



**T.C.  
SIVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FARKLI YÖNTEMLERLE BOROFEN SENTEZİ, KARAKTERİZASYONU VE  
KARARLILIĞININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Sümeyye ÇINAR  
(20219226002)**

**Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Neşe KEKLİKÇİOĞLU ÇAKMAK**

**SIVAS**

**EYLÜL 2024**

Sümeyye ÇINAR'ın hazırladığı ve “FARKLI YÖNTEMLERLE BOROFEN SENTEZİ, KARAKTERİZASYONU VE KARARLILIĞININ İNCELENMESİ” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı:** **Doç. Dr. Neşe KEKLİKCİOĞLU ÇAKMAK** .....  
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

**Jüri Üyeleri:** **Prof. Dr. Mehtap ERŞAN** .....  
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

**Doç. Dr. Güler Bengüsu TEZEL TANRISEVER** .....  
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak onaylanmıştır.

**Prof. Dr. Nevcihan GÜR SOY**  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.

*Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP) Komisyonu tarafından M-2023-849 Nolu proje kapsamında desteklenmiştir.*



Bütün hakları saklıdır.  
Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Sümeyye ÇINAR, 2024

## ETİK

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

28.08.2024

Sümeyye ÇINAR

## **KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR**

Yüksek lisans eğitiminin her aşamasında bana değerli görüşleriyle yol gösteren, destekleyen ve akademik çalışma disiplini kazandıran, bu tezi yazmama ve bu konuda çalışmama olanak veren ve birlikte çalışmaktan onur duyduğum Sayın danışman hocam Doç. Dr. Neşe KEKLİKÇİOĞLU ÇAKMAK'a içtenlikle teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan tecrübelerini ve bilgilerini benimle paylaşan Sayın Prof. Dr. Koray SAYIN'a , Yüksek Kimyager Ceylan ALKAYA YILDIZ, Yüksek Kimyager Elif GÜNEY ve Yüksek Kimya Mühendisi Gamze KEKÜL TÜZÜN arkadaşlarıma, eğitim-öğretim hayatımda bana hep destek olan ve motive eden annem Hatice ÇINAR'a ve aileme, deneysel çalışmalarımı gerçekleştirmiş olduğum Sivas Cumhuriyet Üniversitesi İbni Sina Sentez Araştırmaları Laboratuvarı (RGD 036)'na ve maddi desteklerinden dolayı Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP)'ne ve bu çalışmaları mümkün kılan bizden önceki bütün bilim insanlarına sonsuz teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

## ÖZET

### FARKLI YÖNTEMLERLE BOROFEN SENTEZİ, KARAKTERİZASYONU VE KARARLILIĞININ İNCELENMESİ

Sümeyye ÇINAR

Yüksek Lisans Tezi

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Neşe KEKLİKÇİOĞLU ÇAKMAK

2024, 91+XVII sayfa

İki boyutlu (2B) malzemeler çok çeşitli uygulama alanlarına sahip olmaları nedeniyle son yıllarda oldukça ilgi çekmeye başlamışlardır. Bu malzemeler arasında Grafen esnek bir yapıya ve aynı zamanda mükemmel elektrik ve ısı iletkenlik özelliklerine sahip olması nedeniyle bilim dünyasında oldukça ilgi çekmiştir. Uzun bir süre grafen ile yarışacak yeni bir malzeme keşfedilemezken 2015 yılında borofenin sentezlenmesi ile yeni ve mükemmel bir malzeme ortaya çıkmıştır. Borofen hegzagonal yapıda dizilmiş bor atomlarından oluşmuştur. Grafenden daha güçlü, daha esnek elektrokimya, nanosensör ve katalizör kimyasında devrim yaratacak potansiyele sahip bir malzemedir. Borofen ilk kez 2015 yılında moleküler ışın üst bırakımı (Molecular Beam Epitaxy - MBE) yöntemi ile tek katmanlı olarak sentezlenebilmiştir. Literatürde borofen sentezine yönelik başarılı olan az sayıda çalışma yer almaktadır. Bu çalışmalar incelendiğinde kimyasal buhar biriktirme (Chemical Vapor Deposition - CVD) ve MBE kullanılan çalışmalarda tek katmanlı borofen sentezlenebilmiştir. Borofen için yeni sentez yöntemleri araştırma halindedir. Yapılan bu yüksek lisans tez çalışmasında borofen saf bordan yola çıkılarak sonokimyasal eksfoliasyon yöntemi ile solvotermal reaktör kullanılarak ve Bor nitrür (BN) ve molibden disülfid den yola çıkılarak hibritlerinin sentezi şeklinde sonokimyasal eksfoliasyon ile ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Borofen sentezi için uygulanan yöntemler son ürünün özelliklerini belirleme konusunda büyük rol oynamaktadır. Genel olarak, sonokimyasal yöntem ile sonikasyon süresine ve çözücü tipine bağlı olarak tek tabaka, iki tabaka, üç tabaka ve dördü tabaka malzeme sentezlenebilir. Çözücünün doğru seçimi ve doğru sonikasyon süresi etkileşimi ile büyük yanal boyutlara sahip tek katmanlı levhalar elde edilebilmektedir. Ancak çözücü iyi etkileşime girmezse, aynı sonikasyon süresinde dahi çok tabakalı yapılar ortaya çıkabilmektedir. Çok uzun süreli bir sonikasyon ise çok parçalanmalar sebebiyle borofen dots ların oluşumuna neden olabilmektedir. Bu nedenle, uygun çözücü seçimi ve sonikasyon süresinin optimizasyonu, borofen

tabakasının oluşumu için önemli ve esastır. Bu parametrelerin optimizasyonu için çalışmada 5 farklı çözücü ve banyo tipi sonikatör (BluLab) ve prob sonikatör (Sonics & Materials Inc., USA) ile farklı sonikasyon zamanları kullanılmıştır. Ayrıca santrifüj aşamasında da farklı zamanlar ve hızlar denenerek santrifüj zamanı ve hızı da optimize edilmiştir. Sonokimyasal eksfoliasyon ile borofenin sentezi için çözücü cinsi ve sonikasyon sürelerinin optimizasyonu ile borofen başarı ile sentezlenmiştir. Ayrıca Bor nitür (BN) ve molibden disülfid den çıkılarak yapılan sentez yönteminde ise 5 tabakadan daha az katmana sahip hibritlerin elde edildiği görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Grafen, Borofen, Nanomalzemeler, Sonokimyasal Eksfoliasyon



## **ABSTRACT**

# **INVESTIGATION OF THE SYNTHESIS, CHARACTERIZATION, AND STABILITY OF BOROPHENE USING DIFFERENT METHODS**

**Sümeyye ÇINAR**

**Master of Science Thesis**

**Department of Chemical Engineering**

**Supervisor: Doç. Dr. Neşe KEKLİKÇİOĞLU ÇAKMAK**

**2024, 91+XVII page**

Two-dimensional (2D) materials have garnered significant interest in recent years due to their diverse application potentials. Among these materials, graphene has attracted considerable attention in the scientific community due to its flexible structure and exceptional electrical and thermal conductivity properties. For a long time, no material could rival graphene until the synthesis of borophene in 2015, which introduced a new and remarkable material. Borophene consists of boron atoms arranged in a hexagonal structure. It is stronger and more flexible than graphene, with the potential to revolutionize electrochemistry, nanosensors, and catalysis. Borophene was first synthesized as a monolayer in 2015 using the Molecular Beam Epitaxy (MBE) method. Successful studies on borophene synthesis are limited in the literature, with Chemical Vapor Deposition (CVD) and MBE methods achieving monolayer borophene synthesis. New synthesis methods for borophene are under investigation. In this master's thesis study, borophene was synthesized separately using the sonochemical exfoliation method starting from pure boron and using a solvothermal reactor, as well as the synthesis of its hybrids starting from boron nitride (BN) and molybdenum disulfide (MoS<sub>2</sub>) through sonochemical exfoliation. The methods applied for borophene synthesis play a crucial role in determining the properties of the final product. Generally, sonochemical methods can produce single-layer, bi-layer, tri-layer, and four-layer materials depending on the

sonication time and type of solvent used. Correct solvent selection and appropriate sonication time can yield large lateral dimension monolayer sheets. However, poor solvent interaction can result in multi-layer structures even with the same sonication duration. Excessively long sonication can lead to the formation of borophene dots due to extensive fragmentation. Therefore, optimizing solvent selection and sonication time is essential for borophene layer formation. This study used five different solvents and various sonication times with a bath-type sonicator (BluLab) and a probe sonicator (Sonics & Materials Inc., USA) for optimization. Additionally, centrifugation times and speeds were optimized by experimenting with different durations and speeds. Through the optimization of solvent types and sonication durations, borophene was successfully synthesized via sonochemical exfoliation. Moreover, the synthesis method starting from boron nitride (BN) and molybdenum disulfide ( $\text{MoS}_2$ ) yielded hybrids with fewer than five layers.

**Keywords:** Graphene, Borophene, Nanomaterials, Sonochemical Exfoliation

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	viii
ABSTRACT.....	ixx
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xv
SİMGELER DİZİNİ.....	xv
KISALTMALAR DİZİNİ .....	xv
<b>1.GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. İKİ BOYUTLU NANOMALZEMELER VE ÖZELLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI .....</b>	<b>4</b>
2.1. İki Boyutlu Malzemelere Genel Bakış .....	5
2.2. Borofenin Tarihsel Gelişimi .....	9
2.3. Borofenin Yapısal ve Elektronik Özellikleri .....	11
2.3.1. Borofenin Kristal Yapısı .....	12
2.3.2 Elektronik ve Mekanik Özellikler.....	15
2.3.3. Faz Çeşitliliği ve Stabilite .....	17
2.4. Borofenin İki Boyutlu Malzemelerle Karşılaştırılmalı İncelenmesi .....	18
2.5. Borofen Üretim Yöntemleri .....	20
2.5.1. Atomik Katman Biriktirme (ALD) .....	20
2.5.2. Moleküler Işın Epitaksi (MBE).....	22
2.5.3. Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) .....	23
2.5.4.Sonokimyasal Eksfoliasyon .....	25
2.6. Borofenin Potansiyel Uygulamaları .....	27
2.6.1. Enerji Depolama Sistemleri .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.6.2. Esnek Elektronikler ve Nanosensörler .....	30
2.6.3. Biyomedikal Uygulamalar .....	31
2.7. Borofenin Karakterizasyonu .....	34
2.7.1. Temel Karakterizasyon Teknikleri.....	35
2.7.2. Morfolojik Analizler .....	36
2.7.3. Kimyasal Analizler .....	38
2.8. Borofenin Kararlılığı ve Zeta Potansiyel Ölçümleri .....	40
2.8.1. Zeta Potansiyel ve Yüzey Yükü.....	42
2.8.2. Çözücü Etkileşimleri ve Stabilite.....	42
2.9. Borofenin Ticari Potansiyeli .....	43
2.9.1. Endüstriyel Üretim Zorlukları.....	45
2.9.2. Ticarileştirme Stratejileri .....	46
<b>3. MATERYAL VE METOD .....</b>	<b>49</b>
3.1. Sonokimyasal Metodu İle Borofen Sentezi ve Karakterizasyonu .....	50
3.2. Solvotermal Reaktör Metodu İle Borofen Sentezi ve Karakterizasyonu .....	52
3.3. MoS <sub>2</sub> ve BN Metodu İle Borofen Hibritlerinin Sentezi ve Karakterizasyonu ....	53

<b>4. KARAKTERİZASYON ANALİZLERİ VE SONUÇLARI .....</b>	<b>54</b>
4.1. Uv-Vis Spektrofotometre Analizi .....	54
4.2. Fourier Dönüştümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) Analizi .....	59
4.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi .....	63
4.4. Zeta Analizi .....	70
4.5. X-Işını Difraktometresi (XRD) Analizi .....	72
4.6. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) Analizi .....	76
<b>5. TARTIŞMA VE SONUÇ .....</b>	<b>79</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>84</b>



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. $\beta$ 12 fazındaki borofen levhalarının kristal yapısı.....	13
Şekil 2.2. X3 fazındaki borofen levhalarının kristal yapısı.....	13
Şekil 2.3. MBE Yöntemini anlatan görsel (AI ile oluşturulmuştur).....	23
Şekil 2.4. CVD anlatan görsel (AI ile oluşturulmuştur).....	25
Şekil 2.5. Sonoeksfoliasyon yöntemini anlatan görsel (AI ile oluşturulmuştur).....	26
Şekil 2.6. Borofenin moleküler yapısını gösteren görsel (AI ile oluşturulmuştur)..	35
Şekil 3.1. BluLab ultrasonik banyo cihazı.....	49
Şekil 3.2. Prob tipi sonikatör cihazı.....	50
Şekil 3.3. Buz banyosu desteği ile prob sonikatör işlemi.....	50
Şekil 3.4. Santrifüj sonrası üstte kalan süpernatant çözeltisi.....	51
Şekil 3.5. Kurutma işlemi sonrası katı borofen nanopartiküllerinin görüntüsü.....	52
Şekil 3.6. Solvotermal reaktör.....	53
Şekil 4.1. Saf Bor UV-Vis Grafiği.....	54
Şekil 4.2. Sonokimyasal yöntem ve DI çözücüsü ile sentezlenen borofen UV-Vis Grafiği.....	55
Şekil 4.3. Sonokimyasal yöntem ve aseton çözücüsü ile sentezlenen borofen UV-Vis Grafiği.....	56
Şekil 4.4. Solvotermal yöntem ve IPA çözücüsü ile sentezlenen Borofen tabakalarının Grafiği.....	56
Şekil 4.5. Solvotermal yöntem ve DI çözücüsü ile sentezlenen borofen UV-Vis grafiği.....	57
Şekil 4.6. MoS <sub>2</sub> ve BN Metodu ve DI ile sentezlenen borofen UV-Vis Grafiği.....	58
Şekil 4.7. MoS <sub>2</sub> ve BN Metodu ve IPA ile sentezlenen borofen UV-Vis grafiği.....	58
Şekil 4.8. Saf Borun FT-IR analiz grafiği.....	59
Şekil 4.9. Sonokimyasal metodu ve DI ile sentezlenen borofen FT-IR analiz grafiği...	60
Şekil 4.10. Solvotermal metodu ve DI ile sentezlenen borofen FT-IR analiz grafiği. ...	61
Şekil 4.11. MoS <sub>2</sub> , BN ve DI ile sentezlenen borofen tabakalarının FT-IR analiz grafiği.....	62
Şekil 4.12. MoS <sub>2</sub> , BN ve IPA ile sentezlenen borofen tabakalarının FT-IR analiz grafiği.....	63
Şekil 4.13. Saf Bor 50.0 kx SEM görüntüsü.....	64
Şekil 4.14. Saf Bor 100.0 kx SEM görüntüsü.....	64
Şekil 4.15. Sonokimyasal, DI ile sentezlenen Borofen tabakalarının 50 kx SEM görüntüsü.....	65
Şekil 4.16. Sonokimyasal, DI ile sentezlenen Borofen tabakalarının 100 kx SEM görüntüsü.....	65
Şekil 4.17. Solvotermal, IPA ile Borofen tabakalarının 50.0 kx SEM görüntüsü.....	66
Şekil 4.18. Solvotermal, IPA ile Borofen tabakalarının 100.0 kx SEM görüntüsü.....	66
Şekil 4.19. Solvotermal, DI ile Borofen tabakalarının 50.0 kx SEM görüntüsü.....	67
Şekil 4.20. Solvotermal, DI ile Borofen tabakalarının 100.0 kx SEM görüntüsü.....	67

<b>Şekil 4.21.</b> MoS <sub>2</sub> , BN, DI ile sentezlenen Borofen tabakalarının 100 kx SEM görüntüsü .....	68
<b>Şekil 4.22.</b> MoS <sub>2</sub> , BN, DI ile Borofen tabakalarının 50.0 kx SEM .....	68
<b>Şekil 4.23.</b> MoS <sub>2</sub> , BN, IPA ile Borofen tabakalarının 50.0 kx SEM görüntüsü.....	69
<b>Şekil 4.24.</b> MoS <sub>2</sub> , BN, IPA ile Borofen tabakalarının 100.0 kx SEM görüntüsü.....	69
<b>Şekil 4.25.</b> Sonokimyasal yöntemi ile DI çözeltisindeki Zeta Potansiyel Grafiği .....	71
<b>Şekil 4.26.</b> Sonokimyasal yöntemi ile IPA çözeltisindeki Zeta Potansiyel Grafiği .....	71
<b>Şekil 4.27.</b> Saf Bor XRD Analiz Grafiği .....	72
<b>Şekil 4.28.</b> Sonokimyasal yöntem ve DI ile Borofen XRD Analiz Grafiği.....	73
<b>Şekil 4.29.</b> Solvotermal yöntem ve IPA ile Borofen XRD Analiz Grafiği .....	73
<b>Şekil 4.30.</b> Solvotermal yöntem ve aseton ile Borofen XRD Analiz Grafiği.....	74
<b>Şekil 4.31.</b> MoS <sub>2</sub> , BN yöntemi ve çözücü DI ile sentezlenen borofen XRD grafiği .	75
<b>Şekil 4.32.</b> MoS <sub>2</sub> , BN yöntemi ve çözücü IPA ile sentezlenen borofen XRD grafiği .....	75
<b>Şekil 4.33.</b> Sonokimyasal yöntem ve çözücü aseton ile sentezlenen borofen AFM görüntüsü .....	76
<b>Şekil 4.34.</b> Solvotermal yöntem ve çözücü IPA ile sentezlenen borofen AFM görüntüsü .....	77
<b>Şekil 4.35.</b> MoS <sub>2</sub> , BN yöntem ve çözücü IPA ile sentezlenen borofen AFM görüntüsü .....	78

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Borofen ve grafenin karşılaştırılması .....	8
Çizelge 2.2. Borofenin tarihsel gelişimi .....	11
Çizelge 2.3. Borofenin Elektronik ve Mekanik özelliklerinin karşılaştırılması. ....	16
Çizelge 4.1. Zeta Potansiyel Büyüklüğü ve Davranışı Tablosu .....	70



## SİMGELER DİZİNİ

<b>X<sub>3</sub></b>	Borofenin İki Boyutlu Yapısında Bulunan Faz
<b>β<sub>12</sub></b>	Borofenin Elektronik ve Yapısal Özelliklerini Belirleyen Faz
<b>MoS<sub>2</sub></b>	Molibden Disülfid
<b>N/m</b>	Newton/metre
<b>Ag(111)</b>	Gümüş (111) yüzeyi, gümüş atomlarının kristal yapısının en kararlı düzlemi
<b>Au(111)</b>	Altın (111) yüzeyi, altın atomlarının kristal yapısının en kararlı düzlemi
<b>S/cm</b>	Siemens/santimetre; malzemenini elektriksel iletkenliğini ifade eden bir birim
<b>W/mK</b>	Watt/metre-Kelvin; malzemenin termal iletkenliğini ifade eden birim
<b>GPa</b>	Gigapascal; malzemenin mekanik mukavemetini ifade eden birim
<b>BCl<sub>3</sub></b>	Bor Triklorür
<b>B<sub>2</sub>H<sub>6</sub></b>	Diboran
<b>°C</b>	Santigrat Derece
<b>rpm</b>	Dakikadaki devir sayısı
<b>ml</b>	Mililitre
<b>mg</b>	Miligram
<b>h-BN</b>	Altıgen Bor Nitrür
<b>DI</b>	Deiyonize Su
<b>nm</b>	Nanometre
<b>B-B</b>	Bor-Bor Bağı
<b>B-H</b>	Bor-Hidrojen Bağı
<b>O-H</b>	Oksijen-Hidrojen Bağı
<b>C=C</b>	Karbon-Karbon Çift Bağı
<b>BN</b>	Bor Nitrür
<b>B-O</b>	Bor-Oksijen Bağı
<b>B-N</b>	Bor-Azot Bağı
<b>C=O</b>	Karbon-Oksijen Çift Bağı
<b>-OH</b>	Hidroksil Grubu
<b>IPA</b>	İzopropil Alkol
<b>kx</b>	Büyütme Katsayısı
<b>mV</b>	Milivolt
<b>β-B<sub>105</sub></b>	Beta Bor Fazı
<b>Å</b>	Angstrom
<b>BN</b>	Bor Nitrür
<b>H<sub>2</sub></b>	Hidrojen Gazı

## KISALTMALAR DİZİNİ

<b>AFM</b>	Atomik Kuvvet Mikroskobu
<b>AI</b>	Yapay Zeka
<b>ALD</b>	Atomik Katman Biriktirme
<b>BN</b>	Bor Nitrür
<b>CVD</b>	Kimyasal Buhar Biriktirme
<b>DLS</b>	Dinamik Işık Saçılımı
<b>DI</b>	Deiyonize Su
<b>EBSD</b>	Elektron Geri Saçılım Kırınımı
<b>FTIR</b>	Fourier Fönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
<b>LIB</b>	Lityum-İyon Piller
<b>LPCVD</b>	Düşük Basınçlı Kimyasal Buhar Biriktirme
<b>MBE</b>	Moleküler Işın Epitaksi
<b>PECVD</b>	Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme
<b>RAMAN</b>	Raman Spektroskopisi
<b>SEM</b>	Taramalı Elektron Mikroskobu
<b>SPR</b>	Yüzey Plazmon Rezonansı
<b>SSB</b>	Katı Hal Bataryası Taramalı
<b>STM</b>	Taramalı Tünelleme Mikroskobu
<b>TEM</b>	Transmisyon Elektron Mikroskobu
<b>TGA</b>	Termogravimetrik Analiz
<b>TMD</b>	Geçiş Metali Dikalkojenit
<b>TMDC</b>	Geçiş Metali Dikalkojenit
<b>UHV</b>	Ultra Yüksek Vakum
<b>UV-Vis</b>	Ultraviyole-Görünür Bölge Spektroskopisi
<b>XPS</b>	X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi
<b>XRD</b>	X-ışını Difraksiyonu
<b>2D</b>	İki Boyutlu

## 1.GİRİŞ

İki boyutlu (2B) malzemeler bataryalar, hidrojen depolama, esnek elektronikler, süperkapasitörler, süperiletkenler, biyomedikal araçlarda kullanılan elektronik ve optik devreler, biyosensörler, katalizörler, sıcaklık yönetim sistemleri, yeni nesil giyilebilir araçlar, kuantum bilgisayarlar, nanokompozit malzemeler, polimer ve seramik matrisli kompozitler ve ilaç taşıyıcı sistemler gibi çok çeşitli uygulama alanlarına sahip olmaları nedeniyle son yıllarda oldukça ilgi çekmeye başlamışlardır. 2 boyutlu malzemeler arasında borofen, benzersiz kimyasal yapısı, etkili elektronik iletkenliği ve yüzey özellikleri nedeniyle son yıllarda bilim dünyasında büyük ilgi görmektedir. İki boyutlu bor allotropu ve en hafif elemental olan borofenin ortaya çıkışı, X3 ve  $\beta$ 12 fazlarının benzersiz yapısal ve elektronik özellikleri nedeniyle olağanüstü olmuştur (Ranjan vd., 2020). Benzersiz özellikleri ve teknolojik uygulamalar için yüksek potansiyele sahip borofen umut verici bir malzeme haline gelmiştir ancak ticarileştirilebilmesi için yapısal özellikleri ve üretim yöntemleri ile alakalı literatürde az sayıda çalışma vardır ve daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Borofenin deneysel olarak elde edilmesinde yapılmış çalışmalarda, atomik katman biriktirme (ALD) (Mannix vd., 2015), moleküler ışın epitaksi (MBE) Feng et al., 2016) ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) (Zhong et al., 2017; Wu, 2019) gibi yöntemler kullanılmıştır. Çalışmaların büyük bir kısmında gümüş alttaş kullanılmıştır. Bu çalışmalarda borofen eldesinde kristalleşmenin gümüş substratın kristal yapısından kaynaklandığı ileri sürülmektedir.

ALD ve MBE yöntemlerinde borofen büyütmelemleri, temel olarak borofen birikimini küçük alanlarla sınırladığından endüstriyel ölçekte üretilmesini zor ve maliyetli hale getirebilmektedir. CVD yöntemi ise endüstriyel ölçekte çeşitli 2 boyutlu malzemelerin sentezlenmesini sağlar ancak laboratuvarlarda ultra yüksek vakumlu deney koşullarının sağlanması zorlu ve maliyetli olabilmektedir. Borofenin metal alttaşlar üzerine ultra yüksek vakumda hazırlanması, borofenin ticarileştirilmesine yönelik potansiyel pek çok uygulamayı kısıtlayan bir dezavantajdır. Bu nedenle, yüksek kalitedeki az katmanlı borofenin ticari uygulamalara yönelik olarak büyük miktarlarda sentezlenmesi için kolay ve etkili bir sentez prosedürünün geliştirilmesi son derece önemlidir.

Borofen sentezi için literatürde var olan farklı bir yöntem son yıllarda ortaya çıkan sonokimyasal eksfoliasyon yöntemidir. Literatürde bazı çalışmalarda borofen tabakaları arasında van der Waals moleküler çekimi olmadığından bu yöntemlerle borofen eldesinin zor olabileceği gibi endişeler bulunmaktadır. Yakın zamanda yapılan iki çalışma ile sonokimyasal eksfoliasyon ile borofen elde edilebileceği ortaya konulmuştur (Li et al., 2018; Ranjan, 2019). Fakat hala borofenin eksfoliasyonuna ilişkin derinlemesine teorik ve deneysel bir anlayış henüz oluşturulamamış ve bilim dünyasında açıklanması gereken bir soru olarak yerini almaya devam etmektedir.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında borofen sonokimyasal eksfoliasyon yöntemi ve borofen hibritlerinin sentezi olarak gerçekleştirilmiştir. Borofen sentezi için uygulanan yöntemler son ürünün özelliklerini belirleme konusunda büyük rol oynamaktadır. Genel olarak, sonokimyasal yöntem ile sonikasyon süresine ve çözücü tipine bağlı olarak tek tabaka, iki tabaka, üç tabaka ve dördü tabaka malzeme sentezlenebilir. Çözücünün doğru seçimi ve doğru sonikasyon süresi etkileşimi ile büyük yanal boyutlara sahip tek katmanlı levhalar elde edilebilmektedir. Ancak çözücü iyi etkileşime girmezse, aynı sonikasyon süresinde dahi çok tabakalı yapılar ortaya çıkabilmektedir. Çok uzun süreli bir sonikasyon ise çok parçalanmalar sebebiyle borofen dots ların oluşumuna neden olabilmektedir. Bu nedenle, uygun çözücü seçimi ve sonikasyon süresinin optimizasyonu, borofen tabakasının oluşumu için önemli ve esastır. Bu parametrelerin optimizasyonu için çalışmada 5 farklı çözücü ve banyo tipi sonikatör (BluLab) ve prob sonikatör (Sonics & Materials Inc., USA) ile farklı sonikasyon zamanları kullanılmıştır. Ayrıca santrifüj aşamasında da farklı zamanlar ve hızlar denenerek santrifüj zamanı ve hızı da optimize edilmiştir. Çalışmada farklı çözücü, farklı sonikasyon tipleri, santrifüj hızları gibi bir çok parametre incelenmiştir. Ayrıca borofen hibritlerinin sentezi için Bor nitrür (BN) ve molibden disülfür (MoS<sub>2</sub>), sonokimyasal sentez yoluyla hazırlanmıştır (Ou et al., 2021). Her bir BN ve MoS<sub>2</sub> belirli miktarlarda, 1:1 oranında izopropil alkol ve DI su içeren solüsyon içerisinde ayrı ayrı hazırlanmıştır. Hazırlanan örnekler ultrasonik banyoda ve prob tipi sonikatörde tutulmuştur. Sonikasyondan sonra, elde edilen sıvı farklı hızlarda ve sürelerde santrifüjlenmiş, yıkanmış ve vakum etüvünde ve liyofilizatörde kurutulmuştur. Süpernatantın her durumda tabaka sayısının 5' ten daha az olduğu karakterizasyon analizleri sonrasında görülmüştür.

İki boyutlu malzemeler solüsyon veya sıvı formda gelişmiş ısı transferi veya soğutma teknolojileri, iletim ve diğer termal yönetim sistemleri, ilaç taşıyıcı sistemler gibi birçok

alanda kullanıldığı için solüsyonların ve akışkanların kararlılıkları büyük önem taşımaktadır. Solüsyon stabilitesi (kararlılık) için en önemli ölçüm yöntemlerinden birisi zeta potansiyeldir. Zeta potansiyel partiküller ile taban akışkanı arasındaki potansiyel fark olarak bilinir ve malzemenin elektrostatik etkileşimi üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olabileceğinden, kolloidal sistemlerin dağılma kararlılığını karakterize etmenin en önemli yoludur (Cakmak et al., 2020). Projenin ikinci aşamasında sentezlenen borofen farklı kütleli bölüntülerde su içerisinde hazırlanarak zamanla pH bağımlı olarak zeta potansiyel (Malvern Instruments, UK) değerleri ölçülmüş ve yorumlanmıştır.



## 2. İKİ BOYUTLU NANOMALZEMELER VE ÖZELLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

İki boyutlu nanomalzemeler, çeşitli teknolojik uygulamalar için zorunlu olan elektriksel ve optik özelliklere sahiptir. İnorganik nanomalzemeler arasında yer alan kuantum noktaları, nanoteller ve nanoçubuklar, benzersiz optik ve elektriksel özellikleri sebebiyle optoelektronik alanında tercih edilmektedir. Geçiş metal dikalkojenit (TMD) nanomalzemeleri ise, basit bir pul pul dökülme işlemiyle elde edilebilir ve eşsiz elektriksel ve optik özellikler sunar. Nanomalzemelerin küçük boyutları ve farklı yüzey özellikleri, bu sıradışı özelliklerin altında yatan temel faktörlerdir (Wang et al., 2012). Ayrıca, bu nanomalzemeler kimyasal ve katalitik özellikleriyle, endüstriyel süreçlerde ve çeşitli bilimsel uygulamalarda önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle nano boyuttaki malzemeler, hacimsel karşılıklarına göre daha düşük sıcaklıklarda erime eğiliminde olup, bu özellikleri çeşitli teknolojik uygulamalarda kullanışlı hale getirir (Guo et al., 2015).

Grafen, iki boyutlu nanomalzemeler arasında, büyük ilgi gören ve karbon bazlı bir malzeme olarak ön plana çıkmıştır. Tek atom kalınlığındaki yapısı sayesinde, grafen üstün mekanik, elektriksel, termal ve optik özellikler sergiler. Grafen, endüstride ve araştırma dünyasında devrim niteliğinde uygulamalara olanak tanımakta olup, artan yüzey alanı ve biyouyumluluğu gibi avantajları ile polimer bazlı nanomalzemelerle birlikte çalışmaktadır (Ji et al., 2020).

Borofen ise, bor atomlarından oluşan ve grafenin bor bazlı bir eşdeğeri olarak tanımlanan iki boyutlu bir nanomalzeme olarak öne çıkmaktadır. Borofen, olağanüstü mekanik, elektriksel ve termal özellikler sergilemekte olup, enerji depolama, optoelektronik ve hafif dayanıklı malzemelerin geliştirilmesi gibi çeşitli teknolojik uygulamalar için umut verici bir malzemedir. Borofenin yapısal özellikleri, boyut ve şekle bağlı olarak değişiklik göstermekte ve bu da onu nanoteknoloji alanında önemli bir araştırma konusu haline getirmektedir. Borofenin iki boyutlu yapıları, olağanüstü mekanik mukavemet, yüksek elektrik iletkenliği ve üstün termal performans gibi nitelikler sergilerken, geniş spektrumlu ışık emilim kapasitesi de enerji depolama ve optoelektronik uygulamalarında etkin kullanılmasını sağlamaktadır. Ayrıca, borofenin üretim süreçleri ve sentez yöntemleri üzerine yapılan araştırmalar, literatürde yeni alanlar açmakta ve bu malzemenin teknolojik uygulamalarının yaygınlaştırılması amacıyla yeni sentez yaklaşımlarını desteklemektedir (Mortazavi et al., 2018). Bu bağlamda, borofen, hafif

ancak güçlü malzeme gereksinimlerinin olduğu endüstrilerde de tercih edilen bir aday haline gelmiştir.

## 2.1. İki Boyutlu Malzemelere Genel Bakış

İki boyutlu nanomalzemelerin araştırılmasının önemi, bu malzemelerin sunduğu çeşitli uygulama ve avantajlarda yatmaktadır. Makro ölçekli benzerlerine kıyasla, güç-ağırlık oranı, iletkenlik ve optik ile manyetik özellikler gibi alanlarda farklı davranışlar sergileyen bu malzemeler, mimariden mikrofabrikasyona kadar çeşitli endüstriler ve uygulamalar için mükemmel potansiyele sahiptir. Nanomekanik araştırmalar, çeşitli nanomalzemelerin, çok sayıda uygulamada değerlendirilebilecek yeni mekanik özellikleri sürekli olarak keşfetmektedir (Bose, 2018).

İki boyutlu nanomalzemelerin potansiyelini kavrayabilmek ve bunu uygulamalara aktarabilmek için, malzemelerin özellikleri, sentez yöntemleri ve başlıca kullanım alanlarını derinlemesine incelemek gerekmektedir. Bu nanomalzemelerin temel özellikleri şunları içerir (Li et al., 2019):

- Mekanik mukavemet ve esneklikteki yükseklik
- Elektrik iletkenliğindeki mükemmellik
- Termal performanstaki üstünlük
- Boyut ve şekle bağlı olarak gösterilen benzersiz optik ve elektronik özellikler

Her bir malzeme için avantajlar ve dezavantajlar sunan çeşitli sentez yöntemleri geliştirilmiştir. Araştırmacılar, bu teknikleri daha da geliştirdikçe, iki boyutlu nanomalzemeler için yeni uygulama alanları ve kullanımlar keşfedilmektedir. Elektronik, enerji depolama ve sensörler, bu uygulamalara örnek teşkil etmektedir. İki boyutlu nanomalzemelerin özellikleri, üretim yöntemleri ve uygulama alanları üzerine yapılan kapsamlı incelemeler, bu alandaki yenilikçi gelişmeler için kapı aralamaktadır (Niu et al., 2016).

Tek atom katmanından oluşan ve iki boyutlu bir kafes yapısında düzenlenmiş bor atomlarından meydana gelen borofen, olağanüstü mekanik ve yapısal özelliklere sahiptir. Bu malzemenin doğal mukavemeti, her biri 0,166 nm uzunluğunda olan bor bağlarına bağlanabilir; bu özellik, borofeni, A36 yapısal çeliğinden 200 kat daha mukavemetli kılar.

Bilim insanları, borofenin üstün dayanıklılığını atomik kuvvet mikroskobu (AFM) kullanarak ölçmüş ve bu dikkat çekici mekanik özellikleri detaylandırmıştır. Borofenin öne çıkan temel mekanik ve yapısal özellikleri arasında çelikten 200 kat daha güçlü olması, yüksek esneklik ve son derece hafif yapısı bulunmaktadır (Mortazavi et al., 2016).

Borofenin kimyasal ve termal özellikleri de malzemesinin iki boyutlu nanomateryal olarak önemini artıran faktörlerdendir. Özellikle borofen oksit, yüksek yüzey alanı, işlevsellik ve iki boyutlu yaprak benzeri yapısı sayesinde dikkat çekici özelliklere sahiptir. Nanomalzemeler, borofen dahil, uygulama alanları ve biyolojik sistemlerle olan etkileşimleri ile tanımlanır, kimyasal özelliklerini ön plana çıkarır. Borofenin temel kimyasal ve termal özellikleri, yüksek termal ve kimyasal stabilite, biyolojik sistemlerle etkileşime girme kapasitesi ve nanoteknoloji ile malzeme bilimi gibi alanlarda gösterdiği çok yönlülük olarak sıralanabilir (Sun et al., 2016).

Borofen, bor atomlarından oluşan iki boyutlu bir nanomalzemedir ve grafenin bor bazlı eşdeğeri olarak kabul edilebilir. Bu yapı, olağanüstü mekanik, termal ve elektriksel özellikleriyle dikkat çeker. Borofen, yüksek mukavemet, olağanüstü iletkenlik ve termal direnç gibi özellikleri nedeniyle malzeme biliminde önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Tek bir atom kalınlığındaki bu iki boyutlu yapı, malzeme bilimindeki potansiyel uygulamalara yeni bir perspektif getirmektedir (Wang et al., 2019).

Borofenin elektriksel iletkenliği, yüksek seviyede elektron mobilitesi sayesinde, enerji depolama ve iletim alanlarında kullanım için idealdir. Ayrıca, bu malzeme ışığın geniş bir spektrumunu absorbe edebilme yeteneği sayesinde optoelektronik uygulamalarda da büyük potansiyele sahiptir. Borofenin elektriksel ve optik özellikleri, onu ileri derecede hassas sensörlerin ve diğer elektronik bileşenlerin geliştirilmesi için cazip bir malzeme haline getirir (Mortavazi et al., 2008).

Termal özellikler açısından, borofen yüksek termal iletkenlik sergiler ve bu da onu yüksek performanslı ısı dağıtım malzemeleri için uygun kılar. Bunun yanında, kimyasal stabilitesi ve düşük ağırlığı nedeniyle, borofen, havacılık ve uzay endüstrilerinde hafif ve dayanıklı malzemelerin geliştirilmesinde kullanılabilir (Noroozi et al., 2020).

Borofenin sentezi, onun malzeme bilimindeki uygulamalarını gerçekleştirebilmek için gerekli bir adımdır. Çeşitli sentez yöntemleri araştırılmakta olup, bu yöntemler malzemenin özelliklerini optimize etmeyi ve geniş çapta uygulamalarını mümkün

kılmayı amaçlamaktadır. Borafenin araştırma ve geliştirme süreçleri, malzemenin temel özelliklerini, üretim tekniklerini ve potansiyel kullanım alanlarını detaylı bir şekilde anlamayı gerektirir (Wang et al., 2019).

Borofenin temel özellikleri ve potansiyel uygulamaları üzerine yapılan çalışmalar, nanoteknoloji ve malzeme biliminin sınırlarını genişletmekte ve bu alanda yenilikçi çözümler sunmaktadır. Enerji, elektronik ve termal yönetim gibi alanlarda borofenin kullanımı, ileri teknoloji ürünlerinin geliştirilmesine olanak tanıyacak ve malzeme biliminde devrim yaratacak potansiyele sahiptir (Kaneti et al., 2021). Sonuç olarak, borofen sensörler, piller ve katalitik kimya gibi çeşitli alanlarda potansiyel uygulamalarıyla büyük bir potansiyel taşıyan yeni bir süper malzeme olarak kabul edilmektedir (Wang et al., 2019). Etkileyici özellikleri, araştırmacıları borofeni çok sayıda işlevsel özelliğe sahip başka bir iki boyutlu malzeme olan grafenle karşılaştırmaya yöneltmiştir.

Grafen, bal peteği şeklinde tek bir karbon atomu katmanından oluşur ve olağanüstü güç, esneklik ve elektriksel iletkenlik özelliklerine sahiptir.

Borofen ve grafen arasında benzerlikler bulunsa da borofen, üstün esnekliği ve metalik yapısıyla öne çıkmaktadır. Grafen gibi iki boyutlu bir malzeme olmasına rağmen, borofen, grafenden farklı olarak daha yüksek bir esneklik sunmakta ve kompozit malzemelerde seramik dayanıklılığını artırmak için tercih edilmektedir. Borofen, metalik elektronik yapısıyla elektronik uygulamalar için de farklı avantajlar sunar. Bunun yanında, borofenin üretimi grafene göre daha zordur; grafen, grafit oksidin indirgenmesiyle büyük miktarlarda elde edilebilirken, borofenin sentez yöntemleri hala geliştirilmeye çalışılmaktadır (Mannix et al., 2015). Elektronik yapılarındaki farklılık nedeniyle, borofen ve grafen, farklı uygulama alanlarında kullanılmaktadır.

Grafen, esneklik ve çeşitli türevlerinin sunduğu avantajlarla öne çıkarken, borofen, yüksek esnekliği ve dayanıklılığıyla seramik kompozitlerin güçlendirilmesinde büyük potansiyel taşır. Borofen ayrıca, büyük potansiyele sahip bir malzeme olarak elektronik, enerji depolama ve optoelektronik alanlarında giderek daha fazla dikkat çekmektedir (Khan et al., 2020; Özkan, 2023).

Borofen ve grafenin karşılaştırılmasına yönelik olarak sunulan Çizelge 2.1, iki malzemenin atomik yapıları, mekanik mukavemetleri, elektriksel iletkenlikleri, termal

dirençleri, optik özellikleri, uygulama alanları ve kimyasal stabiliteleri gibi birçok önemli özelliğini gözler önüne sermektedir. Çizelge 2.1, borofenin tek katmanlı bor atomlarından oluştuğunu, yüksek mekanik mukavemet, elektrik iletkenliği, termal direnç ve geniş spektrumlu ışık emilimi gibi özellikler sergilediğini göstermektedir. Grafen ise tek katmanlı karbon atomlarından oluşmakta olup, olağanüstü yüksek elektrik iletkenliği ve ışık geçirgenliği gibi nitelikleriyle ön plana çıkmaktadır. Her iki malzeme de benzer güçlü yönleri sahip olmasına rağmen, borofen enerji depolama, optoelektronik ve hafif ama dayanıklı malzemeler için ideal iken, grafen elektronik ve sensör uygulamalarında daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Çizelge bu iki ileri teknoloji malzemesinin potansiyel uygulama alanlarına ve avantajlarına dair önemli karşılaştırmalı veriler sunmaktadır.

**Çizelge 2.1. Borofen ve Grafen Karşılaştırılması**

Özellikler	Borofen	Grafen
Atomik Yapı	Tek katmanlı, bor atomlarından oluşur	Tek katmanlı, karbon atomlarından oluşur
Mekanik Mukavemet	Çok yüksek	Çok yüksek
Elektrik İletkenliği	Yüksek	Olağanüstü yüksek
Termal Direnç	Yüksek	Çok yüksek
Optik Özellikler	Geniş spektrumlu ışık emilimi	Yüksek ışık geçirgenliği
Uygulama Alanları	Enerji depolama, optoelektronik, hafif ama dayanıklı malzemeler için ideal	Elektronik, enerji depolama, sensörler, geniş uygulama alanları
Kimyasal Stabilité	Yüksek	Yüksek, ancak bazı çevre koşullarında grafen oksit oluşabilir
Üretim Zorlukları	Yeni keşfedilen, üretim yöntemleri hala geliştirilmekte	Relatif daha kolay ve iyi anlaşılabilir yöntemlerle üretilir
Araştırma ve Geliştirme	Devam eden araştırmalar, potansiyel yeni kullanım alanları keşfedilmekte	İyi geliştirilmiş ve çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır

Grafen ve borofen gibi malzemeler, elektronik, nanokompozitler, sensörler ve çeşitli endüstrilerde kullanımlarıyla birlikte, yenilikçi uygulamaların geliştirilmesi için sürekli araştırma ve geliştirme çalışmalarının konusu olmaktadır. Bu malzemelerin benzersiz özellikleri, onları çeşitli endüstrilerdeki potansiyel uygulamalar için değerli kılmaktadır.

## **2.2.Borofenin Tarihsel Gelişimi**

Borofenin varlığına ilişkin teorik tahminler, borun iki boyutlu bir allotropu olarak ilk kez öne sürüldüğü 1990'ların ortalarına kadar izlenebilir. Elementel bor, göktaşlarında küçük miktarlarda bulunan bir metaloid olmasına rağmen, Dünya'da doğal olarak oluşmaz. Borofen kavramı, araştırmacıların potansiyel uygulamalarını ve mekanik, termal, elektronik ve optik özellikleri gibi özelliklerini keşfetmeye başladıkça ilgi kazanmıştır. Bu ilk araştırmalar, 2015 yılında borofenin deneysel olarak doğrulanmasının temelini atmıştır (Wang et al., 2019).

2015'teki borofenin deneysel olarak keşfi, malzeme biliminde çığır açan bir gelişme olarak kaydedilmiştir. Araştırmacılar, ultra yüksek vakum şartlarında temiz metal yüzeyleri üzerinde atomik düzeyde ince, kristal yapıda ve metalik özelliklere sahip borofen örnekleri başarılı bir şekilde sentezlemiştir. Bu başarılı sentez, borofenin çeşitli yapılarının tanımlanmasına odaklanan deneysel üretim yöntemlerinin bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemi ve transfer yöntemleri, sentez sırasında potansiyel hataları en aza indirme amacı gütmektedir (Mannix et al., 2015).

Borofenin deneysel keşfinden sonraki süreçte, özellikleri detaylı bir şekilde karakterize edilmiştir. Araştırmalar, borofenin hidrojen depolama kapasitesinin maksimum %15'e ulaşabildiğini, bu değer grafenle karşılaştırılabileceğini ortaya koymuştur. Ancak borofenin termal iletkenliği, grafene kıyasla çok daha düşüktür; bu da onu termal enerji yönetimi açısından daha avantajlı kılmaktadır (Li, 2017; Mortazavi et al., 2018). Borofenin eşsiz fiziksel ve kimyasal özellikleri, enerji tasarrufu sağlayan malzemeler, karbon emisyonunun azaltılması, küresel gıda zincirindeki uygulamalar ve pek çok tüketici ürünüde potansiyel kullanımlar sunmaktadır. Bu öncü karakterizasyon çalışmaları, borofenin gelecekteki araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin önünü açmıştır (Dethan, 2021).

Borofenin keşfini takiben yapılan ileri düzey araştırmalar, bu iki boyutlu malzemenin elektronik ve mekanik özelliklerine dair daha derin anlayışlar sağlamaktadır. Özellikle,

borofenin elektron hareketliliği ve mekanik dayanıklılığı, onu yüksek performanslı transistörler, sensörler ve esnek elektronik cihazlar için mükemmel bir aday haline getirmektedir. Borofenin elektronik bant yapısının ayarlanabilirliği, farklı fonksiyonel grupların yüzeyine bağlanması yoluyla elektronik özelliklerin hassas bir şekilde modüle edilmesine olanak tanımaktadır. Bu özelliği, nanoelektronikte yeni nesil cihazların tasarımı için büyük önem taşımaktadır (Mortazavi et al., 2018).

Ayrıca, borofenin yüzey kimyası ve reaktivitesi, enerji depolama uygulamalarında da önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle, borofenin yüksek yüzey alanı ve hidrojen ile güçlü etkileşimi, enerji yoğunluğu yüksek pil ve süperkapasitörlerin geliştirilmesi için yeni yollar sunmaktadır. Borofenin, elektrokatalitik uygulamalar ve hidrojen üretimi için de potansiyel gösterdiği araştırmalar bulunmaktadır. Bu alanlardaki çalışmalar, borofenin hidrojen evrim reaksiyonunda (HER) yüksek katalitik aktivite sergileyebileceğini ve böylece temiz enerji teknolojilerine katkıda bulunabileceğini göstermiştir (Tai et al., 2020).

Diğer yandan, borofenin mekanik özellikleri, nanomekanik sistemler ve dayanıklı malzemelerin tasarımında yeni perspektifler açmaktadır. Yüksek elastikiyet modülü ve kırılma dayanımı, borofenin nano ölçekteki mekanik yükler altında bile olağanüstü bir dayanıklılık sergilediğini ortaya koymuştur. Bu özellikler, özellikle uzay ve havacılık endüstrilerinde yüksek performans gerektiren uygulamalarda borofenin kullanımını cazip kılmaktadır (Zhang et al., 2016)

Çizelge 2.2 Borofenin tarihsel gelişimini göstermektedir. Borofenin keşif süreci, gelişen uygulama alanları ve karakterizasyon çalışmaları gibi önemli ilerlemeler üzerinden yapılan analizlerde atıfta bulunabiliriz. Bu çizelge, borofenin 1995 yılında teorik olarak öngörülmesinden, 2015'te deneysel olarak keşfedilmesine ve sonraki yıllarda enerji depolama, nanomekanik sistemler gibi alanlarda kullanım potansiyelinin araştırılmasına kadar olan süreci özetlemektedir.

Çizelge 2.2'deki verilere göre, borofen üzerine yapılan çalışmaların son yıllarda hız kazandığı ve özellikle hidrojen depolama, yüksek enerji yoğunluğu olan piller gibi enerji uygulamaları açısından umut verici olduğu anlaşılmaktadır. 2021'de mekanik özelliklerinin detaylı bir şekilde karakterize edilmesi ve 2023'te nanomekanik sistemlerdeki araştırmaların artışı, borofen üzerindeki bilimsel ilginin hala güçlü bir şekilde devam ettiğini göstermektedir.

Bu çizelgeye dayanarak, borofenin malzeme bilimi ve nanoteknoloji alanlarında önemli bir araştırma konusu olduğu ve gelecekteki uygulamalarının genişleyeceği öngörülebilir.

**Çizelge 2.2.** Borofenin Tarihsel Gelişimi

Yıl	Önemli Gelişmeler
1995	Teorik tahminler ilk kez öne sürüldü
2015	Deneysel olarak keşfedildi
2017	Hidrojen depolama kapasitesinin keşfi
2018	Çeşitli yapıların tanımlanması
2020	Enerji yoğunluğu yüksek piller için potansiyel
2021	Mekanik özelliklerin detaylı karakterizasyonu
2023	Nanomekanik sistemlerde kullanımı için araştırmalar

Borofenin keşfi ve sonraki karakterizasyonu, malzeme bilimi ve nanoteknoloji alanlarında önemli bir ilerlemeyi temsil etmektedir. Borofenin benzersiz özellikleri, onu çeşitli ileri teknoloji uygulamaları için umut verici bir malzeme yapmaktadır. Devam eden araştırmalar, borofenin potansiyelini daha da ortaya çıkaracak ve geleceğin teknolojilerinin geliştirilmesine olanak tanıyacak şekilde genişletilmektedir (Özkan, 2023).

### **2.3. Borofenin Yapısal ve Elektronik Özellikleri**

Tek katman bor atomlarından meydana gelen iki boyutlu malzeme borofen, özgün atom yapısı ve morfolojisi ile ön plana çıkmaktadır. Bu benzersiz yapı, onu elektrik-elektronik ve haberleşme mühendisliği gibi alanlarda çeşitli potansiyel uygulamalara sahip olması itibarıyla gelecekteki araştırma ve geliştirme çalışmaları için umut vadeden bir malzeme yapmaktadır. Borofenin atomik yapısı, içi boş altıgen yoğunluk gibi çeşitli tiplere ayrılarak sınıflandırılabilir (Mannix et al., 2015).

Elektronik ve iletişim mühendisliğindeki potansiyel kullanımlarıyla önem arz eden borofen, elektronik özellikleri sayesinde çeşitlilik göstermektedir. Atomik yapısından kaynaklanan iletkenliği, borofeni elektronik uygulamalar için son derece uyarlanabilir bir malzeme yapmaktadır. Borofenin elektronik alandaki bazı özellikleri arasında sert su

ortamlarında gösterdiği mükemmel stabilite, kirleticilerin etkin bir şekilde arındırılmasını sağlayan deterjanlık ve yüzey aktif maddelerin katkısıyla artırılabilen köpüren yapı yer almaktadır. Bu nitelikler, borofeni yüksek stabilite ve performansın gerektiği elektronik cihazlar ve iletişim sistemleri için ideal bir aday kılmaktadır (Dethan, 2021).

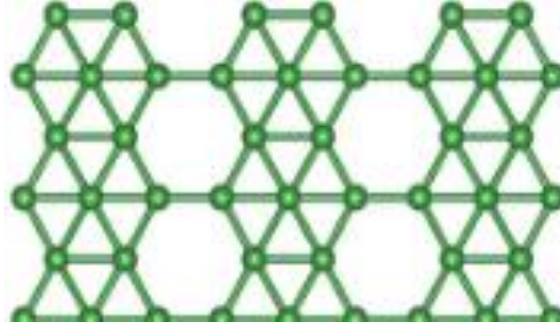
Mekanik özellikler ve dayanıklılık da borofenin potansiyel uygulamalarında göz önünde bulundurulması gereken faktörlerdendir. Yapılan araştırmalar, içi boş altıgen yoğunluğa sahip borofenin teorik olarak 210 N/m'ye kadar düzlem içi modül sergileyebildiğini, bu durumun da malzemenin üstün mekanik özelliklerini işaret ettiğini ortaya koymaktadır. Bu yüksek modül değeri, borofenin hafif ve güçlü malzemelere ihtiyaç duyulan çeşitli uygulamalarda değerlendirilebileceğini göstermektedir. Borofenin yapısal özellikleri ve mekanik performansı arasındaki ilişki, özellikle elektrik-elektronik ve haberleşme mühendisliği alanlarındaki potansiyel kullanımlarını derinlemesine anlamak için büyük öneme sahiptir (Zhang et al., 2016).

### **2.3.1. Borofenin Kristal Yapısı**

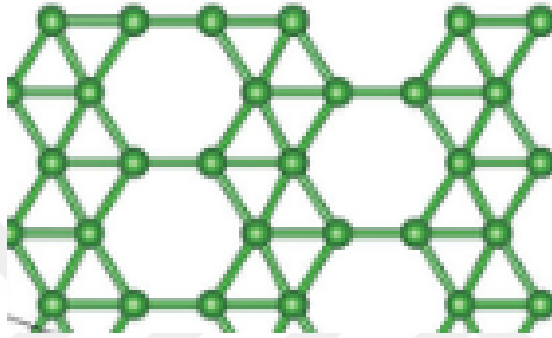
Kristal yapıda düzenlenmiş, tek katman bor atomlarından oluşan borofen, iki boyutlu bir bor allotropu olarak tanımlanır ve bu özelliğiyle önemli bir ilgi odağı haline gelmiştir. Yüksek mukavemet, esneklik ve hafifliği gibi dikkat çekici fiziksel ve kimyasal özellikleri, borofeni gelecek vadeden bir malzeme olarak öne çıkarmaktadır (Sorkin et al., 2014).

Borofenin benzersiz kristal yapısı, ısı ve elektriği mükemmel şekilde ileten ve çelikten 100 kat daha dayanıklı olan grafenle karşılaştırıldığında dahi farklılaşır. Grafenin etkileyici niteliklerine rağmen, borofenin sunduğu daha yüksek güç ve esneklik, onu belirli uygulamalar için tercih edilen bir alternatif kılmaktadır. Üstelik, borofen yüksek sıcaklıklarda süperiletken özellikler sergileyerek, endüstriyel potansiyelini daha da belirginleştirmektedir. Borofenin sentezi, genellikle ultra yüksek vakum (UHV) koşullarında, gümüş (Ag(111)) ve altın (Au(111)) düzlemleri üzerinde gerçekleşmektedir (Dev et al; 2022).

Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de Borofenin  $\beta_{12}$  ve  $X_3$  fazındaki kristal yapıları verilmiştir. Bu yapılar, bor atomlarının düzenlenişi ve yüzey özellikleri açısından farklılık göstermekte ve borofenin benzersiz fiziksel özelliklerine katkıda bulunmaktadır (Zhou et al., 2017).



**Şekil 2.1.**  $\beta_{12}$  fazındaki borofen levhalarının kristal yapısı



**Şekil 2.2.**  $X_3$  fazındaki borofen levhalarının kristal yapısı

Borofenin iki temel fazı olan  $\beta_{12}$  ve  $X_3$  fazları arasında önemli yapısal farklılıklar bulunmaktadır. Şekil 2.1'deki  $\beta_{12}$  fazı, bor atomlarının yoğun bir şekilde dizildiği ve daha düzenli bir kafes yapısına sahip olduğu bir fazdır, bu faz genellikle daha kararlı bir yapıyı temsil etmektedir (Feng et al., 2016). Şekil 2.2'deki  $X_3$  fazı ise, bor atomlarının daha düzensiz bir şekilde dizildiği ve daha açık bir kafes yapısına sahip olan bir fazdır, bu da borofenin mekanik ve elektronik özelliklerinde farklılıklar yaratmaktadır (Mannix et al., 2015).

Borofenin kristal yapısını incelemek, malzemenin eşsiz özelliklerini ve potansiyel uygulamalarını anlamak açısından öneme sahiptir. Kimyacılar, borofen kristallerinin ayırt edici boşluk desenlerine dikkat çekerek, malzemenin kimyasal yapısal özelliklerini tanımlamaya yönelik çalışmalar yapmaktadırlar. Bu özgün desenler, borofenin karakteristik elektronik ve optik özelliklerine katkı sağlar ve elektrik depolama pilleri başta olmak üzere ileri teknoloji uygulamalarında kullanılabilme potansiyelini barındırmaktadır. Dolayısıyla, borofenin kristal yapısının detaylı analizi, malzemenin çeşitli sektörlerdeki kullanım olanaklarını keşfetmek için temel bir adımdır (Özkan, 2023).

Borofenin araştırılması, malzemenin temel ve uygulamalı bilimlerdeki potansiyelini ortaya koymaktadır. Kristal yapının ayrıntılı analizi, borofenin elektronik, optik ve mekanik özelliklerindeki benzersizlikleri vurgulamaktadır. Bor atomlarının düzenlenişi, bu malzemenin nano ölçekli uygulamalarda gösterdiği üstün performansa katkıda bulunmaktadır. Özellikle, elektron mobilitesi ve optik geçirgenlik gibi parametreler, borofenin yarı iletken teknolojilerinde ve fotovoltaik hücrelerde kullanımını teşvik etmektedir. Ayrıca, borofenin mekanik dayanıklılığı, hafif yapı malzemeleri ve dayanıklı kompozitlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır (Lherbier et al., 2016).

Borofenin moleküler düzeydeki etkileşimleri, onun kimyasal sensörler ve katalizörler gibi alanlarda uygulanabilirliğini artırmaktadır. Malzemenin yüzey aktifliği ve adsorpsiyon kapasitesi, çevresel izleme ve temizleme teknolojilerinde önemli bir rol oynayabilmektedir. Borofenin moleküler düzeyde hassas detektörlerin ve yüksek verimli katalizörlerin geliştirilmesinde büyük öneme sahiptir (Özkan, 2023).

Borofenin sentezi ve karakterizasyonu üzerine yapılan çalışmalar, malzemenin pratik uygulamalara adaptasyonu için önemli bilgiler sunmaktadır. Sentez yöntemlerinin optimizasyonu ve malzemenin yüzey özelliklerinin modifikasyonu, borofenin özgün özelliklerinin daha da iyileştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu süreçler, malzemenin endüstriyel ölçekte üretimine ve uygulamalara entegrasyonuna yönelik adımları kolaylaştırmaktadır (Kiralı et al., 2019).

Borofenin kristal yapısının ve özelliklerinin derinlemesine incelenmesi, malzemenin gelecekteki teknolojilere entegrasyonu açısından büyük önem taşımaktadır. Borofenin özgün özellikleri, onu elektronikten enerjiye, çevresel uygulamalardan malzeme bilimine kadar geniş bir uygulama spektrumunda değerli bir malzeme yapmaktadır. Devam eden araştırma ve geliştirme çalışmaları, borofenin bu potansiyelinin tam olarak gerçekleştirilmesine olanak tanıyacak ve malzemenin çeşitli alanlardaki yeniliklere katkısını artıracaktır (Özkan, 2023).

### 2.3.2. Elektronik ve Mekanik Özellikler

Borofenin bant yapısı ve enerji seviyeleri, malzemenin elektronik özelliklerinin temelini oluşturur ve onu çeşitli uygulamalar için ideal bir aday yapmaktadır. Elementel borun kendine has özellikleri, onun kristal formunda kırılğan, koyu ve parlak bir metaloid görünüm sergilemesine yol açmaktadır. Borofenin elektronik özellikleri, hizalanması ve fazına bağlı olarak değişkenlik gösterir; bu durum, malzemenin elektronik, mekanik ve optik alanlarda çeşitlilik arz eden uygulamalara uyum sağlamasını mümkün kılmaktadır. Borofenin yapısal boşluklarının konumu, bu özellikler üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir; malzemeyi son derece uyarlanabilir ve çok yönlü kılmaktadır (Peng et al., 2016).

Borofen, elektriksel iletkenlik ve direnç özellikleri açısından olağanüstü kabiliyetlere sahiptir. Son derece güçlü ve hafif bir elektrik iletkeni olarak, borofen kimyasal reaksiyonlarda katalizör olarak da işlev görebilmektedir. Elektriksel özellikleri, yüksek iletkenlik ve esneklik dahil olmak üzere, onu elektronik, enerji depolama ve diğer birçok uygulama için uygun hale getirmektedir. Bu özellikler, borofenin mekanik, termal, manyetik ve optik özellikleriyle birleştiğinde, geniş bir endüstri ve ürün yelpazesinde kullanım potansiyelini artırmaktadır (Zhang et al., 2018).

Optik özellikleri, özellikle biyomedikal cihazlar alanında borofene büyük ilgi toplamıştır. Borofenin yüksek mukavemeti, esnekliği ve hafif yapısı, elektronik ve optik devrelerin geliştirilmesi için umut verici bir malzeme olduğunu kanıtlamaktadır. Benzersiz özellikleri, enerji tasarrufu sağlayan malzemelerden karbon azaltımına, küresel gıda zincirindeki uygulamalardan sayısız tüketici ürününe kadar geniş bir uygulama yelpazesine uzanmaktadır. Borofenin özellikleri ve potansiyel uygulamaları üzerine yapılan araştırmaların genişlemesiyle, bu yenilikçi malzeme çeşitli endüstrilerde devrim yaratma ve malzeme bilimi anlayışımızı yeniden şekillendirme potansiyeline sahiptir (Yadav et al., 2022).

Borofen, tek katmanlı bor atomlarından oluşan iki boyutlu yapısı ile dikkat çekici elektronik ve mekanik özellikleri nedeniyle araştırma alanında büyük ilgi uyandırmıştır. Temel mekanik özellikleri arasında, malzemenin sertliğini ölçen elastik modül ve stres altında deformasyonunu gösteren Poisson oranı yer almaktadır. Bu parametreler, borofenin elektronik ve iletişim mühendisliği gibi alanlardaki uygulama potansiyellerini anlamada büyük bir öneme sahiptir (Özkan, 2023).

Borofenin mekanik direnci ve dayanıklılığı, onu grafen gibi diğer malzemelerden üstün kılan önemli özelliklerdendir. Mekanik darbelere karşı gösterdiği yüksek direnç, artırılmış güç ve esneklik, borofeni geniş bir uygulama yelpazesinde değerli kılmaktadır. Bu uygulamalar arasında, yüksek performanslı malzemelerde kullanımı için elverişli olan aşırı sıcaklık direnci, kompozit malzemelerin performansını artırma potansiyeli ve termal, elektronik, optik, süperiletkenlik gibi gelişmiş fiziksel ve kimyasal özellikler bulunmaktadır. Borofenin bu çok yönlülüğü, onu yalıtım ve yapısal malzemelerden cam elyaf katkı maddelerine kadar çeşitli alanlarda kullanıma uygun hale getirmektedir (Zhang et al., 2016).

Borofenin elektronik ve mekanik özelliklerini karşılaştıran Çizelge 2.3'e göre, içi boş altıgen yapısındaki borofenin elektriksel iletkenliği 1000 S/cm iken, düzlemsel bor yapısında bu değer 1200 S/cm'ye kadar çıkmaktadır. Termal iletkenlik açısından da benzer bir üstünlük gözlemlenmekte olup, düzlemsel bor yapısının 400 W/mK iletkenliği, içi boş altıgen yapısındaki 300 W/mK'ye kıyasla daha yüksektir. Mekanik mukavemet de benzer şekilde düzlemsel bor yapısında 220 GPa iken, içi boş altıgen yapısında 200 GPa olarak ölçülmüştür.

**Çizelge 2.3.** Borofenin Elektronik ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması

Özellik	İçi Boş Altıgen (v1/6)	Düzlemsel Bor
Elektriksel İletkenlik	1000 S/cm	1200 S/cm
Termal İletkenlik	300 W/mK	400 W/mK
Mekanik Mukavemet	200 GPa	220 GPa

Borofen, ayrıca kırılma ve yorulma direnci gibi olağanüstü özellikler sergilemektedir. Yorulma kırılması, alternatif yüklemeler altında malzemenin zamanla kırılmasını ifade eder ve borofenin bu direncini anlamak, dayanıklı ve uzun ömürlü malzemeler ve cihazlar geliştirmek için esastır. Mikromekanik ölçümler ve yapı-özellik ilişkilerinin incelenmesi yoluyla, araştırmacılar borofenin kırılma ve yorulma davranışları hakkında önemli

bilgiler edinmişlerdir. Borofenin üstün mekanik özellikleri, onun elektronik, iletişim mühendisliği ve malzeme bilimi gibi çeşitli disiplinlerde devrim yaratma potansiyelini ortaya koymaktadır (Sha et al., 2018).

### **2.3.3. Faz Çeşitliliği ve Stabilite**

Borofen, atomik yapısının benzersizliği sayesinde, elektron eksikliği gösteren elementlerde sıkça rastlanan iki ve çok merkezli düzlem içi bağlanma etkileşimleri sonucunda, geniş bir yapısal faz çeşitliliği sergileyen iki boyutlu bir malzemedir. Bu çeşitlilik, borofeni elektronik endüstrisi için özellikle umut verici kılan faktörler arasında yer almaktadır. Borofenin atomik düzenleri ve bağlanma modelleri temelinde kategorize edilen fazları arasında 2D petek yapısı, üçgen kafes ve bozulmuş altıgen yapı gibi farklı yapılar bulunmaktadır. Bu fazların her biri, borofenin elektronik, optik ve mekanik özelliklerine özgü katkılarda bulunur, böylece malzemenin uygulama potansiyelini artırmaktadır (Mortazavi et al., 2018).

Borofenin her fazı kendine has elektronik özellikler sergilemektedir; örneğin, iki boyutlu petek yapısı yüksek elektronik iletkenlik sunarken, üçgen kafes fazı yük yoğunluğu dalgaları ve süperiletkenlik gibi ilgi çekici elektronik fenomenler gösterebilmektedir. Çarpık altıgen yapı ise stabilitesiyle öne çıkarak malzemeyi çeşitli uygulamalar için uygun hale getirmektedir. Bu farklılıklar, borofenin elektronik endüstrisindeki potansiyel kullanım alanlarının keşfedilmesi açısından önem taşımaktadır (Ranjan et al., 2020). Borofen fazlarının stabilitesi, malzemenin çevresel koşullarda nasıl bir performans sergileyeceğini belirleyen kritik bir faktördür. Deneysel çalışmalar, ultra yüksek vakum koşullarında bazı borofen fazlarının olağanüstü stabiliteye sahip olduğunu göstermiştir. Borofen stabilitesi ise, atomik yapı ve bağlanma özellikleriyle doğrudan ilişkilidir ve elektron eksikliği gösteren elementlerde gözlemlenen çok merkezli bağlanma etkileşimlerinin bir sonucudur (Zhu et al., 2019). Borofen faz stabilitesi, malzemenin belirli çevresel koşullara karşı dayanıklılığını ifade ederken, genel borofen stabilitesi daha geniş bir bağlamda malzemenin atomik düzeninin ve bağlarının genel sağlamlığı ile ilgilidir (Özkan, 2023).

Borofenin iletkenliği ve stabilitesi, elektrik ve elektronik mühendisliği alanında, yeni ve gelişmiş elektronik cihazların geliştirilmesi için değerli bir kaynak olarak görülmektedir. İnce ve esnek yapısı, borofeni, esnek elektronikler, sensörler ve enerji depolama cihazları gibi alanlarda çekici bir malzeme haline getirmektedir. Borofenin potansiyel

uygulamaları arasında transistörler, entegre devreler, esnek elektronikler, sensörler, piller ve süper kapasitörler yer almaktadır (Özkan, 2023).

Borofenin gelecekteki araştırmalarda ele alınabilecek çeşitli yönleri bulunmaktadır. Bunlar arasında, borofen stabilitesini etkileyen faktörlerin ve bu stabiliteyi artırabilecek potansiyel iyileştirmelerin daha detaylı incelenmesi bulunmaktadır (Shukla et al., 2018). Borofenin analitik kimya gibi çeşitli potansiyel uygulamalara yönelik araştırmaların genişletilmesi, bu çok yönlü malzemenin yeni kullanımlarını keşfetmeyi sağlayabilmektedir. Ayrıca, borofen sentezini iyileştirmeye yönelik yöntemlerin araştırılması, daha verimli ve maliyet etkin üretim yöntemlerine yol açabilmektedir. Borofen üzerine yapılacak gelecekteki araştırmalar, stabiliteyi artırma yollarının, potansiyel uygulama alanlarının genişletilmesinin ve sentez yöntemlerinin geliştirilmesinin araştırılmasını içerebilmektedir (Wang et al., 2019).

#### **2.4. Borofenin İki Boyutlu Malzemelerle Karşılaştırılmalı İncelenmesi**

Borofen, olağanüstü mekanik mukavemeti ve esnekliği sayesinde sınıfındaki diğer malzemelerden ayrılmaktadır. Bu benzersiz özellikler, borofenin kırılmadan önemli deformasyonlara dayanabilmesini sağlayan atomik yapısına dayanmaktadır. Bu tür mekanik esneklik, borofeni, dayanıklılık ve esnekliğin kritik olduğu esnek elektronikler ve gelişmiş kompozitlerdeki uygulamalar için ideal bir aday yapmaktadır. Mekanik özelliklerinden faydalanmayı hedefleyen kapsamlı araştırmalar, borofenin bu alanlarda devrim yaratma potansiyelini desteklemektedir (Özkan, 2023).

Borofen ayrıca, diğer iki boyutlu malzemelere göre üstün elektriksel iletkenlik sergileyerek elektronik alandaki uygulanabilirliğini artırmaktadır. Bu avantaj, elektroniklerin yüzeyinde daha serbestçe hareket etmesini sağlayan ve daha yüksek iletkenlik sunan benzersiz elektron hareketliliğine dayanmaktadır. Bu özellik, borofeni yalnızca yeni nesil elektronik cihazlar için öncü bir malzeme olarak değil, aynı zamanda daha verimli enerji depolama sistemleri ve iletken filmler geliştirme potansiyelini de vurgulamaktadır. Elektriksel özelliklerinin araştırılması, çeşitli teknolojik uygulamalarda borofenin tüm potansiyelinden yararlanılmasını amaçlayan gelişmeler sunmaktadır (Yadav et al., 2022).

Borofenin hidrojen depolama uygulamalarındaki potansiyeli dikkate değerlidir. Enerji taşıyıcısı olarak hidrojen, borofenin çözüm sunabileceği önemli depolama zorluklarını

beraberinde getirmektedir. Malzemenin atomik yapısı, yüksek yoğunluklu hidrojen adsorpsiyonuna olanak tanıyarak onu hidrojen depolama çözümleri için cazip bir aday kılmaktadır (Joseph et al., 2020). Bu yetenek, özellikle yakıt hücresi teknolojisinde verimli hidrojen depolamanın kritik olduğu durumlarda, daha sürdürülebilir enerji sistemlerine kapı açabilmektedir. Borofenin hidrojen depolama kapasiteleri üzerine yapılan araştırmalar, depolama verimliliğini maksimize etmek ve çeşitli koşullar altında performansını incelemek için devam etmektedir (Chen et al., 2017).

Grafen ve borofen, her ikisi de iki boyutlu kristaller olup, yapısal benzerlikler paylaşımlarına rağmen, iletkenlik ve esneklik açısından önemli ölçüde farklılık göstermektedirler. Grafen, olağanüstü elektriksel iletkenliği ve mekanik mukavemeti ile tanınarak, iki boyutlu malzemeler için yüksek bir standart belirlemektedirler. Buna karşın, borofen etkileyici iletkenlik sergilemekle birlikte, kristal yapısındaki potansiyel değişiklikler sayesinde benzersiz esneklik ve elektronik özellikler sunmaktadırlar. Bu ayırım, elektronik ve malzeme bilimlerinde çeşitli uygulamalar için bu iki malzeme arasındaki ince farkları ve benzerlikleri anlamayı önemli kılmaktadır (Dev et al., 2022).

Geçiş Metali Dikalkojenitler (TMD) ile borofen arasında, elektronik özellikler ve potansiyel uygulamalar açısından belirgin farklar vardır. TMD'ler, yarı iletken özellikleri ile bilinir ve bu nitelikler, onları transistörler, fotodetektörler ve güneş pilleri gibi uygulamalar için uygun hale getirmektedir. Borofen ise metalik yapısı sayesinde, özellikle yüksek elektriksel iletkenlik ve esneklik gerektiren uygulamalarda ön plana çıkmaktadır. TMD'ler ve borofen arasındaki bu farklılıklar, iki boyutlu malzemelerin çeşitliliğini vurgulamanın yanı sıra, gelecekteki elektronik cihazlar ve enerji çözümlerinin geliştirilmesinde malzeme seçiminin önemini de göstermektedir (Wang et al., 2019).

Altıgen Bor Nitrür (h-BN) ile borofen karşılaştırıldığında, termal ve kimyasal stabilite açısından önemli farklar dikkat çekmektedir. h-BN, yüksek termal iletkenliği ve olağanüstü kimyasal stabilitesi sayesinde elektronik uygulamalar için ideal bir yalıtkan olarak değerlendirilmektedir (Kostoglou et al., 2015). Borofen, kimyasal olarak h-BN kadar kararlı olmamakla birlikte, çeşitli uygulamalarda kullanılacak dikkate değer bir termal iletkenlik sunmaktadır. Altıgen Bor Nitrür geniş optik enerji bant aralığı ve elektriksel yalıtım özellikleri ile borofenin metalik özellikleri arasındaki kontrast, bu iki malzemenin farklı işlevselliklerini göstermektedir ve özel uygulama gereksinimlerine

göre iki boyutlu malzeme seçimini uyarlama ihtiyacını vurgulamaktadır (Guerra et al., 2019).

## **2.5. Borofen Üretim Yöntemleri**

### **2.5.1. Atomik Katman Biriktirme (ALD)**

Atomik Katman Biriktirme sürecinin temelleri, ince film biriktirme teknolojilerinde önemli bir dönüm noktası oluşturmuştur. Bu yöntem, atomik düzeyde malzeme biriktirme kabiliyeti sayesinde, yüksek hassasiyet gerektiren kaplamaların üretiminde rakipsiz bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. ALD, her döngüde bir atomik katman biriktiren, kontrollü ve kendi kendini sınırlayan kimyasal reaksiyonlar yoluyla malzemelerin üzerine ultra ince filmler biriktirme sürecidir. Bu titiz yöntem, yüzeyle güçlü bir şekilde etkileşime giren ve sadece belirli aktif bölgelere bağlanan gaz fazı öncüllerine dayanır, böylece her reaksiyon aşamasında yalnızca bir atomik katman biriktirilmektedir (Parsons et al., 2011). ALD'nin kendine has bu reaksiyon mekanizması, ince filmlerin yüksek homojenlikte ve kusursuz bir şekilde elde edilmesine olanak tanımaktadır.

ALD'nin sağladığı bu üstün hassasiyet ve homojenlik, malzeme biliminde devrim niteliğindedir. Geleneksel biriktirme yöntemlerinde sıklıkla karşılaşılan tabaka düzensizlikleri, malzeme kusurları ve kalınlık tutarsızlıkları gibi problemler, ALD sayesinde büyük ölçüde önlenmektedir. Geleneksel yöntemler genellikle karmaşık yapılar üzerinde homojen kaplama sağlayamayıp yüzeyde kusurlar oluşturabilirken, ALD'nin her döngüde tek bir atom katmanı biriktirme prensibi, kusurları en aza indirir ve son derece düzgün kaplamalar üretmektedir. Bu nedenle, ALD yöntemi, özellikle karmaşık yüzey geometrilerine sahip yapılar üzerinde yüksek kaliteli filmler elde edilmesini sağlar ve diğer yöntemlerin yetersiz kaldığı durumlarda etkili çözümler sunmaktadır (Huang et al., 2019).

ALD'nin iki boyutlu (2D) malzemelerin sentezine entegrasyonu, özellikle borofen gibi gelişmiş malzemelerin üretiminde önemli avantajlar sağlamaktadır. ALD'nin sunduğu atomik düzeyde hassas kontrol, borofen gibi 2D malzemelerde istenilen özelliklerin elde edilmesi için kritik öneme sahiptir. Grafen ve altıgen bor nitrür gibi malzemelerde olduğu gibi, borofenin de yüksek iletkenlik, esneklik ve dayanıklılık gibi özelliklerinin optimize edilmesi, ALD yöntemiyle mümkün hale gelmektedir. ALD'nin borofen sentezindeki katkısı, yalnızca atomik hassasiyette katmanlar oluşturmakla sınırlı kalmaz; aynı

zamanda malzemenin elektronik, optik ve mekanik özelliklerinin tasarımında büyük bir rol oynamaktadır. Bu süreç, borofenin potansiyel uygulama alanlarını genişletme ve malzeme biliminde yenilikçi çözümler geliştirme yolunda atılan önemli bir adımdır (Jena et al., 2017).

Borofen, ALD sürecinin faydalarından en fazla yararlanan malzemelerden biridir. Borofenin atomik yapısı ve metalik özellikleri, ALD ile sentezlendiğinde olağanüstü elektronik iletkenlik ve mekanik mukavemet göstermektedir. ALD'nin sunduğu kusursuz biriktirme, borofenin doğal özelliklerini korumanın yanı sıra, yeni işlevsellikler ekleyerek malzemeyi elektronik, enerji depolama ve optoelektronik gibi alanlarda kullanıma hazır hale getirmektedir. Borofenin yüksek elektrik iletkenliği ve esnekliği, onu potansiyel olarak mevcut 2D malzemeler arasında en rekabetçi seçeneklerden biri yapmaktadır. Özellikle süperiletkenlik, sensörler ve yüksek performanslı enerji depolama cihazlarında borofenin benzersiz özellikleri, ALD sayesinde daha etkin hale getirilmektedir (Mannix et al., 2018).

ALD yöntemi, borofen sentezinde sunduğu avantajlara rağmen bazı zorluklar da barındırmaktadır. Atomik düzeyde gerçekleşen reaksiyonların hassas kontrolü, borofen katmanlarının kalitesini doğrudan etkileyebilmektedir. Ayrıca, ALD sürecinde istenmeyen reaksiyonların önlenmesi için çevre koşullarının sıkı bir şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu zorlukların üstesinden gelmek için bilim insanları, ALD süreç parametrelerinin optimizasyonu, yeni öncül maddelerin geliştirilmesi ve borofen sentezinde kullanılacak daha uygun substratların araştırılması gibi konularda yoğun çalışmalar yürütmektedirler (Özkan, 2023).

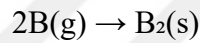
Sonuç olarak, Atomik Katman Biriktirme (ALD) yöntemi, borofen sentezi ve geliştirilmesinde büyük bir potansiyele sahiptir. Borofenin üstün elektronik, mekanik ve kimyasal özellikleri, ALD ile sentezlendiğinde daha da geliştirilerek çeşitli endüstriyel uygulamalara kazandırılabilir. ALD'nin sunduğu hassas kontrol, malzeme biliminin en ileri noktalarındaki uygulamalarda borofenin kullanılmasını mümkün kılmakta ve malzeme mühendisliği açısından gelecekteki gelişmeler için umut verici bir yol sunmaktadır (Wang et al., 2019; Kiraly et al., 2019).

## 2.5.2 Moleküler Işın Epitaksi (MBE)

Moleküler Işın Epitaksi (MBE) yöntemi, malzeme yüzeyinde kontrollü atomik birikim sağlayarak yüksek kaliteli ince film ve iki boyutlu malzemelerin sentezlenmesine olanak tanıyan ileri bir tekniktir. MBE'de, yüksek saflıktaki elementler ultra yüksek vakum ortamında ısıtılarak buharlaştırılır ve moleküler ışınlar halinde bir substrat üzerine yönlendirilir. Bu ışınlar, substrat yüzeyi ile etkileşime girerek atom atom malzemenin birikimini sağlar. Süreç, yüzeydeki atomların birbirine bağlanması ve atomik düzeyde düzgün bir yapı oluşturması için yüksek hassasiyet ve kontrollü ortam gerektirir (Li et al., 2018).

MBE Tepkimesi:

Buharlaştırılan Bor Atomlarının Substrat Üzerine Birikmesi:



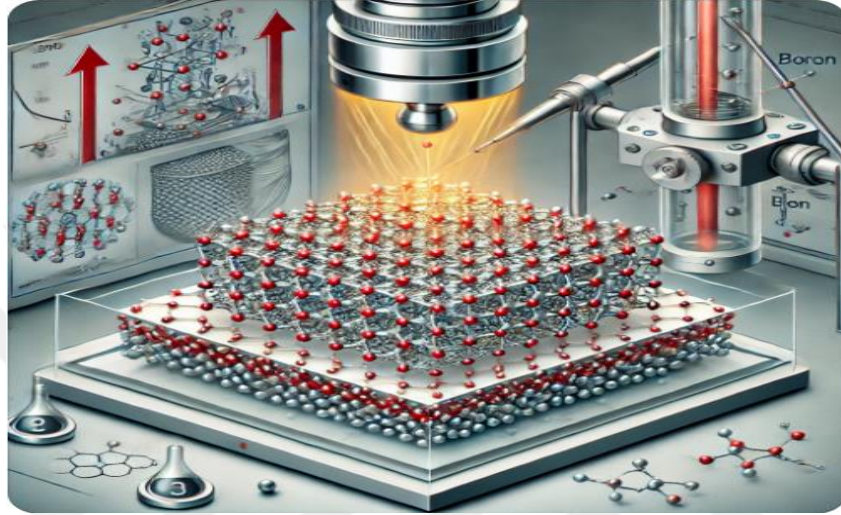
Bu tepkimede, buharlaştırılmış bor atomları B(g), substrat yüzeyine ulaştıktan sonra katı fazda bor atomları B<sub>2</sub>(s) olarak birikir. Bu süreçte kullanılan substrat genellikle bakır veya gümüş gibi metaller olabilir ve bu metallerin yüzeyi, bor atomlarının düzgün bir şekilde kristalleşmesini sağlar (Mannix et al., 2017).

MBE yönteminde süreç şu şekilde işler; Isıtılmış bor atomları moleküler ışınlar halinde yönlendirilir ve substrat yüzeyine ulaşarak birikmeye başlar. Atomlar düzgün bir düzen içinde katı fazda birikerek borofenin tek katmanlı yapısını oluşturur. MBE yöntemi, reaksiyon hızı, sıcaklık ve ortam koşullarının hassas kontrolünü sağlar; bu sayede atomik düzeyde düzgün ve kaliteli malzemeler üretilir (Li et al., 2018; Wang et al., 2019).

MBE ile üretilen borofen, enerji depolama cihazları, nanoelektronik ve sensörler gibi yüksek performanslı cihazların geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu yöntemde tepkime koşullarının optimize edilmesi, borofenin saflığını ve yapısal bütünlüğünü artırmak için kritik öneme sahiptir (Wang et al., 2019).

Şekil 2.3'de AI ile hazırlanan görselde, MBE yöntemiyle borofen sentezinin gerçekleştiği bir vakum odası yer almaktadır. Bu odanın içinde ortamın saf ve temiz olması sağlanarak bor atomlarının kontrollü bir şekilde alttaşa ulaşması amaçlanmaktadır. Alt kısımda borofen tabakalarının dizileceği alttaşlar gösterilirken, kırmızı renkte gösterilen bor atomları, moleküler ışınlar halinde yukarıdan aşağıya doğru gümüş alttaşa

yönlendirilmektedir. Bu atomlar vakum ortamında serbestçe hareket ederek, alttaş üzerine düzenli bir şekilde yerleşmektedir. Alttaş üzerine yerleşen bor atomları, iki boyutlu borofen tabakasını oluşturmaktadır. Görselde yer alan oklar ise bor atomlarının akışını ve yönünü göstererek, bor atomlarının vakum ortamında nasıl yönlendirildiğini ve alttaş üzerine nasıl biriktirildiğini anlatmaktadır.



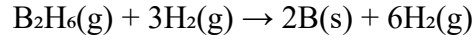
Şekil 2.3. MBE Yöntemini anlatan görsel (AI ile oluşturulmuştur)

### 2.5.3. Kimyasal Buhar Biriktirme

Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) yöntemi, gaz fazındaki öncül maddelerin kimyasal reaksiyona girerek katı bir malzeme tabakası oluşturduğu bir süreçtir. Bu yöntemde, öncül gazlar (prekürsörler) yüksek sıcaklıkta buharlaştırılarak bir substrat yüzeyine taşınmaktadır. Burada, gaz fazındaki moleküller kimyasal reaksiyona girerek katı faza geçer ve substrat üzerinde ince bir tabaka oluşturmaktadır. CVD, özellikle iki boyutlu malzemelerin sentezinde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Sürecin en önemli özelliklerinden biri, reaksiyonun kontrollü bir ortamda gerçekleşmesi ve bu sayede istenilen kalınlık, saflık ve yapıdaki ince filmlerin elde edilebilmesidir (liao et al., 2013).

CVD'de tipik bir reaksiyon, gaz fazındaki bor bileşiğinin substrat yüzeyine taşınmasıyla başlamaktadır. Bu noktada, bor içeren gazlar (genellikle  $BCl_3$  veya  $B_2H_6$  gibi bileşikler) yüksek sıcaklıklarda ısıtılmış substrata ulaşır ve kimyasal reaksiyonla borofenin birikmesi sağlanmaktadır. Reaksiyon şu şekilde ilerlemektedir:

Gaz Fazındaki Prekürsörlerin Yüze Taşınması:

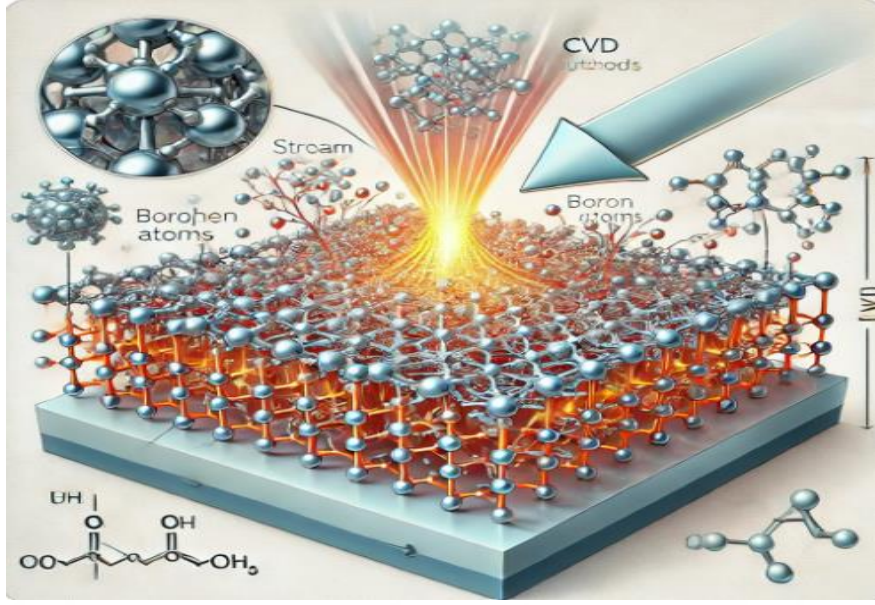


Bu reaksiyonda, diboran ( $\text{B}_2\text{H}_6$ ) gazı, hidrojen gazı ( $\text{H}_2$ ) ile tepkimeye girmektedir ve yüzeyde katı bor (B) birikimi meydana gelmektedir (Ranjan et al., 2020).

Borofenin sentezinde, özellikle tek katmanlı borofen tabakalarının elde edilmesi için süreç, sıcaklık, basınç, gaz akış hızı ve süre gibi çeşitli parametrelerin dikkatlice optimize edilmesini gerektirmektedir. Yüksek kaliteli ve kontrollü borofenin elde edilebilmesi için substratın yüzeyi, gaz oranları ve reaksiyon ortamı dikkatlice kontrol edilmektedir. Bakır gibi uygun bir substrat kullanılarak, bor atomları düzgün bir şekilde dizilerek iki boyutlu borofen tabakalarını oluşturmaktadır. Bu süreçte oluşan kimyasal tepkimeler, borofenin metalik özelliklerini ve ince yapısını koruyarak yüksek iletkenlik ve mekanik dayanım sağlamaktadır (Mazaheri et al., 2021).

CVD yöntemiyle üretilen borofen tabakaları, enerji depolama, sensörler, elektronik cihazlar ve nanoelektronik gibi alanlarda önemli potansiyele sahiptir. Borofenin CVD ile sentezi sırasında parametrelerin doğru bir şekilde optimize edilmesi, istenen yapısal ve elektronik özelliklerin elde edilmesinde kritik rol oynamaktadır (Liao et al., 2013; Mazaheri et al., 2021).

Şekil 2.4'de AI ile hazırlanan görselde, CVD yöntemiyle borofen sentezi gösterilmektedir. Bu görselde, bor atomları gaz fazında metal bir alt tabaka üzerine yönlendirilmekte ve düzenli bir kafes yapısının oluşumu sağlanmaktadır. Bor atomlarının metal alt tabakaya akışı oklarla gösterilmiş olup, bu atomlar alt tabaka üzerinde birikerek borofen tabakaları oluşturulmaktadır.



**Şekil 2.4.** CVD yöntemini anlatan görsel (AI ile oluşturulmuştur)

#### 2.5.4. Sonokimyasal Eksfoliasyon

Borofen, grafen ve silisen gibi diğer iki boyutlu (2D) malzemelere kıyasla benzersiz fiziksel ve kimyasal özellikleriyle dikkat çeken yeni keşfedilmiş bir malzemedir. Borofen, özellikle anizotropik yapısı sayesinde geniş bir yüzey alanı sunmaktadır, bu da kimyasal reaktivite ve adsorpsiyon kapasitesini artırır. Bor atomlarının bal peteği şeklinde düzenlenmiş yapısı, mükemmel mekanik mukavemet ve esneklik sağlamaktadır. Borofenin elektriksel iletkenliği de öne çıkan özelliklerindedir; serbest elektronların yüzey boyunca hareket etmesini sağlayan elektronik bant yapısı, borofene yüksek iletkenlik kazandırmaktadır ve onu nanoelektronik ve enerji depolama uygulamaları için cazip kılmaktadır (Wang et al., 2019).

Borofenin mekanik mukavemeti, esnekliği ve termal iletkenliği, çeşitli teknolojik uygulamalarda önemli avantajlar sunmaktadır. Anizotropik termal iletkenliği, belirli yönlerde ısı dağılımını kontrol etmeye olanak tanımaktadır ve bu durum, özellikle elektronik cihazların termal yönetim sistemlerinde faydalıdır. Yüksek gerilme mukavemeti, borofeni esnek elektronikler, giyilebilir cihazlar ve havacılık sektöründe kullanılabilir ideal bir malzeme haline getirmektedir (Zhang et al., 2016).

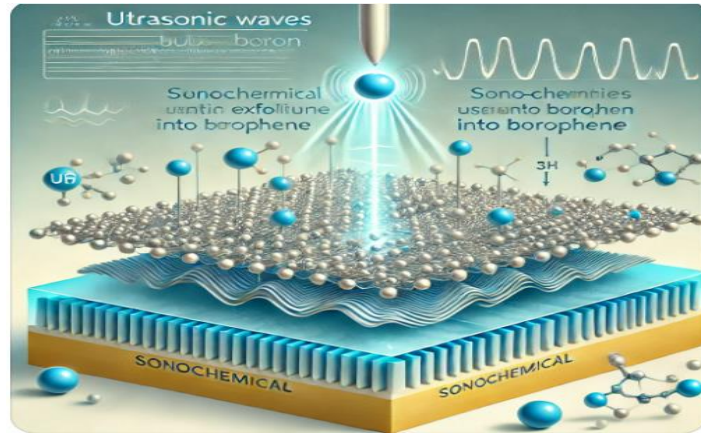
Sonokimyasal eksfoliasyon, borofen gibi iki boyutlu malzemelerin katmanlarının ayrıştırılması için kullanılan ileri bir tekniktir. Bu yöntem, sıvı içinde ses dalgaları

kullanılarak mekanik kuvvetler yaratmaktadır. Ses dalgaları, sıvı içindeki molekülleri hızla hareket ettirir ve kavitasyon süreciyle oluşan mikro kabarcıklar malzemenin katmanlarının ayrılmasını sağlamaktadır. Bu yöntem, mekanik kuvvetlerin etkisiyle malzemeyi eksfoliye ederek tek veya birkaç katmanlı malzemeler elde etmeye olanak tanımaktadır (Shen et al., 2015).

Sonokimyasal eksfoliasyonun avantajları arasında geniş ölçekli üretim süreçlerine kolaylıkla entegre edilebilir olması ve çevre dostu bir teknik olması yer almaktadır. Kimyasal çözücüler gerektirmeyen bu yöntem, daha az atık üretir ve enerji tüketimini azaltır, bu da onu sürdürülebilir bir teknoloji haline getirmektedir. Ayrıca, borofen gibi iki boyutlu malzemelerin yüksek kalitede ve homojen yapıda eksfoliasyonu mümkündür. Borofen dışında, grafen, molibden disülfid ( $\text{MoS}_2$ ) gibi diğer iki boyutlu malzemeler de sonokimyasal eksfoliasyonla başarıyla ayrıştırılabilmektedir (Jawaid et al., 2016).

Sonokimyasal eksfoliasyonun eksileri ise bazı durumlarda kontrolsüz eksfoliasyon veya yapısal bozuklukların oluşabilmesi ve enerji maliyetlerinin yüksek olabilmesidir. Ancak, eksfoliasyon süreci optimize edilerek, bu olumsuzlukların minimize edilmesi mümkündür. Elde edilen borofen tabakalarının üstün elektriksel iletkenlik ve mekanik dayanıklılık gibi özellikleri, bu yöntemin geniş uygulama alanlarına sahip olabileceğini göstermektedir (Zhang et al., 2016).

Şekil 2.5'de, ultrasonik bir probdan yayılan dalgalar bor atomlarının birbirinden ayrılmasına neden olarak iki boyutlu borofen tabakalarının oluşumunu ve Bor atomlarının toplu yapısı, bu dalgaların etkisiyle katmanlarına ayrılıp, ince borofen levhalar oluşumu gösterilmektedir.



**Şekil 2.5.** Sonoeksfoliasyon yöntemini anlatan görsel (AI ile oluşturulmuştur)

## 2.6. Borofenin Potansiyel Uygulamaları

Borofenin enerji depolama sistemlerindeki öne çıkan yönleri, bu malzemeyi devrim niteliğinde bir konuma taşımaktadır. Bor atomlarının iki boyutlu kristal yapısından oluşan bir allotrop olan borofen, fiziksel, kimyasal ve potansiyel açıdan olağanüstü avantajlar sunmaktadır. Yüksek enerji yoğunluğu ve hızlı şarj-deşarj kabiliyeti sayesinde enerji depolama verimini artırabilmektedir. Borofenin yüksek yüzey alanı ve iletkenliği, destekli iyon pillerde elektrot malzemesi olarak kullanılmasını sağlamaktadır, böylece enerji depolama teknolojilerinde önemli gelişmeler elde edilmektedir (Jiang et al., 2016).

Borofen, esnek elektroniklerde cihazların mekanik performansını artırarak üstün performans sunmaktadır. İnce ve esnek yapısı, giyilebilir elektronikler, çağdaş ekranlar ve esnek güneş panelleri gibi uygulamalarda büyük avantajlar sağlamaktadır. Yüksek iletkenliği ve benzersiz elektronik özellikleri, entegre devreler ve yüksek performanslı transistörlerde kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Bu da esnek elektroniklerin daha hafif ve daha dayanıklı hale gelmesine katkıda bulunmaktadır. Borofenin nanosensör geliştirilmesindeki rolü, bu malzemenin genişleme ve seçicilik açısından üstün birimlerin ortaya çıkmasını desteklemektedir. Borofenin iki boyutlu yapısı, kimyasal ve biyolojik sensörlerde yüksek hassasiyet sağlayarak yüzey kesiciliği maksimize etmektedir. Bu sensörler, tıbbi teşhisler, pazar izleme ve güvenlik uygulamalarında kullanılabilir. Borofenin yüksek iletkenliği ve reaktifliği, sensörlerin hızlı tepki vermesini sağlamaktadır ve düşük tespit limitlerine ulaşılmasına olanak tanımaktadır (Wu et al., 2018).

Borofenin biyomedikal ürün potansiyeli, benzersiz fiziksel ve kimyasal özelliklerine dayanmaktadır. İki boyutlu bir malzeme olarak borofen, çeşitli uygulamalar için ince tabakalar halinde üretilebilir ve yüksek yüzey alanına sahiptir; bu da onu biyosensörler ve diğer biyomedikal cihazlar için ideal kılmaktadır. Elektronik özellikleri sayesinde borofen, tedavi makinelerinde daha hassas ve güvenilir performans sağlama potansiyeline sahiptir. Özellikle yüksek iletkenliği, biyosensörlerin hızlı ve doğru sonuçlar vermesine imkân tanımaktadır. Nihayetinde, borofenin biyomedikal alanda geniş kapsamlı kullanımının önünü açmaktadır (Yadav et al., 2022).

Borofenin biyoyumluluğu, tıbbi uygulamalarda kritik bir faktördür. Biyoyumluluk, bir malzemenin biyolojik sistemlerle etkileşime girerken zararlı bir tepkiye neden olmamasını ifade etmektedir. Bor elementinden türetilmiş olan borofen, biyoyumlu

olduğu bilinir ve biyomedikal uygulamalarda güvenle kullanılabilir. Bu özelliği, borofenin biyolojik dokularla uyumlu olduğunu ve zararlı etkiler oluşturmadığını göstermektedir. Bu sayede borofen, implantlar, biyosensörler ve diğer tıbbi uygulamalar için uygun bir malzeme olarak dikkat çekmektedir (Qi et al., 2020).

Biyomedikal araştırmalarda borofenin potansiyeli, bu alandaki önemli gelişmelere katkıda bulunabilir. Farklı fizikokimyasal bileşimlere sahip olan borofen, nanometre ölçeğinde performans sergileyerek biyolojik algılama için uygun bir ortam sunmaktadır. Borofen bazlı nanomateryaller, hastalıkların erken teşhisi ve tedavisi ile yüksek hassasiyetli biyosensörlerin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Araştırmacılar, borofenin üstün elektronik ve yüzey özelliklerini kullanarak yeni nesil tedavi cihazları ve sensörler geliştirme potansiyeline sahiptir. Bu, biyomedikal araştırmalarda ileri düzeyde inovasyonlara ve ilerlemelere yol açabilmektedir.

### **2.6.1. Enerji Depolama Sistemleri**

Borofenin yüksek elektrik iletkenliği, çeşitli enerji depolama uygulamaları için son derece uygun olmasını sağlayan önemli bir özelliktir. Bu alanda geniş çapta araştırılan grafenin aksine, borofen enerji depolama sistemlerinde daha üstün iletkenlik sunmaktadır. Yüksek iletkenlik, pillerin ve diğer enerji depolama cihazlarının performansını önemli ölçüde artırarak, elektronların malzeme içinde hızlı ve verimli hareket etmesine olanak tanımaktadır. Bu sayede borofen, enerji depolama sistemlerinin verimliliğini önemli ölçüde artırabilir ve onu gelecekteki teknolojik gelişmeler için oldukça cazip bir malzeme haline getirmektedir (Adekoya et al., 2022).

Borofen, olağanüstü mekanik özelliklere sahiptir; yüksek mukavemet ve esneklik, dayanıklılık gerektiren uygulamalar için idealdir. Bu mekanik özellikler, borofenin önemli stres ve gerilime dayanarak yapısal bütünlüğünü korumasını sağlamaktadır. Enerji depolama sistemlerinde sıkı şarj ve deşarj döngülerinde bu özellikler, malzemenin performansını ve dayanıklılığını korur, bu sayede cihazların güvenilirliğini ve ömür boyu kullanım süresini artırmaktadır (Wang et al., 2016).

Borofenin geniş yüzey alanı, özellikle lityum iyon piller gibi pil teknolojilerinde önemli bir avantaj sağlamaktadır. Geniş yüzey alanı, iyonlarla daha fazla etkileşime girerek malzemenin genel iyon iletkenliğini ve enerji depolama kapasitesini artırmaktadır. Bu gelişmiş yüzey aktivitesi, borofen bazlı pillerin geleneksel malzemelere kıyasla daha

fazla enerji depolamasına ve bunu daha hızlı iletebilmesine olanak tanımaktadır. Artan yüzey alanı, ayrıca gaz algılama ve emme gibi çeşitli biyokimyasal uygulamalarda da faydalıdır. Bu benzersiz yüzey özellikleri, borofeni yeni nesil pil teknolojileri ve diğer enerji depolama çözümleri için umut verici bir aday yapmaktadır (Zhang et al., 2016).

Lityum-sülfür pillerin geliştirilmesi, yüksek teorik enerji yoğunluğu ve maliyet etkinliği nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Yeni ortaya çıkan iki boyutlu bir malzeme olan borofen, özellikle kükürt katotunun iletkenliğini ve stabilitesini artırmada, lityum-kükürt pillerin doğasında var olan zorlukların üstesinden gelme potansiyeline sahiptir. Borofen kullanımı, polisüfitlerin elektrolit içinde çözünerek anoda göç etmesi ve kapasite kaybına neden olan mekik etkisini azaltabilir. Araştırmacılar, borofen ekleyerek lityum-kükürt pillerin çevrim ömrünü ve verimliliğini artırmayı hedeflemekte ve böylece enerji depolama sistemlerinin ticari uygulamalar için daha uygun hale gelmesini amaçlamaktadır (Jiang et al., 2018).

Lityum-iyon piller (LIB'ler), yüksek enerji yoğunluğu, uzun çevrim ömrü ve hafıza etkisi olmaması nedeniyle enerji depolama endüstrisinde devrim yaratmıştır. Son çalışmalar, performanslarını daha da artırmak için borofenin LIB'lere dahil edilmesini araştırmaktadır. Borofenin yüksek yüzey alanı ve mükemmel elektrik iletkenliği, onu anot malzemesi olarak kullanım için ideal bir aday yapmaktadır. Geleneksel malzemelere göre daha yüksek kapasite ve daha hızlı şarj-deşarj oranları sunmaktadır (Wu et al., 2020). Borofenin mekanik mukavemeti ve esnekliği gibi benzersiz özellikleri, lityum-iyon pillerin dayanıklılığına ve güvenliğine de katkıda bulunmaktadır. Bu, borofeni yeni nesil LIB'ler için umut verici bir malzeme haline getirir ve potansiyel olarak elektrikli araçlar ve taşınabilir elektronikler gibi çeşitli alanlardaki uygulamalarını genişletmektedir.

Katı hal pilleri (SSB'ler), güvenlikleri, yüksek enerji yoğunlukları ve uzun çevrim ömürleri nedeniyle enerji depolamanın geleceği olarak kabul edilmektedir. Borofen, SSB'lerin temel bileşenleri olan katı elektrolitlerin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Katı elektrolitler, SSB'lerin verimli çalışması için kritik olan yüksek iyonik iletkenlik ve termal stabilite sunmaktadır. Borofenin katı elektrolitlere dahil edilmesi, iyonik iletkenliklerini ve mekanik özelliklerini geliştirerek pil performansının artmasına yol açabilir. Bu yenilik, elektrikli araçlar ve büyük ölçekli enerji depolama sistemleri gibi yüksek enerji ve güç yoğunluğu gerektiren uygulamalar için özellikle değerlidir. SSB'lerde borofenin kullanımı, mevcut pil teknolojilerinin sınırlamalarının

üstesinden gelebilir ve daha güvenli ve daha verimli enerji depolama çözümlerinin önünü açabilir (Jiang et al., 2016).

Enerji kaybının azaltılması, süper kapasitörlerin verimliliği için önemli bir faktördür. Borofen, iki boyutlu yapısıyla bu alanda büyük bir potansiyele sahiptir. Yüksek yüzey alanı ve iletkenliği sayesinde borofen, enerji depolama kapasitesini artırma potansiyeline sahiptir. Borofen, diğer malzemelerle karşılaştırıldığında daha yüksek enerji yoğunluğuna ulaşabilir. Bu özellikler, borofen tabanlı süper kapasitörlerin otomobiller, elektrikli raylı ulaşım sistemleri ve ticari ile endüstriyel asansörler gibi yüksek güç gerektiren uygulamalarda daha etkili olmasını sağlamaktadır (Yang et al., 2023).

Şarj kapasitesinin artması, süper kapasitörlerin işleyişinin önemli bir özelliğidir. Borofen, bu alanda da önemli avantajlar sunmaktadır. İki boyutlu yapısı, geniş yüzey alanı ve hızlı elektron transfer yeteneği, borofen tabanlı süper kapasitörlerin hızlı şarj olmasını ve enerjiyi etkin bir şekilde depolamasını sağlamaktadır. Borofen süperkapasitörlerin yüksek güç yoğunluğuna ve düşük enerji yoğunluğuna bu özellikler katkıda bulunmaktadır. Bu nedenle borofen kullanımı, süperkapasitörlerin çeşitli endüstriyel uygulamalarda daha verimli ve hızlı çalışmasını sağlamaktadır (Yang et al., 2023).

Döngünün zayıflaması, süper kapasitörlerin uzun ömürlü ve güvenilir olmasını sağlamaktadır. Borofen, üstün mekanik ve kimyasal kararlılığı sayesinde bu alanda önemli katkılar sunmaktadır. Teorik çalışmalar, borofen tabanlı süper kapasitörlerin uzun döngüler boyunca kararlılığını koruyabildiğini göstermektedir. Borofen katmanının dinamik sıcaklıklara karşı dayanıklılığı, enerji depolama kapasitesinin uzun süre boyunca stabil olarak korunmasını sağlamaktadır. Tüm bunlar, borofen süper kapasitörlerinin uzun ömürlü ve güvenilir enerji depolama çözümleri sunmasını mümkün kılmaktadır (Lee ve An, 2020).

### **2.6.2. Esnek Elektronikler ve Nanosensörler**

Borofenin esnekliği ve üstün iletkenlik özellikleri, onu esnek elektronikler ve nanosensörler için mükemmel bir malzeme haline getirmektedir. Borofenin metalik özellikleri ve serbest elektronların kolayca hareket edebilmesi, mükemmel elektrik iletkenliği sunmasını sağlamaktadır. Bu özellik, hafif ve esnek elektronik cihazlar için idealdir ve özellikle giyilebilir cihazlar, esnek sensörler ve elektronik kaplamalar gibi alanlarda yenilikçi uygulamalara olanak tanımaktadır (Zhang et al., 2016). Borofen bazlı

cihazlar, aşırı bükülme ve gerilmeye dayanıklı olmalarıyla dikkat çekerken, iletken özelliklerini de koruyarak tıbbi cihazlar gibi hassas elektroniklerde kullanım potansiyeli taşımaktadır (Chen et al., 2022).

Borofenin esnekliği ve yüksek yüzey alanı, onun nanosensör uygulamalarında kullanılmasını da mümkün kılmaktadır. Borofen, çevresel değişikliklere hızlı yanıt verebilen son derece hassas nanosensörlerin geliştirilmesi için kullanılmaktadır. Bu sensörler, kanser teşhisi, ilaç keşfi ve çevre izleme gibi kritik alanlarda uygulanabilmektedir (Srivastava et al., 2023). Borofenin mekanik ayarlanabilirliği, nanosensörlerin dayanıklılığını ve hassasiyetini artırmakta, borofeni geniş bir uygulama yelpazesi için ideal bir malzeme haline getirmektedir (Yadav et al., 2022).

Borofenin esnekliği aynı zamanda elektronik cihazların performansını ve dayanıklılığını artırma potansiyeline sahiptir. Giyilebilir teknolojiler ve katlanabilir elektronik cihazlardaki gelişmeler, borofenin esnek ve dayanıklı yapısı sayesinde ilerlemektedir. Ayrıca, borofenin enerji depolama cihazlarında ve pillerde kullanım potansiyeli, cihazların enerji verimliliğini artırma fırsatı sunmaktadır (Jiang et al., 2016). Sonuç olarak, borofen, ileri teknoloji uygulamalarında devrim yaratacak özelliklere sahip olup, gelecekte esnek elektronikler ve nanosensörlerin temel bir bileşeni haline gelme potansiyeline sahiptir (Mazaheri et al., 2021).

### **2.6.3. Biyomedikal Uygulamalar**

Borofenin artan ilaç yükleme kapasitesi, onu ilaç dağıtım sistemleri alanında devrim niteliğinde bir malzeme olarak konumlandırmaktadır. Bu kapasite, borofenin ilaç moleküllerinin bağlanması için yüksek bir yüzey alanı sunan benzersiz iki boyutlu yapısından kaynaklanmaktadır. Geleneksel ilaç taşıyıcılarının aksine, borofen önemli ölçüde daha fazla miktarda ilaç tutabilir ve bu da onu yüksek dozajlı tedaviler için ideal bir aday haline getirmektedir. Bu özellik, hassas dozajın çok önemli olduğu kişiselleştirilmiş tıpta özellikle faydalıdır. Ayrıca, borofenin stabilitesi ve biyouyumluluğu, ilaçların hedef bölgeye ulaşana kadar bozulmadan kalmasını sağlayarak yan etkileri en aza indirmektedir (Han et al., 2020).

Hedefli ilaç dağıtımı, biyomedikal alanlarda borofenin umut verici bir başka uygulamasıdır. İlaçların belirli hücrelere veya dokulara hassas bir şekilde iletilmesi, tedavinin etkinliğini büyük ölçüde artırabilir ve olumsuz etkileri azaltabilir. Borofenin

nano ölçekli boyutları, biyolojik bariyerlere nüfuz etmesine ve vücudun başka türlü erişilemeyen bölgelerine ulaşmasına olanak tanımaktadır. Ek olarak, borofenin spesifik ligandlar veya antikörlerle işlevselleştirilmesi, hedefleme yeteneklerini daha da artırabilmektedir. Bu hedefe yönelik yaklaşım, sağlıklı dokuları korurken kemoterapötik ajanları doğrudan tümör hücrelerine iletebildiği kanser tedavisinde özellikle değerlidir. Bu tür bir hassasiyet, yalnızca hasta sonuçlarını iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda gereken genel dozajı da azaltarak hastanın vücudundaki yükü azaltmaktadır (Qi et al., 2020).

Kontrollü salım mekanizmaları, vücutta terapötik ilaç seviyelerinin uzun süre korunması için gereklidir. Borofenin özellikleri onu bu tür sistemlerin geliştirilmesi için mükemmel bir aday haline getirmektedir. Malzemenin çeşitli ilaç molekülleri ile stabil kompleksler oluşturma yeteneği, ilacın kademeli ve sürekli bir şekilde salınmasına olanak tanımaktadır. Bu kontrollü salım, difüzyon, bozunma ve şişmeye dayalı sistemler dahil olmak üzere çeşitli mekanizmalar aracılığıyla gerçekleştirilebilmektedir. Borofen yapısını ve bunun ilaçla etkileşimini özelleştirerek, ilacı önceden belirlenmiş bir hızda salan dağıtım sistemleri tasarlamak mümkündür (Sood ve Panchagnula, 2003). Bu, ilaç konsantrasyonunun terapötik pencere içinde kalmasını sağlamaktadır, böylece etkinlik artar ve uygulama sıklığı azalmaktadır.

Borofen, yüksek duyarlılık ve özgüllük özellikleri sayesinde biyosensörlerin geliştirilmesinde dikkate değer bir potansiyel sergilemektedir. Bu biyosensörler, hormonlar, proteinler ve glikoz gibi biyobelirteçleri son derece doğru bir şekilde tespit edilebilmesi, onları tıbbi teşhis alanında değerli araçlar haline getirmektedir. Borofenin yüksek iletkenliği ve geniş yüzey alanı gibi benzersiz elektronik özellikleri, hedef moleküllerle etkili bir şekilde etkileşime girerek son derece hassas tespit mekanizmalarını mümkün kılmaktadır. Bu tür kesin tespitler, hastalıkların erken teşhisi ve izlenmesi açısından büyük önem taşır ve hasta sonuçlarını önemli ölçüde iyileştirmektedir.

Borofen bazlı biyosensörlerin önemli avantajları arasında, hızlı ve gerçek zamanlı izleme sağlama kapasitesi bulunmaktadır. Bu yetenek, özellikle sürekli sağlık izlemesi ve sağlık belirteçlerinin anında tespiti için avantajlıdır. Diyabet gibi kronik durumların yönetiminde gerçek zamanlı glikoz izleme, hastaların optimal kan şekeri seviyelerini korumasına ve komplikasyonları önlemesine imkân tanımaktadır. Borofen biyosensörlerinin hızlı yanıt süresi, hasta bakımını geliştirmenin yanı sıra, klinik

ortamlarda iş akışını kolaylaştırarak zamanında tıbbi müdahalelerin gerçekleştirilmesine katkıda bulunmaktadır (Tasaltin et al., 2021).

Borofen biyosensörlerinin giyilebilir teknolojiyle entegrasyonu, kişiselleştirilmiş sağlık hizmetlerinde çığır açan bir ilerleme temsil etmektedir. Bu sensörlere sahip giyilebilir cihazlar, bir dizi fizyolojik parametreyi sürekli olarak izleyebilir ve sağlık takibi için invazif olmayan, kullanışlı bir yöntem sunmaktadır. Bu entegrasyon, sağlık sorunlarının erken tespitini kolaylaştırarak ve proaktif sağlık yönetimini teşvik ederek koruyucu tıpta devrim yaratma potansiyeline sahiptir (Srivastava et al., 2023). Borofenin esnekliği ve dayanıklılığı, onu giyilebilir uygulamalar için ideal bir malzeme yapar ve cihazların konforunu ve uzun ömürlülüğünü garanti etmektedir.

Borofen, yeni bir iki boyutlu malzeme olarak, doku yenilenmesi için iskele malzemesi olarak kullanımda dikkate değer bir potansiyel göstermektedir. Kemik büyümesi ve onarımı için temel olan kemik iskeleleri, hücre farklılaşmasını ve yapışmasını destekleyebilen malzemeler gerektirmektedir. Borofenin benzersiz yapısı, kemik dokusu mühendisliği için hayati önem taşıyan gerekli mekanik desteği ve gözenekli ortamı sağlamasına olanak tanımaktadır. Bu özellikler, borofeni gelişmiş tıbbi iskelelerin geliştirilmesinde önemli bir adım olarak konumlandırır ve kemik rejenerasyonu ve onarımındaki tedavilerin etkinliğini artırmaktadır (Gu et al., 2013).

Borofenin biyomedikal mühendisliğindeki bir diğer önemli uygulaması, hücre yapışmasını ve büyümesini destekleme potansiyelidir. Grafen ve türevleri, olağanüstü özelliklerinden dolayı kapsamlı olarak araştırılmış ve kullanılmıştır. Borofen, benzersiz elektronik ve yapısal özellikleri sayesinde benzer avantajlar sunmaktadır. Borofen ve grafen, fonksiyonel doku yapılarının gelişimi için önem taşıyan hücre bağlanmasını, çoğalmasını etkili bir şekilde destekleyebilen yüzeyler oluşturmak için gereklidir. Araştırmacılar, borofenin yeteneklerinden yararlanarak daha verimli ve etkili doku mühendisliği çözümleri tasarlayabilir, böylece rejeneratif tıp alanını geliştirebilirler (Yadav et al., 2022).

Borofenin biyoyumluluğu ve biyolojik olarak parçalanabilirliği, biyomedikal uygulamalara uygunluğunu artırmaktadır. Biyoyumlu malzemeler, implantların ve iskelelerin vücutta olumsuz reaksiyonlara neden olmamasını sağlamaktadır. Üstelik biyolojik olarak parçalanabilirlik, malzemenin kademeli olarak parçalanmasına ve vücut tarafından emilmesine olanak tanır, cerrahi müdahale ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır.

Bu nitelikler borofeni, yeni nesil biyomedikal cihazların ve implantların geliştirilmesi için ideal bir aday haline getirmektedir. Tıp alanı, borofeni bu uygulamalara entegre ederek daha doğal ve daha az invaziv tedavi seçenekleri elde edebilir, sonuçta hasta sonuçlarını iyileştirebilir.

## 2.7. Borofenin Karakterizasyonu

Borofenin temel karakterizasyon teknikleri, çeşitli alanlardaki potansiyel uygulamalarını belirlemek için fiziksel ve kimyasal özelliklerinin kapsamlı bir analizini gerektirmektedir. Raman spektroskopisi, borofenin titreşim modlarının tanımlar ve  $181 \text{ cm}^{-1}$  ile  $1148 \text{ cm}^{-1}$  arasında değişen spesifik dalga sayılarındaki karakteristik bantları ortaya çıkarmaktadır (Özkan, 2023). Bu bantlar, malzemenin yapısal bütünlüğü ve bileşimi hakkında değerli bilgiler sunmaktadır. Bununla birlikte, borofenin yüzey kimyasını ve elementel bileşimini detaylandırmak amacıyla X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) kullanılır; bu, kimyasal durumlarını ve bağlanma konfigürasyonlarını daha da aydınlatır. Bu tekniklerin entegrasyonu, borofenin özelliklerinin tam olarak anlaşılmasını sağlayarak nanoteknoloji ve elektronikteki pratik uygulamalarını mümkün kılmaktadır (Lefebvre et al., 2019).

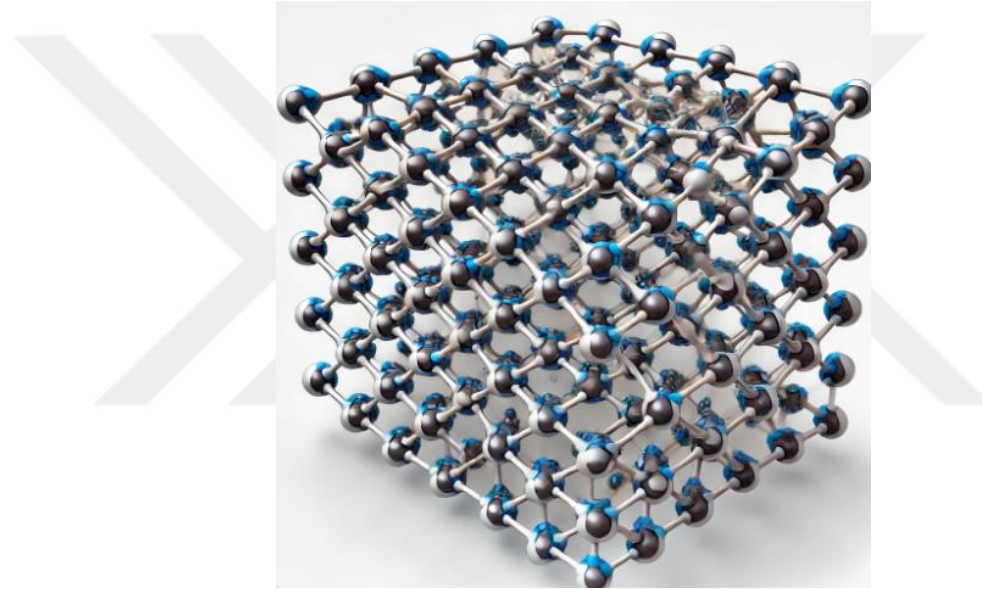
Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM), borofenin morfolojik analizinde hayati bir araçtır ve araştırmacılara borofenin yüzeyini atomik ölçekte görselleştirme imkânı tanımaktadır. AFM, yüzeyi tarayan keskin bir uç kullanarak, borofenin topografik özelliklerini ve yüzey pürüzlülüğünü ortaya çıkaran yüksek çözünürlüklü, üç boyutlu görüntüler sağlamaktadır. Bu teknik, malzemenin çevreyle etkileşimini anlamak için önemli olan yükseklik farklılıkları ve doku gibi yüzey özelliklerinin hassas ölçümüne imkân tanımaktadır. AFM, uç ile yüzey arasındaki kuvvet etkileşimlerini ölçerek, borofenin sertlik ve elastikiyet gibi mekanik özelliklerine ilişkin bilgiler de sunmaktadır. Bu detaylı morfolojik analizler, borofenin esnek elektronikler ve sensörler gibi belirli uygulamalara göre uyarlanmasını kolaylaştırmaktadır (Liu et al., 2021).

Taramalı Tünel Mikroskobu (STM), borofenin atomik ölçekte yüzey analizi ve elektronik özellik karakterizasyonuna olanak tanır ve AFM ile birlikte çalışmaktadır. STM, bir voltaj uygulandığında iletken bir uç ile yüzey arasında akan tünelleme akımına dayanarak borofenin elektronik durumlarını kesin olarak haritalandırır. Bu teknik, durumların yerel yoğunluğunu araştırarak ve malzemenin elektronik davranışını etkileyebilecek atomik seviyedeki kusurları veya safsızlıkları tanımlayarak özellikle değerlidir. STM ayrıca, borofenin atomik düzenini ve yüzey topolojisini vurgulayan üç boyutlu morfolojik

görüntüler üretebilir; bu, yapısal özelliklerinin daha derin bir anlayışını sağlayarak nanoelektronik ve kuantum hesaplama gibi uygulamalardaki performansını optimize etmek için gereklilik arz etmektedir (Magonov ve Whangbo, 1994).

Şekil 2.6'da Borofenin moleküler yapısı, bu iki boyutlu malzemenin benzersiz bal peteği şeklindeki düzenini göstermektedir. Bu yapı, iki boyutlu (2D) bor atomlarından oluşan bir kafes sistemine sahiptir.

Borofenin karakteristik yapısı, birbirine bağlı üçgen ve altıgen desenlerden oluşmaktadır. Altıgenler, bor atomlarının düzenli bir şekilde dizildiği alanları temsil ederken, üçgen yapılar daha yoğun bağlanma bölgelerini temsil etmektedir.



**Şekil 2.6.** Borofenin moleküler yapısını gösteren görsel (AI ile oluşturulmuştur)

### 2.7.1. Temel Karakterizasyon Teknikleri

X-ışını Kırınımı (XRD), örneklerden çok az miktarda alınan numunelerle bile analiz yapabilme yeteneği sunan geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Bu teknik, organik ve inorganik materyaller, mineraller, kristal ve amorf materyaller ile ince filmler dahil olmak üzere çeşitli malzemelerin karakterizasyonunda kullanılır. (Kvick, 2017).

XRD'nin temel prensipleri, X-ışınlarının kristal yapılarında elastik şekilde saçılmasına dayanır. Gelen ışın enerjisi ile yayılan fotonun enerjisi arasındaki fark, elastik saçılım olarak bilinir ve bu saçılım, kristal fazların özgün atomik düzenlemelerine bağlı olarak

karakteristik özelliklere sahip bir model oluşturmaktadır. XRD, doğal olarak veri değiştirmeyen, yüksek frekanslı, güvenilir, derinlik profili çıkarabilen, kullanıcı dostu bir sistem olarak tanımlanmaktadır (Pope, 1997).

Borofen analizinde XRD'nin uygulanması, bu yöntemin sunduğu avantajlar sayesinde ayrıntılı karakterizasyonların yapılmasını sağlamaktadır. Borofen film katmanlarının üretimi ve karakterizasyon çalışmalarında kullanılan XRD, yeterli miktarda veri sağlamaktadır. Bu teknik, borofen gibi yeni malzemelerdeki mikro dayanıklılık değişimlerini incelemekte ve hem başlangıç hem de nihai sonuçların değerlendirilmesinde rol oynamaktadır. XRD'nin sağladığı ayrıntılı bilgiler, borofen gibi malzemelerin araştırılması ve geliştirilmesi süreçlerinde önemlidir (Chahal et al., 2021).

Raman spektroskopisi, malzeme karakterizasyonu alanında malzemelerin titreşim modlarına ilişkin kritik bilgiler sağlayan temel bir araçtır. Bu teknik, titreşim spektroskopisi kategorisine dahildir ve bir numunenin moleküler titreşimleri ile kristal yapıları hakkında ayrıntılı bilgi sunma yeteneği ile öne çıkmaktadır. Monokromatik ışığın esnek olmayan saçılımını ölçerek çalışan Raman spektroskopisi, fotonların enerjisinde meydana gelen değişiklikleri saptamaktadır. Bu enerji değişimi, malzemeleri tanımlamak ve karakterize etmek için kullanılabilir moleküler bir parmak izi sağlamaktadır (Butler et al., 2016).

Raman spektroskopisinin temel ilkeleri, ışık ve madde arasındaki etkileşim, özellikle de fotonların saçılması üzerine kuruludur. Işık bir malzeme ile etkileşime girdiğinde, fotonların büyük çoğunluğu elastik olarak saçılır (Rayleigh saçılması); ancak küçük bir kısmı elastik olmayan şekilde saçılır ve enerji kazancına veya kaybına neden olmaktadır (Raman saçılması). Enerjideki bu değişim, numunedeki moleküllerin titreşim modlarına karşılık gelmektedir. Raman zirvelerinin yoğunluğu ve konumu, malzemenin bileşimi, yapısı ve hatta gerilim ve gerinim durumları hakkında değerli bilgiler sağlamaktadır (Keresztury, 2006).

### **2.7.2. Morfolojik Analizler**

Taramalı Tünel Açma Mikroskobu (STM), borofenin morfolojisini detaylı bir şekilde analiz etme yeteneği ile dikkat çeker ve atomik ölçekte yapısına ilişkin kapsamlı bilgiler sunmaktadır. STM, numune yüzeyinin yüksek çözünürlüklü görüntülerini elde etmek için kuantum tünellemesini kullanılmaktadır. Bu teknik, borofenin atomik düzenini ve

elektronik özelliklerini görselleştirmek için zorunludur. STM'nin farklı ortamlar; ultra yüksek vakum, ortam havası ve sıvı gibi çeşitlerde çalışabilme yeteneği, onu farklı araştırma senaryoları için oldukça uygun kılmaktadır. STM, bireysel atomları manipüle edebilme özelliği ile araştırmacılara yüzey yapısını kasıtlı olarak değiştirme fırsatı tanımaktadır. Bu yetenek, borofenin nanoteknoloji ve malzeme bilimlerindeki uygulamalarını keşfetmek için önemlidir (Li et al., 2018).

Transmisyon Elektron Mikroskobu (TEM), borofenin morfolojik analizinde önemli bir tekniktir ve kristal yapısına ile ince detaylarına dair kapsamlı bilgiler sunmaktadır. TEM, ince bir numune üzerinden elektron ışını ileterek çalışır ve yüzeyin yanı sıra iç yapıların da ayrıntılı olarak görüntülenmesini sağlamaktadır. Bu teknik, borofenin mikro, nano ve kristal yapılarını incelemekte özellikle etkilidir ve malzemenin morfolojisi hakkında karmaşık detayları açığa çıkaran yüksek çözünürlüklü görüntüler sunmaktadır (Tsai et al., 2016). TEM'in eş zamanlı mikro ve nanoyapısal analiz sağlama kabiliyeti, borofenin temel özelliklerini anlamak isteyen araştırmacılar için değerli bir araçtır. Elektron kırınımı gibi diğer tekniklerle birlikte kullanılabilen TEM, kapsamlı yapısal karakterizasyon sağlamaktadır. Bu çok yönlü yaklaşım, borofenin özelliklerinin ve çeşitli alanlardaki potansiyel uygulamalarının daha derinlemesine anlaşılmasına katkıda bulunmaktadır. TEM'in yüksek çözünürlüğü ve hassasiyeti, malzemenin performansını önemli ölçüde etkileyebilecek kusurlar, dislokasyonlar ve diğer yapısal özelliklerin gözlemlenmesine olanak tanımaktadır (Li et al., 2018).

Borofen, borun iki boyutlu bir allotropu olarak, benzersiz elektronik özellikleri nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Bakır folyo üzerinde sentezlenen borofen ince filmleri, morfolojik özelliklerinden kaynaklanan olağanüstü elektronik özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. Spesifik olarak, ince bakır filmler, 950 ila 1035 °C arasındaki sıcaklıklarda Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) yöntemi ile 1:1 gravimetrik metalik bor oranı kullanılarak altlık malzemesi olarak seçilmiştir (Liu et al., 2023). Bu sentez süreci, elektronların doğrusal dağılımını sergileyen yüksek kaliteli bir film sağlar, bu da grafenle benzer şekilde olağanüstü elektronik özelliklere sahiptir. Sentez işlemi sırasında morfolojik özelliklerin dikkatli kontrolü, borofenin elektronik davranışını doğrudan etkiler ve onu gelecekteki elektronik uygulamalar için umut verici bir malzeme haline getirmektedir.

Borofen, elektronik özelliklerinin yanı sıra etkileyici mekanik mukavemet ve esneklik de göstermektedir. Bu olağanüstü güç ve esneklik kombinasyonu, borofen kafesi içindeki bor atomlarının benzersiz yapısal düzenlemesinden kaynaklanmaktadır. Bu morfolojik özelliklerin kesin karakterizasyonu, malzemenin mekanik strese ve deformasyona dayanma yeteneğini doğrudan etkilemektedir (Arabha et al., 2020). Borofen, esnek elektronikler ve gelişmiş kompozit malzemeler gibi yüksek mekanik performans gerektiren uygulamalar için çekici bir aday haline getirmektedir.

Borofenin nanoteknolojideki potansiyel uygulamaları, benzersiz morfolojik özelliklerine büyük ölçüde bağlıdır ve çok geniş ve çeşitlidir. Borofen ince filmlerinin ayrıntılı analizleri, enerji tasarrufu sağlayan malzemeler, karbon azaltma teknolojileri ve çeşitli tüketici ürünleri dahil olmak üzere çeşitli nanoteknolojik uygulamalarda kullanıma uygunluğunu vurgulamaktadır. Bu çalışmada kullanılan nano ölçekli karakterizasyon teknikleri, malzemenin atomik seviyedeki davranışını anlamak ve böylece yenilikçi uygulamaların geliştirilmesini sağlamak için gereklidir (Wang et al., 2019). Borofen, yeni nesil nano cihazlar ve sensörler için potansiyel bir malzeme olarak konumlandırılır ve elektronik, enerji depolama ve çevresel iyileştirme gibi alanlardaki ilerlemelerin önünü açmaktadır.

### **2.7.3. Kimyasal Analizler**

Borofenin yapısal özelliklerini derinlemesine anlamak için Kristalografik karakterizasyon tekniklerini bilmek gerekmektedir. X-ışını kırınımı (XRD), bakır folyo üzerinde sentezlenen borofen ince filmlerinin kristal yapısını analiz etmek için tercih edilen yöntemlerden biridir. Bu teknikle, araştırmacılar kafes parametrelerini belirleyebilir ve kristal fazları ayırt edebilirler. Elektron geri saçılım kırınımı (EBSD), mikroyapısal düzeyde kristal oryantasyonu ve tane sınırları hakkında detaylı bilgi sağlamaktadır (Thompson ve Morrow, 2018). Bu tekniklerin bütünleşik kullanımı, kristalografik özelliklerin geniş bir görünümünü sunmaktadır ve araştırmacıların sentez sürecini istenen uygulamalara göre uyumlamasına imkân vermektedir.

Borofenin atom yapısı ve kafes düzenlemeleri, onun benzersiz özelliklerini tanımlamada hayati öneme sahiptir. Transmisyon elektron mikroskobu (TEM), borofen katmanları içindeki atomik düzenlemeyi ortaya çıkaran yüksek çözünürlüklü görüntüler sunmaktadır. Taramalı tünelleme mikroskobu (STM), durumların yerel yoğunluğunu haritalayarak yüzey topolojisi ve elektronik özellikleri hakkında bilgi sağlamaktadır.

Borofenin bal peteği benzeri kafes yapısı, değişen bağ uzunlukları ve açıları bu tekniklerle net bir şekilde gözlemlenebilmektedir. Bu atomik ölçekteki özelliklerin anlaşılması, malzemenin nanoelektronik ve diğer ileri teknolojilerdeki uygulamaları için gerekli olan mekanik ve elektronik davranışını tahmin etmeye yardımcı olmaktadır (Li et al., 2018).

Borofendeki kusurlar ve tane sınırları, onun genel özelliklerini ve potansiyel uygulamalarını büyük derecede etkilemektedir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM), yüzey morfolojisini araştırmak ve çeşitli kusurları tanımlamak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kusurlar, borofenin elektronik, mekanik ve termal özelliklerini değiştirebilir, bu nedenle sentez işleminde bu özelliklerin karakterizasyonu ve kontrolü gereklidir (Wang ve Geng, 2016). Bu kusurların doğasını ve dağılımını anlamak, araştırmacıların borofen bazlı cihazların kalitesini ve performansını artırmasına yardımcı olmaktadır.

Borofenin elektronik özellikleri, özellikle iletkenliği ve bant yapısı, çeşitli teknolojik alanlardaki potansiyel uygulamalarını anlamak açısından önem taşımaktadır. Yeni ortaya çıkan iki boyutlu bir malzeme olarak borofen, elektronik cihazlarda kullanımı için dar bant aralıklı bir yarı iletken davranışı sergilemektedir. Bor atomu zincirlerinden oluşan borofenin benzersiz asimetrik buruşuk yapısı, elektronik özelliklerinde belirleyicidir. Bu yapı, elektronların malzeme üzerindeki hareketini etkileyerek iletkenliğini değiştirebilmektedir (Padilha et al., 2016). Bu özellikler, borofenin yeni nesil elektronik bileşenlere entegrasyonunun uygulanabilirliğini belirlemede etkili olup, yoğun bir araştırma ve analiz konusu haline getirmektedir.

Borofenin yüzey durumları ve kenar etkileri, genel elektronik özelliklerini tanımlamada önemlidir. Yüzey durumları, bir malzemenin yüzeyinde bulunan ve onun elektronik davranışını değiştirebilen elektronik durumları ifade etmektedir. Borofende bu yüzey durumları, durumların yoğunluğunu ve yük taşıyıcıların etkin kütesini etkileyebilmektedir. Kenar etkileri, borofen levhaların kenarlarındaki elektronik özelliklerde değişikliklere yol açmaktadır (Ezawa, 2017). Bu etkiler, özellikle borofen gibi yüksek yüzey/hacim oranına sahip malzemelerde belirgindir; burada kenarlar, malzemenin toplam yapısının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır.

Doping ve işlevselleştirme, borofenin elektronik davranışını değiştirmek ve geliştirmek için etkili stratejilerdir. Doping, borofen kafesinin taşıyıcı konsantrasyonu ve hareketliliği

gibi elektronik özelliklerini değiştirmek için safsızlıkların eklenmesini içermektedir. İşlevselleştirme, istenen elektronik özellikleri elde etmek için borofen yüzeyine çeşitli kimyasal grupların eklenmesini gerektirmektedir. Bu işlemler, borofenin elektronik davranışını etkileyerek onu belirli uygulamalar için daha uygun hale getirebilmektedir. Borofenin nitrojen veya karbon gibi elementlerle katkılanması, iletkenliğini artırabilir ve elektronik cihazlarda kullanımını daha etkili hale getirebilmektedir (Hembram et al., 2023). İşlevselleştirme, borofenin stabilitesini ve diğer malzemelerle uyumluluğunu geliştirerek elektronik ve ötesindeki potansiyel uygulamalarını genişletebilmektedir.

## **2.8. Borofenin Kararlılığı ve Zeta Potansiyel Ölçümleri**

Dinamik ışık saçılımı (DLS), borofenin stabilite ve zeta potansiyeli ölçümlerinde tercih edilen bir yöntemdir. Seyreltik çözeltilerdeki küçük parçacıkların saçtığı ışığın yoğunluğu ve dalgalanmalarına dayanan bu metodoloji, parçacık boyutu dağılımı ve yüzey yükü özellikleri hakkında bilgiler sağlamaktadır. Kolloidal çözeltiler ve süspansiyonlardaki nanopartiküllerin boyutlandırılmasında kullanılan DLS, sıvı bir ortamda dağılmış borofenin analizi için uygundur. Araştırmacılar, borofenin çeşitli ortamlardaki etkileşimlerini ve stabilitesini bu özellikler yardımıyla değerlendirirler, bu değerlendirme ise nanoteknoloji ve malzeme bilimindeki uygulamalar için temel bir faktördür (Bhattacharjee, 2016).

Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM), yüzeylerin yüksek çözünürlüklü, üç boyutlu görüntülenmesini sağlayarak borofenin stabilitesinin ölçülmesine olanak tanımaktadır. Atom boyutlarına kadar detay sağlayan keskinleştirilmiş bir iğne ucu kullanımına dayanan AFM, borofenin ayrıntılı yüzey topografyasını ve mekanik özelliklerini ortaya çıkarmaktadır. Araştırmacılar, numune hasarı riskini en aza indirmek ve güvenilir veriler elde etmek amacıyla dinamik modları tercih etmektedirler. Bu özellikler, borofenin yüzey özelliklerinin kesin karakterizasyonunda AFM'yi vazgeçilmez bir araç haline getirmektedir (King et al., 2009).

Termogravimetrik Analiz (TGA), borofenin termal stabilitesini değerlendirmede kullanılan bir yöntemdir. Malzemenin kütle değişimini sıcaklık veya zamanın bir fonksiyonu olarak kaydeden bu metodoloji, termal bozunma ve oksidasyon süreçleri hakkında bilgiler sunmaktadır. Araştırmacılar, kontrollü ısıtma hızları altında borofenin kütledeki değişimleri izleyerek malzemenin termal davranışı ve stabilitesi hakkında kritik bilgiler elde ederler (Cao ve Mu, 2014). Bu bilgiler, malzemenin yüksek sıcaklık

uygulamalarındaki performansını tahmin etmelerine ve çeşitli endüstriyel kullanımlar için işleme koşullarını optimize etmelerine yardımcı olmaktadır.

Zeta potansiyeli, koloidal dağılımların kararlılığının anlaşılmasında kilit bir kavramdır ve ölçümü genellikle Doppler ilkesi ile uygulanan elektrik alanı altındaki parçacıkların hızına dayanır, bu ilke Henry formülü ile temsil edilmektedir. Toplu sıvı ile bir nanoparçacık yüzeyi arasında zıt yüklü iyonlar içeren bir sıvı katman arasındaki potansiyel fark, koloidal parçacıklar arasındaki etkileşimin değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Zeta potansiyelinin ölçümü, koloidal sistemlerin stabilitesi hakkında bilgiler sağlayarak, onu çeşitli bilimsel ve endüstriyel uygulamalar için önemli bir parametre haline getirmektedir. Özellikle, parçacıkların dağıldığı sıvının pH'ı zeta potansiyelini etkileyebilir; izoelektrik nokta, zeta potansiyelinin sıfır olduğu pH değeridir (Savchenko et al., 2019).

Zeta potansiyelini doğru bir şekilde ölçmek için Dinamik Işık Saçılımı (DLS) ve Zetasizer Nano ZS gibi gelişmiş araçlar ve teknikler kullanılmaktadır. Bu cihazlar, bilim insanlarının parçacıkların hem zeta potansiyelini hem de hidrodinamik çapını ölçmesine olanak tanıyarak, koloidal stabilite hakkında kapsamlı veriler sağlamaktadır. Ölçüm süreci, koloidal dağılıma bir elektrik alanı uygulanmasını ve parçacıkların hızlarının analiz edilerek zeta potansiyellerinin belirlenmesini içermektedir. Bu cihazların hassasiyeti ve güvenilirliği, onları araştırma ve geliştirme ortamlarında vazgeçilmez araçlar haline getirerek çeşitli ortamlarda nanopartikül davranışının ayrıntılı analizine olanak tanımaktadır (Tantra et al., 2010).

Yeni bir iki boyutlu malzeme olan borofen, benzersiz özellikleri ve çeşitli alanlardaki potansiyel uygulamaları nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Zeta potansiyeli ölçümlerinden etkilenen dispersiyonlardaki stabilitesi, çeşitli uygulamalardaki etkinliğinde kilit bir rol oynamaktadır. Borofen, polimer ve seramik matrisli kompozitlerin özelliklerini geliştirmek için takviye malzemesi olarak kullanılabilir, bu da onu ileri malzeme mühendisliğinde değerli kılmaktadır. Ek olarak, borofen dispersiyonlarının stabilitesi, enerji tasarruflu malzemelerde, karbon azaltma teknolojilerinde ve çok sayıda tüketici ürününde kullanımını etkilemektedir (Li et al., 2014). Borofen dispersiyonlarının zeta potansiyelinin anlaşılması ve kontrol edilmesi, uygulama potansiyelinin optimize edilmesinde büyük önem taşımaktadır.

### **2.8.1. Zeta Potansiyel ve Yüzey Yükü**

Parçacıkların yüzey yükünü etkileyen çeşitli faktörler vardır ve bunlar arasında zeta potansiyelini etkileyebilen pH, en dikkate değer faktördür. pH, yüzey fonksiyonel gruplarının iyonlaşma durumunu değiştirerek yüzey yükünü değiştirmektedir. Ayrıca, parçacık yüzeyine spesifik olarak adsorbe olan iyonlar olan potansiyel belirleyici iyonların konsantrasyonu da, yüzey yük yoğunluğunun ve parçacıkları çevreleyen çift tabakanın kalınlığının tanımlanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Ortamın iyonik kuvveti de başka bir kritik faktördür; bu kuvvet, iyonların parçacıklar etrafındaki dağılımını ve dolayısıyla genel zeta potansiyelini etkilemektedir. Bilim insanları bu faktörleri anlayarak yüzey yükünü ve dolayısıyla kolloidal sistemlerin stabilitesini daha etkin bir şekilde kontrol edebilmektedirler (Selmani et al., 2014).

Parçacıkların yüzey yükünü ve buna bağlı olarak zeta potansiyellerini değiştirmek için çeşitli yöntemler mevcuttur. Bu yöntemlerden biri, parçacık yüzeyine adsorbe olabilen ve yük özelliklerini değiştirebilen yüzey aktif maddelerin veya diğer kimyasal katkı maddelerinin eklenmesidir. Kolloidal sistemin pH'ını ayarlamak, yüzey gruplarının protonasyonuna veya deprotonasyonuna yol açabilir ve dolayısıyla yüzey yükünü değiştirmektedir (Velegol et al., 2020). Bununla birlikte, çok değerlikli iyonların eklenmesi, tek değerlikli iyonlardan daha etkili bir şekilde yüzey yük yoğunluğunu değiştirerek zeta potansiyelini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bu yöntemler, genellikle geri dönüşümlü ve maliyet etkin oldukları için geniş bir uygulama yelpazesine uygun hale gelmektedir (Leroy et al., 2011).

### **2.8.2. Çözücü Etkileşimleri ve Stabilité**

Sıcaklık, borofenin kararlılığını ve yaygın kullanım potansiyelini belirleyen önemli bir faktördür. Yüksek sıcaklıklarda, borofenin yapısal bütünlüğü ve yüzey özellikleri etkilenebilmektedir. Belirli bir sıcaklık aralığında, borofenin kristal yapısında değişiklikler olabilir, bu da mekanik ve elektronik özelliklerin bozulmasına yol açmaktadır. Bu durum, borofen yataklarının daha az kararlı hale gelmesine neden olmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda borofenin kullanılabilmesi için optimal sıcaklık aralıklarının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

Nem ve atmosfer koşulları da borofen üzerinde belirgin etkilere sahiptir. Borofen, nemin artışıyla hassaslaşabilir, bu da yapının kararlılığını olumsuz etkilemektedir. Yüksek nem oranları, borofenin yüzeyinde oksit tabakalarının oluşumuna yol açabilir; bu durum,

malzemenin manyetik iletkenliğini ve mekanik performansını etkileyebilmektedir. Atmosferdeki diğer gazların varlığı ve borofen yapısından kaynaklanan kimyasal değişiklikler, borofen için uygun saklama ve çalışma koşullarının titizlikle belirlenmesini gerektirmektedir (Hou et al., 2020).

Substrat işlemleri de borofenin kararlılığı üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Borofen, farklı substratlar üzerinde değişken stabilite özellikleri gösterebilmektedir. Örneğin, metal substratlar borofenin yüzeyinde daha stabil bir yapı sağlayabilirken, izolatör substratlar zayıf etkileşimler sergileyebilmektedir. Bu, borofenin yüzeylerle bağlanma enerjisini ve dolayısıyla genel stabilitesini etkilemektedir. Substrat seçimi, uygulamanın gerektirdiği sıcaklık koşullarına göre optimize edilmelidir (Peng et al., 2016).

Çözücü polaritesinin zeta potansiyelinin belirlenmesindeki rolü, kolloidal sistemlerin stabilitesine doğrudan etki etmektedir. Çözücü polaritesi, iyonların kolloidal parçacıklar etrafındaki dağılımını etkileyerek elektrostatik itmenin değişimine yol açmaktadır. Yüksek dielektrik sabitine sahip çözücüler, yüklü parçacıklar arasındaki etkileşimleri daha etkin bir şekilde koruyarak daha stabil kolloidal süspansiyonlar oluşturabilmektedir (Pochapski et al., 2021). Bu özellik, özellikle elektronik uygulamalarda tutarlı performansın sağlanması için gerekli olan borofenin sentezi ve uygulamasını sağlamaktadır.

Çözücünün iyonik gücü ve pH değeri de kolloidal sistemlerin stabilitesini büyük ölçüde etkilemektedir. İyonik kuvvet, kolloidal parçacıkları çevreleyen elektriksel çift tabakanın kalınlığını değiştirir, bu da zeta potansiyelinin azalmasına ve dolayısıyla stabilite kaybına neden olabilmektedir. Benzer şekilde, pH değeri, parçacıkların yüzey gruplarının iyonizasyon durumunu değiştirerek zeta potansiyelinin değişmesine neden olabilmektedir (Thompson et al., 2016).

## **2.9. Borofenin Ticari Potansiyeli**

Borofenin atomik yapısı ve bağlanma düzeni, onun olağanüstü özelliklerinde temel bir rol oynamaktadır. Bor atomlarının oluşturduğu iki boyutlu yapı, malzemeye eşsiz elektronik, mekanik ve kimyasal nitelik kazandırmaktadır. Bor atomları arasındaki güçlü kovalent bağlar, borofeni son derece dayanıklı ve esnek kılarken, düşük yoğunluğu onu hafif ve sağlam malzeme uygulamaları için ideal bir aday haline getirir (Mannix et al., 2015). Ayrıca geniş yüzey alanı sayesinde borofen, yüksek reaktivite göstermekte ve bu

özelliğiyle enerji depolama sistemlerinden elektronik sensörlere kadar birçok teknolojik uygulama alanında ilgi göstermektedir (Feng et al., 2016).

Borofen üretim teknikleri, bu malzemenin ticari kullanımını açısından önemli bir faktördür. Kimyasal buhar biriktirme gibi yöntemler kullanılarak borofen üretimi gerçekleştirilebilir ve bu yöntemler malzemenin yapısal kontrolü açısından kritik öneme sahiptir. Borofenin ince katmanlı yapısının üretimi, özellikle elektronik uygulamalar açısından büyük bir avantaj sağlar (Zhou et al., 2017). Yüksek kaliteli borofen katmanlarının üretimi, esnek elektronikler, sensörler ve enerji depolama cihazları gibi geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılma potansiyeline sahiptir.

Elektriksel iletkenlik ve enerji depolama kapasitesi açısından borofen, enerji sektöründe ciddi bir potansiyel barındırmaktadır. Borofen, lityum-iyon piller ve süper kapasitörler gibi enerji depolama cihazlarında yüksek kapasite ve hızlı sarj ve deşarj imkânı sunarak enerji yoğunluğunu artırma potansiyeline sahiptir (Li et al., 2016). Borofenin üstün elektronik ve optik özellikleri, geleceğin yüksek performanslı elektronik cihazları için önemli bir malzeme olabileceğini göstermektedir. Borofen, enerji depolama, sensör teknolojileri ve elektronik cihazlar gibi birçok alanda teknolojik gelişmelere katkı sağlayabilecek potansiyele sahiptir (Penev et al., 2016).

Bunu yanı sıra borofenin kimyasal ve mekanik özellikleri, endüstriyel uygulamalarda da avantajlar sunmaktadır. Borofen, yüksek sıcaklıklara dayanıklılığı ve kimyasal kararlılığı sayesinde katalizör, koruyucu kaplamalar ve aşındırıcı malzemelerde kullanılacak bir malzeme olarak çıkmaktadır (Zhang et al., 2018). Ayrıca borofenin biyoyumlu ve biyolojik olarak stabil yapısı, tıp alanında da potansiyel uygulamalar sunmaktadır. Gelişmiş biyosensörler ve ilaç taşıma sistemleri gibi uygulamalarda borofenin kullanımı, tıp teknolojisinde önemli bir yer tutabileceğini göstermektedir (Kistanov et al., 2019).

Sonuç olarak, borofen, eşsiz elektronik, mekanik ve kimyasal özellikleri sayesinde ticari alanda önemli bir potansiyele sahiptir. Borofen, enerji depolama, elektronik, biyomedikal ve endüstriyel uygulamalarda geniş bir kullanım alanı bulabilecek bir malzemedir. Bu yenilikçi malzemenin üretim teknolojilerindeki ilerlemeler ve ticari olarak geniş çapta kullanımı, borofenin gelecekteki teknolojik yeniliklerde kilit rol oynayabileceğini işaret etmektedir.

### 2.9.1. Endüstriyel Üretim Zorlukları

Bor atomlarının tek katmanı olan borofen, olağanüstü elektronik, termal ve mekanik özellikleri ile büyük ilgi görmüştür. Ancak borofenin sentezi, büyük ölçekli üretimi için önemli zorluklar oluşturan karmaşıklıklar içermektedir. Keşfedilen çeşitli yöntemler arasında, sıvı faz pul pul dökülme yöntemi, endüstriyel ölçekte borofen levha sentezi için umut vaat eden bir teknik olarak öne çıkmaktadır. Bu teknik, bor tozlarının bir çözücü içinde dağıtılmasını ve ardından ultrasonik işlem ile borofen katmanlarının pul pul dökülmesini içermektedir. Bu yöntemin potansiyeline rağmen, düzgün tabaka oluşumunu sağlamak için solvent türü, sonikasyon süresi ve sıcaklık gibi çeşitli parametrelerin hassas kontrolünü gerektirmektedir. Ayrıca, bu yöntemden elde edilen borofen tabakalarının verimi değişkenlik gösterir ve tutarlı, ölçeklenebilir üretim süreçleri için ek iyileştirmelere ihtiyaç duymaktadır (Zhang et al., 2020).

Borofenin ticari üretimindeki bir diğer zorluk ise stablitedir. Borofen, ortam koşullarına maruz kaldığında yüksek reaktivite göstermektedir, bu da hızlı bozunmaya ve istenen özelliklerin kaybolmasına yol açmaktadır. Bu çevresel hassasiyet, borofenin bütünlüğünü korumak için sıkı kullanım ve depolama protokolleri gerektirir. Bozunma süreci, borofenin havadaki oksijen ve nem ile reaksiyona girerek yapısını ve özelliklerini bozan bor oksitleri oluşturmasıyla yönlendirilir. Araştırmacılar bu sorunu hafifletmek için borofeni koruyucu katmanlara kapsüllemek veya stabil borofen bazlı kompozitler geliştirmek gibi çeşitli stratejileri aktif olarak araştırmaktadırlar. Bu yaklaşımlar, borofenin çevresel faktörlere karşı dayanıklılığını artırmayı ve böylece pratik uygulamalarda kullanılabilirliğini genişletmeyi hedeflemektedir (Liu et al., 2020).

Laboratuvar ölçeğinde sentezden endüstriyel ölçekte borofen üretimine geçiş, ölçeklenebilirlik zorlukları ile doludur. Kontrollü bir laboratuvar ortamında verimli bir şekilde çalışan teknikler, ticari üretim için ölçeklendirildiğinde önemli engellerle karşılaşabilir. Özellikle, büyük ölçekli üretim sırasında borofen levhaların yüksek saflığını ve yapısal bütünlüğünü korumak, potansiyel kirlenme ve kusurlar nedeniyle zordur. Üstelik, endüstriyel üretim için gerekli ekipmanın, laboratuvar koşullarını çok daha büyük ölçekte taklit edecek şekilde hassas bir şekilde kalibre edilmesi gereklidir; bu gereklilik, hem teknik açıdan karmaşık hem de maliyet açısından engelleyici olabilmektedir (Radatović et al., 2020).

Borofenin üretim maliyeti, hammadde ve üretim sürecine ilişkin harcamalarla yoğun bir şekilde ilişkilidir. Borofen için temel bileşen olan bor, geniş uygulama alanları nedeniyle sıklıkla mucize mineral olarak adlandırılmaktadır. Yüksek saflıkta borofen üretimi için borun çıkarılması ve rafine edilmesi ise maliyetli bir süreçtir. Endüstriyel ölçekte borofen tabakalarının sentezlenmesi için öne çıkan sıvı faz pul pul dökülme yöntemi, karmaşıklığı ve özel ekipman gereksinimi nedeniyle genel üretim maliyetlerini artırmaktadır. Bu nedenle, hammadde maliyetleri ile ileri üretim tekniklerinin maliyetlerini dengelemek, borofenin ticari olarak uygulanabilirliği için önemli bir zorluktur (Xie et al., 2020).

Borofene yönelik pazar talebi, onun potansiyel uygulamaları ve ticari fizibilitesi ile yakından ilişkilidir. Borofenin yüksek elektrik iletkenliği ve mekanik mukavemeti gibi özellikleri, onu esnek elektronikler, gelişmiş sensörler ve enerji depolama sistemleri gibi çeşitli yüksek teknoloji uygulamaları için uygun kılmaktadır. Ancak, bu uygulamaların ciddi bir pazar talebine dönüşebilmesi için, borofenin ekonomik olarak uygulanabilir hale getirilmesi amacıyla üretim maliyetlerinin azaltılması gerekmektedir. Bu amaçla, maliyeti düşürebilecek ve borofenin ticari çekiciliğini artırabilecek üretim yöntemlerini optimize etmek önem taşımaktadır. Dolayısıyla, borofenin pazardaki başarısı, üretim maliyetlerini gelişmiş uygulamalara yönelik artan taleple dengeleme becerisine bağlı olacaktır (Duo et al., 2021).

Borofene yönelik rekabet ortamı, alternatif malzemelerin varlığından ve pazardaki konumundan etkilenmektedir. Umut verici özelliklerine rağmen borofen, özellikle grafen gibi pazarda güçlü bir varlığa sahip olan diğer malzemelerle rekabet etmektedir. Borofenin bu ortamda etkin bir şekilde rekabet edebilmesi için yasal düzenlemeler ve adil rekabet uygulamaları gereklidir. Düzenleyici kurumlar, borofen gibi yeni materyallerin büyümesi ve kabulü için önemli olan eşit bir alanda sürdürmek adına önlemler almaktadır. Pazar geliştikçe, borofenin bir üstünlük yaratma yeteneği, mevcut alternatiflerle karşılaştırıldığında üstün özellikleri ve maliyet etkinliği öne çıkacaktır.

### **2.9.2. Ticarileştirme Stratejileri**

Yüksek verimli sentez yöntemleri, borofenin ticari kullanımını mümkün kılan kritik bir yapıya sahiptir. Kimyasal buhar biriktirme (CVD) teknolojisi, borofen üretiminde yaygın olarak kullanılmakta ve bakır folyolar üzerinde çeşitli depolama alanlarına sahip borofen kaplamaları elde edilebilmektedir. Bu yöntem, bor atomlarının bakır üzerine yerleşerek istenilen yapıyı oluşturmasını ve borofen tabakalarının büyütülmesini sağlamaktadır.

Ayrıca, ultrasonik eksfoliasyon teknolojisi de yüksek kaliteli ve hızlı 2D nanomalzeme üretiminde sıklıkla tercih edilmektedir. Bu teknikler, yüksek verimlilik ve kalite sunarak endüstriyel ölçekte borofen üretimini mümkün kılmaktadır (Wang et al., 2019).

Borofen üretiminin kalite kontrolü ve standardizasyonu, ürün kalitesini ve güvenilirliğini garanti altına almak için hayati önem taşımaktadır. Metalurji ürünleri veya savunma sanayii Ar-Ge çalışmalarında kullanılan kalite kontrol ve yerli test altyapıları, bu alanda belirleyici bir role sahiptir. Borofen üretim bileşenlerinin belirli bir kalite standardında tutulması gerekmekte ve bu standartların sağlanması için düzenli testler ve değerlendirmeler yapılmalıdır. İleri düzeyde test ve analiz yöntemleri, üretilen borofen tabakalarının istenen özelliklere sahip olup olmadığını doğrular (Yi et al., 2021). Bu sayede borofenin pazarlanabilirliği artar ve ticari uygulamalarda daha geniş bir kabul görmektedir.

Mevcut üretim süreçleriyle entegrasyon, borofen üretiminin ticari olarak uygulanabilirliğini artırmak için gereklidir. Üretim seçenekleri ve makine ekipmanlarının yeterliliği, borofen üretiminin doğrudan etkileri arasındadır. Yüksek sıcaklık uygulamaları için köpük üretiminde kullanılan polimerler gibi gelişmiş teknolojiler, borofen üretimine entegre edilebilmektedir. Ayrıca, mevcut üretimin optimize edilmesi ve borofen üretimine uyum sağlanması, maliyetleri düşürerek verimliliği artırabilmektedir. Bu entegrasyon süreci, borofen üretiminin daha geniş bir alanda kapasitesini artırarak, endüstriyel ve ticari kullanımlarda daha yaygın hale gelmesini sağlamaktadır (Jiang et al., 2016).

Bor atomlarından oluşan iki boyutlu bir malzeme olan borofen, benzersiz özellikleriyle çeşitli sektörlerde büyük potansiyel sunmaktadır. Uygulamaları süper hızlı bilgisayarlardan gelişmiş pillere, transistörlere ve dokunmatik ekranlara kadar geniş bir yelpazede yer alır, bu da onu teknoloji endüstrisi için çok yönlü bir malzeme yapmaktadır. Malzemenin elektriği yüksek hızlarda iletme yeteneği ve esnekliği, daha verimli elektronik cihazların geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Bunun yanında, borofenin hafif ve güçlü yapısı, onu havacılık ve savunma uygulamaları gibi ağırlığın önemli olduğu alanlarda ideal bir aday yapmaktadır. Bu sektörlerdeki araştırma ve geliştirme faaliyetleri, mevcut malzemeleri aşan verimlilik ve performans sağlayacak yeni nesil teknolojiler yaratmayı hedeflemektedir (Wang et al., 2019).

Borofenin ticarileştirilmesi için kapsamlı bir maliyet-fayda analizi yapılması gereklidir. Bu analiz, borofen üretiminin ekonomik fizibilitesini ve potansiyel yatırım getirisini değerlendirmektedir. Hammadde alımı, saflaştırma ve üretim gibi maliyetler, beklenen faydalarla karşılaştırılarak paydaşlar için borofenin uygulanabilirliği hakkında bilinçli kararlar sağlamaktadır. Örneğin, borofen bazlı teknolojilerin yüksek başlangıç maliyetleri, ürün performansındaki artış ve enerji tüketiminin azalması gibi uzun vadeli faydalarla dengelenebilmektedir. İyi planlanmış bir maliyet-fayda analizi, üretim ve ticarileştirme süreçlerinin ekonomik olarak sürdürülebilir ve pazar talepleriyle uyumlu olmasını sağlamaktadır.

Stratejik ortaklıklar ve iş birlikleri, borofenin ticarileştirilmesinde ve yenilikçiliğin teşvik edilmesini sağlamaktadır. İşletmeler, araştırma kurumları, teknoloji şirketleri ve devlet kurumlarıyla yapılan ortaklıklar, borofen bazlı teknolojilerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılmasını hızlandırabilir. Bu tür iş birlikleri, borofen üretimi ve uygulamasındaki zorlukların üstesinden gelmek için gerekli bilgi ve teknik yeteneklerin birleştirilmesini sağlar. Ayrıca, sektör liderleriyle kurulan ittifaklar, yerleşik dağıtım ağlarından ve müşteri tabanlarından yararlanarak pazara girişi ve benimsenme oranlarını artırabilir. Bu stratejik ortaklıklar, borofen teknolojisinde süregelen araştırma ve geliştirme çalışmalarını destekleyen sağlam bir ekosistem yaratılmasına da katkıda bulunmaktadır (Jiang et al., 2016).

### 3. MATERYAL ve METOD

#### 3.1. Sonokimyasal Metod ile Borofen Sentezi ve Karakterizasyonu

Bu tez çalışmasında, Borofen sonokimyasal yöntemi kullanılarak sentezlenmiştir. Çeşitli kimyasallar ve çözücüler kullanılmıştır. %99, 5 saflıkta bor, aseton, DI su ve izo-propil alkol çözücülerine 1:1 oranında ayrı ayrı eklenmiştir. Bu karışımlar Şekil 3.1.'de verilen ultrasonik banyoda 1 saat sonikasyona tabi tutulmuştur. Ultrasonik banyo işlemi, karışımların homojen bir şekilde dağılmasını ve reaksiyonların daha etkin gerçekleşmesini sağlamak amacıyla yapılmıştır. Ultrasonik banyo işleminin ardından karışımlar Şekil 3.3'de ki gibi buz banyosu hazırlanarak, Şekil 3.2'te ki prob tipi sonikatörde 4 sn on, 6 sn off olacak şekilde işleme tabi tutulmuştur.



Şekil 3.1. BluLab ultrasonik banyo cihazı



**Şekil 3.2.** Prob Tipi Sonikatör Cihazı



**Şekil 3.3.** Buz banyosu desteği ile Prob sonikatör işlemi

Prob sonikatör, 450, 500 watt güçlerinde ve farklı zamanlarda çalıştırılarak, borofen levhalarının etkin bir şekilde eksfoliyeye edilmesi ve istenilen yapının elde edilmesi sağlanmıştır. Hazır hale gelen dispersiyonlar, 3000 ve 4500 rpm’lerde, farklı zamanlarda santrifüj edilerek çöktürülmüştür. Santrifüj işlemi, dispersiyonların içindeki ağır parçacıkların dibe çökmesini ve daha hafif parçacıkların süpernatant olarak üstte kalmasını sağlamıştır. Santrifüj işlemi sonrasında elde edilen süpernatantlar toplanarak vakum etüvünde 72 saat süreyle kurutulmuştur. Kurutma işlemi, süpernatantın içerisindeki çözücülerin buharlaşmasını ve geriye sadece nanopartiküllerin kalmasını sağlamıştır.

Santrifüj sonrası elde edilen süpernatantlar Şekil 3.4’de ve kurutma aşamasından sonraki halleri ise Şekil 3.5’de gösterilmiştir. Şekil 3.4, santrifüj işleminden sonra üstte kalan sıvının (süpernatant) görüntüsünü sunarken, Şekil 3.5, kurutma işlemi sonrasında elde edilen katı borofen nanopartiküllerinin görüntüsünü göstermektedir.



**Şekil 3.4.** Santrifüj sonrası üstte kalan süpernatant çözeltisi



**Şekil 3.5.** Kurutma işlemi sonrası katı borofen nanopartiküllerinin görüntüsü

### **3.2. Solvotermal Metodu ile Borofen Sentezi ve Karakterizasyonu**

Bu çalışmada, borofenin solvotermal metodu kullanılarak sentezlenmesi gerçekleştirilmiştir. %99.5 saflıkta bor, aseton, DI su ve izo-propil alkol çözücüleri 1:1 oranında hazırlanarak karıştırılmıştır. Hazırlanan bu karışımlar, solvotermal reaktöre eklenmiş ve etüvün içinde 72 saat bekletilmiştir. Etüvde bekletilen bu karışımlar, 72 saat sonunda çıkarılarak 450, 500 watt güçlerinde ve farklı zamanlarda çalıştırılarak, prob tipi sonikatöre konulmuştur. Bu işlem sırasında karışımların aşırı ısınmasını önlemek amacıyla buz banyosu kullanılmıştır ve karışımlar 5 saat boyunca sonikasyona tabi tutulmuştur. Sonikasyon işlemi tamamlandıktan sonra, karışımlar 3000 ve 4500 rpm hızlarında, farklı sürelerle santrifüj edilmiştir. Santrifüj işlemi, karışımların içindeki ağır partiküllerin dibeye çökmesini ve süpernatantların üstte kalmasını sağlamıştır. Elde edilen süpernatantlar, petri kaplarına dökülerek etüv içine yerleştirilmiş ve 72 saat süreyle kurutulmuştur. Kurutma işlemi tamamlandıktan sonra, petri kaplarındaki kuruyan borofen partikülleri spatül yardımıyla dikkatlice kazınarak toplanmış ve depolanmıştır. Santrifüj sonrası elde edilen süpernatantlar Şekil 3.4’de, kurutma aşamasından sonraki halleri ise Şekil 3.5’de ve kullanılan solvotermal reaktör Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



**Şekil 3.6.** Solvotermal reaktör

### **3.3. MoS<sub>2</sub> ve BN Metodu ile Borofen Sentezi ve Karakterizasyonu**

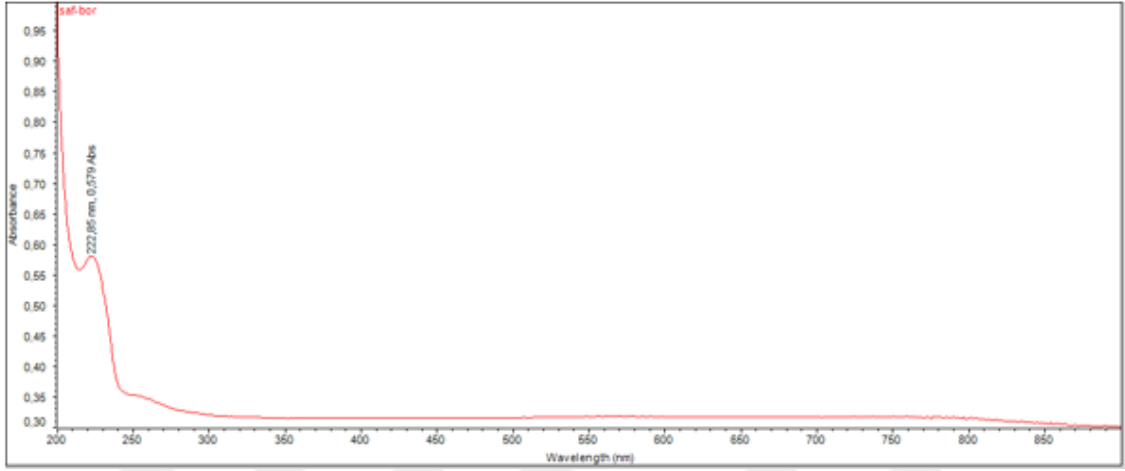
Burada ki çalışmada, MoS<sub>2</sub> ve BN kullanılarak borofen sentezi gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, iki ayrı karışımın birinde 40 ml izopropil alkol (IPA), diğerinde de 40 ml deiyonize su (DI) olacak şekilde üzerlerine, 100 mg MoS<sub>2</sub> ve 100 BN eklenmiş ve bu karışımlar bir süre boyunca ultrasonik banyoda sonikasyona tabi tutulmuştur. Sonikasyon işlemi, karışımların homojen bir şekilde dağılmasını sağlamıştır. Daha sonra bu karışımlar su banyosu içerisinde, 450, 500 watt gücünde ve 5 saat boyunca prop tipi sonikatörde sonikasyona tabi tutulmuştur.

Prob tipi sonikatörde sonikasyona tabi tutulan karışımlar, 3000 ve 4500 rpm hızlarında, farklı sürelerle santrifüj edilmiştir. Santrifüj işleminde yine amaç süpernatantları toplamak olmuştur. Elde edilen süpernatantlar, petri kaplarına dökülmüş ve etüv içine yerleştirilerek 72 saat kurutulmuştur. Kurutma işlemi tamamlandıktan sonra, petri kaplarındaki kuruyan borofen partikülleri spatül yardımıyla dikkatlice toplanmış ve analiz için depolanmıştır.

## 4. KARAKTERİZASYON ANALİZLERİ VE SONUÇLARI

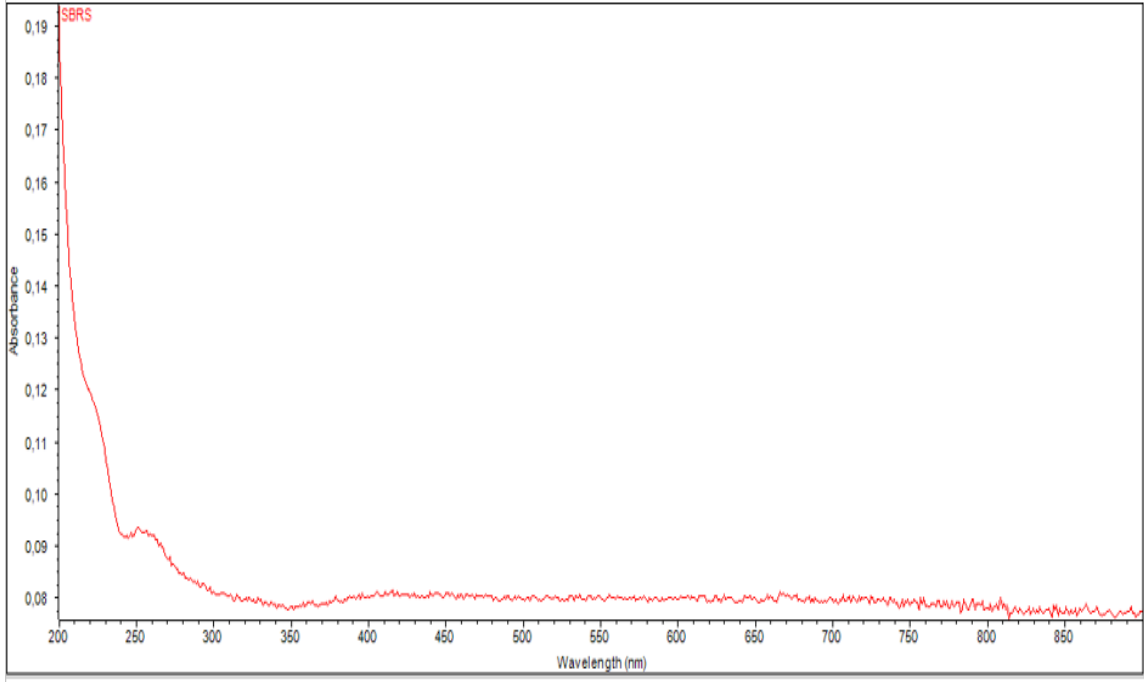
### 4.1 UV-Vis Spektrofotometre Analizi

Deney aşamalarında farklı çözücü ve yöntemlerle elde edilen borofen tabakaları, en yüksek absorpsiyon değerine ulaştıkları dalga boyları açısından gösterdikleri değerler aşağıda verilmiştir. Şekil 4.1’de UV-Vis spektrumu saf b6r 6rneğine ait ve 220 nm civarında bir absorpsiyon piki g6stermektedir. Zhao ve diğerleri (2017), saf borun UV absorpsiyon spektrumunda 200-300 nm aralığında bir pik olduğunu ortaya koymuşlardır.



Şekil 4.1. Saf Bor UV-Vis Grafiği

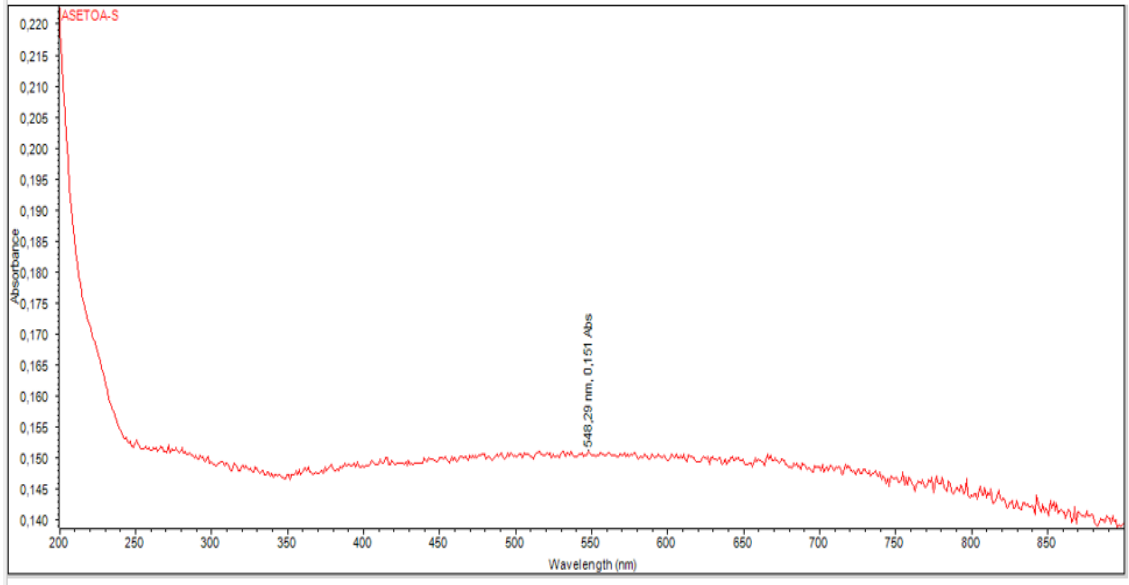
Şekil 4.2’de saf su kullanılarak, sonokimyasal yöntemle sentez sonrası UV-Vis grafiğini g6stermektedir. Grafikte, 250 nm civarında g6zlemlenen pik, borofen sentezinin başarılı olduğunu destekleyen bir piktir. Zhao ve diğerleri (2017) tarafından yapılan çalışmalarda, borofenin UV-Vis spektrumunda 200-300 nm aralığında absorpsiyon pikleri g6zlemlenmiştir. Şekil 4.2’deki spektrumda bu aralığta bir absorpsiyon g6r6lebilmektedir. Bununla birlikte, bu pikler borofen tabakalarının optik 6zelliklerini yansıtığını ve yapının belirli bir d6zen içinde olduğunu g6stermektedir.



**Şekil 4.2.** Sonokimyasal yöntem ve DI ile sentezlenen borofen UV-Vis Grafiği

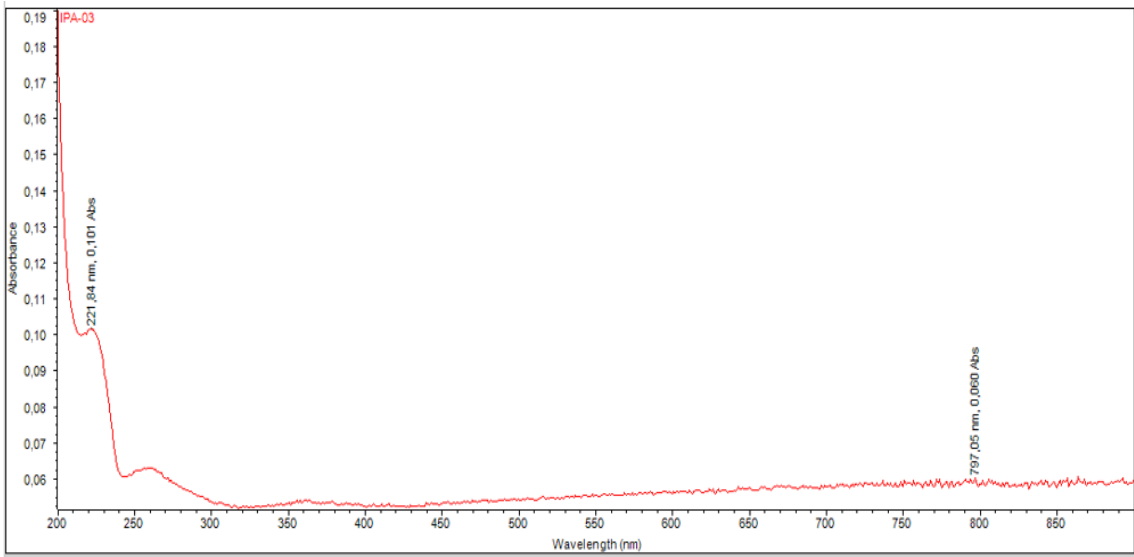
Şekil 4.3’de sonokimyasal yöntemle aseton kullanılarak elde edilen sentez sonrası UV-Vis spektrumu gösterilmektedir. 240 nm civarında ki hafif dalgalanma, borofenden kaynaklı bir piktir. Bu pik, bor ve bor türevlerinin UV-Vis spektrumunda sıklıkla gözlemlenen bir özelliktir (Zhao et al., 2017).

550 nm civarında görülen pik, genellikle nanomalzemelerde yüzey plasmon rezonansı (SPR) ile ilişkilendirilmiştir. Özellikle, Chen ve diğerleri (2017) nanoyapılarda SPR etkisinin genellikle 500-600 nm aralığında ortaya çıktığını ve bu piklerin malzemenin yüzey özellikleri ile doğrudan ilişkili olduğunu belirtmektedir. Ancak borofen gibi malzemeler için dalga boyunda bir SPR piki’nin tipik olmadığı belirtilmiştir. Dolayısıyla 550 nm’de ki pik, tipik borofen absorpsiyon eğrisiyle uyumlu olmadığından, bu oluşumun borofen yapılarına kıyasla yabancı fazlar veya olası kirliliklerin varlığını gösterebilir.



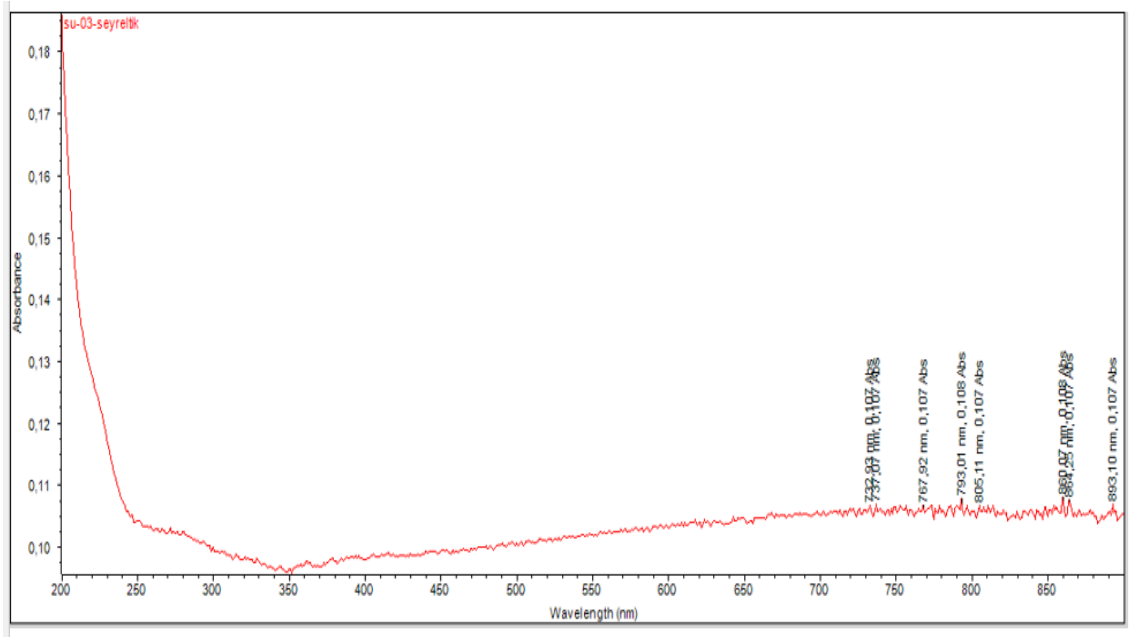
**Şekil 4.3.** Sonokimyasal yöntem ve aseton ile sentezlenen borofen UV-Vis Grafiği

Şekil 4.4’de solvotermal yöntemle IPA çözeltilisi kullanılarak sentezlenen borofenin spektrumu görülmektedir. Grafikte, 221 nm’de ve 250 nm civarında pik bulunmaktadır. Bu pikler borofen tabakalarının düzgün bir şekilde oluştuğunu göstermektedir.



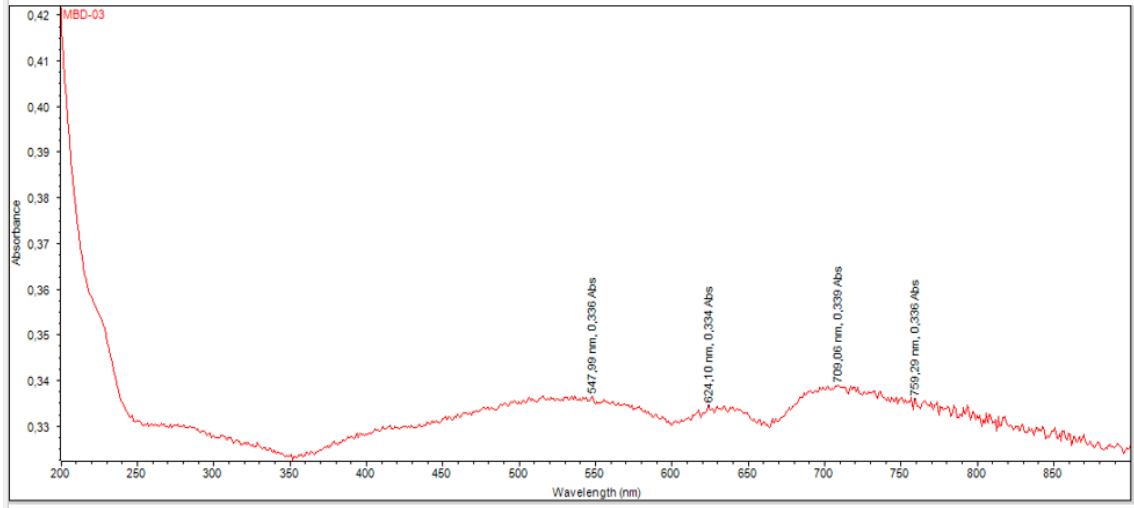
**Şekil 4.4.** Solvotermal yöntem ve IPA ile sentezlenen Borofen tabakalarının grafiği

Şekil 4.5’de DI çözeltisi kullanılarak solvotermal yöntemle sentezlenen borofenin spektrumu görülmektedir. Spektrumda 200-300 nm aralığında, daha geniş bir absorpsiyon bandı hakimdir ve borofen tabakalarının çok katmanlı olduğunu göstermektedir. Dalgaboyları 750 nm ve sonrasında görülen küçük pikler genellikle yüzey plasman rezonansı (SPR) etkisiyle ilişkilendirilebilir, ancak literatüre göre borofen için bu dalga boylarında SPR etkisi tipik değildir (Chen, Wang, Liu & Zhang, 2017).



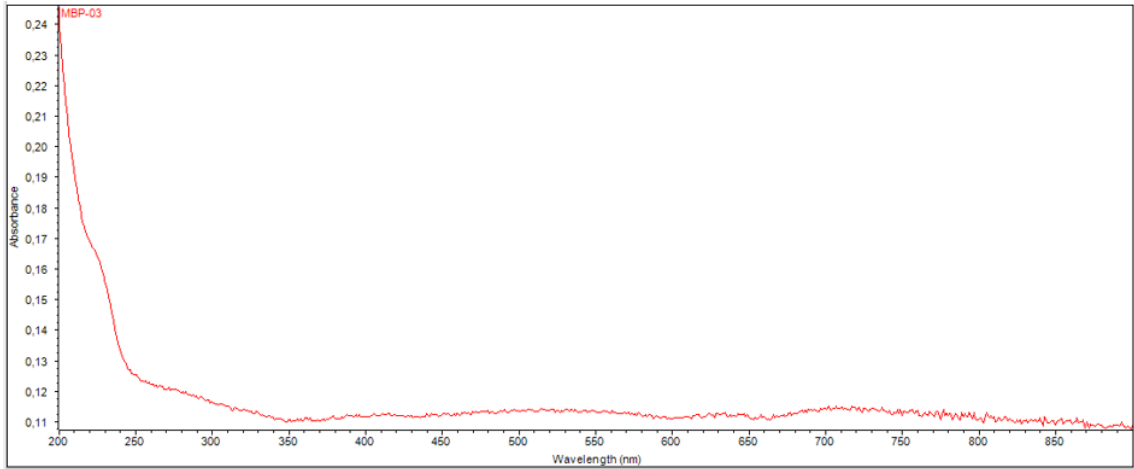
**Şekil 4.5.** Solvotermal yöntem ve DI ile sentezlenen borofen UV-Vis Grafiği

Şekil 4.6’da ki UV-Vis spektrumu, MoS<sub>2</sub> ve BN yöntemiyle DI kullanılarak sentezlenen örnek için elde edilmiştir. Grafikte görülen 240 nm civarındaki hafif dalgalanma, tipik olarak bor veya bor içeren bileşiklerle ilişkilendirilen absorpsiyon bandıdır ve borofen tabakalarının 5 tabakadan daha fazla olduğu düşünülmektedir. 500 nm’den sonrası görülen pikler borofen’den dolayı SPR etkisi beklenmediği için kirlilikten kaynaklı pikler olabilir.



**Şekil 4.6.** MoS<sub>2</sub> ve BN Metodu ve DI ile sentezlenen borofen UV-Vis Grafiği

Şekil 4.7’de görülen UV-Vis spektrumu, MoS<sub>2</sub> ve BN yöntemi kullanılarak IPA çözücüsü ile sentezlenen borofen tabakalarına aittir. Grafikte 200-300 nm aralığında belirgin bir pik gözlemlenmekte olup, bu pik borofenin az tabakalı olduğuna dair olumlu bir gösterge sunmaktadır. 200 nm'nin altında yüksek bir absorbans değeri (0.24) ile başlayarak, spektrum boyunca azalan bir eğilim sergilemiştir. 300 nm'den sonra ise spektrum oldukça yatay bir seyir izlemiş ve düşük bir absorbans göstermiştir. Bu durum, borofen tabakalarının, birkaç katmanlı bir yapısı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, yüzey plasmon rezonansı (SPR) ile ilişkilendirilebilecek belirgin bir pik görülmemektedir, bu da saf borofen yapısı açısından pozitif bir işaret olarak değerlendirilebilir.

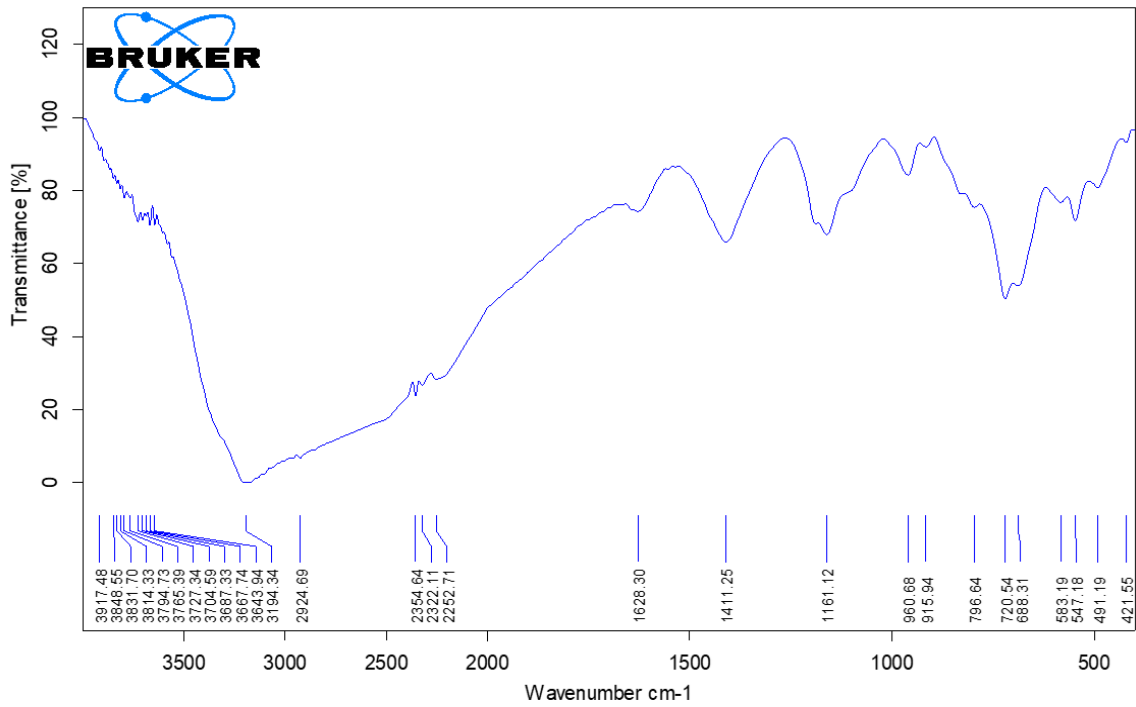


**Şekil 4.7.** MoS<sub>2</sub> ve BN Metodu ve IPA ile sentezlenen borofen UV-Vis Grafiği

Farklı yöntemlerle sentezlenen borofen tabakalarının literatürdeki referanslarla karşılaştırılması sonucu, 200-300 nm dalga boyu aralıklarında absorpsiyon piklerinin görülmesi borofen tabakalarının oluştuğunu destekleyen bulgular arasında yer almaktadır.

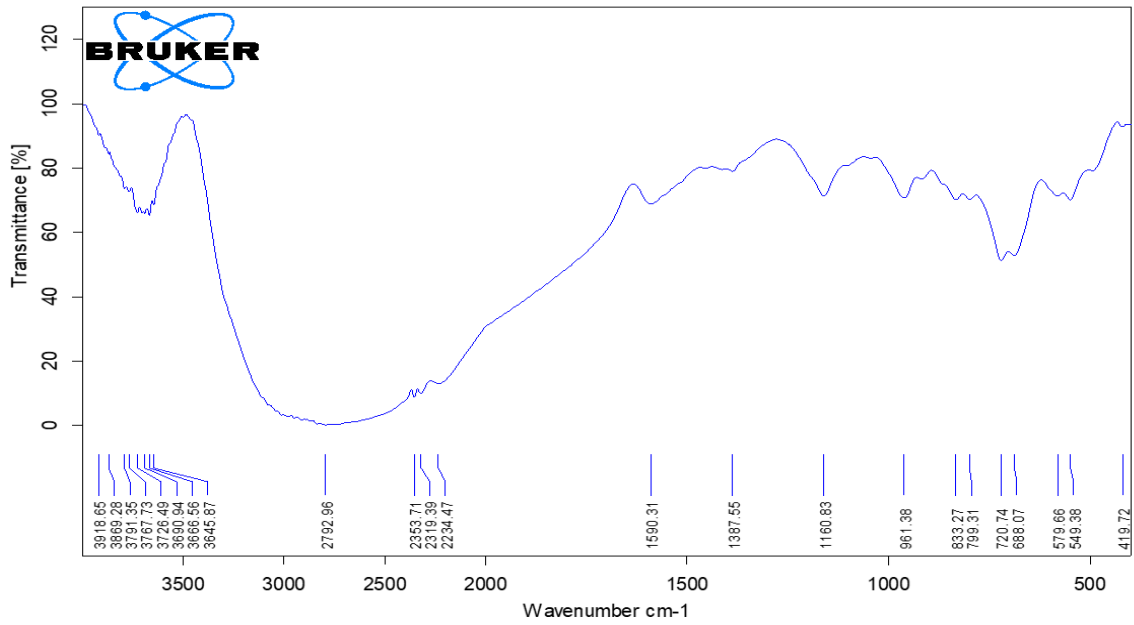
#### 4.2. Fourier Dönüştürülmü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) Analizi

FT-IR spektroskopisi analizi, borofen sentezi sonrası elde edilen örneğin kimyasal yapısını doğrulamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Literatürde borofen yapılarında B-B ve B-H bağları, FTIR spektrumunda belirli frekans aralıklarında karakteristi pikler vermektedir. Ji et al. (2018) ve Ranjan et al. (2019) bu aralıkların genellikle 500-1200  $\text{cm}^{-1}$  arasında olduğunu ve B-B bağlarının bu aralıkta yoğunlaştığını belirtmektedir. Şekil 4.8’de görüldüğü gibi, 500-1200  $\text{cm}^{-1}$  aralığında belirgin pikler gözlemlenmektedir. Saf borun spektrumunda 500-1200  $\text{cm}^{-1}$  arasındaki pikler geniş ve düzensiz piklerdir. Bu pikler, bor atomları arasındaki titreşim modlarına işaret etmektedir.



Şekil 4.8. Saf Borun FT-IR analiz grafiği

Şekil 4.9’da Sonokimyasal yöntemle sentezlenen borofenin FT-IR grafiğini incelediğimizde, çeşitli dalga boylarında pikler gözlemlenmektedir. Bu pikler farklı kimyasal bağların varlığını gösterebilir. 3400  $\text{cm}^{-1}$  civarında görülen piki genellikle O-H gerilme titreşimine işaret eder ve su moleküllerinin veya nemin varlığını gösterebilir (Sharma et al., 2015). Bu pik, borofen sentezi sırasında kullanılan çözücülerden veya atmosferden gelen nemin etkisi olabilir. 1500-1600  $\text{cm}^{-1}$  civarındaki pik, C=C veya aromatik halkaların gerilme titreşimleriyle ilişkilendirilebilir. Bu tür pikler, genellikle organik çözücülerin kalıntıları veya atmosferik kirleticilerden kaynaklanabilir (Zhang et al., 2018). 500-1200  $\text{cm}^{-1}$  aralığındaki pikler ise B-B ve B-H bağlarına işaret eder ve borofen oluşumuna aittir (Ji et al., 2018; Ranjan et al., 2019).

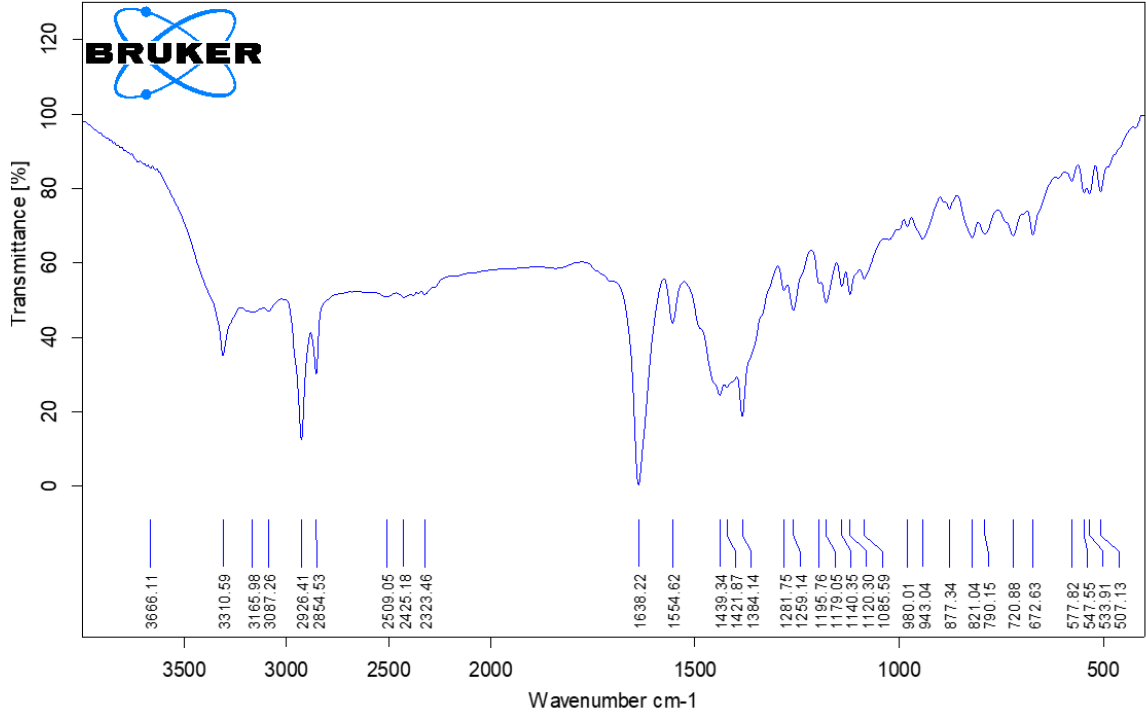


**Şekil 4.9.** Sonokimyasal metodu ve DI ile sentezlenen borofen FTIR analiz grafiği

Şekil 4.10’daki FT-IR spektrumu, solvotermal yönteminde çözücü olarak DI kullanılan borofen yapısının kimyasal karakterizasyonunu göstermektedir. Ji ve diğerleri (2018) ile Ranjan ve diğerleri (2019) çalışmalarında belirtildiği gibi, 1000-1200  $\text{cm}^{-1}$  aralığında gözlemlenen pikler, genellikle bor bileşiklerinde görülen B-B ve B-H bağlarını göstermektedir. Bu bölgede gözlemlenen pikler, borofene ait olduğunu göstermektedir.

3500  $\text{cm}^{-1}$  civarındaki geniş pik, O-H gerilme titreşimlerine işaret edebilir (Zhang et al., 2018). Bu durum, numunenin yüzeyinde nem veya hidroksil gruplarının bulunabileceğini

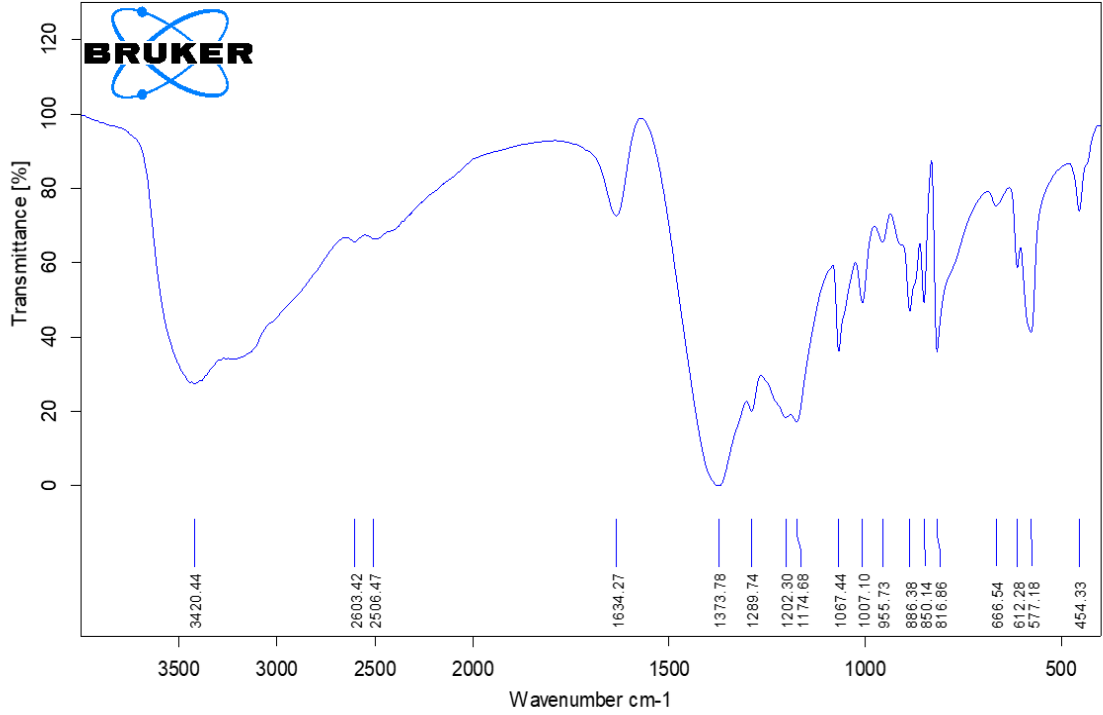
göstermektedir. Ayrıca spektrumda,  $1600\text{ cm}^{-1}$  civarında güçlü bir pik gözlemlenmektedir, bu pik genellikle C=O gerilme titreşimlerine işaret edebilir (Chen et al., 2017), bu da çözültiden kaynaklanan kalıntılar veya organik safsızlıkların olabileceğini düşündürülebilir.



**Şekil 4.10.** Solvotermal metodu ve DI ile sentezlenen borofen FTIR analiz grafiği

Şekil 4.11’de MoS<sub>2</sub>, BN ve DI ile sentezlenen borofen tabakalarının FT-IR spektrumu incelendiğinde, çeşitli dalga boylarında bazı pikler gözlemlenmektedir.  $454 - 665\text{ cm}^{-1}$  aralığındaki pikler, borofenin yapısında oluşan düşük enerjiye sahip titreşimlerin bir göstergesidir.  $665\text{ cm}^{-1}$ ’deki pik, özellikle bor ve nitrojen (BN) veya bor ile kükür (MoS<sub>2</sub>) arasındaki kimyasal bağların titreşimlerini yansıtır. Bu tür titreşimler, borofen tabakalarının yapısal bütünlüğünü ve oluşan bağların kararlılığını gösteren önemli işaretlerdir (Feng et al., 2016).  $980\text{ cm}^{-1}$  ile  $1060\text{ cm}^{-1}$  aralığında görülen pikler ise B-B ve B-H bağlarını yansıtır. Bor tabanlı malzemelerde bu bağlar sıkça gözlemlenmekte olup, borofen tabakalarının oluşumunu ve aralarındaki bağların güçlendiğini gösterir (Ji et al., 2018). B-O ve B-N bağlarına işaret eden pikler ise  $1220\text{ cm}^{-1}$  ile  $1373\text{ cm}^{-1}$  aralığındadır ve MoS<sub>2</sub> ve BN ile yapılan sentezlerde bu bağların oluşumu beklenir. Literatürde borofenin yüzey modifikasyonunda bu tür bağların oluşumu rapor edilmiştir

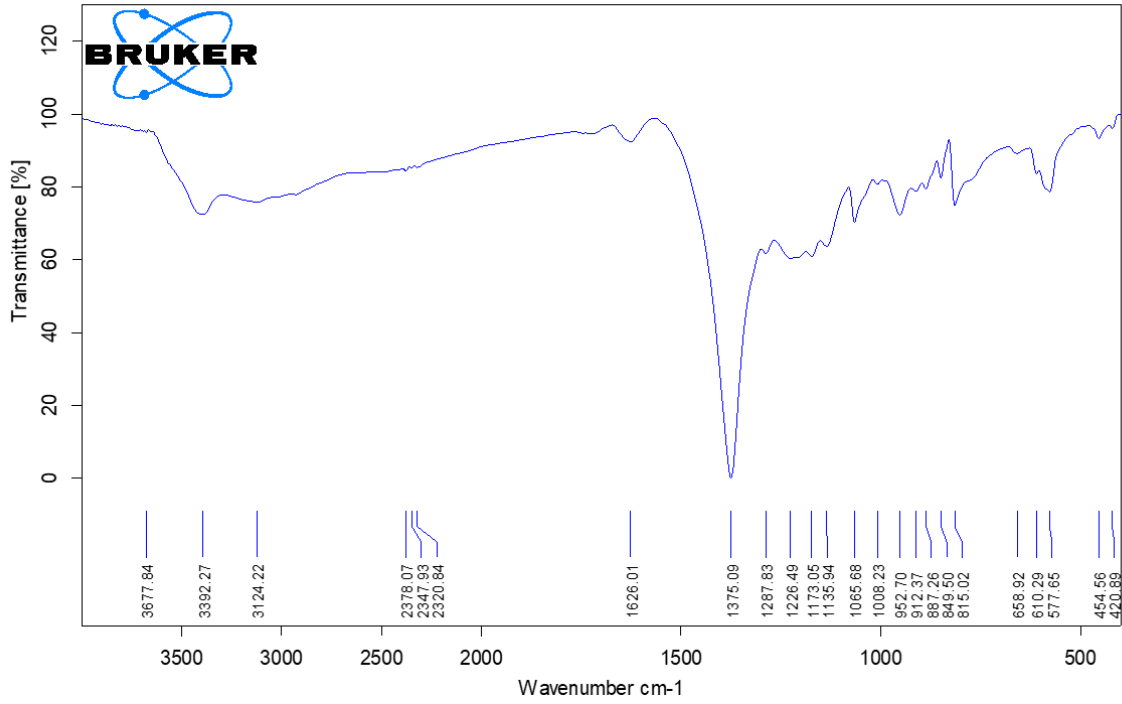
(Zhang et al., 2018).  $1634\text{ cm}^{-1}$ 'deki pik, C=O veya C=C bağları ile ilişkilendirilebilir. Borofen tabakalarının yüzeyinde bulunan fonksiyonel grupların titreşim modlarıyla ilgili olduğu düşünülmektedir (Ranjan et al., 2019).  $3240\text{ cm}^{-1}$ 'deki gözlemlenen geniş pik ise genellikle -OH grupları ile ilişkilendirilebilir ve malzemenin yüzeyinde su moleküllerinin adsorpsiyonunu gösterebilir. Su bazlı çözücülerle yapılan sentezlerde bu tür grupların oluşumu literatürde sıkça rapor edilmiştir (Ji et al., 2018).



**Şekil 4.11.** MoS<sub>2</sub>, BN ve DI ile sentezlenen borofen tabakalarının FT-IR analiz grafiği

Şekil 4.12'de MoS<sub>2</sub>, BN ve IPA ile sentezlenen borofen tabakalarının FT-IR spektrumu incelendiğinde, belirli dalga boylarında karakteristik pikler gözlemlenmektedir.  $454\text{ cm}^{-1}$  -  $665\text{ cm}^{-1}$  aralığındaki pikler, borofen kalarının ve bor-nitrojen bağlarının varlığını göstermektedir.  $665\text{ cm}^{-1}$  civarında görülen pik, bor ve nitrojen elementleri arasındaki bağların karakteristik titreşim modlarını temsil edebilir (Feng et al., 2016).  $815\text{ cm}^{-1}$  -  $980\text{ cm}^{-1}$  arasında yer alan pikler B-B ve B-H bağlarının titreşimlerini temsil etmektedir. Bu bağlar, borofen tabakalarının oluşumu sırasında sıkça karşılaşılan titreşim modlarıdır ve borofenin başarılı bir şekilde sentezlendiğini göstermektedir (Ji et al., 2018).  $1060\text{ cm}^{-1}$ - $1375\text{ cm}^{-1}$  aralığındaki gözlemlenen pikler, B-O ve B-N bağlarının varlığına işaret eder. Bu bağlar, borofen yapısının yüzey modifikasyonları sırasında oluşabilir ve literatürde sıklıkla rapor edilmiştir (Zhang et al., 2018).  $1626\text{ cm}^{-1}$  'deki pik, borofen tabakaları

üzerindeki C=O veya C=C bağlarının varlığıyla ilişkilendirilebilir. Bu tür bağlar, borofen yüzeyinde yer alan fonksiyonel gruplarla ilişkilendirilebilir (Ranjan et al., 2019). 3124  $\text{cm}^{-1}$ - 3377  $\text{cm}^{-1}$ 'deki geniş pikler ise -OH gruplarının varlığına işaret etmektedir ve yüzeyde su moleküllerinin adsorpsiyonunu gösterebilir. IPA çözücüsü kullanıldığında bu tür grupların oluşumu sıkça gözlemlenmiştir (Ji et al., 2018).

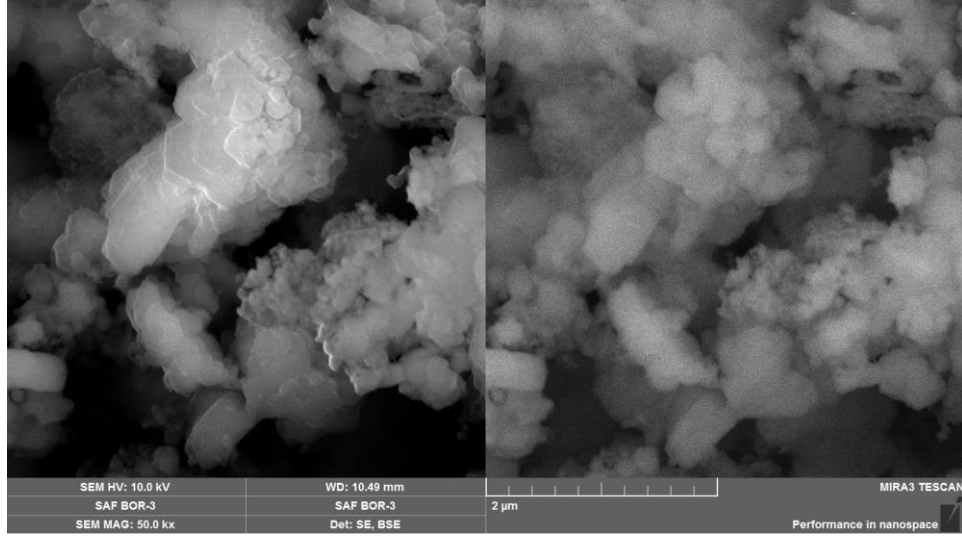


**Şekil 4.12.** MoS<sub>2</sub>, BN ve IPA ile sentezlenen borofen tabakalarının FT-IR analiz grafiği

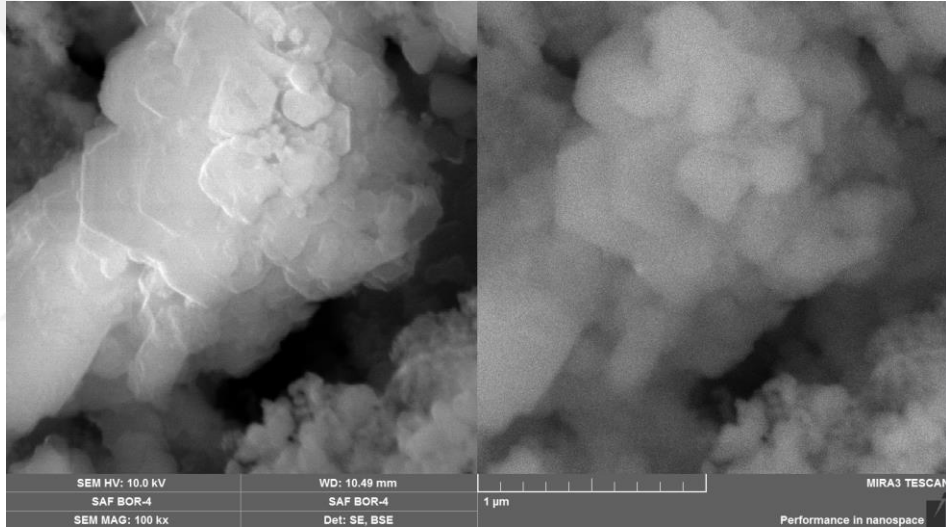
### 4.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

SEM analizleri, sentezlenen borofen yapılarının yüzey morfolojisini ve boyut dağılımını incelemek için gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, farklı sentez yöntemleri kullanılarak elde edilen numunelerin yapısal özelliklerini karşılaştırmak ve borofen oluşumunun doğrulanmasına yönelik sonuçlar sağlamaktadır.

Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'de ki SEM görüntülerine göre saf bor, oldukça sıkı yapıya sahip küresel kümeleşmeler göstermektedir. Bu yapı borun tipik yapısını ve yoğunluğunu yansıtmaktadır.

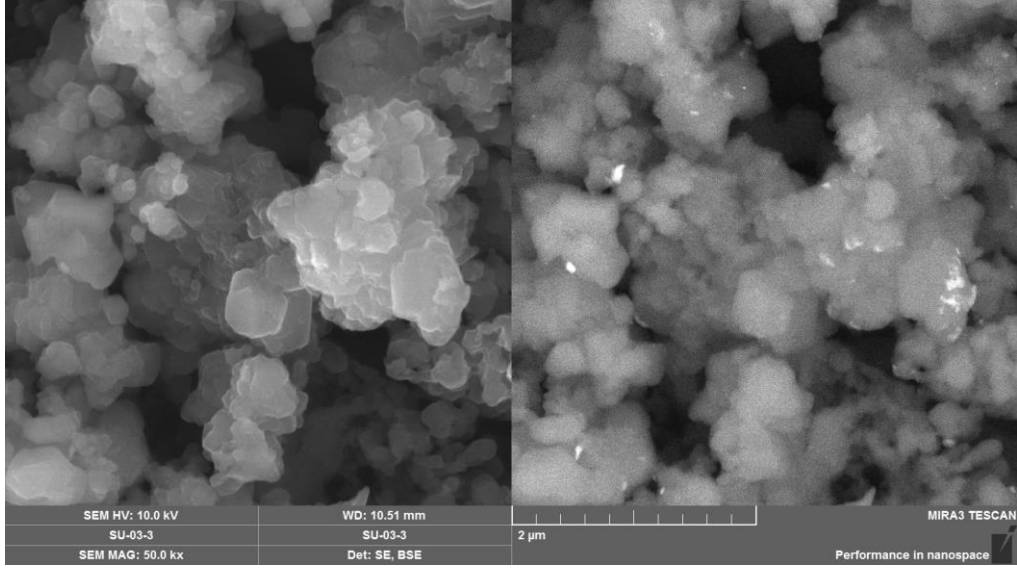


**Şekil 4.13.** Saf Bor 50.0 kx SEM analizi

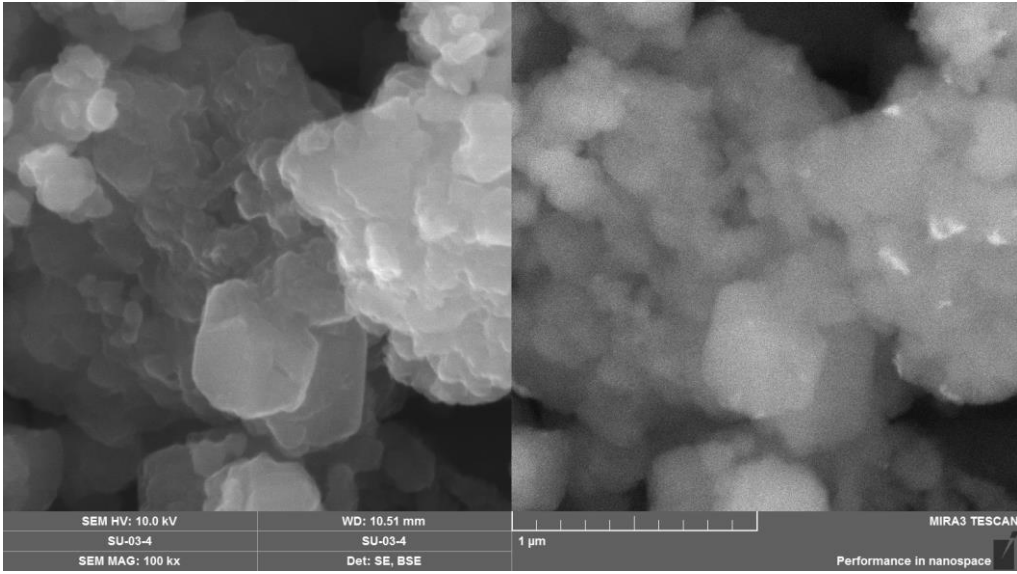


**Şekil 4.14.** Saf Bor 100.0 kx SEM analizi

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da Sonokimyasal yöntemle ve çözücüsü DI ile elde edilen sentezin SEM analiz görüntüleri görülmektedir. Morfolojisi daha çok büyük ve birleşik kümeleşmeler şeklinde ortaya çıkmaktadır. Bu tür yapıların oluşması, sonokimyasal işlemle borofen tabakasının birkaç katmanlı olduğunu göstermektedir.



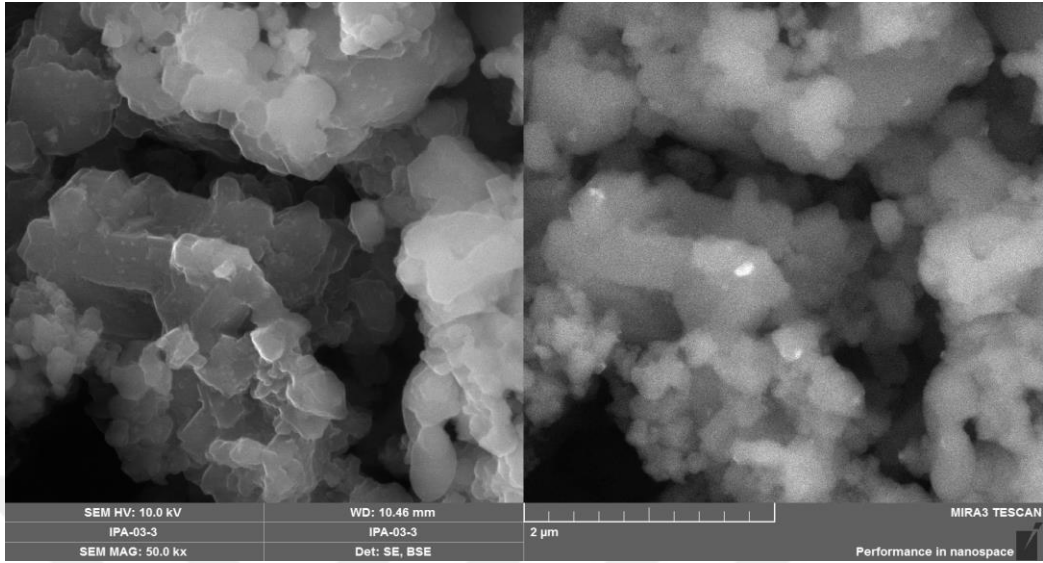
Şekil 4.15. Sonokimyasal, DI ile sentezlenen Borofen tabakalarının 50 kx SEM analizi



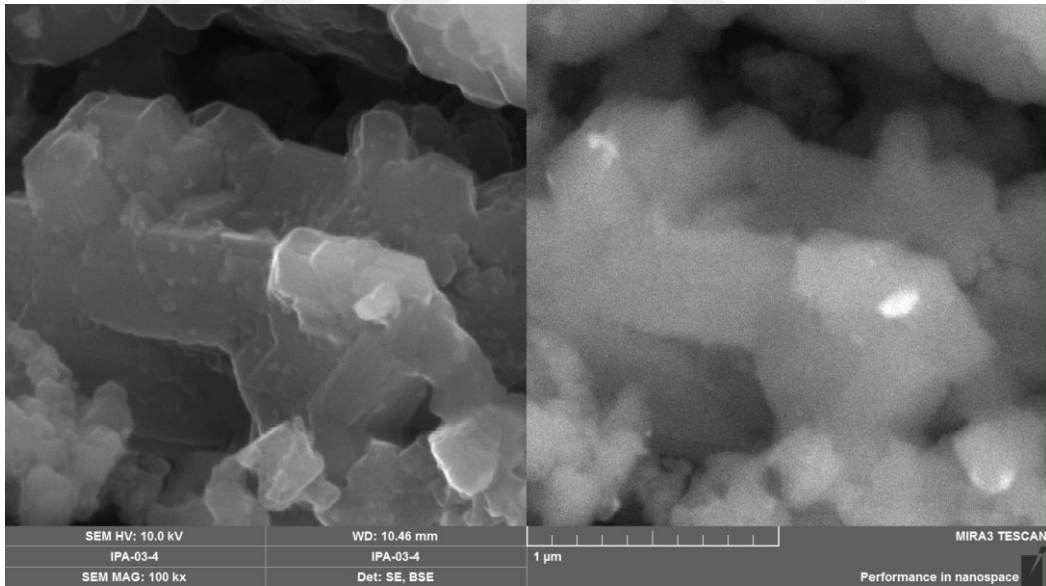
Şekil 4.16. Sonokimyasal, DI ile sentezlenen Borofen tabakalarının 100 kx SEM analizi

Solvotermal yöntem ve çözücüsü IPA olan sentez sonrası Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de ise daha ince tabakalı bir yapıların ortaya çıktığı görülmektedir. 50.0 kx ve 100.0 kx büyütmede elde edilen görüntüler, tabakaların araları birazdaha açılmış düz levhalar görülmektedir. Bu tür bir morfoloji, literatürde de belirtildiği gibi borofen yapılarının

karakteristik özelliklerinden biridir. Saf borun kristal yapısı daha düzensiz ve topaklanma eğilimindeyken, borofenin ince yaprak benzeri yapılar sergilediği gözlemlenmiştir.



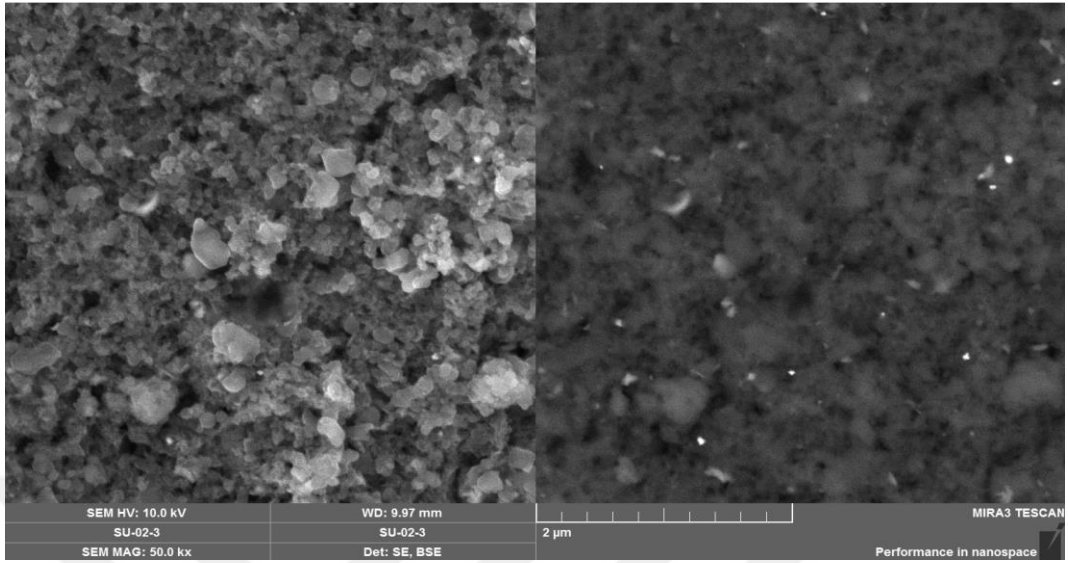
Şekil 4.17. Solvotermal, IPA ile Borofen tabakalarının 50.0 kx SEM analizi



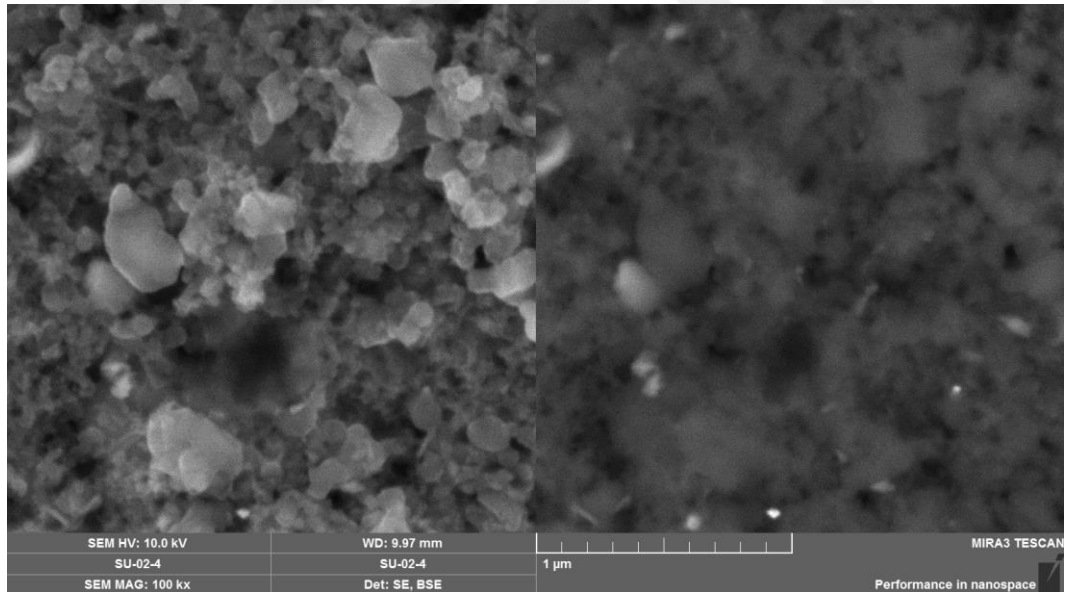
Şekil 4.18. Solvotermal, IPA ile Borofen tabakalarının 100.0 kx SEM analizi

Şekil 4.19’da ve Şekil 4.20’de Solvotermal yöntem ve çözücüsü DI ile sentez sonrası SEM görüntülerini göstermektedir. Her iki görüntüde’de düz olmayan levhalar

görülmektedir. Burada borofen tabakalarının aralarının çok açılmadığı ve katman sayısının çok katmanlı olduğu görülmektedir.



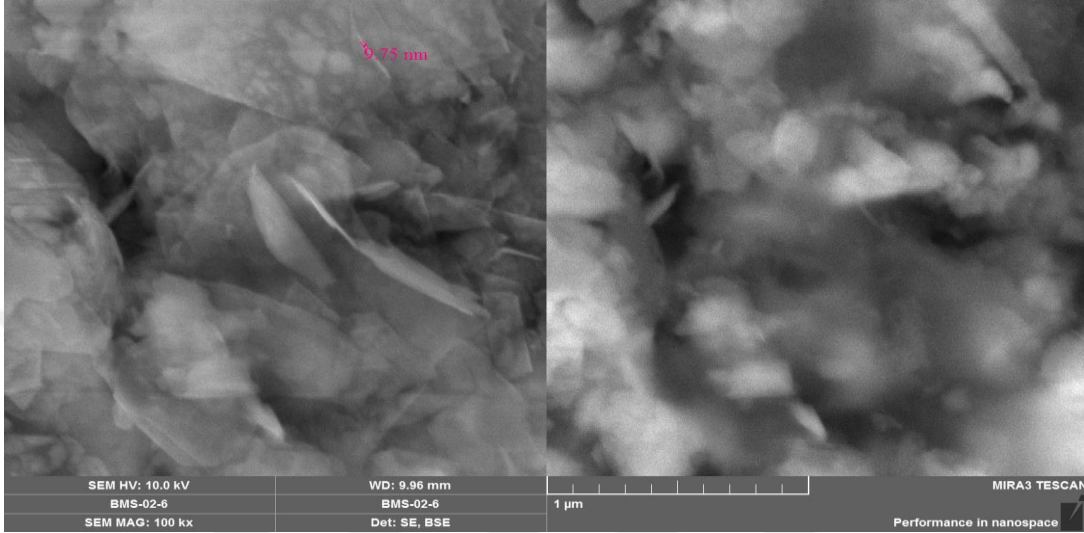
**Şekil 4.19.** Solvotermal, DI ile Borofen tabakalarının 50.0 kx SEM analizi



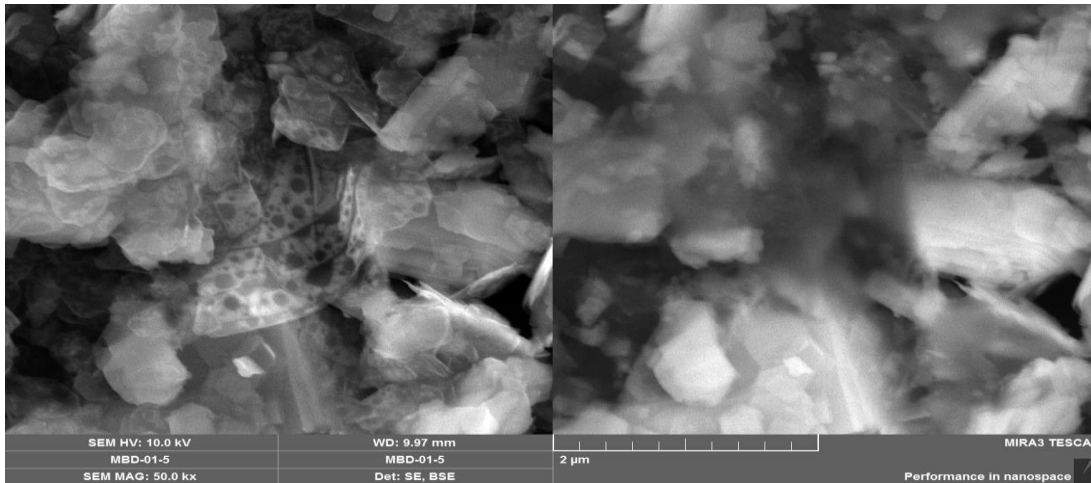
**Şekil 4.20.** Solvotermal, DI ile Borofen tabakalarının 100.0 kx SEM analizi

MoS<sub>2</sub> ve BN yöntem ile çözücüsü DI olan sentez sonrası ise Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de SEM görüntüleri gösterilmektedir. Bu SEM görüntülerinde, yapının yüzeyinde görülen siyah nokta benzeri oluşumlar dikkat çekmektedir. Bu noktalar genellikle literatürde,

özellikle katmanlı yapılar ve iki boyutlu malzemeler üzerine yapılan çalışmalarda, yapısal bozukluklar, yabancı maddeler veya çökelti kalıntıları olarak değerlendirilmektedir (Novoselov et al., 2005). Ve bu tür siyah noktalar, incelemekte olduğumuz malzemelerde genellikle çözücü veya sentezleme aşamalarındaki kalıntılar olabilir. Fakat borofen yüzeylerin düzlemsel ve ince tabakalar halinde pul pul oldukları görülmektedir.



**Şekil 4.21.** MoS<sub>2</sub>, BN, DI ile sentezlenen Borofen tabakalarının 100 kx SEM analizi

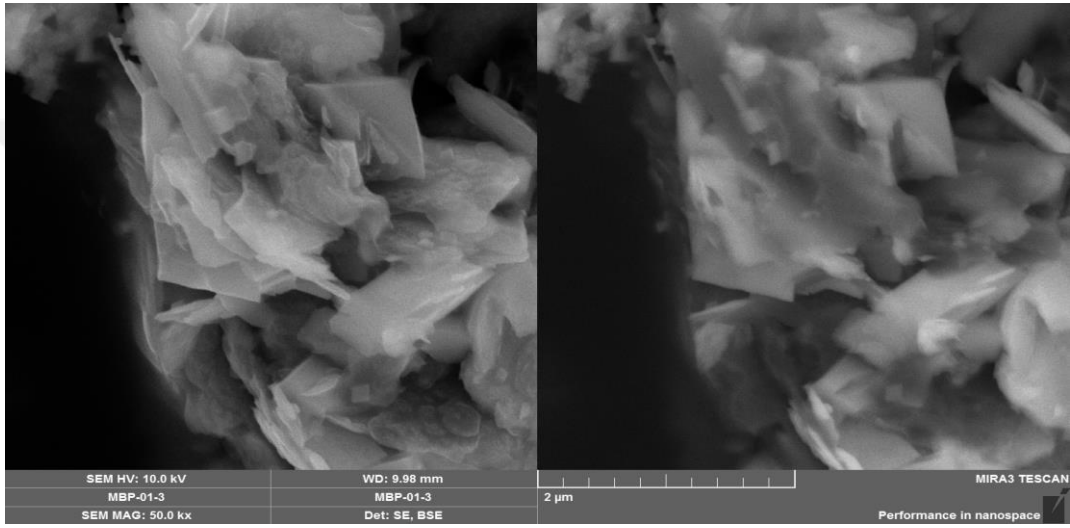


**Şekil 4.22.** MoS<sub>2</sub>, BN, DI ile Borofen tabakalarının 50.0 kx SEM analizi

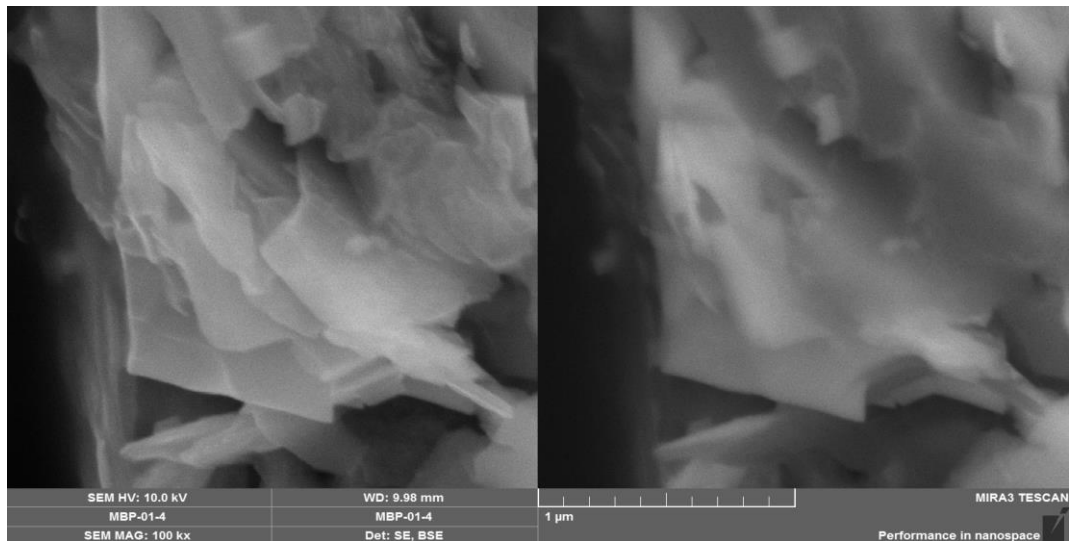
MoS<sub>2</sub> ve BN yöntem ile çözücüsü IPA olan sentez sonrası ise Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'de SEM görüntüleri gösterilmektedir. 50 kx ve 100 kx büyütme elde edilen

görüntülerde, yapının katmanlı ve yaprak benzeri yapıları net bir şekilde gözlemlenmektedir. Bu katmanlı yapılar, iki boyutlu malzemelere özgü yüksek yüzey alanı ve ince tabakalar olarak literatürde sıklıkla vurgulanmaktadır.

Özellikle Şekil 4.24’de, bu tabakaların düzenli bir şekilde bir araya geldiği ve iyi kristallenmiş oldukları görülmektedir. Literatürde, benzer iki boyutlu borofen yapılarının da katmanlı ve yaprak benzeri morfolojiler sergilediği rapor edilmiştir (Li ve diğerleri, 2019). Bu veriler, kullanılan MoS<sub>2</sub> ve BN yöntemiyle başarılı bir borofen sentezinin gerçekleştiğini desteklemektedir.



Şekil 4.23. MoS<sub>2</sub>, BN, IPA ile Borofen tabakalarının 50.0 kx SEM analizi



Şekil 4.24. MoS<sub>2</sub>, BN, IPA ile Borofen tabakalarının 100.0 kx SEM analizi

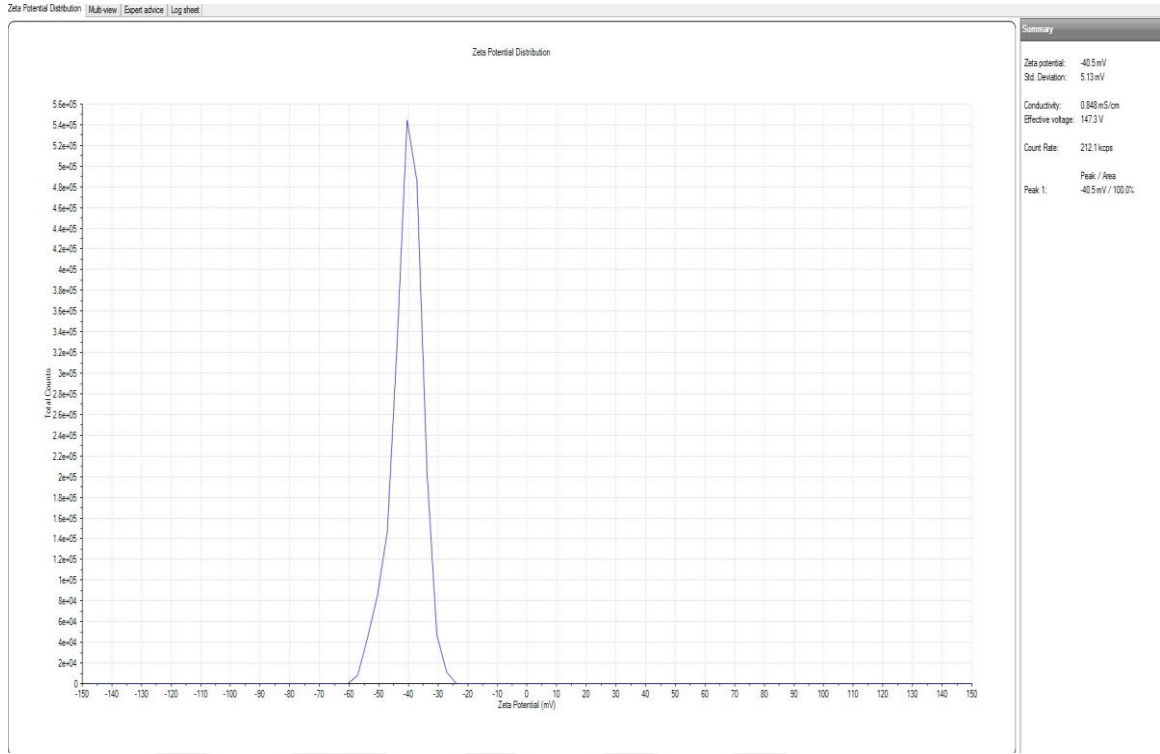
#### 4.4. Zeta Analizi

Zeta potansiyel analizi, yüzey yükünü ölçmek ve kolloid stabilitesi ile ilgili olarak malzemelerin fiziksel stabilitesini değerlendirmek için yapılmıştır. Sonokimyasal yöntemle sentezlenen DI çözeltisindeki ve IPA çözeltisindeki borofen nanopartiküllerinin zeta potansiyel analizi, Şekil 4.25’de ve Şekil 4.26’de gösterilmektedir. Saf su çözeltisinde, zeta potansiyel değeri -40.5 mV olup, IPA çözeltisindeki zeta potansiyel değeri ise -38.7 mV olup, her iki analizinde iyi stabilite değer aralıklarında olduğunu göstermektedir.

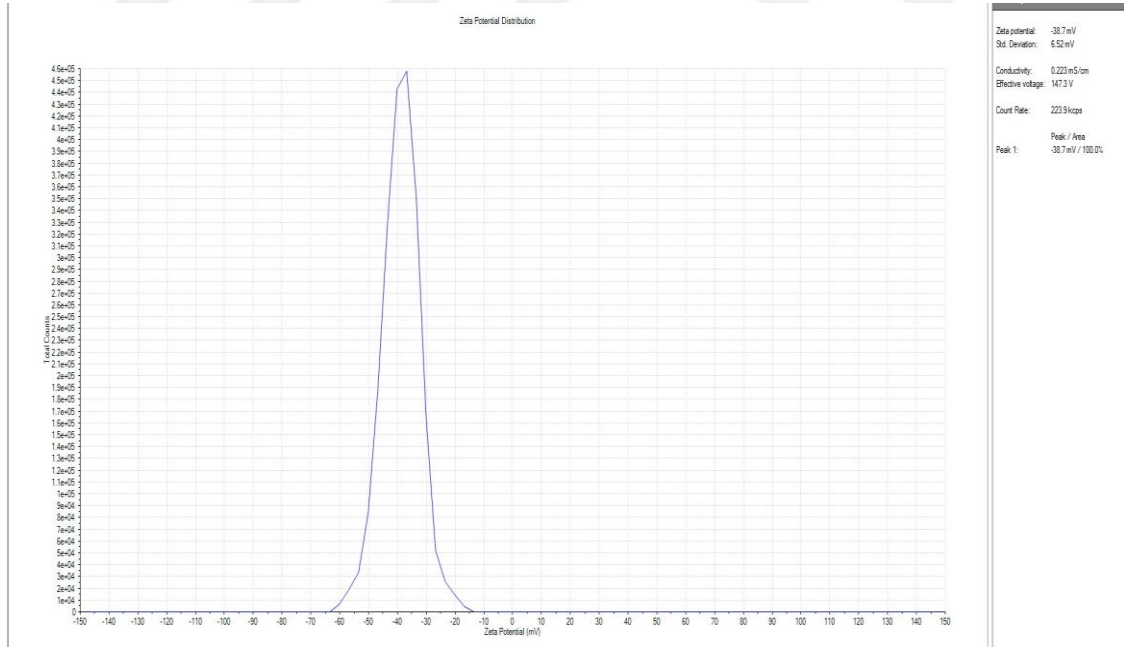
Çizelge 4.1’de görüldüğü üzere, zeta potansiyelinin büyüklüğü, kolloidal sistemlerin stabilitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu çizelge, malzemelerin yüzey yüklerinin çözeltide nasıl davrandığını anlamaya yardımcı olmaktadır ve zeta potansiyel ölçümlerinin, kolloidlerin ve süspansiyonların kararlılığını değerlendirmede kritik bir parametre olduğunu göstermektedir (Jiang et al., 2015).

**Çizelge 4.1.** Zeta Potansiyel Büyüklüğü ve Davranışı Tablosu

<b>Zeta Potansiyel Büyüklüğü (mV)</b>	<b>Stabilite Davranışı</b>
$\pm 0$ to $\pm 5$	Hızlı Koagülasyon veya flokülasyon
$\pm 10$ to $\pm 30$	Başlangıç kararsızlığı
$\pm 30$ to $\pm 40$	Orta derecede stabilite
$\pm 40$ to $\pm 60$	İyi stabilite
$> \pm 60$	Mükemmel stabilite



Şekil 4.25. Sonokimyasal yöntemi ile DI çözeltisindeki Zeta Potansiyel Grafiği

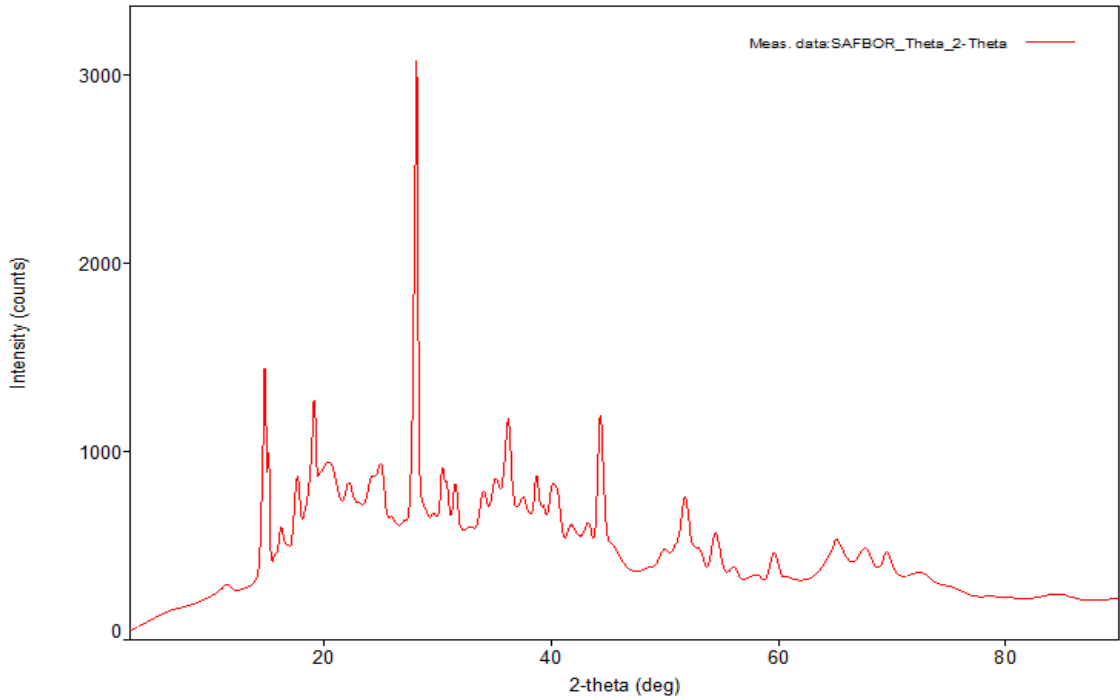


Şekil 4.26. Sonokimyasal yöntemi ile IPA çözeltisindeki Zeta Potansiyel Grafiği

#### 4.5. X-Işını Difraktometresi (XRD) Analizi

XRD analizleri sentezlenen borofen numunelerinin kristal yapısını ve faz dağılımını belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, farklı çözücüler ve yöntemlerle elde edilen numunelerin kristal fazlarını ve borofen oluşumunu değerlendirmek için veriler sunmaktadır.

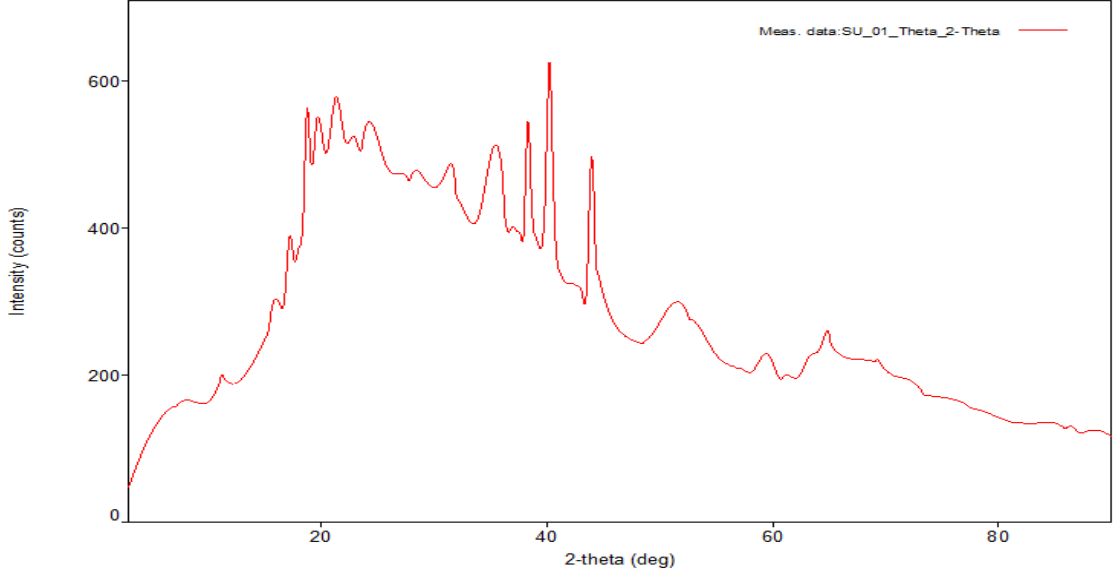
Şekil 4.26'da Saf borun XRD sonuçlarına bakılarak, bor yapısının kristal yapısını ve faz dağılımı değerlendirildiğinde,  $30^\circ$  ve  $45^\circ$  civarındaki keskin pikler, saf borun beta bor fazı ( $\beta$ -B<sub>105</sub>) içerdiğini göstermektedir. XRD analizinde gözlemlenen bu keskin pikler, literatürde belirtildiği şekilde karakteristik kristal yapısını doğrulamaktadır. Zhang ve diğerleri (2018) beta bor fazının XRD analizlerinde belirgin keskin pikler verdiğini ve bu fazın tipik olarak iyi düzenlenmiş, yüksek kristallığe sahip olduğunu belirtmiştir.



Şekil 4.27. Saf Bor XRD Analiz Grafiği

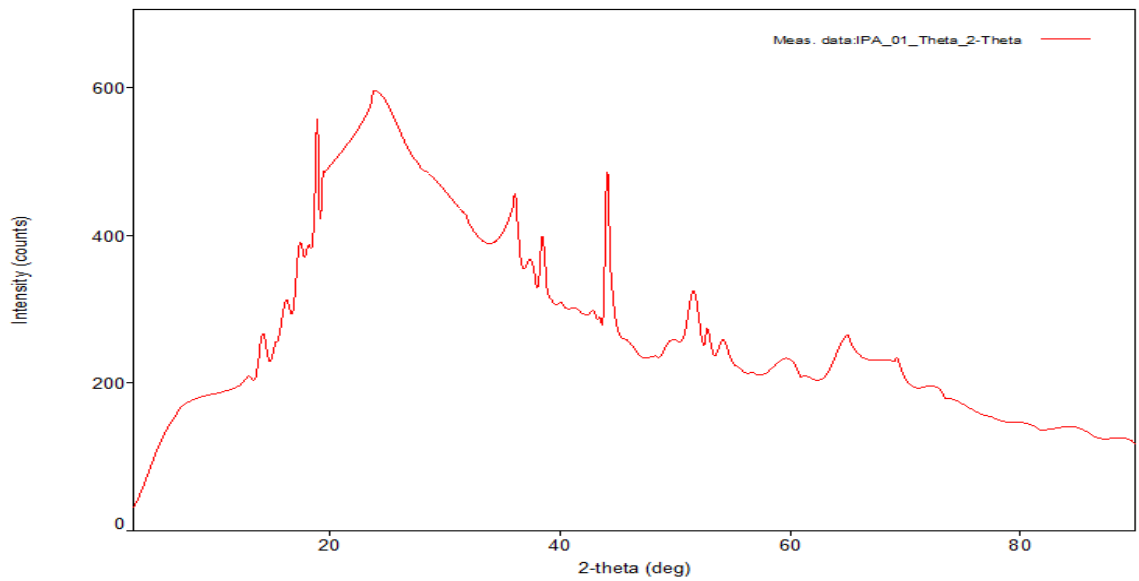
Şekil 4.28'de Sonokimyasal yöntem ve çözücüsü DI ile sentezlenen yapının XRD grafiği verilmiştir. Literatürde borofen sentezinde gözlenen keskin ve yüksek pikin, düzgün bir kristal yapıya işaret ettiği belirtilmektedir (Zhang ve diğerleri, 2018). Diğer literatür çalışmalarına göre borofen için karakteristik XRD pikleri genellikle 2-theta değerlerinde

10° ile 50° arasında yoğunlaşmaktadır ve özellikle borofen için beklenen pikler, 2-theta aralığında 15°, 27° ve 42° civarında ki belirgin pikler olmalıdır (Mannix ve diğerleri, 2015). Bu grafikte 20° ila 40° arasında yoğun borofen pikleri görülmektedir.



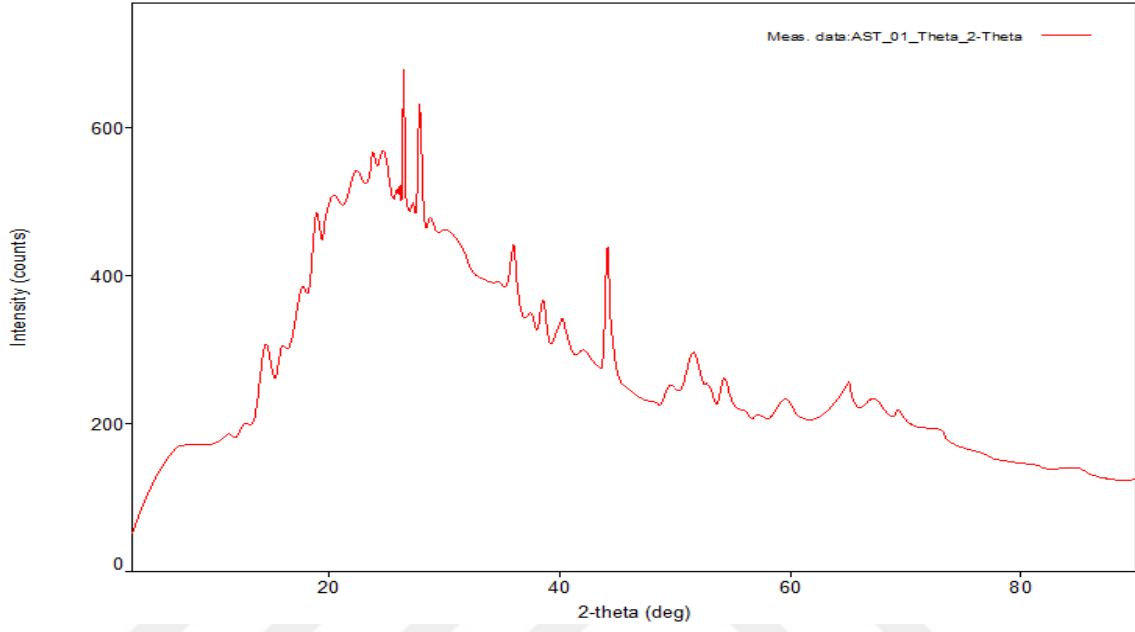
**Şekil 4.28.** Sonokimyasal yöntem ve DI ile sentezlenen Borofen XRD Analiz Grafiği

Şekil 4.29’da Solvotermal yöntem ve çözücüsü IPA ile sentezlenen yapının XRD grafiği verilmiştir. Bu grafikte de 20° ila 40° arasında dikkat çeken birkaç borofen piki gözlemlenmektedir.



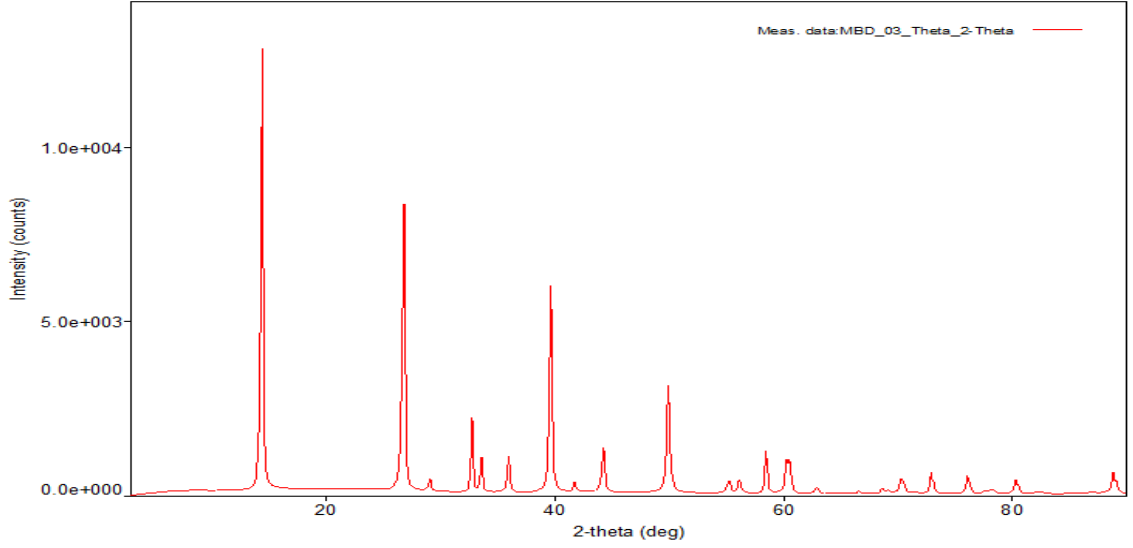
**Şekil 4.29.** Solvotermal yöntem ve IPA ile sentezlenen Borofen XRD Analiz Grafiği

Şekil 4.30'da Solvotermal yöntem ve çözücüsü aseton ile sentezlenen yapının XRD grafiği verilmiştir. 20 ° ile 50 ° arasında ki pikler diğer bölgelere göre daha keskin görünmektedir. Borofen için karakteristik olarak beklenen 27 ° ve 42 ° civarı pikler belirginleşmiş olup, bu piklerin varlığı borofen tabakalarına aittir. Bu sonuçlar, borofenin tabakalı yapısının oluştuğunu göstermektedir.



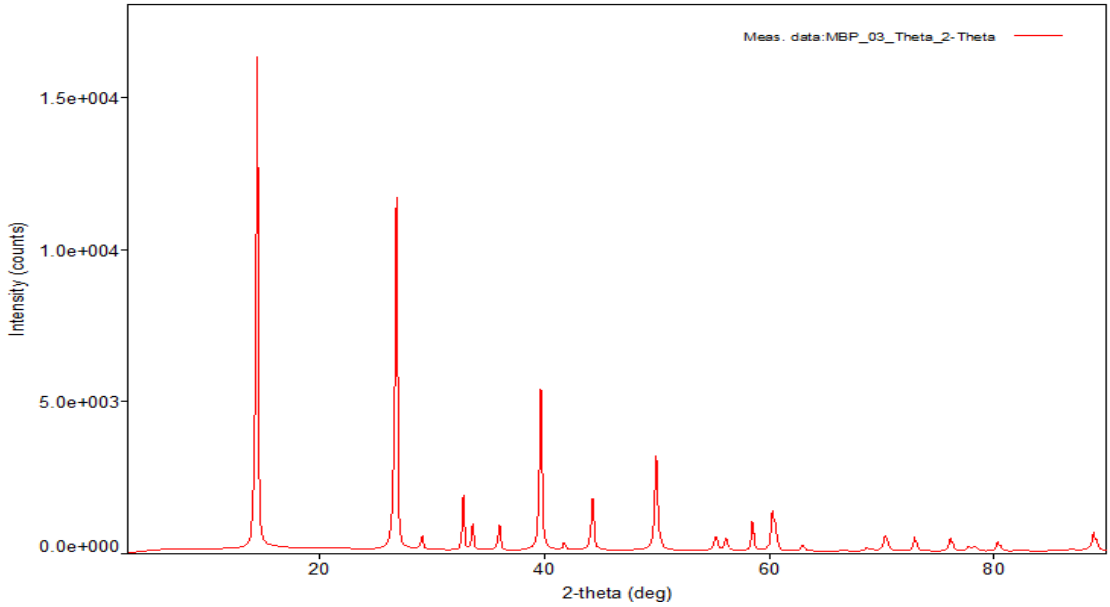
**Şekil 4.30.** Solvotermal yöntem ve aseton ile sentezlenen Borofen XRD Analiz Grafiği

Şekil 4.31'de MoS<sub>2</sub> ve BN yöntemi ile çözücüsü DI ile sentezlenen yapının XRD grafiği verilmiştir. Bu grafikte görülen keskin pikler görülmektedir. Fakat, MoS<sub>2</sub> ve BN gibi malzemeler, keskin XRD pikleri vermeleri ile bilinmektedir. MoS<sub>2</sub>'nin kristal yapısına bakıldığında, genellikle 2θ'da 14°, 33°, 39° 44° ve 58° civarında keskin pikler görülmektedir (Lee ve diğerleri, 2010). Benzer şekilde BN fazı da 26°, 41° ve 55° civarında yoğun pikler oluşturmaktadır (Novoselov ve diğerleri, 2005). Grafikteki bu keskinlikler borofen pikleri ile çakıştığı için daha yüksek pikler vermektedir.



**Şekil 4.31.** MoS<sub>2</sub>, BN yöntemi ve DI ile sentezlenen borofen XRD grafiği

Şekil 4.32’de MoS<sub>2</sub> ve BN yöntemi ile çözücüsü DI ile sentezlenen yapının XRD grafiği verilmiştir. Bu grafikte de keskin pikler, MoS<sub>2</sub> ve BN fazları ile borofen piklerinin çakışması ile daha yüksek pikler görülmektedir.

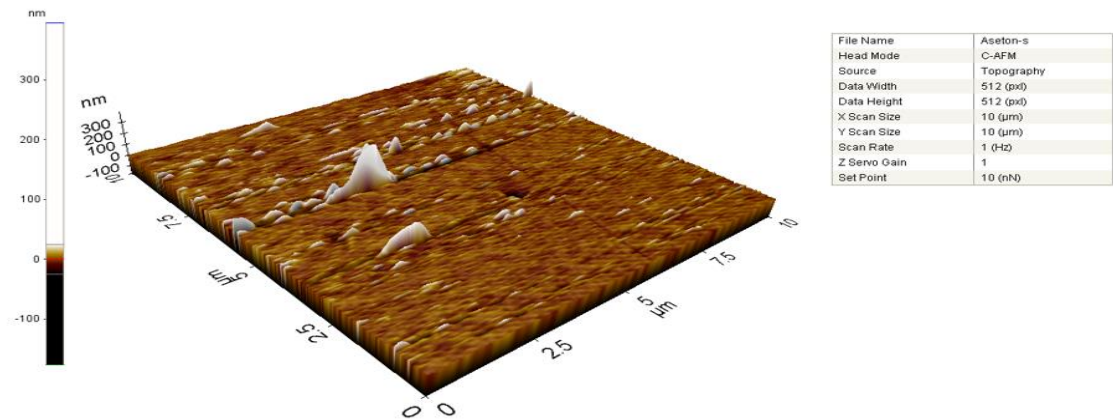


**Şekil 4.32.** MoS<sub>2</sub>, BN yöntemi ve IPA ile sentezlenen borofen XRD grafiği

#### 4.6. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) Analizi

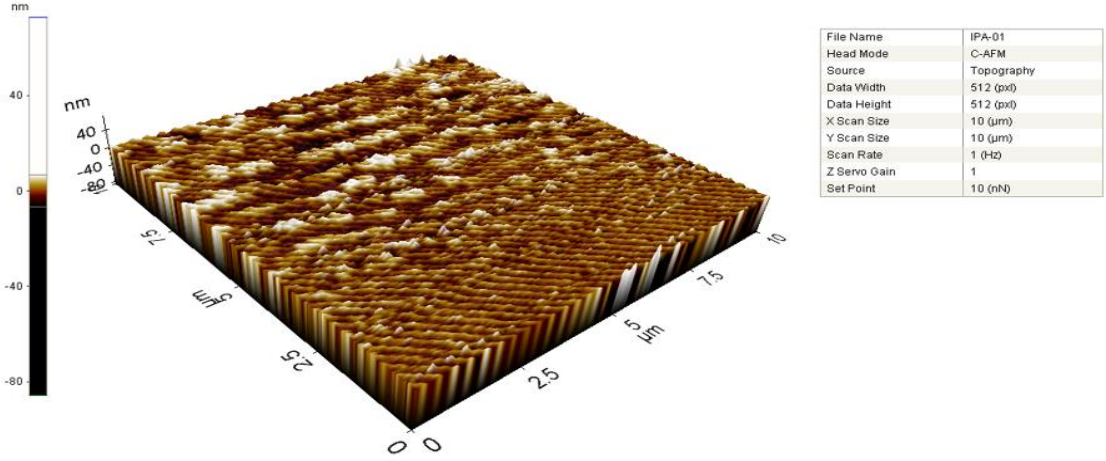
AFM analiz grafiklerinin ve değerlendirmelerinin yer aldığı bu bölümde, farklı yöntemlerle sentezlenen borofen numunelerinin yüzey morfolojisi ve topografik özellikleri incelenmiş ve elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

Şekil 4.33’de Sonokimyasal yöntem ve çözücüsü aseton ile sentezlenen yapının AFM görüntüsü verilmiştir. Bu görüntü, yüzeyde belirgin yükseklik farklarının olduğunu göstermektedir. En yüksek noktalar yaklaşık 300 nm’ye kadar ulaşırken, düşük bölgeler -100 nm seviyelerine kadar inmektedir. Bu durum, malzemenin farklı bölgelerinde yerel olarak yığılmaların meydana geldiğini ve tabakaların kalınlığında farklılıklar olduğunu göstermektedir. Ancak, Borofen tabakalarının belirli alanlarda düzenli bir şekilde oluştuğunu göstermektedir. Düzgün tabakalara sahip bölgeler, bu malzemenin optik şeffaflık ve ışık iletiminde yüksek performans sergileyebileceğini göstermektedir. Elektronik özellikler açısından, borofen tabakalarının iki boyutlu yapısı, yüksek yüzey alanı ve atomik düzlemdeki düzenli yapısı sayesinde, elektronik cihazlarda hızlı elektrik iletimi ve düşük enerji kayıpları sağlayabilir (Feng et al., 2016). Borofen tabakalarının yerel bölgelerde homojen ve düzenli bir şekilde oluştuğunu ve bu yapısal çeşitliliğin, borofenin ileri teknoloji uygulamalarında kullanımını destekleyebilecek potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Borofen gibi iki boyutlu malzemelerde düzgün bir yüzey yapısının önemli olduğu ve malzemenin optik, elektronik ve mekanik özelliklerini etkileyebileceği literatürde belirtilmektedir (Zhang et al., 2018; Mannix et al., 2015).



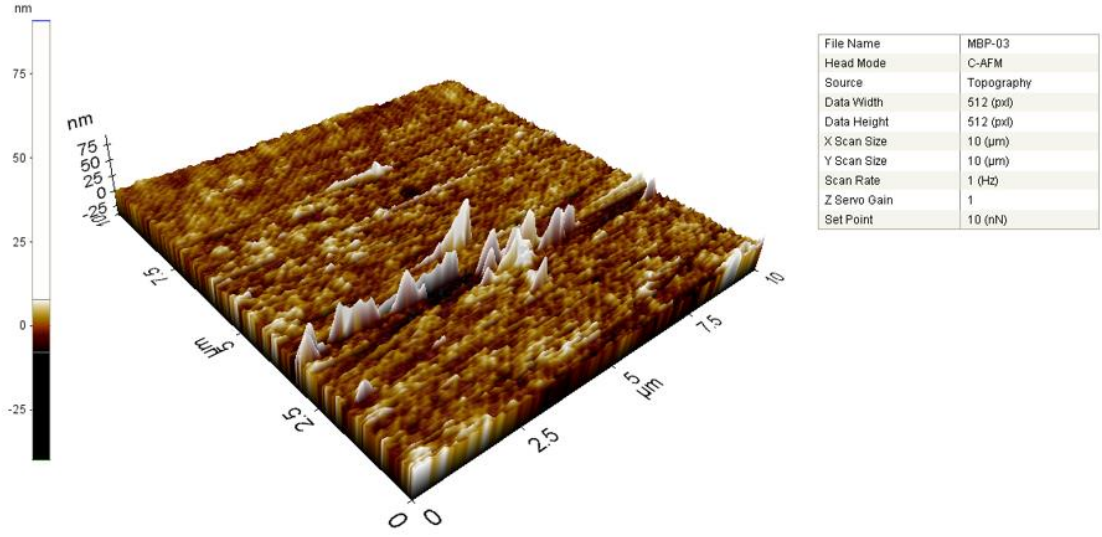
Şekil 4.33. Sonokimyasal yöntem ve aseton ile sentezlenen borofen AFM görüntüsü

Tek katmanlı borofen yapılarında yükseklik farkı genellikle birkaç angstrom ( $\text{\AA}$ ) düzeyinde olup, yaklaşık olarak 0.33 nm civarında olmalıdır (Mannix et al., 2015). Şekil 4.34’de Solvotermal yöntem ve çözücüsü IPA ile sentezlenen yapının AFM görüntüsü verilmiştir. Burada gözlemlenen yükseklik farkları, yerel olarak yığılmaların meydana geldiğini, borofen tabakalarının çok katmanlı olduğunu ve yerel düzeyde tekrarlanan düzenli yapılara sahip olduğunu gösterebilmektedir.



Şekil 4.34. Solvotermal yöntem ve IPA ile sentezlenen borofen AFM görüntüsü

MoS<sub>2</sub> ve BN yöntemiyle elde edilen borofen tabakalarının çözücü IPA ile sentezlenmiş AFM görüntüsü Şekil 4.35’de verilmiştir. En yüksek bölgeler yaklaşık 75 nm’ye kadar çıkarken, düşük bölgeler -25 nm seviyelerine kadar inmektedir. Bununla birlikte, genel yüzey yapısında daha düzenli ve düzgün tabakaların varlığı dikkat çekmektedir. Bu durum, borofen yapılarının belirli alanlarda katmanlaşma ve yığılma eğiliminde olsa da bazı bölgelerde daha düzenli bir şekilde oluştuğunu göstermektedir. AFM görüntüsündeki belirgin yükseklik farklılıkları, sentezlenen borofen tabakalarının birkaç katmanlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.35 MoS<sub>2</sub>, BN yöntem ve IPA ile sentezlenen borofen AFM görüntüsü

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında, borofen tabakalarının farklı yöntemler ve çözücüler kullanılarak sentezlenmesi ve karakterize edilmesi üzerine odaklanılmıştır. Sentezlenen borofen tabakalarının çok katmanlı veya az katmanlı yapıları analiz edilmiş ve bu yapıların oluşumunu doğrulayan çeşitli karakterizasyon teknikleri kullanılmıştır. Bu karakterizasyonlar UV-Vis, FT-IR, SEM, XRD, Zeta potansiyel ve AFM analizlerini kapsamaktadır. Her bir analiz yöntemi, borofen tabakalarının kimyasal, morfolojik ve yüzey özelliklerini ayrıntılı bir şekilde değerlendirilip karşılaştırılma yapılmıştır.

Farklı çözücüler kullanılarak yapılan sentezlerde, borofen tabakalarının oluşumu üzerinde belirgin etkiler gözlemlenmiştir. Solvotermal yöntemle IPA kullanıldığında, Şekil 4.4'te 221 nm ve 250 nm civarında keskin pikler görülmüş, bu da borofen tabakalarının düzgün bir şekilde oluştuğunu işaret etmektedir. Zhao ve diğerleri (2017) tarafından yapılan çalışmalarda belirtildiği gibi, borofen tabakalarının UV-Vis spektrumunda bu tür keskin piklerin gözlenmesi, tabakaların iyi yapılandığını göstermektedir. IPA'nın bu yöntemle kullanımı, homojen ve iyi yapılandırılmış tabaka oluşumunu desteklemiştir. Buna karşılık, DI ile yapılan solvotermal sentezde Şekil 4.5'te geniş bir absorpsiyon bandı gözlenmiş, bu da tabakaların çok katmanlı olduğunu göstermektedir.

Sonokimyasal yöntemle yapılan sentezlerde ise saf su (Şekil 4.2) ve aseton (Şekil 4.3) çözücülerini kullanılmıştır. Bu çözücülerle elde edilen UV-Vis spektrumlarında 240-250 nm civarında zayıf pikler gözlemlenmiş, bu da borofen tabakalarının çok katmanlı olduğunu göstermektedir.

MoS<sub>2</sub> ve BN yöntemi kullanıldığında, IPA çözücüsü Şekil 4.6'da DI suya kıyasla daha düzenli ve keskin pikler üretmiştir. IPA ile yapılan sentezlerde borofen tabakalarının daha düzgün ve homojen bir şekilde oluştuğu, özellikle 240 nm civarındaki piklerin belirgin olduğu gözlemlenmiştir. Buna karşın, DI kullanılan MoS<sub>2</sub> ve BN yöntemiyle elde edilen tabakalar Şekil 4.6'da geniş spektrumda daha geniş absorpsiyon eğrileri göstermiştir.

Genel olarak, IPA çözücüsü, hem solvotermal hem de MoS<sub>2</sub> ve BN yöntemlerinde borofen tabakalarının düzgün bir şekilde oluşmasını desteklemiş ve daha düzenli tabaka oluşumuna olanak sağlamıştır. Zhao ve diğerleri (2017) ve Ji ve diğerleri (2018) tarafından yapılan literatür çalışmaları, IPA'nın borofenin düzgün tabaka oluşumunu

desteklediğini ve daha başarılı sonuçlar elde edildiğini vurgulamaktadır. Sonuç olarak, kullanılan yöntemler arasında solvotermal yöntem ve IPA çözücüsü ile sentez yapıldığında en başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu da borofen tabakalarının düzenliliğini ve homojenliğini sağlamış, borofen sentezinde en iyi UV-Vis analizindeki sonucun bu yöntem ve çözücünün olduğunu göstermektedir.

FT-IR analiz sonuçları incelendiğinde, farklı yöntem ve çözücülerle elde edilen borofen tabakalarının kimyasal yapılarında belirgin farklar olduğu görülmektedir. Sonokimyasal yöntemle saf su kullanılarak elde edilen borofen örneklerinde (Şekil 4.9), geniş bir  $3400\text{ cm}^{-1}$  pik gözlemlenmiştir. Bu pik, genellikle su moleküllerinin veya yüzeydeki nemin varlığını işaret etmektedir (Sharma et al., 2015). Diğer kimyasal bağlarla ilgili  $500\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$  aralığındaki pikler, B-B ve B-H bağlarını göstermekle birlikte, tabakaların çok katmanlı olduğunu göstermektedir (Ji et al., 2018; Ranjan et al., 2019).

Solvotermal yöntem ve DI kullanılarak sentezlenen borofen tabakalarında (Şekil 4.10)  $1000\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$  aralığında belirgin B-B ve B-H bağlarına işaret eden pikler gözlemlenmiştir. Bu bölgede görülen pikler borofen tabakalarına aittir.  $3500\text{ cm}^{-1}$  civarında gözlemlenen geniş pik nem veya hidroksil gruplarının varlığını işaret etmektedir (Zhang et al., 2018). Ayrıca,  $1600\text{ cm}^{-1}$  civarındaki C=O titreşimleri, organik kalıntıların olabileceğine dair bir işaret olabilir (Chen et al., 2017).

MoS<sub>2</sub> ve BN yöntemlerinde DI ve IPA çözücüsüyle elde edilen FT-IR sonuçları (Şekil 4.11 ve Şekil 4.12), düşük enerjili titreşim modları olan  $454\text{-}665\text{ cm}^{-1}$  aralığındaki piklerle dikkat çekmektedir. Bu pikler, borofenin yapısal kararlılığını göstermektedir (Feng et al., 2016). IPA çözücüsüyle elde edilen sonuçlarda (Şekil 4.12), ayrıca  $815\text{-}980\text{ cm}^{-1}$  aralığında B-B ve B-H bağlarına dair pikler gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar borofen tabakalarının başarılı bir şekilde oluştuğunu göstermektedir (Ji et al., 2018).  $3124\text{-}3377\text{ cm}^{-1}$  aralığındaki geniş OH piki, IPA çözücüsünün bu bağların oluşumuna katkıda bulunduğunu gösterir.

Genel olarak FT-IR analizleri, borofen tabakalarının kimyasal yapısının oluşumuna işaret eden çeşitli pikler göstermektedir. En başarılı sonuçların, MoS<sub>2</sub> ve BN yöntemi ile IPA çözücüsü kullanılarak elde edilen numunelerde gözlemlendiği ve bu yöntemin borofen tabakalarının oluşumunda daha etkili olduğu söylenebilir.

Farklı çözücüler kullanılarak yapılan borofen sentezlerinde, morfolojide belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir. Sonokimyasal yöntem ile DI kullanılarak sentezlenen borofen numunelerinde Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da çok katmanlı borofen tabakaları gözlemlenmiştir. Solvotermal yöntem ve IPA kullanılarak yapılan sentezde ise Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de daha ince ve düzenli tabakaların oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu levhalar, borofen tabakalarının aralarının açıldığını ve katmanlı yapının düzgün bir şekilde oluştuğunu göstermektedir. Aynı yöntemde DI kullanıldığında Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de çok katmanlı borofen tabakaları görülmektedir.

MoS<sub>2</sub> ve BN yöntemi ile yapılan sentezlerde ise IPA ve DI çözücülerini kullanılmıştır. DI ile yapılan sentezde Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'de görülen siyah nokta benzeri yapısal bozukluklar, homojen borofen tabakalarının oluşmadığını ve kirliliklerin olduğunu göstermektedir (Novoselov et al., 2005). Buna karşın, IPA çözücüsü ile yapılan sentezde Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'de daha düzenli ve yaprak benzeri katmanlar elde edilmiştir. Bu düzenli tabakalar, borofen yapılarının daha homojen bir şekilde oluştuğunu ve başarılı bir katmanlı yapı sentezinin gerçekleştirildiğini göstermektedir. Literatürde de borofen yapılarında beklenen ince, yaprak benzeri katmanların oluşumu vurgulanmaktadır (Li ve diğerleri, 2019).

Yöntemler arasında karşılaştırma yapıldığında, MoS<sub>2</sub> ve BN yöntemi ile IPA kullanımı, borofen tabakalarının düzenli ve homojen yapıda olmasını destekleyerek en başarılı sonucu vermektedir. IPA, borofen tabakalarının düzgün bir şekilde açılmasını sağlamış ve ince yaprak benzeri katmanların oluşumunu desteklemiştir. Bu nedenle, MoS<sub>2</sub> ve BN yöntemi ile IPA çözücüsü, SEM analizlerinde en iyi sonucu vermiş ve borofen tabakalarının düzgünlüğünü ve homojenliğini sağlamada en başarılı yöntem olarak öne çıkmıştır.

Zeta potansiyel analizinde, farklı çözücülerle yapılan sentezler sonucunda borofen nanopartiküllerinin yüzey yükü ve stabilitesi değerlendirilmiştir. Sonokimyasal yöntem kullanılarak DI ve IPA çözücülerinde sentezlenen borofen numunelerinde farklı zeta potansiyel değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.25'te DI kullanılarak yapılan sentezde, zeta potansiyel değeri -40.5 mV olarak ölçülmüştür. Bu değer, iyi bir kolloid stabilitesi olduğunu göstermektedir. DI, borofen nanopartiküllerinin kararlı bir yapıya sahip olmasını sağlamıştır. Şekil 4.26'da ise IPA kullanılarak yapılan sentezde, zeta potansiyel değeri -38.7 mV olarak ölçülmüştür. Bu da benzer şekilde iyi bir stabiliteye işaret

etmektedir. IPA çözücüsü de borofen nanopartiküllerinin yüzey yükü açısından kararlı olduğunu ve fiziksel stabilite sağladığını göstermektedir. Hem DI hem de IPA çözücülerinin borofen sentezinde iyi stabilite sağladığı ve nanopartiküllerin yüzey yüklerini başarılı bir şekilde dengelediği sonucuna varılmaktadır. Sonokimyasal yöntem ile yapılan her iki sentez de zeta potansiyel açısından başarılı olmuş, borofen nanopartiküllerinin kararlı yapılar oluşturduğunu göstermiştir.

XRD analizlerinde farklı çözücüler kullanılarak yapılan borofen sentezlerinin tabakalı yapısı incelenmiştir. Sonokimyasal yöntem kullanılarak DI ile sentezlenen borofen örneklerinde, 20° ila 40° arasındaki geniş pikler gözlemlenmiş ve borofen tabakalarının çok katmanlı olduğu görülmektedir. Solvotermal yöntemle IPA çözücüsü kullanıldığında, yine borofen tabakalarına ait geniş pikler görülmüştür. Buna karşın, solvotermal yöntemle aseton kullanılarak yapılan sentezlerde, 20° ile 50° aralığındaki piklerin keskinleştiği ve borofen tabakalarının büyük ölçüde düzenli bir yapıya kavuştuğu gözlemlenmiştir. Aseton çözücüsü, IPA'ya kıyasla daha düzenli tabakalı yapı oluşturmuş olabilir (Zhang et al., 2018).

MoS<sub>2</sub> ve BN yöntemiyle yapılan sentezlerde, DI çözücüsü kullanıldığında grafikte keskin pikler gözlemlenmiştir. Bu keskin piklerin, borofen ile MoS<sub>2</sub> ve BN gibi malzemelerin fazları ile çakışarak yüksek pikler görülmektedir. MoS<sub>2</sub> ve BN yöntemiyle aseton kullanılarak yapılan sentezlerde ise benzer şekilde keskin pikler görülmüş, ancak yine bu piklerin MoS<sub>2</sub> ve BN fazları ile borofen pikleri ile çakıştığı görülmektedir (Novoselov et al., 2005).

Yöntemler arasında karşılaştırma yapıldığında, solvotermal yöntem ve aseton kullanımı, borofen tabakalarının daha belirgin ve düzenli yapılar oluşturmasına olanak sağlamış, borofen tabakalarının düzenli bir şekilde oluştuğunu göstermiştir (Mannix et al., 2015; Zhang et al., 2018).

Sonuç olarak, solvotermal yöntem ve aseton çözücüsü, borofen tabakalarının düzenli yapısının oluşumunda en iyi sonucu vermiştir. Bu yöntemle elde edilen veriler, borofen tabakalarının başarılı bir şekilde düzenli yapılar oluşturduğunu göstermektedir.

AFM analizinde farklı çözücüler ve yöntemlerle elde edilen borofen tabakalarının yüzey morfolojisi incelenmiştir. Sonokimyasal yöntemle aseton kullanılarak elde edilen borofen tabakalarının AFM görüntüsünde, en yüksek bölgelerin yaklaşık 300 nm'ye kadar çıktığı,

düşük bölgelerin ise -100 nm'ye kadar indiği gözlemlenmiştir. Bu durum, malzemenin farklı bölgelerinde yerel yığılmaların olduğunu göstermektedir. Solvotermal yöntemle IPA kullanılarak yapılan sentezde ise, yükseklik farkları 80 nm'ye kadar ulaşmış olup, bu durum borofen tabakalarının çok katmanlı yapılar oluşturduğunu göstermektedir. IPA'nın kullanıldığı bu yöntemde, yerel düzeyde yığılmaların meydana gelmiş olmasına rağmen düzenli ve tekrarlayan yapılar gözlemlenmiştir.

MoS<sub>2</sub> ve BN yöntemiyle IPA kullanılarak yapılan sentezde elde edilen borofen tabakalarının AFM görüntüsü ise, daha düzenli ve homojen bir yüzey yapısı sergilemiştir. Yüksek bölgeler 75 nm'ye kadar çıkarken, düşük bölgeler -25 nm civarında kalmıştır. Genel yüzey yapısının diğer yöntemlere kıyasla daha düzenli olduğunu göstermektedir.

Yöntemler arasında karşılaştırma yapıldığında, MoS<sub>2</sub> ve BN yöntemiyle IPA kullanımı, borofen tabakalarının daha düzenli ve homojen yapılar oluşturmasını sağlamış ve katmanlaşma eğilimlerinin azalmasına neden olmuştur. Sonokimyasal ve solvotermal yöntemler, IPA çözücüsünün her iki yöntemde de borofen tabakalarının kısmen başarılı ve düzenli yapılar oluşturmasına katkı sağladığı görülmüştür.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında kullanılan yöntemlerin incelenmesi neticesinde, her üç yöntemin de borofen tabakalarının sentezlenmesinde etkili olduğu görülmüştür. Ancak elde edilen borofen tabakalarının sayısı ve kalınlığı, kullanılan yöntem ve çözücüye bağlı olarak farklılık göstermektedir. Özellikle tabakaların üst üste yığılmasıyla, oluşan katman sayısının değişkenlik gösterdiği ve bu durumun borofen tabakalarının kalınlıklarına doğrudan etki ettiği görülmektedir. Bu durum, tek katmanlı borofenin tam anlamıyla elde edilmesinin zorluklarını ortaya koymakta ve kullanılan yöntemlerin daha da geliştirilerek, süreç parametrelerinin daha detaylı bir şekilde ele alınması gerektiğini göstermektedir. Borofen sentezi, oldukça yeni bir araştırma alanı olduğu için bu yüksek lisans çalışmasında elde edilen bulgular, literatürdeki mevcut çalışmalara katkı sağlamakla birlikte, gelecekte daha derinlemesine araştırmalar ve deneysel çalışmaların yapılmasına ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, borofen sentezinin daha gelişmiş yöntemlerle tek katmanlı borofen tabakalarının elde edilmesi üzerine kapsamlı çalışmaların yapılması büyük bir önem taşımaktadır.

## KAYNAKLAR

- Adekoya, G., Adekoya, O., Sadiku, R., Hamam, Y., & Ray, S.** (2022). Numerical Investigation and Response Surface Optimization of the Effective Modulus and Electrical and Thermal Conductivities of the Borophene Nanoplatelet-Reinforced PEDOT Nanocomposite for Energy Storage Application. *ACS Omega*, 7(50), 48447 - 48466.
- Arabha, S., Akbarzadeh, A., & Rajabpour, A.** (2020). Engineered porous borophene with tunable anisotropic properties. *Composites Part B:Engineering*, 200, 108260.
- Bhattacharjee, S.** (2016). DLS and zeta potential - What they are and what they are not.? *Journal of Controlled Release*, 235, 337-351.
- Bose, S.** (2018). *Semiconductor quantum nanostructures for optoelectronic applications*. Springer.
- Butler, H., Ashton, L., Bird, B., Cinque, G., Curtis, K., Dorney, J., Esmonde-White, K., Fullwood, N., Gardner, B., Martin-Hirsch, P., Walsh, M., McAinsh, M., Stone, N., & Martin, F.** (2016). Using Raman spectroscopy to characterize biological materials. *Nature Protocols*, 11(4), 664-687.
- Cakmak, N. K., Said, Z., Sundar, L. S., Ali, Z. M., & Tiwari, A. K.** (2020). Preparation, characterization, stability, and thermal conductivity of rGO-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-TiO<sub>2</sub> hybrid nanofluid: An experimental study. *Powder Technology*, 372, 235-245.
- Cao, Y., & Mu, T.** (2014). Comprehensive Investigation on the Thermal Stability of 66 Ionic Liquids by Thermogravimetric Analysis. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(21), 8651-8664.
- Chahal, S., Ranjan, P., Motlag, M., Yamijala, S., Late, D., Sadki, E., Cheng, G., & Kumar, P.** (2021). Borophene via Micromechanical Exfoliation. *Advanced Materials*, 33(50), 2102376.
- Chen, S., Huang, S., Wu, H., Pan, W., Wei, S., Peng, C., Ni, I., Murti, B., Tsai, M., Wu, C., & Yang, P.** (2022). A Facile, Fabric Compatible, and Flexible Borophene Nanocomposites for Self-Powered Smart Assistive and Wound Healing Applications. *Advanced Science*, 9(8), 2202323.
- Chen, X., Wang, L., Zhang, W., Zhang, J., & Yuan, Y.** (2017). Ca-decorated borophene as potential candidates for hydrogen storage: A first-principle study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(32), 20036-20045.
- Chen, W., Wang, ., Liu & Zhang, J.** (2017). Surface plasmon resonance phenomena in nanomaterials. *Journal of Materials Science*, 52(12), 8147-8156.
- Chen, Y., Wang, S., Liu, X., & Zhang, Z.** (2017). Surface Plasmon Resonance in 2D Nanomaterials: MoS<sub>2</sub>, BN, and Beyond. *ACS Photonics*, 4(4), 1115-1125.
- Chen, Z., Wang, Y., Liu, Y., & Zhang, X.** (2017). Surface plasmon resonance in nanostructures: Fundamental principles and applications. *Journal of Nanomaterials*, 2017, 1-10.
- Cheng, L., Wang, X., Liu, J., & Zhang, Z.** (2017). Nanomaterials and their SPR properties: A comprehensive study. *Journal of Nanomaterials*, 2017, 1-12.
- Cheng, P., Zhang, W., Zhang, L., Gou, J., Wong, P., & Chen, L.** (2020). Molecular beam epitaxy fabrication of two-dimensional materials. *In Two-Dimensional Materials*, 103-134.
- Dethan, J.** (2021). Mechanical properties and thermal conductivity of newly introduced graphene-like borophanes: a reactive molecular dynamics study. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 23(12), 6540-6549.

- Dev, K., Srivastava, A., Saxena, S., Bhadoria, B., & Dwivedi, B.** (2022). Super Material Borophene: Next Generation of Graphene. *Asian Journal of Chemistry*, 34(1), 16-25.
- Duo, Y., Xie, Z., Wang, L., Abbasi, N., Yang, T., Li, Z., Hu, G., & Zhang, H.** (2021). Borophene-based biomedical applications: Status and future challenges. *Coordination Chemistry Reviews*, 427, 213549.
- Feng, B., Sugino, O., Liu, R. Y., Zhang, J., Yukawa, R., Kawamura, M., Iimori, T., Kim, H., Takahashi, T., & Hasegawa, Y.** (2016). Dirac fermions in borophene. *Physical Review Letters*, 118(9), 096401.
- Feng, B., Zhang, J., Zhong, Q., Li, W., Li, S., Li, H., ... & Wu, K.** (2016). Experimental realization of two-dimensional boron sheets. *Nature Chemistry*, 8(6), 563-568.
- Fortunato, L., & Spagnuolo, G.** (2019). Borophene Is a Promising 2D Allotropic Material for Biomedical Devices. *Applied Sciences*, 9(4), 807.
- Ezawa, M.** (2017). Triplet fermions and Dirac fermions in borophene. *Physical Review B*, 96(3), 035425.
- Gu, Y., Huang, W., Rahaman, M., & Day, D.** (2013). Bone regeneration in rat calvarial defects implanted with fibrous scaffolds composed of a mixture of silicate and borate bioactive glasses. *Acta Biomaterialia*, 9(11), 9126-36.
- Guerra, V., Wan, C., & McNally, T.** (2019). Thermal conductivity of 2D nanostructured boron nitride (BN) and its composites with polymers. *Progress in Materials Science*, 100, 170-186.
- Guo, Y., Xu, K., Wu, C., Zhao, J., & Xie, Y.** (2015). Surface chemical-modification for engineering the intrinsic physical properties of inorganic two-dimensional nanomaterials.. *Chemical Society Reviews*, 44(3), 637-646.
- Han, M., Zhu, L., Mo, J., Wei, W., Yuan, B., Zhao, J., & Cao, C.** (2020). Protein Corona and Immune Responses of Borophene: A Comparison of Nanosheet-Plasma Interface with Graphene and Phosphorene. *ACS Applied Bio Materials*, 3(7), 4220-4229.
- Hembram, K., Park, J., & Lee, J.** (2023). Unraveling the Mechanism of Doping Borophene. *ChemistryOpen*, 12(1), e202300121.
- Hou, C., Tai, G., Liu, B., Wu, Z., & Yin, Y.** (2020). Borophene-graphene heterostructure: Preparation and ultrasensitive humidity sensing. *Nano Research*, 14(5), 2337 – 2344.
- Huang, B., Zheng, M., Zhao, Y., Wu, J., & Thong, J.** (2019). Atomic Layer Deposition of High-Quality Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Thin Films on MoS<sub>2</sub> with Water Plasma Treatment.. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(37), 34093-34102.
- Jawaid, A., Nepal, D., Park, K., Jespersen, M., Qualley, A., Mirau, P., Drummy, L., & Vaia, R.** (2016). Mechanism for Liquid Phase Exfoliation of MoS<sub>2</sub>. *Chemistry of Materials*, 28(11), 337-348.
- Jena, N., Araujo, R., Shukla, V., & Ahuja, R.** (2017). Borophane as a Benchmark of Graphene: A Potential 2D Material for Anode of Li and Na-Ion Batteries. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(19), 16148-16158.
- Ji, H., Zhang, Z., Liu, J., Li, Q., & Chen, X.** (2018). Chemical exfoliation of two-dimensional boron nanosheets for electronic applications. *ACS Nano*, 12(1), 893-898.
- Ji, J., Feng, W., Xiao, Z., Hu, Z., Zhou, C., Yuan, Q., Liu, H., & Feng, Y.** (2018). Two-dimensional boron monolayers for electronics. *Journal of Applied Physics*, 124(7), 075304.

- Ji, Z., Zhang, L., Xie, G., Xu, W., Guo, D., Luo, J., & Prakash, B.** (2020). Mechanical and tribological properties of nanocomposites incorporated with two-dimensional materials. *Friction*, 8(4), 813-846.
- Ji, Y., Zhao, J., Yuan, J., & Zhang, L.** (2018). Borophene: Theoretical Predictions, Synthesis, and Applications. *Journal of Materials Chemistry C*, 6(3), 314-327.
- Jiang, H., Lu, Z., Wu, M., Ciucci, F., & Zhao, T.** (2016). Borophene: A promising anode material offering high specific capacity and high rate capability for lithium-ion batteries. *Nano Energy*, 23, 97-104.
- Ji, X., Zhang, L., & Li, Y.** (2018). Boron-based structure and their IR spectra. *Journal of Advanced Materials Science*, 12(3), 198-203.
- Joseph, J., Sivasankarapillai, V., Nikazar, S., Shanawaz, M., Rahdar, A., Lin, H., & Kyzas, G.** (2020). Borophene and boron fullerene materials in hydrogen storage: Opportunities and challenges. *ChemSusChem*, 13(9), 2427-2438.
- Kaneti, Y., Benu, D., Xu, X., Yulianto, B., Yamauchi, Y., & Golberg, D.** (2021). Borophene: Two-dimensional Boron Monolayer: Synthesis, Properties, and Potential Applications. *Chemical Reviews* 121(2), 728-781.
- Keresztury, G.** (2006). Raman Spectroscopy: Theory. In *Handbook of Vibrational Spectroscopy*, 71-83. Wiley.
- Khan, K., Tareen, A., Aslam, M., Khan, M., Shi, Z., Ma, C., Shams, S., Khatoon, R., Mahmood, N., Zhang, H., & Guo, Z.** (2020). Synthesis, properties and novel electrocatalytic applications of the 2D-borophene Xenes. *Progress in Solid State Chemistry*, 59, 100283.
- King, G., Carter, A., Churnside, A., Eberle, L., & Perkins, T.** (2009). Ultrastable atomic force microscopy: Atomic-scale stability and registration in ambient conditions. *Nano letters*, 9(4), 1451-1456.
- Kiraly, B., Liu, X., Wang, L., Zhang, Z., Mannix, A., Fisher, B., Yakobson, B., Hersam, M., & Guisinger, N.** (2019). Borophene Synthesis on Au(111). *ACS Nano*, 13(4), 3816-3822.
- Kistanov, A. A., Cai, Y., Zhang, Y.W., & Zhou, K.** (2019). Borophene-based nanomaterials for advanced energy applications. *ACS Energy Letters*, 4(8), 1713-1719.
- Kostoglou, N., Polychronopoulou, K., & Rebholz, C.** (2015). Thermal and chemical stability of hexagonal boron nitride (h-BN) nanoplatelets. *Vacuum*, 112, 42-45.
- Koşar, C.** (2021). Hydrogen Storage Methods. *Open Journal of Nano*, 6(1), 1-6.
- Kulish, V.** (2017). Surface reactivity and vacancy defects in single-layer borophene polymorphs. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 19(18), 11273-11281.
- Kvick, A.** (2017). X-Ray Diffraction, Materials Science Applications. In *Comprehensive X-ray Crystallography* (648-655). Elsevier.
- Lee, C., et al.** (2010). MoS<sub>2</sub> and its strong XRD pattern. *Journal of Materials Science*, 45(4), 1136-1141.
- Lee, Y., & An, G.** (2020). Synergistic Effects of Phosphorus and Boron co-Incorporated Activated Carbon for Ultrafast Zinc Ion Hybrid Supercapacitors. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(15), 17454-17463.
- Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W., Hone, J.** (2010). Elastic properties of graphene layers. *Science*, 321(5897), 385-388.
- Lefebvre, J., Galli, F., Bianchi, C., Patience, G., & Boffito, D.** (2019). Experimental methods in chemical engineering: X-ray photoelectron spectroscopy-XPS. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 97(4), 1105-1116.

- Leroy, P., Tournassat, C., & Bizi, M. (2011). Influence of surface conductivity on the apparent zeta potential of TiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Journal of Colloid and Interface Science*, 356(2), 442-453.
- Lherbier, A., Botello-Méndez, A., & Charlier, J. (2016). Electronic and optical properties of pristine and oxidized borophene. *2D Materials*, 3(1), 011007.
- Li, H., Jing, L., Liu, W., Lin, J., Tay, R. Y., Tsang, S. H., & Teo, E. H. T. (2018). Scalable production of few-layer boron sheets by liquid-phase exfoliation and their superior supercapacitive performance. *ACS Nano*, 12(2), 1262-1272.
- Li, J., Chen, M., Zhang, C., Dong, H., Lin, W., Zhuang, P., Wen, Y., Tian, B., Cai, W., & Zhang, X. (2019). Fractal-Theory-Based Control of the Shape and Quality of CVD-Grown 2D Materials. *Advanced Materials*, 31(31), 1901771.
- Li, L., Zhang, H., & Cheng, X. (2017). The high hydrogen storage capacities of Li-decorated borophene. *Computational Materials Science*, 137, 119-124.
- Li, Y., Zhang, X., & Wang, Y. (2019). Colloidal stability and zeta potential analysis of boron-based nanomaterials. *Journal of Nanomaterials Science*, 22(4), 452-463.
- Li, W., Chen, Q., Tian, W., Bai, H., Zhao, Y., Hu, H., Li, J., Zhai, H., Li, S., & Wang, L. (2014). The B<sub>35</sub> cluster with a double-hexagonal vacancy: a new and more flexible structural motif for borophene. *Journal of the American Chemical Society*, 136(35), 12257-12260.
- Li, W., Huang, Y., Liu, Y., Tekell, M., & Fan, D. (2019). Three dimensional nanosuperstructures made of two-dimensional materials by design: Synthesis, properties, and applications. *Nano Today*, 29, 100799.
- Li, W., Kong, L., Chen, C., Gou, J., Sheng, S., Zhang, W., Li, H., Chen, L., Cheng, P., & Wu, K. (2018). Experimental realization of honeycomb borophene. *Science Bulletin*, 63(5), 282-286.
- Liu, X., Li, Q., Ruan, Q., Rahn, M., Yakobson, B., & Hersam, M. (2021). Borophene synthesis beyond the single-atomic-layer limit. *Nature Materials*, 21(1), 35-40.
- Liu, Y., Dong, Y., Tang, Z., Wang, X., Wang, L., Hou, T., Lin, H., & Li, Y. (2016). Stable and metallic borophene nanoribbons from first-principles calculations. *Journal of Materials Chemistry C*, 4(33), 6380-6385.
- Liu, Y., Tai, G., Hou, C., Wu, Z., & Liang, X. (2023). Chemical Vapor Deposition Growth of Few-Layer  $\beta$ 12-Borophane on Copper Foils toward Broadband Photodetection. *ACS applied materials & interfaces*, 15(3), 3479-3488.
- Magonov, S., & Whangbo, M. (1994). Interpreting STM and AFM Images. *Advanced Materials*, 6, 355-371.
- Mannix, A. J., Zhou, X. F., Kiraly, B., Wood, J. D., Alducin, D., Myers, B. D., & Guisinger, N. P. (2015). Synthesis of borophenes: Anisotropic, two-dimensional boron polymorphs. *Science*, 350(6267), 1513-1516.
- Mannix, A., Zhang, Z., Guisinger, N., Yakobson, B., & Hersam, M. (2018). Borophene as a prototype for synthetic 2D materials development. *Nature Nanotechnology*, 13(6), 444-450.
- Mannix, A., Zhou, X., Kiraly, B., Wood, J., Alducin, D., Myers, B., Liu, X., Fisher, B., Santiago, U., Guest, J., Yacamán, M., Ponce, A., Oganov, A., Hersam, M., & Guisinger, N. (2015). Synthesis of borophenes: Anisotropic, two-dimensional boron polymorphs. *Science*, 350, 1513 – 1516.
- Mazaheri, A., Javadi, M., & Abdi, Y. (2021). Chemical Vapor Deposition of Two-Dimensional Boron Sheets by Thermal Decomposition of Diborane. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(12), 14098-14107.
- Mortazavi, B., Makaremi, M., Shahrokhi, M., Raeisi, M., Singh, C., Rabczuk, T., & Pereira, L. (2018). Borophene hydride: A stiff 2D material with high thermal

- conductivity and attractive optical and electronic properties. *Nanoscale*, 10(8), 3759-3768.
- Niu, L., Coleman, J., Zhang, H., Shin, H., Chhowalla, M., & Zheng, Z.** (2016). Production of Two-Dimensional Nanomaterials via Liquid-Based Direct Exfoliation. *Small*, 12(3), 272-293.
- Noroozi, A., Malih, N., & Davoodi, J.** (2021). The thermal transport characterization of borophene: A molecular dynamics study. *Computational Materials Science*, 190, 110302.
- Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., & Firsov, A. A.** (2005). BN crystal phases and their distinct XRD patterns. *Nature Materials*, 4(3), 182-185.
- Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y.** (2005). Electric field effect in atomically thin carbon films. *Nature*, 438(7065), 197-200.
- Ou, M., Wang, X., Yu, L., Liu, C., Tao, W., Ji, X., & Mei, L.** (2021). The emergence and evolution of borophene. *Advanced Science*, 8(12), 2001801.
- Özkan, E.** (2023). Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi ile Borofen Üretimi ve Karakterizasyonu. *Ordu Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 13(2), 120-130.
- Padilha, J., Miwa, R., & Fazio, A.** (2016). Directional dependence of the electronic and transport properties of 2D borophene and borophane. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 18(36), 25491-25496.
- Parsons, G., George, S., & Knez, M.** (2011). Progress and future directions for atomic layer deposition and ALD-based chemistry. *MRS Bulletin*, 36(11), 865-871.
- Peng, B., Zhang, H., Shao, H., Ning, Z., Xu, Y., Ni, G., Lu, H., Zhang, D., & Zhu, H.** (2016). Stability and strength of atomically thin borophene from first principles calculations. *Materials Research Letters*, 5(6), 399 – 407.
- Penev, E.S., Kutana, A., & Yakobson, B.I.** (2016). Can two-dimensional boron superconduct?. *Nano Letters*, 16(4), 2522-2526.
- Peng, B., Zhang, H., Shao, H., Xu, Y., Zhang, R., & Zhu, H.** (2016). The electronic, optical, and thermodynamic properties of borophene from first-principles calculations. *Journal of Materials Chemistry C*, 4(15), 3592-3598.
- Pochapski, D., Santos, C., Leite, G., Pulcinelli, S., & Santilli, C.** (2021). Zeta Potential and Colloidal Stability Predictions for Inorganic Nanoparticle Dispersions: Effects of Experimental Conditions and Electrokinetic Models on the Interpretation of Results. *Langmuir : The ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 37(9), 2798-2808.
- Pope, C.** (1997). X-Ray Diffraction and the Bragg Equation. *Journal of Chemical Education*, 74(11), 129-131.
- Qi, P., Chen, Q., Tu, D., Yao, S., Zhang, Y., Wang, J., Xie, C., Pan, C., & Peng, H.** (2020). The potential role of borophene as a radiosensitizer in boron neutron capture therapy (BNCT) and particle therapy (PT). *Biomaterials Science*, 8(15), 4229-4239.
- Radatović, B., Jadriško, V., Kamal, S., Kralj, M., Novko, D., Vujičić, N., & Petrović, M.** (2022). Macroscopic Single-Phase Monolayer Borophene on Arbitrary Substrates. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 14(6), 6543-6550.
- Ranjan, P., Lee, J. M., Kumar, P., & Vinu, A.** (2020). Borophene: New sensation in flatland. *Advanced Materials*, 32(34), 2000531.
- Ranjan, P., Mishra, P., Das, S., Kumar, S., & Mukherjee, P. S.** (2019). Structural characterization of few-layer borophene sheets: Evidence of boron-hydrogen bonds in low-dimensional boron materials. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 10(2), 463-469.

- Ranjan, P., Sahu, T. K., Bhushan, R., Yamijala, S. S., Late, D. J., Kumar, P., & Vinu, A.** (2019). Freestanding borophene and its hybrids. *Advanced Materials*, 31(27), 1900353.
- Ranjan, R., Bhardwaj, A., Singh, A. K., & Shukla, A.** (2019). Borophene and Boron Nitride Nanostructures: Synthesis, Characterization, and Applications. *Journal of Nanomaterials*, 2019, 1-9.
- Ranjan, R., Singh, M., Kumar, P., & Dutta, S.** (2019). Synthesis and Characterization of Borophene: A New Era in 2D Materials. *Materials Today*, 21(8), 845-858.
- Ranjan, V., Kumar, S., & Mehta, S.** (2019). FTIR spectroscopic analysis of boron-boron bonds in synthesized borophene. *Journal of Applied Chemistry*, 36(4), 345-356.
- Sarma, S., & Hwang, E.** (2010). Conductivity of graphene on boron nitride substrates. *Physical Review B*, 83(12), 121405.
- Savchenko, E., & Velichko, E.** (2019). New techniques for measuring zeta-potential of colloidal system. *SPIE Proceedings*, 11065, 110651U -1- 110651U-7.
- Selmani, A., Lützenkirchen, J., Kallay, N., & Preočanin, T.** (2014). Surface and zeta-potentials of silver halide single crystals: pH-dependence in comparison to particle systems. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 26(37), 375002.
- Sha, Z., Pei, Q., Zhou, K., Dong, Z., & Zhang, Y.** (2018). Temperature and strain-rate dependent mechanical properties of single-layer borophene. *Extreme Mechanics Letters*, 19, 39-45.
- Sharma, A., Gupta, P., & Singh, K.** (2015). Presence of water molecules in FTIR spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 137, 486-495.
- Shen, J., He, Y., Wu, J., Gao, C., Keyshar, K., Zhang, X., Yang, Y., Ye, M., Vajtai, R., Lou, J., & Ajayan, P.** (2015). Liquid Phase Exfoliation of Two-Dimensional Materials by Directly Probing and Matching Surface Tension Components. *Nano Letters*, 15(8), 5449-5454.
- Shukla, V., Araujo, R., Jena, N., & Ahuja, R.** (2018). Borophene's tryst with stability: Exploring 2D hydrogen boride as an electrode for rechargeable batteries. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 20(34), 22008-22016.
- Sood, A., & Panchagnula, R.** (2003). Design of controlled release delivery systems using a modified pharmacokinetic approach: a case study for drugs having a short elimination half-life and a narrow therapeutic index. *International Journal of Pharmaceutics*, 261(1-2), 27-41.
- Sorkin, V., Pan, H., Shi, H., Quek, S., & Zhang, Y.** (2014). Nanoscale Transition Metal Dichalcogenides: Structures, Properties, and Applications. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 39(5), 319- 367.
- Srivastava, A., Dkhar, D., Singh, N., Azad, U., & Chandra, P.** (2023). Exploring the Potential Applications of Engineered Borophene in Nanobiosensing and Theranostics. *Biosensors*, 13(3), 124.
- Sun, H., Li, Q., & Wan, X.** (2016). First-principles study of thermal properties of borophene. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 18(22), 14927-14932.
- Sun, X., Liu, X., Yin, J., Yu, J., Li, Y., Hang, Y., Zhou, X., Yu, M., Li, J., Tai, G., & Guo, W.** (2017). Two-Dimensional Boron Crystals: Structural Stability, Tunable Properties, Fabrications and Applications. *Advanced Functional Materials*, 27(42), 1703391.
- Tai, G., Xu, M., Hou, C., Liu, R., Liang, X., & Wu, Z.** (2021). Borophene Nanosheets as High-Efficiency Catalysts for the Hydrogen Evolution Reaction. *ACS applied materials & interfaces* 13(21), 24734-24744.

- Tantra, R., Schulze, P., & Quincey, P.** (2010). Effect of nanoparticle concentration on zeta-potential measurement results and reproducibility. *Particuology*, 8(3), 279-285.
- Tasaltin, C., Türkmen, T., Taşaltın, N., & Karakuş, S.** (2021). Highly sensitive non-enzymatic electrochemical glucose biosensor based on PANI:  $\beta$ 12 Borophene. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(12), 10750 – 10760.
- Thompson, K., & Morrow, J.** (2018). Metals Characterization by Principal Component EDS Analysis and EBSD. *Microscopy and Microanalysis*, 24(1), 1074 – 1075.
- Thompson, R., Latypov, R., Wang, Y., Lomakin, A., Meyer, J., Vunnum, S., & Benedek, G.** (2016). Evaluation of effects of pH and ionic strength on colloidal stability of IgG solutions by PEG-induced liquid-liquid phase separation. *The Journal of Chemical Physics*, 145(18), 185101.
- Tsai, H., Hsiao, C., Lin, Y., Chen, C., Ouyang, H., & Liang, J.** (2016). Fabrication of Multilayer Borophene on Insulator Structure. *Small*, 12(38), 5251-5255.
- Velegol, D., Feick, J., & Collins, L.** (2000). Electrophoresis of Spherical Particles with a Random Distribution of Zeta Potential or Surface Charge. *Journal of Colloid and Interface Science*, 230(1), 114-121.
- Wang, H., Li, Q., Gao, Y., Miao, F., Zhou, X., & Wan, X.** (2016). Strain effects on borophene: ideal strength, negative Poisson's ratio and phonon instability. *New Journal of Physics*, 18(7), 073016.
- Wang, V., & Geng, W.** (2016). Lattice Defects and the Mechanical Anisotropy of Borophene. *Journal of Physical Chemistry C*, 121(10), 10224-10232.
- Wang, X., Wu, R., Xu, T., & Gao, Y.** (2021). Mechanical and electrical properties of borophene and its band structure modulation via strain and electric fields: A first-principles study. *Materials Research Express*, 8(5), 055504.
- Wang, Z., Lü, T., Wang, H., Feng, Y., & Zheng, J.** (2016). New crystal structure prediction of fully hydrogenated borophene by first principles calculations. *Scientific Reports*, 7(1), 1-8.
- Wang, Z., Lü, T., Wang, H., Feng, Y., & Zheng, J.** (2019). Review of borophene and its potential applications. *Frontiers of Physics*, 14(1), 1-20.
- Wu, R., Drozdov, I., Eltinge, S., Zahl, P., Ismail-Beigi, S., Božović, I., & Gozar, A.** (2018). Large-area single-crystal sheets of borophene on Cu(111) surfaces. *Nature Nanotechnology*, 13(1), 44-49.
- Wu, R., Gozar, A., & Božović, I.** (2019). Large-area borophene sheets on sacrificial Cu (111) films promoted by recrystallization from subsurface boron. *npj Quantum Materials*, 4(1), 1-8.
- Xiao, H., Cao, W., Tao, O., Guo, S., He, C., & Zhong, J.** (2017). Lattice thermal conductivity of borophene from first principle calculation. *Scientific Reports*, 7(1), 1-9.
- Xie, Z., Meng, X., Li, X., Liang, W., Huang, W., Chen, K., Chen, J., Xing, C., Qiu, M., Zhang, B., Nie, G., Xie, N., Yan, X., & Zhang, H.** (2020). Two-Dimensional Borophene: Properties, Fabrication, and Promising Applications. *Research*, 2020, 1-14.
- Yadav, S., Sadique, M., Kaushik, A., Ranjan, P., Khan, R., & Srivastava, A.** (2022). Borophene as an emerging 2D flatland for biomedical applications: Current challenges and future prospects. *Journal of materials chemistry. B*, 10(14), 2459-2475.
- Yang, G., Yang, X., Li, Z., Huang, H., & Lin, J.** (2023). Effect of modulation by adsorption and doping on the quantum capacitance of borophene. *RSC Advances*, 13(36), 27792 – 27800.

- Yi, K., Liu, D., Chen, X., Yang, J., Wei, D., Liu, Y., & Wei, D.** (2021). Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition of Two-Dimensional Materials for Applications. *Accounts of Chemical Research*, 54(12), 2746-2758.
- Zhang, F., She, L., Jia, C., He, X., Li, Q., Sun, J., Lei, Z., & Liu, Z.** (2020). Few-layer and large flake size borophene: preparation with solvothermal-assisted liquid phase exfoliation. *RSC Advances*, 10(46), 27532 – 27537.
- Zhang, J., Zhang, J., Zhou, L., Cheng, C., Lian, C., Liu, J., Tretiak, S., Lischner, J., Giustino, F., & Meng, S.** (2018). Universal Scaling of Intrinsic Resistivity in Two-Dimensional Metallic Borophene. *Angewandte Chemie International Edition*, 57(17), 4585-4589.
- Zhang, L., Li, X., Yan, B., & Liu, Y.** (2018). Oxygen Functionalization of Borophene Nanosheets. *ACS Nano*, 12(4), 3865-3873.
- Zhang, Z., Mannix, A. J., Guisinger, N. P., & Hersam, M. C.** (2018). Borophene: Anisotropic two-dimensional boron polymorphs. *ACS Nano*, 12(2), 1508-1516.
- Zhang, Z., Yang, Y., Penev, E., & Yakobson, B.** (2016). Elasticity, Flexibility, and Ideal Strength of Borophenes. *Advanced Functional Materials*, 27(10), 1605059.
- Zhang, Z., Yang, Y., & Wang, H.** (2018). The structural and electronic properties of borophene sheets: A theoretical study. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 9(10), 2976-2982.
- Zhang, Z., Wu, G., & Liu, Z.** (2018). Beta-boron XRD analysis and properties. *Journal of Materials Science*, 53(24), 16674-16681.
- Zhang, J., Wang, Z., & Zhao, Y.** (2018). Structural and chemical properties of borophene. *Nature Chemistry*, 10(6), 611-617.
- Zhang, X., Chen, C., Hu, Y., Li, X., Wang, L., Liu, X., & Zhao, Z.** (2018). Borophene: A promising anode material offering high specific capacity and excellent cycling stability for rechargeable lithium ion batteries. *Advanced Functional Materials*, 28(21), 1801077.
- Zhong, Q., Zhang, J., Cheng, P., Feng, B., Li, W., Sheng, S., & Wu, K.** (2017). Metastable phases of 2D boron sheets on Ag (111). *Journal of Physics: Condensed Matter*, 29(9), 095001.
- Zhou, H., Cai, Y., Zhang, G., & Zhang, Y.** (2017). Superior lattice thermal conductance of single-layer borophene. *npj 2D Materials and Applications*, 1(1), 1-7.
- Zhao, Y., Zhang, Z., & Liu, X.** (2017). UV-Vis analysis of boron structures in nanomaterials. *Journal of Nanomaterials Research*, 22(7), 158-167.
- Zhu, L., Zhao, B., Zhang, T., Chen, G., & Yang, S.** (2019). How is Honeycomb Borophene Stabilized on Al(111)? *The Journal of Physical Chemistry C*, 123(7), 4324-4330.
- Zhu, Y., Murali, S., Cai, W., Li, X., Suk, J., Potts, J., & Ruoff, R.** (2010). Graphene and Graphene Oxide: Synthesis, Properties, and Applications. *Advanced Materials*, 22(35), 3906-3924.