



**TARSUS**  
ÜNİVERSİTESİ

**T.C.**  
**TARSUS ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**  
**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GRAFİTİK KARBON NİTRÜR VE BOR NİTRÜR İÇEREN  
KOMPOZİT YAPILARIN HAZIRLANMASI; ÇEVRE VE ENERJİ  
UYGULAMALARI**

**BUSE SERT**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**TARSUS - 2022**

**T.C.  
TARSUS ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ  
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GRAFİTİK KARBON NİTRÜR VE BOR NİTRÜR İÇEREN  
KOMPOZİT YAPILARIN HAZIRLANMASI; ÇEVRE VE ENERJİ  
UYGULAMALARI**

**BUSE SERT**

**Danışman: PROF. DR. KASIM OCAKOĞLU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**TARSUS - 2022**

**Tarsus Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürlüğüne;**

Bu çalışma, jüri tarafından Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

**Başkan:** Prof. Dr. Kasım OCAKOĞLU  
(Danışman)

**Üye:** Dr. Öğr. Üyesi Ersan HARPUTLU

**Üye:** Prof. Dr. Nadir DİZGE

Yukarıdaki Jüri kararı Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ...../...../2022 tarih ve ...../.....sayılı kararıyla onaylanmıştır.

**ONAY**

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim elemanlarına ait olduklarını onaylıyorum.  
.../.../2022

Prof. Dr. Osman Murat ÖZKENDİR  
Enstitü Müdürü

**NOT:** Bu tezde kullanılan ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu'ndaki hükümlere tabidir.

## ETİK BEYANI

Tarsus Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde ve ortaya çıkan sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim 06 / 01 / 2022

İMZA

Buse SERT

## ÖZET

### Grafitik Karbon Nitrür ve Hekzagonal Bor Nitrür İçeren Kompozit Yapıların Hazırlanması; Çevre ve Enerji Uygulamaları

**BUSE SERT**

**Yüksek Lisans Tezi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Kasım OCAKOĞLU**

**Ocak 2022, 113 sayfa**

Yarı iletken nanokompozit malzemeler son yıllarda çevresel iyileştirme ve enerji uygulamaları için yoğun ilgi görmektedir. Bu tez çalışması kapsamında nanomalzeme katkılı membranlar ve süperkapasitörler üretilmiştir. Yüksek termal stabilitesi ve iyi dağılıbilirlik, kimyasal kararlılık, elektriksel yalıtım özellikleri ve toksik olmamaları sebebiyle grafitik karbon nitrür ( $g-C_3N_4$ ) ve bor nitrür kuantum noktalar (BNKN) bu uygulamalarda nanokompozit malzemelerin esas bileşenleri olarak kullanılmıştır.

$g-C_3N_4$  ve BNKN üretimi sırasında sinterleme ve hidrotermal işlem ile gerçekleştirilmiştir. Nanomalzemelerin çevresel uygulamalarında, ağırlıkça % 0.5, % 1.0 ve % 2.0  $g-C_3N_4$  veya BNKN içeren polietersülfon (PES) membranlar ( $g-C_3N_4@PES$ ,  $BNKN@PES$ ) bir döküm ünitesinde üretilmiştir. Membranların saf su akı geçirgenlik performansı ile birlikte membran tıkanıklığını önleme ve kirlilik çalışmaları da araştırılmıştır. Hibrit membranların, saf PES membrandan daha iyi temizleme özelliği sergilediği görülmüştür.

Enerji uygulamalarında kullanılmak üzere,  $g-C_3N_4$  veya BNKN içeren grafen elektrotlar hazırlanmıştır. Bu kapsamda, farklı miktarlarda alınan  $g-C_3N_4$  veya BNKN (15 mg / 30 mg / 60 mg), indirgenmiş grafen oksit (rGO) (30 mg) ile hidrotermal işleme tabii tutularak, süperkapasitör uygulamalarında kullanılacak elektrotlar ( $g-C_3N_4@rGOH$  ve  $BNKN@rGOH$ ) hazırlanmış ve uygun tekniklerle (XRD, SEM, CV, BET, ZETA) karakterize edilmiştir. Bu hibrit yapılardan üretilen elektrotların spesifik kapasitans değerleri, empedans eğrileri ve şarj/deşarj performansları elektrokimyasal teknikler ile analiz edilmiştir.  $g-C_3N_4@rGOH$  (30 mg/15 mg oranlarında) hazırlanan elektrotun  $157.4 F g^{-1}$  spesifik kapasitans değeri ile en yüksek performansa sahip olduğu bulunmuştur. Eşit oranlarda hazırlanan  $BNKN@rGOH$  (30 mg/30 mg oranlarında)

hibrit yapısından ise  $207.25 \text{ F g}^{-1}$  spesifik kapasitans değeri ile en yüksek performansa sahip olduğu bulunmuştur. Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlara göre; üretilen hibrit yapıların, evre ve enerji uygulamalarında gelecek vaad ettiği görülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Nanokompozit Malzemeler, Nanomalzeme Katkılı Membran Sentezi, Atık Su Arıtımı, Enerji Depolama, Süperkapasitör

## ABSTRACT

### **Preparation of Composite Structures Containing Graphitic Carbon Nitride and Hexagonal Boron Nitride; Environmental and Energy Applications**

**BUSE SERT**

**Master Thesis, Department of Energy Systems Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Kasım OCAKOĞLU**

**January 2022, 113 pages**

Semiconductor nanocomposite materials have attracted intense interest for environmental remediation and energy applications in recent years. In this thesis, nanomaterial doped membranes and supercapacitors were produced. Graphitic carbon nitride ( $g\text{-C}_3\text{N}_4$ ) and boron nitride quantum dots (BNKN) have been used as the main components of nanocomposite materials in these applications due to their high thermal stability and good dispersibility, chemical stability, electrical insulating properties and non-toxicity.

The production of  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  and BNKN was carried out by heating process and hydrothermal treatment, respectively. In environmental applications of nanomaterials, polyethersulfone (PES) membranes ( $g\text{-C}_3\text{N}_4 @\text{PES}$ ,  $\text{BNKN}@\text{PES}$ ) containing 0.5 %, 1.0 % and 2.0 % by weight  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  or BNKN were produced in a casting unit. Along with the pure water flux permeability performance of the membranes, membrane fouling prevention and pollution studies were also investigated. It has been observed that hybrid membranes to display better cleaning properties than pure PES membranes.

Graphene-based electrodes containing  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  or BNKN have been prepared for use in energy applications. In this context, electrodes ( $g\text{-C}_3\text{N}_4@\text{rGOH}$  ve  $\text{BNKN}@\text{rGOH}$ ) that can be used in supercapacitor applications were prepared by hydrothermal treatment with reduced graphene oxide (rGO) (30 mg) of  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  or BNKN (15 mg / 30 mg / 60 mg), taken in different amounts, and with appropriate techniques (XRD, SEM, CV, BET, ZETA) were characterized. The specific capacitance values, impedance curves and charge/discharge performances of the electrodes produced from these hybrid structures were analyzed by electrochemical techniques. It was found that the electrode prepared  $g\text{-C}_3\text{N}_4@\text{rGOH}$  (at the ratio of 30 mg/15 mg) had

the highest performance with a specific capacitance value of 157.4 F g<sup>-1</sup>. It was found that the hybrid structure of BNKN@rGOH (at the ratio of 30 mg/30 mg), prepared in equal proportions, had the highest performance with a specific capacitance value of 207.25 F g<sup>-1</sup>. According to the results obtained from this thesis study; It is seen that the hybrid structures produced are promising in environmental and energy applications.

**Keywords:** Nanocomposite Materials, Nanomaterial Doped Membrane Synthesis, Waste Water Treatment, Energy Storage, Supercapacitor

## ÖNSÖZ

Tez çalışmalarımız için, bizlere laboratuvar ortamını sağlayıp, sürekli ziyaretleriyle bizleri onurlandıran Sayın Rektörümüz Orhan AYDIN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tezin gerçekleştirilmesinde, başlangıcından sonuna kadar her konuda benden desteğini esirgemeyen, akademik alanda daha iyi ilerleyebilmem için bana yol gösteren, bilgi ve tecrübesiyle beni her zaman yönlendiren ve her durumda yanımda olan danışman hocam, sayın Prof. Dr. Kasım OCAKOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, yüksek lisans laboratuvar çalışmalarım boyunca tezimin çevre uygulamaları kısmında bana destek olan, bu konuda beni bilgilendiren Prof. Dr. Nadir DİZGE'ye teşekkür ederim.

Yüksek lisans sürecim boyunca, gerekli bütün yardım, tavsiye ve yönlendirmeleri yapan, karşılaştığım problemlerin çözümünde deneyimlerinden yararlandığım ve aynı zamanda laboratuvar çalışmalarım boyunca benden her konuda desteğini esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Ersan HARPUTLU'ya,

Ortak çalışma alanına sahip olduğum, her gün beraber vakit geçirdiğim, sevincimi hüznümü paylaştığım, benim en büyük destekçilerimden olan Functional Research Team üyelerine,

Çevre uygulamaları kısmında yürüttüğüm laboratuvar çalışmalarım esnasında, her sorumda beni geri çevirmeyen, ilgilenen Zeynep Bilici'ye,

Tüm eğitim hayatım boyunca bana olan inançlarını, ilgilerini ve desteklerini hiç bırakmayan canım ailem; babam Ahmet SERT'e, annem Nilüfer SERT'e ve ablam Burcu SERT'e

Teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ.....	v
KISALTMALAR.....	x
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xiv
GİRİŞ.....	1

## BÖLÜM I

### KARBON VE BOR İÇEREN KOMPOZİT YAPILARIN ÇEVRESEL UYGULAMALARI

	Sayfa
1.1. Nanomalzemelerin Özellikleri ve Kullanım Alanları.....	3
1.2. Kompozit Nanomalzemeler.....	8
1.3. Karbon Bazlı Nanomalzemelerin Özellikleri.....	9
1.3.1. Grafitik Karbon Nitrür İçeren Kompozit Nanomalzemenin Çevre Uygulamaları.....	12
1.4. Bor Nitrür Yapısının Fiziksel Özellikleri.....	13
1.4.1. Bor Nitrür İçeren Kompozit Nanomalzemenin Çevre Uygulamaları.....	16
1.5. Membran Prosesleri ve Membranların Özellikleri.....	18
1.5.1. Membranların Tanımı ve Özellikleri.....	18
1.5.2. Membranlardaki Akım Şekilleri.....	20
1.5.3. Membran Proseslerinin Sınıflandırılması.....	20
1.5.4. Membran Kirlenmesi ve Temizlenmesi.....	22
1.6. Kompozit Nanomalzeme Katkılı Membran Prosesleri.....	24

## BÖLÜM II

### KARBON VE BOR İÇEREN KOMPOZİT YAPILARIN ENERJİ UYGULAMALARI

	Sayfa
2.1. Enerji Depolama Sistemleri.....	26
2.1.1. Bataryalar.....	27
2.1.2. Kapasitörler.....	28
2.1.2.1. Süperkapasitörler.....	29
2.1.2.1.1. Elektrik Çift Katmanlı Süperkapasitör.....	30
2.1.2.1.2. Faradaik Kapasitörler (PsödoKapasitörler).....	31
2.1.2.1.3. Hibrit Kapasitörler.....	32
2.1.3. Elektrolit.....	33
2.2. Grafitik Karbon Nitrürün Süperkapasitör Çalışmaları.....	34
2.3. Bor Nitrür (BKNK) Süperkapasitör Çalışmaları.....	36

## BÖLÜM III

### YÖNTEM

3.1. Kullanılan Kimyasal Maddeler.....	39
3.2. Kullanılan Cihazlar.....	39
3.2.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	40
3.2.2. X-Işını Difraktometresi (XRD).....	41
3.2.3. Fourier Dönüşümlü Kızıl Ötesi Spektrometresi (FTIR).....	43
3.2.4. UV-Vis Spektrofotometre (UV-Vis).....	44
3.2.5. Floresans Spektrofotometre.....	45
3.2.6. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM).....	45

3.2.7. Yüzey Alanı Ölçümü (BET).....	46
3.2.8. Tanecik Büyüklüğü Ölçümü ( Zetasizer).....	47
3.2.9. X-Ray Fotoelektron Spektroskopisi (XPS).....	48
3.2.10. Döngüsel Voltametri (CV).....	49
3.2.11. Temas Açısı (Contact Angel).....	51
3.3. Grafitik Karbon Nitrür (g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ) Sentezi.....	52
3.4. Hekzagonal Bor Nitrür (h-BN) Sentezi.....	53
3.5. Bor Nitrür Kuantum Nokta (BNKN) Sentezi.....	53
3.6. Grafen Oksit Sentezi.....	54
3.6.1. g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @rGO Nanokompozit Yapısından Hidrojel Hazırlanması.....	55
3.6.2. BNKN@rGO Nanokompozit Yapısından Hidrojel Hazırlanması.....	55
3.7. Saf Polietersülfon (PES) Membranların Hazırlanması.....	56
3.8. Kompozit Membranların Hazırlanması.....	57
3.8.1. Kompozit Membranların Saf Su Akılarının Değerlendirilmesi ve Kirlenme Çalışmaları.....	57

## **BÖLÜM IV**

### **BULGULAR**

4.1. Kompozit Nanomalzemelerin Karakterizasyonu.....	59
4.1.1. Grafitik Karbon Nitrür (g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ) ve Katkılı g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> Membranların Karakterizasyonu.....	59
4.1.2. Bor Nitrür Kuantum Nokta (BNKN) ve Katkılı BNKN Membranların Karakterizasyonu.....	67
4.1.3. g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ve BNKN Katkılı PES Membranların Performansı.....	70
4.1.3.1. g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> Katkılı ve Saf Membranların Saf Su Akıları.....	70
4.1.3.2. g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> Katkılı ve Saf Membranların Protein Giderimi ve Akıları.....	71
4.1.3.3. g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> Katkılı ve Saf Membranların Boya Performansı.....	73
4.1.3.4. BNKN Katkılı ve Saf Membranların Saf Su Akıları.....	74

4.1.3.5. BNKN Katkılı ve Saf Membranların Protein Giderimi ve Akıları.....	75
4.1.3.6. BNKN Katkılı ve Saf Membranların Boya Performansı.....	76
4.2. g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @rGOH ve BNKN@rGOH BET Yüzey Alanı Ölçümleri.....	77
4.3. Kompozit Nanomalzemeler Üzerinde Yapılan Elektrokimyasal Çalışmalar...	78
4.3.1. g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @rGOH Nanokompozit Malzemenin Elektrokimyasal Çalışmaları.....	80
4.3.2. BNKN@rGOH Nanokompozit Malzemenin Elektrokimyasal Çalışmaları.....	85
4.4. Nanokompozit Malzemelerin İkili Hücre Elektrokimyasal Ölçümleri.....	90
<b>SONUÇ ve ÖNERİLER.....</b>	<b>95</b>
<b>KAYNAKÇA.....</b>	<b>97</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>112</b>



## KISALTMALAR

**$\Delta V$** : Potansiyel Fark

**AFM**: Atomik Kuvvet Mikroskobu

**Ag/AgCl**: Gümüş/Gümüş Klorür

**Ag**: Gümüş

**B**: Bor

**BET**: Yüzey Alanı Ölçümü

**BN**: Bor Nitür

**BNKN**: Bor Nitür Kuantum Nokta

**BNNS**: Bor Nitür Nanotabakalar

**BNNT**: Bor Nitür Nantüpler

**BSA**: Sığır Serum Albümini

**C**: Kapasitans

**Ca**: Kalsiyum

**CA**: Selüloz Asetat

**CNT**: Karbon Nanotüpler

**CoSe<sub>2</sub>**: Kobalt Selenit

**C<sub>s</sub>**: Spesifik Kapasitans

**CV**: Döngüsel Voltametri

**D**: Boyutsal

**EDLC**: Elektrikli Çift Katmanlı Kapasitörler

**EIS**: Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi

**FRR**: Akı Geri Kazanım Oranı

**FTIR**: Fourier Dönüşümlü Kızıl Ötesi Spektrometresi

**g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>**: Grafitik Karbon Nitür

**GCD**: Galvanostatik Yük-Deşarj

**GO**: Grafen Oksit

**H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**: Hidrojen Peroksit

**H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>**: Sülfürik Asit

**h-BN:** Hekzagonal Bor Nitrür  
**Hg/Hg<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:** Cıva/Cıva Sülfat  
**Hg/HgO:** Cıva/Cıva Oksit  
**Hg<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>:** Doymuş Kalomel  
**HN0<sub>3</sub>:** Nitrik Asit  
**I:** Deşarj Akımı  
**IP:** Arayüzey Polimerizasyonu  
**KBN:** Karbon Bazlı Nanomalzemeler  
**KMn0<sub>4</sub>:** Potasyum Permanganat  
**KN:** Kuantum Nokt  
**KOH:** Potasyum Hidroksit  
**m:** Elektro-Aktif Malzemenin Kütlesi  
**M:** Molarite  
**MB:** Metil Mavisi  
**MF:** Mikrofiltrasyon  
**Mg:** Magnezyum  
**Mns:** Manganez Sülfür  
**MOS<sub>2</sub>:** Molibden Disülfid  
**MWI:** Mikrodalga Işınlama Tekniği  
**Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>:** Sodyum Karbonat  
**Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>:** Sodyum Karbonat  
**nAg:** Gümüş Nanopartiküller  
**NF:** Nanofiltrasyon  
**NMP:** N-metil Prolidon  
**NOM:** Doğal Organik Madde  
**PCN:** Fosfor Katkılanmış g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>  
**PES:** Polietersülfon  
**PL:** Floresans Spektrofotometre  
**PMR:** Fotokatalitik Membran Reaktör Sistemi  
**PPA:** Polipiperazin Amid

**PVA:** Polivinilalkol  
**Q:** Potansiyel  
**QY:** Kuantum Verimi  
**Ra:** Yüzey Pürüzlülüğü  
**RGO:** İndirgenmiş Grafen Oksit  
**Rir:** Geri Dönüşü Olmayan Kirlenme Oranı  
**RO:** Ters Ozmoz  
**Rr:** Tersine Çevrilebilir Kirlenme Oranı  
**RR180:** Reaktif Red 180  
**SCE:** Standart Bir Referans Elektrot  
**SEM:** Taramalı Elektron Mikroskobu  
**SEM-EDX:** Taramalı Elektron Mikroskobu Enerji Yayılımlı X-Işını Analizi  
**SnO<sub>2</sub>:** Kalay Oksit  
**t:** Deşarj Süresi  
**TCH:** Tetrasiklin Hidroklorür  
**TFC:** İnce Film Kompozit  
**TiO<sub>2</sub>:** Titanyum Dioksit  
**UF:** Ultrafiltrasyon  
**UV-Vis:** UV-Vis Spektrofotometre  
**V:** Yük  
**WS<sub>2</sub>:** Tungsten Disülfid  
**XPS:** X-Ray Fotoelektron Spektroskopisi  
**XRD:** X-Işını Difraksiyonu  
**ZETA:** Tane Büyüklüğü Ölçümü

## TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
<b>Tablo 2.1.</b> Süperkapasitör ve Lityum İyon Pillerin Karşılaştırılması.....	30
<b>Tablo 2.2.</b> Süperkapasitörlerin Karşılaştırılması.....	33
<b>Tablo 3.1.</b> Katkılı Membranların Saf Su Akı Değerleri.....	57
<b>Tablo 4.1.</b> Kompozit Membranların Ra Değerleri .....	67
<b>Tablo 4.2.</b> Katkısız ve g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> Katkılı PES Membranların Gözeneklilik, Ortalama Gözenek Boyutu ve Temas Açısı.....	71
<b>Tablo 4.3.</b> Katkısız ve BNKN Katkılı PES Membranların Gözeneklilik, Ortalama Gözenek Boyutu ve Temas Açısı .....	75
<b>Tablo 4.4.</b> Farklı Oranlarda Birleştirilmiş Kompozit Malzemelerin Yüzey ve Gözenek Boyut Dağılımı .....	77
<b>Tablo 4.5.</b> 0.5:1 Oranından Hazırlanan g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @rGOH Elektrotunun Farklı Tarama Hızlarında Hesaplanan Spesifik Kapasitans Değerleri.....	81
<b>Tablo 4.6.</b> 1:1 Oranından Hazırlanan g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @rGOH Elektrotunun Farklı Tarama Hızlarında Hesaplanan Spesifik Kapasitans Değerleri .....	82
<b>Tablo 4.7.</b> 2:1 Oranından Hazırlanan g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @rGOH Elektrotunun Farklı Tarama Hızlarında Hesaplanan Spesifik Kapasitans Değerleri .....	84
<b>Tablo 4.8.</b> 0.5:1 Oranından Hazırlanan BNKN@rGOH Elektrotunun Farklı Tarama Hızlarında Hesaplanan Spesifik Kapasitans Değerleri .....	86
<b>Tablo 4.9.</b> 1:1 Oranından Hazırlanan BNKN@rGOH Elektrotunun Farklı Tarama Hızlarında Hesaplanan Spesifik Kapasitans Değerleri.....	87
<b>Tablo 4.10.</b> 2:1 Oranından Hazırlanan BNKN@rGOH Elektrotunun Farklı Tarama Hızlarında Hesaplanan Spesifik Kapasitans Değerleri i.....	89
<b>Tablo 4.11.</b> g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @rGOH Ve BNKN@rGOH Simetrik Olarak Hazırlanmış İkili Elektrod Sistemlerinden Elde Edilen Spesifik Kapasitans Değerleri.....	93

## ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Nanomalzemelerin Boyutları.....	4
Şekil 1.2. Nanomalzeme Çeşitleri.....	5
Şekil 1.3. Nanomalzeme Sentez Yöntemleri.....	6
Şekil 1.4. Kompozit Nanomalzemelerin Kullanım Alanları.....	8
Şekil 1.5. Bir Karbon Atomunun Atomik Yörünge Diagramı. A) Temel Durum, B) Elmas Yapısındaki Gibi $Sp^3$ Hibritleşmesi, C) Grafit Ve Grafende Olduğu Gibi $Sp^2$ Hibritleşmesi.....	9
Şekil 1.6. Çeşitli Karbon Bazlı Nanomalzemelerin Formları.....	10
Şekil 1.7. Grafitik Karbon Nitrürün Katmanlı Yapısı.....	11
Şekil 1.8. g- $C_3N_4$ 'ün İkinci Bir Yarı İletkene Bağlanmasıyla Oluşturulan Yük Transferi A) Daha Negatif CB İle ve B) Daha Pozitif VB ile.....	12
Şekil 1.9. h-BN Uygulamalarının Şematik Gösterimi .....	14
Şekil 1.10. Hekzagonal Bor Nitrürün Kristal Yapısı .....	14
Şekil 1.11. Bor Nitrür Kuantum Noktaların Oluşum Şeması.....	15
Şekil 1.12. BN Nanotabakalarının Herhangi Bir Amin Grubu (Üre) İle Modifiye Edilmiş Hali.....	17
Şekil 1.13. Bir Membran Tarafından Ayrılmış İki Fazlı Bir Sistemin Sistemik Gösterimi.....	19
Şekil 1.14. Gözenek Boyutlarına Göre Membran Prosesleri.....	21
Şekil 1.15. Membran Tıkanma ve Kirlenme Şekilleri .....	23
Şekil 1.16. Katkılanan Membranlarda Değişen Özellikler .....	24
Şekil 2.1. Enerji Depolama Sistemleri.....	27
Şekil 2.2. Bataryaların Çalışma Prensibi.....	28
Şekil 2.3. Geleneksel Bir Kapasitörün Şematik Gösterimi.....	28

<b>Şekil 2.4.</b> Elektrik Çift Katmanlı Kapasitörlerin Şematik Gösterimi.....	31
<b>Şekil 2.5.</b> Hibrit Kapasitörlerin Şematik Gösterimi.....	32
<b>Şekil 2.6.</b> Süperkapasitör Çalışmaları İçin g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /GO Elektrotu Hazırlama Prosedürü.....	35
<b>Şekil 3.1.</b> Kullanılan SEM Cihazı.....	39
<b>Şekil 3.2.</b> X- Işını Kırınımına Ait Şematik Görüntü.....	41
<b>Şekil 3.3.</b> XRD Cihazı.....	41
<b>Şekil 3.4.</b> FTIR Cihazı.....	42
<b>Şekil 3.5.</b> Elektronik Spektrum Ve Görünür Bölge Spektrumu.....	43
<b>Şekil 3.6.</b> Kullanılan UV-Vis Cihazı.....	44
<b>Şekil 3.7.</b> AFM Cihazı.....	45
<b>Şekil 3.8.</b> Kullanılan BET Cihazı.....	46
<b>Şekil 3.9.</b> Zetasizer Cihazı.....	47
<b>Şekil 3.10.</b> XPS Cihazı.....	48
<b>Şekil 3.11.</b> Kullanılan CV Cihazı .....	50
<b>Şekil 3.12.</b> Temas Açısı Ölçüm Cihazı.....	50
<b>Şekil 3.13.</b> A) Ürenin Fırından Öncesi Ve B) Fırınlamadan Sonra Elde Edilen Görüntüsü.....	51
<b>Şekil 3.14.</b> Protonlanmış g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> .....	51
<b>Şekil.3.15.</b> Hekzagonal Bor Nitrür Kül Fırın Sonrası Fotoğrafi.....	52
<b>Şekil 3.16.</b> Hidrotermal Yöntemle Sentezlenen BNKN.....	53
<b>Şekil 3.17.</b> g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @rGO Hidrojeller.....	54
<b>Şekil 3.18.</b> BNKN@rGO Hidrojeller.....	55
<b>Şekil 3.19.</b> Membran Döküm Ünitesi.....	55

<b>Şekil 3.20.</b> Katkılanan Membranların Görüntüsü .....	56
<b>Şekil 3.21.</b> Normal Akımlı Filtrasyon Sistemi.....	57
<b>Şekil 3.22.</b> Membran Filtrasyon Sisteminde Kullanılan Filtrasyon Sistemi Ve Reaktif Red (RR180) Boyası.....	58
<b>Şekil 3.23.</b> Boyadan (RR180) Geçirilen Membranın Görüntüsü.....	58
<b>Şekil 4.1.</b> g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 'ün XRD Görüntüsü.....	59
<b>Şekil 4.2.</b> Grafen Oksit, Grafit ve rGOH'ın XRD Spektrumları.....	60
<b>Şekil 4.3.</b> g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @rGOH XRD Spektrumları.....	61
<b>Şekil 4.4.</b> g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @rGOH SEM Görüntüsü.....	61
<b>Şekil 4.5.</b> g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 'ün SEM Görüntüleri.....	62
<b>Şekil 4.6.</b> g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 'ün FTIR görüntüsü.....	63
<b>Şekil 4.7.</b> g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ve RGOH Zeta Potansiyel Grafiği. ....	63
<b>Şekil 4.8.</b> (A) Saf PES Membranın SEM Analizi, (B) Ağırlıkça % 0.5 g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /PES, (C) Ağırlıkça % 1.0 g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /PES, (D) Ağırlıkça % 2.0 g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /PES SEM Analizleri.....	64
<b>Şekil 4.9.</b> Saf PES Membranın Ve Ağırlıkça % 2.0 g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> Katkılı PES Membranının EDX Görüntüleri.....	65
<b>Şekil 4.10.</b> g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> Katkılı Membranların İki Ve Üç Boyutlu AFM Görüntüleri. (A,B) Ağırlıkça % 0.5 g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> Katkılı Membran Ve Üç Boyutlu AFM Görüntüleri, (C, D) Ağırlıkça % 1.0 g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> Katkılı Membran Ve Üç -Boyutlu AFM Görüntüleri, (E, F) Ağırlıkça % 2.0 g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> Katkılı Membran Ve Üç Boyutlu AFM Görüntüleri, (G, H) Saf PES Membranı Ve Üç Boyutlu AFM Görüntüleri.....	66
<b>Şekil 4.11.</b> hBN ve BNKN XRD Şeması.....	67
<b>Şekil 4.12.</b> BNKN@rGOH XRD Spektrumları .....	68
<b>Şekil 4.13.</b> BNKN@rGOH SEM Görüntüsü.....	69
<b>Şekil 4.14.</b> BNKN'lerin (A) UV ve (B) PL Emisyon Grafikleri.....	69

<b>Şekil 4.15.</b> (A) BNKN'lerin TEM Görüntüsü, (B) BNKN'nin Partikül Boyut Dağılımı.....	70
<b>Şekil 4.16.</b> Farklı oranlarda olan kompozit g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /PES membranların saf su akı grafiği.....	71
<b>Şekil 4.17.</b> Saf ve g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> Katkılı Membranların Protein Giderimlerinde Akı Değerleri.....	72
<b>Şekil 4.18.</b> Saf ve g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> Katkılı Membranların Protein Giderimleri.....	72
<b>Şekil 4.19.</b> Membranların Rt, Rr ve Rir Değerleri ve (B) FRR ve Rr/Rir Oranı.....	73
<b>Şekil 4.20.</b> Farklı Oranlarda Katkılanan Kompozit BNKN Membranların Saf Su Akı Grafiği.....	74
<b>Şekil 4.21.</b> B) Saf ve BNKN Katkılı Membranların Protein Giderimlerinde Akı Değerleri C) Saf ve Katkılı Membranların Protein Giderimleri.....	75
<b>Şekil 4.22.</b> Saf ve BNKN Katkılı Membranların A) Rt, Rr ve Rir Değerleri ve B) FRR ve Rr/Rir Oranı.....	76
<b>Şekil 4.23.</b> A-B) Farklı Oranlarda Alınan BNKN Miktarına Göre BET Analizi, C-D)Farklı Oranlarda Alınan g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> Miktarına Göre BET Analizi.....	78
<b>Şekil 4.24.</b> Ölçüm Anındaki CV Cihazının Görüntüsü.....	79
<b>Şekil 4.25.</b> Elektrotların Yerleştirme Düzenegi.....	79
<b>Şekil 4.26.</b> 0.5:1 Oranından Hazırlanan g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @rGOH Elektrotunun Farklı Tarama Hızlarındaki CV Eğrileri (A), Farklı Akım Yoğunluklarında Şarj-Deşarj Eğrileri (B), Empedans Grafiğisi (C).....	81
<b>Şekil 4.27.</b> 1:1 Oranından Hazırlanan g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @rGOH Elektrotunun Farklı Tarama Hızlarındaki CV Eğrileri (A), Farklı Akım Yoğunluklarında Şarj-Deşarj Eğrileri (B), Empedans Grafiğisi (C).....	82
<b>Şekil 4.28.</b> 2:1 Oranından Hazırlanan g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @rGOH Elektrotunun Farklı Tarama Hızlarındaki CV Eğrileri (A), Farklı Akım Yoğunluklarında Şarj-Deşarj Eğrileri (B), Empedans Grafiğisi (C).....	83

<b>Şekil 4.29.</b> Farklı Oranlardaki g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @rGOH Elektrotunun 100 mv/S Tarama Hızlarında CV Eğrileri.....	84
<b>Şekil 4.30.</b> 0.5:1 Oranında Katkılan g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @rGOH Elektrotuna Air 1000 Döngü İçerisinde Elde Edilen Kapasitans Tutma Eğilim Grafiği.....	85
<b>Şekil 4.31.</b> 0.5:1 Oranından Hazırlanan BNKN@rGOH Elektrotunun Farklı Tarama Hızlarındaki CV Eğrileri (A), Farklı Akım Yoğunluklarında Şarj-Deşarj Eğrileri (B), Empedans Grafiği (C).....	86
<b>Şekil 4.32.</b> 1:1 Oranından Hazırlanan BNKN@rGOH Elektrotunun Farklı Tarama Hızlarındaki CV Eğrileri (A), Farklı Akım Yoğunluklarında Şarj-Deşarj Eğrileri (B), Empedans Grafiği (C).....	87
<b>Şekil 4.33.</b> 2:1 Oranından Hazırlanan BNKN@rGOH Elektrotunun Farklı Tarama Hızlarındaki CV Eğrileri (A), Farklı Akım Yoğunluklarında Şarj-Deşarj Eğrileri (B), Empedans Grafiği (C).....	88
<b>Şekil 4.34.</b> Farklı Oranlardaki BNKN@rGOH Elektrotunun 100mv/S Tarama Hızındaki CV Eğrileri.....	89
<b>Şekil 4.35</b> 1:1 Oranında Katkılan BNKN@rGOH Elektrotuna Air 1000 Döngü İçerisinde Elde Edilen Kapasitans Tutma Eğilim Grafiği.....	90
<b>Şekil 4.36.</b> Elektrokimyasal Ölçüm İçin Hazırlanan Simetrik Elektrotları İçeren İkili Hücre Mekanizması .....	91
<b>Şekil 4.37.</b> A) g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @rGOH Simetrik Elektrotun Farklı Tarama Hızlarındaki CV Eğrileri, B) BNKN@rGOH Simetrik Elektrotun Farklı Tarama Hızlarındaki CV Eğrileri, C) g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @rGOH Simetrik Elektrotun Empedans Grafiği, D) BNKN@rGOH Simetrik Elektrotun Empedans Grafiği.....	92



## GİRİŞ

Günümüzde artan nüfusla birlikte endüstriyelleşme de hızlı bir şekilde artış göstermektedir. Bu artışa paralel olarak artan enerji ve temiz su kaynaklarına olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Özellikle tatlı su kaynaklarının hızlıca kirlenmesi, bu sorunun daha trajik hale gelmesine neden olmaktadır. Bu bağlamda düşük maliyetli ve enerji tasarrufu sağlayabilecek yöntemlerin araştırılması bir gereklilik olup bunlar arasında membran prosesleri dikkat çekmektedir. Atık su arıtımında yaygın olarak kullanılan membran filtrasyon teknolojisi bizlere geniş kullanım alanları sunmaktadır. Membran uygulamalarındaki amaç; membranın yüzeyinde, hazırlanan çözelti içerisindeki bazı bileşenlerin geçişine izin verilmesi ve bazılarının da tutulmasını sağlamaktır. Membranlar, seçici bir şekilde ayırmanın ve taşınmanın gerçekleştirildiği yarı geçirgen bariyer olarak tanımlanabilir. Membran sistemleri su arıtımında uygulanan geleneksel sistemlere kıyasla, küçük boyutta olmaları, kimyasal ihtiyacına gereksinim duyulmaması ve bu avantajlarla birlikte kaliteli çıkış suyu eldesi alınabilmektedir. Membranlarda, filtrasyon sistemlerindeki arıtma işlemi, hem fiziksel hem de kimyasal özellikler ile ilişkilendirilir. Örneğin; basınç farkı, yoğunlaşma (kimyasal potansiyel) farkı, elektriksel potansiyel farkı ve sıcaklık farkının biri veya birkaçı ile oluşturulan sürücü kuvvet ile bu işlem gerçekleşmektedir. Membran performansı seçicilik ve akı parametreleriyle belirlenir. Membranların avantajları olduğu gibi üretim, işletme ve pazarlama maliyetlerinin yüksekliği gibi dikkat çeken dezavantajları da bulunmaktadır. Ancak bunlar arasındaki en büyük problem, çok ciddi akı kaybının yaşandığı membran tıkanmasıdır. Membran tıkanması, akıdaki azalma kadar, basınç farkında meydana gelen artış ile de kolaylıkla fark edilebilmektedir. Bu dezavantajları ve membran tıkanmalarını engellemek için nanomalzeme katkılı membranlar üretilerek bu konuda iyileştirme çalışmaları yapılmaktadır.

Karbon temelli nanokompozit malzemeler ve kuantum noktalar, son zamanlarda benzersiz özellikleri nedeniyle çevresel uygulamalarda ve enerji depolama sistemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Geliştirilmiş mekanik özellikleri, boyutsal ve termal/kimyasal kararlılıkları, elektriksel iletkenlikleri nedeniyle büyük ilgi gören grafitik karbon nitrür ( $g-C_3N_4$ ) karbon bazlı nanokompozit malzemelerdendir. Ayrıca diğer karbon tabanlı nanomalzemeler ile karşılaştırıldığında, metal içermeyen polimerik bir yarı iletken olan  $g-C_3N_4$ , hidrojen ve azot atomlarının varlığı nedeniyle elektron açısından zengin özelliklere sahiptir. Bu nedenle, fonksiyonel malzemelerin uygulamalarında karbonu

daha fazla tamamlamak için ilginç bir aday olarak görülmektedir. Son zamanlarda çevresel ve enerji uygulamalarında kullanılan, bir diğer nanokompozit malzeme ise grafit benzeyen hekzagonal bor nitrürdür (h-BN). Grafit ile aynı düzlemsel yapıya ve özelliklere sahiptir. h-BN’de bulunan katmanların büyük oranda birbirinden ayrılarak grafen yapısına benzeyen ve kuantum nokta (quantum dot) olarak adlandırılan forma dönüştürülmesine yönelik çalışmalar, uygulama alanlarında büyük avantajlar sağlamaktadır. Bor nitrür kuantum noktaların (BNKN) toksik olmaması, geniş bant aralığına sahip olması (5.7 eV), termal iletkenliğinin yüksek olması ve üstün kimyasal kararlılık gibi avantajları vardır. g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve BNKN kompozit yapıların, kolayca elde edilebilir olması sayesinde kullanım alanlarında ciddi bir artış trendi oluşmuştur. Özellikle tıp, elektronik, enerji depolama prosesleri, katalizörler ve çevre kirliliğini önlemek amacıyla farklı uygulamalardaki kullanımları dikkat çekmektedir.

Bu tez çalışmasında, öncelikle g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve BNKN nanomalzemelerin membranlara katkılanmasıyla elde edilen kompozit membranların saf su akı performansları, membran kirlilik ve temizlik giderimleri üzerine çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve BNKN’ların sahip oldukları yüksek yüzey alanlarından dolayı süperkapasitör uygulamalarında kullanılmak üzere kompozit elektrotlar hazırlanmış, bunlarla ilgili fizikokimyasal ve elektrokimyasal çalışmalar yapılmıştır.

# BÖLÜM 1

## KARBON VE BOR İÇEREN KOMPOZİT YAPILARIN ÇEVRESEL UYGULAMALARI

En az iki farklı malzemenin birleştirilmesiyle oluşan kompozit malzemelerin hem enerji depolama sistemlerinde hem de çevresel uygulamalarda kullanım alanları oldukça geniştir. Söz konusu bu ilgi ve ihtiyaç gün geçtikçe de artmaktadır. Son zamanlarda, kimyasal olarak kararlı yapıya sahip, grafitin bir analogu olan g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve h-BN'den hazırlanan BNKN, gözlenen sıra dışı özellikleri sebebiyle, farklı çalışmalarda kullanılmak üzere, kompozit malzemelerin hazırlanmasında oldukça fazla kullanılmaktadır. Eşsiz özelliklere sahip olan bu yarı iletken malzemelerin çevresel uygulamalarında kullanımı yaygın olarak denenmeye başlamıştır. Özellikle, filtrasyon sistemlerinde kullanılan membran yapılar son zamanlarda gittikçe fazla ilgi görmektedir.

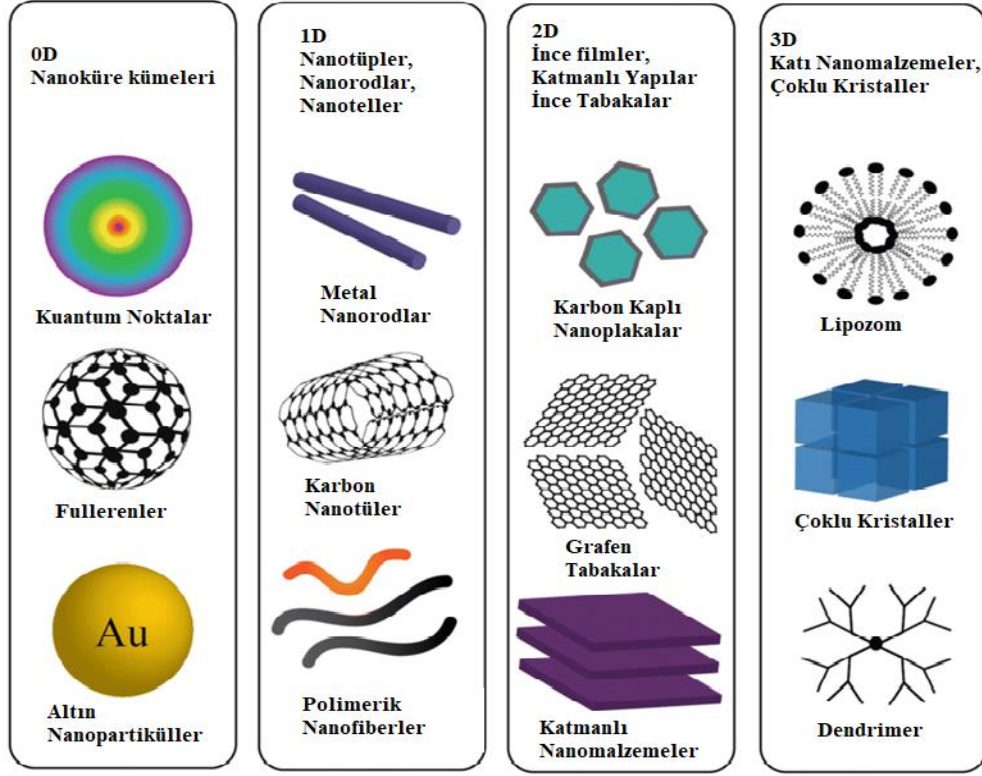
### 1.1. Nanomalzemelerin Özellikleri ve Kullanım Alanları

- **Nanomalzemelerin Özellikleri**

Nanoteknoloji, yunancada cüce anlamına gelen bir bilim dalı olarak karşımıza çıkmaktadır. Nanomalzemeler, bir boyutu en az 100 nm'den küçük olan, çoğunlukla disiplinler arası çalışmaların yapıldığı tercih edilir bir malzeme sınıfıdır (I. Khan vd., 2019:908).

Şekil 1.1.'de görüldüğü gibi nanomalzemeler boyutsal (D: dimensional) olarak sıfır boyutlu (0D (zero dimensional); nanoküreler), tek boyutlu (1D; nanotüpler, nanolifler ve nanoşeritler), iki boyutlu (2D (two dimensional); ince filmler ve nano tabakalar) ve üç boyutlu (3D (three dimensional); nano yapılı gözenekli malzemeler) olarak sınıflandırılır. Boyutun, malzemenin fizyokimyasal ve optik özelliklerini etkileyebileceği araştırmacılar tarafından keşfedildiğinde, nanomalzeme çalışmalarına olan ilgi hızla artmıştır (Gajanan ve Tijare, 2018:1093-1096).

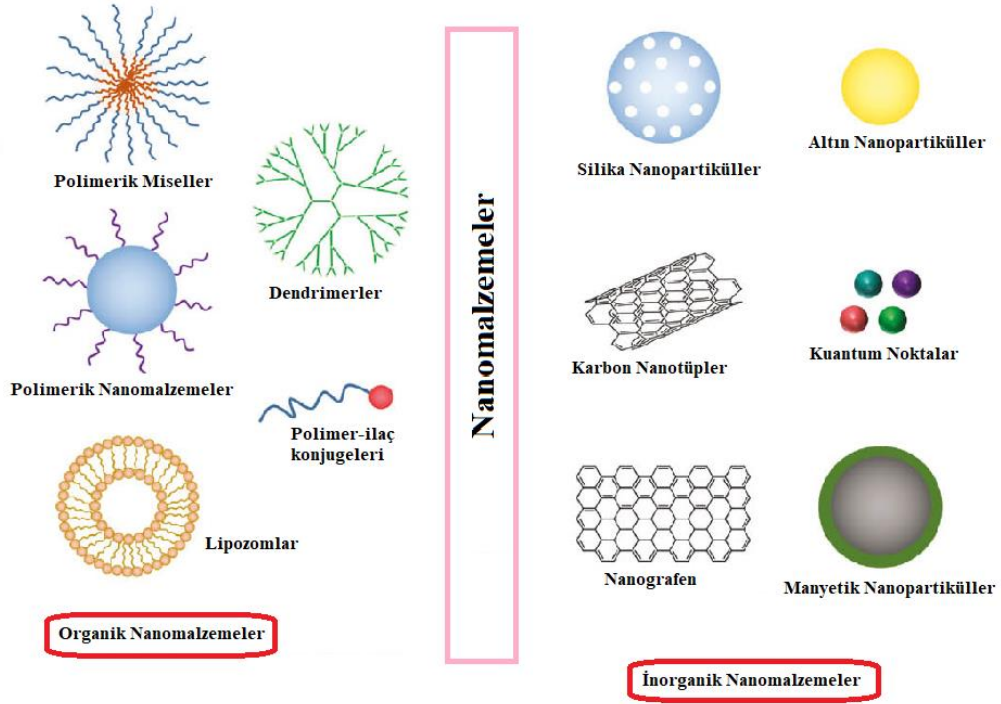
## Nanomalzemelerin Boyutları



Şekil 1.1. Nanomalzemelerin Boyutları

Kaynak: Poh vd., 2018:1.

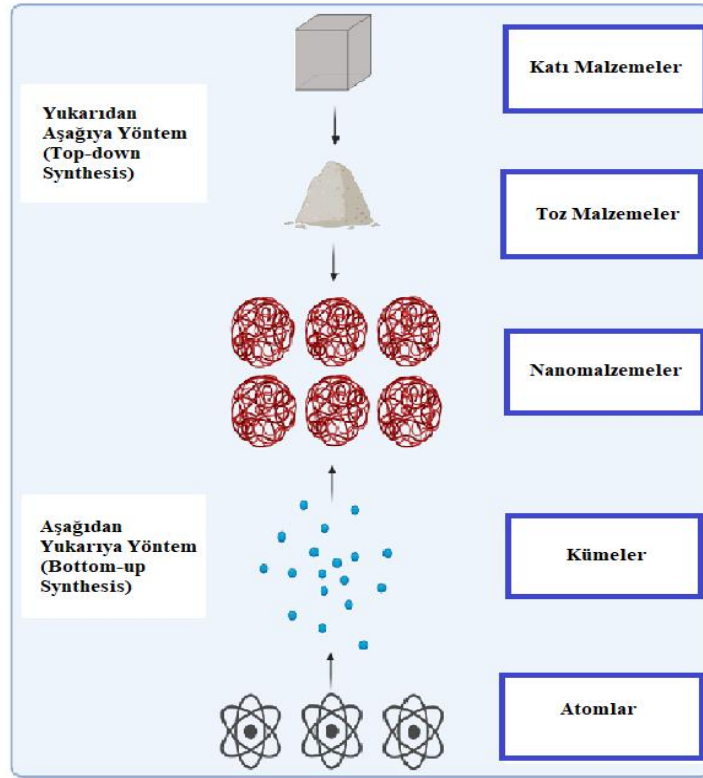
Nanomalzemeler, geniş spesifik yüzey alanları ve yüksek reaktiviteleri nedeniyle bir çok katalizör ve sensör malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca nanomalzemelerin yüksek yüzey alanı/kütle oranı, emici malzemelerin adsorpsiyon kapasitelerini büyük ölçüde iyileştirebilir (Laurent vd.,2009:2574) . Bu malzemeler genel olarak morfolojilerine, boyutlarına ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak çeşitli kategorilere ayrılır. Fiziksel ve kimyasal özelliklere dayanarak, iyi bilinen nanomalzeme sınıflarından bazıları Şekil 1.2.'de verilmiştir.



**Şekil 1.2.** Nanomalzeme Çeşitleri

**Kaynak:** Zhou vd., 2017:473.

Nanomalzemelerin sentezi için çeşitli yöntemler bulunmakla birlikte, genel olarak bunlar Şekil 1.3’de görüldüğü gibi iki ana sınıfa ayrılır: Yukarıdan aşağıya (bottom-up) ve Aşağıdan yukarıya (top-down) (Y. Wang and Xia, 2004:2047–2050). Yukarıdan aşağıya olan yöntem, yıkıcı yaklaşım olarak adlandırılmaktadır. Bunun sebebi, hacimsel olarak malzemeye dışarıdan enerji verilmesiyle çok daha büyük yapılardan başlayarak daha küçük birimlere doğru uygun nanomalzemelerin oluşturulmasıdır. Bu yöntemde kullanılan başlıca metotlar; mekanik öğütme, litografi, aşındırma vb. yöntemlerdir. Aşağıdan yukarıya olan yöntemde ise, nanomalzemeler nispeten daha basit yapılardan oluşturulduğu için bu yaklaşım tersine kullanılır. Bundan dolayı, bu yaklaşıma inşa etme yaklaşımı da denmektedir. Küçük boyuttaki yapıların kimyasal reaksiyonlar yardımıyla büyütülerek nanomalzeme oluşumunu gerçekleştirilmesi olarak da tanımlanan bir yöntemdir. Fiziksel ve kimyasal buhar biriktirme teknikleri seçili yüzey üzerinde malzeme biriktirme yöntemlerinin başlıca örnekleridir (İravanı, 2011:2638).



**Şekil 1.3.** Nanomalzeme Sentez Yöntemleri

**Kaynak:** Huston vd., 2021:2130.

Nanomalzemeler ile elde edilen kompozit yapıların fiziksel ve kimyasal davranışları hem doğrudan ölçülebilir niceliklere (kütle, hacim, elektrik yükü) hem de yüksek reaktivitelerine dayalı olarak kendi kendini organize etme (self-assembled) özelliklerine bağlıdır (Seaton vd., 2010:7). Nanomalzemeler, yığın maddeler ile moleküler veya atomik yapılar arasında bir köprü oldukları için çok fazla ilgi görmektedir. Bunun en önemli sebepleri olarak; çok çeşitli fizikokimyasal özelliklere sahip olmaları, geniş yüzey alanları, mekanik olarak güçlü, optik olarak aktif ve kimyasal olarak reaktif olmaları, gibi benzersiz özellikleri sayılabilir (Saleh, 2020:101067). Nanomalzemelerin optik ve elektronik özellikleri ise büyük ölçüde birbirine bağlıdır. Nanomalzemeler, metallerin ortak elektron tabakasının kalınlığını sınırlandıracak kadar küçük olduklarından, genellikle belirli optik özelliklere sahiptir; bu doğal olay kuantum etkileri üretir. Örneğin, normal şartlarda günümüzde kullanılan altın ve silikonun renkleri sırasıyla sarı ve gri olmasına rağmen, bu yapıların nanometre mertebesindeki renkleri, boyuta bağlı olarak kırmızı ve siyah olarak görünmektedir.

- **Nanomalzemelerin Kullanım Alanları**

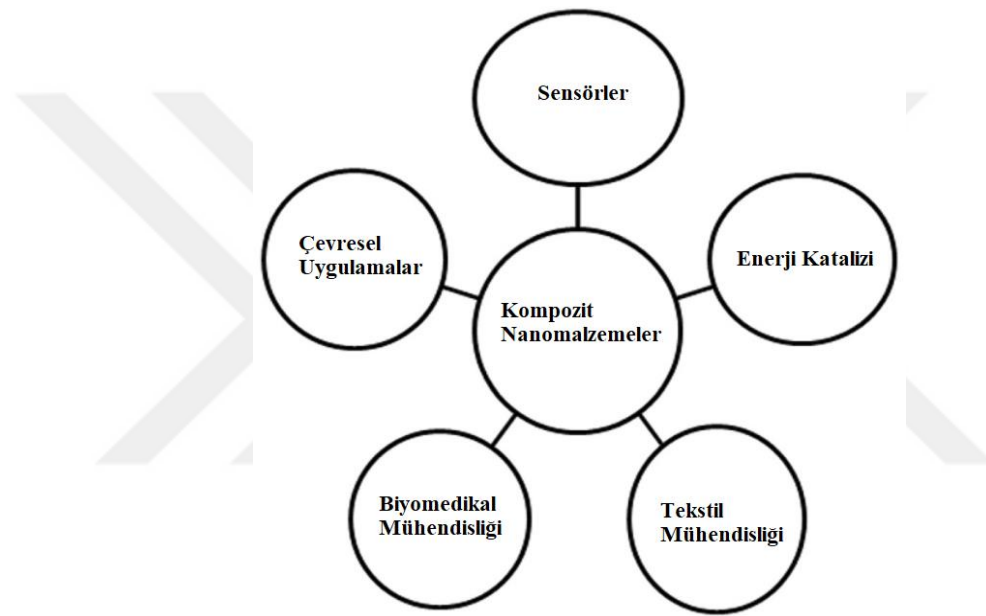
Nanomalzemeler başlıca tıpta, elektronik cihazlarda, enerji dönüşüm proseslerinde, katalizörlerde ve özellikle çevre kirliliğini önlemek amacıyla farklı uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Nanomalzemelerin antibakteriyel özelliklere sahip olması ve aynı zamanda eşsiz fiziksel, kimyasal özellikleri ile katalitik reaksiyonların önlenmesi üzerine geniş çapta çalışmalar yapılmıştır (Bell, 2003:1688).

Nanomalzemeler, küçük boyutları nedeniyle oldukça yüksek bir yüzey alanına sahiptir ve bu da çalışmalar için yüksek bir katalitik bölge sağlar (Pouretedal vd., 2009: 13). Birçok avantajları ile birlikte nanomalzemeler, su ve havadaki kirleticileri ayrıştırmak ve temizlemek için kullanılabilir. Çeşitli morfolojilerde ve özelliklerde bulunan nanomalzemeler, doğal ortamdaki su ve hava kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Örneğin, manyetik nanoadsorbanlar malzemeye kolayca tutulabildikleri ve arıtılmış sudan kolayca ayrılabilirler için çevre uygulamalarında kullanılan adsorbanlar arasında özellikle dikkat çekmektedir (Theis vd., 2011:1). Buna ek olarak, kitosan, gümüş nanopartiküller (nAg), fotokatalitik titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>) ve karbon nanotüpler (CNT) dahil olmak üzere birçok doğal ve mühendislik ürünü nanomalzemenin güçlü antimikrobiyal özelliklere sahip olduğu kanıtlanmıştır (Colombo vd.,2012:4306; Salata, 2004:1). Ek olarak, nanomalzemelerin polimerik yapıya dahil edilmesi ile oluşan kompozit yapıda, mekanik, elektriksel ve optik özelliklerinin geliştirildiği görülmüştür. Çevresel uygulamalarda kullanılacak olan bu nanomalzemelerdeki iyileştirme son dönemlerde oldukça ilgi görmektedir (W.T.Liu,2006:1). Örneğin; nanomalzeme katkılanmış membranların üretilmesi, yapılan filtrasyon çalışmalarındaki iyileştirmelere destek olmuştur.

Nanomalzemelerin membran yapılarına katkılanması, membran gözenek boyutundaki değişiklikler, membran yüzeyini hidrofilikliği, elektropozitifliği veya elektronegatifliği ve yüzey katalitik özellikleri gibi çeşitli değişiklikler ile membran üzerinde yapılan çalışmalara avantaj sağlamaktadır. Nano gözenekli malzemeleri dahil ederek olası boyut sınıflandırması, bir dizi kirleticinin ve mikroorganizmanın membrandan geçişini önleyebildiği de ayrıca öngörülmektedir (Godwin vd., 2009:6453).

## 1.2. Kompozit Nanomalzemeler

Bilimin hızlı gelişimi nedeniyle, organik-inorganik kompozitler, nanopolimer matrisli kompozitler ve inorganik-inorganik kompozitleri içeren yeni malzemelerin geliştirilmesi önemli bir konuma sahiptir (L. S. Wang and Hong,2021). Nanokompozitler, geliştirilmeye açık olan yapıları kontrol etmek için nano ölçekte bir veya daha fazla farklı malzemenin karıştırılmasıyla oluşturulan yeni nesil yeni malzemelerdir.



**Şekil 1.4.** Kompozit Nanomalzemelerin Kullanım Alanları

**Kaynak:** Sahay vd., 2014:1.

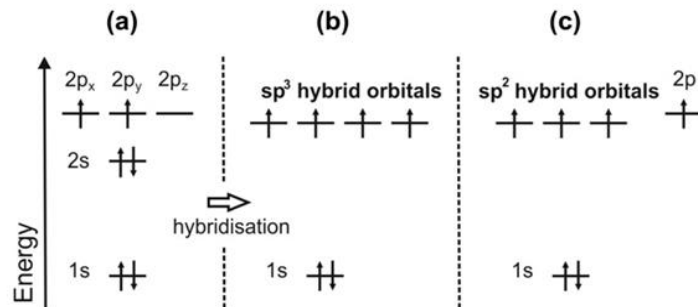
Nanokompozitler, geliştirilmiş mekanik özellikleri, boyutsal kararlılıkları, termal/kimyasal kararlılıkları ve elektriksel iletkenlikleri nedeniyle büyük ilgi görmüştür (Akbulut vd.,2014:265). Nanoyapıların, geniş yüzey alanı/hacim oranı gibi doğal özellikleri ve gözeneklilik, kararlılık, geçirgenlik gibi mühendislik özellikleri nedeniyle büyük önem taşıdığı bulunmuştur (Peining vd.,2011:588). Nanokompozitlerin bu özellikleri sadece kullanılan bileşenlere değil, aynı zamanda morfoloji ve ara yüz özelliklerine de bağlıdır. Geliştirilmiş sürtünme ve aşınma direnci, kirlenme direnci, süper hidrofobiklik, süper hidrofiliklik, termal enerji aktarımı, elektronik ve iyonik taşıma ve nanokompozitler tarafından gösterilen sıvı taşıma gibi gelişmiş özellikler,

bireysel malzemelere kıyasla onları çok çeşitli mühendislik uygulamaları için çekici kılmaktadır (D. Y. Wang vd.,2009:14829).

### 1.3. Karbon Bazlı Nanomalzemelerin Özellikleri

Fullerenler, grafen ve karbon nanotüpler gibi karbon bazlı nanomalzemeler (KBN'ler), benzersiz kimyasal ve fiziksel özellikleri nedeniyle bilimsel ve endüstriyel alanda oldukça fazla kullanım alanı mevcuttur (H. S. Lin and Matsuo,2018:11244; Mallakpour and Soltanian, 2016:109916-109935; Thostenson vd.,2021). Yoğun araştırma çabaları sayesinde KBN'ler çok çeşitli uygulamalarda kendilerine yer bulmuştur ve özellikle tek boyutlu yapıları, yüksek en-boy oranı ve yüksek termal iletkenlikleri nedeniyle polimer kompozitlerde ısı taşınımını önemli ölçüde arttırdığı bulunmuştur (Q. Hu vd., 2017:1).

Karbona olan genel ilgi, bu elementin mevcut olduğu çeşitli yapısal formlardan kaynaklanmaktadır. Bu çeşitlilik, atomik orbital hibridizasyon yoluyla diğer karbon atomları da dâhil olmak üzere çeşitli elementlere farklı değerlik bağları oluşturma yeteneği sağlayan karbonun özel bir elektron konfigürasyonundan kaynaklanır (Ayrancı vd., 2017:1548; Cha vd., 2013:2891; Healy vd., 2008:376). Karbon atom numarası 6'ya sahiptir ve bu nedenle elektronlar, Şekil 1.5'de (temel durum) gösterildiği gibi  $1s^2$ ,  $2s^2$ ,  $2p_x^1$  ve  $2p_y^1$  atomik orbitallerini işgal eder. Dört değerlikli bir elementtir, yani sadece dört dış elektron kovalent kimyasal bağların oluşumuna katılır.

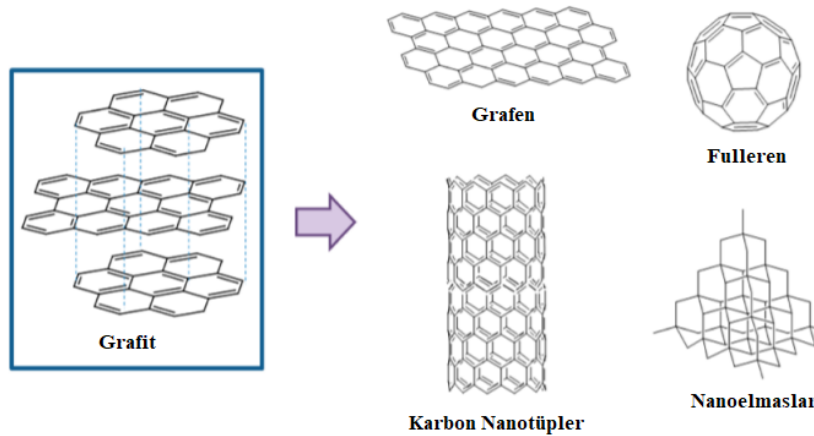


**Şekil 1.5.** Bir Karbon Atomunun Atomik Yörünge Diagramı. A) Temel Durum, B) Elmas Yapısındaki Gibi Sp<sup>3</sup> Hibritleşmesi, C) Grafite Ve Grafende Olduğu Gibi Sp<sup>2</sup> Hibritleşmesi

**Kaynak:** Abergel vd., 2010:43.

Karbon, diğer atomlarla bağlar oluştururken, karbon 2s elektronlarından birini boş 2p<sub>z</sub> orbitaline yükseltir ve bu da hibrit orbitallerin oluşmasına neden olur. Elmasta, 2s-enerji seviyesi, her biri bir elektronla dolu dört enerjik olarak eşdeğer sp<sup>3</sup>-orbital oluşturmak için üç 2p seviyesi ile hibritleşir (Şekil 1.5b). Dört sp<sup>3</sup>-orbital birbirinden mümkün olan en büyük mesafeye yönlendirilir. Bir karbon atomunun sp<sup>3</sup>-orbitalleri, diğer karbon atomlarının sp<sup>3</sup>-orbitalleri ile örtüşerek 3D elmas yapısını oluşturur. Elmasın yüksek sertliği, C-C bağlarının güçlü bağlanma enerjisinden kaynaklanmaktadır (dos Santos vd., 2017).

Çok yönlü mekanik, elektronik ve termal özelliklere sahip tek bir sp<sup>2</sup> bağlı karbon atomu tabakası olan grafen, çeşitli araştırma alanlarında umut verici bir malzeme olarak ortaya çıkmıştır. İlginç fizikokimyasal özellikleri nedeniyle süperkapasitörler, elektronikler, yakıt hücreleri, biyosensörler ve piller dahil olmak üzere çok çeşitli teknolojik uygulamaları bulunmaktadır (Geim and Novoselov,2009:11-19). Örneğin, grafen, grafit, grafen oksit (GO) son zamanlarda kullanılan iki boyutlu karbon bazlı nanoyapılardır. Grafen, termal özellik, elektriksel iletkenlik, mekanik mukavemet ve şeffaflık dahil olmak üzere fizikokimyasal özelliklerinin çeşitliliği ile karakterize edilir (Ghosh vd., 2008:151911; Rafiee vd.,2010:179). Bu nanomalzemeler geniş bir yüzey alanına sahiptir ve enerji depolama gibi alanlarda çekici kılan özelliklerle karakterize edilir.



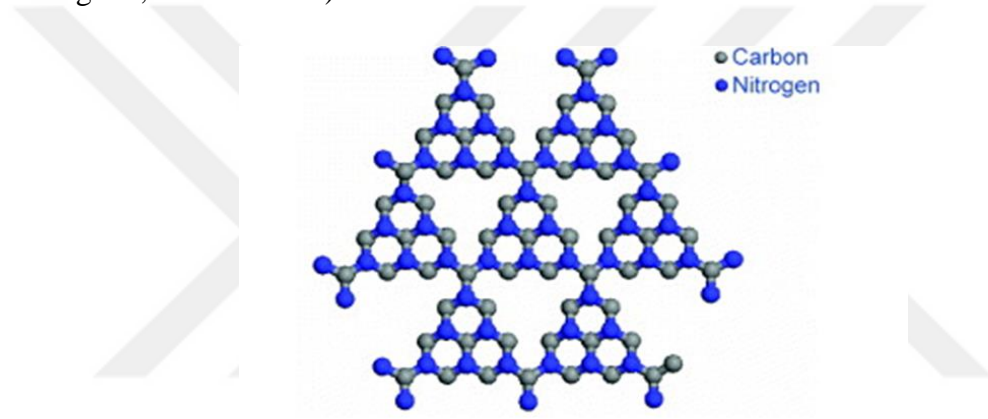
**Şekil 1.6.** Çeşitli Karbon Bazlı Nanomalzemelerin Formları

**Kaynak:** Mauter ve Elimelech, 2008:5843-5859.

Yeni olağan çalışmalarda, karbon nanotüpler, grafen/grafen oksit vb. gibi karbon bazlı malzemelerin çoğuna benzer şekilde, son zamanlarda adından fazlasıyla

bahsedilen diğerk bir karbon temelli kompozit malzeme ise, grafitik karbon nitrürdür (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>). Çoğu C-tabanlı malzeme ile karşılaştırıldığında, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, karbon ve nitrojen atomlarının varlığı nedeniyle elektron açısından zengin özelliklere sahiptir. Bu nedenle, fonksiyonel malzemelerin uygulamalarında karbonu daha fazla tamamlamak için ilginç bir aday olarak dikkate alınır (Y. X. Zhang vd., 2018:343).

Karbon ve nitrojen içeren g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, kolayca temin edilebilen başlangıç malzemelerinden hazırlanan, toksik olmayan ve düşük maliyetli bir yarı iletkenidir (Dante vd., 2011:1094). g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, katmanlı grafen yapısına sahip iki boyutlu bir nanomateriyaldir. Güçlü C – N kovalent bağı düzlem yönünde bulunur ve Şekil 1.7’de görüldüğü gibi bu düzlemler Van der Waals etkileşimleri yoluyla üst üste istiflenir (Z. Huang vd., 2021:105922).



**Şekil 1.7.** Grafitik Karbon Nitrürün Katmanlı Yapısı

**Kaynak:** Yue vd., 2011:034401.

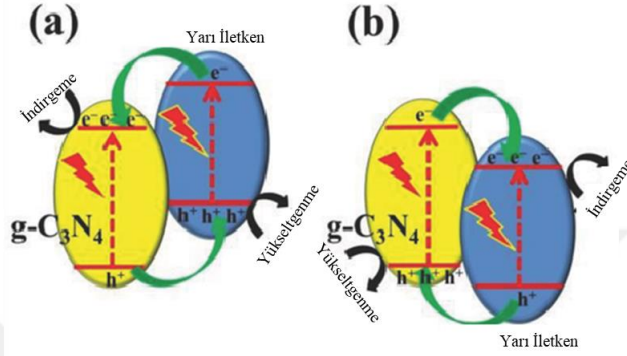
Grafen bazlı türevlerle karşılaştırıldığında, tipik bir metal içermeyen polimerik yarı iletken olarak g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, basit hazırlama prosedürü, mükemmel fizikokimyasal kararlılık özellikleri, çevreye zarar vermemesi gibi benzersiz diğerk avantajlara sahiptir (Lakhi vd., 2017:72). Bu nedenler g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>'ü çevre ve enerji gibi öncelikli alanlarda kullanılabilcek ideal bir malzeme olarak öne çıkarmaktadır.

### **1.3.1. Grafitik Karbon Nitrür İçeren Kompozit Nanomalzemenin Çevre**

#### **Uygulamaları**

Grafitik karbon nitrür ve kompozitleri, fotokatalitik oksidasyon, çevresel uygulamalarda özellikle su arıtma sistemlerinde büyük ilgi gösterir (Costa vd., 2012:86; Robert vd.,2017:12503; Vildoza vd.,2010:303). Fotokatalitik oksidasyon; atık sulardaki

çeşitli kirlilikleri arındırmak için, hidrojen üretimi ya da antibakteriyel aktiveler gibi çeşitli amaçlarla UV ışığın enerji kaynağı olarak kullanıldığı bir yöntemdir (Zhao vd., 2021:120145). g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve kompozitleri fotokatalitik çalışmalara dahil edildiğinde ise; g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>'ün uygun bant aralığının olması, düşük maliyetli kolay sentezinin olması, toksik olmaması kompozitler ile birleştirildiğinde membran ayırma proseslerinde dikkat çekmektedir (Kuila vd.,2012:1061).



**Şekil.1.8.** g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>'ün İkinci Bir Yarı İletkene Bağlanmasıyla Oluşturulan Yük Transferi A) Daha Negatif CB İle ve B) Daha Pozitif VB İle.

**Kaynak:** Zhang vd., 2021:31005.

Ayrıca son zamanlarda KBN'ler için yapılan araştırma çabalarının çoğu, yüksek mukavemetli kompozit malzemeler üreterek çeşitli uygulamalar için malzemenin avantajlı özelliklerinin kullanılmasına odaklanmıştır (Rogers and Martin, 2021:3056-3066). Son on yılda ise, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> çok umut verici bir fotokatalizör ve fotoelektrokatalizör olarak çok dikkat çekmiştir (W.Zhao vd., 2020:015080). Ek olarak, bu yarı iletken, su veya havadaki kirleticilerin ayrışmasına (S.Kumarvd.,2018:74), CO<sub>2</sub> indirgeme reaksiyonlarında (Brunettivd.,2019:117779) suyu parçalanmasına (Xiangvd.,2019:143520) ve amonyak sentezine (H. Liu vd.,2019:306) yönelik birçok potansiyel fotokatalitik uygulama alanında da kullanılmıştır.

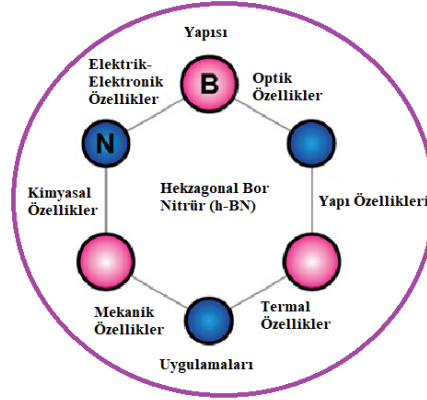
g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>'ün çevre alanındaki uygulamalarından biri de membran prosesleridir. Son yirmi yılda, membran prosesleri, evsel ve endüstriyel talepler için yüksek kaliteli su sağlamak için yaygın olarak kullanılmıştır (Hasija vd., 2021:125324). Membran prosesleri, artan temiz su ihtiyacı ile düşük maliyetli ve enerji tasarrufu sağlayan yöntemler olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin; Huanxin Zhao ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, bir g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> / rGO / selüloz asetat (CA) kompozit fotokatalitik membran vakumlu filtreleme yöntemiyle başarılı bir şekilde üretilmiştir. g-

$C_3N_4$ 'ün çekici fotokatalitik verimliliği sayesinde,  $g-C_3N_4$  / rGO / CA kompozit fotokatalitik membranlar arasındaki benzersiz hetero-yapıdan kaynaklanan fotojenere yük ayrımı, görünür UV-Vis altında su arıtımında üstün performans sergilemiştir. Membran kirlenmesi, bu süreçte önemli ölçüde azaltılmıştır. Kompozit fotokatalitik membranın gösterdiği tüm avantajlar, onu su arıtma uygulaması için umut verici kılmaktadır (H. Zhao vd., 2016:134). Menglu Zhang ve arkadaşları modifiye edilmiş  $g-C_3N_4$ 'ün organik kirletici bozunma mekanizmasına ve kompozit membranların kirlenme kontrolüne temel katkısını göstermektedir (M. Zhang vd., 2021:128663). Bu çalışmaların sonucunda ise,  $g-C_3N_4$  bazlı fotokatalitik membranlar, su arıtmada muazzam uygulama potansiyeli göstermiştir. Fakat gelecekteki çalışmalarda, su arıtmada  $g-C_3N_4$  ile fotokatalitik membranların uygulanması, güncel teknolojilerin gereksinimlerini karşılanabilmesi için fotokatalitik aktiviteyi ve membran malzemeleriyle uyumluluğunu optimize etme konusunda çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Shuanglong Ma ve arkadaşlarının yapmış olduğu bir diğer çalışmada, gümüş (Ag) katkılı  $g-C_3N_4$  kompozit malzemenin (Ag /  $g-C_3N_4$ ) görünür ışık altında Escherichia coli'yi (E. coli) inaktive etmek tasarlamış oldukları fotokatalizör olarak literatüre sunmuşlardır. Kompozit fotokatalistler, saf  $g-C_3N_4$  tozlarına göre önemli ölçüde geliştirilmiş fotokatalitik dezenfeksiyon verimliliği sergilemektedir. Arttırılmış fotokatalitik bakterisidal etki, Ag ve  $g-C_3N_4$ 'ün hibrit etkisinden dolayı olduğu anlaşılmıştır, bu da görünür ışığın daha iyi adsorpsiyonunu, serbest yüklerin azaltılmış rekombinasyonunu, fotojenere elektron deliklerinin hızlı ayrılmasını ve taşınmasını sağlamıştır (S. Ma vd., 2016:77). Chechia Hu ve arkadaşlarının çalışmasında ise, atık su arıtımı için fosfor katkılanmış  $g-C_3N_4$  (PCN) fotokatalizörü ile entegre etkili bir fotokatalitik membran reaktör sistemi (PMR) geliştirilmiştir. PCN'nin ağırlıkça % 10'u, UV-Vis ışınması altında metil mavisi (MB) boyası ile en yüksek bozunma aktivitesini sergilemiştir. Bunun nedenini  $g-C_3N_4$  yapısındaki yük ayrılmasını iyileştirmek ve eşleşmemiş elektronların sayısını azaltmak için fosfor ile birleştirilerek kullanılmıştır. Bu sonuçlar, bu çalışmada geliştirilen PMR'nin oldukça aktif ve kararlı olduğunu, dahası atık sudaki organik kirleticilerin etkin bir şekilde giderilmesi için umut verici bir sistem olduğunu göstermektedir (Chechia Hu vd., 2019:1).

#### **1.4. Bor Nitrür Yapısının Fiziksel Özellikleri**

Grafite benzeyen hegzagonal bor nitrür, grafit ile aynı düzlemsel yapıya ve özelliklere sahiptir ve “beyaz grafit” olarak da adlandırılır. Kendine has bağlanma

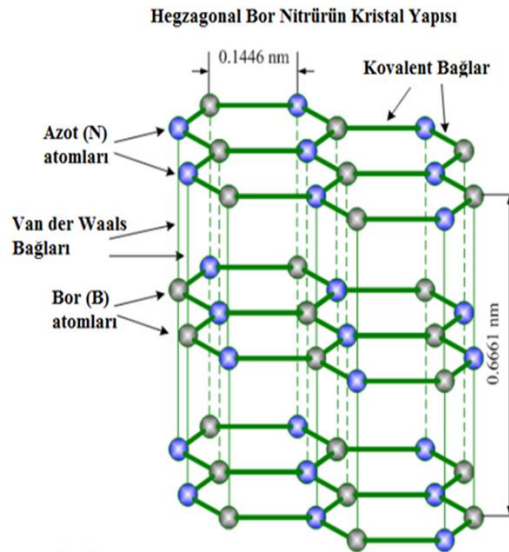
davranışları sayesinde çok farklı yapılarda bulunabilir (X. Wang vd., 2020:121366). h-BN benzersiz optik özellikleri, umut verici dielektrik performansı, yüksek ısı iletkenlik ve kimyasal kararlılık gibi kendine özgü ve büyüleyici fiziksel özellikleri nedeniyle son yıllarda çok fazla ilgi görmektedir (Raidongia vd., 2010:399).



**Şekil 1.9.** h-BN Uygulamalarının Şematik Gösterimi

**Kaynak:** Angizi vd., 2020:126513.

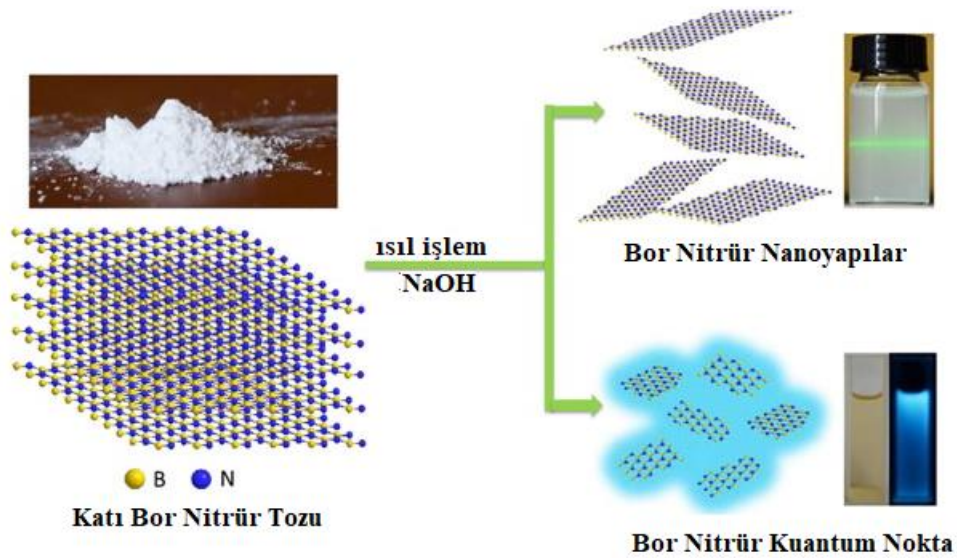
Bor nitrürü oluşturan elementlerden bor ve azot, karbon ile aynı hizada olduğundan birbirine benzer yapıya sahiptirler (D. Li vd.,2012:534). Şekil 1.9'da gösterildiği gibi hekzagonal bor nitrürün kristal yapısında; bor ve azot atomları arasında kuvvetli kovalent, tabaklar arasında ise zayıf Wan der Waals bağları vardır.



**Şekil 1.10.** Hekzagonal Bor Nitrürün Kristal Yapısı

- **Kaynak:** Majety vd., 2012:1.

Grafit yapısındaki gibi h-BN’de bulunan katmanların büyük oranda birbirinden ayrılarak grafen yapısına benzeyen ve kuantum nokta (KN) olarak adlandırılan forma dönüştürülmesine yönelik çalışmalar da büyük avantajlar sağlamaktadır. Öte yandan, bilindiği gibi kuantum noktaları çok küçük yarı iletken kristaller veya nano parçacıklardır. Kuantum noktalar genellikle kuantum hapsedme etkisine tabi nanoparçacıkları ve boyuta bağlı olarak farklı emisyonlar gösteren nano ölçekli yapıları içerir (Bawendi vd.,2003:477). Sıfır boyutlu nanomalzemeler olan kuantum noktaları biyo-görüntüleme, ilaç dağıtımı, fotovoltajik hücreler, fotokataliz gibi farklı alanlarda kullanılmaktadır. Örneğin, bor nitrür kuantum noktaları (BNKN), çok katmanlı h-BN nano tabakalarının boyutunu küçülterek üretilmektedir (Huo vd.,2017:10673). BNKN’in floresans özellikleri, yüksek termal stabilitesi (W. Luo vd.,2017:1701450), ve düşük toksisite, iyi dağılılabirlik, daha iyi biyo-uyumluluk ve basit sentez yöntemi gibi büyüleyici özelliklerinden dolayı bu malzemelere olan ilgi artmıştır (Q. Liu vd.,2019:306). Bu nedenle, BNKN’ların sentez yönteminin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır (Budak vd.,2020:100975).



**Şekil 1.11.** Bor Nitrür Kuantum Noktaların Oluşum Şeması

**Kaynak:** Z. Lei vd., 2015:18902.

BNKN geleneksel yarı iletken kuantum noktalar ile karşılaştırıldığında düşük toksisite ve iyi dağılılabirlikleri nedeniyle biyomedikal ve optik görüntüleme alanlarında umut verici adaylar oldukları kanıtlanmıştır (R. Kumar vd.,2016:38; Qin

vd.,2020:135621; Umrao vd.,2019:100001). Son zamanlarda yapılan araştırmalarda, iki boyutlu (2D) bor nitrür nano yaprakların ve sıfır boyutlu (0D) bor nitrür kuantum noktaların bir dizi çalışmada diğer türevlerine göre daha iyi performans gösterdiği de belirlenmiştir (Murray vd.,2002:8706). Örneğin; Zhouyue Lei ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, sonikasyon-solvotermal tekniğe dayalı BNKN'leri hazırlamak için kolay ve evrensel bir yöntem geliştirmişlerdir. Canlı hücrelerde güçlü floresan, iyi hücre geçirgenliği ve düşük sitotoksosite avantajları ile BNKN'lerin vitro biyo-görüntüleme için kullanmışlardır. Ayrıca, polimer matrisine kolayca entegre edilirler ve geliştirilmiş su tutma kapasitesi ile proton değiştirici membranların, proton iletkenliklerini önemli ölçüde iyileştirmişlerdir (Z. Lei vd.,2015:18902). Bingping Liu ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada ise, kolay bir aşağıdan yukarıya yaklaşım kullanılarak, %18,3'e varan kuantum verimleri (QY) ile hidroksilant amino-fonksiyonelleştirilmiş BNKN'lerin sentezi için kavramsal olarak yeni ve basit bir hidrotermal yöntemle sentez geliştirmişlerdir. Mükemmel fotoluminesans özelliklerine sahip işlevselleştirilmiş BNKN'ler, sulu bir ortamda kolayca dağılabilir ve mükemmel seçicilik ve düşük algılama limitleri ile demir ( $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ) iyonlarının tespiti için floresan probalar olarak kullanılmıştır (B. Liu vd.,2016:18899).

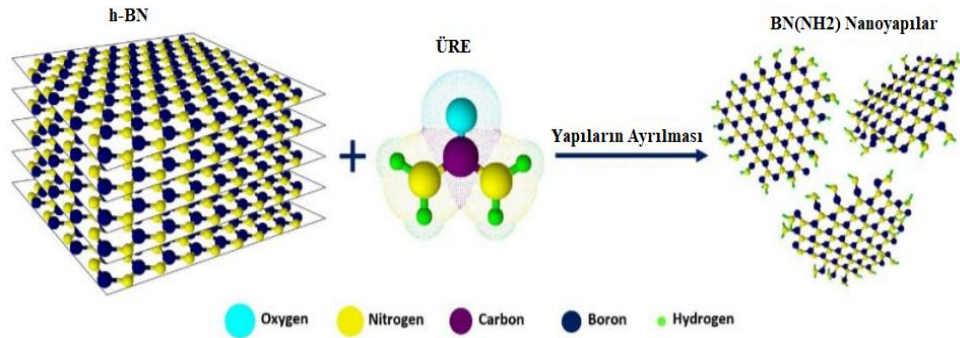
#### **1.4.1. Bor Nitrür İçeren Kompozit Nanomalzemenin Çevre Uygulamaları**

Çok küçük yarı iletken kristaller ve nanoparçacıklardan oluşan bor nitrür (BN), termal ve kimyasal olarak kararlıdır ve oksidasyona karşı iyi bir dirence sahiptir. Ayrıca, BN'nin hidrofobik yapışınsan dolayı filtrasyon sistemlerinde kullanılabilir. Bu nedenle çevresel uygulamalarda BN'nin özellikle su arıtma sistemlerinde kullanımı oldukça ilgi çekmektedir (S. Yu vd., 2018:243). Dahası, su teknolojilerinde kullanılmak üzere, özellikle su arıtma için yeni BN bazlı kompozit malzemeler üzerinde araştırmalar yapılmaya devam etmektedir (W. Lei vd., 2013:1). Örneğin, bor nitrür nanüpler (BNNT) iyi adsorpsiyon özelliklerinden dolayı yağ ve organik çözücüler gibi kirleticilerin emilmesi ve su arıtımı için mükemmel bir aday olarak gösterilmiştir (T. Li vd., 2016:4960).

Nanoyapıların hidrofobik davranışı ve yüksek lipofilikliği (kimyasal bir bileşiğin yağlarda ve lipitlerde, polar olmayan çözücülerdeki çözünme kabiliyetidir), yağ/su ayrımı için önemlidir (Hao vd., 2017:656). Weber ve arkadaşları, bir karbon nanofiber şablonu üzerinde iki aşamada BNNT'ler hazırlamıştır. Elde edilen BNNT'ler iyi

mekanik ve adsorpsiyon özellikleri (BNNT yapıları suyu iterken kendi ağırlığının 110 katına kadar yağ emilimi yapmıştır) üzerine çalışmalar yapmışlardır (Weber vd., 2018:1800056). Gonzalez Ortiz ve arkadaşları bor nitrür içeren polivinilalkol bazlı (h-BNNS / PVA) nanokompozit malzeme geliştirmişlerdir (Gonzalez-Ortiz vd., 2018:4319). Çalışma kısaca homojen bir h-BNNS/PVA dispersiyonun bir cam yüzeyi üzerin kaplanması ile başlanmıştır daha sonra dispersiyon içiresindeki çözücü malzeme ortamdan uzaklaştırılmıştır. Son olarak h-BNNS/PVA katmanında gözenekli yapıyı oluşturmak için ultra saf su banyosunda bekletilerek gözenekli bir membran haline getirilmiştir. Elde edilen hibrit yapıya sahip memebranın 1 µm civarında bir gözenek boyutuna sahip olduğu, 2000 Lm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>bar<sup>-1</sup> basınçta su arıtma performansının % 76'lık bir değere ulaştığı gözlemlenmiştir.

Daha farklı çalışmalarda, bor nitür nanotabakalar (BNNS) amin grupları ile modifiye edilerek (Şekil farklı nanokompozitler üretilmiştir. Böylece nanokompozit kenarlarındaki amin fonksiyonallikleri ve elektron eksikliği olan bor (B) atomları sayesinde, bu BNNS'ler yüksek oranda hidrofilik ve negatif yüklü hale gelmiştir, dolayısıyla bu durum kirlenmeyi sınırlamış olmaktadır. Toplam kirlenme direncinde % 50'lik bir gelişme, uzun vadeli fonksiyonel stabilite olduğu tespit edilmiştir (Abdikheibari vd., 2019:565).



**Şekil 1.12.** BN Nanotabakalarının Herhangi Bir Amin Grubu (Üre) İle Modifiye Edilmiş Hali

**Kaynak:** Abdikheibari vd., 2018:12066.

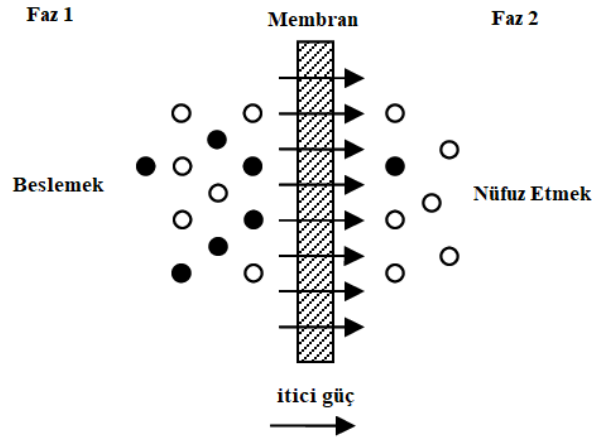
BN'nin büyük katmanlarının birbirinden ayrılarak oluşturduğu BNKN'lerin de çevresel uygulamalarda, membran prosesleri için kullanılabilecek umut verici bir yarı iletken nanokompozit malzeme olduğu bilinmektedir (Yoon vd.,2020:2898). Membran proseslerinin geleneksel ayırma teknolojilerine göre avantajı, yüksek temizleme

kapasitesine sahip olması ve daha uygun maliyetli olmasıdır (Z. Wang vd.,2014:276). Bor nitrür kuantum noktaları ise yüksek geçirgenlikleri ve seçicilikleri sayesinde umut vadeden bir moleküler ayırma membranıdır. Sara Abdikheibari ve arkadaşlarının çalışmasında, tipik olarak içme suyu arıtma uygulamaları için kullanılan ince film kompozit (TFC) nanofiltrasyon (NF) membranları, doğal organik madde (NOM) tarafından kirlenmeye karşı hassastır ve bu da geçirgenlik ve ayırma etkinliğini olumsuz etkiler. Burada, kirlenmeyi iyileştirmek için arayüzey polimerizasyonu (IP) işlemi sırasında polipiperazin amid (PPA) aktif tabakası içindeki amin işlevselleştirilmiş bor nitrür, BN(NH<sub>2</sub>), nano tabakaların dahil edilmesiyle yeni TFC, NF membranları üretilmiştir. Fiziksel ve kimyasal karakterizasyon araştırmaları, nano tabakaların PPA ağı içine başarılı bir şekilde yerleştirildiğini doğrulamıştır. Buna göre, ağırlıkça % 0.004 BN(NH<sub>2</sub>) (PPA-BN-4) içeren membran, benzer deney koşulları altında hazırlanan çıplak bir PPA membranına kıyasla daha negatif yüklü ve hidrofilik bir yüzey sergilemiştir. Bu çalışmada elde edilen yüksek oranda tekrarlanabilir sonuçlar, pratik içme suyu arıtma uygulamalarında BN(NH<sub>2</sub>) TFN membranlarının büyük potansiyelinin olduğunu göstermiştir (Abdikheibari vd., 2018:12066).

## **1.5. Membran Prosesleri ve Membranların Özellikleri**

### **1.5.1. Membranların Tanımı ve Özellikleri**

Membranlar, seçici geçirgen bir şekilde ayırmanın gerçekleştirildiği yarı geçirgen bir zar olarak tanımlanmaktadır (Altmann and Ripperger, 1997:119-128). Membran teknolojileri, geleneksel atık su arıtma teknolojilerine alternatif olarak atık su arıtma ve uygulamaları yeniden kullanmanın uygun bir yolu olarak dikkat çekmektedir. Yeni bir ayırma ve arıtma teknolojisi olarak, membran teknolojisi yaygın olarak uygulanmaktadır. Endüstriyel atık su arıtma, boya endüstrisi, deniz suyu ve suyu tuzdan arındırma gibi çeşitli alanlarda benzersiz bir rol oynamaktadır.



**Şekil 1.13.** Bir Membran Tarafından Ayrılmış İki Fazlı Bir Sistemin Sistemik Gösterimi

**Kaynak:** Elharati, 2009:1.

Bir membran tarafından ayrılmış iki fazlı bir sistem göz önünde bulundurulduğunda, çözeltinin membrandan geçişi sırasında Şekil 1.12.'de olduğu gibi 3 ayrı faz meydana gelmektedir. Bunlar besleme, süzüntü ve konsantre fazlarıdır. İlk faz besleme (faz 1) fazıdır. Bir bileşenin, membran tarafından belli bir oranda tutulması esasına dayanmaktadır. Membranda akım ise 2 kısma ayrılır. Membrandan geçen akım olarak adlandırılan süzüntü (faz 2) ve membrandan geçemeyen akım olan (faz 3) konsantre fazıdır (Ray vd., 2020:140).

Membran filtrasyonun temel prensibi ise, sıvıları içerisinde çözünen maddeleri, gazları ve partikülleri uzaklaştırmak için yarı geçirgen yapıların kullanılmasına dayanmaktadır. Malzemelerin sudan ayrılması için membranın su geçiriyor olması ve çözünen maddelere veya diğer partiküllere karşı daha az geçirgen olması gerekmektedir. Membranların genellikle bilinen uygulama alanları sıvı ortamında, toksik maddeleri, mikroorganizmaları uzaklaştırmak olmakla beraber, kâğıt endüstrisinde renk gideriminde, sularda sertliğe neden olan kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg) gibi bileşenleri gidermekte, vb. gibi çok geniş kullanım alanı vardır (Staniskis and Stasiskiene, 2006:1252).

### 1.5.2. Membranlarda Akım Şekilleri

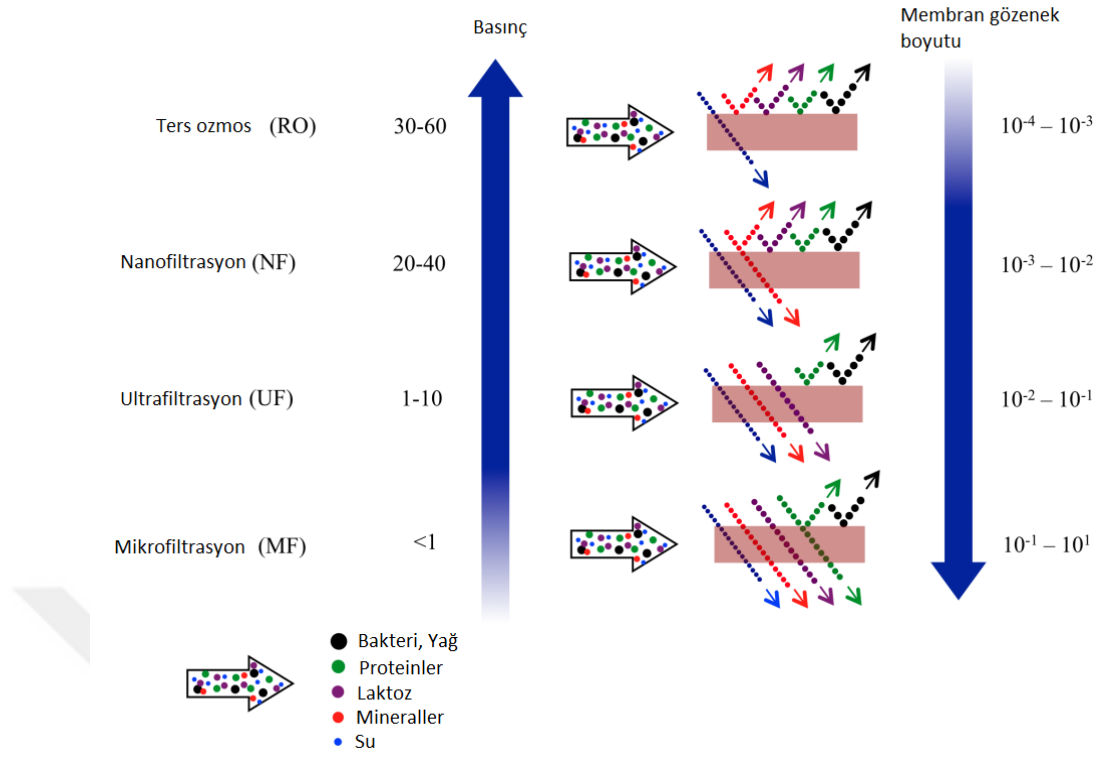
Membran proseslerin de filtrasyon çeşitleri ve akım şekli bileşiğin yapısı ve boyutu hedef alınarak belirlenmektedir. Membranın yüzeyi ve gözeneklerindeki akım şekli

oldukça önemlidir. Bunun sebebi ise, bir sürücü kuvvetin etkisiyle bir akışkan bileşeni membrandan geçmektedir (Junjian Zheng vd., 2018:4117). Membran yüzeyindeki küçük gözeneklerden geçirilmesi gereken bileşenlerin, geçişini sağlamak için gözenek boyutu ile ters orantılı olarak akım şekli uygulanması gerekir (Oe vd., 1996:107). Membranlarda uygulanan filtrasyon şekillerinin açıklaması verilmiştir;

- a) Normal akımlı filtrasyon (dead-end filtrasyon); çözelti membran yüzeyine dik olarak gönderilir. Membran gözeneklerinden tamamen geçen çözülden bir çıkış akısı meydana gelir. Geçemeyen bileşenler ise membran yüzeyinde zamanla birikerek bir tabaka haline gelir.
- b) Çapraz akımlı filtrasyon (cross-flow) ise; küçük partiküller ve çözünmüş tuzların uzaklaştırılmasında uygulanır. Çözelti membran yüzeyine paralel olarak verilir. Beslenen çözeltinin bir kısmı membrandan süzülür. Bir kısmı ise konsantre olarak süzülmezsizin devam etmekte olan akış nedeniyle membranın yüzeyinde birikmeden sürüklenerek uzaklaşır.

### **1.5.3. Membran Proseslerinin Sınıflandırılması**

Membran prosesler su ve atık su arıtımında, akışkanın membran gözeneklerinden geçirilerek kirleticilerin porlarda ve yüzeyde birikmesiyle oluşan sistemlerdir (Nadeem vd., 2019:1437). Atık suların arıtımı zorunlu hale gelmiş ve gelişen arıtma teknolojileri ile atık suların tekrar kullanımı mümkün olmaktadır. Membran prosesleri birçok avantajları ve gelişen teknolojisi nedeniyle atık suların tekrar kullanımını sağlayarak alternatif su kaynağı olarak değerlendirilmesi büyük öneme sahiptir. Membranın öncelikli rolü seçici bir bariyer gibi davranmasıdır (Y. Zhang vd., 2018:343). Membranlar molekül ağırlık sınırı veya por büyüklüğüne göre sınıflandırılabilirler (Şekil 1.13). Mikrofiltrasyon (MF), ultrafiltrasyon (UF), NF ve ters ozmoz (RO) gibi basınçla çalışan membran prosesleri ise gözenek çapına ve aynı zamanda madde büyüklüğüne bağlı olarak, dünya genelinde su arıtma, yeniden kullanım ve tuzdan arındırma sistemleri için uygulanmıştır (Kerdi vd., 2020:114454).



**Şekil 1.14.** Gözenek Boyutlarına Göre Membran Prosesleri

**Kaynak:** Meng vd., 2009:1489.

Mikrofiltrasyon, gözenek boyutu açısından en büyük olan membrandır. Mikrofiltrasyon membranları çözeltilerde bulunan bakteri, protein, nişasta, yağ, maya, silt ve alg gibi maddelerin ayrımını sağlamaktadır (Njoya vd.,2021:118915). Mikrofiltrasyonda akım membran yüzeyine dik veya çapraz olarak uygulanır. Besleme akımında bulunan maddeler zamanla membran porlarında ve yüzeyinde birikerek membran akısında azalma meydana getirmektedir. Su ve atık suların arıtılmasında, aynı zamanda doğal ve sentetik organik maddelerin gideriminde mikrofiltrasyon membranlar uygulanır. UF membranları, gözenek açıklığı bakımından mikrofiltrasyon membranlardan küçük, nanofiltrasyon membranlardan ise büyük yapılardır (Munirasu vd., 2016:183). UF membranlar, çözeltilerden küçük partikülleri ve çözünmüş molekülleri ayırmak için kullanılırlar. Gıda ve ilaç endüstrisinde, meyve suyu ve şarapların süzülerek saflaştırılmasında ve antibiyotik üretimi vb. gibi uygulamalarda kullanılmaktadır (Pendergast and Hoek,2011:1946-1971). Nanofiltrasyon membranlar monovalent iyonların geçişine izin verirken, divalent iyonların, glikoz, laktoz, virüs gibi maddelerin tutulmasını sağlamaktadır. Sularda renk, koku ve tat oluşturan bileşenlerin

giderilmesi NF membran sistemleriyle sağlanabilmektedir (Mengenai vd., 2017:643). Özellikle; organik madde gideriminde, atık suların geri kazanılması gibi uygulama alanlarına sahiptir. Bir ters osmoz membranı, su moleküllerinin geçmesine izin veren ancak çözünmüş tuzların, organik maddelerin ve bakterilerin çoğunluğunun geçmesine izin vermeyen yarı geçirgen bir zardır. RO membranları, gözenek boyutu en küçük olan membranlardır. RO membranlar düşük molekül ağırlıklı çözünmüş maddelerin, organik ve inorganik bileşenlerin geçişine izin vermez (P. Li vd., 2020:04047). Membran yüzeyine uygulanacak basınç, 30-100 bar arasındadır. Bunun amacı, membran yüzeyi ile süzüntü akısı arasındaki moleküller ile sürtünmeyi sağlamaktır. Kullanılan içme suyunun arıtılmasında, tekstil endüstrisindeki renk giderim çalışmalarında, deniz suyundan tuzun uzaklaştırılması gibi çalışmalar için uygulama alanları mevcuttur (Tang vd., 2011:126). Bu uygulamalar sadece bu alanlardaki ayırma ve arıtma problemlerini çözmekle kalmaz, aynı zamanda çevre koruma, daha temiz üretim ve enerjinin geri dönüşümü için teknoloji destekleri sağlamaktadır.

#### **1.5.4. Membran Kirlenmesi ve Temizlenmesi**

- **Membranların Kirlenmesi**

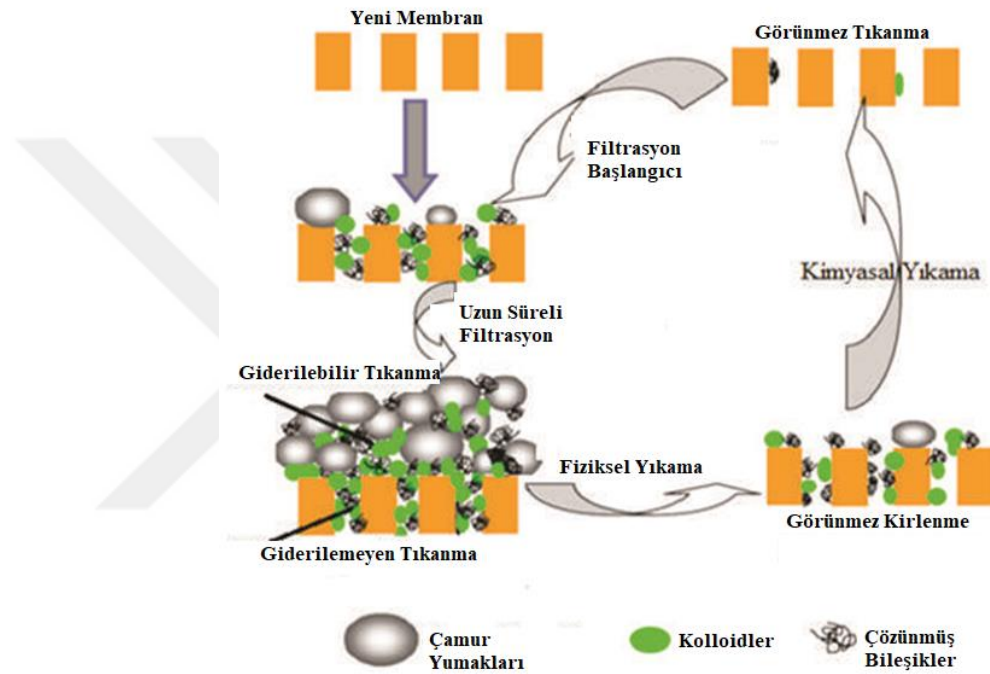
Membranların kirlenmesi genellikle, su veya atık suyun membran yüzeyine belli bir basınçla verilmesi sonucunda oluşmaktadır. Sıvıda bulunan kirleticilerin membran gözeneklerinde ve yüzeyinde birikmesiyle membran kirlenmesi meydana gelmektedir. Kirleticiler bakteri, yağ, protein, şeker, nişasta, silt, glikoz, askıda katılar ve benzeri maddeleri oluşturmaktadır (Sioutopoulos vd., 2019:21). Zamanla membran yüzeyinde biriken kirleticiler bir tabaka oluşturur. Bu sebeple, gözenekleri kapanan membranlarda akı azalması meydana gelir. Membran kirlenmesi verilen bir çözelti için; derişim, sıcaklık, pH, iyonik güç gibi fiziksel ve kimyasal parametrelere bağlıdır (S. Huang vd., 2018:90).

Membranlarda birçok farklı olay ile kirlenme meydana gelmektedir. Bunlar membran yüzeyinde biyofilm oluşumu, gözenek tıkanması, jel oluşumu, adsorbsiyon ve derişim polarizasyonu şeklinde gerçekleşir (Bazin vd., 2018:95). Membranın gözenek boyutundan daha büyük olan partiküller, tıkanma meydana getirirler. Bu durum akının azalmasına buna bağlı olarak süzüntü için uygun aktif membran yüzey alanının azalmasına neden olur. Membranın gözenek boyutundan daha küçük olan partiküllerde,

kirleticiler membran gözenekleri tarafından absorbe edilir. Böylece membran alanı azalırken; gözenek boyutu da azalır ve bu sayede membranın direnci artmış olur.

- **Membranların Temizlenmesi**

Membranın gözenek boşluklarında ve yüzeyinde oluşan kirlenmeleri giderebilmek için membranın türüne, kimyasal direncine ve kirliliğin çeşidine bağlı olarak düzenli temizlik işlemleri uygulanmaktadır. Membran temizleme işlemi hem fiziksel hem de kimyasal yöntemlerle yapılabilmektedir (J. Chen vd., 2020:118587).



**Şekil 1.15.** Membran Tıkanma ve Kirlenme Şekilleri

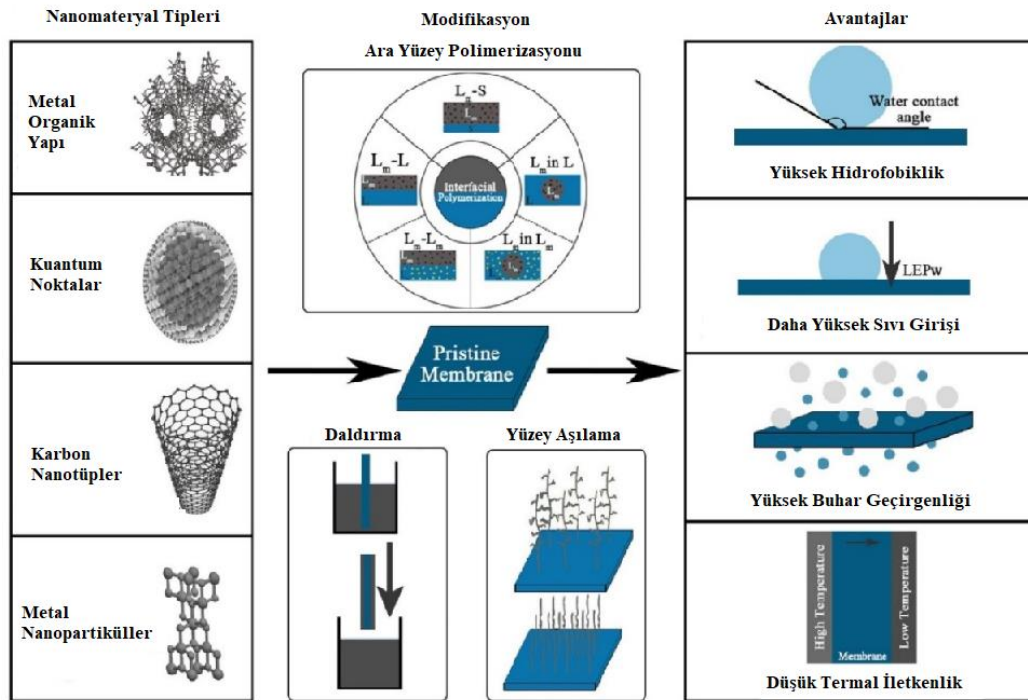
**Kaynak:** Formoso vd., 2017:39.

- 1- Fiziksel temizleme iki şekilde uygulanır. Bunlar geri yıkama ve dinlendirme uygulamalarıdır. Geri yıkama; hava kabarcıkları veya su ile yapılır. Membranda birikmiş kirleticileri uzaklaştırmak için membran yapı ve özelliğine bağlı olarak belli bir basınç altında ters yönde akım uygulanır. Dinlendirme de ise süzüntünün bir süre durdurulması sağlanır. Bu iki yöntem birlikte uygulanabilmektedir
- 2- Kimyasal temizleme fiziksel temizlemeye göre daha kısa ve daha etkilidir. Fakat fiziksel temizlemede kimyasal atık oluşmaz. Kimyasal temizlemede membranın bozunma olasılığı vardır (Z. Wang vd., 2014:1). Kimyasal temizlemede baz, asit ve oksidantlar kullanılır. Asitler ( hidroklorik, sitrik, sülfirik ve oksalik asit ) vb. diğer

kimyasallar, inorganik maddeleri uzaklaştırmak için kullanılırken, sodyum hipoklorit organik maddeleri ve mikroorganizmaları uzaklaştırmak için kullanılır.

### 1.6. Kompozit Nanomalzeme Katkılı Membran Prosesleri

Karbon bazlı nanomalzemeler, kuantum noktalar gibi benzersiz özelliklere sahip kompozit malzemelerin membran ayırma tekniklerinde son zamanlarda kullanılmaktadır. Bu nanokompozit malzemeler, membran geçirgenliğini ve seçiciliğini arttırmaktadır (Akar vd., 2013:216). Bu tür nanomalzemeler, su moleküllerinin hızlı bir şekilde taşınmasına izin verirken aynı zamanda zara kirlenme önleyici bir karakter kazandırarak onları membran teknolojisi için başarılı bir aday haline getirmektedir (Ozbey-Unal vd., 2020:101646). Nanomalzemeler (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, BNKN), membranlara katılanması sonucunda kendi özelliklerini korumaktadırlar. Polimer destek malzemeleri haline gelen kompozit nanomalzemeler (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/PES, BNKN/PES) ise; daha yüksek stabilite, işlenebilirlik ve nanopartikül-matris etkileşiminin neden olduğu iyileştirmeler sağlamaktadır (Anticó vd., 2021:878).



Şekil 1.16. Katkılanan Membranlarda Değişen Özellikler

Kaynak: Ray vd., 2020:140.

Ek olarak, nanomalzemelerin polimerik nanokompozitlere katkılanması, mekanik, elektriksel ve optik özelliklerin geliştirilmesine yol açar. Nanomalzemeler kullanılarak elde edilen membranlarda veya membran yüzeylerinde yapılan iyileştirmeler, gözeneklilik, yüzey özelliklerinin hidrofiliği, elektropozitifliği veya elektronegatifliği ve yüzey katalitik özelliklerinde çeşitli değişiklikler sağlamaktadır (Cuicui Hu vd., 2020:962). Şekil 1.16'da görüldüğü gibi, farklı nanomalzemelerle katkılanmış (metal nanopartiküller, kuantum noktalar, karbon bazlı nanomalzemeler vb. membranlar, saf membranlara kıyasla daha yüksek sıvı girişi, yüksek buhar geçirgenliği, düşük termal iletkenli gibi avantajlara ulaşarak daha iyi sonuçlar elde edilmesine destekçi olmuştur.



# BÖLÜM 2

## GRAFİTİK KARBON NİTRÜR VE BOR NİTRÜR İÇEREN KOMPOZİT

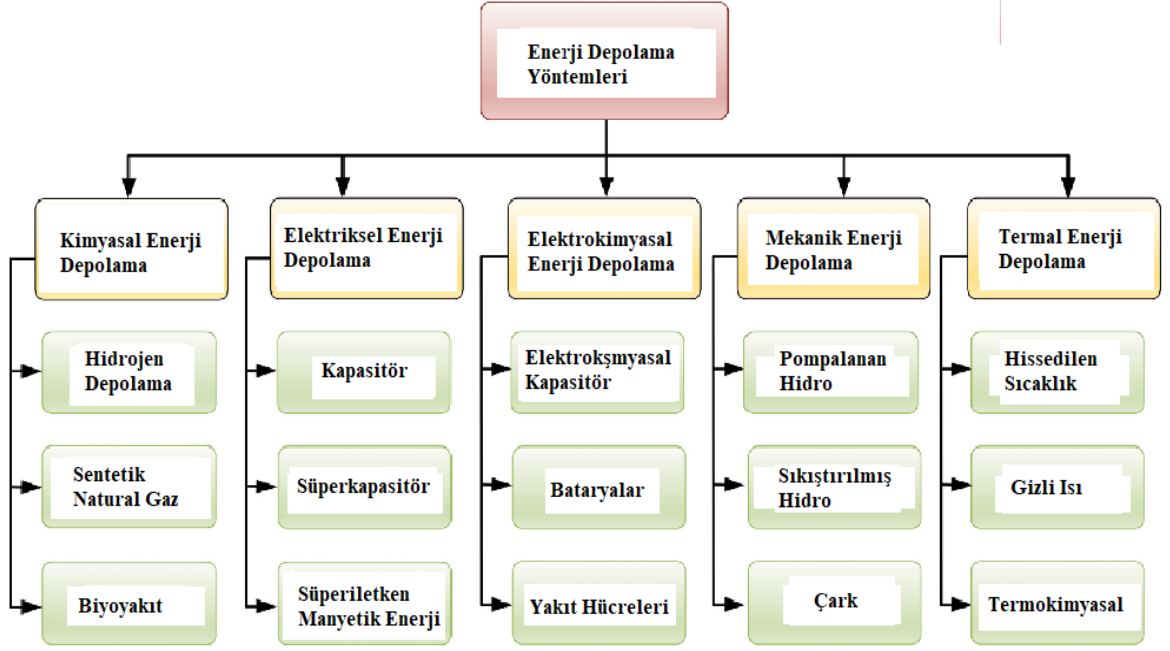
### YAPILARIN ENERJİ UYGULAMALARI

Enerji depolama sistemleri uzun yıllardır bilim dünyasında çalışılan uygulama alanlarındandır. Enerji depolama sistemlerinin performansını arttıracak yeni malzemelerin geliştirilmesi ve bunun sonucunda ortaya çıkacak yeni uygulama çalışmalarının yapılması gün geçtikçe artmaktadır. Nanomalzemelerin enerji uygulamaları, kullanılan depolama sistemlerinden süperkapasitörler, lityum iyon bataryalar, yakıt hücreleri, elektrot yapımı vb. olarak kullanılabilir. Enerji depolama sistemleri uzun yıllardır bilim dünyasında çalışılan uygulama alanlarındandır. Enerji depolama sistemlerinin performansını arttıracak yeni malzemelerin geliştirilmesi ve bunun sonucunda ortaya çıkacak yeni uygulama çalışmalarının yapılması gün geçtikçe artmaktadır. Nanomalzemelerin enerji uygulamaları, kullanılan depolama sistemlerinden süperkapasitörler, lityum iyon bataryalar, yakıt hücreleri, elektrot yapımı vb. olarak kullanılabilir.

#### 2.1. Enerji Depolama Sistemleri

Enerji, yenilenemeyen enerji kaynaklarından (kömür, petrol ve doğal gaz dahil) ve yenilenebilir enerji kaynaklarından (güneş, rüzgâr ve hidroelektrik dahil) üretilebilir. Ancak yenilenebilir enerji üretimi, konum ve iklim gibi birçok parametreye bağlıdır (Xu vd., 2020:5393). Yenilenebilir enerji kaynakları düşük verimliliğe ve düşük güç yoğunluklarına sahip olabilir. Dahası enerji, çok farklı zamanlarda kullanılabilir. Bu nedenle yenilenebilir enerjinin depolanması gerekir. Elektrik enerjisini, neredeyse tüm yenilenemez ve yenilenebilir enerji kaynaklarından üretebildiğimiz için en yaygın kullanılan enerji türüdür. Üretilen enerji, enerji nakil hatları ile talep edilen yere kolaylıkla aktarılabilir. Aktarılan elektrik enerjisi, ihtiyaç duyulan enerji türlerine, ışık, ses, ısı, kinetik vb. dönüştürülebilir. Elektrik enerjisinin depolanması taşınabilir cihazlar için önemlidir.

Enerji kısaca elektrokimyasal, elektromanyetik, termodinamik (Goodenough, 2013:14) ve mekanik (Dharmendra vd., 2021:315) olarak depolanabilir. Enerji depolama sistemlerinden bazıları Şekil 2.1'de gösterilmiştir (D. Zhang vd., 2021:110014). Elektrokimyasal enerji depolama türleri (piller, kapasitörler ve süper kapasitörler) aşağıda açıklanmıştır.

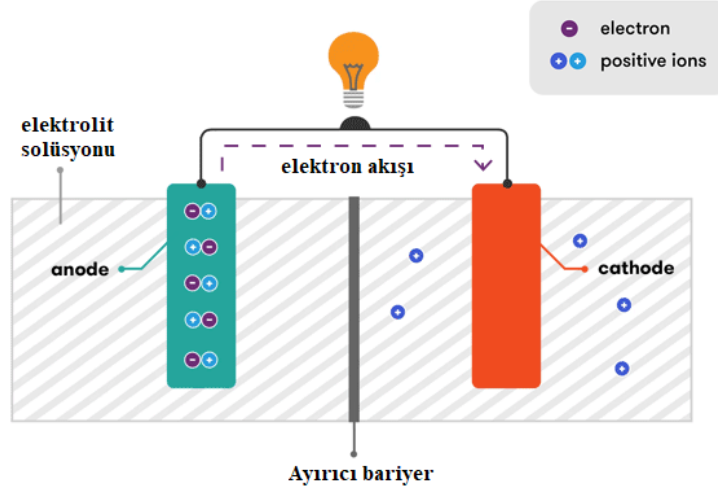


**Şekil 2.1.** Enerji Depolama Sistemleri

**Kaynak:** Mofijur vd., 2019:3167.

### 2.1.1. Bataryalar

Piller bir veya daha fazla elektrokimyasal hücreden oluşur ve kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürürler (Zeng vd., 2014:1129). Piller, taşınabilir elektronik cihazlar için en yaygın enerji depolama cihazıdır. Piller, kararlı voltaj sağlamak için seri bağlanmış iki veya daha fazla galvonik (volta) hücresinden oluşur (Winter and Brodd, 2004:4245-4269) Piller, bir redoks reaksiyonu yoluyla şarjı depolayabilir (Abruña vd., 2008:43). Temel bir volta hücresinde iki elektrot ve bir elektrolit bulunur. Ek olarak, elektrotlar arasında kısa devre oluşmasını önlemek için bir ayırıcı kullanılır. Elektrotlara oksidasyonun meydana geldiği anot (negatif terminal) ve indirgenimin gerçekleştiği katot (pozitif terminal) adı verilir. Elektrotlar, genellikle sulu bir çözelti (asit veya baz) olan bir elektrolit içine daldırılır. Bu işlemde bir elektrot malzemesi elektronları bırakır ve diğer elektrot bu elektrotları alarak iyonların bu iki elektrot arasında taşınmasını sağlar. Şekil 2.2 bir pilin temsilini göstermektedir. Elektrot boyutunun büyük olması, daha fazla akım kapasitesi sağlar. Böylece piller yüksek enerji depolayabilir. Ancak pillerin temel dezavantajı, uzun süreli şarj (saat) olabilmesidir.

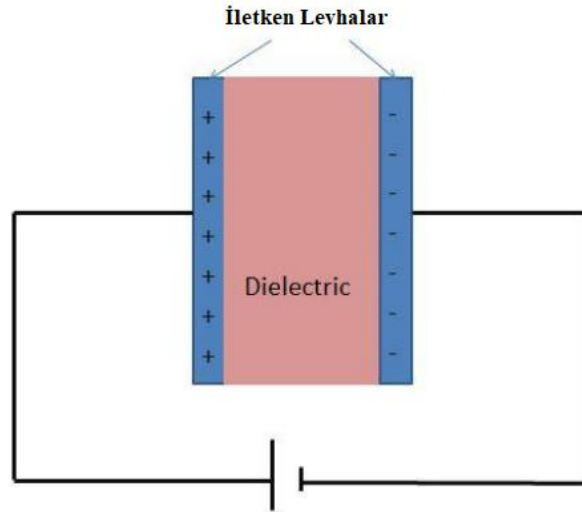


Şekil 2.2. Bataryaların Çalışma Prensibi

**Kaynak:** Biswas vd., 2013:122.

### 2.1.2. Kapasitörler

Bir dielektrik ile ayrılmış iki iletken paralel plakaya bir voltaj farkı uygulandığında, plakalardan biri pozitif yükleri, diğeri ise negatif yükleri depolar (Zhu vd., 2021:630). Bu cihaza kapasitör denir ve tipik bir kapasitör Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Geleneksel Bir Kapasitörün Şematik Gösterimi

Yük miktarı uygulanan gerilim ile orantılıdır ve gerilim farkı başına şarj oranı kapasitans olarak tanımlanır ve kapasitans aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$C=Q/V \quad (1)$$

C kapasitans, V ve Q sırasıyla yük ve potansiyeldir. Kapasitans üç değişkene bağlıdır; plakaların alanı, plakalar arasındaki mesafe ve plakalar arasındaki ortamın dielektrik sabiti. Her üç tip kapasitör kapasitansı, plakaların yüzey alanına ve aralarındaki mesafeye ve ayrıca ortam özelliklerine bağlı olarak değiştirilebilir (Wu vd., 2016:1). Kapasitansı artırmak için yüzey alanı artırılmalı, mesafe azaltılmalı veya ortam, dielektrik sabiti daha yüksek olan bir malzeme ile değiştirilmelidir. Süper kapasitörlerde kullanılan elektrotlar yüksek bir yüzey alanına sahip olabilir (Hiraoka vd., 2010:422) ve elektrot ile elektrolit arasındaki mesafe genellikle çok küçüktür (genellikle birkaç nanometre (Hantel vd., 2011:90)). Bu nedenle, süper kapasitörler, geleneksel kapasitörlerle karşılaştırıldığında yüksek özgül kapasitansa sahip olabilir.

### **2.1.2.1. Süperkapasitörler**

Ultrakapasitörler olarak da adlandırılan süper kapasitörler, yükü yüksek yüzey alanlı elektrotlar üzerinde elektrostatik olarak depolayabilir. Süper kapasitörlerin en belirgin avantajı, uzun çevrim ömrü (uzun şarj-deşarj çevrimlerinden sonra yüksek kapasitans tutma), yüksek güç yoğunluğu ve çevre dostu bileşenlerle (elektrotlar ve elektrolitler) inşa edilebilmeleridir (Vangari vd., 2012:72).

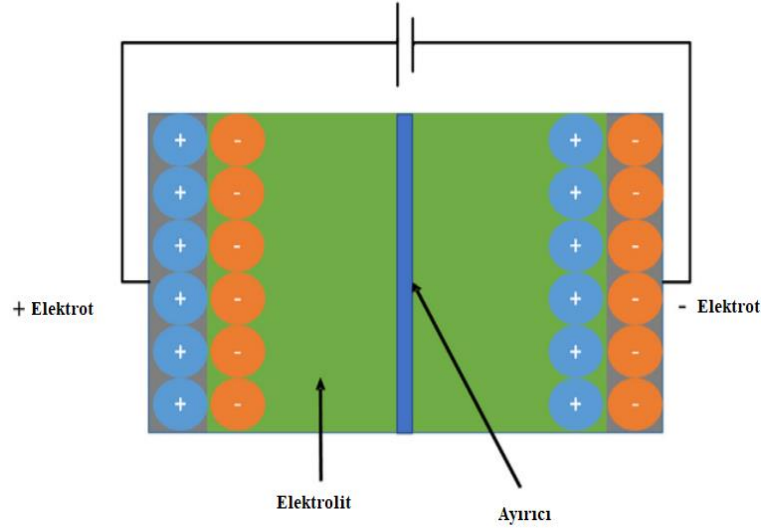
Geleneksel pillere kıyasla genellikle daha az enerji depolarlar, ancak kısa bir zaman ölçeğinde (tipik olarak birkaç saniye içinde) şarj vedeşarj olabilirler. Bununla birlikte, süper kapasitörlerin lityum iyon pillere kıyasla zayıf yönleri, düşük özgül enerji ve yüksek maliyetler olabilir. Lityum iyon pil ve süper kapasitör için bazı parametrelerin ortalama değerleri Tablo 2.1'de verilmiştir. Elektrolit kapasitörlere göre birim kütle başına yaklaşık 100 kat daha fazla enerji depolayabilirler (Burke, 2000:37). Üç tip süper kapasitör vardır; elektrikli çift katmanlı kapasitörler, hibrit kapasitörler ve sözde kapasitörler (faradaik kapasitörler).

**Tablo 2.1.** Süper kapasitör ve Lityum İyon Pilin Karşılaştırılması.

İşlevi	Süperkapasitör	Lityum-iyon
Şarj Zamanı	1-10 dakika	10-60 dakika
Döngü Sayısı	1 milyon üzeri	500'den fazla
Hücre Voltajı	2.3-2.75 V	Normali 3.6 V
Spesifik Enerji	5	120-240
Spesifik Güç	10.000	1000-3000
Maliyet	10.000 dolar	2250-1000 dolar
Servis Yaşı	10-15 yıl	5-10 yıl
Şarj Sıcaklığı	-40 / 65 °C	0 / 45 °C
Deşarj Sıcaklığı	-40 / 65 °C	-20 / 60 °C

#### 2.1.2.1.1. Elektrik Çift Katmanlı Süperkapasitör

Elektrikli çift katmanlı kapasitörler (EDLC), iki elektrot, elektrolit ve bir ayırıcıdan oluşur (Azam vd., 2021:8335). EDLC'de yükler elektrot-elektrolit arayüzlerinde toplanır (Libich vd., 2018:224). EDLC deposu elektrostatik olarak şarj olur ve elektrokimyasal (faradaik) reaksiyon oluşmaz. Elektrot ve elektrolit arasındaki arayüz Şekil 2.4'da gösterilmiştir. Elektrotun yüzey alanı çok yüksek olabilir (grafit çok gözenekli olabileceğinden) ve elektrot yüzeyi ile elektrolit arasındaki mesafe nanometre ölçeğinden daha azdır. Bu nedenle, bu iki parametre (yüksek elektrot alanı ve elektrot ile elektrolit arasındaki düşük mesafe) yüksek bir kapasitansa neden olur.



**Şekil 2.4.** Elektrik Çift Katmanlı Kapasitörlerin Şematik Gösterimi

EDLC, grafit, karbon nanotüpler veya grafen gibi karbon bazlı malzemelerle üretilir (Iro vd., 2016:10628). Zıt iyonlar (katyonlar ve anyonlar) bu iki elektrot arasına voltaj farkı uygulanarak iki karbon bazlı elektrota çekilebilir ve yük otomatik olarak depolanabilir. Daha önce belirtildiği gibi, ayırma mesafesi kapasitans ile ters orantılıdır. Şekil 2.4'da görüldüğü gibi her iki elektrotta da ince çift katmanlar oluşur ve bu nedenle ince çift katmanlar yüksek kapasitansa neden olur. EDLC'de kimyasal reaksiyon oluşmaz ve bu şişme/büzülme olasılığını ortadan kaldırır (Lozano-Castelló vd., 2003:1765).

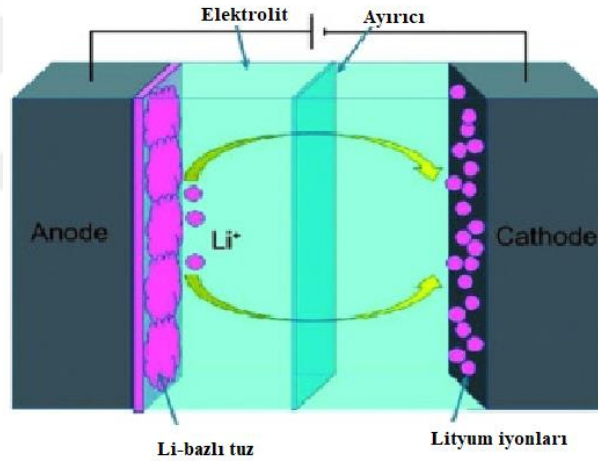
#### 2.1.2.1.2. Faradaik Kapasitörler (Psödokapasitörler)

Faradaik kapasitörler olarak da adlandırılan psödokapasitörler, yükleri elektrokimyasal olarak (faradaik olarak) depolar (Simon and Gogotsi, 2009:320-329). Metal oksitler/hidroksitler/sülfürler ve iletken polimerler, psödokapasitör malzemeleri olarak kullanılabilir.

Sözde kapasitörler, faradaik süreçlerle EDLC'lerden daha büyük kapasitans yoğunluklarına ve spesifik enerjiye sahip olabilir (Conway and Pell, 2003:637). Öte yandan, psödokapasitörler daha az güç yoğunluğuna ve daha az döngüsel kararlılığa sahiptir. Psödokapasitörlerin çevrim kararlılığı ve düşük güç yoğunlukları olan ana dezavantajları, yeni kompozit elektrotlar tasarlanarak değiştirilebilir.

### 2.1.2.1.3. Hibrit Kapasitörler

Hibrit kapasitörler, EDLC ve sözde kapasitörlerin bir kombinasyonu ile geliştirilmiştir. Bu nedenle hibrit kapasitörlerde daha iyi bir enerji depolama performansına neden olabilecek hem faradaik hem de faradaik olmayan süreçler vardır (Xie vd., 2022:161967). Hibrit süper kapasitör tipleri, kompozit hibritler (B. Zhao vd., 2017:32), asimetrik hibritler ve pil tipi hibritlerdir (Acharya vd., 2020:3073). Kompozit hibrit süper kapasitörlerde elektrotlar, metal oksitleri veya iletken polimerleri (psödokapasitör) karbon bazlı malzemelerle (EDLC) bir elektrotta birleştirir. Asimetrik hibritlerde elektrotlardan biri psödokapasitör tipi elektrot diğeri ise EDLC tipi elektrottur. Pil tipi hibritlerde, asimetrik bir hibrit süper kapasitör elektrotlarından biri bir pil elektrotu ile değiştirilir. Şekil 2.8'de bir hibrit süper kapasitör temsili gösterilmektedir. Süper kapasitör elektrotlarının özeti ve karşılaştırması aşağıdaki tabloda verilmiştir.



Şekil 2.5. Hibrit Kapasitörlerin Şematik Gösterimi

**Kaynak:** Muzaffar vd., 2019:123.

**Tablo 2.2.** Süperkapasitörlerin Karşılaştırılması

Süperkapasitör Çeşitleri	EDLC	Psödokapasitör	Hibrit Kapasitör		
			Asimetrik Hibrit	Simetrik Hibrit	Batarya Benzeri Hibrit
Elektrot Materyalleri	Karbon	Metal oksit ya da redoks polimeri	Anot; psödokapasitans materyal, cathode; karbon.	Redox metal oksit/karbon ya da redoks polimeri/karbon	Anot; Li iyon materyal, katot; karbon
Şarj Depolama Mekanizması	Elektrokimyasal çift katman, faradaik olmayan prosesler	Redoks reaksiyonları; faradik prosesler	Anot; redoks reaksiyonları, katot; EDLC	Redoks reaksiyonları	Katot; EDLC
Değerler	İyi döngü stabilitesi, iyi oran kapasitesi, düşük spesifik kapasitans, düşük enerji yoğunluğu	Yüksek spesifik kapasitans, yüksek enerji yoğunluğu, yüksek güç yoğunluğu	Yüksek enerji yoğunluğu, yüksek güç yoğunluğu, iyi stabilite	Yüksek enerji yoğunluğu, orta düzeyde maliyet ve kararlılık	Yüksek enerji yoğunluğu, yüksek düzeyde maliyet ve gerekli elektrot malzemesini eşleşmesi

### 2.1.3. Elektrolit

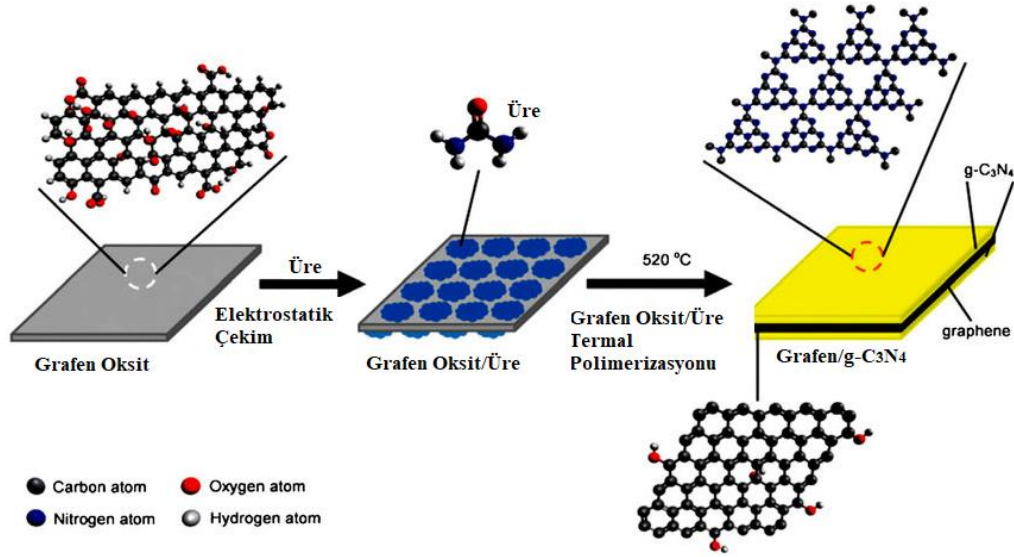
İletken bir çözelti olan elektrolit, gerekli reaksiyonu gerçekleştirmek için anot ve katod elektrodun arasındaki yük ve iyon taşınmasında kullanılmaktadır. Elektrolitteki akım ve iyonlar, harici elektrik gücü yardımıyla kontrol edilebilir ve dolayısıyla bir malzeme bir redoks reaksiyonu ile uyarlanabilir (Aurbach vd., 2007:491). Elektrolit, reaksiyon değişikliğine neden olabileceğinden enerji depolama cihazlarında önemli bir bileşendir. Bu nedenle elektrolitlerin yanıcılık, toksisite, uçuculuk gibi fiziksel özellikleri elektrotların üretimi ve elektrotların çevrimi sırasında önemlidir (Jaumaux

vd., 2021:2008644). Ancak, sulu veya organik elektrolitler yaygın olarak kullanıldığından ve bu geleneksel elektrolitlerin fiziksel özellikleri kolayca değiştirilemediğinden şimdiye kadar kullanılan elektrolit türleri sınırlıdır. Elektrolit sayısını artırmak ve elektrolitlerin fiziksel özelliklerini kontrol etmek için, son zamanlarda elektrokimyasal uygulamalar için iyonik sıvı elektrolit adı verilen yeni bir elektrolit türü üzerinde yaygın olarak çalışılmaktadır (Mahanta vd., 2020:372).

## **2.2. Grafitik Karbon Nitrürün Süperkapasitör Çalışmaları**

Süperkapasitörlerde yüksek performans elde etmek için, elektrot malzemelerinin geniş spesifik yüzey alanına, yüksek iletkenliğe, düşük üretim maliyetine, bol kaynağa ve tatmin edici elektrokimyasal stabiliteye sahip olması beklenmektedir (J. Luo vd., 2013:1464). Süperkapasitörlerde uygulanan çeşitli elektrot malzemeleri arasında, yüksek etkili yüzey alanına ve mükemmel iletkenliğe sahip karbon bazlı malzemeler son zamanlarda çok dikkat çekmiştir (Y. Ma vd., 2019:26) Güvenilir verimli enerji depolama cihazlarına yönelik artan talebi karşılamak için, yüksek enerji depolamalı yeni gelecek vaat eden malzemelerin geliştirilmesi hala zorlu olmaya devam ediyor (Q. Chen vd., 2015:6761).

Grafitte benzer bir yapıya sahip 2D malzemeler (yani, iki bitişik katman arasındaki zayıf van der Waals etkileşimleri, düzlem içi atomları birbirine bağlayan güçlü kovalent bağ), son birkaç on yılda olağanüstü dikkat çekmiştir (Wen vd., 2017:72). Karbon bazlı malzemelerden, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, uygun bant aralığı (yaklaşık 2,7 eV) (Godin vd., 2017:5216; Shevlin and Guo, 2016:7250-7256) nedeniyle fotokatalizde önemli araştırma ilgisi kazanmıştır. Bununla birlikte, araştırmacılar enerji depolama cihazlarında elektrot malzemesi olarak potansiyel uygulamalarını nadiren incelediler.



**Şekil 2.6.** Süperkapasitör Çalışmaları İçin g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/GO Elektrotu Hazırlama Prosedürü

**Kaynak:** Mamba and Mishra, 2016:347-377.

Hem g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> hem de grafen benzer grafit mikro yapılara sahip olduğundan ve g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> yüksek oranda nitrojen fonksiyonel grupları içerdiğinden, grafeni g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ile değiştirmek, grafen bazlı süper kapasitörlerin performansını artırmak için potansiyel olarak etkili bir strateji olarak kabul edilir (R. Lin vd., 2017:25545).

Bununla birlikte, polimerik bir yarı iletken olarak, katkısız g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, geniş moleküler yapısı, psödokapasitansa en büyük katkıları olan kenar nitrojen atomlarının sayısını sınırlar. Bu nedenle, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>'ün kenar azot atomlarının sayısını artırarak kompozit malzemelerin elektrokimyasal performansını artırmak için son zamanlarda daha fazla araştırma yapılmaktadır. Bu araştırmalara örnek olarak, Baskaran Palanive ve arkadaşları, ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nanokompozitini sentezlemek için kolay sol-jel ve kalsinasyon yöntemi kullanılmışlardır. Hazırlanan nano partiküller için, elektrokimyasal süperkapasitör ölçümleri yapılırken, fotokatalitik boya bozunması için de kullanılmıştır. Kompozit malzeme, ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ve g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> arasındaki sinerjik etki nedeniyle saf nanoparçacıklarla karşılaştırıldığında daha iyi fotokatalitik aktivite ve üstün kapasitans özelliği göstermiştir. Kompozit malzeme arasındaki heteroeklem oluşumu, yük taşıyıcıları zıt yönde hareket ettirmeye yardımcı olur ve nanokompozit ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>'ün gelişmiş fotokatalitik aktivitesini destekleyen elektron-boşluk (hole) çiftlerinin rekombinasyon oranını azaltır. Pozitif elektrotlar, 10A/g akım yoğunluğunda 103 F/g

kapasitans ve 500 ardışık döngüden sonra kapasitans verimi %94'tür (Palanivel vd., 2019:143807). Veena Ragupathi ve arkadaşları ise, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> katkılı manganez sülfür (MnS) nanoparçacıkları sol-jel tekniği ile sentezlenmiş ve bu çalışmada yapısal ve kapasitif davranışları incelenmiştir. Malzeme, 10 mV s<sup>-1</sup> tarama hızında 463,32 F g<sup>-1</sup>'lik yüksek bir spesifik kapasitans ve 2000 döngüden sonra korunan %98,6 mükemmel süper kapasitif davranış sergilemiştir (Ragupathi vd., 2019:88).

### 2.3. Bor Nitrür (BNKN) Süperkapasitör Çalışmaları

- Süperkapasitörlerin çoğu, grafen, molibden disülfid (MoS<sub>2</sub>) (Jingxuan Zheng vd., 2020:78), hBN (Rajendran vd., 2021:3445), kobalt selenit (CoSe<sub>2</sub>), kalay oksit (SnO<sub>2</sub>) ve tungsten disülfid (WS<sub>2</sub>) gibi 2D malzemeler kullanılarak imal edilmiştir (W. Chen vd., 2019:313). Bu 2D katmanlı malzemeler, birbirine bağlı kristal düzenlemeleri nedeniyle mükemmel kimyasal ve anizotropik özellikler sunmuştur. Çeşitli karbon bazlı malzemelerle önemli araştırma ilerlemeleri kaydedilmesine rağmen, yüksek termal iletkenlikleri, mekanik mukavemetleri, optik şeffaflıkları, esneklikleri, termal kararlılıkları, kimyasal toleransları göz önünde bulundurulduğunda grafen ve h-BN bazlı hibrit malzemeler ile yapılan çalışmalarda bir artışın olduğu görülmektedir.

BNKN, nano ölçekli boyutu ve amin kenar fonksiyonel gruplarının varlığı nedeniyle son derece gelişmiş bir reaktivite ortaya koyar (Ciesielski and Samorì, 2013:381-398) ve birleştirme reaksiyonu yoluyla GO yüzeyi ile başarılı bir kompleks kovalent bağ oluşumunu sağlar. Ayrıca, BNKN, önemli ölçüde artan yük taşıyıcı yoğunluğuna yol açan ve değişen yüzey enerjisi nedeniyle hidrofilik bir elektrolit çözeltisi ile uyumluluğunu geliştirir.

Sonuç olarak önerilen farklı sentez yaklaşımlarıyla, yüksek dayanıklılığa sahip, yüksek performanslı süper kapasitörler için elektrot malzemeleri olarak kullanılacak verimli ve kararlı 2B hibrit heteroyapılı BNKN/GO malzemelerinin geliştirilmesi için yeni bir stratejiye yol açabileceğini göstermektedir. Yasmin Mussa ve arkadaşları, enerji depolama cihazlarından biri olan lityum iyon (Li-ion) piller ile, özellikle petrol endüstrisi gibi zorlu ortamlardaki uygulamalar yapmak için hibrit bir yapı hazırlamışlardır. Bu yaklaşımda, yüksek sıcaklıklı lityum iyon piller için anot olarak Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/ RGO/h-BN nanokompozitlerini mikrodalga ışınlama tekniği (MWI) yoluyla sentezlemişlerdir.

Sonuçlar, h-BN ilavesinin sadece  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{RGO}$  nanokompozitlerinin termal stabilitesini arttırmakla kalmayıp aynı zamanda spesifik yüzey alanını da geliştirdiğini göstermiştir.  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{RGO}/\text{h-BN}$  nanokomp ozitleri, RGO ve h-BN arasındaki sinerjik etkileri kanıtlayan  $191 \text{ m}^2/\text{g}$ 'lik en yüksek spesifik yüzey alanını sergilemiştir. Ayrıca,  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{RGO}/\text{h-BN}$ , 100 döngüden sonra yüksek performans ve daha düşük direnç üzerinde kararlı tersinirlik ile en yüksek spesifik kapasiteyi sergilemiştir. İlginç bir şekilde, bu yeni nanokompozit, mükemmel döngü kararlılığı (%100 kapasite tutma) ve  $150^\circ\text{C}$ 'de azaltılmış bir iç direnç ile olağanüstü yüksek sıcaklık performansları da sergilemektedir (Mussa vd., 2020:1). Aamar F. Khan ve arkadaşları ise, yüzey aktif madde ile hegzagonal bor nitrür (2D-hBN) nano tabakaları, sulu ortamda sodyum kolat kullanılarak üretmişlerdir. İlk kez asidik ortam içinde oksijenin elektrokimyasal indirgenmesini (oksijen indirgeme reaksiyonu) denemişlerdir. hBN'nin oksijen indirgeme reaksiyonuna yönelik olası elektrokatalitik aktivitesini gösteren geleneksel grafit bazlı elektrotlara kıyasla önemli ölçüde potansiyelinde azalma gözlemlenmiştir, bu nedenle yakıt hücresi teknolojisinde faydalı bir elektrot platformu olarak potansiyele sahiptir. Ayrıca, yüzey aktif madde ile (sodyum kolat) 2D-hBN'nin,  $1745 \text{ F g}^{-1}$ 'e kadar spesifik kapasitans değerine sahip etkili bir elektrokimyasal süper kapasitör malzemesi olduğunu da göstermişlerdir. 2D-hBN kapasitansının açık bir analizini sağlayan galvanostatik şarj/deşarj analizine 2D-hBN'nin elektrokimyasal özelliklerinin tam bir analizi gerçekleştirilmiştir. Literatürde eksik görülen, spesifik kapasitansı hesaplamak için çok çeşitli yöntemler tanıtılmış olup bu çalışmada kullanılmıştır. Sonuç olarak, bu yapıda h-BN'nin birçok iyi özelliklerinin yanında yüzey aktif bir madde ile birleştirilmesi (sodyum kolat), hem daha önceki benzer çalışmalarda bildirilmemiş olması hem de elektrokatalitik ve kapasitif davranışa sodyum kolatın büyük katkı sağlaması çalışmayı güçlendirmiştir (A. F. Khan vd., 2017:4103).

# BÖLÜM 3

## YÖNTEM

Materyal ve yöntem bölümünde, tez çalışmasında olan nanomalzemelerin sentez yöntemleri, kullanılan membranlara nanomalzemelerin nasıl katkılındığının yöntemi, amacı ve önemi bilgileri yer almaktadır.

### 3.1. Kullanılan Kimyasal Maddeler

Üre (Ph.Eur., >99.5%), Borik asit , Nitrik asit Sodyum Karbonat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) , Etanol, Amonyak, Polietersülfon, N-metil-prolidon, Doğal grafit, Sülfürik asit ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), Nitrik asit ( $\text{HNO}_3$ ), Potasyum permanganat ( $\text{KMnO}_4$ ), Hidrojen peroksit ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), Askorbik asit, NMP (N-metil pirolidon), Sığır serum albümini (BSA), Reaktif Red 180 (RR180).

### 3.2. Kullanılan Cihazlar

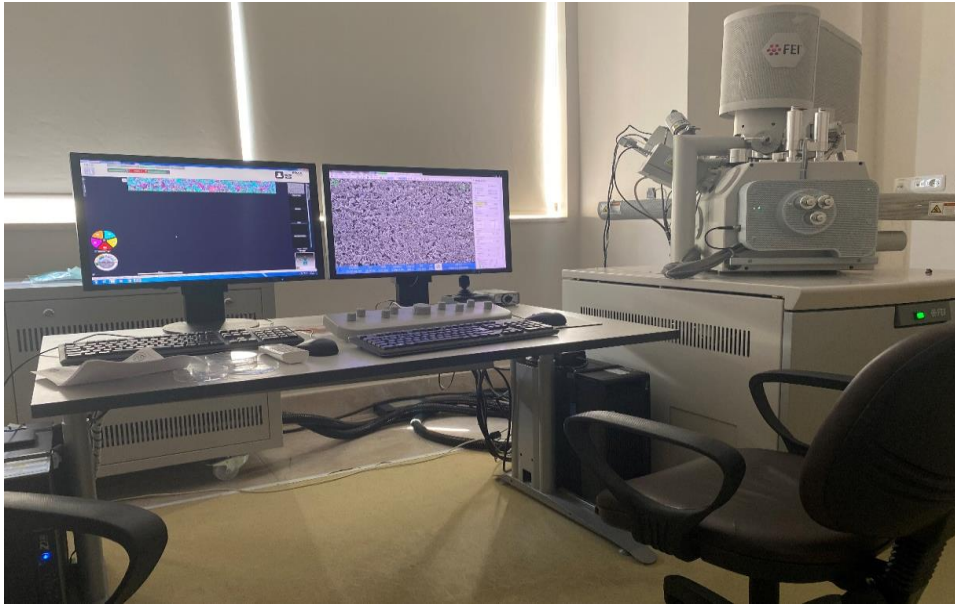
Tez çalışmasında sentezlene nanomalzemelerin ve bu malzemeler ile katkılan membranların karakterizasyonunda kullanılan yöntemler ile birlikte g- $\text{C}_3\text{N}_4$  ve BNKN ları kullanılarak hazırlanan süperkapasitör elektrodların elektrokimyasal ölçümleri için kullanılan cihazlar aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

- Fourier Dönüşümlü Kızıl Ötesi Spektrometresi (FTIR)
- Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)
- X-Işını Difraksiyonu (XRD)
- UV-Vis Spektrofotometre (UV-Vis)
- Floresans Spektrofotometre (PL)
- Yüzey Alanı Ölçümü (BET)
- X-Ray Fotoelektron Spektroskopisi (XPS)
- Taramalı Elektron Mikroskobu Enerji Yayılımlı X-Işını Analizi (SEM-EDX)
- Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)
- Temas Açısı (Contact Angel)

- Döngüsel Voltametri (CV) cihazı kullanılmıştır.
- ZETA Potansiyel Ölçümü

### 3.2.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Sentezlenen örneklerin yüzey morfolojisi ve mikro yapısı hakkında bilgileri belirlemek amacıyla, FEI QUANTA FEG 650 model SEM cihazı kullanılmıştır. SEM cihazı, birçok dalda araştırma-geliştirme çalışmalarındaki kullanımı ile beraber, elektronları kullanarak numunenin yüzeyinden yüksek çözünürlüklü görüntü alınmasını sağlamaktadır. Cihazın çalışma mekanizmasında, yüzeye odaklanmış bir elektron demeti sayesinde numune yüzeyinin taranması ve görüntülenmesini sağlayan yöntemlerden biridir. Yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronlar atomlar ile etkileşime girerek numune yüzeyi ile ilişkilendirilen bilgiler verir. Elektron ışını ile numunenin dış yörüngesindeki yüksek enerjili elektronlarla düşük enerjili elektronların etkileşimi sonucunda ikincil elektronlar uyarılır. Bu hareket, bir dedektör tarafından sinyale çevrilerek, yüksek çözünürlüklü (çözünürlük: mm- 100 nm) numunenin görüntüsü elde edilir.



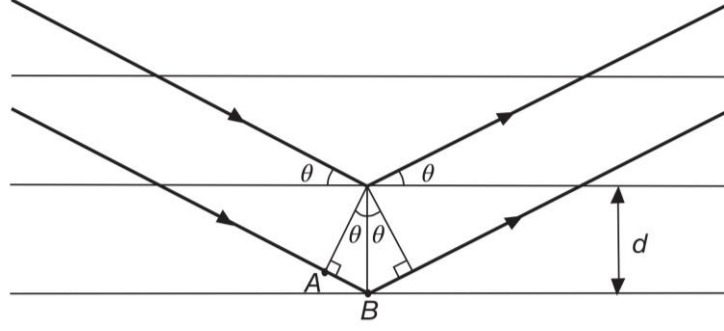
Şekil 3.1. Kullanılan SEM Cihazı

Tipik bir SEM cihazı, SEM monitöründe gözlemlenen özelliklerin kimyasal analizine izin vermek için bir Enerji yayımlı X-Işını Analizi sistemiyle (EDX) donatılmıştır. Bir SEM-EDX sisteminde üretilen sinyaller morfolojik analiz için görüntü oluşturmada kullanılan ikincil ve geri saçılmış elektronları ve ayrıca tespit edilebilir. Ayrıca numune konsantrasyonlarda bulunan kimyasalların tanımlanması ve miktarların belirlenmesi için kullanılan X-ışınlarını içerir. EDX'deki tespit limiti, numune yüzeyinin koşullarına bağlıdır. Yüzey ne kadar pürüzsüzse, tespit edilecek malzemenin kimyasal analiz limiti o kadar düşük olur. EDX, ağırlıkça %1 ile %10 arasındaki konsantrasyonlara sahip elementleri tespit edebilir.

### **3.2.2. X-Işını Difraktometresi (XRD)**

X-Işını Difraktometresi (XRD), numunelerin kristal yapılarını analiz etmek için kullanılan bir teknik olup, tez kapsamında sentezlenen malzemelerin karakterizasyonu, 40 kV, 30 mA, Cu K $\alpha$ , dalga boyu: 1.5405 Å Bruker marka AXS D8 Advance model XRD cihazı kullanılmıştır. Ayrıca XRD, x-ışını ile karakterizasyonda çok sık tercih edilirken, malzemelerin yapısı, kristal yöntemleri ve kusurları gibi diğer yapısal parametreler ile ilgili de detaylı bilgi sağlamaktadır. Analizi yapılan malzemeler XRD cihazıyla hacimsel-katı yapıda, ince film, toz, jel, kremi yapıların hepsine bakılabilmektedir. Ayrıca, kalitatif, kantitatif faz analizi, stres, ince filmin fazı ve kalınlığı gibi de birçok analiz yapılabilmektedir. Fakat genellikle numune toz formundadır ve bu analiz metodu numuneyi tahrip etmediği gibi çok az miktarlarda dahi analiz yapılabilmektedir.

X-ışını kırınımı Bragg Yasasının temelinde dayanmaktadır. Şekil 3.2'de görüldüğü gibi İki dalga arasındaki yol farkı  $2d\sin\theta$  olur. Ardışık iki düzlemden kırınan dalgaların aynı fazda olabilmesi için yol farkı  $\lambda$  dalga boyunun tam katları olmalıdır. X-ışını paralel olan düzlemden yansır ve detektöre aktarılarak numunenin kristal yapısı hakkında detaylı bilgi edilir. Düzlemden yansıyan X-ışınlarından elde edilen pikler miller indisleri ile ifade edilir. Bu sayede elde edilen pik şiddetine bağlı olarak yansımanın hangi düzlemden kaynaklandığı bulunabilir.



**Şekil 3.2.** X- Işını Kırınımına Ait Şematik Görüntü

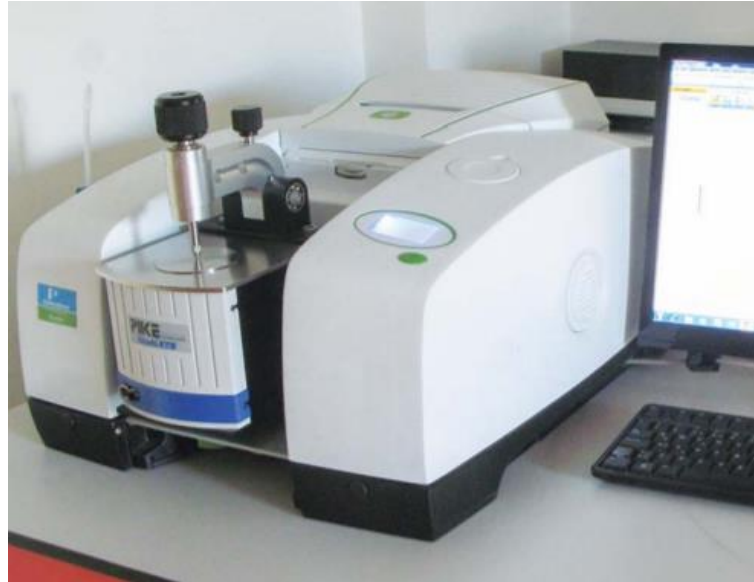
Kullanımı kolay, hızlı bir işleme sahip ve numunelerdeki boyut, şekil çeşitliliklerine izin verme gibi avantajları olan Şekil 3.3’de gösterilen XRD cihazı, x-ışınları vakum altında bir tüpte üretilirken, tüp içerisine bir akım uygulanır ve bu akım ne kadar yüksek olursa içeriye yayılan elektron sayısı da o kadar büyük olacaktır. Tüpün içerisindeki yüksek voltaj, bu elektronları hızlandırır ve hedefe çarpar. Çarpılan hedefte, x ışınları üretilir ve üretilen bu x-ışınları hedeflenen malzemenin de karakteristik özelliği demektir. Sonuç olarak, konulan numune üzerine x-ışınları toplanır. Cihazda bulunan dedektör bu x-ışını sinyalini saptar ve bir mikro işlemci tarafından bu sinyali sayım hızına çevirerek, dataları ortaya çıkarır. Çıkarılan veriler ise, malzeme ile ilgili olan kristal yapı özelliklerini açıklamış olur.



**Şekil 3.3.** XRD Cihazı

### 3.2.3. Fourier Dönüşümlü Kızıl Ötesi Spektrometresi (FTIR)

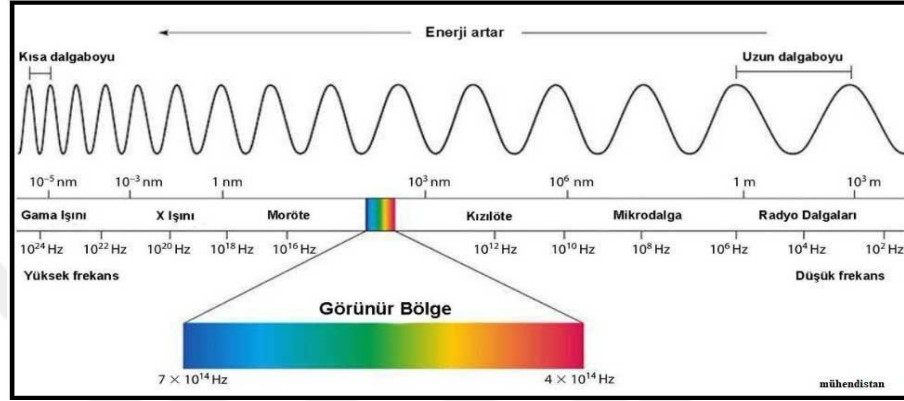
FTIR, kızılötesi spektroskopinin en yaygın şeklidir. Tüm kızılötesi spektroskopiler, kızılötesi (IR) radyasyon bir numuneden geçtiğinde radyasyonun bir kısmının emilmesi ilkesine göre hareket eder. Numuneden geçen radyasyon kaydedilir. Farklı yapılarına sahip farklı moleküller farklı spektrumlar ürettiğinden, spektrumlar molekülleri tanımlamak ve ayırt etmek için kullanılabilir. Bu şekilde, spektrumlar insanların parmak izleri veya DNA'sı gibidir: neredeyse benzersizdir. FTIR, çeşitli nedenlerle tercih edilen kızılötesi spektroskopi yöntemidir. İlk olarak, numuneyi yok etmez. İkincisi, eski tekniklerden önemli ölçüde daha hızlıdır. Üçüncüsü, çok daha hassas ve kesindir. FTIR'ın bu faydaları, kızılötesi "kaynak" olan ve daha yüksek hızla izin veren bir interferometre ve Fourier dönüşümü kullanımından kaynaklanmaktadır. Fourier dönüşümü, dalgaları ayıran ve zamana bağlı olarak dalganın frekansını döndüren matematiksel bir fonksiyondur. İnterferometrenin "çıktısı", kullandığımız spektroskopi spektrumu değil, "interferogram" olarak bilinen bir grafikdir. Fourier dönüşümü, interferogramı tanıdığımız ve kullandığımız kızılötesi spektroskopi spektrum grafiğine dönüştürür.



Şekil 3.4. FTIR Cihazı

### 3.2.4. UV-Vis Spektrofotometre (UV-Vis)

UV-Vis absorpsiyon spektroskopisi, bir örnekteki atom, molekül veya iyonların ya da çözelti veya gaz fazındaki kimyasal maddelerin bir enerji düzeyinden diğerine geçişi sırasında absorblanan ve nicel olarak ölçümü sağlayan analitik bir tekniktir. UV-Vis , yakın-ultraviyole (180-390 nm) veya görünür bölgedeki (390-780 nm) radyasyonun, ne kadarının absorblandığını anlamaktır.



Şekil 3.5. Elektronik Spektrum Ve Görünür Bölge Spektrumu

**Kaynak:** Science Electromagnetic Spectrum Diagram Stock Vector - Illustration of clipart, electromagnetic: 212857549.

UV-Vis absorpsiyon spektroskopisinde genel olarak örnekler çözeltilerde hazırlanır, fakat numuneler katı maddeler ve gazlar olarak da incelenebilir. Ayrıca, UV-Vis spektrofotometre ölçümlerinin çalışma prensibi Lambert-Beer eşitliğine dayanmaktadır; burada  $\epsilon$ , molar absorpsiyon katsayısını;  $I$ , ışığın madde içerisindeki kat ettiği yol ve son olarak  $c$ , maddenin konsantrasyonunu ifade etmektedir.

$$\text{Absorbance} = \epsilon \cdot I \cdot c \quad (2)$$

Bir spektrofotometre düzeneği, başlıca ışık kaynağı, dalga boyu seçicisi (monokromatör) ve dedektörden oluşur ve gönderilen ışın demetinin örneğin yüzeyinden yansması sonrası ölçümü ve bu sayede belirlenen absorbansın hesaplaması ile açıklanabilir. Numunenin yapısına göre nasıl absorbans değişikliğinin gösterildiğini ve malzemelerin karakteristik özellikleri ile ilgili genel bilgileri Genesys 150 model UV-Vis spektroskopisinde ölçüm alınarak bakılmıştır.



**Şekil 3.6.** Kullanılan UV-Vis Cihazı

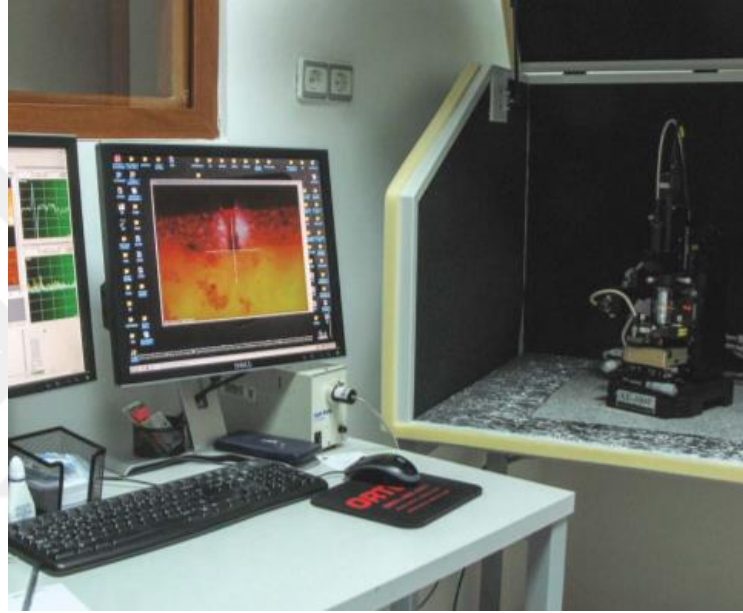
### **3.2.5. Floresans Spektrofotometre**

Floresans spektroskopisinde, ışınım singlet halde gerçekleşirken kısa süreli bir ışınım yapar ve elektromanyetik ışın demeti ile uyarılmış bir atom veya molekül temel enerji seviyesinden bir üst enerji seviyesine çıkar. Daha sonra üst enerji seviyesindeki uyarılmış olan atom veya moleküller fazla enerjiyi atarak temel enerji seviyesine dönmek ister, yani uyarılan elektron, spinini değiştirmeden eşit haldeki elektronla hala zıt spinli olarak kalır. Özetle floresans spektrumundaki en önemli özellik, düşük enerjide maksimum emisyon elde edilmesidir. Bu durum için ise genelde atom veya moleküller farklı moleküllerle çarpıştırılarak kaybedilir. Geriye kalan enerji ise floresans ışınımı olarak yayılır ve bu çalışmada da Cary Eclipse marka Floresans spektrumu kullanılarak ölçüm alınmıştır.

### **3.2.6. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)**

Çözünürlüğü çok yüksek bir kuvvet mikroskobu olan AFM, atomik boyutta yüzey özelliklerini incelemek amacıyla Park Systems marka, XE-100E model AFM cihazı kullanılmıştır. Nanoboyutta görüntüleme ölçme ve malzeme işleme konusunda en

gelişmiş araçlardan biridir. AFM’de silisyum, silisyumoksit veya silisyumnitrürden yapılmış keskin bir uç, genellikle silisyumoksitten yapılan manivela adı verilen ve belli bir kuvvet sabitine sahip denge çubuğuna bağlanmıştır. AFM’de bu uç numune yüzeyine yaklaştırıldığında, uç ve yüzey arasında atomik güçlerin oluşumu nedeniyle denge çubuğunda küçük oynamalar olur ve bu oynamaların optik araçlarla ölçülmesiyle yüzey morfolojisi tespit edilir. AFM uygulamaya bağlı olarak çeşitli modlarda kullanılabilir.



**Şekil 3.7.** AFM Cihazı

### **3.2.7. Yüzey Alanı Ölçümü (BET)**

Brunauer Emmett Teller (BET) teorisi, gaz moleküllerinin katı bir yüzey üzerinde fiziksel adsorpsiyonunu açıklamayı amaçlar ve malzemelerin spesifik yüzey alanlarının ölçümü için önemli bir analiz tekniğinin temelini oluşturur. Bu çalışmada kullanılan TriStar II model BET cihazında, analiz ünitesinden tamamen bağımsız, kendinden programlı, 6 (altı) istasyonlu tam otomatik gaz giderme sistemi vardır. Gözlemler genellikle fiziksel adsorpsiyon veya fizisorpsiyon olarak adlandırılır.

BET teorisi, çok katmanlı adsorpsiyon sistemleri için geçerlidir ve genellikle, spesifik miktarı belirlemek için adsorbanlar (gazın bağlandığı malzeme ve gaz fazı

adsorptif olarak adlandırılır) olarak malzeme yüzeyleri ile kimyasal olarak reaksiyona girmeyen sondalama gazlarını (adsorbat olarak adlandırılır) kullanır. Azot, BET yöntemleriyle yüzey araştırması için kullanılan en yaygın olarak kullanılan gaz halindeki adsorbattır. Bu nedenle, standart BET analizi çoğunlukla N<sub>2</sub>'nin (77 K) kaynama sıcaklığında gerçekleştirilir. Daha düşük frekansla da olsa başka problama adsorbatları da kullanılır, bu da farklı sıcaklıklarda ve ölçüm ölçeklerinde yüzey alanının ölçülmesine olanak tanır. Bunlara argon, karbondioksit ve su dahildir. BET teorisi ile belirlenen spesifik yüzey alanı miktarları, kullanılan adsorbat molekülüne ve onun adsorpsiyon kesitine bağlı olabilir (Hanaor vd., 2014:15143).



**Şekil 3.8.** Kullanılan BET Cihazı

### **3.2.8. Tanecik Büyüklüğü Ölçümü ( Zetasizer)**

Zetasizer malzemenin partikül boyutunu, zeta (tanecik büyüklüğü) potansiyelini ve moleküler ağırlığı ölçme yeteneği sağlar. Şekil 3.9.'da gösterilen, Nano ZS modele sahip Zetasizer sistemindeki benzersiz teknoloji, bu parametrelerin çok çeşitli konsantrasyonlarda ölçülmesi mümkündür. Zetasizer serisi, geniş bir konsantrasyon aralığında boyut ve zeta potansiyelinin ölçümü için önceden hizalanmış optikler ve programlanabilir ölçüm konumu ve doğru ölçümler için gerekli olan hassas sıcaklık kontrolüne sahiptir. Ayrıca iletkenlik ve pH ölçümü yapılabilmektedir. Moleküller veya

parçacıklar olarak var olan çok çeşitli malzemeler dinamik ışık saçılımı ile karakterize edilebilir. Bunlara proteinler, polimerler, pigmentler, nanopartiküller, seramik süspansiyonlar, mürekkepler ve tonerler dahildir.



**Şekil 3.9.** Zetasizer Cihazı

### **3.2.9. X- Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS)**

Kimyasal analiz için elektron spektroskopisi olarak da bilinen X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS), çok çeşitli malzemelere uygulanabilmesi ve yüzeyden değerli nicel ve kimyasal durum bilgileri sağlaması nedeniyle en yaygın kullanılan yüzey analiz tekniğidir. Bir malzemede bulunan veya yüzeyini kaplayan elementlerin yanı sıra kimyasal durumlarını ve elektronik durumların genel elektronik yapısını ve yoğunluğunu tanımlayabilen fotoelektrik etkiye dayalı, yüzeye duyarlı spektroskopik bir tekniktir.



**Şekil 3.10. XPS Cihazı**

Derinlik dağılımı bilgisi, ince film yapılarını karakterize etmek için XPS ölçümlerini iyon öğütme (püskürtme) ile birleştirerek elde edilebilir. Ayrıca, XPS'nin yüzey katmanları veya ince film yapıları hakkında sağladığı bilgiler, nanomalzemeler, fotovoltaikler, kataliz, korozyon, yapışma, elektronik cihazlar ve paketleme, manyetik ortam dahil olmak üzere, görüntüleme teknolojisi, yüzey işlemleri ve çok sayıda uygulama için kullanılan ince film kaplamaları, birçok endüstriyel ve araştırma uygulaması için önemlidir. XPS tipik olarak, numune yüzeyinden fotoelektronların yayılmasına neden olan mono-enerjili Al  $\alpha$  x-ışınları ile numune yüzeyinin uyarılmasıyla gerçekleştirilir. Yayılan fotoelektronların enerjisini ölçmek için bir elektron enerji analizörü kullanılır. Bir fotoelektron zirvesinin bağlanma enerjisi ve yoğunluğundan, tespit edilen bir elementin element kimliği, kimyasal durumu ve miktarı belirlenebilir.

### **3.2.10. Döngüsel Voltametri (CV)**

Voltametri, potansiyel değıştikçe akımı ölçerek bir elektrot veya elektrolit hakkında bilgi sağlayan bir elektroanalitik yöntemdir. Birçok voltametri yöntemi vardır. Genellikle kullanılan voltametri yöntemlerinden biri olan döngüsel voltametri, elektrokimya temelli bir elektrot çalışmasıdır, çünkü döngüsel voltamogram, redoks davranışını geniş bir potansiyel aralığında hızla gözlemleyebilmektedir (Nicholson,

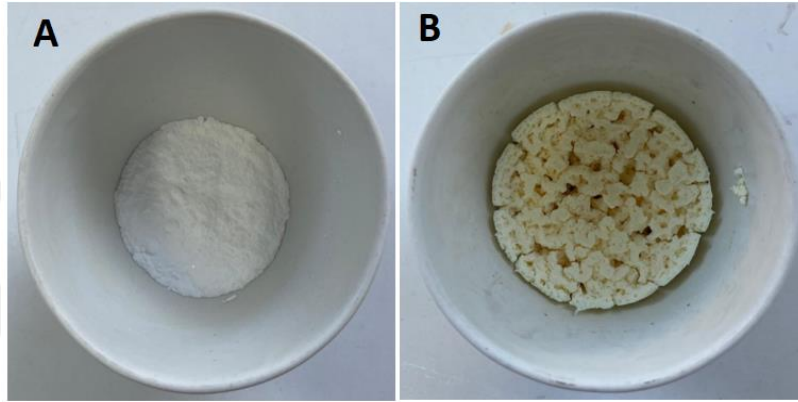
2002:1351). Döngüsel voltametre kolayca uygulanabilir olmasının yanında elektrot ve elektrolit arasındaki redoks reaksiyonları hakkında yeterli bilgi sağlamak için de yaygın bir tekniktir. Tipik bir elektrokimyasal sistemde bir elektrolit çözeltisi; karşıt elektrot (counter electrode), referans elektrot (reference electrode) ve çalışma elektrotu (working electrode) dahil olmak üzere üç elektrotlu bir hücre gerektirir.

Elektrokimyasal devrenin tamamlanması için yardımcı elektrot olarak da adlandırılan karşıt elektrot, genellikle titanyum, grafit veya platin gibi inert malzemeden yapılır. Çünkü karşıt elektrot, elektrotun incelenmesi sırasında oksitlenmemeli veya azalmamalıdır. Karşıt elektrot, hızlı elektron transferine izin vermeli ve çalışma elektrotunda meydana gelen reaksiyon hızını sınırlamamalıdır. Üç elektrotta sistemdeki akım, çalışma elektrotu ile karşıt elektrot arasında akar ve yüzey alanları da akım ölçümleri için önemlidir. Bu nedenle hücredeki karşıt elektrotun yüzey alanı, hücredeki çalışma alanının yüzey alanından daha büyük olmalıdır, aksi takdirde karşıt elektrot, akım ölçümlerinin hız sınırlayıcı reaktifi (elektrot) olabilmektedir. (Choudhury vd., 2021:7611). Referans elektrot ise, üç hücreli bir elektrokimyasal sistemde referans noktası olarak kullanılır. Gerilimi kontrol etmek ve ölçmek için kullanılmaktadır. Referans elektrotu iyi tanımlanmış ve kararlı bir dengeye sahip olmalıdır. Referans elektrotlar ortamın sulu olup olmamasına göre farklılık gösterir. Sulu çözelti için doymuş kalomel ( $Hg_2Cl_2$ ), cıva/cıva sülfat ( $Hg/Hg_2SO_4$ ), cıva/cıva Oksit ( $Hg/HgO$ ) ve gümüş/Gümüş klorür ( $Ag/AgCl$ ) elektrotu genellikle referans elektrot olarak kullanılmaktadır (Arya vd., 2021:2089). Çalışma elektrotunda ise ilgilenilen reaksiyon analiz edilir. Genellikle çalışma elektrodu inert malzemelerden yapılır. Çalışma elektrotunun boyutu ve şekli akımı etkilediği için önemlidir. Sırasıyla indirgenme veya yükseltgenme reaksiyonu gerçekleştiğinde, çalışma elektrodu anot veya katot olarak adlandırılır. Döngüsel voltametri tekniği, çalışma elektrotunun voltajını önceden belirlenmiş E1 ve E2 noktalarından farklı potansiyellerde sabit bir tarama hızında ( $v / V s^{-1}$ ) (iki veya fazla döngüde) sürdürülmelidir.



### 3.3. Grafitik Karbon Nitrür (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) Sentezi

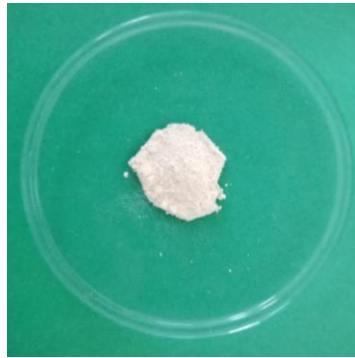
Başlangıç malzemesi olan üre (58 g), kapalı bir kroze içerisinde, 580 °C'de dakikada 5 °C artacak şekilde 3 saat kül fırında ısıtıldı. Elde edilen ürün, 0.1M HNO<sub>3</sub> ve su ile yıkandı. Bu işlem ile asit üründen uzaklaştırılırken, pH 5.5-6 arasına gelene kadar yıkama işlemine devam edildi. Daha sonra ürünü (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) elde etmek için, 70 °C etüvde gece boyunca kurumaya bırakıldı (Sert, Ozay, vd., 2021:126571).



Şekil 3.13. A) Ürenin Fırından Öncesi ve B) Fırınlamadan Sonra Elde Edilen Görüntüsü

- **Protonlanmış g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Sentezi**

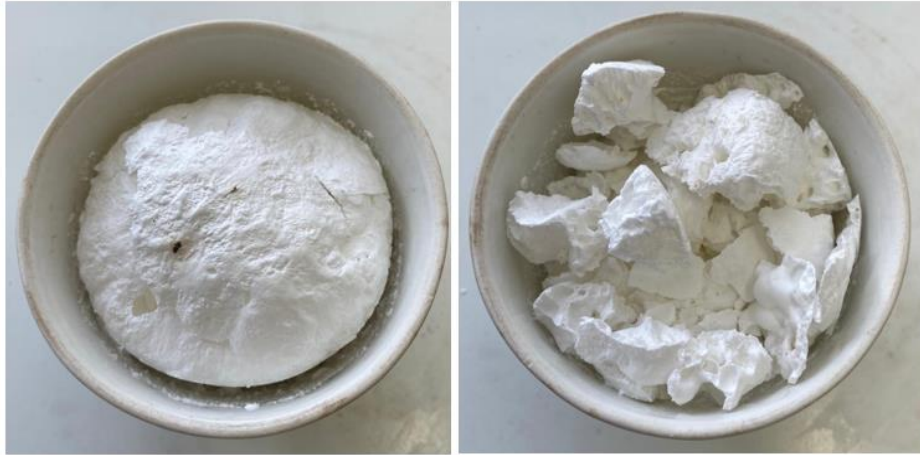
Süperkapasitör çalışmalarında kullanılacak g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>'ün yüzey alanını arttırmak ve dolayısıyla elde edilecek kapasitans sonuçlarını yükseltmek için bu çalışmada, protonlanmış g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kullanılmıştır. Melamine (2 g) ve amonyum klorat (2 g) havanda iyice ezilip, karıştırıldıktan sonra kül fırında 600 °C'de 2 saat sinterlenip mezogözenekli g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> elde edilmiştir. Bu elde edilen mezogözenekli g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, nitrik asit içerisinde, 40 °C'de 24 saat karışıma bırakılmıştır. Sonrasında malzeme saf su ile yıkanarak 70 °C'de vakumlu etüvde kurumaya bırakılmıştır.



Şekil 3.14. Protonlanmış g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

### 3.4. Hekzagonal Bor Nitrür (h-BN) Sentezi

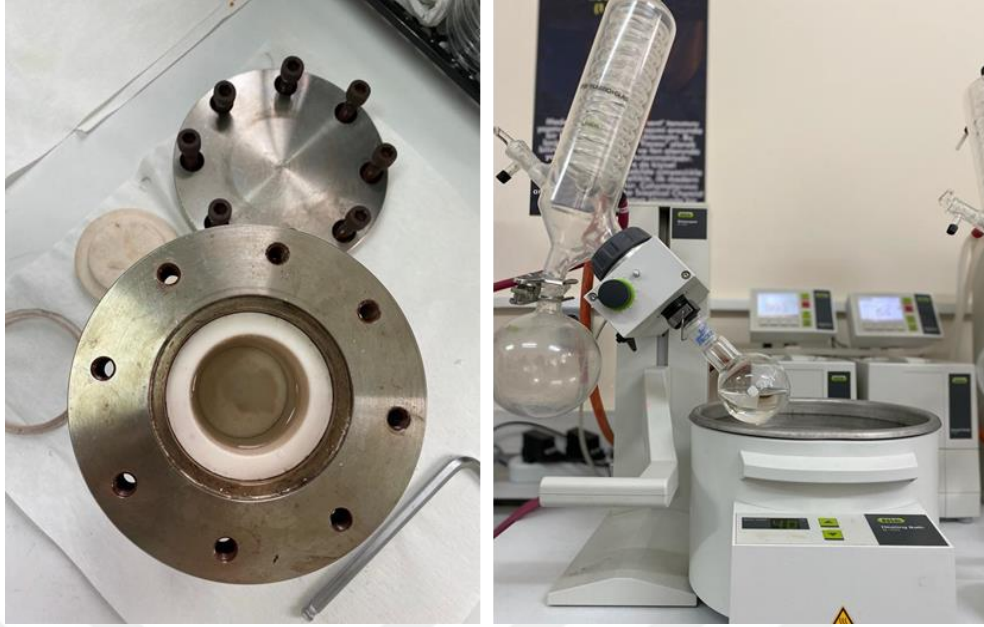
Bu yöntemde başlangıçta, üre ve borik asit karışımlarının (1/1) 300 °C'ye kadar kademeli olarak ısıtılmasıyla bir öncül üretildi. Üretilen ürün, 300 °C'de 2 saat tutulduktan sonra toplandı ve cam bir kavanozda saklandı. Elde edilen ürün miktarının % 10'u kadar Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (Sodyum Karbonat) eklendi ve katalitik etkisini arttırmak için havan içerisinde iyice karıştırıldı. Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> eklenen ürün, etüv 80 °C sıcaklıktayken 3 saat kadar bekletildi. Son olarak üretilen bu başlangıç malzemelerinden hekzagonal bor nitrür elde etmek için, Argon ortamında 1200 °C'de dakikada 10 °C artacak şekilde 3 saat ısıtılmıştır.



Şekil.3.15. Hekzagonal Bor Nitrür Kül Fırın Sonrası Fotoğrafi

### 3.5. Bor Nitrür Kuantum Nokta (BNKN) Sentezi

Bor nitrür kuantum noktaları tek adımda hidrotermal yöntemle sentezlendi. Öncü malzemeler olarak üre ve borik asit kullanıldı. Tipik olarak, sentez için borik asit (4 g), deiyonize su ve etanol çözeltisi (1:2'lik oranla) içerisinde çözündürüldü. Ardından üre (3 g), % 25'lik amonyak çözeltisi (36 ml) içinde çözüldü ve borik asit / su / etanol karışımına eklendi. Ultrasonik banyoda, 10 dakika karıştırıldıktan sonra, Teflon ile kapatılmış bir otoklava aktarıldı ve 24 saat 200 °C'de tutuldu. Hidrotermal sonrasında malzeme içerisindeki sıvıyı uzaklaştırmak için evapore edildi ve 6500 rpm de yarım saat santrifüj ile toplandı. Etüvde 70 °C'de kurutularak elde edildi (Sert, Gonca, vd., 2021:111867).



**Şekil 3.16.** Hidrotermal Yöntemle Sentezlenen BNKN

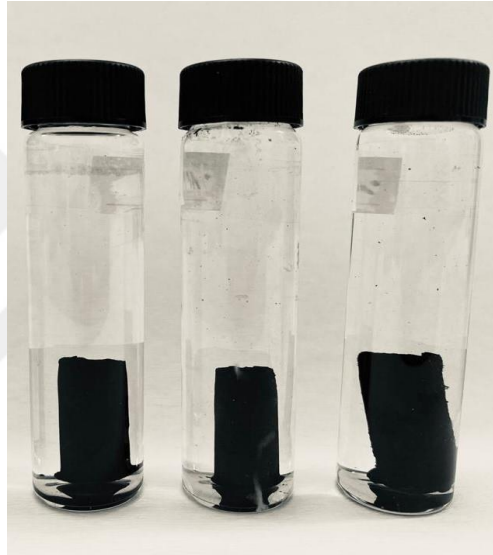
### 3.6. Grafen Oksit Sentezi

Doğal grafit (5 g) ve 150 ml'lik  $H_2SO_4$  heterojen karışımı bir balonda 24 saat karıştırıldı. Daha sonra, 50 ml  $HNO_3$  bir önceki karışma eklenerek tekrar 24 saat karışmaya bırakıldı. Daha sonra, 400 ml saf su yavaşça elde edilen karışıma eklenerek 1 saat boyunca karışmaya devam edildi. Elde edilen heterojen karışımdan grafit tabakaları uzaklaştırmak için karışım santrifüj edilerek sonrasında saf su ile birçok kez yıkandı. Yıkama işlemi ile asit ortamdan uzaklaştırıldıktan sonra, grafit tabakaları  $60\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 24 saat vakumlu etüv içerisinde kurumaya bırakıldı. Elde edilecek indirgenmiş grafen yapılarının verimini arttırmak için kurutulan grafit tabakaları  $1050\text{ }^\circ\text{C}$ 'de bir kül fırınında 10 saniye bekletilmiştir. 1 g yeni ince grafit tabakası ile tekrar 200 mL  $H_2SO_4$  gece boyunca karışmaya bırakıldı. Sonrasında, karışıma 10g  $KMnO_4$  eklenerek karışımın olduğu cam balon soğuksu banyosuna taşındı. Karışımın dönme hızı maksimum seviyeye çıkartılarak, karışım içerisine ilk olarak 400 mL saf su sonrasında ise 50 mL  $H_2O_2$  yavaş yavaş eklenerek karışıma ilave edildi. Süspansiyonun rengi açık kahverengi olana kadar çözelti karıştırılmaya devam edildi. Son aşamada indirgenen grafen tabakaları saf su ile hazırlana HCl çözeltisi (9: 1 su: hacimce HCl) ile yıkandı ve yeni ürün defalarca tekrar saf su ile yıkanarak tüm asidik ortamdan uzaklaşması

sağlandı. Santrifüj yöntemi ile çözelti ortamından uzaklaştırılan GO tabakaları vakum ortamında kurumaya bırakıldı (H. Yu vd., 2016:6).

### 3.6.1. g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>@rGOH Nanokompozit Yapısından Hidrojel Hazırlanması

İlk olarak GO (0.030 g) distile su (15 mL) içinde, çok iyi dağılına kadar ultrasonikasyon altında yaklaşık 1 saat boyunca çözündürüldü. Daha sonra, ayrı bir yerde farklı miktarlarda (0.030g / 0.060g / 0.015g) protonlanmış g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 10 ml distile su içerisinde karıştırılarak GO süspansiyonuna eklendi. Sonrasında askorbik asit (0.060 g) eklenerek karışım 1 saat daha ultrasonikasyonda bekletilerek, sonucunda otoklavda 180 °C’de 24 saat ısıtılması ile hidrojeller Şekil 3.17’de görüldüğü gibi elde edildi.



Şekil 3.17. g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>@rGO Hidrojeller

### 3.6.2. BNKN@rGOH Nanokompozit Yapısından Hidrojel Hazırlanması

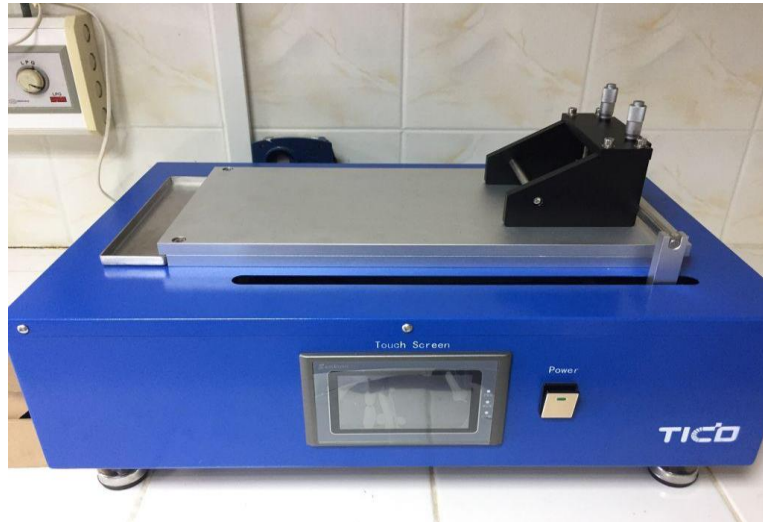
Hidrojel elde etmek için; ilk olarak GO (0.030 g) distile su (15 mL) içinde hazırlandı, daha sonra iyi dağılmış GO solüsyonuna farklı miktarlarda (0.030 g / 0.060 g / 0.015 g) BNKN 10 ml distile su içerisinde 1 saat boyunca karıştırılarak ultrasonikasyon altında GO solüsyonuna eklendi. Sonrasında askorbik asit (0.060 g) eklenerek karışım 1 saat daha ultrasonikasyonda bekletilerek, sonucunda otoklavda 180 °C’de 24 saat ısıtılması ile hidrojeller Şekil 3.18’de görüldüğü gibi elde edildi.



Şekil 3.18. BNKN@rGO Hidrojeller

### 3.7. Saf Polietersülfon (PES) Membranların Hazırlanması

Polietersülfon (PES) membranlar faz inversiyon yöntemi ile sentezlenmiştir. PES boncukları kullanılmadan önce 2 saat boyunca etüvde 70 °C'de kurutulmuştur. Kurutulan PES boncuklar N-metil pirolidon (NMP) çözücüsü içerisine eklenerek çözünmesi için 60 °C'de bir gece boyunca karıştırılmıştır. Döküm için hazır hale gelen çözelti 5 dakika boyunca hava kabarcıklarını gidermek için ultrasonik banyo içerisinde bekletilmiştir. Çözeltinin döküm işlemi yapıldığı cam plakada, sentezlenen membranlar üzerinde kalan çözücünün uzaklaştırılabilmesi için distile su içeren pıhtılaştırma banyosuna konulmuştur. Cam plakadan ayrılan membranlar distile su içerisinde bir kaba alınarak deney için hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.19. Membran Döküm Ünitesi

### 3.8. Kompozit Membranların Hazırlanması

Sentezlenen PES boncuklar kurutulduktan sonra, NMP çözücüsü ile beraber karışım yüzdeleri % 0.5, % 0.1 %1 ve % 2 olacak şekilde ayrı ayrı BNKN ve g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> eklenerek katkılanmış ve homojen hale getirilmesi için 60 °C'de bir gece boyunca karıştırılmıştır. Membran dökümü öncesi ultrasonik banyoda hava kabarcıklarını gidermek için 5 dakika boyunca tutulmuştur. Cam plakadan membran ayrıldıktan sonra deneyi yapmak üzere, tekrar distile su dolu kapta Şekil 3.20'deki gibi bekletilmiştir.



Şekil 3.20. Katkılanmış Membranların Görüntüsü

#### 3.8.1 Kompozit Membranların Saf Su Akılarının Değerlendirilmesi ve Kirlenme Çalışmaları

BNKN/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> içeren membranların yüzey temizleme özellikleri incelenmiştir. Öncelikle % 0.5, % 1, % 0.1 ve % 2'lik uygun membranların seçilmesi için normal akışlı (dead-end) filtrasyon sisteminde membranların akı değerleri ölçülmüştür. Şekil 3.21'de gösterilen bu sistem; akı dediğimiz; membran içerisinden birim zamanda geçen sıvı miktarını görmek için uyguladığımız filtrasyon sistemidir. Membranların gözeneklerinin tam açılması için yapılan sıkıştırma işleminde, membran dead end filtrasyon sistemine yerleştirilmiş ve sisteme yüksek barda (minimum 15 dakika/5 bar) azot gazı verilmiştir.



**Şekil 3.21.** Normal Akışlı Membran Sistemi

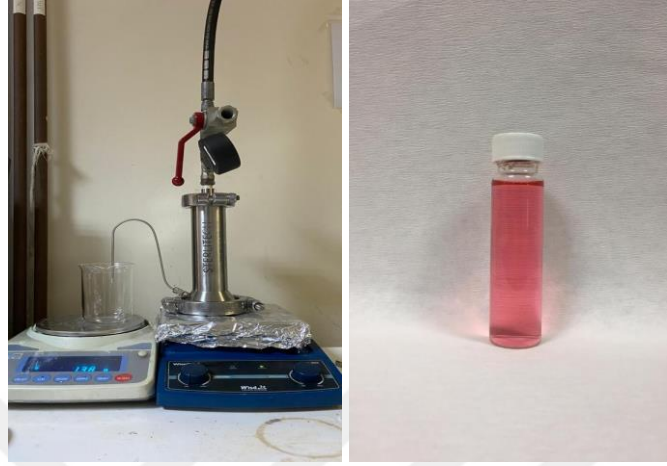
Daha sonra belirlenen; 1, 2, 3, 4, 5 bar basınçlarına kadar her 60 saniyede 1, toplamda 5 dakika, kademeli bir şekilde yeniden azot gazı verilerek Tablo 3.1’de gösterildiği gibi çıkan sonuçlar bir excel dosyasında toparlanmış ve akı değerlerine göre uygun membranlar seçilmiştir. Sonuç olarak kompozit membranların performansı diğer saf membranlara kıyasla dead end filtrasyon sistemi ile belirlenmiştir.

**Tablo 3.1.** Katkılı Membranların Saf Su Akı Değerleri

t	Saf Membran (1 bar)	Saf Su Akı Değeri	t	Saf Membran (2 bar)	Saf Su Akı Değeri	t	Saf Membran (3 bar)	Saf Su Akı Değeri	t	Saf Membran (4 bar)	Saf Su Akı Değeri	t	Saf Membran (5 bar)	Saf Su Akı Değeri
<b>1 Nolu Membran</b>														
0	1,5		0	136,55		0	13,49		0	3,28		0	188,88	
1	24,96	964,10	1	154,19	724,93	1	38,48	1026,98	1	33,4	1237,80	1	226,52	1546,84
2	47,05	907,80	2	184	1225,06	2	73,82	1452,32	2	63,97	1256,30	2	260,6	1400,54
3	68,72	890,54	3	211,89	1146,16	3	123,58	3033,69	3	94,22	1243,15	3	290,11	1212,73
4	88,8	825,20	4	240,6	1179,86	4	141,22	5803,56	4	124,17	1230,82	4	320,36	11922,32
5	108,09	792,73	5	257,54	696,164	5	172,12	1269,86	5	153,81	1218,08	5	350,85	1752,31
<b>2 Nolu Membran</b>														
0	0,44		0	76,57		0	171,48		0	3,79		0	130,21	
1	12,38	490,68	1	96,01	798,90	1	195,22	975,61	1	30,11	1081,64	1	155,32	5351,09
2	24,05	479,58	2	115,14	786,16	2	217,87	930,82	2	55,66	1050	2	189,04	7768,76
3	35,62	475,47	3	133,97	773,83	3	241,43	968,21	3	81,47	1060,68	3	219,22	1240,27
4	47,09	471,36	4	153,06	784,52	4	264,94	966,16	4	106,08	1011,36	4	247,71	1170,82
5	58,88	484,52	5	171,48	756,98	5	285,43	842,05	5	130,21	991,64	5	275,45	1140
* t = zaman (dk)														

Membranların deney sırasında zamanla akılarının düştüğü gözlemlenmiştir. Bunun nedeni de membran yüzey ve gözeneklerinde gerçekleşen kirliliktir. Bu çalışmada, membranlardan 60 dk saf su geçirilip, sonra kirlenici madde olarak yine 60

dk süreyle 100 ppm derişimindeki sığır serum albümini (BSA) ve Reaktif Red 180 (RR180) gibi boya içeren sentetik atık su geçirilmiştir. Buradaki amaç, katkı ve saf membranların hem RR180 ve BSA çözeltilerinin giderim verimlerini hem de kirlilik üzerine olan etkileri gözlemlenmiştir.



**Şekil 3.22.** Membran Filtrasyon Sisteminde Kullanılan Filtrasyon Sistemi Ve Reaktif Red (RR180) Boyası

Boyadan geçirilen membranların kirlenme akılarına bakmak için fiziksel temizleme yapılmış ve tekrar saf su geçirilerek akı dataları toplanmıştır. Akı değerleri hesaplanmış, akı geri kazanım oranları belirlenmiş ve böylece membranların kirlenmeye karşı direnç performansları incelenmiştir. Membrandan boya geçirilmesindeki amaç, hem tıkanma problemine karşı , sentezlenen BNKN ve g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> katkıli membranların katkısız (saf) polietersülfon membrana göre gösterdiği farklılıkların belirlenmesi hem de boya giderim verimleri üzerine olan etkilerinin incelenmesidir.



**Şekil 3.23.** Boyadan (RR180) Geçirilen Membranın Görüntüsü

# BÖLÜM 4

## BULGULAR

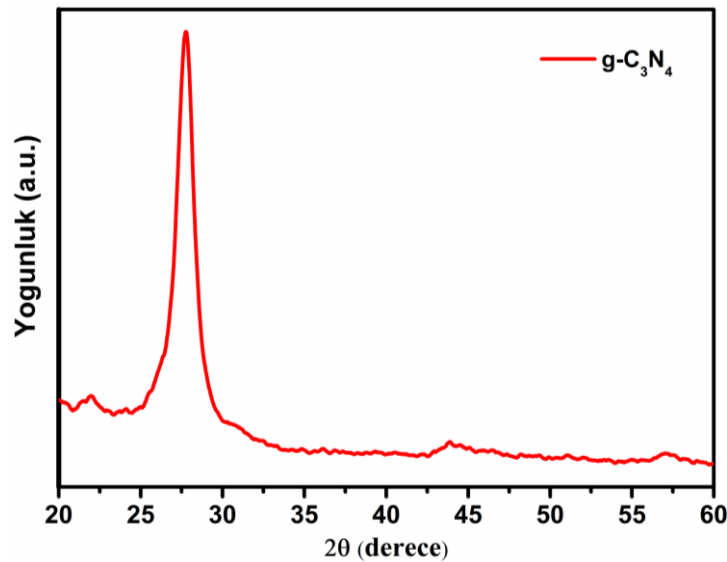
Tez çalışmasının bu bölümünde öncelikle sentezlenen nanokompozit malzemelerin, farklı karakterizasyon teknikleri ile doğrulanması ve yorumlanmasına yer verilmiştir.

### 4.1. Kompozit Nanomalzemelerin Karakterizasyonu

#### 4.1.1. Grafitik Karbon Nitrür ( $g-C_3N_4$ ) ve Katkılı $g-C_3N_4$ Membranların Karakterizasyonu

Nitrik asitle muamele edilmiş ürenin  $580\text{ }^\circ\text{C}$ 'de sentezlenerek elde edilmesiyle oluşan  $g-C_3N_4$ 'ün kristal yapısı, toz XRD analizi kullanılarak incelendi. Şekil 4.1'de, sentezlenen  $g-C_3N_4$  nano tabakalarının XRD modellerini göstermektedir.

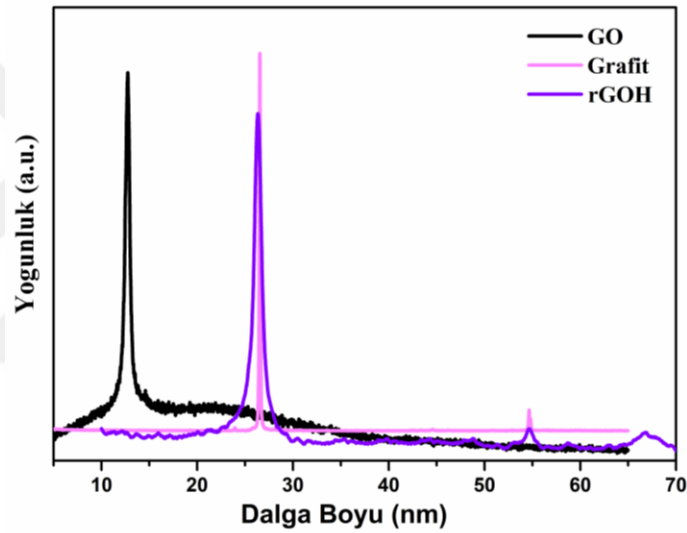
XRD sonuçlarına göre çıkan  $27,5\text{ }^\circ$ 'de karakteristik güçlü bir pik ve  $22\text{ }^\circ$ 'de zayıf bir pik gözlemlenmiştir. Bu güçlü çıkan tepe noktası,  $g-C_3N_4$  düzlemine benzer şekilde  $d = 0.342\text{ nm}$ 'lik bir ara katman mesafesine karşılık gelir. Belirtilen güçlü tepe noktası, önceki çalışmalarda bildirilen XRD modellerine çok benzer şekilde  $g-C_3N_4$ 'ün öngörülen kırınımıyla eşleşmektedir (Shcherban vd., 2018:2928). Tüm bu pikler, düşük kristallik derecesine sahip bir malzemeye karşılık gelmektedir.



Şekil 4.1.  $g-C_3N_4$ 'ün XRD Görüntüsü

GO, rGOH, grafitin ve g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>@rGOH örneklerinin kristal yapısal özelliklerini ve katmanlar arası mesafesi, CuK $\alpha$   $\lambda$  radyasyonlu ( $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$ ) bir Rigaku Smartlab modeli kullanılarak XRD tekniği ile belirlendi.

İlk olarak GO ve grafit katmanlar arası mesafeleri, toz XRD desenleri kullanılarak doğrulandı. Grafitin 2 $\theta$  piki 10,52 °C'de elde edilmiştir. Bu durum grafitin 8.5 Å (0.85 nm) ara katman mesafesi ile GO'ya tamamen oksitlendiğini gösterir. Grafit deseni, 2 $\theta = 26.5^\circ$  (002) merkezli dar bir tepe noktası olarak ortaya çıkarken ve katmanlar arası mesafe 3.33 Å (33,3 nm) olarak Scherrer denklemi kullanılarak hesaplanmıştır (Şekil 4.2).

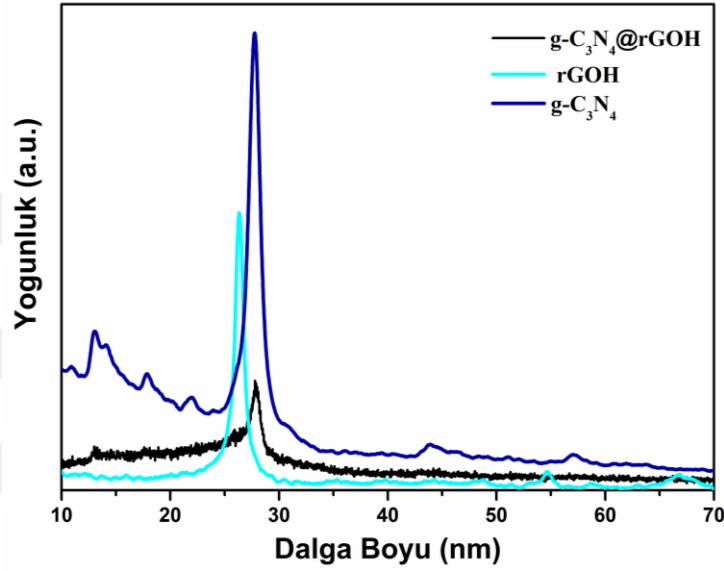


**Şekil 4.2.** Grafiten Oksit, Grafit ve rGOH'ın XRD Spektrumları

İlk olarak GO, grafit ve g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/rGOH kompozit yapısı için alınan XRD analizinde rGOH, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>@rGOH kompozitlerinin XRD grafikleri Şekil 4.18'de gösterildiği gibi elde edilmiştir. rGOH'nin XRD spektrumuna bakıldığında 2 teta (2 $\theta$ ) açısı  $\approx 24$  derece elde edilmiş ve rGOH yapıları arasındaki mesafenin ise 3.60 Å olduğu Scherrer denklemi kullanılarak hesaplanmıştır. Böylece, GO katmanları arasındaki oksijen içeren fonksiyonel grupların azaltılması hakkında başarılı bir şekilde hareket edildiği tespit edilebilmiştir. g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> numuneleri için de, tipik katmanlar arası 27.5 ° ( $d = 3.27 \text{ \AA}$ )'de bulunduğu görülmüştür.

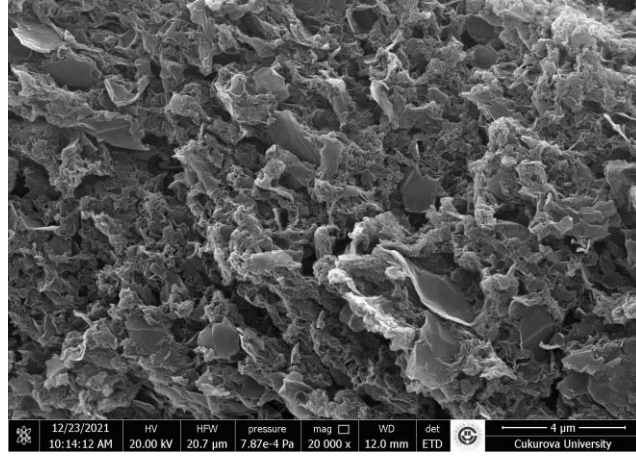
$$\tau = \frac{0.9 \times \lambda}{d \cos\theta} \quad (3)$$

Şekil 4.3'de görüldüğü gibi g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, rGOH ve g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>@rGOH'nun XRD modeli için, tüm XRD tepe noktaları, malzemenin bir hibrit yapıda olduğunu göstermektedir. Böylece, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>'ün rGOH'a başarıyla eklendiği görülmektedir.



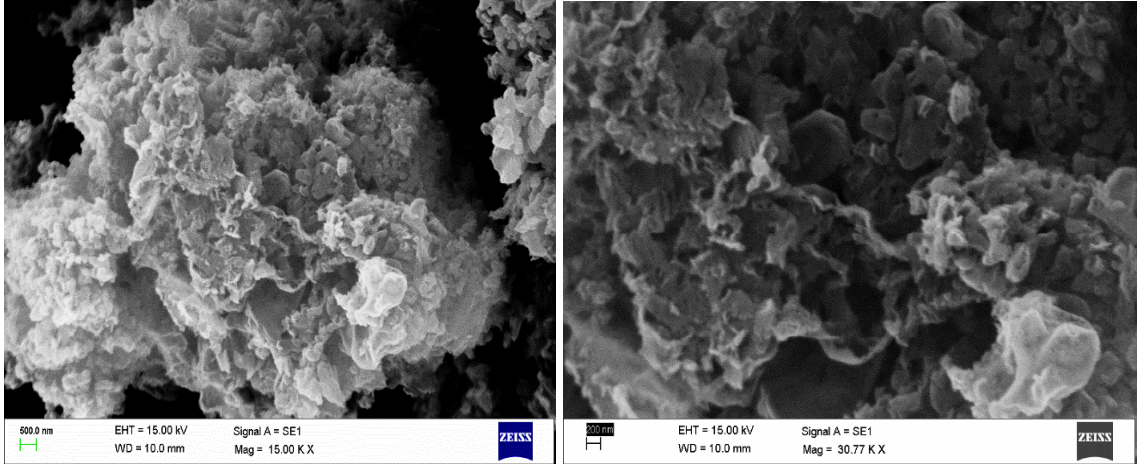
Şekil 4.3. g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>@rGOH XRD Spektrumları

Hidrotermal yöntemle elde edilen g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>@rGOH'ın yüzey morfolojisine ait görüntü Şekil 4.4'de gösterildiği gibidir. g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>'ün şekilde görüldüğü gibi yığılmış yapılar ile birlikte düzensiz bir yapı göstermesinin yanında, rGOH nano tabakaları da oldukça gözenekli üç boyutlu (3D) bir mikro yapı oluşturmak için birbirleriyle örtüşmüştür.



**Şekil 4.4.** g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>@rGOH SEM Görüntüsü

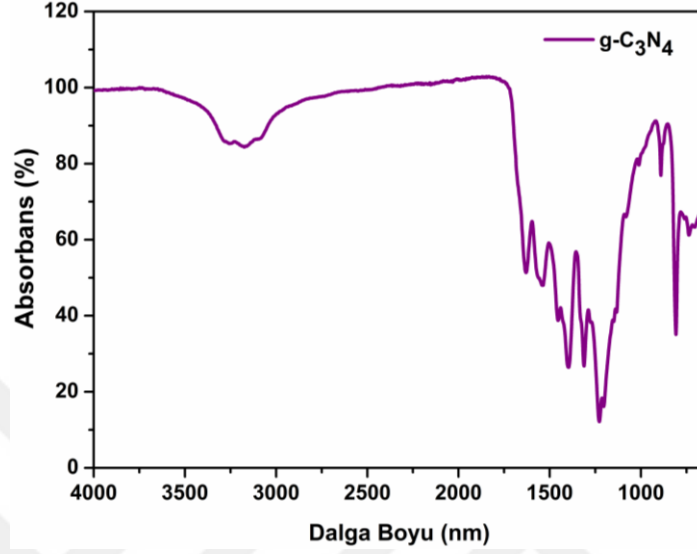
Şekil 4.5'de g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>'ün yüzey morfolojisine ait SEM görüntüleri gösterilmektedir. Doğrudan ısıtılan üre ve asit muamelesi ile sentezlenen bu nano yapı, tipik katmanlı ve şekilde görüldüğü gibi yığılmış yapılar ile birlikte düzensiz bir yapı göstermiştir. g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>'ün çoklu tabakasının kalınlığı, SEM görüntüsünden 50 ile 200 nm arasında belirlenmiştir. Ayrıca, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> yapısının çok katmanlı pürüzlülüğünün, üst üste binen katmanlarının düzensiz ve çıkıntılı sınırlarından kaynaklandığını SEM görüntüsünden kolaylıkla görülebilir.



**Şekil 4.5.** g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>'ün SEM Görüntüleri

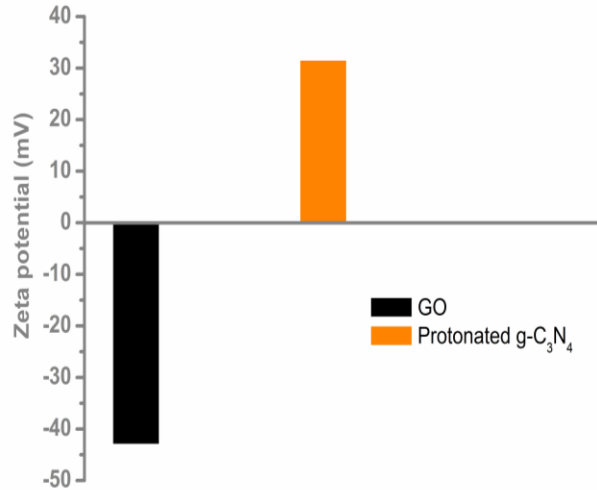
g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>'ün FTIR analizine göre (Şekil 4.6), 1002-1010 cm<sup>-1</sup>'deki çıkan tepe noktası triazin birimlerine atfedilebilir ve 1568 ve 1650 cm<sup>-1</sup>'deki tepe noktaları C = N gerilmesi ile ilgili olabilmektedir (J. Liu vd., 2011:14398). Ayrıca 1241,1319 ve 1409

$\text{cm}^{-1}$ 'deki pikler aromatik C-N gerilmesine denk gelmektedir. Dahası  $3100 \text{ cm}^{-1}$ 'deki nispeten geniş tepe noktası, aromatik halkanın kusur bölgelerinde adsorbe edilen  $\text{H}_2\text{O}$  molekülleri ve terminal  $\text{NH}_2$  veya  $\text{NH}$  grupları ile ilgili olabilmektedir (G. Li vd., 2009:14829).



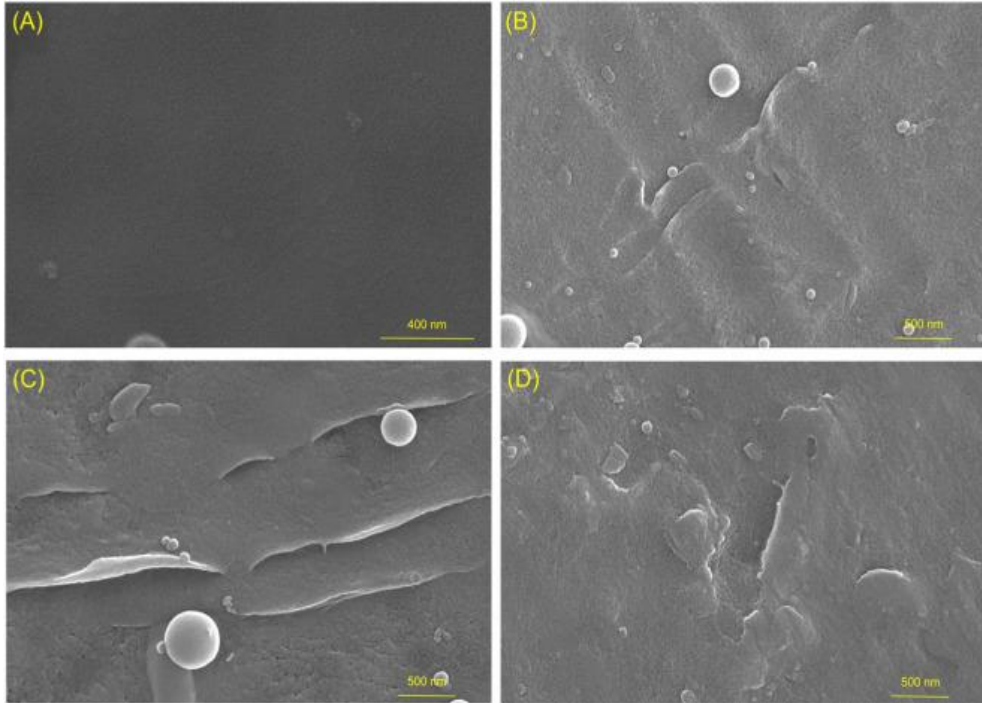
Şekil 4.6.  $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 'ün FTIR Görüntüsü

Zıt kutuplar arasındaki güçlü elektrostatik etkileşim nedeniyle yüklü numunelerin, zeta potansiyeli ölçümleri, hibrit rGO hidrojel yapmak için  $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 'ün (+31.6 mV) grafen oksit katmanlarına (-43 mV) karıştırılmasının görüntülenen temel adımında kullanıldı (Şekil 4.4)

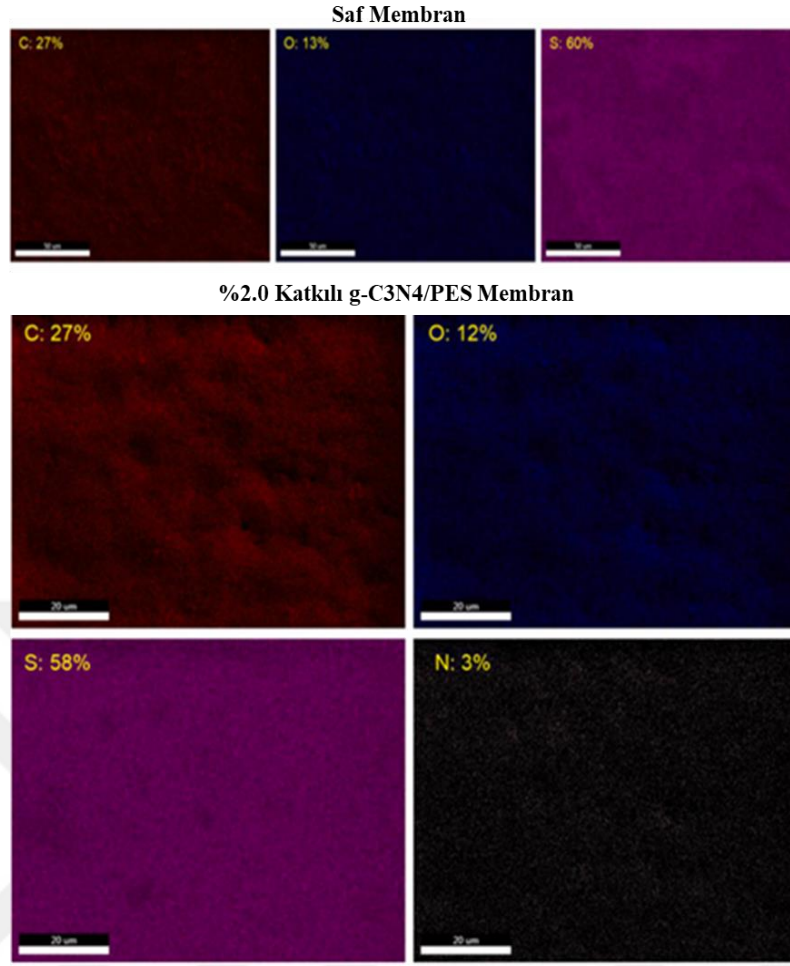


Şekil 4.7.  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  ve rGOH Zeta Potansiyel Grafığı

$g-C_3N_4$  katkılanmış membranların karakterizasyonu için alınan SEM görüntüleri ve elemental analizler Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'de görüldüğü gibi modifiye edilmiştir. Belirtilen şekillerde, bozulmamış yani saf PES membran neredeyse pürüzsüz bir yüzey göstermektedir (Şekil 4.8(A)). Bununla birlikte, katkılı membranların SEM görüntülerinden (Şekil 4.8 (B-C-D)) anlaşıldığı gibi,  $g-C_3N_4$  nano tabakalarının belirli bir yönelimde oluştuğunu ve çok düzenli bir oluşum içerisine girdiğini, PES membranlarının tüm yüzeyini kaplandığı da SEM görüntülerinde açıkça görülebilmektedir. PES membranlarının yüzey pürüzlülüğünün,  $g-C_3N_4$ 'ün miktarı ile orantılı olarak arttığını da görebilmekteyiz.  $g-C_3N_4$  nano tabakalarının varlığı ve PES membranlarının elemental analizleri, EDX yöntemi kullanılarak da karakterize edilmiştir. İspatı da, PES membranın içeriğinde sadece karbon (C), oksijen (O) ve kükürt (S) elementleri bulunurken,  $g-C_3N_4$  katkılı olan membran yüzeyinde de (Şekil 4.9.), nitrojen (N) bulunması,  $g-C_3N_4$ 'ün PES membrana başarılı bir şekilde karıştırıldığını göstermektedir (Sert, Ozay, vd., 2021:126571).



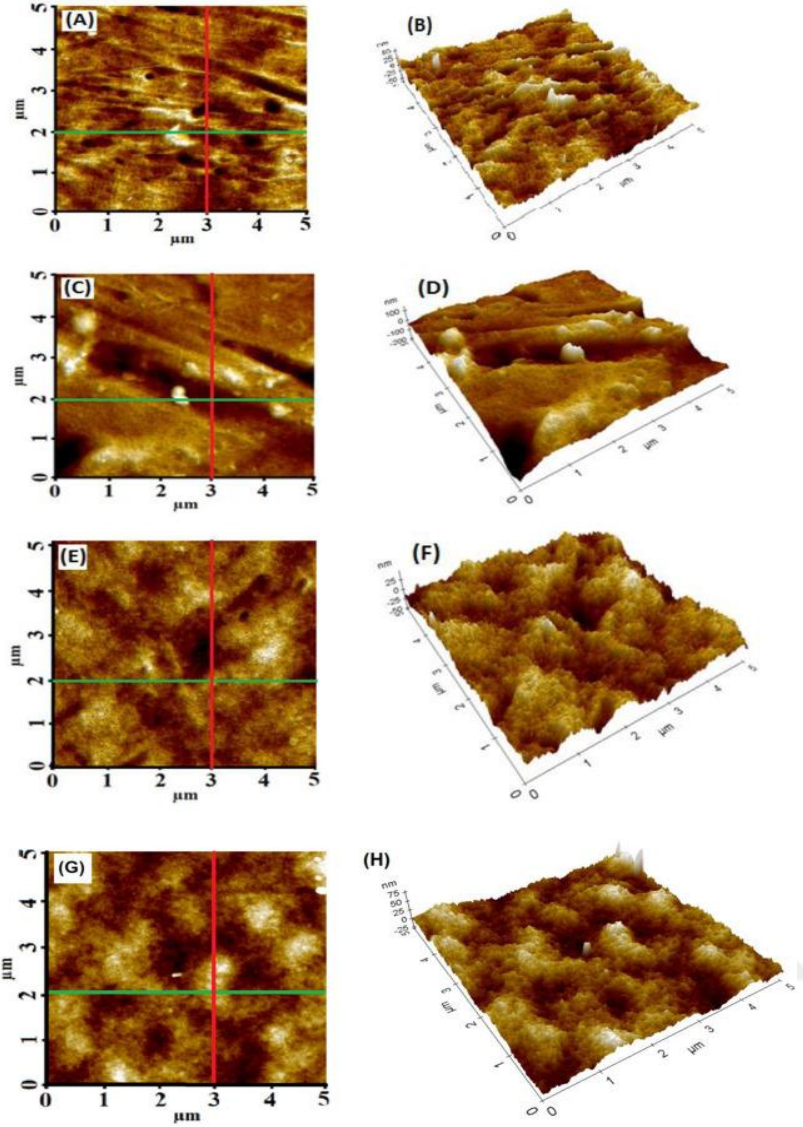
**Şekil 4.8.** (A) Saf PES Membranın SEM Analizi, (B) Ağırlıkça % 0.5  $g-C_3N_4$ /PES, (C) Ağırlıkça % 1.0  $g-C_3N_4$ /PES, (D) Ağırlıkça % 2.0  $g-C_3N_4$ /PES SEM Analizleri



**Şekil 4.9.** Saf PES Membranın Ve Ağırlıkça % 2.0 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Katkılı PES Membranının EDX Görüntüleri

AFM, yüzey pürüzlülüğünü karakterize etmek için farklı miktarlarda (% 0.5, % 1.0, % 2.0) g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ile katkılanmış membranların analizi için kullanılmıştır. Farklı oranlardaki katkılı membranların ve saf membranın gözeneklilik ölçümleri için alınan AFM görüntüleri ve temas açısı ölçümleri belirli bir standart sapmada hesaplanarak bulunmuştur (Tablo 4.1).

Yüzey pürüzlülüğü (Ra) analizlerinin ortalaması, verilen alan içindeki tüm yükseklik değerlerinin standart sapması olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 4.10.** g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Katkılı Membranların İki Ve Üç Boyutlu AFM Görüntüleri. (A,B) Ağırlıkça % 0.5 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Katkılı Membran Ve Üç Boyutlu AFM Görüntüleri, (C, D) Ağırlıkça % 1.0 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Katkılı Membran Ve Üç -Boyutlu AFM Görüntüleri, (E, F) Ağırlıkça % 2.0 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Katkılı Membran Ve Üç Boyutlu AFM Görüntüleri, (G, H) Saf PES Membranı Ve Üç Boyutlu AFM Görüntüleri

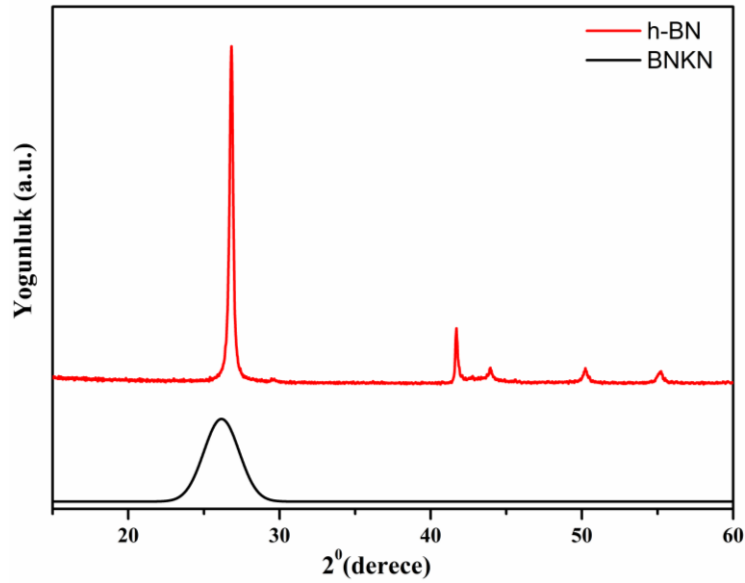
Sonuç olarak, katkıli membranların gözenekliliği, bozulmamış PES membranından daha yüksek görülmüştür. g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nano tabakalarındaki karbon ve oksijen grupları, faz inversiyon işlemi sırasında kompozit membranların yapısını etkileyen termodinamik ve kinetik parametreleri etkilemiş olabilmektedir. Bu nedenle, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nano tabakalarının eklenmesinden sonra daha büyük gözenek boyutlarının elde edildiği tespit edilmiştir.

**Tablo 4.1.** Kompozit Membranların Ra Değerleri

Membran	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)	Pürüzlülük Ortalaması (Ra)
2.0 % g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /PES	17.6	12.3
1.0 % g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /PES	16.3	10.2
0.5 % g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /PES	15.1	8.5
Saf PES membran	5.9	4.8

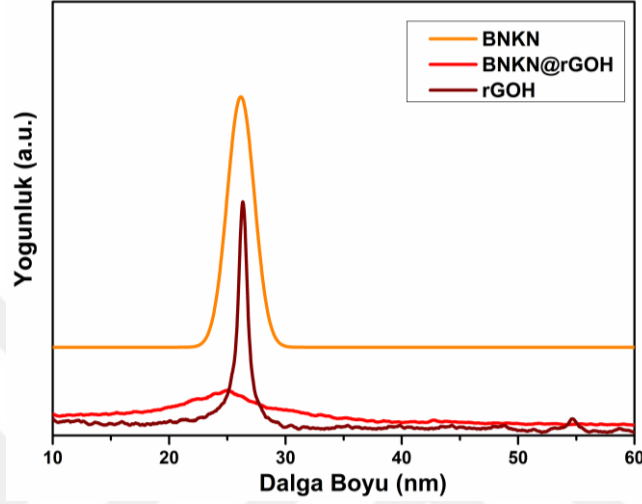
#### 4.1.2. Bor Nitür Kuantum Noktalar (BNKN) ve BNKN ile Katkılanmış Membranların Karakterizasyonu

BNKN'lerin kristal yapısı X-ışını toz kırınımı ölçümleri ile sistematik olarak araştırılmıştır. Şekil 4.11'de gösterildiği gibi, 27.5 °daki ana pik, hegzagonal bor nitürün yüzeyine karşılık gelirken hidrotermal ile tek adımda sentezlenen BNKN deki yoğunluk ise keskin bir şekilde azalır, bu da BNKN'lerin yüksek oranda pul pul dökülmüş yapısının kanıtı olarak söylenmektedir.



**Şekil 4.11.** h-BN ve BNKN XRD Şeması

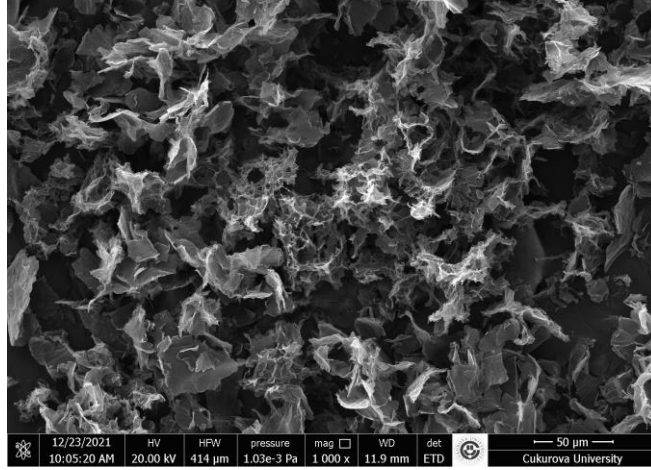
GO, rGOH, grafitin ve BNKN@rGOH örneklerinin kristal yapısal özelliklerini ve katmanlar arası mesafesi,  $\text{CuK}\alpha$   $\lambda$  radyasyonlu ( $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$ ) bir Rigaku Smartlab modeli kullanılarak XRD tekniği ile belirlendi. Şekil 4.12'de görüldüğü gibi BNKN@rGOH kompozit yapısının XRD analizinde görünen bariz tepe noktalarından  $30.35^\circ$  ve  $24.80^\circ$  'de gelen tepe noktaları sırasıyla GO ve BNKN'lerin başarılı bir şekilde oluştuğunu göstermektedir.



Şekil 4.12. BNKN@rGOH XRD Spektrumları

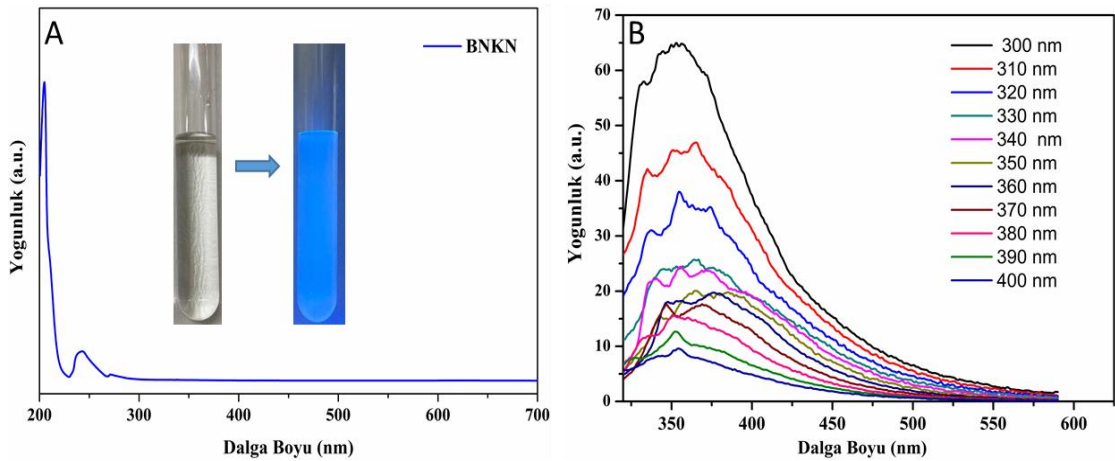
Grafitin yansıma piki, ara katman aralıklarında oksijen fonksiyonel gruplarının araya girmesi nedeniyle GO'da  $12.2^\circ$ 'ye kaymıştır. rGOH, BNKN@rGOH kompozitinin oluşumu sırasında azalır ve rGOH zirvesi neredeyse BNKN ile aynı konumdadır (yaklaşık  $2\theta = 23.5^\circ - 26.34^\circ$ ). Bu nedenle, BNKN@rGOH kompozitleri için ( $2\theta = 24^\circ - 27^\circ$ ) aralığında geniş bir bant görünümünden dolayı pikleri belirlemek çok zordur. Ayrıca, parçacık boyutundaki azalma ve rGOH tabakalarının varlığında nano boyutlu alan oluşumu, pik genişlemesinin ana nedenleridir.

BNKN@rGOH hibrit yapısının SEM görüntüsü Şekil 4.13'de gösterildiği gibi hidrotermal yöntemle elde edilmiştir. Borun düzensiz morfolojisi, aglomerasyonu ve değişen boyutları görülmektedir. Ayrıca BNKN@rGOH nano tabakaları oldukça gözenekli üç boyutlu (3D) bir mikro yapı oluşturmak için birbirleriyle örtüşmüştür.



Şekil 4.13. BNKN@rGOH SEM Görüntüsü

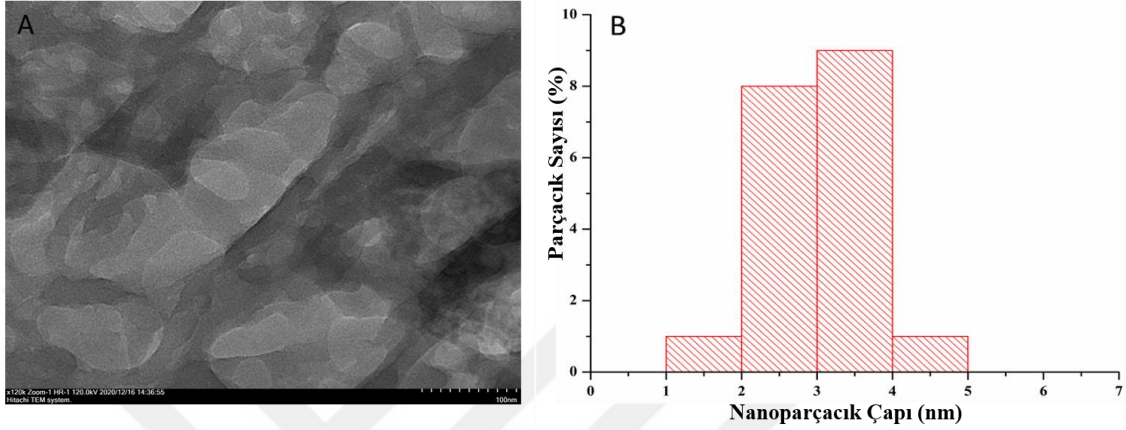
UV-Vis ve PL emisyon spektrumu, BNKN'lerin optik özelliklerini incelemek için kullanılan karakterizasyon yöntemlerindedir. Şekil 4.14 (A)'da gösterildiği gibi, BNKN'ler 205 nm'de tipik bir UV-Vis absorpsiyon zirvesi sergilemektedir. Şekil 4.14 (A)'daki UV-Vis grafiğın içerisindeki ek görüntülerde de görüldüğü gibi, hazırlanan kuantum noktaların, dağılımının 365 nm UV ışığın aydınlatması altında mavi bir floresan ışık gösterdiğini görebilmekteyiz. Farklı uyarma dalga boylarındaki PL uyarma ve emisyon spektrumları ise Şekil 4.14 (B)'de gösterilmektedir. BNKN'lerin PL spektrumları, 300 nm ile 400 nm arasındaki farklı uyarma dalga boylarında elde edilmiştir. Maksimum floresan emisyonu, 360 nm uyarma dalga boyunda kaydedilmiştir.



Şekil 4.14. BNKN'lerin (A) UV ve (B) PL Emisyon Grafikleri

BNKN'lerin morfolojisi ile ilgili ayrıntıları tespit etmek için TEM analizi yapılmıştır. Tek adımda otoklavda sentezlenen BNKN'lerin boyut dağılımı TEM

yoluyla elde edilmiştir. Şekil 4.15 (A)'de gösterilen TEM görüntüsü literatürdeki çalışmalara benzer sonuçlar vermektedir (B. Liu vd., 2016:18899). BNKN'lerin parçacık boyutu dağılımı ise, Şekil 4.15 (B)'deki histogramda da gösterilmektedir. Bu histograma göre, BNKN'ler 3– 4 nm aralığında küresel parçacıklar olarak ortaya çıkmıştır.

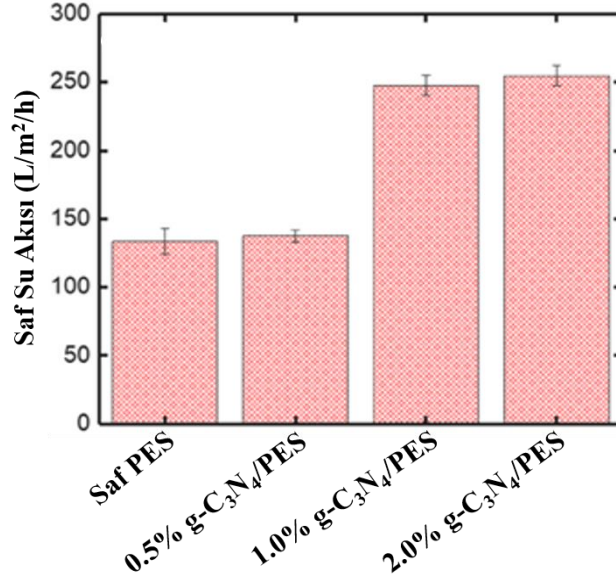


Şekil 4.15. (A) BNKN'lerin TEM Görüntüsü, (B) BNKN'nin Partikül Boyut Dağılımı

#### 4.1.3. g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve BNKN Katkılı PES Membranların Performansı

##### 4.1.3.1. g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Katkılı ve Saf Membranların Saf Su Akıları

Hazırlanan kompozit membranlardan akı performansı Şekil 4.14'de gösterilmektedir. Şekil 4.16'de de görülebileceği gibi, saf PES membranların akı değeri kompozit membranlara göre oldukça düşüktür. g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> oranının artışına göre yükselen akı değerlerinde ağırlıkça % 2.0 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/PES kompoziti en yüksek değere sahiptir. Akışta  $133.5 \pm 9.5$  L/m<sup>2</sup>/saat'ten (saf membran için)  $254.8 \pm 7.3$  L/m<sup>2</sup>/saate (ağırlıkça % 2.0 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/PES membran için) artış, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>'ün hidrofilitesi olarak açıklanabilmektedir. Ayrıca bu sonuç, hesaplanan temas açısı ile de Tablo 4.2'de görüldüğü gibi eşdeğerlidir. ( $75.42 \pm 0.56$  °den  $67.54 \pm 0.36$  °'ye düştü).



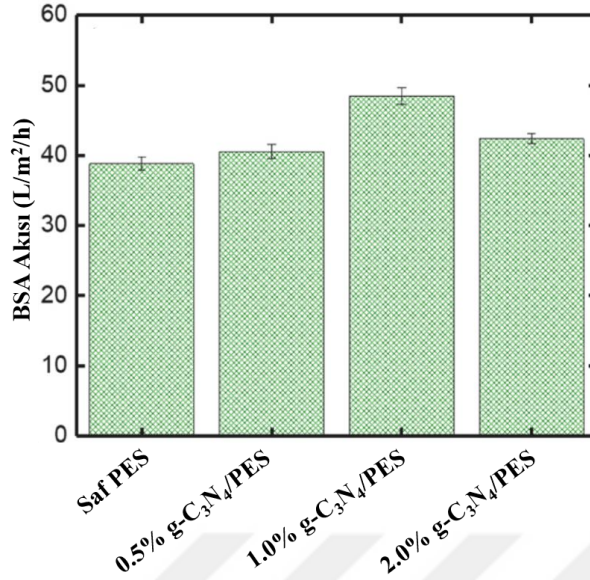
**Şekil 4.16.** Farklı Oranlarda Olan Kompozit g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/PES Membranların Saf Su Akı Grafiği

**Tablo 4.2.** Katkısız ve g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Katkılı PES Membranlarının Gözeneklilik, Ortalama Gözenek Boyutu ve Temas Açısı

Membran	Gözeneklilik	Ortalama Gözenek Boyutu	Temas Açısı
2.0 % g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /PES	81.83 ± 1.15	27.03 ± 0.53	67.54 ± 0.36
1.0 % g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /PES	80.63 ± 1.32	25.83 ± 0.47	70.54 ± 0.60
0.5 % g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /PES	80.46 ± 1.25	18.03 ± 0.52	74.20 ± 0.29
Saf PES membran	56.83 ± 1.17	17.03 ± 0.45	75.42 ± 0.56

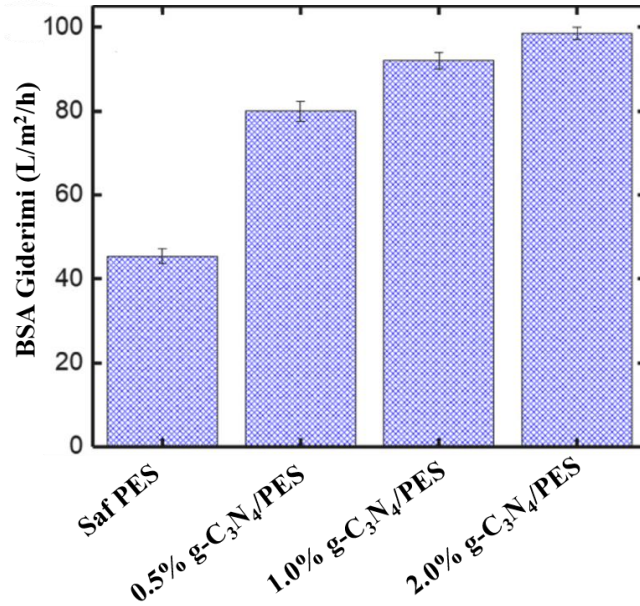
#### 4.1.3.2. g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Katkılı ve Saf Membranların Protein Giderimi ve Akıları

Su veya atık suda bulunan kirleticiler, membran kirlenmesi olayını meydana getirmektedir. Bu çalışmada kirleticilerden 100 ppm derişimindeki BSA proteini ve RR180 gibi boya içeren sentetik atık su kullanılmıştır. g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> katkılanmış membranlar bu proteinden (BSA) belirli sürelerde geçirilmiş ve daha sonra temizlenerek alınan akı değerleri toparlanmıştır.



**Şekil 4.17.** Saf Ve g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Katkılı Membranların Protein Giderimlerinde Akı Değerleri

g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/PES katkıli membranların BSA giderim akıları, % 0.5, % 1,0, % 2.0 oranlarında sırasıyla 38.8 ± 0.9, 40.6 ± 1.0 ve 48.5 ± 1.2 L/m<sup>2</sup>/saat'dir. Bununla birlikte, ağırlıkça %2.0 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/PES membranı en düşük BSA akışını (42.4 ± 0.7 L/m<sup>2</sup>/saat) sağlamıştır ancak yine de saf membrandan daha yüksektir (Şekil 4.18).



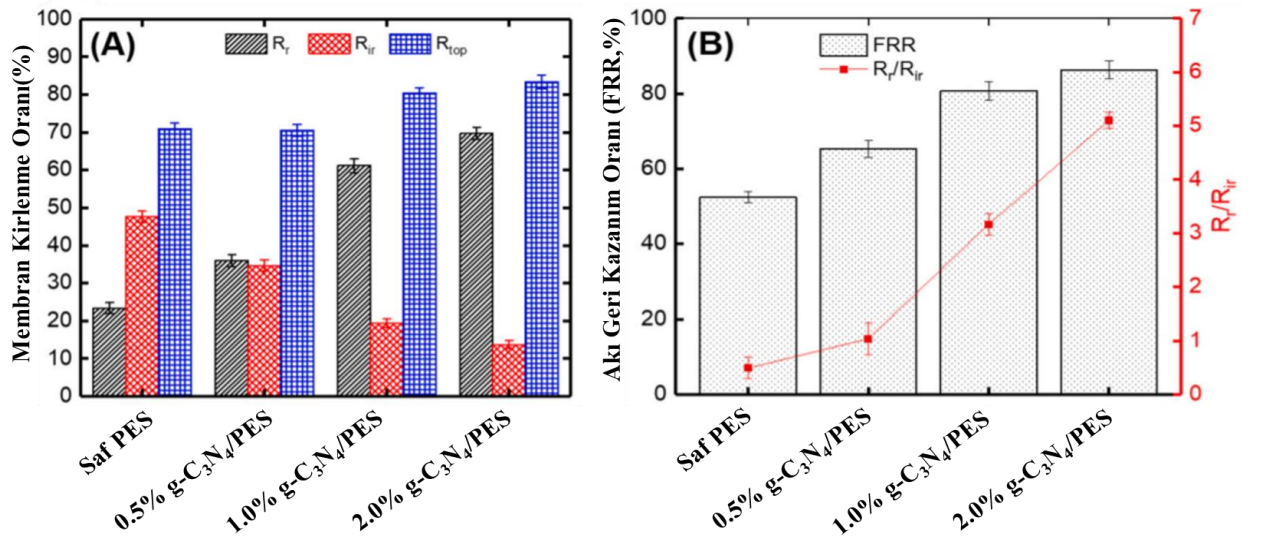
**Şekil 4.18.** Saf ve g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Katkılı Membranların Protein Giderimleri

Membranların BSA giderim kapasitesi de araştırılmıştır. BSA giderim verimlilikleri, katkılanmış g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nanomalzemenin ağırlıkça % 0'dan % 2.0'ye

yükseldiğinde %  $45.5 \pm 1.8$ 'den %  $98.5 \pm 1.5$ 'e yükselmiştir. Böylece kompozit membranların hem daha küçük gözenek boyutu hem de daha yüksek hidrofiliği, BSA gideriminde artışa neden olmuştur. Bu da katkılanmış membranın saf membrana göre proteini tuttuğunu ve o gözeneklerden geçmesine izin vermediğini göstermektedir. Bu çalışmada, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ile katkılanmış membranlar kullanarak, BSA'nın çıkarılması üzerinde olumlu etkileri olduğu sonucuna varabiliriz.

#### 4.1.3.3. g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Katkılı Membranların Boya Performansları

g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> katkılı membranlarda, kirlenme oranları hesaplanarak membranların boya performansı araştırılmıştır. Saf PES membranın toplam kirlenme oranı (R<sub>t</sub>) değeri % 70.9'dur. Ancak kompozit membranların R<sub>t</sub> değerleri (0.5 % g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/PES, % 1.0 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/PES ve % 2.0 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/PES) sırasıyla, % 70.5, % 80.4 ve % 83.3'e yükselir. Sonuçlar, katkılanmış g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> membrandan sonra tersine çevrilebilir kirlenme oranı (R<sub>r</sub>) değerlerinin arttığını ve geri dönüşü olmayan kirlenme oranının (R<sub>ir</sub>) değerlerinin düştüğünü göstermiştir (Şekil 4.19 (A)).



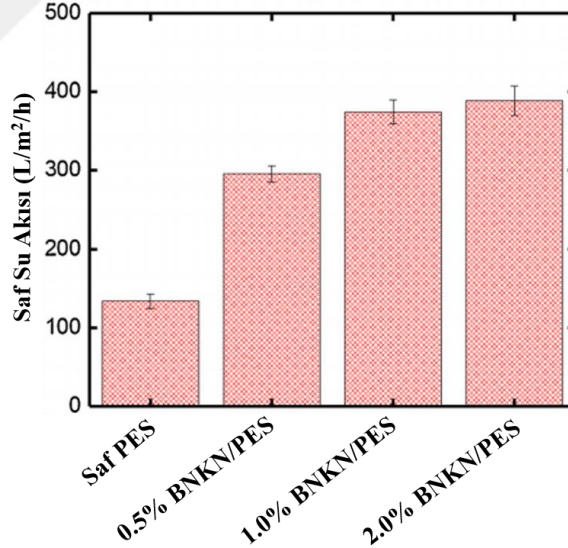
Şekil 4.19. Membranların R<sub>t</sub>, R<sub>r</sub> ve R<sub>ir</sub> Değerleri ve (B) FRR ve R<sub>r</sub>/R<sub>ir</sub> Oranı

Membranların akı geri kazanım oranı (FRR) ve R<sub>r</sub>/R<sub>ir</sub> oranları Şekil 4.19 B'de gösterilmiştir. R<sub>r</sub>/R<sub>ir</sub> oranı, bozulmamış PES membran için 0.49'dan ağırlıkça % 2.0 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/PES membran için 5.10'a yükselmiştir. R<sub>r</sub>/R<sub>ir</sub> oranındaki artış, tersinmez

membran kirlenmesini tersinir zar kirlenmesine dönüştürmeye bağlanabilmektedir. Başka bir deyişle, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nanoyapılarının PES membrana katkılanması, membran gözeneklerinde geri dönüşü olmayan BSA kirlenmesini önlemiştir. Ayrıca, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nano tabakalarının eklenmesinden sonra, FRR değerleri saf membranda %5 2.4 iken, ağırlıkça % 2.0 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/PES membranda % 86.3'e yükselmiştir.

#### 4.1.3.4. BNKN Katkılı ve Saf Membranların Saf Su Akıları

Normal akımlı filtrasyon sistemi kullanılarak hazırlanan kompozit BNKN membranların, saf su akı performans grafiği Şekil 4.15'de görülmektedir. Saf su akısı, BNKN nanomalzemesinin katkılanmasıyla 133.5 ± 9.5 L/m<sup>2</sup>/saat'ten (saf membran için) 388.6 ± 18.8 L/m<sup>2</sup>/saat'e (BNKN/PES ağırlıkça % 2.0 membran için) yükselmiştir. Bu sonuçlar 75.42 ± 0.56 °'den 65.34 ± 0.25 °'e düşen temas açısı ölçümlerini de desteklemektedir. Hesaplanan gözenek boyutu ise, katkısız membrandan (% 0) katkılanmış membrana (% 2.0) göre kıyaslandığında sırasıyla 16.47 ± 0.35 nm'den 19.16 ± 0.22 nm'ye yükselmiştir.



Şekil 4.20. Farklı Oranlarda Katkılanan Kompozit BNKN Membranların Saf Su Akı Grafiği

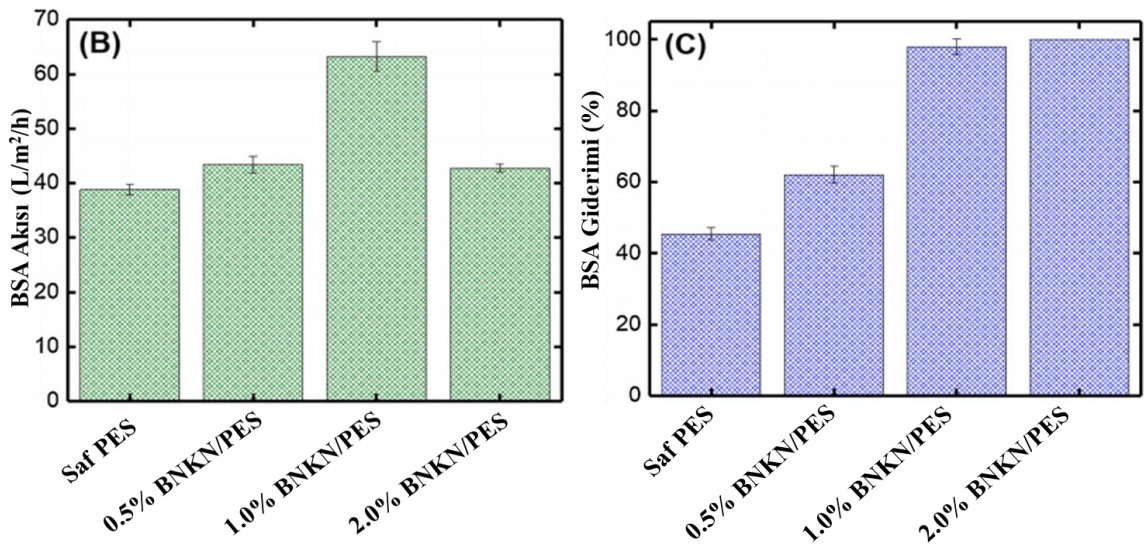
BNKN katkıli nanokompozit membranların gözenekliliği ve hidrofilitliği tabloya göre artarken, ortalama gözenek yarıçapı çok az değişmiştir. BNKN nanomalzemesinin PES membrana katkılanmasıyla, saf membranın hidrofilik özelliğinin arttığı tespit edilmiştir (75.42 ± 0.56 °'den 65.34 ± 0.25 °'ye).

**Tablo 4.3.** Saf ve BNKN katkıli PES membranlarının gözeneklilik boyutu, temas açısı ve ortalama gözenek boyutu.

Membran	Pürüzlülük	Ortalama Pürüzlülük	Temas Açısı
2.0 % PES/BNKN	61.83±1.17	19.16±0.22	65.34±0.25
1.0 % PES/BNKN	60.63±1.02	18.88±0.29	68.14±0.31
0.5 % PES/BNKN	58.46±1.05	17.32±0.24	72.12±0.26
Saf PES	56.83±1.17	16.47±0.35	75.42±0.56

#### 4.1.3.5. BNKN Katkıli ve Saf Membranların Protein Giderimi ve Akıları

Katkılı BNKN membranlarda protein gideriminin (BSA) akısı, ağırlıkça % 1.0 BNKN'ye kadar bir artış eğilimi göstermiştir. BSA akıları; saf PES membran, ağırlıkça % 0.5 BNKN/PES ve ağırlıkça % 1.0 BNKN/PES membranlar için sırasıyla  $38.8 \pm 0.9$ ,  $43.4 \pm 1.6$  ve  $63.2 \pm 2.7$  L/m<sup>2</sup>/saat'dir. Bununla birlikte, ağırlıkça % 2.0 olan BNKN/PES membran, daha düşük BSA akısını ( $42.7 \pm 0.7$  L/m<sup>2</sup>/saat) arttırmıştır. Bu sonuç, saf membrandan değerlerin daha yüksek olduğunu ispatlamıştır (Şekil 4.21. (B)).

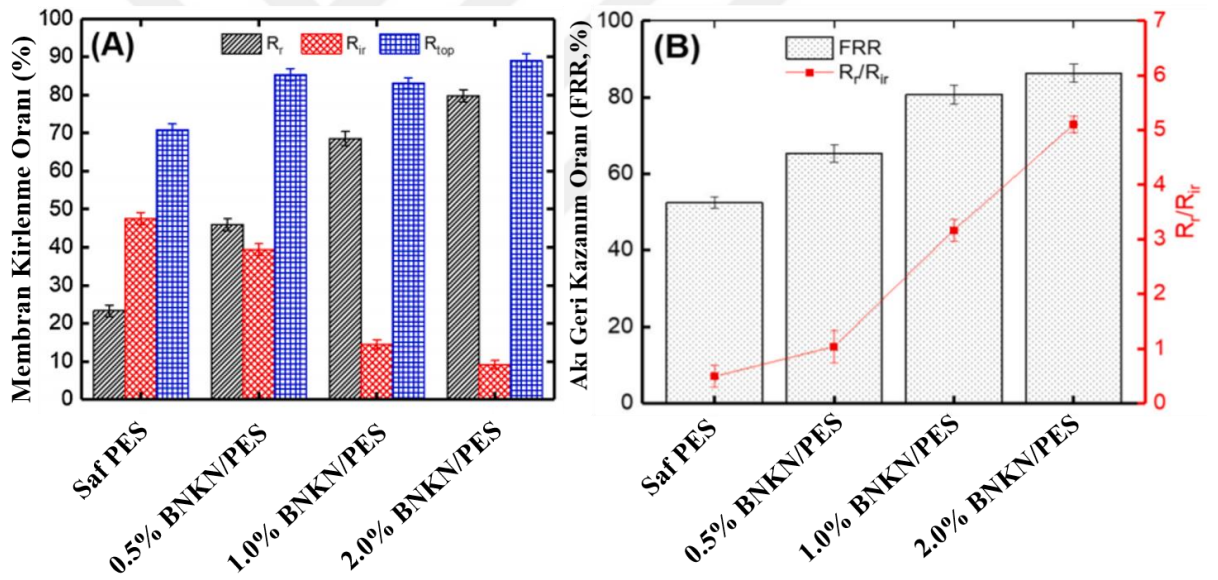


**Şekil 4.21.** B) Saf ve BNKN Katkıli Membranların Protein Giderimlerinde Akı Değerleri C) Saf ve Katkıli Membranların Protein Giderimleri

BSA giderimi verimlilikleri ise, katkılanmış BNKN nanomalzemelerin ağırlıkça % 0'dan % 2.0'ye yükseldiğinde %  $45.5 \pm 1.8$ 'den % 100'e yükselmiştir (Şekil 4.19 (C)). BNKN katkılanmış kompozit membranların BSA giderimindeki artış, saf membrana kıyasla hem daha küçük gözenek boyutu hem de daha yüksek hidrofilik özellik ile açıklanabilir.

#### 4.1.3.6. BNKN Katkılı Membranların Boya Performansları

Kompozit membranların  $R_t$  değerlerinin, bozulmamış PES membranlara kıyasla arttığı Şekil 4.22 (A)'da görülmektedir. Sonuçlar, BNKN'nin katkılanmasından sonra  $R_r$  değerlerinin arttığını ve  $R_{ir}$  değerlerinin de düştüğünü göstermektedir.



Şekil 4.22. Saf ve BNKN Katkılı Membranların A)  $R_t$ ,  $R_r$  ve  $R_{ir}$  Değerleri ve B) FRR ve  $R_r/R_{ir}$  Oranı

FRR ve  $R_r/R_{ir}$  oranları Şekil 4.22'de gösterilmektedir. Geri dönüşü olmayan membran tıkanması,  $R_r/R_{ir}$  oranının artması nedeniyle tersine çevrilebilir membran tıkanmasına dönüştürülür. PES membranlara kıyasla BNKN katkılı kompozit membranlar daha yüksek bir FRR değeri göstermektedir. BNKN nanomalzemesinin membrana katkılanması, filtrasyon işlemi sırasında BSA kirlenme direncini arttırdı ve FRR değerleri, bozulmamış PES membranı için % 52.4'ten ağırlıkça % 2.0 BNKN membran için % 90.8'e yükselmiştir.

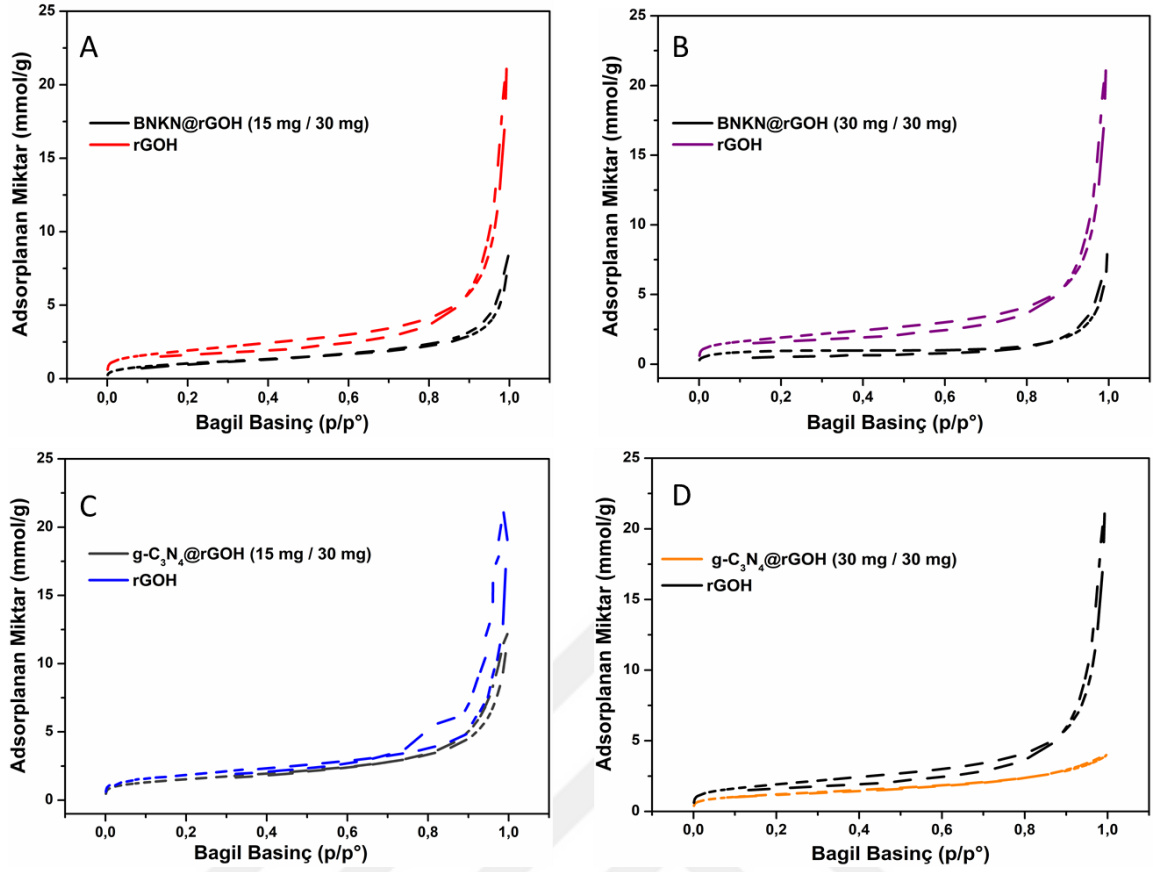
#### 4.2. rGOH, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/rGOH ve BNKN@rGOH BET Yüzey Alanı Ölçümleri

BET yüzey analizi, hazırlanan malzemenin yüzey alanı ve gözenekliliği için çok faydalı bir ölçümdür. Partikül boyutu küçüldüğünde, yüzey alanı-hacim oranında bir kazanç olur.

**Tablo 4.4.** Farklı Oranlarda Birleştirilmiş Kompozit Malzemelerin Yüzey ve Gözenek Boyut Dağılımı

Örnek	BET yüzey alanı	Langmuir yüzey alanı	Maksimum gözenek hacmi (p/p <sup>0</sup> )	BJH Adsorpsiyon ortalama gözenek genişliği (4V/A):	BJH Desorpsiyon ortalama gözenek genişliği (4V/A)
rGO	150.8657 m <sup>2</sup> /g	193.0296 m <sup>2</sup> /g	0.587328 cm <sup>3</sup> /g	227.984 Å	285.432 Å
30 mg GO@15 mg g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	120.7494 m <sup>2</sup> /g	154.8759 m <sup>2</sup> /g	p/p <sup>0</sup> = 0.985944334: 0.324690 cm <sup>3</sup> /g	141.873 Å	161.111 Å
30 mg GO@30 mg g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	94.6693 m <sup>2</sup> /g	125.1397 m <sup>2</sup> /g	p/p <sup>0</sup> = 0.978935195: 0.126603 cm <sup>3</sup> /g	65.817 Å	73.468 Å
30 mg GO@15 mg BNKN	82.7579 m <sup>2</sup> /g	106.5242 m <sup>2</sup> /g	p/p <sup>0</sup> =0.986647168: 0.208048 cm <sup>3</sup> /g	115.820 Å	123.864 Å
30 mg GO@30 mg BNKN	71.9548 m <sup>2</sup> /g	96.4708 m <sup>2</sup> /g	p/p <sup>0</sup> =0.979320699: 0.157760 cm <sup>3</sup> /g	355.681 Å	266.338 Å

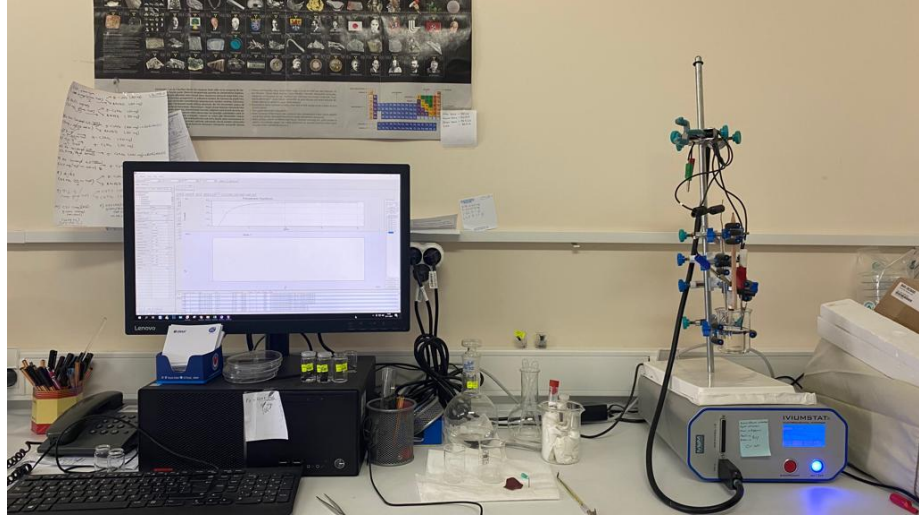
rGO'nun ve diğer kompozit nanomalzemelerin (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, BNKN) reaktif yüzey ve gözenek boyutu dağılımı, BET ölçümü ile 200 °C sıcaklıkta azot altında adsorpsiyon/desorpsiyon ile analiz edilmiştir. rGO, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve BNKN'nın toplam aktif spesifik yüzey alanı, BET ve adsorpsiyon/desorpsiyon ortalama gözenek genişliği değerleri Tablo 4.4'de verilmiştir. Spesifik toplam aktif yüzey alanı, hibrit yapının süperkapasitör uygulamaları için kullanılabilir bir aday yapmaktadır.



**Şekil 4.23.** A-B) Farklı Oranlarda Alınan BNKN Miktarına Göre BET Analizi, C- D)Farklı Oranlarda Alınan g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Miktarına Göre BET Analizi

### 4.3. Kompozit Nanomalzemeler Üzerinde Yapılan Elektrokimyasal Çalışmalar

Bu çalışmada elektrotun elektrokimyasal davranışı döngüsel voltametri (CV), elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ve galvanostatik yük-deşarj (GCD) ile ölçülmüştür. CV eğrileri farklı voltaj tarama hızlarında (5, 10, 20, 30, 40, 50 ve 100 mV s<sup>-1</sup>) 6 M potasyum hidroksit (KOH) elektroliti içerisinde alınmıştır. EIS verileri, açık devre potansiyelinde 0.01 Hz ila 100 kHz frekans aralığında toplanmıştır. CV ve EIS testlerinde ve GCD ölçümlerinde, çalışma elektrotu (numune kaplı nikel köpük), platin levha karşı elektrotu ve standart bir referans elektrotu (SCE) içeren üç elektrotlu bir cam hücre kullanıldı. GCD ölçümleri ise farklı akım yoğunluklarında (1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 ve 10.0 A g<sup>-1</sup>) yapıldı.



**Şekil 4.24.** Ölçüm Anındaki CV Cihazının Görüntüsü

CV ölçümlerinde kullanılacak çalışma elektrotları ( $g\text{-C}_3\text{N}_4@\text{rGOH}$  ve  $\text{BNKN}@\text{rGOH}$ ) ağırlıkça % 80 aktif malzeme (10 mg), ağırlıkça % 10 PVDF, % 10 karbon siyahı N-metil prolidon (NMP) (1 mL) çözgeni içinde hazırlanmıştır. Daha sonra, bu karışım karbon kaplanmış ( $1\text{ cm}^2$ ) nikel köpüğün üzerine düzgün bir şekilde kaplanmış ve vakum altında gece boyunca  $80^\circ\text{C}$ 'de kurutulmuştur. Ölçü için hazırlanan CV hücresi Şekil 4.25 deki gibi çalışma elektrodu, karşıt elektrod ve referans elektrodu 6 M KOH sulu çözeltisi içerisine daldırılmıştır.



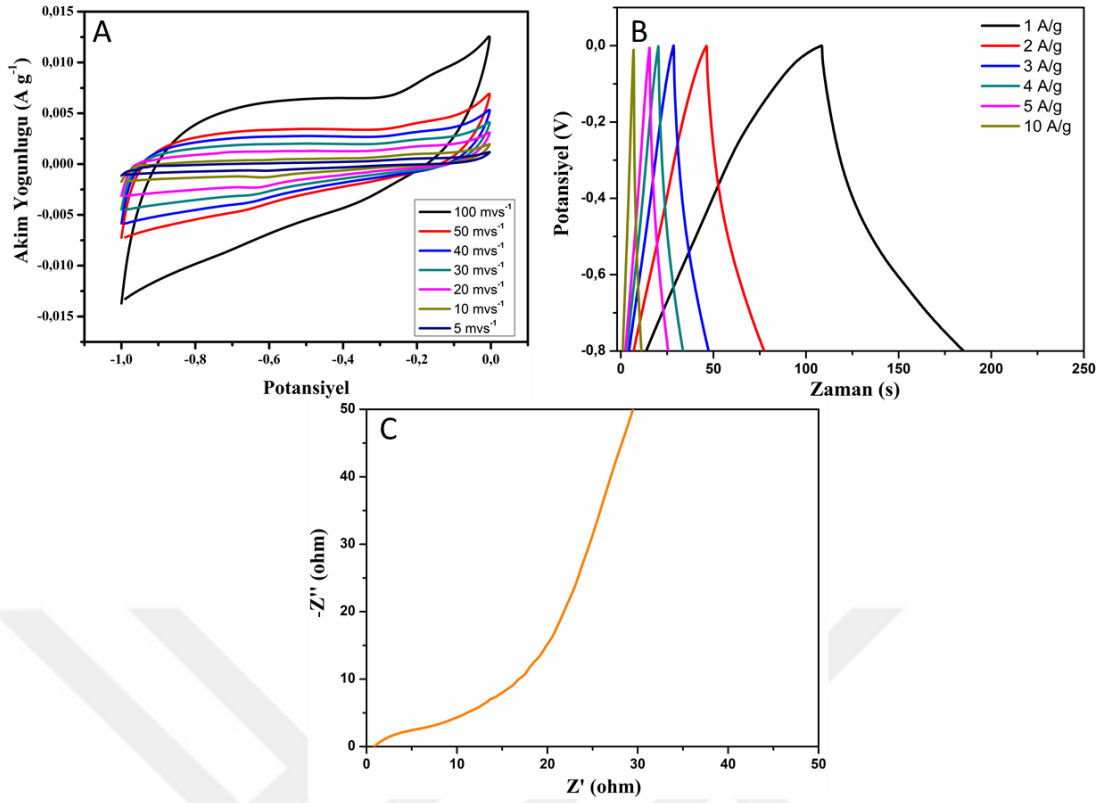
**Şekil 4.25.** Çalışmanın Yapıldığı Elektrot Düzenegi

#### 4.3.1. g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>@rGOH Nanokompozit Malzemenin Elektrokimyasal Çalışmaları

g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>@rGOH nanokompozit malzemenin elektrokimyasal davranışı çalışma elektrodunda rGOH miktarı (30 mg) sabit tutularak farklı oranlarda g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (15 mg, 30 mg, 60 mg) yapısı ile elde edilen ikili hibrit yapının kapasitans değerleri üzerinde elektrokimyasal ölçümler yapılmıştır. g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>@rGOH nanokompozit malzemeye uygulanacak potansiyel aralığı 6M KOH elektrolit çözeltisi içerisinde -1 ila 0 V olarak belirledikten sonra ilk CV ölçümleri 0.5:1 oranından hazırlanana g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>@rGOH kompozit malzemesi üzerinden alınmıştır. Kapasitans değerleri her bir tarama hızında CV döngülerinin alanları bulunurak aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$C_s = \frac{\int_{v_i}^{v_f} Idv}{mv\Delta V} \quad (4)$$

Burada m, V ve v sırasıyla aktif elektrot malzemesinin toplam ağırlığı, tek elektrot üzerindeki tarama hızı ve voltaj tarama aralığıdır.  $\int Idv$  ise uygulana potansiyel aralığında elde edilen CV alanıdır. Şekil 4.26 (A)'da belirtilen g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>@rGOH elektrotun 5, 10, 20, 30, 40, 50 ve 100 mV s<sup>-1</sup>'de tarama hızlarda hesaplanan spesifik kapasitans değerleri Tablo 4.5.'deki gibi ortaya çıkmıştır. Bu tabloya göre en yüksek kapasitans değeri 5 mvs<sup>-1</sup>'de 157 F/g olarak bulunmuştur. Aynı zamanda Şekil 4.26 (B)'de görüldüğü gibi farklı akım yoğunluklarındaki şarj/deşarj eğrileri de detaylı bir şekilde verilmiştir. Hibrit yapının empedans değeri ise 0.8 ohm ölçülmüştür.



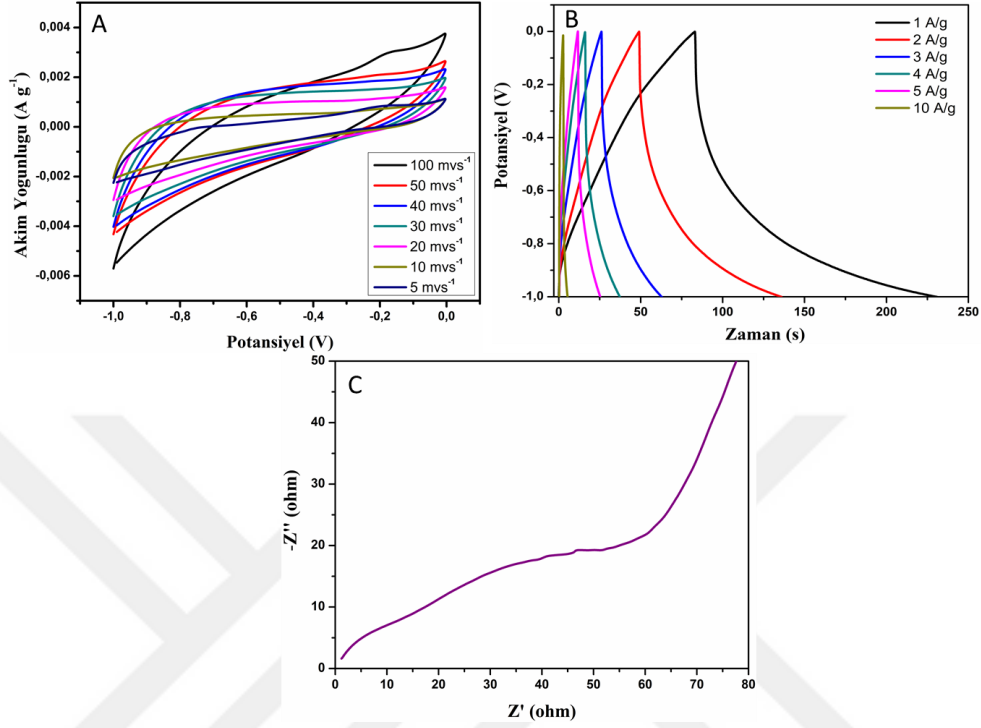
**Şekil 4.26.** 0.5:1 Oranından Hazırlanan g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>@rGOH Elektrotunun Farklı Tarama Hızlarındaki CV Eğrileri (A), Farklı Akım Yoğunluklarında Şarj-Deşarj Eğrileri (B), Empedans Grafiği (C)

**Tablo 4.5.** 0.5:1 Oranından Hazırlanan g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>@rGOH Elektrotunun Farklı Tarama Hızlarında Hesaplanan Spesifik Kapasitans Değerleri

Alan	Tarama Hızı	Madde Miktarı	Potansiyel Aralık	C <sub>s</sub>
7.87*10 <sup>-4</sup>	5 mV/s	1 mg (1*10 <sup>-3</sup> g)	(0-(-1)) = 1	157.4 F/g
0.0014	10 mV/s	1 mg (1*10 <sup>-3</sup> g)	(0-(-1)) = 1	140 F/g
0.0029	20 mV/s	1 mg (1*10 <sup>-3</sup> g)	(0-(-1)) = 1	145 F/g
0.0041	30 mV/s	1 mg (1*10 <sup>-3</sup> g)	(0-(-1)) = 1	136.66 F/g
0.0054	40 mV/s	1 mg (1*10 <sup>-3</sup> g)	(0-(-1)) = 1	135 F/g
0.0067	50 mV/s	1 mg (1*10 <sup>-3</sup> g)	(0-(-1)) = 1	134 F/g
0.012	100 mV/s	1 mg (1*10 <sup>-3</sup> g)	(0-(-1)) = 1	120 F/g

Diğer bir CV ölçümü 1:1 oranda katkılanan g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>@rGOH nanokompozit elektrot üzerinde yapılmıştır. Kompozit elektrotdan elde edilen CV eğrileri, şarj/deşarj

eğrileri ve empedans grafiği Şekil 4.27’de ki gibi elde edilmiştir. Hesaplanan spesifik kapasitans değerleri ise Tablo 4.6.’da görüldüğü gibi en yüksek  $5 \text{ mvs}^{-1}$  tarama hızında ( $156.2 \text{ F/g}$ ) elde edilmiştir. Hibrit yapının empedans değeri ise  $1.2 \text{ ohm}$  ölçülmüştür.

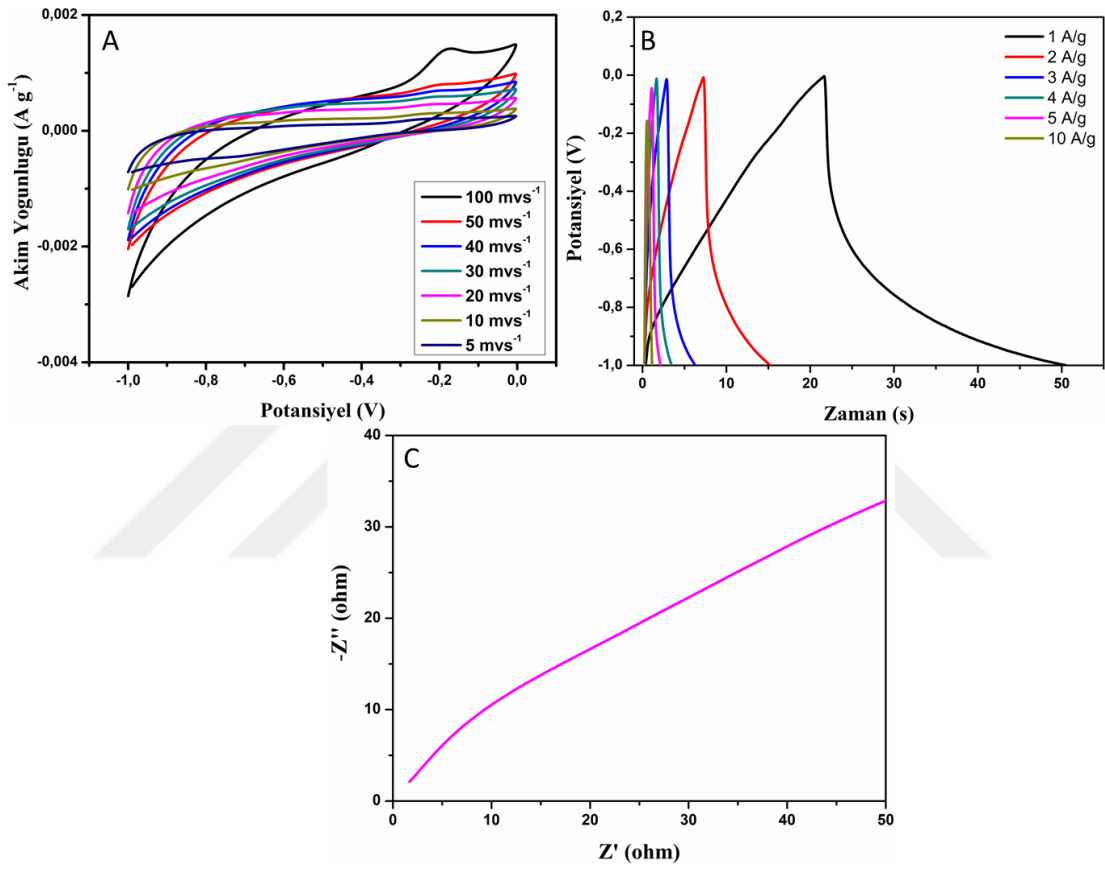


**Şekil 4.27.** 1:1 Oranından Hazırlanan  $\text{g-C}_3\text{N}_4@\text{rGOH}$  Elektrotunun Farklı Tarama Hızlarındaki CV Eğrileri (A), Farklı Akım Yoğunluklarında Şarj-Deşarj Eğrileri (B), Empedans Grafiği (C)

**Tablo 4.6.** 1:1 Oranından Hazırlanan  $\text{g-C}_3\text{N}_4@\text{rGOH}$  Elektrotunun Farklı Tarama Hızlarında Hesaplanan Spesifik Kapasitans Değerleri

Alan	Tarama Hızı	Madde Miktarı	Potansiyel Aralık	$C_s$
$7.87 \cdot 10^{-4}$	5 mV/s	1 mg ( $1 \cdot 10^{-3}$ g)	(0-(-1)) = 1	156.2 F/g
0.0013	10 mV/s	1 mg ( $1 \cdot 10^{-3}$ g)	(0-(-1)) = 1	130 F/g
0.0020	20 mV/s	1 mg ( $1 \cdot 10^{-3}$ g)	(0-(-1)) = 1	100 F/g
0.0026	30 mV/s	1 mg ( $1 \cdot 10^{-3}$ g)	(0-(-1)) = 1	86.66 F/g
0.0030	40 mV/s	1 mg ( $1 \cdot 10^{-3}$ g)	(0-(-1)) = 1	75 F/g
0.0032	50 mV/s	1 mg ( $1 \cdot 10^{-3}$ g)	(0-(-1)) = 1	64 F/g
0.0040	100 mV/s	1 mg ( $1 \cdot 10^{-3}$ g)	(0-(-1)) = 1	40 F/g

Son olarak  $g\text{-C}_3\text{N}_4@\text{rGOH}$  nanokompozitinde  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  miktarını iki katına çıkartarak (60 mg) yapılan elektrokimyasal ölçümlerden elde edilen CV döngüleri, şarj/deşarj eğrileri empedans grafiği Şekil 4.28.'deki gibi elde edilmiştir. Yapılan ölçümler doğrultusunda elde edilen en yüksek spesifik kapasitans değeri de  $5\text{ mvs}^{-1}$ 'de 81.2 olarak bulunmuştur (Tablo 4.7). Hibrit yapının empedans değeri ise 1.6 ohm ölçülmüştür.

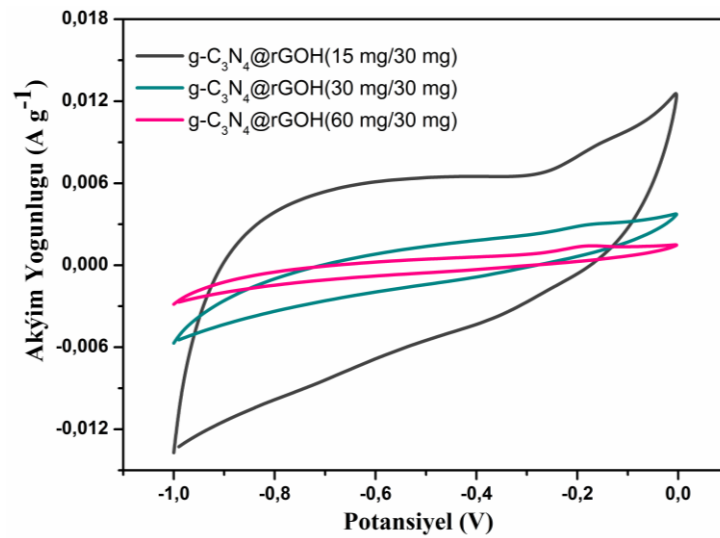


**Şekil 4.28.** 2:1 Oranından Hazırlanan  $g\text{-C}_3\text{N}_4@\text{rGOH}$  Elektrotunun Farklı Tarama Hızlarındaki CV Eğrileri (A), Farklı Akım Yoğunluklarında Şarj-Deşarj Eğrileri (B), Empedans Grafiği (C)

**Tablo 4.7.** 2:1 Oranından Hazırlanan g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>@rGOH Elektrotunun Farklı Tarama Hızlarında Hesaplanan Spesifik Kapasitans Değerileri

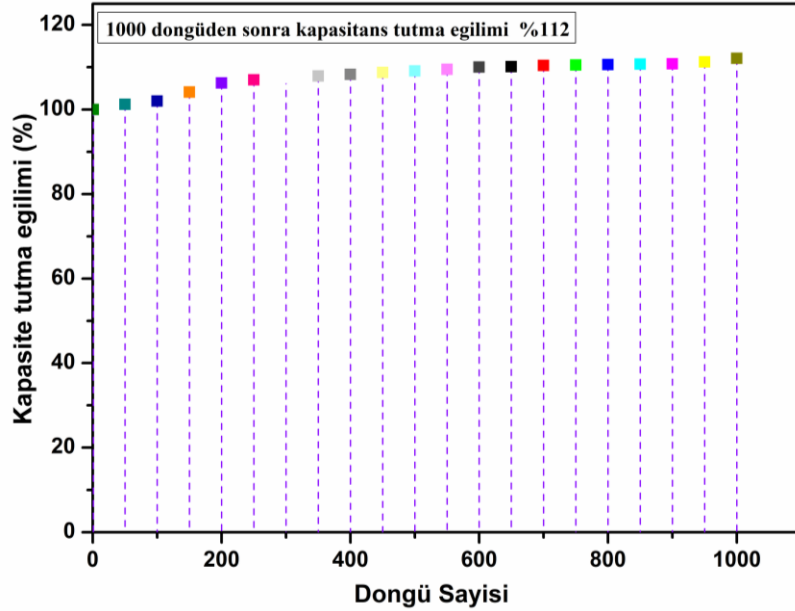
Alan	Tarama Hızı	Madde Miktarı	Potansiyel Aralık	C <sub>s</sub>
4.06*10 <sup>-4</sup>	5 mV/s	1 mg (1*10 <sup>-3</sup> g)	(0-(-1)) = 1	81.2 F/g
5.72*10 <sup>-4</sup>	10 mV/s	1 mg (1*10 <sup>-3</sup> g)	(0-(-1)) = 1	57.2 F/g
8.21*10 <sup>-4</sup>	20 mV/s	1 mg (1*10 <sup>-3</sup> g)	(0-(-1)) = 1	41.5 F/g
9.98*10 <sup>-4</sup>	30 mV/s	1 mg (1*10 <sup>-3</sup> g)	(0-(-1)) = 1	33.66 F/g
0.0011	40 mV/s	1 mg (1*10 <sup>-3</sup> g)	(0-(-1)) = 1	27.5 F/g
0.0012	50 mV/s	1 mg (1*10 <sup>-3</sup> g)	(0-(-1)) = 1	24 F/g
0.0017	100 mV/s	1 mg (1*10 <sup>-3</sup> g)	(0-(-1)) = 1	17 F/g

g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>@rGOH nanokompozit malzemenin farklı oranlarda, aynı potansiyel aralıkta alınan ve 100 mV/s tarama hızında elde edilen CV eğrileri Şekil 4.29'de verilmiştir. Sonuç olarak, elde edilen değerlere bakıldığında, nanokompozit malzeme miktarını arttırdıkça kapasitans değerinin düştüğü görülmektedir. Bunun nedeni, kompozit nanomalzemenin rGOH üzerindeki yüzey alanını olumsuz yönde etkilemesidir. Dahası, elektrot/elektrolit arasındaki temas yüzey alanının azalması elektrot yüzeyinde oluşan redox potansiyellerde bir azalmaya sebep olmuştur ki bu durum elde edilen kapasitans miktarının orantılı bir şekilde azaldığını göstermektedir (Harputlu, 2022:127787).



**Şekil 4.29.** Farklı Oranlardaki g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>@rGOH Elektrotunun 100mV/S Tarama Hızlarında CV Eğrileri

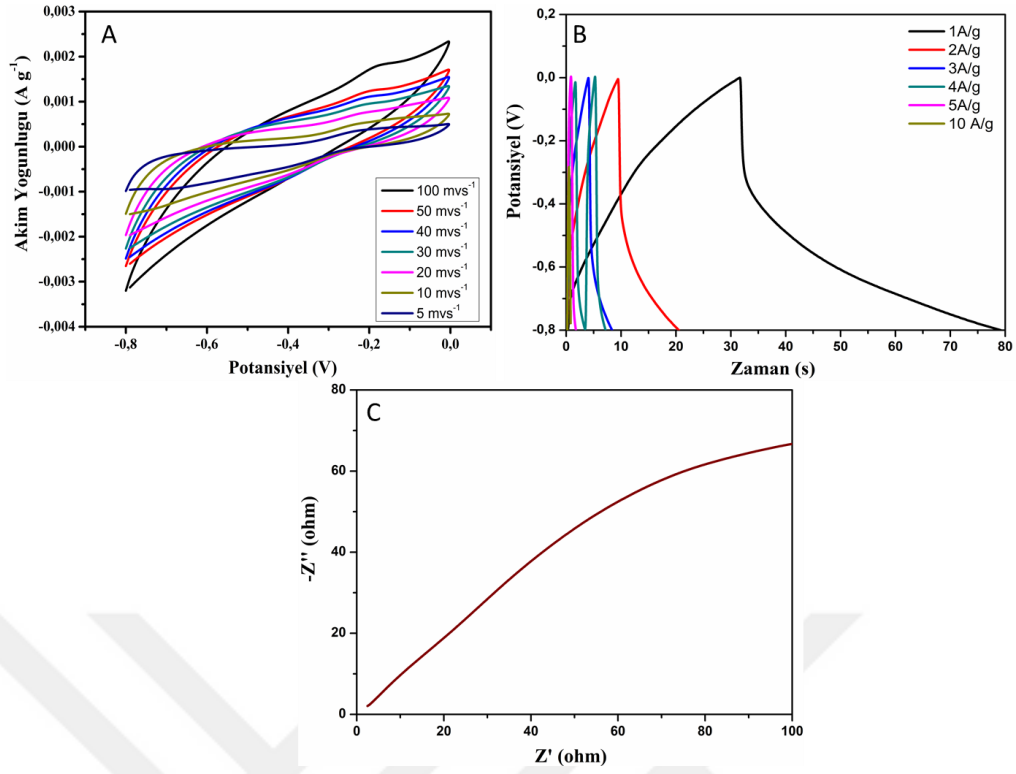
Yük transfer direnci ne kadar düşükse, kompozit malzemenin elektrokimyasal davranışında bir iyileşmeye olmaktadır (Reddy vd., 2019:3618).  $g-C_3N_4@rGOH$  elektrotunun döngü kararlılığı, 1000 döngüden sonra Şekil 4.30'de görüldüğü gibi % 112 kapasitans tutma eğilimine sahip olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.30. 0.5:1 Oranında Katkılan  $g-C_3N_4@rGOH$  Elektrotuna Air 1000 Döngü İçerisinde Elde Edilen Kapasitans Tutma Eğilim Grafiği

#### 4.3.2. BNKN@rGOH Nanokompozit Malzemenin Elektrokimyasal Çalışmaları

BNKN@rGOH nanokompozit malzemenin elektrokimyasal davranışı çalışma elektrodunda farklı oranlarda BNKN (15 mg, 30 mg, 60 mg) kullanılarak yapının kapasitans değerleri üzerinde bir kıyaslama yapılmıştır. BNKN@rGOH nanokompozit malzemeye uygulanacak potansiyel aralığı 6M KOH elektrolit çözeltisi içerisinde - 0.8 - 0 V olarak belirledikten sonra ilk CV ölçümleri 0.5:1 oranından hazırlanana BNKN@rGOH kompozit malzemesi üzerinden alınmıştır. Belirtilen BNKN@rGOH elektrotun 5, 10, 20, 30, 40, 50 ve 100  $mV s^{-1}$ 'de tarama hızları alınarak spesifik kapasitans değerleri hesaplanmıştır. Aynı zamanda farklı akım yoğunluklarındaki şarj/deşarj eğrileri ve empedans grafiği Şekil 4.31'de ki gibi elde edilmiştir. 0.5:1 oranından hazırlanana BNKN@rGOH elektrotundan elde edilne en yüksek kapasitans değerleri Tablo 4.8.'de görüldüğü  $5 mvs^{-1}$  de 141.2 F/g olarak hesaplanmıştır. Hibrit yapının empedans değeri ise 1.02 ohm ölçülmüştür.



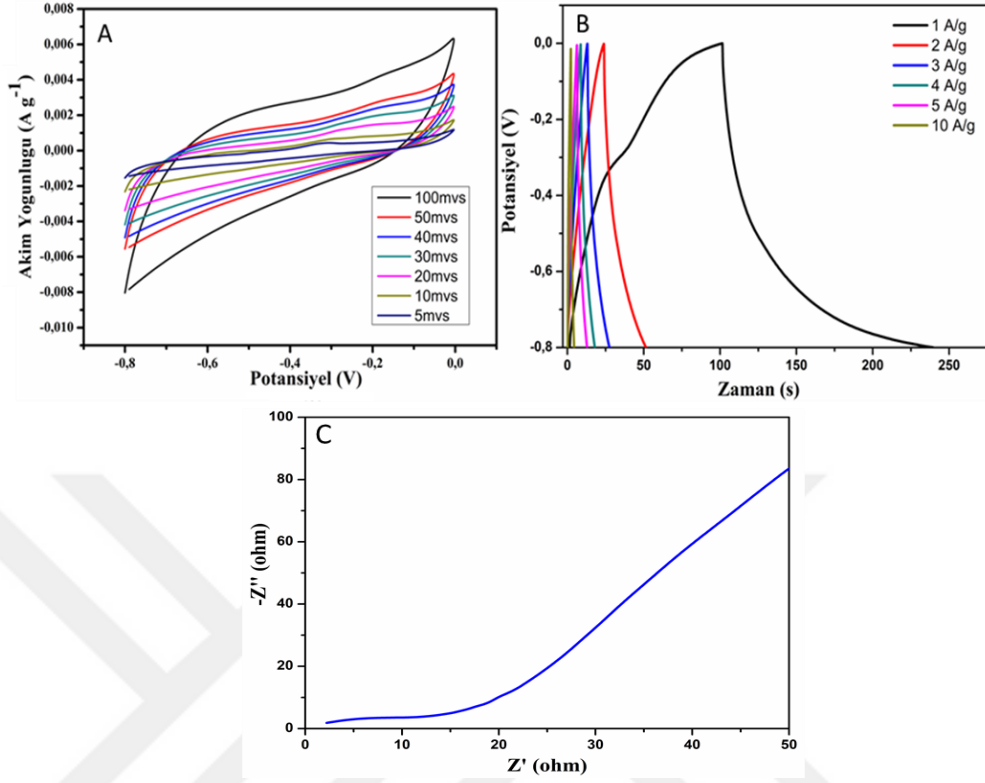
**Şekil 4.31.** 0.5:1 Oranından Hazırlanan BNKN@rGOH Elektrotunun Farklı Tarama Hızlarındaki CV Eğrileri (A), Farklı Akım Yoğunluklarında Şarj-Deşarj Eğrileri (B), Empedans Grafiği (C)

**Tablo 4.8.** 0.5:1 Oranından Hazırlanan BNKN@RGOH Elektrotunun Farklı Tarama Hızlarında Hesaplanan Spesifik Kapasitans Değerleri

Alan	Tarama Hızı	Madde Miktarı	Potansiyel Aralık	$C_s$
$5.65 \cdot 10^{-4}$	5 mV/s	1 mg ( $1 \cdot 10^{-3}$ g)	(0-(-0,8)) = 0.8	141.25 F/g
$7.98 \cdot 10^{-4}$	10 mV/s	1 mg ( $1 \cdot 10^{-3}$ g)	(0-(-0,8)) = 0.8	99.75 F/g
0.0010	20 mV/s	1 mg ( $1 \cdot 10^{-3}$ g)	(0-(-0,8)) = 0.8	62.5 F/g
0.0013	30 mV/s	1 mg ( $1 \cdot 10^{-3}$ g)	(0-(-0,8)) = 0.8	54.16 F/g
0.0014	40 mV/s	1 mg ( $1 \cdot 10^{-3}$ g)	(0-(-0,8)) = 0.8	43.75 F/g
0.0015	50 mV/s	1 mg ( $1 \cdot 10^{-3}$ g)	(0-(-0,8)) = 0.8	37.5 F/g
0.0020	100 mV/s	1 mg ( $1 \cdot 10^{-3}$ g)	(0-(-0,8)) = 0.8	25 F/g

BNKN@rGOH nanokompozit malzemenin rGOH ile aynı oranlarda (1:1) katkılındığı elektrotta ise alınan tarama hızının eğrisi, şarj/deşarj eğrileri ve empedans grafiği Şekil 4.32’de verilmiştir. Hesaplanan spesifik kapasitans değerine göre Tablo

4.9.'da görüldüğü gibi en yüksek değer  $5 \text{ mVs}^{-1}$ 'de  $207 \text{ F/g}$  bulunmuştur. Hibrit yapının empedans değeri ise  $2.2 \text{ ohm}$  ölçülmüştür.

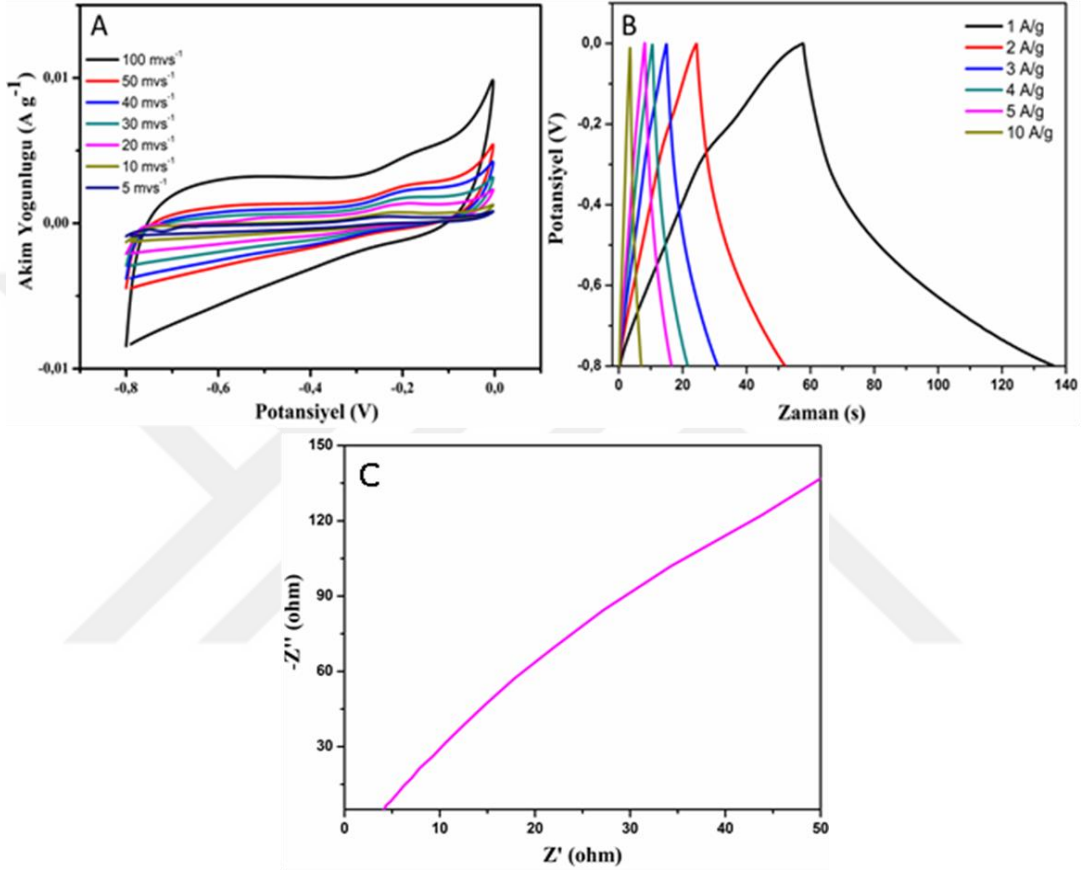


**Şekil 4.32.** 1:1 Oranından Hazırlanan BNKN@rGOH Elektrotunun Farklı Tarama Hızlarındaki CV Eğrileri (A), Farklı Akım Yoğunluklarında Şarj-Deşarj Eğrileri (B), Empedans Grafiği (C)

**Tablo 4.9.** 1:1 Oranından Hazırlanan BNKN@rGOH Elektrotunun Farklı Tarama Hızlarında Hesaplanan Spesifik Kapasitans Değerleri

Alan	Tarama Hızı	Madde Miktarı	Potansiyel Aralık	$C_s$
$8.29 \cdot 10^{-4}$	5 mV/s	1 mg ( $1 \cdot 10^{-3}$ g)	(0-(-0,8)) = 0.8	207.25 F/g
0.0012	10 mV/s	1 mg ( $1 \cdot 10^{-3}$ g)	(0-(-0,8)) = 0.8	150 F/g
0.0018	20 mV/s	1 mg ( $1 \cdot 10^{-3}$ g)	(0-(-0,8)) = 0.8	112.5 F/g
0.0023	30 mV/s	1 mg ( $1 \cdot 10^{-3}$ g)	(0-(-0,8)) = 0.8	95.83 F/g
0.0029	40 mV/s	1 mg ( $1 \cdot 10^{-3}$ g)	(0-(-0,8)) = 0.8	90.62 F/g
0.0033	50 mV/s	1 mg ( $1 \cdot 10^{-3}$ g)	(0-(-0,8)) = 0.8	75 F/g
0.0051	100 mV/s	1 mg ( $1 \cdot 10^{-3}$ g)	(0-(-0,8)) = 0.8	63.75 F/g

BNKN@rGOH nanokompozitinde BNKN miktarını iki katına çıkartarak (60 mg) yapılan ölçümden elde edilen CV döngü eğrileri, şarj/deşarj eğrileri ve empedans grafikleri Şekil 4.33'de verilmiştir. Aynı zamanda çıkan en yüksek spesifik kapasitans değeri de 5mvs'de 139.75 F/g olarak Tablo 4.10'da verilmiştir. Hibrit yapının empedans değeri ise 3.96 ohm ölçülmüştür.

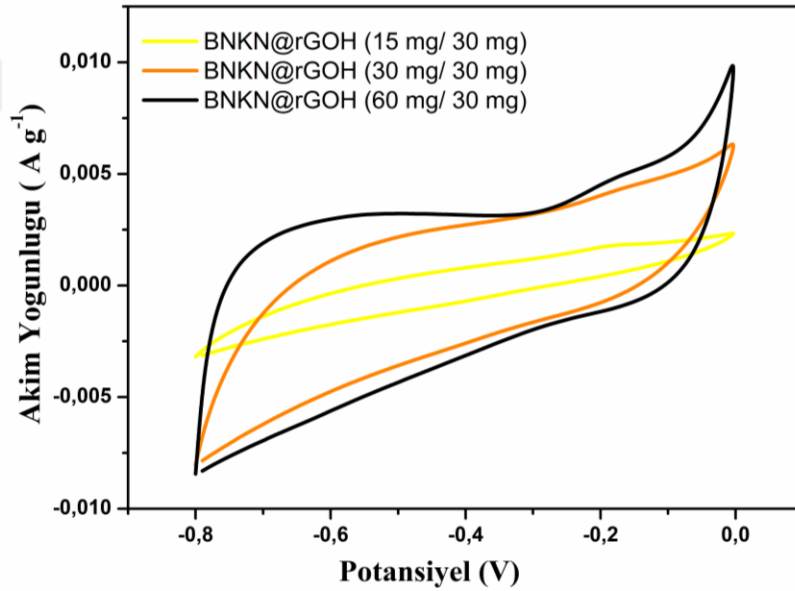


**Şekil 4.33.** 2:1 Oanından Hazırlanan BNKN@rGOH Elektrotunun Farklı Tarama Hızlarındaki CV Eğrileri (A), Farklı Akım Yoğunluklarında Şarj-Deşarj Eğrileri (B), Empedans Grafiği (C)

**Tablo 4.10.** 2:1 Oranından Hazırlanan BNKN@rGOH Elektrotunun Farklı Tarama Hızlarında Hesaplanan Spesifik Kapasitans Değerleri

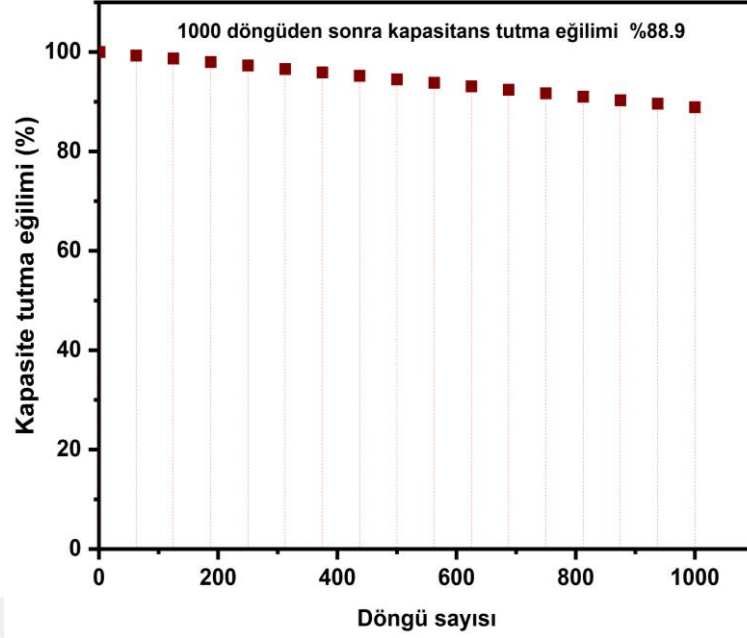
Alan	Tarama Hızı	Madde Miktarı	Potansiyel Aralık	Csp
$5.59 \cdot 10^{-4}$	5 mV/s	1 mg ( $1 \cdot 10^{-3}$ g)	(0-(-0,8)) = 0.8	139.75 F/g
$7.79 \cdot 10^{-4}$	10 mV/s	1 mg ( $1 \cdot 10^{-3}$ g)	(0-(-0,8)) = 0.8	97.37 F/g
0.0013	20 mV/s	1 mg ( $1 \cdot 10^{-3}$ g)	(0-(-0,8)) = 0.8	81.25 F/g
0.0018	30 mV/s	1 mg ( $1 \cdot 10^{-3}$ g)	(0-(-0,8)) = 0.8	75 F/g
0.0024	40 mV/s	1 mg ( $1 \cdot 10^{-3}$ g)	(0-(-0,8)) = 0.8	75 F/g
0.0030	50 mV/s	1 mg ( $1 \cdot 10^{-3}$ g)	(0-(-0,8)) = 0.8	75 F/g
0.0060	100 mV/s	1 mg ( $1 \cdot 10^{-3}$ g)	(0-(-0,8)) = 0.8	75 F/g

Farklı oranlarda hazırlanan BNKN@rGOH nanokompozit elektrotların, aynı potansiyel aralıkta alınan CV eğrileri Şekil 4.34’de verilmiştir.



**Şekil 4.34.** Farklı Oranlardaki BNKN@rGOH Elektrotunun 100mV/S Tarama Hızındaki CV Eğrileri

Sonuç olarak BNKN@rGOH elektrotunun döngü kararlılığı, 1000 döngüden sonra Şekil 4.35’de görüldüğü gibi % 88.9 kapasitans tutma eğilimine sahip olduğu tespit edilmiştir.



**Şekil 4.35.** 1:1 Oranında Katkılan BNKN@rGOH Elektrotuna Ait 1000 Döngü İçerisinde Elde Edilen Kapasite Tutma Eğilim Grafiği

#### 4.4. Nanokompozit Malzemelerin İkili Hücre Elektrokimyasal Ölçümleri

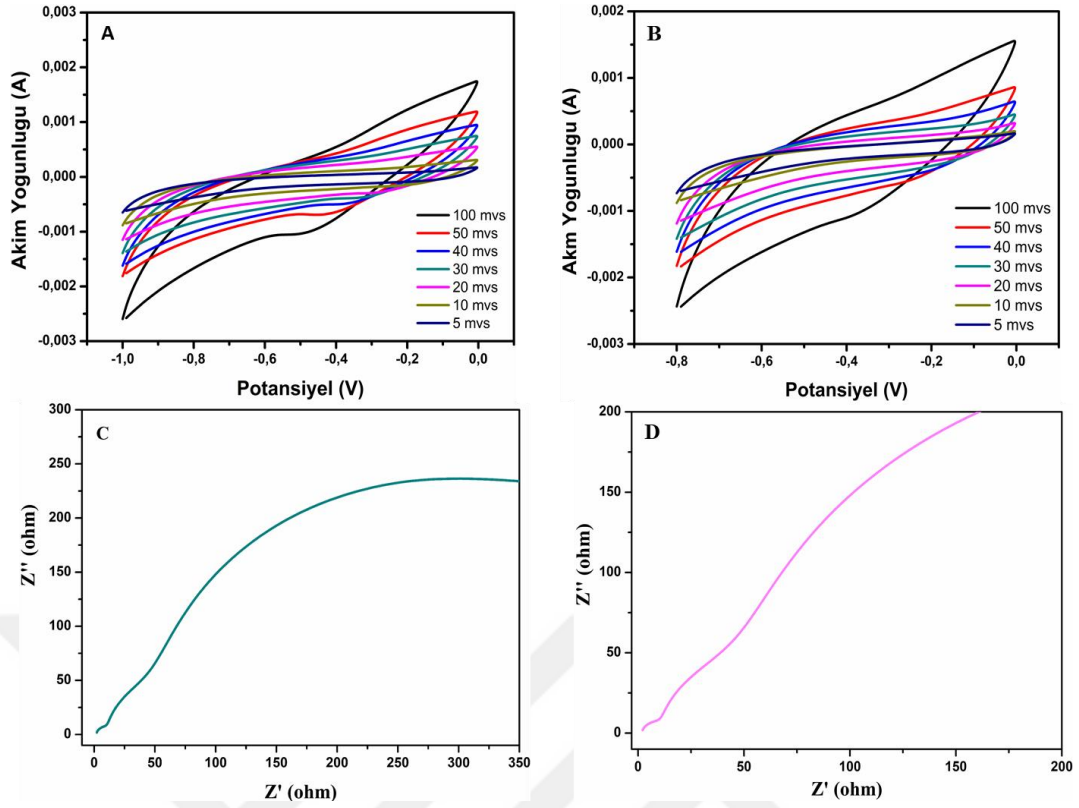
$g-C_3N_4@rGOH$  ve  $BNKN@rGOH$  hibrit yapılarının üçlü (3) hücre elektrokimyasal ölçümlerinden sonra, yapıların ikili (2) hücre elektrokimyasal ölçümleri sırasıyla CV, şarj/deşarj ve empedans ölçümleri yapılarak gerçekleştirilmiştir. Simetrik olarak hazırlanan her bir hibrit elektrot (çalışma ve karşıt elektrot aynı hibrit malzemeyi içerecek şekilde hazırlanan yapı), öncelikle aktif tabakanın ( $g-C_3N_4@rGOH$  veya  $BNKN@rGOH$ ) darası alınmış sadece  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  lik Ni köpük üzerine kaplanması ile gerçekleştirilmiştir. Bunun için daha önceden hazırlanmış 1 ml NMP içerisinde dispers olmuş hibrit yapılardan 100'er  $\mu\text{l}$  alınarak Ni köpük üzerine homojen bir şekilde damlatılmıştır. Her bir hibrit yapı içeren Ni köpükler  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  de vakum altında 24 saat süre ile kurutulmaya bırakılmıştır. Daha sonra Ni köpük üzerindeki madde miktarı belirlenen elektrotlar daha önceden 6M KOH çözeltisine daldırılmış porlu bir yapıya sahip ayırıcı olarak adlandırılan bir membran yapısı ile bir araya getirilerek (Şekil 4.36) elektrokimyasal ölçümler alınmıştır.



**Şekil 4.36.** Elektrokimyasal Ölçüm İçin Hazırlanan Simetrik Elektrotları İçeren İkili Hücre Mekanizması

Farklı tarama hızlarında ayrı ayrı hazırlanan, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>@rGOH ve BNKN@rGOH içeren simetrik yapıların CV performansları ve empedans grafikleri Şekil 4.37'de ki gibi elde edilmiştir. Tarama hızlarındaki artış doğrultusunda CV eğrilerinin kapladığı alanda redoks pikleri olmaksızın git gide bir artış gözlemlenmiştir. Kapasitans değerleri her bir tarama hızında CV döngülerinin alanları bulunarak aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$C_s = \frac{2 \int_{v_i}^{v_f} I dv}{mv\Delta V} \quad (5)$$



**Şekil 4.37.** A)  $g\text{-C}_3\text{N}_4@\text{rGOH}$  Simetrik Elektrotun Farklı Tarama Hızlarındaki CV Eğrileri, B)  $\text{BNKN}@\text{rGOH}$  Simetrik Elektrotun Farklı Tarama Hızlarındaki CV Eğrileri, C)  $g\text{-C}_3\text{N}_4@\text{rGOH}$  Simetrik Elektrotun Empedans Grafiği, D)  $\text{BNKN}@\text{rGOH}$  Simetrik Elektrotun Empedans Grafiği

Tablo 4.11’de görüleceği üzere elde edilen  $C_s$  miktarları en çok elektrolara  $5 \text{ mVs}^{-1}$ ’de tarama hızları uygulandığında elde edilmiştir. Simetrik hibrit yapıların empedans değeri ise  $g\text{-C}_3\text{N}_4@\text{rGOH}$  için  $1.14 \text{ ohm}$  ölçülmüşken,  $\text{BNKN}@\text{rGOH}$  ile hazırlanan ikili elektrot sisteminde  $1.21 \text{ ohm}$  ölçülmüştür.

**Tablo 4.11.** g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>@rGOH Ve BNKN@rGOH Simetrik Olarak Hazırlanmış İkili Elektrod Sistemlerinden Elde Edilen Spesifik Kapasitans Değerleri

Tarama Hızı	g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @rGOH'ın Spesifik Kapasitans Değeri	BNKN@rGOH 'ın Spesifik Kapasitans Değeri
5 mvs <sup>-1</sup>	130.4 F/g	161.5 F/g
10 mvs <sup>-1</sup>	96 F/g	96.7 F/g
20 mvs <sup>-1</sup>	73.4 F/g	67.7 F/g
30 mvs <sup>-1</sup>	62.2 F/g	57.8 F/g
40 mvs <sup>-1</sup>	55 F/g	53.3 F/g
50 mvs <sup>-1</sup>	52 F/g	50 F/g
100 mvs <sup>-1</sup>	38 F/g	37.5 F/g

Simetrik iki elektrotlu hücrelerin enerji yoğunluğu en yüksek çıkan spesifik kapasitans değerlerine göre, E (Wh kg<sup>-1</sup>) ve güç yoğunluğu P (W kg<sup>-1</sup>), aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmıştır:

$$E = \frac{Cs \times \Delta V^2}{(3.6 \times 8)} \quad (6)$$

$$P = 3600 \frac{E}{td} \quad (7)$$

Elde edilen enerji ve güç yoğunlukları dikate alındığında g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>@rGOH hibrit yapısında elde edilen değerler sırasıyla 4.52 Wh kg<sup>-1</sup>, 1627.2 W kg<sup>-1</sup> hesaplandı. BNKN@rGOH ile hazırlanan ikili hücreden elde edilen enerji ve güç yoğunlukları ise sırasıyla 3.58 Wh kg<sup>-1</sup>, 2148 W kg<sup>-1</sup> olarak hesaplanmıştır.

Tez çalışması kapsamında yapılan süperkapasitör çalışmalarında, üretilen kompozit elektrotların ( $g-C_3N_4@rGOH$  ve  $BNKN@rGOH$ ) spesifik kapasitans değerleri, şarj/deşarj eğrileri ve empedans grafikleri sonucunda, iki kompozit elektrotun da farklı konsantrasyonlarda farklı sonuçlar verdiğini gözlemledik. Aynı zamanda elde edilen güç ve enerji yoğunluklarını kıyaslırsak da;  $g-C_3N_4@rGOH$ ,  $BNKN@rGOH$  elektrotlara göre daha yüksek sonuç vermiştir.



## SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez kapsamında, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve BNKN nanoyapılar tek adımda, başarılı bir şekilde sentezlenmiş ve XRD, SEM, FTIR, UV-Vis, PL yöntemleri kullanılarak karakterize edilmiştir. Bu tür hibrit malzemelerin farklı alanlarda kullanılabilme potansiyeli, yapılan detaylı çalışmalarla incelenmiştir. Bu kapsamda özellikle çevre ve enerji uygulamalarına yönelik çalışmalar yapılmıştır.

PES içerisine entegre edilmiş nanokompozit malzemelerin membranlar üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yarı iletken katalizörlerle fonksiyonelleştirilmiş PES kompozit membranlar (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/PES, BNKN/PES), faz-inversiyon yöntemi ile hazırlanmış ve protein ayrımı için kullanılmıştır. Nanomalzeme katkılı ve katkısız PES membranlar, SEM, AFM, gözeneklilik, temas açısı ve ortalama gözenek boyutu ile karakterize edilmiştir. SEM görüntüleri, katkılanmış nanomalzemelerin PES membran yapısına nüfuz ettiğini kanıtlarken, AFM görüntüleri, katkılanmış membranların pürüzlülüğünün nanomalzeme konsantrasyonu ile arttığını göstermiştir. Kompozit membranların gözenek sayısı, gözenek boyutu ve hidrofilik özelliklerinin, katkısız PES membrana kıyasla arttığı tespit edilmiştir. Üretilen kompozit membranların kirlenme önleyici özelliklerini test etmek için organik bir tıkaçıcı olarak BSA kullanılmıştır. Alınan sonuçlar doğrultusunda, BSA filtrasyonu sırasında kompozit membranların kirlenme önleyici özelliklerinin geliştiği gözlemlenirken, katkılı membranların BSA çözeltisini tutma kapasitesinin arttığı da belirlenmiştir. Bu nedenle, katkılanmış membranların çok iyi tıkanıklık önleyen malzeme olduğu tespit edilirken, membran kirlenmesini azaltmak için g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, BNKN kullanılabilir. Bu nanokompozit membranların kıyaslanması sonucunda ise; BNKN/PES membranların g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/PES membranlara göre, daha iyi kirlenme önleyici özellik gösterdiği görülmektedir. Çevresel uygulamalar da gelecek vaad eden bu nanokompozit malzemeler, ayrıca süperkapasitör çalışmalarda da denenerek elektrokimyasal ölçümleri de alınmıştır.

g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>@rGOH ve BNKN@rGOH hibrit yapıları üzerinde yapılan elektrokimyasal ölçümler doğrultusunda yapıların spesifik kapasitans ölçümleri başarı ile yapılmıştır. Elde edilen bulgular doğrultusunda g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>@rGOH ve BNKN@rGOH elektrotlarında elde edilen en yüksek C<sub>s</sub> değeri, 5 mV s<sup>-1</sup> tarama hızlarında tespit edilmiştir. Elektrotlar üzerine 5 mVs<sup>-1</sup>'de tarama hızları uygulandığında, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>@rGOH ve BNKN@rGOH hibrit yapıları EDCL kapasitörlerdeki gibi benzer bir davranış

(diktorgen bir CV eğrisi) sergilemişlerdir. Ancak, uygulanan tarama hızı  $10 \text{ mVs}^{-1}$  ve yukarısında elde edilen yeni CV eğrileri,  $5 \text{ mVs}^{-1}$ 'e kıyasla dikdörtgen şeklinden hafif bir bozulma ile psedokapasitör davranışın olduğunu ortaya koymuştur. Bu sonuç, literatürde de belirtildiği üzere elektrot malzemelerindeki elektron veya iyon taşıma mekanizmasının kinetiği ve elektrot/elektrolit ara yüzeyinde az miktarda iyon adsorpsiyonu ve desorpsiyonun meydana gelmesi nedeniyle açıklanabilir (Harputlu, 2022:127787). Diğer bir taraftan, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>@rGOH ve BNKN@rGOH hibrit yapılarını içeren elektrotların CV eğrileri  $5 \text{ mVs}^{-1}$ 'in üzerindeki artan tarama hızlarıyla genişlemiş olup, bu da hızlı şarj/deşarj kinetiğini ve mükemmel geri dönüş kararlılığını göstermektedir (Şekil 4.24 - Şekil 4.30.). Aksine, yük dağılımı elektrik alanındaki farkı koruyamadığı için yüksek tarama hızında daha düşük Cs ile sonuçlanır. Ayrıca, hibrit elektrot, artan çift kapasitif davranış nedeniyle daha düşük iç direnç göstermiştir. Düşük akım yoğunluğunda alınan geniş şarj-deşarj eğrileri yüksek kapasitans değeri vermektedir. Elektrolitten iyon difüzyonu, daha düşük akım yoğunluğunda aktif malzemelerin maksimum yüzey alanına erişebilir, bu nedenle daha yüksek bir spesifik kapasitans elde edilebilir. Akım yoğunluğunun artmasıyla, iyonlar ve elektrot arasındaki etkileşim azalır ve bu da kapasitansta bir azalmaya neden olur. Son olarak, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>@rGOH ve BNKN@rGOH hibrit yapıları sırasıyla 1000 döngüden sonra bile neredeyse % 88 ve % 112'lik yüksek döngü kararlılığı göstermiştir. Hazırlanan elektrotların özelliklerinin geliştirilmesinde, yeni hibrit malzemelerin amaca yönelik dizaynı ve hazırlanması çok büyük önem arz etmektedir. Bu bağlamda hazırlanmış olduğumuz tez çalışması, sonraki çalışmalara ışık tutabilecek bir yapıdadır.

## KAYNAKÇA

- Abdikhebari, S., Lei, W., Dumée, L. F., Barlow, A. J., & Baskaran, K., (2019). Novel thin film nanocomposite membranes decorated with few-layered boron nitride nanosheets for simultaneously enhanced water flux and organic fouling resistance. *Applied Surface Science*, 488:565–577.
- Abdikhebari, S., Lei, W., Dumée, L. F., Milne, N., & Baskaran, K., (2018). Thin film nanocomposite nanofiltration membranes from amine functionalized-boron nitride/polypiperazine amide with enhanced flux and fouling resistance. *Journal of Materials Chemistry A*, 6(25):12066–12081.
- Abergel, D. S. L., Apalkov, V., Berashevich, J., Ziegler, K., & Chakraborty, T., (2010). Properties of graphene: A theoretical perspective. *Advances in Physics*, 59(4):261–482.
- Abruña, H. D., Kiya, Y., & Henderson, J. C., (2008). Batteries and electrochemical capacitors. *Physics Today*, 61:43.
- Acharya, J., Raj, B. G. S., Ko, T. H., Khil, M. S., Kim, H. Y., & Kim, B. S., (2020). Facile one pot sonochemical synthesis of CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/MWCNTs hybrids with well-dispersed MWCNTs for asymmetric hybrid supercapacitor applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45:3073–3085.
- Akar, N., Asar, B., Dizge, N., & Koyuncu, I., (2013). Investigation of characterization and biofouling properties of PES membrane containing selenium and copper nanoparticles. *Journal of Membrane Science*, 437:216–226.
- Akbulut, M., D'Addio, S. M., Gindy, M. E., & Prud'homme, R. K., (2014). Novel methods of targeted drug delivery: the potential of multifunctional nanoparticles. *Expert Review of Clinical Pharmacology*, 2(3):265–282.
- Altmann, J., & Ripperger, S., (1997). Particle deposition and layer formation at the crossflow microfiltration. *Journal of Membrane Science*, 124:119–128.
- Angizi, S., Khalaj, M., Alem, S. A. A., Pakdel, A., Willander, M., Hatamie, A., & Simchi, A., (2020). Review—Towards the Two-Dimensional Hexagonal Boron Nitride (2D h-BN) Electrochemical Sensing Platforms. *Journal of The Electrochemical Society*, 167(12): 126513.
- Anticó, E., Vera, R., Vázquez, F., Fontàs, C., Lu, C., & Ros, J., (2021). Preparation and

- Characterization of Nanoparticle-Doped Polymer Inclusion Membranes. Application to the Removal of Arsenate and Phosphate from Waters. *Materials* 2021, 14:878.
- Arya, N., Avasthi, P., & Balakrishnan, V., (2021). A light-fostered supercapacitor performance of multi-layered ReS<sub>2</sub> grown on conducting substrates. *Nanoscale Advances*, 3:2089–2102.
- Aurbach, D., Markovsky, B., Salitra, G., Markevich, E., Talyossef, Y., Koltypin, M., Nazar, L., Ellis, B., & Kovacheva, D., (2007). Review on electrode–electrolyte solution interactions, related to cathode materials for Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 165:491–499.
- Ayranci, R., Başkaya, G., Güzel, M., Bozkurt, S., Şen, F., & Ak, M., (2017). Carbon Based Nanomaterials for High Performance Optoelectrochemical Systems. *ChemistrySelect*, 2(4):1548–1555.
- Azam, M. A., Ramli, N. S. N., Nor, N. A. N. M., & Nawi, T. I. T., (2021). Recent advances in biomass-derived carbon, mesoporous materials, and transition metal nitrides as new electrode materials for supercapacitor: A short review. *International Journal of Energy Research*, 45:8335–8346.
- Bawendi, M. G., Steigerwald, M. L., & Brus, L. E. (2003). The Quantum Mechanics of Larger Semiconductor Clusters (“Quantum Dots”). *Annual Review of Physical Chemistry*, 41(1):477–496.
- Bazin, M. M., Nakamura, Y., & Ahmad, N., (2018). Chemical Cleaning Of Microfiltration Ceramic Membrane Fouled By Nom. *Jurnal Teknologi*, 80:95–103.
- Bell, A. T., (2003). The Impact of Nanoscience on Heterogeneous Catalysis. *Science*, 299(5613):1688–1691.
- Biswas, M. M., Azim, M. S., Saha, T. K., Zobayer, U., Urmi, M. C., Biswas, M. M., Azim, M. S., Saha, T. K., Zobayer, U., & Urmi, M. C., (2013). Towards Implementation of Smart Grid: An Updated Review on Electrical Energy Storage Systems. *Smart Grid and Renewable Energy*, 4:122–132.
- Brunetti, A., Pomilla, F. R., Marci, G., Garcia-Lopez, E. I., Fontananova, E., Palmisano, L., & Barbieri, G., (2019). CO<sub>2</sub> reduction by C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiO<sub>2</sub> Nafion photocatalytic membrane reactor as a promising environmental pathway to solar fuels. *Applied Catalysis B: Environmental*, 255:117779.
- Budak, E., Aykut, S., Paşaoğlu, M. E., & Ünlü, C., (2020). Microwave assisted synthesis of boron and nitrogen rich graphitic quantum dots to enhance

- fluorescence of photosynthetic pigments. *Materials Today Communications*, 24:100975.
- Burke, A., (2000). Ultracapacitors: why, how, and where is the technology. *Journal of Power Sources*, 91:37–50.
- Cha, C., Shin, S. R., Annabi, N., Dokmeci, M. R., & Khademhosseini, A., (2013). Carbon-Based Nanomaterials: Multifunctional Materials for Biomedical Engineering. *ACS Nano*, 7(4):2891–2897.
- Chen, J., Meng, X., Tian, Y., Wang, X., Zhu, J., Zheng, H., & Wang, L., (2020). Fabrication of a superhydrophilic PVDF-g-PAA@FeOOH ultrafiltration membrane with visible light photo-fenton self-cleaning performance. *Journal of Membrane Science*, 616:118587.
- Chen, Q., Zhao, Y., Huang, X., Chen, N., & Qu, L., (2015). Three-dimensional graphitic carbon nitride functionalized graphene-based high-performance supercapacitors. *Journal of Materials Chemistry A*, 3:6761–6766.
- Chen, W., Yu, X., Zhao, Z., Ji, S., & Feng, L., (2019). Hierarchical architecture of coupling graphene and 2D WS<sub>2</sub> for high-performance supercapacitor. *Electrochimica Acta*, 298:313–320.
- Choudhury, B. J., Roy, K., & Moholkar, V. S., (2021). Improvement of Supercapacitor Performance through Enhanced Interfacial Interactions Induced by Sonication. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 60:7611–7623.
- Ciesielski, A., & Samorì, P., (2013). Graphene via sonication assisted liquid-phase exfoliation. *Chemical Society Reviews*, 43:381–398.
- Colombo, M., Carregal-Romero, S., Casula, M. F., Gutiérrez, L., Morales, M. P., Böhm, I. B., Heverhagen, J. T., Prosperi, D., & Parak, W. J., (2012). Biological applications of magnetic nanoparticles. *Chemical Society Reviews*, 41: 4306–4334.
- Conway, B. E., & Pell, W. G., (2003). Double-layer and pseudocapacitance types of electrochemical capacitors and their applications to the development of hybrid devices. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 7:637–644.
- Costa, A., Chiarello, G. L., Selli, E., & Guarino, M., (2012). Effects of TiO<sub>2</sub> based photocatalytic paint on concentrations and emissions of pollutants and on animal performance in a swine weaning unit. *Journal of Environmental Management*, 96: 86–90.
- Dante, R. C., Martín-Ramos, P., Correa-Guimaraes, A., & Martín-Gil, J., (2011). Synthesis of graphitic carbon nitride by reaction of melamine and uric acid.

- Materials Chemistry and Physics*, 130:1094–1102.
- Dharmendra, K., Mitra, S., Mahato, A. C., Nag, A., & Kumar, D., (2021). Various methodologies to improve the energy efficiency of a Compressed Air Energy Storage system. *Energy Storage*, e:315.
- dos Santos, M. C., Maynard, M. C., Aveiro, L. R., da Paz, E. C., & dos Santos Pinheiro, V., (2017). Carbon-Based Materials: Recent Advances, Challenges, and Perspectives. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*.
- Elharati, M. A., (2009). Poly(vinyl alcohol) / polyamide thin-film composite membranes. *undefined*.
- Formoso, P., Pantuso, E., De Filipo, G., & Nicoletta, F. P., (2017). Electro-Conductive Membranes for Permeation Enhancement and Fouling Mitigation: A Short Review. *Membranes*, 7:39.
- Gajanan, K., and Tijare, S. N., (2018). Applications of nanomaterials. *Materials Today: Proceedings*, 5:1093–1096.
- Geim, A. K., and Novoselov, K. S., (2009). The rise of graphene. *Nanoscience and Technology: A Collection of Reviews from Nature Journals*, 11–19.
- Ghosh, S., Calizo, I., Teweldebrhan, D., Pokatilov, E. P., Nika, D. L., Balandin, A. A., Bao, W., Miao, F., & Lau, C. N., (2008). Extremely high thermal conductivity of graphene: Prospects for thermal management applications in nanoelectronic circuits. *Applied Physics Letters*, 92:151911.
- Godin, R., Wang, Y., Zwijnenburg, M. A., Tang, J., & Durrant, J. R., (2017). Time-Resolved Spectroscopic Investigation of Charge Trapping in Carbon Nitrides Photocatalysts for Hydrogen Generation. *Journal of the American Chemical Society*, 139:5216–5224.
- Godwin, H. A., Chopra, K., Bradley, K. A., Cohen, Y., Harthorn, B. H., Hoek, E. M. V., Holden, P., Keller, A. A., Lenihan, H. S., Nisbet, R. M., & Nel, A. E., (2009). The University of California Center for the environmental implications of nanotechnology. *Environmental Science and Technology*, 43:6453–6457.
- Gonzalez-Ortiz, D., Pochat-Bohatier, C., Gassara, S., Cambedouzou, J., Bechelany, M., & Miele, P., (2018). Development of novel h-BNNS/PVA porous membranes via Pickering emulsion templating. *Green Chemistry*, 20:4319–4329.
- Goodenough, J. B., (2013). Electrochemical energy storage in a sustainable modern society. *Energy & Environmental Science*, 7:14–18.
- Hanaor, D. A. H., Ghadiri, M., Chrzanowski, W., & Gan, Y., (2014). Scalable surface

- area characterization by electrokinetic analysis of complex anion adsorption. *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids*, 30:15143–15152.
- Hantel, M. M., Kaspar, T., Nesper, R., Wokaun, A., & Kötz, R., (2011). Partially reduced graphite oxide for supercapacitor electrodes: Effect of graphene layer spacing and huge specific capacitance. *Electrochemistry Communications*, 13:90–92.
- Hao, W., Marichy, C., Journet, C., & Brioude, A., (2017). A Novel Two-Step Ammonia-Free Atomic Layer Deposition Approach for Boron Nitride. *ChemNanoMat*, 3:656–663.
- HARPUTLU, E., (2022). Nanoarchitectonics of the supercapacitor performance of LaNiO<sub>3</sub> perovskite on the graphitic-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> doped reduced graphene oxide hydrogel. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 632:127787.
- Hasija, V., Nguyen, V. H., Kumar, A., Raizada, P., Krishnan, V., Khan, A. A. P., Singh, P., Lichtfouse, E., Wang, C., & Thi Huong, P., (2021). Advanced activation of persulfate by polymeric g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> based photocatalysts for environmental remediation: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 413:125324.
- Healy, M. L., Dahlben, L. J., & Isaacs, J. A., (2008). Environmental Assessment of Single-Walled Carbon Nanotube Processes. *Journal of Industrial Ecology*, 12:376–393.
- Hiraoka, T., Izadi-Najafabadi, A., Yamada, T., Futaba, D. N., Yasuda, S., Tanaike, O., Hatori, H., Yumura, M., Iijima, S., & Hata, K., (2010). Compact and Light Supercapacitor Electrodes from a Surface-Only Solid by Opened Carbon Nanotubes with 2 200 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> Surface Area. *Advanced Functional Materials*, 20:422–428.
- Hu, Chechia, Wang, M. S., Chen, C. H., Chen, Y. R., Huang, P. H., & Tung, K. L., (2019). Phosphorus-doped g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> integrated photocatalytic membrane reactor for wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*, 580:1–11.
- Hu, Cuicui, Yang, Z., Sun, Q., Ni, Z., Yan, G., & Wang, Z., (2020). Facile Preparation of a Superhydrophobic iPP Microporous Membrane with Micron-Submicron Hierarchical Structures for Membrane Distillation. *Polymers*, 12:962.
- Hu, Q., Wujcik, E. K., Kelarakis, A., Cyriac, J., & Gong, X., (2017). Carbon-Based Nanomaterials as Novel Nanosensors. *Journal of Nanomaterials*.
- Huang, S., Ras, R. H. A., & Tian, X., (2018). Antifouling membranes for oily

- wastewater treatment: Interplay between wetting and membrane fouling. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 36:90–109.
- Huang, Z., Zhao, X., Xia, H., Lu, F., Hu, L., & Chu, P. K., (2021). Insights into enhancement of photocatalytic properties of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> by local electric field induced by polarization of MgO(111). *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9: 105922.
- Huo, B., Liu, B., Chen, T., Cui, L., Xu, G., Liu, M., & Liu, J., (2017). One-step synthesis of fluorescent boron nitride quantum dots via a hydrothermal strategy using melamine as nitrogen source for the detection of ferric ions. *Langmuir*, 33(40):10673–10678.
- Huston, M., Debella, M., Dibella, M., & Gupta, A., (2021). Green Synthesis of Nanomaterials. *Nanomaterials*, 11(8):2130.
- Iravani, S. (2011). Green synthesis of metal nanoparticles using plants. *Green Chemistry*, 13(10):2638–2650.
- Iro, Z. S., Subramani, C., & Dash, S. S., (2016). A brief review on electrode materials for supercapacitor. *International Journal of Electrochemical Science*, 11(12):10628–10643.
- Jaumaux, P., Wu, J., Shanmukaraj, D., Wang, Y., Zhou, D., Sun, B., Kang, F., Li, B., Armand, M., & Wang, G., (2021). Non-Flammable Liquid and Quasi-Solid Electrolytes toward Highly-Safe Alkali Metal-Based Batteries. *Advanced Functional Materials*, 31(10):2008644.
- Kerdi, S., Qamar, A., Alpatova, A., Vrouwenvelder, J. S., & Ghaffour, N., (2020). Membrane filtration performance enhancement and biofouling mitigation using symmetric spacers with helical filaments. *Desalination*, 484:114454.
- Khan, A. F., Down, M. P., Smith, G. C., Foster, C. W., & Banks, C. E., (2017). Surfactant-exfoliated 2D hexagonal boron nitride (2D-hBN): role of surfactant upon the electrochemical reduction of oxygen and capacitance applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(8):4103–4113.
- Khan, I., Saeed, K., & Khan, I., (2019). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(7):908–931.
- Kuila, T., Bose, S., Mishra, A. K., Khanra, P., Kim, N. H., & Lee, J. H., (2012). Chemical functionalization of graphene and its applications. *Progress in Materials Science*, 57(7):1061–1105.
- Kumar, R., Singh, R. K., Yadav, S. K., Savu, R., & Moshkalev, S. A., (2016).

- Mechanical pressure induced chemical cutting of boron nitride sheets into boron nitride quantum dots and optical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 683:38–45.
- Kumar, S., Karthikeyan, S., & Lee, A. F., (2018). g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Based Nanomaterials for Visible Light-Driven Photocatalysis. *Catalysts*, 8(2):74.
- Lakhi, K. S., Park, D. H., Al-Bahily, K., Cha, W., Viswanathan, B., Choy, J. H., & Vinu, A., (2017). Mesoporous carbon nitrides: synthesis, functionalization, and applications. *Chemical Society Reviews*, 46(1):72–101.
- Laurent, S., Forge, D., Port, M., Roch, A., Robic, C., Vander Elst, L., & Muller, R. N., (2009). Magnetic Iron Oxide Nanoparticles: Synthesis, Stabilization, Vectorization, Physicochemical Characterizations, and Biological Applications. *Chemical Reviews*, 110(4):2574.
- Lei, W., Portehault, D., Liu, D., Qin, S., & Chen, Y., (2013). Porous boron nitride nanosheets for effective water cleaning. *Nature Communications*, 4(1):1–7.
- Lei, Z., Xu, S., Wan, J., & Wu, P., (2015). Facile preparation and multifunctional applications of boron nitride quantum dots. *Nanoscale*, 7(45):18902–18907.
- Li, D., Zhang, C., Li, B., Cao, F., Wang, S., Liu, K., & Fang, Z., (2012). Low-cost preparation of boron nitride ceramic powders. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 27(3):534–537.
- Li, G., Yang, N., Wang, W., & Zhang, W. F., (2009). Synthesis, photophysical and photocatalytic properties of N-doped sodium niobate sensitized by carbon nitride. *Journal of Physical Chemistry C*, 113(33):14829–14833.
- Li, P., Zhang, S., Lv, Y., Ma, G., & Zuo, X., (2020). Fouling mechanism and control strategy of inorganic membrane. *E3S Web of Conferences*, 194:04047.
- Li, T., Wang, L., Zhang, K., Xu, Y., Long, X., Gao, S., Li, R., & Yao, Y., (2016). Freestanding Boron Nitride Nanosheet Films for Ultrafast Oil/Water Separation. *Small*, 12(36):4960–4965.
- Libich, J., Máca, J., Vondrák, J., Čech, O., & Sedlaříková, M., (2018). Supercapacitors: Properties and applications. *Journal of Energy Storage*, 17:224–227.
- Lin, H. S., & Matsuo, Y., (2018). Functionalization of [60]fullerene through fullerene cation intermediates. *Chemical Communications*, 54(80):11244–11259.
- Lin, R., Li, Z., Abou El Amaiem, D. I., Zhang, B., Brett, D. J. L., He, G., & Parkin, I. P., (2017). A general method for boosting the supercapacitor performance of graphitic carbon nitride/graphene hybrids. *Journal of Materials Chemistry A*,

5(48):25545–25554.

- Liu, B., Yan, S., Song, Z., Liu, M., Ji, X., Yang, W., & Liu, J., (2016). One-Step Synthesis of Boron Nitride Quantum Dots: Simple Chemistry Meets Delicate Nanotechnology. *Chemistry – A European Journal*, 22(52):18899–18907.
- Liu, H., Wu, P., Li, H., Chen, Z., Wang, L., Zeng, X., Zhu, Y., Jiang, Y., Liao, X., Haynes, B. S., Ye, J., Stampfl, C., & Huang, J., (2019). Unravelling the effects of layered supports on Ru nanoparticles for enhancing N<sub>2</sub> reduction in photocatalytic ammonia synthesis. *Applied Catalysis B: Environmental*, 259:118026.
- Liu, J., Zhang, T., Wang, Z., Dawson, G., & Chen, W., (2011). Simple pyrolysis of urea into graphitic carbon nitride with recyclable adsorption and photocatalytic activity. *Journal of Materials Chemistry*, 21(38):14398–14401.
- Liu, Q., Hu, C., & Wang, X., (2019). One-pot solvothermal synthesis of water-soluble boron nitride nanosheets and fluorescent boron nitride quantum dots. *Materials Letters*, 234:306–310.
- Liu, W. T., (2006). Nanoparticles and their biological and environmental applications. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 102(1):1–7.
- Lozano-Castelló, D., Cazorla-Amorós, D., Linares-Solano, A., Shiraishi, S., Kurihara, H., & Oya, A., (2003). Influence of pore structure and surface chemistry on electric double layer capacitance in non-aqueous electrolyte. *Carbon*, 41(9):1765–1775.
- Luo, J., Jang, H. D., & Huang, J., (2013). Effect of sheet morphology on the scalability of graphene-based ultracapacitors. *ACS Nano*, 7(2):1464–1471.
- Luo, W., Wang, Y., Hitz, E., Lin, Y., Yang, B., & Hu, L., (2017). Solution Processed Boron Nitride Nanosheets: Synthesis, Assemblies and Emerging Applications. *Advanced Functional Materials*, 27(31):1701450.
- Ma, S., Zhan, S., Jia, Y., Shi, Q., & Zhou, Q., (2016). Enhanced disinfection application of Ag-modified g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composite under visible light. *Applied Catalysis B: Environmental*, 186:77–87.
- Ma, Y., Zhou, C., Yu, B., Chen, M., & Wang, C., (2019). Study on Preparation and Electrochemical Properties of Biomass-Derived Spherical Activated Carbon. <http://www.sciencepublishinggroup.com>, 4(4):26.
- Mahanta, U., Choudhury, S., Venkatesh, R. P., Sarojiniamma, S., Ilangoan, S. A., & Banerjee, T., (2020). Ionic-Liquid-Based Deep Eutectic Solvents as Novel Electrolytes for Supercapacitors: COSMO-SAC Predictions, Synthesis, and Characterization. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 8(1):372–381.

- Majety, S., Cao, X. K., Dahal, R., Pantha, B. N., Li, J., Lin, J. Y., & Jiang, H. X., (2012). Semiconducting hexagonal boron nitride for deep ultraviolet photonics. *Quantum Sensing and Nanophotonic Devices IX*:8268.
- Mallakpour, S., & Soltanian, S., (2016). Surface functionalization of carbon nanotubes: fabrication and applications. *RSC Advances*, 6(111):109916–109935.
- Mamba, G., & Mishra, A. K., (2016). Graphitic carbon nitride (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) nanocomposites: A new and exciting generation of visible light driven photocatalysts for environmental pollution remediation. *Applied Catalysis B: Environmental*, 198:347–377.
- Mauter, M. S., & Elimelech, M., (2008). Environmental Applications of Carbon-Based Nanomaterials. *Environmental Science and Technology*, 42(16):5843–5859.
- Meng, F., Chae, S. R., Drews, A., Kraume, M., Shin, H. S., & Yang, F., (2009). Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): Membrane fouling and membrane material. *Water Research*, 43(6):1489–1512.
- Mengenai, U., Sisa, R., Menggunakan, M. M., Membran, T., Berbanding, P., Konvensional, T., Nazirah, S., Ikhsan, W., Yusof, N., Aziz, F., & Misdan, N., (2017). Malaysian Journal Of Analytical Sciences A Review Of Oilfield Wastewater Treatment Using Membrane Filtration Over Conventional Technology. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 21:643–658.
- Mofijur, M., Mahlia, T. M. I., Silitonga, A. S., Ong, H. C., Silakhori, M., Hasan, M. H., Putra, N., & Ashrafur Rahman, S. M., (2019). Phase Change Materials (PCM) for Solar Energy Usages and Storage: An Overview. *Energies*, 12(16):3167.
- Munirasu, S., Haija, M. A., & Banat, F., (2016). Use of membrane technology for oil field and refinery produced water treatment—A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 100:183–202.
- Murray, C. B., Norris, D. J., & Bawendi, M. G., (2002). Synthesis and characterization of nearly monodisperse CdE (E = sulfur, selenium, tellurium) semiconductor nanocrystallites. *Journal of the American Chemical Society*, 115(19):8706–8715.
- Mussa, Y., Ahmed, F., Arsalan, M., & Alsharaeh, E., (2020). Two dimensional (2D) reduced graphene oxide (RGO)/hexagonal boron nitride (h-BN) based nanocomposites as anodes for high temperature rechargeable lithium-ion batteries. *Scientific Reports 2020 10:1*, 10(1):1–13.
- Muzaffar, A., Ahamed, M. B., Deshmukh, K., & Thirumalai, J., (2019). A review on recent advances in hybrid supercapacitors: Design, fabrication and applications.

- Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101:123–145.
- Nadeem, K., Guyer, G. T., Keskinler, B., & Dizge, N., (2019). Investigation of segregated wastewater streams reusability with membrane process for textile industry. *Journal of Cleaner Production*, 228:1437–1445.
- Nicholson, R. S., (2002). Theory and Application of Cyclic Voltammetry for Measurement of Electrode Reaction Kinetics. *Analytical Chemistry*, 37(11):1351–1355.
- Njoya, O., Zhao, S., Kong, X., Shen, J., Kang, J., Wang, B., & Chen, Z., (2021). Efficiency and potential mechanism of complete Cr(VI) removal in the presence of oxalate by catalytic reduction coupled with membrane filtration. *Separation and Purification Technology*, 275:118915.
- Oe, T., Koide, H., Hirokawa, H., & Okukawa, K. (1996). Performance of membrane filtration system used for water treatment. *Desalination*, 106(1–3):107–113.
- Ozbey-Unal, B., Omwene, P. I., Yagcioglu, M., Balcik-Canbolat, Ç., Karagunduz, A., Keskinler, B., & Dizge, N., (2020). Treatment of organized industrial zone wastewater by microfiltration/reverse osmosis membrane process for water recovery: From lab to pilot scale. *Journal of Water Process Engineering*, 38:101646.
- Palanivel, B., Mudisoodum perumal, S. devi, Maiyalagan, T., Jayarman, V., Ayyappan, C., & Alagiri, M., (2019). Rational design of ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nanocomposite for enhanced photo-Fenton reaction and supercapacitor performance. *Applied Surface Science*, 498:143807.
- Peining, Z., Nair, A. S., Shengyuan, Y., & Ramakrishna, S., (2011). TiO<sub>2</sub>-MWCNT rice grain-shaped nanocomposites—Synthesis, characterization and photocatalysis. *Materials Research Bulletin*, 46(4):588–595.
- Pendergast, M. M., & Hoek, E. M. V., (2011). A review of water treatment membrane nanotechnologies. *Energy & Environmental Science*, 4(6):1946–1971.
- Poh, T. Y., Ali, N. A. T. B. M., Mac Aogáin, M., Kathawala, M. H., Setyawati, M. I., Ng, K. W., & Chotirmall, S. H., (2018). Inhaled nanomaterials and the respiratory microbiome: clinical, immunological and toxicological perspectives. *Particle and Fibre Toxicology*, 15(1):1–16.
- Pouretedal, H. R., Keshavarz, M. H., Yosefi, M. H., Shokrollahi, A., & Zali, A., (2009). Photodegradation of HMX and RDX in the Presence of Nanocatalyst of Zinc Sulfide Doped with Copper. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical*

- Engineering (IJCCE)*, 28(4):13–19.
- Qin, D., Jiang, X., Mo, G., Feng, J., & Deng, B., (2020). Boron nitride quantum dots as electrochemiluminescence coreactants of rGO@Au@Ru–SiO<sub>2</sub> for label-free detection of AFP in human serum. *Electrochimica Acta*, 335:135621.
- Rafiee, M. A., Rafiee, J., Srivastava, I., Wang, Z., Song, H., Yu, Z. Z., & Koratkar, N., (2010). Fracture and fatigue in graphene nanocomposites. *Small*, 6(2):179–183.
- Ragupathi, V., Panigrahi, P., & Ganapathi Subramaniam, N., (2019). g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> doped MnS as high performance electrode material for supercapacitor application. *Materials Letters*, 246:88–91.
- Raidongia, K., Gomathi, A., & Rao, C. N. R., (2010). Synthesis and Characterization of Nanoparticles, Nanotubes, Nanopans, and Graphene-like Structures of Boron Nitride. *Israel Journal of Chemistry*, 50(4):399–404.
- Rajendran, J., Reshetilov, A. N., & Sundramoorthy, A. K., (2021). Preparation of hybrid paper electrode based on hexagonal boron nitride integrated graphene nanocomposite for free-standing flexible supercapacitors. *RSC Advances*, 11(6):3445–3451.
- Ray, S. S., Bakshi, H. S., Dangayach, R., Singh, R., Deb, C. K., Ganesapillai, M., Chen, S. S., & Purkait, M. K., (2020). Recent Developments in Nanomaterials-Modified Membranes for Improved Membrane Distillation Performance. *Membranes*10(7):140.
- Reddy, B. J., Vickraman, P., & Justin, A. S., (2019). Microwave synthesis of MoO<sub>3</sub> - reduced graphene oxide nanocomposite for high performance asymmetric supercapacitors. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30(4):3618–3628.
- Robert, D., Keller, N., & Selli, E., (2017). Environmental photocatalysis and photochemistry for a sustainable world: a big challenge. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(14):12503–12505.
- Rogers, R. E., & Martin, S. M., (2021). Carbon nanomaterials and their impact on membrane separation applications. *Environmental Science: Nano*, 8(11):3056–3066.
- Sahay, R., Reddy, V. J., & Ramakrishna, S., (2014). Synthesis and applications of multifunctional composite nanomaterials. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 9(1):1–13.
- Salata, O. V., (2004). Applications of nanoparticles in biology and medicine. *Journal of*

- Nanobiotechnology*, 2(1):1–6.
- Saleh, T. A., (2020). Nanomaterials: Classification, properties, and environmental toxicities. *Environmental Technology & Innovation*, 20:101067.
- Science Electromagnetic Spectrum Diagram Stock Vector - Illustration of clipart, electromagnetic: 212857549. (2021). <https://www.dreamstime.com/science-electromagnetic-spectrum-diagram-illustration-image212857549>.
- Seaton, A., Tran, L., Aitken, R., & Donaldson, K., (2010). Nanoparticles, human health hazard and regulation. *Journal of The Royal Society Interface*, 7
- Sert, B., Gonca, S., Ozay, Y., Harputlu, E., Ozdemir, S., Ocakoglu, K., & Dizge, N., (2021). Investigation of the antifouling properties of polyethersulfone ultrafiltration membranes by blending of boron nitride quantum dots. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 205:111867.
- Sert, B., Ozay, Y., Harputlu, E., Ozdemir, S., Yalcin, M. S., Ocakoglu, K., & Dizge, N., (2021). Improvement in performance of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nanosheets blended PES ultrafiltration membranes including biological properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 623:126571.
- Shcherban, N. D., Mäki-Arvela, P., Aho, A., Sergiienko, S. A., Yaremov, P. S., Eränen, K., & Murzin, D. Y., (2018). Melamine-derived graphitic carbon nitride as a new effective metal-free catalyst for Knoevenagel condensation of benzaldehyde with ethylcyanoacetate. *Catalysis Science & Technology*, 8(11):2928–2937.
- Shevlin, S. A., & Guo, Z. X., (2016). Anionic Dopants for Improved Optical Absorption and Enhanced Photocatalytic Hydrogen Production in Graphitic Carbon Nitride. *Chemistry of Materials*, 28(20):7250–7256.
- Simon, P., & Gogotsi, Y., (2009). Materials for electrochemical capacitors. *Nanoscience and Technology: A Collection of Reviews from Nature Journals*, 320–329.
- Sioutopoulos, D., Karabelas, A., & Mappas, V., (2019). Membrane Fouling Due to Protein—Polysaccharide Mixtures in Dead-End Ultrafiltration; the Effect of Permeation Flux on Fouling Resistance. *Membranes*, 9(2):21.
- Staniskis, J. K., & Stasiskiene, Z., (2006). Environmental management accounting in Lithuania: exploratory study of current practices, opportunities and strategic intents. *Journal of Cleaner Production*, 14(14):1252–1261.
- Tang, C. Y., Chong, T. H., & Fane, A. G., (2011). Colloidal interactions and fouling of NF and RO membranes: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 164(1–2):126–143.

- Theis, T. L., Bakshi, B. R., Durham, D., Fthenakis, V. M., Gutowski, T. G., Isaacs, J. A., Seager, T., & Wiesner, M. R., (2011). A life cycle framework for the investigation of environmentally benign nanoparticles and products. *Phys. Status Solidi RRL* :1–6.
- Thostenson, E. T., Ren, Z., & Chou, T.-W. (2021). *Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review*.
- Umrao, S., Maurya, A. K., Shukla, V., Grigoriev, A., Ahuja, R., Vinayak, M., Srivastava, R. R., Saxena, P. S., Oh, I. K., & Srivastava, A., (2019). Anticarcinogenic activity of blue fluorescent hexagonal boron nitride quantum dots: as an effective enhancer for DNA cleavage activity of anticancer drug doxorubicin. *Materials Today Bio*, 1:100001.
- Vangari, M., Pryor, T., & Jiang, L., (2012). Supercapacitors: Review of Materials and Fabrication Methods. *Journal of Energy Engineering*, 139(2):72–79.
- Vildoza, D., Ferronato, C., Sleiman, M., & Chovelon, J. M., (2010). Photocatalytic treatment of indoor air: Optimization of 2-propanol removal using a response surface methodology (RSM). *Applied Catalysis B: Environmental*, 94(3–4):303–310.
- Wang, D. Y., Song, Y. P., Wang, J. S., Ge, X. G., Wang, Y. Z., Stec, A. A., & Richard Hull, T., (2009). Double in situ approach for the preparation of polymer nanocomposite with multi-functionality. *Nanoscale Research Letters*, 4(4):303–306.
- Wang, L. S., & Hong, R. Y. (2021). *Synthesis, Surface Modification and Characterisation of Nanoparticles*.
- Wang, X., Yin, Y., Li, M., & Hu, Y., (2020). Hexagonal boron Nitride@ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> hybrid nanosheet: An ecofriendly flame retardant for polyvinyl alcohol. *Journal of Solid State Chemistry*, 287:121366.
- Wang, Y., & Xia, Y., (2004). Bottom-Up and Top-Down Approaches to the Synthesis of Monodispersed Spherical Colloids of Low Melting-Point Metals. *Nano Letters*, 4(10): 2047–2050.
- Wang, Z., Ma, J., Tang, C. Y., Kimura, K., Wang, Q., & Han, X., (2014). Membrane cleaning in membrane bioreactors: A review. *Journal of Membrane Science*, 468:276–307.
- Weber, M., Iatsunskyi, I., Coy, E., Miele, P., Cornu, D., & Bechelany, M., (2018). Novel and Facile Route for the Synthesis of Tunable Boron Nitride Nanotubes

- Combining Atomic Layer Deposition and Annealing Processes for Water Purification. *Advanced Materials Interfaces*, 5(16):1800056.
- Wen, J., Xie, J., Chen, X., & Li, X., (2017). A review on g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-based photocatalysts. *undefined*, 391:72–123.
- Winter, M., & Brodd, R. J., (2004). What Are Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors? *Chemical Reviews*, 104(10):4245–4269.
- Wu, Y., Wang, T., Zhang, Y., Xin, S., He, X., Zhang, D., & Shui, J., (2016). Electrocatalytic performances of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-LaNiO<sub>3</sub> composite as bi-functional catalysts for lithium-oxygen batteries. *Scientific Reports*, 6(1):1–8.
- Xiang, Q., Li, F., Zhang, D., Liao, Y., & Zhou, H., (2019). Plasma-based surface modification of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nanosheets for highly efficient photocatalytic hydrogen evolution. *Applied Surface Science*, 495:143520.
- Xie, X. B., Hou, C., Wu, D., Sun, X., Yang, X., Zhang, Y., Yu, R., Zhang, S., Kimura, H., & Du, W., (2022). Facile synthesis of various Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/bio-activated carbon electrodes for hybrid capacitor device application. *Journal of Alloys and Compounds*, 891:161967.
- Xu, Z., Sun, S., Han, Y., Wei, Z., Cheng, Y., Yin, S., & Cui, W., (2020). High-Energy-Density Asymmetric Supercapacitor Based on a Durable and Stable Manganese Molybdate Nanostructure Electrode for Energy Storage Systems. *ACS Applied Energy Materials*, 3(6):5393–5404.
- Yoon, S. I., Ma, K. Y., Kim, T. Y., & Shin, H. S., (2020). Proton conductivity of a hexagonal boron nitride membrane and its energy applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 8(6):2898–2912.
- Yu, H., Zhang, B., Bulin, C., Li, R., & Xing, R., (2016). High-efficient Synthesis of Graphene Oxide Based on Improved Hummers Method. *Scientific Reports*, 6.
- Yu, S., Wang, X., Pang, H., Zhang, R., Song, W., Fu, D., Hayat, T., & Wang, X., (2018). Boron nitride-based materials for the removal of pollutants from aqueous solutions: A review. *Chemical Engineering Journal*, 333:343–360.
- Yue, B., Li, Q., Iwai, H., Kako, T., & Ye, J., (2011). Hydrogen production using zinc-doped carbon nitride catalyst irradiated with visible light. 12(3):034401.
- Zeng, X., Li, J., & Singh, N., (2014). Recycling of Spent Lithium-Ion Battery: A Critical Review, 44(10):1129–1165.
- Zhang, D., Li, L., Deng, J., Guo, S., Pang, H., Lu, J., Xia, D., & Ji, X., (2021). A new type of zinc ion hybrid supercapacitor based on 2D materials. *Nanoscale*,

- 13(25):11004–11016.
- Zhang, M., Yang, Y., An, X., & Hou, L. an., (2021). A critical review of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-based photocatalytic membrane for water purification. *Chemical Engineering Journal*, 412:128663.
- Zhang, Y., Wei, S., Hu, Y., & Sun, S., (2018). Membrane technology in wastewater treatment enhanced by functional nanomaterials. *Journal of Cleaner Production*, 197:339–348.
- Zhang, Y. X., Li, K., Yu, Y. X., & Zhang, W. De., (2018). Carbon nanotubes-modified graphitic carbon nitride photocatalysts with synergistic effect of nickel(II) sulfide and molybdenum(II) disulfide co-catalysts for more efficient H<sub>2</sub> evolution. *Journal of Colloid and Interface Science*, 526:374–383.
- Zhang, Y., Yuan, J., Ding, Y., Liu, B., Zhao, L., & Zhang, S. (2021). Research progress on g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-based photocatalysts for organic pollutants degradation in wastewater: From exciton and carrier perspectives. *Ceramics International*, 47(22): 31005–31030.
- Zhao, B., Chen, D., Xiong, X., Song, B., Hu, R., Zhang, Q., Rainwater, B. H., Waller, G. H., Zhen, D., Ding, Y., Chen, Y., Qu, C., Dang, D., Wong, C. P., & Liu, M., (2017). A high-energy, long cycle-life hybrid supercapacitor based on graphene composite electrodes. *Energy Storage Materials*, 7:32–39.  
<https://doi.org/10.1016/J.ENSM.2016.11.010>
- Zhao, H., Chen, S., Quan, X., Yu, H., & Zhao, H., (2016). Integration of microfiltration and visible-light-driven photocatalysis on g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nanosheet/reduced graphene oxide membrane for enhanced water treatment. *Applied Catalysis B: Environmental*, 194:134–140.
- Zhao, W., Huang, Y., Su, C., Gao, Y., Tian, W., & Yang, X., (2020). Fabrication of magnetic and recyclable In<sub>2</sub>S<sub>3</sub>/ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanocomposites for visible light photocatalytic activity enhancement. *Materials Research Express*, 7(1):015080.
- Zhao, X., You, Y., Ma, Y., Meng, C., Zhang, Z., (2021). Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/W<sub>18</sub>O<sub>49</sub> hybrid membrane with visible-light-driven photocatalytic ability for selective dye separation. *Separation and Purification Technology*, 282:120145.
- Zheng, Jingxuan, Zhang, B., & Wang, Z., (2020). Electron-assisted synthesis of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/MoS<sub>2</sub> composite with dual defects for enhanced visible-light-driven photocatalysis. *RSC Advances*, 11(1):78–86.
- Zheng, Junjian, Wang, Z., Ma, J., Xu, S., & Wu, Z., (2018). Development of an

- Electrochemical Ceramic Membrane Filtration System for Efficient Contaminant Removal from Waters. *Environmental Science and Technology*, 52(7):4117–4126.
- Zhou, Q., Zhang, L., & Wu, H., (2017). Nanomaterials for cancer therapies. *Nanotechnology Reviews*, 6(5):473–496.
- Zhu, Q., Li, J., Simon, P., & Xu, B., (2021). Two-dimensional MXenes for electrochemical capacitor applications: Progress, challenges and perspectives. *Energy Storage Materials*, 35:630–660.

## ÖZGEÇMİŞ

**Adı ve Soyadı** : BUSE SERT

**Doğum Tarihi** :

**E-mail** :

**Öğrenim Durumu** : Yüksek Lisans

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lisans	Enerji Sistemleri Mühendisliği	Mersin Üniversitesi	2015-2019
Yüksek Lisans	Enerji Sistemleri Mühendisliği	Tarsus Üniversitesi	2019-2022

### ESERLER (Makaleler ve Bildiriler)

1. Improvement in Performance of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Nanosheets Blended PES Ultrafiltration Membranes Including Biological Properties
2. Investigation of the Antifouling Properties of Polyethersulfone Ultrafiltration Membranes by Blending of Boron Nitride Quantum Dots
3. Synthesis and Characterization of Heterogeneous Photocatalyst Comprised of ZnO Decorated g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> for Photocatalytic Decolorization of Crystal Violet Dye (yayınlanma sürecinde.)