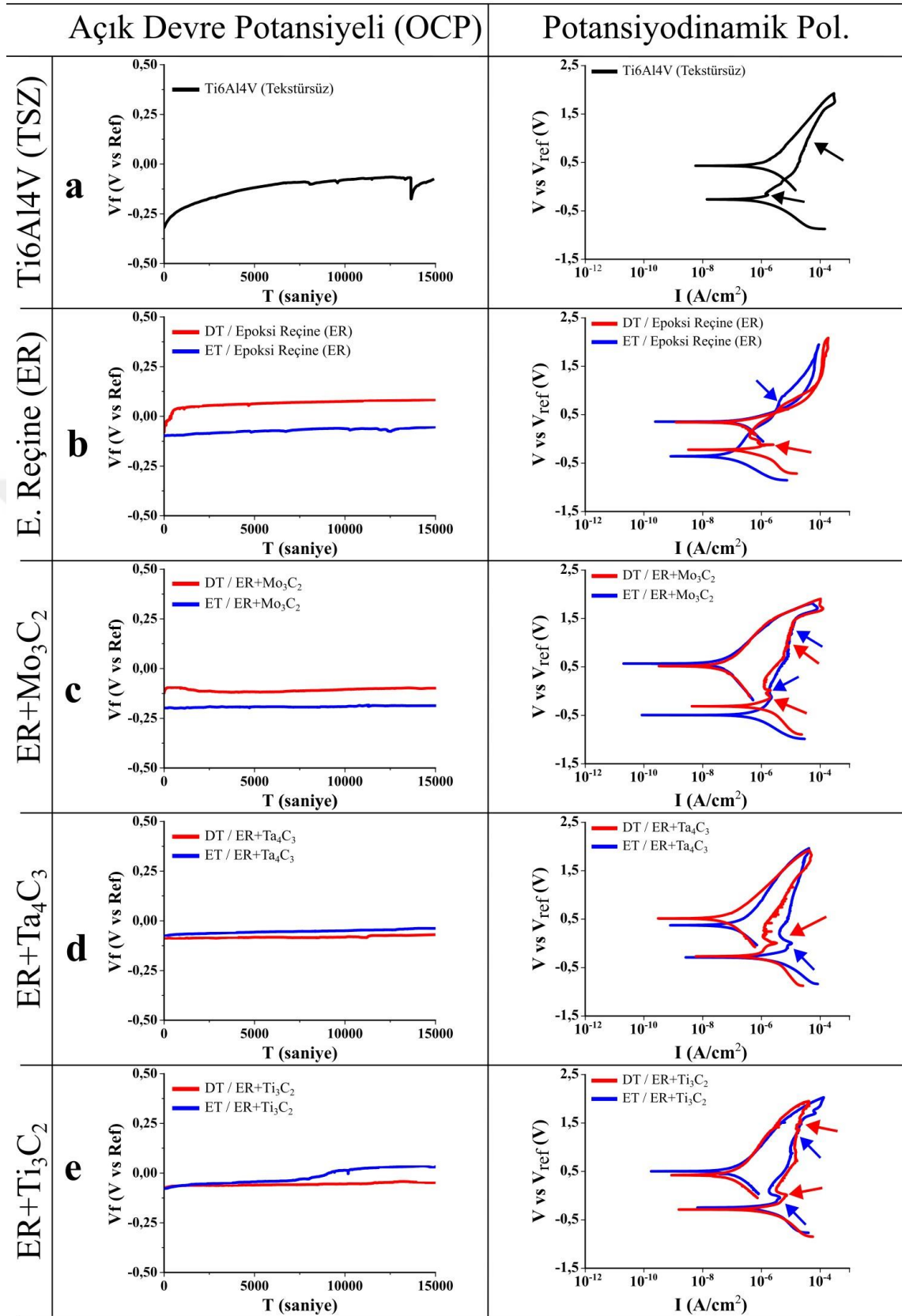
temas açısı değerleri arttıkça hidrofobik karaktere yaklaşılar ve bu da yüzeylerde korozyon mekanizmasının gerçekleşmesinin gecikmesine sebep olur. (Xu et al. 2020). Statik temas açılarında en yüksek değer, yüzeyinde çukurcuk bulunmayan TSZ numuneden (Temas açısı:87,46) ölçülmüştür. Tekstürlü numunelerin yüzeyinde ise tekstürlerden ileri gelen çukurlu yapılar sebebiyle temas açısı değerlerinde düşüş görülmüştür. Her ne kadar TSZ numunenin temas açısı değeri diğer numunelerden büyük olsa da hem yüzeyinde kuvvetli bir koruyucu tabaka olmaması sebebiyle, hem de SLM üretimi sırasında oluşan süreksizliklerden dolayı, korozyon hızının diğer numunelere göre daha fazla olduğu gözlenmiştir. Tekstürlü numunelerde korozyon testi sırasında bu çukurlardan sızıntıların olması sebebiyle korozyon hızlanmıştır. Bu olayı anlatan şematik görsel Şekil 4.27’de verilmiştir. Korozyon bölgelerinin yakınlaştırılmış hali Şekil 4.27a’da ve Şekil 4.27b’de görülmektedir. Şekil 4.27a’da korozyon oluşumu epoksi ile Ti6Al4V metal matris ara yüzeyinde oluşmuşken Şekil 4.27b’de korozyon oluşumu SLE ile üretilen ana matrisin yüzeyindeki süreksizlik bölgelerinde meydana gelmiştir. Korozyon kinetiğinin niceliği ile doğrudan ilişkili olan akım yoğunluklarına (I_{corr}) bakıldığında ise en yüksek değer TSZ numuneden ($I_{corr}=1260 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2$) elde edilmiştir. En düşük değer ise ET/ER ($I_{corr}=159 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2$) numuneden elde edilmiştir. Buna bağlı olarak korozyon hızı da en düşük ET/ER’den (Korozyon hızı: $1,36 \times 10^{-3} \text{ mm/yıl}$), en yüksek ise TSZ’den (Korozyon hızı: $10,77 \times 10^{-3} \text{ mm/yıl}$) elde edilmiştir (Çizelge 4.5).

Şekil. 4.36’da polarizasyon eğrileri incelendiğinde numunelerin tümünde pasivasyon bölgeleri ok ile işaret edilen yerlerde görülmektedir. TSZ numunede tekstürlerin olmayışı sebebiyle yüzeyde meydana gelen pasif oksit tabakası sayesinde pasivasyon bölgesinde stabil akım değerleri elde edilmiş ve korozyon yavaşlamıştır. Kısa bir süre sonra kırılğan olan bu pasif oksit tabakanın kırılması ile korozyon yeniden hızlanmış ve eğri dikeylikten kurtularak pasif bölge sona ermiştir. Korozyonun yeniden hızlanması ile yüzeyde meydana gelen hasarlar Şekil.4. 40’ta SEM yüzey görüntülerinden de görüldüğü üzere çukurcuk korozyonuna dönüşmüştür. Meydana gelen korozyon ürünlerinin yüzeye çökmesi ile yeniden bir pasif bölge oluşmuş ve korozyon hızı yavaşlamıştır. Ancak çukurcuk korozyonlarının çevre bölgelerindeki aralıklardan sıvının sızması ile korozyon hızı yeniden artmış ve çukurcuk korozyonlarının hemen yanında aralık korozyonları meydana gelmiştir (Şekil.4.40). Benzer korozyon davranışı MXene katkılanmış numunelerde de gözlenirken, bu numunelerde meydana gelen pasif bölge

TSZ'ye göre biraz daha fazladır. Bu durumun da epoksi reçinesinin yalıtkanlık özelliğinden ileri gelebilmektedir. Grafiklerden katkısız ER numunelerde ise oldukça geniş bir alanda bir pasif bölgenin varlığı dikkat çekmektedir. Bu da yüzeyde az bir hasarın olabileceğini göstermektedir. Zaten korozyon hızı değerleri de bu durumu desteklemektedir. DT ve ET numunelerinin genelinde stabil olmayan akım değerleri görülmektedir. Bu duruma yüzeylerdeki epoksi sistemi-Ti6Al4V arayüzeyindeki metastabil pitlerin varlığının sebep olduğu düşünülmektedir. Potansiyel değerlerinin artırılmasıyla bu yapılar çukurcuk korozyonuna evrilmekte ve bir süre sonra kararlı hale geçmektedir (Tang et al. 2014).

Grafikteki sonuçlar genel anlamda değerlendirildiğinde MXene katkılı ER infiltre edilen numunelerin korozyon hızlarının katkısız ER infiltre edilen numunelere göre daha az farkla fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu durum MXene tabakalarının içeriğinde bulunan metallere kaynaklı olarak iletkenliğin bir miktar artması sonucu, epoksi sisteminin korozyon direncinin düşmesiyle açıklanabilir. ET ve DT numunelerinin korozyon hızları birbiri ile kıyaslandığında, aynı MXene malzeme katkılanan DT numunelerin, ET numunelerden daha fazla olduğu, sadece Ti_3C_2 yapısında yine DT numunelerinin daha fazla olması kaydıyla, birbirlerine daha yakın değerlerde oldukları görülmektedir. Bu durum, Bölüm 4.2'de, Çizelge 4.1'de verilen numunelerin yüzey dağılım oranları göz önüne alındığında ve korozyon mekanizmasının da daha çok iletkenliğin yüksek olduğu metal matris yüzeyinde gerçekleştiği varsayılarak açıklanabilir. Buna göre, ET numunelerin üst yüzeylerindeki ER/Ti6Al4V oranının düşük olması sebebiyle, iletkenliği artıran metal matrislerin miktarlarının da düşük olması ve Ti6Al4V bulunan bölgelerde pasif oksit tabakasının oluşması ve bu bölgelerin de yüzey alanının fazla olmasından kaynaklı olduğu, bu yüzden de korozyon hızının ET numunelerinde daha az olduğu düşünülmektedir. Aynı durum MXene katkılanmamış ER emdirilmiş numunelerde de gözlenmiştir. Buna göre ET numunelerin yüzey alanlarında pasif oksit tabaka oluşturabilecek Ti6Al4V yoğunluğu, iletkenliği çok zayıf olan ER'ye göre daha fazla olduğundan numune her taraftan korunmuştur. DT numunelerde ise tekstürden kaynaklı çukurcuklardan dolayı, numune ile temas eden sıvının bu çukurcuk ve ER arayüzeyinden sızması daha kolay olacağından, katkısız numunelerde de korozyon hızının yine DT numunelerinde daha fazla olduğu düşünülmektedir.

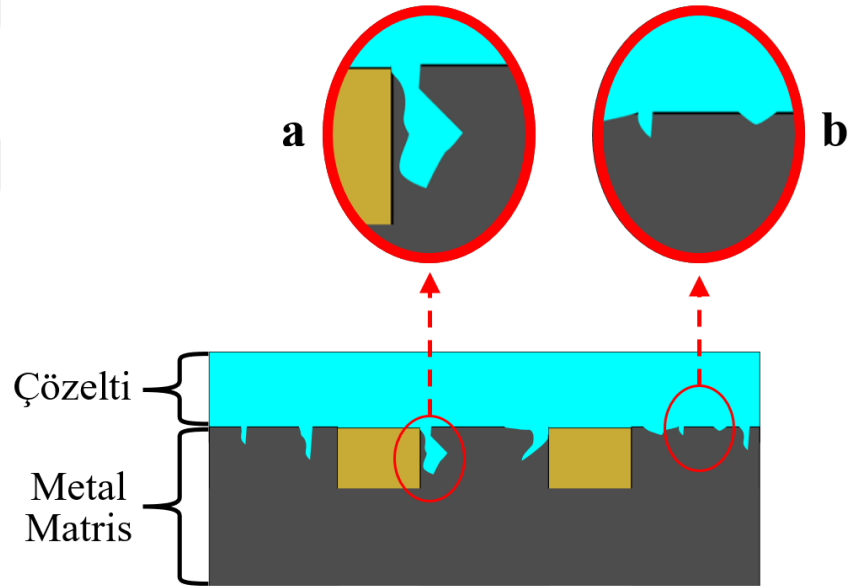
Aynı epoksi sistemi emdirilen DT ve ET numuneler gruplandırılıp ortalama korozyon hız değerleri hesaplanarak epoksi reçineye katkılanan MXene malzemeye göre sonuçlar değerlendirildiğinde, korozyon hızlarının büyükten küçüğe; $ER+Mo_3C_2 > ER+Ta_4C_3 > ER+Ti_3C_2 > ER$ (katkısız) şeklinde sıralandığı tespit edilmiştir. 2B MXene malzemelerin metalik elementlerinin elektrik iletkenlik değerleri göz önüne alındığında, sıralamanın bu şekilde çıkmasının beklenen bir sonuç olduğu görülmektedir. Katkısız ER emdirilen numunelerin epoksi sistemi içerisinde iletkenliği artıracak herhangi bir metal bileşen bulunmadığından korozyona karşı en dirençli çıkan grup olmuştur. MXene katkılı numunelerin metal elementlerinin (MXene'in “M” bileşeni) elektrik iletkenlik değerleri Çizelge 4.6’da verilmiştir. Buna göre iletkenliği en düşük olan metal Ti ve en yüksek olan metal ise Mo olduğundan korozyon hız sıralamaları da bu değerlerle uyumlu bir şekilde çıkmıştır.



Şekil 4.36. Numunelerin açık devre potansiyeli ve çevrimsel potansiyodinamik polarizasyon ölçüm grafikleri; (a) TSZ, (b) DT-ET/ER, (c) DT-ET/ER+Mo₃C₂, (d) DT-ET/ER+Ta₄C₃, (e) DT-ET/ER+Ti₃C₂.

Çizelge 4.5. Korozyon parametreleri

Numune Adı	E_{corr} (mV)	I_{corr} (A/cm ²)	Korozyon Hızı (mm/yıl)
Ti6Al4V(Tekstürlüz)	-264	1260E-09	10,77E-03
DT/ER	-224	338E-09	2,89E-03
ET/ER	-359	159E-09	1,36E-03
DT/ER+Mo ₃ C ₂	-313	1230E-09	10,52E-03
ET/ER+Mo ₃ C ₂	-495	846E-09	7,25E-03
DT/ER+Ta ₄ C ₃	-267	908E-09	7,77E-03
ET/ER+Ta ₄ C ₃	-289	587E-09	5,03E-03
DT/ER+Ti ₃ C ₂	-286	540E-09	4,62E-03
ET/ER+Ti ₃ C ₂	-245	538E-09	4,61E-03



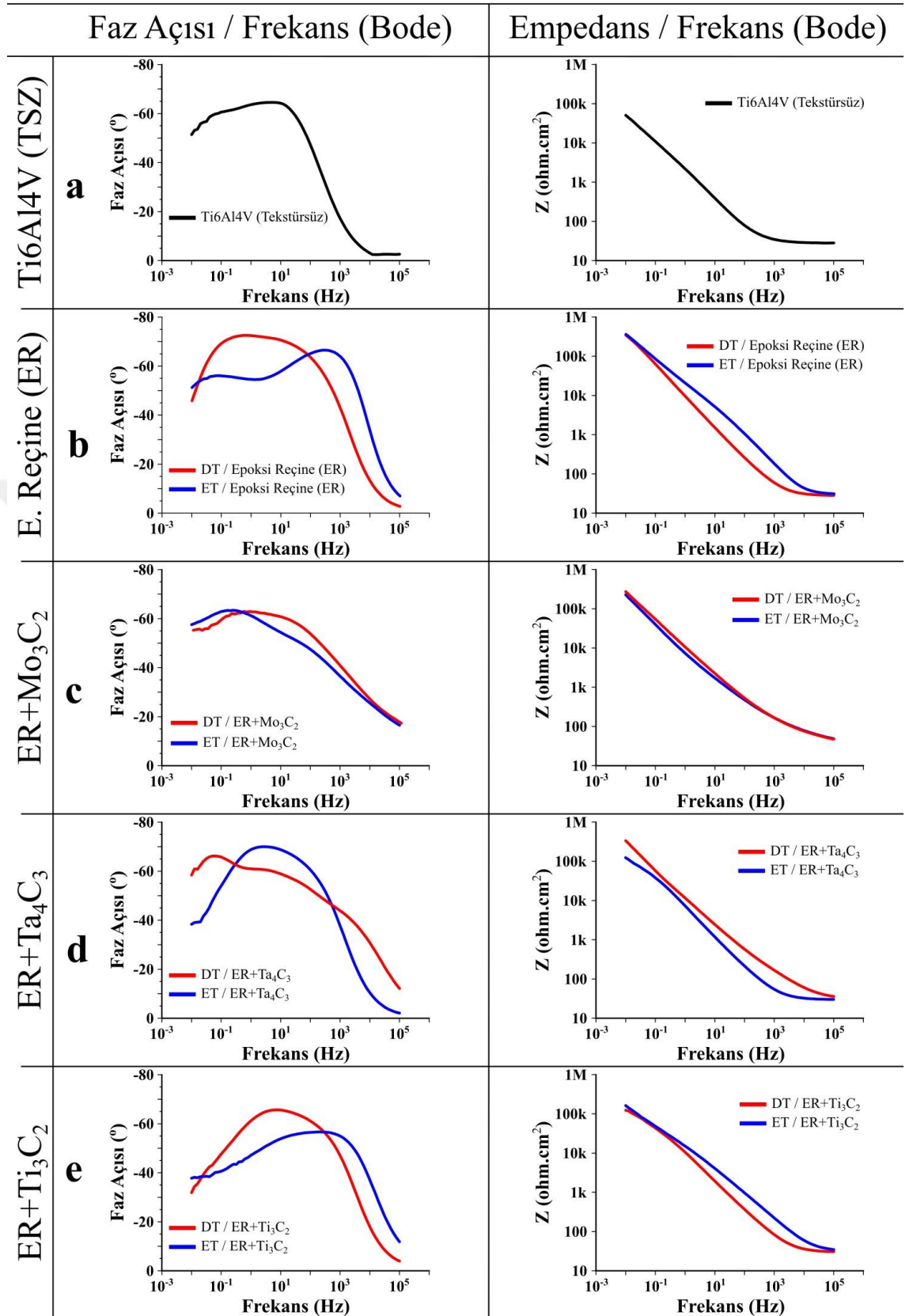
Şekil 4.37. Tekstürlü numunelere ait korozyon bölgeleri şematik görünümü; (a)Epoksi-Ti6Al4V arayüzeyinde oluşan korozyon bölgesi, (b)Üretim yöntemi sebebiyle metal matrisin yüzeyinde oluşan korozyon bölgesi.

Çizelge 4.6. MXene malzemelerin metal elementlerine ait elektrik iletkenlikleri (Anonymous 2024).

Malzeme	Elektrik iletkenliği S/m
Molibden	$2,0 \times 10^7$
Tantal	$7,7 \times 10^6$
Titanyum	$2,5 \times 10^6$

4.6.2. Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) analizleri

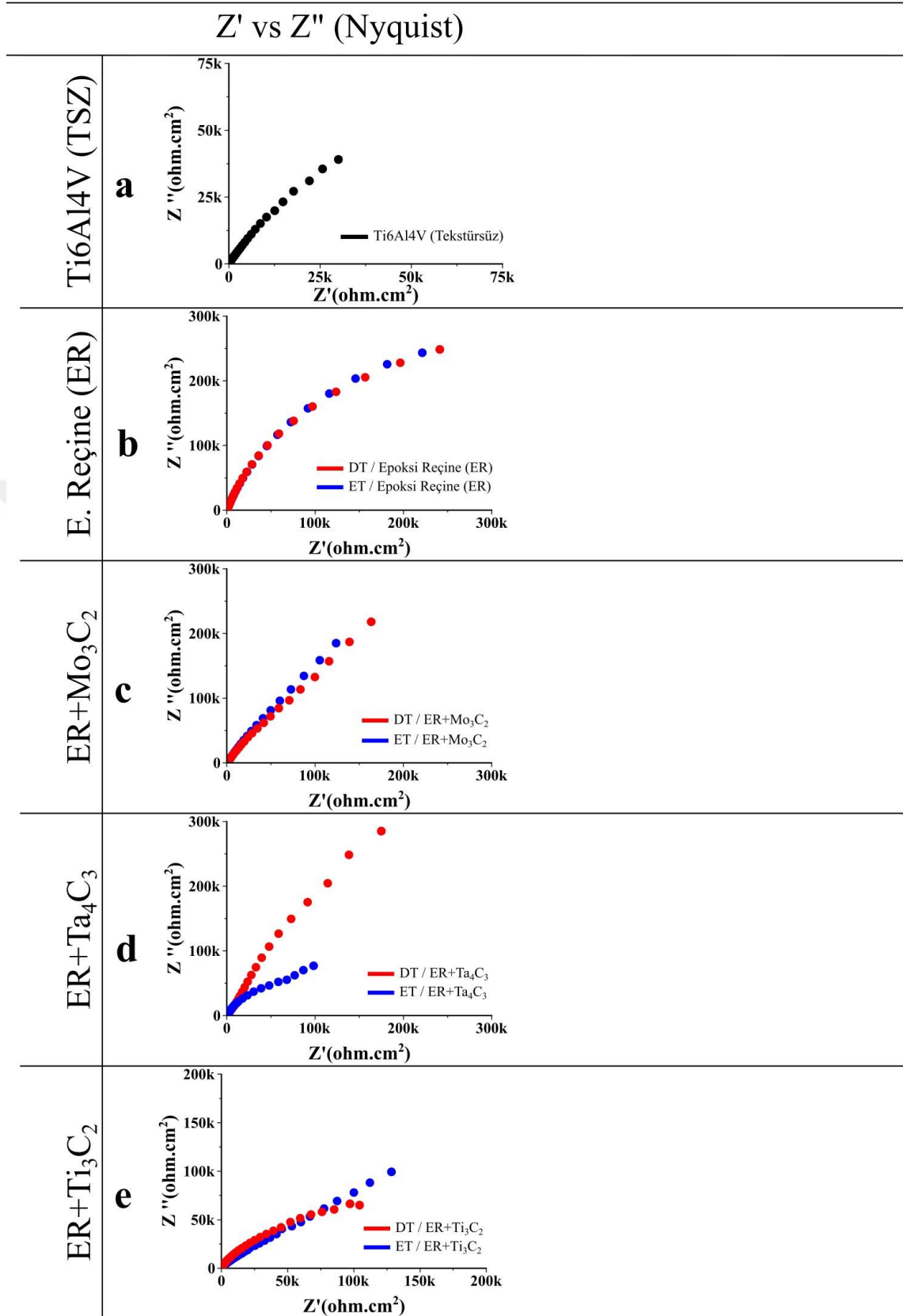
EIS ölçümleri numunelerin OCP değerlerinde 100.000–0,01 Hz frekans aralığında alternatif akım (AC) sinyalleri kullanılarak alınmıştır. Korozyona maruz bırakılan bütün yüzeyler için yüzey alanı 0,502 cm² olarak kullanılmış ve bütün veriler yüzey alanına göre ölçülmüştür. Bu amaçla numunelerin EIS ölçümleri alınmıştır. Şekil 4.38’de DT ve ET numunelerinin bode eğrilerinde yer alan faz açısı/frekans ve empedans/frekans grafikleri verilmiştir. Grafiğin faz açısı/frekans kısımları incelendiğinde faz açısı değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bilindiği üzere Bode eğrilerinde düşük faz açıları düşük korozyon direncini gösterirken, düşük frekans bölgelerinde faz açısının değişimi de metalin davranışını göstermektedir. Ayrıca Bode grafiğinde Zmod-Frekans eğrisinin altında kalan alanın artması ile korozyon davranışı da iyileşir (Uzundumlu 2023). Grafiklerden en yüksek faz açısı değerinin DT/ER’ye ait olduğu (73°) görülmektedir. TSZ numune ve DT/ER+Mo₃C₂’nin faz açıları birbirine çok yakın olup en düşük açılar bu numunelerden (64-65°) elde edilmiştir. Dolayısıyla bu grafiğe göre en yüksek korozyon direnci DT/ER’den, en düşük korozyon dirençleri ise sırasıyla DT/ER+Mo₃C₂ ve TSZ numunelerinden elde edildiği söylenebilmektedir. Empedans/frekans grafikleri incelendiğinde tüm numunelerin düşük frekanslarda empedans değerleri yüksek iken, yüksek frekanslarda empedans değerleri düşüktür. Empedans/frekans grafiklerinin tümü birlikte düşünüldüğünde TSZ Ti6Al4V numunenin grafiğinin altında kalan bölge diğer tüm numunelere ait grafiklerden daha düşük, DT/ER’nin ise daha yüksek çıkmıştır. Dolayısıyla bu grafik de diğer grafikler gibi TSZ numunenin korozyona karşı en dirençsiz, katkısız ER emdirilen numunelerin ise daha dirençli olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.38. Numunelerin Bode grafikleri; (a) TSZ, (b) DT-ET/ER, (c) DT-ET/ER+Mo₃C₂, (d) DT-ET/ER+Ta₄C₃, (e) DT-ET/ER+Ti₃C₂.

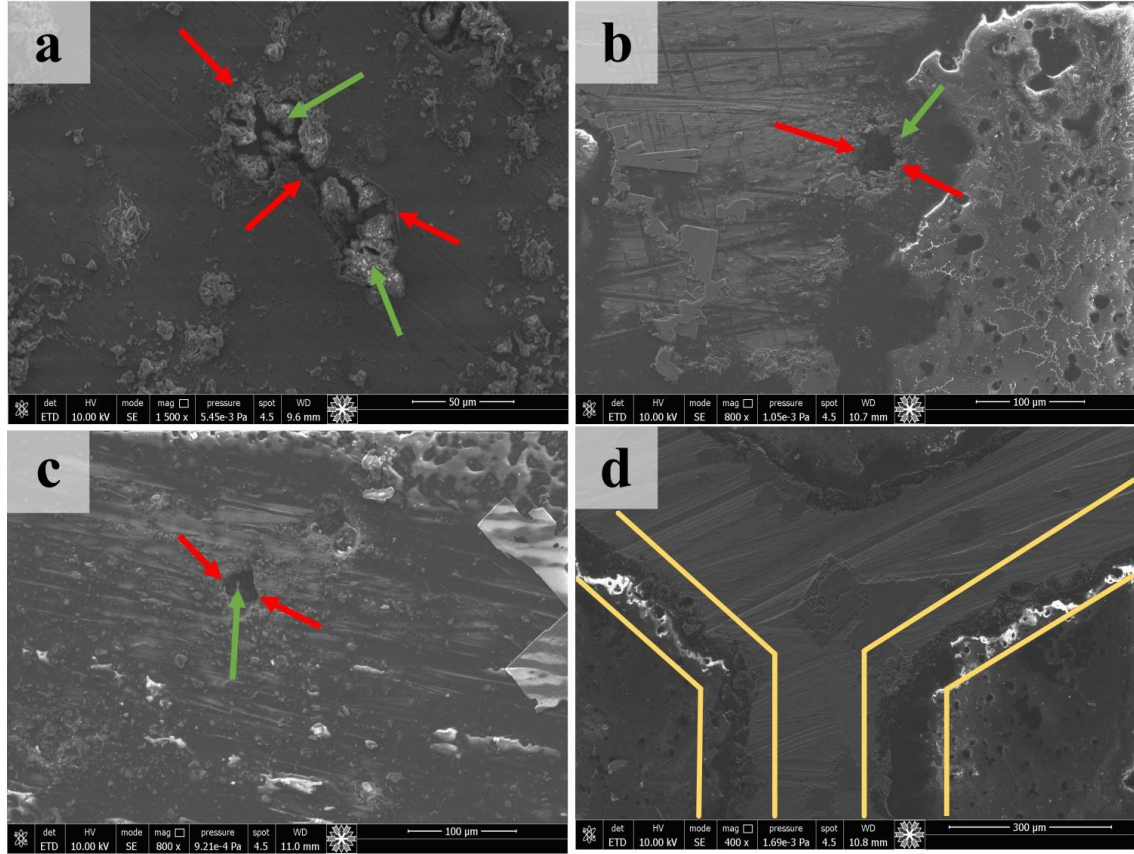
Şekil 4.39’da numunelerin nyquist grafikleri verilmiştir. Nyquist eğrilerinde yer alan yarım dairelerin çapı, analizi yapılan numunelerin polarizasyon direncini temsil eder ve yarım dairelerin çapı büyüdükçe korozyon direnci büyürken, korozyon hızı da azalır (Uzundumlu 2023). Grafiklere genel olarak bakıldığında yarım dairelerin çapları diğer korozyon sonuçlarıyla örtüşen bir sonuç ortaya koymaktadır. Buna göre en büyük yarım daire çapına sahip olan DT/ER numunesi en yüksek polarizasyon direncine sahiptir. TSZ numunenin ise yarım daire çapı en küçük olduğundan, korozyon direnci en düşük numunenin TSZ Ti6Al4V olduğu görülmektedir.





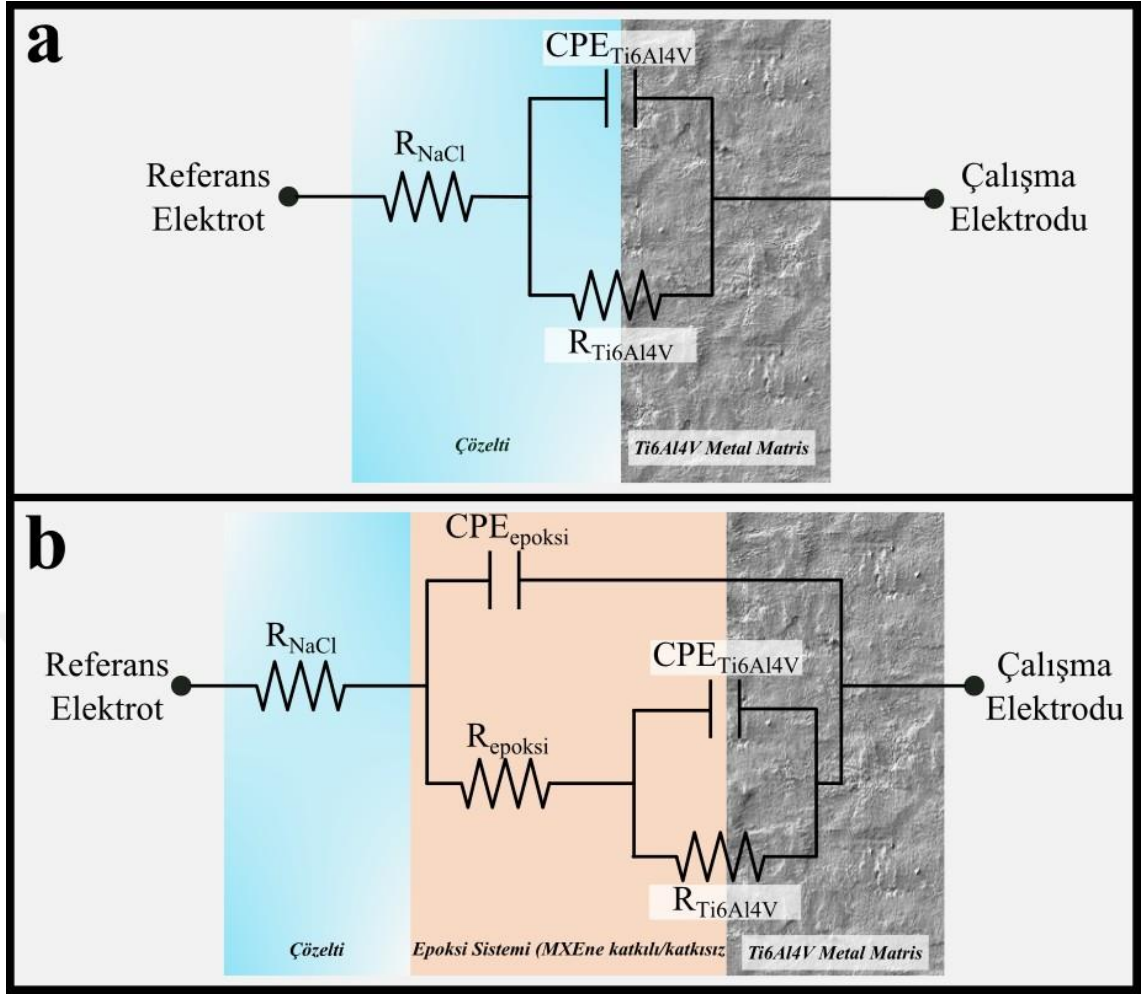
Şekil 4.39. Numunelerin Nyquist grafikleri; (a) TSZ, (b) DT-ET/ER, (c) DT-ET / ER+Mo₃C₂, (d) DT-ET/ER+Ta₄C₃, (e) DT-ET/ER+ Ti₃C₂.

Şekil 4.40'da bazı numunelerin korozyon sonrası SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntülerde kırmızı renkli oklar çukurcuk korozyon bölge sınırlarını, yeşil renkli oklar ise korozyon bölgesinden dışarı taşan korozyon ürünlerini ve sarı hat ile gösterilen bölgeler aralık korozyonunu göstermektedir. Şekil 4.40a'da oldukça geniş bir çukurcuk korozyonu görülmektedir. Korozyon oranının en yüksek olduğu TSZ numunede bu durum beklenen bir sonuçtur. Şekil 4.40b'de daha önceden Şekil 4.37'de şematik gösterildiği gibi epoksi sistemi ile metal matris ara yüzeyinde oluşan bir çukurcuk korozyonu göze çarpmaktadır. Numune yüzeyindeki süreksizlik bölgeleri korozyon açısından en elverişli bölgeler olduğu için tekstürlü DT ve ET numunelerin neredeyse tamamında bu yapıya rastlanmıştır. Şekil 40d'de ise yine metal matris ve epoksi sistemi arayüzeyinde oluşan büyük çaplı aralık korozyonu olduğu görülmektedir.



Şekil 4.40. Korozyon sonrası SEM görüntüleri; (a) TSZ, (b) DT/ER+ Mo₃C₂, (c) DT/ER+Ta₄C₃ ve (d) DT/ER+Ti₃C₂.

Şekil 4.41’de tüm numunelere ait eşdeğer devre modelleri (a: TSZ ve b: DT-ET numunelere ait) ve Çizelge 4.7’de ise bu devre modeline ait devre elemanlarının değer tablosu verilmiştir. Elde edilen EIS uyum değerleri Gamry Echem Analyst yazılımı ile tespit edilmiştir. Şekil 4.41a, TSZ numunelere ait olduğu için Şekil 4.41b’den farklı olarak epoksi sistemi bulunmamaktadır. Eşdeğer devrelerde yer alan elektronik bileşenler; R_{NaCl} , NaCl sıvı direnci, $R_{Ti6Al4V}$; taban malzeme (Ti6Al4V) direnci, R_{epoksi} ; metal matrislere emdirilen epoksi sistemlerinin direnç değerleri, $CPE_{Ti6Al4V}$; taban malzemenin sabit faz elemanı, CPE_{epoksi} ; epoksi reçinenin sabit faz elemanı, Y_0 ; şarj transfer direnci, n ; frekans kuvvetleri şeklinde tanımlanmaktadır. Şarj transfer direnci doğrudan film tabakası ve taban malzeme arasındaki arayüzeyde meydana gelen korozyon hızı ile alakalıdır R_{NaCl} değerlerinin tüm şartlarda birbirine yakın oluşunun, numunelerden çözümlere direnci etkileyecek bir malzeme geçişinin olmadığını gösterdiği düşünülmektedir. Buna göre toplam dirençler karşılaştırıldığında TSZ numunesinin direncinin en düşük çıktığı görülmektedir. Bunun sebebinin taban malzeme üzerinde oluşan pasif oksit film tabakasının kırılma yapısından dolayı uzun ömürlü olmayışı ve meydana geldikten kısa bir süre sonra kırılması ile şarj transfer direncinin olmaması, böylece taban malzeme üzerinde koruyucu bir tabakanın kalmaması ile sıvı ortamın malzemeye direkt temasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. TSZ dışındaki numunelerde taban malzeme dirençleri incelendiğinde, TSZ numunesinin sahip olduğu dirençten çok daha büyük dirençlere sahip oldukları, DT/ER numunesinin ise en büyük dirence sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuç diğer korozyon değerleri ile de örtüşmektedir. Benzer durum bütün numunelerdeki taban malzemelerin dirençleri için de geçerlidir. Zaten toplam dirençte en büyük etkiyi taban malzemelerin dirençlerinin yaptığı da Çizelge 4.7’den görülmektedir. Bunun sebebinin, epoksi reçinesinin yalıtkan olması ve aynı zamanda da viskozitesinin yüksek olmasından dolayı MXene yapılarından taban malzemeye elektron iletkenliğinin düşük olmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Numunelerde epoksi reçinesinin dirençlerinin yüksek olduğu, sadece DT/ET/ER+ Mo_3C_2 -ET/ER+ Ta_3C_4 - ET/ER+ Ti_3C_2 numunelerinde düşük değerler olduğu göze çarpmaktadır. Bunun sebebinin de emdirilen reçinede homojenliğin olmamasına bağlı olarak akımın metal-reçine arayerinden kolayca sızdığından ayrıca reçinenin içinde bulunan MXene yapılarındaki metallerin iletkenliklerinin yüksek olmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Eşdeğer devre analiz sonuçlarında da diğer korozyon analizleri sonuçlarında olduğu gibi korozyon direnci en yüksek olan numune DT/ER iken, en düşük olan numune TSZ olduğu elde edilmiştir.



Şekil 4.41. TSZ, DT ve ET numunelerin eşdeğer devre modeli; (a) TSZ (b) DT ve ET

Çizelge 4.7. Eşdeğer devre elemanlarının değer çizelgesi

Numune Adı	R_{NaCl} (ohm.cm2)	R_{Ti64} (ohm.cm2)	R_{epoksi} (ohm.cm2)	CPE_{Ti64}		$CPE_{Reçine}$	
				Y_0 (S.sa.cm-1)	n	Y_0 (S.sa.cm-1)	n
Ti6Al4V (Tekstürlü)	27,96	148,8x10 ³	-	-	-	123,8x10 ⁻⁶	743,8x10 ⁻³
DT/ER	27,02	20,33x10 ⁹	3,69x10 ³	4,97x10 ⁻⁶	751x10 ⁻³	113,5x10 ⁻⁶	725,4x10 ⁻³
ET/ER	29,59	5,53x10 ⁶	7,32x10 ³	4,60x10 ⁻⁶	818,9x10 ⁻³	11,81x10 ⁻⁶	589,9x10 ⁻³
DT/ER+ Mo ₃ C ₂	53,54	1,32x10 ⁶	186,3	7,04x10 ⁻⁶	675x10 ⁻³	18,35x10 ⁻⁶	696x10 ⁻³
ET/ER+ Mo ₃ C ₂	52,23	7,01x10 ⁶	368,4	12,37x10 ⁻⁶	662x10 ⁻³	22,88x10 ⁻⁶	703,4x10 ⁻³
DT/ER+Ta ₄ C ₃	34,85	5,40x10 ⁹	458	10,83x10 ⁻⁶	694,3x10 ⁻³	12,45x10 ⁻⁶	704,6x10 ⁻³
ET/ER+Ta ₄ C ₃	30,33	411,1x10 ³	132,2x10 ³	32,17x10 ⁻⁶	778,4x10 ⁻³	106,3x10 ⁻⁶	693,7x10 ⁻³
DT/ER+Ti ₃ C ₂	29,73	272x10 ³	87,05x10 ³	23,66x10 ⁻⁶	739,8x10 ⁻³	30,99x10 ⁻⁶	491,3x10 ⁻³
ET/ER+Ti ₃ C ₂	33,73	955,9x10 ³	284,9	6,39x10 ⁻⁶	738x10 ⁻³	18,82x10 ⁻⁶	445,6x10 ⁻³

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez kapsamında SLE ile üretilen Ti6Al4V metal matrisli kompozit malzemelere MXene katkılı epoksi reçine emdirilmesiyle yeni nesil kompozit malzeme üretilmiştir. Üretilen numunelere yapılan analizler sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- ❖ MAX fazından MXene fazına HF ile seçici dağlama yapılması sonucu yapı içerisinde bir miktar Al kalmış ve dönüşüm sırasında bu Al oksitlenerek Al_2O_3 formuna dönüşmüştür.
- ❖ Ti6Al4V metal matrisin sertlik değeri kriyojenik sıcaklıkta, oda sıcaklığına göre yaklaşık %30 artış gösterirken bu değer katkısız ER için yaklaşık %55'dir.
- ❖ ER'ye MXene ilavesi, ortalama yüzey pürüzlülük değeri R_a 'yı katkılanan MXene cinsine göre %23-67 arasında artırdığı görülmüştür.
- ❖ Yapılan altıgen desenli tekstür tasarımıyla tekstürsüz numunelere oranlar kütlelerde yaklaşık %20'lik bir azalma olmuştur.
- ❖ Temas açıları MXene ilavesi ile bir miktar düşmüştür. Tekstürlü numuneler arasında en hidrofobik davranışı katkısız ER infiltre edilen numuneler göstermiştir.
- ❖ Sürtünme analizlerinde epoksi sistemi emdirilmiş her numune, TSZ numunelere göre tüm ortamlarda daha düşük sürtünme katsayısı değerine sahiptir.
- ❖ Genel olarak kuru ve vakum ortamında yapılan testlerde Ti_3C_2 , sürtünme açısından en ideal sonuçları verirken, kriyojenik şartlarda Mo_3C_2 daha ideal davranış göstermiştir. NaCl ortamında ise MXene katkılı tüm numuneler benzer sonuçlar vermiştir.
- ❖ Vakum ortamında yapılan testlerde tüm numunelerin sürtünme katsayısı değerleri bir miktar artış göstermiştir.
- ❖ Kriyojenik ortamda yapılan testlerde sertlik değerleri arttığından aşınma oranları diğer ortamlara göre düşük çıkmıştır. Fakat vakum ortamında yapılan testlerde yüzeyde bulunan oksit tabakası tekrar oluşmadığından sertlik değerleri test sırasında anlık olarak düşerek aşınma oranlarını arttırmıştır.
- ❖ Korozyon test sonuçlarına göre ER sistemi emdirilmiş her numunenin korozyon direnci TSZ Ti6Al4V'ye göre yüksek çıkmıştır.

- ❖ Korozyon testi analizlerinden epoksi sistemine MXene ilavesi yapının iletkenliğini arttırarak korozyon sonuçlarını bir miktar düşürdüğü anlaşılmıştır. Bu yüzden tüm numuneler arasında en iyi korozyon dayanımı, katkısız ER emdirilmiş DT ve ET numunelerden elde edilmiştir.

Bu tezde ortaya konulan yeni nesil MMK'lara yapılan tribolojik ve korozyon testleri sonucunda tezin amacı olarak endüstride özellikle otomotiv ile havacılık ve uzay sektöründe kullanılması için istenilen özellikler kazandırılmıştır. ER'ye MXene eklenmesi ile korozyon direnci saf ER'ye göre bir miktar düşse de TSZ numunelere oranla korozyon direnci daha fazladır.

Yürütülen çalışmalar ışığında gelecek araştırmalar için aşağıdaki öneriler verilebilir;

- ❖ Tasarlanan katı modellerin yüzeyindeki tekstürlerin şekli, sayısı ve boyutları değiştirilerek numunelerin kütle ölçümleri, aşınma ve korozyon testleri yapılmalıdır. Yapılan tasarımlara göre çıkacak sonuçlar derlenerek bir optimizasyon problemi ile daha iyi sonuçlar ortaya konulabilir.
- ❖ Aşınma testleri oda sıcaklığından yüksek sıcaklıklarda da yapılarak sonuçlar değerlendirilmelidir. Çıkacak sonuçlara göre MMK'ların çalışma sıcaklık aralığı belirlenmelidir.
- ❖ Bu tezde MMK'lara aşınma ve korozyon testleri ayrı şekilde yapılmıştır. Fakat uygulamada bazı ortamlarda makine elemanları hem sürtünmeye hem de korozyona aynı anda uğrayabilmektedir. Dolayısıyla MMK'lara tribokorozyon deneyleri de yapılarak çalışma genişletilebilir.
- ❖ Bu tezde Mo_3C_2 , Ta_4C_3 ve Ti_3C_2 MXene malzemeleri incelenmiştir. Bunlara ek olarak farklı MXene malzemelerin farklı şartlardaki aşınma ve korozyon deneyleri yapılarak çalışma genişletilebilir.

KAYNAKLAR

- Abdelmalak, M. N. 2014. MXenes: A new family of two-dimensional materials and its application as electrodes for li-ion batteries. Drexel University, Material Science and Engineering, 177, PA.
- Adams, J. B., Hector, L. G., Siegel, D. J., Yu, H. and Zhong, J. 2001. Adhesion, lubrication and wear on the atomic scale. *Surface and Interface Analysis*, 31(7), 619–626.
- Alwarappan, S., Nesakumar, N., Sun, D., Hu, T. Y. and Li, C. Z. 2022. 2D metal carbides and nitrides (MXenes) for sensors and biosensors. *Biosensors and Bioelectronics*, 205.
- Anonymous, 2024. Web Sitesi: <https://periodictable.com/>, Eriřim Tarihi: 20.05.2024.
- ASTM., F2792-12a, 2012. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Azadmanjiri, J., Berndt, C. C., Wang, J., Kapoor, A. and Srivastava, V. K. 2016. Nanolaminated composite materials: Structure, interface role and applications. *RSC Advances*, 6(111), 109361–109385.
- Barsoum, M. W. and Radovic, M. 2011. Elastic and mechanical properties of the MAX phases. *Annual Review of Materials Research*, 41, 195–227.
- Bhattacharjee, B., Ahmaruzzaman, M., Djellabi, R., Elimian, E. and Rtimi, S. 2022. Advances in 2D MXenes-based materials for water purification and disinfection: Synthesis approaches and photocatalytic mechanistic pathways. *Journal of Environmental Management*, 324.

- Bhusan, B., Israelachvili, J. N. and Landman, U. 1995. Nanotribology: friction, wear and lubrication at the atomic scale. *Nature*, 374, 607–616.
- Bhushan, B. 2001. *Modern Tribology Handbook- Volume One Principles of Tribology*.
- Bhushan, B. 2005. Nanotribology and nanomechanics. *Wear*, 259(7–12), 1507–1531.
- Cai, X., Luo, Y., Liu, B. and Cheng, H. M. 2018. Preparation of 2D material dispersions and their applications. *Chemical Society Reviews*, 47(16), 6224–6266.
- Cardaropoli, F., Alfieri, V., Caiazzo, F. and Sergi, V. 2012. Dimensional analysis for the definition of the influence of process parameters in selective laser melting of Ti–6Al–4V alloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 226(7), 1136–1142.
- Çelik, O. N., Ay, N. and Göncü, Y. 2013. Effect of nano hexagonal boron nitride lubricant additives on the friction and wear properties of AISI 4140 steel. *Particulate Science and Technology*, 31(5), 501–506.
- Chen, F. X., Mai, Y. J., Xiao, Q. N., Cai, G. F., Zhang, L. Y., Liu, C. S. and Jie, X. H. 2019. Three-dimensional graphene nanosheet films towards high performance solid lubricants. *Applied Surface Science*, 467–468, 30–36.
- Cheng, J., Ma, J., Yu, Y., Fu, L., Qiao, Z., Yang, J., Li, J. and Liu, W. 2014. Vacuum tribological properties of a Ti-46Al-2Cr-2Nb intermetallics. *Journal of Tribology*, 136(2).
- Chen, Z., He, X., Xiao, C. and Kim, S. H. 2018. Effect of humidity on friction and Wear- A critical review. *Lubricants*, 6(3).

- Chernova, N. A., Roppolo, M., Dillon, A. C. and Whittingham, M. S. 2009. Layered vanadium and molybdenum oxides: Batteries and electrochromics. *Journal of Materials Chemistry*, 19(17), 2526–2552.
- Deng, Z., Smolyanitsky, A., Li, Q., Feng, X. Q. and Cannara, R. J. 2012. Adhesion-dependent negative friction coefficient on chemically modified graphite at the nanoscale. *Nature Materials*, 11(12), 1032–1037.
- Dev Singh, D., Mahender, T. and Raji Reddy, A. 2021. Powder bed fusion process: A brief review. *Materials Today: Proceedings*, 46, 350–355.
- Dong, S., Wang, W., Gao, Y. and Deng, G. 2022. Tribological Properties of Different-Sized Black Phosphorus Nanosheets as Water-Based Lubrication Additives for Steel/Titanium Alloy Wear Contact. *Metals*, 12(2).
- Efeoglu, I., Arnell, R. D. and Tinston, S. F. 1993. The mechanical and tribological properties of titanium nitride coatings formed in a four magnetron closed-field sputtering system*. *Surface and Coating Technology*, 57(99), 61–69.
- Eklund, P., Beckers, M., Jansson, U., Högberg, H. and Hultman, L. 2010. The Mn + 1AXn phases: Materials science and thin-film processing. *Thin Solid Films*, 518(8), 1851–1878.
- Erdemir, A. 2001. Solid lubricants and self-lubricating films. *Modern Tribology Handbook*, 2.
- Ferrar, B., Mullen, L., Jones, E., Stamp, R. and Sutcliffe, C. J. 2012. Gas flow effects on selective laser melting (SLM) manufacturing performance. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(2), 355–364.
- Gallagher, P., Lee, M., Amet, F., Maksymovych, P., Wang, J., Wang, S., Lu, X., Zhang, G., Watanabe, K., Taniguchi, T. and Goldhaber-Gordon, D. 2016. Switchable

- friction enabled by nanoscale self-assembly on graphene. *Nature Communications*, 7.
- Gates, J. D. 1998. Two-body and three-body abrasion: A critical discussion. *Wear*, 214, 139–146.
- Geim, A. K. and Novoselov, K. S. 2007. The rise of graphene. *Nature Materials*, 6(March), 183–191.
- Ghasali, E., Dizge, N., Khataee, A., Alterkaoui, A., Isik, Z., Özdemir, S. and Orooji, Y. 2024. Biofouling mitigation of Nb₂AlC and Mo₃AlC₂ MXene-precursors doped polyether sulfone mixed matrix membranes for pathogen microorganisms. *Science of The Total Environment*, 172189.
- Ghidiu, M. J. 2018. Ions in MXene: Characterization and control of interlayer cations and their effects on structure and properties of 2D transition metal carbides. PhD Thesis. Drexel University, Philadelphia.
- Gibson, I., Rosen, D. and Stucker, B. 2015. Additive manufacturing technologies 3d printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing second edition. springer science.
- Gong, Y., Shi, G., Zhang, Z., Zhou, W., Jung, J., Gao, W., Ma, L., Yang, Y., Yang, S., You, G., Vajtai, R., Xu, Q., Macdonald, A. H., Yakobson, B. I., Lou, J., Liu, Z. and Ajayan, P. M. 2014. Direct chemical conversion of graphene to boron- and nitrogen- and carbon-containing atomic layers. *Nature Communications*, 5(3193), 1–8.
- Griseri, M., Tunca, B., Lapauw, T., Huang, S., Popescu, L., Barsoum, M. W., Lambrinou, K. and Vleugels, J. 2019. Synthesis, properties and thermal decomposition of the Ta₄AlC₃MAX phase. *Journal of the European Ceramic Society*, 39(10), 2973–2981.

- Guo, L., Zhang, Y., Zhang, G., Wang, Q. and Wang, T. 2021. MXene-Al₂O₃ synergize to reduce friction and wear on epoxy-steel contacts lubricated with ultra-low sulfur diesel. *Tribology International*, 153(April 2020).
- Hu, H., Guo, Y., Yan, J., Qiu, J. and Wang, Y. 2019. Dry sliding wear behavior of MoSi₂-Mo₅Si₃-Mo₅SiB₂ composite at different temperatures and loads. *Wear*, 428–429, 237–245.
- Hu, J., Li, S., Zhang, J., Chang, Q., Yu, W. and Zhou, Y. 2020. Mechanical properties and frictional resistance of Al composites reinforced with Ti₃C₂T_x MXene. *Chinese Chemical Letters*, 31(4), 996–999.
- Hu, T., Li, Z., Hu, M., Wang, J., Hu, Q., Li, Q. and Wang, X. 2017. Chemical Origin of Termination-Functionalized MXenes: Ti₃C₂T₂ as a Case Study. *Journal of Physical Chemistry C*, 121(35), 19254–19261.
- Jiang, X., Kuklin, A. V., Baev, A., Ge, Y., Ågren, H., Zhang, H. and Prasad, P. N. 2020. Two-dimensional MXenes: From morphological to optical, electric and magnetic properties and applications. *Physics Reports*, 848(2020), 1–58.
- Jin, L., Liu, K. and Chen, X.-G. 2020. Improved Elevated Temperature Properties in Al-13%Si Piston Alloys by Mo Addition. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29.
- Joseph, A., Gautham, V., Akshay, K. S. and Sajith, V. 2022. 2D MoS₂-hBN hybrid coatings for enhanced corrosion resistance of solid lubricant coatings. *Surface and Coatings Technology*, 443.
- Kalantar-Zadeh, K., Tang, J., Wang, M., Wang, K. L., Shailos, A., Galatsis, K., Kojima, R., Strong, V., Lech, A., Wlodarski, W. and Kaner, R. B. 2010. Synthesis of nanometre-thick MoO₃ sheets. *Nanoscale*, 2(3), 429–433.

- Karthik, G. M. and Kim, H. S. 2021. Heterogeneous Aspects of Additive Manufactured Metallic Parts: A Review. *Metals and Materials International*, 27(1).
- Kassym, K. and Perveen, A. 2019. Atomization processes of metal powders for 3D printing. *Materials Today: Proceedings*, 26, 1727–1733.
- Khot, A. C., Dongale, T. D., Park, J. H., Kesavan, A. V. and Kim, T. G. 2021. Ti₃C₂-based MXene oxide nanosheets for resistive memory and synaptic learning applications. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 13(4), 5216–5227.
- Kim, S. and Choi, H. C. 2020. Recent advances in covalent organic frameworks for molecule-based two-dimensional materials. *ACS Omega*, 5(2), 948–958.
- Kruth, J. P., Mercelis, P., Van Vaerenbergh, J., Froyen, L. and Rombouts, M. 2005. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 11(1), 26–36.
- Krylov, S. Y. and Frenken, J. W. M. 2014. The physics of atomic-scale friction: Basic considerations and open questions. *Physica Status Solidi (B) Basic Research*, 251(4), 711–736.
- Kuc, A., Heine, T. and Kis, A. 2015. Electronic properties of transition-metal dichalcogenides. *MRS Bulletin*, 40(7), 577–584.
- Kurahashi, Y., Tanaka, H., Terayama, M. and Sugimura, J. 2017. Effects of environmental gas and trace water on the friction of DLC sliding with metals. *Micromachines*, 8(7), 1–14.
- Kurtoglu, M., Naguib, M., Gogotsi, Y. and Barsoum, M. W. 2012. First principles study of two-dimensional early transition metal carbides. *MRS Communications*, 2(4), 133–137.

- Lian, W., Mai, Y., Liu, C., Zhang, L., Li, S. and Jie, X. 2018. Two-dimensional Ti₃C₂ coating as an emerging protective solid-lubricant for tribology. *Ceramics International*, 44(16), 20154–20162.
- Li, J. and Luo, J. 2017. Superlow Friction of Graphite Induced by the Self-Assembly of Sodium Dodecyl Sulfate Molecular Layers. *Langmuir*, 33(44), 12596–12601.
- Lim, K. R. G., Shekhirev, M., Wyatt, B. C., Anasori, B., Gogotsi, Y. and Seh, Z. W. 2022. Fundamentals of MXene synthesis. *Nature Synthesis*, 1(8), 601–614.
- Liu, L., Zhou, M., Jin, L., Li, L., Mo, Y., Su, G., Li, X., Zhu, H. and Tian, Y. 2019. Recent advances in friction and lubrication of graphene and other 2D materials: Mechanisms and applications. *Friction*, 7(3), 199–216.
- Li, Y., Schreiber, P., Schneider, J. and Greiner, C. 2023. Tribological mechanisms of slurry abrasive wear. *Friction*, 11(6), 1079–1093.
- Lukatskaya, M. R., Dunn, B. and Gogotsi, Y. 2016. Multidimensional materials and device architectures for future hybrid energy storage. *Nature Communications*, 7.
- Lukatskaya, M. R., Mashtalir, O., Ren, C. E., Dall’Agnese, Y., Rozier, P., Taberna, P. L., Naguib, M., Simon, P., Barsoum, M. W. and Gogotsi, Y. 2013. Cation intercalation and high volumetric capacitance of two-dimensional titanium carbide. *Science*, 341(6153), 1502–1505.
- Lu, P., Liu, Y., Zhou, T., Wang, Q. and Li, Y. 2018. Recent advances in layered double hydroxides (LDHs) as two-dimensional membrane materials for gas and liquid separations. *Journal of Membrane Science*, 567, 89–103.
- Lu, X., Xue, H., Gong, H., Bai, M., Tang, D., Ma, R. and Sasaki, T. 2020. 2d layered double hydroxide nanosheets and their derivatives toward efficient oxygen evolution reaction. *Nano-Micro Letters*, 12(1).

- Manimunda, P., Al-Azizi, A., Kim, S. H. and Chromik, R. R. 2017. Shear-induced structural changes and origin of ultralow friction of hydrogenated diamond-like carbon (DLC) in dry environment. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 9(19), 16704–16714.
- Manu, B. R., Gupta, A. and Jayatissa, A. H. 2021. Tribological properties of 2D materials and composites- A review of recent advances. *Materials*, 14(7).
- Manu, B. R. and Jayatissa, A. H. 2020. Effect of humidity on friction of molybdenum disulfide films produced by thermal evaporation on titanium substrates. *Chemical Science International Journal*, 25–33.
- Manu, B. R., Schroeder, A. M. and Jayatissa, A. H. 2020. Characterization of the effect of moisture on tribology of titanium rubbed against different pin materials. *Chemical Science International Journal*, 1–10.
- Marian, M., Song, G. C., Wang, B., Fuenzalida, V. M., Krauß, S., Merle, B., Tremmel, S., Wartzack, S., Yu, J. and Rosenkranz, A. 2020. Effective usage of 2D MXene nanosheets as solid lubricant – Influence of contact pressure and relative humidity. *Applied Surface Science*, 531(March), 147311.
- Marian, M., Tremmel, S., Wartzack, S., Song, G., Wang, B., Yu, J. and Rosenkranz, A. 2020. Mxene nanosheets as an emerging solid lubricant for machine elements – Towards increased energy efficiency and service life. *Applied Surface Science*, 523(April), 146503.
- Ma, R. and Sasaki, T. 2010. Nanosheets of oxides and hydroxides: Ultimate 2D charge-bearing functional crystallites. *Advanced Materials*, 22(45), 5082–5104.
- Martini, A., Burris, D. L., Cayer-Barrioz, J. and Spencer, N. D. 2021. Publishing science in tribology: the past, present and future of tribology letters. *Tribology Letters*, 69(2).

- Mbamara, U. S., Olofinjana, B., Ajayi, O. O., Lorenzo-Martin, C., Obiajunwa, E. I. and Ajayi, E. O. B. 2016. Friction and wear behavior of nitrogen-doped ZnO thin films deposited via MOCVD under dry contact. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(2), 956–963.
- Miyoshi, K. 2007. *Solid Lubricants and Coatings for Extreme Environments: State-of-the-Art Survey*. NASA/TM.
- Mujib, S. Bin, Mukherjee, S., Ren, Z. and Singh, G. 2020. Assessing corrosion resistance of two-dimensional nanomaterial-based coatings on stainless steel substrates. *Royal Society Open Science*, 7(4).
- Naguib, M., Halim, J., Lu, J., Cook, K. M., Hultman, L., Gogotsi, Y. and Barsoum, M. W. 2013. New two-dimensional niobium and vanadium carbides as promising materials for li-ion batteries. *Journal of the American Chemical Society*, 135(43), 15966–15969.
- Naguib, M., Kurtoglu, M., Presser, V., Lu, J., Niu, J., Heon, M., Hultman, L., Gogotsi, Y. and Barsoum, M. W. 2011a. Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti 3AlC 2. *Advanced Materials*, 23(37), 4248–4253.
- Pinkerton, A. J. 2016. Lasers in additive manufacturing. *Optics and Laser Technology*, 78, 25–32.
- Rajender, I., Abdullah, B. and Asiri Editors, M. 2020. *Engineering materials black phosphorus synthesis, properties and applications*. (Inamuddin, Ed.; Electronic). Springer Nature Switzerland.
- Rakhi, R. B., Ahmed, B., Hedhili, M. N., Anjum, D. H. and Alshareef, H. N. 2015. Effect of postetch annealing gas composition on the structural and electrochemical properties of ti2ctx mxene electrodes for supercapacitor applications. *Chemistry of Materials*, 27(15), 5314–5323.

- Riedo, E., Gnecco, E., Bennewitz, R., Meyer, E. and Brune, H. 2003. Interaction potential and hopping dynamics governing sliding friction. *Physical Review Letters*, 91(8).
- Ronchi, R. M., Arantes, J. T. and Santos, S. F. 2019. Synthesis, structure, properties and applications of MXenes: Current status and perspectives. *Ceramics International*, 45(15), 18167–18188.
- Scarpa, F., Adhikari, S. and Chowdhury, R. 2010. The transverse elasticity of bilayer graphene. *Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics*, 374(19–20), 2053–2057.
- Scharf, T. W. and Prasad, S. V. 2013. Solid lubricants: A review. *Journal of Materials Science*, 48(2), 511–531.
- Scharf, T. W., Singer, I. L. and Singer, I. L. 2008. Tribology of diamond-like carbon films fundamentals and applications. *Third Bodies and Tribochemistry of DLC Coatings*, 201–236.
- Shah, F. U., Glavatskih, S. and Antzutkin, O. N. 2013. Boron in tribology: From borates to ionic liquids. *Tribology Letters*, 51(3), 281–301.
- Sheng, X., Li, S., Huang, H., Zhao, Y., Chen, Y., Zhang, L. and Xie, D. 2021. Anticorrosive and UV-blocking waterborne polyurethane composite coating containing novel two-dimensional Ti₃C₂ MXene nanosheets. *Journal of Materials Science*, 56(6), 4212–4224.
- Shirazi, S. F. S., Gharekhani, S., Mehrli, M., Yarmand, H., Metselaar, H. S. C., Adib Kadri, N. and Osman, N. A. A. 2015. A review on powder-based additive manufacturing for tissue engineering: Selective laser sintering and inkjet 3D printing. *Science and Technology of Advanced Materials*, 16(3).

- Smolyanitsky, A. 2015. Effects of thermal rippling on the frictional properties of free-standing graphene. *RSC Advances*, 5(37), 29179–29184.
- Smolyanitsky, A. and Killgore, J. P. 2012. Anomalous friction in suspended graphene. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 86(12).
- Sunil, T., Sandeep, M., Kumaraswami, R. and Shravan, A. 2016. A critical review on solid lubricants. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 7(5), 193–199.
- Tang, Y., Zuo, Y., Wang, J., Zhao, X., Niu, B. and Lin, B. 2014. The metastable pitting potential and its relation to the pitting potential for four materials in chloride solutions. *Corrosion Science*, 80, 111–119.
- Tevrüz, T. 2015. *Makine Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri*. Çağlayan Kitapevi, 125, İstanbul.
- Tian, J., Li, C. and Xian, G. 2021. Reciprocating friction and wear performances of nanometer sized-TiO₂ filled epoxy composites. *Polymer Composites*, 42(4), 2061–2072.
- Turalıoğlu, K., Taftalı, M., Tekdir, H., Çomaklı, O., Yazıcı, M., Yetim, T. and Yetim, A. F. 2021. The tribological and corrosion properties of anodized Ti6Al4V/316L bimetallic structures manufactured by additive manufacturing. *Surface and Coatings Technology*, 405.
- Uzundumlu, Y. E. 2023. Eklemlerde kullanılabilecek doğal bitkisel katkılı biyopolimer üretimi. Doktora Tezi. Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyomedikal Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 211, Erzurum.

- Wang, H., Wang, Y., Liu, Y., Zhao, J., Li, J., Wang, Q. and Luo, J. 2021. Tribological behavior of layered double hydroxides with various chemical compositions and morphologies as grease additives. *Friction*, 9(5), 952–962.
- Wei, Y., Zhang, P., Soomro, R. A., Zhu, Q. and Xu, B. 2021. Advances in the synthesis of 2D MXenes. *Advanced Materials*, 33(39).
- Wenzel, N. 1949. Surface roughness and contact angle. *The Journal of Physical and Colloid Chemistry*, 53(9), 1466–1467.
- Wu, Y., Wu, L., Yao, W., Jiang, B., Wu, J., Chen, Y., Chen, X. bo, Zhan, Q., Zhang, G. and Pan, F. 2021. Improved corrosion resistance of AZ31 Mg alloy coated with MXenes/MgAl-LDHs composite layer modified with yttrium. *Electrochimica Acta*, 374.
- Xuan, J., Wang, Z., Chen, Y., Liang, D., Cheng, L., Yang, X., Liu, Z., Ma, R., Sasaki, T. and Geng, F. 2016. Organic-base-driven intercalation and delamination for the production of functionalized titanium carbide nanosheets with superior photothermal therapeutic performance. *Angewandte Chemie*, 128(47), 14789–14794.
- Xue, Y., Wu, C., Shi, X., Zhang, K. and Huang, Q. 2021. High temperature tribological behavior of textured CSS-42L bearing steel filled with Sn-Ag-Cu-Ti₃C₂. *Tribology International*, 164.
- Xu, R., Yongshengwang, Wang, Y., Wang, Z. and Su, J. 2020. Effect of different micro-texture shape on corrosion resistance of metal surface. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 892(1).
- Yan, C., Bor, B., Plunkett, A., Domènech, B., Schneider, G. A. and Giuntini, D. 2022. Nanoindentation of supercrystalline nanocomposites: linear relationship between elastic modulus and hardness. *JOM*, 74(6), 2261–2276.

- Yan, H., Li, W., Li, H., Fan, X. and Zhu, M. 2019. Ti₃C₂ MXene nanosheets toward high-performance corrosion inhibitor for epoxy coating. *Progress in Organic Coatings*, 135, 156–167.
- Yetim, A. F. 2009. Biyomalzeme olarak kullanılan aısı316l paslanmaz çelik ve ti6al4v alaşımının plazma ile nitrüleme davranışı, ti-dlc ince film kaplama ile karşılaştırılması. Doktora Tezi. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 137, Erzurum.
- Yetim, T., Turalioğlu, K., Taftali, M., Tekdir, H., Kovaci, H. and Yetim, A. F. 2022. Synthesis and characterization of wear and corrosion resistant Ni-doped Al₂O₃ nanocomposite ceramic coatings by sol-gel method. *Surface and Coatings Technology*, 444.
- Yin, X., Jin, J., Chen, X., Rosenkranz, A. and Luo, J. 2019. Ultra-wear-resistant MXene-based composite coating via in situ formed nanostructured tribofilm. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 11(35), 32569–32576.
- Zhang, H. 2015. Ultrathin Two-Dimensional Nanomaterials. *ACS Nano*, 9(10), 9451–9469.
- Zhang, H. A., Hu, X. P., Tan, W. C. and Shi, C. 2008. Wear behaviors of MoSi₂ at elevated temperatures. *Key Engineering Materials*, 368–372, 961–963.
- Zhou, C., Li, Z., Liu, S., Zhan, T., Li, W. and Wang, J. 2022. Layered double hydroxides for tribological application: Recent advances and future prospective. *Applied Clay Science*, 221.
- Zhou, C., Zhao, X., Xiong, Y., Tang, Y., Ma, X., Tao, Q., Sun, C. and Xu, W. 2022. A review of etching methods of MXene and applications of MXene conductive hydrogels. *European Polymer Journal*, 167.

Zupan, J. and Kolar, D. 1972. Optical properties of graphite and boron nitride Optical properties of graphite and boron nitride. J Phys. C Solid State Phys, 5, 3097–3100.

