



T.C.

ALANYA ALAADDİN KEYKUBAT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**MAX FAZDAN MXene TOZ ELDESİ ve POLİMERE TAKVIYE EDİLMESİ ile
ÜRETİLEN MALZEMELERİN TRİBOELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Muhammed Tunahan ÜNAL

Danışman

Prof. Dr. Derman VATANSEVER BAYRAMOL

ALANYA

2024

T.C.
ALANYA ALAADDİN KEYKUBAT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**MAX FAZDAN MXene TOZ ELDESİ ve POLİMERE TAKVIYE EDİLMESİ ile
ÜRETİLEN MALZEMELERİN TRİBOELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Muhammed Tunahan Ünal

Anabilim Dalı: Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Program Adı: Nanobilim ve Nanomühendislik

Danışman

Prof. Dr. Derman VATANSEVER BAYRAMOL

Bu tez çalışması, ALKÜ BAP Komisyonunca kabul edilen 2022-02-03-LTP01 numaralı proje ve TÜBİTAK BİDEB 2210-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Yüksek Lisans Burs Programı kapsamında desteklenmiştir.

ALANYA

(2024)

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilemeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programıyla tarandığını ve “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

Muhammed Tunahan ÜNAL

TEŞEKKÜR SAYFASI

Çalışmamda bana yol gösteren, destek ve emeklerini esirgemeyen, öğrencisi olmaktan gurur duyduğum tez danışmanım sayın Prof. Dr. Derman VATANSEVER BAYRAMOL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Araştırmalarımın hemen her aşamasında yardımlarını esirgemeyen, bilgisinden ve tecrübesinden faydalandığım hocam sayın Arş.Gör. Ercan ŞENER'e teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışma bünyesinde hammadde olarak kullanılan MAX fazı tozlarının, üniversitemiz bünyesinde yüksek lisans çalışmasında üretimlerini sağlayıp paylaşan Ebru ŞENER'e teşekkürlerimi sunarım.

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca desteklerini esirgemeyen, fakültemiz imkanlarından sonuna kadar faydalanmamı sağlayan Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi'ndeki tüm hocalarımaya sonsuz teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 2022-02-03-LTP01 proje numarası ile desteklenmiş olup ayrıca TÜBİTAK BİDEB 2210-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Yüksek Lisans Burs Programı kapsamında burs desteği alınmıştır. Desteklerinden dolayı Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü ve TÜBİTAK BİDEB'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmamı hayatım boyunca beni destekleyen, hakkını asla ödeyemeceğim babam İsmet ÜNAL'a ithaf ediyorum.

Muhammed Tunahan ÜNAL

ÖZET

MAX FAZDAN MXene TOZ ELDESİ ve POLİMERE TAKVİYE EDİLMESİ İLE ÜRETİLEN MALZEMELERİN TRIBOELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Muhammed Tunahan ÜNAL

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ocak, 2024 (46 Sayfa)

Gün geçtikçe, insanoğlu kaynakların hızla tüketmekte olduğunu ve çevre kirliliğinin tehlikesinin farkına daha fazla varmaktadır. Bu nedenle, kaynakların daha verimli kullanımı ve çevreye en az zarar veren malzeme ve/veya yöntemlerin tercihi ile ilgili önemli çalışmalar yapılmaktadır. Ulaşılan güç yoğunlukları göz önüne alındığında, hibrit yenilenebilir enerji yapıları, enerji üretimi ve elektronik cihazların çalıştırılması için iyi adaylar olarak kabul edilebilir. Triboelektrik kavramı, yüksüz yani nötr olan malzemelerin birbirleri ile kısa süreli temasları sayesinde aralarında meydana gelen elektron alış-verişi neticesinde ortaya çıkan bir olaydır. Triboelektrik etki mekanizmalarının belirlenmesinden bu yana bir taraftan bu etkiye sahip malzemeler araştırılırken diğer taraftan triboelektrik olarak üretilecek olan enerjinin artırılması yönünde çalışmalar sürdürülmektedir. Buradan yola çıkarak, bu çalışmada üretilen MXene tozlarının katkılandırıldığı polimerin tribolojik özellikleri üzerine incelemeler yapılmış ve oluşan farklılıklar tartışılmıştır.

Çalışmada kullanılan MXene, dağlama işlemi ile MAX faz malzemesinden üretilmiştir. Bu amaçla, hammadde olarak kullanılan MAX fazı Ti_3SiC_2 formundadır. MAX fazı çalışma içerisinde 4 ayrı asit ile kimyasal aşındırma işlemine maruz bırakılmıştır. Bu asitler hidroflorik asit (HF), hidroklorik asit (HCl), sülfirik asit (H_2SO_4) ve nitrik asit (HNO_3) olacak şekildedir. MAX fazı aşındırma işlemi 3 ayrı süre ve 3 ayrı molaritede gerçekleştirilmiştir. 3-5-7 molar asit ile 12-48-96 saat liç işlemi gerçekleştirilmiştir. Toplamda 36 ayrı reçetede olası faz değişikliği incelenmiştir. Aşındırma işleminden sonra pH değeri '6' oluncaya dek santrifüj işlemi uygulanan karışım kullanıma hazır hale getirilmiştir. MXene tozları XRD altında karakterize edilmiş ve partikül boyutları bir Zetasizer aracılığıyla belirlenmiştir. MXene tozu polimer çözeltisine eklenmiştir ve bir manyetik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Çözelti, bir film

oluşturmak üzere petri kabına dökülmüştür. Film oluşumu için solvent döküm tekniği kullanılmıştır. Üretilen filmlerin voltaj oluşumları osiloskop altında test edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: MXene Fazları, $Ti_3C_2T_x$, Triboelektrik Malzemeler.



ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE TRIBOELECTRIC PROPERTIES OF MATERIALS MANUFACTURED BY MAKING MXene POWDER FROM MAX PHASE AND SUPPLYING POLYMER

Muhammed Tunahan ÜNAL

Department of Metallurgy and Materials Engineering
Graduate School of Alanya Alaaddin Keykubat University,

January, 2024

Day by day, mankind is becoming more aware of the rapid consumption of resources and the danger of environmental pollution. For this reason, important studies are being carried out on the more efficient use of resources and the choice of materials and/or methods that are least harmful to the environment. Considering the power densities achieved, hybrid renewable energy structures can be considered as good candidates for power generation and operation of electronic devices. The concept of triboelectricity is a phenomenon that occurs as a result of electron exchange between uncharged, i.e. neutral materials due to their short-term contact with each other. Since the determination of the mechanisms of triboelectric effect, on the one hand, materials with this effect have been investigated, on the other hand, studies have been carried out to increase the energy to be produced as triboelectric. Based on this, the tribological properties of the polymer doped with MXene powders produced in this study were investigated and the differences were discussed.

MXene used in the study was produced from MAX phase material by etching process. For this purpose, the MAX phase used as raw material is in the form of Ti_3SiC_2 . MAX phase was subjected to chemical etching with 4 different acids in the study. These acids are hydrofluoric acid (HF), hydrochloric acid (HCl), sulphuric acid (H_2SO_4) and nitric acid (HNO_3). The MAX phase etching process was carried out at 3 different times and 3 different molarities. The leaching process was carried out for 12-48-96 hours with 3-5-7 molar acid. In total, possible phase change was analysed in 36 different recipes. After the etching process, the mixture was centrifuged until the pH value was '6' and the mixture was ready for use. MXene powders were characterised under XRD and particle sizes were determined using a Zetasizer. MXene powder was added to the polymer solution and mixed with a magnetic stirrer. The solution was poured into a petri dish to

form a film. Solvent casting technique was used for film formation. The voltage evolution of the produced films was tested under oscilloscope.

Keywords: MXene Phases, $Ti_3C_2T_x$, Triboelectric Materials.



İÇİNDEKİLER

İÇ KAPAK SAYFASI	
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI	i
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	i
TEŞEKKÜR SAYFASI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	2
1.2. Tezin Hedefleri	2
2. LİTERATÜR	3
2.1. MAX Fazları ve MXene Fazları	3
2.1.1 MAX Fazları	3
2.1.2 MAX Fazların Genel Özellikleri	4
2.1.3 MXene Fazları	5
2.1.4 MXene Fazların Genel Özellikleri	7
2.2. MAX Fazlarının MXene Fazlarına Geçişinde Kullanılan Yöntemler	8
2.2.1 Hidroflorik Asit ile Aşındırma	9
2.2.2 Hidroklorik Asit ile Aşındırma	9
2.2.3 Alkali Aşındırma	10
2.3. MXene Fazların Kullanım Alanları	10
2.3.1 Biyomalzeme Alanındaki Uygulamalar	10
2.3.2 Kompozit Alanındaki Uygulamalar	11
2.3.3 Süper Kapasitör Alanındaki Uygulamalar	11
2.4. Triboelektrik Etki ve Takviye MXene	12
3. YÖNTEM	18
3.1. Hammadde Tedariği ve Karakterizasyonu	18
3.2. Kompozisyon Tasarımı ve Malzeme Üretimi	18
3.3. Film Üretimi	22
3.4. Triboelektrik Testler için Numune Hazırlama	22

4. TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER.....	24
4.1. Üretilen MXene Tozlarının Karakterizasyonu.....	24
4.1.1 Faz Analizi	24
4.1.2 Mikroyapı Tane Boyutu ve Dağılımı Analizi.....	29
4.1.3 Mikroyapı Karakterizasyonu	33
4.1.4 Triboelektrik Testler	37
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	39
6. KAYNAKLAR	40
ÖZGEÇMİŞ	



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 Periyodik tablo içerisinde MAX faz yapılarını oluşturabilecek elementler (4).	3
Şekil 2.2 (a) 211, (b) 312 ve (c) 413 fazlarının atomik yapıları(5).	4
Şekil 2.3 Oksidasyon ortamında Ti_3SiC_2 alaşımının performansı (7).	4
Şekil 2.4 MAX fazının MXene fazına geçişinin şematik gösterimi (15).	6
Şekil 2.5 MAX fazını ve MXene fazının bileşimini gösteren periyodik tablo (16).	6
Şekil 2.6 MXene Fazı ile ilgili yıllar içerisinde yapılan ve literatüre girmiş çalışmaları gösteren şema (17–19).	7
Şekil 2.7 MAX fazından MXene fazının eldesi (27).	9
Şekil 2.8 Yıllara göre MXene uygulamaları ile ilgili araştırmalar (37).	12
Şekil 2.9 Malzemelerin elektron verme veya elektron alma eğilimlerine göre düzenlenmiş triboelektrik serilerin listesi (46).	14
Şekil 2.10 Triboelektrik jeneratörlerin çalışma modları (46).	15
Şekil 3.1 MAX fazı tozlarının HF asit içerisinde MXene faza geçişi.	19
Şekil 3.2 Asidik aşındırma işlemi sonrasında yapıdaki asidin uzaklaştırılması.	20
Şekil 3.3 Santrifüj işlemi ve yapının MXene faza dönüşmesinin ilk muayenesi.	21
Şekil 3.4 Farklı parametrelerde üretilen film yapıları	22
Şekil 3.5 Triboelektrik özellikleri incelenen film yapının test aşaması.	23
Şekil 4.1 MAX tozun 3M HF ve H_2O_2 içerisinde 12-48-96 saatlik aşındırma işlemi sonucunda oluşan 5-80 derece aralığındaki XRD görüntüleri.	24
Şekil 4.2 MAX tozun 5M HF ve H_2O_2 içerisinde 12-48-96 saatlik aşındırma işlemi sonucunda oluşan 5-80 derece aralığındaki XRD görüntüleri.	25
Şekil 4.3 MAX tozun 7 M HF ve H_2O_2 içerisinde 12-48-96 saatlik aşındırma işlemi sonucunda oluşan 10-80 derece aralığındaki XRD görüntüleri.	25
Şekil 4.4 MAX tozun 12 saat HF ve H_2O_2 içerisinde 3-5-7 molarlık aşındırma işlemi sonucunda oluşan 5-80 derece aralığındaki XRD görüntüleri.	26
Şekil 4.5 MAX tozun 48 saat HF ve H_2O_2 içerisinde 3-5-7 molarlık aşındırma işlemi sonucunda oluşan 5-80 derece aralığındaki XRD görüntüleri.	26
Şekil 4.6 MAX tozun 96 saat HF ve H_2O_2 içerisinde 3-5-7 molarlık aşındırma işlemi sonucunda oluşan 5-80 derece aralığındaki XRD görüntüleri.	27
Şekil 4.7 MXene fazın Qandeel ve ark. (2020) tarafından üretildiği ve incelendiği çalışmada yapılan XRD analizi sonucu.	27
Şekil 4.8 MAX tozun 3-5-7 M HNO_3 içerisinde 12 saatlik aşındırma işlemi sonucunda oluşan 5-80 derece aralığındaki XRD görüntüleri.	28
Şekil 4.9 MAX tozun 3-5-7 M HCl içerisinde 12 saatlik aşındırma işlemi sonucunda oluşan 5-80 derece aralığındaki XRD görüntüleri.	28
Şekil 4.10 MAX tozun 3-5-7 M H_2SO_4 içerisinde 12 saatlik aşındırma işlemi sonucunda oluşan 5-80 derece aralığındaki XRD görüntüleri.	29

Şekil 4.11 5M HF içerisinde 12 saat aşındırma sonucu elde edilen tozun tane boyut analizi.....	29
Şekil 4.12 5M HF içerisinde 12 saat aşındırma sonucu elde edilen tozun tane boyut analizi.....	30
Şekil 4.13 5M HF içerisinde 48 saat aşındırma sonucunda elde edilen MXene tozun tane boyut analizi.....	30
Şekil 4.14 5M HF içerisinde 48 saat aşındırma sonucunda elde edilen MXene tozun tane boyut analizi.....	30
Şekil 4.15 5M HF içerisinde 96 saat aşındırma sonucunda elde edilen MXene tozun tane boyut analizi.....	31
Şekil 4.16 5M HF içerisinde 96 saat aşındırma sonucunda elde edilen MXene tozun tane boyut analizi.....	31
Şekil 4.17 7M HF içerisinde 48 saat aşındırma sonucunda elde edilen MXene tozun tane boyut analizi.....	31
Şekil 4.18 7M HF içerisinde 48 saat aşındırma sonucunda elde edilen MXene tozun tane boyut analizi.....	32
Şekil 4.19 7M HF içerisinde 96 saat aşındırma sonucunda elde edilen MXene tozun tane boyut analizi.....	32
Şekil 4.20 7M HF içerisinde 96 saat aşındırma sonucunda elde edilen MXene tozun tane boyut analizi.....	32
Şekil 4.21 5M/48 Saat HF ile kimyasal aşındırma işlemine tabi tutulan numunenin SEM görüntüleri.....	33
Şekil 4.22 5M/96 Saat HF ile kimyasal aşındırma işlemine tabi tutulmuş numunelerin mikroyapı görüntüleri.....	34
Şekil 4.23 Mikroyapı görüntülerinde 7M/48 Saat HF ile kimyasal aşındırma işleminin uygulandığı numunenin SEM görüntüleri.....	35
Şekil 4.24 5M 48 Saat HF asit ile aşındırma işlemine maruz bırakılan numunenin SEM/EDS görüntüsü.....	36
Şekil 4.25 5M 96 Saat HF asit ile aşındırma işlemine maruz bırakılan numunenin EDS analiz sonucu.....	36
Şekil 4.26 7M 48 Saat HF asit ile aşındırma işlemine maruz bırakılan numunenin EDS analiz sonucu.....	37
Şekil 4.27 Hazırlanan numunelerin triboelektrik test sonuçlarına ait görseller	38

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

rpm	Dakikadaki Devir sayısı (Rotation Per Minute)
P	Basınç
Ti ₃ SiC ₂	Titanyum Silisyum Karbür
Ti ₃ C ₂	Titanyum Karbür
pH	Potansiyel hidrojen
g/cm	Yoğunluk
g	gram
N	Kuvvet
°C	Santigrat derece
dB	Desibel
m	metre
M	Molar
K	Kelvin
Ω	ohm
W/mK	Isıl iletkenlik katsayısı

Kısaltmalar

ALKÜ	Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi
Ti	Titanyum
Si	Silisyum
TiC	Titanyum Karbür
SiC	Silisyum Karbür
C	Karbon
Ti ₃ SiC ₂	Titanyum Silisyum Karbür
Ti ₃ C ₂	Titanyum Karbür
PVDF	Polivilidin Florür
DMF	Dimetilformamid
DMAC	Dimetilasetamid

1. GİRİŞ

Gün geçtikçe insanoğlu, kaynakların hızla tükenmekte olduğunun ve çevre kirliliğinin tehlikesinin farkına daha fazla varmaktadır. Bu nedenle, kaynakları daha verimli kullanma ve çevreye en az zarar veren malzeme ve/veya yöntemleri tercih etme yolunda önemli çalışmalar yapılmaktadır. Ancak dünya enerji talebinin her geçen yıl artmaya devam edeceği de bir gerçektir. Bu nedenle önemli sayıda araştırmacı, daha iyi ve daha temiz bir çevre için Dünyanın sürekli artan enerji ihtiyacının en azından bir kısmını çevreye zarar vermeden karşılamanın bir yolunu bulmaya odaklanmaktadır. Bu yaklaşımla, “yenilenebilir enerji” adı altında farklı uyaranlardan enerji üretimi gerçekleştiren malzeme ve malzeme grupları hayatımıza girmiştir. Bunlardan biri olan “triboelektrik” nano jeneratörler üzerine yapılan çalışmalar ile yenilenebilir enerji alanındaki çalışmalar yeni bir yön daha kazanmıştır. [1,2]. Bu alanda son yıllarda çalışmaların hız kazandığını söylemek mümkündür. Yenilebilir enerji kaynakları ile üretilen enerjinin artırılması, diğer enerji üretim yöntemlerinin daha az kullanılması ve dolaylı olarak da çevrenin daha az kirletilmesi anlamına gelmekte olup oldukça önemlidir. Malzemelerin özellikleri üzerinde bazı değişiklikler yapabilmek adına ilgili malzemeye farklı malzemelerin dahil edilmesi yani katkılandırılması birçok alanda kullanılan bir yöntemdir. Yenilenebilir enerji üretimi sağlayan triboelektrik özellikli malzemeler için de daha yüksek enerji verimi elde etmek adına benzer çalışmalar yapılmaktadır.

Bu çalışmada, triboelektrik listede yer alan Poliviniliden florür (PVDF) polimerine MXene fazı takviye edildiğinde polimerin sağladığı triboelektrik etkinin artırılıp artırılmayacağı çalışılmıştır. Bu amaçla, PVDF’e katkılandırılmak üzere, Ebru ŞENER’in yüksek lisans tezinde uyguladığı yöntem takip edilerek hazırlanan titanyum silisyum karbür (Ti_3SiC_2) MAX fazlardan Ti_3C_2 formunda MXene elde edilmiştir. MXene fazları karbür, nitrür ve karbonitrür yapılardan oluşabilecek 2 boyutlu yeni nesil bir malzemedir [3]. Yeni nesil bu faz, gelişmiş elektriksel iletkenliği ve geniş yüzey alanı ile birçok alanda çalışmalara uygunluğu ile dikkat çekmektedir. Bu nedenle, polimere takviye edilmesi ile triboelektrik özelliğin artacağı öngörülerek çalışma hayata geçirilmiştir.

1.1. Tezin Amacı

Bu çalışmada, kimyasal aşındırma yöntemi ile Ti_3SiC_2 MAX fazlı yapıdan Ti_3C_2 MXene faz bileşiğinin (Ti_3C_2) üretimi, analizi, PVDF polimerine takviye edilerek solvent döküm yöntemi ile film haline getirilmesi, üretilen filmlerin triboelektrik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

1.2. Tezin Hedefleri

Çalışmanın amaçlandığı şekilde gerçekleştirilebilmesi için için belirlenen hedefler aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- 1) MXene faz bileşiğinin (Ti_3C_2) kimyasal aşındırma yöntemi ile en az 1 asit, 2 farklı molarite ve 2 farklı sürede üretiminin gerçekleştirilmesi,
- 2) Sentezlenen MXene faz bileşiğinin asitten arındırılması, santrifüj işlemi yapılması,
- 3) pH seviyesi '6' seviyesine getirilen MXene tozlarının polimere homojen dağılım ile takviye edilmesi,
- 4) Takviye edilecek polimerin uygun çözücüler ile polimer çözeltisi haline getirilmesi,
- 5) MXene takviyeli film haline getirilmiş polimerin bir osiloskop yardımı ile triboelektrik özelliklerinin belirlenmesi hedeflenmektedir.

2. LİTERATÜR

2.1. MAX Fazları ve MXene Fazları

Tez çalışması kapsamında üretilecek olan MXene yapılar, MAX fazdan kimyasal aşındırma tekniği ile elde edileceğinden öncelikle MAX fazlı yapılar ve literatürdeki çalışmalar incelenmiş olup daha sonra MXene fazlar ve özelliklerine ait literatür okumaları yapılmıştır.

2.1.1 MAX Fazları

MAX fazlı malzemeler genel olarak $M_{n+1}AX_n$ ($n=1-5$) şeklinde formüle edilmiştir. M, A ve X harfleri element tablosunda farklı grupları temsil etmektedir. “M” ile sembolize edilmiş kısım geçiş metallerini, “A” ile sembolize edilmiş kısım geçiş grubu elementlerini, “X” ile sembolize edilmiş kısım ise Azot (N) veya Karbonu (C) temsil etmektedir. Günümüze kadar yapılan çalışmalarda MAX fazları üretiminde M, A ve X olarak yapıya dahil edilebilecek elementler belirlenmiş olup Şekil 2.1’de periyodik tablo üzerinde gösterilmiştir.

The figure shows a periodic table with the following elements highlighted for MAX phase formation:

- Red (M):** Sc, Ti, V, Cr, Zr, Nb, Mo, Hf, Ta.
- Blue (A):** Al, Si, Ga, Ge, In, Sn, Tl, Pb.
- Black (X):** C, N.

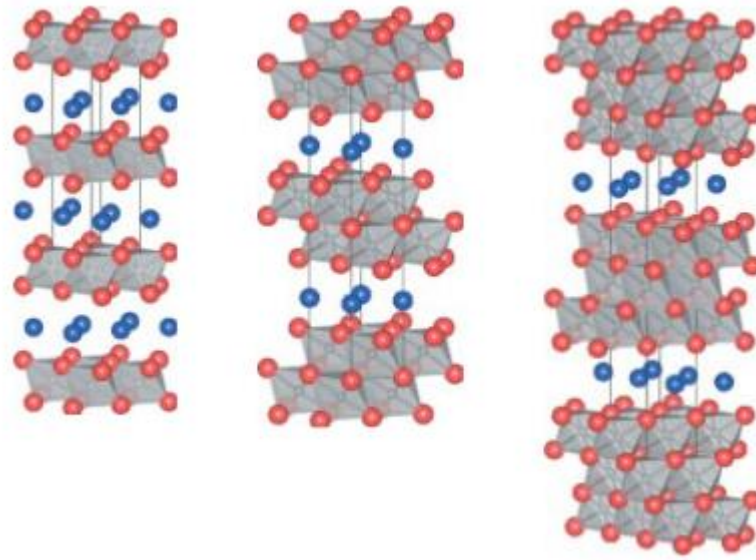
Legend: M: early transition metal, A: group A element, X: C and/or N.

Şekil 2.1 Periyodik tablo içerisinde MAX faz yapılarını oluşturabilecek elementler [4].

MAX fazı alaşımları üst üste çok ve nano katmanlı kristal bir yapıya sahiptir. Yüksek sıcaklıklarda termodinamik koşullar altında, ısıl işlemler sonucunda atomlar katmanlı bir dizilim göstermektedir. Bu farklı atom dizilimleri ve katmanlı yapıları sayesinde hem metal hem de seramiklere ait bazı özellikleri bir arada gösterebilmektedirler.

Şekil 2.1.’deki periyodik tabloda gösterilen elementler ile oluşturulabilecek MAX fazlı yapıların sayısının yüzden fazla olduğu bilinmektedir. Ancak, MAX fazlarının genel

olarak karşılaşılan ve endüstride en sık kullanılan çeşitleri Şekil 2.2’de verilen 211, 312 ve 413 olmak üzere 3 ayrı hekzagonal kristal kafes sistemidir.

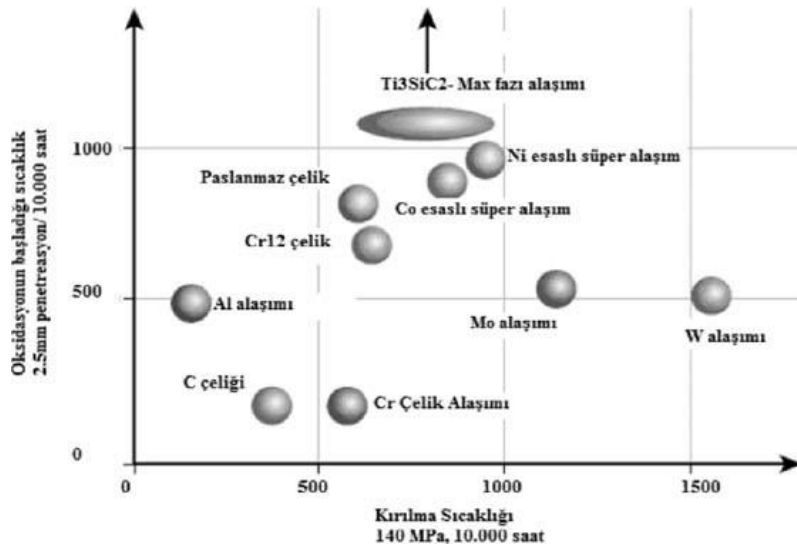


Şekil 2.2 (a) 211, (b) 312 ve (c) 413 fazlarının atomik yapıları[5].

Şekil 2.2.’de atomik yapıları verilen 211, 312, 413 MAX fazları dışında 514, 615 ve 716 MAX faz yapıları da üretilmekte olup literatürde az da olsa bu yapılarla ilgili çalışmalara rastlanmaktadır.

2.1.2 MAX Fazların Genel Özellikleri

MAX faz alaşımlarının yoğunlukları $4-5 \text{ g/cm}^3$ civarındadır. Nispeten düşük yoğunlukta olmalarına rağmen sertlik değerleri, elastik modülleri ve spesifik mukavemetleri oldukça yüksektir [6].



Şekil 2.3 Oksidasyon ortamında Ti_3SiC_2 alaşımının performansı [7].

Faz kararlılığı oldukça yüksek olan MAX faz alaşımlarının 700°C'ye kadar oksidasyon direnci, 1300 °C'ye kadar faz kararlılığını korumaktadır [8,9]. MAX fazının yapısına göre değişiklik gösteren bu değerler oluşum yapısına göre 2300°C'ye kadar faz kararlılığı gösterebilmektedir. MAX fazlarının termal genleşme katsayıları $8-10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ aralığındadır.

MAX faz bileşiklerinin elektriksel iletkenlik değerleri $2-14 \times 10^6 (\Omega \text{m})^{-1}$ aralığında, termal iletkenlikleri ise 12-60 W/mK arasında değer almaktadır. MAX faz bileşiklerinin yapısına göre sıcaklığın artmasına bağlı olarak termal iletkenlik değerlerinde artış veya azalma gözlemlenmektedir [4,5].

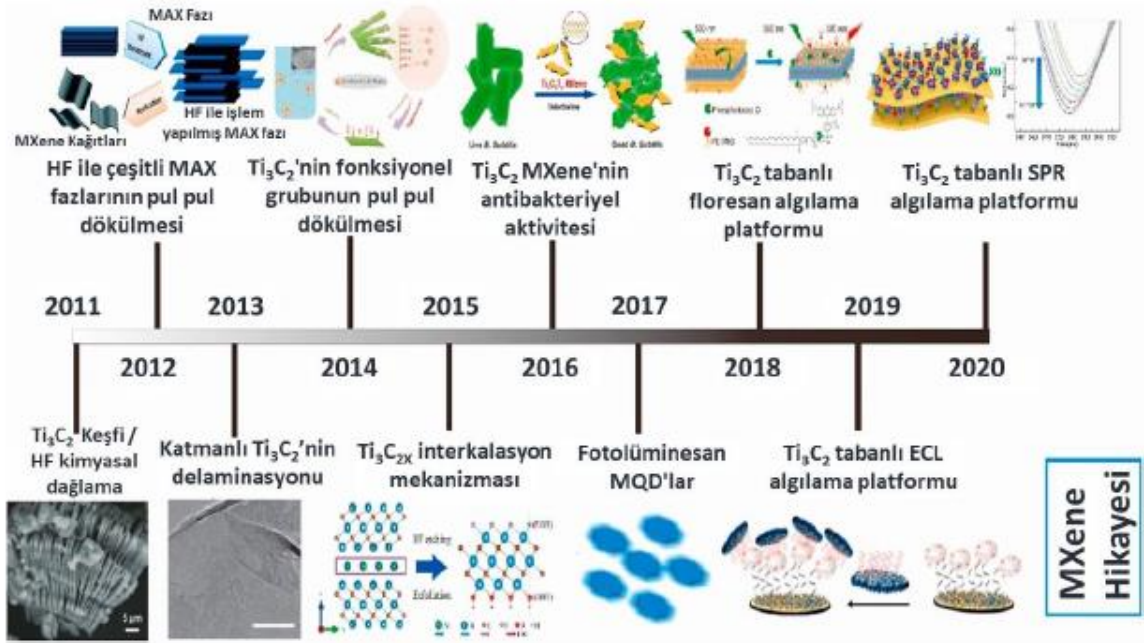
MAX faz alaşımları katmanlı yapıları, malzemenin darbeye karşı dayanımını artırmaktadır. İyi elektriksel ve termal iletkenlikleri, deformasyona dayanımlı olmaları, kolay işlenebilir olmaları, yüksek oksidasyon direnci ve düşük yoğunluk gibi özellikleri nedeniyle termo-fiziksel özellikler bakımından birçok malzemeye göre üstünlük ve avantaj sağlamaktadır [10].

2.1.3 MXene Fazları

MAX fazların HF ile muamele edilmesinin yapıda "A" ile ifade edilen geçiş metali elementini uzaklaştırdığı 2011 yılında bilime ve literatüre kazandırılmış olup böylelikle Ti_3C_2 MXene fazlar keşfedilmiştir. İki boyutlu malzeme grupları arasına yakın zamanda katılan MXene'ler, M_{n+1}X_n formülü ile ifade edilmektedir. Geçiş metali karbürleri, nitrürleri ve karbonitrürlerinden oluşan yeni nesil iki boyutlu malzemelerdir [11]. MXene fazları iki boyutlu yapıları sayesinde dinamik ve mekanik kararlılık sağlamaları ile çok yönlü kullanım alanına sahip olduklarını göstermektedirler.

2 boyutlu malzemeler arasında değerlendirildiğinde grafene göre daha zengin kimyasal içeriğe sahiptir. İçerisinde yalnızca karbon barındırmaması daha fazla ve gelişmiş özellikler sunma potansiyelini artırmaktadır [12]. Kimyasal aşındırma yöntemi ile elde edilen MXene fazları birçok alanda yüksek performans göstermektedirler. MXene fazın keşfedilmesi ile yüksek elektriksel iletkenlikleri, sert bir yapıda olmaları, kimyasal olarak kararlı ve yüksek yüzey alanlı morfolojileri nedeni ile enerji depolama alanında araştırma konusu haline gelmiştir [13,14].

MXene fazın yapısındaki çeşitliliğe göre farklı özellikler göstermekle birlikte çeşitli modifikasyonlar ile elektronik özellikleri de değiştirilebilmektedir. Son yıllarda MXene faz araştırmalarının artması ile yeni sentez ve işleme teknikleri de literatüre kazandırılmıştır. Bu çalışmalar yıllar içerisinde birçok MXene kompozisyonun ortaya çıkmasını sağlamıştır. MXene fazın keşfedilmesinden itibaren literatürde konumlandığı durumlar Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6 MXene Fazı ile ilgili yıllar içerisinde yapılan ve literatüre girmiş çalışmaları gösteren şema [17–19].

2.1.4 MXene Fazların Genel Özellikleri

Mxene fazların yüksek potansiyelli malzemeler olarak değerlendirilmesinin sebebi birçok uygulama alanında istenilen özellikleri sağlaması ve çok yönlü davranış gösterebilmesidir. Yüksek elektriksel iletkenlikleri, kimyasal kararlılıkları, ayarlanabilir bant boşlukları ve eşsiz morfolojisi gibi üstün özellikler taşımaktadır. MXene fazları çok katmanlı, birkaç katmanlı veya tek katmanlı yapıda bulunabilmektedir. Katman yapılarındaki farklılıklar, özelliklerinde değişikliğe neden olsa da mekanik özelliklerine bakıldığında içsel sertlik ve tokluk değerleri yüksektir [20].

MXene fazları seramik özellikleri sayesinde mekanik ve kimyasal olarak kararlı yapıdadır. Yapısında bulunan X elementlerinin metalik özellik ve/veya yarı iletkenlik gibi elektriksel özellikleri etkilediği görülmüştür. Bant aralığı ve iletkenlik özelliklerinin X elementleri tarafından belirlendiği görülmüştür [21,22].

Kristal yapılarına bakıldığında MXene fazlarla altıgen hegzagonal sıkı paket şeklinde karşılaşmak daha mümkündür. Kimyasal bağları incelendiğinde, yapı olarak kovalent ve metalik bağlı bir yapı sergilediği ancak MAX fazından dönüşümü sırasında yapıya Van der Waals bağları ve zayıf hidrojen bağları eklendiği görülmektedir [23].

Gözenekli yapıya sahip olan MXene fazlar, bu gözenekler sayesinde yüksek yüzey alanı özelliğine sahiptir. Yüksek yüzey alanına sahip olması ise enerji depolamada ve süper kapasitörlerdeki performansını olumlu yönde etkilemektedir [24].

MXene fazların sentezinde kullanılan yöntemler, elde edilen ürünün özelliklerine doğrudan etki etmektedir. Kullanılan üretim yöntemi ve sentez esnasındaki koşullar yapıda tortusal aşınmamış parçalar, akordeon benzeri morfoloji veya tek katmanlı yapı ile karşılaşılmasına neden olabilmektedir. MXene fazlar birçok yeni kompozitin sentezlenmesinde takviye elemanı olarak kullanılmaktadır. Tabakalı yapıları ve iyi esneklikleri, MXene fazları çok işlevli kompozit takviyesi haline getirmektedir. MXene'ler, mükemmel termal ve elektriksel iletkenlik, ısı direnci, kolay işlenebilirlik ve mükemmel hacimsel kapasitans dahil olmak üzere hem metallerin hem de seramiklerin özelliklerini birleştiren özellikleriyle dikkate değerdir.

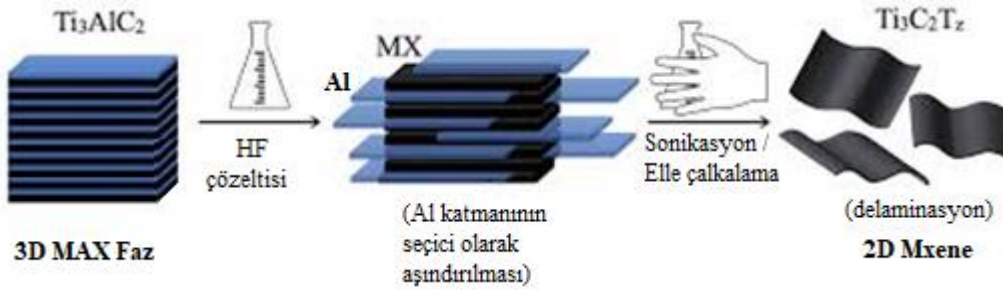
2.2. MAX Fazlarının MXene Fazlarına Geçişinde Kullanılan Yöntemler

MAX fazlarının aşındırılması için uzun yıllar çalışmalar sürdürülmüştür. Bu yıllar içerisinde çeşitli fiziksel ve kimyasal yöntemler denenmiştir. Günümüzde kullanılan MXene faz elde etme yöntemlerinin geliştirilmesi MAX fazların bağ yapılarının üzerinde yapılan çalışmalar ile mümkün olmuştur. Yapıdaki M-X bağları genel itibari ile iyonik ve kovalent bağlar ile birbirine bağlıdır. Bu durum yapıdaki M-X bağlarının güçlü bir duruş sergilemesini sağlamaktadır. Bunun yanı sıra yapı içerisindeki M-A elementleri genel itibari ile metalik bağlar ile birbirine bağlıdır. Bu durum ise M-A arasında zayıf bir bağlanma gücü olduğunu göstermektedir.

İncelenen bu bağ yapıları neticesinde uygun aşındırıcılar kullanılarak MAX fazındaki "A" katmanının seçici olarak aşındırılmasının mümkün olduğu görülmüştür. Aşındırma işlemi ilk zamanlarından itibaren HF ile yapılmaktadır. Günümüze bakıldığında doğrudan veya dolaylı olarak HF tabanlı aşındırma prosesleri yanında farklı asitlerin ve alkali kullanımının da tercih edildiği görülmektedir. Aşağıda hidroflorik asit, hidroklorik asit ve tetrametil amonyum hidroksit kullanılarak gerçekleştirilen aşındırma yöntemlerinden kısaca bahsedilmiştir.

2.2.1 Hidroflorik Asit ile Aşındırma

MXene fazın hidroflorik asit (HF) ile aşındırma sonucunda elde edilmesi ilk olarak 2012 yılında gerçekleştirilmiştir. %50 HF konsantrasyonu ile aşındırma işlemine maruz bırakılan MAX (Ti_3AlC_2) fazından Al atomlarının aşındırılması sonucunda MXene (Ti_3C_2) fazı elde edilmiştir [25]. MAX fazı, HF konsantrasyonuna oda sıcaklığında ve belirli bir sürede yavaş bir şekilde ilave edilmektedir. MAX fazının ilavesinin yavaş bir şekilde gerçekleştirilmesindeki neden, MAX fazının ilavesi esnasında oluşan reaksiyonun ekzotermik olmasıdır. Literatürde, reaksiyon esnasında açığa çıkan sıcaklık sebebi ile MAX faz ilavesinin buz banyosu içerisinde gerçekleştiği çalışmalar ile karşılaşmak mümkündür. Aşındırma işlemi sonrasında reaksiyonu sonlandırmak ve asidi yapıdan uzaklaştırmak maksadı ile deiyonize su ile çözelti yıkanmaktadır. Santrifüj işlemine tabii tutulan çözelti deiyonize su ile tekrar tekrar yıkanmaktadır. İşlemler sonucunda pH seviyesi '6' seviyesine gelinceye dek işlemler tekrarlanmaktadır [26]. Son olarak kurutulan MXene tozları kullanıma hazır hale gelmektedir. MAX faz tozlarına uygulanan işlem ve elde edilen MXene fazın oluşumu Şekil 2.7'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.7 MAX fazından MXene fazının eldesi [27].

2.2.2 Hidroklorik Asit ile Aşındırma

Literatürde bulunan birçok çalışmada MAX fazlardan MXene fazlara geçiş sırasında HCl kullanımı göze çarpmaktadır. Çalışmalar incelendiğinde, dolaylı yoldan HF ile yürütülen prosesler olduğu anlaşılmaktadır. MAX fazda bulunan A ile sembolize edilmiş elementi aşındırma maksadı ile hazırlanan HCl içerikli asidik çözeltilerin flor içeren tuzlarla birlikte kullanılması neticesinde çözelti yapısı HF bünyesine bürünmektedir. Proseslerin bu şekilde yürütülmesinin sebebi HF'in üretimindeki doğaya zararını minimize etmeye çalışmaktır. HCl ile hazırlanan asidik çözeltinin içerisine lityum florür (LiF), sodyum florür (NaF) gibi florür tuzlarının girmesi ile HF'in reaksiyon

içerisinde üretimini sağlanmaktadır. HF'in reaksiyon içerisinde üretiminin sağlanmasını gösteren reaksiyonun oluşumu şu şekildedir;



Böylece HF'in doğrudan eklenmesinin önüne geçilmiş olmaktadır. Bu yöntemin bir diğer avantajı ise oluşan MXene katmanları arasına florür tuzlarının yerleşmesi ve katmanlar arası mesafenin büyüyor olmasıdır. Katmanlar arası mesafenin artması daha iyi iyon etkileşimini sağlamaktadır. Florür tuzlarının kullanılması MXene üretiminde HCl ve sülfirik asit (H₂SO₄) gibi genel asitlerin kullanımını mümkün kılmaktadır.

2.2.3 Alkali Aşındırma

HF'in toksik doğası, MXene fazın HF ile aşındırılmasına alternatif olarak flor içermeyen yeni yöntemler bulma yönünde yapılan araştırmaların ilerlemesine neden olmuştur. Alkali aşındırma yönteminde, Ti₃AlC₂ MAX fazından düşük miktarda HF ve tetrametil amonyum hidroksit ile kullanılarak Al atomlarının ayrıştırılmasını sağlanmaya çalışılmıştır. Yapılan inceleme ve değerlendirmelerde, oluşan MXene fazın veriminin çok düşük olduğu ifade edilmiştir [28,29].

2.3. MXene Fazların Kullanım Alanları

MXene fazların önemli ve gelişmiş elektriksel, termal, mekanik ve kimyasal özellikleri malzemenin birçok alanda kullanılabilirliğini göstermiştir. Araştırmacıların ilgisini çeken bu özellikler literatürdeki onlarca çalışmayla desteklenmektedir.

Fotokatalizör uygulamaları, süperkapasitör uygulamaları, sensör uygulamaları, hidrojen depolama, elektromanyetik kalkanlama, antibakteriyel uygulamalar ve kompozitler gibi birçok alanda uygulaması bulunmaktadır. Birçok alanda uygulama bulmasının mümkün olması mekanik, yapısal, elektronik ve manyetik özelliklerinin gelişmiş ve uygulanabilir olmasından kaynaklıdır [30].

2.3.1 Biyomalzeme Alanındaki Uygulamalar

İki boyutlu MXene fazları, geniş ve spesifik yüzey alanına sahip olması, kolay işlenebilirliği, yüksek iletkenliği ve biyomedikal özellikleri ile literatürde önemli yere sahip olmuştur [31] Biyomedikal alanlarda MXene fazın 3 boyutlu eldesi için çalışmaların sürmesi daha fazla önem arz etmektedir. Özellikle sinir doku mühendisliğinde MXene faza yer verdikleri alanlarda gelişmiş özellikler ile gelişmiş performanslar izlemiştirlerdir [32]. MXene fazların sergilediği hidrofilik özellik

biyomateryal olarak kullanımı biyotıp için önem arz etmektedir. Diğer iki boyutlu malzemeler ile kıyaslandığında tek veya birkaç katmanlı MXene'ler oksijen ve sulu ortamda stabil özellik göstermektedir. Bu özelliği ile biyolojik olarak parçalanabilirlik açısından olumlu sonuçlar ile karşılaşmıştır [33]

2.3.2 Kompozit Alanındaki Uygulamalar

MXene fazların üstün özellikleri, birçok alanda olduğu gibi kompozit malzeme oluşturma ile ilgili yapılan araştırmalarda da dikkat çekmiştir. MXene faz bünyesine yapılan takviye veya takviyeler, katmanlar arasına giriş yaparak ayırıcı özellik sergileyebilmekteler. Ana faz bünyesine takviye edilen bu malzemelerin bünyeye yeni ve çoklu iyileştirmelerde bulunması kaçınılmaz bir hal almaktadır. Yapılan incelemelerde MXene bünyesine polimerler, karbon bazlı malzemeler, geçiş metali bazlı bileşikler, metal alaşımları ve metal-organik gibi malzemelerin takviye edilmesiyle başarılı kompozitlerin üretildiği gözlemlenmiştir. Oluşturulan yeni kompozitlerde meydana gelen yüzey alanındaki artış ve elektrokimyasal korumada kullanılabilen adsorpsiyon etkinliği gibi özellikler başta olmak üzere MXene'nin yüzey özelliklerinde olumlu gelişmeleri beraberinde getirmektedir [34]. MXene fazının takviye olarak kullanıldığı durumlarda yüksek elektriksel iletkenlik ve iyi mekanik özellikler göstermesi tercih edilen yeni nesil kompozitler oluşturulmasına teşvik olarak gösterilmektedir. Sentezinin geliştirilebilir boyutta olması ve geleneksel olarak kullanılan iki boyutlu malzemeler ile rekabetçi özellikleri sayesinde çeşitli endüstriyel uygulamalar için ideal malzemeler halini almaktadır [35].

2.3.3 Süper Kapasitör Alanındaki Uygulamalar

Süperkapasitör alanında tercih edilen MXene fazlar, katmanlı yapıları ve yüzey özelliklerinin işlevsel olması maksadı ile bu alandaki çalışmalar içerisinde yerini almaktadır. Yüksek elektriksel iletkenlikleri ve geniş yüzey alanları ile enerji depolama için süper kapasitörlerde kullanımları umut vericidir. Yüksek enerji yoğunluğu ve uzun ömürlü enerji depolama gibi özellikler elde edilmesi, MXene fazın yeni elektrot tasarımlarında, elektrolit mühendisliği ve hibrit malzemeler de dahil olmak üzere farklı alanda tercih edilen bir malzeme olmasını sağlamaktadır. İki boyutlu MXene fazın M ve X bileşenlerinin ayarlanabilir stekiyometrik oranları, değiştirilebilir özellikleri de beraberinde getirmektedir. MXene fazın suda dağılılırılığı, iyi mekanik özellikleri ve

olan 2012 yılındaki birkaç çalışmada triboelektrik etki modlarına yer verilmiştir. Seçilecek olan mod ile uygulama alanı arasındaki ilişki ve uyum maksimum verim sağlama bakımından önemlidir. Bilim ve akademide triboelektrik malzemeler ile ilgili yapılan çalışmalarda gelinen son nokta umut vericidir. Uygulama alanları arasında ise triboelektrik malzemelerin ve triboelektrik etkinin yenilenebilir enerji uygulamalarında kullanımı büyük bir yere sahiptir. Çevre kirliliği, hava kirliliği, küresel ısınma ve kaynakların azalması gibi etkenler, elektrik enerjisine dönüştürülebilecek ve elektrik enerjisi üretiminde kullanılacak yeni kaynaklar üzerinden çalışma ihtiyacı doğurmuştur. Bu nedenle, triboelektrik etki ile elektrik üretimi ve üretilen elektrik enerjisinin kullanımı üzerine yapılan çalışmalar önem arz etmektedir.

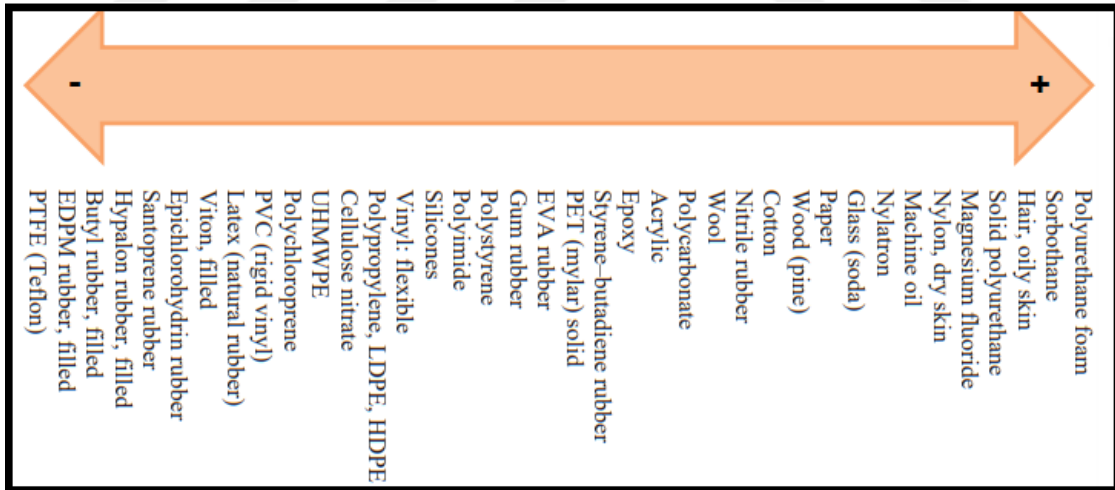
Tarihsel gelişimine bakıldığında son 20 yılda yenilenebilir enerji çalışmalarının önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Yenilenebilir enerjiden bahsederken en yaygın kullanılan malzemeler, güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürebilen fotovoltaik malzemeler ve mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürebilen piezoelektrik malzemelerdir. Her iki malzeme de akıllı malzemeler sınıfında yer alan önemli ve özel malzemelerdir. Piezoelektrik ve fotovoltaik malzemeye dayalı yenilenebilir enerji çalışmalarının yanı sıra triboelektrik malzemeler ve bunların enerji üretiminde kullanımları üzerine yapılan çalışmalar da hızla artmaktadır.

Triboelektrik etki uzun yıllardır bilinmesine rağmen ilk ulaşılabilir literatürün 1898 yılında Coehn tarafından yazıldığı belirtilmektedir. O dönemde ortaya atılan bu etki, yıllar içerisinde farklı araştırmacıların çalışmalarına konu olmuş ve bu sayede bugün kullandığımız "triboelektrik seriler" listesinin geliştirilmesine yol açmıştır. Coehn, triboelektrik serideki malzemelerin varlığı ile bunların dielektrik katsayıları arasındaki ilişkiyi incelemiş ve dielektrik katsayısı yüksek olan malzemelerin temastan sonra verici olarak davranıp pozitif yüklendiğini, dielektrik katsayıları düşük olan malzemelerin ise temastan sonra negatif olarak yüklendiğini yani alıcı olarak hareket ettiğini belirtmiştir [38]. Gallo ve Lama tarafından 1976 yılında yapılan bir çalışmada, Coehn'in çalışmasında, artık yükün ihmal edilmesi nedeniyle triboelektrik etkiyi ifade ederken sadece dielektrik katsayısına bağlı kalmanın doğru olmayacağını belirtilmiştir [39].

Kısa süreli temas ve ayrılma sonucu yük, farklı malzemelerin yüzeyinde oluştuğu için meydana gelen durumu ifade etmek adına "kontakt elektrifikasyonu", "statik yük" veya "temas yükü" gibi terimlerin kullanıldığına rastlamak mümkündür. 1800'lü yıllarda oluşturulmaya başlanan "triboelektrik seriler" listesi yıllar içinde genişlemiştir. Diaz ve Felix-Navarro 2004 yılında yaptıkları çalışmada 1898, 1955, 1962 ve 1987 yıllarından

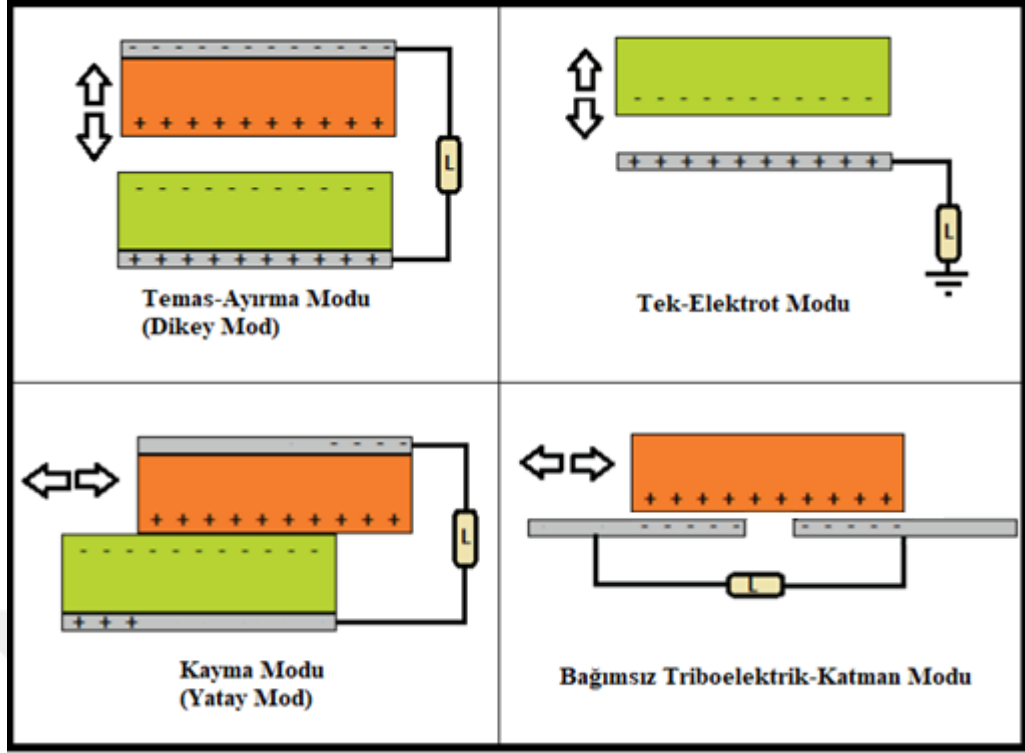
seçtikleri yayınlardaki listeleri karşılaştırmışlar ve polimerler için yarı kantitatif triboelektrik dizi listesi oluşturmayı amaçlamışlardır [40]. Çünkü polimerler kolay ulaşılabilirlik, esneklik, hafiflik, ucuzluk ve çok yönlülük gibi avantajları ile diğer birçok alanda olduğu gibi triboelektrik malzeme ve uygulama alanında da ön plana çıkmaktadır. 1986'da Yamamoto ve Scarlett, bir parçacığın çarpma ekipmanı tarafından darbeye maruz bırakıldığında polimer parçacıkları tarafından üretilen triboelektrik yükü deneysel olarak incelemiştir [41].

Dünyanın artan enerji talebi, özellikle triboelektrik nanojeneratörlerin kullanıma girmesiyle yenilenebilir enerji alanındaki çalışmalara yeni bir yön vermiştir [42,43]. Şekil 2.9'da malzemelerin elektron verme veya elektron alma eğilimlerine göre düzenlenmiş triboelektrik bir seri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, saç ve cilt temas ettirildiğinde pozitif yüklenir ve örneğin PVC sandalye gibi farklı bir malzemeye doğru yönelir. Özellikle cildin daha kuru olduğu kış aylarında bu durum daha belirgin yaşanmaktadır. Yapılan çalışmalarla, seçilen iki malzemedен birinin negatif uca, diğerinin pozitif uca yakın olduğu yani iki malzeme arası uzaklık arttığı durumda, triboelektrik etkinin daha yüksek enerji üretimi meydana getireceği ortak sonucu ortaya çıkmıştır [44,45].



Şekil 2.9 Malzemelerin elektron verme veya elektron alma eğilimlerine göre düzenlenmiş triboelektrik serilerin listesi [46].

Triboelektrik jeneratörlerin dört çalışma modu, Şekil 2.10'da verildiği gibi dikey temas ayırma modu, tek elektrot modu, yanal kayma modu ve serbest duran triboelektrik katman modudur.



Şekil 2.10 Triboelektrik jeneratörlerin çalışma modları [46].

Yürürken gerçekleştirilen temas ve ayrılma hareketinden enerji toplamak için yapılan bir çalışmada, ayakkabının içine triboelektrik nanojeneratör monte edilmiştir ve bu çalışma, triboelektrik alanında yenilenebilir enerji üretimine yönelik önemli bir yaklaşımdır. Çalışmada, triboelektrik malzeme olarak biri polidimetilsiloksan (PDMS) diğeri polietilen teraftalat (PET) olmak üzere iki film ve iki triboelektrik film arasında elastik bir sünger kullanılmıştır. İnsan yürüyüşü sonucunda maksimum 220 V voltaj değerine ve 40 mA akım yoğunluğuna ulaşıldığı ve bunun küçük elektroniklere güç sağlamak için kullanılabileceği belirtilmiştir [47].

Nguyen ve Yang bağıl nem ve hava basıncının triboelektrik enerji üretimi üzerindeki etkisini incelemiştir. Bağıl nemin etkisini belirlemek için uygulanan mekanik uyarma aynı tutulurken bağıl nem %90'dan %10'a düşürülmüştür. Ortam basıncında bağıl nem azaldıkça üretilen şarjda bir artış tespit edilmiştir. Hava basıncının etkisini belirlemek için bağıl nem %0'a yakın tutulurken hava basıncı ortam sıcaklığında 50 Torr'a düşürülmüştür. Hava basıncı azaldıkça üretilen şarjda bir azalma tespit edilmiştir.[48] Vasandani ve diğeri, iki triboelektrik katmanın temas kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün üretilen triboelektrik yük üzerindeki etkilerini incelemiştir [49].

Bunların yanında rüzgârdan sudan ve tekstillerden triboelektrik enerji üretimi ile ilgili bir dizi deneysel araştırma ve inceleme yayınlanmıştır [50–54]. Biyonomik yüzgeç gibi tasarlanmış ve yapılandırılmış çok katmanlı bir triboelektrik nanojeneratör tarafından denizaltı enerjisinin toplanması üzerine yapılan çalışmadaki fikir, üretilen enerjiyi en üst düzeye çıkarmak için operasyon sırasında çok alanlı temas kurmak olmuştur. Bu çalışma için rapor edilen tepe güç yoğunluğu, su dalgalarından triboelektrik enerji hasadı üzerine yapılan bazı benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında, ideal test koşulu altında önemli ölçüde yüksek olan 444 W m^{-3} olarak rapor edilmiştir [55–57]. Aynı yıl, Huang ve ark. triboelektrik nanojeneratörler ile okyanus dalgasından enerji üretimi üzerine yapılan deneysel çalışmaları derlerken, Slabov ve ark. doğal ve çevre dostu malzemeler kullanarak gerçekleştirilen triboelektrik enerji üretimi konusundaki çalışmaları incelemiştir [58,59]. Rodrigues-Marinho ve ark. polimer bazlı triboelektrik malzemeleri ve bunların enerji üretim yeteneklerini incelerken, yeşil ve çevre dostu uygulamalar için biyobozunur malzemelerin triboelektrik enerji hasadı Chao ve diğerleri tarafından incelenmiştir [60,61].

Araştırma gruplarından bazıları, triboelektrik malzemeler içeren hibrit enerji üretimi gerçekleştiren yapılar üzerinde çalışmaya başlamıştır. Hibrit enerji jeneratörleri içeren triboelektrik malzeme ile ilgili ilk çalışmalardan biri Jung ve diğerleri (2015) tarafından yapılmıştır [62]. Çalışmalarında, kontak ayırma ile 370 V tepe çıkış voltajı ve 12 mA.cm^{-2} akım yoğunluğu ile ortalama güç yoğunluğunun yaklaşık 4.44 mW.cm^{-2} olduğunu açıklamışlardır.

İslam ve ark. (2020) tarafından daha yüksek voltaj çıkışları elde etmek için tasarlanan elektromanyetik ve triboelektrik katmanlardan oluşan hibrit bir karo yapısı ile 1200 V açık devre voltajına ve 5 mA kısa devre akımına ulaşıldığı ve bunun bazı ticari muadillerine kıyasla daha yüksek olduğu bildirilmiştir [63]. Ji ve ark. (2022), kitap şeklinde bir yapıda piezoelektrik seramikler ve karbon siyahı içeren bir piezoelektrik-triboelektrik hibrit enerji toplayıcı üretmiştir [64]. Çalışmada, piezoelektrik-triboelektrik hibrit enerji toplayıcı tarafından üretilen maksimum açık devre voltajı 1043 V ve kısa devre akımı 579 μA iken piezoelektrik enerji toplayıcının kendi başına sadece 10.1 V ve 2.02 nA ve triboelektrik enerji toplayıcının ise kendi başına sadece 391 V ve 130 μA ürettiği ifade edilmiştir. Sonuç olarak, piezoelektrik-triboelektrik hibrit yapının enerji üretiminin kendini oluşturan yapıların tek tek enerji üretimlerinden oldukça yüksek olduğu belirtilmiştir.

Bir başka hibrit sistemde, triboelektrik ve fotovoltaik yenilenebilir enerji sistemleri birleştirilmiştir [55]. Çalışmanın amacının hem güneş ışığından hem de yağmur damlalarından enerji toplamak olduğu bu nedenle güneş ışınlarının geçebilmesi için yapıda şeffaf elektrot olarak indiyum kalay oksit (ITO) kullanıldığı açıklanmıştır. Üretilen şeffaf triboelektrik/fotovoltaik jeneratörün güneş altında iyi çalıştığı ve ayrıca yağmurlu bir günde 6 V açık devre tepe voltajı ve 0.8 μ A kısa devre akımı ürettiği ifade edilmiştir. Triboelektrik etkinin bileşenlerden biri olduğu hibrit yenilenebilir enerji üretimi gerçekleştiren yapılar üzerine daha birçok değerli deneysel çalışma yapılmakta olup sayılarının hızla artacağı beklenmektedir.



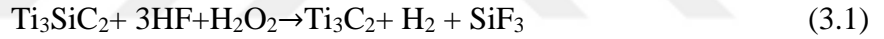
3. YÖNTEM

3.1. Hammadde Tedariği ve Karakterizasyonu

Çalışma kapsamında Ti_3C_2 MXene fazlı bileşiğin eldesi için Üniversitemiz laboratuvarında yüksek lisans programı kapsamında üretilen ve TÜBİTAK 1002 ile desteklenen 221M584 nolu projeden elde edilen Ti_3SiC_2 MAX faz tozu üretim prosesi takip edilerek üretimler gerçekleştirildiğinden, MAX faz üretimi ile ilgili ayrıntılı proses burada verilmemiştir. Üretilen MAX faz tozunun yapısal karakterizasyonu için X-Işınları Difraktometresi (XRD), partikül boyutu ve dağılımları için ise Zetasizer tane boyut ölçüm cihazı kullanılmış olup bu analizler hizmet alımı olarak gerçekleştirilmiştir. MAX fazdan MXene faza geçiş için aşındırma işleminde hidrojen florür (HF), reaksiyon hızı ve oksitleyici için hidrojen peroksit (H_2O_2) kullanılmıştır.

3.2. Kompozisyon Tasarımı ve Malzeme Üretimi

Ti_3C_2 MXene fazı bileşiğini hazırlamak için Ti_3SiC_2 MAX fazı hammadde olarak kullanılmıştır. Kullanılan hammaddenin ortalama tane boyutu 1 μm olduğu görülmüştür. Uygulanan reçete bileşimi;



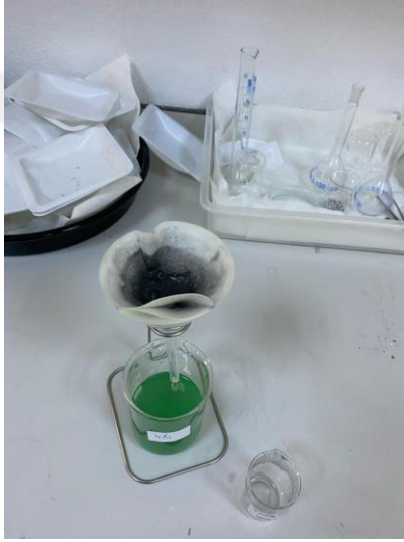
Denkleminde mol oranlarından faydalanılarak hazırlanmıştır. Literatürde Ti_3C_2 MXene fazının saf olarak elde edilmesi ve reaksiyonun istenilen boyutta kalması için aşındırma aşamasında kullanılan HF ve H_2O_2 miktarı önem arz etmektedir.

Literatürde MXene fazı tozlarının saf olarak elde edilmesinde ve reaksiyonun istenilen sonucu vermesi adına, MAX faz tozlarının aşındırma çözeltisi, 100 mililitrelik teflon beher içerisinde 45 ml HF ve 5 ml H_2O_2 eklenerek oluşturulmuştur. Oluşturulan karışım 2 saat bekletilmiştir. İçerisine 3 gr MAX tozu kademeli olarak ilave edilmiştir.



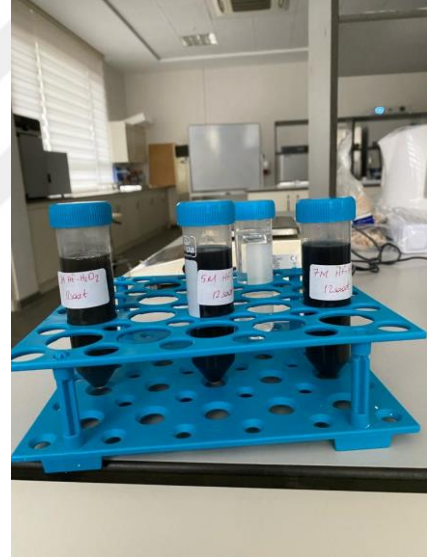
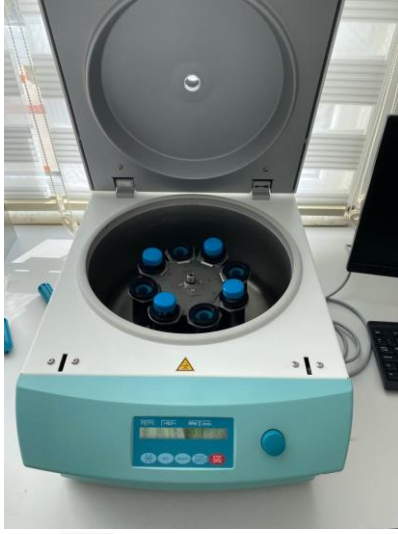
Şekil 3.1 MAX fazı tozlarının HF asit içerisinde MXene faza geçişi.

6 aşamada, 1 saat içerisinde eşit şekilde eklenen MAX tozlarının bulunduğu solüsyon kabı, oluşacak tepkime ekzotermik olacağı için şekil 3.1’de görüldüğü üzere buz banyosu içerisinde 2 saat bekletilmiştir. 12, 48 ve 96 saat bekleme süresi ile planlanan üretim 3 ayrı reçete haline getirilmiştir. Asit derişimi 3,5 ve 7 mol olacak şekilde hazırlanmış ve reçete sayısı 9’a ulaşmıştır. 4 ayrı asit ile yapılan bu işlem sonucunda reçete sayısı 36’ya ulaşmıştır.



Şekil 3.2 Asidik aşındırma işlemi sonrasında yapıdaki asidin uzaklaştırılması.

Manyetik karıştırıcı üzerinde manyetik balık yardımı ile karıştırılan çözeltinin reçete süresi boyunca ortamda gaz çıkışı olmuştur. Bu yüzden çalışmanın bu aşaması çeker ocak içerisinde gerçekleştirilmiştir. Reçete süresini tamamlayan çözeltiler 50ml'lik santrifüj tüplerine doldurulmuştur. Santrifüj işlemine alınan olan çözelti şekil 3.3'te görüldüğü gibi her işlemde süzülüp deiyonize su doldurulmuş ve işlem tekrarlanmıştır. Santrifüj işlemi pH düzeyi '6' oluncaya dek tekrarlanmıştır.



Şekil 3.3 Santrifüj işlemi ve yapının MXene faza dönüşmesinin ilk muayenesi.

Santrifüj işlemi tamamlanan MXene fazı tozları kuruması için 24 saat 60°C’de Etüv fırını içerisinde bekletilmiştir. Kurutulan MXene fazı tozları, gezegensel değirmen içerisinde seramik bilyeler ile öğütülmüştür. Gezegensel değirmen içerisinde 450 rpm hızda ve 24 saat süre ile işlem gören pul haldeki MXene’lerin nano boyutta toz haline geldiği görülmüştür. MXene fazı tozlarının bu aşamalardan sonra kullanıma hazır hale geldiği görülmüştür.

3.3. Film Üretimi

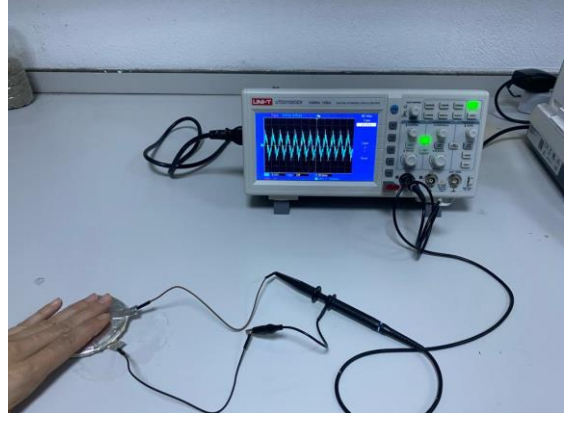
Film üretimi Polivilidin Florür (PVDF) polimeri içerisinde MXene takviyesi ile gerçekleştirilmiştir. Pellet formunda bulunan 10gr PVDF polimeri, 30ml Aseton, 40ml DMF ve 30ml DMAC olacak şekilde hazırlanan 100 ml çözücü içerisinde eklenmiştir. Manyetik karıştırıcıda manyetik balık ile karıştırırken 60°C'ye sabitlenerek çözdürülen karışım 2 saatlik işlem sonrasında hazır hale gelmiştir. Solvent döküm tekniği kullanılarak petri kabı içerisinde 10ml karışım dökülmüştür. 24 saatlik bekleyişin ardından çözücüsü uzaklaşan ve film hale gelen yapılar triboelektrik deneyler için hazır hale gelmiştir.



Şekil 3.4 Farklı parametrelerde üretilen film yapıları

3.4. Triboelektrik Testler için Numune Hazırlama

Hazırlanan film yapıların triboelektrik etkisinin test edilebilmesi için elektrot görevi görmek üzere kullanılan alüminyum folyo, film yüzeylere çift taraflı bant ile sabitlenmiştir. Maksimum temas yüzeyi oluşturabilmek için çift taraflı bant sadece çerçeve şeklinde ve 1-2 mm genişliğinde kesilerek kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler, önceki bölümde Şekil 2.10'da verilen dikey ve yatay modlarda test edilmiştir.



Şekil 3.5 Triboelektrik özellikleri incelenen film yapının test aşaması.

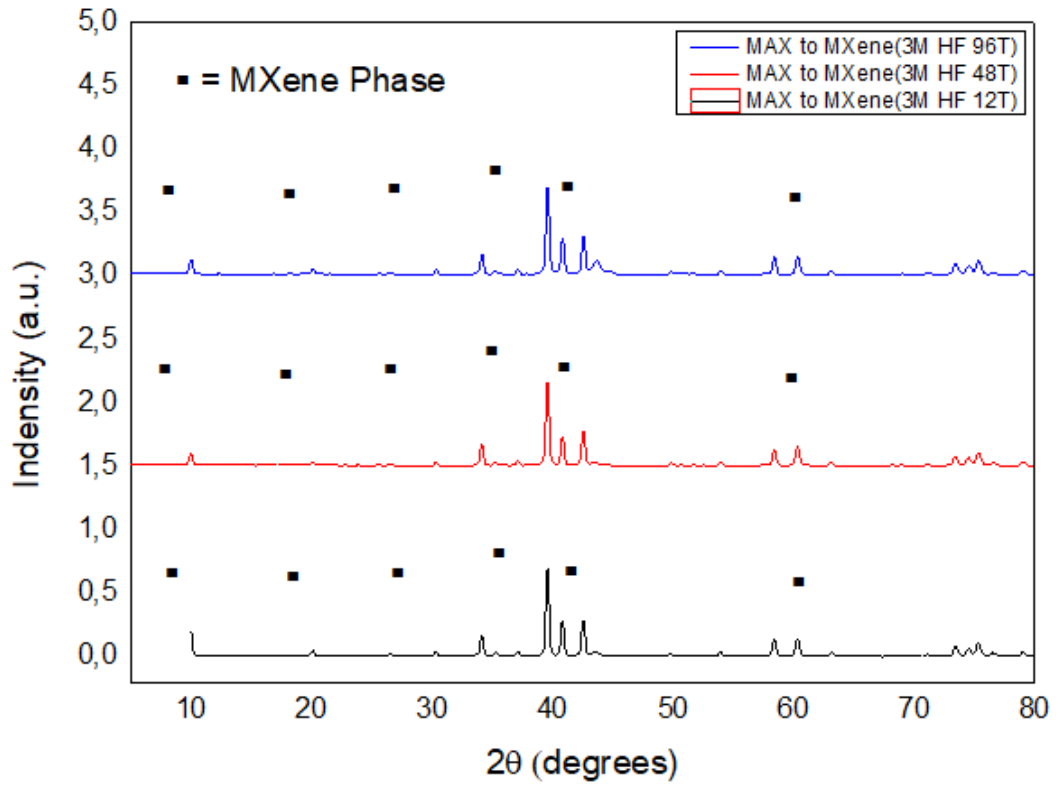


4. TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1. Üretilen MXene Tozlarının Karakterizasyonu

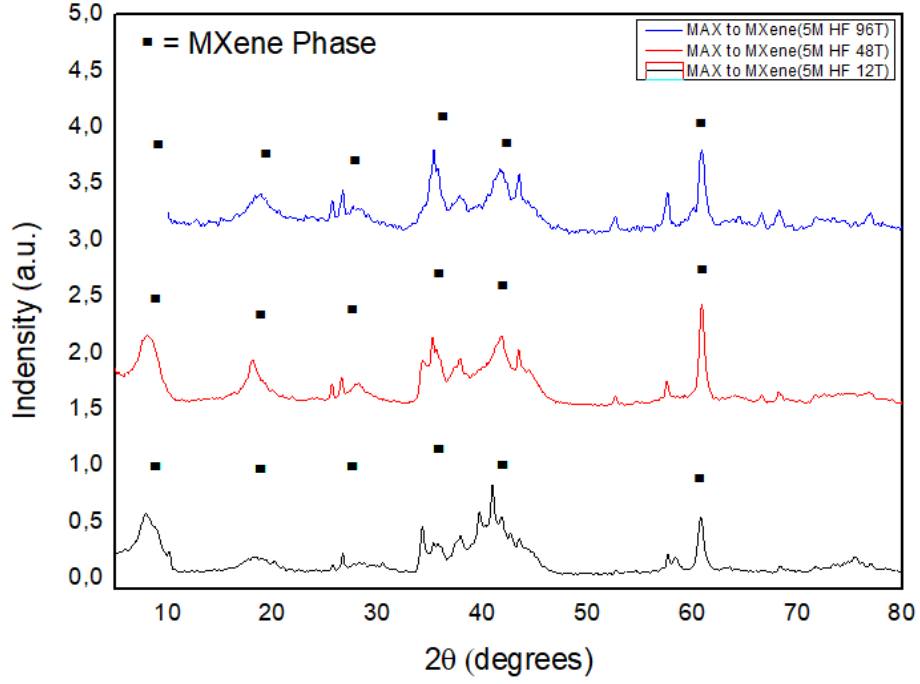
Elde edilen MXene tozu için X-Işınları Difraktometresi (XRD), partikül boyutu ve dağılımları için ise Zetasizer tane boyut ölçüm cihazı ve morfolojisinin ve elementel analizinin incelenmesi için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılım X ışını spektrometresi (EDS) kullanılmıştır. Yoğunluk ölçümü Arşimet metoduna göre gerçekleştirilmiştir.

4.1.1 Faz Analizi



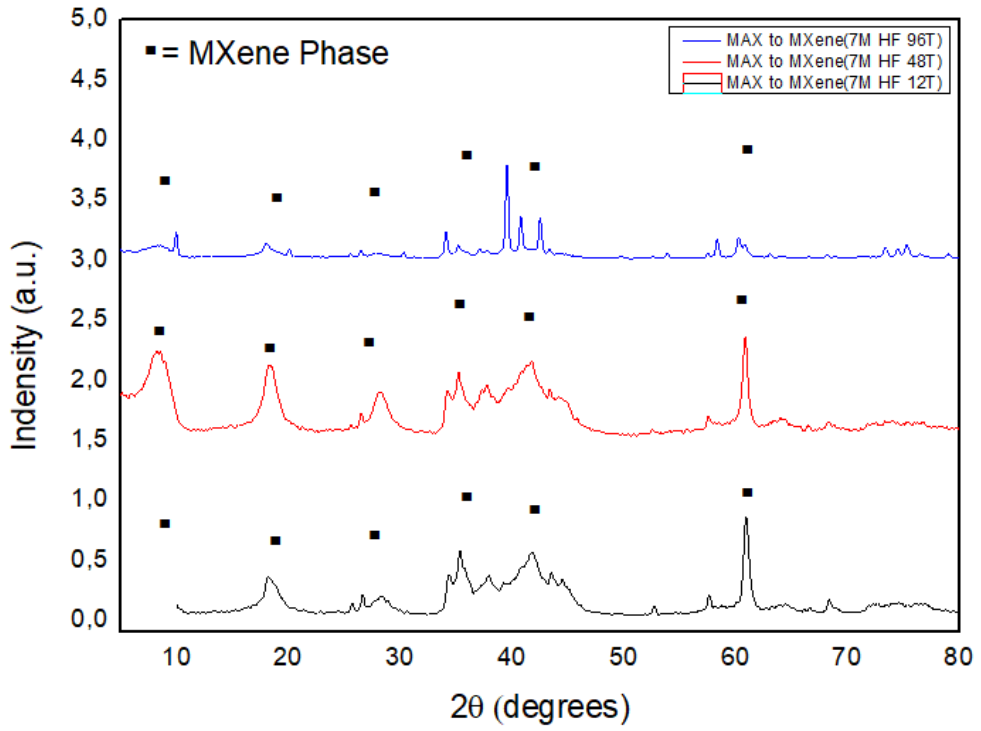
Şekil 4.1 MAX tozun 3M HF ve H₂O₂ içerisinde 12-48-96 saatlik aşındırma işlemi sonucunda oluşan 5-80 derece aralığındaki XRD görüntüleri.

XRD sonuçlarında literatürden alınan latis parametreleri ve pik pozisyonları sırası ile (002), (004), (006), (008), (111), (200), (110) konumunda ve 8.75, 18.73, 27.3, 35.8, 42.01 ve 61 derecededir.

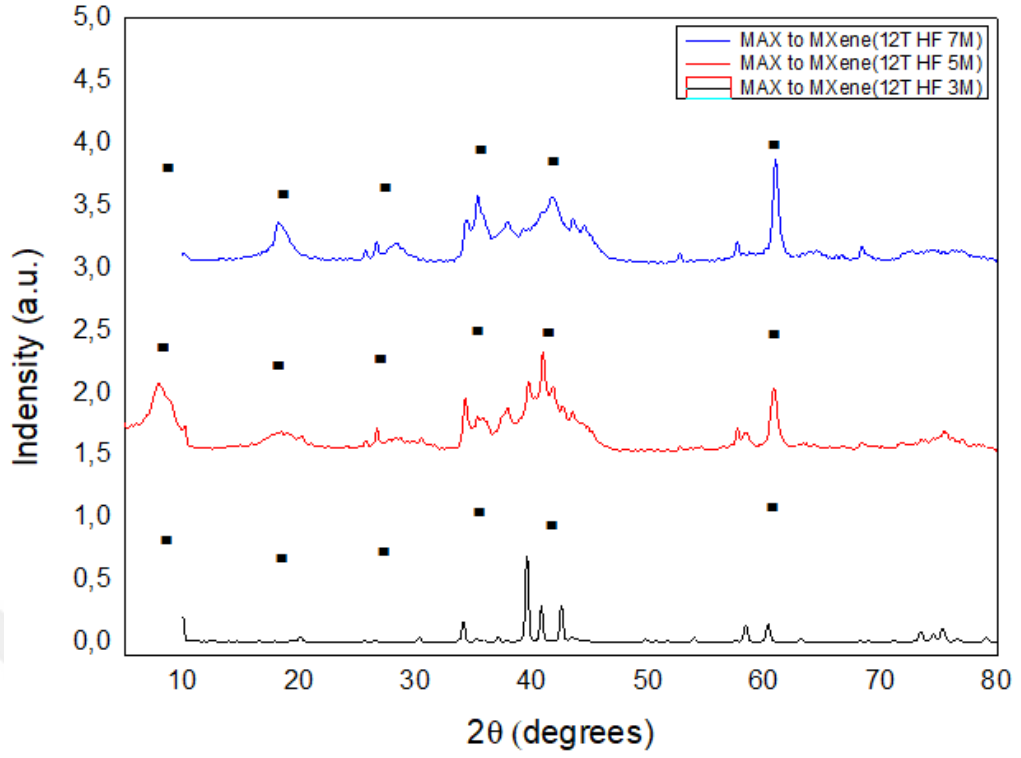


Şekil 4.2 MAX tozun 5M HF ve H_2O_2 içerisinde 12-48-96 saatlik aşındırma işlemi sonucunda oluşan 5-80 derece aralığındaki XRD görüntüleri.

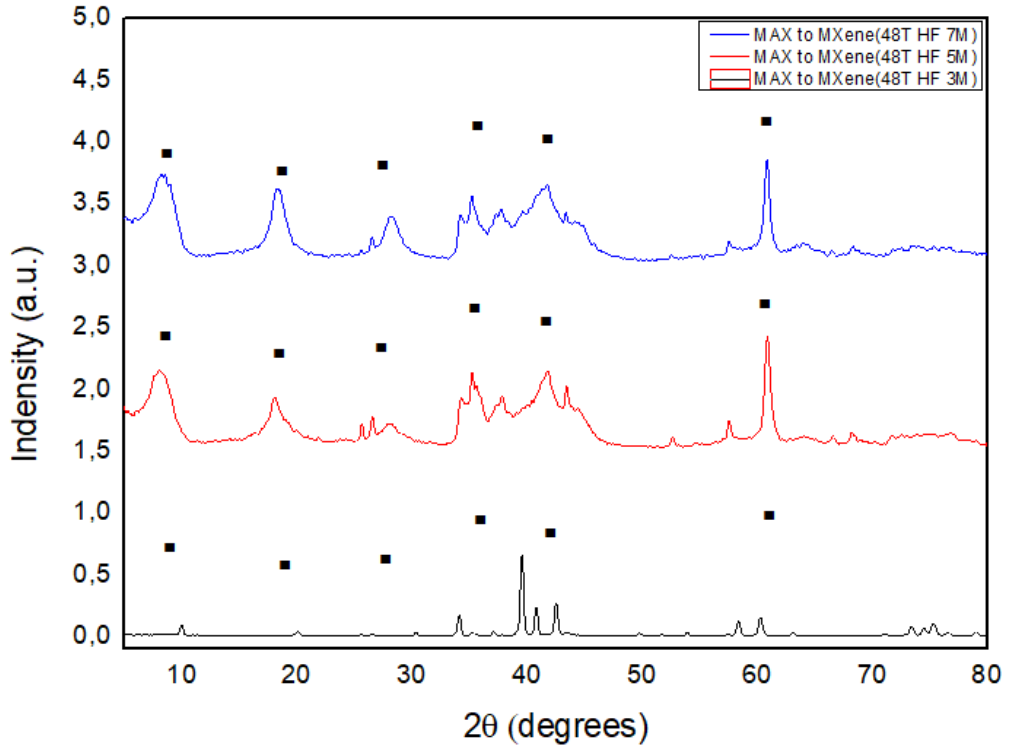
Üretilen numunede de görülmektedir ki ana pikler doğru pozisyonlarda konumlanmışlardır.



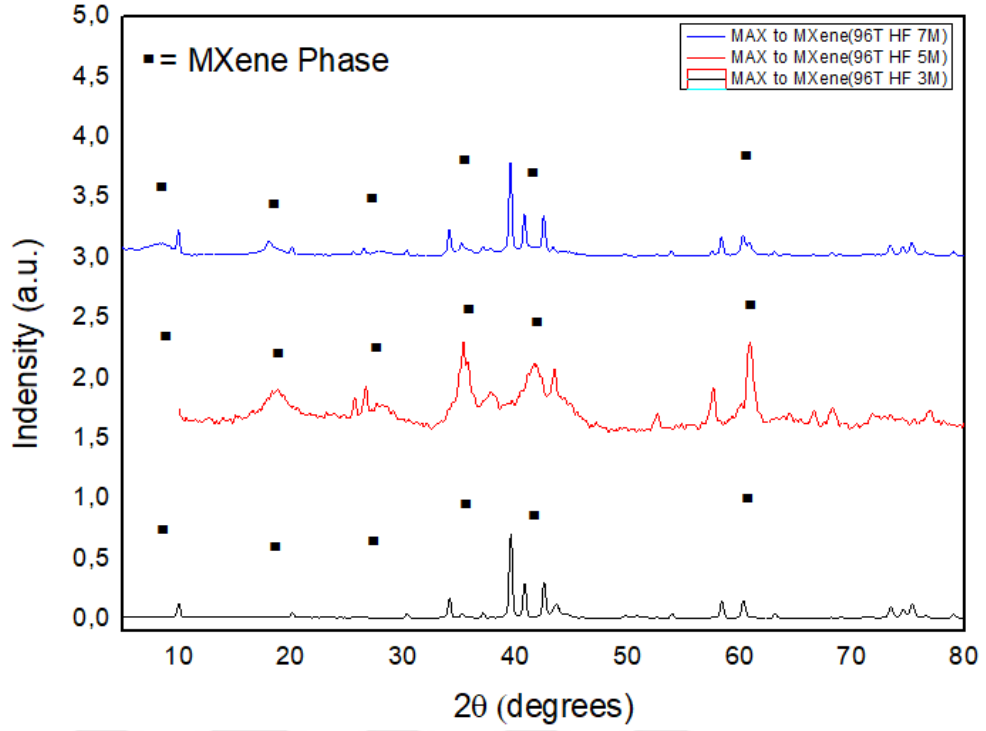
Şekil 4.3 MAX tozun 7 M HF ve H_2O_2 içerisinde 12-48-96 saatlik aşındırma işlemi sonucunda oluşan 10-80 derece aralığındaki XRD görüntüleri.



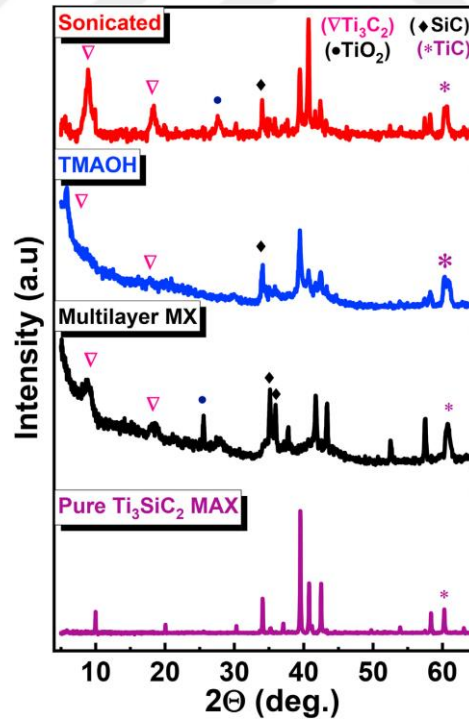
Şekil 4.4 MAX tozun 12 saat HF ve H₂O₂ içerisinde 3-5-7 molarlık aşındırma işlemi sonucunda oluşan 5-80 derece aralığındaki XRD görüntüleri.



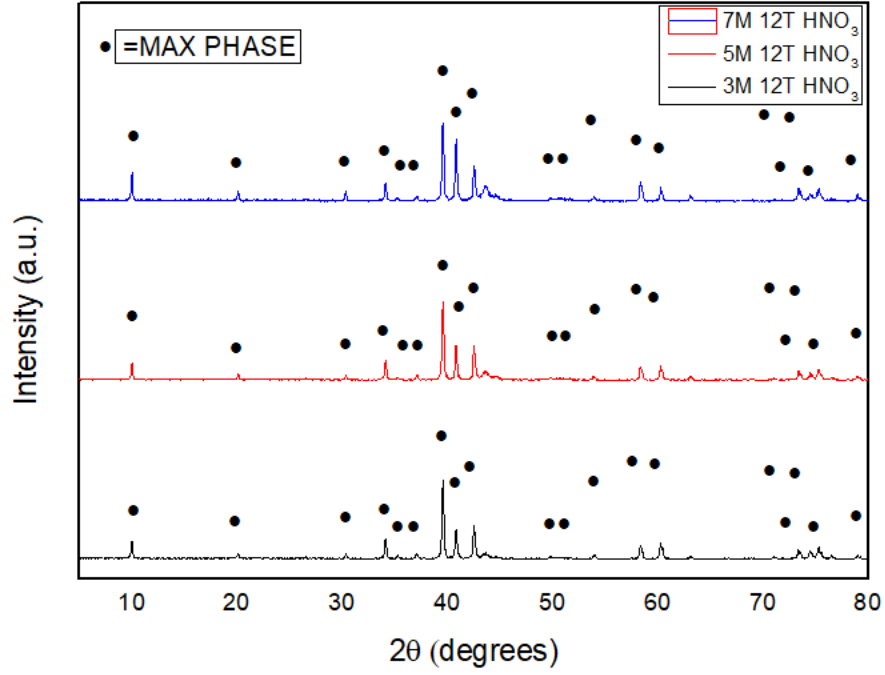
Şekil 4.5 MAX tozun 48 saat HF ve H₂O₂ içerisinde 3-5-7 molarlık aşındırma işlemi sonucunda oluşan 5-80 derece aralığındaki XRD görüntüleri.



Şekil 4.6 MAX tozun 96 saat HF ve H₂O₂ içerisinde 3-5-7 molarlık aşındırma işlemi sonucunda oluşan 5-80 derece aralığındaki XRD görüntüleri.

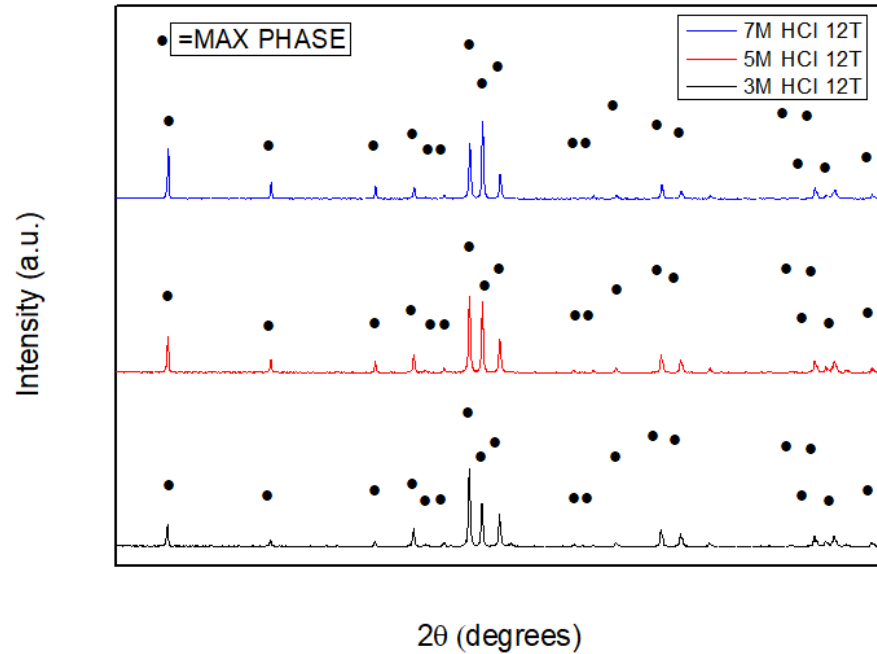


Şekil 4.7 . MXene fazın Qandeel ve ark. (2020) tarafından üretildiği ve incelendiği çalışmada yapılan XRD analizi sonucu.



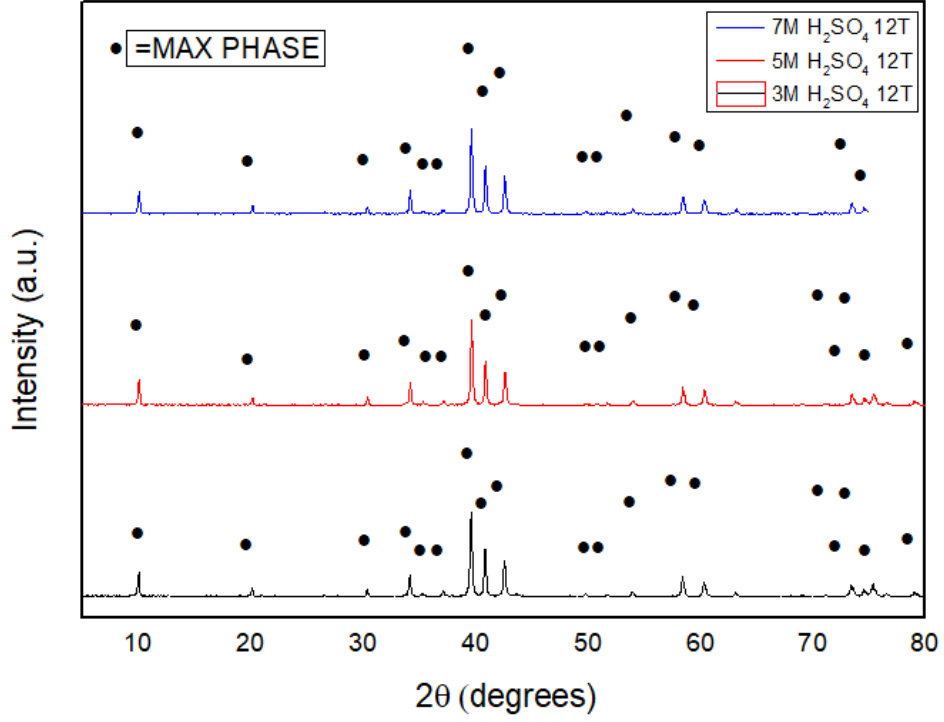
Şekil 4.8 MAX tozun 3-5-7 M HNO₃ içerisinde 12 saatlik aşındırma işlemi sonucunda oluşan 5-80 derece aralığındaki XRD görüntüleri.

MAX fazın yapısının değişmediği ve MXene faza geçiş olmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.9 MAX tozun 3-5-7 M HCl içerisinde 12 saatlik aşındırma işlemi sonucunda oluşan 5-80 derece aralığındaki XRD görüntüleri.

MAX fazın yapısının değişmediği ve MXene faza geçiş olmadığı gözlemlenmiştir.

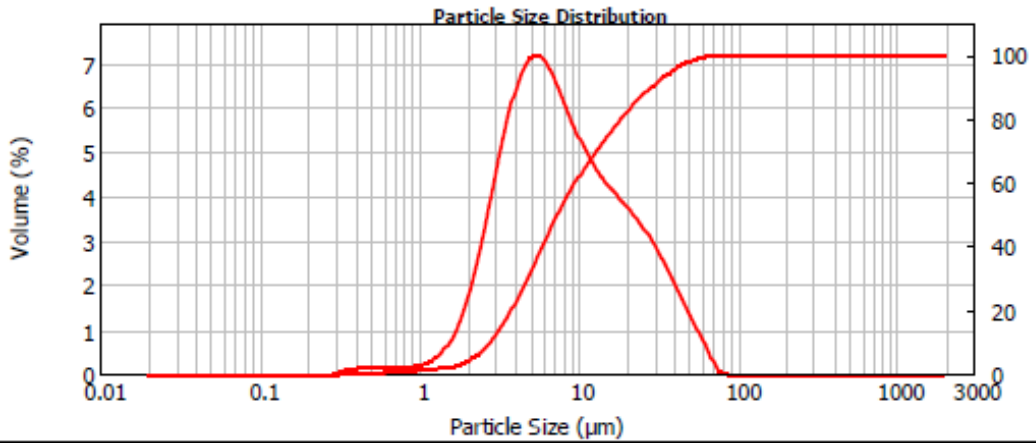


Şekil 4.10 MAX tozun 3-5-7 M H₂SO₄ içerisinde 12 saatlik aşındırma işlemi sonucunda oluşan 5-80 derece aralığındaki XRD görüntüleri.

MAX fazın yapısının değişmediği ve MXene faza geçiş olmadığı gözlemlenmiştir.

4.1.2 Mikroyapı Tane Boyutu ve Dağılımı Analizi

Tane boyutu ve tane boyutu dağılım bilgileri, tane boyutu ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiş olup taneciklerin nano boyutları ve bunların dağılımlarıyla ilgili bilgiler yorumlanmıştır.

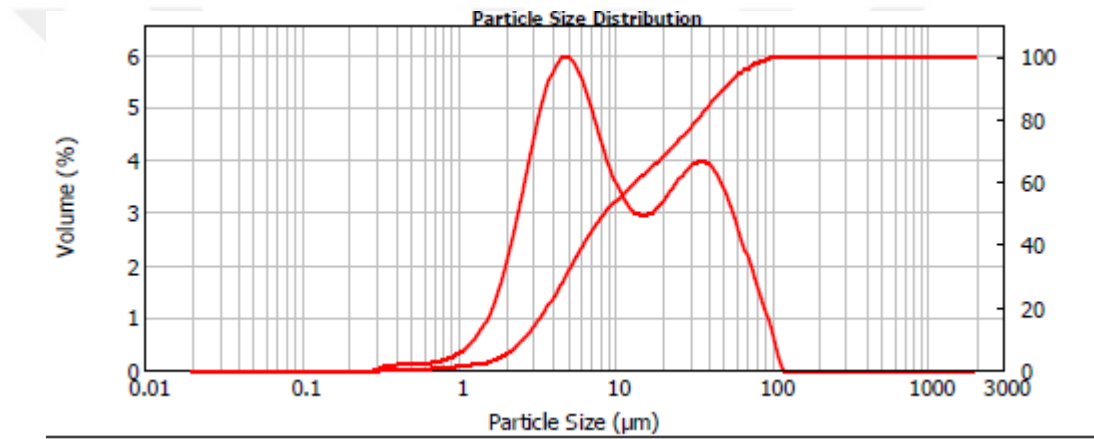


Şekil 4.11 5M HF içerisinde 12 saat aşındırma sonucu elde edilen tozun tane boyut analizi.

Numunenin boyut dağılımına bakıldığında d(0.1), d(0.5) ve d(0.9) değerleri sırası ile 2.787, 7.375 ve 28.564 şeklindedir.

Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %
0.010	0.00	0.106	0.00	1.096	1.28	11.482	66.41	120.226	100.00	1258.925	100.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	1.54	13.183	70.67	138.038	100.00	1445.440	100.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	1.95	15.136	74.65	158.489	100.00	1659.587	100.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	2.60	17.378	78.40	181.970	100.00	1905.461	100.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	3.66	19.953	81.93	208.930	100.00	2187.762	100.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	5.28	22.909	85.25	239.883	100.00	2511.886	100.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	7.64	26.303	88.31	275.423	100.00	2884.032	100.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	10.89	30.200	91.07	316.228	100.00	3311.311	100.00
0.030	0.00	0.316	0.01	3.311	15.09	34.674	93.49	363.078	100.00	3801.894	100.00
0.035	0.00	0.363	0.08	3.802	20.19	39.811	95.53	416.869	100.00	4365.158	100.00
0.040	0.00	0.417	0.18	4.365	26.03	45.709	97.19	478.630	100.00	5011.872	100.00
0.046	0.00	0.479	0.30	5.012	32.34	52.481	98.47	549.541	100.00	5754.399	100.00
0.052	0.00	0.550	0.44	5.754	38.83	60.256	99.37	630.957	100.00	6606.934	100.00
0.060	0.00	0.631	0.60	6.607	45.18	69.183	99.91	724.436	100.00	7585.776	100.00
0.069	0.00	0.724	0.75	7.586	51.19	79.433	99.99	831.764	100.00	8709.636	100.00
0.079	0.00	0.832	0.91	8.710	56.73	91.201	100.00	954.993	100.00	10000.000	100.00
0.091	0.00	0.955	1.08	10.000	61.79	104.713	100.00	1096.478	100.00		

Şekil 4.12 5M HF içerisinde 12 saat aşındırma sonucu elde edilen tozun tane boyut analizi.

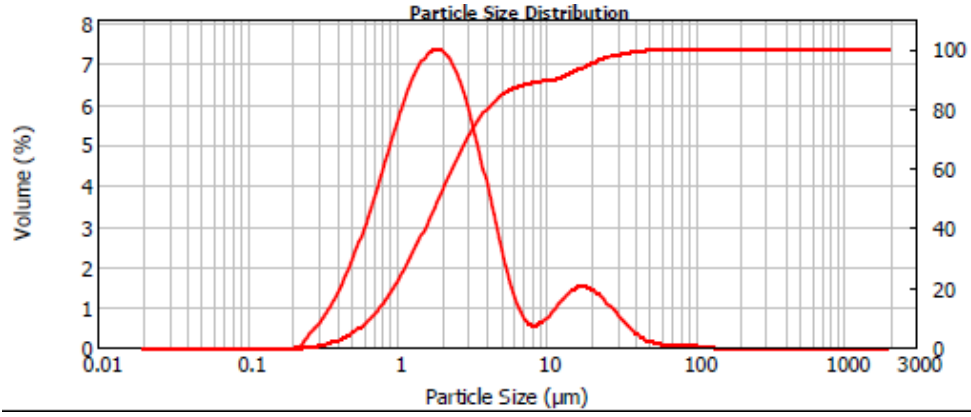


Şekil 4.13 5M HF içerisinde 48 saat aşındırma sonucunda elde edilen MXene tozun tane boyut analizi.

Numunenin boyut dağılımına bakıldığında d(0.1), d(0.5) ve d(0.9) değerleri sırası ile 2.624, 8.604 ve 49.928 şeklindedir.

Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %
0.010	0.00	0.106	0.00	1.096	1.35	11.482	56.87	120.226	100.00	1258.925	100.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	1.77	13.183	59.66	138.038	100.00	1445.440	100.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	2.38	15.136	62.33	158.489	100.00	1659.587	100.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	3.30	17.378	64.99	181.970	100.00	1905.461	100.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	4.63	19.953	67.77	208.930	100.00	2187.762	100.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	6.50	22.909	70.74	239.883	100.00	2511.886	100.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	9.04	26.303	73.94	275.423	100.00	2884.032	100.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	12.33	30.200	77.36	316.228	100.00	3311.311	100.00
0.030	0.00	0.316	0.01	3.311	16.37	34.674	80.91	363.078	100.00	3801.894	100.00
0.035	0.00	0.363	0.08	3.802	21.05	39.811	84.49	416.869	100.00	4365.158	100.00
0.040	0.00	0.417	0.17	4.365	26.21	45.709	87.94	478.630	100.00	5011.872	100.00
0.046	0.00	0.479	0.27	5.012	31.58	52.481	91.10	549.541	100.00	5754.399	100.00
0.052	0.00	0.550	0.38	5.754	36.88	60.256	93.84	630.957	100.00	6606.934	100.00
0.060	0.00	0.631	0.51	6.607	41.86	69.183	96.08	724.436	100.00	7585.776	100.00
0.069	0.00	0.724	0.66	7.586	46.36	79.433	97.83	831.764	100.00	8709.636	100.00
0.079	0.00	0.832	0.83	8.710	50.33	91.201	99.06	954.993	100.00	10000.000	100.00
0.091	0.00	0.955	1.05	10.000	53.80	104.713	99.84	1096.478	100.00		

Şekil 4.14 5M HF içerisinde 48 saat aşındırma sonucunda elde edilen MXene tozun tane boyut analizi.



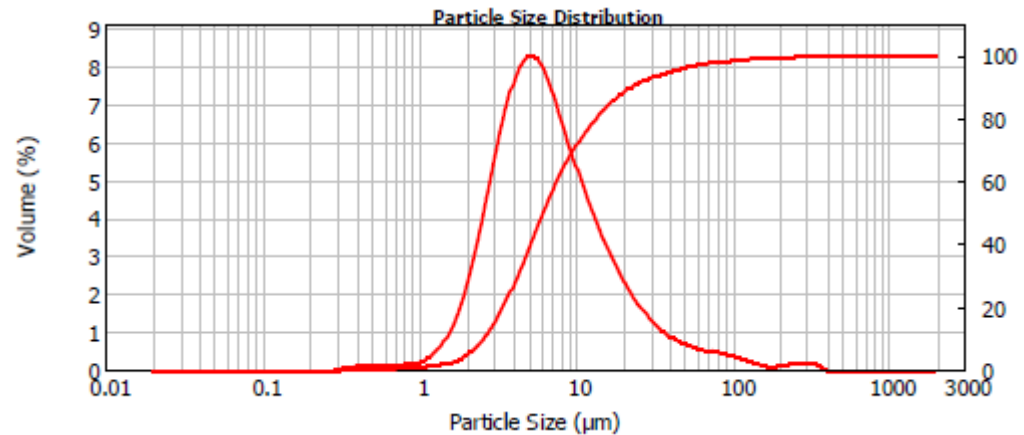
Şekil 4.15 5M HF içerisinde 96 saat aşındırma sonucunda elde edilen MXene tozun tane boyut analizi.

Üretim sonrasında 24 Saat Gezegensel Değirmen Yardımı ile Öğütülmüştür. Numunenin tane boyut dağılımına bakıldığında $d(0.1)$, $d(0.5)$ ve $d(0.9)$ değerleri sırası ile 0.669, 1.906 ve 11.293 şeklindedir. Yapıda büyük ölçüde nano boyuta geçildiği söylenebilmektedir.

Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	25.14	11.482	90.10	120.226	99.99	1258.925	100.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	30.79	13.183	91.11	138.038	100.00	1445.440	100.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	36.91	15.136	92.33	158.489	100.00	1659.587	100.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	43.37	17.378	93.68	181.970	100.00	1905.461	100.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	49.99	19.953	95.04	208.930	100.00	2187.762	100.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	56.57	22.909	96.30	239.883	100.00	2511.886	100.00
0.023	0.00	0.240	0.04	2.512	62.91	26.303	97.37	275.423	100.00	2894.032	100.00
0.026	0.00	0.275	0.33	2.884	68.79	30.200	98.22	316.228	100.00	3311.311	100.00
0.030	0.00	0.316	0.82	3.311	74.03	34.674	98.84	363.078	100.00	3801.894	100.00
0.035	0.00	0.363	1.60	3.802	78.47	39.811	99.26	416.869	100.00	4365.158	100.00
0.040	0.00	0.417	2.71	4.365	82.02	45.709	99.52	478.630	100.00	5011.872	100.00
0.046	0.00	0.479	4.23	5.012	84.67	52.481	99.66	549.541	100.00	5754.399	100.00
0.052	0.00	0.550	6.22	5.754	86.47	60.256	99.75	630.957	100.00	6608.934	100.00
0.060	0.00	0.631	8.75	6.607	87.80	69.183	99.80	724.436	100.00	7585.776	100.00
0.069	0.00	0.724	11.88	7.586	88.29	79.433	99.85	831.794	100.00	8709.636	100.00
0.079	0.00	0.832	15.65	8.710	88.79	91.201	99.91	954.993	100.00	10000.000	100.00
0.091	0.00	0.955	20.08	10.000	89.35	104.713	99.95	1096.478	100.00		

Şekil 4.16 5M HF içerisinde 96 saat aşındırma sonucunda elde edilen MXene tozun tane boyut analizi.

Üretim sonrasında 24 Saat gezegensel değirmen yardımı ile öğütülmüştür.

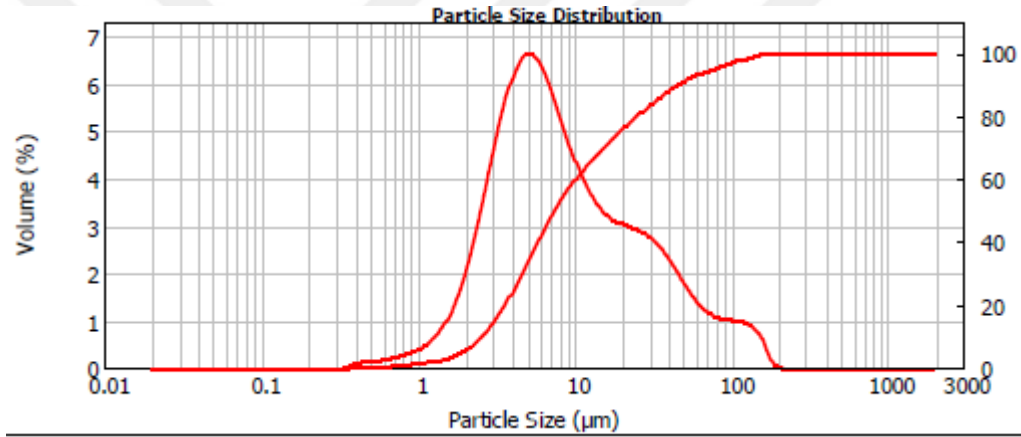


Şekil 4.17 7M HF içerisinde 48 saat aşındırma sonucunda elde edilen MXene tozun tane boyut analizi.

Numunenin boyut dağılımına bakıldığında d(0.1), d(0.5) ve d(0.9) değerleri sırası ile 2.578, 6.616 ve 22.726 şeklindedir. Artan asit derişiminin numunenin boyutunda etkili olduğu gözlemlenmiştir.

Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %
0.010	0.00	0.106	0.00	1.096	1.05	11.482	75.74	120.226	98.88	1258.925	100.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	1.37	13.183	79.62	138.038	99.10	1445.440	100.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	1.90	15.136	82.94	158.489	99.23	1659.587	100.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	2.78	17.378	85.76	181.970	99.31	1905.461	100.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	4.18	19.953	88.13	208.930	99.39	2187.762	100.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	6.30	22.909	90.11	239.883	99.51	2511.886	100.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	9.32	26.303	91.72	275.423	99.67	2884.032	100.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	13.37	30.200	93.03	316.228	99.84	3311.311	100.00
0.030	0.00	0.316	0.01	3.311	18.51	34.674	94.10	363.078	99.97	3801.894	100.00
0.035	0.00	0.363	0.08	3.802	24.65	39.811	94.97	416.869	100.00	4365.158	100.00
0.040	0.00	0.417	0.16	4.365	31.57	45.709	95.70	478.630	100.00	5011.872	100.00
0.046	0.00	0.479	0.25	5.012	38.94	52.481	96.34	549.541	100.00	5754.399	100.00
0.052	0.00	0.550	0.36	5.754	46.37	60.256	96.90	630.957	100.00	6606.934	100.00
0.060	0.00	0.631	0.46	6.607	53.52	69.183	97.40	724.436	100.00	7585.776	100.00
0.069	0.00	0.724	0.58	7.586	60.13	79.433	97.85	831.764	100.00	8709.636	100.00
0.079	0.00	0.832	0.70	8.710	66.04	91.201	98.25	954.993	100.00	10000.000	100.00
0.091	0.00	0.955	0.84	10.000	71.24	104.713	98.59	1096.478	100.00		

Şekil 4.18 7M HF içerisinde 48 saat aşındırma sonucunda elde edilen MXene tozun tane boyut analizi.



Şekil 4.19 7M HF içerisinde 96 saat aşındırma sonucunda elde edilen MXene tozun tane boyut analizi.

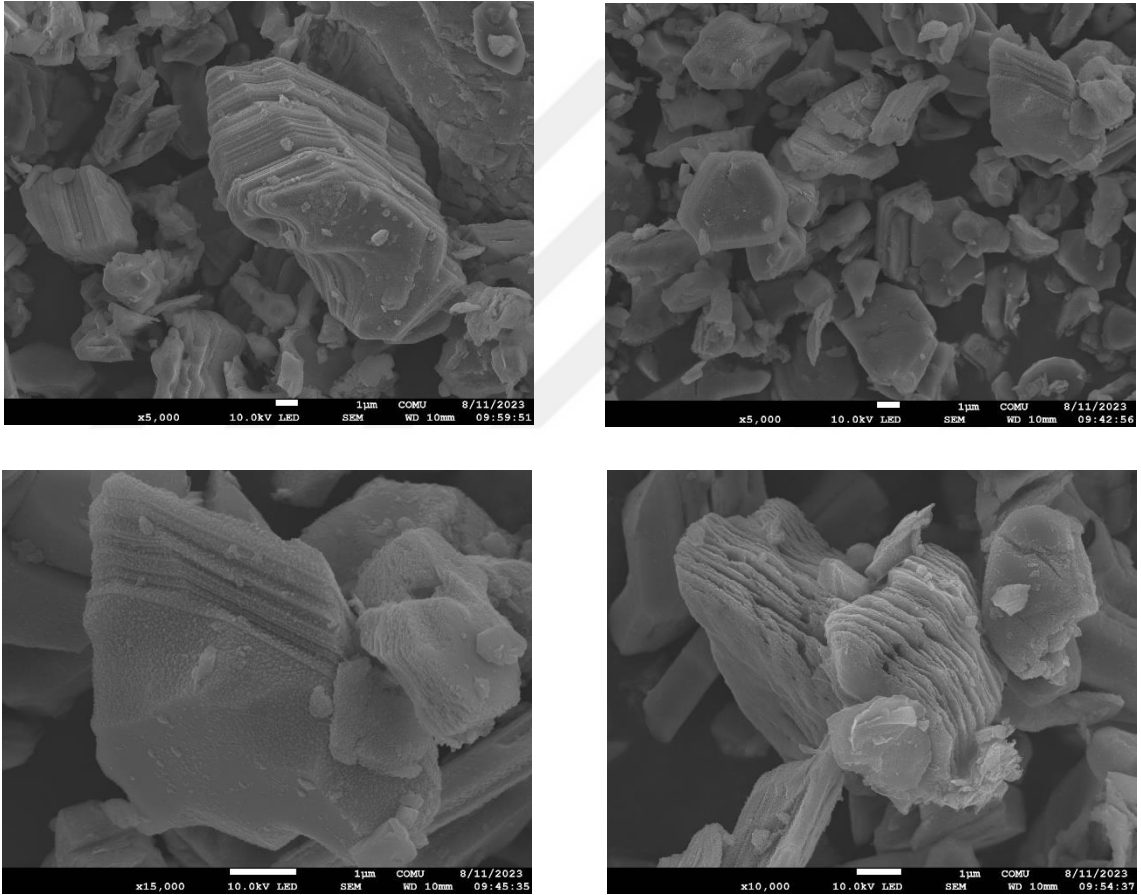
Numunenin boyut dağılımına bakıldığında d(0.1), d(0.5) ve d(0.9) değerleri sırası ile 2.559, 7.423 ve 45.322 şeklindedir.

Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %
0.010	0.00	0.106	0.00	1.096	1.58	11.482	63.53	120.226	98.12	1258.925	100.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	2.06	13.183	66.89	138.038	98.96	1445.440	100.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	2.73	15.136	69.98	158.489	99.64	1659.587	100.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	3.69	17.378	72.87	181.970	99.98	1905.461	100.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	5.05	19.953	75.66	208.930	100.00	2187.762	100.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	6.98	22.909	78.37	239.883	100.00	2511.886	100.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	9.59	26.303	81.02	275.423	100.00	2884.032	100.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	13.01	30.200	83.57	316.228	100.00	3311.311	100.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	17.25	34.674	85.97	363.078	100.00	3801.894	100.00
0.035	0.00	0.363	0.01	3.802	22.26	39.811	88.17	416.869	100.00	4365.158	100.00
0.040	0.00	0.417	0.08	4.365	27.86	45.709	90.11	478.630	100.00	5011.872	100.00
0.046	0.00	0.479	0.19	5.012	33.80	52.481	91.77	549.541	100.00	5754.399	100.00
0.052	0.00	0.550	0.33	5.754	39.77	60.256	93.16	630.957	100.00	6606.934	100.00
0.060	0.00	0.631	0.50	6.607	45.50	69.183	94.32	724.436	100.00	7585.776	100.00
0.069	0.00	0.724	0.69	7.586	50.80	79.433	95.34	831.764	100.00	8709.636	100.00
0.079	0.00	0.832	0.93	8.710	55.56	91.201	96.28	954.993	100.00	10000.000	100.00
0.091	0.00	0.955	1.22	10.000	59.78	104.713	97.21	1096.478	100.00		

Şekil 4.20 7M HF içerisinde 96 saat aşındırma sonucunda elde edilen MXene tozun tane boyut analizi.

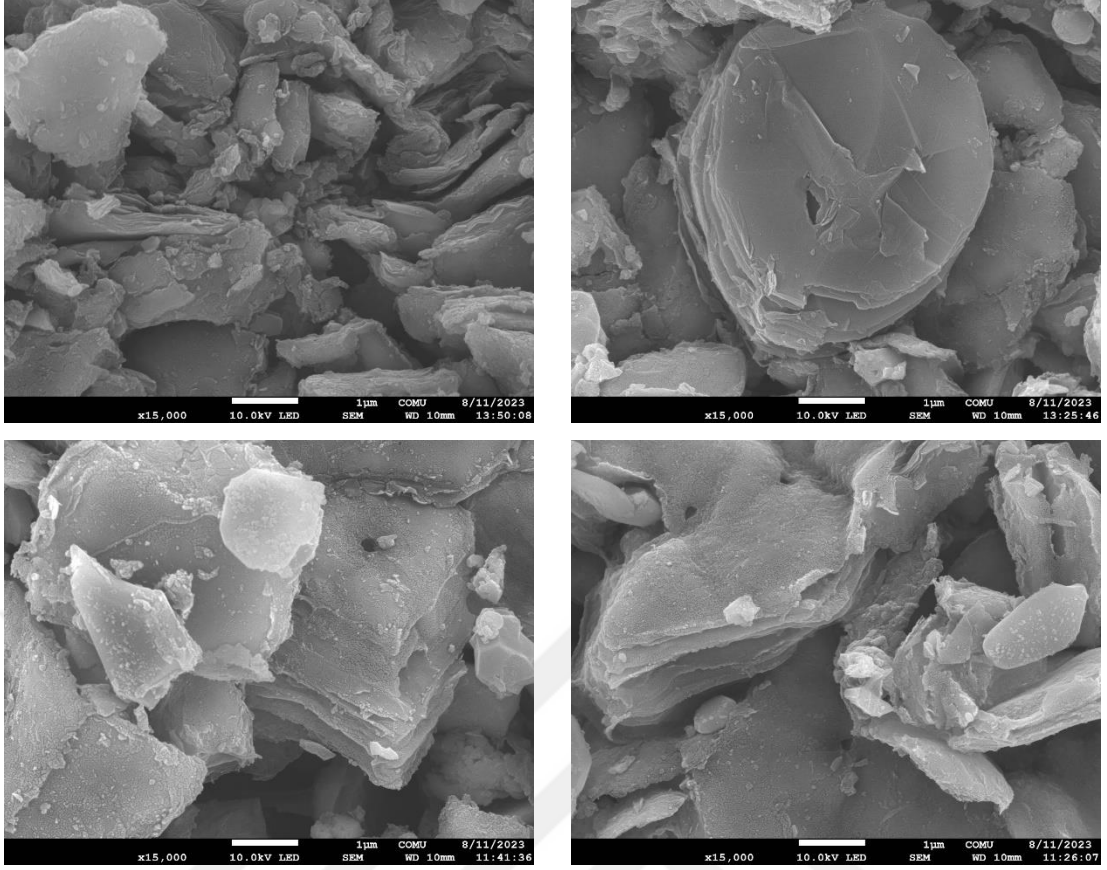
4.1.3 Mikroyapı Karakterizasyonu

Elde edilen Ti_3C_2 MXene fazlı yapıların yüzey morfolojisi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Üretilen numunelerin tane boyutları ve oluşan kink bantları incelenmiş olup mikroyapı karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Ayrıca SEM bünyesinde bulunan Enerji Dağılım Spektrometresi (EDS) ile elementel analiz yapılarak MXene oluşumu incelenmiştir. XRD sonuçları incelendiğinde pik pozisyonlarının konumlandıkları noktalar ve pik şiddetlerinin yeterliliği göz önüne alınarak, elde edilen MXene tozlardan seçilen 3 numunenin SEM ve EDS analizi yapılmıştır.



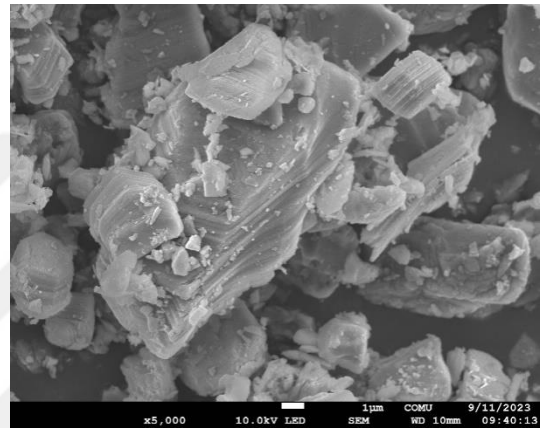
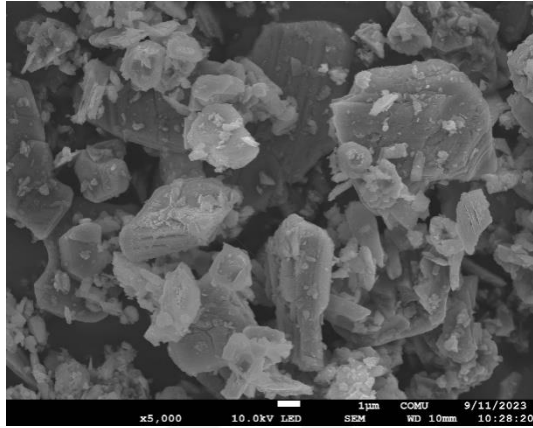
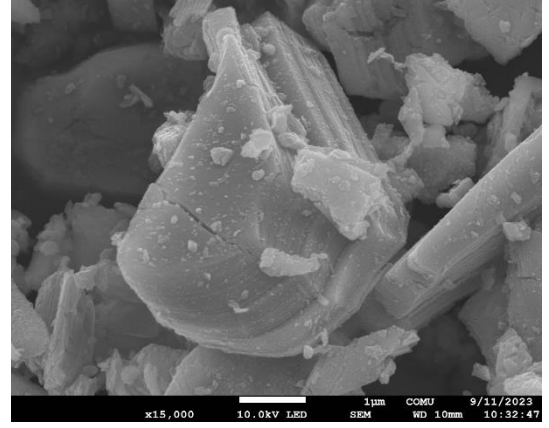
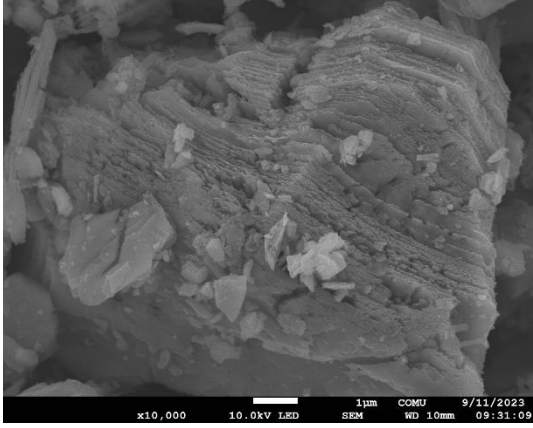
Şekil 4.21 5M/48 Saat HF ile kimyasal aşındırma işlemine tabi tutulan numunenin SEM görüntüleri.

Mikroyapı görüntülerinde 5M/48 Saat HF ile kimyasal aşındırma işleminin numune üzerinde katman aralarının daha belirgin hale geldiği ve düşük katman yapıları MXene fazlarının üretimine katkıda bulunduğu gözlemlenmiştir.



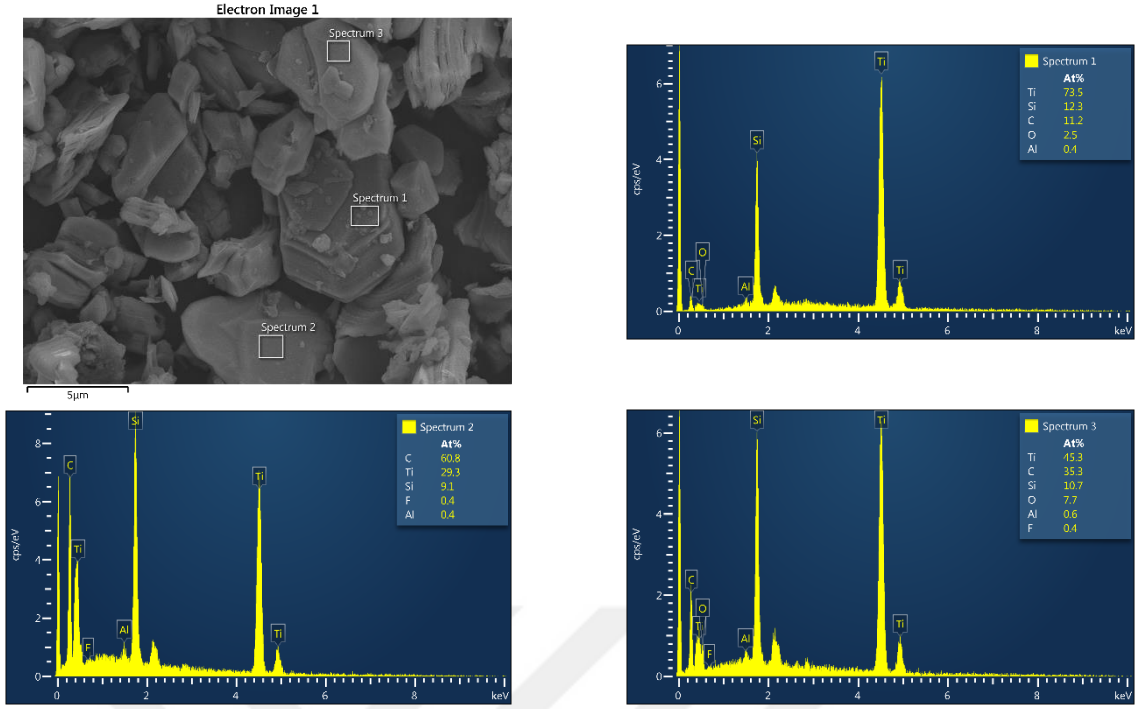
Şekil 4.22 5M/96 Saat HF ile kimyasal aşındırma işlemine tabi tutulmuş numunelerin mikroyapı görüntüleri.

Mikroyapı görüntülerinde 5M/96 Saat HF ile kimyasal aşındırma işleminin numune üzerinde katman aralarının daha belirgin hale geldiği ve düşük katman yapılı MXene fazlarının üretimine katkıda bulunduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.17’de verilen numune ile kıyaslandığında kimyasal aşındırma süresinin artışı sonucunda mikroyapı içerisinde çatlaklar ve kopan parçalar olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.23 Mikroyapı görüntülerinde 7M/48 Saat HF ile kimyasal aşındırma işleminin uygulandığı numunenin SEM görüntüleri.

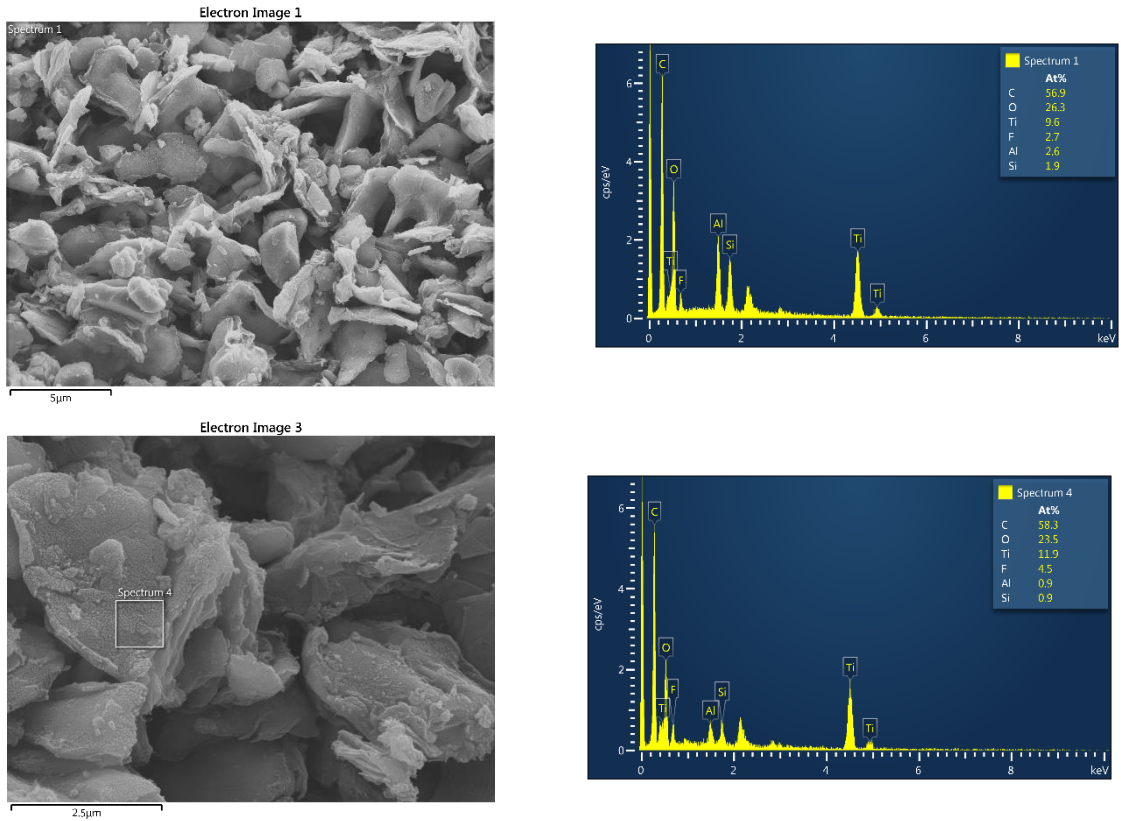
Numune üzerinde katman aralarının daha belirgin hale geldiği ve düşük katman yapılı MXene fazlarının üretimine katkıda bulunduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de verilen numuneler ile kıyaslandığında kimyasal aşındırma süresinin artışı ve asit derişiminin artması sonucunda mikroyapı içerisinde çatlaklar ve kopan parçalar olduğu gözlemlenmiştir.



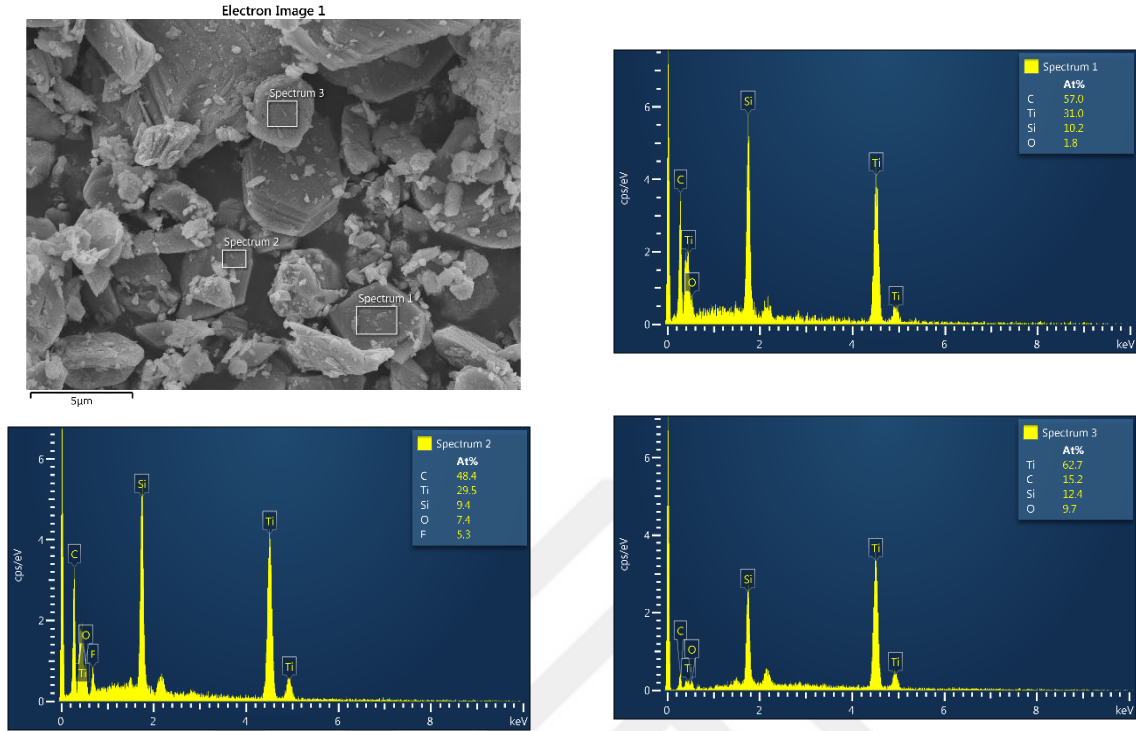
Şekil 4.24 5M 48 Saat HF asit ile aşındırma işlemine maruz bırakılan numunenin SEM/EDS görüntüsü.

3 ayrı noktadan alınan analiz için numune içerisinde stekiyometrik birleşimler göz önüne alınarak MXene fazların bulunduğu söylenebilmektedir. (Spectrum 3)

Şekil 4.25 5M 96 Saat HF asit ile aşındırma işlemine maruz bırakılan numunenin EDS analiz sonucu.



Artan aşındırma süresi ile mikroyapı ve bağ yapılarında bozunmalara uğradığı gözlemlenmiştir.

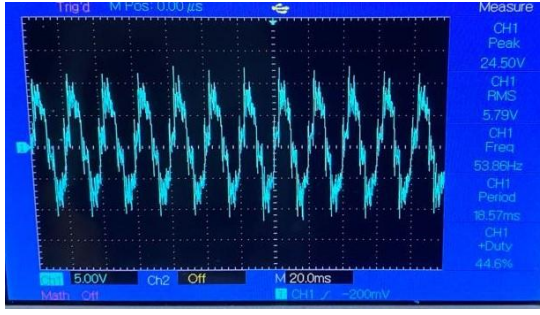


Şekil 4.26 7M 48 Saat HF asit ile aşındırma işlemine maruz bırakılan numunenin EDS analiz sonucu.

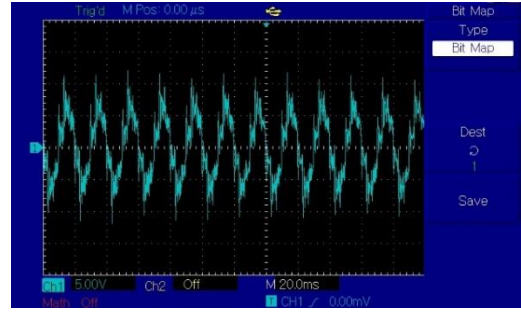
Artan kimyasal aşındırma süresi ve asit derişimin mikroyapıda bozunmalara yol açtığı gözlemlenmiştir. Yapı içerisinde MXene fazın bulunduğu, bölgeler içerisinde ayrılmış katmanlar ve stekiyometrik birleşimin yüzdeleri üzerinden belirlenmiştir.

4.1.4 Triboelektrik Testler

Triboelektrik ölçümler için hazırlanan numuneler, temas ayırma yani dikey temas modunda ve kayma yani yatay temas modunda test edilmiştir. Bu sırada oluşan triboelektrik etki, UNI-T UTD2102CEX marka ve model dijital osiloskop ile kayıt altına alınmıştır. Testler en az 5 tekrarlı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Laboratuvarda, 221M584 nolu proje kapsamında gerçekleştirilen üretim parametre ve yöntemi takip edilerek üretilen MAX fazlı yapılardan HF ile 5 M ve 96 saatlik seçici aşındırma ile üretilen MXene yapılar kullanılarak gerçekleştirilen triboelektrik test sonuçlarına ait görseller Şekil 4.27’de verilmiştir.



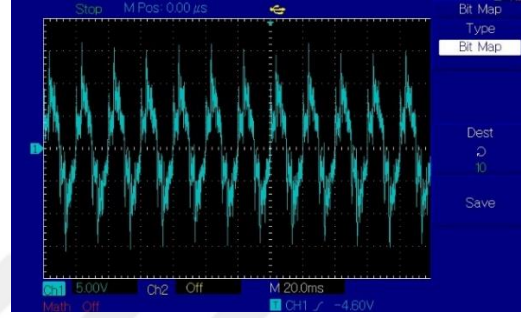
(a)



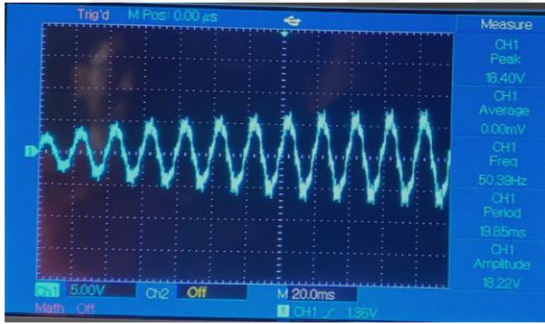
(b)



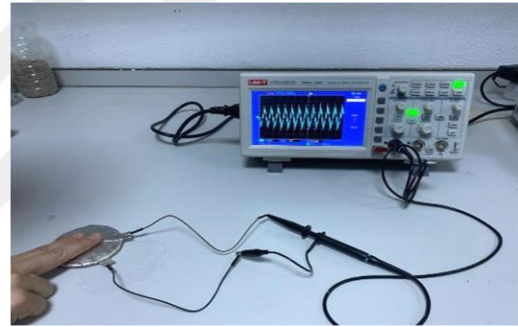
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.27 Hazırlanan numunelerin triboelektrik test sonuçlarına ait görseller

Şekil 4.27’de çalışma kapsamında üretilen MXene yapıların PVDF’e takviye edilmesi ile hazırlanan numunelere ait dikey temas modu voltaj üretimleri (a-d) ile yatay temas modu voltaj üretimleri (e) ve test set-up verilmiştir. Numunelere uygulanan temas alanı değiştirilerek üretilen voltajlar kayıt altına alınmıştır. Dikey temas modunda, temas ettirilen yüzey alanının büyüklüğüne bağlı olarak 20-30 volt açık devre voltaj üretimi gerçekleşmiştir. Yatay temas modunda ise işlem sırasında numuneler arası temas alanı değiştiğinden üretilen voltajın buna bağlı olarak değiştiği (Şekil 4.27 (e)) görülmektedir. Küçük temas alanının düşük voltaj üretimine, büyük temas alanının ise daha yüksek voltaj üretimine neden olduğu hem dikey hem de yatay temas modları ile yapılan ölçümlerde görülmüştür.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Laboratuvarda üretilen MAX fazı, hidroflorik asit (HF), hidroklorik asit (HCl), sülfirik asit (H₂SO₄) ve nitrik asit (HNO₃) olmak üzere 4 ayrı asit ile kimyasal aşındırma işlemine maruz bırakılmıştır. İşlem 3 ayrı süre (12-48-96 saat) ve 3 ayrı molaritede (3-5-7 mol) gerçekleştirilmiştir. Toplamda 36 ayrı reçetede olası faz değişikliği incelenmiştir. MXene tozları XRD altında karakterize edilmiş ve partikül boyutları bir Zetasizer aracılığıyla belirlenmiştir. HF ile yapılan kimyasal aşındırma işleminde 5 ve 7 molar asit ile yapılan 48 ve 96 saatlik işleme üretilen tozların XRD paternlerinde MXene'den beklenen pikler elde edilmiş ve MXene üretiminin gerçekleştiği tespit edilmiştir. Tane boyut analizi ve Scherer denklemi ile gerçekleştirilen değerlendirmede 5 molar HF ile 96 saat gerçekleştirilen kimyasal aşındırma işlemi neticesinde hedeflenen $\leq 1\mu\text{m}$ tane boyutuna ulaşılmıştır. SEM ve EDS analiz sonuçları katmanlı MXene yapı oluşumunu çok net bir şekilde göstermektedir.

Üretilen ve analiz edilen MXene tozu daha sonra polimer çözeltilisine eklenerek solvent döküm yöntemi ile film yüzeyler üretilmiştir. Üretilen filmlerin voltaj oluşumları bir osiloskop yardımı ile takip edilmiş ve kayıt altına alınmıştır. Üretilen film yapılar dikey temas ayırma modunda, yüzeyler arası temas eden alana bağlı olarak 20-30 volt, yatay temas ayırma modunda ise yine yüzeyler arası temas eden alana bağlı olarak 6-18 volt arası açık devre tepe voltaj üretimi gerçekleştirmiştir. Yapılan tekrarlı ölçümler benzer sonuçlar vermiştir. Çalışma kapsamında yapılan analizler ve testler, üretilen MXene yapıların başarılı bir şekilde yüksek saflıkta üretilebildiğini göstermiş olup farklı uygulama ve kullanım alanlarında değerlendirilmek üzere yeni çalışmalara olanak sağlayacağı öngörülmektedir.

6. KAYNAKLAR

- [1] Z.L. Wang, W. Wu, Nanotechnology-Enabled Energy Harvesting for Self-Powered Micro-/Nanosystems, *Angewandte Chemie International Edition* 51 (2012) 11700–11721. <https://doi.org/10.1002/anie.201201656>.
- [2] Z.L. Wang, Triboelectric Nanogenerators as New Energy Technology for Self-Powered Systems and as Active Mechanical and Chemical Sensors, *ACS Nano* 7 (2013) 9533–9557. <https://doi.org/10.1021/nn404614z>.
- [3] O.J. Kewate, S. Punniyakoti, Ti_3AlC_2 MAX Phase And $Ti_3C_2T_x$ Mxene-Based Composites Towards Supercapacitor Applications: A Comprehensive Review of Synthesis, Recent Progress, and Challenges, *J Energy Storage* 72 (2023) 108501. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108501>.
- [4] E. Altuncu, S. Türkan, E. Saka, A. Atasoy, MAX Fazi Alaşımları ve Termo-Fiziksel Özellikleri, *Journal of Aeronautics and Space Technologies (Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi)* 8 (2015). <https://doi.org/10.7603/s40690-015-0009-5>.
- [5] M.W. Barsoum, T. El-Raghy, The MAX Phases: Unique New Carbide and Nitride Materials: Ternary ceramics turn out to be surprisingly soft and machinable, yet also heat-tolerant, strong and lightweight, n.d. <https://www.jstor.org/stable/27857502>.
- [6] X. He, Y. Bai, Y. Li, C. Zhu, X. Kong, In Situ Synthesis and Mechanical Properties of Bulk Ti_3SiC_2/TiC Composites by SHS/PHIP, *Materials Science and Engineering: A* 527 (2010) 4554–4559. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.04.006>.
- [7] N.C. Ghosh, K. Kalkan, R. Singh, S.A. Tucker, Synthesis and Tribological Characterization of In-Situ Spark Plasma Sintered Ti_3SiC_2 and Ti_3SiC_2-TiC Composites. 2009.
- [8] J. Lis, Y. Miyamoto, R. Pampuch, K. Tanihata, *T&SiC-based Materials Prepared by HIP-SHS Techniques*, 1995.
- [9] H. Zhang, V. Presser, C. Berthold, K.G. Nickel, X. Wang, C. Raisch, T. Chassé, L. He, Y. Zhou, Mechanisms and Kinetics of The Hydrothermal Oxidation of Bulk Titanium Silicon Carbide, *Journal of the American Ceramic Society* 93 (2010) 1148–1155. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2009.03570.x>.
- [10] B.Y. Islak, E. Ayas, Evaluation of properties of spark plasma sintered Ti_3SiC_2 and Ti_3SiC_2/SiC composites, *Ceram Int* 45 (2019) 12297–12306. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.03.144>.
- [11] B. Anasori, M.R. Lukatskaya, Y. Gogotsi, 2D Metal Carbides and Nitrides (MXenes) For Energy Storage, *Nat Rev Mater* 2 (2017). <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.98>.
- [12] Patrick S. Urbankowski in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, *Synthesis of Two-Dimensional Transition Metal Nitrides*, 2019.

- [13] W. Bao, X. Xie, J. Xu, X. Guo, J. Song, W. Wu, D. Su, G. Wang, Confined Sulfur in 3 D MXene/Reduced Graphene Oxide Hybrid Nanosheets for Lithium–Sulfur Battery, *Chemistry - A European Journal* 23 (2017) 12613–12619. <https://doi.org/10.1002/chem.201702387>.
- [14] S. Kumar, U. Schwingenschlögl, Thermoelectric Performance Of Functionalized Sc_2C MXenes, *Phys Rev B* 94 (2016). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.035405>.
- [15] B. Koneru, J. Swapnalin, R. Pothu, P. Banerjee, R. Boddula, A.B. Radwan, N. Al-Qahtani, Role of The Intercalated Ions on The High Capacitance Behavior of $Ti_3C_2T_x$ MXene Nanohybrids, *Nanocomposites* 9 (2023) 128–137. <https://doi.org/10.1080/20550324.2023.2258622>.
- [16] B. Pant, M. Park, A.A. Kim, MXene-Embedded Electrospun Polymeric Nanofibers for Biomedical Applications: Recent Advances, *Micromachines (Basel)* 14 (2023). <https://doi.org/10.3390/mi14071477>.
- [17] M. Ramazan, MAX Fazından Yeni Nesil 2d MXene $Ti_3C_2T_x$ Sentezi ve Lityum İyon Pillerde Kullanımı Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Doktora Tezi, (2023), Sakarya.
- [18] X. Zhu, Y. Zhang, M. Liu, Y. Liu, 2D Titanium Carbide MXenes as Emerging Optical Biosensing Platforms, *Biosens Bioelectron* 171 (2021) 112730. <https://doi.org/10.1016/J.BIOS.2020.112730>.
- [19] O. Salim, K.A. Mahmoud, K.K. Pant, R.K. Joshi, Introduction to MXenes: Synthesis and Characteristics, *Mater Today Chem* 14 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2019.08.010>.
- [20] X. Li, Z. Huang, C.E. Shuck, G. Liang, Y. Gogotsi, C. Zhi, MXene Chemistry, Electrochemistry and Energy Storage Applications, *Nat Rev Chem* 6 (2022) 389–404. <https://doi.org/10.1038/s41570-022-00384-8>.
- [21] A. Chae, H. Jang, D.Y. Koh, C.M. Yang, Y.K. Kim, Exfoliated MXene as a Mediator for Efficient Laser Desorption/Ionization Mass Spectrometry Analysis of Various Analytes, *Talanta* 209 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.120531>.
- [22] M. Khazaei, A. Ranjbar, M. Arai, T. Sasaki, S. Yunoki, Electronic Properties and Applications of MXenes: a Theoretical Review, *J Mater Chem C Mater* 5 (2017) 2488–2503. <https://doi.org/10.1039/c7tc00140a>.
- [23] Joseph. Halim, Synthesis and Characterization of 2D Nanocrystals and Thin Films of Transition Metal Carbides (MXenes), Linkopings Universitet, 2014.
- [24] M.P. Bilibana, Electrochemical Properties of MXenes and Applications, *Advanced Sensor and Energy Materials* 2 (2023) 100080. <https://doi.org/10.1016/j.asems.2023.100080>.
- [25] M. Naguib, M. Kurtoglu, V. Presser, J. Lu, J. Niu, M. Heon, L. Hultman, Y. Gogotsi, M.W. Barsoum, Two-dimensional Nanocrystals Produced by Exfoliation of Ti_3AlC_2 , *Advanced Materials* 23 (2011) 4248–4253. <https://doi.org/10.1002/adma.201102306>.

- [26] G. Bahuguna, S. Gaur, A. Patel, M. Verma, S. Kiruthika, R. Gupta, Deciphering The Influence of Fluorine on The Electrochemical Performance of MAX and Derived MXene by Selective Electrophilic Fluorination, *Mater Res Bull* 169 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2023.112497>.
- [27] A. Champagne, *Chimie Nouvelle* N° 135-novembre 2020 Insights Into The Physical Properties of The MAX Phases And MXenes: From Experiments to First-Principles Modeling Insights into The Physical Properties of The MAX Phases and MXenes: from Experiments to First-Principles Modeling, n.d.
- [28] S.A. Thomas, A. Patra, B.M. Al-Shehri, M. Selvaraj, A. Aravind, C.S. Rout, MXene Based Hybrid Materials for Supercapacitors: Recent Developments and Future Perspectives, *J Energy Storage* 55 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105765>.
- [29] J. Xuan, Z. Wang, Y. Chen, D. Liang, L. Cheng, X. Yang, Z. Liu, R. Ma, T. Sasaki, F. Geng, Organic-Base-Driven Intercalation and Delamination for the Production of Functionalized Titanium Carbide Nanosheets with Superior Photothermal Therapeutic Performance, *Angewandte Chemie - International Edition* 55 (2016) 14569–14574. <https://doi.org/10.1002/anie.201606643>.
- [30] M. Naguib, V.N. Mochalin, M.W. Barsoum, Y. Gogotsi, 25th Anniversary Article: MXenes: A New Family of Two-Dimensional Materials, *Advanced Materials* 26 (2014) 992–1005. <https://doi.org/10.1002/adma.201304138>.
- [31] G.P. Lim, C.F. Soon, N.L. Ma, M. Morsin, N. Nayan, M.K. Ahmad, K.S. Tee, Cytotoxicity of MXene-Based Nanomaterials for Biomedical Applications: A mini review, *Environ Res* 201 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111592>.
- [32] H. Wei, Y. Gu, A. Li, P. Song, D. Liu, F. Sun, X. Ma, X. Qian, Conductive 3D $Ti_3C_2T_x$ MXene-Matrigel Hydrogels Promote Proliferation and Neuronal Differentiation of Neural Stem Cells, *Colloids Surf B Biointerfaces* 233 (2024) 113652. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2023.113652>.
- [33] H. Huang, C. Dong, W. Feng, Y. Wang, B. Huang, Y. Chen, Biomedical Engineering of Two-Dimensional MXenes, *Adv Drug Deliv Rev* 184 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.addr.2022.114178>.
- [34] R. T. Yaman, Islak Kimya Yöntemi ile Mxene Ti_3C_2Tx Üretimi: Sentez Parametrelerinin Mxene Tabaka Boyutuna Etkisi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, (2023). Konya.
- [35] S. Saxena, M. Johnson, F. Dixit, K. Zimmermann, S. Chaudhuri, F. Kaka, B. Kandasubramanian, Thinking Green with 2-D and 3-D MXenes: Environment Friendly Synthesis and Industrial Scale Applications and Global Impact, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 178 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113238>.
- [36] R. Akhter, S.S. Maktedar, MXenes: A Comprehensive Review of Synthesis, Properties, and Progress in Supercapacitor Applications, *Journal of Materiomics* (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2023.08.011>.

- [37] Y. Gogotsi, B. Anasori, The Rise of MXenes, *ACS Nano* 13 (2019) 8491–8494. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b06394>.
- [38] A. Coehn, Ueber ein Gesetz der Electricitätserregung, *Ann Phys* 300 (1898) 217–232. <https://doi.org/10.1002/andp.18983000203>.
- [39] C.F. Gallo, W.L. Lama, Some Charge Exchange Phenomena Explained by a Classical Model Of The Work Function, 1976.
- [40] A.F. Diaz, R.M. Felix-Navarro, A Semi-Quantitative Triboelectric Series for Polymeric Materials: The Influence of Chemical Structure and Properties, *J Electrostat* 62 (2004) 277–290. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2004.05.005>.
- [41] H. Yamamoto, B. Scarlett, Triboelectric Charging of Polymer Particles by Impact, *Particle & Particle Systems Characterization* 3 (1986) 117–121. <https://doi.org/10.1002/ppsc.19860030305>.
- [42] Z.L. Wang, Triboelectric Nanogenerators as New Energy Technology for Self-Powered Systems and as Active Mechanical and Chemical Sensors, *ACS Nano* 7 (2013) 9533–9557. <https://doi.org/10.1021/nn404614z>.
- [43] Z.L. Wang, W. Wu, Nanotechnology-Enabled Energy Harvesting for Self-Powered Micro-/Nanosystems, *Angewandte Chemie - International Edition* 51 (2012) 11700–11721. <https://doi.org/10.1002/anie.201201656>.
- [44] S. Pan, Z. Zhang, Fundamental Theories and Basic Principles of Triboelectric Effect: A Review, *Friction* 7 (2019) 2–17. <https://doi.org/10.1007/s40544-018-0217-7>.
- [45] Recent Progress on Flexible Triboelectric Nanogenerators for Self-Powered Electronics RonanH inchet, WanchulS eung, and Sang-WooK im* [a], (2015). <https://doi.org/10.1002/cssc.v8.14/issuetoc>.
- [46] A. Derman Vatansever Bayramol, Triboelectric Materials, Current Developments and Applications, (2022), Antalya
- [47] T.C. Hou, Y. Yang, H. Zhang, J. Chen, L.J. Chen, Z. Lin Wang, Triboelectric Nanogenerator Built Inside Shoe Insole for Harvesting Walking Energy, *Nano Energy* 2 (2013) 856–862. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2013.03.001>.
- [48] V. Nguyen, R. Yang, Effect of Humidity and Pressure on the Triboelectric Nanogenerator, *Nano Energy* 2 (2013) 604–608. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2013.07.012>.
- [49] P. Vasandani, Z.H. Mao, W. Jia, M. Sun, Relationship Between Triboelectric Charge and Contact Force for Two Triboelectric Layers, *J Electrostat* 90 (2017) 147–152. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2017.11.001>.
- [50] B. Chen, Y. Yang, Z.L. Wang, Scavenging Wind Energy by Triboelectric Nanogenerators, *Adv Energy Mater* 8 (2018). <https://doi.org/10.1002/aenm.201702649>.
- [51] S.S. Kwak, H.J. Yoon, S.W. Kim, Textile-Based Triboelectric Nanogenerators for Self-Powered Wearable Electronics, *Adv Funct Mater* 29 (2019). <https://doi.org/10.1002/adfm.201804533>.

- [52] Z. Liu, H. Li, B. Shi, Y. Fan, Z.L. Wang, Z. Li, Wearable and Implantable Triboelectric Nanogenerators, *Adv Funct Mater* 29 (2019). <https://doi.org/10.1002/adfm.201808820>.
- [53] M.O. Shaikh, Y. Bin Huang, C.C. Wang, C.H. Chuang, Wearable Woven Triboelectric Nanogenerator Utilizing Electrospun PVDF Nanofibers for Mechanical Energy Harvesting, *Micromachines (Basel)* 10 (2019). <https://doi.org/10.3390/mi10070438>.
- [54] B. Kil Yun, H. Soo Kim, Y. Joon Ko, G. Murillo, J. Hoon Jung, Interdigital Electrode Based Triboelectric Nanogenerator for Effective Energy Harvesting from Water, *Nano Energy* 36 (2017) 233–240. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.04.048>.
- [55] D. Yang, Y. Ni, H. Su, Y. Shi, Q. Liu, X. Chen, D. He, Hybrid Energy System Based on Solar Cell and Self-Healing/Self-Cleaning Triboelectric Nanogenerator, *Nano Energy* 79 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105394>.
- [56] L. Xu, T. Jiang, P. Lin, J.J. Shao, C. He, W. Zhong, X.Y. Chen, Z.L. Wang, Coupled Triboelectric Nanogenerator Networks for Efficient Water Wave Energy Harvesting, *ACS Nano* 12 (2018) 1849–1858. <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b08674>.
- [57] P. Cheng, H. Guo, Z. Wen, C. Zhang, X. Yin, X. Li, D. Liu, W. Song, X. Sun, J. Wang, Z.L. Wang, Largely Enhanced Triboelectric Nanogenerator for Efficient Harvesting of Water Wave Energy by Soft Contacted Structure, *Nano Energy* 57 (2019) 432–439. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.12.054>.
- [58] B. Huang, P. Wang, L. Wang, S. Yang, D. Wu, Recent Advances in Ocean Wave Energy Harvesting by Triboelectric Nanogenerator: An Overview, *Nanotechnol Rev* 9 (2020) 716–735. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2020-0055>.
- [59] V. Slabov, S. Kopyl, M.P. Soares dos Santos, A.L. Kholkin, Natural and Eco-Friendly Materials for Triboelectric Energy Harvesting, *Nanomicro Lett* 12 (2020). <https://doi.org/10.1007/s40820-020-0373-y>.
- [60] T. Rodrigues-marinho, N. Castro, V. Correia, P. Costa, S. Lanceros-Méndez, Triboelectric Energy Harvesting Response of Different Polymer-Based Materials, *Materials* 13 (2020) 1–12. <https://doi.org/10.3390/ma13214980>.
- [61] S. Chao, H. Ouyang, D. Jiang, Y. Fan, Z. Li, Triboelectric Nanogenerator Based on Degradable Materials, *EcoMat* 3 (2021). <https://doi.org/10.1002/eom2.12072>.
- [62] W.S. Jung, M.G. Kang, H.G. Moon, S.H. Baek, S.J. Yoon, Z.L. Wang, S.W. Kim, C.Y. Kang, High Output Piezo/Triboelectric Hybrid Generator, *Sci Rep* 5 (2015). <https://doi.org/10.1038/srep09309>.
- [63] E. Islam, A.M. Abdullah, A.R. Chowdhury, F. Tasnim, M. Martinez, C. Olivares, K. Lozano, M.J. Uddin, Electromagnetic-Triboelectric-Hybrid Energy Tile for Biomechanical Green Energy Harvesting, *Nano Energy* 77 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105250>.

- [64] S.H. Ji, W. Lee, J.S. Yun, Book-Shaped All-in-One Piezo-Triboelectric Energy Harvester Module with Enhanced Current Characteristics As an Eco-Friendly Energy Source, *J Eur Ceram Soc* 42 (2022) 1414–1424. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.11.047>.



ÖZGEÇMİŞ

Adı - Soyadı: Muhammed Tunahan ÜNAL

Eğitim ve Mesleki Geçmiş:

- Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği/Antalya (09/2015-06/2020)
- Alanya Anadolu Lisesi/Fen-Matematik/Antalya(09/2011-06/2015)

Yabancı Dil Bilgisi:

İngilizce