

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**Ti3C2 MXENE SENTEZİ VE SENTEZ ŞARTLARININ MXENE
ÖZELLİKLERİNE OLAN ETKİSİ**

Mustafa YEGİN

Yüksek Lisans Tezi

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Çevre Bilimleri Bilim Dalı

TEMMUZ 2024

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Ti₃C₂ MXENE SENTEZİ VE SENTEZ ŞARTLARININ MXENE ÖZELLİKLERİNE OLAN ETKİSİ

Tez Yazarı
Mustafa YEGİN

Danışman
Prof. Dr. Özge HANAY

TEMMUZ 2024
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı:	Ti3C2 MXene Sentezi ve Sentez Şartlarının MXene Özelliklerine Olan Etkisi
Yazarı:	Mustafa YEGİN
İlk Teslim Tarihi:	24.06.2024
Savunma Tarihi:	12.07.2024

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Prof. Dr. Özge HANAY Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	İmza Onayladım
Başkan:	Prof. Dr. Mehtap TANYOL Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Doç. Dr. Aytekin ÇELİK Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza

Prof. Dr. Burhan ERGEN
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Ti3C2 MXene Sentezi ve Sentez Şartlarının MXene Özelliklerine Olan Etkisi ” Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

12.07.2024

Mustafa YEGİN



ÖNSÖZ

Yüksek lisans çalışma dönemim boyunca bana bilgi ve deneyimleriyle sabırla yol gösteren, çalışmalar konusunda sürekli beni cesaretlendiren maddi ve manevi her türlü desteği esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Özge HANAY'a ve proje yürütücümüz Prof. Dr. Halil HASAR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yürütülen deneysel çalışmalardaki analizlerde bilgi desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Aytekin ÇELİK, Arş. Gör. Yunus AKSOY ve projedeki ekip arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu tez çalışması TÜBİTAK 122Y006 no'lu proje kapsamında yürütülmüştür. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim

Mustafa YEGİN
ELAZIĞ, 2024



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xiii
KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
2. MXENE'NİN YAPISI VE ÖZELLİKLERİ.....	1
2.1. MXene Sentezi	4
2.2. MXene Sentezinde Uygulanan Farklı Aşındırma Yöntemleri	6
2.2.1. Florür ile aşındırma	6
2.2.2. Elektrokimyasal Aşındırma	7
2.2.3. Sulu Olamayan Aşındırma Yöntemi	7
2.2.4. Alkali Aşındırma Yöntemi	8
2.3. MXeneler'in Yapısı ve Kararlılığı.....	8
2.4. MXene'lerin Özellikleri	10
2.4.1. Spesifik Yüzey Alanı	10
2.4.2. Mekanik Özellikler.....	10
2.4.3. İletkenlik Özellikleri	10
2.4.4. Optik özellikler.....	11
2.4.5. Antibakteriyel Etki	12
2.4.6. Diğer Özellikleri.....	12
3. MXENE'LERİN ÇEVRESEL UYGULAMALARINDAKİ YERİ.....	15
3.1. Adsorpsiyon.....	15
3.2. Fotokatalitik Reaksiyonlar.....	18
3.3. Membran Uygulamaları.....	20
3.4. Kapasitif Deiyonizasyon.....	21
4. TEZ ÇALIŞMASININ AMACI.....	24
5. MATERYAL VE METOT	25
5.1. Kullanılan Kimyasallar	25
5.2. Doğrudan HF ile $Ti_3C_2T_x$ Sentezi	25
5.3. $LiF+HCl$ ile $Ti_3C_2T_x$ Sentezi.....	26
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	28
6.1. Doğrudan HF ile Sentezlenmiş $Ti_3C_2T_x$ 'in Karakterizasyon Çalışmaları	28
6.1.1. XPS Analizleri	28
6.1.2. XRD Analizleri	50
6.1.3. SEM Görüntüleri	55
6.1.4. EDS Analizi	66
6.1.5. Temas Açısı Değerleri.....	69
6.1.6. TGA Analizi	69

6.2. LiF+HCl Yoluyla Sentezlenmiş $Ti_3C_2T_x$ 'in Karakterizasyonu	70
6.2.1. XPS Analizleri	70
6.2.2. XRD Analizleri	72
6.2.3. Temas Açısı.....	75
6.2.4. TGA Analizleri.....	75
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	77
KAYNAKLAR.....	79
ÖZGEÇMİŞ	



ÖZET

Ti₃C₂ MXene Sentezi ve Sentez Şartlarının MXene Özelliklerine Olan Etkisi

Mustafa YEGİN

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz 2024, Sayfa: xiv + 84

Yakın zamanda keşfedilen üstün elektriksel iletkenlik, büyük yüzey alanı, kullanım amacına göre değiştirilebilir yüzey grupları, hidrofilik davranışları ve antibakteriyel etkileri gibi birçok özelliğe sahip 2D nanomalzeme ailesinin bir üyesi olan Ti₃C₂T_x MXene birçok mühendislik alanında kullanılmaktadır. Çevre Mühendisliği alanında da bu üstün özelliklerinden dolayı birçok proseste kullanılabilirliği düşünülmüş ve birçok çalışmaya konu olmuştur. Bu noktadan çıkışla MXene üretim şartları ve sentez prosedürlerinin MXene'nin kimyasal ve fiziksel yapısına olan etkisinin belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu çalışmada Ti₃C₂T_x MXene'nin Ti₃AlC₂ MAX fazından doğrudan HF ile ve LiF+HCl yoluyla aşındırılarak sentezlenmesi amaçlanmıştır. Sıcaklık, aşındırma süresi ve aşındırma çözeltisinin konsantrasyonunun olan etkisi, sentez koşullarının MXene'in yüzey gruplarına, morfolojik yapısına ve kimyasal yapısına olan etkisi belirlenmiştir. Çalışmada sıcaklığının artırılması ile MAX fazından erken geçiş metali olan Al atomlarının uzaklaştırılmasının arttığı, doğrudan HF ile 40 °C 24 saat %30 konsantrasyonundaki HF koşullarında sentezlenen MXene'in MAX fazındaki Al atomlarının gideriminin yaklaşık %99 olduğu ve MXene'nin tanecik boyutlarının MAX fazının yaklaşık üçte bire düştüğü tespit edilmiştir. LiF+ HCl yoluyla MXene sentezinin doğrudan HF'ye kıyasla daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştiği belirlenmiştir. Yüksek sıcaklık şartlarında sentezlenen MXene'lerin daha yüksek termal dirence sahip olduğu gözlemlenmiştir. Aşındırma çözeltisinin konsantrasyonu arttıkça MXene yapısında oluşan akordiyonik yapıların derinliğinin arttığı belirlenmiştir. MAX fazının aşındırılması sonrası oluşan MXene yapısının yüzey gruplarının yapılan temas açısı analizleri sonuçlarına göre MAX fazına kıyasla daha hidrofilik bir malzemenin olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: 2D nanomalzeme, MXene, MAX

ABSTRACT

Ti₃C₂ MXene Synthesis and the Effect of Synthesis Conditions on MXene Properties

Mustafa YEGİN

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Environmental Engineering

July 2024, Pages: xiv + 84

Ti₃C₂T_x MXene, a member of the recently discovered 2D nanomaterial family with many features such as superior electrical conductivity, large surface area, changeable surface groups according to the intended use, hydrophilic behavior and antibacterial effects, is used in many engineering fields. Due to these superior properties, it has been considered to be usable in many processes in the field of Environmental Engineering and has been the subject of many studies. From this point on, it is important to determine the effect of MXene production conditions and synthesis procedures on the chemical and physical structure of MXene. In this study, it was aimed to synthesize Ti₃C₂T_x MXene from the Ti₃AlC₂ MAX phase by directly etching it with HF and LiF + HCl. The effects of temperature, etching time and concentration of the etching solution, and the effect of synthesis conditions on the surface groups, morphological structure and chemical structure of MXene were determined. In the study, the removal of Al atoms, which is an early transition metal, from the MAX phase increased by increasing the temperature, the removal of Al atoms in the MAX phase of MXene synthesized directly with HF at 40 °C for 24 hours at 30% concentration was approximately 99%, and the particle sizes of MXene were approximately three-thirds of those of the MAX phase. It was found that it decreased to one. It has been determined that MXene synthesis via LiF+ HCl occurs at higher temperatures compared to direct HF. It has been observed that MXenes synthesized under high temperature conditions have higher thermal resistance. It was determined that as the concentration of the etching solution increased, the depth of the accordion structures formed in the MXene structure increased. According to the results of the contact angle analysis of the surface groups of the MXene structure formed after the etching of the MAX phase, it was concluded that a more hydrophilic material was formed compared to the MAX phase.

Keywords: 2D nanomaterial, MXene, MAX

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1.	MXene ailesinin tarihçesi 2
Şekil 2.1.	MAX fazının oluştuğu elementler. 1
Şekil 2.2.	Yaygın olarak görülen MAX fazlarının kristal yapıları (a-)M ₂ X b-)M ₃ X ₂ c-)M ₄ C ₃)..... 2
Şekil 2.3	MAX ve MXenen'in yapıları 3
Şekil 2.4.	MAX ve MXene'nin üretim aşamaları 6
Şekil 2.5.	Farklı MXene yapıları..... 9
Şekil 3.1.	Ağır metallerin MXene Yüzeyindeki etkileşimleri 17
Şekil 3.2.	MXene katkılı membranın antibiyotikleri giderme yüzdesi 20
Şekil 3.3.	Kapasitif deiyonizasyonun çalışma mekanizması..... 22
Şekil 6.1.	A) 20 °C, %20 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu. B) 20 °C, %30 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.C) 20 °C, %40 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu. 29
Şekil 6.2.	A) 30 °C, %20 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu. B) 30 °C, %30 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu. C) 30 °C, %40 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu. 30
Şekil 6.3.	A) 40 °C, %20 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu. B) 40 °C, %30 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.C) 40 °C, %40 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu. 31
Şekil 6.4.	MAX'ın (Ti ₃ AlC ₂) XPS spektrumu. 32
Şekil 6.5.	20 °C, %20 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu. 32
Şekil 6.6.	20 °C, %20 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu. 33
Şekil 6.7.	20 °C, %20 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu. 33
Şekil 6.8.	20 °C, %20 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu. 34
Şekil 6.9.	20 °C, %30 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu. 34
Şekil 6.10.	20 °C, %30 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu. 35
Şekil 6.11.	20 °C, %30 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu. 35
Şekil 6.12.	20 °C, %30 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu. 36
Şekil 6.13.	20 °C, %40 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu. 36
Şekil 6.14.	20 °C, %40 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu. 37
Şekil 6.15.	20 °C, %40 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu. 37
Şekil 6.16.	20 °C, %40 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu. 38
Şekil 6.17.	30 °C, %20 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu. 38
Şekil 6.18.	30 °C, %20 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu. 39

Şekil 6.19.	30 °C, %20 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.	39
Şekil 6.20.	30 °C, %20 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.	40
Şekil 6.21.	30 °C, %30 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.	40
Şekil 6.22.	30 °C, %30 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.	41
Şekil 6.23.	30 °C, %30 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.	41
Şekil 6.24.	30 °C, %30 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.	42
Şekil 6.25.	30 °C, %40 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.	42
Şekil 6.26.	30 °C, %40 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.	43
Şekil 6.27.	30 °C, %40 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.	43
Şekil 6.28.	30 °C, %40 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.	44
Şekil 6.29.	40 °C, %20 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.	44
Şekil 6.30.	40 °C, %20 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.	45
Şekil 6.31.	40 °C, %20 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.	45
Şekil 6.32.	40 °C, %20 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.	46
Şekil 6.33.	40 °C, %30 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.	46
Şekil 6.34.	40 °C, %30 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.	47
Şekil 6.35.	40 °C, %30 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.	47
Şekil 6.36.	40 °C, %30 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.	48
Şekil 6.37.	40 °C, %40 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.	48
Şekil 6.38.	40 °C, %40 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.	49
Şekil 6.39.	40 °C, %40 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.	49
Şekil 6.40.	40 °C, %40 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.	50
Şekil 6.41.	20 °C, %20 HF 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene'in ve MAX fazının XRD grafiği.	51
Şekil 6.42.	20 °C, %30 HF 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene'in ve MAX fazının XRD grafiği.	51
Şekil 6.43.	20 °C, %40 HF 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene'in ve MAX fazının XRD grafiği.	52
Şekil 6.44.	30 °C, %20 HF 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene'in ve MAX fazının XRD grafiği.	52
Şekil 6.45.	30 °C, %30 HF 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene'in ve MAX fazının XRD grafiği.	53
Şekil 6.46.	30 °C, %40 HF 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene'in ve MAX fazının XRD grafiği.	53
Şekil 6.47.	40 °C, %20 HF 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene'in ve MAX fazının XRD grafiği.	54

Şekil 6.48.	40 °C, %30 HF 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene'in ve MAX fazının XRD grafiği.	54
Şekil 6.49.	40 °C, %40 HF 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene'in ve MAX fazının XRD grafiği.	55
Şekil 6.50.	Ti ₃ AlC ₂ MAX'ın SEM görüntüsü.	56
Şekil 6.51.	20 °C, %20 HF 24 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü.	56
Şekil 6.52.	20 °C, %30 HF 24 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü.	57
Şekil 6.53.	20 °C, %40 HF 24 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü.	57
Şekil 6.54.	30 °C, %20 HF 24 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü.	58
Şekil 6.55.	30 °C, %30 HF 24 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü.	58
Şekil 6.56.	30 °C, %40 HF 24 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü.	59
Şekil 6.57.	40 °C, %20 HF 24 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü.	59
Şekil 6.58.	40 °C, %30 HF 24 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü.	60
Şekil 6.59.	40 °C, %40 HF 24 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü.	60
Şekil 6.60.	Ti ₃ AlC ₂ MAX'ın SEM görüntüsü	61
Şekil 6.61.	A) 20 °C, %20 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, B) 20 °C, %20 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, C) 20 °C, %20 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, D) 20 °C, %20 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü.	61
Şekil 6.62.	A) 20 °C, %30 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, B) 20 °C, %30 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, C) 20 °C, %30 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, D) 20 °C, %30 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü.	62
Şekil 6.63.	A) 20 °C, %40 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, B) 20 °C, %40 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, C) 20 °C, %40 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, D) 20 °C, %40 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü.	62
Şekil 6.64.	A) 30 oC, %20 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, B) 30 oC, %20 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, C) 30 oC, %20 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, D) 30 oC, %20 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü.	63
Şekil 6.65.	A) 30 °C, %30 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, B) 30 °C, %30 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, C) 30 °C, %30 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, D) 30 °C, %30 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü.	63
Şekil 6.66.	A) 30 °C, %40 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, B) 30 °C, %40 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, C) 30 °C, %40 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, D) 30 °C, %40 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü.	64

Şekil 6.67.	A) 40 °C, %20 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, B) 40 °C, %20 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, C) 40 °C, %20 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, D) 40 °C, %20 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü.	64
Şekil 6.68.	A) 40 °C, %30 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, B) 40 °C, %30 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, C) 40 °C, %30 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, D) 40 °C, %30 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü.	65
Şekil 6.69.	A) 40 °C, %40 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, B) 40 °C, %40 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, C) 40 °C, %40 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, D) 40 °C, %40 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü.	65
Şekil 6.70.	Ti ₃ AlC ₂ MAX'ın EDS verileri.....	66
Şekil 6.71.	20 °C, %20 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in EDS verileri.	67
Şekil 6.72.	30 °C, %20 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in EDS verileri.	67
Şekil 6.73.	40 °C, %20 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in EDS verileri.	68
Şekil 6.74.	MAX fazı ve sentezlenen tüm MXene'lerin Al miktarları kütlece % grafiği.	68
Şekil 6.75.	MAX fazı ve farklı sentez şartlarıyla sentezlenen MXene'lerin temas açısı değerleri.	69
Şekil 6.76.	A) MAX fazı Ti ₃ AlC ₂ TGA grafiği B) 20 °C, %20 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in TGA grafiği C) 30 °C, %20 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in TGA grafiği D) 40 °C, %20 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in TGA grafiği.	70
Şekil 6.77.	50°C, %33,13 HCl, 1.88 g LiF ve 27 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS grafiği.	71
Şekil 6.78.	50°C, %33,13 HCl, 1.88 g LiF ve 57 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS grafiği.	71
Şekil 6.79.	60°C, %33,13 HCl, 1.88 g LiF ve 27 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS grafiği.	72
Şekil 6.80.	60°C, %33,13 HCl, 1.88 g LiF ve 57 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS grafiği.....	72
Şekil 6.81.	MAX fazı (Ti ₃ AlC ₂) ve 50°C, %33,13 HCl, 1.88 g LiF, 27 ve 57 saat koşullarında sentezlenen MXene'lerin XRD grafikleri.	73
Şekil 6.82.	MAX fazı (Ti ₃ AlC ₂) ve 60°C, %33,13 HCl, 1.88 g LiF, 27 ve 57 saat koşullarında sentezlenen MXene'lerin XRD grafikleri.	73
Şekil 6.83.	MAX fazı (Ti ₃ AlC ₂) ve 60°C-50°C, %33,13 HCl, 1.88 g LiF ve 27 saat koşullarında sentezlenen MXene'lerin XRD grafikleri.	74
Şekil 6.84.	MAX fazı (Ti ₃ AlC ₂) ve 60°C-50°C, %33,13 HCl, 1.88 g LiF ve 57 saat koşullarında sentezlenen MXene'lerin XRD grafikleri.	74
Şekil 6.85.	MAX fazı (Ti ₃ AlC ₂) ve 60°C-50°C, %33,13 HCl, 1.88 g LiF ve 27-57 saat koşullarında sentezlenen MXene'lerin temas açıları değerleri.	75
Şekil 6.86.	A) %33.13 HCl, 1.88 g LiF, 50 °C ve 27 saat üretilen MXene'in TGA grafiği B) %33.13 HCl, 1.88 g LiF, 50 °C ve 57 saat üretilen MXene'in TGA grafiği C) %33.13 HCl, 1.88 g LiF, 60 °C ve 27 saat üretilen MXene'in TGA grafiği D) %33.13 HCl, 1.88 g LiF, 60 °C ve 57 saat üretilen MXene'in TGA grafiği.	76

TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Genel olarak kullanılan MAX fazları, MXene fazları ve aşındırıcılar.....	3
Tablo 2.2. MAX fazı olmayan, MXene fazları, aşındırıcılar	3
Tablo 2.3. MXene çeşitleri.....	5
Tablo 2.4. 2D malzemelerin belirli özelliklerinin karşılaştırılması.....	12
Tablo 3.1. MXene'lerin adsorpsiyon kapasiteleri	16
Tablo 3.2. Katyonik ve iyonik metal türleri için adsorpsiyon mekanizmaları	17
Tablo 3.3. MXene ile fotokatalitik reaksiyon ile giderilen kirleticiler.	19
Tablo 5.1. Doğrudan HF ile üretilen Mxene'ler ve üretim şartları ($Ti_3C_2T_x$)	26
Tablo 5.2. $LiF+HCl$ ile üretilen ($Ti_3C_2T_x$) Mxene'ler ve üretim şartları.....	27

KISALTMALAR

2D	: İki boyutlu malzeme
WPC	: Ahşaptan üretilen boşluklu karbon
EMI	: Elektromanyetik Girişim
CDI	: Kapasitif Deiyonizasyon
HF	: Hidroflorik asit
DMSO	: Dimetil sülfoksit
TBAOH	: Tetrabutilamonyum hidroksit
TMAOH	: (tetrametilamonyum hidroksit)
MWCNT	: Çok duvarlı karbon nanotüp
SWCNT	: Tek duvarlı karbon nano tüp
MoS ₂	: Molibden disülfid
MB	: Metilen Mavisi
LiF	: Lityum florür
HCl	: Hidrojen klorür
ED	: Elektrodializ
RO	: Ters osmoz
NF	: Nano Filtrasyon
XRD	: X- IŞINI DİFRAKTOMETRESİ
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopu
EDS	: Enerji Dispersiv Spektrumu
XPS	: X-Ray fotoelektron Spektroskopisi
TGA	: Termogravimetrik Analiz

1. GİRİŞ

Endüstrileşme ve toplumun sürekli olarak hızla genişlemesiyle birlikte, enerji krizi ve çevre kirliliği sorunları giderek daha ciddi bir hal almaktadır. Hızlıca büyüyen sanayi ve bunların oluşturduğu endüstriyel atıklar ve artan şehirleşme sonucunda mevcut su kaynaklarını kirlenmektedir böylece temiz su kaynaklarına erişim kısıtlanmaktadır. Oluşan bu su kıtlığı dünya çapında kendini hissettirmeye başlamıştır ayrıca gelecek nesiller için ise büyük bir tehdit oluşturmaktadır ve mevcut olan su kaynakları da kirlenmektedir. Kirlenen su ortamlarında ortaya çıkan kirleticiler toksik, kalıcı ve sürekli hareket halinde olduğundan ekosistemler için tehdit oluşturarak insan ve tüm canlılar için ciddi sağlık tehditlerine sebebiyet vermektedir. Kirleticileri su ortamından gidermek için yeni proselere ve yeni malzemelere ihtiyaç giderek artmaktadır [1].

Grafenin 2004 yılında başarılı bir şekilde üretimi ve sonrasındaki kullanımı ile 2004 yılından sonra iki boyutlu (2D) malzemeler dikkat çekmeye ve araştırılmaya başlanmıştır [2, 3]. Bu 2D malzemelerin belirli mekanik, optik ve elektronik özellikleri dikkate alındığında elektronik ve optielektronik cihazlardan elektrokimyasal katalizörlere kadar birçok farklı alanlarda kullanılmıştır [4]. Erken geçiş metali karbürleri veya nitrürler olarak bilinen MXene'ler, 2011 yılında Amerika'da bulunan Drexel Üniversitesi'nde ilk sentezlendiğinden beri giderek daha da ilgi çekmeye ve bilimsel çalışmalara konu olmaya başlamıştır [5]. MXeneler 2D malzeme olarak adlandırılmaktadır. Yani 2D malzemeler birkaç atom veya birkaç mikrometre kalınlığına sahip düzlemsel olarak tanımlanan nano tabakalara verilen genel isimdir [6]. MXene'lerin sentezi on yıldan fazla bir süre öncesine dayanmaktadır ve MXene'lerin hikayesi Şekil 1.1'de verilmiştir [5]. 2012'de MXene ailesi sentezlenmeye başladıktan sonra 2013'de yüzeyleri arasındaki sulu tuz çözeltilerinden katyonların kendiliğinden katmanların arasına girdiği gözlemlenmiştir [7, 8]. 2014 yılı içerisinde hidroklorik asit ve lityum florürden çözeltisi ile başarılı bir şekilde MXene sentezlendiği raporlanmıştır [9]. 2015 yılında MXene'nin kükürt pilin yapısında kullanılabileceğini ilaveten etkin bir şekilde enerji depolayabileceğini belirlenmiş ve bu sayede MXenelerin pil ve enerji depolama sektöründe dikkat çekici yeni bir malzeme olmuştur [10]. MXeneler'in en dikkat çeken özelliklerinkinden biri de yüzey gruplarının mevcudiyetidir. 2016 yılında MXenelerin yüzeyindeki bulunan fonksiyonel grupları varlığını tanımlanmış ve kanıtlanmıştır [11]. 2017 yılında MXene'nin üretim yöntemlerine yönelik teknikler kılavuz hazırlanarak yayınlanmıştır [12]. 2018'de üstün özelliklere sahip MXene sentezlemek amacıyla Ti_3C_2Tx 'in diskotik katmanlı sıvı-kristal fazı bilim insanları tarafından incelenmiştir [13]. 2019 yılında, MXene'in farklı kullanım alanlarını uygulamalarının ve mevcut çalışmalar üzerine bir inceleme yapılarak bu çalışmalar derlenmiştir. MXene'in birçok alandaki üstün performansının bulunduğu tespit edilmiştir [14].

2020'de MXenelerle aerogel-WPC'yi (ahşaptan üretilen boşluklu karbon) sentezlenmiş ve bu malzemeyi birçok sektörde kullanılan görüntüleme alanları için üst düzey elektromanyetik girişim (EMI) cihazlarında kullanılabileceğini belirlenmiştir [15].



Şekil 1.1. MXene ailesinin tarihçesi [16].

MXene'ler, iyi iletkenlik özelliklerine sahip olmakla birlikte farklı yüzey grupları ile sonlandırılabilirlerinden bu yüzey grupları sayesinde farklı kimyasal karakteristik özelliklere sahiptir ve enerji depolama alanlarındaki AR-GE çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [8]. MXene'ler diğer nano malzeme ailelerine göre daha avantajlı bir malzemedir çünkü ayarlanabilir yüzeyel fonksiyonel gruplara sahiptir ki bu özellikler ise onu eşsiz kılmaktadır [17]. Yüzey alanının büyüklüğü, biyolojik olarak uyumluluk, sağlam elektrokimyasal özellikler, benzersiz doğal yapısı, yüksek hidrofiliklik ve fizikokimyasal özellikleri sebebiyle MXene'lerin arıtma teknolojileri için birçok dirençli ve toksik kirleticiyi tespit etmek amaçlı sensörler veya dedektör ya da bu kirleticileri gidermede geleceğe yönelik kullanılabilecek bir nanomalzeme olduğu düşünülmektedir [18]. Son yıllarda, yapılan çalışmaların sonucunda MXene'ler olağanüstü mekanik, manyetik, elektronik ve kimyasal özellikleri ile dikkat çekerek Çevre Mühendisliği alanında birçok bilim insanı ve araştırmacıyı bu malzeme üzerine çalışmaya teşvik etmiştir. MXene'ler yüzey grupları sayesinde düşük temas açısına yani yüzeyel olarak hidrofilikliğe ek olarak fazlasıyla metalik bölgelere sahiptir. Birçok bilim insanını bu üstün özellikleri sayesinde verimli çevre dostu bir giderim yolu olan fotokatalitik su arıtma uygulamalarında MXene kullanımına yönlendirmiştir [19]. MXene'lerin yüzey gruplarında bol miktarda anyonik fonksiyonel gruplar mevcuttur; ağır metaller ve sudaki kirleticileri için adsorbent

olarak kullanılabilirler [20]. MXene'ler etkin bir anti mikrobiyel özelliklere sahiptir ve son zamanlarda yapılan çalışmalarda bu özelliğinden dolayı biyolojik kirlenmeyi engelleyen membranların yapısında kullanılmıştır [21, 22]. MXene'lerin yüksek su tutma kapasitesi CDI (kapasitif deiyonizasyon) sistemlerinin elektrotlarında kullanılmasına olanak sağlayabileceği gözlemlenmiştir [8]. Bu sistemde su ortamında bulunan farklı iyonlar MXene'in yüzey gruplarıyla veya katmanları ile etkileşime geçebilirler buda CDI sistemlerinde kullanılmalarını sağlamaktadır [23]. Ayrıca yapılan çalışmalarda MXene'in 2D yüzeyinin efektif kullanımdan dolayı su ortamında yüksek miktarda tuz giderimi sağladığı rapor edilmiştir [24]. Bu özellikler MXene üzerinde yapılan çalışmalar hız kazandırmış ve birçok mühendislik alanında uygulanmaya başlanmıştır.



2. MXENE'NİN YAPISI VE ÖZELLİKLERİ

Hekzagonal katmanlı seramik yapılı bileşik ailesinin en büyük üyesi MAX fazıdır. MAX ismini, kimyasal formülünden alır. M_nAX_{n+1} formülüyle sembolize edilen MAX fazında M:erken geçiş metalini (Sc, Ti, V, Zr, Cr, Nb, Hf, Ta, Mo, vb.), A: Aşağıdaki resimde de görüldüğü gibi A ya da baş grubuna ait elementleri içerir (Al, Si, P, S, Ga, Ge, As, Sn ve In) X: karbon, azot yada her ikisini içerir. Erken geçiş metalleri karbürleri ya da nitrürleri ismi buradan gelmektedir [25]. Şekil 2.1 de MAX fazının oluştuğu elementler verilmiştir.

IA	IIA											IIIA	IVA	VA	VIA	VII	VIIIA
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Lr	Unq	Unp	Unh	Uns	Uno	Une									

H

He

M

Erken Geçiş Metali

A

A Grubu Elementi

X

C ve/veya N Atomu

Şekil 2.1. MAX fazının oluştuğu elementler [25].

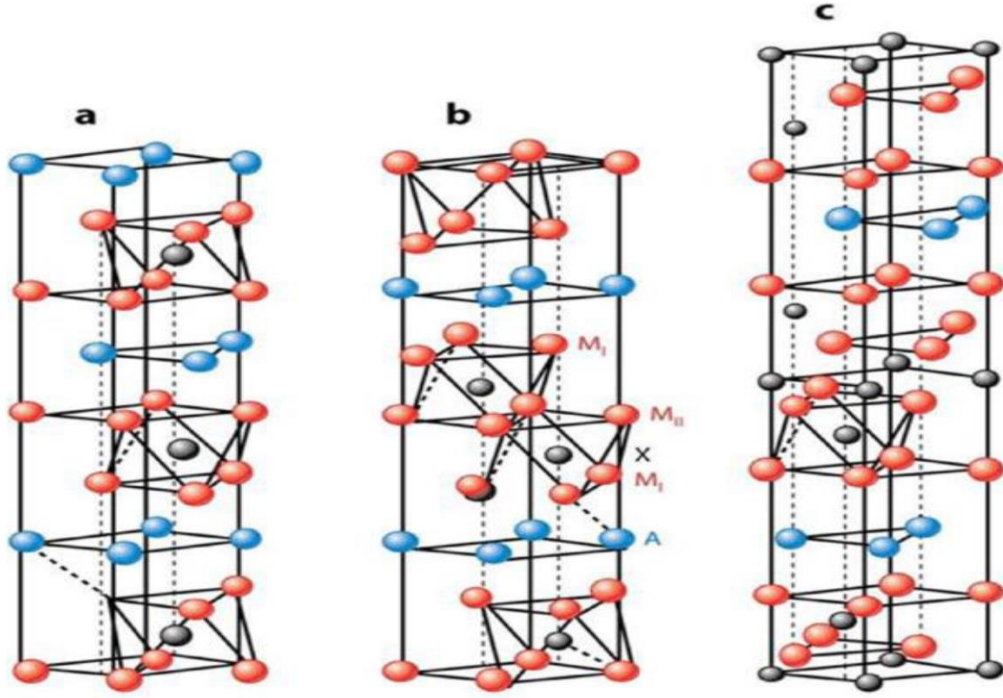
MAX fazının özellikleri;

- yüksek erime sıcaklığı,
- yüksek sıcaklıklarda stabil karakterizasyon,
- sürtünme kuvvetine karşı dayanım,
- yüksek termal şok karşı dayanım,
- yüksek sertlik,
- yüksek kimyasal dayanım ve
- oksitlenmeye karşı dirençtir [25].

Belirtilen birçok üstün özelliklerinden ötürü, MAX fazları uzay ve havacılık ve ısı sistemlerinde kullanılan elemanların tasarımında aktif olarak kullanılmaktadır [25]. Birçok farklı kristal yapıya sahip olan MAX fazları olmasına rağmen, çoğunlukla en fazla karşılaşılan 3 temel MAX fazı mevcuttur. Şekil 2.2’de bu fazların kristal yapıları gösterilmiştir [25].

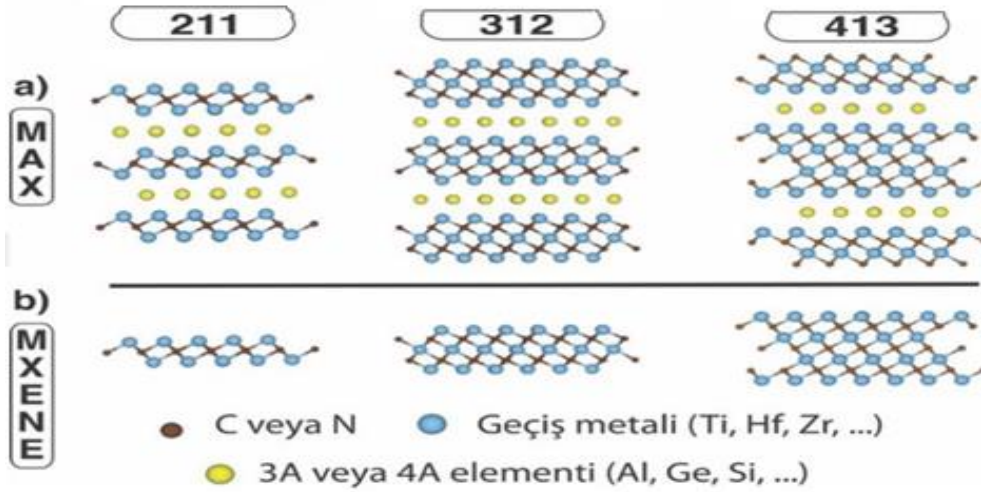
Bu en çok karşılaşılan MAX fazı arasındaki farklılık, M ve X elementlerinin sayısı belirlemektedir. Şekil 2.2(a) M_2AX yapısını göstermekte olup ve yapısında mevcut bir tane A

elementine karşın 2 tane M ve bir tane X elementi yer almaktadır. Şekil 2.2(b)'de M_3AX_2 yapısı gösterilmiştir. Bu yapıda bulunan bir adet A elementi 3 adet M elementine karşın 2 adet X elementi düşmektedir. Şekil 2.2 (c) de M_4AX_3 yapısını temsil etmektedir ki burada 1 adet A elementi, 4 adet M elementine karşın 3 adet X elementi karşılık gelmektedir [25].



Şekil 2.2. Yaygın olarak görülen MAX fazlarının kristal yapıları (a-) M_2X b-) M_3X_2 c-) M_4C_3) [22].

Genellikle, MAX fazları yüksek sıcaklıkta ve yüksek basınç şartları altında belirli oranlarda çeşitli MAX fazında kullanılan elementlerin tozlarının karıştırılması ve arıdından sinterlenmesiyle üretilirler [25]. MAX fazındaki yapıların metalik bir özellik sahip olduğu gözlemlenmiştir [25]. Yapılan çalışmalarda 70 MAX türü sentezlendiği rapor edilmiştir. MXene sentezlerken bahsedilen MAX fazındaki A elementlerini aşındırmak amacıyla asitler kullanılmıştır [26]. Kullanılan en ilk ve yaygın aşındırıcı olarak HF (hidroflorik asit) çözeltisidir [25]. Şekil 2.3'de MAX fazından MXene geçiş gösterilmektedir.



Şekil 2.3 MAX ve MXenen'in yapıları [25].

MXene'nin kimyasal olarak formüle edecek olursak, $M_{n+1}X_nT_x$, M erken geçiş metalleri sembolize eder (Ti, V, Mo, Sc, Zr, W, Cr, Ta, Nb ve Hf gibi), X azot (N), karbon (C) yada her ikisini ve T_x Yüzey gruplarının sayısını temsil eder, $n = 1,2,3$, üç ortak yapıyı tanımlar. Aşındırarak uzaklaştırılan A ise A grubu elementlerini temsil eder [25, 27]. Aşağıda verilen Tablo 2.1 ve Tablo 2.2 de MAX fazlarının farklı aşındırıcılar kullanarak hangi MXeneler'in sentezlendiği gösterilmektedir.

Tablo 2.1. Genel olarak kullanılan MAX fazları, MXene fazları ve aşındırıcılar [28].

MXene	MAX Fazı	Aşındırıcı
TiC ₂	Ti ₂ AlC	6 M HCl içinde ağırlıkça %10 HF -13.5 M LiF
V ₂ C	V ₂ AlC	%50 ağırlıkça HF
(W _{0.67}) ₂ C	(W _{0.67} S _{0.33}) ₂ C	12M HCl içerisinde 24 M LiF
Zr ₃ C ₂	Zr ₃ Al ₃ C ₅	1 M NaHF ₂
NbC ₃	NbAlC ₃	%50 ağırlıkça HF
Ti ₃ N ₄	Ti ₃ AlN ₃	Çözülmüş Tuz (LiF,NaF,KF)
Mo ₂ C	Mo ₂ C	%50 ağırlıkça HF 3M LiF 12M HCl içerisinde
Ti ₃ C ₂	Ti ₃ SiC ₂	HNO ₃ , KMnO ₄ , FeCl ₃ , veya (NH ₄) ₂ S ₂ O ₈

Tablo 2.2. MAX fazı olmayan, MXene Fazları, aşındırıcılar [28].

MXene	MAX olamayan faz	Aşındırıcı
Zr ₃ C ₂ T _x	Zr ₃ Al ₃ C ₅	HF çözeltisi ile aşındırma
Hf ₃ C ₂ T _x	Hf ₃ Al ₄ C ₆	HF çözeltisi ile aşındırma

2.1. MXene Sentezi

MAX fazında bulunan MA ve MX bağları kuvvetleri birbirinden farklıdır. MX bağı ile MA bağı kıyasladığımızda MX bağı daha kuvvetli olduğu gözlemlenmiştir [29]. Bu nedenle ana fikir; MAX fazından A elementini yani kuvvetli olmayan MA bağlarının bir şekilde uzaklaştırılmasıyla erken geçiş metallerinin karbürleri, nitrürlerini yada her ikisini de elde etmektir [30, 31]. MA bağlarının kopartılarak MAX fazından uzaklaştırılmasıyla sentezlenen bu malzemeye 2D metal karbürleri ve/veya nitrürleri olarak da bilinen bu aileye genel olarak MXene denilmiştir [32]. Yaygın sentez prosedürü olarak HF (hidroflorik asit) ile aşındırma kullanılmıştır. HF'nin kullanılmasının temel sebebi seçici olarak MA bağı hedef almasıdır bundan dolayı etkin ve basit bir şekilde sentezlemeye olanak sağlar. HF ile aşındırma işlemi sabit bir karıştırma altında gerçekleştirilir ve belirli bir reaksiyon süresinden sonra çok katmanlı bir MXene sentezlenmiş olur bu çok katmanlı yapıyı daha küçük parçalara veya pul haline getirmek için genellikle metanol etanol veya izopropil alkol içerisinde ultrasonikasyon işlemiyle oluşturulur [29]. MXene sentezi HF ile aşındırılarak kolayca ve yüksek verimle MAX fazındaki A elementini uzaklaştırdığından dolayı tipik ve yaygın olarak kullanılmaktadır [16]. Ti_3AlC_2 MAX fazının zengin flor içeren su ortamında gerçekleşen reaksiyonu ve oluşan son ürün aşağıda verilmiştir [5].



MAX fazında bulunan alüminyum atomlarının MAX fazından ayrılarak alüminyum florür oluşturması (1.1) ortamda bulunan -OH ve -F MXene'in yüzeyine bağlanması ise (1.2 ve 1.3) [5]. Elde edilen nihai ürün çok katmanlı yüzey grupları -F ve -OH bağlanmış $Ti_3C_2T_x$ 'dir.

Kullanılan MAX fazının saflığı, kalitesi, partikül boyutu aşındırma çözeltisi saflığı, aşındırma sonrası kullanılan interkalasyon ajanı, reaksiyonun gerçekleştiği sıcaklık ve reaksiyon süresi gibi parametreler sentezlenen MXene'nin özelliklerini etkileyebilir [26]. MAX fazındaki M'in atom numarası ne kadar büyürse daha agresif aşındırıcı ve daha fazla reaksiyon süresi gerekmektedir. Örneğin; aynı elementleri içeren M_4AX_3 ile M_2AX 'i kıyaslandığında; M_4AX_3 MAX fazı için daha konsantre bir aşındırma çözeltisi ve daha fazla bir reaksiyon süresi gerekmektedir [32]. Aşındırma işlemi sonrası oluşan MXene'ler zayıf Van der Waals bağlarıyla bir arada duran çok katmanlı pul şeklinde malzemedir ki bu bağları parçalayıp tek katmanlı MXene üretmek için sonikasyon işlemi uygulanır ve bu adıma delaminasyon ismi verilir. Ayrıca isteğe bağlı bir şekilde yüzey alanlarını arttırmak ve oluşan yapıdaki boşlukları arttırmak için uygulanan adıma ise interkalasyon adı verilir [5]. MXene sentezinde kullanılan HF çözeltisinin

konsantrasyonu üretilen MXene'in yüzey morfolojisini ve yüzey alanını değiştirebileceği yapılan çalışmalar sonrasında rapor edilmiştir. Aşındırma çözeltisinin konsantrasyonu yükseltilerek daha kısa sürede daha iyi aşındırılmış akordiyonik yapılar elde edilebileceği gözlemlenmiştir [16].

HF insan ve çevreye zarar verebilecek tehlikeli bir maddedir. Solunması bile toksik bir etkiye sahiptir [16]. Bu nedenle daha az zararlı olan kimyasallar ile MXene sentezi, amaçlanmıştır. Bu amaçla yerinde HF asit üretme reaksiyonları araştırılmıştır. 2014 yılında HCl (hidroklorik asit) ile herhangi bir florür tuzu kullanarak (LiF, KF, NaF vb.) yerinde HF sentezlemeyi başarılmıştır [33].

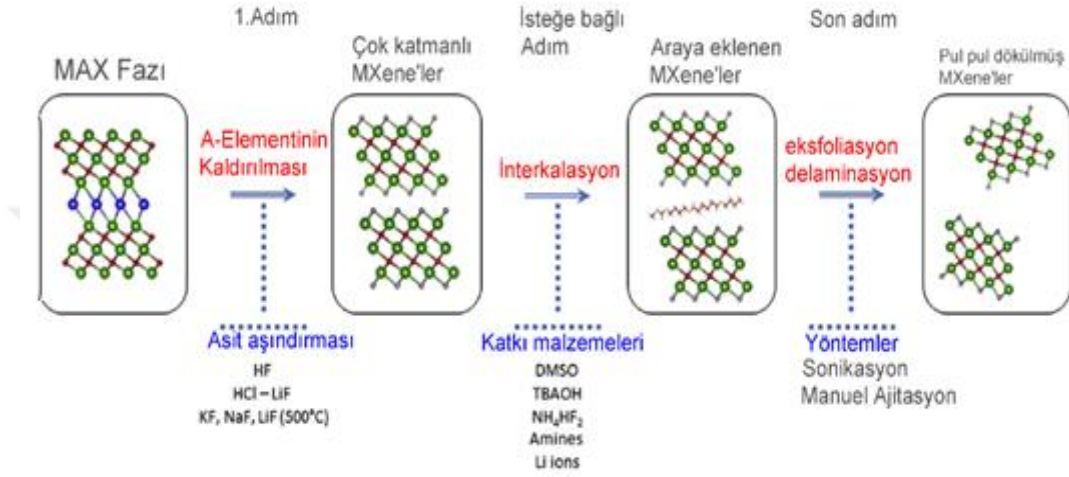


Bu sentez şekli doğrudan HF ile kıyaslandığında daha az agresif aşındırıcılar kullanılması ve daha az bir süre sonikasyon işlemine tabi tutulması gibi birçok avantajı bulunmaktadır. Sentezlenen MXene'in yaklaşık %70 lik bir kısmı bir veya iki katmanlıdır. Bundan dolayı delaminasyon için daha az enerji harcanır, daha büyük yüzey alanlarına sahiptirler ve DMSO veya TBAOH gibi interkalasyon ajanlarının kullanılmasına gerek duyulmaz. Gerçekleşen reaksiyon (1.4) yüksek sıcaklıklarda gerçekleştiğinden sentez koşullarında dezavantaj oluşturmaktadır [9]. Tablo 2.3'de sentezlenen farklı MXene türleri ve prosedürleri verilmiştir.

Tablo 2.3. MXene çeşitleri [16].

Tip	MXene	Aşındırıcılar
M ₂ X	Ti ₂ C	10% HF
M ₂ X	(Ti _{0.5} Nb _{0.5}) ₂ C	50% HF
M ₂ X	V ₂ C	50% HF
M ₂ X	Nb ₂ C	50% HF
M ₂ X	Mo ₂ C	50% HF
M ₂ X	Mo _{1.33} C	48% HF
M ₂ X	Ti ₂ N	6 M HCl ve 6 g KF
M ₂ X	(V _{1-x} Ti _x) ₂ C	30% HF
M ₂ X	Nb _{1.33} C	48% HF
M ₂ X	W _{1.33} C	48% HF
M ₃ X ₂	Ti ₃ C ₂	50% HF
M ₃ X ₂	(V _{0.5} Cr _{0.5}) ₃ C ₂	50% HF
M ₃ X ₂	Ti ₃ CN	30% HF
M ₃ X ₂	Zr ₃ C ₂	50% HF
M ₃ X ₂	Mo ₂ TiC ₂	%51 sulu HF
M ₃ X ₂	Cr ₂ TiC ₂	5 mol LiF ile 6 M HCl,
M ₃ X ₂	Hf ₃ C ₂	Ağırlıkça %35 HF
M ₃ X ₂	Mo ₂ ScC ₂	%48 HF
M ₄ X ₃	Ta ₄ C ₃	50% HF
M ₄ X ₃	Ti ₄ N ₃	59% KF + 29% LiF + 12% NaF
M ₄ X ₃	Nb ₄ C ₃	48–51% HF
M ₄ X ₃	(Nb _{0.8} Ti _{0.2}) ₄ C ₃	48–51% HF
M ₄ X ₃	(Nb _{0.8} Zr _{0.2}) ₄ C ₃	12 M HCl ve 0.6 g LiF
M ₄ X ₃	Mo ₂ Ti ₂ C ₃	%51 sulu HF
M ₄ X ₃	V ₄ C ₃	40% HF

İnterkalasyon tek katmanlı küçük MXene yapılarına dönüştürmek için veya MAX fazındaki uzaklaştırılan A atomlarından dolayı oluşan boşluklu yapıdaki boşluk miktarını arttırmak için kullanılan kimyasallardır. Genellikle TMAOH (tetrametilamonyum hidroksit), DMSO (dimetil sülfoksit), TBAOH (n-bütilamin, tetrabütilamonyum hidroksit) gibi kimyasallar kullanılarak işlevselleştirme yoluyla tek veya çok katmanlı tabakalara ayrılabilir [6, 34]. Şekil 2.4’de MXene sentez prosedürü verilmiştir.



Şekil 2.4. MAX ve MXene'nin üretim aşamaları [32].

2.2. MXene Sentezinde Uygulanan Farklı Aşındırma Yöntemleri

MAX fazından MXene sentezi sırasında, zararsız ve çevreci kimyasal metotlar seçilmelidir. MXene sentezi için kullanılan metotlar içerisinde florür vasıtasıyla aşındırma, elektrokimyasal yol ile aşındırma, kuru (susuz) aşındırma, ve alkali işlemi gibi yöntemler sunulmuştur [35].

2.2.1. Florür ile aşındırma

Florür vasıtasıyla aşındırma işlemi, çoğunlukla iki ayrı metotla yapılabilir. İlk yöntem, yüksek konsantrasyonda HF asit kullanarak doğrudan MXene yüzeyini aşındırmayı hedefler. Çok katmanlı MXene yapıları elde etmek için ise, MAX fazı oda sıcaklığında yüksek konsantrasyonda HF ile aşındırıldıktan sonra izopropil alkol ve metanol çözeltisi içerisinde sonikasyon ile parçalanır [35].

İkinci yöntem ise HCl ve farklı çeşitte florür tuzlarının, CsF, FeF_3 , NaF, CaF, LiF, KF vb. kimyasalların kullanılarak yerinde HF asit üretilerek aşındırmanın yapıldığı yöntemdir. MXene'lerin yüzeyini aşındırmak amacıyla kullanılan flor içerikli çözeltiler ile MAX fazı arasında kimyasal etkileşimler gözlemlenmiştir. MAX fazından, Al atomlarının zengin florlu çözelti ile giderilmesinden sonra MXene yüzeyinde -F ve -OH yüzey gruplarıyla sonlandırılmıştır, fakat

yüzey gruplarında oksijenin varlığı da gözlemlenmiştir (Ti-O, Ti-OH ve Ti-F). HF kullanılarak Ti_3CNT_x , $TiNbCT_x$, Nb_2CT_x , $Mo_2Ti_2C_3T_x$, TiC_2T_x , Ti_3C_2 , $(Nb_{0.8}Zr_{0.2})_4C_3T_x$, $(Nb_{0.8}Ti_{0.2})_4C_3T_x$ ve $Zr_3C_2T_x$ gibi birçok çeşitli MXene sentezlenmiştir [35].

Al içeren MAX fazlarındaki Al atomlarının F ile yüksek reaktivite göstermesi gibi avantajlarından dolayı flor bazlı çözeltiler veya doğrudan HF ile aşındırma yapılarak MXene sentezi etkin ve basit olmasından ötürü yaygın bir üretim prosedürü olarak görülmüştür. Fakat Al içeren MAX grupları HF ile aşındırarak üretilmesi çevreye zararlı ve üretim esnasında güvenlik sorunları oluşturur aynı zamanda F yüzey grupları MXene'in malzeme performansını kısıtlayarak yeni uygulama alanlarında kullanımlarını güçleştirmektedir. Yani HF içermeyen aşındırma yöntemlerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır [35].

2.2.2. Elektrokimyasal Aşındırma

Kimyasal aşındırmanın temelini, MX ve MA bağları arasındaki reaktivite farkı oluşturur. Elektrokimyasal aşındırma ise, bir yükün transferi sürecini içerir. Seyreltilmiş HCl çözeltisindeki gözenekli Ti_2AlC elektrotları üzerinde Al'in elektrokimyasal olarak giderilmesinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Ti_2AlC MXene sentezlemek için tercih edilebilir. Elektrokimyasal aşındırmada yönteminde $LiF+HCl$ veya HF kimyasal aşındırma metoları gibi flor iyonları kullanılmazken, yüzey gruplarında yalnızca -Cl, O ve -OH içeren MXenler üretilmiştir [36].

Aşındırıcı olarak HF kullanılmadan üretilen Ti_2CT_x , V_2CT_x ve Cr_2CT_x MXene'lerdir. Düşük sıcaklık, aşındırıcı olarak seyreltilmiş HCl'nin mevcudiyetinde MAX fazının aşındırma işleminin süresini kısaltarak MXene'in aşındırma miktarını büyük ölçüde yükseltmiştir. Termal destekli elektrokimyasal aşındırma, sadece MXene sentezi için bir yöntem sunmakla kalmamış ayrıca daha önce üretilmesi güç olan MXene türlerinin üretimini kolaylaştırmış olduğu gözlemlenmiştir [37].

2.2.3. Sulu Olamayan Aşındırma Yöntemi

Erimiş tuzla aşındırma ve iyot destekli aşındırma, en çok kullanılan iki sulu olmayan aşındırma prosedürüdür. Erimiş tuzlardaki asit katyonları, oldukça yüksek bir redoks potansiyeline sahiptir bu sebepten dolayı MAX fazındaki erken geçiş metallerini (A atomlarını) kolaylıkla yükseltgenebileceği gözlemlenmiştir [35].

Farklı MAX fazlarını aşındırmak için, Ti_3AlCN , Ti_2AlC , $NbAlC$, Ti_3AlC_2 gibi çeşitli erimiş tuzlar ($NiCl_2$, $AgCl_2$, $CuCl_2$, $CoCl_2$, $FeCl_2$) kullanılmıştır. Bu erimiş tuzlar, geç geçiş metal halojenürün standart MAX fazındaki erken geçiş metallerinin (A atomlarını) yerini almak için kullanılabileceği gözlemlenmiştir. MXene üretiminin ham maddesi olarak kullanılacak MAX fazlarının çeşitliliğini büyük ölçüde arttırmıştır. Yakın zamandaki çalışmalarda, basit ve çevre

dostu bir yaklaşım olan erimiş tuzlarla aşındırma metodu, MXene üretiminde HF kullanımına ihtiyaç duymaması nedeniyle seçildiği gözlenmektedir [38].

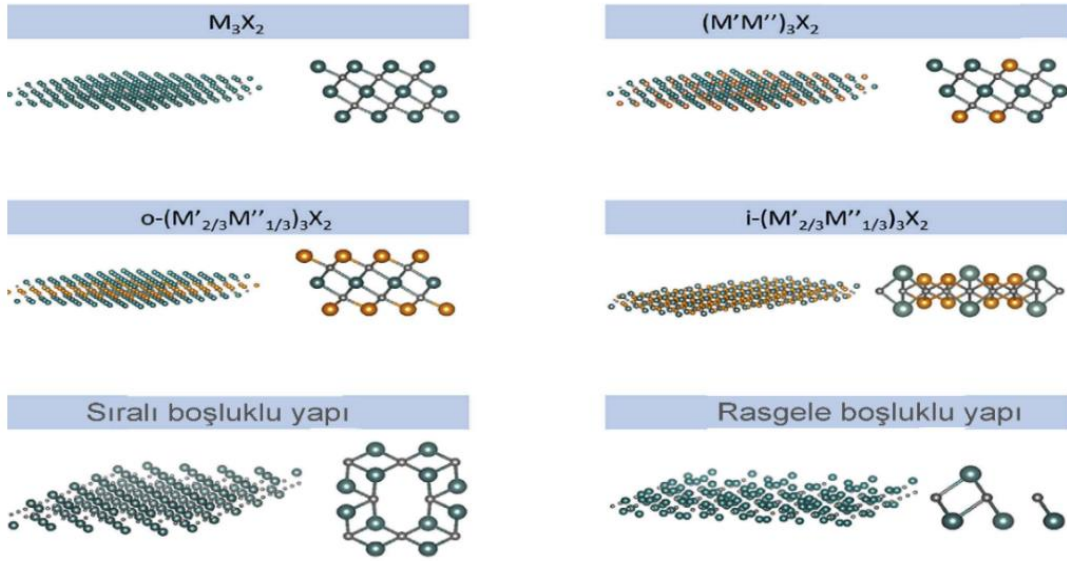
2.2.4. Alkali Aşındırma Yöntemi

MAX fazı olan Ti_3AlC_2 'nin MXene sentezi için alkali aşındırma, Al'ın yüksek reaktivitesi nedeniyle ideal çevre dostu bir metottur. Ancak bu yöntemin dezavantajı yüzeyinde belirli oksitler veya hidroksitler oluşacağından zorluk oluşturmaktadır. Örneğin; KOH, MXene sentezi için başarılı bir aşındırma maddesi olarak kullanılmış tek katmanlı $Ti_3C_2T_x$ sentezlenmiştir. Max fazının alkaliye maruz kalma AlO veya $Al(OH)_3$ gibi Al oksit-hidroksitlerinin oluşmasına sebebiyet verir bu durum ise arzulanan Al giderim verimine ulaşmayı güçleştirir [39].

Yapılan çalışmalarda yüzey grupları O veya OH içeren NaOH içerikli hidrotermal aşındırma yapılarak Mxene sentezlendiği bildirilmiştir. Üretilen MXene'in oksitlenmesinin önüne geçmek için bu hidrotermal süreç argon gazı altında yapılmıştır. 270 °C'de NaOH çözeltisi kullanılarak Ti_3AlC_2 MAX fazı seçici aşındırma ile MAX fazından Al giderimi sağlandığı rapor edilmiştir. Üretilen MXene çok katmanlı olup görünür herhangi bir F yüzey sonlandırma grubu olmadan sadece O veya OH yüzey grupları içeren MXene'im ağırlıkça saflığı % 92 olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak MAX fazının erken geçiş metalleri alkali aşındırma yöntemi kullanılarak başarıyla giderilmiş buda MXene sentezlemek için HF tüketimi olmayan bir bakış açısı sunar [35].

2.3. MXeneler'in Yapısı ve Kararlılığı

Bilgisayar destekli simülasyonlar, MXene yapılarını inceleyip anlamak ve yapılan deneysel çalışmalara katkı sağlayarak yeni oluşturulabilecek stabil MXene bileşiklerini belirlemek için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [35]. Yapılan bu simülasyonlar sonucunda 6 farklı MXene yapısının bulunabileceği belirtilmiştir. Şekil 2.5'da bulunan bu 6 farklı yapı verilmiştir [32].



Şekil 2.5. Farklı MXene Yapıları [32].

Sentezlenen MXene'lerin atomik yapıları, yüzeysel ve iç yapılarındaki kusurları ve yüzey sonlandırma gruplarını belirlemek amacıyla atomik çözünürlüklü taramalı transmisyon elektron mikroskobu (STEM), yüksek çözünürlüklü transmisyon elektron mikroskobu (HRTEM) ve elektron enerji kaybı spektroskopisi (EELS) yoluyla MXene'lerin yapıları değerlendirilebilmektedir [32, 40, 41, 42].

Yürütülen çalışmalar sonrasında MXene'lerin yüksek sıcaklıklara ve nem ile bozulabileceği rapor edilmiştir. Depolama ve uygulama alanlarında bu durum göz önüne alınmalıdır [43-44]. Sentezlendikten sonra iletkenliği ölçülen $Ti_3C_2T_x$ MXene 70 saat boyunca açık havaya maruz bırakıldıktan sonra tekrar iletkenliği ölçülmüştür karşılaştırıldığında bu iki değer yaklaşık olarak %20 civarında bir iletkenlik kaybı gözlemlenmiştir [43]. Sentezlenen MXeneler'in saklama koşulları olarak havasız ve ışıksız ortamda eğer çözelti halindeyse polaritesi yüksek bir çözücüde muhafaza edilmesi tavsiye edilmektedir [26, 43].

MXene'in termal kararlılığın yönelik yapılan bir çalışmada argon gazı altında $Ti_3C_2T_x$ TGA 10 °C /dk ısıtma hızıyla analizi yapılmıştır ve kütle kayıpları incelenmiştir 200 °C ye kadar ısıtıldığında MXene de % 0.38 lik bir kütle kaybı gözlemlenmiştir. Bu kayıp yapısında adsorbe edilen su ve HF moleküllerini temsil ettiği, 200 ile 800 °C kadar % 4,48 lik bir kütle kaybı gözlemlenmiştir bu kayıp yüzey sonlandırma gruplarından OH gruplarının yüzeyden ayrılmasına bağlanmıştır. 800 ile 1000 °C arasında % 2.47 lik bir kayıp gözlemlenmiş bu kayıp ise yüzey gruplarındaki flor atomlarının salınımına bağlanmıştır [32].

MXeneler'in oksitlenme kararlılığını inceleyecek olursak yüksek sıcaklıktaki su, hava oramlarında veya UV ışımasına maruz kaldığında oksidasyon yoluyla oksijen içeriğine ayrışır. Örnek verilecek olursa $Ti_3C_2T_x$ sulu çözeltisi havayla temas ettiğinde oksijenin tetiklemesi

nedeniyle katmanlı geometrisi çekirdektime ile ayırır. Aynı zamanda MXene, karbon malzemenin yüzeyi üzerinde titanyum okside dönüşür ki bu durum titanyum oksidi siyah ve yeşilimsi renginden mavimsi beyazına kadar çökmesiyle kanıtlanmıştır [45].

2.4. MXene’lerin Özellikleri

2.4.1. Spesifik Yüzey Alanı

MXene’ler akordiyonik özel yapıları sayesinde yüksek yüzey alanlarına sahiptir. Bu durum MAX fazındaki A elementinin aşındırılarak uzaklaştırılmasıyla yapıda kalan boşluklardan oluşmaktadır. Yüksek bir yüzey alanına sahip olması MXeneleri adsorpsiyon çalışmalarında adsorbent olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Yapılan bir çalışmada MXene’lerin yüzey alanlarını tespit etmek amacıyla Brunauer–Emmett–Teller (BET) teorisini kullanılarak 93 m²/g bulunmuş MXene, MoS₂ (molibden disülfid), SWCNT (tek duvarlı karbon nano tüp) ve H-Bor Nitrür gibi vb. diğer nano malzemelerle yüzey alanına yakındır. Bu çalışma ile MXenelerin yüksek yüzey alanlarının varlığını göstermiştir [46].

Fotokatalitik reaksiyonlar aktif yüzey bölgelerinde gerçekleşmektedirler. MXene’ler sahip olduğu aktif yüzey grupları ve yüksek yüzey alanları sayesinde fotokatalitik proseslerde de kullanılabileceği birçok çalışmada belirlenmiştir [47].

2.4.2. Mekanik Özellikler

MXene’ler az sayıda atomik katmalara sahiptir ve bu sayede tek katmalı bir MXene genellikle 1 nm den az bir kalınlıktadır ve bu kalınlık sentez sürecine ve interkalasyon için kullanılan kimyasallara veya prosedürlere göre değişkenlik göstermektedir. Genel olarak tek katmanlı MXene’ler kalınlıkları nm ile µm arasındadır [46]. Elastik sabiti olan (C_{11}) değeri incelendiğinde MXene’leri MAX fazlarıyla kıyaslandığımızda nerdeyse iki katıdır bu durum MXeneler’in çok iyi bir elastik sabitinin olduğunu gözlemlenmiştir [47]. Fakat yüzey sonlandırma gruplarının mevcudiyeti C_{11} değerini ciddi oranda düşürmektedir. Her ne kadar yüzey sonlandırma grupları C_{11} değerini düşürse de MXene’lerin muadili olduğu düşünülen bir başka 2D malzeme grafene göre çok daha yüksektir. Örnek verecek olursak Ti₂C çift eksenli gerilmelerde % 9,5 ile % 18 deforme olurken Grafen’de ise %20 ile %24 arasında deformasyon görülmüştür [32].

2.4.3. İletkenlik Özellikleri

Yüzey grupları haricinde MXene’lerin metalik karakterde olduğu bilinmektedir. Yüzey grupları ile birlikte yüzey gruplarının konumuna yönüne ve türüne göre değişiklik gösterse de yarı iletken bir malzeme sınıfındadır [26]. MXene’lerin sentezi sırasında yüzey sonlandırma

gruplarındaki farklılıklar göstermiş oldukları elektronik ve elektriksel karakterlerini etkilerler [16]. Ayrıca MXene'ler deki katman sayısı ve yüzeylerinde bulunan fonksiyonel grupların mevcudiyeti direnç değerlerini arttırdığı rapor edilmiştir [32]. Yapılan çalışmalar sonucunda yüzey grupları - F ile sonlandırılmış MXene'lerin elektrik iletimi -O grubu ile sonlandırılmış MXene göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir[48].

MXenelerin elektrik iletkenlik değerleri karbon nanotüplerinkinden daha yüksek iken çok katmanlı Grafen'in elektrik iletkenliğine yakındır [29, 49]. MXene'lerin morfolojileri üzerinde yapılan değişiklikler elektriksel iletkenlik değerlerinin değişmesine neden olmaktadır [50].

MXene'lerin elektrik iletkenliği de morfolojiye ve hazırlama yöntemine bağlı olarak ayarlanabilir. Örneğin, hafif aşındırma şartları ve delaminasyon koşullarındaki farklılıklar, farklı büyüklükte ve daha az kusurlu pullar üretecektir. Ayrık pullar arasındaki iyi etkileşim, teması ve interkalasyonda kullanılan ajanların yokluğu, yüksek iletkenlik değerlerine neden olabilir. Ti_3C_2Tx 'in ölçülen iletkenlik değeri, aşındırma ve delaminasyon koşullarına bağlı olarak $1000\ S\cdot cm^{-1}$ ile $>20.000\ S\cdot cm^{-1}$ arasında değişiklik göstermiştir [50]. Benzer şekilde, $\sim 100\ nm$ kalınlık aralığındaki MXene ince filmleri için $3,4 \times 10^{-4}\ \Omega$ öz direnç değeri bildirilmiştir [51]. Elektriksel özelliklerin iyileştirilmesinin bir başka yolu da yüzeyi ısıl işlemle veya alkali işlem ile yüzeySEL kusurların giderilmesidir [32]. İletkenlik değerleri elektromanyetik ve elektriksel alanlardaki kullanılacak sensörlerin ve malzemelerin performansını değerlendirmek için kritik bir öneme sahiptir [52]. MXeneler'in geçiş metalleri, X elementleri kombinasyonları seçilebilmektedir ve buna ek olarak yüzey gruplarında nispeten kontrol edilebilmektedir. Bu avantajlarına ilaveten bazı üstün özelliklerinden dolayı sensör, pil, enerji ve biyoteknolojik alanlar dahil olmak üzere çeşitli alanlardaki uygulamalar için uygun bir malzeme olarak ön plana çıkmaktadır [16].

2.4.4. Optik özellikler

MXene'ler eşsiz optik özelliklere sahiptirler. Fotokatalitik reaksiyonların performansını etkileyen parametrelerden en önemlisi görünür dalga boylarını ve UV bölgedeki ışığın dalga boylarının adsorpsiyonudur [53]. $5\ nm$ kalınlığındaki Ti_3C_2Tx film UV görünür bölgede (UV-vis) ışığın % 91.2'ye kadar geçirgenlik göstermiş ve aynı zamanda 300 ile 500 nm arasında ışığın emildiği gözlemlenmiştir [32]. Etkin bir şekilde geçirgenlik değerleri elde etmek için MXene film kalınlığını ve interkalasyondaki değişimlerle optimize edilebilir [32].

MXene'lerin UV görünür bölgedeki ışık geçirgenliği ve metallere benzer iletkenlik gibi özellikleri nedeniyle esnek ve şeffaf elektrotların üretiminde potansiyel adaylardır [53]. Su buharlaştırma ve biyomedikal uygulamalarında kullanılan yüksek verime sahip ışıktan ısıya dönüşüm verimliliği rapor edilmiştir [54]. MXene'deki fonksiyonel grupların mevcudiyeti optik özelliklerini etkilediği gözlemlenmiştir. Flor ve hidroksil grupları ile yüzey sonlandırma

yapıldığında emilimi ve yansıtmayı azaltırken saf MXene'den daha düşük bir emilim ve yansıtma özelliğine sahip olduğu gözlemlenmiştir [53].

Yapılan başka bir çalışmada MXene, görünür aralıkta >97 (1–5 nm kalınlık) geçirgenlik sergilemiştir; iletkenlik $\approx 2000\text{--}5000\text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ile yaklaşık 70 nm film kalınlıklarında %30 veya altına düşen bir geçirgenlik göstermiştir. MXene'lerin görünür veya IR aralığında bir plazmonik rezonans özelliği gösterdiği belirtilmiştir [55].

2.4.5. Antibakteriyel Etki

Son yıllarda yapılan çalışmalarda MXene'lerin ektin antibakteriyel özelliklere sahip olduğu tespit edilmiştir. Yapılan bir çalışmada $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$, kullanarak *E.coli* ve *B.subtilis*'in bakteri gruplarının aktivitesini inhibe ettiği gözlemlenmiştir. MXene ile aynı ortamda bulunan bakteriyel hücre aktivitelerinin zaman içerisinde %98 yani neredeyse tamamen durdurulduğu tespit edilmiştir. $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ bakterileri inhibe etme sebebinin negatif yüke sahip hidrofilik yüzeyi ile bakteri ve MXene arasındaki teması arttırması ve sonrasında bakteri gruplarının inaktivasyonuna bağlanmıştır [21].

2.4.6. Diğer Özellikleri

MXeneler'in sahip olduğu düşük direnç değerleri, yüksek geçirgenlikleri ve metalik elektriksel iletkenlikleri nedeniyle günümüzde ekranlama ve elektromanyetik alanlar için koruyucu malzeme olarak kullanılırlar [56, 57, 58]. MXene'ler, doku mühendisliği, kanser tedavilerinde vb. biyomedikal uygulamalar üzerinde değerlendirmiş *in vitro* ve *in vivo* deneyleri sonucu biyoyouyumluluğu ve belirgin bir toksitesi olmağı gözlemlenmiştir. Ayarlanabilir morfolojik yapısı spesifik biyolojik bozunma ve yüksek fizyolojik stabilitesi biyomedikal alanda kullanılabileceği belirtilmiştir [32]. Tablo 2.4'de 2D malzemelerin belirli özelliklerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

Tablo 2.4. 2D malzemelerin belirli özelliklerinin karşılaştırılması [46].

NANO MALZEME	BANT ARALIĞI (EV)	İLETKENLİK (S/CM)	YÜZEY ALANI (M^2/GR)	BİYOUYUMLULUK
SWCNT	0.042	$10^2\text{--}10^6$	600	Belirsiz
MWCNT	1.82	$10^3\text{--}10^5$	122	Belirsiz
H-BOR NİTRÜR	5.9	Yalıtkan	150-550	Boyut ve şekile Bağlı
MOS_2	1.89	10^{-4}	8.6	Biyoyumlu
GRAFEN	0	2700	450	Biyoyumlu
MNO_2	1.33	$10^{-5}\text{--}10^{-6}$	257.5	Biyoyumlu
MXENE (Ti_3C_2)	0.1	2410	93.6	Biyoyumlu

Belirtilen birçok nano malzeme grupları incelendiğinde MXene iletkenlik olarak Grafen'e yakın bir değerdedir diğer malzemelere kıyasla iyi bir iletken olduğundan genellikle yalıtkan olan polimerlerle kompozit oluşturularak iletkenlik özelliği kazandırılabilir. Yüzey alanı grafen ile kıyaslandığında yaklaşık 5 kat daha az olmasına rağmen yüzey grupları MXene'lere anyonik özellik kazandırdığı için ağır metal vb. katyonik yüzey yüküne sahip kirleticiler için oldukça etkili bir adsorbent olarak kullanılmaktadır. Antibakteriyel özelliği ve biyouyumluluk özelliği dikkate alındığında gaz transfer membranlarının yapısında kullanılarak istenmeyen biyofilm oluşumu engellenebilir.

Artan sera emisyonları nedeniyle temiz ve sera emisyonları oluşturmeyen enerji arayışı nedeniyle termoelektrik endüstrisi yükselen bir ilgiye sahiptir. Cr_2CF_2 , Mo_2CF_2 ve Ti_2CO_2 gibi yarı iletken MXene ailesinin üyeleri düşük termal iletkenlikleri MoS_2 'ye benzerdir bu sebeplerden dolayı termoelektrik alanındaki cihazlarda uygulanabileceği belirtilmiştir [59, 60, 61]. Son zamanlarda yapılan bir çalışmada -O ile yüzey sonlandırması yapılan ve kullanılan MAX fazında ki M atom numarası ile ve MXene'in pul boyutu ile artacağı belirtilmiştir. MXene, enerji ve nano ölçekli spintronik cihazların üretilmesi alanında iyi bir aday olduğu gözlemlenmiştir [16].

MXene'nin benzersiz yapısı ve ayarlanabilir yüzey gruplarının kimyasal özellikleri MXene ailesinin gaz sensörleri alanında kullanılabileceği belirlenmiştir. Yapılan bir çalışmada, Ti_2CO_2 MXene katkılı kompozit malzemelerin CO, O₂, H₂, NH₃, CO₂, CH₄ gazların gaz algılama aktiviteleri teorik olarak araştırılmıştır. Ti_2CO_2 adsorpsiyon enerjisi ve yük transferi incelendiğinde NH₃ en etkili bir şekilde adsorblandığı gözlemlenmiştir. NH₃ algılama sensörlerinde Ti_2CO_2 'in kullanılabileceği rapor edilmiştir [62]. Başka bir çalışmada, poliamid-V₂CT_x karışımı solüsyonu polar olmayan gazlara karşı yüksek hassasiyeti olduğu rapor edilmiştir [28].

MXeneler'in iyi hidrofiliklik tanıma özelliği sebebiyle birçok alanda kullanılabilecek sensör bazlı cihazların geliştirilmesinde uygun bir malzeme olduğu kabul görülmektedir. MXene katkılı kompozitler taşınabilir sensörlerde uygulanmasına olanak sağlayacak mekanik esnekliğe ve mekanik dayanıma sahiptir [63-64]. MXeneler dokunsal sensörleri bilgisayar donanımlarındaki kullanılan parçalarda, güvenlik sistemlerindeki dokunmatik cihazlar gibi birçok alanda kullanılabilmektedir [28].

MXeneler iyi bir hidrofilik performansa sahiptirler. Bu durum MXene'lerin yüzeyinde hidrofilikliği sağlayan ayarlanabilir fonksiyonel gruplar ile kazandırılmıştır. Yapılan bir çalışmada farklı türlerdeki MXeneler'in temas açısı değerleri ölçülmüş ve sonuçları sırasıyla Ti_2C 32°, Ta_4C_3 41° ve Ti_3C_2 34° olduğu belirtilmiştir. Bu hidrofilik davranışı ile enerji depolama, pil ve cihazlarda uygulanabilir özelliktedir. Ayrıca yüksek hidrofiliklik su içerisinde iyi bir şekilde dağılmasını sağlar ve DMF(Dimetilformamid) gibi polar çözeltilerde kolay disperse edildiğinde membran uygulama alanlarında iyi bir ara yüzey olarak kullanılabileceği gözlemlenmiştir [7, 65].

MXeneler'in katmanları arasında van der Waals (vdW) kuvvetleri bulunur. Bu hetero yapısı fotokataliz için önemli bir özelliktir [66, 67]. Hetero yapıları hidrojen çevirimi reaksiyonlarını (HER), N_2 indirgeme reaksiyonlarını (NRR) ve fotokatalitik reaksiyonlarını etkilediği belirtilmiştir [16].

MXene'ler açık hava şartlarında ve su ortamında yüzeyindeki, ara yüzeylerindeki iletkenliği azalır ve reaksiyon pasifleşmesi artabileceği belirtilmiştir. Bu durum uzun kullanım süresine sahip bazı alanlardaki kullanımına engel olmaktadır [68, 69]. MXene'lerin yüksek sıcaklık nem ve oksidasyona maruz kaldıklarında stabilitelerinde birtakım bozulmaların oluşabileceği gözlemlenmiştir [43, 69]. Örneğin; uzun bir oksidasyon sonrası MXene TiO_2 'ye dönüşecektir [69]. MXene 70 saat açık havaya maruz kaldığında ilk iletkenlik değerinde 1/5 lik bir azalmanın olduğu belirtilmiştir [43]. Yapılan araştırmalar sonrasında daha az yüzey kusurlarına sahip ve daha büyük bir yüzey alanına sahip MXene sentezlemek bu ortamlardaki kararlılığını arttırabileceği gözlemlenmiştir [43]. MXeneler'in stabilitelerini etkileyebilecek faktörler; sentez koşulları, yüzey sonlandırma gruplarının varlığı ve türleri, tabakaların kalitesi ve pul pul dökülme derecesi stabilitelerini belirleyen temel faktörlerdir [26, 44]. MXeneler oksijensiz ve karanlık şartlar altında saklanması MXene'nin stabilitesini arttırmaya ve daha uzun süre bozunmadan kalabileceğini belirlenmiştir [26, 44].

Metalik iyonların kolayca adsorpsiyonu, interkalasyon kimyası, depolama kapasitesi ve çalışma potansiyeli yüzeyde bulunan fonksiyonel grupların olması ile ilişkilendirilmiştir [70]. Genel olarak yüzey guruplarının varlıkları, özellikle -OH ve -F yüzey grupları difüzyon bariyerini arttırdığı gözlemlenmiştir [71]. Yapılan bir çalışmada kullanılan Ti_3C_2Tx MXenede bulunan -OH gruplarının yüzeyinden giderilmesiyle Li-iyon kapasitesi neredeyse beş katlık bir artışa neden olduğu gözlemlenmiştir [71]. MXeneler'in K^+ , Na^+ , Mg^{2+} ve Al^{3+} gibi metalik iyonlarla birlikte kullanılabilirler [72, 83]. Son dönemlerde kullanılan elektrokimyasal depolama cihazları olan süper kapasitörler, küçük miktarda enerjiyi etkin bir şekilde depolayabilmektedir. Süper kapasitörler üretimi için MXeneler ve bunların kompozitleri elektrotlarda kullanılması enerjiyi verimli bir şekilde depolamasına olanak sağladığı gözlemlenmiştir [74]. Yalpan bir çalışmada çok katmanlı Ti_3C_2Tx , ve ticari olarak kullanılan aktifleştirilmiş grafenle kıyaslanmıştır. Sonuç olarak; sırasıyla 180 ve 200-350 F/ cm^3 hemen hemen benzer bir performans göstermiştir. İnterkalasyon işlemi KOH ile yapılan Ti_3C_2Tx 'de 340 F/ cm^3 performans göstermiştir. Asidik çözeltilere maruz bırakıldığında, Ti_3C_2Tx filmi 10.000 kez deviri ile kullanıldıktan sonra herhangi bir bozulma olmadan etkin hacimsel kapasitans özellik (2 mVs⁻¹ hızında 900 F cm^{-3}) sergilemiştir [75, 76].

3. MXENE'LERİN ÇEVRESEL UYGULAMALARINDAKİ YERİ

3.1. Adsorpsiyon

Adsorpsiyon ekonomik olarak basitliği, yüksek giderim verimliliği ve daha az yan ürün miktarı ile organik veya organik olmayan kirleticilerde geniş çalışma aralığı sayesinde ön plana çıkmaktadır [77, 78, 79]. MXene 2D nanomalzemeleri büyük yüzey alanları etkin hidrofilik davranışları nedeniyle kirleticilerin su ortamından uzaklaştırmak için adsorpsiyon mekanizmasına uygun olduğundan sıkça kullanılmıştır. Adsorbent olarak MXene kullanımı farklı su parametrelerinde pH, doğal organik madde, sıcaklık vb. parametreler MXene performansı üzerinde etkiye sahiptir. MXenel'er yüzey gruplarında bulunan -O, -OH, -F gibi anyon yüzey grupları sayesinde ağır metaller gibi katyonik kirleticilerin su ortamından giderilmesine olanak sağlar, radyonüklidler, inorganik ve tipik organik kirleticilerin gideriminde kullanılabilirler[16].

Adsorpsiyon mekanizmasında MXeneler'in yüzeyinde bulunan yüzey yüklerinden dolayı kirleticileri adsorbe edebilmesini kolaylaştırmaktadır [80]. Sentez kısmında da bahsedildiği gibi yüzey sonlandırma işlemi MXeneler'in yüzeyinde sudaki zıt yüklü kirleticilerle etkileşime girebilecek çeşitli fonksiyonel gruplar oluşturur [81]. Islak aşındırma olarak bilinen HF gibi asitlerle sentezleme işlemine bağlı olarak zengin florlu ortamdan kaynaklı -F gruplarına ilaveten -OH, -O, -Cl fonksiyonel grupları bolca bulunur. Bu durum MXene'leri negatif yüke sahip hale getirir buda katyonik kirleticiler için elektrostatik çekim ile adsorpsiyonu kolaylaştırır [82]. Boyalar birçok endüstriyel üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır birçok sağlık ve çevre ekosistemine zarar vermiştir [83]. Yapılan çalışmalarda potansiyel olarak kullanılacak adsorbent ve fotokatalitik reaksiyonlarda kullanılacak bir malzeme olan MXene incelenmiştir. Yapılan çalışmada $Ti_3C_2T_x$ 'in Metilen mavisi (MB) ile adsorpsiyonu araştırılmış ve 38.851 mg/g gibi bir adsorpsiyon kapasitesi belirlenmiştir. Bu değer ticari montmorillonit killeri ile kıyaslandığında MXene'lerin daha yüksek bir adsorpsiyon kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca yapılan adsorpsiyon UV ışık altında daha yüksek değerlere ulaştığı belirtilmiştir. Metilen mavisi 5 saat UV ışık altında %81'lik bir giderime ulaştığı UV ışık olmadan daha az bir giderim verimliliği göstermiştir [69]. Tablo 3.1'de bazı kirleticilerin MXene ile adsorpsiyon kapasiteleri ve mekanizmaları verilmiştir.

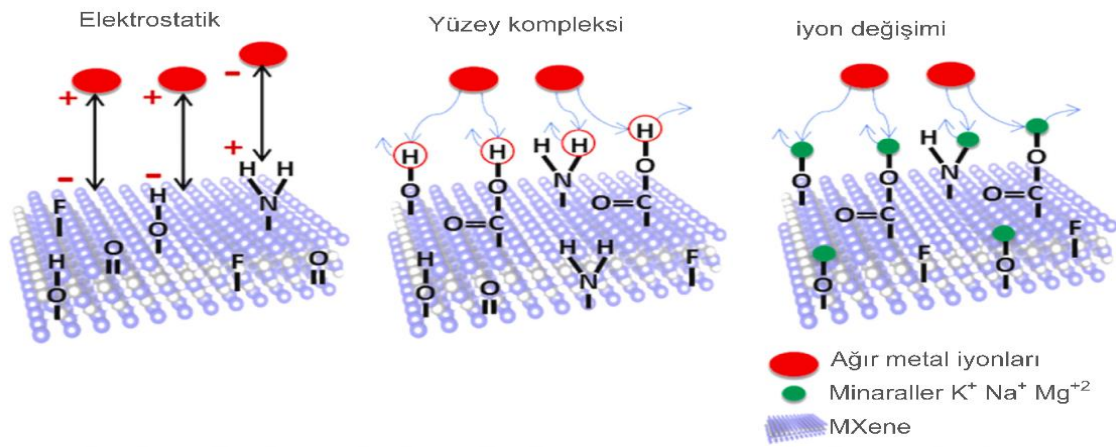
Tablo 3.1. MXene’lerin adsorpsiyon kapasiteleri [16].

MALZEME	KİRLETİCİ	Q _{MAKS} MG/G	MEKANİZMA
Ti ₃ C ₂ T _x	Metilen Mavisi (MB)	38.851	Elektrostatik etkileşim
V ₂ CT _x	U(IV)	174	Heterojen adsorpsiyon bölgeleri (-OH, -O, -F), iyon değişim mekanizması
Ti ₃ C ₂ T _x	Cu ²⁺	78.45	-O, -OH, -F, katyonik metal iyonlarını ve yüzeydeki negatif yüklü uç gruplar arasındaki iyon değişim reaksiyonunu yakalamak için etkili yerlerdir.
Ti ₂ CT _x	U (IV)	470	MXene'nin yüzeyi, uranil ve diğer ağır metal katyonları için güçlü bir ilgiye sahiptir.
Ti ₃ C ₂ T _x	Üre	21.7	Yüzey uç grubu -OH, O, F
Ti ₃ C ₂ T _x	Pd ²⁺	184.56	Daha geniş ara katman mesafesi ve daha büyük spesifik yüzey alanı, yüzey kimyasal adsorpsiyonu
Ti ₂ CT _x	Th(IV)	213.2	Ti – OH'nin Th(IV)'e karşı güçlü bağlanma afinitesi
Ti ₃ C ₂	Cs ⁺	25.4	Çok sayıda negatif yüzey fonksiyonel grubu ve yüzey alanı
V ₂ C	Metilen Mavisi (MB)	111.11	MB ve V ₂ CT _x arasında güçlü elektrostatik etkileşim
Ti ₃ C ₂	Ba ²⁺	180	Güçlü kompleks oluşumu, kimyasal iyon değişimi
Ti ₃ C ₂	Sr ²⁺	225	Güçlü kompleks oluşumu, kimyasal iyon değişimi
Ti ₃ C ₂	Cs ⁺	148	Elektrostatik etkileşim
Ti ₃ C ₂	Pb ²⁺	36.6	Negatif yüzey yükü
Ti ₃ C ₂ O _x	Hg ²	4806	Katalitik indirgeme ile birleştirilmiş adsorpsiyon
Ti ₃ C ₂ T _x	Amitriptilin (AMT)	58.7	Elektrostatik etkileşim ve Hidrojen bağı

MXeneler’in geniş yüzey alanı, elektron açısından zengin yüzey grupları ve farklı türde ayarlanabilir yüzey sonlandırması sayesinde karşıt yüklü yani katyonik yüklü ağır metalleri genellikle anyonik olan yüzey grupları hızlıca yakalayabilen elektrostatik ve indirgeyici özelliklere sahiptir [84]. Bu etkili özellikler MAX fazının aşındırılmasında kullanılan aşındırıcılara, aşındırma şartlarına, interkalasyon yöntemlerine ve delaminasyon gibi sentez koşullarına ek olarak sentez sonrası depolama şartları gibi birçok koşula bağlı olarak değişkenlik gösterebilir [12]. Adsorpsiyon çalışmalarında kullanılan birçok adsorbentle MXene’ler geniş yüzey alanı ve yüzeyinde bulunan –O ve –OH gruplarının varlığı ile rekabet edebilirler ve birçoğundan üstün bir adsorpsiyon kapasitesi gösterebilir. MXene yüzeyinde mevcut bulunan çeşitli kimyasal özelliklere sahip fonksiyonel grupların varlığı ağır metaller ile yüzey kompleksleşmesi ve iyon transferi dışında belirli metal grupları için indirgeyici bir özellik gösterir [81, 85]. Ağır metallerin adsorpsiyonu esnasında çökmesi veya indirgenmesi adsorpsiyon mekanizmasına dahil edilmezler daha çok belirli koşullarda gerçekleşen adsorpsiyon şartlarına eşlik eden kimyasal reaksiyonlardır. Bu durumlara örnek verecek olursak bazik şartlarda ağır metaller ile oluşan Cu(OH)₂, Ba(OH)₂, Ni(OH)₂ gibi hidroksit kompleksleri oluşur [86].

Eşsiz birçok özelliğe sahip MXene bazlı adsorbentler çeşitli ağır metal türleri için yüksek adsorpsiyon kapasitesi oluşturmaktadır. Adsorpsiyon davranışını ve mekanizmasını çözmek,

adsorpsiyon performansını arttırarak kirleticilerin giderilmesini sağlamak için oldukça önemlidir. Adsorpsiyon mekanizması ağır metaller ile adsorbent molekülleri arasındaki ilişkiyi tanımlayan bir terimdir. Adsorpsiyon kapasitesi, adsorpsiyon izotermi, kinetikleri, termodinamiği ve seçicilik kimyasal ve fiziksel etkileşimi tanımlamak için oldukça önemlidir. Bu mekanizmalar ve sistemler kullanılan adsorbent, kirletici türü ve reaksiyonun gerçekleşeceği ortamın şartlarına bağlı olarak değişiklik gösterebilir [100]. Şekil 3.1'de gösterildiği gibi başlıca elektrostatik etkileşimler, iyon değişimi ve yüzey kompleksleşmesi dahil olmak üzere çeşitli biçimler alabilir. Ek olarak, Tablo 3.2'de katyonik ve iyonik metal türleri için MXene bazlı adsorbentler için adsorpsiyon mekanizmalarının örneklerini listelenmiştir.



Şekil 3.1. Ağır metallerin MXene yüzeyindeki etkileşimleri [86].

Tablo 3.2. Katyonik ve iyonik metal türleri için adsorpsiyon mekanizmaları [87].

Katyonik Metal Türleri	Elektrostatik etkileşim	Negatif yüklü MXene yüzeyi ile pozitif yüklü katyonik türler, örneğin Cu(II), Ba(II), Pb(II), Hg(II), Cd(II), UO_2^{2+}
Katyonik Metal Türleri	İyon değişimi	MXen yüzeyinin interkalasyonlu iyonları (örneğin Na^+ , Li^+ , H^+) ile Ba(II), Pb(II), Cu(II), Cd(II) gibi katyonik türler arasındaki iyon değişimi
Katyonik Metal Türleri	Yüzey kompleksleşmesi	MXen yüzey kısımlarının iyonları (örneğin karboksilik ($-COOH$), hidroksil ($-OH$) ve amin ($-NH_2$) fonksiyonel gruplarının) ile Cu(II), Pb(II), Hg(II), Ba(II), Sr(II) gibi katyonik türler arasındaki iyon değişimi
Katyonik Metal Türleri	Çökeltme	Bazik koşullarda metal iyonları, Cu(II) ve Ba(II) ve $Ba(OH)_2$ gibi hidroksit kompleksi çöktürmeleri oluşturur.
Katyonik Metal Türleri	Redüksiyon	<u>Cu(II)</u> , Hg(II) gibi katyonik metal türlerinin MXene indirgenmesi, Cu(II)'yi Cu(I)'ye, Hg(II)'yi Hg(I)'ye ve U(VI)'yi U(IV)'e indirgeyerek
Oksitlenmiş anyonik metal türleri	Elektrostatik etkileşim	Pozitif yüklü modifiye MXene yüzeyi ile anyonik metal türleri arasındaki elektrostatik çekim $HCrO_4^- / Cr_2O_7^{2-}$
Oksitlenmiş anyonik metal türleri	Yüzey kompleksleşmesi	OH gibi MXene bol oksijen içeren grupların $HCrO_4^-$ ve $Cr_2O_7^{2-}$ çıkarılması için Cr(III) ile kompleksleştirilmesi
Oksitlenmiş anyonik metal türleri	Redüksiyon	$Cr_2O_7^{2-}$ gibi anyonik metal türlerinin MXene indirgenmesi BrO_3^- , ReO_4^- , $Fe(CN)_6^{3-}$, MnO_4^-

Adsorbentlerin yeniden kullanımı ve rejenerasyonu düşük maliyetli ve yeniden kullanılabilir adsorbentlerin geliştirilip kullanılmasında oldukça önemli bir meseledir. MXene bazlı adsorbentlerin rejenerasyonu çeşitli baz, tuzlar ve asitler rejenerasyon solüsyonları olarak kullanılabilmektedirler. Desorpsiyon ajanlarının belirlenmesi ve seçimi ardışık olarak adsorpsiyon ve desorpsiyon döngülerinin verimliliği adsorbentlerin stabilitesi ile doğru oratılıdır. Desorpsiyon ajanları olarak genellikle HCl asit, HNO₃ asit, Ca(NO₃)₂ ve NaOH kullanılır [86]. Pb(II) iyonlarını içeren bir atık su için adsorpsiyon deneyleri yapıldıktan sonra adsorbent olarak kullanılan MXene 4 saat boyunca 1 N HCl asit çözeltisi içerisinde bekletilmiştir. Desorpsiyon işlemi yapıldıktan sonra aynı şartlar altında adsorpsiyon tekrarlanmıştır. Bu şekilde yapılan 4 döngü sonrasında %85 lik bir giderim verimliliği ile tekrar kullanılabilirliği kanıtlanmıştır [88].

HNO₃ pH değerlerini çok hızlı bir şekilde asidik değerlere çekebilme özelliğine sahiptir. Ağır metallerinin desorpsiyonu için etkili bir asidik reaktiftir [104]. Yapılan bir çalışmada MXene-alijinat kompozit adsorbentinin Pb(II) hem de Cu(II)'ye karşı desorpsiyon performansı araştırılmıştır. 10 adsorpsiyon-desorpsiyon döngüleri sonrası adsorpsiyon kapasitesi sırasıyla %8,9 ile % 5,4 lük bir azalma olduğunu göstermiştir. Bu durumda yeniden kullanılabilirlik konusunda oldukça iyi bir performansa sahip bir adsorbent olarak kullanılabilir[86].

MXene ile yapılan adsorpsiyon çalışmalarında atıksudan fosfat ve nitratın giderimi de araştırılmıştır. Fosfat giderimi için adsorbent kapasitesi yaklaşık 83 mg/g, nitrat için ise 66 mg/g olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda çalışmada Ti₃C₂T_x'in tekrar kullanılabilirliği de araştırılmıştır. NaOH kullanılarak desorpsiyon sağlanmış ve 6 döngü boyunca tekrar kullanılabilceği rapor edilmiştir [89].

Son zamanlarda yapılan çalışmalarda krom karbür, vanadyum karbür ve titanyum karbür gibi çeşitli MXene'ler, U(VI) giderimi adsorpsiyon prosesi kullanılarak geniş çapta araştırılmıştır. Bir çalışmada, U(VI) için Titanyum Karbür (Ti₃C₂T_x) MXene 470 mg/g ve vanadyum karbürün ise 174 mg/g adsorpsiyon kapasitesine sahip olduğu bildirilmiştir. İki adsorbent karşılaştırıldığında Titanyum Karbür (Ti₃C₂T_x) daha yüksek bir adsorpsiyon potansiyeline sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak elektrostatik çekim kuvvetine ve yüzey kompleksleşmesi olduğuna bağlanmıştır [18].

3.2. Fotokatalitik Reaksiyonlar

Kirleticileri su ortamından gidermek için çeşitli farklı giderim metotları geliştirmiştir. Bu metotlar arasında iyon değişimi, kimyasal çöktürme, adsorpsiyon, biyokimyasal proseler, membran sistemleri ve fizikokimyasal teknolojiler yer almaktadır. Bu yöntemler su ortamından kirleticileri giderebilirler fakat kirleticiler ikincil kirletici olarak kalmaya devam ederler. Diğer arıtma yöntemleriyle karşılaştırıldığında fotokatalitik parçalanma ile kirleticileri parçalayabilmektedir. Bu prosesi sürdürülebilir enerji kaynaklarıyla entegre edildiğinde daha etkin bir yöntem olarak ön

plana çıkmaktadır. Fotokatalitik bozunma güçlü kimyasal enerjiyle birlikte güneş enerjisi ile kirleticileri parçalayarak ikincil bir kirlilik oluşturmamaya veya çevreye daha zararsız nihai ürünlere dönüştürmek için kullanılır [1].

Fotokatalitik proseslerde temel çalışma prensibi gelen ışık emilir ve fotonların elektron enerji seviyeleri $\lambda \text{ g (nm)} = 1240/E \text{ g (eV)}$ eşiğine ulaştığında veya üzerini çıktığında elektron çiftleri sonuç olarak ışıkla uyarılır. Uyarılmış elektron çiftleri yüzeye taşınır ve sonrasında elektron donörleri ile elektron alıcıları reaksiyona girer. Bu reaksiyon kirleticiyle indirgenme ve oksidasyon(redoks) tepkimeleri yoluyla ortamda bulunan kirleticiler bozunurlar. Çoğunlukla fotokatalitik özelliğe sahip malzemeler tek başına kullanılmaz yeteri kadar verimli çalışmazlar. Bu durumdan dolayı pratik uygulama alanlarında pek fazla yer bulamazlar. Sinerjik etki sağlamak amacıyla fotokatalitik özelliklere sahip malzemelerle birlikte katalizörlerde kullanılır. Kullanılan bu katalizörlere yardımcı katalizör adı verilir. Örnek verilecek olursa TiO_2 gibi büyük bant aralığına sahip yarı iletken malzemeler sadece UV ışığa karşı duyarlıdır [1].

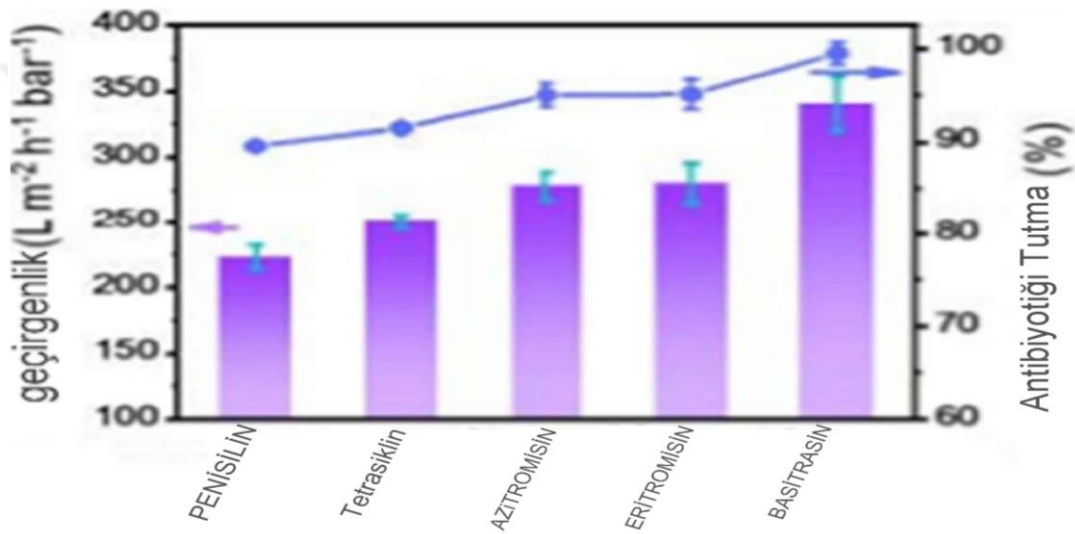
Fotokatalitik proseslerde yardımcı katalizör olarak kullanılan malzemeler genellikle değerli metallere aittir. Doğada az bulunmaları ve yüksek fiyatlar nedeniyle bu durum bir endişe yaratmaktadır. İki boyutlu geçiş metali karbürleri olarak bilinen MXene'ler yüksek elektriksel iletkenliğe, mükemmel bir ışık yakalama adsorplama ve ayarlanabilir zengin yüzey gruplarına sahiptir. Bu özelliklerinden ötürü fotokatalitik proseler de kullanılabileceği rapor edilmiştir [1]. Tablo 3.3'de MXene ve bazı kirleticilerin fotokatalitik reaksiyonları ve giderimleri verilmiştir.

Tablo 3.3. MXene ile fotokatalitik reaksiyon ile giderilen kirleticiler [1].

Malzeme	Metot	Kirletici	Kullanılan Işık	Bozunma %
1 M HCl+ TiO_2	Mikrodalga Hidrotermal	Enrofloksasin	8 saat karanlık ortamda + 5 saat UV ışık altında	%93.4
$\text{ZnCdS}+\text{TiO}_2/$ $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$	Hidrotermal	Metilen Mavisi	Görülebilir ışık	240 dakika %90
$\text{TiO}_2+ \text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$	Hidrotermal Oksidasyon- Tavlama	Bisfenol A	UV ışık	70 dakika %79.5
$\text{AgPO}_4+\text{TiO}_2/$ $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$	Kalsinasyon- Elektrostatik	Metilen Mavisi	Simüle edilmiş güneş ışığı	120 dakika %96
Grafen+ TiO_2	Tek Adımlı Kalsinasyon	Tetrasiklin	Yakın Kızıl Ötesi	150 dakika %28.63
$\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x +$ TiO_2	Hidrotermal	Metilen Turuncusu	Simüle edilmiş güneş ışığı	40 dakika %99
$\text{ZnO}+ \text{TiO}_2/$ $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$	Kimyasal Hidrotermal	Karbamazepin	Simüle edilmiş güneş ışığı	180 dakika %99.6

3.3. Membran Uygulamaları

MXeneler iyi hidrofilik özelliklerinden dolayı su ve polar olan çözücüler içerisinde iyi dağılılabilme özelliklerine sahip olduklarından dolayı 2D membranlar halinde üretilebilirler [90, 91]. Yakın zamanda yapılan bir çalışmada MAX fazı olarak Ti_3AlC_2 kullanılarak yerinde HF üretilerek LiF ve HCl kullanılarak aşındırma işlemi yapılmış interkalasyonlu veya interkalasyon yapılmaksızın Ti_3C_2Tx ile üretilen membranlar harika bir antibiyotik tutma kapasitesi göstermiş ve üstün bir su geçişi sağlamıştır. Yapılan çalışmada penisilin, tetrasiklin, eritromisin, azitromisin ve basitrasin gibi antibiyotiklerin filtrasyonu için kullanılmıştır [16]. Aşağıdaki verilen Şekil 3.2 de MXene membranının suyu geçirgenlik değerleri ve antibiyotikleri tutma yüzdeleri verilmiştir.



Şekil 3.2. MXene katkılı membranın antibiyotikleri giderme yüzdesi [16].

MXene'den oluşturulan membranların kalınlığı ve kirletici moleküllerinin büyüklüğü MXene membranların performansında büyük bir öneme sahip olduğu belirtilmiştir. Yapılan çalışmada farklı kalınlıklara sahip Ti_3C_2Tx membranların performansı üzerinde çalışılmıştır. Belirli aralıklarla membran kalınlıkları değiştirilerek antibiyotiklerin giderimi incelenmiş membran kalınlıkları arttıkça geçirgenlik azalırken antibiyotiklerin membran yüzeyinde tutunması artmıştır. Membranların dayanımı ve stabilitesi incelendiğinde 30 döngü boyunca MXene membranların antibiyotik tutma kapasitelerinde herhangi bir azalma olmadığı belirtilmiştir. Membranların antibiyotikleri tutması elektrostatik etkileşime bağlanmıştır [16].

MXeneler'in özelliklerinde de bahsedildiği gibi MXeneler antibakteriyel özelliklere sahiptirler bu sayede membranların yapısında kullanılarak biyofilm oluşumu ve membranların biyolojik olarak kirlenmesinin önüne geçilebileceği gözlemlenmiştir. Bu amaçla Ti_3C_2Tx katkılı selüloz fototermal membranlar üretilmiştir. Üretilen bu membranlar ile uzun süre boyunca atıksu

arıtımında kullanılmıştır. Membran yaklaşık olarak % 99.9 luk yüksek bir antibakteriyel özellik göstermiştir [22].

MXene katkılı veya membranların ara fazlarında kullanılmasıyla genellikle yalıtkan özelliklere sahip polimerlerde yüksek iletkenlik ve ilaveten daha yüksek hidrofiliklik gibi eşsiz özellikler katar. Bu tür özellikler sayesinde tuzlu suyun tuzluluktan arıtılması ve su saflaştırma prosesleri gibi uygulama alanlarında dikkat çeken bir malzeme olarak ön plana çıkmaktadır [92].

Yağ içeren bu atıksular insan ve çevre sağlığı için gerek kısa dönemde gerekse uzun dönemde ciddi tehlikeler yaratmaktadır. Bu yağ ve gres içeren atıksuların arıtımı için kullanılan membran proseslerin etkin bir şekilde su ve yağ gresini ayrımını yapabilmesi için süper hidrofilik membranların geliştirilmesi gerekmektedir. MXeneler yüksek hidrofilik özelliklerinden dolayı bu alanda kullanılabileceği düşünülmektedir. Yapılan bir çalışmada ultra ince bir yapıya sahip PES-MXene katkılı membran yüksek hidrofilik yüzeyi sayesinde atıksuda bulunan yağ ve gresin membran yüzeyine yapışmasını engellediğini ve yüksek yağ giderim veriminin yanına uzun süre boyunca stabil bir şekilde bu üretilen membranın kullanılabileceği belirlenmiştir [92].

Yüksek hidrofiliklik özelliğinden ve çeşitli 2D katmaları arasındaki taşıma kanallarının mevcudiyetinden dolayı elektrodializ (ED), ters osmoz (RO) ve nano filtrasyon(NF) proseslerinde tuzluluk giderme amacıyla membran alanında kullanılabileceği belirtilmiştir. Bir nano filtrasyon(NF) ile tuzluluk gidermek amacıyla yapılan bir çalışmada içi boş MXene katkılı bir membran tasarlanmıştır. Üretilen membran 5.9 L/m².sa.bar lık bir geçişe sahip %70 lik Na₂SO₄ tutma kapasitesi göstermiştir. Bu durum tuzluluk giderme proseslerinde tasarlanacak membranlarda MXene kullanılabileceğini göstermiştir [92].

Son zamanlarda solvent dehidratasyonu birçok uygulama alanında yüksek saflıkta solvenler elde etmek amacıyla önemli bir işlemdir. Bozunmamış, işlevselleştirilmiş yüzey grupları ve sahip olduğu nanokanalları sayesinde solvent dehidratasyonu alanında kullanılabileceği rapor edilmiştir [92].

Sonuç olarak MXene'in sahip olduğu pek çok özellikten dolayı yüksek hassasiyet gerektiren ayırma işlemlerinde, iyon geri kazanma, tuzluluk giderme prosesleri, nükleer kirleticiler içeren atıksuyun arıtılması, lityum giderimi, solvent dehidratasyonu ve farmasötiklerin atıksulardan giderilmesi gibi farklı alanda kullanılacak membranların yapısında kullanılabileceği belirtilmiştir [92].

3.4. Kapasitif Deiyonizasyon

Kapasitif Deiyonizasyon (CDI) basit tasarımı kolay işletme şartları ve herhangi bir kimyasala ihtiyaç duyulmayan bir arıtım yöntemidir. CDI sistemi kirleticilerden arıtmak ve konsantre saf su elde etmek amacıyla sırasıyla adsorpsiyon ve desorpsiyon adımları ile gerçekleştirir. CDI hücresindeki elektrotlara elektriksel potansiyel bir yük verildiğinde su

ortamında bulunan kirletici iyonlar elektrotun yüzeyinde toplanarak adsorplanır. Elektrotların yüzeyinde toplanan iyonlar su ortamından uzaklaştırılır ve çift katmanlı elektriksel bir tabaka oluşur. CDI düşük elektriksel potansiyelle çalıştığından dolayı düşük maliyetli bir giderim yöntemidir. Çevre dostu bir arıtım yöntemi olduğundan dolayı son zamanlarda birçok çalışmaya konu olmuş tuzluluk giderme ve su saflaştırma prosesi olarak karşımıza çıkmaktadır [93].

Son zamanlarda temiz su kaynaklarına erişimin zorlaşmasından ve mevcut tatlı sudan acı veya tuzlu su miktarının fazla olmasından dolayı su ortamından tuzluluğun giderilmesi ve ekonomik olarak daha uygun proseslerin geliştirilmesi için yapılan çalışmalar giderek artmaktadır. Su ortamından tuzluluğu gidermek için damıtma, elektrodializ ve membran filtrasyon sistemleri kullanılmaktadır [93].

Bir CDI döngüsü iki aşamadan meydana gelir, ilki iyonların yüksek adsorplama özelliğine sahip elektrot çiftlerinde akış hızının çok düşük olduğu veya tamamen durağan olan suyu arıtmak için elektriksel çekimden kaynaklı bir iyon elektrosorpsiyon aşamasıdır. Sonraki aşama tutulan iyonların serbest bırakılmasıdır, yani iyonları uzaklaştırılmış su alındıktan sonra elektrotlardan desorbe edilerek iyonların tekrar elektrotun yüzeyinden ayrılmasıdır böylelikle kullanılan elektrotlar tekrar etkin bir şekilde kullanılabilirler. Elektrotlar arasında bir potansiyel voltaj farkı uygulandıktan sonra, iyonlar elektroda doğru çekilir. Negatif elektroda katyonlar toplanırken (katot, üst tarafta bulunur), pozitif elektroda ise anyonlar toplanır (anot, alt tarafta bulunur) . Sonuç olarak, su ortamından tuzdan arındırılmış su elde edilir [93]. Kapasitif deiyonizasyonun ana işleyiş mekanizması şekil 3.3 de verilmiştir .



Şekil 3.3. Kapasitif deiyonizasyonun çalışma mekanizması [93].

CDI sistemlerinde tasarımında en önemli parametre elektrotlardır. Son zamanlarda grafen, karbo-aerogeller mezogözenekli karbonlar ve karbon nanotüpler gibi karbon içerikli elektrotlar geniş çapta uygulama alanı bulmuştur [16]. Karbon bazlı elektrotların kısıtlı iyon depolama kapasiteleri ve pozitif yüklü karbon elektrotlarda korozyon gibi etkilerden dolayı sınırlı kullanımı

gibi dezavantajları mevcuttur. Bu durum elektrotlarda kullanılacak yeni malzemeleri araştırmaya itmiştir. Klasik olarak üretilen karbon bazlı elektrotların dışında iyonları iyon interkalasyonu ve redoks reaksiyonları ile depolayabilen elektrotlara Faradaik elektrotlar denmektedir [94]. 2014 yılında yapılan bir çalışmada, Faradaik elektrotların karbon bazlı elektrotlara göre %50 den daha yüksek bir verimde tuzluluktan giderim verimi sağladığı gözlemlenmiştir [95]. MXenelerde bulunan yüksek iletkenlik, geniş yüzey alanı ve katmanları arasında bulunan boşluk miktarı fazla olduğundan dolayı ayrıca karbon bazlı elektrotlara göre daha stabil bir şekilde tekrar kullanılabilirlik gibi birçok avantaja sahip olduğundan dolayı CDI proseslerindeki elektrotların yapısında kullanılabileceği belirtilmiştir. MXeneler kapasitif deiyonizasyon da kullanılacak elektrotların yapısında kullanıldığında klasik karbon bazlı elektrotlara göre daha fazla psödokapasitif deiyonizasyon ve daha fazla tuzluluktan giderim verimi elde edilebileceği düşünülmektedir [16].

2016 yılında yapılan bir çalışmada yüksek verimlilikte tuzluluktan arındırma ya ulaşmak için CDI elektrotlarında Ti_3C_2 kullanılmıştır adsorpsiyon desorb-psiyeon davranışları incelendiğinde Ti_3C_2 MXene'nin kapasitans değerinin 132 F/g olduğu tespit edilmiştir [96]. HF tehlikeli ve sağlığa zararlı bir aşındırıcıdır yapılan bir başka çalışmada HF ile aşındırmanın yerine NH_4HF_2 kullanılarak Ti_3C_2 sentezlenmiştir. NH_4HF_2 kullanılarak sentezlenen Ti_3C_2 'nin tuzluluktan giderme verimi HF ile aşındırılmış Ti_3C_2 'ye göre %35 daha yüksek bir değere sahip olduğu belirtilmiştir [16].

Elektrotların stabilitesi ve tekrar kullanılabilirliği CDI uygulamalarında önemli bir parametredir. Yapılan çalışmalarda NH_4HF_2 ile aşındırılarak sentezlenen Ti_3C_2 MXene elektrotların 200 şarj/deşarj döngüsünden sonra bile etkin bir kapasitans olarak performans gösterdiği rapor edilmiştir [16].

4. TEZ ÇALIŞMASININ AMACI

Son yıllarda su ve atıksudaki kirleticilerin giderimi ve gaz ayırma proseslerinde kullanılmaya başlayan sıradışı fizikokimyasal özellikleri ile dikkati çeken 2D malzemeler ön plana çıkmıştır. Bu 2D malzemelerden biri olan MXene ticari olarak temini zor ve maliyetli olduğundan MXene ($Ti_3C_2T_x$) üretimini Max fazından (Ti_3AlC_2) laboratuvar ortamında sağlanması planlandı. MAX fazı bir aşındırıcı yardımıyla yapısında bulunan Erken geçiş metali olan Al atomlarını uzaklaştırarak MXene yapısını oluşturur.



Reaksiyonun gerçekleştiği şartlar yani sentez koşulları üretilen MXene'in birçok kimyasal ve morfolojik yapısını etkileyeceğinden farklı sentez şartları altında MXene'nin sentezlenmesi ve karakterizasyonun yapılması gerekmektedir [5]. Bu nedenle yapılan bu tez çalışmasında sentez şartlarını optimize etmek ve malzemenin karakterizasyon sonuçları ile üretilen MXene'lerin farklı kullanılabilir proselerdeki kullanılabilirliğini belirlemek amaçlanmıştır.

MXene'in ($Ti_3C_2T_x$) ham maddesi olan MAX fazından (Ti_3AlC_2) doğrudan HF ve yeterli kadar HF üreterek daha az toksik etkiye sahip olan bir başka prosedür olan LiF+HCl ile aşındırma çözeltileri ile süre, sıcaklık ve aşındırma çözeltisi konsantrasyonlarının etkisinin senteze ve özelliklerine olan etkisinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Doğrudan HF ile 36 farklı şartta, LiF+HCl ile 4 farklı şartta numune sentezlenmiş ve sentezlenen numuneler karakterize edilerek optimum sentez şartları belirlenmesi hedeflenmiştir.

Karakterizasyon için MAX fazından Al atomlarının giderildiğini tespit etmek amacıyla X-IŞINI DİFRAKTOMETRESİ (XRD), yüzey gruplarının belirlenmesi amacıyla X-Ray fotoelektron Spektroskopisi (XPS), aşındırma işlemi sonrası oluşan akordiyonik yapının gözlemlenmesi ve yapısında bulunan elementlerin belirlenmesi amacıyla Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM-EDS) görüntüleri, hidrofiliklik derecesinin belirlenmesi amacıyla temas açısı ve termal kararlılığının tespit edilmesi için Termogravimetrik Analiz (TGA) analizleri yapılmıştır.

5. MATERYAL VE METOT

Yapılan çalışmalarda MAX fazı olarak Ti_3AlC_2 kullanılarak aşındırma işlemi HF ile doğrudan aşındırma ve $LiF+HCl \rightarrow HF$ reaksiyonu ile yerinde HF üretimi ile yapılmıştır. Farklı şartlar altında (sıcaklık, aşındırma çözeltisi konsantrasyonu ve zaman) sentezleme yapılarak en optimum şartlar belirlenmesi amaçlanmıştır.

5.1. Kullanılan Kimyasallar

Hidroflorik asit ve HCl Merck'ten temin edilmiştir. LiF abcr, HCl Carlo Erba, etanol ISOLAB, Ti_3AlC_2 NANOĞRAFI, TBMOH (Tetra-n-butilamonyum hidroksit) ISOLAB dan satın alınmıştır. Tüm kimyasallar ve sentezlenen MXene'ler oda sıcaklığında, havasız ve ışıksız ortamda muhafaza edilmiştir. MAX fazı, kimyasallar ve hizmet alımları TÜBİTAK tarafından desteklenen 122Y006 nolu projeden sağlanan bütçe ile gerçekleştirilmiştir.

5.2. Doğrudan HF ile $Ti_3C_2T_x$ Sentezi

Öncelikle aşındırıcı olarak kullanılan % 40'lık HF (Merck), istenilen konsantrasyona seyreltilerek 28 ml HF+su çözeltisi reaksiyonun gerçekleşeceği kaba konuldu. Seyreltme oranları ve reaksiyon şartları Tablo 5.1'de gösterilmiştir. Daha sonra % 99'luk Ti_3AlC_2 (Nanografi) Max fazı hassas terazi yardımıyla 1 g tartılmış ve reaksiyonun gerçekleşeceği kaba yavaşça eklendi. İstenilen sıcaklık ve istenilen süre göz önüne alınarak numune su banyosuna konuldu.

Belirlenen süre sonrasında su banyosundan numuneler alınarak 50 ml'lik falkon tüplerine aktarıldı. Daha sonra numune falkon tüpleriyle santrifüje alınarak 4100 rpm'de 3 dk süreyle sürekli santrifüj edilerek ve her santrifüj sonrası süpernatant döküldü. Üzerine tekrar deiyonize su ilave edilerek bu işlem pH değeri nötr olana kadar devam ettirildi. Süpernatantın pH'ı değeri nötr olan numune 200 ml deiyonize su içerisinde dağıtıldıktan sonra 40 dk süreyle azot gazı altında sonikasyon uygulandı. Sonikasyon işleminden sonra numune vakumlu süzme düzeneğine alınarak ve 0.22 mikron gözenek çapına, 47 mm dış çapına sahip membran ile süzüldü.

Süzme işlemi tamamlandıktan sonra üretilen MXene spatül yardımıyla 14 ml falkon tüpüne alındı Sonrasında vakumlu etüv altında 65 °C 24 saat bekletilerek kurutulmuş ve karanlık-havasız ortamda saklanmıştır.

Tablo 5.1 de Doğrudan HF ile $Ti_3C_2T_x$ sentezinde uygulanacak şartlar verilmiştir toplamda 3 sıcaklık (20 °C, 30 °C, 40 °C) her sıcaklıkta 3 konsantrasyon (%20, %30, %40) her sıcaklık ve her konsantrasyon 12 saat, 24 saat, 48 saat ve 72 saat lik numuneler hazırlanmıştır toplamda 36 adet farklı şartlarda $Ti_3C_2T_x$ sentezlenerek optimum sentez şartları belirlenmesi amaçlanmıştır.

Tablo 5.1. Doğrudan HF ile üretilen Mxeneler ve üretim şartları ($Ti_3C_2T_x$)

Numune No	Analizdeki Karşılığı	HF Oranı (%)	Sıcaklık($^{\circ}C$)	Temas süresi (st)
1	C-1	MAX (Ti_3AlC_2)		
2	C-2	20	20	12
3	C-3	20	20	24
4	C-4	20	20	48
5	C-5	20	20	72
6	C-6	30	20	12
7	C-7	30	20	24
8	C-8	30	20	48
9	C-9	30	20	72
10	C-10	40	20	12
11	C-11	40	20	24
12	C-12	40	20	48
13	C-13	40	20	72
14	C-14	20	30	12
15	C-15	20	30	24
16	C-16	20	30	48
17	C-17	20	30	72
18	C-18	30	30	12
19	C-19	30	30	24
20	C-20	30	30	48
21	C-21	30	30	72
22	C-22	40	30	12
23	C-23	40	30	24
24	C-24	40	30	48
25	C-25	40	30	72
26	C-26	20	40	12
27	C-27	20	40	24
28	C-28	20	40	48
29	C-29	20	40	72
30	C-30	30	40	12
31	C-31	30	40	24
32	C-32	30	40	48
33	C-33	30	40	72
34	C-34	40	40	12
35	C-35	40	40	24
36	C-36	40	40	48
37	C-37	40	40	72

5.3. LiF+HCl ile $Ti_3C_2T_x$ Sentezi

Bu yöntemde doğrudan aşındırıcı olarak HF kullanmak yerine $LiF+HCl \rightarrow HF$ reaksiyonu ile yerinde HF üretilerek reaksiyon gerçekleştirilmesi amaçlandı. İlk olarak istenilen HCl (CARLO ERBA) konsantrasyonu ayarlanıp 28 ml asit çözeltisi hazırlanarak reaksiyonun gerçekleşeceği kaba eklendi. Belirlenen LiF tuzu (abcr) ve 1 gr Ti_3AlC_2 Max (Nanografi) fazı hassas terazi yardımıyla tartılarak reaksiyon kabına konulduktan sonra istenilen süre ve sıcaklıkta su banyosuna yerleştirildi. Belirlenen süre sonrasında numune 50 ml falkon tüplerine alınarak santrifüje alındı. İlk 5 dk 4100 rpm’de santrifüj yapıldıktan sonra üst sıvı boşaltılıp yerine 25 ml deiyonize su ve 25 ml etanol

(İSOLAB) ilave edildi. Sentezlenen Mxene'in santrifüjde çökmemesi sebebiyle etanol ilave edildi. Sonrasındaki santrifüjler ortalama 25 dk 4100 rpm'de yapılarak numunenin yıkanması sağlandı. Üst sıvının pH değeri nötr oluncaya kadar bu prosedür uygulanmaya devam edildi. pH değeri nötr olan numune 100 ml etanolde dağıtılarak 20 dk azot gazı altında sonikasyona tabi tutuldu. Sonikasyondan sonra numune 30 dk 4100 rpm santrifüj edilerek üst sıvısı döküldü. Son olarak sentezlenen MXene tek falkon tüpünde toplanarak sonrasında 65 °C vakumlu etüvde kurutularak etanol uzaklaştırılmıştır. Üretilen Mxene karanlık ve havasız ortamda saklanmıştır. Aşağıda verilen Tablo 5.2 de üretilen $\text{LiF}+\text{HCl} \rightarrow \text{HF}$ ile üretilen numuneler verilmiştir.

Tablo 5.2. $\text{LiF}+\text{HCl}$ ile üretilen ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$) Mxene'ler ve üretim şartları.

Numune No	Analizedeki Karşılığı	Sıcaklık	Temas Süresi (Saat)	HCl Konsantrasyonu (%)	LiF Miktarı (gr)
1	Clif-1	50	27	33.13	1.88
2	Clif-2	50	57	33.13	1.88
3	Clif-3	60	27	33.13	1.88
4	Clif-4	60	57	33.13	1.88

MAX fazından sentezlenen doğrudan HF ile ve $\text{LiF}+\text{HCl}$ ile sentezlenen $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXeneler'in karakterizasyonu için X- IŞINI DİFRAKTOMETRESİ (XRD) analizi, Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM-EDS) görüntüleri, X-Ray fotoelektron Spektroskopisi (XPS), Termogravimetrik Analiz (TGA) ve Temas Açısı analizleri yapılmıştır.

Karakterizasyon çalışmalarında 41 adet numunenin XPS, XRD analizleri, 37 adet numunenin SEM-EDS görüntüleri ve 14 adet numunenin temas açıları analizleri Erzurum Atatürk Üniversitesi DAYTAM'da (Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi), 8 adet numunenin TGA analizleri ise Adana Çukurova Üniversitesi'nde hizmet alımı şeklinde yapılmıştır.

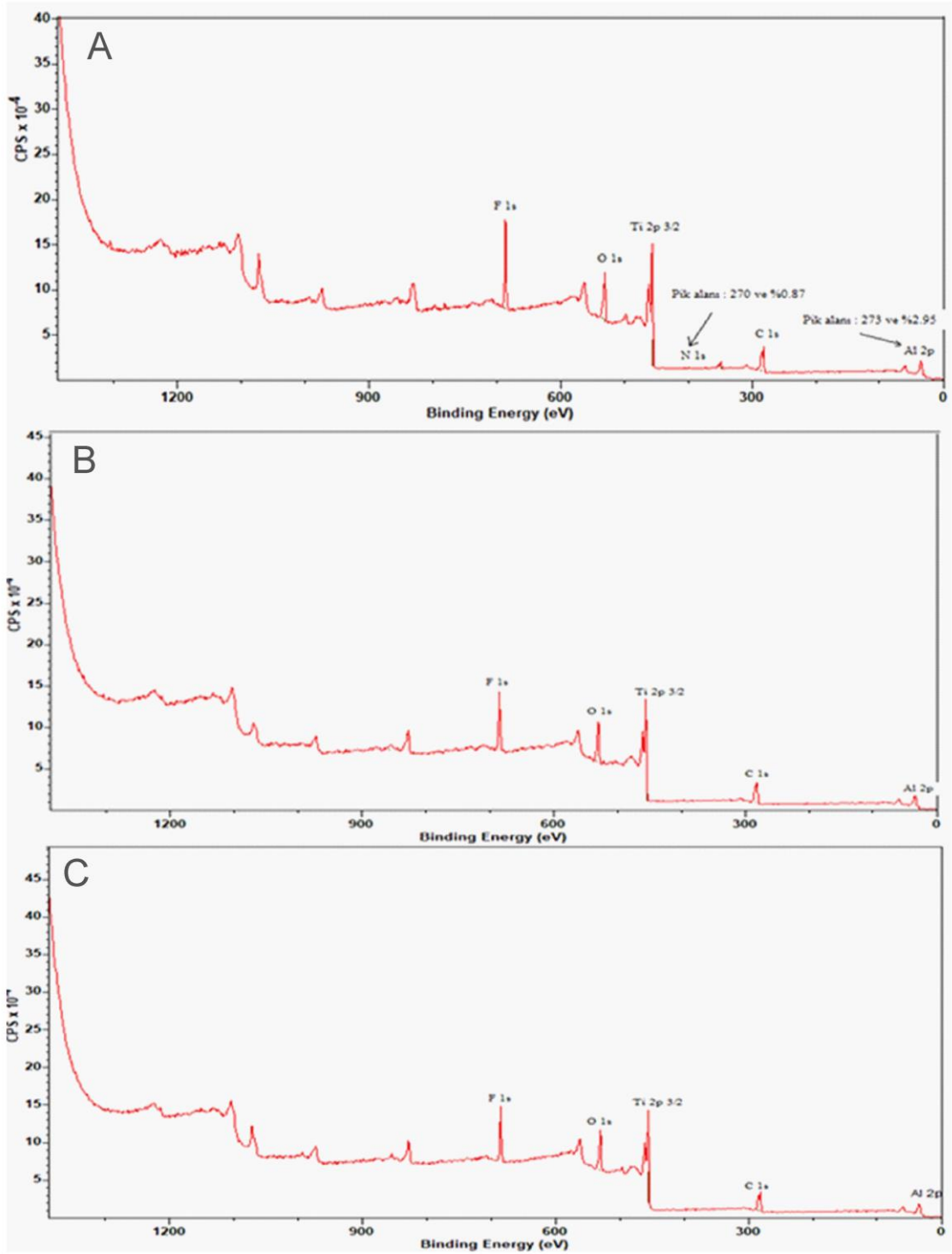
6. BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1. Doğrudan HF ile Sentezlenmiş $Ti_3C_2T_x$ 'in Karakterizasyon Çalışmaları

Doğrudan HF ile sentezlenmiş 36 adet numune ve MAX fazının karakterizasyon çalışmalarının sonuçları aşağıdaki başlıklar altında verilmiştir.

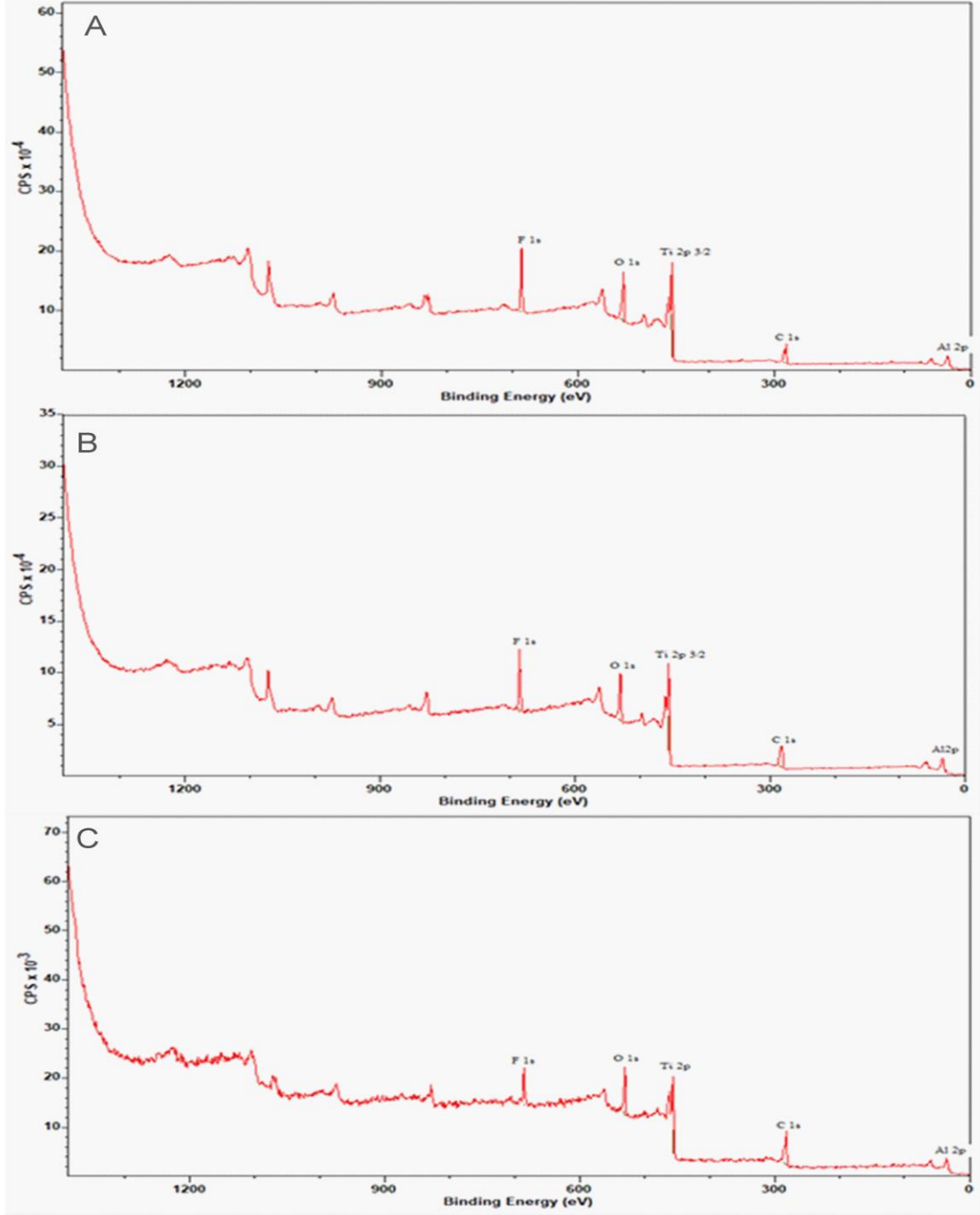
6.1.1. XPS Analizleri

MXene'nin yüzey kimyası hakkında daha fazla bilgi elde etmek için XPS analizleri yapıldı. 20 °C, 30 °C ve 40 °C sıcaklıklarında 12, 24, 48 ve 72 saatte HF'ın %20, %30 ve %40 farklı konsantrasyonlarda üretilen MXene'lerin XPS analizleri gerçekleştirildi. 24 saatte hazırlanan MXene'ler için sıcaklık ve HF konsantrasyonları kıyaslandı. Dik yönde örnek yüzeyi üzerinde kaydedilen XPS taramalarından, $Ti_3C_2T_x$ MXene'in elementel yapısında C, O, Ti ve F elementleri içermektedir. Özellikle, Ti ve C elementleri $Ti_3C_2T_x$ MXene'in ana yapısından kaynaklanmaktadır. F ve O elementleri $Ti_3C_2T_x$ 'nin yüzey gruplarından ileri gelmektedir. Üretilen $Ti_3C_2T_x$ MXene'lerde Al atomları düşük düzeyde de olsa Al 2p (74-75 eV) bağlanma enerjisinde görülmektedir. Fakat, MXene'de Al'ın düşük içeriğinden dolayı çok zayıf şiddette sinyal görülmektedir. MXene'nin XPS spektrumlarında 281.38, 284.6 ve 287.76 eV da oluşan pikler C1s bağlanma enerjisini gösterirken bu sinyallerin esasta sırasıyla T-C, C-C ve C-O den kaynaklandığı anlaşılmaktadır [99]. Şekil 6.1'de 20 °C sıcaklık ve 24 saat sabit süre altında sırasıyla %20, %30 ve %40 HF konsantrasyonları ile sentezlenen MXeneler'in XPS spektrumları verilmiştir.



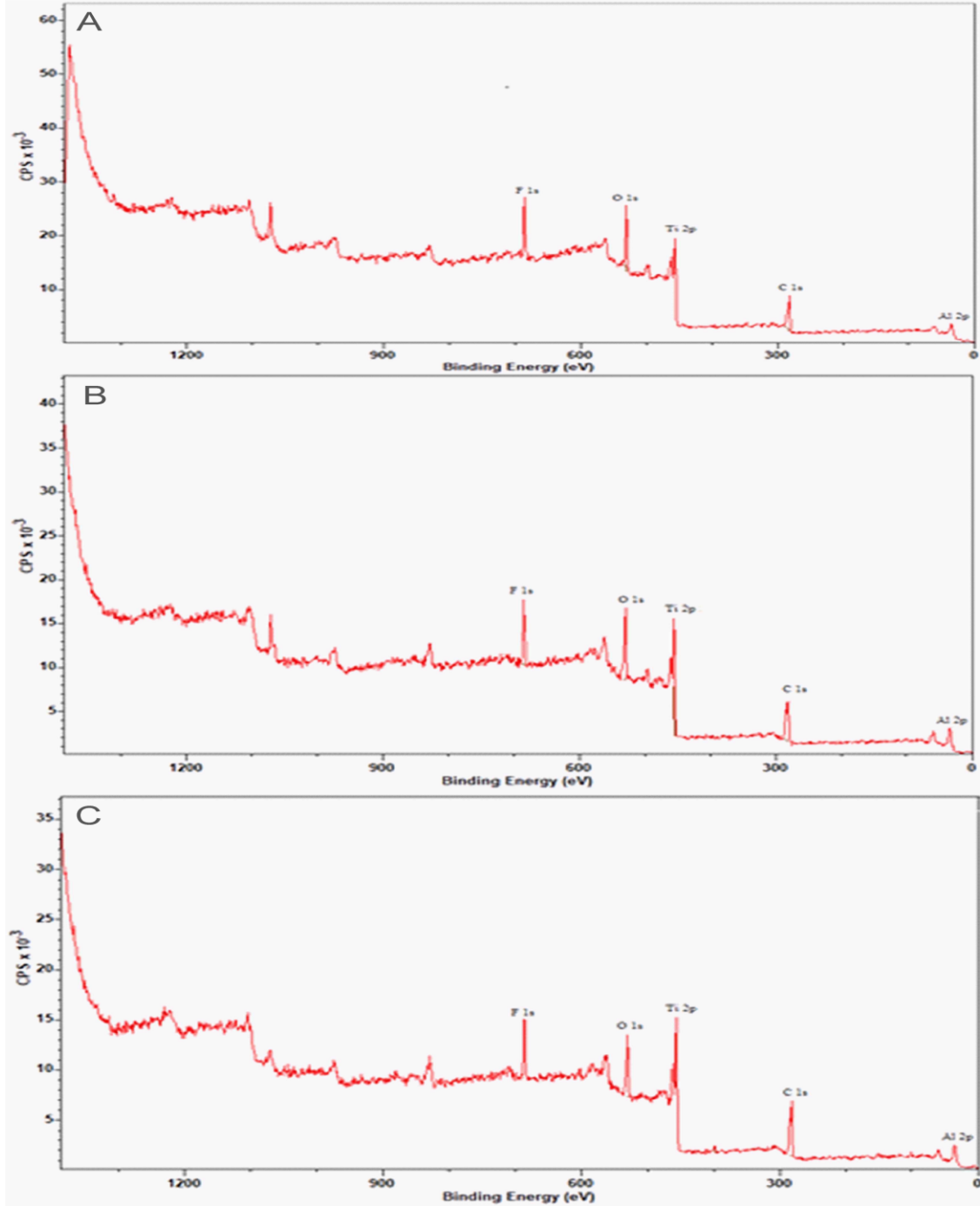
Şekil 6.1. A) 20 °C, %20 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu. B) 20 °C, %30 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu. C) 20 °C, %40 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.

Şekil 6.2’de 30 °C sıcaklık ve 24 saat sabit süre altında sırasıyla %20, %30 ve %40 HF konsantrasyonları ile sentezlenen MXeneler’in XPS spektrumları verilmiştir.



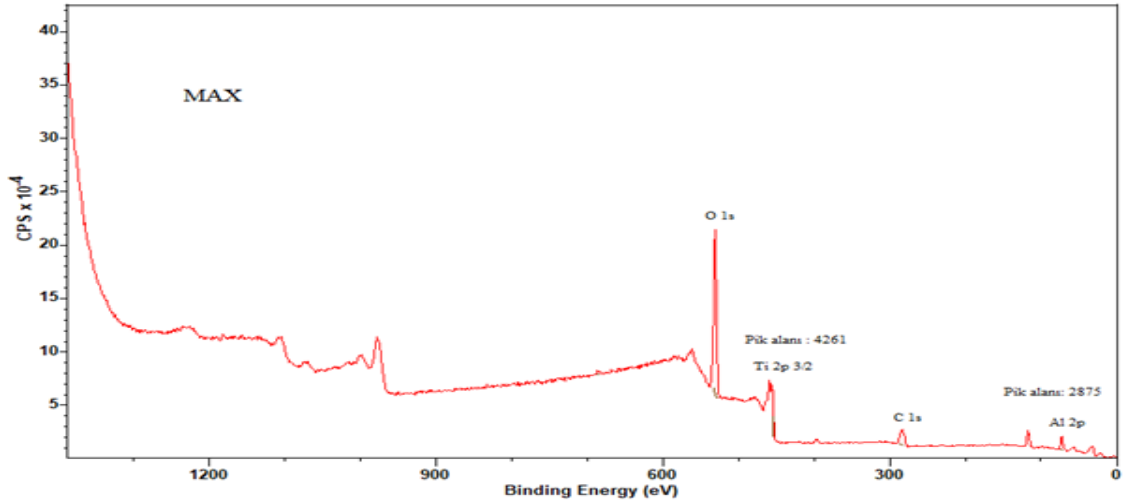
Şekil 6.2. A) 30 °C, %20 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu. B) 30 °C, %30 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu. C) 30 °C, %40 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu.

Şekil 6.3 de 40 °C sıcaklık ve 24 saat sabit süre altında sırasıyla %20, %30 ve %40 HF konsantrasyonları ile sentezlenen MXeneler'in XPS spektrumları verilmiştir.



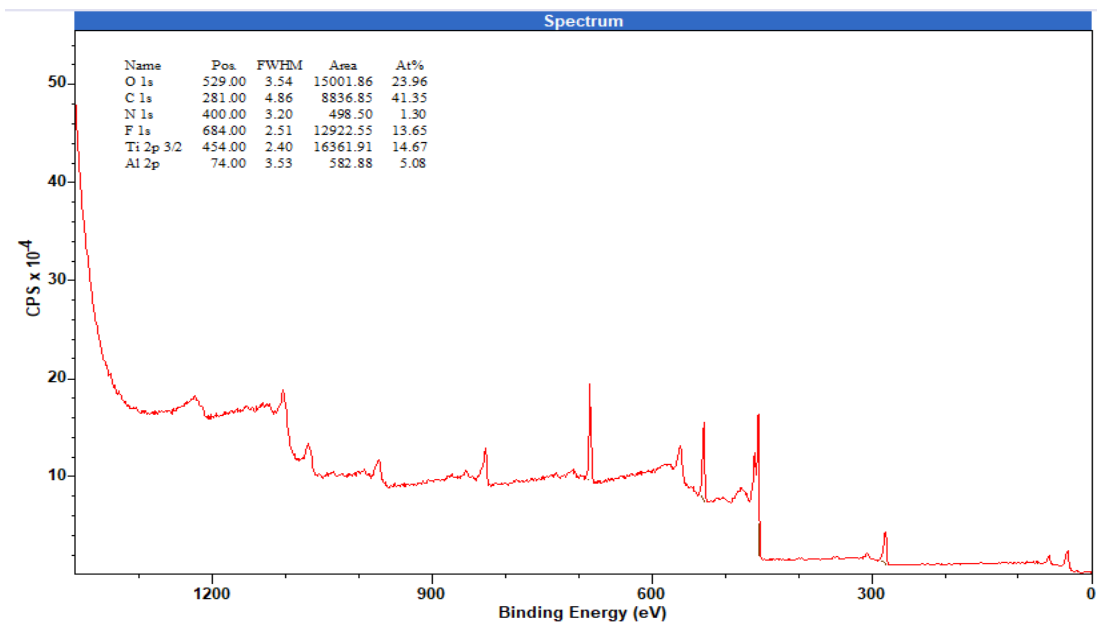
Şekil 6.3. A) 40 °C, %20 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu. B) 40 °C, %30 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu. C) 40 °C, %40 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.

MAX'ın XPS spektrumu Şekil 6.4'de gösterildi. Spektrumlarda özellikle Ti 2p'nin pik alanı 4261, Al'ın pik alanı 2874'ü gösterdi. Sentezlenen MXene'nin örneğin Şekil 6.2.B deki XPS spektrumundan Ti 2p'nin pik alanı 9851, Al atomları düşük düzeyde de olsa Al 2p (74-75 eV) bağlanma enerjisinde görülmekte olup Al 2p için bir pik alanı spektrumda verilmemiştir. Bu değerler MAX fazının MXene yapısına dönüştüğünü gösteren önemli kanıtlardandır. Bu sonuçlar üretilen MXene içeriğinde düşük düzeyde de olsa MAX fazının varlığını göstermektedir.



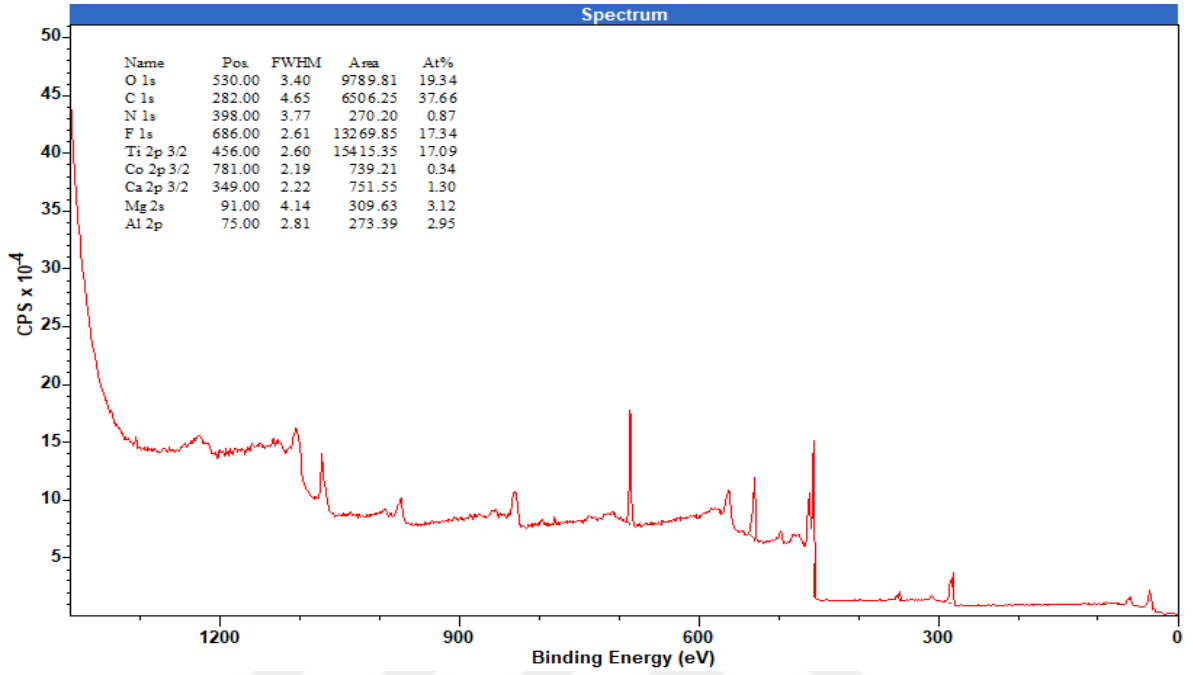
Şekil 6.4. MAX'ın (Ti_3AlC_2) XPS spektrumu.

Sentezlenen tüm MXene'ler de Al pikiinde azalma gözlemlenmiş ayrıca yüzey gruplarından dolayı F ve O grupları gözlemlendi. Şekil 6.5'de 20 °C, %20 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu verilmiştir.



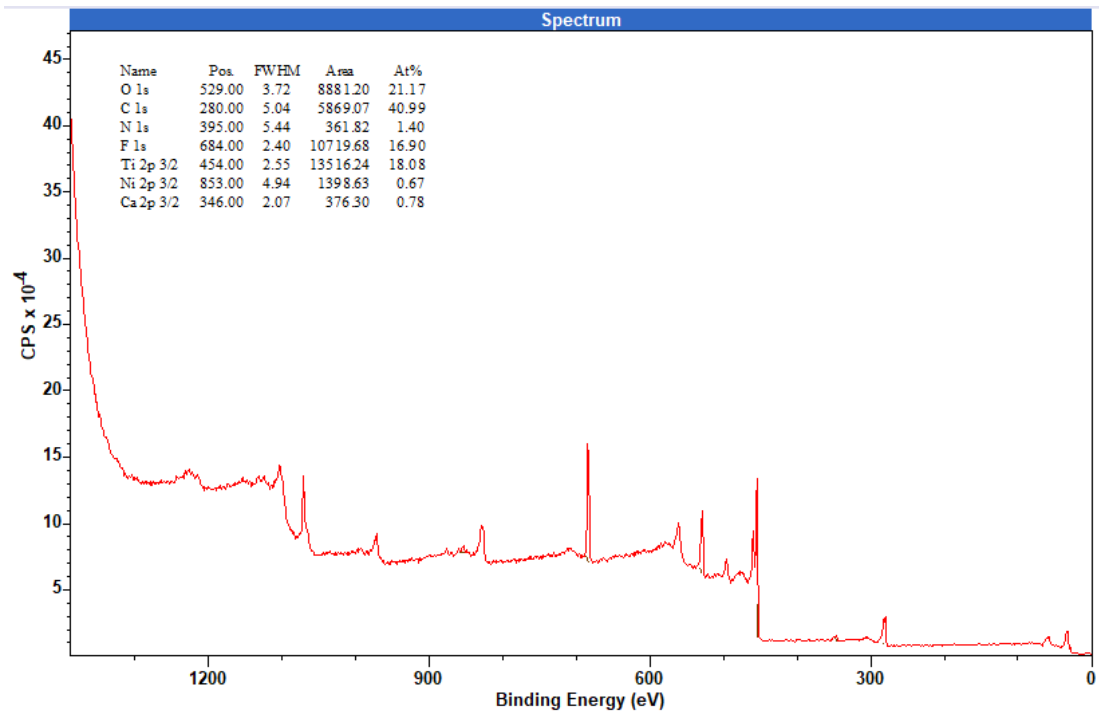
Şekil 6.5. 20 °C, %20 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.

Şekil 6.6'da 20 °C, %20 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu verilmiştir.



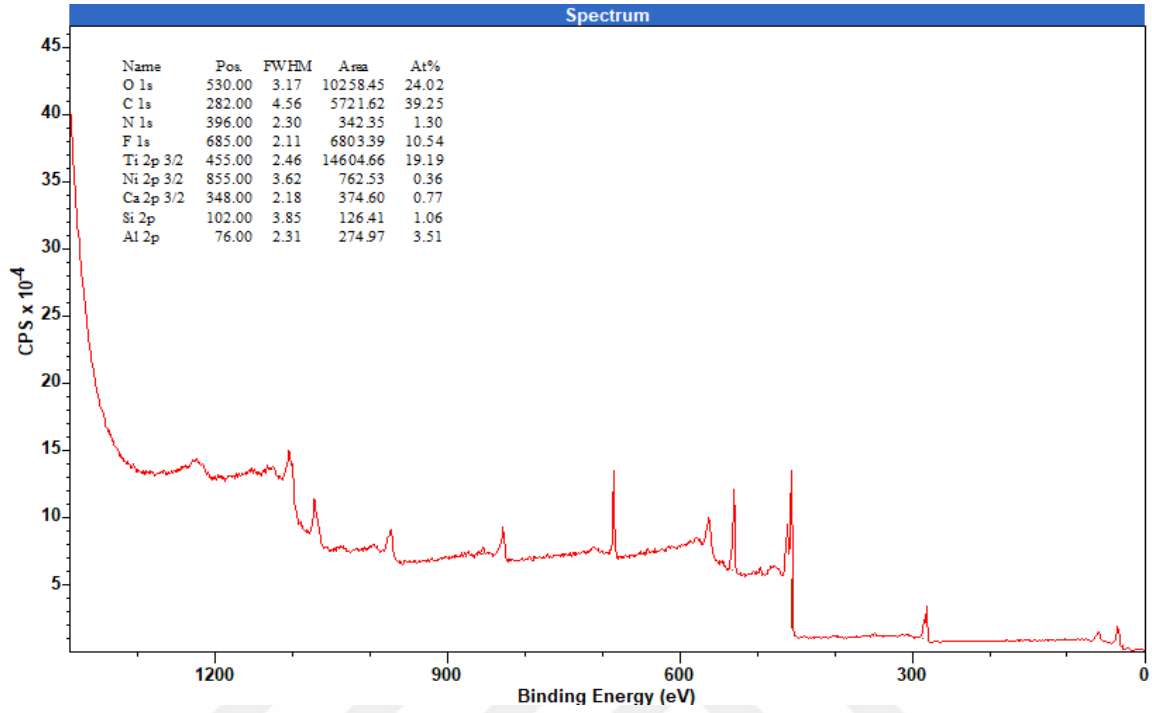
Şekil 6.6. 20 °C, %20 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.

Şekil 6.7'de 20 °C, %20 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu verilmiştir.



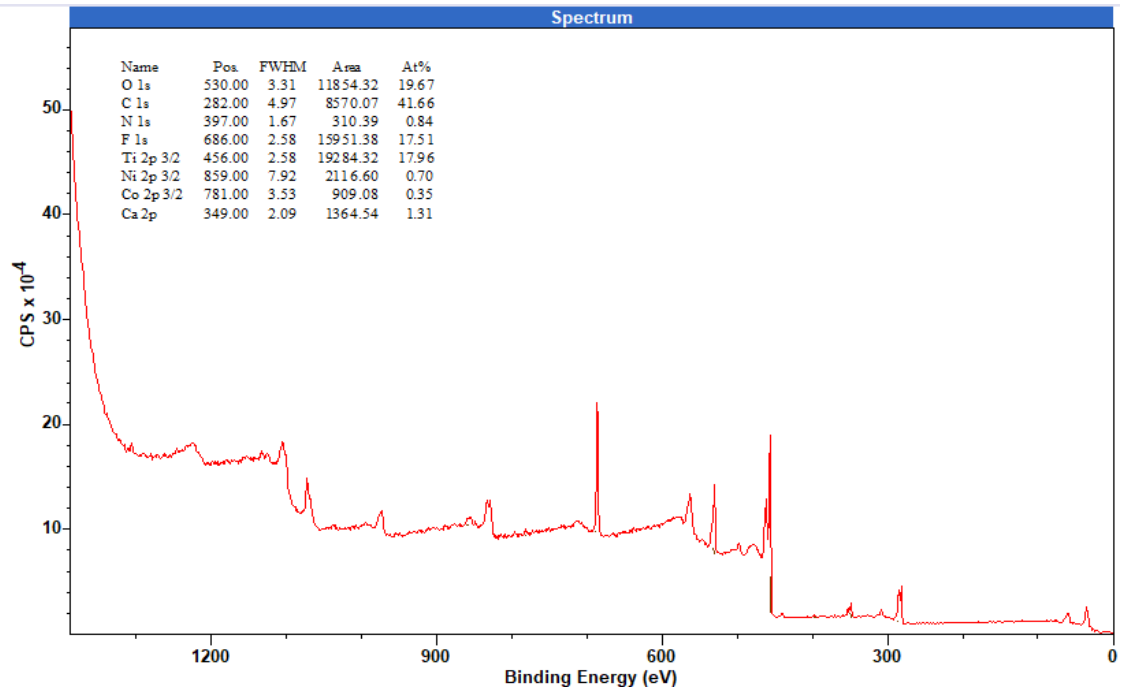
Şekil 6.7. 20 °C, %20 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.

Şekil 6.8’de 20 °C, %20 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu verilmiştir.



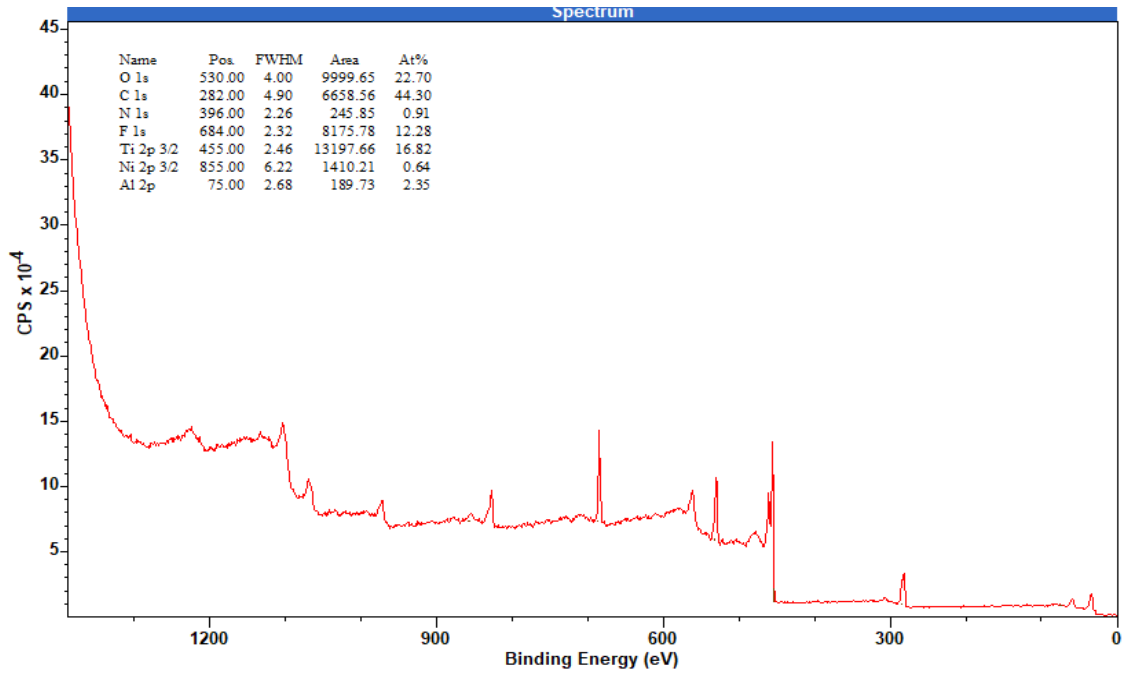
Şekil 6.8. 20 °C, %20 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu.

Şekil 6.9’da 20 °C, %30 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu verilmiştir.



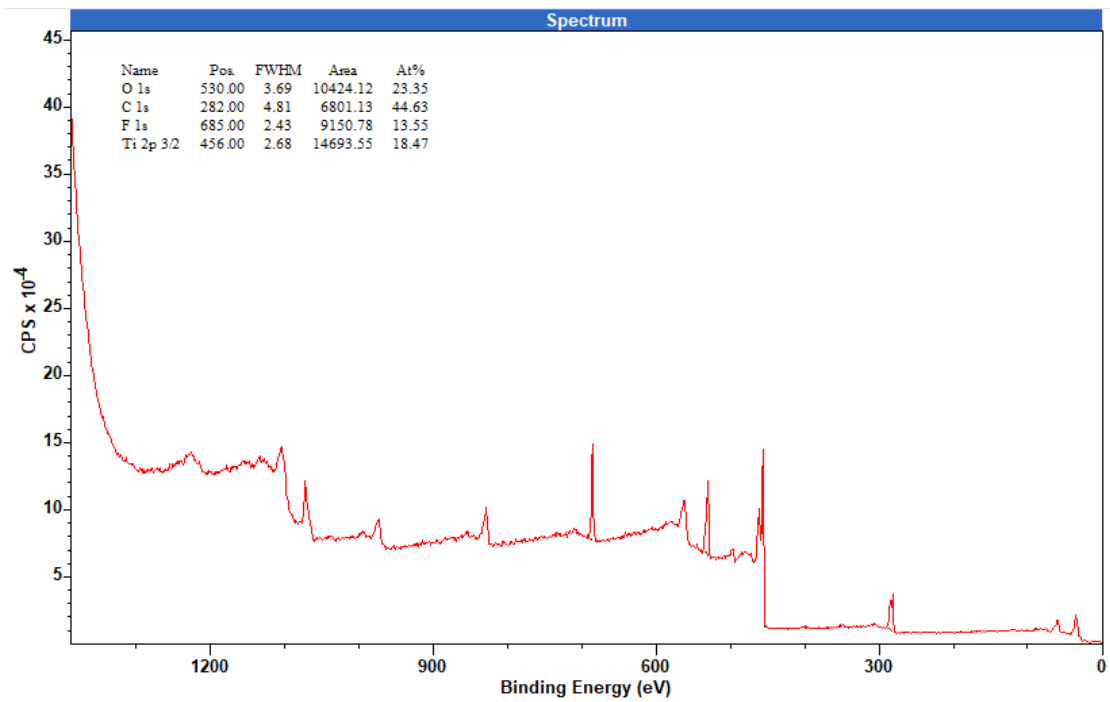
Şekil 6.9. 20 °C, %30 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu.

Şekil 6.10'da 20 °C, %30 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu verilmiştir.



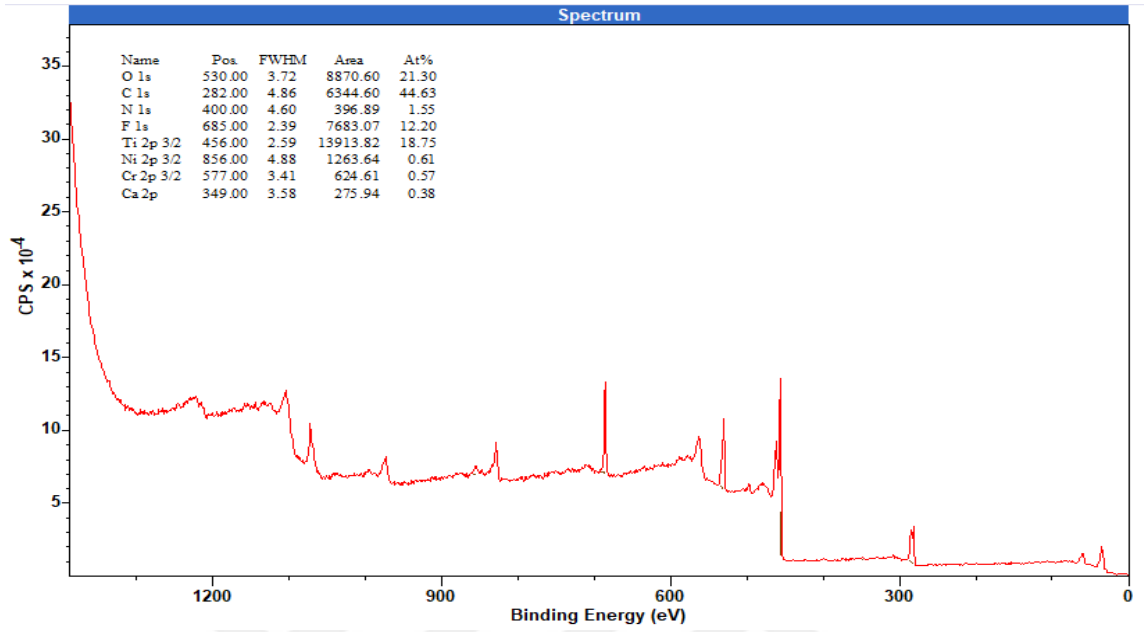
Şekil 6.10. 20 °C, %30 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.

Şekil 6.11'da 20 °C, %30 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu verilmiştir.



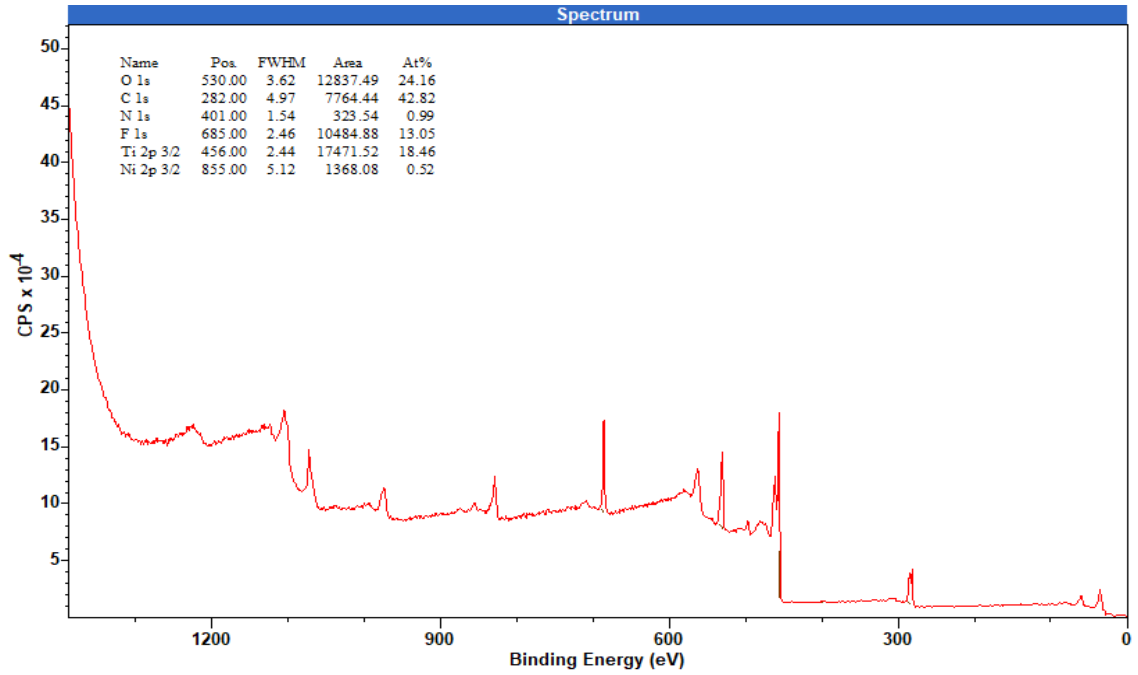
Şekil 6.11. 20 °C, %30 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.

Şekil 6.12’da 20 °C, %30 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu verilmiştir.



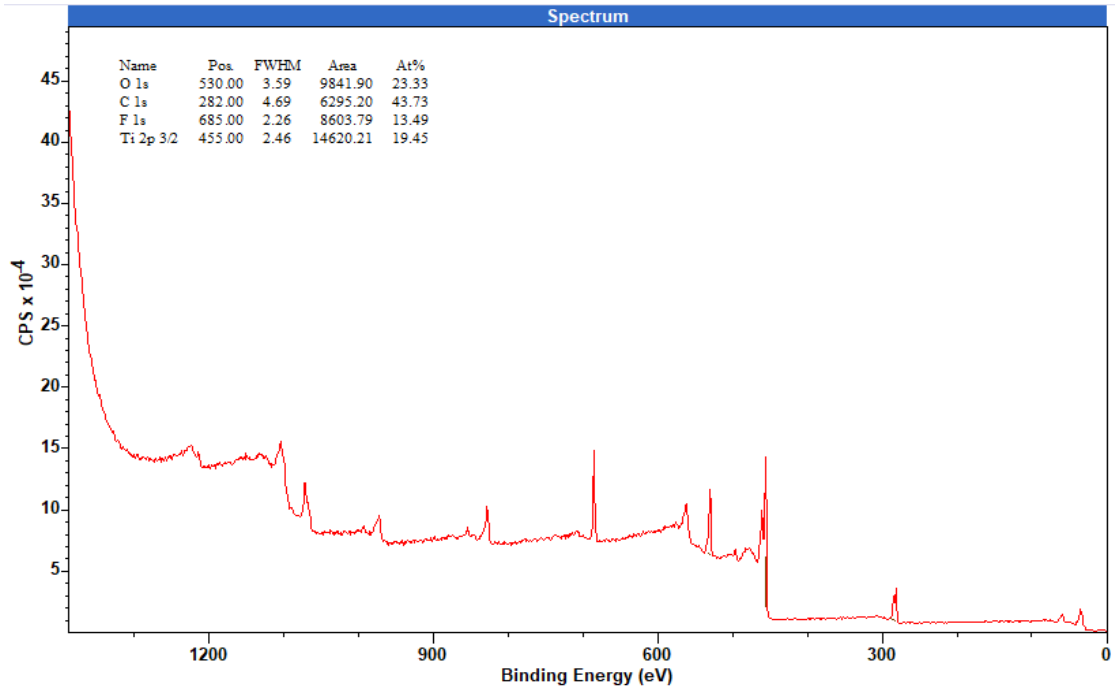
Şekil 6.12. 20 °C, %30 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu.

Şekil 6.13’te 20 °C, %40 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu verilmiştir.



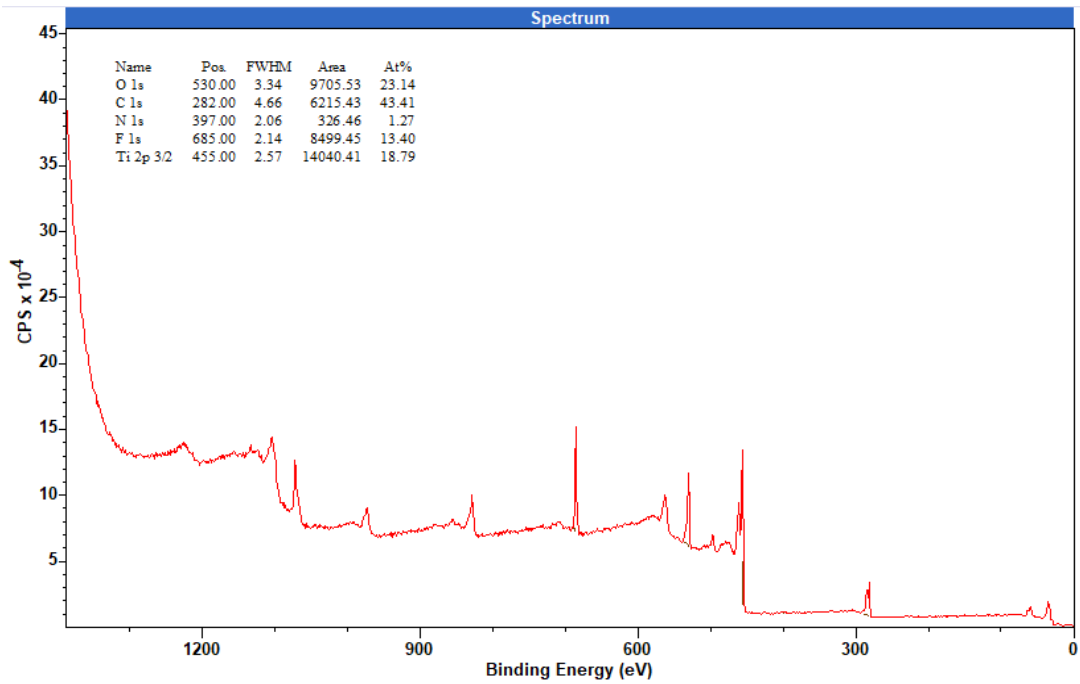
Şekil 6.13. 20 °C, %40 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu.

Şekil 6.14’de 20 °C, %40 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu verilmiştir.



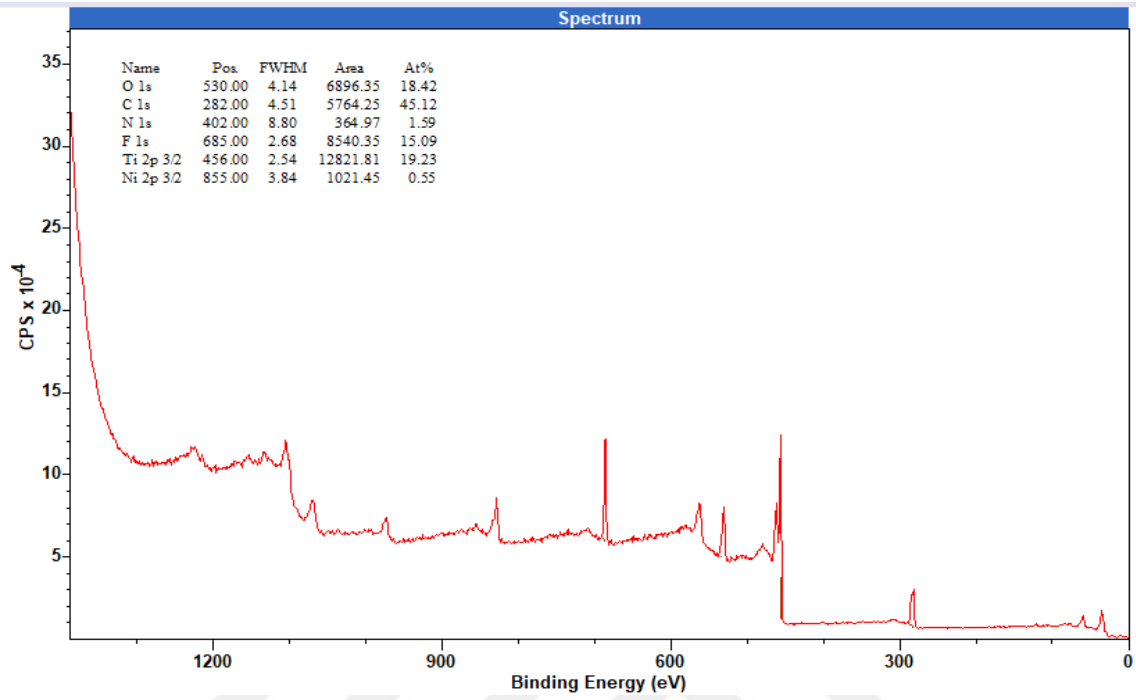
Şekil 6.14. 20 °C, %40 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu.

Şekil 6.15’de 20 °C, %40 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu verilmiştir.



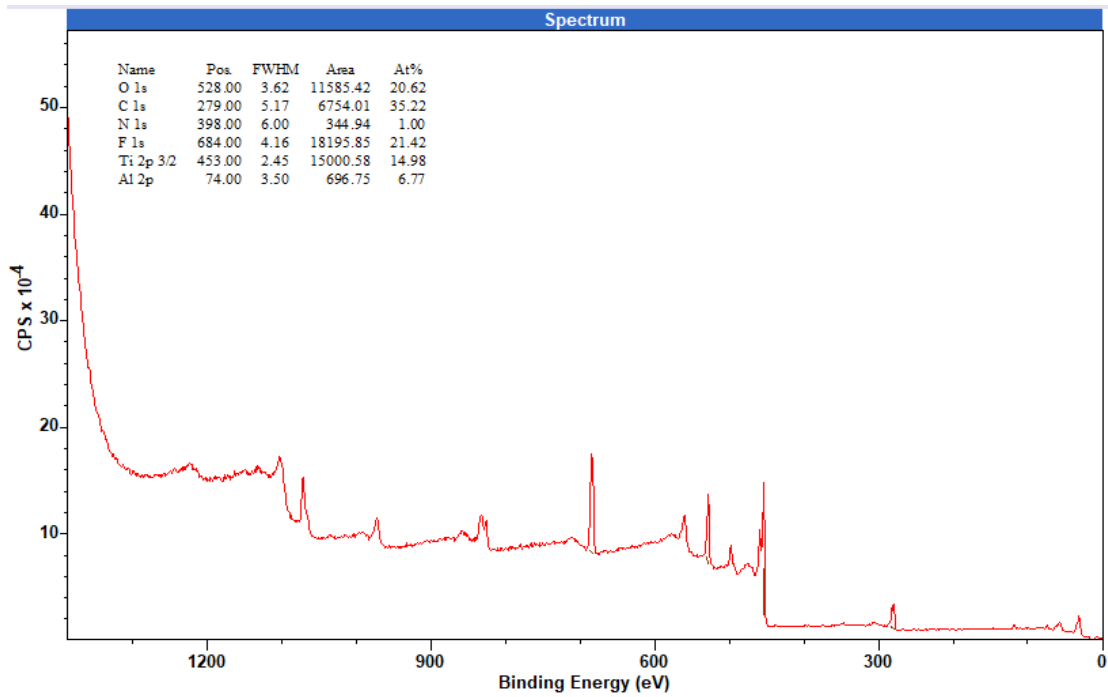
Şekil 6.15. 20 °C, %40 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu.

Şekil 6.16'de 20 °C, %40 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu verilmiştir.



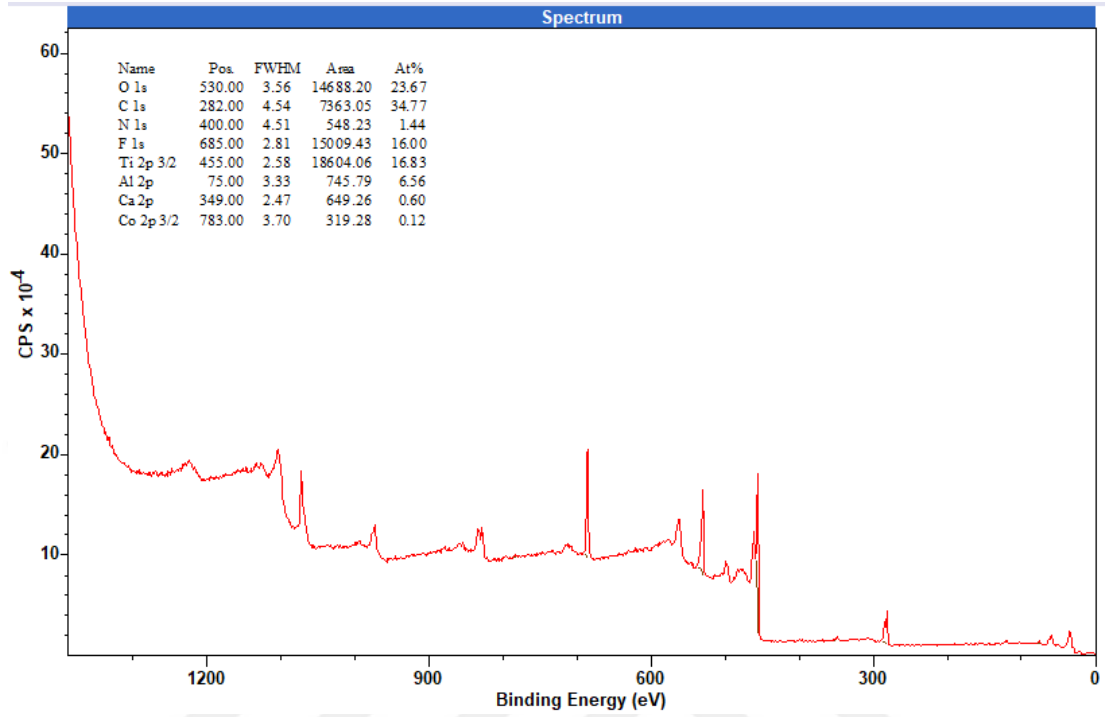
Şekil 6.16. 20 °C, %40 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.

Şekil 6.17'de 30 °C, %20 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu verilmiştir.



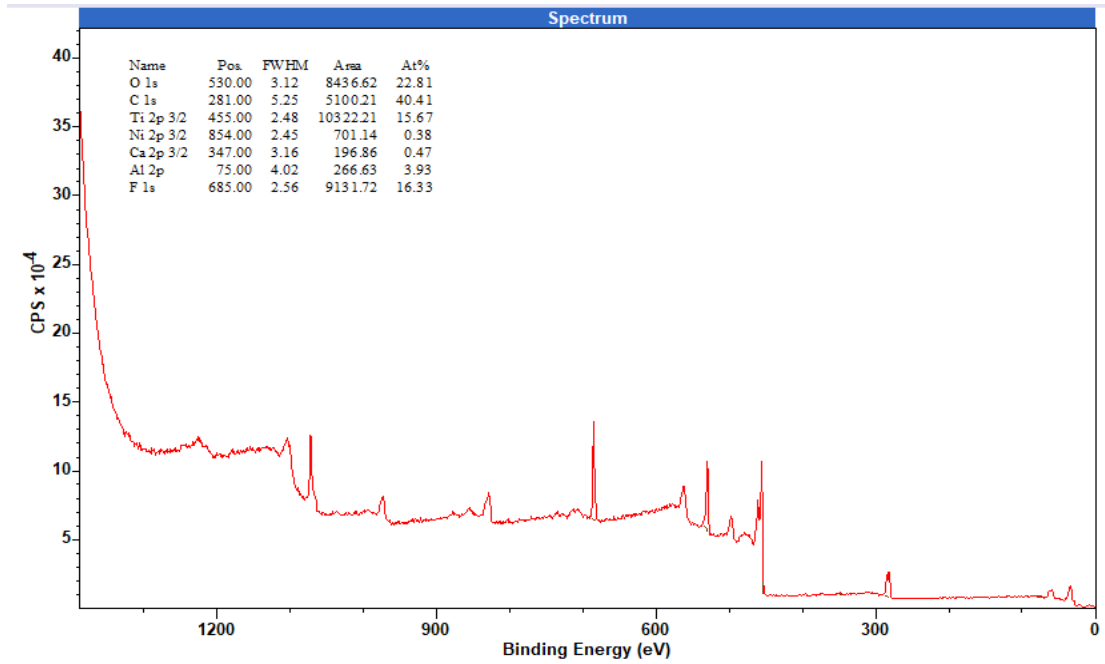
Şekil 6.17. 30 °C, %20 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.

Şekil 6.18’de 30 °C, %20 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu verilmiştir.



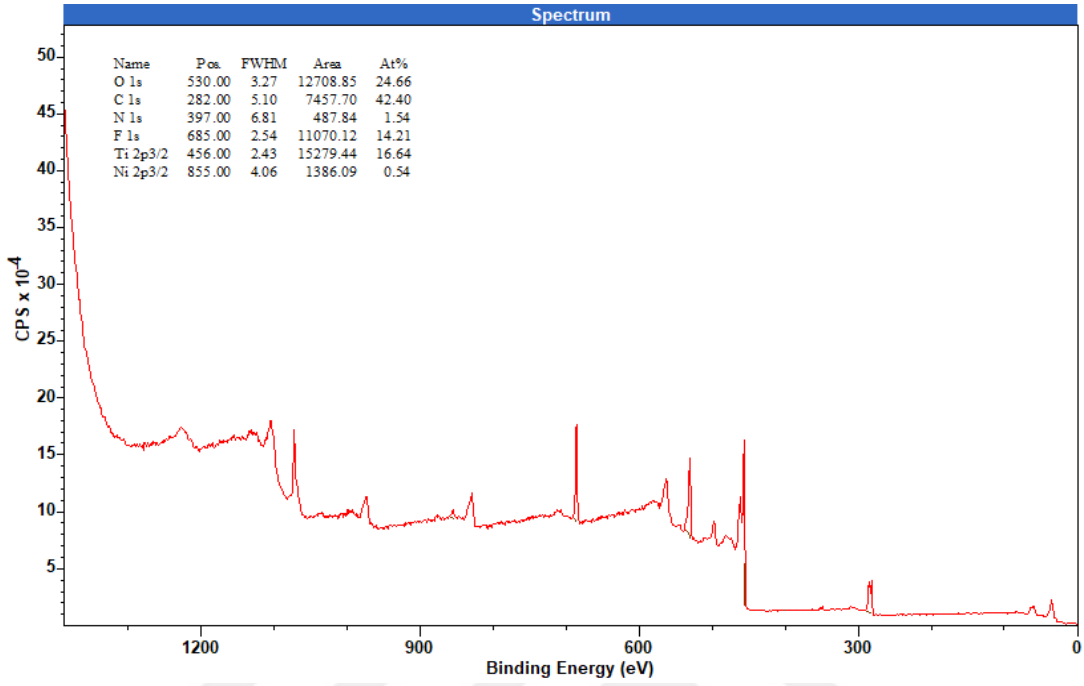
Şekil 6.18. 30 °C, %20 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu.

Şekil 6.19’da 30 °C, %20 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu verilmiştir.



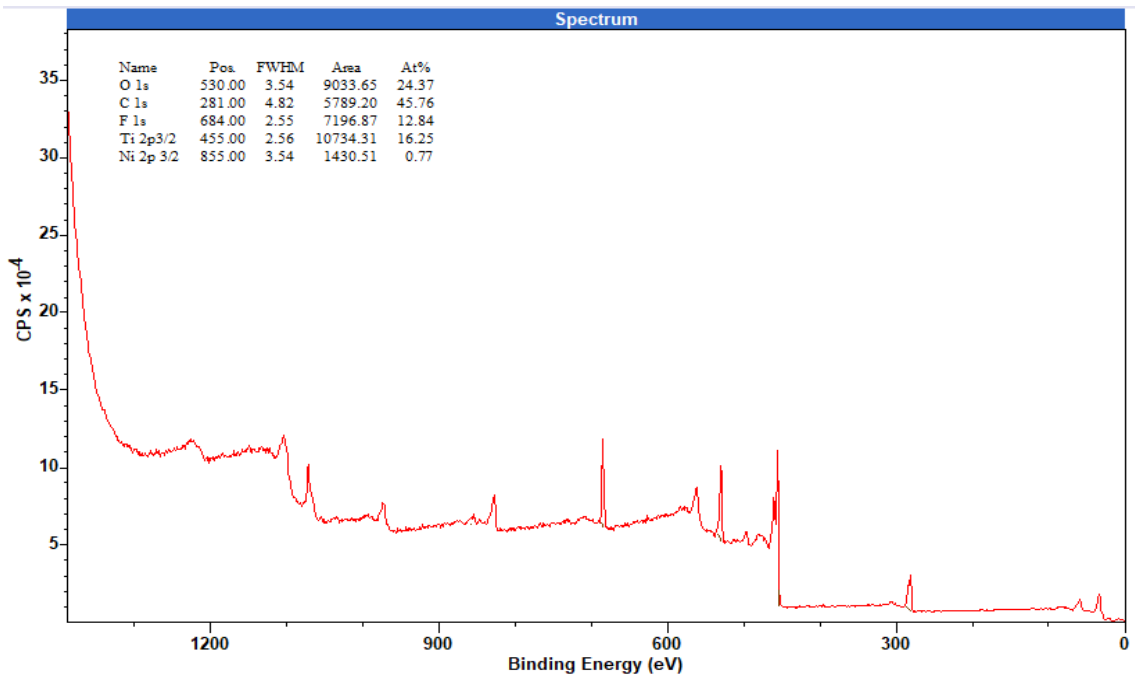
Şekil 6.19. 30 °C, %20 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu.

Şekil 6.20’de 30 °C, %20 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu verilmiştir.



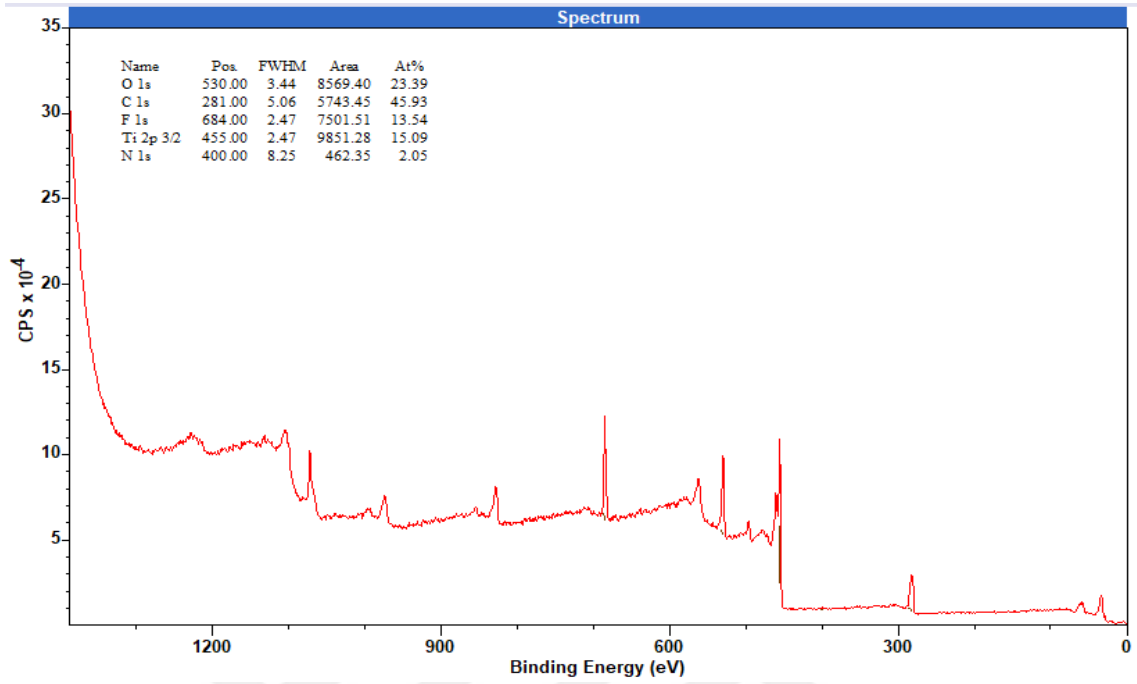
Şekil 6.20. 30 °C, %20 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu.

Şekil 6.21’de 30 °C, %30 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu verilmiştir.



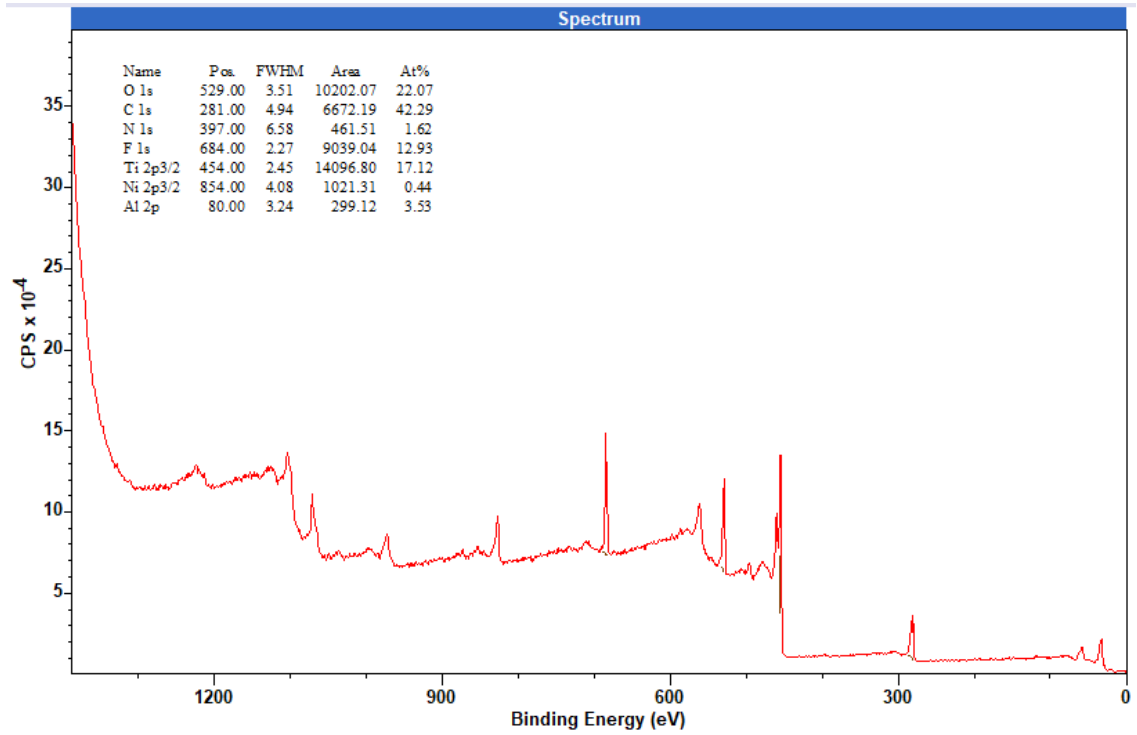
Şekil 6.21. 30 °C, %30 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu.

Şekil 6.22’de 30 °C, %30 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu verilmiştir.



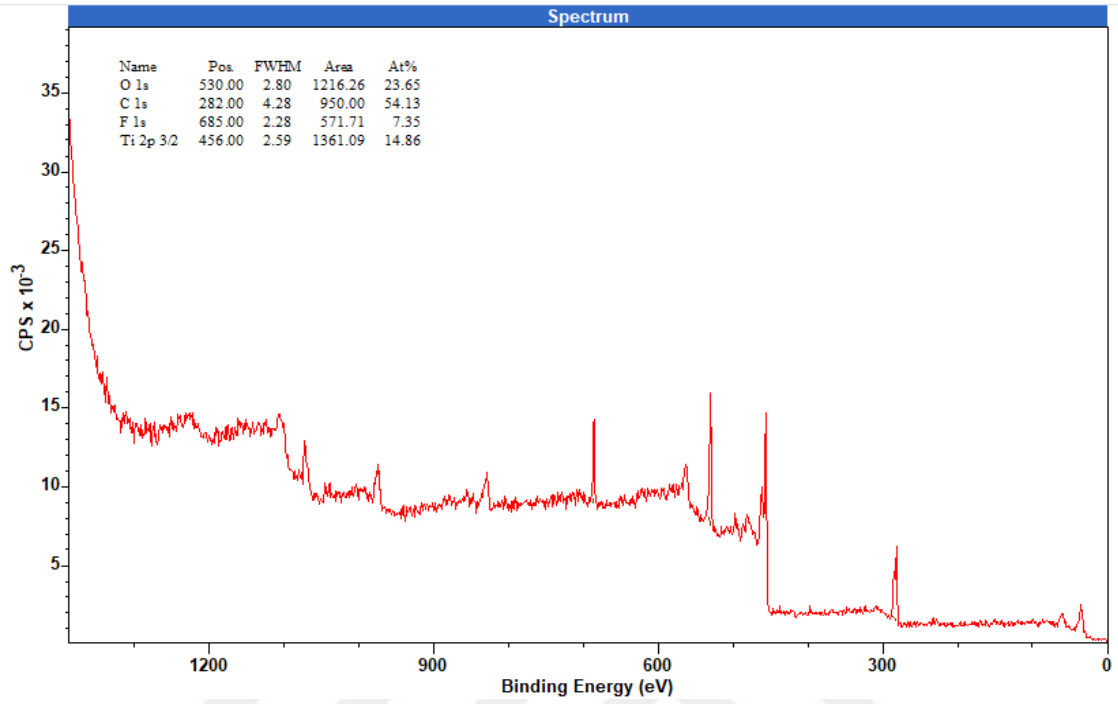
Şekil 6.22. 30 °C, %30 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu.

Şekil 6.23’de 30 °C, %30 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu verilmiştir.



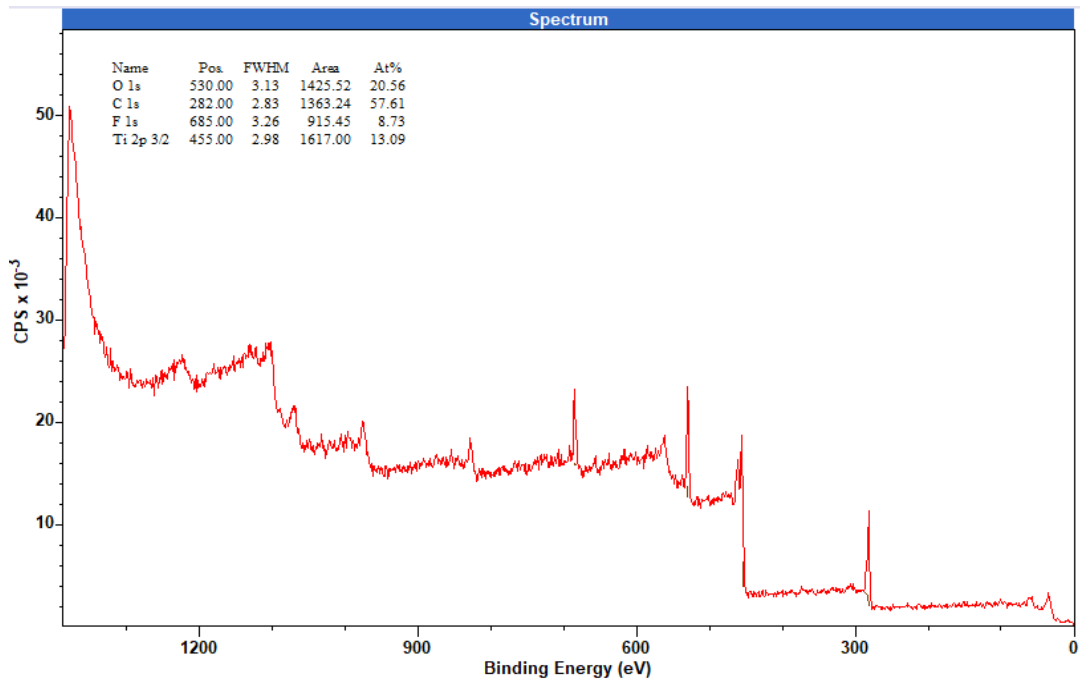
Şekil 6.23. 30 °C, %30 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu.

Şekil 6.24’de 30 °C, %30 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu verilmiştir.



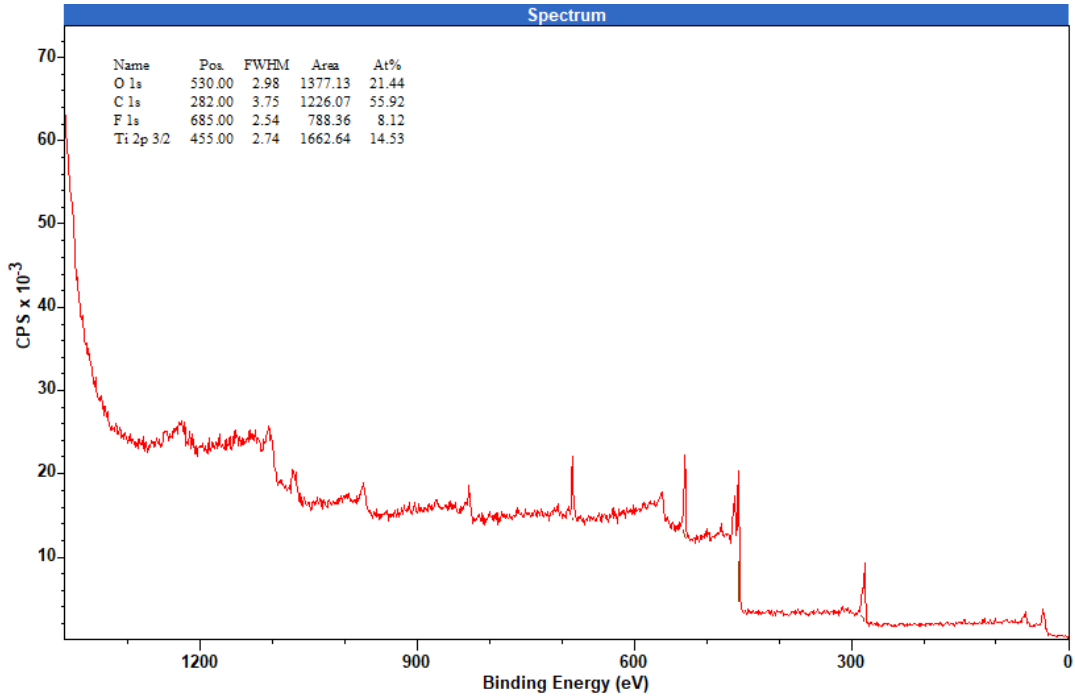
Şekil 6.24. 30 °C, %30 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu.

Şekil 6.25’de 30 °C, %40 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu verilmiştir.



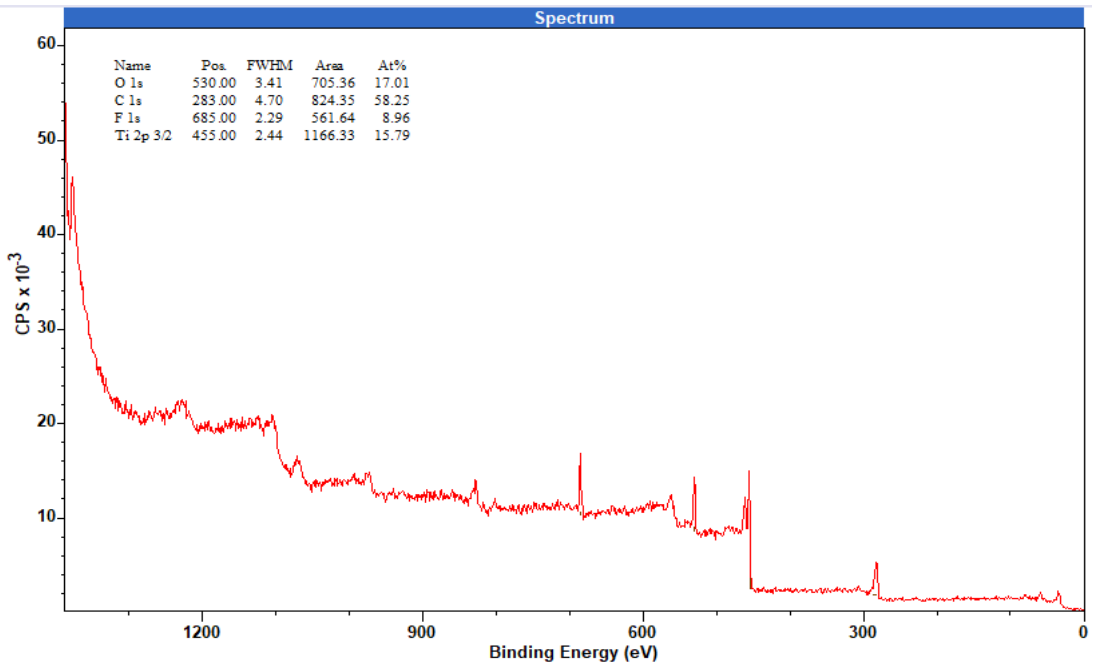
Şekil 6.25. 30 °C, %40 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu.

Şekil 6.26'de 30 °C, %40 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu verilmiştir.



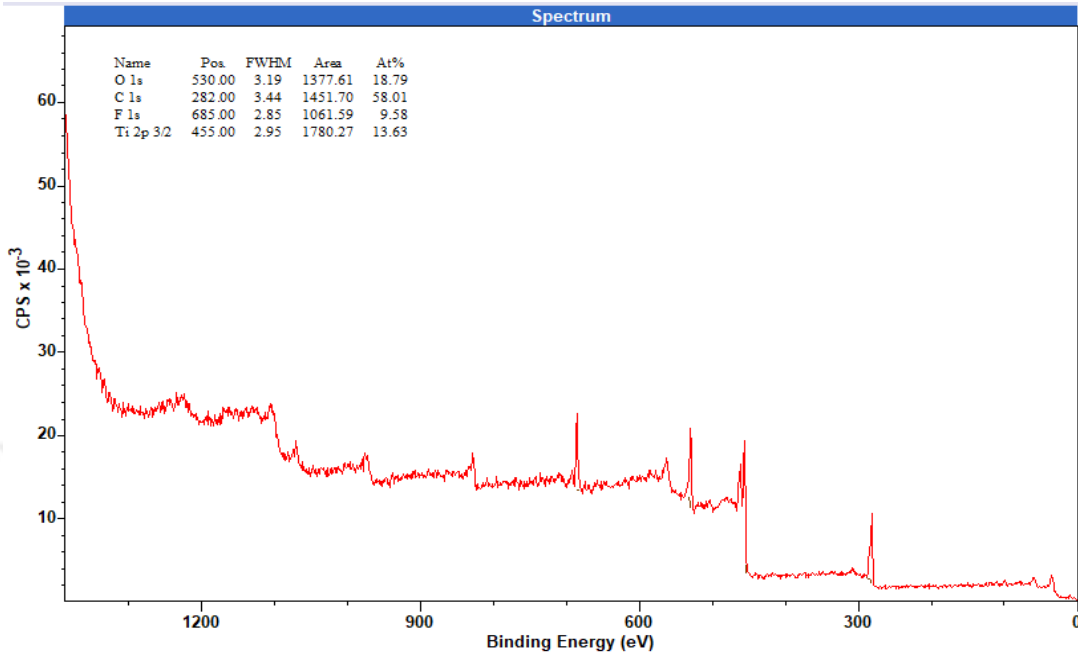
Şekil 6.26. 30 °C, %40 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.

Şekil 6.27'de 30 °C, %40 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu verilmiştir.



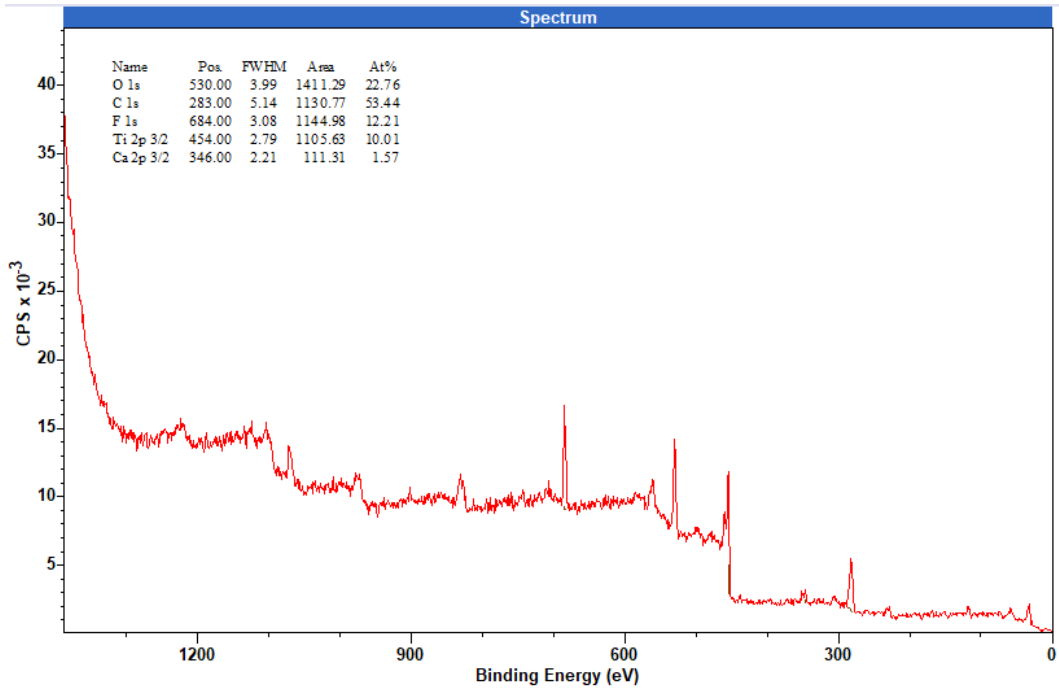
Şekil 6.27. 30 °C, %40 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.

Şekil 6.28’de 30 °C, %40 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu verilmiştir.



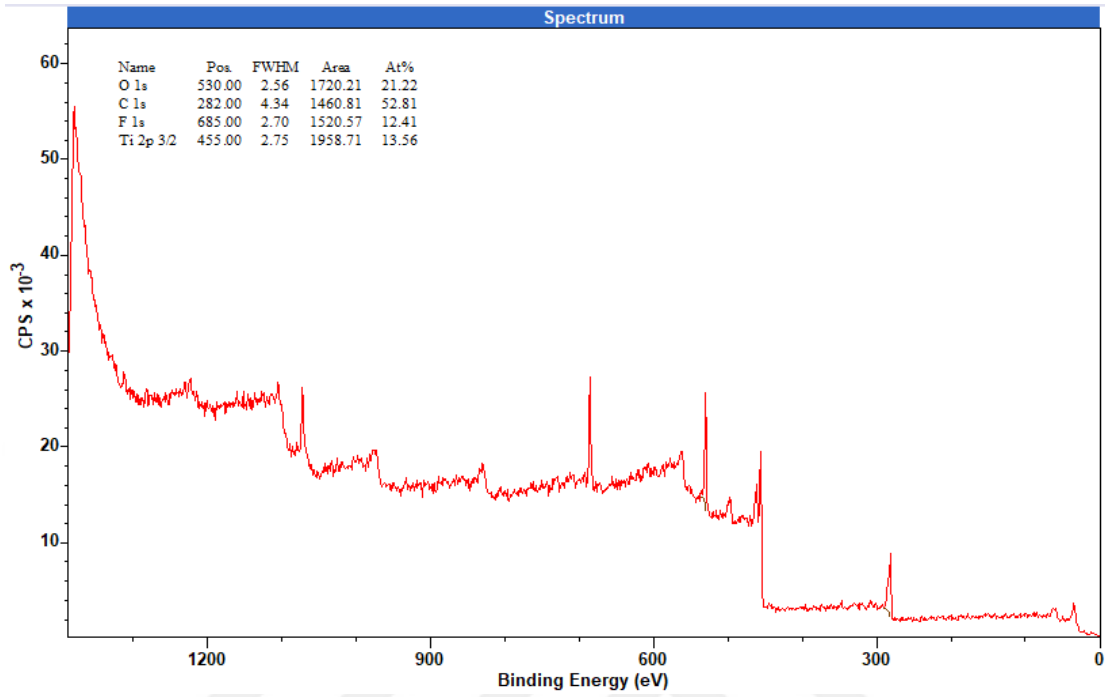
Şekil 6.28. 30 °C, %40 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu.

Şekil 6.29’de 40 °C, %20 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu verilmiştir.



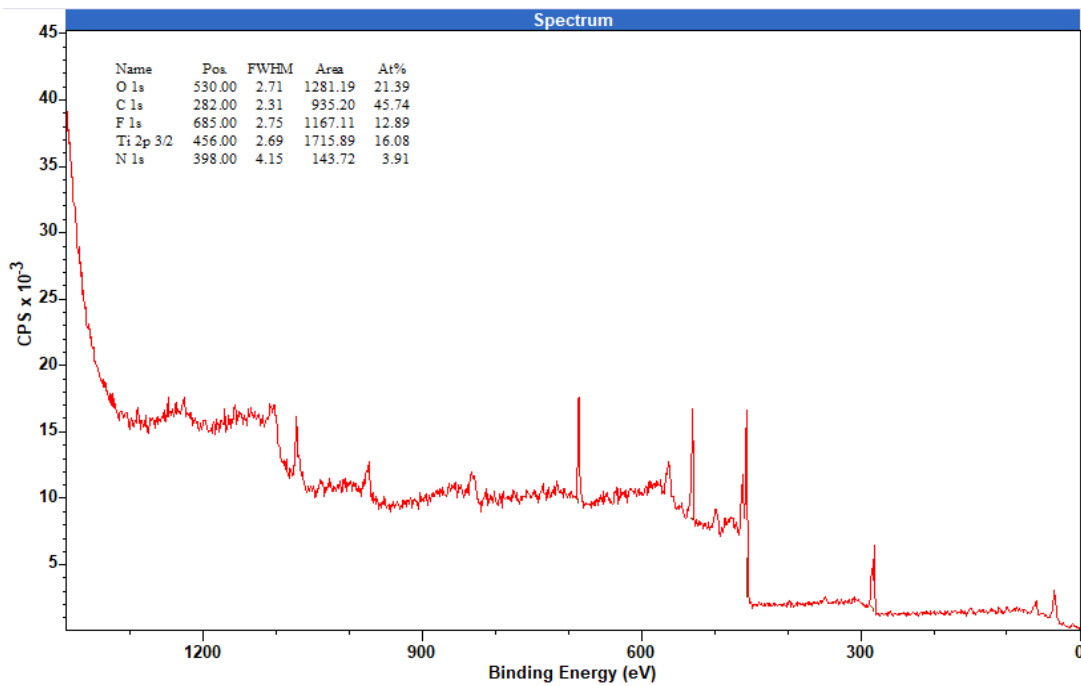
Şekil 6.29. 40 °C, %20 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu.

Şekil 6.30'de 40 °C, %20 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu verilmiştir.



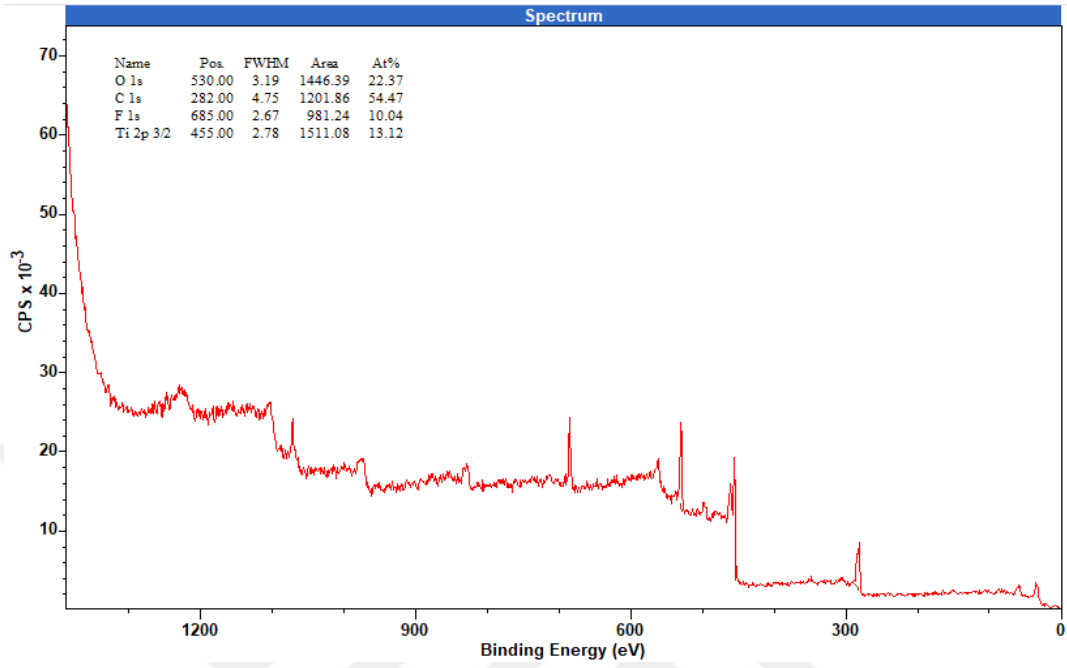
Şekil 6.30. 40 °C, %20 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.

Şekil 6.31'de 40 °C, %20 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu verilmiştir.



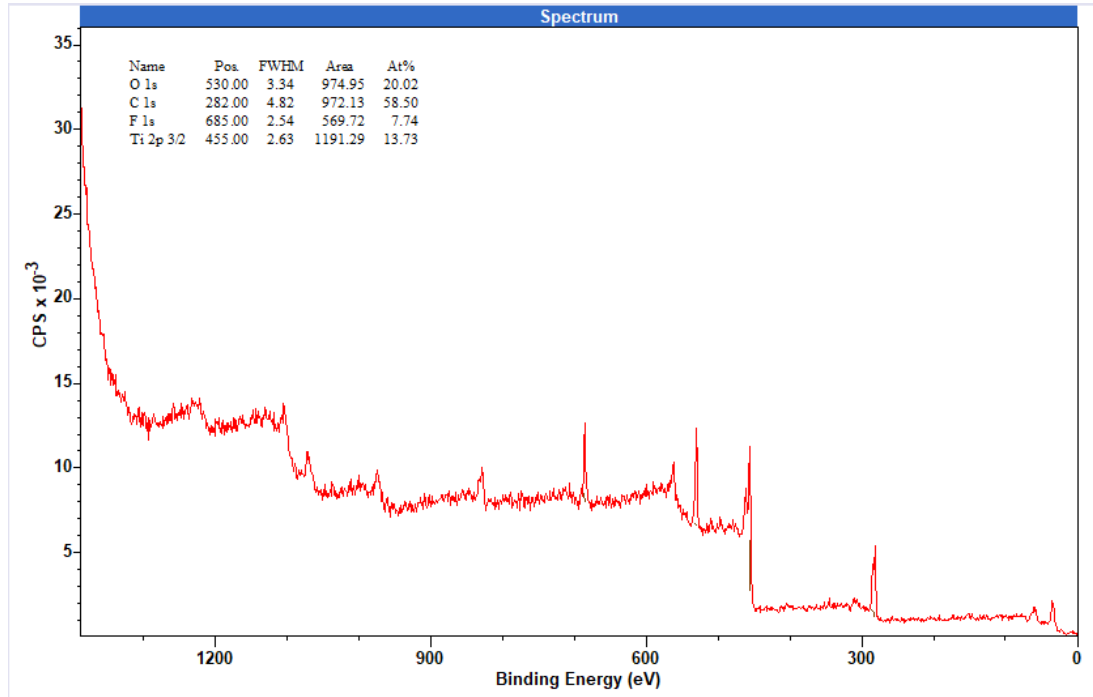
Şekil 6.31. 40 °C, %20 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.

Şekil 6.32’de 40 °C, %20 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu verilmiştir.



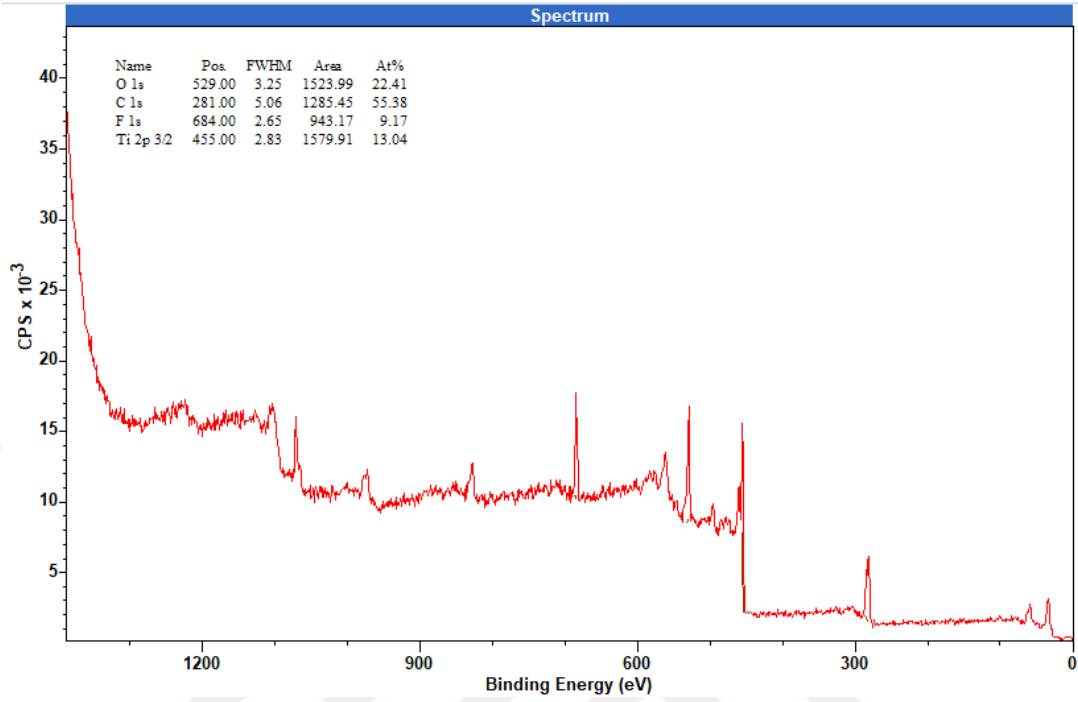
Şekil 6.32. 40 °C, %20 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu.

Şekil 6.33’de 40 °C, %30 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu verilmiştir.



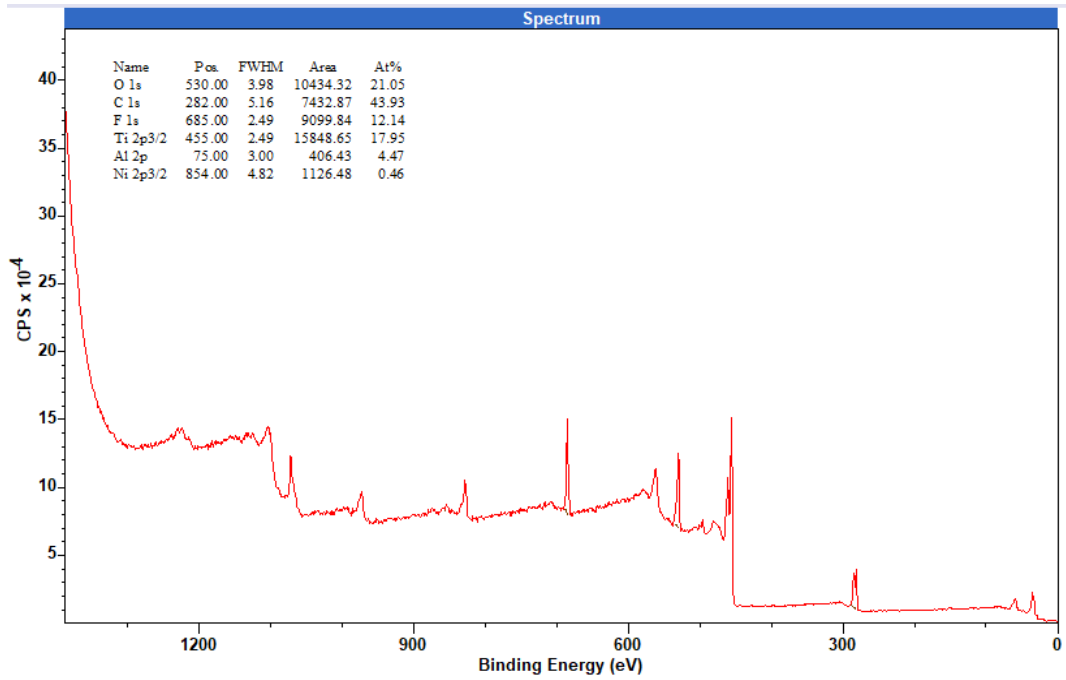
Şekil 6.33. 40 °C, %30 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu.

Şekil 6.34’de 40 °C, %30 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu verilmiştir.



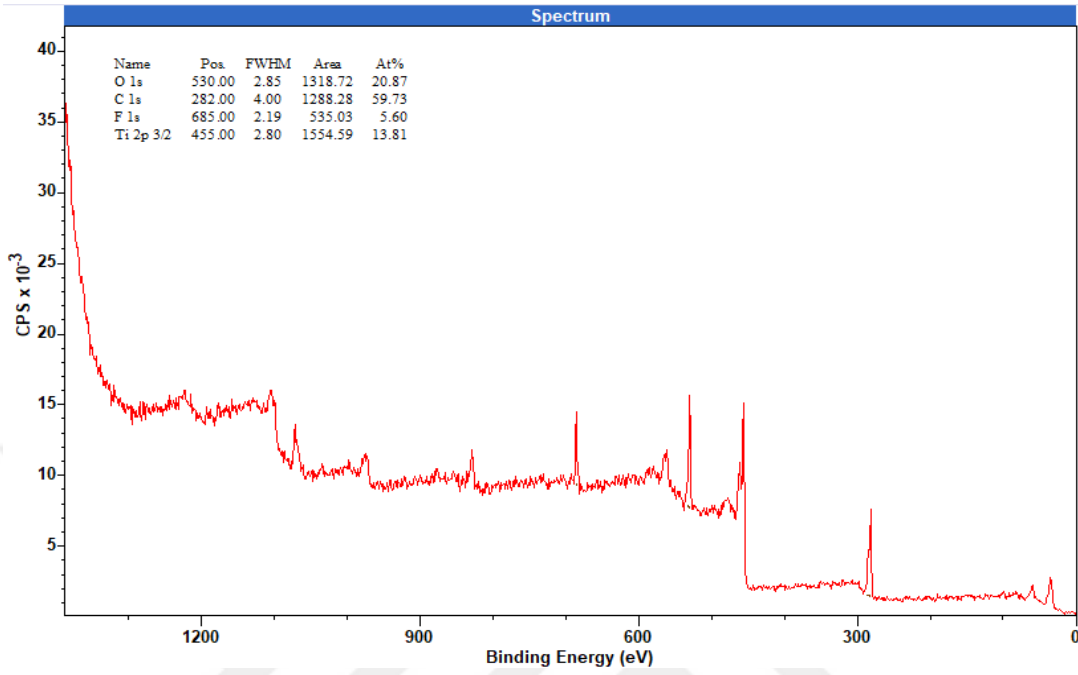
Şekil 6.34. 40 °C, %30 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu.

Şekil 6.35’de 40 °C, %30 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu verilmiştir.



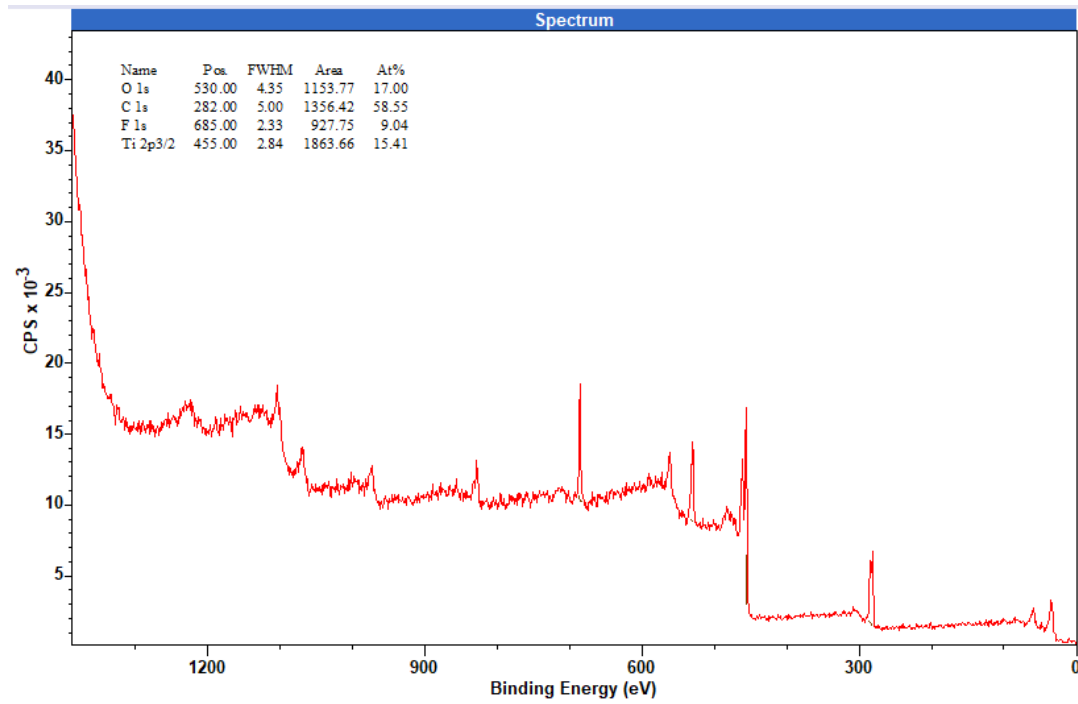
Şekil 6.35. 40 °C, %30 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu.

Şekil 6.36'de 40 °C, %30 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu verilmiştir.



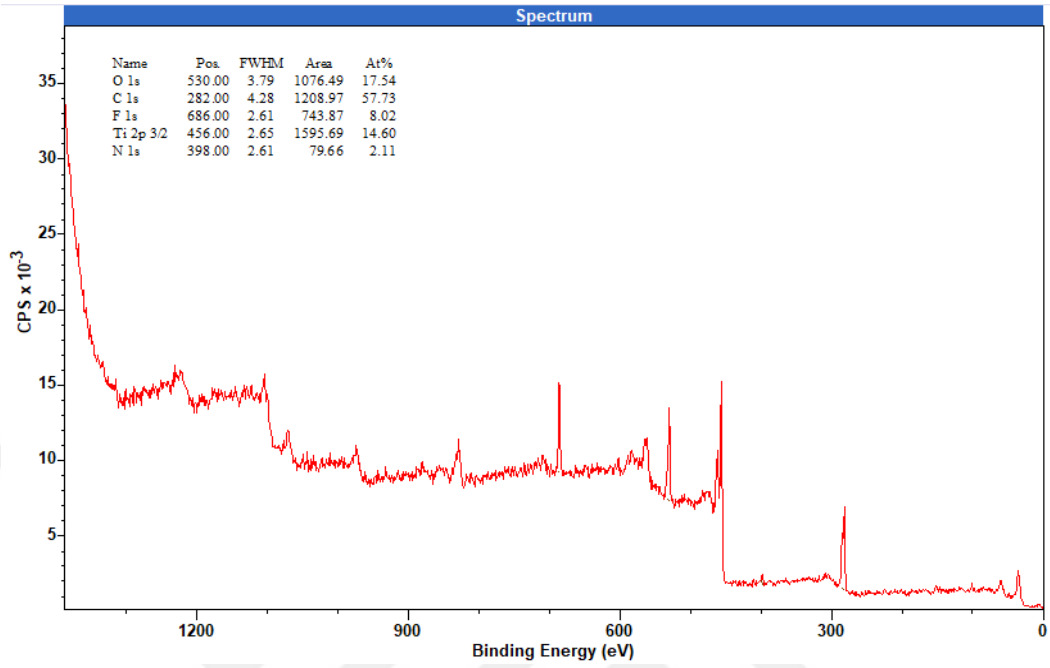
Şekil 6.36. 40 °C, %30 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.

Şekil 6.37'de 40 °C, %40 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu verilmiştir.



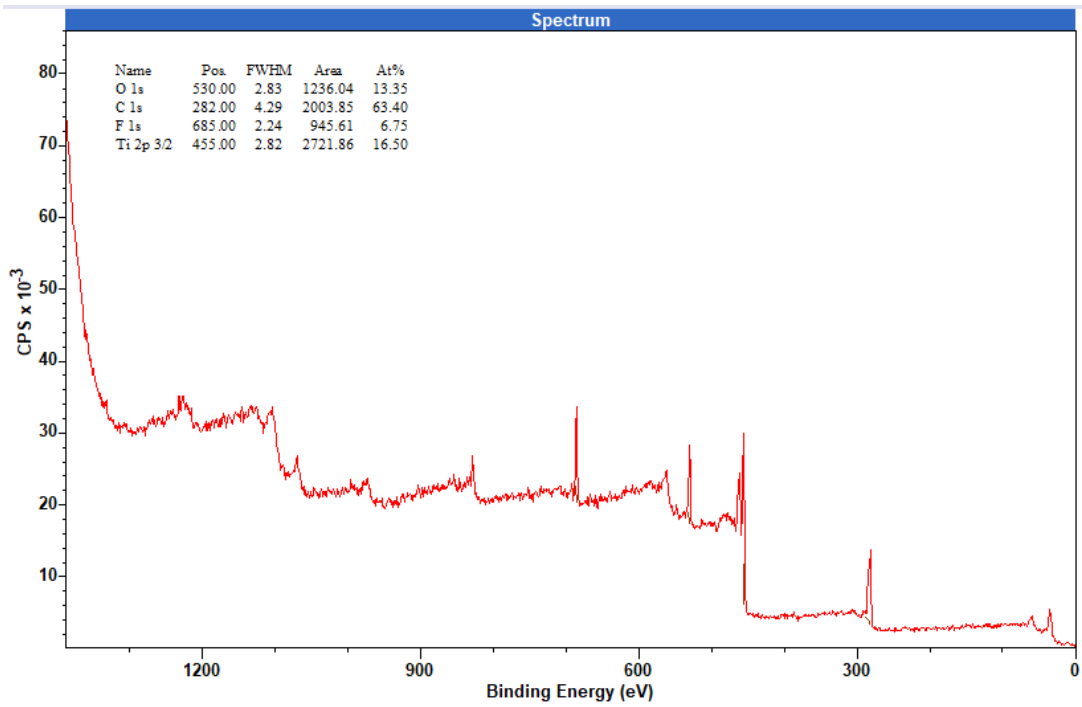
Şekil 6.37. 40 °C, %40 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.

Şekil 6.38’de 40 °C, %40 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu verilmiştir.



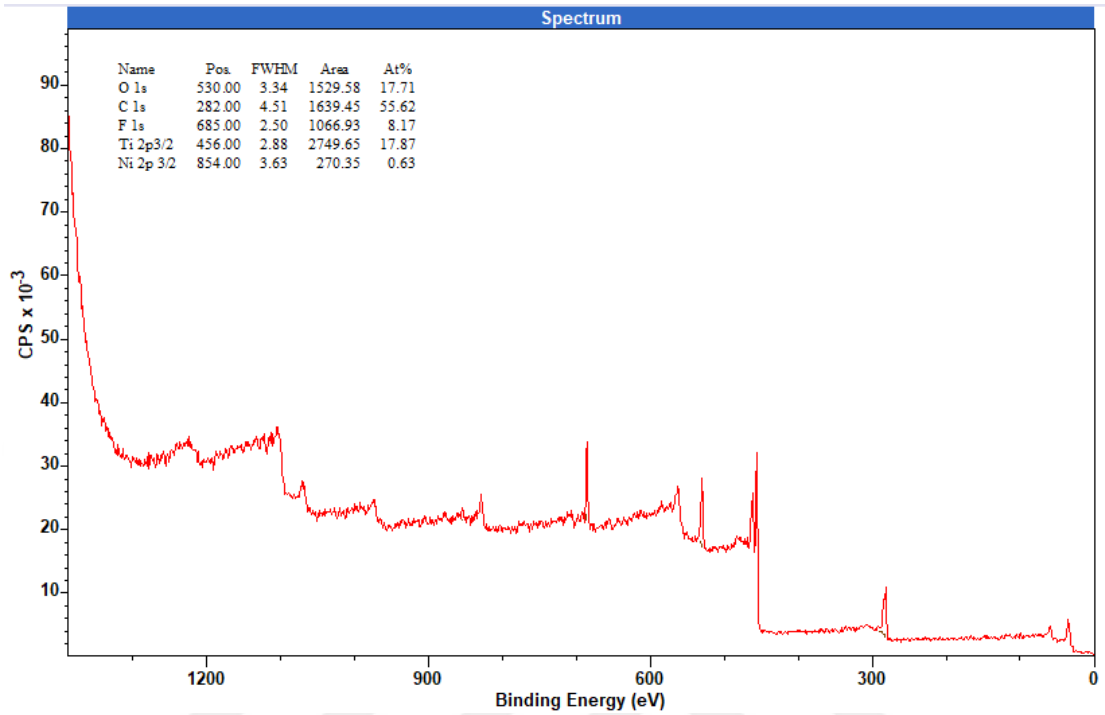
Şekil 6.38. 40 °C, %40 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu.

Şekil 6.39’de 40 °C, %40 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu verilmiştir.



Şekil 6.39. 40 °C, %40 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS spektrumu.

Şekil 6.40'de 40 °C, %40 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu verilmiştir.



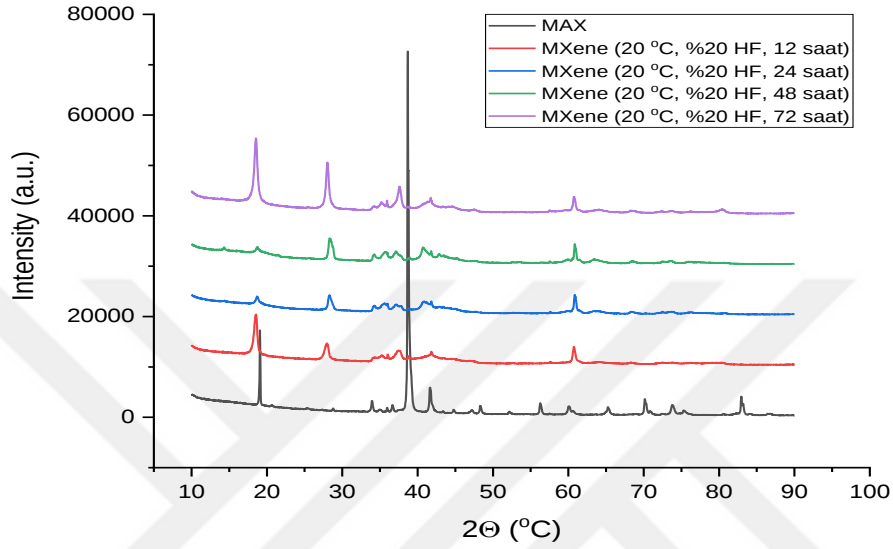
Şekil 6.40. 40 °C, %40 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS spektrumu.

6.1.2. XRD Analizleri

MXene sentezlerinde kullanılan başlangıç materyali MAX fazı (Ti_3AlC_2)'ın ve MXene ($Ti_3C_2T_x$) aşındırma süreleri ile karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Sentez koşulları olarak; 20-40 °C sıcaklık aralığı, % 20-40 HF derişim aralığı ve 12-72 saat zaman aralığında hazırlanan MXene'in XRD şekilleri MAX'ınki ile kıyaslandığında önemli ölçüde değişiklikler görüldü. 38.6° ve 19.4° de görülen pikler MAX'ın en şiddetli ve karakteristik pikleridir. Bu bağlamda, hazırlanan MXene'lerin XRD görüntülerinde 38.6° piki makul düzeyde pik şiddetinde küçülme gözlenirken, 19.4° piki biraz daha küçük açılı bölgeye (18.6°) kaymıştır. Farklı koşullarda hazırlanan MXene'in XRD görüntülerinde özellikle 38.6° pikin hemen hemen kaybolacak düzeye gelmiş olması ve XRD görüntülerinde benzerlik görülmesi MAX'ın HF ile aşındırılarak MXene dönüştürülmesinin yeterli koşullar olduğunu göstermektedir. Hazırlanan MXene'lerin XRD görüntüleri dikkatlice incelendiğinde 38.6° de çok zayıf görülen pikin varlığı ortamda düşük düzeyde de olsa MAX kaldığını göstermektedir. Bu bağlamda MXene'lerin XPS spektrumlarında N 1s bağlanma enerjisinin 398 eV da 270 alana sahip olup % 0.87 kadardır. Halbuki, MAX'da N 1s 398 eV da 1131 alana sahip ve % 2.66 miktarındadır. Dolayısıyla XPS ile XRD sonuçlarının birbirleriyle uyum içinde olduğunu göstermektedir. Ayrıca, MXene'nin XRD görüntülerindeki 38.6° pikin daha düşük ve algılanması zor olması Ti_3AlC_2 'deki Al katmanlarının daha etkin biçimde

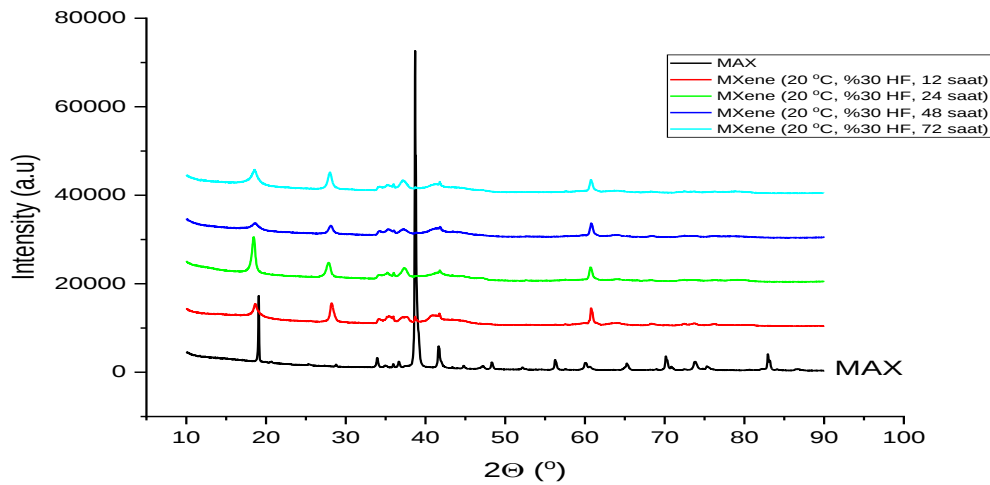
uzaklaştırıldığını göstermektedir. Literatürdeki diğer örneklerle kıyaslandığında benzer durum görülmektedir [72, 97].

Şekil 6.41'de 20 °C, %20 HF sırasıyla 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene'in ve MAX fazının XRD grafikleri verilmiştir.



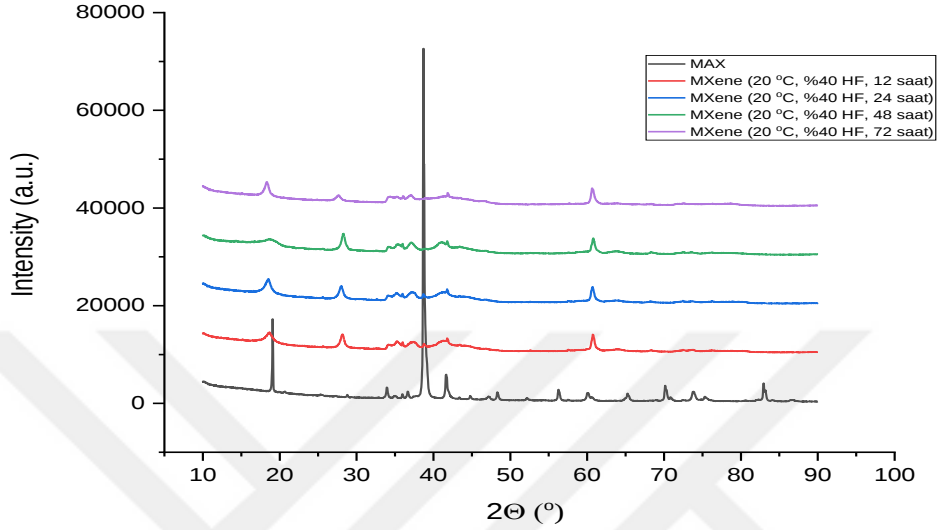
Şekil 6.41. 20 °C, %20 HF 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene'in ve MAX fazının XRD grafiği.

Şekil 6.42'de 20 °C, %30 HF sırasıyla 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene'in ve MAX fazının XRD grafikleri verilmiştir. Sentezlenen Tüm MXene'lerin Al atomlarını temsil eden 38.6° pikin ciddi oranda azaldığı gözlemlendi.



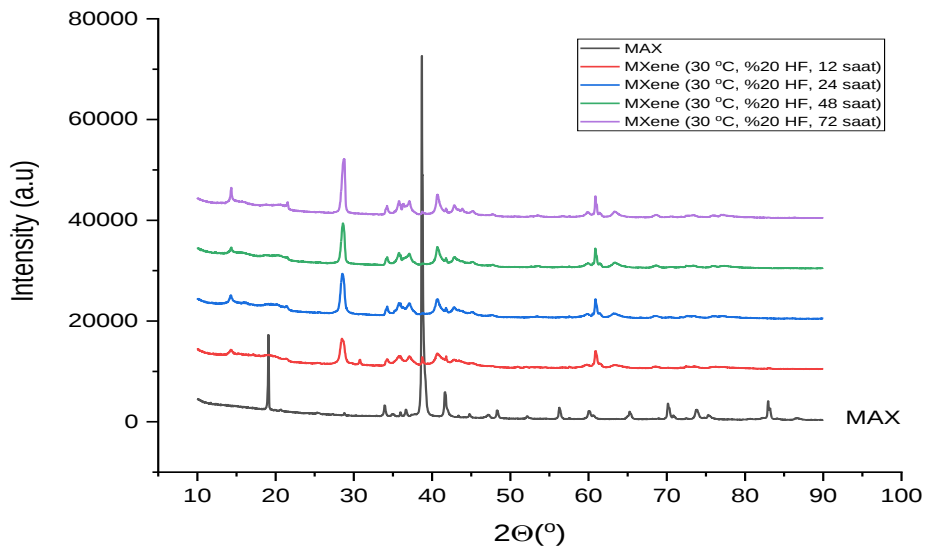
Şekil 6.42. 20 °C, %30 HF 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene'in ve MAX fazının XRD grafiği.

Şekil 6.43’da 20 °C, %40 HF sırasıyla 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene’in ve MAX fazının XRD grafikleri verilmiştir. Sentezlenen Tüm MXene’lerin Al atomlarını temsil eden 38.6° pikin ciddi oranda azaldığı gözlemlendi.



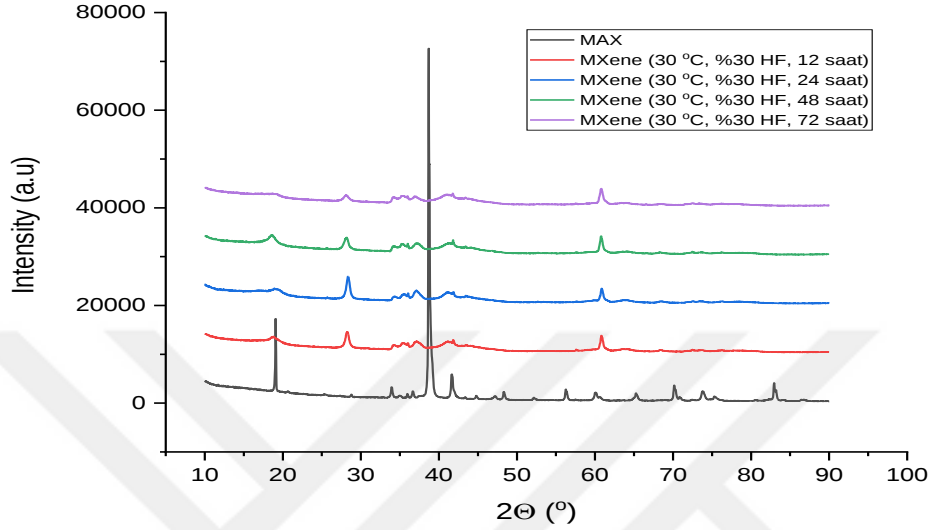
Şekil 6.43. 20 °C, %40 HF 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene’in ve MAX fazının XRD grafiği.

Şekil 6.44’da 30 °C, %20 HF sırasıyla 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene’in ve MAX fazının XRD grafikleri verilmiştir. Sentezlenen Tüm MXene’lerin Al atomlarını temsil eden 38.6° pikin ciddi oranda azaldığı gözlemlendi.



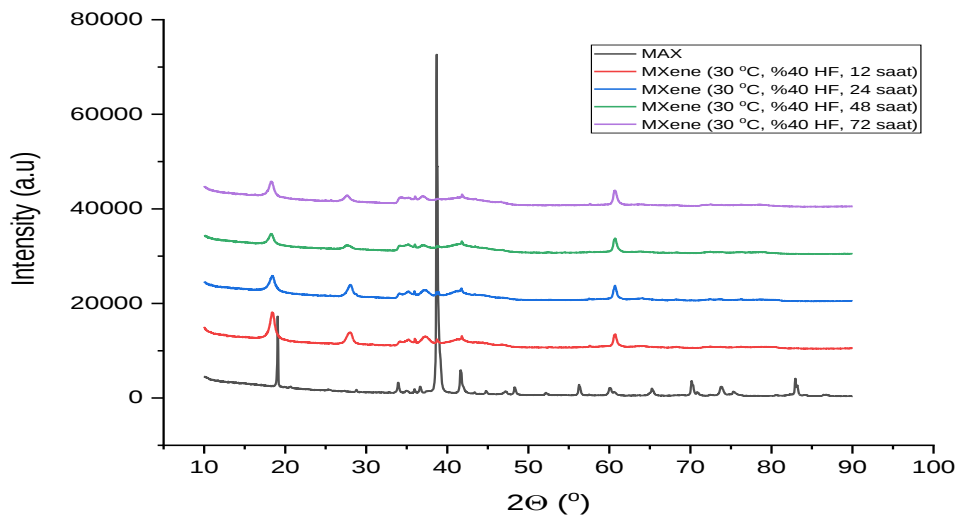
Şekil 6.44. 30 °C, %20 HF 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene’in ve MAX fazının XRD grafiği.

Şekil 6.45’de 30 °C, %30 HF sırasıyla 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene’in ve MAX fazının XRD grafikleri verilmiştir. Sentezlenen Tüm MXene’lerin Al atomlarını temsil eden 38.6° pikin ciddi oranda azaldığı gözlemlendi.



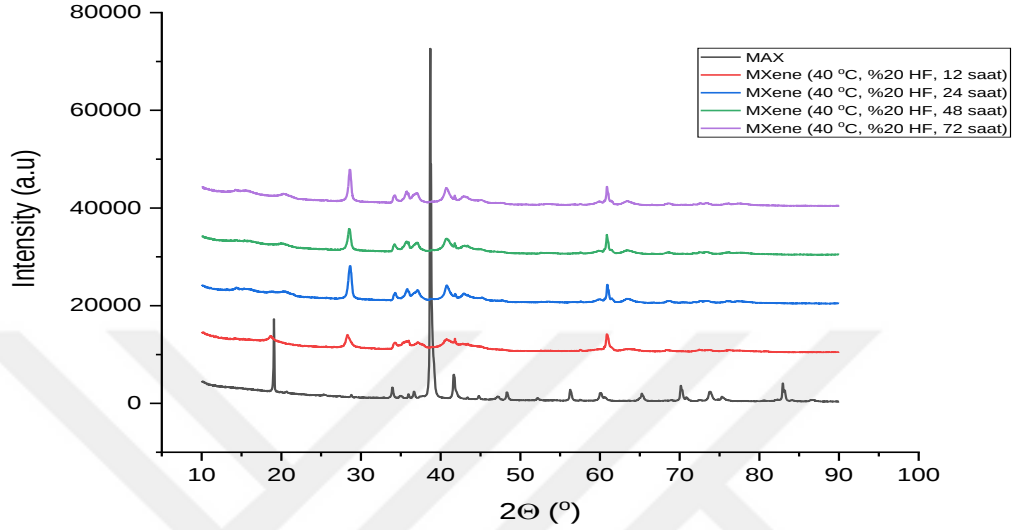
Şekil 6.45. 30 °C, %30 HF 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene’in ve MAX fazının XRD grafiği.

Şekil 6.46’de 30 °C, %40 HF sırasıyla 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene’in ve MAX fazının XRD grafikleri verilmiştir. Sentezlenen Tüm MXene’lerin Al atomlarını temsil eden 38.6° pikin ciddi oranda azaldığı gözlemlendi.



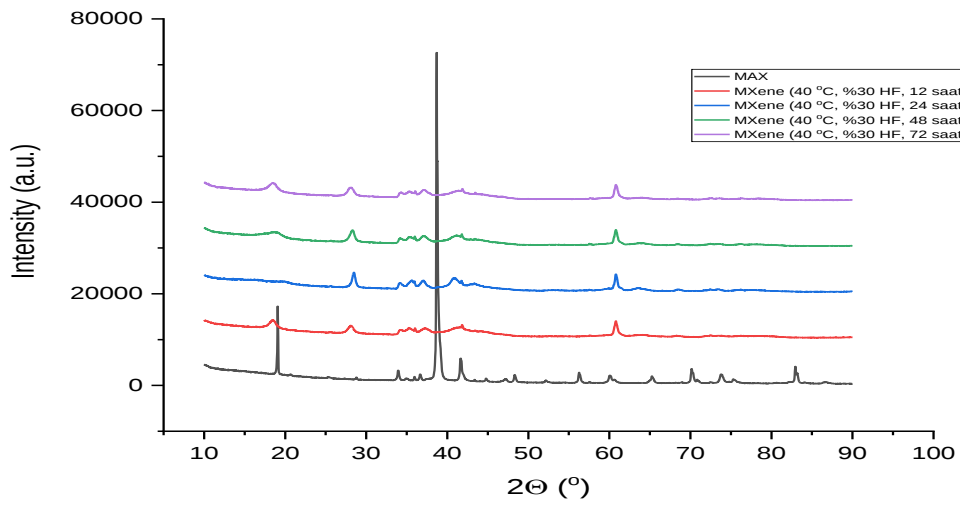
Şekil 6.46. 30 °C, %40 HF 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene’in ve MAX fazının XRD grafiği.

Şekil 6.47’de 40 °C, %20 HF sırasıyla 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene’in ve MAX fazının XRD grafikleri verilmiştir. Sentezlenen Tüm MXene’lerin Al atomlarını temsil eden 38.6° pikin ciddi oranda azaldığı gözlemlendi.



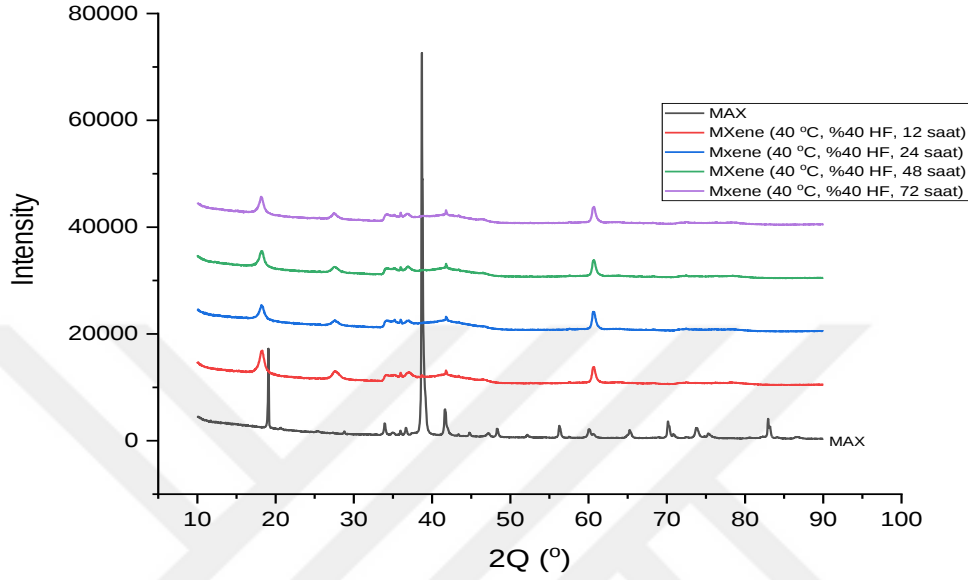
Şekil 6.47. 40 °C, %20 HF 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene’in ve MAX fazının XRD grafiği.

Şekil 6.48’de 40 °C, %30 HF sırasıyla 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene’in ve MAX fazının XRD grafikleri verilmiştir. Sentezlenen Tüm MXene’lerin Al atomlarını temsil eden 38.6° pikin ciddi oranda azaldığı gözlemlendi.



Şekil 6.48. 40 °C, %30 HF 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene’in ve MAX fazının XRD grafiği.

Şekil 6.49’de 40 °C, %40 HF sırasıyla 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene’in ve MAX fazının XRD grafikleri verilmiştir. Sentezlenen Tüm MXene’lerin Al atomlarını temsil eden 38.6° pikin ciddi oranda azaldığı gözlemlendi.



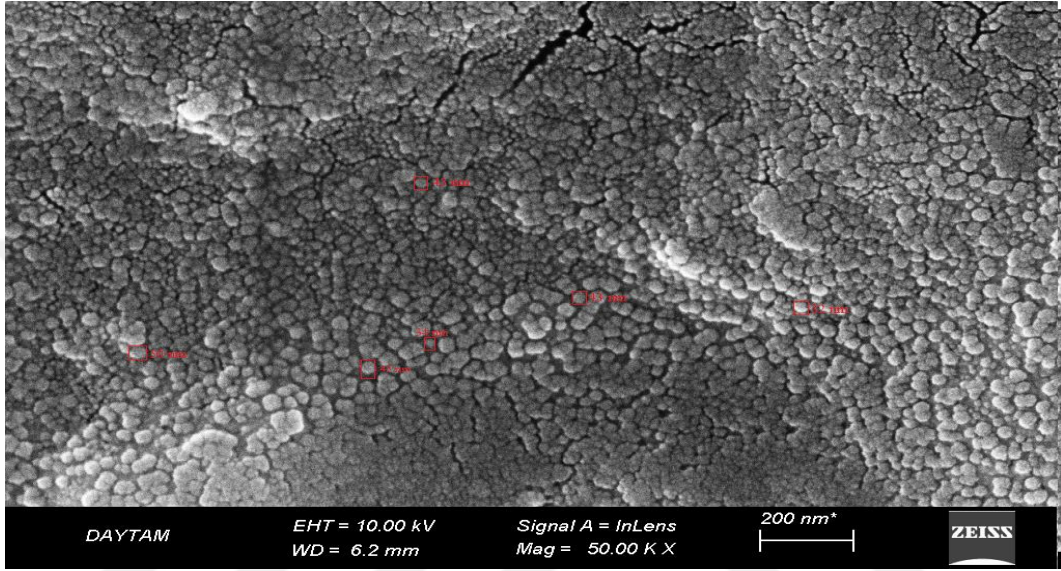
Şekil 6.49. 40 °C, %40 HF 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene’in ve MAX fazının XRD grafiği.

6.1.3. SEM Görüntüleri

MAX öncüsünün tanecik boyutundaki değişimi daha iyi anlamak için MAX’ın MXene fazına dönüşümünde yani $Ti_3C_2T_x$ üretmek için Al’ın aşındırılması çalışma kapsamında belirtilen koşullara göre gerçekleştirildi. Bu doğrultuda üretilen MXene’lerin bazı SEM görüntüleri sadece belirli koşullardakiler için karşılaştırmalı olarak gösterildi. Şekil 6.50’de MAX (Ti_3AlC_2) tozlarının SEM görüntüsünü gösteriyor. MAX’ın SEM görüntüsü tipik küresel MAX fazını göstermektedir. SEM görüntüsünde de görüldüğü gibi MAX küreciklerinin boyutları 50 nm den daha düşük olduğu belirlendi. Verilen şekillerden MXene taneciklerinin nanoboyutlarında bir miktar değişiklik olduğu görüldü. Örneğin 20 °C, %30 HF ve 24 saat koşullarında hazırlanan MXene’in SEM görüntüsünden MXene taneciklerinin 20 nm’ye kadar küçüldüğü görülmektedir. Bu davranış Ti_3AlC_2 fazının Al metalinin aşınması sonucu $Ti_3C_2T_x$ ’e dönüşmesi ve güçlü sonikasyon sonucu tanecik boyutunun azaldığı düşünülmektedir.

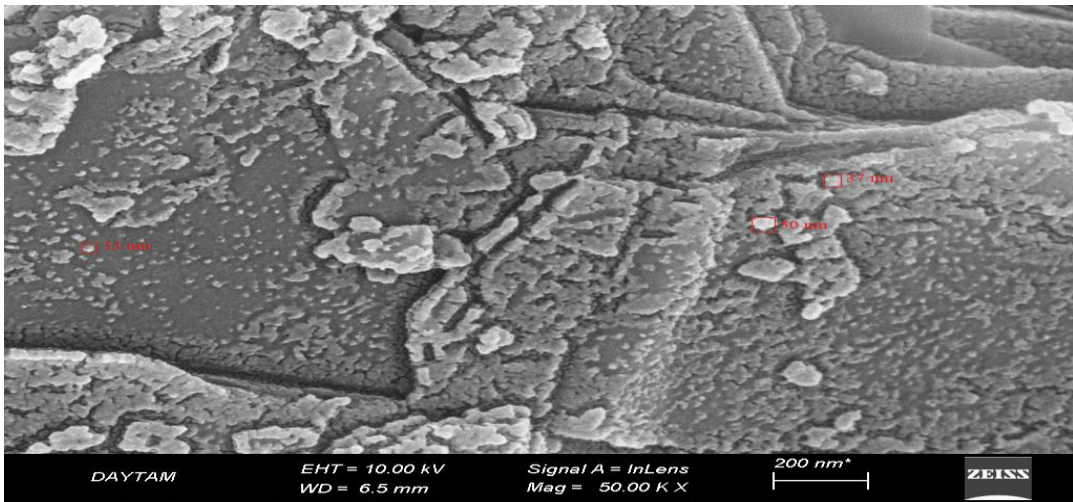
Taramalı elektron mikroskobu (SEM), yapının görselleştirilmesine izin verir ve genellikle MXene'nin HF ile aşındırılması sonrası oluşan akordiyonik yapının gözlemlenmesi MAX fazından MXene’in başarıyla sentezlendiğinin göstergesi kabul edilir. Tüm HF ile aşındırılmış numuneler aynı morfolojik yapıda olmaz [98]. Şekil 6.53, 6.57, 6.61 ve 6.65, farklı koşullar altında sentezlenen

çok katmanlı $Ti_3C_2T_x$ 'in SEM görüntülerini gösterilmektedir. HF konsantrasyonu düştükçe, "akordeon" yapısı daha az belirgin hale gelir ve çok katmanlı MXene, tipik MAX yapısına daha çok benzer. Esasen, etkili HF konsantrasyonu arttıkça, H_2 üretimi giderek daha hızlı hale gelir ve genişleyen yapıya yol açar. Daha düşük konsantrasyonlarda (ve dolayısıyla daha yavaş kinetiklerde), partiküllerin morfolojik değişimi daha az gözlemlenir [12]. Şekil 6.50'de MAX fazının Ti_3AlC_2 SEM görüntüsü verilmiştir.



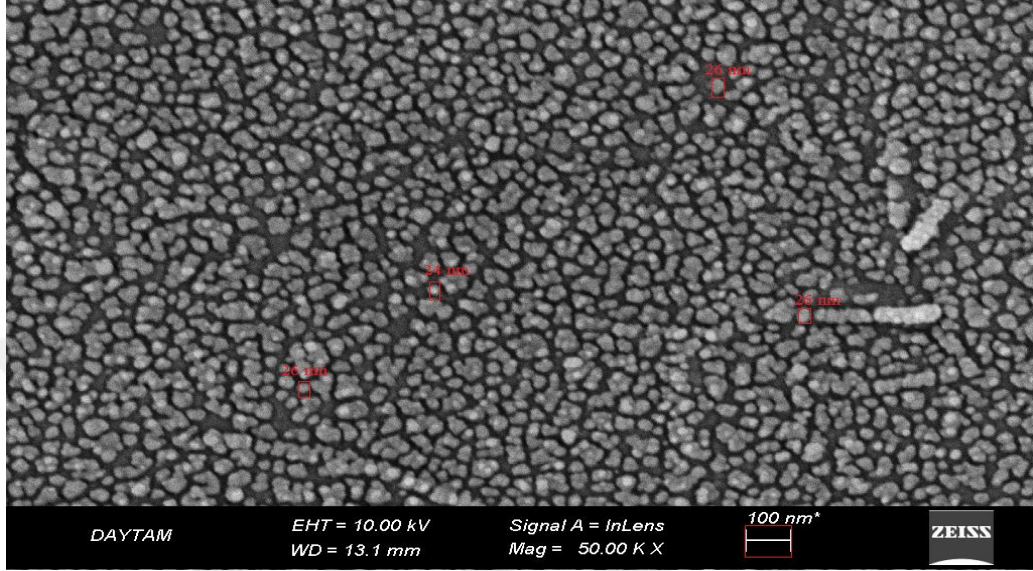
Şekil 6.50. Ti_3AlC_2 MAX'ın SEM görüntüsü.

Şekil 6.51'de 20 °C, %20 HF 24 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü verilmiştir. Sabit sıcaklık ve sabit reaksiyon süresi içerisinde değişen aşındırıcı konsantrasyonları ile kıyaslandı. MAX fazında tanecik boyutları yaklaşık 54-43 nm arasındadır. Bu sentez şartında sentezlenen MXene'in tanecik boyutları 33nm-37nm arasına olduğu gözlemlendi.



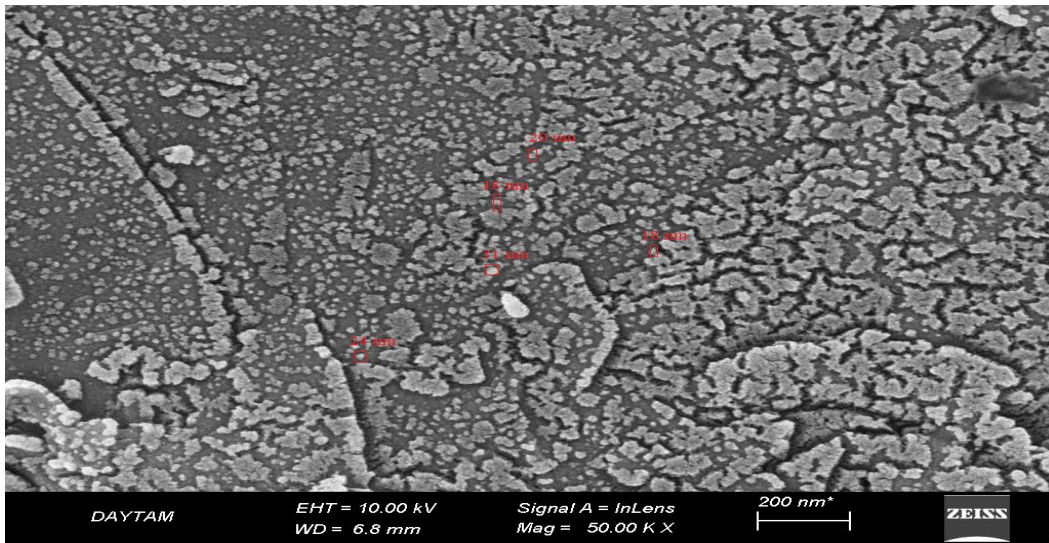
Şekil 6.51. 20 °C, %20 HF 24 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü.

Şekil 6.52’de 20 °C, %30 HF 24 saat koşullarında üretilen MXene’in SEM görüntüsü verilmiştir. MAX fazında tanecik boyutları yaklaşık 54-43 nm arasındadır. Bu sentez şartında sentezlenen MXene’in tanecik boyutları 24nm-26nm arasına olduğu gözlemlendi. Artan aşındırma çözeltisi konsantrasyonu daha küçük tanecikli MXene sentezine sebep olmuştur.



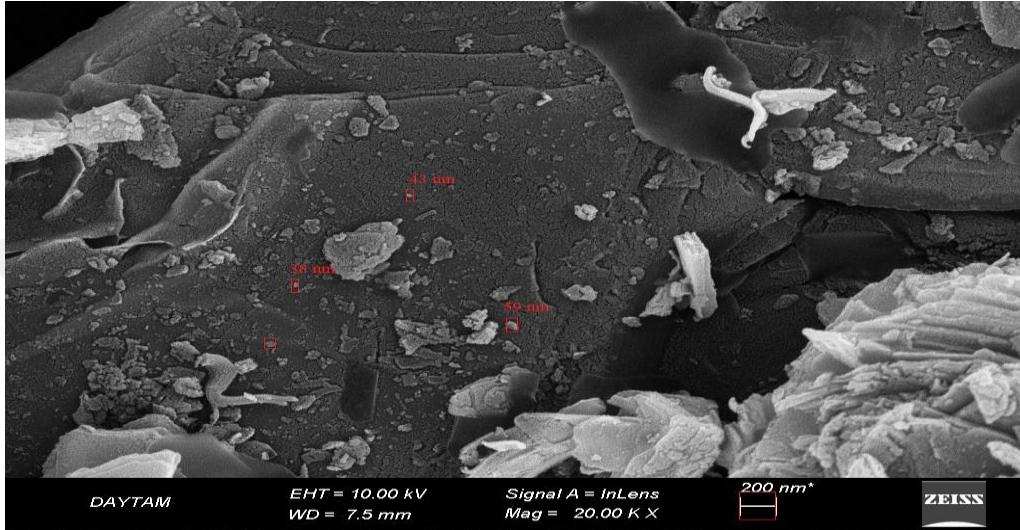
Şekil 6.52. 20 °C, %30 HF 24 saat koşullarında üretilen MXene’in SEM görüntüsü.

Şekil 6.53’de 20 °C, %40 HF 24 saat koşullarında üretilen MXene’in SEM görüntüsü verilmiştir. MAX fazında tanecik boyutları yaklaşık 54-43 nm arasındadır. Bu sentez şartında sentezlenen MXene’in tanecik boyutları ortalama 18nm-24nm arasına olduğu gözlemlendi. Benzer şekilde artan aşındırma çözeltisi konsantrasyonu tanecik boyutunu küçülttüğü gözlemlendi.



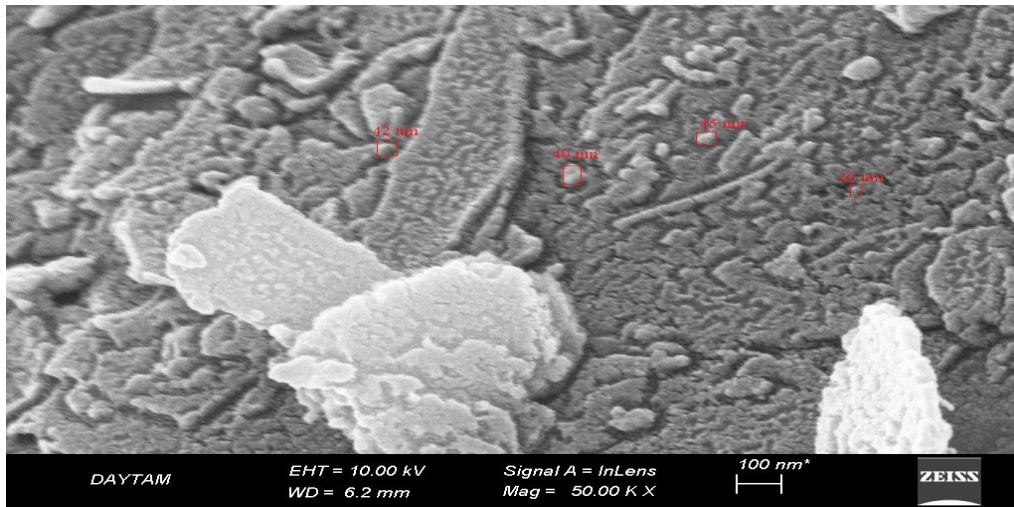
Şekil 6.53. 20 °C, %40 HF 24 saat koşullarında üretilen MXene’in SEM görüntüsü.

Şekil 6.54’de 30 °C, %20 HF 24 saat koşullarında üretilen MXene’in SEM görüntüsü verilmiştir. Sabit sıcaklık ve sabit reaksiyon süresi içerisinde değişen aşındırıcı konsantrasyonları ile kıyaslandı. MAX fazında tanecik boyutları yaklaşık 54-43 nm arasındadır. Bu sentez şartında sentezlenen MXene’in tanecik boyutları ortalama 38-43 nm arasına olduğu gözlemlendi. MAX fazından Al atomlarının uzaklaştırılmasıyla daha küçük tanecikli yapıya sahip MXene sentezlenmiştir.



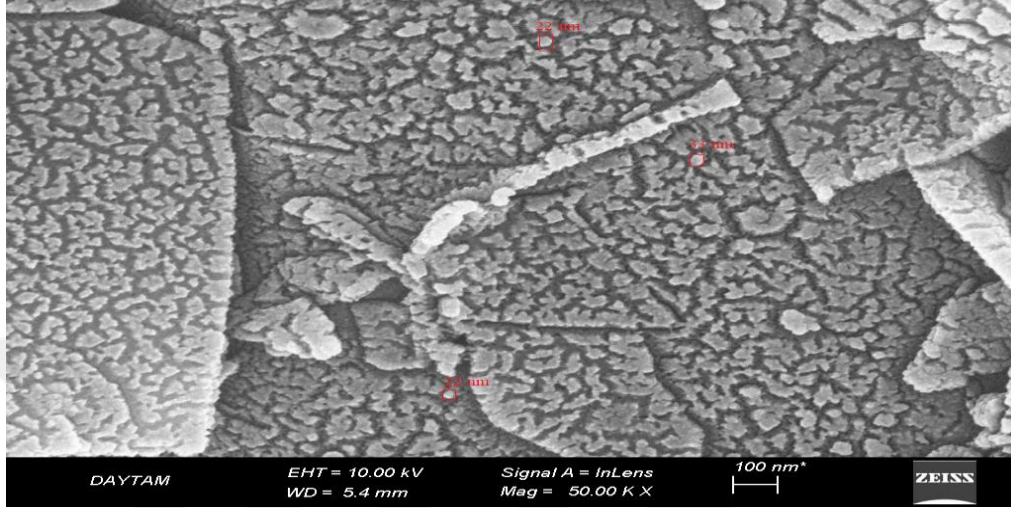
Şekil 6.54. 30 °C, %20 HF 24 saat koşullarında üretilen MXene’in SEM görüntüsü.

Şekil 6.55’de 30 °C, %30 HF 24 saat koşullarında üretilen MXene’in SEM görüntüsü verilmiştir. MAX fazında tanecik boyutları yaklaşık 54-43 nm arasındadır. Bu sentez şartında sentezlenen MXene’in tanecik boyutları ortalama 26-40 nm arasına olduğu gözlemlendi. Artan HF konsantrasyonu tanecik boyutunu azalttığı gözlemlendi.



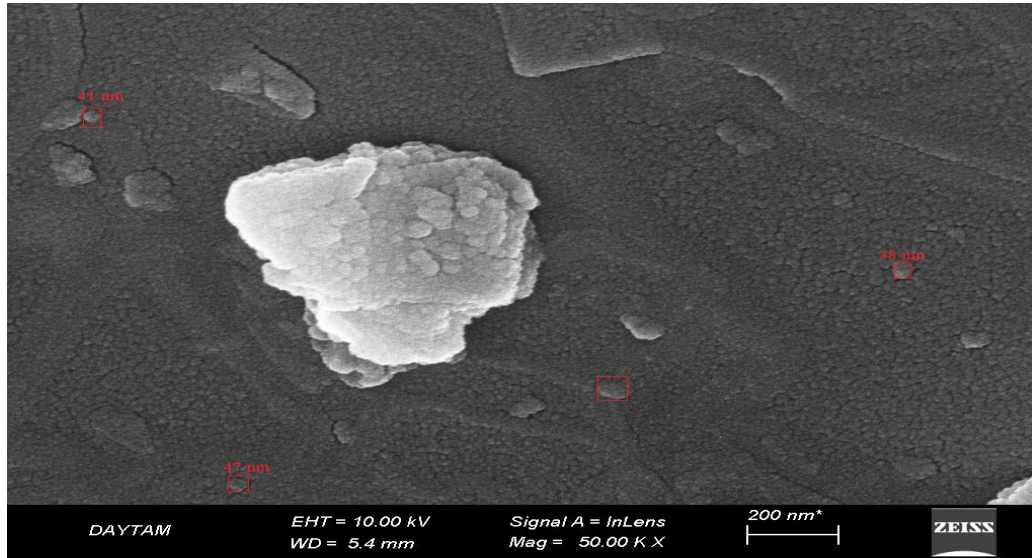
Şekil 6.55. 30 °C, %30 HF 24 saat koşullarında üretilen MXene’in SEM görüntüsü.

Şekil 6.56'de 30 °C, %40 HF 24 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü verilmiştir. MAX fazında tanecik boyutları yaklaşık 54-43 nm arasındadır. Bu sentez şartında sentezlenen MXene'in tanecik boyutları ortalama 22-32nm arasına olduğu gözlemlendi. Artan HF konsantrasyonu tanecik boyutunu azalttığı gözlemlendi.



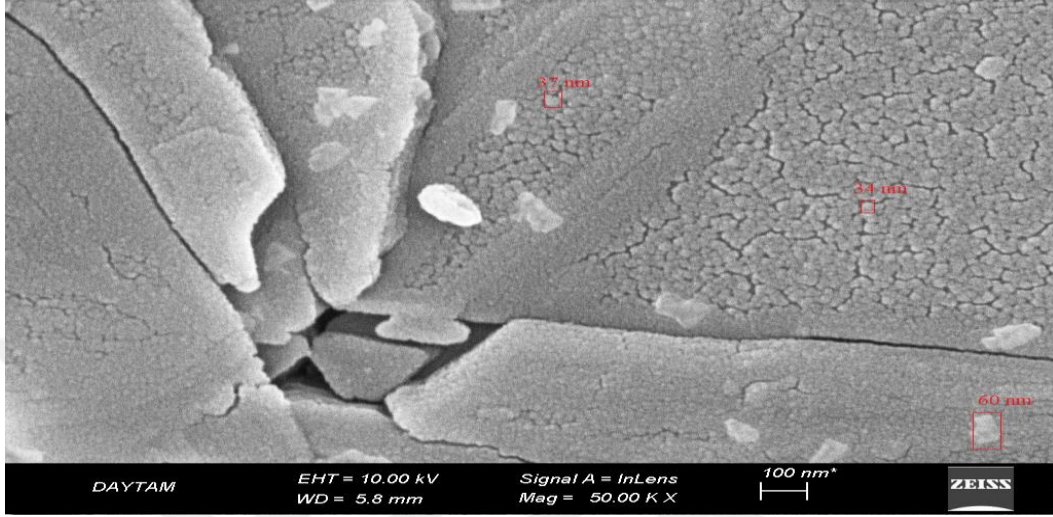
Şekil 6.56. 30 °C, %40 HF 24 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü.

Şekil 6.57'de 40 °C, %20 HF 24 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü verilmiştir. Sabit sıcaklık ve sabit reaksiyon süresi içerisinde değişen aşındırıcı konsantrasyonları ile kıyaslandı. MAX fazında tanecik boyutları yaklaşık 54-43 nm arasındadır. Bu sentez şartında sentezlenen MXene'in tanecik boyutları ortalama 38nm-41nm arasına olduğu gözlemlendi.



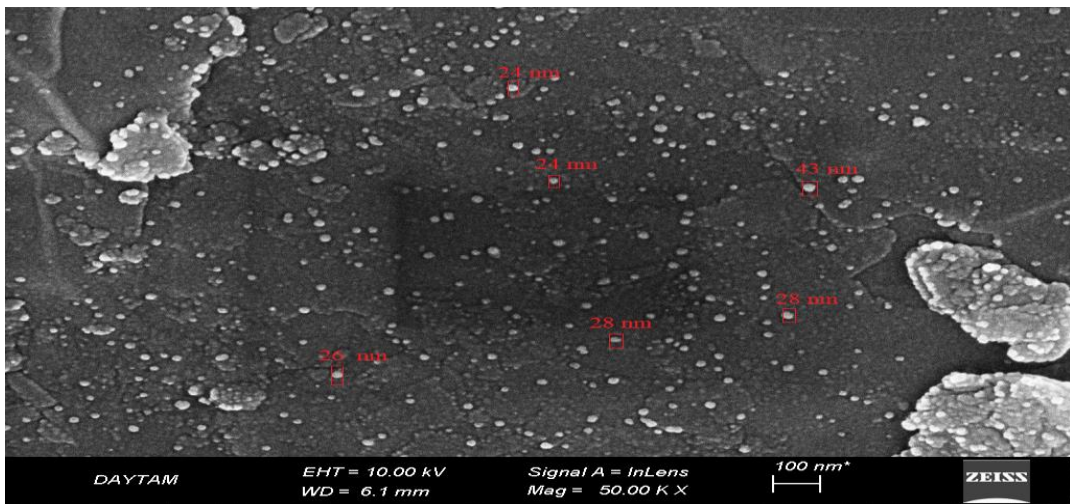
Şekil 6.57. 40 °C, %20 HF 24 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü.

Şekil 6.58’de 40 °C, %30 HF 24 saat koşullarında üretilen MXene’in SEM görüntüsü verilmiştir. MAX fazında tanecik boyutları yaklaşık 54-43 nm arasındadır. Bu sentez şartında sentezlenen MXene’in tanecik boyutları ortalama 34nm-37nm arasına olduğu gözlemlendi. Artan HF konsantrasyonu tanecik boyutunu azalttığı gözlemlendi.



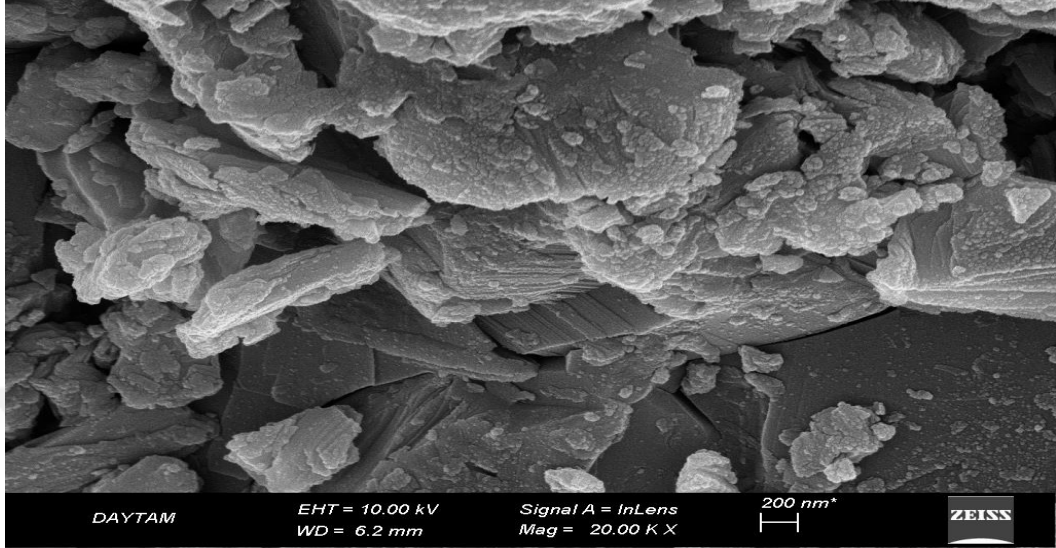
Şekil 6.58. 40 °C, %30 HF 24 saat koşullarında üretilen MXene’in SEM görüntüsü.

Şekil 6.59’de 40 °C, %40 HF 24 saat koşullarında üretilen MXene’in SEM görüntüsü verilmiştir. MAX fazında tanecik boyutları yaklaşık 54-43 nm arasındadır. Bu sentez şartında sentezlenen MXene’in tanecik boyutları ortalama 24nm-28nm arasına olduğu gözlemlendi. Sonuç olarak tüm sıcaklık şartlarında artan HF konsantrasyonu MAX fazını iyi aşındırdığı ve daha küçük tanecikli yapının oluştuğu gözlemlendi.



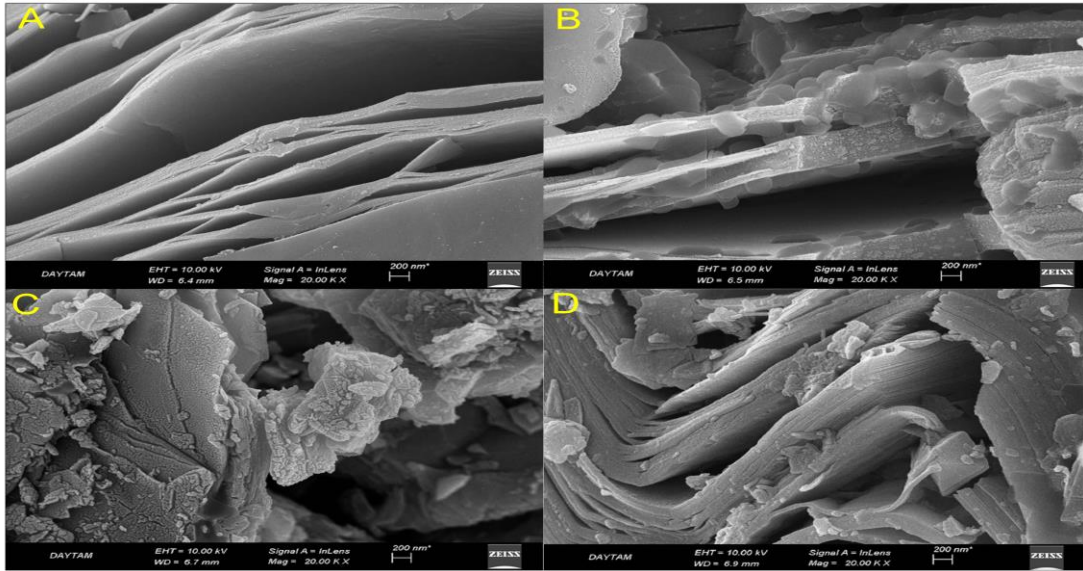
Şekil 6.59. 40 °C, %40 HF 24 saat koşullarında üretilen MXene’in SEM görüntüsü.

Doğrudan HF ile sentezlenen tüm MXene'lerin SEM görüntüleri verilmiş ve sentezlenen tüm MXene'ler de akordiyonik yapının oluştuğu gözlemlendi. Şekil 6.60'da MAX fazının SEM görüntüsü verilmiştir.



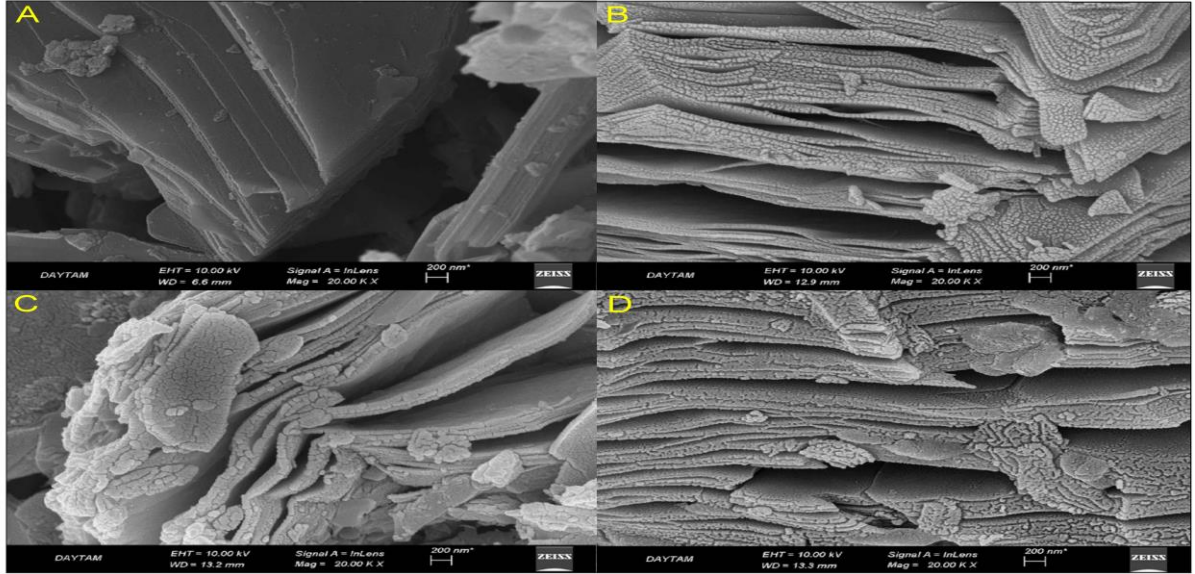
Şekil 6.60. Ti_3AlC_2 MAX'ın SEM görüntüsü

Şekil 6.61'de 20 °C, %20 HF ve sırasıyla 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüleri verilmiştir.



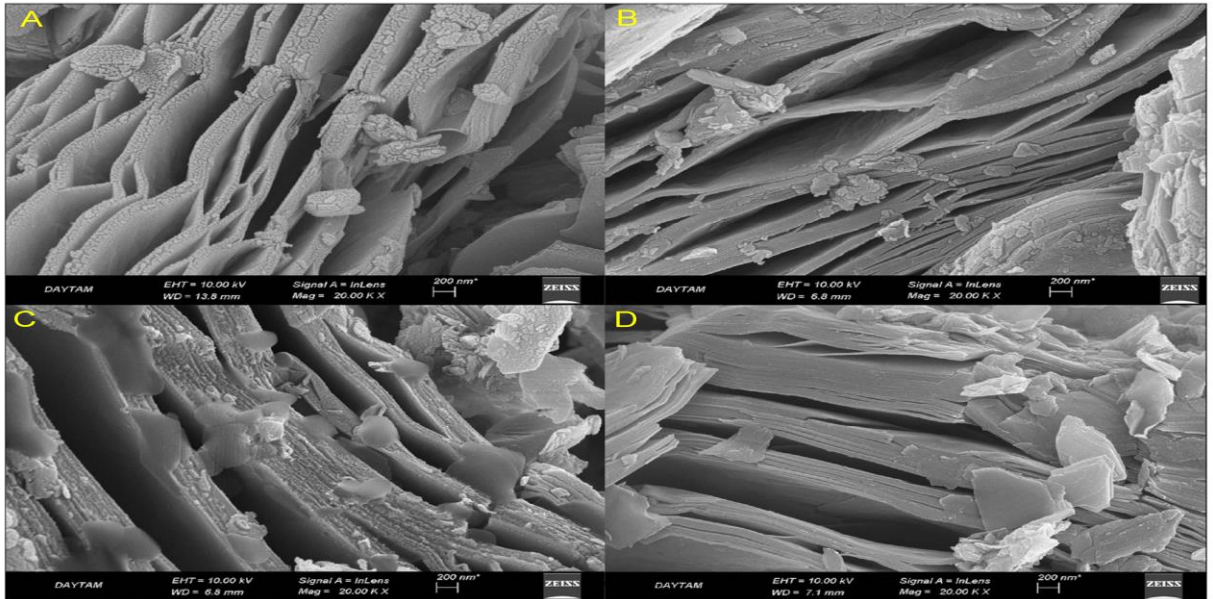
Şekil 6.61. A) 20 °C, %20 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, B) 20 °C, %20 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, C) 20 °C, %20 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, D) 20 °C, %20 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü.

Şekil 6.62’de 20 °C, %20 HF ve sırasıyla 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene’in SEM görüntüleri verilmiştir.



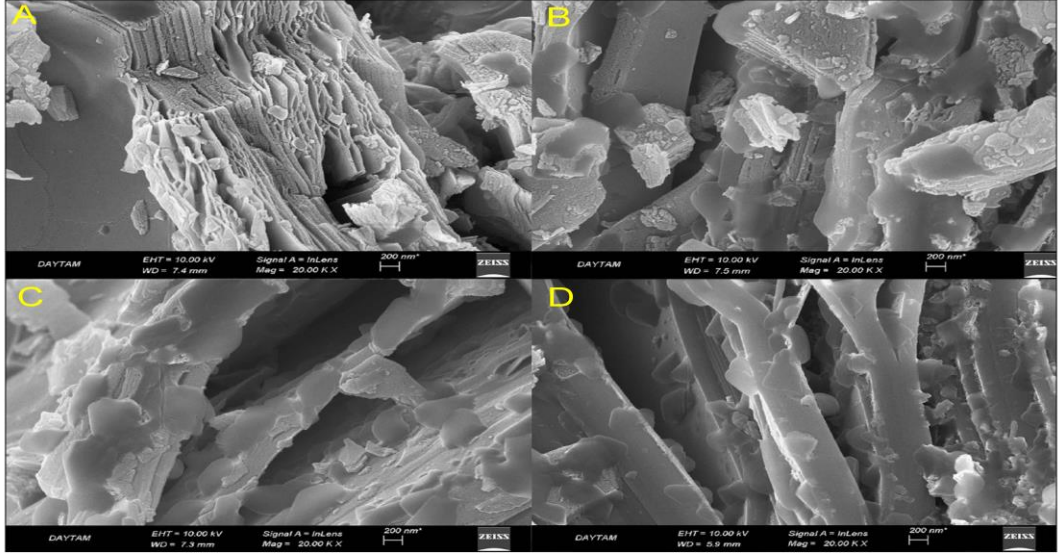
Şekil 6.62. A) 20 °C, %30 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene’in SEM görüntüsü, B) 20 °C, %30 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene’in SEM görüntüsü, C) 20 °C, %30 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene’in SEM görüntüsü, D) 20 °C, %30 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene’in SEM görüntüsü.

Şekil 6.63’de 20 °C, %40 HF ve sırasıyla 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene’in SEM görüntüleri verilmiştir.



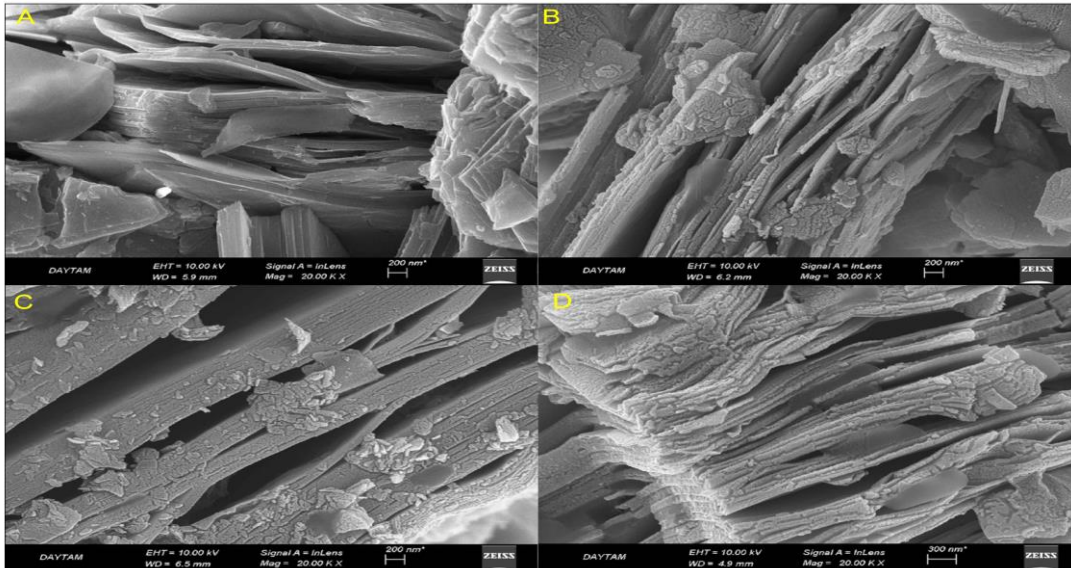
Şekil 6.63. A) 20 °C, %40 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene’in SEM görüntüsü, B) 20 °C, %40 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene’in SEM görüntüsü, C) 20 °C, %40 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene’in SEM görüntüsü, D) 20 °C, %40 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene’in SEM görüntüsü.

Şekil 6.64'de 30 °C, %20 HF ve sırasıyla 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüleri verilmiştir.



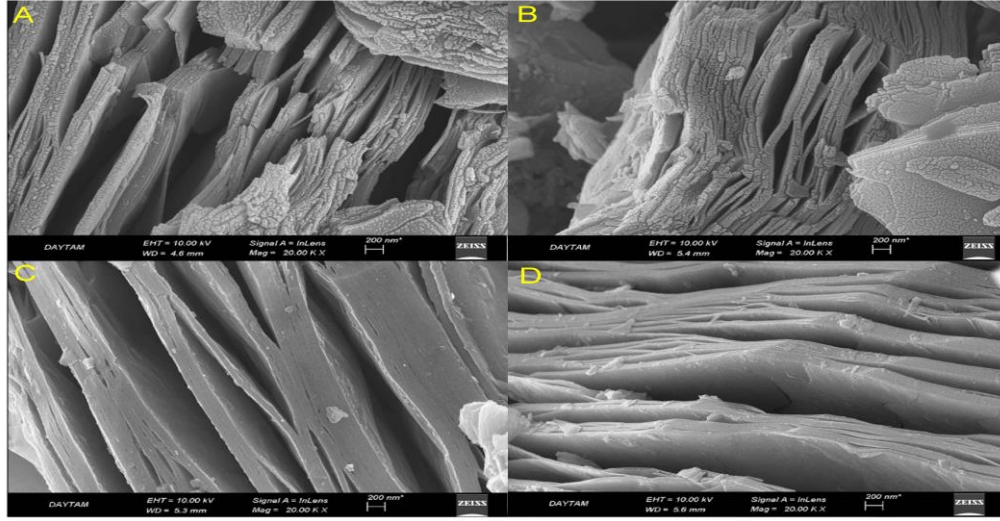
Şekil 6.64. A) 30 oC, %20 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, B) 30 oC, %20 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, C) 30 oC, %20 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, D) 30 oC, %20 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü.

Şekil 6.65'de 30 °C, %30 HF ve sırasıyla 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüleri verilmiştir.



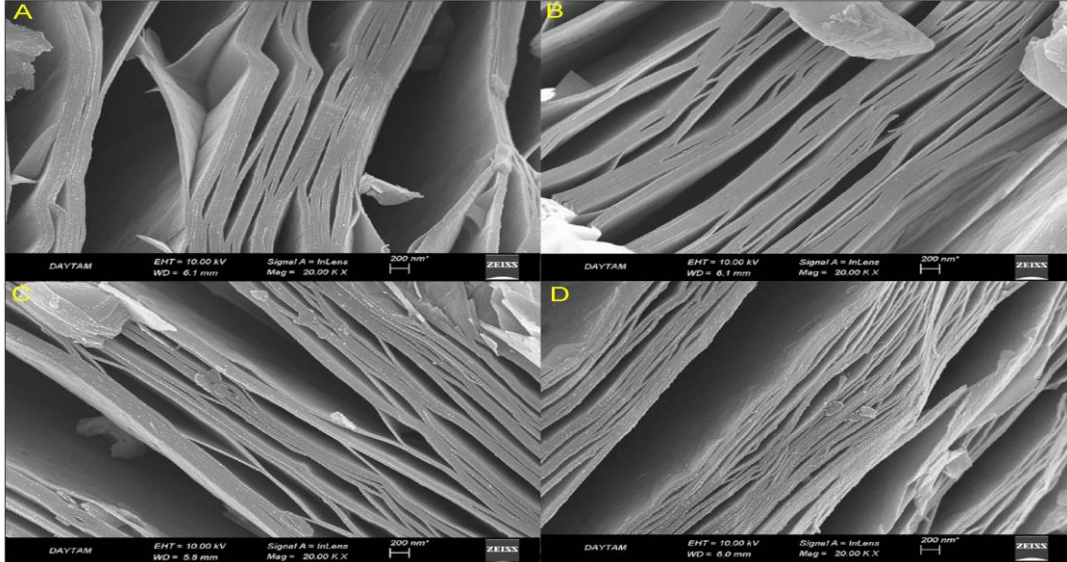
Şekil 6.65. A) 30 °C, %30 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, B) 30 °C, %30 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, C) 30 °C, %30 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, D) 30 °C, %30 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü.

Şekil 6.66'de 30 °C, %40 HF ve sırasıyla 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüleri verilmiştir.



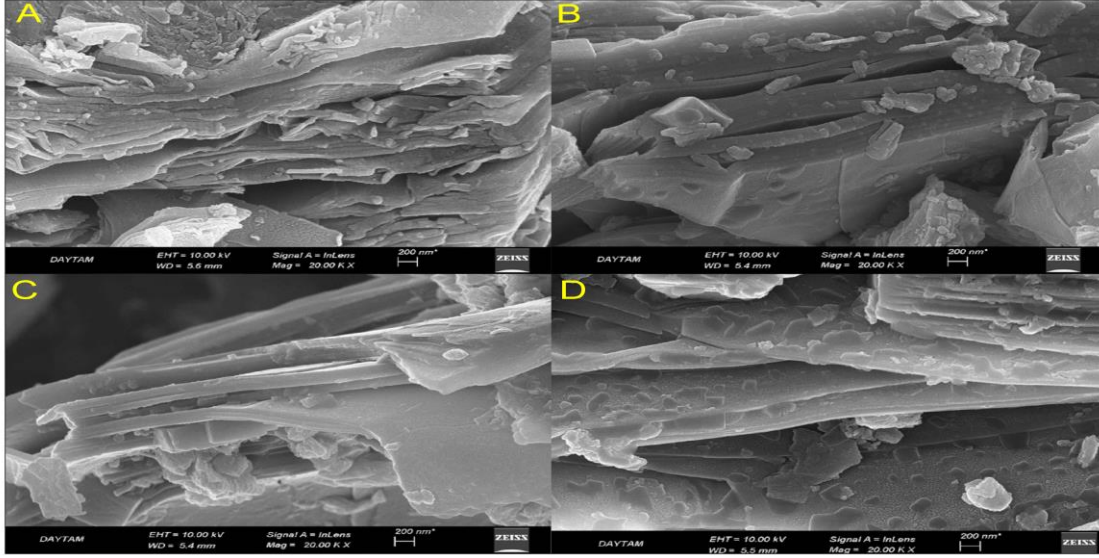
Şekil 6.66. A) 30 °C, %40 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, B) 30 °C, %40 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, C) 30 °C, %40 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, D) 30 °C, %40 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü.

Şekil 6.67'de 40 °C, %20 HF ve sırasıyla 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüleri verilmiştir.



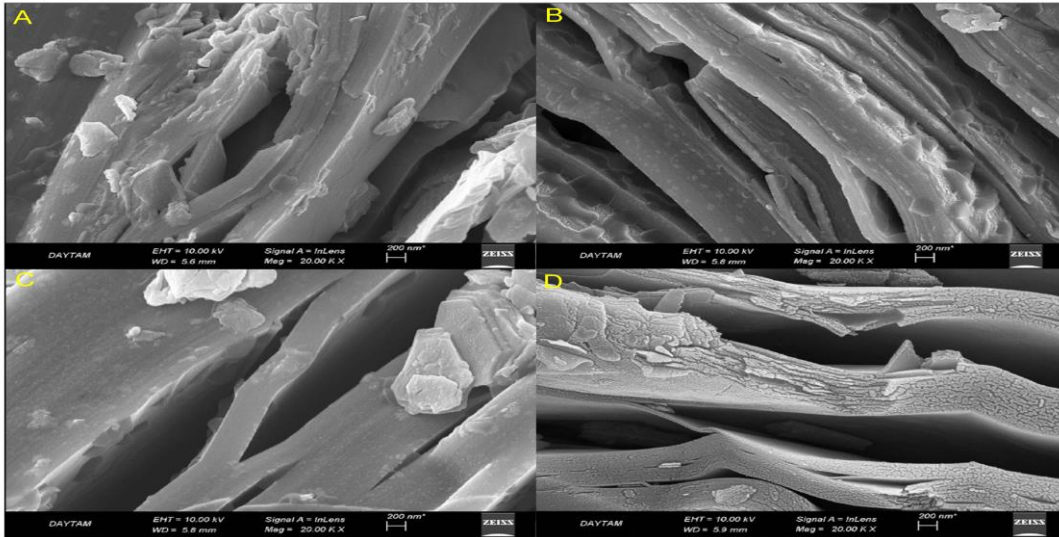
Şekil 6.67. A) 40 °C, %20 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, B) 40 °C, %20 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, C) 40 °C, %20 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, D) 40 °C, %20 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü.

Şekil 6.68'de 40 °C, %30 HF ve sırasıyla 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.68. A) 40 °C, %30 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, B) 40 °C, %30 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, C) 40 °C, %30 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, D) 40 °C, %30 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü.

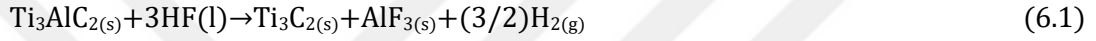
Şekil 6.69'de 40 °C, %40 HF sırasıyla ve 12, 24, 48, 72 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüleri verilmiştir.



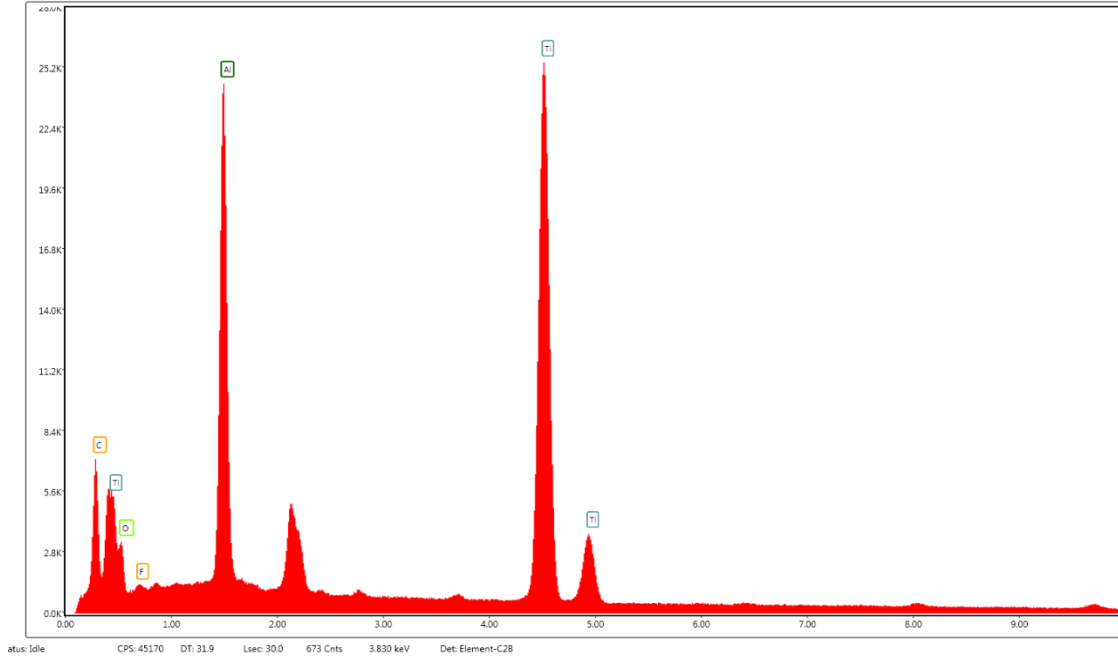
Şekil 6.69. A) 40 °C, %40 HF ve 12 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, B) 40 °C, %40 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, C) 40 °C, %40 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü, D) 40 °C, %40 HF ve 72 saat koşullarında üretilen MXene'in SEM görüntüsü.

6.1.4. EDS Analizi

MAX'ın ve sentezlenen MXene'lerin EDS spektrumu verilmiştir. Sabit aşındırıcı konsantrasyonunda (%20) HF farklı sıcaklık değerlerinde (20 °C, 30 °C, 40 °C) 24 saat reaksiyon süresi içinde üretilen MXene'in kaydedilen EDS spektrumları karşılaştırmalı olarak sunuldu. MAX'ın EDX analizinde özellikle Ti, Al ve C elementlerinin varlığını gösterirken Ti ile Al piklerinin oldukça şiddetli olduğu görüldü. MXenen'in farklı koşullarındaki EDS spektrumları birbirleriyle benzerlik taşımalarına rağmen, özellikle MAX'ınki ile kıyaslandığında en bariz değişiklik şiddetli olan Al pikinde önemle küçülme olduğu görüldü. Ancak üretilen MXene'lerin hala Al içermesi iki nedene bağlanabilir. Onlardan biri karışımda MAX fazının kalmış olması ki bu olguyu XPS ve XRD analizleri de desteklemektedir. Diğer taraftan MAX fazının MXene fazına dönüşümü aşağıdaki kimyasal tepkimeyle özetlenirse;

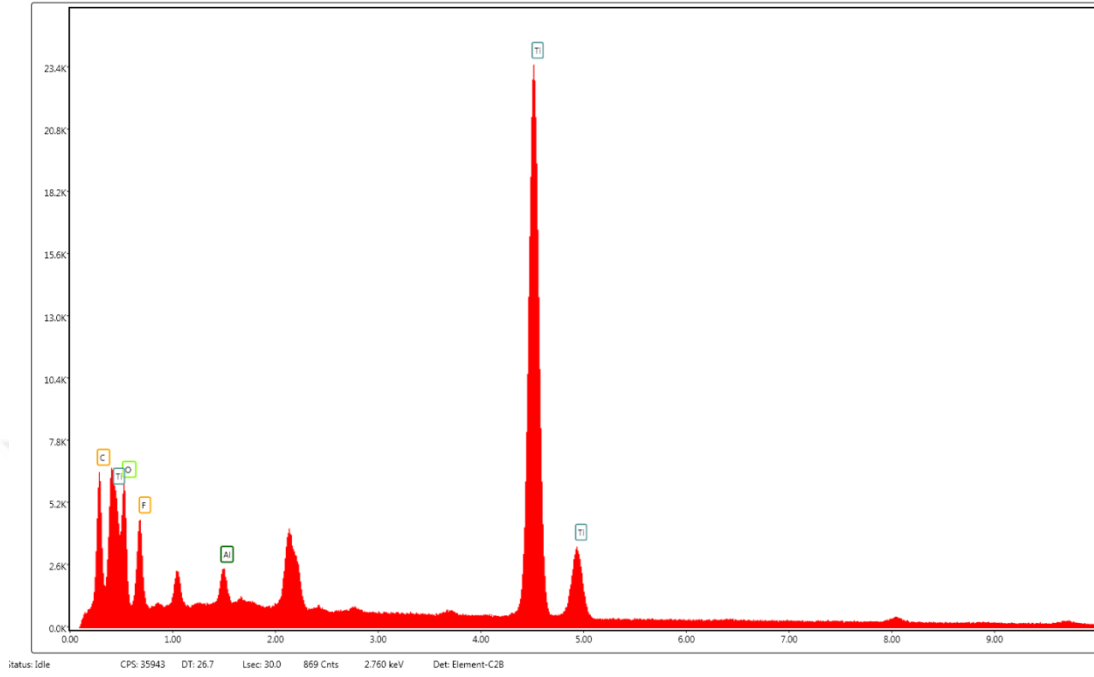


Denklem (1) de görüldüğü gibi MAX'ın aşındırma işlemi sırasında Ti_3C_2 kristalleri ile AlF_3 , oluşumu mümkün görülmektedir. AlF_3 suda, asitte ve bazda tamamen çözünemediğinden MXene içerisinde Al safsızlığı olarak kaldığı düşünülmektedir. Aynı zamanda üretilen MXene'lerde dönüşmeyen MAX içeriği XPS verilerinden de ortaya konuldu. Sentezlenen MXene'in yüzey gruplarında beklenildiği gibi F,O grupları görüldü. Ayrıca artan sıcaklık MAX fazındaki Al atomlarının giderimini arttırdığı gözlemlendi. Şekil 6.70'de MAX fazının EDS verileri verilmiştir.



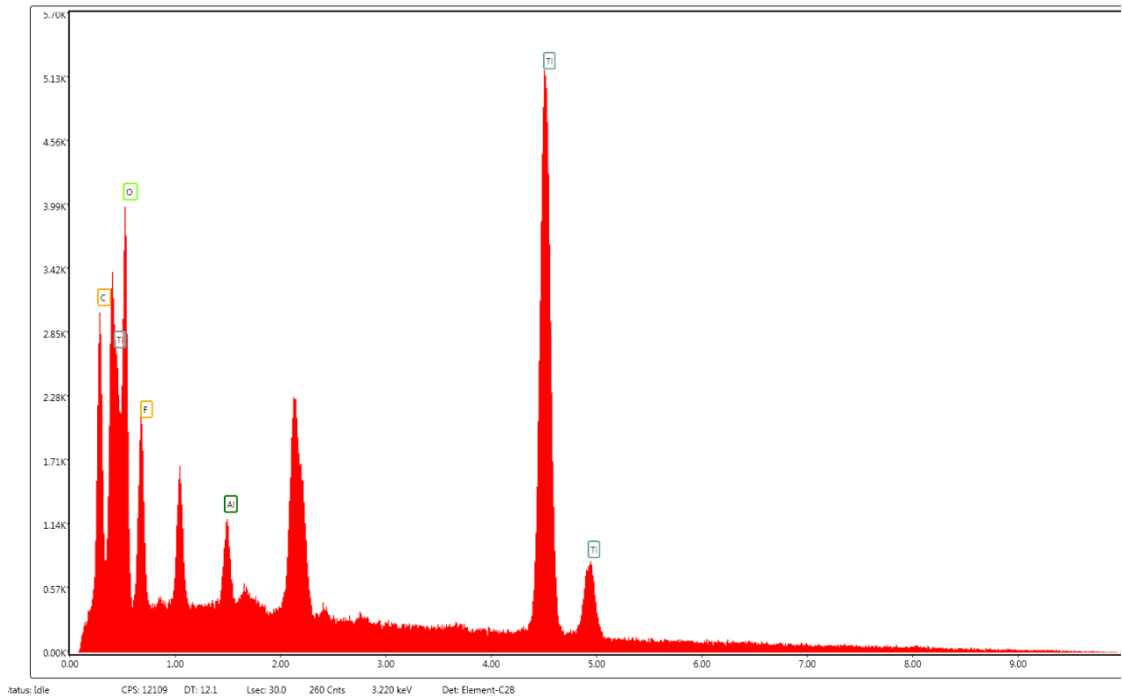
Şekil 6.70. Ti_3AlC_2 MAX'ın EDS verileri.

Şekil 6.71’de 20 °C, %20 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene’in EDS verileri verilmiştir.



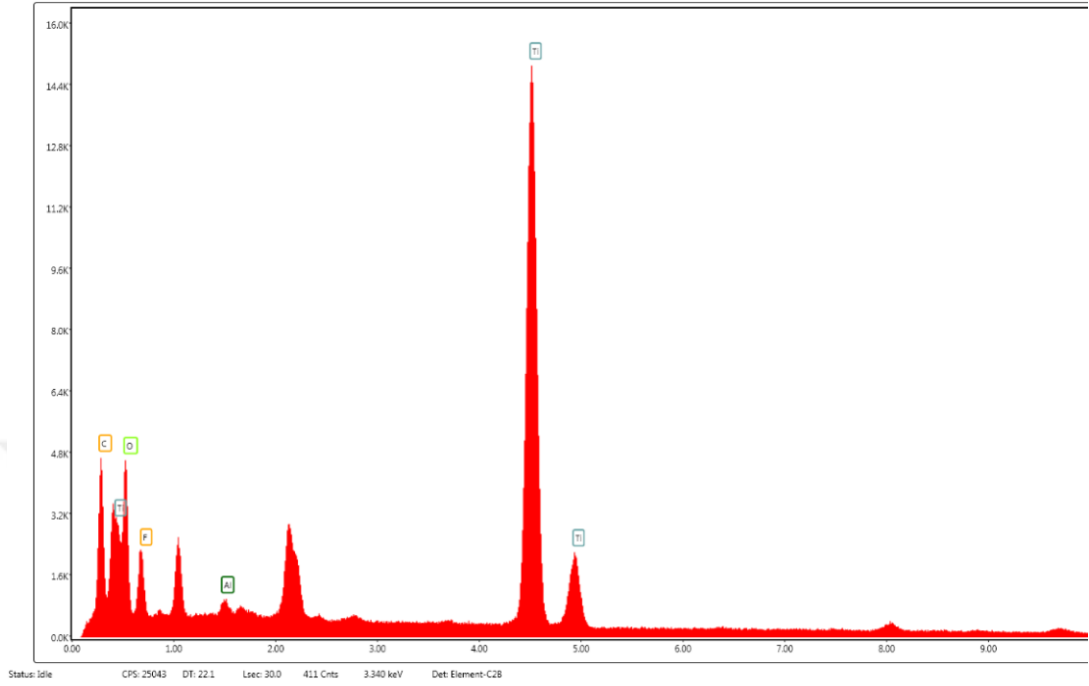
Şekil 6.71. 20 °C, %20 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene’in EDS verileri.

Şekil 6.72’de 30 °C, %20 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene’in EDS verileri verilmiştir.



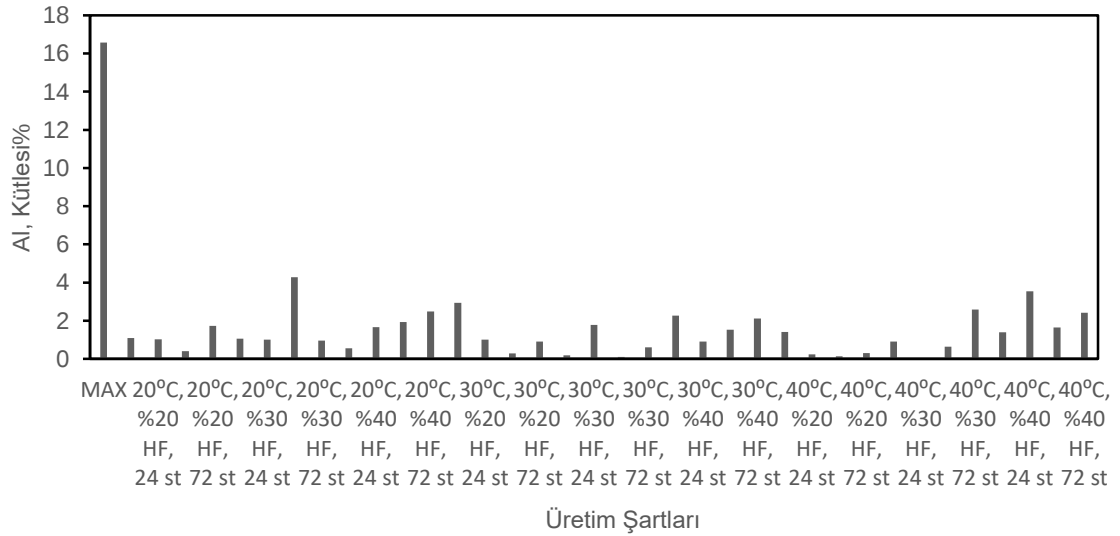
Şekil 6.72. 30 °C, %20 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene’in EDS verileri.

Şekil 6.73’de 40 °C, %20 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene’in EDS verileri verilmiştir. Görüldüğü gibi artan sıcaklık Al pikiinde azalmaya neden olmuştur.



Şekil 6.73. 40 °C, %20 HF ve 24 saat koşullarında üretilen MXene’in EDS verileri.

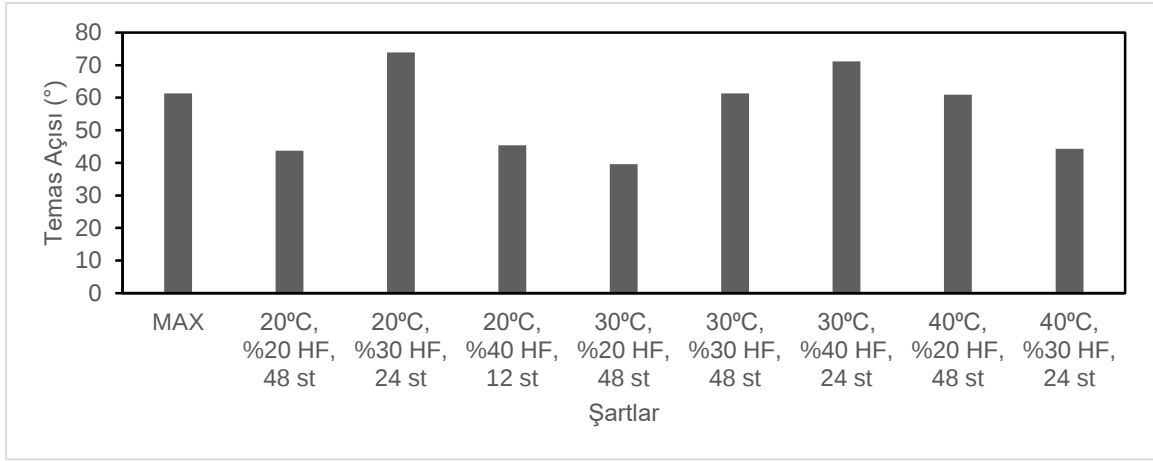
Tüm doğrudan HF ile sentezlenen MXene’lerin ve MAX fazında bulunan Al miktarları yüzde olarak Şekil 6.74 ’de verilmiştir.



Şekil 6.74. MAX fazı ve sentezlenen tüm MXene’lerin Al miktarları kütlege % grafiği.

6.1.5. Temas Açısı Değerleri

HF aşındırma yöntemi ile farklı üretim şartlarında üretilen Ti_3C_2Tx 'lerden (MXene'ler) XRD analizleri baz alınarak en iyi Al giderimi olan 8 farklı MXene ve Ti_3AlC_2 (MAX fazı) soğuk pres diskleri üzerine damlatılan su damlacıkları ile temas açısı ölçüm sonuçları Şekil 6.75'de verilmiştir. Farklı sıcaklık ve farklı konsantrasyonlarda HF ile farklı sürelerde aşındırma yapılarak elde edilen Ti_3C_2Tx örneklerinin su temas açısı değerleri $40-74^\circ$ aralığında olduğu gözlemlendi. Yüzey gruplarında mevcut olan -F termininin, -OH ve -O gruplarından daha hidrofobik olduğundan temas açısındaki azalmayı, HF ile aşındırma işleminden sonra OH yüzey gruplarının varlığı ile açıklanabilir [99]. Hidrofiliklik derecesi en yüksek olan $30^\circ C$, %20 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene olduğu gözlemlendi.

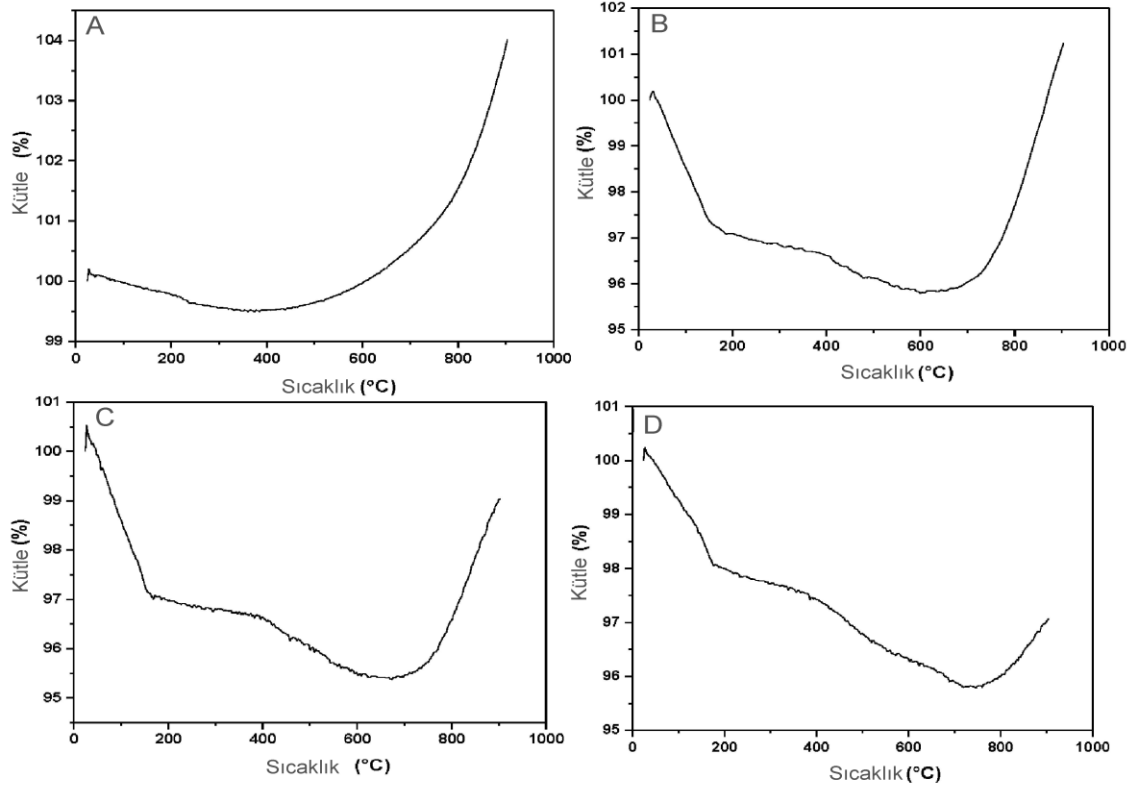


Şekil 6.75. MAX fazı ve farklı sentez şartlarıyla sentezlenen MXene'lerin temas açısı değerleri.

6.1.6. TGA Analizi

MAX fazı ve sentezlenen MXene'lerin termal karalılığını ve sıcaklığa karşı direncini gözlemlemek amacıyla yapılan TGA analizi sonuçlarında MXene $600-750^\circ C$ kadar kütle kaybı ve sonrasında kütle artışı gözlemlendi $200^\circ C$ 'ye kadar lineer azalan kütle MXene'in yapısında adsoplanan su ve kalan HF molekülerinin varlığını temsil ettiği düşünülmüş ve yaklaşık olarak tüm sentezlenen MXene'lerde %3 lük bir kütle kaybına denk gelmektedir $200-750^\circ C$ sıcaklıktaki ortalama %2 lik kütle kaybı yüzey sonlandırma gruplarının MXene yapısından ayrılmasına bağlanmıştır $750^\circ C$ sonrası kütle artışı ise MXene'lerin oksitlenmenin olduğu gözlemlendi. Benzer şekilde literatürdeki çalışmalarla alınan sonuçlar birbirlerini destekler niteliktedir [32]. MAX fazında ise $200^\circ C$ kadar %0.5 lik kütle kaybı bünyesinde bulunan nem den kaynaklanmaktadır. $200^\circ C$ sonrası artan kütlesi ise oksitlendiğini göstermektedir. Ayrıca yüksek sıcaklıkta sentezlenen MXene'in termal karalılığının daha yüksek olduğu ve MAX fazından sentezlenen MXene'in termal karalılığı MAX fazından daha termal olarak karalı olduğu

gözlemlendi. Şekil 6.76’te MAX fazı ve sabit HF konsantrasyonu ve reaksiyon süresinde (%20 HF, 48 saat) farklı sıcaklıklara (20 °C, 30 °C, 40 °C) ait TGA grafikleri verilmiştir.



Şekil 6.76. A) MAX fazı Ti_3AlC_2 TGA grafiği B) 20 °C, %20 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene’in TGA grafiği C) 30 °C, %20 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene’in TGA grafiği D) 40 °C, %20 HF ve 48 saat koşullarında üretilen MXene’in TGA grafiği.

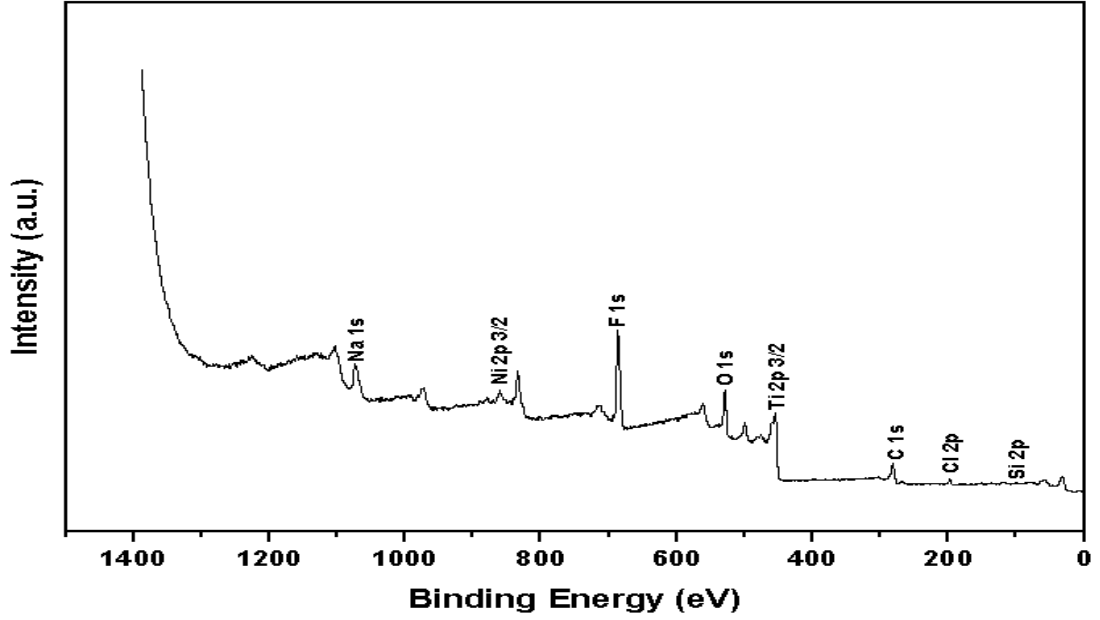
6.2. LiF+HCl Yoluyla Sentezlenmiş $Ti_3C_2T_x$ ‘in Karakterizasyonu

LiF+HCl kullanılarak yerinde HF üretilip sentezlenen 4 adet MXene ve MAX fazının karakterizasyon çalışmaları verildi. Düşük sıcaklıklarda istenilen miktarda Al giderimi sağlanmadığından dolayı sıcaklıklar 50 °C ve 60 °C olarak seçildi.

6.2.1. XPS Analizleri

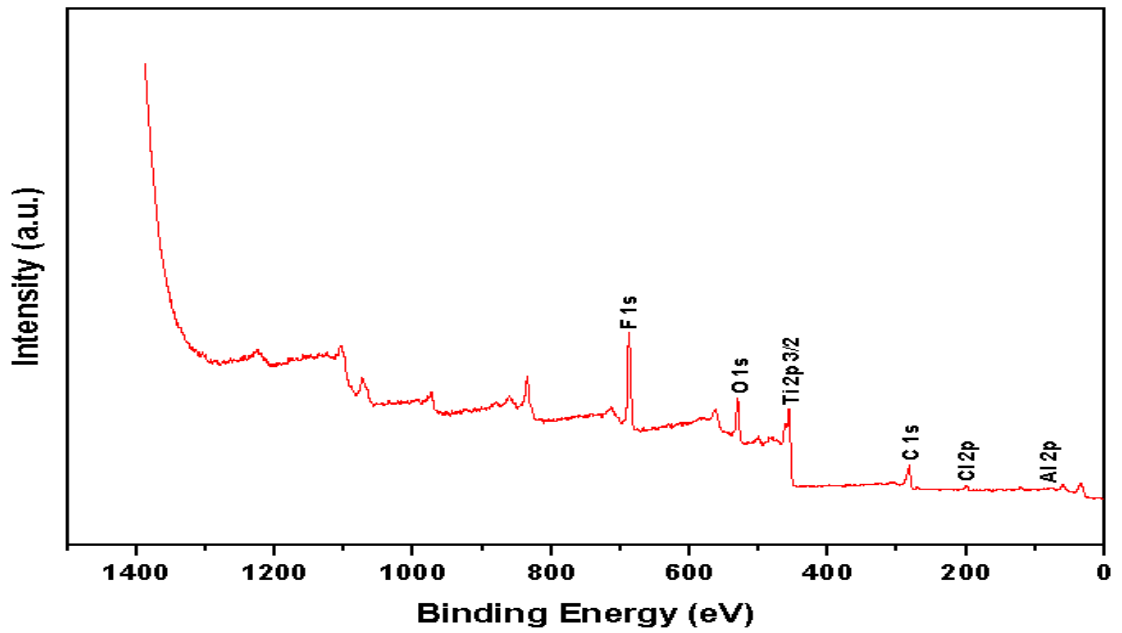
MXene’nin yüzey kimyası hakkında daha fazla bilgi elde etmek için XPS analizleri gerçekleştirilmiştir. Doğrudan HF ile sentezlenen MXene benzer şekilde Dik yönde örnek yüzeyi üzerinde kaydedilen XPS taramalarından, $Ti_3C_2T_x$ MXene’nin elementel yapısında C, O, Ti ve F elementleri gözlemlendi. Özellikle, yapısında Ti ve C elementleri $Ti_3C_2T_x$ MXene’nin kendi yapısından kaynaklanmaktadır. F ve O elementleri $Ti_3C_2T_x$ ’nin yüzey gruplarından dolayı gözlemlendi. Şekil 6.4 MAX fazı ile Üretilen $Ti_3C_2T_x$ MXene’le kıyaslandığında Al atomları düşük düzeyde de olsa Al 2p (74-75 eV) bağlanma enerjisinde olduğu görülmektedir. Şekil 6.77’te

50°C’de %33,13 HCl + 1,88 g LiF karışımı ile 27 saat boyunca aşındırma işlemi ile sentezlenmiş MXene’in XPS grafiği verilmiştir.



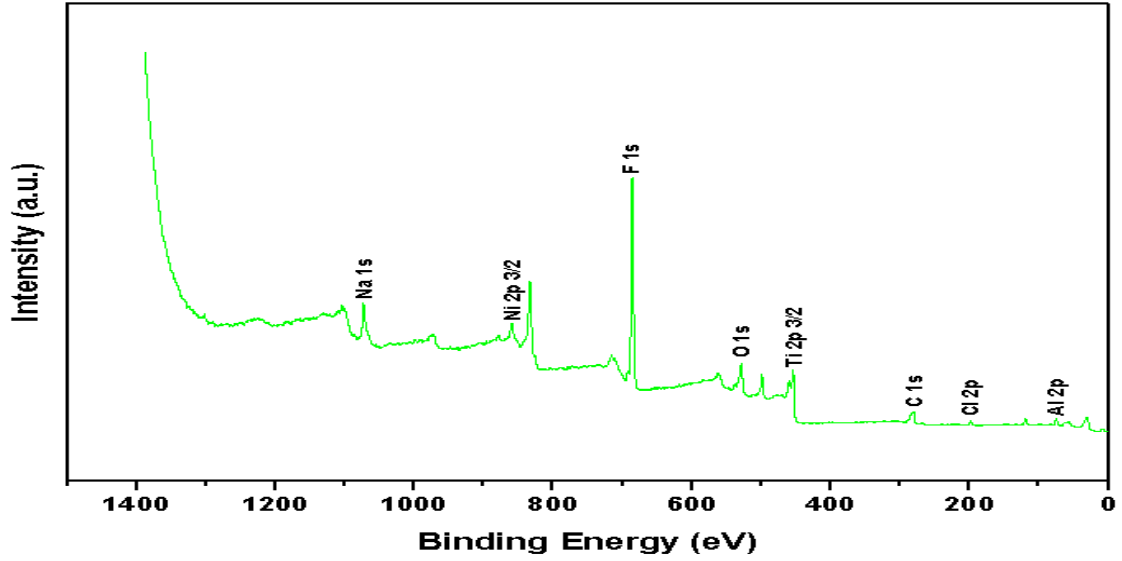
Şekil 6.77. 50°C, %33,13 HCl, 1.88 g LiF ve 27 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS grafiği.

Şekil 6.78’te 50°C’de %33,13 HCl + 1,88 g LiF karışımı ile 57 saat boyunca aşındırma işlemi ile sentezlenmiş MXene’in XPS grafiği verilmiştir.



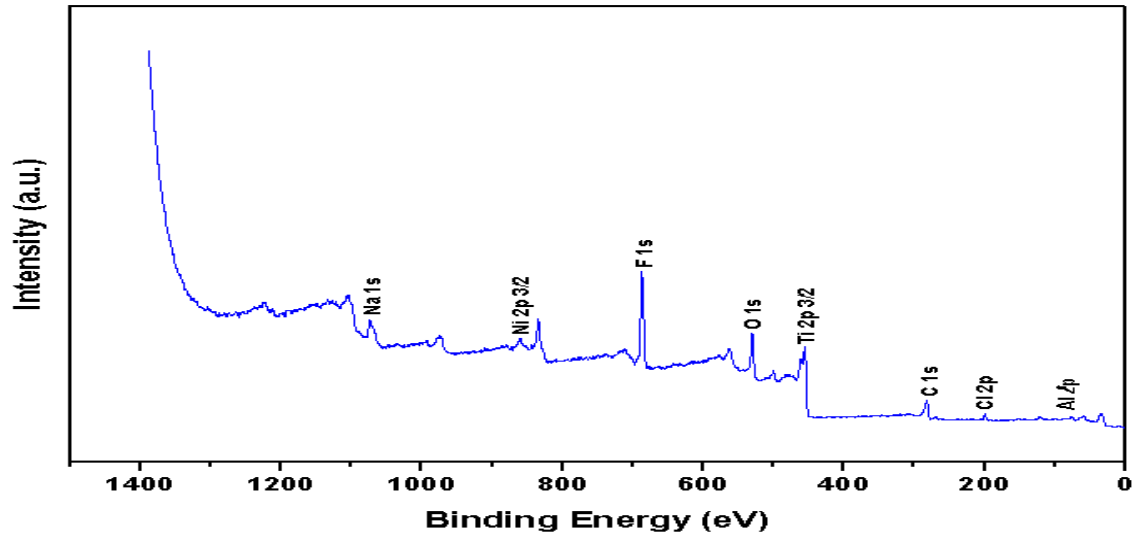
Şekil 6.78. 50°C, %33,13 HCl, 1.88 g LiF ve 57 saat koşullarında üretilen MXene’in XPS grafiği.

Şekil 6.79'te 60°C'de %33,13 HCl + 1,88 g LiF karışımı ile 27 saat boyunca aşındırma işlemi ile sentezlenmiş MXene'in XPS grafiği verilmiştir.



Şekil 6.79. 60°C, %33,13 HCl, 1.88 g LiF ve 27 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS grafiği.

Şekil 6.80'de 60°C'de %33,13 HCl + 1,88 g LiF karışımı ile 57 saat boyunca aşındırma işlemi ile sentezlenmiş MXene'in XPS grafiği verilmiştir.

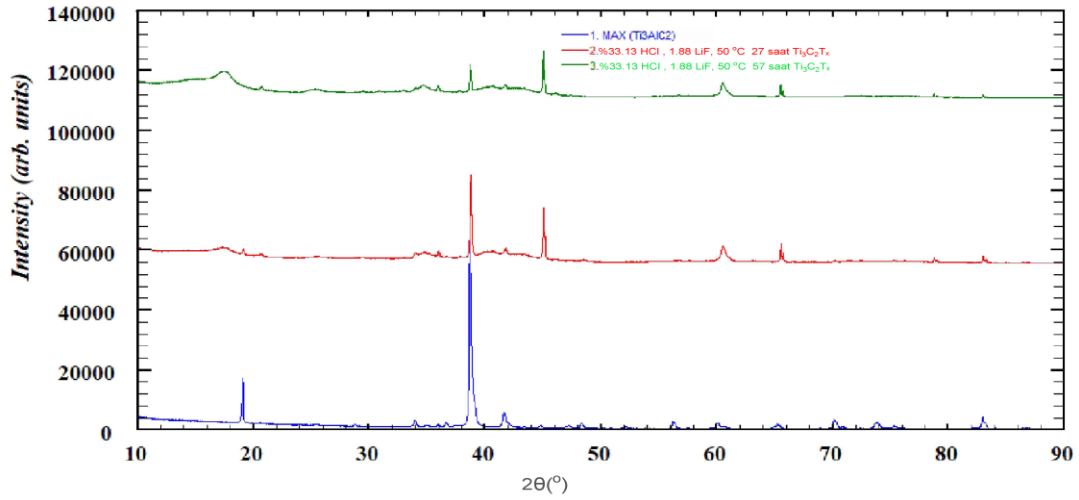


Şekil 6.80. 60°C, %33,13 HCl, 1.88 g LiF ve 57 saat koşullarında üretilen MXene'in XPS grafiği.

6.2.2. XRD Analizleri

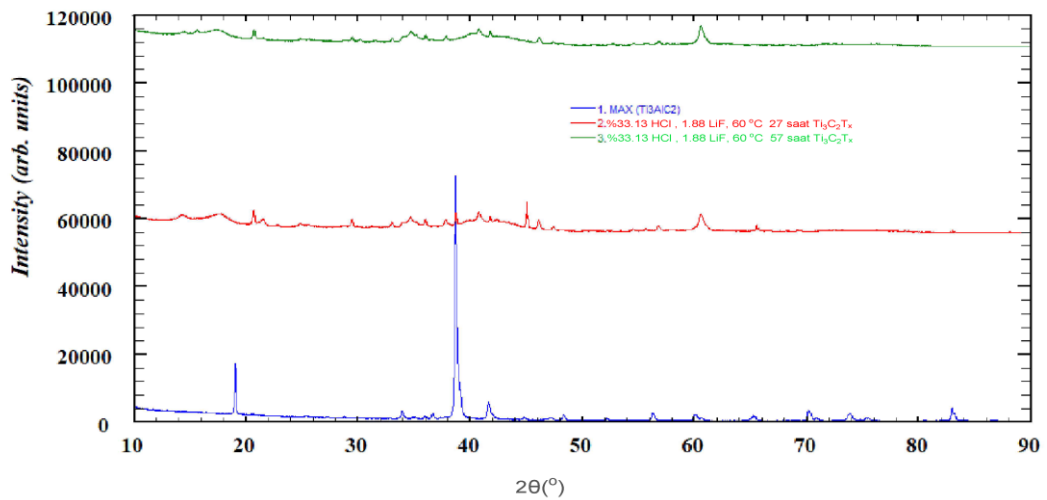
MXene sentezlerinde kullanılan başlangıç materyali MAX fazı (Ti_3AlC_2)'ın ve MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$) aşındırma süreleri ve farklı sıcaklıklar karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Sentez koşulları olarak; 50, 60 °C sıcaklık aralığı, %33.13 HCl derişim aralığı, 1.88 g LiF ve 27, 57 saat zaman

aralığında hazırlanan MXene'in XRD şekilleri MAX'ınki ile kıyaslandığında önemli ölçüde değişiklikler görüldü. 38.6° de görülen pikler MAX'ın en şiddetli ve karakteristik pikleridir. Sentezlenen MXene'lerde Al atomlarını temsil eden bu piklerde azalma ve XPS analizleriyle uyumluluk gösterdi. Şekil 6.81'de %33,13 HCl, 1.88 g LiF 50 °C şartlarında 27 saat ve 57 saatte üretilen MXene'lerin süre etkisi gözlemlmek amacıyla XRD grafiği verilmiştir. Artan reaksiyon süresi MAX fazında bulunan Al atomlarının daha etkin bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlamıştır.



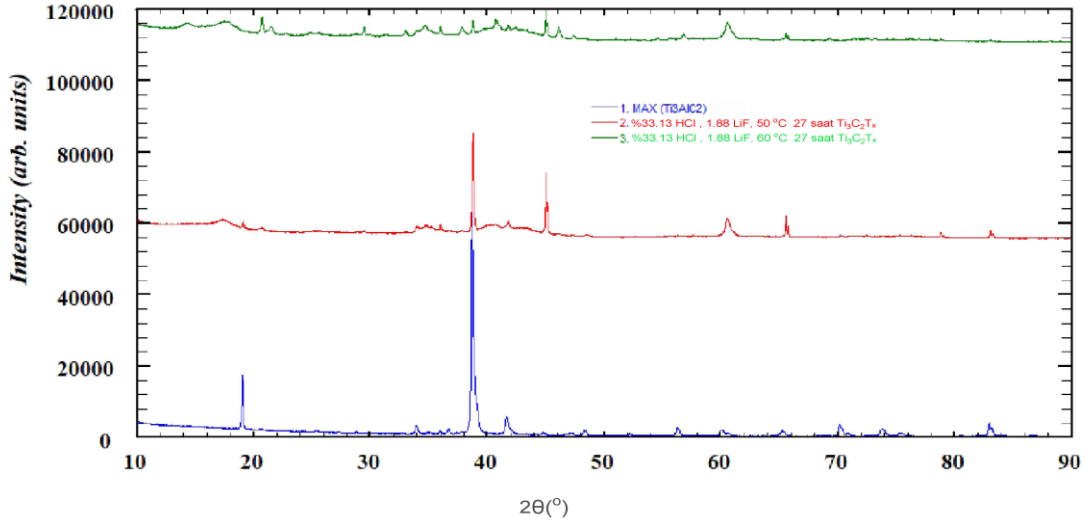
Şekil 6.81. MAX fazı (Ti_3AlC_2) ve 50°C, %33,13 HCl, 1.88 g LiF, 27 ve 57 saat koşullarında sentezlenen MXene'lerin XRD grafikleri.

Şekil 6.82'de %33,13 HCl, 1.88 g LiF 60 °C şartlarında 27 saat ve 57 saatte üretilen MXene'lerin süre etkisi gözlemlmek amacıyla XRD grafiği verilmiştir. Benzer şekilde artan reaksiyon süresi MAX fazında bulunan Al atomlarının daha etkin bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlamıştır.



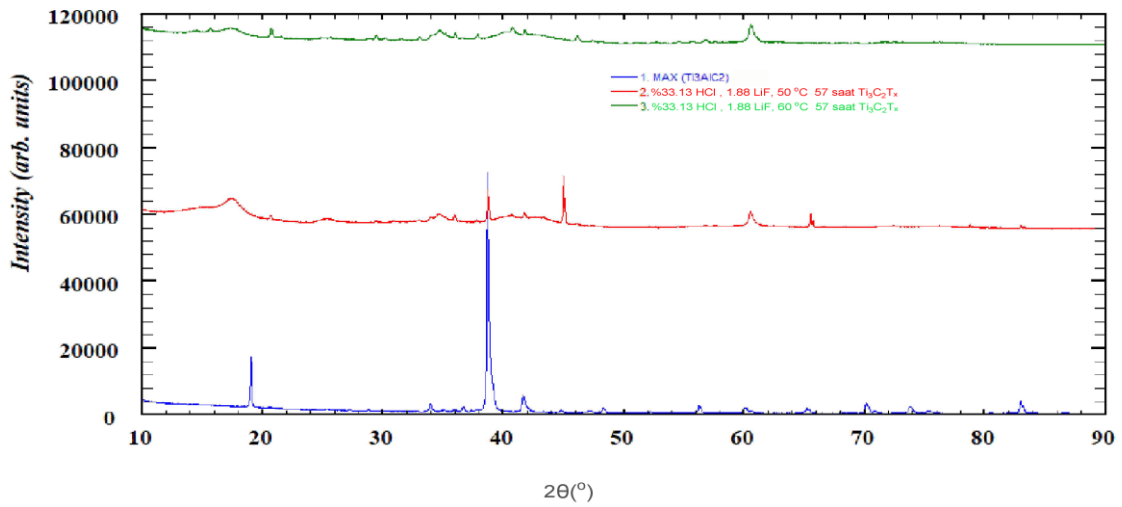
Şekil 6.82. MAX fazı (Ti_3AlC_2) ve 60°C, %33,13 HCl, 1.88 g LiF, 27 ve 57 saat koşullarında sentezlenen MXene'lerin XRD grafikleri.

Şekil 6.83’de %33.13 HCl, 1.88 g LiF 60 °C ve 50 °C sıcaklık değerlerinde 27 saat koşullarında üretilen MXene’lerin sıcaklık etkisi gözlemek amacıyla XRD grafiği verilmiştir. Artan sıcaklık MAX fazında bulunan Al atomlarının daha etkin bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlamıştır.



Şekil 6.83. MAX fazı (Ti₃AlC₂) ve 60°C-50°C, %33,13 HCl, 1.88 g LiF ve 27 saat koşullarında sentezlenen MXene’lerin XRD grafikleri.

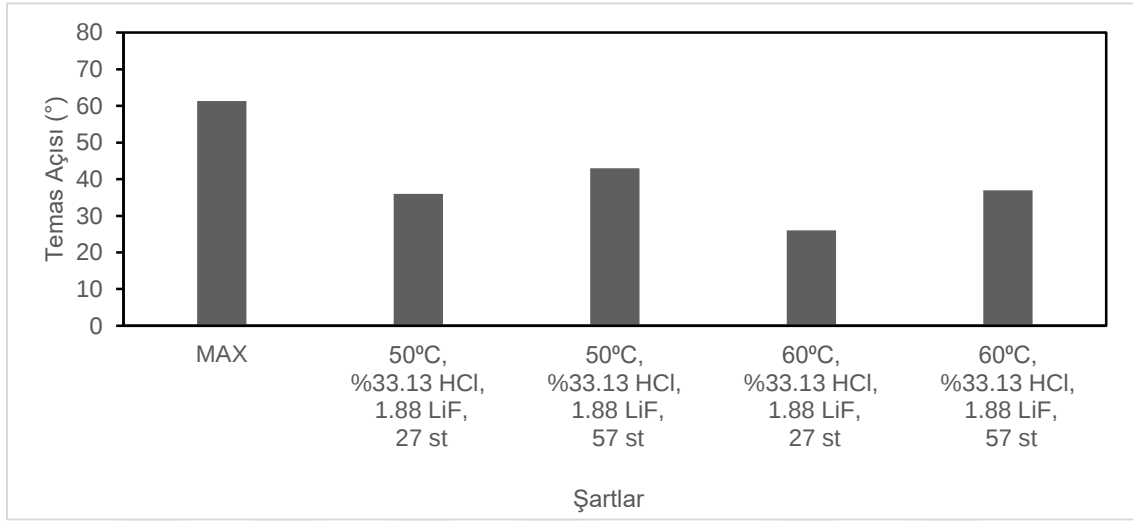
Şekil 6.84’de %33.13 HCl, 1.88 g LiF 60 °C ve 50 °C sıcaklık değerlerinde 57 saat koşullarında üretilen MXene’lerin sıcaklık etkisi gözlemek amacıyla XRD grafiği verilmiştir. Benzer şekilde artan sıcaklık MAX fazında bulunan Al atomlarının daha etkin bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlamış ve 38.6° daki pik neredeyse kaybolmuş olarak gözlemlendi.



Şekil 6.84. MAX fazı (Ti₃AlC₂) ve 60°C-50°C, %33,13 HCl, 1.88 g LiF ve 57 saat koşullarında sentezlenen MXene’lerin XRD grafikleri.

6.2.3. Temas Açısı

LiF+HCl yöntemi ile farklı şartlarda sentezlenen Ti_3C_2Tx 'lerden basınç altında kapsül (pellet) haline numune üzerine su damlacığı damlatılarak temas açıları ölçülmüş ve sonuçları Şekil 6.85'de verilmiştir. MAX fazının temas açısı 61 olarak ölçülürken sentezlenen MXene'lerin temas açıları 26-45° aralığında olduğu gözlemlendi. MXene'in daha düşük temas açısına sahip olması mevcut yüzey gruplarının varlığına bağlanmıştır. LiF+HCl yoluyla sentezlenen MXene'lerin doğrudan HF ile sentezlenenlere göre daha hidrofilik karakterde olduğu tespit edildi.

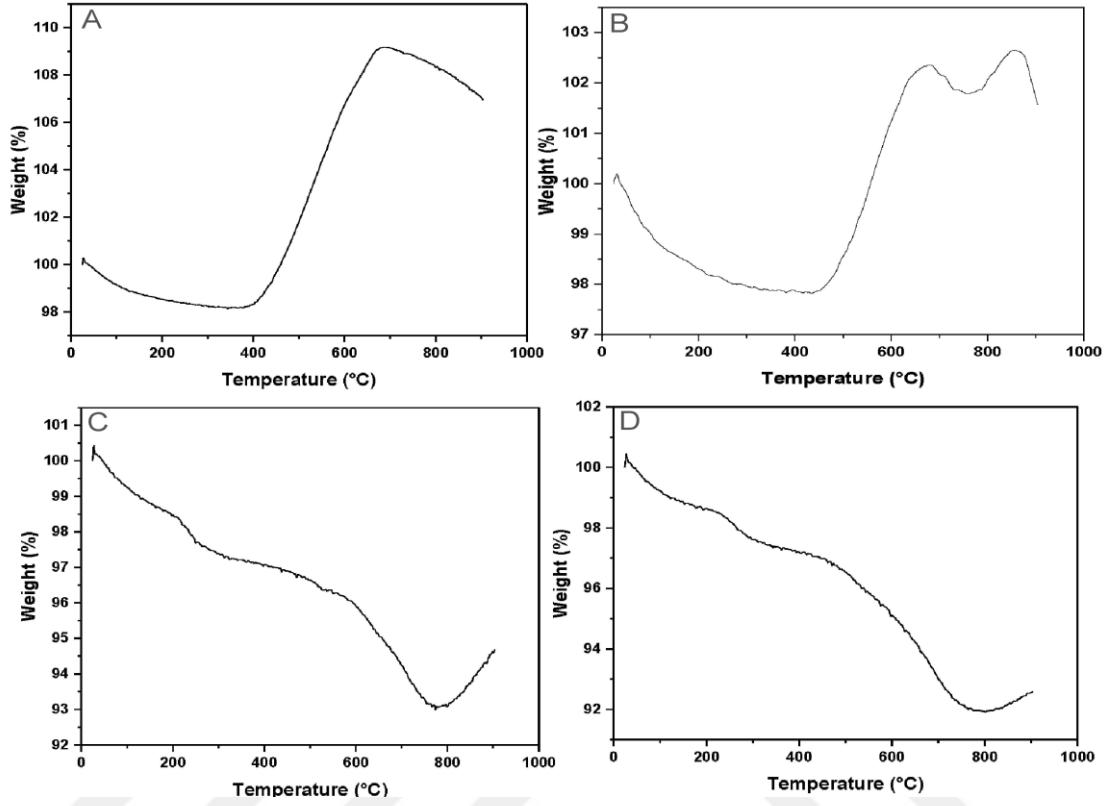


Şekil 6.85. MAX fazı (Ti_3AlC_2) ve 60°C-50°C, %33,13 HCl, 1.88 g LiF ve 27-57 saat koşullarında sentezlenen MXene'lerin temas açıları değerleri.

6.2.4. TGA Analizleri

MAX fazı ve sentezlenen MXene'lerin termal karalılığını ve sıcaklığa karşı direncini gözlemlemek amacıyla yapılan TGA analizi sonuçları Şekil 6.86'de gösterilmiştir. MXene 400-780 °C kadar kütle kaybı ve sonrasında kütle artışı gözlemlenmiştir. 200 °C'ye kadar lineer azalan kütle MXene'in yapısında adsoplanan su ve kalan HF molekülerinin varlığını temsil ettiği düşünülmüş ve yaklaşık olarak tüm sentezlenen MXene'lerde % 3 lük bir kütle kaybına denk gelmektedir. 50 °C sentezlenen MXene'ler 200 °C'den yaklaşık 400 °C kadar % 0.5 kütle kaybı yüzey gruplarının ayrılmasına bağlandı. 400 dereceden sonra artan kütle artışı oksitlenmenin başladığının göstergesi olarak kabul edildi. 60 °C sentezlenen MXene'ler termal etkilere karşı daha yüksek bir direnç göstererek 200 °C ile yaklaşık 780 °C kadar yüzey gruplarının ayrılmasıyla yaklaşık % 5.5 lik bir kütle kaybı gözlemlendi. 780 °C den sonra oksitlenmeye başladığı gözlemlendi. Şekil 6.76 (A) 'da MAX fazı incelendiğinde 200 °C kadar % 0.5 lik kütle kaybı bünyesinde bulunan nem den kaynaklanmaktadır. 200 °C sonrası artan kütlesi ise oksitlendiğini göstermektedir. Ayrıca yüksek sıcaklıkta sentezlenen MXene'in doğrudan HF ile sentezlenen

MXene benzer şekilde termal kararlılığının daha yüksek olduğu ve MAX fazından sentezlenen MXene'in termal kararlılığı MAX fazından daha kararlı bir yapıya sahip olduğu gözlemlendi.



Şekil 6.86. A) %33.13 HCl, 1.88 g LiF, 50 °C ve 27 saat üretilen MXene'in TGA grafiği B) %33.13 HCl, 1.88 g LiF, 50 °C ve 57 saat üretilen MXene'in TGA grafiği C) %33.13 HCl, 1.88 g LiF, 60 °C ve 27 saat üretilen MXene'in TGA grafiği D) %33.13 HCl, 1.88 g LiF, 60 °C ve 57 saat üretilen MXene'in TGA grafiği.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada doğrudan HF ve alternatif olarak sentez esnasında operatör için daha az zararlı olacak şekilde yerinde HF üretmek amacıyla LiF+HCl kullanılarak aşındırma işlemleri uygulanmış ve iki yöntemle de $Ti_3C_2T_x$ MXene yapısı başarılı bir şekilde sentezlenerek karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Çalışmada en optimum sentez koşullarını belirlemek amacıyla 36 adet doğrudan HF ile ve 4 adet numune LiF+HCl ile yerinde HF üretimi sağlanarak sentezlenerek karakterizasyon çalışmaları yapıldı. XRD ve XPS analizleri incelendiğinde doğrudan HF ile sentez koşulları göz önünde alındığında yüksek sıcaklık ve yüksek HF konsantrasyonu MAX fazındaki Al atomlarının uzaklaştırılmasında pozitif bir etki yaratmış ve en optimum Al atomlarının aşındırılması için 40 °C, %30 HF ve 24 saat sentez koşullarında sentezlenen MXene olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde LiF+HCl yoluyla sentezlenen MXene'lerde de sıcaklığın artışı ve reaksiyon süresi Al atomlarının aşındırılarak uzaklaştırılmasında etkili olmuştur. Al atomlarının MAX yapısından giderilmesinde en optimum şart olarak %33.13 HCl, 1.88 g LiF, 60 °C, ve 57 saat sentez koşulu olarak belirlenmiştir. XPS ve XRD analizleri birbirlerini destekler nitelikte olup belirlenen iki sentez yöntemindeki optimum şartlarda üretilen malzemeler Al atomlarının giderilmesi konusunda kıyaslandığında benzer verimlilikler gözlemlenmiştir. Ayrıca LiF+HCl reaksiyonu yüksek sıcaklıklarda gerçekleştiğinden sentez şartları yüksek sıcaklıkları gerektirmektedir.

SEM görüntüleri incelendiğinde sonikasyon ve MXene'in yüksek sıcaklıkta sentezlenmesi elde edilen MXene'in tanecik boyutunda ciddi oranda bir azalmaya sebep olduğu gözlemlenmiştir. Sentezlenen tüm MXene'lerde akordiyonik yapının oluştuğu ve artan HF konsantrasyonu daha derin akordiyonik yapılar oluşmasını sağlamıştır. Oluşan bu akordiyonik yapılar MXene'lerde yüzey alanında artış sağlandığından dolayı kirleticilerin giderimi için adsorpsiyon çalışmalarında adsorbent olarak kullanılabilir.

EDS ve XPS verileri birbirini desteklen nitelikte olup sentezlenen MXene'lerin yüzey sonlandırma gruplarında F, O ve OH gruplarının varlığını gösterdi. MAX fazında bulunan Al atomlarının ciddi oranda uzaklaştırıldığı gözlemlenmiştir. Yüzey sonlandırma grupları F, O ve OH gibi gruplar içerdiğinden dolayı anyonik yüke sahiptirler bu sayede ağır metal vb. katyonik yüke sahip kirleticiler için etkin bir adsorbent olabileceği gözlemlenmiştir.

Temas açısı analiz sonuçları göz önüne alındığında MAX fazının temas açısı 68° civarıyken doğrudan HF ile 30 °C, % 20 HF 48 saat şartlarında sentezlenen MXene bu temas açısı değerini 40° kadar düşüğü, LiF+HCl metoduyla sentezlenen %33.13 HCl, 1.88 gr LiF, 60 °C ve 27 saat sentez koşullarında üretilen MXene'in temas açısı değerini 26° kadar düşürdüğü gözlemlendi. LiF+HCl yoluyla sentezlenen MXene'lerin doğrudan HF ile sentezlenenlerle kıyaslandığında LiF+HCl ile sentezlenenler daha hidrofilik bir özellik göstermiştir. Bu durum LiF+HCl ile sentez

metoduyla üretilen MXene'lerin yüzey sonlandırma gruplarında daha fazla OH grubu bulunmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yüksek hidrofiliklik davranışları nedeniyle dimetilformamid (DMF) gibi hidrofilik çözücülerde iyi disperse olacağından membran yapılarında katkı malzemesi olarak kullanılabilirler.

TGA verileri incelendiğinde MAX fazı çabuk oksitlenebilir nitelikte olduğundan havasız ve nem içermeyen ortamda muhafaza edilmelidir. Doğrudan HF ile sentezlenen MXene'lerde MAX fazına kıyasla termal kararlılıkları daha fazladır. Yaklaşık ortalama 700 °C -750 °C oksitlenmeye başladığı gözlemlendi. Senteze koşullarında artan sıcaklık Termal kararlılığını arttırdığı tespit edildi. LiF+HCl yoluyla 50 °C'da sentezlenen MXene'lerin 400 °C -450 °C arasında oksitlenmeye başladığı 60 °C'da sentezlenen MXene'lerin ise 780 °C kadar termal kararlılık gösterdiği gözlemlendi. Benzer şekilde sıcaklık artışı bu yöntemle sentezlenen MXene'ler içinde termal kararlılıkta artışa sebep olmuştur. Doğrudan HF ile sentezlenen MXene'ler LiF+HCl yoluyla sentezlenenlere göre daha termal karalı bir yapıya sahiptirler. Yüksek termal kararlılıkları göz önüne alındığında termoelektriksel cihazlarda kullanılabileceği ve burada kullanılacak MXene'lerin yüksek sıcaklıkta sentezlenmesi termal kararlılıkta pozitif bir etki sağlayacağı tespit edildi.

Son zamanalarda 2 boyutlu nano malzemeler farklı çalışma alanlarında kullanılmaya başlamasıyla önem kazanıp birçok alanda çalışmalara konu olmuştur. 2 boyutlu malzeme grupları arasında MAX fazlarından sentezlenen MXene ailesinden $Ti_3C_2T_x$ en sık çalışılan malzemedir. MXene'ler, akordiyonik kitapsı yapıları, ayarlanabilir yüzeysel fonksiyonel grupları, büyük yüzey alanları, hidrofilik karakterde olmaları, yarı iletken bir yapıda olması ve antibakteriyel özelliklere sahip olması gibi birçok üstün özelliğinden dolayı birçok çevre mühendisliği alanda kullanılabileceği gözlemlenmiştir.

MXene'ler yakın zamanda keşfedilen yeni bir malzeme olduğundan hala küçük ölçeklerde laboratuvarlarda sentezlenmektedir. Büyük hacimlerde sentezlemek ve teknolojik alanlarda kullanılması için yüksek maliyetli üretim yöntemleri yerine büyük ölçekli düşük maliyetli yeni sentez yöntemleri araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] Park, S., Kim, S., Yea, Y., Saravanakumar, K., Lee, E., Yoon, Y., & Park, C. M. (2023). Adsorptive and photocatalytic performance of cobalt-doped ZnTiO₃/Ti₃C₂T_x MXene nanohybrids towards tetracycline: Kinetics and mechanistic insight. *Journal of Hazardous Materials*, 443, 130165.
- [2] Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D. E., Zhang, Y., Dubonos, S. V., ... & Firsov, A. A. (2004). Electric field effect in atomically thin carbon films. *science*, 306(5696), 666-669.
- [3] Ramanathan, A. A., Aqra, M. W., & Al-Rawajfeh, A. E. (2018). Recent advances in 2D nanopores for desalination. *Environmental Chemistry Letters*, 16(4), 1217-1231.
- [4] Asahi, R. Y. O. J. I., Morikawa, T. A. K. E. S. H. I., Ohwaki, T., Aoki, K., & Taga, Y. (2001). Visible-light photocatalysis in nitrogen-doped titanium oxides. *science*, 293(5528), 269-271.
- [5] Naguib, M., Kurtoglu, M., Presser, V., Lu, J., Niu, J., Heon, M., ... & Barsoum, M. W. (2011). Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti₃AlC₂. *Advanced materials*, 23(37), 4248-4253.
- [6] Mashtalir, O., Naguib, M., Mochalin, V. N., Dall'Agnese, Y., Heon, M., Barsoum, M. W., & Gogotsi, Y. (2013). Intercalation and delamination of layered carbides and carbonitrides. *Nature communications*, 4(1), 1716.
- [7] Naguib, M., Come, J., Dyatkin, B., Presser, V., Taberna, P. L., Simon, P., ... & Gogotsi, Y. (2012). MXene: a promising transition metal carbide anode for lithium-ion batteries. *Electrochemistry Communications*, 16(1), 61-64.
- [8] Lukatskaya, M. R., Mashtalir, O., Ren, C. E., Dall'Agnese, Y., Rozier, P., Taberna, P. L., ... & Gogotsi, Y. (2013). Cation intercalation and high volumetric capacitance of two-dimensional titanium carbide. *Science*, 341(6153), 1502-1505.
- [9] Ghidui, M., Lukatskaya, M. R., Zhao, M. Q., Gogotsi, Y., & Barsoum, M. W. (2014). Conductive two-dimensional titanium carbide 'clay' with high volumetric capacitance. *Nature*, 516(7529), 78-81
- [10] Xiao, L., Arnd, G., & NL, F. (2015). Sulfur cathodes based on conductive MXene nanosheets for high-performance lithium-sulfur batteries. *Angew Chem Int Ed*, 54, 3907-3911.
- [11] Halim, J., Cook, K. M., Naguib, M., Eklund, P., Gogotsi, Y., Rosen, J., & Barsoum, M. W. (2016). X-ray photoelectron spectroscopy of select multi-layered transition metal carbides (MXenes). *Applied Surface Science*, 362, 406-417.
- [12] Alhabeb, M., Maleski, K., Anasori, B., Lelyukh, P., Clark, L., Sin, S., & Gogotsi, Y. (2017). Guidelines for synthesis and processing of two-dimensional titanium carbide (Ti₃C₂T_x x MXene). *Chemistry of Materials*, 29(18), 7633-7644
- [13] Xia, Y., Mathis, T. S., Zhao, M. Q., Anasori, B., Dang, A., Zhou, Z., ... & Yang, S. (2018). Thickness-independent capacitance of vertically aligned liquid-crystalline MXenes. *Nature*, 557(7705), 409-412
- [14] Pang, J., Mendes, R. G., Bachmatiuk, A., Zhao, L., Ta, H. Q., Gemming, T., ... & Rummeli, M. H. (2019). Applications of 2D MXenes in energy conversion and storage systems. *Chemical Society Reviews*, 48(1), 72-133.
- [15] Liang, C., Qiu, H., Song, P., Shi, X., Kong, J., & Gu, J. (2020). Ultra-light MXene aerogel/wood-derived porous carbon composites with wall-like "mortar/brick" structures for electromagnetic interference shielding. *Science Bulletin*, 65(8), 616-622
- [16] Yu, F., Zhang, X., Yang, Z., Yang, P., & Ma, J. (2021). Environmental applications of two-dimensional transition metal carbides and nitrides for water purification: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 1-28.
- [17] Ghosh, A., Pal, H., Das, T., Chatterjee, S., & Das, A. (2022). Synthesis and Characterization of MXene from MAX phase. *Materials Today: Proceedings*, 58, 714-716.
- [18] Zhang, S., Bilal, M., Adeel, M., Barceló, D., & Iqbal, H. M. (2021). MXene-based designer nanomaterials and their exploitation to mitigate hazardous pollutants from environmental matrices. *Chemosphere*, 283, 131293.

- [19] Guo, Z., Zhou, J., Zhu, L., & Sun, Z. (2016). MXene: a promising photocatalyst for water splitting. *Journal of Materials Chemistry A*, 4(29), 11446-11452.
- [20] Wang, L., Song, H., Yuan, L., Li, Z., Zhang, Y., Gibson, J. K., ... & Shi, W. (2018). Efficient U (VI) reduction and sequestration by Ti₂CT x MXene. *Environmental science & technology*, 52(18), 10748-10756
- [21] Rasool, K., Helal, M., Ali, A., Ren, C. E., Gogotsi, Y., & Mahmoud, K. A. (2016). Antibacterial activity of Ti₃C₂T x MXene. *ACS nano*, 10(3), 3674-3684.
- [22] Zha, X. J., Zhao, X., Pu, J. H., Tang, L. S., Ke, K., Bao, R. Y., ... & Yang, W. (2019). Flexible anti-biofouling MXene/cellulose fibrous membrane for sustainable solar-driven water purification. *ACS applied materials & interfaces*, 11(40), 36589-36597.
- [23] Come, J., Black, J. M., Lukatskaya, M. R., Naguib, M., Beidaghi, M., Rondinone, A. J., ... & Balke, N. (2015). Controlling the actuation properties of MXene paper electrodes upon cation intercalation. *Nano Energy*, 17, 27-35.
- [24] Bao, W., Tang, X., Guo, X., Choi, S., Wang, C., Gogotsi, Y., & Wang, G. (2018). Porous cryo-dried MXene for efficient capacitive deionization. *Joule*, 2(4), 778-787.
- [25] Yorulmaz, U. (2018). *İki boyutlu mxene kristallerinin mekanik ve dinamik özelliklerinin temel prensiplere dayalı yöntemler ile incelenmesi ve araştırılması* (Tez No. 537865) [Yüksek lisans tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>
- [26] Anasori, B., Lukatskaya, M. R., & Gogotsi, Y. (2017). 2D metal carbides and nitrides (MXenes) for energy storage. *Nature Reviews Materials*, 2(2), 1-17.
- [27] Zhu, J., Ha, E., Zhao, G., Zhou, Y., Huang, D., Yue, G., ... & Zhao, P. (2017). Recent advance in MXenes: a promising 2D material for catalysis, sensor and chemical adsorption. *Coordination Chemistry Reviews*, 352, 306-327.
- [28] Nashim, A., & Parida, K. (2022). A Glimpse on the plethora of applications of prodigious material MXene. *Sustainable Materials and Technologies*, e00439
- [29] Naguib, M., Mochalin, V. N., Barsoum, M. W., & Gogotsi, Y. (2014). 25th anniversary article: MXenes: a new family of two-dimensional materials. *Advanced materials*, 26(7), 992-1005.
- [30] Enyashin, A. N., & Ivanovskii, A. L. (2013). Two-dimensional titanium carbonitrides and their hydroxylated derivatives: Structural, electronic properties and stability of MXenes Ti₃C₂- xN_x (OH) 2 from DFTB calculations. *Journal of Solid State Chemistry*, 207, 42-48.
- [31] Chaudhari, N. K., Jin, H., Kim, B., San Baek, D., Joo, S. H., & Lee, K. (2017). MXene: an emerging two-dimensional material for future energy conversion and storage applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(47), 24564-24579.
- [32] Ronchi, R. M., Arantes, J. T., & Santos, S. F. (2019). Synthesis, structure, properties and applications of MXenes: Current status and perspectives. *Ceramics International*, 45(15), 18167-18188
- [33] Ghidui, M., Naguib, M., Shi, C., Mashtalir, O., Pan, L. M., Zhang, B., ... & Barsoum, M. W. (2014). Synthesis and characterization of two-dimensional Nb₄ C₃ (MXene). *Chemical communications*, 50(67), 9517-9520.
- [34] Naguib, M., Unocic, R. R., Armstrong, B. L., & Nanda, J. (2015). Large-scale delamination of multi-layers transition metal carbides and carbonitrides "MXenes". *Dalton transactions*, 44(20), 9353-9358.
- [35] Bashir, T., Ismail, S. A., Wang, J., Zhu, W., Zhao, J., & Gao, L. (2023). MXene terminating groups O,-F or -OH,-F or O,-OH,-F, or O,-OH,-Cl?. *Journal of Energy Chemistry*, 76, 90-104.
- [36] Sun, W., Shah, S. A., Chen, Y., Tan, Z., Gao, H., Habib, T., ... & Green, M. J. (2017). Electrochemical etching of Ti₂ AlC to Ti₂ CT x (MXene) in low-concentration hydrochloric acid solution. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(41), 21663-21668.
- [37] Pang, S. Y., Wong, Y. T., Yuan, S., Liu, Y., Tsang, M. K., Yang, Z., ... & Hao, J. (2019). Universal strategy for HF-free facile and rapid synthesis of two-dimensional MXenes as multifunctional energy materials. *Journal of the American Chemical Society*, 141(24), 9610-9616

- [38] Shi, H., Zhang, P., Liu, Z., Park, S., Lohe, M. R., & Wu, Y. (2021). Shaygan Nia, A.; Yang, S.; Feng, X. Ambient-stable two-dimensional titanium carbide (MXene) enabled by iodine etching. *Angew. Chem. Int. Ed*, 60(16), 8689-8693.
- [39] Li, G., Tan, L., Zhang, Y., Wu, B., & Li, L. (2017). Highly efficiently delaminated single-layered MXene nanosheets with large lateral size. *Langmuir*, 33(36), 9000-9006.
- [40] Karlsson, L. H., Birch, J., Halim, J., Barsoum, M. W., & Persson, P. O. (2015). Atomically resolved structural and chemical investigation of single MXene sheets. *Nano letters*, 15(8), 4955-4960.
- [41] Sang, X., Xie, Y., Lin, M. W., Alhabeab, M., & Van Aken, K. L. Atomic defects in monolayer titanium carbide (Ti₃C₂T_x) MXene. *ACS Nano* 10, 9193–9200 (2016).
- [42] Wang, X., Garnero, C., Rochard, G., Magne, D., Morisset, S., Hurand, S., ... & Celerier, S. (2017). A new etching environment (FeF₃/HCl) for the synthesis of two-dimensional titanium carbide MXenes: a route towards selective reactivity vs. water. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(41), 22012-22023.
- [43] Lipatov, A., Alhabeab, M., Lukatskaya, M. R., Boson, A., Gogotsi, Y., & Sinitskii, A. (2016). Effect of synthesis on quality, electronic properties and environmental stability of individual monolayer Ti₃C₂ MXene flakes. *Advanced Electronic Materials*, 2(12), 1600255
- [44] Zhang, C. J., Pinilla, S., McEvoy, N., Cullen, C. P., Anasori, B., Long, E., ... & Nicolosi, V. (2017). Oxidation stability of colloidal two-dimensional titanium carbides (MXenes). *Chemistry of Materials*, 29(11), 4848-4856.
- [45] Kumar, J. A., Prakash, P., Krithiga, T., Amarnath, D. J., Premkumar, J., Rajamohan, N., ... & Rajasimman, M. (2022). Methods of synthesis, characteristics, and environmental applications of MXene: A comprehensive review.
- [46] Ganesh, P. S., & Kim, S. Y. (2022). Electrochemical sensing interfaces based on novel 2D-MXenes for monitoring environmental hazardous toxic compounds: A concise review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*
- [47] Lu, M., Han, W., Li, H., Zhang, W., & Zhang, B. (2020). There is plenty of space in the MXene layers: The confinement and fillings. *Journal of Energy Chemistry*, 48, 344-363.
- [48] Berdiyorov, G. R. (2015). Effect of surface functionalization on the electronic transport properties of Ti₃C₂ MXene. *Europhysics Letters*, 111(6), 67002.
- [49] Jiang, X., Kuklin, A. V., Baev, A., Ge, Y., Ågren, H., Zhang, H., & Prasad, P. N. (2020). Two-dimensional MXenes: From morphological to optical, electric, and magnetic properties and applications. *Physics Reports*, 848, 1-58.
- [50] Urbankowski, P., Anasori, B., Hantanasirisakul, K., Yang, L., Zhang, L., Haines, B., ... & Gogotsi, Y. (2017). 2D molybdenum and vanadium nitrides synthesized by ammoniation of 2D transition metal carbides (MXenes). *Nanoscale*, 9(45), 17722-17730.
- [51] Ng, V. M. H., Huang, H., Zhou, K., Lee, P. S., Que, W., Xu, J. Z., & Kong, L. B. (2017). Recent progress in layered transition metal carbides and/or nitrides (MXenes) and their composites: synthesis and applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(7), 3039-3068.
- [52] Shahzad, F., Alhabeab, M., Hatter, C. B., Anasori, B., Man Hong, S., Koo, C. M., & Gogotsi, Y. (2016). Electromagnetic interference shielding with 2D transition metal carbides (MXenes). *Science*, 353(6304), 1137-1140.
- [53] Berdiyorov, G. R. (2016). Optical properties of functionalized Ti₃C₂T₂ (T= F, O, OH) MXene: First principles calculations. *Aip Advances*, 6(5), 055105
- [54] Li, R., Zhang, L., Shi, L., & Wang, P. (2017). MXene Ti₃C₂: an effective 2D light-to-heat conversion material. *ACS nano*, 11(4), 3752-3759
- [55] Hantanasirisakul, K., & Gogotsi, Y. (2018). Electronic and optical properties of 2D transition metal carbides and nitrides (MXenes). *Advanced Materials*, 30(52), 1804779.
- [56] Zhang, C., Anasori, B., Seral-Ascaso, A., Park, S. H., McEvoy, N., Shmeliov, A., ... & Nicolosi, V. (2017). Transparent, flexible, and conductive 2D titanium carbide (MXene) films with high volumetric capacitance. *Advanced materials*, 29(36), 1702678

- [57] Mariano, M., Mashtalir, O., Antonio, F. Q., Ryu, W. H., Deng, B., Xia, F., ... & Taylor, A. D. (2016). Solution-processed titanium carbide MXene films examined as highly transparent conductors. *Nanoscale*, 8(36), 16371-16378
- [58] Dillon, A. D., Ghidui, M. J., Krick, A. L., Griggs, J., May, S. J., Gogotsi, Y., ... & Fafarman, A. T. (2016). Highly conductive optical quality solution-processed films of 2D titanium carbide. *Advanced Functional Materials*, 26(23), 4162-4168
- [59] Gandhi, A. N., Alshareef, H. N., & Schwingenschlögl, U. (2016). Thermoelectric performance of the mxenes M₂Co₂ (M= Ti, Zr, or Hf). *Chemistry of Materials*, 28(6), 1647-1652
- [60] Khazaei, M., Arai, M., Sasaki, T., Estili, M., & Sakka, Y. (2014). Two-dimensional molybdenum carbides: potential thermoelectric materials of the MXene family. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 16(17), 7841-7849.
- [61] Zou, X., Li, G., Wang, Q., Tang, D., Wu, B., & Wang, X. (2018). Energy storage properties of selectively functionalized Cr-group MXenes. *Computational Materials Science*, 150, 236-243.
- [62] Yu, X. F., Li, Y. C., Cheng, J. B., Liu, Z. B., Li, Q. Z., Li, W. Z., ... & Xiao, B. (2015). Monolayer Ti₂CO₂: a promising candidate for NH₃ sensor or capturer with high sensitivity and selectivity. *ACS applied materials & interfaces*, 7(24), 13707-13713
- [63] Xin, M., Li, J., Ma, Z., Pan, L., & Shi, Y. (2020). MXenes and their applications in wearable sensors. *Frontiers in chemistry*, 8, 297.
- [64] Lei, Y., Zhao, W., Zhang, Y., Jiang, Q., He, J. H., Baeumner, A. J., ... & Alshareef, H. N. (2019). A MXene-based wearable biosensor system for high-performance in vitro perspiration analysis. *Small*, 15(19), 1901190.
- [65] Naguib, M., Mashtalir, O., Carle, J., Presser, V., Lu, J., Hultman, L., ... & Barsoum, M. W. (2012). Two-dimensional transition metal carbides. *ACS nano*, 6(2), 1322-1331.
- [66] Geim, A. K., & Grigorieva, I. V. (2013). Van der Waals heterostructures. *Nature*, 499(7459), 419-425.
- [67] Yadav, S., Yashas, S. R., & Shivaraju, H. P. (2021). Transitional metal chalcogenide nanostructures for remediation and energy: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(5), 3683-3700
- [68] Ghassemi, H., Harlow, W., Mashtalir, O., Beidaghi, M., Lukatskaya, M. R., Gogotsi, Y., & Taheri, M. L. (2014). In situ environmental transmission electron microscopy study of oxidation of two-dimensional Ti₃C₂ and formation of carbon-supported TiO₂. *Journal of Materials Chemistry A*, 2(35), 14339-14343
- [69] Mashtalir, O., Cook, K. M., Mochalin, V. N., Crowe, M., Barsoum, M. W., & Gogotsi, Y. (2014). Dye adsorption and decomposition on two-dimensional titanium carbide in aqueous media. *Journal of Materials Chemistry A*, 2(35), 14334-14338.
- [70] Tang, Q., Zhou, Z., & Shen, P. (2012). Are MXenes promising anode materials for Li ion batteries? Computational studies on electronic properties and Li storage capability of Ti₃C₂ and Ti₃C₂X₂ (X= F, OH) monolayer. *Journal of the American Chemical Society*, 134(40), 16909-16916
- [71] Xie, Y., Naguib, M., Mochalin, V. N., Barsoum, M. W., Gogotsi, Y., Yu, X., ... & Kent, P. R. (2014). Role of surface structure on Li-ion energy storage capacity of two-dimensional transition-metal carbides. *Journal of the American Chemical Society*, 136(17), 6385-6394.
- [72] Wang, X., Shen, X., Gao, Y., Wang, Z., Yu, R., & Chen, L. (2015). Atomic-scale recognition of surface structure and intercalation mechanism of Ti₃C₂X. *Journal of the American Chemical Society*, 137(7), 2715-2721. [73] Dong, Y., Shi, H., & Wu, Z. S. (2020). Recent advances and promise of MXene-based nanostructures for high-performance metal ion batteries. *Advanced Functional Materials*, 30(47), 2000706..
- [73] Vyskočil, J., Mayorga-Martinez, C. C., Szökölová, K., Dash, A., Gonzalez-Julian, J., Sofer, Z., & Pumera, M. (2019). 2D Stacks of MXene Ti₃C₂ and 1T-Phase WS₂ with Enhanced Capacitive Behavior. *ChemElectroChem*, 6(15), 3982-3986
- [74] Ling, Z., Ren, C. E., Zhao, M. Q., Yang, J., Giammarco, J. M., Qiu, J., ... & Gogotsi, Y. (2014). Flexible and conductive MXene films and nanocomposites with high capacitance. *Proceedings of the*

National Academy of Sciences, 111(47), 16676-16681..

- [75] Syamsai, R., Kollu, P., Jeong, S. K., & Grace, A. N. (2017). Synthesis and properties of 2D-titanium carbide MXene sheets towards electrochemical energy storage applications. *Ceramics International*, 43(16), 13119-13126.
- [76] Boyer, T. H. (2015). Removal of dissolved organic matter by magnetic ion exchange resin. *Current Pollution Reports*, 1(3), 142-154.
- [77] Akhtar, J., Amin, N. A. S., & Shahzad, K. (2016). A review on removal of pharmaceuticals from water by adsorption. *Desalination and Water Treatment*, 57(27), 12842-12860.
- [78] Lee, P. X., Liu, B. L., Show, P. L., Ooi, C. W., Chai, W. S., Munawaroh, H. S. H., & Chang, Y. K. (2021). Removal of calcium ions from aqueous solution by bovine serum albumin (BSA)-modified nanofiber membrane: Dynamic adsorption performance and breakthrough analysis. *Biochemical Engineering Journal*, 171, 108016
- [79] Shahzad, A., Rasool, K., Miran, W., Nawaz, M., Jang, J., Mahmoud, K. A., & Lee, D. S. (2017). Two-dimensional Ti₃C₂T_x MXene nanosheets for efficient copper removal from water. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(12), 11481-11488.
- [80] Ying, Y., Liu, Y., Wang, X., Mao, Y., Cao, W., Hu, P., & Peng, X. (2015). Two-dimensional titanium carbide for efficiently reductive removal of highly toxic chromium (VI) from water. *ACS applied materials & interfaces*, 7(3), 1795-1803
- [81] Jun, B. M., Park, C. M., Heo, J., & Yoon, Y. (2020). Adsorption of Ba²⁺ and Sr²⁺ on Ti₃C₂T_x MXene in model fracking wastewater. *Journal of Environmental Management*, 256, 109940
- [82] Jijoe, P. S., Yashas, S. R., & Shivaraju, H. P. (2021). Fundamentals, synthesis, characterization and environmental applications of layered double hydroxides: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(3), 2643-2661.
- [83] Peng, Q., Guo, J., Zhang, Q., Xiang, J., Liu, B., Zhou, A., ... & Tian, Y. (2014). Unique lead adsorption behavior of activated hydroxyl group in two-dimensional titanium carbide. *Journal of the American Chemical Society*, 136(11), 4113-4116.
- [84] Zou, G., Guo, J., Peng, Q., Zhou, A., Zhang, Q., & Liu, B. (2016). Synthesis of urchin-like rutile titania carbon nanocomposites by iron-facilitated phase transformation of MXene for environmental remediation. *Journal of Materials Chemistry A*, 4(2), 489-499.
- [85] Othman, Z., Mackey, H. R., & Mahmoud, K. A. (2022). A critical overview of MXenes adsorption behavior toward heavy metals. *Chemosphere*, 133849
- [86] Ling, L., Fan, M., Wang, B., & Zhang, R. (2015). Application of computational chemistry in understanding the mechanisms of mercury removal technologies: a review. *Energy & Environmental Science*, 8(11), 3109-3133.
- [87] Jun, B. M., Her, N., Park, C. M., & Yoon, Y. (2020). Effective removal of Pb (ii) from synthetic wastewater using Ti₃C₂T_x MXene. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 6(1), 173-180.
- [88] Karthikeyan, P., Elanchezhian, S. S., Preethi, J., Talukdar, K., Meenakshi, S., & Park, C. M. (2021). Two-dimensional (2D) Ti₃C₂T_x MXene nanosheets with superior adsorption behavior for phosphate and nitrate ions from the aqueous environment. *Ceramics International*, 47(1), 732-739.
- [89] Feng, A., Yu, Y., Mi, L., Yu, Y., & Song, L. (2019). Comparative study on electrosorptive behavior of NH₄HF₂-etched Ti₃C₂ and HF-etched Ti₃C₂ for capacitive deionization. *Ionics*, 25(2), 727-735.
- [90] Maleski, K., Mochalin, V. N., & Gogotsi, Y. (2017). Dispersions of two-dimensional titanium carbide MXene in organic solvents. *Chemistry of Materials*, 29(4), 1632-1640
- [91] Sun, Y., Lu, J., Li, S., Dai, C., Zou, D., & Jing, W. (2023). MXene-based membranes in water treatment: Current status, and future prospects. *Separation and Purification Technology*, 125640
- [92] Suna, S. (2021). *Membran kapasitif deiyonizasyon yöntemi ile çöp sızıntı suyundan iyon giderimi* (Tez No. 663509 [Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>

- [93] Suss, M. E., & Presser, V. (2018). Water desalination with energy storage electrode materials. *Joule*, 2(1), 10-15
- [94] Lee, J., Kim, S., Kim, C., & Yoon, J. (2014). Hybrid capacitive deionization to enhance the desalination performance of capacitive techniques. *Energy & Environmental Science*, 7(11), 3683-3689.
- [95] Srimuk, P., Kaasik, F., Krüner, B., Tolosa, A., Fleischmann, S., Jäckel, N., ... & Presser, V. (2016). MXene as a novel intercalation-type pseudocapacitive cathode and anode for capacitive deionization. *Journal of Materials Chemistry A*, 4(47), 18265-18271.
- [96] Ren, C. E., Zhao, M. Q., Makaryan, T., Halim, J., Boota, M., Kota, S., ... & Gogotsi, Y. (2016). Porous two-dimensional transition metal carbide (MXene) flakes for high-performance Li-ion storage. *ChemElectroChem*, 3(5), 689-693.
- [97] Shuck, C. E., Ventura-Martinez, K., Goad, A., Uzun, S., Shekhirev, M., & Gogotsi, Y. (2021). Safe synthesis of MAX and MXene: guidelines to reduce risk during synthesis. *ACS Chemical Health & Safety*, 28(5), 326-338.
- [98] Bilyk, T., Benchakar, M., Bugnet, M., Loupiau, L., Chartier, P., Pazniak, H., ... & Mauchamp, V. (2020). Electronic structure sensitivity to surface disorder and nanometer-scale impurity of 2D titanium carbide MXene sheets as revealed by electron energy-loss spectroscopy. *The Journal of Physical Chemistry C*, 124(49), 27071-27081

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa YEGİN

[REDACTED]

[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]

AKADEMİK FAALİYETLER

Makaleler:

1. Hanay, Ö., Aksoy, Y., Çelik, A., & Yegin, M. (2024). Modifying gas transfer membranes with nanoscale zero-valent iron: effects on membrane material properties, treatment performance, and biofilm thickness. *Water Science & Technology*, 89(5), 1195-1210.
2. Demirelli, K., Barim, E., Çelik, A., Yegin, M., Aksoy, Y., Hanay, Ö., & Hasar, H. (2024). Photoresponse, thermal and electrical behaviors of MXene-based polysulfone nanocomposite. *Polymer Bulletin*, 1-22.

Bildiriler:

1. Adsorption of Methylene Blue with MXene and MAX (ICAR CONGRESS 13) 2024

Projeler:

1. "MXENE Arayüzlü Bipolar Membran Üretimi ve Konsantre Akımından Asit/Baz Kazanımı" 122Y006 nolu TÜBİTAK 1001 Projesi