



T.C.

**BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MANGAN DESTEKLİ BOR NİTRÜR NANOPARTİKÜLLERİN
SENTEZİ VE KARAKTERİZASYONU**

Aygül BELGE

**Ağustos-2024
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MANGAN DESTEKLİ BOR NİTRÜR NANOPARTİKÜLLERİN
SENTEZİ VE KARAKTERİZASYONU**

Aygül BELGE

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Kadri KURT**

**Ağustos-2024
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Aygül BELGE tarafından hazırlanan “Metal Destekli Bor Nitrür Nanopartiküllerin Sentezi ve Karakterizasyonu” adlı tez çalışması 27/08/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Ali YEŞİL

.....

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Kadri KURT

.....

Üye

Prof. Dr. Ali YEŞİL

.....

Üye

Doç. Dr. Ali İhsan KESKİN

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

Bu tez çalışması BAP tarafından BTÜBAP-2024-YL-07 numaralı proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Aygül BELGE

Tarih:07.08.2024

ÖZET

METAL DESTEKLİ BOR NİTRÜR NANOPARTİKÜLLERİN SENTEZİ VE KARAKTERİZASYONU

Aygül BELGE

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Kadri KURT

2024, 79 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Ali YEŞİL

Dr. Öğr. Üyesi Kadri KURT

Doç. Dr. Ali İhsan KESKİN

Nanobilim ve nanoteknolojide son yıllarda yaşanan gelişmeler, nano ölçekli yapıların güçlendirilmiş mekanik, termal ve elektriksel özellikleri nedeniyle elektronik, farmasötik, biyomedikal, çevre, tıp ve enerji depolama gibi çeşitli alanlarda birçok uygulamada kullanılmasını sağlamıştır. Bor nitrür nanoyapılar bunlara iyi bir örnektir. Bu çalışmada, amonyak gazının borik asit ve üre karışımı ile reaksiyonundan bor nitrür ve mangan destekli bor nitrür nanoyapılar başarıyla sentezlendi. Sentezlenen nano yapı malzemelerin fiziksel ve yapısal özellikleri Enerji Dağılımı X-Işını Spektroskopisi (EDX), Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) ve Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) ile belirlendi. Deneyler borik asit ve ürenin manyetik karıştırıcıda karıştırıldıktan sonra azot kaynağı olarak amonyak katıldıktan sonra bir hidrotermal reaksiyon sistemi (Fytronix, FYHT-8000) ile 200 °C'de 24 saat süreyle gerçekleştirildi ve bor nitrür (h-BN) nano yapılar elde edildi. Mangan destekli bor nitrür (h-BN-Mn) nano yapılar ise literatürde belirtilen yöntemde bazı modifikasyonlar yapılarak bor nitrürün sonike edilmesinden sonra mangan içeren çözeltinin eklenerek ultrasonik banyoda karıştırılmasından sonra sodyum bor hidrür ile indirgenmesinden elde edildi. FTIR sonuçları bor nitrür ile mangan destekli bor nitrürün varlığını ve borun nitrojene atomik oranının bor ve nitrojen arasındaki kimyasal stokiyometrik ilişki ile uyumlu olduğunu gösterdi. Ayrıca SEM ve EDX sonuçlarına göre h-BN ve h-BN-Mn nanoyapıların literatür ile uyumlu olduğunu göstermektedir. Sentezlenen h-BN-Mn nanoyapılar başta enerji depolama olmak üzere birçok uygulamalarda nanomateryal olarak kullanılabilir. Bu çalışmada hidrojen enerjisi depolama üzerine çalışma yürüttük. Çağımızda hızla tükenen fosil yakıtlar nedeniyle, temiz ve sürdürülebilir enerji türlerine gereksinim duyulmaktadır. Hidrojen enerjisi ile ilgili dünya ve Türkiye’de yapılan birçok çalışma mevcuttur ama depolama ile ilgili yeterli bir gelişim söz konusu değildir. Nano ölçekte depolama için en uygun görünen bor nitrür nanopartikülleri bizi bu çalışmaya sevk etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Bor nitrür, Katalizör, Mangan, Metal nanomateryal

ABSTRACT

SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF METAL SUPPORTED BORON NITRIDE NANOPARTICLES

Aygül BELGE

**Batman University Graduate Education Institute
Department of Physics**

Advisor: Dr. Öğr. Üyesi Kadri KURT

2024, 79 Pages

Jury

Prof. Dr. Ali YEŞİL

Dr. Öğr. Üyesi Kadri KURT

Doç. Dr. Ali İhsan KESKİN

Developments in nanoscience and nanotechnology in the last years have enabled the use of nanoscale structures in many applications in various fields such as electronics, pharmaceuticals, biomedical, environmental, medicine and energy storage due to their enhanced mechanical, thermal and electrical properties. Boron nitride nanostructures are a good example. In this study, boron nitride and manganese-supported boron nitride nanostructures were successfully synthesized from the reaction of ammonia gas with a mixture of boric acid and urea. The physical and structural properties of the synthesized nanostructured materials were determined by Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Scanning Electron Microscopy (SEM). The experiments were carried out at 200 °C for 24 hours with a hydrothermal reaction system (Fytronix, FYHT-8000) after mixing boric acid and urea in a magnetic stirrer and adding ammonia as a nitrogen source, and boron nitride (h-BN) nanostructures were obtained. Manganese-supported boron nitride (h-BN-Mn) nanostructures were obtained by sonicating the boron nitride by making some modifications to the method specified in the literature, adding manganese-containing solution, mixing it in an ultrasonic bath, and then reducing it with sodium boron hydride. FTIR results showed the existence of boron nitride and manganese-supported boron nitride, and the atomic ratio of boron to nitrogen was consistent with the chemical stoichiometric relationship between boron and nitrogen. In addition, SEM and EDX results show that h-BN and h-BN-Mn nanostructures are compatible with the literature. Synthesized h-BN-Mn nanostructures can be used as nanomaterials in many applications, especially in energy storage. In this study, we conducted a study on hydrogen energy storage. Reason: In our age, fossil fuels are rapidly depleted, and clean and sustainable energy is needed. There are many studies on hydrogen energy in the world and in Turkey, but storage is a big disadvantage. Boron nitride nanoparticles, which seem to be the most suitable for nanoscale storage, lead us to this study.

Keywords: Boron nitride, Catalyst, Manganese, Metal nanomaterial

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca bilgi ve birikimiyle hep yanımda olan, kendisi ile çalışmaktan onur duyduğum değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Kadri KURT'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Laboratuvar çalışmalarım boyunca bana her türlü desteği sağlayan, her soruma sabırla cevap veren Dr. Öğr. Üyesi Erdal ERTAŞ hocama teşekkürlerimi sunarım. Çalışmamda malzemenin sentezlenmesinde cihaz desteği sağlayan Prof. Dr. Bilsen TURAL ve Prof. Dr. Servet TURAL hocalarıma teşekkür ederim.

Yüksek lisansımın tüm sürecinde her türlü desteğini sağlayan süt kardeşim, arkadaşım Y. Mimar Rahşan DOĞRU'ya; arkadaşım Ömer KEZER'e ve teknik destek için büyük sabır gösteren meslektaşım arkadaşım Fatif ÇAKAR'a çok teşekkür ederim. Son olarak her türlü desteğini sunan annem Fahriye BELGE ve babam Mehmet Ali BELGE ve en büyük destekçim hakkını asla ödeyemeyeceğim kardeşim Mehmet BELGE'ye teşekkür ederim.

Bu tezi çok kıymetli yeğenlerim Amed ve Dicle BELGE'ye ithaf ediyorum yolunuz hep aydınlık olsun.

Aygül BELGE
BATMAN-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER.....	ix
ÇİZELGELER.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	3
2.1. Bor Nitrür.....	3
2.1.1. Hegzagonal bor nitrür (h-BN).....	5
2.1.2. Kübik bor nitrür (c-BN).....	7
2.1.4. Bor nitrür nano tüpler (BNNT).....	10
2.2. Bor Nitrür Nano Malzeme Özellikleri	12
2.2.1. Mekanik özellikler	12
2.2.1.1. Hegzagonal bor nitrürün(h-BN) mekanik özellikleri.....	13
2.2.1.2. Kübik bor nitrürün (c-BN) mekanik özellikleri.....	14
2.2.1.3. Bor nitrür nano tüplerin (BNNT) mekanik özellikleri.....	14
2.2.2. Termal özellikler.....	15
2.2.2.1. Hegzagonal bor nitrür (h-BN) termal özellikleri	17
2.2.2.2. Kübik bor nitrürün (c-BN) termal özellikleri	18
2.2.2.3. Bor nitrür nano tüplerin (BNNT) termal özellikleri	18
2.2.3. Optik özellikler	19
2.2.3.1. Hegzagonal bor nitrür (h-BN) optik özellikler	21
2.2.3.2. Kübik bor nitrür (c-BN) optik özellikleri	22
2.3. Bor Nitrür Sentezlenmesi.....	24
2.3.1. Hegzagonal bor nitrür (h-BN) sentezi ve yöntemleri	24
2.3.1.1. Kimyasal buhar biriktirme yöntemi	24
2.3.1.2. Pul pul dökülme yöntemi	26
2.3.2. Kübik bor nitrür (c-BN) sentez ve yöntemleri.....	30
2.3.2.1. Hegzagonal bor nitrürün kübik bor nitrüre dönüştürülmesi	30
2.3.2.2. Radyo frekanslı magnetron püskürtme yöntemi.....	32
2.3.3. Bor nitrür nano tüplerin (BNNT) sentezi.....	34
2.3.3.1. Ark deşarj yöntemi.....	35
2.3.3.2. Lazer aplasyon yöntemi	36
2.3.3.3. Bilyalı öğütme yöntemi	38
2.4. Bor Nitrürün Uygulama Alanları.....	39
2.4.1. Biyomedikal	39
2.4.2. Uzay	40

2.4.3. Hidrojen depolama.....	41
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	43
3.1. Kimyasallar	43
3.2 Karakterizasyon	43
3.3. Bor nitrür sentezi	43
3.4. Mangan destekli bor nitrür sentezi.....	44
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI.....	45
4.1. Karakterizasyon Teknikleri.....	45
4.2. Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) tekniği.....	45
4.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) tekniği.....	47
4.4. Enerji dağılımı X-ışını spektroskopisi (EDX) tekniği	48
5. SONUÇLAR.....	50
5.1. Sonuç	50
ÖZGEÇMİŞ	65

ŞEKİLLER

Şekil 2.1. Hegzagonal bor nitrür yapısı. (a) üstten görünümü, (b) yandan görünümü.	6
Şekil 2.2. Elmas ve kübik bor nitrürün kristal yapıları.....	8
Şekil 2.3. Würtzite bor nitrür kristal yapısı.	9
Şekil 2.4. Bor nitrür kristal yapıları.	9
Şekil 2.5. (a) CNT ler ve (b) BNNT lerin 2000 ve 2019 yılları arasında yapılan yayın sayıları.....	11
Şekil 2.6. (a) BNNT'lerin (kırmızı—bor, mavi—azot) ve (b) çok duvarlı BNNT'lerin gösterimi.	12
Şekil 2.7. Sıvı pul pul dökülme yoluyla hegzagonal bor nitrür nanotüpleri sentezine yönelik şematik diyagram gösterilmiştir.....	27
Şekil 2.8. Pebax-BNNS'lerin eksfoliasyonu ve dispersiyonu için şematik çizim. a h - BNNS'lerin eksfoliasyonu ve yerinde işlevselleştirme odası . b, c h -BNNS'lerin eksfoliasyonu ve yerinde işlevselleştirme süreci . d Elde edilen Pebax-BNNS'ler. Pebax molekülleri mekanik eksfoliasyon süreci sırasında oluşan sarkan bağlarla rastgele reaksiyona girecekti.	28
Şekil 2.9. Pebax-BNNS'lerin nanoyapısı ve karakterizasyonu. a Pebax-BNNS'lerin düşük büyütme ve b yüksek büyütme FESEM görüntüleri, substratlar üzerinde rastgele dağıtılmıştır. c Pebax-BNNS'lerin TEM görüntüsü. Ekler, Pebax-BNNS'lerin karşılık gelen EDS spektrumu ve SAED modelidir. d Beş katmanlı tek bir Pebax-BNNS'nin HRTEM görüntüsü. Ek, d'de kırmızı çizgiyle işaretlenmiş alanın karşılık gelen mesafe profilidir ve 0,34 nm'lik bir kristal aralığını gösterir. e AFM görüntüsü, bazı Pebax-BNNS'lerin alt tabakalar üzerinde rastgele dağıldığını göstermektedir. Orijinal h -BN'nin ve elde edilen Pebax-BNNS'lerin FTIR spektrumları (f), Raman spektrumları (g) ve XPS spektrumları (h) Orijinal h-BN'nin ve elde edilen Pebax-BNNS'lerini göstermektedir.	28
Şekil 2.10. 180 °C'de hidrotermal eksfoliasyondan sonra $\sim 2 \times 10^5$ Pa basınç ve güçlü bir karıştırma ile, solvent izopropil alkol ve 1- oktanol ile pul pul dökülen hegzagonal bor nitrür nano tüpler, bariz kalınlık azalması göstermiş. Ancak diğer üç polar çözücüyle (N,N-dimetilformamid, N-metilpirolidon ve deiyonize su) pul pul dökülen ürün, etkili bir soyma etkisi göstermemiş.	29
Şekil 2.11. Hegzagonal bor nitrür yığınının başlayarak hegzagonal bor nitrür nanotüplerin pul pul dökülmesi için önerilen hidrotermal pul pul dökülme prosedürü. Hipotezde, lityum katyonları, otojen yüksek basınç ($\sim 2 \times 10^5$ Pa) altında bitişik hegzagonal bor nitrür katmanları arasındaki boşluğa eklenerek genişlemiş yapıya (1.genişleme) yol açmış. Daha sonra, hegzagonal bor nitrürün yüzey enerjisiyle iyi uyum sağlayabilen polariteye sahip çözücü, pul pul dökülme enerjisini daha da azaltabilir, bu da son pul pul dökülmeye (2. genişleme) hazır gevşek bir yapıya neden olur. Son olarak, kuvvetli karıştırma ve yüksek otojen basınç altında hegzagonal bor nitrür nanotüpleri, büyük bir verim ve yüksek bir konsantrasyonla yığımlardan soyulmuş olduğu gözlenmiştir.	30
Şekil 2.12. Hegzagonal bor nitrürün Basınç-Sıcaklık Faz Diyagramı(Eremets ve ark., 1998). Kırmızı çizgi hBN-cBN dönüşüm sınırını belirtir ve kırmızı bölge dönüşümün kinetik olarak mümkün olduğu alanı gösterir.	32
Şekil 2.13. BN filmlerinin biriktirilmesi için radyo frekanslı püskürtme sisteminin şematik gösterimi.....	33

Şekil 2.14. a Bağların bağ enerjisi B, N veya H'den oluşur; b $B+N_2$ ve BH_3NH_3 başlayan BNNT sentezinin kavramsal enerji diyagramı; c Dehidrojenasyon prosesine göre iki farklı amonyak boran pirolizi yolu	37
Şekil 2.15. a) BNNT sentez ekipmanı ve b) toz modülünün şematik diyagramı; c) Reaksiyonun hemen ardından BNNT lifi elde edildi; d 10 cm uzunluğunda BNNT fiber; e BNNT fiberin SEM görüntüsü f BNNT'nin TEM görüntüsü; g Sentez sürecinin şematik diyagramı.	38
Şekil 2.16. Bor nitrür uygulama alanları.	39
Şekil 3.1. Hegzagonal bor nitrür (h-BN) sentezinin şematik diyagramı.	44
Şekil 4.1. Sentezlenen bor nitrürün FT-IR spektrumu.....	46
Şekil 4.2. Sentezlenen bor nitrürün FT-IR spektrumu.....	46
Şekil 4.3. Saf bor nitrürün SEM görüntüsü.	47
Şekil 4.4. Mn katkılı bor nitrürün SEM görüntüsü.....	48
Şekil 4.5. Bor nitrür nano yapı malzemelerin EDX spektrumları, elementlerin karşılık gelen atomik %'sini göstermektedir.	49
Şekil 4.6. Mangan katkılı bor nitrür nano yapı malzemelerin EDX spektrumları, elementlerin karşılık gelen atomik %'sini göstermektedir.	49

ÇİZELGELER

Çizelge 2.1. Bor-Azot kimyasına yönelik çalışmaların zaman çizelgesi.....	5
Çizelge 2.2. BN fazlarının yapısal özellikleri.	10
Çizelge 2.3. Bor nitrür kristal yapıların optik özellikleri	20



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Å	: Angström
cm	: Santi metre
d	: Optimum ayrılma mesafesi
eV	: Elektro volt
g	: Gram
GPa	: Gigapaskal
K	: Kelvin
kg	: Kilogram
T	: Sıcaklık
mm	: Milimetre
mK	: Mikrokkelvin
mL	: Mililitre
MHz	: Mikrohertz
MPa	: Megapaskal
nm	: Nanometre
Pa	: Paskal
Torr	: Basınç birimi
V	: Volt
µm	: Mikrometre

Kısaltmalar

AlN	: Alüminyum nitrat
AFM	: Atomik kuvvet mikroskobu
BeO	: Berilyum oksit
BN	: Bor nitrür
BNNT	: Bor nitrür nanotüp
c-BN	: Kübik bor nitrür
CNT	: Karbon nano tüp
CVD	: Kimyasal buhar birikimi
DFT	: Yoğunluk fonksiyonel teorisi
EDX	: X-ışını spektroskopisi
FTIR	: Fourier dönüşümü kızılötesi
GaN	: Galyum nitrit
h-BN	: Hegzagonal bor nitrür
KCN	: Potasyum siyanür
PL	: Fotolüminesans
RF	: Radyo frekansı
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
TEM	: Transmisyon elektron mikroskobu
XRD	: X-ışını kırınımı

1. GİRİŞ

Nanoteknoloji bilimsel olarak çok uzak bir geçmişe sahip değildir. 1980’lerde fulerenler ve karbon nanotüp gibi karbon bazlı nanotüplerin keşfi ile başlamış. Temel kavramların geliştirilmesi ise çok daha uzak bir geçmişe sahiptir. Nanobilimin gelişimi, bilim insanlarının maddenin sürekli ve dolayısıyla daha küçük parçalara sonsuza kadar bölünebilir mi olduğu, yoksa küçük, bölünemez ve yok edilemez parçacıklardan mı oluştuğu sorusunu ele aldığı MÖ 5. Yüzyılda Antik Yunanlılar ve Demokritos zamanına kadar uzanabilir. Ancak ilk olarak maddelerin nanoboyutta tanımı ünlü fizikçi Richard P. Feynman (1918-1988) tarafından ortaya atılmıştır. Feynman, California Teknoloji Enstitüsü’nde yapmış olduğu bir konferansta “Neden Britannica Ansiklopedisi’nin 24 cildinin tamamını bir toplu iğnenin başına yazamıyoruz?” hipotezini ortaya atarak daha küçük makineler yapmak için makineleri kullanma vizyonunu moleküler seviyeye kadar anlattı. Nanoteknoloji terimini ilk kez 1974 yılında Japon bilim insanı Norio Taniguchi kullanmış ve şöyle tanımlamıştır: “Nanoteknoloji esas olarak malzemelerin bir atom veya bir molekül tarafından ayrılması, birleştirilmesi ve deformasyonunun işlenmesidir (Alrebh, 2022; Bayda ve ark., 2020).

Bir veya birden fazla fiziksel boyuta sahip nanometre ölçeğiyle tanımlanan malzemelere düşük boyutlu malzemeler denir. Bunlar iki boyutlu (2D) nano tabakalar, tek boyutlu (1D) nanotüpler ve sıfır boyutlu (0D) fullerenler bu tür malzemelerin tipik örneklerini temsil eder. Karşılaştırıldığında üç boyutlu (3D) dökme maddelere, düşük boyutlu yapıların kuantum nedeniyle yeni özellikler sergilemesi bekleniyor. Bu nedenle son zamanlarda malzeme bilimcileri bu konulara özellikle dikkat çektiler. Nanosistemlerin alışılmadık fiziksel ve kimyasal özelliklerini anlamlandırmak için mühendislikte yeni uygulamalara teşvik edebilecek özellikler gözlemlenmektedir (Jiang ve ark., 2015; Pakdel ve ark., 2012).

Nanoyapılı malzemelerin incelenmesi, bu malzemelerin elektriksel, mekanik ve optik özelliklerinin, elektron ve deliklerin hapsedilmesi, yüzey etkileri nedeniyle büyük ölçekteki benzerlerinden farklı olduğunu ortaya çıkarmıştır (Lauret ve ark., 2005). Bu özelliklere sahip BN bileşiği günümüzde nükleer enerji, uzay, otomotiv, savunma sanayisi ve enerji depolamada gibi birçok endüstri alanında eşsiz birer ham madde olarak kullanılmaktadır. BN özellikleri arasında sertlik, yüksek erime noktası, düşük dielektrik sabiti ve geniş bant aralığı vb. yer almaktadır. BN yüksek ısıl dayanımı ve

oksidasyon direncinden dolayı farklı kullanım alanlarına sahip bir malzemedir (Ahmad ve ark., 2014; Peng ve ark., 2008).



2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Bor Nitrür

Bor nitrür (BN), doğada bulunmayan sentetik olarak üretilen, bor (B) ve azot (N) atomlarının eşit miktarda bir araya getirilmesi ile üretilen kimyasal bir bileşiktir (Pakdel ve ark., 2014). BN, 1842'de eriyik borik asit (H_3BO_3) ve potasyum siyanür (KCN) ile gerçekleştirilen reaksiyon sonucunda sentetik bir bileşik olarak kabul edildi (McLean ve ark., 2023). Karbon nanotüplerinin (CNT) tanımlanmasından dört yıl sonra, 1994 yılında teorik olarak öngörülmüş ve 1995 yılında bor nitrür nanotüpleri (BNNT) başarıyla sentezlenmiştir (Ciofani ve Mattoli, 2016). Bunun ardından başka 1D BN nanomalzemeleri, nanoteller, nanoyapraklar, nanofiberler ve nanosedirler üretildi. 1998 ve 1999 yıllarında C_6O kömür topçuklarından esinlenilerek 0D iç içe geçmiş ve tek tabakalı oktahedral BN fullerinler üretildi. Ayrıca, 2004 yılında grafenin yükselmesinden ve katmanlı 2D nano yapılar üzerindeki araştırma ilerlemelerinden sonra, bağımsız 2D BN yapraklarının bir BN kristalinden soyulduğu rapor edildi (Pakdel ve ark., 2012). Bor (B) p tipi yarı iletken katkı maddesidir. Azot (N), mol ağırlığı 14,007 g/mol'dür, oda sıcaklığında gaz fazında olup $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de sıvı fazdadır (Oskay, 2012). Mükemmel kimyasal özelliklere sahip, yüksek termal iletkenlik, antioksidasyon stabilitesi, mükemmel biyolojik uyumluluk, benzersiz elektronik ve optik özelliklere sahip olması nedeniyle fazlasıyla ilgi çekmektedir (Pakdel, 2012; Tarhan, 2021; Yin ve ark., 2016).

Bor nitrür nanotüpler (BNNT), karbon nanotüplerin (CNT) yapısının analogları olarak bilinirler ancak üstün özelliklere sahiptirler (Golberg, 2010). Yapısal benzerlikleri olmasına rağmen kimyasal ve fiziksel özelliklerinde önemli farklılıklar gösterirler. CNT'lerin aksine, elektriksel özellikleri kiralite ve çaplarına bağlı değildir çünkü yaklaşık 5.5 eV'lık büyük bir bant aralığına sahiptirler. BNNT'ler ayrıca CNT'lere göre mükemmel radyasyon kalkanlama özelliklerine sahiptirler. BNNT'ler B ve N elementlerinden oluştuğundan, elektron yapıları CNT'lerden oldukça farklı olması beklenir. B-N bağlarında yük dağılımı C-C bağlarında olduğundan daha asimetriktir (Cohen ve ark., 2010). BNNT'ler, CNT'lere göre aynı koşullarda hava ortamında $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar oksidasyona direnirken CNT'ler sadece $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar dayanıklıdır (Kalay ve ark., 2015).

Bor ve azot atomlarının her bir tabakası, zayıf Van der Waals kuvvetleri ile birbirine bağlanmıştır. Her tabakada atomlar güçlü kovalent bağlarla tutulur. Bor nitrür en yalıtkan malzemelerden biridir ve yüksek bir Young modülü olan 0.865 TPa ve kırılma dayanımı olan 70.5 GPa gibi mekanik özelliklere sahiptir. Ayrıca, yarı iletkenler arasında en yüksek termal iletkenlik katsayılarından biri olan 751 W/mK'e sahiptir (Maryam, 2020). Elektron yoğunluğu B atomundan, daha yüksek elektronegatifliğine sahip olan N atomlarına doğru çekilir. Bu nedenle, B-N bağları yarı iletken geniş bant aralığı gibi davranır. BNNT'lerin bazı önemli özellikleri şunlardır: yüksek hidrofobiklik, oksidasyona ve ısıya direnç, yüksek hidrojen depolama kapasitesi ve radyasyon emilimi. Elektriksel yalıtımları çok yüksektir, yüksek termal iletkenliğe rağmen (Terao ve ark., 2010). BN bu özellikleri nedeniyle enerji, sağlık ve çevre gibi çok yönlü uygulama alanlarına sahiptir.

Bor (B) ve azot (N) elementleri periyodik çizelgede karbon (C) elementine komşu olması nedeniyle, karbon (C) ile izoyapısal özelliklere sahip olup çeşitli kristal yapıları mevcuttur (Pakdel ve ark., 2014). Bu kristal yapılar; grafit ile benzer bir katı yapıya sahip beyaz kaygan bir BN polimorfu olan hegzagonal bor nitrür (h-BN), elmasa benzer olan ve bugüne kadar bilinen ikinci en sert materyal olan kübik bor nitrür (c-BN), ABCABC şeklinde üç katmanlı bir dizilimle sp^2 bağlı bir yapıya sahip rombohedral bor nitrür (r-BN), lonsdaleitei andıran vürstetik bor nitrür (w-BN), monoklinik BN (m-BN), turbostratik BN (t-BN), ortorombik BN (o-BN) ve amorf BN (a-BN) farklı kristal ve amorf polimorfik yapılar mevcuttur (Alrebh, 2022; Izyumskaya ve ark., 2017; Pakdel ve ark., 2014; Zhang ve ark., 2017).

Çizelge 2.1. Bor-Azot kimyasına yönelik çalışmaların zaman çizelgesi (Jawaid ve Khan, 2023).

Yıl	Araştırmacı	Katkı
1809	Gay-Lussae	Amonyak ve trifloro-boronun eklentisi
1842	Balmain	Bor nitrür hakkında ilk raporlar
1850	Wohler Rose	Bor nitrürün karakterizasyonu
1905	Stock Joannis	
1926	Stock ve Pohland	Borazinin sentezi
1935	Wiberg, Schlesinger	Bor-Azot bileşiklerinin temel çalışmaları
1955	Brown ve Laubengayer	B-trikloroborazinin standart laboratuvar ekipmanı ile hazırlanması
1956	Dewar ve arkadaşları	Heteroaromatik bor-azot bileşileri
1958	Parry ve arkadaşları	

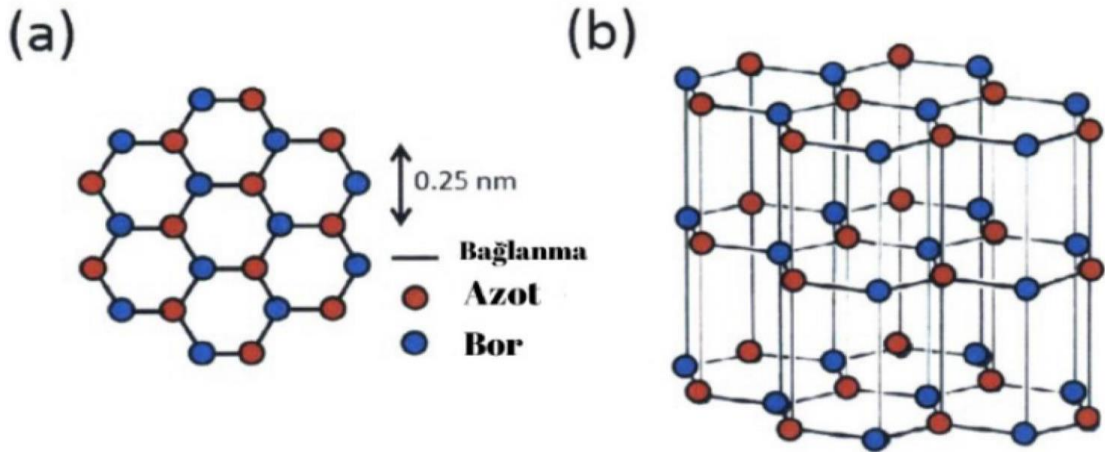
2.1.1. Hegzagonal bor nitrür (h-BN)

Teorik yoğunluk: 2.27 g/cm^3 olan hegzagonal bor nitrür (h-BN), B atomları ve N atomları tarafından iki boyutlu bir düzlemde sırayla düzenlenen bir kafestir. N atom çekirdeği ve B atomu, zayıf Van der Waals kuvvetleri tarafından birbirine bağlanan güçlü bir s bağı oluşturmak üzere sp^2 orbitali ile birleştirilir, böylece katmanlar arasında kolayca kayabilir ve kayganlık özellikleri gösterir (Lee ve ark., 2010; Watanabe ve ark., 2004). 1995 yılında Nagashima ve arkadaşları çeşitli metal yüzeylerde epitaksil büyüme kullanarak h-BN kristallerini elde ettiler (Nagashima ve ark., 1995). 2005 yılında iki boyutlu bir h-BN hazırlamak için mikro-mekanik soyma yöntemi benimsendi. Hegzagonal bor nitrürün bant aralığı yaklaşık 5.9 eV 'dir, Mohs sertlik ölçeği yaklaşık 2 olup, hacim modülü yaklaşık 36.5 GPa , kırılma indisinin yaklaşık 1.8 olduğu, nötron emme yeteneğine sahiptir (Benka, 2005). Ayrıca, anti-oksidasyon sıcaklığı $900 \text{ }^\circ\text{C}$, termal dayanıklılığı $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar, inert bir ortamda $2700 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de stabil kalır (Crane ve Cowan, 2000). Son olarak, h-BN termal darbe direncine, elektrik titreşimine, elektrik

alanının çökmesine karşı yüksek dirence sahip, toksik olmayan, çevre dostu olduğu ve çeşitli metaller veya kimyasal aşındırıcılarla ıslanma olmaması ve diğer mükemmel fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olduğundan geniş bir şekilde kullanılmaktadır (Wang ve ark., 2017).

Hegzagonal bor nitrür, grafitte benzerliğinden dolayı “beyaz grafit” olarak adlandırılır. Hegzagonal bor nitrür örgüsünün nokta grubu $D6h$ 'dir (Spencer, 2021). Hegzagonal bor nitrür, grafit yapılarına benzer bir yapıya sahip olan sıralı bor ve nitrojen atomlarından oluşur. Grafitin aksine, h-BN'de B atomları doğrudan N atomlarının üzerine yerleştirilmiştir (Kimura ve ark., 1999). Hegzagonal bor nitrür tozu geleneksel olarak bir yağlayıcı katkı maddesi olarak kullanılmış (Trice ve Halloran, 1999). Hegzagonal bor nitrür, yüksek sıcaklıklarda bile geniş bir asit ve oksidant çeşitliliğine karşı kimyasal olarak inert olduğu için kaplama malzemelerinde kullanılmış (Fang, 2015).

Isıl bir iletken olarak, BN kriyojenik sıcaklıklarda paslanmaz çelikte aynı seviyede ve yüksek sıcaklık koşullarında berilyum oksit (BeO) ile eş seviyededir; 700 °C'nin üzerinde, BN'nin termal iletkenliği toksik olan BeO'yu aşmaktadır. Özellikle ilgi çekici olan özellikleri arasında yüksek dielektrik özellikler (dielektrik sabiti 4'tür) ve yüksek dielektrik dayanımı bulunmasıdır (Lipp ve ark., 1989).



Şekil 2.1. Hegzagonal bor nitrür yapısı. (a) üstten görünümü, (b) yandan görünümü (Fang, 2015).

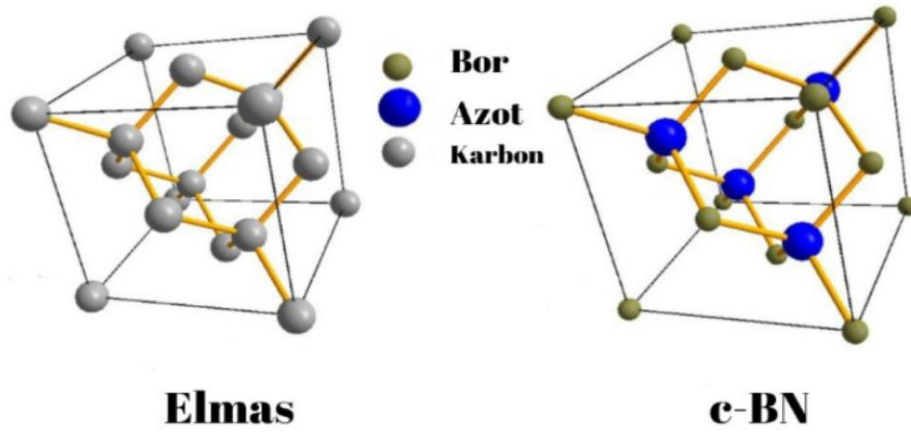
2.1.2. Kübik bor nitrür (c-BN)

BN'nin ikinci en yaygın fazı, üç katmanlı ABCABC istifleme dizisinde düzenlenmiş sp^3 bağlı bor ve nitrojen atomlarından oluşan kübik çinko karışım yapısıdır (Zhang ve Meng, 2019). Kübik bor nitrür, Wentorf'un (Wentorf, 1957) 1957'de elmadan sonra ikinci en sert malzeme olan kübik bor nitrürü hegzagonal bor nitrürün yüksek sıcaklık ve basınca maruz bırakılmasıyla sentezlendi (Uygun koşullarda h-BN yaklaşık 15 dk sonunda 6 GPa basınç ve 1470-1720 K sıcaklık aralığında c-BN'e dönüşebilir (Vel ve ark., 1991). Ve böylelikle BN'yi bilim camiasının radarına soktu ve araştırma odağı haline geldi. BN'nin seramik malzeme olarak potansiyeli araştırma ilgisini daha da artırdı ve 1969'da ticari olarak kullanılabilir hale geldi (Jawaid ve Khan, 2023). Wentorf ve meslektaşları tarafından "Borazon" adı verilen c-BN, çinko blende kafes yapısı sergiliyordu ve elması çizebilecek kadar sertti. Sonraki sentez, h-BN'nin c-BN'ye doğrudan ve katalizör destekli dönüşümünün mümkün olduğunu gösterdi (Wentorf, 1961). Yapısal olarak elmasa benzeyen c-BN, kimyasal olarak inerttir, elektriksel olarak yalıtıcıdır, termal olarak iletken ve yüksek sıcaklıklarda oksidasyona karşı yüksek dirence sahiptir (McLean ve Alister, 2023; Vel ve ark., 1991).

Kübik BN, elmasa benzer bir kristal yapıya sahiptir; ancak elmasın yapısı iki yüz merkezli kübik (FCC) karbon hücresinden oluşurken, c-BN'de bir boron FCC hücresi ve bir nitrojen FCC hücresi bulunur. Kübik bor nitrür için kafes sabiti $a=0,3615$ nm'dir ve bu, elmasinkine çok yakındır ($a=0,3567$ nm). Elmas durumunda atomlar arasındaki bağ tamamen kovalent iken c-BN, kullanılan iyoniklik ölçeğine bağlı olarak 0,26 ile 0,48 arasında iyoniklik sergiler. Elmas gibi c-BN de altıgen malzemeden yüksek sıcaklık ve yüksek basınçta oluşur. Elmas ve c-BN, sırasıyla 5,5 ve 6,4 eV enerjili geniş bant aralıklarına sahiptir (Izyumskaya ve ark., 2017). Aynı zamanda c-BN elmadan sonra sertlik ve termal iletkenliğe sahiptir, ancak termal ve kimyasal stabilite oksidasyonu elmas için 1200°C iken c-BN için 600°C ve grafitizasyon sıcaklıkları elmasın 1500°C 'ye karşı c-BN'ün 1400°C olmasından dolayı c-BN elması geride bırakmaktadır (Solozenko ve ark., 1999). Kübik bor nitrür çok yüksek yaklaşık 5000 kg (33-45 GPa) Vickers sertliğe sahip olmasından dolayı çeşitli endüstriyel uygulamalarında dayanıklı yapı malzemeleri olarak kullanılmasını sağlar. Ve c-BN düşük sıcaklıklarda ince film formunda çökeltilmesi, 1300°C 'ye kadar yüksek sıcaklıklara dayanıklı olması malzeme uygulamalarında daha da çekici hale gelmektedir. Ayrıca, elmas filmlerin aksine, c-BN hem p-tipi hem de n-tipi olarak depolanabilir ve oksit tabakası ile pasive edilebilir.

Kübik bor nitrür, kızılötesi ve görünür spektrumun bir bölümünde saydam olup, bu nedenle optik elementler için koruyucu kaplama olarak aranan bir malzemedir (Mirkarimi ve ark., 1997; Noor Mohammad, 2002; Wentorf, 1957). Kübik bor nitrür ve elmastaki güçlü atomik bağ nedeniyle her iki malzeme de son derece serttir ve mükemmel termal iletkenlerdir. Bu ve diğer özellikler, c-BN'nin şu anda kesici takımların kaplamalarında, aşınmaya ve korozyona dayanıklı kaplamalar, soğutucular ve yüksek sıcaklıklı elektronik cihazlar için neden tercih edildiğini açıklamaktadır (Zhang ve Meng, 2019).

Kübik bor nitrür, geniş bant aralığı, yüksek termal iletkenlik, yüksek elektrik direnci, kimyasal inertlik vb. gibi benzersiz fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı birçok potansiyel uygulama için umut verici bir malzeme olarak ilgi görmektedir (Izyumskaya ve ark., 2017).

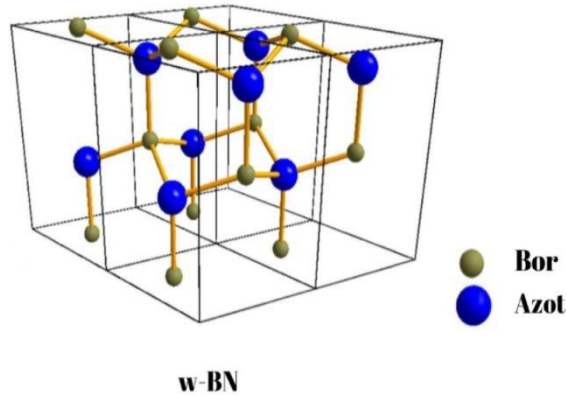


Şekil 2.2. Elmas ve kübik bor nitrürün kristal yapıları (McLean ve Alister, 2023).

2.1.3. Würtzite bor nitrür (w-BN)

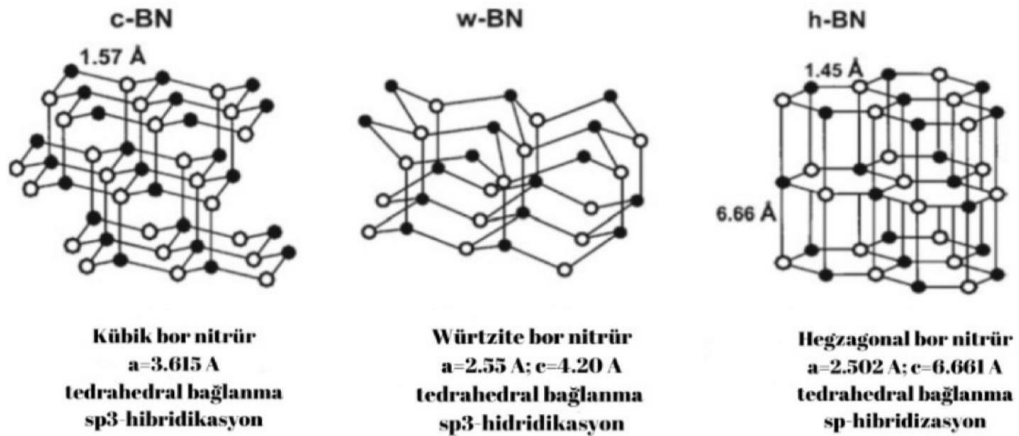
Grafitte olduğu gibi h-BN'ye birkaç GPa basınç uygulandığında sp^2 'den sp^3 bağlı B-N'ye geçiş meydana gelir (Bayda ve ark., 2020). Her ne kadar grafit ile aşırı koşulların uygulanması doğrudan elmas üretse de ortam sıcaklığında yüksek basınç altında h-BN bunun yerine würtzite yapısına dönüşür. Dönüştürülmüş würtzit bor nitrür (w-BN), yapısal olarak karbon sistemi için lonsdaleit olarak bilinen bir mineral fazı olan "altıgen elmas" fazına benzer. Simülasyonlar hem w-BN hem de lonsdaleitin elmastan daha sert olma potansiyelini göstermiştir (Pan ve ark., 2009). Würtzit bor nitrür,

elmasan daha yüksek bir termal stabiliteye sahip olduğundan, yeni bir ultra sert malzeme olarak umut verici bir adaydır (Spencer, 2021).



Şekil 2.3. Würtzite bor nitrür kristal yapısı (McLean ve Alister, 2023).

GaN, AlN ve InN gibi diğer yarı iletken 3A grubu nitrürler optoelektronik gelişiminde etkili olmuştur; hepsi wurtzite yapısında stabildir. Bu nedenle w-BN'nin özelliklerini anlamak ve belirlemek önemlidir. Ne yazık ki, w-BN'yi küçük miktarlardan (büyük, yüksek kaliteli bir kristal gibi) daha fazla sentezlemenin zorluğu nedeniyle, w-BN'un fiziksel özelliklerine ilişkin çok az çalışma yapılmıştır (Nagakubo ve ark., 2013). C-BN ve w-BN kompozitleri, diğer c-BN 30 formlarına göre tek kristal ve çok kristalli elmasın sertliğine daha yakın sertlik işareti göstermiştir (Dubrovinskaya ve ark., 2007). W-BN'nin sertliği henüz belirlenmemiştir ve bir nanokompozitteki sertliğin yükselmesine nasıl katkıda bulunduğu anlaşılmaması belirsizdir (Spencer, 2021).



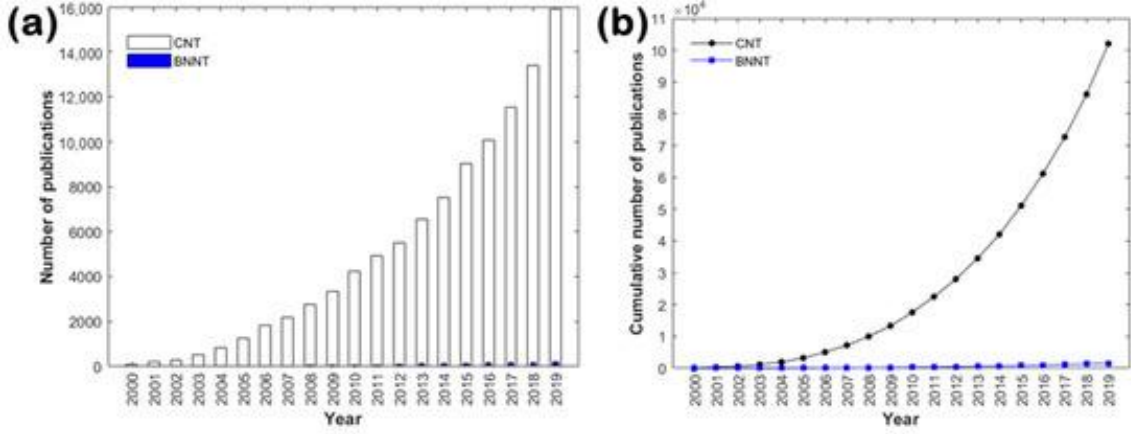
Şekil 2.4. Bor nitrür kristal yapıları (Haubner ve ark., 2002; Jawaid ve Khan, 2023).

Çizelge 2.2. BN fazlarının yapısal özellikleri.

Faz	h-BN	c-BN	w-BN
B-N bağ uzunluğu	1.45	1.57	1.55
Bağ hibridizasyonu	sp ²	sp ³	sp ³
Bir A	2.5043	3.616912	2.5494
B A	6.656213	-----	4.2112
Uzay grubu	P63/mmc	F43m	P63mc
İstifleme sırası	AA'...	ABC...	AA'
Yoğunluk (g cm ⁻³)	2.214	3484.712	3.467.412
Molar hacim (cm ³ mol ⁻¹)	10.89216	7.118316	7.14516

2.1.4. Bor nitrür nano tüpler (BNNT)

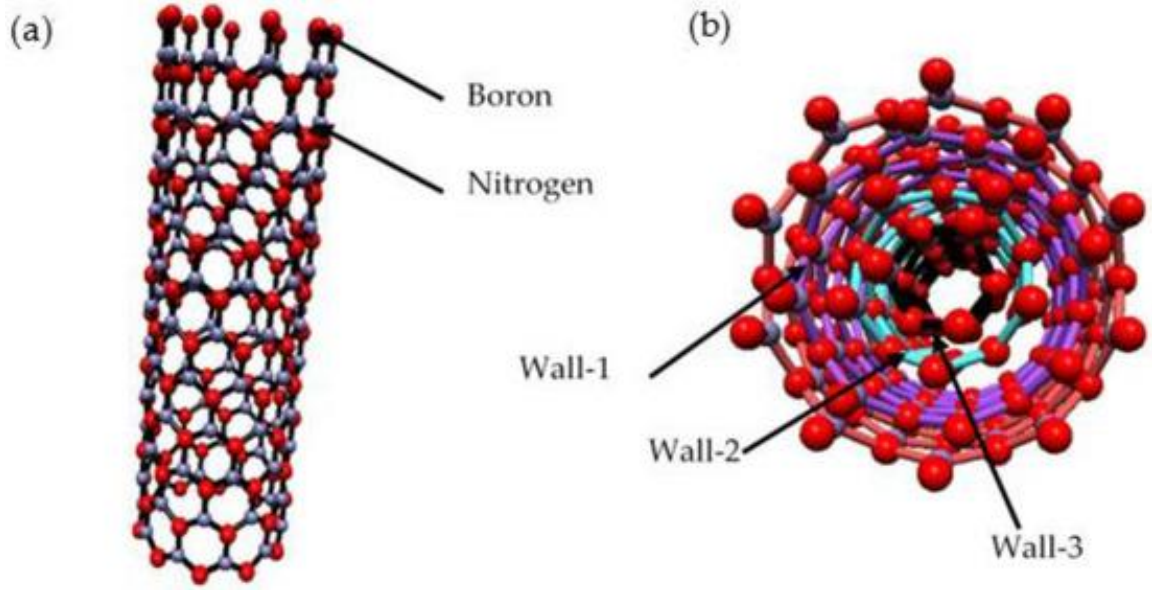
Bor nitrür nanotüpü (BNNT) ilk olarak 1994'te teorik olarak rapor edilmiş ve sonraki yıl deneysel olarak üretildiğinden beri, en ilgi çekici karbon olmayan nanotüplerden biri haline gelmiştir (Golberg, 2010; Kakarla ve Kong, 2022). Karbon nanotüpler (CNT'ler) için bir nanomalzeme karşılığı olarak BNNT'lerin araştırılması ve geliştirilmesinde çok fazla ilgi duyuldu. BNNT'ler, karbon atomlarının altıgen bir kafeste düzenlenmiş bor ve nitrojen atomlarıyla değiştirildiği silindirik rulolar olduklarından, CNT'lere yapı olarak benzerdir (Kakarla ve Kong, 2022). BNNT'ler metalik veya yarı iletken CNT'lerle karşılaştırıldığında, bir BNNT, temelde tüp geometrisinden bağımsız olarak, yaklaşık 5 eV'lik bir bant aralığına sahip bir elektrik yalıtkanıdır (Golberg, 2010). Olağan üstü bir Young modülüne (~1,2 Tpa) sahip olmasına rağmen, BNNT'ler literatürde CNT'lerden çok daha az ilgi görmüştür (Kakarla ve Kong, 2022; Wang ve ark., 2010). Daha spesifik olarak, 2000 ve 2019 yılları arasında BNNT'ler ve CNT'ler hakkında hakemli yayın sayıları daha azdır (Golberg, 2010; Kostoglou ve ark., 2020; Wang ve ark., 2010). Bu durumun başlıca nedenlerinden biri, BNNT'lerin sentezlerinin CNT'lerden çok daha zor olmasıdır (Kostoglou ve ark., 2020; Wang ve ark., 2010). Son bir incelemede tartışıldığı gibi, BNNT'lerin büyümesi genellikle aşırı yüksek büyüme sıcaklıkları (>1300 °C) gerektirir ve özel enstrümantasyon veya tehlikeli kimyasallar gerektirir olmasıdır (Wang ve ark., 2010).



Şekil 2.5. (a) CNT ler ve (b) BNNT lerin 2000 ve 2019 yılları arasında yapılan yayın sayıları (Kostoglou ve ark., 2020).

Ek olarak, BNNT'ler yüksek kimyasal kararlılığa, mükemmel mekanik özelliklere ve yüksek termal iletkenliğe sahiptir (Golberg, 2010; Kakarla ve Kong, 2022). Bu özellikler hakkında detaylı bilgiler sonraki aşamalarda belirtilmiştir. Bu tür benzersiz özellikler, BN nanotüplerini ve nanolevhalarını optoelektronik nanoaygıtlar, kompozitler, yarı iletken cihazlar, hidrojen depolama için nano dolgu maddeleri ve biyomedikal ve doku mühendisliği uygulamalarında ortaya çıkan bir malzeme dahil olmak üzere çeşitli uygulamalar için araştırma ve geliştirmede büyük ilgi görmüştür (Golberg, 2010; Kakarla ve Kong, 2022).

CNT ile mükemmel şekilde eşleşen elektriksel olarak yalıtkan substratlar ve grafen kafesleri gibi çeşitli potansiyel alanlarda umut vadeden bir nanomalzeme haline getirir (Golberg, 2010). BNNT'lerin, CNT'lere kıyasla önemli ölçüde farklı olan önemli bir özelliği, atmosferik koşullarda bile üstün yüksek sıcaklık dirençleriyle ilgilidir ve bu, aşırı koşullara dayanması gereken sağlam malzemelerin gerekli olduğu yeni uygulamalar (örneğin havacılık endüstrisi) için yeni yollar açar (Kostoglou ve ark., 2020).



Şekil 2.6. (a) BNNT'lerin (kırmızı—bor, mavi—azot) ve (b) çok duvarlı BNNT'lerin gösterimi (Kakarla ve Kong, 2022).

2.2. Bor Nitrür Nano Malzeme Özellikleri

BN ve bor nitrür kristal yapıların mekanik, optik, elektronik ve termal özelliklerini ile ilgili yapılan çalışmalar ve yapılması planlanan çalışmalar hakkında literatör özeti:

2.2.1. Mekanik özellikler

Bor nitrür (BN) nanotabakaları gibi iki boyutlu (2D) nanomalzemeler, kompozit, nanoelektromekanik sistemler ve algılama gibi çok çeşitli uygulamalar için yararlı olabilecek birçok büyüleyici özelliğe sahiptir. Bu nanomalzemelerin mekanik özelliklerinin araştırılması bu nedenle önemlidir (Falin ve ark., 2017).

Nanotüpler ve grafen gibi karbon nanosistemleri ile ilgili literatür çok geniş olmasına rağmen, bor nitrür sistemlerine daha az ilgi gösterilmiştir. Bununla birlikte, BN nanoyapıları elektriksel olarak yalıtılmış özellikler, temel olarak güçlü kimyasal ve termal stabilite sergiler, aynı zamanda mükemmel termal iletkenlikler ve kütle algılama yetenekleri bulunmaktadır (Chowdhury ve Adhikari, 2011; Golberg, 2010). Karbon nanotüplerin aksine, BN nanotüplerinin tamamı yarı iletkendir; ayrıca, kiraliteden bağımsız olarak çapı 9,5 Å'dan büyük olduğunda BN nanotüpünde sabit geniş bir bant

aralığı (5,5 eV) bulunurken, küçük BN nanotüpleri boyuta bağlı ilginç elektronik ve manyetik özellikler gösterir (Boldrin ve ark., 2011).

Yüksek sertlik, yüksek sıcaklık dayanımı, düşük termal genleşme katsayısı, yüksek elektriksel iletkenlik ve mükemmel kimyasal direnç özelliklerine sahip bir çok uygulamada karşılaştığımız BN kristal yapılarından h-BN, c-BN ve BNNT lerini inceleyecek olursak:

2.2.1.1. Hegzagonal bor nitrürün(h-BN) mekanik özellikleri

Hegzagonal bor nitrür, 1.000 GPa civarında çok yüksek bir Young modülü sergilediği bilinirken (Lee ve ark., 2008). Tek katmanlı h-BN'nin aynı zamanda tek katmanlı olarak 716 ve 977 GPa arasında yüksek bir Young modülüne sahip olduğu tahmin edilmiştir (Aubendorf ve ark., 2006; Thomas ve ark., 2016). Bununla birlikte, kimyasal buhar birikimini(CVD) ölçen ilk deneyler sentezlenen h-BN'nin bu tahminlerden çok daha düşük 200-500 GPa olduğunu gösterdi (Song ve ark., 2010). Daha sonra Kim ve ark. Fe üzerinde geniş alanlı, çok katmanlı h-BN sentezlendi ve son derece yüksek Young modülü, yani 1.160 GPa sergilendiğini gözlemlediler (Kim ve ark., 2015). İlginç bir şekilde, grafenin aksine, h-BN'nin mekanik özellikleri, sınırlı sayıda katmana sahip olmasına bağlı değildir (McLean ve Alister, 2023).

Hegzagonal bor nitrürün atomik tabakalarını elde etmeye yönelik ilk çaba, BN tabakasının mekanik olarak soyulduğu veya yarıldığı mekanik pul pul dökülme tekniğidir. Bu yöntem ilk olarak 2004 yılında grafeni izole etmek için kullanıldı ve o zamandan beri diğer birçok katmanlı malzemeye uygulandı (Balbuena ve ark., 2004). Hegzagonal bor nitrür katmanları yapışkan bir bantla soyulabilir, bir alt tabakaya yapıştırılabilir ve optik mikroskopla tanımlanabilir. Bu yöntem, fizik ve optoelektronik alanındaki çalışmalarda onlarla çalışmayı kolaylaştıran kalınlık ve daha büyük yanal boyut gibi karakteristik özelliklere sahiptir (Gorbachev ve ark., 2011; Meyer ve ark., 2009).

Hegzagonal bor nitrür mekanik olarak pul pul dökülmesinin bir başka yolu da doğrudan çekme kuvveti yerine kesme kuvvetlerinin kullanılmasıdır. Bu, hafif ıslak bilyalı frezeleme işlemleriyle yapılır. Nitrojen atmosferi (N_2) altında, bir h-BN tozu öncüsü katmanları nazikçe keser ve bilya darbesini ve kirlenmeyi azaltmak için öğütme maddesi olarak benzil benzoat kullanılır (Li ve ark., 2011). Bu, yapışkan bantla soyularak kalınlığı 10 nm'den az olan katmanlar üretildi (Sperber, 2016).

2.2.1.2. Kübik bor nitrürün (c-BN) mekanik özellikleri

Yapısal olarak elmasa benzeyen c-BN, çok çeşitli tekniklerle karakterize edilen elmas benzeri özellikleri paylaşır. Kübik bor nitrür keşfinin ardından c-BN'nin elması çizebilecek kadar sert olduğu iddia edildi (Wentorf, 1957). Doğal olarak bu, mekanik özelliklerinin karakterizasyonuna ve sert seramik aletlerde kullanılmasına yol açtı, ancak ilk başta c-BN özelliklerine ilişkin birçok araştırma patentler yoluyla rapor edildi (Industries, 1982). Elmasın yerini alan BN daha yaygın hale geldi, sentez maliyetlerini düşürme ve aynı zamanda sentezlenen malzemenin sertliğini artırma çabaları çoğaldı. Bu açıdan önemli bir gözlem, alt tabakanın mekanik özelliklerin ölçümünü de etkileyebilmesiydi (McLean ve Alister, 2023).

Kübik bor nitrür filminde stres gelişimi yaygındır ve önemli bir araştırma çabasıdır film stresini azaltmak ve üretilen filmde h-BN'ye kıyasla c-BN içeriğini artırmak için büyüme sürecini optimize etmek için yapılmış. Bu sert malzemenin mekanik açıdan üstün formunu ortaya çıkarmak için yeni c-BN polimorfları teorik olarak araştırılmaktadır (McLean ve Alister, 2023; Wentorf, 1957).

Çok kristalli c-BN, tek kristalli c-BN'ye göre gelişmiş mekanik özellikler sergilemeye başladıkça, araştırma çalışmaları yüksek düzeyde nanoyapılı c-BN'nin sentezlenmesine yönelmeye başladı. Dubrovinskaia ve arkadaşları, tek kristalli c-BN'ye kıyasla sertliği %100 arttıran toplanmış bir c-BN nanokompozitinin sentezini rapor etmiştir. Ultra ince taneler 14 nm, Hall- Petch etkisi nedeniyle ölçülen Vickers sertliğinin 85 GPa olmasını sağladı (McLean ve Alister, 2023).

2.2.1.3. Bor nitrür nano tüplerin (BNNT) mekanik özellikleri

Bor nitrür nanotüpleri (BNNT'ler) hafif, güçlü, termal ve kimyasal olarak kararlı bir boru şeklinde nanoyapı türüdür ve polimer nanokompozitler için araştırılan tüm takviye edici nano dolgu türleri arasında giderek artan ilgi görmüştür (Chopra ve ark., 1995; Rubio ve ark., 1994). BN'nin düzlemsel aşamalarıyla karşılaştırıldığında, BNNT'lerin mekanik özelliklerinin ölçülmesi sorunlu olabileceğine karşın Young modüllerine ihtiyaç duyulmuştur. Araştırmalar, BNNT'lerin 1,3 TPa'ya kadar Young modülüne ve 33 GPa'ya kadar gerilme mukavemetine sahip olduğunu göstermiştir; bunların her ikisi de saf karbon muadilleri olan karbon nanotüplerle (CNT'ler) karşılaştırılabilir düzeydedir. Kavramsal olarak, BNNT'lerin, kısmen yüksek polarize

elektiriksel özelliklerinden ve bunun sonucunda polimerlerle güçlü Coulomb etkileşimlerinden dolayı, polimerlerle güçlü bağlanma arayüzleri oluşturabildikleri öngörülmektedir (Cohen ve Zettl, 2010). Ancak BNNT-polimer arayüzlerinin mekanik gücü bugüne kadar büyük ölçüde keşfedilmemiş durumda (Chen ve ark., 2015).

Chopra ve arkadaşları, bir transmisyon elektron mikroskobu (TEM) içindeki Young modülünü, destekli bir BNNT'nin rezonans frekansı aracılığıyla, zorlanmış bir osilatörle çalıştırarak ve termal titreşim genliğini ölçerek ölçmüşlerdir (Zettl ve Chopra, 1998). Buradaki Young modülü MWBNNT'ler için 1220 GPa olarak ölçüldü. Suryavanshi ve arkadaşları, 34-94 nm çapındaki MWBNNT'lerin, uygulanan bir elektrik alanı yoluyla rezonans yapmak üzere dirsekli bir tüpün yapıldığı TEM bazlı bir yöntem kullanılarak ortalama 722 GPa'lık Young modülü sergilediğini bulmuşlardır (Suryavanshi ve ark., 2004). Golberg ve arkadaşları kuvveti ve piezo yer değiştirme eğrilerini doğru bir şekilde kaydetmek için entegre bir TEM-AFM piezo tahrikli tutucu kullanmışlardır (Golberg ve ark., 2007). BNNT'leri piezo-hareketli bir Al tel ve bir Si konsol arasında sıkıştırarak Young modülünün 500-600 GPa olduğunu ölçtüler. Benzer şekilde, Arenal ve arkadaşları tarafından kullanılan modifiye edilmiş bir TEM-AFM kurulumu, SWBNNT'lerin Young modüllerinin ölçülmesine olanak tanıdı (Arenal ve ark., 2011). Young modülünün belirlenmesi duvar kalınlığının bilinmesini gerektirir ve bunun nasıl tanımlandığına bağlı olarak Young modülü önemli ölçüde değişir. Duvar kalınlığının grafitin katmanlar arası aralığıyla aynı olduğu varsayılırsa, 0,34 nm; Young modülü 250 GPa, bazı analitik yaklaşımlara göre kalınlık 0,07 nm ise Young modülü 1110 GPa'dır. MWBNNT Young modülleri üzerine yapılan ayrı bir çalışma, atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ölçümleri yoluyla benzer şekilde geniş bir aralık rapor etmiştir, 1.800 ± 300 GPa. Klasik potansiyelleri ve sıkı bağlamayı kullanan teorik çalışmalar Young'ın SWBNNTS modülünü 800 ile 1000 arasına yerleştirir (McLean ve Alister, 2023).

2.2.2. Termal özellikler

Bir malzemenin termal iletkenliği (K), ısıyı taşıma özelliğini ölçer ve Fourier yasasını ($Q = -K\Delta T$) kullanarak ölçülür, burada Q birim alan başına düşen ısı akışını temsil eder ve ΔT iletken medyanın (yüksekten düşük bölgelere) sıcaklık gradyanını temsil eder. Isı iletkenliği atomik parametreler gibi çeşitli parametrelere bağlıdır, bunlar atomik ağırlık, akustik mod frekansı, anizotropik yapı ve bağ güçleri gibi çeşitli

parametrelerdir. Genel olarak, ağır elementler fonon modu frekansını bastırarak, grubun hızını yavaşlatarak ve termal iletkenliği düşürerek daha düşük termal iletkenliğe sahiptir. Ancak, ısı transfer mekanizması metalik ve metal olmayan malzemelerde farklıdır (Chang ve ark., 2008; Zhi ve ark., 2010). Bu, toplam termal iletkenliğin elektron ve fonon katkılarının toplamı olduğu için, yani $KT = K_p + K_e$ 'dir ve her bir bileşen farklı malzemelerde farklı termal iletkenlik yüzdesini hesaba katar. Örneğin, termal enerji, metal olmayan katı maddelerde (K_p) genellikle kafes veya atomik titreşimlerle taşınırken, ağır katkılar içeren yarı iletkenlerde veya metallerde (K_e) serbest elektronların katkısı baskındır. BN'de çok fazla serbest elektron olmadığından, fononlar ana ısı taşıyıcılar haline gelir ve bu nedenle tüm BN tabanlı nanomalzemeler dikkate değer termal iletkenlere sahiptirler (Zhi ve ark., 2010).

Yüksek kimyasal ve termal kararlılığın yanı sıra, h-BN'in olağanüstü termal iletkenliği, yüksek sıcaklık uygulamaları için ideal bir aday yapar. Ancak, anizotropik tabaka yapılı kristal yapılı h-BN'deki farklı kütle düzlemlerinde termal iletkenlik arasında büyük bir farklılık vardır. Örneğin, basal düzleminde termal iletkenlik $390 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ile $2000 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ arasında değişmektedir (McKinney ve ark., 2019). İlginç bir şekilde, c-BN, h-BN'den daha yüksek bir termal iletkenliğe sahiptir (Cai ve ark., 2019). Bu, c-BN'nin daha simetrik ve izotropik olması nedeniyle c-BN'nin kristal iletkenliğinin bulk h-BN'nin iletkenliğinden daha yüksek olmasıdır. Benzer şekilde, çeşitli çapları olan BNNT'ler gibi nano yapıdaki h-BN yapıları, oda sıcaklığındaki $350 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 'lik mükemmel termal iletkenlik sergileyebilir (Lindsay ve Broido, 2011). Bu termal iletkenlik değeri, karbon nanotüplerden (CNT'ler) daha yüksektir, çünkü BNNT'ler daha zayıf bir fonon-fonon saçılması yapısına sahiptir (Chang ve ark., 2006).

Özetlemek gerekirse, BN nanomalzemelerin çoğu mükemmel termal iletkenlik sergiler, en iyi iletken BN alotropu Z-BNNR ve onu A-BNNR takip eder, çünkü bağlanma kenarları, ek iletken kanallara ve yapısal kararlılığa katkıda bulunur. Bu nedenle, düşük içsel termal iletkenliğe sahip malzemelere kolayca entegre edilerek genel termal performansı artırabilirler. Bununla birlikte, w-BN, r-BN ve BN nanokafesin termofiziksel özelliklerine ilişkin ek analizler, termal performanslarının doğrulanması için gereklidir (Wong ve Vall'es, 2023).

2.2.2.1. Hegzagonal bor nitrür (h-BN) termal özellikleri

Yüksek termal iletkenliğe ve dikkat çekici kimyasal eylemsizliğe sahip bir yalıtkan olarak h-BN, diğer geleneksel ısı transfer malzemelerinden daha fazla avantaja sahiptir (Xiao, 2016).

Pek çok araştırmacı, h-BN'nin termal iletkenlik değerlerini 300 ila 2000 W m⁻²¹ K⁻¹ arasında hesaplamıştır; bu değerler, çoğu metalik ve seramik malzemeninkinden çok daha yüksektir (Ouyang ve ark., 2010; Sevik ve ark., 2011). Benzer kristal yapıları, kafes sabitlerini, birim hücre kütlelerini ve fonon dağılımlarını paylaşırsalar da, mantık dışı bir şekilde h-BN'nin termal iletkenlik değerleri grafeninkinden (1500-2500 W m⁻²¹ K⁻¹) biraz daha düşüktür. Bu fark, BNNS için daha yumuşak fonon modlarına ve B ile N arasındaki kütle farkına atfedilebilir (Sevik ve ark., 2011; Xiao, 2016).

Lindsay ve arkadaşları fonon Boltzmann taşıma denklemini kullanarak tek katmanlı h-BN için oda sıcaklığında termal iletkenliğin 600 W m⁻¹ K⁻¹'den fazla olduğunu hesaplamışlardır (Lindsay ve Broido, 2011). Bunlar, termal iletkenliğin izotopik saflığıyla önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Ek olarak, h-BN'nin termal iletkenliği, izotopik artışla birlikte kristalit boyutunda belirgin şekilde bir artış gözlemlenmiştir. Kristalit boyutunun 1 µm'ye artırılması %40, 10 µm'ye ise %200 artış sağlandığı belirtilmiştir (Sichel, 1976). Cai ve ekibi, Raman spektroskopisi aracılığıyla ölçülen tek katmanlı h-BN için oda sıcaklığında 751 W m⁻¹ K termal iletkenlik rapor etmiştir. Bu çalışmada, h-BN katman sayısının artmasıyla termal iletkenliğin de azaldığı görülmüştür, iki katman için 646 W m⁻¹ K⁻¹ ve üç katman için 602 W m⁻¹ K⁻¹ düzeyine düşmüştür (McLean ve Alister, 2023; Cai ve ark., 2019).

Grafit gibi, h-BN de güçlü bir anizotropik termal genleşme katsayısına sahiptir (Kelly, 1975). B ve N arasındaki güçlü bağ, h-BN'İ anizotropik termal olarak izole edici yapar. Güçlü kovalent bağlar nedeniyle, BN alatropları üstün termal kararlılık sergiler (Pakdel ve ark., 2014). Hegzagonal bor nitrür özellikle havada 1273 K'de, vakumda 1673 K'de ve inert bir atmosferde yaklaşık 2850 °C'de bozulur (Paine ve Narula, 1990). Her durumda, sağlam bağlanma deseni, teorik olarak 1700–2000 W m⁻¹ K⁻¹ termal iletkenlik sağlar, bu da onu doğada şu ana kadar mevcut en termal iletken malzemelerden biri yapar (Duclaux ve ark., 1992; Roy ve Zhang, 2021).

2.2.2.2. Kübik bor nitrürün (c-BN) termal özellikleri

Elmasın termal iletkenliğinin ölçülmesinden bu yana, oda sıcaklığında en yüksek termal iletkenliğe sahip kütleli malzeme olarak sınıflandırılmıştır (Berman ve ark., 1953). Ayrıca sentetik izotopik olarak saf (C^{12}) bir elmasın, ^{13}C 'yi daha güçlü bir şekilde saçan fononlar nedeniyle termal iletkenliği arttırdığı ve ölçülen termal iletkenliği azalttığı gösterilmiştir (Olson ve ark., 1993; Wei ve ark., 1993). Novikov ve ekibi c-BN için de bu durumun geçerli olduğunu göstermişlerdir, izotopik saflık B veya B termal iletkenliği teorik olarak önemli ölçüde hatta 125 katına kadar arttırmaktadır (Morelli ve ark., 2002; Novikov ve ark., 2000). Chen ve ekibi doğal N içeren ve farklı B izotop kompozisyonları içeren dört set c-BN kristali hazırlamışlardır ve bunlar Raman ve uçuş zamanlı ikinci iyon kütle spektrometrisi (TOF-SIMS) ile doğrulanmıştır (Rani ve Chakraborty, 2020). Termal iletkenliği ölçmek için lazer pompa-sonda tekniği, mekansal ve zamansal termoreflektans ile birleştirilmiştir. Doğal c-BN (%78.3 ^{11}B) $880 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ termal iletkenliğe sahip olduğu belirtilmiştir. İnanılmaz bir şekilde, ^{11}B %99.2'ye ulaştırıldığında termal iletkenlik $1.660 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 'a yükselir ve %99.3 ^{10}B için $1.650 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 'a yükselir, çünkü doğal c-BN ile meydana gelen fonon-izotop saçılmasının kaldırılmasıyla gerçekleşir. Doğal c-BN'nin ve izotopik olarak iyileştirilmiş c-BN'nin termal iletkenliğini çeşitli yarı iletkenler ve bor içeren malzemeler aralığında karşılaştırarak fonon saçılma süreçlerinin farklı şekillerini vurgulanmıştır (McLean ve Alister, 2023).

2.2.2.3. Bor nitrür nano tüplerin (BNNT) termal özellikleri

BNNT'ler, yarı tek boyutlu bir nanomateryal olarak yüksek termal iletkenlik ve kontrol edilebilir termal iletkenlik avantajlarına sahiptir. Bu nedenle, BNNT'ler yeni bir yarı iletken türü ve aynı zamanda müthiş bir termal iletken malzeme olarak kabul edilmektedir (Song ve ark., 2010; Stewart ve ark., 2009). Ayrıca bor nitrür nanomalzemesi, mükemmel termal stabilitesi ve yüksek sıcaklıklarda oksidasyon direnci nedeniyle nano-elektromekanik sistemlerin inşası için ideal malzemelerden biri haline gelmiştir (Huang ve ark., 2020; Khan ve ark., 2013; Kubota ve ark., 2007).

Çok duvarlı bor nitrür nano tüplerin (BNNT) termal iletkenliğinin oda sıcaklığında $175 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ olduğu ve çok duvarlı karbon nano tüplerinden (CNT) ($250 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) düşük olduğu gözlenmiştir. Ancak Chang ve ekibi yüksek çözünürlüklü bir

transmisyon elektron mikroskobu ile görüntülemeyi sağlayan mikro işlenmiş bir test düzeneği kullanılarak izotropik olarak zenginleştirilmiş, bireysel, izole çok katlı born nitrit nanotüplerin sıcaklığa bağlı termal iletkenliği karbon nanotüpe rakip olacak şekilde %50'lik bir artış sağlamışlardır (Chang ve ark., 2006).

Daha sonra Jiang ve arkadaşları, klasik Tersoff türetilmiş bir potansiyel kullanarak BNNT'lerdeki fonon saçılmasını daha ayrıntılı bir şekilde inceledi ve termal iletkenliğin BNNT'nin vida simetrisi tarafından etkilendiğini bulmuşlardır (Jiang ve Wang, 2011). Belkerk ve arkadaşları tarafından da, termal özelliklerine dik olarak hizalanan BNNT filmlerinin incelenmesi yapıldı. Bir fototermal teknik kullanılarak, büyüme öncesinde SiO₂ substratı üzerine püskürtülerek biriktirilen bir Pt ince film termometresinin kullanıldığı bir fototermal teknik kullanılarak incelenmiştir; Pt termometresinin sıcaklığı lazer darbesiyle değiştirildi ve BNNT'lerin termal iletkenliğinin büyüme süreci sırasında ölçülmesine izin verildi. BNNT'lerin kalınlığı 10 µm'den 28 µm'ye çıktıkça, termal iletkenlik 55 W m⁻¹ K⁻¹'den 170 W m⁻¹ K⁻¹'e yükseldi. Görünür ortam teorisi, bu termal iletkenlikleri, 10 µm ve 28 µm kalınlığındaki BNNT filmlerin katı parçaları için sırasıyla 470 W m⁻¹ K⁻¹ ve 2.400 W m⁻¹ K⁻¹'e çevirdi (Belkerk ve ark., 2016).

2.2.3. Optik özellikler

Spektroskopi ve mikroskopi gibi yöntemler kullanılarak yapılan optik karakterizasyon, bir malzemenin yapısına ilişkin (iç bağlanma yapısı veya malzemenin kendisinin morfolojisi gibi) önemli bilgiler sağlar. Günümüzde Raman spektroskopisi, bir BN ürününün kimliğini ve saflığını doğrulamak için in situ ve ex situ olarak kullanılabilir ve aynı zamanda basınç ve sıcaklık değişiklikleri gibi bir uyarıya yanıt olarak malzemedeki atomik değişiklikleri izlemek için de kullanılabilir (Cai ve ark., 2017). Kızılötesi (IR) ve Raman spektroskopisi tipik olarak birbirleriyle ve diğer karakterizasyon teknikleriyle birlikte kullanılır; ağırlıklı olarak fotoluminesans (PL) spektroskopisi (burada lazerler absorpsiyonu indükler ve bir materyalden fotonların müteakip emisyonunu araştırır) (Chen ve ark., 2017).

Zayıf IR geçirgenliği ve aktif modların yakınlığı nedeniyle grafit ve CNT'lerin ayırt edilmesi. Öte yandan, polar/iyonik B- N bağlarına sahip olan BN malzemeleri, gelişmiş IR emilimine sahiptir. Raman saçılımının yoğunlukları, Raman saçılımını rezonanssız hale getiren geniş bant aralıklarından dolayı CNT'lere göre daha düşüktür.

Bununla birlikte, her iki spektrumun yorumlanması, fonon frekanslarının doğru bilgisi ve bunların malzemenin yapısından, yani h-BN katmanlarından veya BNNT'lerin çapı nasıl etkilenebileceği ile mümkündür (McLean ve Alister, 2023).

1991 yılında Yong-Nian Xu ve W. Y. Ching tarafından yapılan çalışmalara da kısaca değinecek olursak: hegzağonal, kübik ve würtzite kristal yapıların optik özellikleri hesaplanmış ve mevcut ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Hegzağonal BN için, hareketli elektron saçılması tarafından ölçülen elektron enerji kaybı fonksiyonundaki tüm yapılar hesaplanmış. Kübik BN için, hesaplanan dielektrik fonksiyonu yansıma verileriyle de iyi bir uyum içinde olmuş. würtzit yapıdaki BN için optik veriler mevcut olamamış. Bu sonuçlar, bu üç kristaldeki kristal yapısı ve bağlanma bağlamında tartışılmıştır. Kübik ve hegzağonal BN üzerinde hesaplanan ve ölçülen optik verilerin analizi temelinde, iletkenlik bandı durumlarının doğruluğunun belirlenmesinin, bant boşluğu büyüklüğüne değil, optik emilim eğrilerindeki ana yapıların çoğaltılmasına dayanması gerektiği öne sürülmüştür. Yerel yoğunluk teorisince hesaplanan yüksek iletkenlik bandı durumlarının doğruluğu güçlü bir şekilde enerji ve momentum bağımlı olduğu. Ayrıca, optik boşluk belirlenmesi, doğrudan ve dolaylı geçişlerin farklı rolleri ve verilerin düşük frekans bölgesine ekstrapolasyonu gibi zorluklar nedeniyle karmaşık olduğu belirlenmiş (Xu ve Ching, 1991).

Çizelge 3'te her BN fazı için kırılma indisi, sınır modları, optik bant aralığı ve Raman uyarımlarının optik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.3. Bor nitrür kristal yapıların optik özellikleri (Xu ve Ching, 1991).

Optik Özellikler	c-BN	h-BN	BNNT
Kırılma indisi	2.11753	1.96131	
		2.17135	
		2.22134	
Brillouin bölgesi Sınır modları (cm-1)	1232	823	805
	100053	1382149	1380156
	1269	823.5	809
	1027110	1365135	1369152
	1304	828	810
	1056107	1367148	1380155
	1306.4		813

	1055.6113		1389157
Optik bant boşluğu (eV)	6.36 (Evans)	6.25(toplu)	5.75163
		7.3144 (tek katmanlı)	5.8179
Raman uyarımları Modu (cm ⁻¹)		28	
		1366150(toplu)	1356

2.2.3.1. Hegzagonal bor nitrür (h-BN) optik özellikler

Hegzagonal bor nitrür üzerinde birçok optik ve enerji kaybı ölçümü yapılmıştır. İlk veriler çoğunlukla zayıf örnekler nedeniyle doğası gereği çok çelişkiliydi (Büchner, 1977; Mamy ve ark., 1981). O dönemde hesaplanan bant yapıları yeterince doğru değildi ve yardımcı olamadı. Son zamanlarda, iyi karakterize edilmiş h-BN örnekleri üzerinde dikkatlice yapılan inelastik elektron saçılma spektrumu ölçümleri mevcut hale geldi. Optik dielektrik sabitler ve diğer özellikler, enerji kaybı spektrumlarından çıkarılarak analiz edilebilir hale geldiği belirtilmiştir (Tarrio ve Schnatterly, 1989; Xu ve Ching, 1991).

Ab-initio çalışması kullanarak, yoğunluk fonksiyonel teorisi (DFT) temel alınarak hegzaonal bor nitrürün (h-BN), 0 ile 25 eV enerji aralığında dielektrik fonksiyonlar, soğurma katsayısı, kırılma indisi ve optik yansımaya gibi optik özellikler incelenmiştir. Maksimum soğurma, 14.87 eV'de bir tepe noktasıyla ultraviyole bölgede görülür ancak görünür bölgede herhangi bir soğurma olmadığı. Kırılma indisi, sıfır enerji sınırında 1.17 ölçeğe ve UV bölgesinde 1.5'e kadar ölçeklenebilir olduğu gözlenmiştir (Satawara ve ark., 2020). Ve Optik emilim katsayısı ve yansımaya hesaplamaları, h-BN'nin görünür bölgede şeffaf bir malzeme olduğunu ve emilim ve yansımının sadece UV bölgesinde meydana geldiğini, bu özelliğin ise görünmez olacak şekilde UV dedektör cihazlarının yapımı için uygun olduğunu göstermiştir (Ravan ve Jafari, 2019; Satawara ve ark., 2020).

Hegzagonal bor nitrürün optik özellikleri ile ilgili yapılan diğer bir çalışmada hegzaonal bor nitrür (h-BN) ince filmlerin optik özelliklerinin incelenmesidir. Filmler Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi, UV-görünür geçirgenlik ve yansımaya spektrumu ile h-BN'ye yaklaşan geniş bir optik bant aralığı (biriktirilmiş film için 5,86 eV ve tavllanmış film için 5,97 eV) karakterize edilmiştir. BN tek kristali, radyo frekansı (RF) önyargılı tıynetron püskürtme ve 970 K'de biriktirme sonrası tavlama ile başarılı bir şekilde hazırlanmıştır (Jiang ve Wang, 2011).

Hegzagonal bor nitrürü için birçok çalışmada elde edilen bant aralıkları mevcuttur. Ancak Watanabe ve ekibi tarafından yüksek kaliteli bir h-BN kristalinin derin UV absorpsiyonuna ilişkin önemli lüminesans gözlemleri, h-BN'nin doğrudan bir bant olduğunu kesin olarak kanıtlamıştır. Boşluk malzemesi bu eksiton soğurma bantları nedeniyle bant aralığının 5.971 eV olduğu tahmin edildi (Watanabe ve ark., 2004). Evans ve ekibi direkt 5.96 eV yaptığı tespitle uyumludur (Evans ve ark., 2008). Watanabe ve ekibi tarafından belirtilen eksiton bağlanma enerjisi 0.149 eV değeri de, Arnaud ve ekibi tarafından GW yaklaşımı 0.72 eV kullanılarak hesaplanandan çok daha azdı (Arnaud ve ark., 2006). Hesaplamaları, alçakta bulunan eksitonların katmanlar içinde sıkı bir şekilde sınırlandırıldığını ve dolayısıyla h-BN'nin 5,95 eV'lik dolaylı bant aralığına sahip olduğunu göstermişlerdir (McLean ve Alister, 2023; Watanabe ve ark., 2004).

2.2.3.2. Kübik bor nitrür (c-BN) optik özellikleri

Pratik uygulamaları düşündüğümüzde, bir malzemenin en önemli optik özelliği muhtemelen bant aralığıdır. Erken teorik çalışmalar, c-BN'nin dolaylı, geniş bir bant aralığına sahip olacağını öngördü (McLean ve Alister, 2023). Çeşitli yöntemler c-BN'nin bant aralığını tahmin etmek için uygulanmıştır, bu yöntemler arasında UV-fotoemisyon ölçümleri, UV emilim spektrumları, ve Yumuşak X-ışını spektrumları yer almaktadır ve bu yöntemler c-BN'nin bant genişliğini 5.8 eV ile 6.4 eV arasında vermiştir (Dovesi ve ark., 1981; Fomichev ve Rumsh, 1968; Powers ve ark., 1995; Xu ve Ching, 1991).

İlk kez Gielisse ve ekibi c-BN'nin optik özellikleri hakkında bilgi sağlamışlardır. Bunlar arasında kırılma indisi, emilim, optik frekanslar ve daha fazlası IR spektroskopisi yoluyla belirlenmiştir (Brafman, 1968). Sonuçlar, Raman spektroskopisi kullanan Brafman ve ekibi tarafından yapılan çalışmayla uyumlu olduğu gözlenmiştir. Daha yeni teorik çalışmalar, lineer yanıt teorisini kullanan Cai ve ekibi tarafından yapılmış ve Gielisse ve ekibinin uzunlamasına optik (LO) ve dik bağlı (TO) tepe frekanslarını desteklemiştir (Cai ve ark., 2007).

IR veya Raman spektroskopisi kullanılarak bir filmdeki c-BN içeriğinin tahmin edilmesi mümkündür. Örneğin, yaklaşık olarak 1.080-1.400 cm^{-1} 'de görülen IR piklerinin yüksekliği, filmin içindeki c-BN oranını verir, ancak bu pikler stres, sıcaklık, film kalınlığı ve stokiyometri tarafından kaydırılabilir (Friedmann ve ark., 1994; Zhang

ve ark., 2003). Benzer bir strateji genellikle mono ve birkaç katmanlı grafen yapılarının yapısal kalitesini rapor etmek için kullanılır ve bunlar genellikle Raman spektroskopisi ile belirlenir. Kübik bor nitrürün Raman pikleri, kusurlarla veya kristalit boyutu azaldıkça genişleyebilir, çünkü bu, malzemede fonon dağılımını etkiler ve dolayısıyla Raman saçılma yoğunluğunu etkiler (Nemanich ve ark., 1981; Werninghaus ve ark., 1997).

2.2.3.3. Bor nitrür nano tüplerin (BNNT) optik özellikleri

Nanotüplerin optik özelliklerinin incelenmesi, nanotüp biliminde yeni bir ilgi alanıdır ve tekil karbon nanotüplerin yapısını karakterize etmek için önemli bir araştırma yöntemi haline gelmektedir (O'Connell ve ark., 2002). Bu durum, karbon nanotüplerle izo yapıda olan bor nitrür nanotüpler (BNNT) için de geçerlidir ve teorik olarak 6 eV'ye yakın bir bant aralığına sahip geniş bant aralıklı yarı iletkenler olması öngörülmektedir (Blase ve ark., 1994). Çok katmanlı BNNT ilk kez 1995 yılında sentezlenmiştir ve tek katmanlı BNNT ise 1996 yılında sentezlenmiştir (Loiseau ve ark., 1996; Chopra ve ark., 1995). Çok katmanlı BNNT (MWBNT), kimyasal buhar biriktirme (CVD), ark deşarj veya kimyasal türev alma ile üretilirken tek katmanlı BNNT (SWBNNT) yalnızca lazer buharlaştırma ile elde edilebilir (Jaffrennou ve ark., 2007; Lee ve ark., 2001).

Farklı tek duvarlı bor nitrür nanotüplerin (SWBNNT'ler) kiralitelerine, tüp uzunluklarına ve tüp çaplarına göre optik özellikleri, yarı deneysel bir Hamiltoniyen üzerinde zamana bağlı lokalize yoğunluk matrisi yaklaşımı ile incelenmiştir. Tek duvarlı bor nitrür nanotüplerin optik aralığının, belirli bir tüp çapındaki kiraliteden bağımsız olduğu bulunmuştur. Boşluk, özellikle tüp çapı küçük olduğunda, optik boşluğun büyük ölçüde kiraliteye bağlı olduğu tek duvarlı karbon nano tüplerin aksine, yaklaşık 5,6 Å'lık bir tüp çapında 5,78 eV'dir. Tek duvarlı bor nitrür nanotüplerin esas olarak 6 eV'nin altında bir ana absorpsiyon zirvesi gösterdiği de bulunmuştur; bu, tek duvarlı karbon nano tüplerin çoklu tepe özelliklerinden çok farklıdır. Üstelik, tek duvarlı bor nitrür nanotüplerin optik özelliklerinin de güçlü bir şekilde anizotropik olduğu ve kiraliteden bağımsız olarak absorpsiyon yoğunluğunda önemli ölçüde yüksek olduğu bulunmuştur; bu, ultraviyole ışık absorpsiyonu gibi gelişmiş uygulamalarda iyi bir potansiyele işaret etmektedir (Ng ve Zhang, 2004).

Çok duvarlı bor nitrür nanotüplerin optik özellikleri lüminesans ve absorpsiyon spektroskopileri aracılığıyla araştırılmaktadır. Katodolüminesans görüntüleme, bor nitrür nanotüplerinin yüksek derecede UV ışıldayan malzemeler olduğunu ve lüminesansın nanotüp boyunca yer aldığını göstermektedir (Jaffrennou ve ark., 2007).

2.3. Bor Nitrür Sentezlenmesi

Bor nitrür sentezi bor ve azot elementlerinin bir araya getirilmesi ile bor nitrür (BN) bileşiği oluşması işlemine bor nitrür sentezi denir. Bor nitrür bileşiği yüksek sıcaklıklar ile gerçekleşen birkaç farklı metotla sentezlenebilir. Bor nitrür nanometre ölçekte teorik olarak 1994 yılında keşfedildikten bir yıl sonra (1995) Chopra ve arkadaşları elektrik arkı ile saf BN sentezlediler. Bu keşiften sonra uzun yıllar BN'ün sentezi için çalışmalar devam etti yüksek sıcaklıkta reaksiyon, kimyasal buhar biriktirme, kimyasal çökeltme gibi yöntemler ile farklı boyut ve yapıda BN nano tüpler üretildi (Chen ve ark., 1999; Zhi ve ark., 2010). Bu yöntemlerin literatördeki karşılığı direk redüksiyon, bor oksitin hidrojen ile reaksiyonu, azot içeren bileşiklerin bor oksit veya oksijen içeren borlu bileşiklerle reaksiyonu, alkali element içeren sistemlerden ve amonyaklı bileşiklerden bor nitrür eldesi şeklinde tanımlanmaktadır (Aydin, 2018). BN sentezi yapılırken sıcaklık, basınç, bileşik oranları ve kullanılan metotlar oluşan BN bileşiğinin yapısal özelliklerini belirler (Kalay ve ark., 2015).

2.3.1. Hegzagonal bor nitrür (h-BN) sentezi ve yöntemleri

Olağanüstü özelliklerinden ve büyük potansiyele sahip olmasından kaynaklı, h-BN bazlı heteroyapıların sentezine önemli çabalar sarf edilmiştir. Sentez yöntemlerini ele alırken "yukarıdan aşağıya" ve "aşağıdan yukarıya" yaklaşımlar olarak sınıflandırılabilen çeşitli teknikler kullanılmış. Sonuç olarak, pul pul dökülme, püskürtme ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) gibi yöntemler ile hegzagonal bor nitrür sentezlenmiştir (Li ve ark., 2019; Wang ve ark., 2017).

2.3.1.1. Kimyasal buhar biriktirme yöntemi

Kimyasal buhar biriktirme, kontrollü koşullarda iyi kalite ve üretkenliğe sahip 2 boyutlu malzemeler üretir. Bu tekniğin prosedürü, inorganik malzemelerin veya dar

filmlerin özel substratlar üzerine biriktirilmesidir. Bu yöntemde malzemelere aşamalar ve boyutlar gibi farklı yönlerde desen verilebilir. Kimyasal buhar biriktirmede katman sayısı, faz, kusurlar ve tane boyutu gibi çeşitli 2 boyutlu malzeme özellikleri, kontrollü bir durumda 2 boyutlu malzemelerin büyütülmesine olanak sağlayacak şekilde ayarlanabilir. Bu teknikle üretilen malzemeler çoğunlukla sürekli büyütülen ve geniş yüzey alanına sahip homojen filmlerdir (Maryam, 2020).

Bor nitrür filmlerinin yüksek sıcaklıklarda biriktirilmesine yönelik kimyasal buhar biriktirme yöntemi ilk kez 1964 te uygulanmış (McLean ve Alister, 2023). Son yıllarda, optimize edilmiş koşullar altında çeşitli substratlar üzerinde istenen h-BN kristallerini elde etmek için çok ilerleme kaydedildi. Hegzagonal bor nitrür, kimyasal buhar biriktirme yöntemi büyüme sıcaklığı, basınç, katalitik substrat vb. gibi birçok faktörden etkilenen karmaşık bir süreçtir (Liu ve ark., 2021). Büyüme parametrelerinin ince ayarı, h-BN tanelerinin veya istenen özelliklere sahip ince filmlerin üretilmesine olanak tanır. Altıgen bor nitrürün alan boyutunun genişletilmesi, çok sayıda uygulama için yüksek kaliteli film elde etmek açısından zordur (Meng ve ark., 2017). Daha önceki aşamalarda, Cu, Pt, Co, Fe gibi farklı katalitik substratlar üzerinde kimyasal buhar biriktirme işlemi yoluyla büyütülen h-BN'nin alan boyutları birkaç mikrometre ile sınırlıydı (Caneva ve ark., 2016; Driver ve ark., 2016; Gao ve ark., 2013; Kim ve ark., 2012). Şimdiye kadar, h-BN'nin alan boyutlarını arttırmak için birçok girişimde bulunulmuştur ve büyük alanlı tek kristalli h-BN, kimyasal buhar biriktirme kullanılarak grafen büyümesine benzer şekilde çekirdeklenme yoğunluğunun kontrol edilmesiyle elde edilir (Gan ve Luo, 2013; Liu ve ark., 2021). Bazı kimyasal buhar biriktirme çalışmaları şu şekildedir:

İlk hegzaonal bor nitrür tek katmanlı filmi, 1990 yılında $B_3N_3H_6$ 'nın Pt ve Ru yüzeyleri üzerinde adsorpsiyonu ve ayrıştırılmasıyla büyütüldü (Paffett ve ark., 1990). $B_3N_3H_6$, doğal bor nitrür stokiyometrisinde C atomlarının alternatif B ve N atomlarıyla ikame edildiği benzen ile karşılaştırılabilir. Bu nedenle hegzaonal bor nitrür katmanlarını büyütmek için iki veya daha fazla gazı ihtiyaç yoktur (Pierson, 1975). Si substratı üzerinde dikey olarak hizalanmış hegzaonal bor nitrür nano-tabakaları, mikrodalga plazma kimyasal buhar biriktirme tekniği kullanılarak BF_3-N_2-H gazlarının bir karışımından 800 °C'de büyütülmüş (Sperber, 2016; Yu ve ark., 2010).

Auwater ve arkadaşları, ayrışan gazlar ve nikel yüzeyi arasında uzun ve sürekli bir etkileşime izin veren daha yavaş ve daha istikrarlı bir ayrışma reaksiyonu sunmak için amonyak borandan daha yüksek stabiliteye sahip olan b-trikloroborazin

kullanmıştır. Tek katmanlı hegzağonal bor nitrür, tek bir katmanda %3'ün altında Cl kapsamıyla elde edilmiş (Auwärter ve ark., 2004).

Ye ve arkadaşları, C ve O içermeyen borazinin çökeltilmesiyle SiBNC lifleri üzerine hegzağonal bor nitriri kapladılar. Çalışmalarında, ortam basıncında kristal hegzağonal bor nitrür çökmesi için amonyak kullanımının ön koşul olduğunu buldular. Aksi takdirde yoğun amorf kaplamalar elde edildi. Borazinin yüksek sıcaklıklarda kararsız olması nedeniyle hegzağonal bor nitrür birikimi için en uygun sıcaklık 1090 °C (Yu ve ark., 2010).

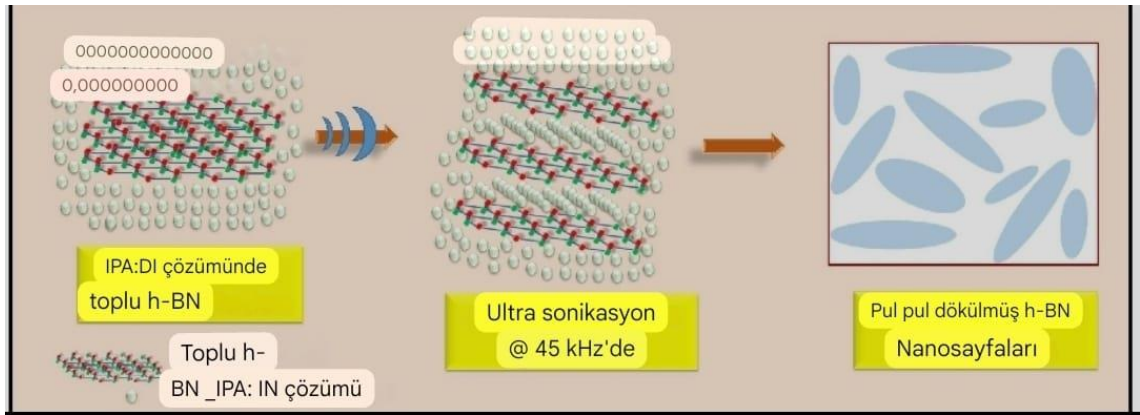
Shi ve arkadaşları, borazinin daha fazla dehidrojenasyonunu kolaylaştıran ve daha iyi kristalli hegzağonala bor nitrüre yol açan, 1000°C'de bir son tavlama işlemi ile 400 °C'lik düşük bir sıcaklıkta ortam basıncı altında Na gazı ile borazin buharını akıttı. Borazinin akış hızı ve reaksiyon süresi arttırılarak değişen kalınlıklarda h-BN filmleri büyütüldü (Shi ve ark., 2010).

2.3.1.2. Pul pul dökülme yöntemi

Bu yöntemin mekanik pul pul dökülme, hegzağonal bor nitrürün yapısal ve optik özelliklerine ilişkin önemli çalışmalar yapılmış olsa da daha kapsamlı bir yöntem olarak sıvı pul pul dökülme yöntemi de kullanılmaktadır (Alem ve ark., 2009; An ve ark., 2019; Watanabe ve ark., 2004).

Mittala ve ekibinin yaptığı çalışmada büyük ölçekte hegzağonal bor nitrür nanotüplerin sentezlenmesi için sıvı pul pul dökülme yöntemi kullanılmışlar. Sıvı pul pul dökülme yöntemi, 2 boyutlu katı malzemeleri düşük maliyetli ve yüksek üretim hızında çözücülerde sonikasyon kullanarak ince ve küçük levhalara ayrıştırır. Hacimli hegzağonal bor nitrür tozunda, katmanlar içindeki B ve N atomları güçlü kovalent bağ etkileşimine sahipken, bitişik hegzağonal bor nitrür katmanları zayıf Vander Waals kuvvetleri ve kısmi iyonik bağlanma ile bağlanmış. Temel olarak, Lewis asit-baz etkileşim mekanizması hegzağonal bor nitrürün ayrışmasından sorumludur. Hegzağonala bor nitrürde, lewis asit karakterine sahip B atomu lewis baz bileşiğini çeker ve hegzağonal bor nitrürün dispersiyon ve ayrışmasına yardımcı olan stabil bir lewis asit-baz kompleksi oluşturur. Ayrıca, çözücü H₂O lewis baz özelliğine sahiptir ve tahmini yüzey gerilimi ~64 mN/m olup hegzağonal bor nitrürün ayrışmasına yardımcı olur. Büyük miktarda hegzağonal bor nitrür nanotüplerin üretimi durumunda, karışık çözücünün lewis baz karakteristiği olumlu etkilidir. Sentez sürecinde, hegzağonal bor

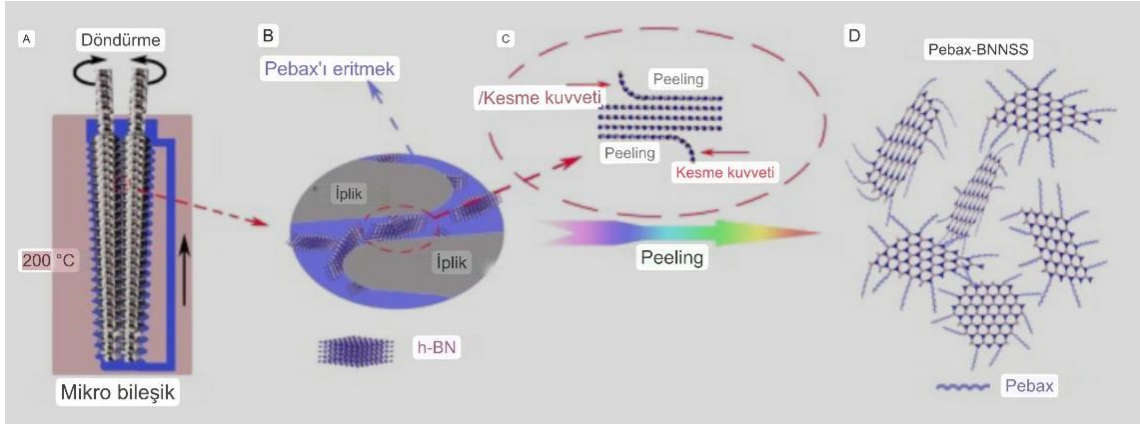
nitürürn kolayca dispersiyon ve ayrıştırılmasını sağladığı oranında H₂O ve izopropil alkol karıştırılmış. Karışık çözücü izotropil alkol ve H₂O farklı oranları ayırışma veriminin optimize edilmesi için keşfedilmiş. Sonik titreşim süreci altında, çözücü h-BN ile etkileşime girer ve zayıf etkileşen bitişik h-BN katmanları arasında elektron çeteler ve devamlı olarak yana doğru yayılmak için yeterli dış enerji sağlayan karışık stabil çözücü, B-N atomlarının arasındaki bağlanmayı minimize etmek için yeterli dış enerji sağlar. Sonunda, güçlü karıştırma etkisi altında, tamamen ultra ince hegzagonal bor nitür nanotüpleri haline dönüşür (Mittal ve ark., 2020).



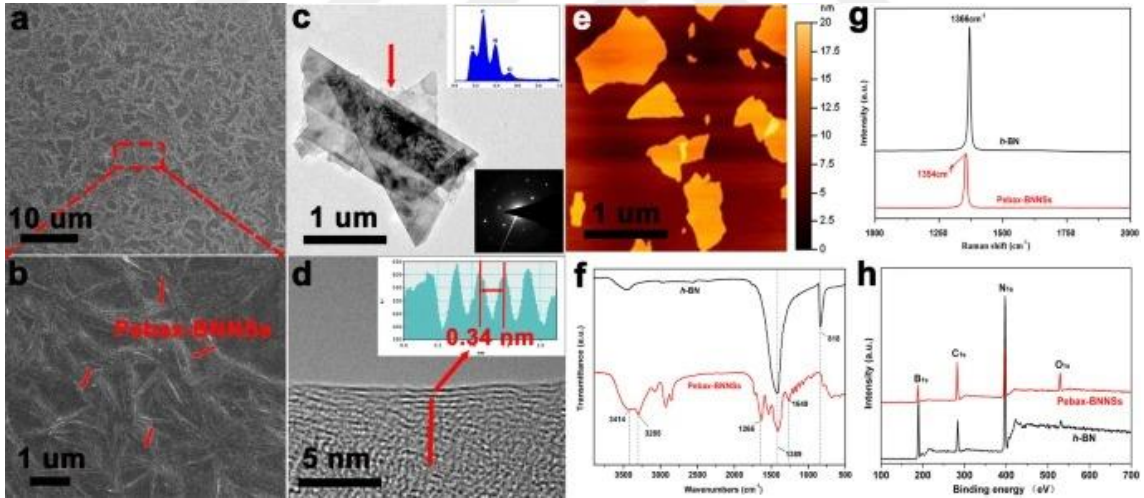
Şekil 2.7. Sıvı pul pul dökülme yoluyla hegzagonal bor nitür nanotüpleri sentezine yönelik şematik diyagram gösterilmiştir (Mittal ve ark., 2020).

An ve ekibinin yaptığı mekanik pul pul dökülme yöntemi için, yüksek elastik geri kazanım, iyi esneklik ve mükemmel işleme performansı gibi sertlik ve esneklik arasında birçok mükemmel özelliğe sahip, aynı zamanda poliamidlerle ilişkilendirilen iyi bir dayanıklılığa hem de polieterlerden kaynaklanan yüksek esnekliğe sahip olmasından kaynaklı. Pebax ve hegzagonal bor nitürü nanotüplerin mükemmel özelliklerini birleştirebileceğini ve böylece hegzagonal bor nitürü nanotüplerin mükemmel yağlama performansını kazandırabileceğini ön görmüş ve Pebax işlevselleştirilmiş hegzagonal bor nitür nanotüplerin imalatı, ticari h-BN tozlarının erimiş Pebax içinde 200 °C'de bir Xplore (MC 15) mikro birleştiricide gerçekleştirilen solventsiz mekanik pul pul dökülmesini gösterdiği ve Pebax molekülleri, hegzagonal bor nitür nanotüplerin yerinde işlevselleştirilmesini sağlamak için mekanik pul pul dökülme işlemi sırasında üretilen doymamış bağlarla eşzamanlı olarak reaksiyona girdiği ve elde edilen Pebax-BNNS'lerin morfolojisi ve bileşimi, alan emisyon taramalı elektronik mikroskopi (FESEM), transmisyon elektron mikroskobu

(TEM), yüksek çözünürlüklü transmisyon elektron mikroskobu (HRTEM), enerji dağılımlı X- dahil olmak üzere tamamlayıcı görüntüleme ve spektroskopik teknolojilerle karakterize edilmiş (An ve ark., 2019).

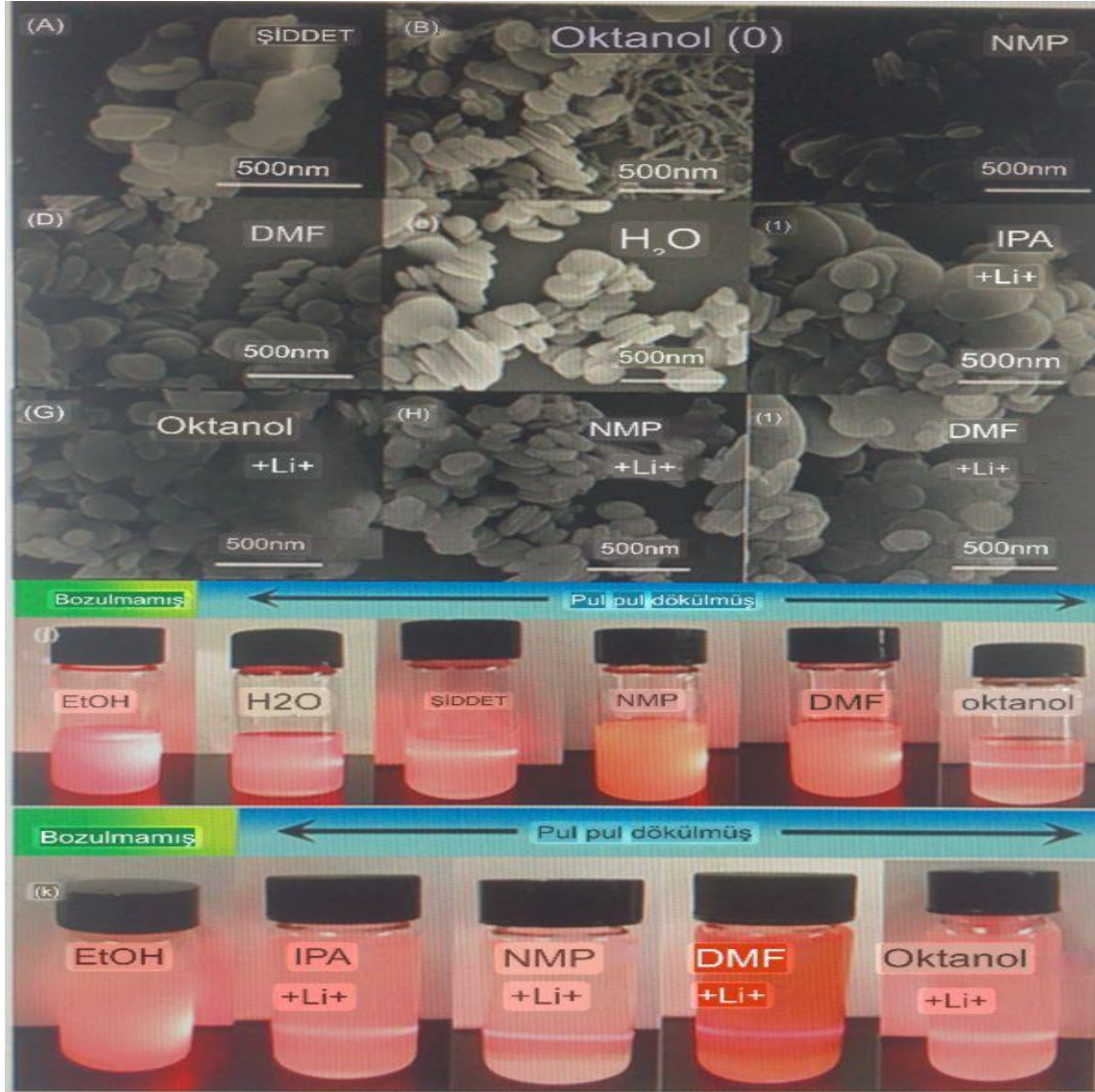


Şekil 2.8. Pebax-BNNS'lerin eksfoliasyonu ve dispersiyonu için şematik çizim. a h - BNNS'lerin eksfoliasyonu ve yerinde işlevselleştirme odası . b, c h -BNNS'lerin eksfoliasyonu ve yerinde işlevselleştirme süreci . d Elde edilen Pebax-BNNS'ler. Pebax molekülleri mekanik eksfoliasyon süreci sırasında oluşan sarkan bağlarla rastgele reaksiyona girecekti (An ve ark., 2019).

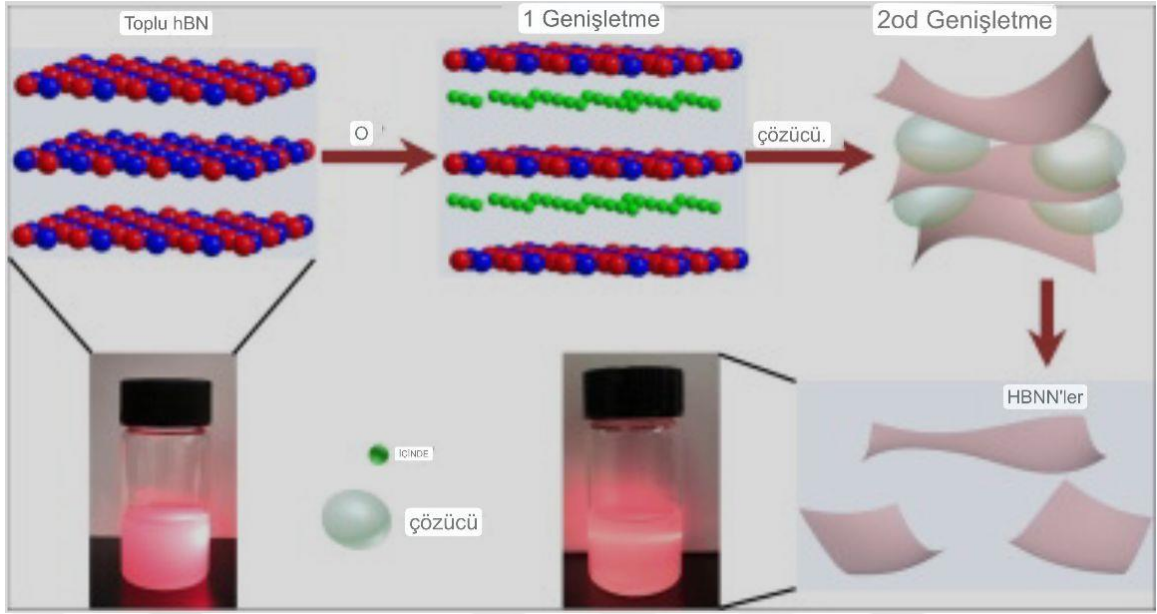


Şekil 2.9. Pebax-BNNS'lerin nanoyapısı ve karakterizasyonu. a Pebax-BNNS'lerin düşük büyütme ve b yüksek büyütme FESEM görüntüleri, substratlar üzerinde rastgele dağıtılmıştır. c Pebax-BNNS'lerin TEM görüntüsü. Ekler, Pebax-BNNS'lerin karşılık gelen EDS spektrumu ve SAED modelidir. d Beş katmanlı tek bir Pebax-BNNS'nin HRTEM görüntüsü. Ek, d'de kırmızı çizgiyle işaretlenmiş alanın karşılık gelen mesafe profilidir ve 0,34 nm'lik bir kristal aralığını gösterir. e AFM görüntüsü, bazı Pebax-BNNS'lerin alt tabakalar üzerinde rastgele dağıldığını göstermektedir. Orijinal h -BN'nin ve elde edilen Pebax-BNNS'lerin FTIR spektrumları (f), Raman spektrumları (g) ve XPS spektrumları (h) Orijinal h -BN'nin ve elde edilen Pebax-BNNS'lerini göstermektedir (An ve ark., 2019).

Diğer bir pul pul dökülme yöntemi de Wang ve ekibinin hidrotermal pul pul dökülme yöntemi ile üzerindeki solvent etkisi ilk olarak 1-oktanol, izopropil alkol, N,N-dimetilformamid, N-metilpirolidon ve deiyonize su dahil olmak üzere beş farklı polar solvent ile incelenmiştir. Bu reaksiyonda kullanılan ham hegzagonal bor nitrür, yanal boyutu $\sim 20 \mu\text{m}$ ve kalınlığı $\sim 1 \mu\text{m}$ olan dökme malzemedir şekillerde gösterildiği gibidir.



Şekil 2.10. 180 °C'de hidrotermal eksfoliasyondan sonra $\sim 2 \times 10^5$ Pa basınç ve güçlü bir karıştırma ile, solvent izopropil alkol ve 1- oktanol ile pul pul dökülen hegzagonal bor nitrür nano tüpler, bariz kalınlık azalması göstermiş. Ancak diğer üç polar çözücüyle (N,N-dimetilformamid, N-metilpirolidon ve deiyonize su) pul pul dökülen ürün, etkili bir soyma etkisi göstermemiş (Wang ve ark., 2019).



Şekil 2.11. Hegzagonal bor nitrür yığınınından başlayarak hegzagonal bor nitrür nanotüplerin pul pul dökülmesi için önerilen hidrotermal pul pul dökülme prosesidir. Hipotezde, lityum katyonları, otojen yüksek basınç ($\sim 2 \times 10^9$ Pa) altında bitişik hegzagonal bor nitrür katmanları arasındaki boşluğa eklenerek genişlemiş yapıya (1. genişleme) yol açmış. Daha sonra, hegzagonal bor nitrürün yüzey enerjisiyle iyi uyum sağlayabilen polariteye sahip çözücü, pul pul dökülme enerjisini daha da azaltabilir, bu da son pul pul dökülmeye (2. genişleme) hazır gevşek bir yapıya neden olur. Son olarak, kuvvetli karıştırma ve yüksek otojen basınç altında hegzagonal bor nitrürü nanotüpleri, büyük bir verim ve yüksek bir konsantrasyonla yığınlardan soyulmuş olduğu gözlenmiştir (Wang ve ark., 2019).

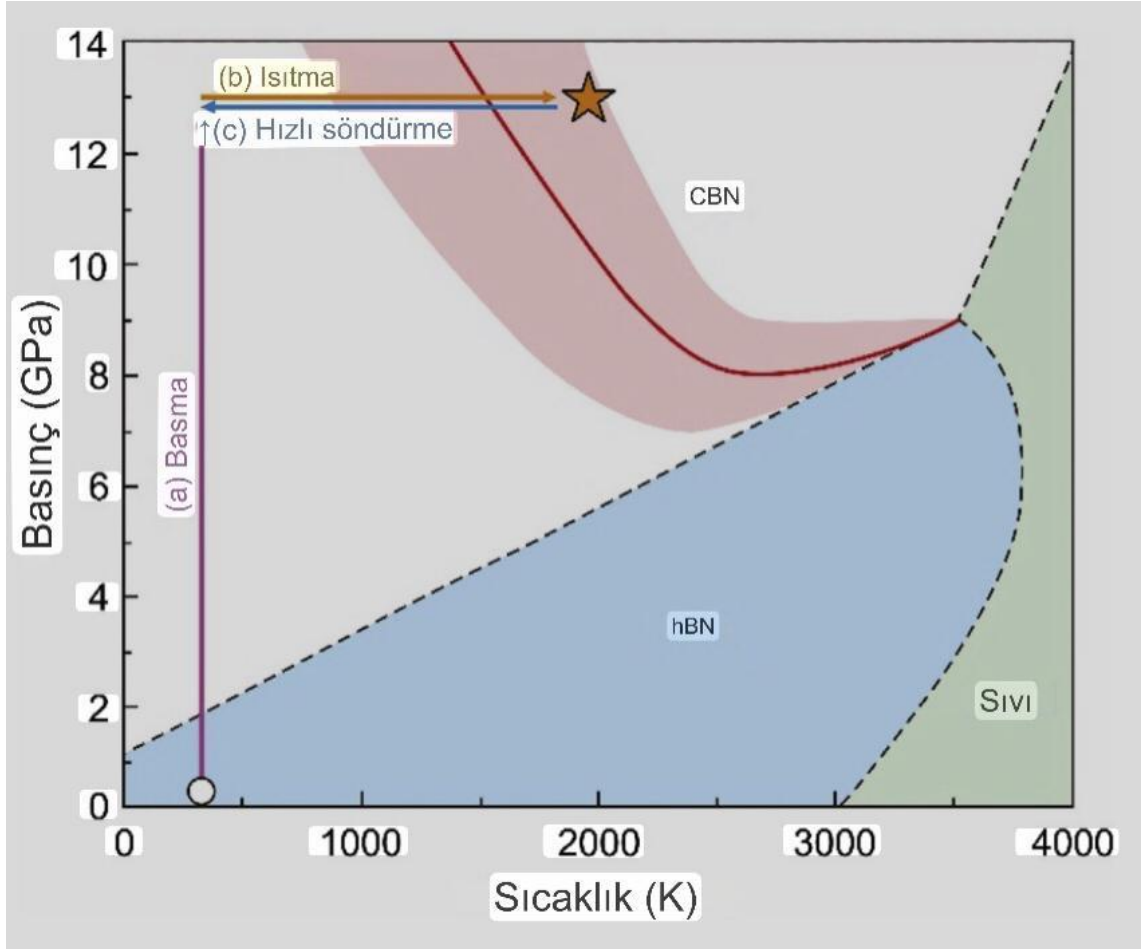
2.3.2. Kübik bor nitrür (c-BN) sentez ve yöntemleri

Çok kristalli kübik bor nitrür malzemeleri genellikle yüksek basınç ve sıcaklıklarda bor nitrür katmanlarının büzülmesine yol açtığı grafit benzeri hegzagonal bor nitrür öncüsünün martensitik dönüşümü kullanılarak sentezlenir (Britun ve Kurdyumov, 2000; Tian ve ark., 2013). Aynı zamanda kübik bor nitrürün ark deşarj, püskürtme ve buharlaştırma gibi başka sentez yöntemleri de mevcuttur.

2.3.2.1. Hegzagonal bor nitrürün kübik bor nitrüre dönüştürülmesi

Kübik bor nitrür sentezi genellikle hegzagonal bor nitrür kullanılarak sentezlense de son zamanlarda yapılan bazı çalışmalarda kübik bor nitrürden de hegzagonal bor nitrürü sentezlenmektedir bu bölümde kübik bor nitrürün basınç ve sıcaklık parametreleri kullanılarak hegzagonal bor nitrürden elde edilmesini ele alacağım.

Liang ve ekibi 0.2-1.5 μm tane büyüklüğüne, 2.29 g/cm^3 yoğunluğuna ve yaklaşık % 99 yüksek saflığa sahip polikristalin hegzagonal bor nitrür öncü tozu kullanılarak, miktarı minimize etmek için yüksek sıcaklıklı vakum fırınında 1250 K ve 2×10^{-4} Torr'da 1 saat boyunca ısıtılmış ve işlenmiş hegzagonal bor nitrür tozu hızlıca 3 mm çapında ve 2 mm kalınlığında tantal folyo kapsüle yüklenmiş, yüksek basınç ve yüksek sıcaklık sentezi deneyleri, kübik basınç makinesine dayalı iki aşamalı çok kuleli bir aparat kullanılarak gerçekleştirilmiş. Örnek odasının sıcaklığı doğrudan W-Re termokupller kullanılarak elde edilmiş. Hücre basıncı, Bi, Ti, Ba, ZnTe ve ZnS gibi bilinen maddelerin basınçla indüklenen faz değişimi kullanılarak kalibre edilmiş (Liang ve ark., 2019). Deneyde, numuneler oda sıcaklığında sentez deneyi için 13 GPa'ya kadar yavaşça sıkıştırıldıktan sonra sıcaklık istenen değere (1873-2173 K) ulaşana kadar yaklaşık 100 K/dakika ısıtma hızında yükseltilmiş ve stabil bir basınç sağlanmış. Son olarak, numune hızlıca soğutulmuş ve ardından yavaşça basınç azaltılmış. yüksek yoğunlukta nanotwinler ve yığılma kusurları içeren nano yapıya sahip kübik bor nitrürü sentezlemişler. Bu sentetik nano yapıdaki kübik bor nitrür, yüksek Vickers sertliği (78 GPa), yüksek kırılma dayanımı ($11.8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) ve son derece yüksek oksidasyon sıcaklığı (1565 K) sergilediği gözlemlenmiş (Liang ve ark., 2020).



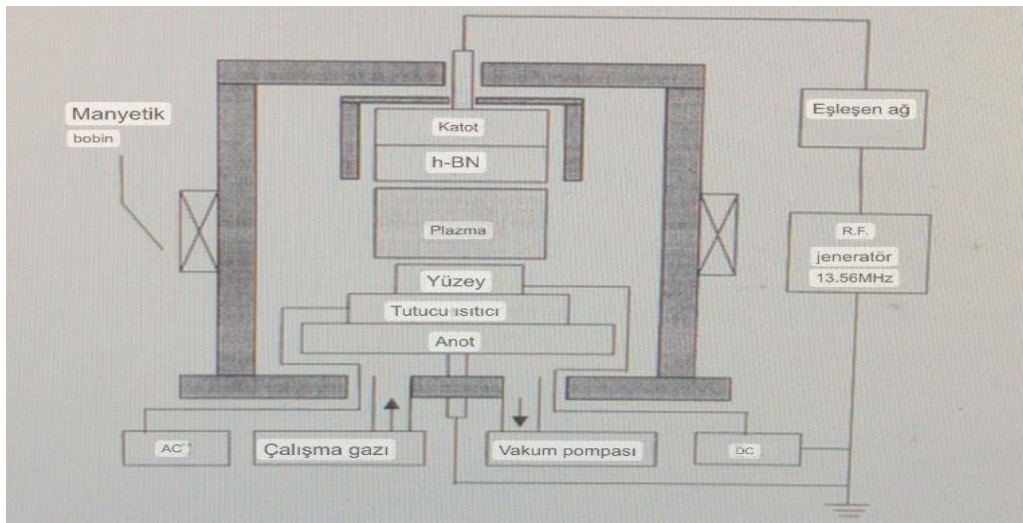
Şekil 2.12. Hegzagonal bor nitrürün Basınç-Sıcaklık Faz Diyagramı(Eremets ve ark., 1998). Kırmızı çizgi hBN-cBN dönüşüm sınırını belirtir ve kırmızı bölge dönüşümün kinetik olarak mümkün olduğu alanı gösterir (Liang ve ark., 2020).

Malzeme biliminde benzersiz özelliklerinden dolayı süper sert wurtzitik bor nitrür (w-BN) ve kübik bor nitrür (c-BN) oldukça ilgi görmektedir w-BN ve c-BN katı-katı faz geçişleri ile hegzagonal bor nitrürden elde edilmektedir. Düzenli olarak bulunan h-BN'ü 8,1-13 GPa basınç, da sıcaklığında w-BN elde edilmiştir. H-BN dönüşümünde oda sıcaklığında en düşük basınç 8,1 GPa iken, 10 GPa üzerinde geri döndürülememeye başlanmış (Ji ve ark., 2012)

2.3.2.2. Radyo frekanslı magnetron püskürtme yöntemi

Radyo frekanslı magnetron püskürtme, kübik bor nitrür filmlerinin yüksek enerjili iyon destekli biriktirilmesinin ilk alternatifleri arasındaydı (McLean ve Alister, 2023).

Bu yöntem ile ilgili Deng ve ekibinin yaptığı çalışmada püskürtme hedefi olarak 4 N saflıkta sıcak preslenmiş hegzagonal bor nitrür kullanılmış. Bor nitrür filmleri radyo frekansı püskürtme sistemi ile (100) odaklı silikon substrat (8-15 cm) üzerine biriktirildi. Substratlar, 11 cm dirençli p-tipi Si(100) levhalardı ve bunlar biriktirme sırasında negatif DC voltajıyla ön gerilimlendirilmiş, püskürtme gazı nitrojen ve argonun karışımıydı. Katoda 4 N saflıkta sıcak preslenmiş hegzagonal bor nitrürden bir hedef yapıştırılmış ve substrat tutucu anoda yerleştirildi. Substratlar için ısıtma ve ön gerilim aparatları mevcuttu. Cihaz AC ve DC beslemesi ile bağımsız olarak kontrol edilebilmekte. Radyo frekans jeneratörü (13.56 MHz) ağ işi eşleştirilerek katoda bağlanmış. Manyetik bobin, hedefin ve substratın yakınındaki plazmanın yoğunluğunu artırmak amacıyla plazmadaki elektrik parçacıklarının hareketini sınırlayabilen manyetik alan üretmek için kullanılmış. Püskürtme öncesinde taban basıncı 1×10^{-6} Torr'un altındayken. Çalışma gazı nitrojen ve argonun karışımıydı (N/Ar+N, oran % 5 idi) ve çalışma basıncı $(5-10) \times 10^{-6}$ Torr'a ayarlandı. Biriktirmeden önce substratlar üçlü bir solvent kullanılarak ultrasonik olarak temizlenmektedir. Bor nitrür filmleri Fourier dönüşümü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi ile karakterize edilmiş. Kübik bor nitrür filmlerinin farklı radyo frekansı güçlerinde ve farklı DC negatif substrat önyargısında oluşturulabileceği bulunmuştur. Ayrıca, neredeyse saf kübik faza sahip kübik bor nitrür filmleri, uygun radyo frekansı gücü ve DC alt tabaka ön gerilim voltajı altında başarıyla elde edilmiş. Sonuçlar kübik bor nitrür oluşumu için substrata çarpan pozitif iyonların uygun enerji akış yoğunluğunun gerekli olduğunu göstermiştir (Deng ve ark., 2000).



Şekil 2.13. BN filmlerinin biriktirilmesi için radyo frekanslı püskürtme sisteminin şematik gösterimi (Deng ve ark., 2000).

Diğer bir çalışma ise Li ve ekibi radyo frekanslı magnetron püskürtme yöntemi ile kübik bor nitrür filmleri biriktirilmesi üzerine çalışmalar yapmış. Ve biriktirme sırasında uygulanan substrat sapmasına ek olarak, hedef ile substrat (d) arasındaki mesafenin kübik faz oluşumu ve dolayısıyla bor nitrür filmlerinin faz bileşimi üzerinde önemli bir rol oynadığını gözlemlemişler. Radyo frekanslı magnetron püskürtme biriktirme sisteminde, 1 inç çapında % 99,99 saf hegzagonal bor nitrür disk kullanılarak bor nitrür ince filmler büyütülmüş. Püskürtme tesisinin taban basıncı 109 Torr civarında ve filmler % 50 Ar % 50 N₂ karışımında 10 mTorr basınçta oluşturulmuş. Silikon (100) levhalar substrat olarak kullanılmış ve önceden temizlenip pasifleştirilmekteymiş. Biriktirme sıcaklığı 450 °C'de kontrol edildikten ve yüksek frekanslı bir DC ön gerilim uygulandıktan sonra ön gerilim voltajı 250-450 V arasında değişirken, hedef ile substrat arasındaki mesafe 2-5 cm arasında değişiyordu. Biriktirme oranı, film kalınlığı ve süresi ölçülerek değerlendirilmiş ve sonuç olarak en büyük iyon-atom varış oranı ve en yüksek kübik bor nitrür hacim yüzdesi, tanımlanan depolama ayarlarında optimum ayrılma mesafesi $d = 3$ cm'de elde edilir (Li ve ark., 2001).

2.3.3. Bor nitrür nano tüplerin (BNNT) sentezi

Bor nitrür nano tüpler daha önce karbon nano tüplerde kullanılmış bazı sentez yöntemleri baz alınarak yapılmış. Bu sentez yöntemleri ark deşarj, lazer ablasyon, bilyalı öğütme gibi yöntemlerdir. BNNT'leri büyütme teknikleri, düşük sıcaklık ve yüksek sıcaklık olmak üzere iki geniş kategoriye ayrılabilir. Düşük sıcaklık sentez yönteminde, çalışma sıcaklıkları saf borun buharlaşma sıcaklığının çok altında olan 600 ila 1700 °C arasındadır. İki yaygın düşük sıcaklık sentez yöntemi bilyalı öğütme ve kimyasal buhar biriktirmedir. Bu tekniklerin her ikisi de katalizör gerektirir ancak yüzlerce miligram ila gram BNNT üretebilirler. İki yüksek sıcaklık sentez tekniği vardır, ark deşarjı ve lazer ablasyon yöntemleri. Bu yöntemlerin her ikisi de çok ince (~ 5 nm) olan yüksek kaliteli BNNT'ler üretir. Düşük sıcaklık yöntemlerine benzer şekilde, ark deşarjı katalizörlerin kullanımını gerektirir ve düşük en boy oranlarına sahip küçük çaplı nanotüpler üretir (Tiano ve ark., 2014). Bu bölümde bu sentez yöntemleri ile ilgili yapılmış çalışmalara kısaca göz atacağız.

2.3.3.1. Ark deşarj yöntemi

Bor nitrür nano tüplerin sentezi için ilk olarak 1995 yılında Chopra ve ekibi karbon fullerendirme üretiminde kullanılan bir plazma ark deşarj cihazında, dış çapı 6.3 mm olan boş volfram elektrotuna 3.17 mm çapında hegzagonal bor nitrür içeren preslenmiş çubuk yerleştirildi ve bileşik bir anot oluşturulmuş ve katot olarak ise saf bakır çubuk kullanılmıştır. Bu çalışmada iç çeper çapları 1-3 nm, dış çeper çapları 6-8 nm, boyları ise 200 nm'den büyük BN nanotüpler üretilmiş (Chopra ve ark., 1995). Takip eden yıllardan günümüze değin birçok çalışma yürütülmüştür.

Narita ve arkadaşları 2003 yılında ark eritme yöntemi ile NbB, YB ve YB/Ni:6 gibi borür bazlı tozlar kullanılarak BN nanotüpleri üretmişler. Üretim aşamasında karbon nanotüp üretimi için iyi katalitik özellikler gösterdiği için Y ve Y/Ni metalleri, borondan daha kolay nitrojen ile reaksiyona girdiği için de Nb ve Y metalleri tercih edilmiş. NbB tozu elektrik arak fırınında bir bakır kaba yerleştirilmiş 1×10^{-6} Pa basınçta işlem gördükten sonra, uzunluğu sırası ile 4-6 nm ve 4-10 nm uzunluğunda İtiryumun birkaç duvarlı BNNT'lerin üretilmesi üzerindeki katalitik etkisini doğruladılar (Kim ve ark., 2018; Narita ve Oku, 2003).

2017 de Yeh ve ekibinin ark deşarj yöntemi ile bor nitrür nano tüplerin kök büyümesini kanıtlamak için: Yaklaşık 10 mm genişliğinde, 5 mm derinliğinde ve 100 mm uzunluğunda bor elektronları ark eritme fırınında %96 B, %2 Co ve %2 Ni karıştırılarak hazırlandı. BNNT sentezi için ark plazması, bor veya tungsten katot ile bor anotunu kısa bir süre temas ettirerek 400 Torr N_2 'de saf nitrojen ortamında üretildi, ardından akım 40 A'da tutuldu. Harici bir kontrol sistemi, belirtilen deşarj voltajına ulaşılan kadar elektrot boşluğunu artırıldı. Elektrotlar arasındaki boşluk 1 cm'yi geçmedi. Deşarjdan sonra, elektrotlarda gri lifli ürünler, elektrotların altına yerleştirilen bir malzeme toplayıcı levha ve tercih edilen bir biriktirme yeri olmayan hazne duvarında bulundu. Gri lifli ürünler, bor nitrür katmanlarıyla sarılmış tepkimeye girmemiş anot malzemeleriyle birlikte bol miktarda BNNT içeriyordu. Bu BNNT içeren gri lifli ürünler reaktörün her yerinde bulundu, bu durum ark sentezli tek duvarlı karbon nanotüplerinin durumuna benzer ve BNNT'lerin hacimde sentezlendiğini gösterir. Bu ürünlerin TEM, EDS ve Raman spektroskopisi ile karakterizasyonu, sentezlenen nanotüplerin öncelikle tek ve çift duvarlı olduğunu belirledi. Ek olarak, BNNT'lerin kök büyümesi kanıtı yüksek çözünürlüklü TEM ile gözlemlendi (Yeh ve ark., 2017).

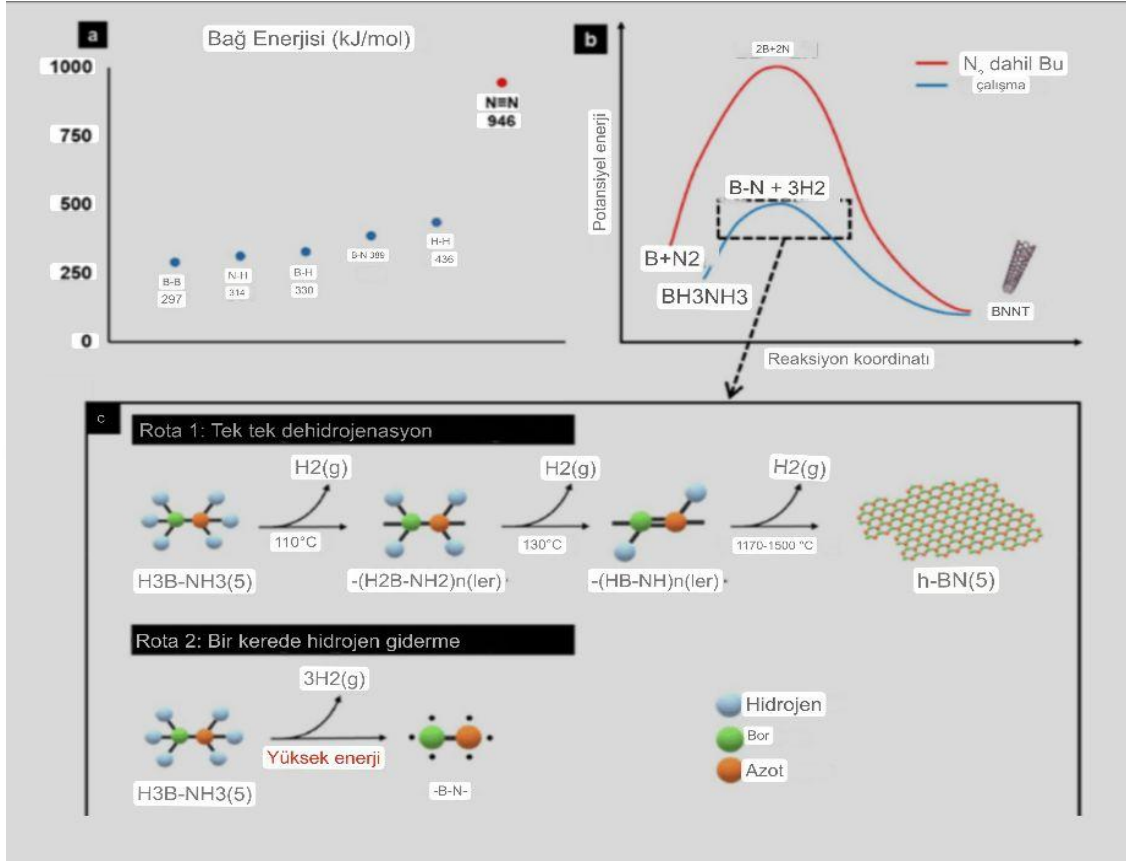
2.3.3.2. Lazer aplasyon yöntemi

Bir diğer BNNT üretim yöntemi olan lazer aplasyon Yu ve arkadaşları 1998'de %99 saflıkta BN ve nanoboyutta her biri %1 lik Ni ve Co tozunun karıştırılması ile hazırlanmış. Karıştırılan toz 150 °C'de preslenerek hedeflenen bir plak oluşturulacak şekilde işlendi. Ardından argon, azot ve helyum gazları yaklaşık 20 saatlik 1200 °C gaz boşaltma işleminden sonra lazer aplasyon gerçekleştirilmiş, aplasyondan yapılan malzemeler akışkan taşıyıcı gazlar tarafından taşındı ve su soğutmalı bakır toplayıcı üzerinde toplandı. Sonuç olarak iki katmanlı çapları 1,5 ila 8 mm olan bor nitrür nano tüpler elde edilmiş (Yu ve ark., 1998)

Kim ve ekibi, lazer aplasyon yöntemini kullanarak yüksek basınç ve yüksek sıcaklık koşullarına dayanacak şekilde özel olarak tasarlanmış bir haznede bor nitrürü nano tüpler sentezlemiştir. Her biri 102 µm çapında olan ve bir besleyiciye bağlanan 70 bor fiberden oluşan bir demet, %99 saflığa sahip 14 bar azotla doldurulmuş haznenin ortasına yerleştirildi. Bor fiberlerinin sayısı deneysel olarak optimize edildi. Çok fazla bor fiberi varsa, demet başarıyla eritilemediği ve bu da verimde bir azalmaya neden olduğu gözlemlenmiştir. Demet, sentez işlemi boyunca bir ZnSe lensi tarafından 1 mm'ye kadar odaklanan dalga boyu 10,6 µm, orijinal ışın çapı 2 cm olan bir CO₂ lazeri ile sürekli olarak ısıtılmış ve yüksek hızlı kamera ve optik emisyon spektrometresi kullanarak lazer ısıtma sürecinin yerinde termal analizini ve yakın gözlemini gerçekleştirmişlerdir. Bor lifli demeti 1000 W sürekli CO₂ lazeri ile ısıtılarak, OES ile ölçüldüğünde sıcaklığı 3845 K olan küresel bir erimiş bor topu oluşturulduktan sonra, nitel karşılaştırma için erimiş bor topunun üzerine 1 cm ve 13 cm olacak şekilde farklı yüksekliklerde yerleştirilen toplayıcılarda pamuk benzeri BNNT ürünleri toplandı (Kim ve ark., 2019).

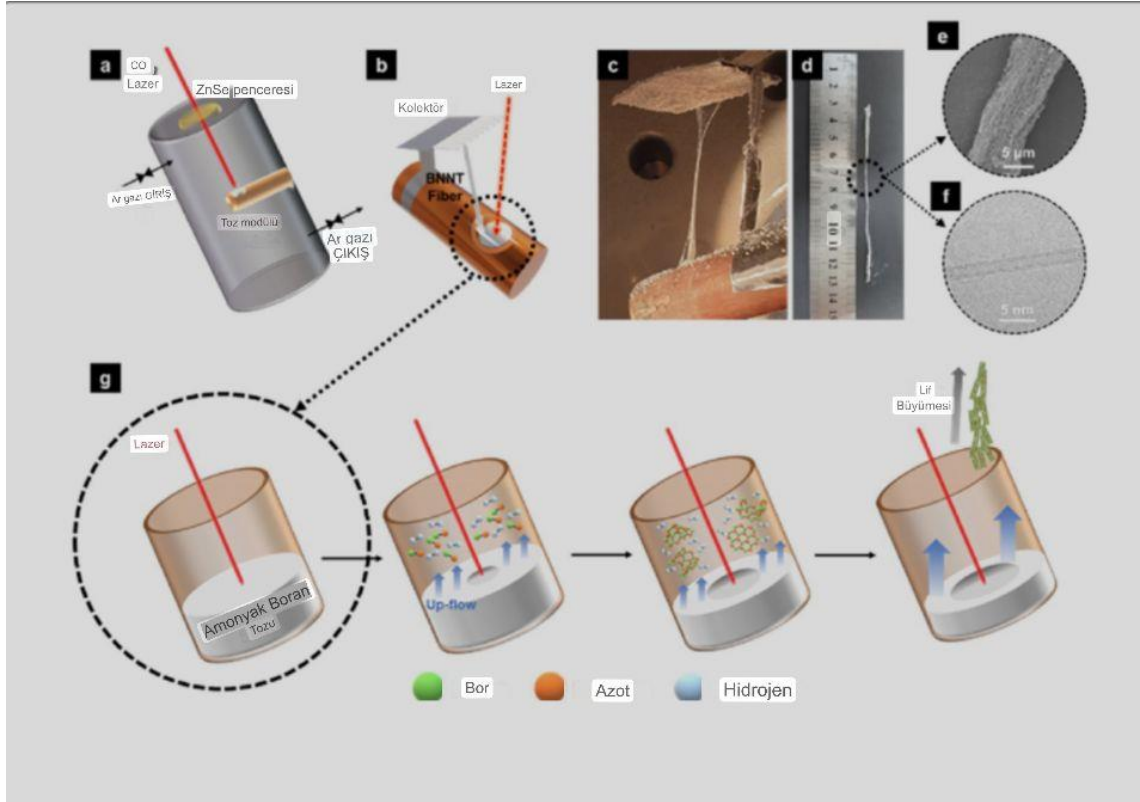
Bae ve ekibi lazer ablasyon ile BNNT sentezi reaksiyonunu gerçekleştirmek için 1000 W enerjiye sahip, 10.6 µm dalga boyuna sahip bir sürekli CO₂ lazer kullanıldı. BNNT sentezi, yüksek basınçlı silindirik bir reaksiyon odasında gerçekleştirildi, bu odanın yüksekliği 140 cm, çapı ise 60 cm idi. Reaksiyon odasının üst kısmına takılan bir çinko selenid pencere, CO₂ lazerin geçmesine ve dış materyallerin girişini engellemesine olanak tanıdı. Gaz giriş ve çıkış noktaları odanın üst ve alt kısmında bulunmaktaydı ve deney sabit bir gaz akışı olan nitrojen veya argon ile sabit bir odacık basıncında gerçekleştirildikten sonra, H₃N-BH₃ oda sıcaklığında bir toz halinde katı olduğundan, öncü olarak kullanabilmek için bir toz konteyneri gerekmektedir. Bakır bir

toz modülü reaksiyon odasının ortasına yerleştirilmiş ve su ile soğutulmuş (Bae ve ark., 2022).



Şekil 2.14. a) Bağların bağ enerjisi B, N veya H'den oluşur; b) B+N₂ ve BH₃NH₃ başlayan BNNT sentezinin kavramsal enerji diyagramı; c) Dehidrojenasyon prosesine göre iki farklı amonyak boran pirolizi yolu (Bae ve ark., 2022).

Toz modülünün üzerine bir ızgara tipi toplayıcı yerleştirilmiş, bu toplayıcı BNNT'leri reaksiyon akışının yukarı doğru akışından toplamaktadır. Tipik bir reaksiyon 30 dakika boyunca devam etmekte ve lazer tarafından ısıtılan noktanın sıcaklığı, kara cisim radyasyonundan ölçülmüş ve 4000 K olarak tutulmuştur. Deneyler, 2, 4, 8 ve 12 barlık farklı odacık basınçları altında argon ve nitrojen gibi iki farklı gaz kullanılarak gerçekleştirilmiş, 30 dakikalık bir reaksiyondan sonra, reaksiyon koşullarına bağlı olarak çeşitli uzunluklarda BNNT fiberler elde edilmiştir (Bae ve ark., 2022).



Şekil 2.15. a) BNNT sentez ekipmanı ve b) toz modülünün şematik diyagramı; c) Reaksiyonun hemen ardından BNNT lifi elde edildi; d) 10 cm uzunluğunda BNNT fiber; e) BNNT fiberin SEM görüntüsü f) BNNT'nin TEM görüntüsü; g) Sentez sürecinin şematik diyagramı (Bae ve ark., 2022).

2.3.3.3. Bilyalı öğütme yöntemi

Bilyalı öğütme yöntemi için Chen ve ekibi 1999 yılında, bor tozunu amonyak gazında (NH_3) 150 saat boyunca bilyalı öğütmenin ardından N_2 atmosferinde 1000-1200 $^{\circ}\text{C}$ 'de izotermal tavlama yapılmıştır (Chen ve ark., 1999). Chen ve arkadaşları daha sonraki çalışmalarında uzun öğütme süresinin yüksek BNNT verimi elde etmek için önemli bir etken olduğunu bunun bor ve amonyak gazı arasındaki nitrasyon sürecini destekleyerek BNNT oluşumunu kolaylaştırdığını ön görmüşlerdir (Kim ve ark., 2018).

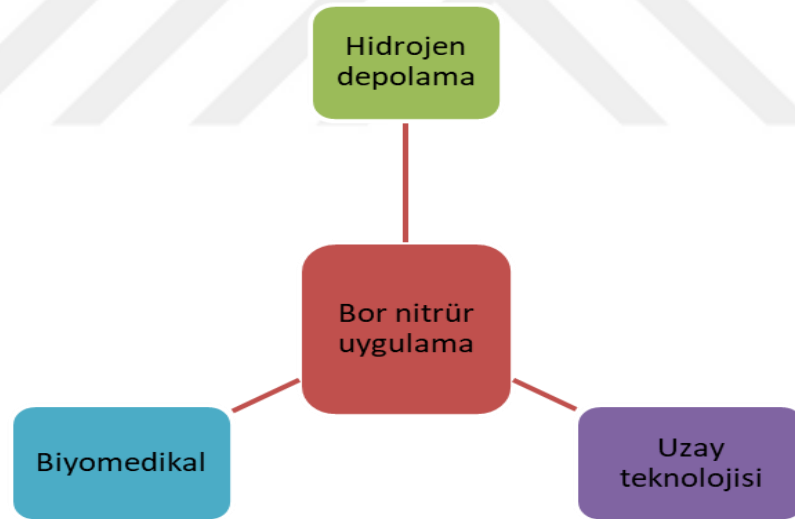
Kristalin bor tozunun bilyalı öğütülmesi ve ardından ısısal işleme tabi tutulmasına dayalı bor nitrür nanotüplerinin (BNNT'ler) sentezi Kim ve ekibi tarafından yapılan çalışma araştırıldı. Öğütme için Fe bazlı paslanmaz çelik (STS) bilyeler ve öğütme kapları kullanıldı ve öğütme sırasında üretilen Fe safsızlığı, bir azot ortamında tavlama sırasında BNNT'lerin üretimi için bir katalizör görevi gördüğü ve öğütülmüş bor tozu için kristalin borun yapısal deformasyonu, X-ışını kırınım spektrumlarına ve elektron

mikroskobu görüntülerine dayanarak gözlemlendiği, öğütme sırasında borun azotla hiçbir kimyasal reaksiyonu meydana gelmediği ve BNNT'ler yalnızca tavlama sırasında sentezlendiği, üretilen BNNT'ler temelde nanotüp kümelerine karıştırılmış çok duvarlı silindirik veya bambu tipleri. BNNT'lerin çapları 50-150 nm aralığında ve duvar sayıları ortalama $\sim 0,3$ nm boşlukla 30-100 aralığında ve bor nitrürün Fe parçacıklarının yüzeyine kaplanmış amorf bordan sentezlendiği gözlemlenmiştir (Kim ve ark., 2011).

2.4. Bor Nitrürün Uygulama Alanları

Bor nitrür (BN) nanomalzemelerinin, yüksek yüzey alanı, düşük yoğunluk, mükemmel termal kararlılık, mekanik mukavemet, biyouyumluluk ve mükemmel korozyon direnci ve antioksidan gibi olağanüstü özellikleri nedeniyle yoğun ilgi görmüştür. Bu olağanüstü özelliklerinden dolayı birçok uygulama alanına sahiptir (Han ve ark., 2022).

Bu uygulama alanlarından bazıları şu şekildedir:



Şekil 2.16. Bor nitrür uygulama alanları.

2.4.1. Biyomedikal

Bor nitrür nanopartikülleri biyomedikal uygulamalarda ilaç dağıtımı, kanser tedavisi, kemik doku mühendisliği, manyetik rezonans (MRI) gibi çeşitli alanlarda kullanılmak üzere bir çok çalışma yürütülmektedir. Tabtimsai ve Wanno saf, Ti ve Sc

katkılı zikzak ve koltuk BN nanotüplerine adsorplanan 5-florourasil (FU) antikanser ilacı için adsorpsiyon karakteristiklerini, geometrik kararlılığı ve elektronik özellikleri yoğunluk fonksiyonel teorisi (DFT) aracılığıyla araştırmış ve geçiş metalleri katkılı BN nanotüpleri durumunda daha iyi adsorpsiyon kabiliyeti, daha kısa adsorpsiyon uzunluğu ve daha iyi yük transferi rapor etmiştir (Han ve ark., 2022; Tabtimsai ve Wanno, 2021). Çözünme enerjisi ölçümü yoluyla, FU/geçiş metali katkılı BN nanotüplerinin saf BN nanotüplerinden daha yüksek çözünürlüğe sahip olduğu doğrulanmıştır. Ayrıca, FU moleküllerinin geçiş metali katkılı BN nanotüplerine adsorpsiyonunun kendiliğinden ve doğası gereği ekzotermik olduğu bildirilmiştir. Dolayısıyla, yukarıdaki tüm faktörler, yüzeye uyarlanmış BN nanotüplerini biyolojik bir sistemde yararlı bir ilaç taşıyıcısı yapar (Han ve ark., 2022).

Ciofani ve ekibi bu çalışmada, hegzagonal bor nitrür (h-BN) ve bozunma ürünü borik asitin (BA) prostat kanseri hücreleri üzerindeki etkisi, bir dizi moleküler test yoluyla etki mekanizmalarına vurgu yapılarak karşılaştırmalı olarak araştırılmıştır. İlk olarak, h-BN'nin yüksek hücresel internalizasyon kapasitesi ve sağlıklı hücrelerin aksine önemli bir hücre canlılığı azalmasına neden olan prostat kanseri hücrelerinin yüksek hücresel duyarlılığı değerlendirilmiştir. Kanser baskılama etkilerini değerlendirmek amacıyla mitokondriyal disfonksiyon, reaktif oksijen türleri (ROS) üretimi ve hücre ölüm mekanizmaları araştırılmıştır. Son olarak, kanser hücrelerinin metastatik kapasiteleri, h-BN'ye maruz kalan hücrelerin sitoskeleton yapıları ve göç kapasitesi izlenerek test edildi. Sonuçlar, h-BN'nin ROS üretimini ciddi şekilde artırarak prostat kanseri hücre apoptozunu desteklediğini açıkça göstermektedir (Ciofani ve ark., 2020).

2.4.2. Uzay

Son yıllarda uzay araştırmaları bilim ve mühendislikte önemli bir rol oynamaktadır. Zararlı uzay radyasyonunu azaltmada büyük zorluklar olduğundan, uzay uygulamaları için uzay araçları ekstra ağır kalkan malzemeleri ile inşa edilmiştir. Bu radyasyonlar, galaktik kozmik ışınlar (GCR), güneş partikül olayları (SPE) ve tuzaklanmış enerjik radyasyon dahil olmak üzere yüksek enerjili protonlar, nötronlar ve elektronlar içerir (Barabash ve ark., 2019; Chancellor ve ark., 2014). Çoğu uzay uygulamasında, protonlar ve nötronlar, özellikle yüksek atom numaralı kalkan malzemeleri arasındaki nükleer çarpışmalardan kaynaklanan ikincil nötronlar, insan dokusuna zarar vermekte ve elektronik arızalar gibi potansiyel sorunlara neden

olmaktadır (Cheraghi ve ark., 2021). Bu zararları ortadan kaldırmak için bor nitrür nanomalzemeler önemli rol oynamaktadır. Bir malzeme, uzay kalkanı uygulamasına uygun kabul edilebilmesi için dört temel özelliğe sahip olması gerekir. 1 Maliyeti azaltmak için hafif olmalıdır; 2 Hedef elektronlar ile gelen yüklü parçacıklar arasındaki etkileşimleri artırmak için yüksek bir elektron yoğunluğuna sahip olmalıdır; 3 İkincil parçacık üretimi daha az olmalı ve 4 Uygun termal özelliklere sahip olmalıdır (Cheraghi ve ark., 2021).

Bu bağlamda Chen ve ekibinin yaptığı çalışmada, verimli uzay radyasyon soğutma performansına ve oldukça anizotropik bir termal iletim davranışına sahip bir h-BN/Al₂O₃ çift katmanlı kaplamayı kolay bir tek adımlı sıvı faz plazma destekli elektroforez ve sinterleme (LPES) yöntemi ile üretildi ve çift katmanlı h-BN/Al₂O₃ kaplamasındaki anizotropik termal difüz, yüksek enerjili bir lazer ışınının ısıtılması altında kaplama yüzeyine dikey ve yatay yönler boyunca sıcaklık evrimi ile karakterize edilmiş, izotropik tek katmanlı Al₂O₃ ile karşılaştırıldığında, yatay yönelimli h-BN pullarından oluşan çift katmanlı h-BN/Al₂O₃ kaplaması, ön yüzey sıcaklığında 20 °C'ye kadar artış ve arka yüzeyde 30 °C'ye kadar sıcaklık düşüşü ile gelişmiş yatay termal iletkenlik gösterir; ön ve arka yüzey sıcaklıkları lazer noktasından 3 mm uzakta ölçülmüştür. Dahası, içsel malzeme özelliklerinin yapısal tasarımıyla birleştirilmesiyle, h-BN/Al₂O₃ çift katmanlı kaplama ideal bir seçici spektral tepki sergiler. Çift katmanlı yapı, ortalama kızılötesi emisivitesi >0,86'dır ve güneş ışınımının ~%89'unu yansıtır. Mevcut çalışma, soğuk evrene gelişmiş radyasyon erişimi sağlayan anizotropik termal iletim yoluyla uzay radyasyon soğutma verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için yeni bir konsept göstermektedir (Chen ve ark., 2021).

2.4.3. Hidrojen depolama

Çağımızda hızla tükenen fosil yakıtlar nedeniyle temiz ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Hidrojen enerjisi ile ilgili dünya ve Türkiye’de yapılan birçok çalışma mevcuttur ama depolama büyük bir dezavantaj olmaktadır nano ölçekte depolama için mekanik ve termal özelliklerinden dolayı uygun görünen bor nitrür nanopartikülleri bizi bu çalışmaya sevk etmektedir.

Hidrojen depolama için yüzey modifikasyonları ve doping teknikleri kullanılmaktadır. Doping tekniği için Lale ve ekibinin yaptığı çalışmalara kısaca göz

atacak olursak BN'in bazı B veya N atomlarının başka hafif bir atomla değiştirilmesi fikri, karşılaştırıldığında periyodik çizelgedeki konumu nedeniyle karbonun (C) doğal olarak önerilmesi Jhi ve Kwon, H₂'nin karbonun bir B veya N yerine konması durumunda depolama enerjisinin çok daha uygun olacağını yaptıkları çalışmada öngördüler (Jhi ve Kwon, 2004; Lale ve ark., 2018). Bir başka olası ikame maddesi oksijendir (O). Abonitio simülasyonlar aracılığıyla Jhi, aktifleştirilmiş BN nanotüplerdeki oksitlenmiş gözeneklerin, nanoyapının depolama kapasitesini arttırırken tüp içinde H₂ difüzyonuna izin verebileceğini açıkladı (Jhi, 2006; Lale ve ark., 2018).

BN'nin H₂ depolama kapasitesini geliştirmek için başka bir olası strateji işlevselleştirmedir. Buradaki fikir, BN'nin yüzeyinde bir heteroelementi desteklemektir. Lityum, BN işlevselleştirmesine adaydır. Wang ve diğerleri. Ab initio ilk prensip hesaplamalarıyla, bir BN atom zincirini süsleyen Li atomlarının her birinin 6 moleküle kadar H₂ yakalayacağı öngörülmüştü (Wang ve ark., 2013). Benzer bir tahmin Zhang ve ekibi tarafından da önerildi. daha sonra Li ile süslenmiş gözenekli BN'nin teorik olarak maksimum ağırlıkça %7,5 H₂ depo edebileceğini ve ortalama depolama enerjisinin -15,4 kJ mol⁻¹ (Li içermeyen numune için -7,4'e karşılık) olduğunu varsaydılar (Lale ve ark., 2018; Zhang ve ark., 2015).

Weng ve ekinbi bu konuda gözenekli bor nitrürde hidrojen depolamak için karbon ve oksijenle ortak katkılanmış BN mikro süngerlerini sentezlemişlerdir. BN mikro süngerler, borik asit (BA) ve guanidin karbonat (GC) adduct'ların öncüllerini kullanarak hazırlandı. Sentezlenen bu yapıların, kimyasal durumlarını ve H₂ depolama performanslarını sistemli olarak incelemiş ve GC/BA için 1.5:1 oranında ve 800 °C'de hazırlanan tipik karbon ve oksijenle doplanmış BN mikro süngerleri, göreceli olarak mütevazı bir yüzey alanı (397 m² g⁻¹) sahip olmalarına rağmen, 1 MPa ve -196 °C'de %2.19 ağırlıkça H₂ alım kapasitesine sahip olduğu, bu da özellikle daha yüksek yüzey alanları (1290 m² g⁻¹'ye kadar) olan doplanmamış BN örneklerinden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Weng ve ark., 2021).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Kimyasallar

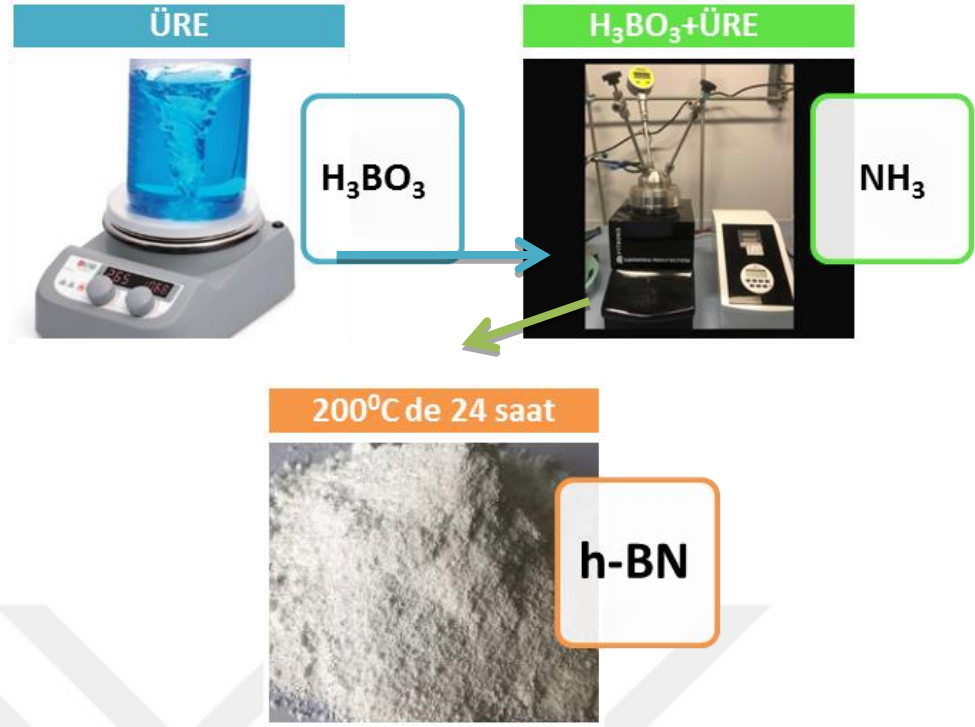
Bu çalışma için gerekli ham maddeler borik asit (ACS reaktifi, $\geq 99,5$ %, Sigma-Aldrich), üre (ACS reaktifi, $\geq 99,0$ - $100,5$ %, Sigma-Aldrich), amonyak çözeltisi (ACS reaktifi, ≥ 25 - 32 %, Sigma-Aldrich) mangan asetat monohidrat (ACS reaktifi, $\geq 98,0$ %, Sigma-Aldrich) 98%, ve deiyonize sudur.

3.2 Karakterizasyon

Bor nitrür ve mangan katkılı bor nitrürün karakterizasyonu bu çalışmanın önemli bir parçasını içermektedir. Sentezlenen bor nitrür ve mangan katkılı bor nitrürün nano yapılı malzemeler Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılımı X-Işını Spektroskopisi (EDX) ile karakterize edildi.

3.3. Bor nitrür sentezi

Bor nitrür tek adımlı hidrotermal yöntemi ile sentezlendi. Modifiye edilmiş olan prosedürde, 1 g borik asit 5 mL deiyonize suda çözüldükten sonra 1 g üre eklenip karışım 30 dk daha karıştırılmaya devam edildi. Daha sonra karışıma %25 amonyak çözeltisinden 5 mL eklendi. Elde edilen bu karışım, Teflon donanımlı paslanmaz hidrotermal reaksiyon sistemi (Fytronix, FYHT-8000) 200 °C'de 24 saat süreyle hidrotermal olarak ısıtıldı. Bundan sonra, karışım çözeltisi oda sıcaklığında ($25 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$) soğutuldu. Bor nitrür dispersiyonu 0,22 μm gözenek boyutuna sahip bir filtre kâğıdı kullanılarak vakumla filtrelendi ve 6500 rpm'de 40 dakika süreyle santrifüj edildi. Santrifüjlemeden sonra, süpernatanttaki sıvı toplandı ve pelet kısmında kalan bor nitrür (h-BN) nano yapılar liyofilizatörde kurutulduktan sonra karakterizasyon işlemleri ve diğer uygulamalar için saklandı.



Şekil 3.1. Hegzagonal bor nitrür (h-BN) sentezinin şematik diyagramı.

3.4. Mangan destekli bor nitrür sentezi

Literatürde yer alan yöntemde bazı modifikasyonlar yapılarak mangan katkılı bor nitrür elde edildi. Bu sentez için 1 gr bor nitrür ve 500 mg mangan tuzunun çözeltisi deiyonize su içerisinde 1 saat ultrasonik banyoda çözüldü. Daha sonra çözeltiye 100 mg sodyum bor hidrür ilave edildi ve ultrasonik işlem 1 saat daha devam etti. Hazırlanan çözelti 100 °C'taki manyetik karıştırıcıda 24 saat süreyle karıştırılmaya devam edildi. Reaksiyon tamamlandıktan sonra oda sıcaklığına ulaşınca kadar bekletilen çözelti 6500 rpm'de 30 dakika santrifüjlendi. Sonrasında elde edilen ürün 5 kez deiyonize su ile yıkandı. Mangan katkılı bor nitrür liyofilizatörde kurutulduktan sonra karakterizasyon işlemleri ve diğer uygulamalar için saklandı.

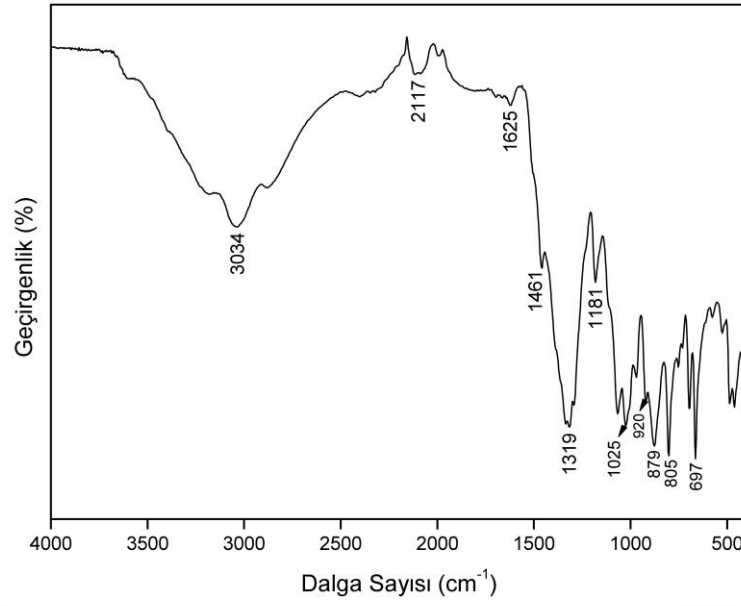
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

4.1. Karakterizasyon Teknikleri

Sentezlenen nano yapılı malzemelerin fiziksel ve yapısal özellikleri Enerji Dağılımı X-Işını Spektroskopisi (EDX), Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) karakterizasyon teknikleri ile belirlendi.

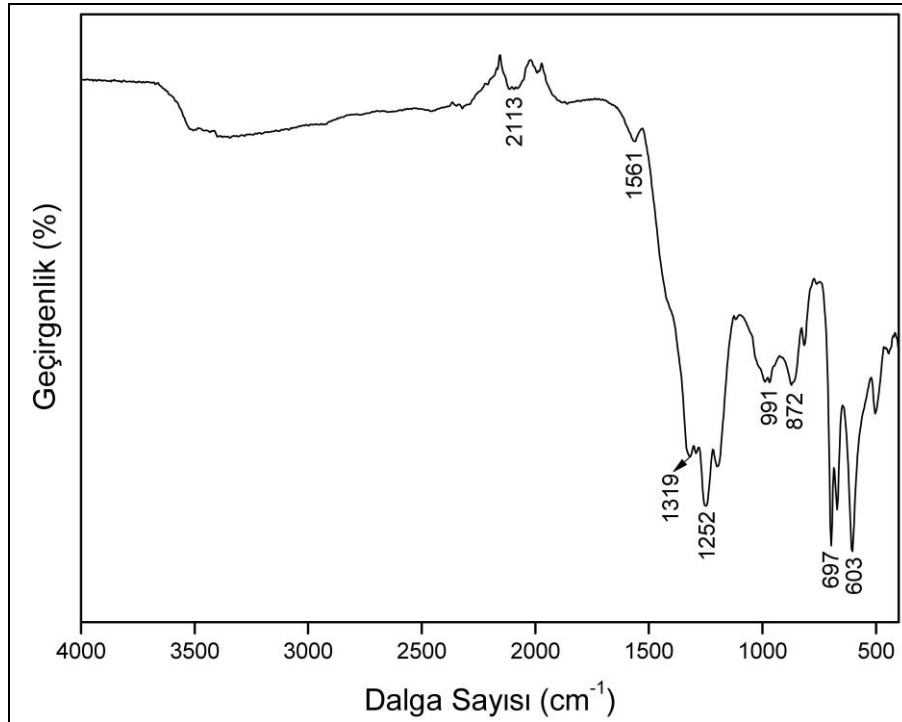
4.2. Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) tekniği

Şekil 4.1.'de gösterilen FTIR spektrumu, malzemenin bileşiminin daha fazla doğrulanması için analiz edildi. FTIR spektrumunda gösterildiği gibi, yaklaşık 805 ve 1319 cm^{-1} 'de iki ana karakteristik spektrum gözlemlendi; bunlar başka bir çalışmada bildirilen BN ile ilgili sonuçlara benzerdir (Tang ve ark., 2008). İlk spektrum piki B–N–B bağının düzlem dışı titreşimine karşılık gelirken ikincisi ise B–N bağının düzlem içi gerilme titreşimini temsil eder. 697 cm^{-1} 'deki görülen spektrum piki, B–O bükülme titreşimine atfedilebilir. 920 cm^{-1} ve 1025 cm^{-1} 'deki emilim pikleri, C–N gerilme titreşimine ait pikler olarak karşımıza çıkmaktadır (Shen ve ark., 2019). Ayrıca 1181, 1461 ve 3034 cm^{-1} 'de görülen spektrum pikleri B–N, BN–O bağlanması sonucunda hekzagonal BN ve B–OH bağlanmasına ait pikleri olarak belirtilmiştir (Singh ve ark., 2016).



Şekil 4.1. Sentezlenen bor nitrürün FT-IR spektrumu.

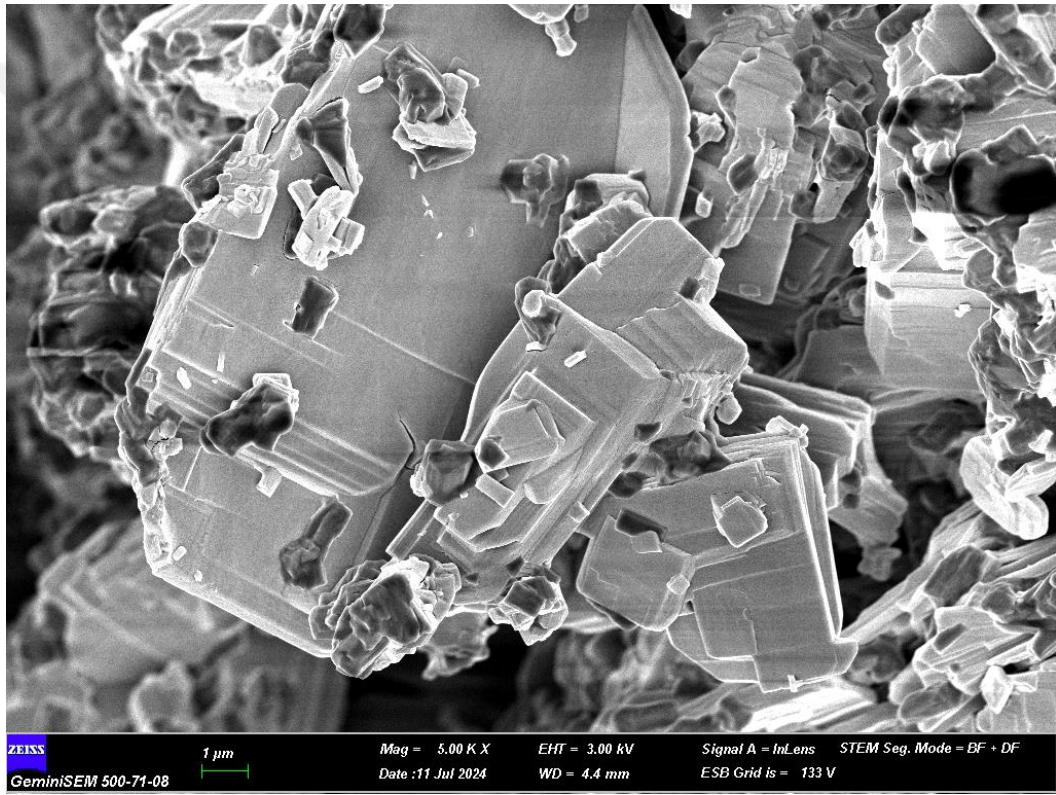
Mangan katkılı bor nitrürün FT-IR spektrumu Şekil 4.2.'de gösterilmektedir. FT-IR, 1561 cm^{-1} 'de N–B–N, 1319 cm^{-1} 'de B–N ve 920 cm^{-1} 'de B–N–B fonksiyonel bağ gerilme frekanslarının varlığını ortaya koymuştur, 1252 cm^{-1} ve 1200 cm^{-1} 'de cm Mn–BN için diğer ek bantlar sırasıyla asimetrik ve simetrik gerilme frekansları olarak görülmektedir (Ikram ve ve ark., 2020; Mahalingam ve ve ark., 2022).



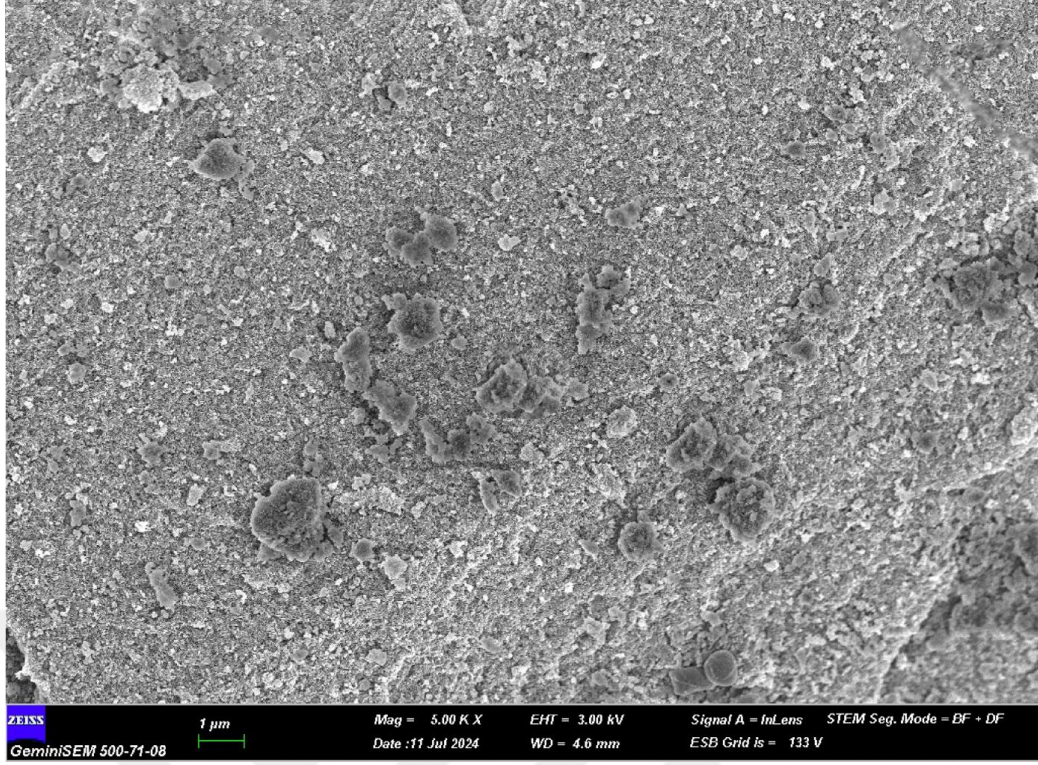
Şekil 4.2. Sentezlenen bor nitrürün FT-IR spektrumu.

4.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) tekniği

Saf ve Mn ile birleştirilmiş BN'nin morfolojik incelemesi, Şekil 4.3.'de gösterildiği gibi SEM ile elde edilen mikrograflardan gerçekleştirildi. Şekil 4.3.'deki SEM mikrografından, elde edilen parçacıkların kümelenmiş nanosheets yapısı sergilediği görülebilir. Ayrıca, düzgün özelliklere ve yuvarlak kenarlara sahip nanosheets kompaktının pürüzsüz yüzeyi de gözlemlendi. Ayrıca, Şekil 4.4.'de gösterilen katkılı numuneler, nanosheets üzerinde Mn'nin varlığı ile yüksek kümelenmeyi göstermektedir (Ikram, Jahan, ve ark., 2020; Liu ve ark., 2022).



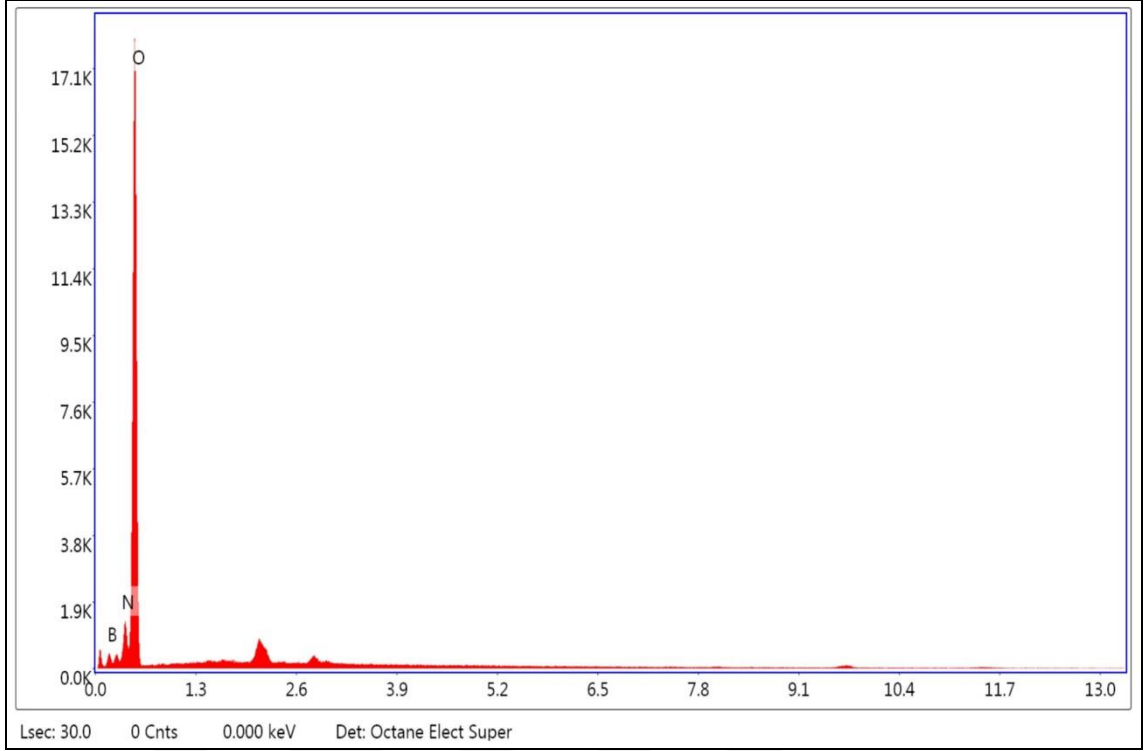
Şekil 4.3. Saf bor nitrürün SEM görüntüsü.



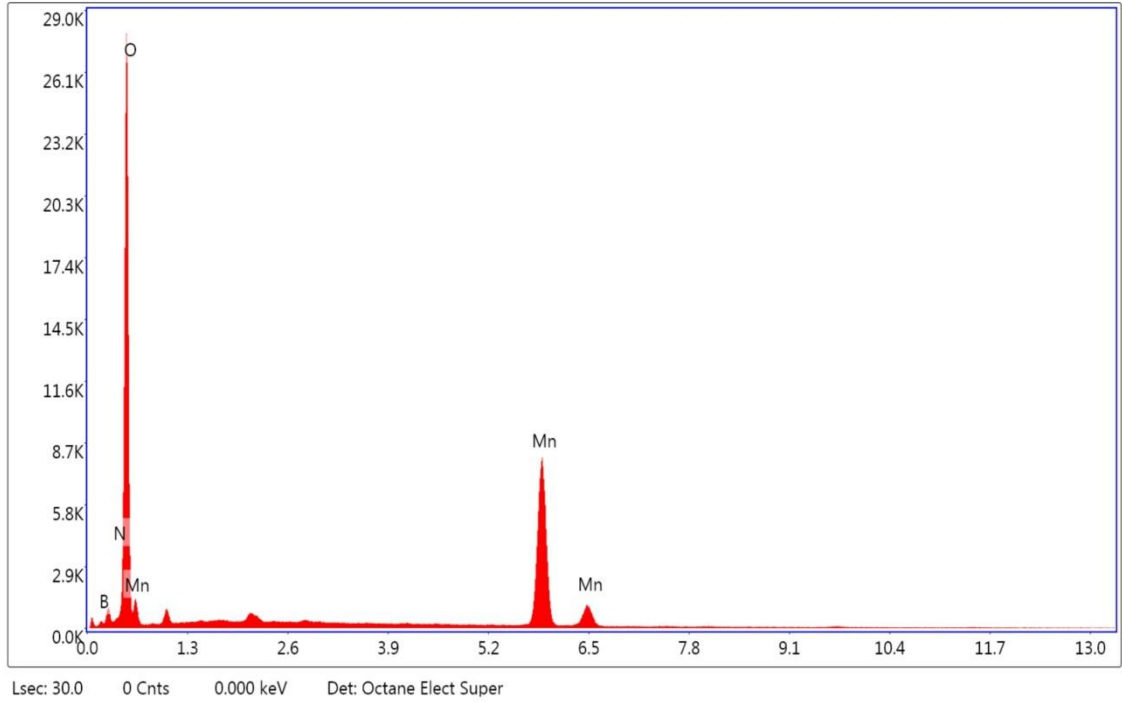
Şekil 4.4. Mn katkılı bor nitrürün SEM görüntüsü.

4.4. Enerji dağılımı X-ışını spektroskopisi (EDX) tekniği

Sentezlenen bor nitrür ve mangan katkılı bor nitrür nano yapıları numunelerde bulunan malzemelerin kimyasal bileşimleri analiz etmek için EDX analizine tabi tutulur. Bor nitrür ve mangan katkılı nano yapıları malzemelerin EDX spektrumları ve bunlara karşılık gelen elementlerin atom yüzdeleri Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.’te gösterilmiştir. Bor (B), azot (N) ve oksijen (O) elementleri bor nitrür nano yapıları malzemelerde Şekil 4.5.’te gözlenmektedir. Şekil 4.6.’te gösterildiği gibi mangan katkılı bor nitrürde ise bu elementlere ek olarak, mangan (Mn) elementi de tespit edilmiştir. Dolayısıyla, hazırlanan nanokompozitin diğer safsızlıklardan arınmış olduğu ve sadece sentezde kullanılan metallerin olduğu açıktır (Hojatisaeidi ve ark., 2020; Muthu ve ark., 2017).



Şekil 4.5. Bor nitrür nano yapılı malzemelerin EDX spektrumları, elementlerin karşılık gelen atomik %'sini göstermektedir.



Şekil 4.6. Mangan katkılı bor nitrür nano yapılı malzemelerin EDX spektrumları, elementlerin karşılık gelen atomik %'sini göstermektedir.

5. SONUÇLAR

5.1. Sonuç

Bu çalışmada, amonyak gazının borik asit ve üre karışımı ile reaksiyonundan bor nitrür ve mangan destekli bor nitrür nanoyapılar başarıyla sentezlendi. Sentezlenen ürünlerin FTIR sonuçları bor nitrür ile mangan destekli bor nitrürün varlığını ve borun nitrojene atomik oranının bor ve nitrojen arasındaki kimyasal stokiyometrik ilişki ile uyumlu olduğunu gösterdi. Ayrıca XRD, SEM ve EDX sonuçlarına göre h-BN ve h-BN-Mn nanoyapıların literatür ile uyumlu olduğunu göstermektedir. Sentezlenen h-BN-Mn nanoyapılar başta enerji depolama olmak üzere birçok uygulamalarda nanomateryal olarak kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- Ahmad, P., Khandaker, M. U., Khan, Z. R., ve Amin, Y. M. (2014). A simple technique to synthesize pure and highly crystalline boron nitride nanowires. *Ceramics International*, 40(9 PART B), 14727–14732.
- Alem, N., Erni, R., Kisielowski, C., Rossell, M. D., Gannett, W., ve Zettl, A. (2009). Atomically thin hexagonal boron nitride probed by ultrahigh-resolution transmission electron microscopy. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 80(15), 1–7.
- Alrebh, A. (2022). Boron nitride and boron carbon nitride nanosheets synthesis using inductively coupled thermal plasma. July.
- An, L., Yu, Y., Bai, C., Bai, Y., Zhang, B., Gao, K., Wang, X., Lai, Z., ve Zhang, J. (2019). Simultaneous production and functionalization of hexagonal boron nitride nanosheets by solvent-free mechanical exfoliation for superlubricant water-based lubricant additives. *npj 2D Materials and Applications*, 3(1).
- Arenal, R., Wang, M. S., Xu, Z., Loiseau, A., ve Golberg, D. (2011). Young modulus, mechanical and electrical properties of isolated individual and bundled single-walled boron nitride nanotubes. *Nanotechnology*, 22(26).
- Arnaud, B., Lebègue, S., Rabiller, P., ve Alouani, M. (2006). Huge excitonic effects in layered hexagonal boron nitride. *Physical Review Letters*, 96(2), 1–4.
- Aubendorf, G., Jüttemann, F., Muktavat, K., Sharma, L., Srivastava, R., Stauffer, A. D., Bartschat, K., Fursa, D. V., Bray, I., ve Hanne, G. F. (2006). Total polarization of the 185 nm emission line of mercury excited by electron impact. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 39(21), 4435–4442.
- Auwärter, W., Suter, H. U., Sachdev, H., ve Greber, T. (2004). Synthesis of One Monolayer of Hexagonal Boron Nitride on Ni(111) from B-Trichloroborazine (ClBNH)₃. *Chemistry of Materials*, 16(2), 343–345.
- Aydin, H. (2018). Nanoyapılı Hegzagonal Bor Nitrür Üretimi ve Karakterizasyonu The Production and Characterization of Nanostructured Hexagonal Boron Nitride. *Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi Science and Eng. J of Fırat Univ*, 30(2), 269–275.
- Bae, D. S., Kim, C., Lee, H., Khater, O., Kim, K. S., Shin, H., Lee, K. H., ve Kim, M. J. (2022). Spontaneous formation of boron nitride nanotube fibers by boron impurity reduction in laser ablation of ammonia borane. *Nano Convergence*, 9(1).
- Barabash, A., Barabash, D., Pertsev, V., ve Panfilov, D. (2019). Polymer-Composite Materials for Radiation Protection. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 983, 352–360.

- Bayda, S., Adeel, M., Tuccinardi, T., Cordani, M., ve Rizzolio, F. (2020). The history of nanoscience and nanotechnology: From chemical-physical applications to nanomedicine. *Molecules*, 25(1), 1–15.
- Belkerk, B. E., Achour, A., Zhang, D., Sahli, S., Djouadi, M. A., ve Yap, Y. K. (2016). Thermal conductivity of vertically aligned boron nitride nanotubes. *Applied Physics Express*, 9(7).
- Ben, McLean, Alister, J. P. (2023). *Boron Nitride Nanomaterials*.
- Benka, S. G. (2005). Two-dimensional atomic crystals. *Physics Today*, 58(9), 9–9.
- Berman, R., Simon, F. E., ve Ziman, J. M. (1953). The thermal conductivity of diamond at low temperatures. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. *Mathematical and Physical Sciences*, 220(1141), 171–183.
- Blase, X., Rubio, A., Louie, S. G., ve Cohen, M. L. (1994). Stability and band gap constancy of boron nitride nanotubes. *Epl*, 28(5), 335–340.
- Boldrin, L., Scarpa, F., Chowdhury, R., ve Adhikari, S. (2011). Effective mechanical properties of hexagonal boron nitride nanosheets. *Nanotechnology*, 22(50).
- Britun, V. F., ve Kurdyumov, A. V. (2000). Mechanisms of martensitic transformations in boron nitride and conditions of their development. *High Pressure Research*, 17(2), 101–111.
- Büchner, U. (1977). Wave-Vector Dependence of the Electron Energy Losses of Boron Nitride and Graphite. *Physica Status Solidi (B)*, 81(1), 227–234.
- Cai, Q., Scullion, D., Falin, A., Watanabe, K., Taniguchi, T., Chen, Y., Santos, E. J. G., ve Li, L. H. (2017). Raman signature and phonon dispersion of atomically thin boron nitride. *Nanoscale*, 9(9), 3059–3067.
- Cai, Q., Scullion, D., Gan, W., Falin, A., Zhang, S., Watanabe, K., Taniguchi, T., Chen, Y., Santos, E. J. G., ve Li, L. H. (2019). High thermal conductivity of high-quality monolayer boron nitride and its thermal expansion. *Science Advances*, 5(6), 1–9.
- Cai, Y., Zhang, L., Zeng, Q., Cheng, L., ve Xu, Y. (2007). Infrared reflectance spectrum of BN calculated from first principles. *Solid State Communications*, 141(5), 262–266.
- Caneva, S., Weatherup, R. S., Bayer, B. C., Blume, R., Cabrero-Vilatela, A., Braeuninger-Weimer, P., Martin, M. B., Wang, R., Baehtz, C., Schloegl, R., Meyer, J. C., ve Hofmann, S. (2016). Controlling Catalyst Bulk Reservoir Effects for Monolayer Hexagonal Boron Nitride CVD. *Nano Letters*, 16(2), 1250–1261.
- Chancellor, J. C., Scott, G. B. I., ve Sutton, J. P. (2014). Space radiation: The number one risk to astronaut health beyond low earth orbit. *Life*, 4(3), 491–510.

- Chang, C. W., Fennimore, A. M., Afanasiev, A., Okawa, D., Ikuno, T., Garcia, H., Li, D., Majumdar, A., ve Zettl, A. (2006). Isotope effect on the thermal conductivity of boron nitride nanotubes. *Physical Review Letters*, 97(8), 1–4.
- Chang, C. W., Okawa, D., Garcia, H., Majumdar, A., ve Zettl, A. (2008). Breakdown of fourier's law in nanotube thermal conductors. *Physical Review Letters*, 101(7), 1–4.
- Chen, G., Wang, Y., Zou, Y., Wang, H., Qiu, J., Cao, J., Wang, S., Jia, D., ve Zhou, Y. (2021). Hexagonal boron nitride and alumina dual-layer coating for space solar thermal shielding. *Chemical Engineering Journal*, 421(August), 127802.
- Chen, X., Dmuchowski, C. M., Park, C., Fay, C. C., ve Ke, C. (2017). Quantitative Characterization of Structural and Mechanical Properties of Boron Nitride Nanotubes in High Temperature Environments. *Scientific Reports*, 7(1), 1–9.
- Chen, X., Zhang, L., Park, C., Fay, C. C., Wang, X., ve Ke, C. (2015). Mechanical strength of boron nitride nanotube-polymer interfaces. *Applied Physics Letters*, 107(25).
- Chen, Y., Fitz Gerald, J., Williams, J. S., ve Bulcock, S. (1999). Synthesis of boron nitride nanotubes at low temperatures using reactive ball milling. *Chemical Physics Letters*, 299(3–4), 260–264.
- Cheraghi, E., Chen, S., ve Yeow, J. T. W. (2021). Boron Nitride-Based Nanomaterials for Radiation Shielding: A Review. *IEEE Nanotechnology Magazine*, 15(3), 8–17.
- Chowdhury, R., ve Adhikari, S. (2011). Boron-nitride nanotubes as zeptogram-scale bionanosensors: Theoretical investigations. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 10(4), 659–667.
- Ciofani, G., ve Mattoli, V. (2016). Boron nitride nanotubes in nanomedicine. *Nitride Nanotubes in Nanomedicine*.
- Cohen, M. L., ve Zettl, A. (2010). The physics of boron nitride nanotubes. *Physics Today*, 63(11), 34–38.
- Crane, T. P., ve Cowan, B. P. (2000). Magnetic relaxation properties of helium-3 adsorbed on hexagonal boron nitride. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 62(17), 11359–11362.
- Deng, J., Wang, B., Tan, L., Yan, H., ve Chen, G. (2000). Growth of cubic boron nitride films by RF reactive sputter. *Thin Solid Films*, 368(2), 312–314.
- Dmitri Golberg, Y. B. (2010). Boron nitride nanotubes and nanosheets. *ACS Nano* 4(6), 2979–2993.
- Dovesi, R., Pisani, C., Roetti, C., ve Dellarole, P. (1981). Exact-exchange Hartree-Fock calculations for periodic systems. IV. Ground-state properties of cubic boron nitride. *Physical Review B*, 24(8), 4170–4176.

- Driver, M. S., Beatty, J. D., Olanipekun, O., Reid, K., Rath, A., Voyles, P. M., ve Kelber, J. A. (2016). Atomic Layer Epitaxy of h-BN(0001) Multilayers on Co(0001) and Molecular Beam Epitaxy Growth of Graphene on h-BN(0001)/Co(0001). *Langmuir*, 32(11), 2601–2607.
- Dubrovinskaia, N., Solozhenko, V. L., Miyajima, N., Dmitriev, V., Kurakevych, O. O., ve Dubrovinsky, L. (2007). Superhard nanocomposite of dense polymorphs of boron nitride: Noncarbon material has reached diamond hardness. *Applied Physics Letters*, 90(10), 1–4.
- Duclaux, L., Nysten, B., Issi, J.-P., ve Moore, A. %. (1992). Structure and low-temperature thermal conductivity of pyrolytic boron nitride B-1348 Louvain-la-1Veuve, Belgium. *Physical Review B*, 46(6), 3362–3367.
- E Sichel, R. E. M. (1976). Heat capacity and thermal conductivity of hexagonal pyrolytic boron nitride.
- Emanet Ciofani, M., Şen, Ö., ve Çulha, M. (2020). Hexagonal Boron Nitride Nanoparticles for Prostate Cancer Treatment. *ACS Applied Nano Materials*, 3(3), 2364–2372.
- Eremets, M., Takemura, K., Yusa, H., Golberg, D., Bando, Y., ve Blank, V. (1998). Disordered state in first-order phase transitions: Hexagonal-to-cubic and cubic-to-hexagonal transitions in boron nitride. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 57(10), 5655–5660.
- Evans, D. A., McGlynn, A. G., Towlson, B. M., Gunn, M., Jones, D., Jenkins, T. E., Winter, R., ve Poolton, N. R. J. (2008). Determination of the optical band-gap energy of cubic and hexagonal boron nitride using luminescence excitation spectroscopy. *Journal of Physics Condensed Matter*, 20(7).
- Falin, A., Cai, Q., Santos, E. J. G., Scullion, D., Qian, D., Zhang, R., Yang, Z., Huang, S., Watanabe, K., Taniguchi, T., Barnett, M. R., Chen, Y., Ruoff, R. S., ve Li, L. H. (2017). Mechanical properties of atomically thin boron nitride and the role of interlayer interactions. *Nature Communications*, 8, 1–9.
- Fang, W. (2015). Synthesis of Bilayer Graphene and Hexagonal Boron Nitride by Chemical Vapor Deposition Method. *PhD Thesis, December*, 1–172.
- Fomichev, V. A., ve Rumsh, M. A. (1968). Investigation of X-ray spectra of hexagonal and cubic boron nitride. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 29(6), 1015–1024.
- Friedmann, T. A., Mirkarimi, P. B., Medlin, D. L., McCarty, K. F., Klaus, E. J., Boehme, D. R., Johnsen, H. A., Mills, M. J., Ottesen, D. K., ve Barbour, J. C. (1994). Ion-assisted pulsed laser deposition of cubic boron nitride films. *Journal of Applied Physics*, 76(5), 3088–3101.

- Gan, L., ve Luo, Z. (2013). Turning off hydrogen to realize seeded growth of subcentimeter single-crystal graphene grains on copper. *ACS Nano*, 7(10), 9480–9488.
- Gao, Y., Ren, W., Ma, T., Liu, Z., Zhang, Y., Liu, W. Bin, Ma, L. P., Ma, X., ve Cheng, H. M. (2013). Repeated and controlled growth of monolayer, bilayer and few-layer hexagonal boron nitride on Pt foils. *ACS Nano*, 7(6), 5199–5206.
- Golberg, D., Costa, P. M. F. J., Lourie, O., Mitome, M., Bai, X., Kurashima, K., Zhi, C., Tang, C., ve Bando, Y. (2007). Direct force measurements and kinking under elastic deformation of individual multiwalled boron nitride nanotubes. *Nano Letters*, 7(7), 2146–2151.
- Gorbachev, R. V., Riaz, I., Nair, R. R., Jalil, R., Britnell, L., Belle, B. D., Hill, E. W., Novoselov, K. S., Watanabe, K., Taniguchi, T., Geim, A. K., ve Blake, P. (2011). Hunting for monolayer boron nitride: Optical and raman signatures. *Small*, 7(4), 465–468.
- Han, N., Wang, S., Rana, A. K., Asif, S., Klemeš, J. J., Bokhari, A., Long, J., Thakur, V. K., ve Zhao, X. (2022). Rational design of boron nitride with different dimensionalities for sustainable applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 170(October).
- Haubner, R., Wilhelm, M., Weissenbacher, R., ve Lux, B. (2002). Boron Nitrides — Properties, Synthesis and Applications. 102, 1–45. Hojatisaeidi, F., Mureddu, M., Dessi, F., Durand, G., Durand, G., ve Saha, B. (2020). Metal-free modified boron nitride for enhanced CO₂ capture. *Energies*, 13(3), 1–11.
- Huang, J., Guo, Y., Fan, Y., ve Liang, Y. (2020). Molecular dynamics investigation of the thermal properties in single-walled boron nitride nanotube. *Materials Research Express*, 7(2).
- Ikram, M., Hassan, J., Imran, M., Haider, J., Ul-Hamid, A., Shahzadi, I., Ikram, M., Raza, A., Kumar, U., ve Ali, S. (2020). 2D chemically exfoliated hexagonal boron nitride (hBN) nanosheets doped with Ni: synthesis, properties and catalytic application for the treatment of industrial wastewater. *Applied Nanoscience (Switzerland)*, 10(9), 3525–3528.
- Ikram, M., Jahan, I., Haider, A., Hassan, J., Ul-Hamid, A., Imran, M., Haider, J., Shahzadi, A., Shahbaz, A., ve Ali, S. (2020). Bactericidal behavior of chemically exfoliated boron nitride nanosheets doped with zirconium. *Applied Nanoscience (Switzerland)*, 10(7), 2339–2349.
- Industries, E. (1982). Stable Region of CBN. 19.
- Izyumskaya, N., Demchenko, D. O., Das, S., Özgür, Ü., Avrutin, V., ve Morkoç, H. (2017). Recent Development of Boron Nitride towards Electronic Applications. *Advanced Electronic Materials*, 3(5), 1–22.

- Jaffrennou, P., Barjon, J., Lauret, J. S., Maguer, A., Golberg, D., Attal-Trétout, B., Ducastelle, F., ve Loiseau, A. (2007). Optical properties of multiwall boron nitride nanotubes. *Physica Status Solidi (B) Basic Research*, 244(11), 4147–4151.
- Jawaid, M., ve Khan, A. (y.y.). *Multifunctional Boron-Nitride Composites*.
- Jawaid, M., ve Khan, A. (2023). *Multifunctional Boron-Nitride Composites*.
- Jhi, S. H. (2006). Activated boron nitride nanotubes: A potential material for room-temperature hydrogen storage. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 74(15), 31–34.
- Jhi, S. H., ve Kwon, Y. K. (2004). Hydrogen adsorption on boron nitride nanotubes: A path to room-temperature hydrogen storage. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 69(24), 1–4.
- Ji, C., Levitas, V. I., Zhu, H., Chaudhuri, J., Marathe, A., ve Ma, Y. (2012). Shear-induced phase transition of nanocrystalline hexagonal boron nitride to wurtzitic structure at room temperature and lower pressure. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(47), 19108–19112.
- Jiang, J. W., ve Wang, J. S. (2011). Theoretical study of thermal conductivity in single-walled boron nitride nanotubes. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 84(8), 1–7.
- Jiang, X. F., Weng, Q., Wang, X. Bin, Li, X., Zhang, J., Golberg, D., ve Bando, Y. (2015). Recent Progress on Fabrications and Applications of Boron Nitride Nanomaterials: A Review. *Journal of Materials Science and Technology*, 31(6), 589–598.
- Kakarla, A. B., ve Kong, I. (2022). In Vitro and In Vivo Cytotoxicity of Boron Nitride Nanotubes: A Systematic Review. *Nanomaterials*, 12(12).
- Kalay, S., Yilmaz, Z., Sen, O., Emanet, M., Kazanc, E., ve Çulha, M. (2015). Synthesis of boron nitride nanotubes and their applications. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 6(1), 84–102.
- Kelly, B. T. (1975). The anisotropic thermal expansion of boron nitride: II. Interpretation by the semi-continuum model. *Philosophical Magazine*, 32(4), 859–867.
- Khan, U., May, P., O'Neill, A., Bell, A. P., Boussac, E., Martin, A., Semple, J., ve Coleman, J. N. (2013). Polymer reinforcement using liquid-exfoliated boron nitride nanosheets. *Nanoscale*, 5(2), 581–587.
- Kim, J. H., Cho, H., Pham, T. V., Hwang, J. H., Ahn, S., Jang, S. G., Lee, H., Park, C., Kim, C. S., ve Kim, M. J. (2019). Dual growth mode of boron nitride nanotubes in high temperature pressure laser ablation. *Scientific Reports*, 9(1), 1–10.

- Kim, J. H., Pham, T. V., Hwang, J. H., Kim, C. S., ve Kim, M. J. (2018). Boron nitride nanotubes: synthesis and applications. *Nano Convergence*, 5(1).
- Kim, J., Lee, S., Uhm, Y. R., Jun, J., Rhee, C. K., ve Kim, G. M. (2011). Synthesis and growth of boron nitride nanotubes by a ball milling-annealing process. *Acta Materialia*, 59(7), 2807–2813.
- Kim, K. K., Hsu, A., Jia, X., Kim, S. M., Shi, Y., Hofmann, M., Nezich, D., Rodriguez-nieva, J. F., Dresselhaus, M., Palacios, T., ve Kong, J. (2012). Synthesis of Monolayer Hexagonal Boron Nitride on Cu Foil Using CVD.pdf. *Nano Letters*, 12, 161.
- Kim, S. M., Hsu, A., Park, M. H., Chae, S. H., Yun, S. J., Lee, J. S., Cho, D. H., Fang, W., Lee, C., Palacios, T., Dresselhaus, M., Kim, K. K., Lee, Y. H., ve Kong, J. (2015). Synthesis of large-area multilayer hexagonal boron nitride for high material performance. *Nature Communications*, 6.
- Kimura, Y., Wakabayashi, T., Okada, K., Wada, T., ve Nishikawa, H. (1999). Boron nitride as a lubricant additive. *Wear*, 232(2), 199–206.
- Kostoglou, N., Tampaxis, C., Charalambopoulou, G., Constantinides, G., Ryzhkov, V., Doumanidis, C., Matovic, B., Mitterer, C., ve Rebholz, C. (2020). Boron nitride nanotubes versus carbon nanotubes: A thermal stability and oxidation behavior study. *Nanomaterials*, 10(12), 1–9.
- Kubota, Y., Watanabe, K., Tsuda, O., ve Taniguchi, T. (2007). Deep ultraviolet light-emitting hexagonal boron nitride synthesized at atmospheric pressure. *Science*, 317(5840), 932–934.
- Lale, A., Bernard, S., ve Demirci, U. B. (2018). Boron Nitride for Hydrogen Storage. *ChemPlusChem*, 83(10), 893–903.
- Lauret, J. S., Arenal, R., Ducastelle, F., Loiseau, A., Cau, M., Attal-Tretout, B., Rosencher, E., ve Goux-Capes, L. (2005). Optical transitions in single-wall boron nitride nanotubes. *Physical Review Letters*, 94(3), 1–4.
- Lee, C., Li, Q., Kalb, W., Liu, X. Z., Berger, H., Carpick, R. W., ve Hone, J. (2010). Frictional characteristics of atomically thin sheets. *Science*, 328(5974), 76–80.
- Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W., ve Hone, J. (2008). Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *Science*, 321(5887), 385–388.
- Lee, R. S., Gavillet, J., Chapelle, M. L., Loiseau, A., Cochon, J. L., Pigache, D., Thibault, J., ve Willaime, F. (2001). Catalyst-free synthesis of boron nitride single-wall nanotubes with a preferred zig-zag configuration. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 64(12), 6–9.
- Li, H., Zhang, Q., Chong, C., Yap, R., Tay, K., Hang, T., Edwin, T. H. T., Olivier, A. A., Yap, C. C. R., Tay, B. K., Edwin, T. H. T., Olivier, A. A., Baillargeat, D., Pro,

- D., Arulkumar, S., Parthiban, S., Goswami, A., Varma, R. S., Naushad, M., ... Prakash, C. (2019). Accepted Manuscript. *Materials Today: Proceedings*, 22(1), 16–20.
- Li, L. H., Chen, Y., Behan, G., Zhang, H., Petracic, M., ve Glushenkov, A. M. (2011). Large-scale mechanical peeling of boron nitride nanosheets by low-energy ball milling. *Journal of Materials Chemistry*, 21(32), 11862–11866.
- Li, Q., Zhou, Z. F., Lee, C. S., Lee, S. T., ve Bello, I. (2001). Synthesis and characterization of cubic boron nitride films: Substrate bias and ion flux effects. *Diamond and Related Materials*, 10(9–10), 1886–1891.
- Liang, H., Guan, S., Li, X., Liang, A., Zeng, Y., Liu, C., Chen, H., Lin, W., He, D., Wang, L., ve Peng, F. (2019). Microstructure evolution, densification behavior and mechanical properties of nano-HfB₂ sintered under high pressure. *Ceramics International*, 45(6), 7885–7893.
- Liang, H., Lin, W., Wang, Q., Zhang, W., Guan, S., Zhang, J., Kai, J. J., He, D., ve Peng, F. (2020). Ultrahard and stable nanostructured cubic boron nitride from hexagonal boron nitride. *Ceramics International*, 46(8), 12788–12794.
- Lindsay, L., ve Broido, D. A. (2011). Enhanced thermal conductivity and isotope effect in single-layer hexagonal boron nitride. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 84(15), 1–6.
- Lipp, A., Schwetz, K. A., ve Hunold, K. (1989). Hexagonal boron nitride: Fabrication, properties and applications. *Journal of the European Ceramic Society*, 5(1), 3–9.
- Liu, H., Yan, Z., Sun, Z., Li, A., Guo, Z., ve Qian, L. (2022). Highly Efficient Synthesis of Hexagonal Boron Nitride Nanofibers with High Specific Surface Area. *ES Materials and Manufacturing*, 16, 56–65.
- Liu, H., You, C. Y., Li, J., Galligan, P. R., You, J., Liu, Z., Cai, Y., ve Luo, Z. (2021). Synthesis of hexagonal boron nitrides by chemical vapor deposition and their use as single photon emitters. *Nano Materials Science*, 3(3), 291–312.
- Loiseau, A., Willaime, F., Demoncy, N., Hug, G., ve Pascard, H. (1996). Boron nitride nanotubes with reduced numbers of layers synthesized by arc discharge. *Physical Review Letters*, 76(25), 4737–4740.
- Mahalingam, S., Murugesan, A., Thiruppathiraja, T., Lakshmipathi, S., Makhanya, T. R., ve Gengan, R. M. (2022). Green synthesis of benzimidazole derivatives by using zinc boron nitride catalyst and their application from DFT (B3LYP) study. *Heliyon*, 8(11), e11480.
- Mamy, R., Thomas, J., Jezequel, G., ve Lemonnier, J. C. (1981). Anisotropie Des Transitions Interbandes Dans Le Nitrure De Bore Hexagonal. *Journal de physique. Lettres*, 42(22), 473–475.

- Maryam, A. (2020). Characterization, Exfoliation and Applications of Boron Nitride and Molybdenum Disulfide from Compressible Flow Exfoliation. Satukan Tekad Menuju Indonesia Sehat, November.
- Mckinney, R., Gorai, P., Toberer, E. S., ve Stevanovic, V. (2019). Rapid Prediction of Anisotropic Lattice Thermal Conductivity: Application to Layered Materials. *Chemistry of Materials*, 31(6), 2048–2057.
- Meng, J., Zhang, X., Wang, Y., Yin, Z., Liu, H., Xia, J., Wang, H., You, J., Jin, P., Wang, D., ve Meng, X. M. (2017). Aligned Growth of Millimeter-Size Hexagonal Boron Nitride Single-Crystal Domains on Epitaxial Nickel Thin Film. *Small*, 13(18), 1–8.
- Meyer, J. C., Chuvilin, A., Algara-Siller, G., Biskupek, J., ve Kaiser, U. (2009). Selective sputtering and atomic resolution imaging of atomically thin boron nitride membranes. *Nano Letters*, 9(7), 2683–2689.
- Mirkarimi, P. B., McCarty, K. F., ve Medlin, D. L. (1997). Review of advances in cubic boron nitride film synthesis. *Materials Science and Engineering R: Reports*, 21(2), 47–100.
- Mittal, N., Kedawat, G., Kanika, Gupta, S., ve Gupta, B. K. (2020). An innovative method for large-scale synthesis of hexagonal boron nitride nanosheets by liquid phase exfoliation. *ChemistrySelect*, 5(40), 12564–12569.
- Morelli, D. T., Heremans, J. P., ve Slack, G. A. (2002). Estimation of the isotope effect on the lattice thermal conductivity of group IV and group III-V semiconductors. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 66(19), 1953041–1953049.
- Muthu, R. N., Rajashabala, S., ve Kannan, R. (2017). Hydrogen storage performance of lithium borohydride decorated activated hexagonal boron nitride nanocomposite for fuel cell applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(23), 15586–15596.
- Nagakubo, A., Ogi, H., Sumiya, H., Kusakabe, K., ve Hirao, M. (2013). Elastic constants of cubic and wurtzite boron nitrides. *Applied Physics Letters*, 102(24).
- Nagashima, A., Tejima, N., Gamou, Y., Kawai, T., ve Oshima, C. (1995). Electronic structure of monolayer hexagonal boron nitride physisorbed on metal surfaces. *Physical Review Letters*, 75(21), 3918–3921.
- Narita, I., ve Oku, T. (2003). Synthesis of boron nitride nanotubes by using NbB₂, YB₆ and YN₆/Ni powders. *Diamond and Related Materials*, 12(10–11), 1912–1917.
- Nasreen G.Chopra, R.J.Luyken, K.Cherrey, VincentH.Crespi, MarvinL.Cohen, StevenG.Louie, ve A.Zettl*. (1995). BNNT chopra1995. *Science*, 269, 966–967.
- Nemanich, R. J., Solin, S. A., ve Martin, R. M. (1981). Light scattering study of boron nitride microcrystals. *Physical Review B*, 23(12), 6348–6356.

- Ng, M. F., ve Zhang, R. Q. (2004). Optical spectra of single-walled boron nitride nanotubes. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 69(11), 1–6.
- Noor Mohammad, S. (2002). Electrical characteristics of thin film cubic boron nitride. *Solid-State Electronics*, 46(2), 203–222.
- Novikov, N. V., Podoba, A. P., Perevertailo, V. M., Shmegeera, S. V., ve Witek, A. (2000). Effect of isotope content on the cubic boron nitride lattice thermal conductivity. *Diamond and Related Materials*, 9(3), 629–631.
- O. Brafman, G. L. and S. S. M. (1968). Raman Spectra Of A ϵ N, Cubic Bn And Bp. *The Journal of Antibiotics*, 21(2), 102010.
- O’Connell, M. J., Bachilo, S. H., Huffman, C. B., Moore, V. C., Strano, M. S., Haroz, E. H., Rialon, K. L., Boul, P. J., Noon, W. H., Kittrell, C., Ma, J., Hauge, R. H., Weisman, R. B., ve Smalley, R. E. (2002). Band gap fluorescence from individual single-walled carbon nanotubes. *Science*, 297(5581), 593–596.
- Olson, J. R., Pohl, R. O., Vandersande, J. W., Zoltan, A., Anthony, T. R., ve Banholzer, W. F. (1993). Thermal conductivity of diamond between 170 and 1200 K and the isotope effect. *Physical Review B*, 47(22), 14850–14856.
- Ortiz Balbuena, J., Tutor De Ureta, P., Rivera Ruiz, E., ve Mellor Pita, S. (2004). Enfermedad de Vogt-Koyanagi-Harada. *Medicina Clinica*, 146(2), 93–94.
- Oskay, N. (2012). Bu tez çalışması Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Başkanlığı tarafından desteklenmiştir. Proje No: 1005F110. 1–129.
- Ouyang, T., Chen, Y., Xie, Y., Yang, K., Bao, Z., ve Zhong, J. (2010). Thermal transport in hexagonal boron nitride nanoribbons. *Nanotechnology*, 21(24).
- Paffett, M. T., Simonson, R. J., Papin, P., ve Paine, R. T. (1990). Borazine adsorption and decomposition at Pt(111) and Ru(001) surfaces. *Surface Science*, 232(3), 286–296.
- Paine, R. T., ve Narula, C. K. (1990). Synthetic Routes to Boron Nitride. *Chemical Reviews*, 90(1), 73–91.
- Pakdel, A., Bando, Y., ve Golberg, D. (2014). Nano boron nitride flatland. *Chemical Society Reviews*, 43(3), 934–959.
- Pakdel, A., Zhi, C., Bando, Y., ve Golberg, D. (2012). Low-dimensional boron nitride nanomaterials. *Materials Today*, 15(6), 256–265.
- Pan, Z., Sun, H., Zhang, Y., ve Chen, C. (2009). Harder than diamond: Superior indentation strength of wurtzite BN and lonsdaleite. *Physical Review Letters*, 102(5), 1–4.

- Peng, C. X., Weng, H. M., Zhang, Y., Ma, X. P., ve Ye, B. J. (2008). Influence of dopants in ZnO films on defects. *Chinese Physics Letters*, 25(12), 4442–4445.
- Pierson, H. O. (1975). Boron Nitride Composites By Chemical Vapor Deposition. *Journal of Composite Materials*, 9(3), 228–240.
- Powers, M. J., Benjamin, M. C., Porter, L. M., Nemanich, R. J., Davis, R. F., Cuomo, J. J., Doll, G. L., ve Harris, S. J. (1995). Observation of a negative electron affinity for boron nitride. *Applied Physics Letters*, 67(1995), 3912.
- Rani, P., ve Chakraborty, M. K. (2020). Ultrahigh thermal conductivity in isotope-enriched cubic boron nitride. *Range Management and Agroforestry*, 4(1), 1–15.
- Ravan, B. A., ve Jafari, H. (2019). DFT study on electronic and optical properties of halogen-adsorbed hexagonal boron nitride. *Computational Condensed Matter*, 21, e00416.
- Roy, S., ve Zhang, X. (2021). Structure, Properties and Applications of Two-Dimensional Hexagonal Boron Nitride. *Advanced Materials*, 33(44), 1–48.
- Rubio, A., Corkill, J. L., ve Cohen, M. L. (1994). Theory of graphitic boron nitride nanotubes. *Physical Review B*, 49(7), 5081–5084.
- Satawara, A. M., Shaikh, G. A., Gupta, S. K., ve Gajjar, P. N. (2020). Structural, electronic and optical properties of hexagonal boron-nitride (h-BN) monolayer: An Ab-initio study. *Materials Today: Proceedings*, 47(xxxx), 529–532.
- Sevik, C., Kinaci, A., Haskins, J. B., ve Çağın, T. (2011). Characterization of thermal transport in low-dimensional boron nitride nanostructures. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 84(8), 1–7.
- Shen, T., Liu, S., Yan, W., ve Wang, J. (2019). Highly efficient preparation of hexagonal boron nitride by direct microwave heating for dye removal. *Journal of Materials Science*, 54(12), 8852–8859.
- Shi, Y., Hamsen, C., Jia, X., Kim, K. K., Reina, A., Hofmann, M., Hsu, A. L., Zhang, K., Li, H., Juang, Z. Y., Dresselhaus, M. S., Li, L. J., ve Kong, J. (2010). Synthesis of few-layer hexagonal boron nitride thin film by chemical vapor deposition. *Nano Letters*, 10(10), 4134–4139.
- Singh, B., Kaur, G., Singh, P., Singh, K., Kumar, B., Vij, A., Kumar, M., Bala, R., Meena, R., Singh, A., Thakur, A., ve Kumar, A. (2016). Nanostructured Boron Nitride with High Water Dispersibility for Boron Neutron Capture Therapy. *Scientific Reports*, 6(September), 1–10.
- Solozhenko, V. L., Turkevich, V. Z., ve Holzapfel, W. B. (1999). Refined Phase Diagram of Boron Nitride. *Journal of Physical Chemistry B*, 103(15), 2903–2905.
- Song, L., Ci, L., Lu, H., Sorokin, P. B., Jin, C., Ni, J., Kvashnin, A. G., Kvashnin, D. G., Lou, J., Yakobson, B. I., ve Ajayan, P. M. (2010). Large scale growth and

- characterization of atomic hexagonal boron nitride layers. *Nano Letters*, 10(8), 3209–3215.
- Spencer, S. (2021). U Niversity of B Ergen M Aster T Hesis.
- Sperber, J. L. (2016). Investigations Of Hexagonal Boron Nitride: *Bulk Crystals And Atomically-Thin Two Dimensional Layers*. 1(12), 13.
- Stewart, D. A., Savic, I., ve Mingo, N. (2009). First-principles calculation of the isotope effect on boron nitride nanotube thermal conductivity. *Nano Letters*, 9(1), 81–84.
- Suryavanshi, A. P., Yu, M. F., Wen, J., Tang, C., ve Bando, Y. (2004). Elastic modulus and resonance behavior of boron nitride nanotubes. *Applied Physics Letters*, 84(14), 2527–2529.
- Tabtimsai, C., ve Wanno, B. (2021). Theoretical investigation on 5-fluorouracil anti-cancer drug adsorption on Sc- and Ti-doped armchair and zigzag boron nitride nanotubes. *Journal of Molecular Liquids*, 337, 116596.
- Tang, C., Bando, Y., Huang, Y., Zhi, C., ve Golberg, D. (2008). Synthetic routes and formation mechanisms of spherical boron nitride nanoparticles. *Advanced Functional Materials*, 18(22), 3653–3661.
- TARHAN, T. (2021). Synthesis and characterization of boron nitride nanotubes (BNNTs) with a new method and precursor materials. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11, 1217–1224.
- Tarrio, C., ve Schnatterly, S. E. (1989). Interband transitions, plasmons, and dispersion in hexagonal boron nitride. *Physical Review B*, 40(11), 7852–7859.
- Terao, T., Zhi, C., Bando, Y., Mitome, M., Tang, C., ve Golberg, D. (2010). Alignment of boron nitride nanotubes in polymeric composite films for thermal conductivity improvement. *Journal of Physical Chemistry C*, 114(10), 4340–4344.
- Thomas, S., Ajith, K. M., ve Valsakumar, M. C. (2016). Directional anisotropy, finite size effect and elastic properties of hexagonal boron nitride. *Journal of Physics Condensed Matter*, 28(29), 295302.
- Tian, Y., Xu, B., Yu, D., Ma, Y., Wang, Y., Jiang, Y., Hu, W., Tang, C., Gao, Y., Luo, K., Zhao, Z., Wang, L. M., Wen, B., He, J., ve Liu, Z. (2013). Ultrahard nanotwinned cubic boron nitride. *Nature*, 493(7432), 385–388.
- Tiano, A. L., Park, C., Lee, J. W., Luong, H. H., Gibbons, L. J., Chu, S.-H., Applin, S., Gnoffo, P., Lowther, S., Kim, H. J., Danehy, P. M., Inman, J. A., Jones, S. B., Kang, J. H., Sauti, G., Thibeault, S. A., Yamakov, V., Wise, K. E., Su, J., ve Fay, C. C. (2014). Boron nitride nanotube: synthesis and applications. *Nanosensors, Biosensors, and Info-Tech Sensors and Systems 2014*, 9060(Cvd), 906006.
- Trice, R. W., ve Halloran, J. W. (1999). Hot-Pressed Boron Nitride / Oxide Ceramic Composites. *Journal of American Ceramic Society*, 65, 2563–2565.

- Vel, L., Demazeau, G., ve Etourneau, J. (1991). Cubic boron nitride: synthesis, physicochemical properties and applications. *Materials Science and Engineering B*, 10(2), 149–164.
- Wang, J., Lee, C. H., ve Yap, Y. K. (2010). Recent advancements in boron nitride nanotubes. *Nanoscale*, 2(10), 2028–2034.
- Wang, J., Ma, F., ve Sun, M. (2017). Graphene, hexagonal boron nitride, and their heterostructures: properties and applications. *RSC Advances*, 7(27), 16801–16822.
- Wang, N., Yang, G., Wang, H., Yan, C., Sun, R., ve Wong, C. P. (2019). A universal method for large-yield and high-concentration exfoliation of two-dimensional hexagonal boron nitride nanosheets. *Materials Today*, 27(xx), 33–42.
- Wang, Y., Wang, F., Xu, B., Zhang, J., Sun, Q., ve Jia, Y. (2013). Theoretical prediction of hydrogen storage on Li-decorated boron nitride atomic chains. *Journal of Applied Physics*, 113(6).
- Watanabe, K., Taniguchi, T., ve Kanda, H. (2004). Direct-bandgap properties and evidence for ultraviolet lasing of hexagonal boron nitride single crystal. *Nature Materials*, 3(6), 404–409.
- Wei, L., Kuo, P. K., Thomas, R. L., Anthony, T. R., ve Banholzer, W. F. (1993). Thermal conductivity of isotopically modified single crystal diamond. *Physical Review Letters*, 70(24), 3764–3767.
- Weng, Q., Zeng, L., Chen, Z., Han, Y., Jiang, K., Bando, Y., ve Golberg, D. (2021). Hydrogen Storage in Carbon and Oxygen Co-Doped Porous Boron Nitrides. *Advanced Functional Materials*, 31(4), 7–9.
- Wentorf, R. H. (1957). Cubic form of boron nitride. *The Journal of Chemical Physics*, 26(4), 956.
- Wentorf, R. H. (1961). Synthesis of the cubic form of boron nitride. *The Journal of Chemical Physics*, 34(3), 809–812.
- Werninghaus, T., Hahn, J., Richter, F., ve Zahn, D. R. T. (1997). Raman spectroscopy investigation of size effects in cubic boron nitride. *Applied Physics Letters*, 70(8), 958–960.
- Wong, T. Lo, ve Vall'es, C. (2023). Effects of boron-nitride-based nanomaterials on the thermal properties of composite organic phase change materials: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 187,
- Xiao, F. (2016). Hexagonal boron nitride nanosheets synthesis and applications. Hexagonal boron nitride nanosheets synthesis and applications.
- Xu, Y. N., ve Ching, W. Y. (1991). Calculation of ground-state and optical properties of boron nitrides in the hexagonal, cubic, and wurtzite structures. *Physical Review B*, 44(15), 7787–7798.

- Yeh, Y. W., Raites, Y., Koel, B. E., ve Yao, N. (2017). Stable synthesis of few-layered boron nitride nanotubes by anodic arc discharge. *Scientific Reports*, 7(1), 1–7.
- Yin, J., Jidong, L., Hang, Y., Jin, Y., Tai, G., Xuemei, L., Zhang, Z., ve Guo, W. (2016). Boron Nitride Nanostructures: Fabrication, Functionalization and Applications. *Small*, 12(22), 2942–2968.
- Yu, D. P., Sun, X. S., Lee, C. S., Bello, I., Lee, S. T., Gu, H. D., Leung, K. M., Zhou, G. W., Dong, Z. F., ve Zhang, Z. (1998). Synthesis of boron nitride nanotubes by means of excimer laser ablation at high temperature. *Applied Physics Letters*, 72(16), 1966–1968.
- Yu, J., Qin, L., Hao, Y., Kuang, S., Bai, X., Chong, Y. M., Zhang, W., ve Wang, E. (2010). Vertically aligned boron nitride nanosheets: Chemical vapor synthesis, ultraviolet light emission, and superhydrophobicity. *ACS Nano*, 4(1), 414–422.
- Zettl, A., ve N. G. Chopra. (1998). Measurement of the elastic modulus of a multi wall boron nitride nanotube. *Solid State Communications*, 105(5), 297–300.
- Zhang, H., Tong, C. J., Zhang, Y., Zhang, Y. N., ve Liu, L. M. (2015). Porous BN for hydrogen generation and storage. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(18), 9632–9637.
- Zhang, K., Feng, Y., Wang, F., Yang, Z., ve Wang, J. (2017). Two dimensional hexagonal boron nitride (2D-hBN): Synthesis, properties and applications. *Journal of Materials Chemistry C*, 5(46), 11992–12022.
- Zhang, X., ve Meng, J. (2019). Recent progress of boron nitrides. *Ultra-Wide Bandgap Semiconductor Materials*.
- Zhang, X. W., Boyen, H. G., Deyneka, N., Ziemann, P., Banhart, F., ve Schreck, M. (2003). Epitaxy of cubic boron nitride on (001)-oriented diamond. *Nature Materials*, 2(5), 312–315.
- Zhi, C., Bando, Y., Tang, C., ve Golberg, D. (2010). Boron nitride nanotubes. *Materials Science and Engineering R: Reports*, 70(3–6), 92–111.

ÖZGEÇMİŞ**KİŞİSEL BİLGİLER**

Adı Soyadı : Aygöl BELGE
Uyruğu : TC

EĞİTİM

Derece	Adı	Bitirme Yılı
Üniversite	Trakya Üniversitesi	2014
Yüksek Lisans	Batman Üniversitesi	
Doktora	-	

İŞ DENEYİMLERİ

Kurum	Görevi	Yıl
ADK İnsan Kaynakları	İK Sorumlusu	2014-2015
Özel Okullar	Fizik Öğretmeni	2015-2024

UZMANLIK ALANI Fizik Öğretmenliği

YABANCI DİLLER İngilizce

YAYINLAR -