



T.C.

HİTİT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

KİMYA MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**GRAFENİN UZUN SÜRELİ MAKRODİSPERSİYONUNA YÜZEY
AKTİF MADDELERİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

İsmail KARABEKMEZ

Çorum - 2025

**GRAFENİN UZUN SÜRELİ MAKRODİSPERSİYONUNA YÜZEY AKTİF
MADDELERİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

İsmail KARABEKMEZ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Kimya Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Yüksek Lisans Tezi

TEZ DANIŞMANI

Doç. Dr. Filiz BORAN

Çorum - 2025



T.C.
HİTİT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ONAYI

ÖĞRENCİNİN

Adı ve Soyadı : İsmail KARABEKMEZ
Numarası : 220443002
Ana Bilim Dalı : Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Programı : Tezli Yüksek Lisans Programı
Danışmanı : Doç. Dr. Filiz BORAN
Tez Savunma Tarihi : 30.09.2025 **Saati**: 10:30
Tez Başlığı : Grafenin Uzun Süreli Makrodispersiyonuna Yüzey Aktif Maddelerin Etkisinin İncelenmesi

Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim Yönetmeliği'nin **9. maddesi** uyarınca, yapılmış olan tez savunma sınavı sonunda adayın tezinin **KABULÜNE OY BİRLİĞİ** ile karar verilmiştir.

TEZ SAVUNMA SINAV JÜRİSİ		KARAR	
Ünvanı Adı ve Soyadı	Görevi	Kabul	Ret
Prof. Dr. Ayşegül Ülkü METİN	Jüri Başkanı	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Doç.Dr. Filiz BORAN	Tez Danışmanı	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Prof.Dr. Erol ALVER	Üye	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Prof. Dr. Osman ÇUBUK

Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan ederim.

İsmail KARABEKMEZ



GRAFENİN UZUN SÜRELİ MAKRODİSPERSİYONLARINA YÜZEY AKTİF MADDELERİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

İsmail KARABEKMEZ

ORCID: 0009-0000-5717-3429

HİTİT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Yüksek Lisans Tezi

Kasım 2025

ÖZET

Grafen bazlı nanoakışkanlar; olağanüstü termal, elektriksel ve mekanik özellikleri sayesinde son yıllarda çok çeşitli bilimsel ve teknolojik alanlarda önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bu nanoakışkanlar, yüksek yüzey alanı ve benzersiz yapı özellikleri sayesinde enerji depolama, elektronik, biyomedikal uygulamalar ve ısı transferi gibi pek çok alanda potansiyel çözümler sunmaktadır. Ancak grafenin sulu ortamda kararlı dispersiyonlarının elde edilmesi, bu materyalin pratik uygulamalarda kullanılabilirliğini doğrudan etkileyen kritik bir faktördür.

Bu çalışmada, grafenin su ortamında farklı yüzey aktif maddeler kullanılarak stabil dispersiyonlarının hazırlanması ve karakterizasyonu amaçlanmıştır. Katyonik yüzey aktif maddeler olan didodesildimetilamonyum bromür ve setilpiridinyum bromür, grafen parçacıklarının su içinde homojen şekilde dağılmasını sağlayarak fiziksel stabiliteyi artırmada rol oynamıştır. Hazırlanan dispersiyonların stabilitesi ve özellikleri, UV-VIS spektroskopisi, zeta potansiyel ölçümleri, zeta boyut analizi, X-ışını kırınımı, Raman spektroskopisi ve geçirimli elektron mikroskobu gibi ileri karakterizasyon teknikleri kullanılarak kapsamlı biçimde incelenmiştir. Ayrıca, bu grafen dispersiyonlarının farklı bakteriyel türler üzerindeki antimikrobiyal etkileri de değerlendirilmiş, böylece materyalin biyomedikal uygulamalar açısından taşıdığı potansiyel incelenmiştir.

Anahtar Kavramlar: Grafen, dispersiyon, yüzey aktif madde, makrodağılım, nanoakışkan

Bilim Kodu: 91215

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SURFACTANTS ON THE LONG-TERM MACRODISPERSION OF GRAPHENE

İsmail KARABEKMEZ

ORCID: 0009-0000-5717-3429

HITIT UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL

Master of Science Thesis

November 2025

ABSTRACT

Graphene-based nanofluids have become a significant research topic in various scientific and technological fields in recent years due to their exceptional thermal, electrical, and mechanical properties. These nanofluids offer potential solutions in numerous areas such as energy storage, electronics, biomedical applications, and heat transfer, owing to their high surface area and unique structural properties. However, obtaining stable dispersions of graphene in aqueous media is a critical factor that directly affects the material's usability in practical applications.

In this study, the preparation and characterization of stable graphene dispersions in water using different surfactants were aimed. Cationic didodecyldimethylammonium bromide and cetylpyridinium bromide surfactants played a role in enhancing the physical stability by enabling the homogeneous distribution of graphene particles in the aqueous medium. The stability and properties of the prepared dispersions were comprehensively analyzed using advanced characterization techniques such as UV-VIS spectroscopy, zeta potential measurements, zeta-sizer analysis, X-ray diffraction, Raman spectroscopy, and transmission electron microscopy. Additionally, the antimicrobial effects of these graphene dispersions on different bacterial species were evaluated, revealing the material's potential for biomedical applications.

Key Terms: Graphene, dispersion, surfactant, macrodispersion, nanofluid

Science Code: 91215

TEŐEKKÖR

Tez çalıőmam sırasında bilgi ve birikimleri ile beni destekleyen tez danıőmanım Doç. Dr. Filiz BORAN'a, Kimya Mühendisliği Öğretim Üyesi Doç. Dr. Erol ALVER'e, lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca bana yol gösteren ve ışık tutan Hitit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümündeki tüm hocalarıma sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca manevi destekleri ile güç bulduğum sevgili aileme saygı ve hürmetlerimi sunarım.

İsmail KARABEKMEZ



Bu tez çalışması, MUHMİTEK19004.24.003 (MİTEK) numaralı proje kapsamında, Yükseköğretim Kurulu (YÖK) koordinasyonunda yürütülen “Bölgesel Kalkınma Odaklı Misyon Farklılaşması ve İhtisaslaşması Programı” çerçevesinde, T.C. Hitit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BAP) tarafından desteklenmiştir. Bu süreçte verdikleri kıymetli katkılar için Hitit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne ve proje ekibine teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
TABLolar DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER

1.1. Nanomalzemeler	3
1.2. Karbon nanomalzemeler	4
1.2.1. Grafen	5
1.2.2. Grafen oksit	6
1.2.3. Fulleren	7
1.2.4. Karbon nanotüp	9
1.3. Yüzey Aktif Maddeler	9
1.4. Nanoakışkanlar	11
1.4.1. Grafen nanoakışkanlar	16
1.5. Literatür Özeti	18

2. BÖLÜM

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Kullanılan Kimyasal Maddeler	23
2.2. Yöntem	23
2.2.1. Grafen nano-mikro sulu dispersiyonlarının hazırlanması	23

2.2.2. Makrodağılım testi ve optik özelliklerinin belirlenmesi	23
2.2.3. Grafen nano-mikro sulu dispersiyon ürünlerinin yapısal ve morfolojik karakterizasyonu	24
2.2.4. Grafen nano-mikro sulu dispersiyon ürünlerinin antimikrobiyal etkinliklerinin belirlenmesi.....	24

3. BÖLÜM

DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Grafen Nano-Mikro Sulu Dispersiyon Örnekleri Hazırlanmasında DDAB'nin Etkisi.....	26
3.1.1. UV-VIS analizi ve makro dağılım derecelerinin belirlenmesi	26
3.1.2. Zeta potansiyel ve zeta boyut analizi.....	30
3.1.3. TEM analizi.....	32
3.1.4. XRD analizi	33
3.1.5. Raman analizi.....	34
3.2. Grafen Nano-Mikro Sulu Dispersiyon Örnekleri Hazırlanmasında CPB'nin Etkisi.....	35
3.2.1. Zeta potansiyel ve zeta boyut analizi.....	36
3.2.2. TEM analizi.....	37
3.2.3. XRD analizi	38
3.2.4. Raman analizi.....	39
3.3. Optimize Grafen Nano-Mikro Sulu Dispersiyon Örneklerinin Antimikrobiyal Aktiviteleri	40
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	46
KAYNAKÇA.....	48

TABLULAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
Tablo 1.1. Karbon nanomalzemelerin boyutlarına göre sınıflandırılması Liu ve Speranza, 2019'dan uyarlanmıştır	5
Tablo 1.2. Fulleren çeşitleri. Bai vd., 2019'dan uyarlanmıştır.....	8
Tablo 1.3. Nanoakışkanlar hakkında yapılan bazı çalışmaların karşılaştırılması.....	15
Tablo 3.1. DDAB kullanılarak ve kullanılmadan hazırlanan "Grafen nano-mikro sulu dispersiyon" örneklerinin Raman spektrum verileri	35
Tablo 3.2. CPB kullanılarak ve kullanılmadan hazırlanan "Grafen nano-mikro sulu dispersiyon" örneklerinin Raman spektrum verileri	40
Tablo 3.3. DDAB, CPB kullanılarak ve kullanılmadan hazırlanan "Grafen nano-mikro sulu dispersiyon" örneklerinin ve antibiyotiklerin patojen mikroorganizmalara karşı inhibisyon zon ölçümleri	42

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Nanomalzemelerin endüstride kullanım alanları Kurwadkar vd., 2014'den uyarlanmıştır.....	4
Şekil 1.2. Dört adımlı Hummers reaksiyonu	6
Şekil 1.3. Tek aşamalı nanoakışkan üretim yöntemlerinden biri olan lazer ile uzaklaştırma yöntemi	12
Şekil 1.4. İki aşamalı nanoakışkan üretim yöntemlerinden biri olan sonikasyon ile üretim yöntemi	13
Şekil 3.1. DDAB kullanılarak hazırlanan "Grafen nano-mikro sulu dispersiyon" örneklerinin santrifüjden hemen sonra ölçülen UV-VIS absorpsiyon spektrumları.....	27
Şekil 3.2. DDAB kullanılarak hazırlanan "Grafen nano-mikro sulu dispersiyon" örneklerinin makro dağılım dereceleri.....	28
Şekil 3.3. DDAB kullanılarak hazırlanan "Grafen nano-mikro sulu dispersiyon" örneklerinin fotografik görüntüleri.....	29
Şekil 3.4. DDAB kullanılarak hazırlanan "Grafen nano-mikro sulu dispersiyon" örneklerinin Tauc grafikleri ve tahmini bant aralıkları.....	30
Şekil 3.5. DDAB kullanılarak hazırlanan "Grafen nano-mikro sulu dispersiyon" örneklerinin zeta potansiyelleri.....	31
Şekil 3.6. DDAB kullanılarak hazırlanan "Grafen nano-mikro sulu dispersiyon" örneklerinin zeta boyut analiz sonuçları	32
Şekil 3.7. DDAB kullanılarak ve kullanılmadan hazırlanan "Grafen nano-mikro sulu dispersiyon" örneklerinin TEM görüntüleri	33
Şekil 3.8. DDAB kullanılarak ve kullanılmadan hazırlanan "Grafen nano-mikro sulu dispersiyon" örneklerinin XRD grafikleri.....	34
Şekil 3.9. DDAB kullanılarak ve kullanılmadan hazırlanan "Grafen nano-mikro sulu dispersiyon" örneklerinin Raman spektrumları	35
Şekil 3.10. CPB kullanılarak hazırlanan "Grafen nano-mikro sulu dispersiyon" örneklerinin fotografik görüntüleri.....	36
Şekil 3.11. CPB kullanılarak hazırlanan "Grafen nano-mikro sulu dispersiyon" örneklerinin zeta boyut analiz sonucu	37

Şekil	Sayfa
Şekil 3.12. CPB kullanılarak ve kullanılmadan hazırlanan “Grafen nano-mikro sulu dispersiyon” örneklerinin TEM görüntüleri	38
Şekil 3.13. CPB kullanılarak ve kullanılmadan hazırlanan “Grafen nano-mikro sulu dispersiyon” örneklerinin XRD grafikleri.....	39
Şekil 3.14. CPB kullanılarak ve kullanılmadan hazırlanan “Grafen nano-mikro sulu dispersiyon” örneklerinin Raman spektrumları	40
Şekil 3.15. Saf suyun patojen mikroorganizmalara karşı inhibisyon görüntüleri	42
Şekil 3.16. Sürfaktan kullanılmadan hazırlanan “Grafen nano-mikro sulu dispersiyon” örneğinin patojen mikroorganizmalara karşı inhibisyon görüntüleri.....	43
Şekil 3.17. İmipenemin patojen mikroorganizmalara karşı inhibisyon görüntüleri.....	43
Şekil 3.18. Tetrasiklinin patojen mikroorganizmalara karşı inhibisyon görüntüleri.....	44
Şekil 3.19. DDAB kullanılarak hazırlanan “Grafen nano-mikro sulu dispersiyon” örneğinin patojen mikroorganizmalara karşı inhibisyon görüntüleri	44
Şekil 3.20. CPB kullanılarak hazırlanan “Grafen nano-mikro sulu dispersiyon” örneğinin patojen mikroorganizmalara karşı inhibisyon görüntüleri.....	45

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A°	Angström
$Aa(\lambda)$	Santrifüjden Sonraki Absorbans
$Ab(\lambda)$	Santrifüjden Önceki Absorbans
$CuK\alpha$	Bakır (Cu) anodu kullanılarak elde edilen karakteristik K alfa ($K\alpha$) X-ışını dalga boyu
D_p	Parçacıkların Ortalama Boyutu
E_g	Optik Enerji Bant Aralığı
h	Planck Sabiti ($6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$)
I_D	D Bandı Şiddeti
I_G	G Bandı Şiddeti
I_{2D}	2D Bandı Şiddeti
K	Scherrer Sabiti (0,94)
α	Absorpsiyon Katsayısı
λ	Dalga Boyu
ν	Fotonun Frekansı

Kısaltmalar

AFG	Alkali Fonksiyonelleştirilmiş Grafen
CNT	Karbon Nanotüp
CPB	Setilpiridinyum Bromür
CTAB	Setiltrimetilamonyum Bromür
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
DANSS	Daldırılmış Ark Nanoparçacık Sentez Sistemi
DDAB	Didodesildimetilamonyum Bromür
DTAB	Dodesiltrimetilamonyum Bromür
GO	Grafen Oksit
G/S	Grafen Stabilizatör Oranı
GO-SDS	Sodyum Dodesil Sülfat ile Modifiye Edilmiş Grafen Oksit
HTAB	Heksadesiltrimetilamonyum Bromür
NMP	N-Metil-2-Pirolidon
PVA	Polivinil Alkol
rGO	İndirgenmiş Grafen Oksit
SDBS	Sodyum Dodesil Benzen Sülfonat
SDS	Sodyum Dodesil Sülfat
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TEM	Geçirimli Elektron Mikroskobu
TiO ₂	Titanyum Dioksit
UV	Ultraviyole
UV-VIS	Ultraviyole Görünür Spektroskopisi
XRD	X-Işını Difraksiyon Spektroskopisi

GİRİŞ

Grafen, olağanüstü fiziksel ve kimyasal özellikleri sayesinde elektronik, enerji depolama, biyomedikal ve çevresel uygulamalar gibi pek çok alanda büyük bir potansiyele sahiptir. Grafenin yüksek mekanik dayanımı, elektriksel iletkenliği ve termal kararlılığı sayesinde nanoteknoloji biliminde yeni bir sayfa açılmıştır. Ancak, grafenin hidrofobik yapısı nedeniyle sulu ortamlarda homojen ve uzun süreli dağılımı sınırlıdır ve bu durum endüstriyel ölçekte üretim ve tüketimini kısıtlamaktadır. Bu sorunun aşılması için dispersiyon stabilitesinin sağlanması elzemdir (Geim ve Novoselov, 2007; Baruah vd., 2024; Texter 2014).

Grafen nanoakışkanlar, grafen türevlerinin bir baz sıvı içinde dağıtılmasıyla oluşturulan yüksek termal iletkenlikli akışkanlardır ve ısı transferi uygulamalarında önemli bir potansiyele sahiptir. Grafen nanoakışkanlar, yüksek termofiziksel özellikleriyle modern mühendislik uygulamalarının vazgeçilmez bileşenleri arasına girmiştir. Grafenin yüksek yüzey alanı, yüksek termal iletkenliği ve kimyasal kararlılığı, sıvıların ısı transfer verimliliğini artırır. Bu özellikler, elektronik soğutma, otomotiv motorları, ısı eşanjörleri ve güneş kolektörleri gibi sistemlerde etkin bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır (Bahiraei ve Heshmatian, 2019; Arshad vd., 2019).

Grafenin dispersiyon stabilitesine yönelik yapılan çalışmalar yüzey aktif maddelerin bu süreçte önemli bir rol oynadığını göstermiştir. Nanoakışkanların üretiminde dispersiyon tekniklerinin belirleyici faktör olduğu ve yüzey aktif madde katkılı dispersiyonların çökelmeyi geciktirerek stabiliteyi önemli ölçüde artırdığı görülmüştür. Yüzey aktif madde bazlı dispersiyon yöntemlerinin grafenin homojen dağılmasını sağlayarak, nanoteknoloji uygulamalarında daha geniş kullanım alanı sunduğunu ortaya konmuştur (Akpan vd., 2019; Texter, 2014).

Yüzey aktif madde stabilizasyonu üzerine yapılan çalışmalar, grafenin dispersiyon sürecini optimize etmenin, yüzey modifikasyonu yoluyla mümkün olduğunu göstermektedir. Didodesildimetilamonyum bromür (DDAB) kullanarak hazırlanan grafen dispersiyonlarının elektrostatik stabilizasyon mekanizması ile çökelmeyi geciktirdiği belirlenmiştir. Ayrıca, iyonik olmayan yüzey aktif maddelerin kullanıldığı su bazlı dispersiyonların daha yüksek grafen konsantrasyonuna ulaşarak stabilite sağladığı görülmüştür (Li vd., 2017; Guardia vd., 2011).

Yüzey aktif maddelerin meydana getirdiği yüzey modifikasyonu, grafenin dispersiyon stabilitesini artırmanın en önemli yollarından biri olarak değerlendirilmektedir. Bu alanda yapılan çalışmalar yüzey aktif maddelerin grafenin yüzey özelliklerinin iyileştirdiği ve elektrostatik etkileşimler yoluyla çözücüde daha kararlı hale getirildiğini göstermiştir. Setil trimetil amonyum bromür ile stabil hale getirilen grafen dispersiyonları, partikül büyüklüğü ve yüzey yükü açısından optimize edilmiş ve yüksek sıcaklıklarda bile dispersiyon stabilitesi korunmuştur (Verma vd., 2015; Zheng vd., 2023).

Bu çalışma, yüzey aktif maddelerin grafen dispersiyonlarının stabilitesine etkisini inceleyerek; grafen dispersiyonlarının elektronik, enerji, biyomalzeme gibi birçok alanda daha etkin kullanılmasını sağlamayı amaçlamaktadır.



1. BÖLÜM

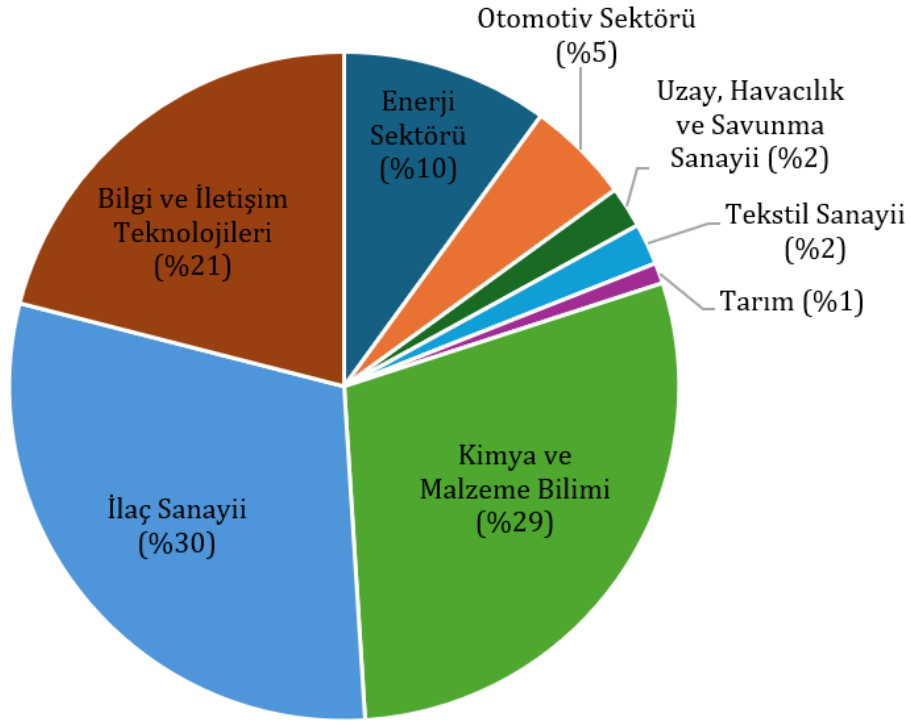
GENEL BİLGİLER

1.1. Nanomalzemeler

Nanomalzemeler modern bilimin en çığır açıcı alanlarından biri olarak kabul edilir. En az bir boyutu 100 nanometreden küçük olan yapılar nanomalzeme olarak adlandırılır. Nano ölçekteki malzemeler makro ölçekteki muadillerine kıyasla benzersiz fiziksel, kimyasal, mekanik, elektronik ve optik özellikler sergiler. Ayrıca, nanomalzemelerin birim hacim başına yüksek yüzey alanı katalitik reaksiyonlarda, adsorpsiyon süreçlerinde ve malzemenin yüzeyinde gerçekleşen reaksiyonlarda büyük avantaj sağlamaktadır. Bu sayede kimyasal reaktivite, yüzey enerjisi ve mekanik dayanım gibi özelliklerde belirgin artışlar gözlenir. Özellikle metalik nanoparçacıklar ve yarı iletken nanomalzemeler, makro ölçekten tamamen farklı geometrik ve elektronik özellikler göstererek hem temel araştırmalar hem de uygulamalı çalışmalar için önemli araştırma alanları oluşturur (Akpan vd., 2019; Kumar vd., 2024).

Nanomalzemeler boyutlarına göre sıfır boyutlu nanoparçacıklar, bir boyutlu nanoteller ve nanotüpler, iki boyutlu tabaka yapılar ve üç boyutlu gözenekli ağ yapıları olarak sınıflandırılır (Singh vd., 2020). Nanomalzemelerin sentez yöntemleri endüstriyel ve teknolojik uygulamalardaki başarıyı doğrudan etkilemektedir. Bu alanda, yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya olarak sınıflandırılan çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Yukarıdan aşağıya şeklinde sınıflandırılan metotlar büyük boyutlu malzemelerin fiziksel, kimyasal veya mekanik yöntemlerle küçültülerek nanometrik boyutlara getirilmesini, aşağıdan yukarıya olarak sınıflandırılan metotlar ise fiziksel veya kimyasal olarak atomlar ve moleküllerin bir araya gelerek büyütülmesini ifade eder. Özellikle sol-jel, kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve hidrotermal sentez gibi aşağıdan yukarıya üretim yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Mekuye ve Abera, 2023).

Nanomalzemeler yüksek yüzey alanı ve kuantum etkileri sayesinde elektrik iletimi, mekanik dayanım ve kimyasal reaktivite sayesinde pek çok endüstri için değerlidir. Elektronik alanında nanomalzemeler, cihazların minyatür boyutlarda üretilebilmesini ve verimliliğin artırılmasını sağlar. Sağlık alanında teşhis ve ilaç iletimi konusunda avantaj sağlamaktadır. Enerji uygulamalarında nanomalzemeler güneş hücreleri ve pillerde, kapasite ve iletim verimliliğini artırmada kullanılmaktadır. Çevre alanında ise kirliliklerin azaltılması ve su arıtımında kullanılır. Nanomalzemeler yüksek potansiyellerine rağmen büyük ölçekte üretimi ve kullanımı, yasal mevzuatlar ve sağlık endişeleri gibi dezavantajları nedeniyle daha fazla alanda kullanılmasına engel olmaktadır. Nanomalzemelerin daha fazla endüstriyel ve teknolojik alana dahil edilebilmesi için üretim metotlarının gelişmesi, çevresel ve sağlık risklerinin azaltılması için çalışmalar devam etmektedir. Nanomalzemelerin kullanım alanları Şekil 1.1'de verilmiştir. (Kumar vd., 2024; Kurwadkar vd., 2014).



Şekil 1.1. Nanomalzemelerin endüstride kullanım alanları. Kurwadkar vd., 2014'den uyarlanmıştır (Kurwadkar vd., 2014).

1.2. Karbon Nanomalzemeler

Karbon 6 elektrona sahip olması sebebiyle sp^1 , sp^2 ve sp^3 hibritleşmeleri yapabilen bir elementtir. Bu hibritleşme çeşitliliği, karbonun farklı allotroplarının oluşmasını sağlar. Bu allotroplar karbonun fiziksel ve kimyasal özelliklerinde büyük çeşitlilikleri ortaya çıkarır. Özellikle 1985 yılında fullerenin, 1991 yılında karbon nanotüplerin (CNT) ve 2004 yılında grafenin keşfedilmesiyle birlikte, karbon nanomalzemeler büyük bir ilgi odağı haline gelmiştir. Bu gelişmeler, karbon nanomalzemelerin olağanüstü özelliklerinin anlaşılmasını sağlamış ve bu malzemelerin büyük ölçekli üretim tekniklerinin geliştirilmesine öncülük etmiştir (Gupta vd., 2024).

Karbon nanomalzemeler; 0 boyutlu fulleren ve karbon kuantum noktaları, 1 boyutlu CNT, 2 boyutlu grafen ve grafen oksit (GO), 3 boyutlu grafen levhalar şeklinde sınıflandırılabilir. Tablo 1.1'de karbon bazlı nanomalzemelerin boyutlarına göre sınıflandırılması verilmiştir (Liu ve Speranza, 2019).

Tablo 1.1. Karbon nanomalzemelerin boyutlarına göre sınıflandırılması. Liu ve Speranza, 2019'dan uyarlanmıştır (Liu ve Speranza, 2019).

0D	Karbon Kuantum Noktaları	Fulleren	Karbon Nano Onion	Nanoelmas	Grafen Kuantum Noktaları
1D	Tek Duvarlı CNT	Çok Duvarlı CNT		Karbon Nanohorn	
2D	Grafen	Açılmış CNT		Çok Katmanlı Grafen Levha	
3D	Grafit		Elmas		

Karbon bazlı nanomalzemeler yüksek termal, mekanik, elektriksel, optik ve yapısal özellikleri sayesinde biyomedikal alanında büyük ilgi toplamıştır. CNT, GO, grafen ve kuantum noktaları biyosensörler, ilaç iletimi ve kanser tedavisinde kullanılmaya başlamıştır (Maiti vd., 2018).

1.2.1. Grafen

Grafen sp^2 hibritleşmiş karbon atomlarının bal peteği örgüsünde, tek bir düzlemde dizilmesiyle oluşan iki boyutlu bir kristal yapıdır. Bu yapı, malzeme bilimi literatüründe hem teorik hem de uygulamalı çalışmalarda yeni bir araştırma alanının temelini oluşturmuştur. İlk kez 2004 yılında Geim ve Novoselov'un mekanik eksfoliasyon yöntemiyle üretimi gerçekleştirilen grafen çok çeşitli alanlarda kullanılmaya başlanmıştır (Geim ve Novoselov, 2007; Maiti vd., 2018).

Oda sıcaklığında elektron iletim hızı $15.000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ civarında olan grafen, geleneksel yarı iletken malzemelere göre çok daha avantajlıdır. Yüksek frekanslı transistörler, sensörler ve kuantum cihazlarında kullanmak için oldukça elverişlidir. (Geim ve Novoselov, 2007). Grafenin termal iletkenliği oda sıcaklığında $5.300 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 'dir. Bu değer nanomalzemelerde sıcaklık iletimi açısından oldukça önemlidir (Balandin vd., 2008).

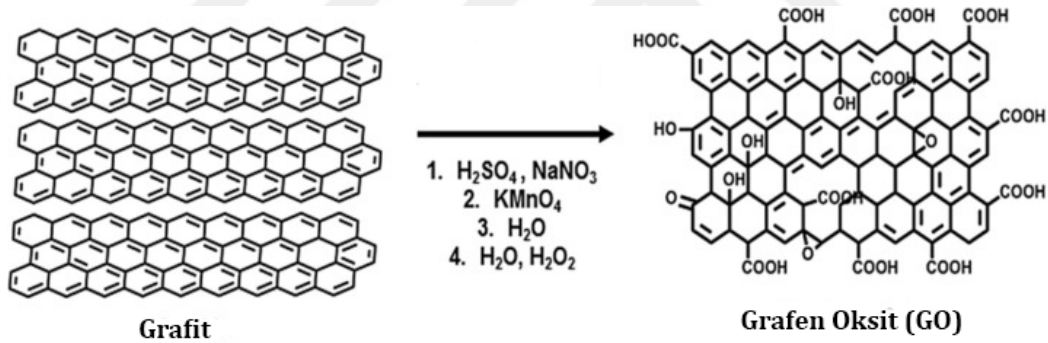
Mekanik özellikler bakımından, grafen yüksek bir elastik değere ($\sim 1 \text{ TPa}$) ve yaklaşık 130 GPa gerilme mukavemetine sahiptir. Bu düzeyde bir mekanik dayanım grafeni hem mikro hem de makro ölçekteki yapılardaki uygulamalar için avantajlı bir takviye malzemesi haline getirir. (Lee vd., 2008). Ayrıca %97'nin üzerinde optik geçirgenliğe sahiptir ve bu özelliği sayesinde şeffaf iletken levha uygulamalarında kullanılabilir (Bonaccorso vd., 2010).

Grafen üretimi için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Her bir teknik, üretim verimliliği ve nihai ürünün özellikleri açısından farklı avantajlar sunmaktadır. Eksfoliasyon yöntemi, grafit tabakalarının mekanik veya kimyasal yollarla ayrılması ile grafen elde edilmesini sağlar. Mekanik eksfoliasyon, grafitin yapışkan bant gibi malzemelerle ayrılmasını içeren basit bir yöntemdir, ancak büyük ölçekli üretim için yeterli verim sunmamaktadır. Kimyasal eksfoliasyon ise grafitin işlenmesi ve sonrasında oluşan tabakaların ayrılmasıyla gerçekleştirilir. Bir diğer önemli yöntem olan GO'nun indirgenmesi, kimyasal veya termal yollarla grafitten GO üretilmesi

ve indirgenerek grafene dönüştürülmesine dayanır. Bu yöntemde hidrazinler, borhidridler ve askorbik asit gibi kimyasallar kullanılarak grafen üretimi sağlanmaktadır. Grafenin büyütülmesi için kullanılan epitaksiyel yöntem ise silisyum karbür (SiC) yüzeyler üzerinde yüksek sıcaklıkta silisyumun ayrılmasıyla grafen tabakalarının oluşturulmasına dayanır. Bunun yanı sıra CNT'lerin aksel açılması ve ark boşaltımı metodu gibi alternatif yöntemler de grafen üretimi için kullanılmaktadır. Ancak bu teknikler düşük verimlilikleri nedeniyle yaygın değildir. Grafen üretiminde kullanılan yöntemin seçimi, uygulama alanına ve üretim ölçeğine bağlı olarak değişmektedir (Bonaccorso vd., 2010).

1.2.2. Grafen oksit

GO, grafenin oksijen içeren fonksiyonel gruplarla (hidroksil, epoksit, karboksil vb.) zenginleştirilmiş bir türevidir. Genellikle grafitin Hummers yöntemi ile kimyasal oksidasyonu sonucu elde edilmektedir. Şekil 1.2'de 4 adımlı Hummers reaksiyonu verilmiştir. Bu reaksiyonda GO çok katmanlı yapısını korur ve yüzeyinde taşıdığı fonksiyonel gruplar sayesinde hidrofilik özellik kazanır (Dreyer vd., 2010; Zaaba vd, 2017).



Şekil 1.2. Dört adımlı Hummers reaksiyonu

GO elektronik özellikler açısından saf grafene kıyasla farklılık gösterir. Oksijenli grupların varlığı, karbon atomları arasındaki sp^2 hibrit yapısını bozar. Bu nedenle GO genellikle yalıtkan veya yarı iletken karaktere sahiptir. Ancak indirgenmiş grafen oksit (rGO) formuna dönüştürüldüğünde, iletkenlik özelliği kısmen geri kazanılabilir (Eda ve Chhowalla, 2010).

GO'nun en dikkat çeken avantajlarından biri de yüksek kolloidal kararlılığıdır. Sulu ve polar çözücülerde kolaylıkla dağılabilmesi özellikle biyomedikal uygulamalarda ilaç taşıyıcı sistemler ve biyosensörler alanında avantajlı hale getirmektedir. Ayrıca oksijenli fonksiyonel gruplar sayesinde metal iyonları ile kompleks oluşturma ve yüzey modifikasyonu gibi kimyasal işlemlere de uygundur (Dreyer vd., 2010; Liu vd., 2019).

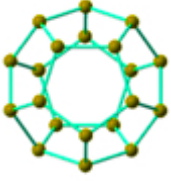
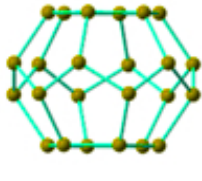
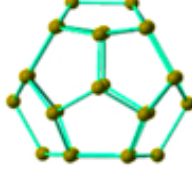
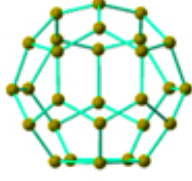
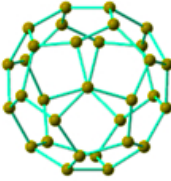
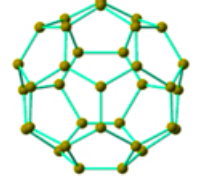
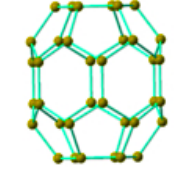
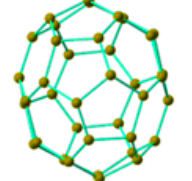
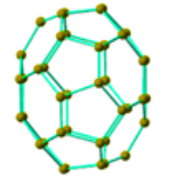
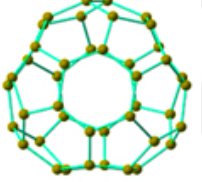
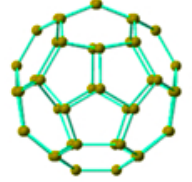
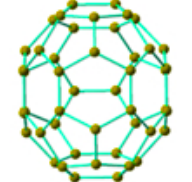
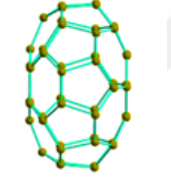
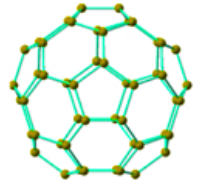
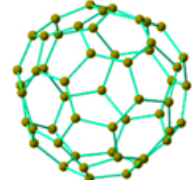
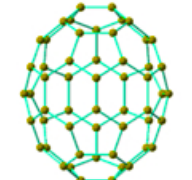
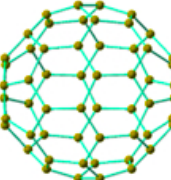
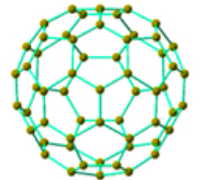
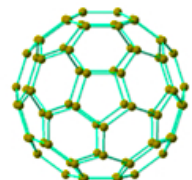
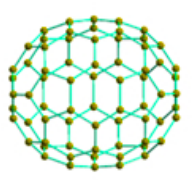
1.2.3. Fulleren

Fullerenler, yalnızca karbon atomlarından oluşan, kapalı kafes benzeri yapılar sergileyen allotroplardır. İlk olarak 1985 yılında Kroto ve arkadaşları tarafından keşfedilen C_{60} molekülü simetrik bir küre yapısına sahiptir. C_{60} , her biri sp^2 hibritleşmiş 60 karbon atomunun 12 beşgen ve 20 altıgen ile oluşturduğu yapıyı temsil eder. Bu yapı fullerenlere yüksek kararlılık ve kimyasal işlevsellik kazandırmaktadır (Kroto vd., 1985).

İlk keşfedilen ve en yaygın olan fulleren C_{60} molekülüdür. Ancak C_{16} 'dan başlayarak yüzlerce karbon atomu içeren farklı fulleren türleri de bulunmaktadır. Bu çeşitlilik, moleküllerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkileyerek onları farklı uygulamalar için uygun hale getirir. Örneğin, bazı fullerenler elektron alıcı özellikleri nedeniyle güneş pillerinde kullanılırken, diğer tipleri ilaç taşıyıcı olarak biyomedikal alanında değerlendirilmektedir. Yapılarındaki simetri ve özgün bağlanma özellikleri, fullerenlerin nanoteknoloji ve malzeme bilimi gibi disiplinlerde önemli bir araştırma konusu olmasını sağlamaktadır. Tablo 1.2'de bazı fulleren çeşitleri verilmiştir (Bai vd., 2019, Kausar, 2025).

Elektronik özellikleri açısından fullerenler, yüksek elektron alma eğilimi ve konjuge π -bağları sayesinde hem elektron alıcısı hem de yarı iletken karakter sergileyebilir. Bu özellik, onları özellikle fotovoltajik cihazlar ve polimer bazlı elektronik cihazlarda avantajlı kılar. Fulleren, ince film transistörlerinden elektronik iletkenlik ve süperiletkenlik uygulamalarına kadar birçok elektronik alanda çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır (Haddon, 1992).

Tablo 1.2. Fulleren çeşitleri. Bai vd., 2019'dan uyarlanmıştır (Bai vd., 2019).

 20 (I_h)	 24 (D_{6h})	 26 (D_{3h})	 28 (T_d)
 32 (D_{3d})	 34 (C_{3v})	 36 (D_{6h})	 38 (C_2)
 40 (D_{5d})	 42 (D_3)	 44 (D_{3h})	 46 (C_{2v})
 48 (D_{6d})	 50 (D_{5h})	 52 (T)	 54 (C_{2v})
 56 (D_2)	 58 (C_{3v})	 60 (I_h)	 70 (D_{5h})

Fullerenlerin çözünürlüğü düşük olmakla birlikte kimyasal işlemler ile çözünürlük ve biyolojik uygunluk artırılabilir. Fonksiyonel grupların yüzeye bağlanması, hem çözünürlüğü hem de uygulama çeşitliliğini artırarak ilaç taşıyıcı sistemler, enzim inhibitörleri ve antiviral ajanlar gibi biyomedikal uygulamalara olanak tanır (Jensen vd., 1996).

1.2.4. Karbon nanotüp

CNT'ler tek boyutlu silindirik karbon yapılarıdır. Yüksek yüzey alanı, mekanik dayanım ve elektronik özellikleri sayesinde nanoteknoloji alanında önemli bir yer edinmiştir. İlk kez 1991 yılında Iijima tarafından keşfedilen bu yapılar, tek bir grafen tabakasının kıvrılmasıyla oluşan tek duvarlı CNT ve iç içe geçmiş birçok silindirik yapıyı içeren çok duvarlı CNT olarak ikiye ayrılır (Iijima, 1991).

Elektronik açıdan CNT çap ve sarmal açısına bağlı olarak iletken ya da yarı iletken özellik gösterebilir. Bu sayede alan etkili transistörler ve esnek elektronik cihazlarda kullanılmaktadır. Elektron mobiliteleri silikondan çok daha yüksektir. Bu nedenle CNT, elektronik nanomalzeme bileşenlerin temel yapıtaşı olarak değerlendirilmektedir (Avouris, 2002).

CNT aynı zamanda yüksek mekanik özelliklere sahiptir. Sp^2 karbon bağlarının sağladığı yüksek bağ enerjisi sayesinde elastisite modülleri 1 TPa'ya kadar çıkabilir. Yüksek dayanımlı, hafif kompozitlerin üretimi için uygundur. Ayrıca yüksek dayanım gerektiren malzeme uygulamaları için güçlü bir aday olarak değerlendirilmektedir (Yu vd., 2000).

CNT'nin fonksiyonelleşme oranı yüksektir. CNT'ler doğal halleriyle hidrofobiktir ve suda çözünmezler. Fakat yüzeylerinin fonksiyonelleştirilmesiyle çözünürlükleri artırılabilir ve bu sayede elektronik, optik, sensör, enerji ve ısı transferi gibi alanlarda tercih edilen bir malzeme hâline gelir. Günümüzde kullanım alanları transistörler, gaz sensörleri, lityum-iyon bataryalar, süperkapasitörler ve kompozit malzemeler gibi alanlardır. Ayrıca yüksek ısı aktarım kapasitesi sayesinde nanoakışkanlar için de uygunluk göstermektedir (Gupta vd., 2019).

CNT yüksek termal, mekanik, elektriksel, optik ve yapısal özellikleri sayesinde biyomedikal alanında büyük ilgi toplamıştır. İlaç iletimi ve kanser tedavisi gibi alanlarda kullanılmaya başlamıştır. CNT'ler özellikle yüksek en-boy oranları, elektrik iletimi ve kimyasal stabiliteleri sayesinde yüksek hızda elektron iletimi ve moleküler tanıma özelliklerine sahiptir. Ek olarak kanser hücrelerine büyümeyi ve çoğalmayı engelleyen CNT uygulamaları ile ilgili çalışmalar devam etmektedir (Maiti vd., 2018).

CNT'ler çeşitli yöntemlerle üretilebilmektedir. Yaygın olarak kullanılan yöntemler: ark boşaltımı, lazer ile uzaklaştırma ve CVD yöntemleridir. CVD yöntemi, düşük sıcaklık, yüksek saflık ve ölçeklenebilirlik avantajları sayesinde endüstriyel ölçekte en yaygın kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde asetilen gibi karbon içeren gazlar, yüksek sıcaklıkta nikel gibi metal katalizörler üzerine toplanarak CNT sentezi sağlanır (Endo vd., 2007; Huang vd., 1998).

1.3. Yüzey Aktif Maddeler

Yüzey aktif maddeler diğer ismiyle sürfaktanlar olarak bilinir. Hem hidrofobik kuyruk hem de hidrofilik baş grubu içeren amfifilik moleküllerdir. Bu özellik, su-ortam ara yüzeylerinde toplanarak yüzey gerilimini düşürmelerini ve misel oluşumunu sağlar. Yüzey aktif maddeler

deterjan, emülsiyonlayıcı, dispersant ve biyosidal ajan olarak yaygın biçimde kullanılır. Farmasötik, kozmetik ve endüstriyel proseslerde kritik rol oynarlar (Rosen ve Kunjappu, 2012).

Katyonik yüzey aktif maddeler, anyonik yüzey aktif maddelere kıyasla daha iyi antibakteriyel ve antifungal aktivitelere sahiptir. Katyonik yüzey aktif maddeler gıda, boya, antibakteriyel formülasyonlar, misellerle geliştirilmiş ultrafiltrasyon, kozmetik, mezogözenekli malzemelerin sentezi, koenzim modelleri, nanopartiküllerin seçici sentezi, floresan söndürücüler ve hücre zarı boyunca ilaç dağıtım araçları olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. En yaygın katyonik yüzey aktif maddeler setiltrimetilamonyum bromür (CTAB), setiltrimetilamonyum klorür, ditetradesildimetilamonyum klorür ve setilpiridinyum bromür (CPB) veya klorür gibi kuaterner amonyum bileşikleridir. Ayrıca kuaterner piridinyum yüzey aktif madde sistemleri, mikrop öldürücü özellikleri, enzim stabilitesini inceleme, gen aktarımını kolaylaştırma ve ilaç dağıtımında etkili bir araç olarak farmasötiklerde geniş kullanımlarına sahiptir (Verma, 2015).

CPB (C21-H38-N.Br), ağız bakım ürünlerinden laboratuvar uygulamalarına kadar geniş bir kullanım alanına sahip katyonik bir yüzey aktif maddedir. Dezenfektan, mikrop öldürücü, deodorant ve analitik kimya reaktifi olarak hem farmasötik hem de fiziksel kimya alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır (Sarasan ve Chouhan, 2015).

Sodyum dodesil sülfat (SDS, yaygın kullanılan anyonik bir yüzey aktif maddedir. Toz ve pelet formda bulunur. Pelet hali daha iyi çözünürlüğe sahiptir ve daha az toksiktir. Kritik misel konsantrasyonu 25°C'de 0,0082 M'dir ve sıcaklık veya elektrolit eklenmesiyle değişir. SDS, temizlik ürünleri, biyoteknoloji, biyokimya ve polimer araştırmalarında kullanılır. Güçlü bir deterjan olup hemoglobin analizi ve protein saflaştırmada etkilidir. SDS'nin antiviral özellikleri, Herpes virüsü ve HIV gibi virüsleri engelleyebilir. SDS'nin sentezi dodekanol ve sülfürik asit tepkimesiyle ve ardından sodyum hidroksit ile nötralizasyonu ile elde edilir. Mikroskopik olarak amfifilik yapıya sahip olması nedeniyle yağ çözücü etkisi yüksektir (Bhattarai vd., 2014).

DDAB katyonik yüzey aktif madde grubunda kuaterner amonyum bileşiğidir. Toksikite özelliğine sahip olması nedeniyle ekosistem üzerinde olumsuz sonuçlar doğurabilir. Elektrokimyasal karakterizasyon çalışmalarında, DDAB'nin farklı pH ortamlarındaki davranışı incelenmiştir. Asidik ortamda, bu bileşik iki elektron ve iki proton içeren bir indirgenme reaksiyonu ile parçalanırken, nötr ortamda üç elektron ve üç proton transferiyle bir redoks reaksiyonu geçirmektedir. Bazik ortamda ise DDAB'nin sadece oksidasyon süreci gerçekleşir. DDAB'nin sulu çözeltilerindeki difüzyon katsayısının pH'a bağlı olarak değiştiği görülmüştür. DDAB'nin DNA ile etkileşimi incelendiğinde, bu etkileşimin potansiyel kanser önleyici etkileri değerlendirilmiş ve etkileşime dair bağlanma parametreleri ayrıntılı olarak belirlenmiştir. Elektrokimyasal analizlere göre, DDAB, DNA ile elektrostatik ve hidrofobik etkileşimler yoluyla bağlanabilmekte, böylece DNA'nın replikasyon mekanizmasını etkileyebilmektedir. Bu etkileşim, kanser hücrelerinin çoğalmasını durdurmaya yönelik potansiyel bir mekanizma olarak değerlendirilmektedir (Shah vd., 2011).

Setilpridinyum bromür (CPB), katyonik bir yüzey aktif madde olup, piridinyum baş grubu ve uzun C16 hidrofobik kuyruğa sahiptir. Antiseptik özellikleri nedeniyle tıbbi ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmakta olup, ilaç taşıma sistemlerinde ve enzim stabilizasyon çalışmalarında önemli bir rol oynar. CPB'nin sulu çözeltilerde kritik misel konsantrasyonu 0,0007 M'dir. Bu değer üzerinde misel yapıları oluşturarak su içinde çözünmeyen bileşikler çözebilir. Moleküler dinamik simülasyonları, CPB'nin su ve 1-oktanol içindeki hareketini analiz etmiştir. Bu çalışmaya göre sulu ortamda daha hareketli olan CPB molekülü, misel ortamında ise kuyruk hareketi kısıtlanmıştır. Ayrıca, bromür iyonlarıyla etkileşimleri incelenmiş, misel ortamında iyonların piridinyum baş grubuna yakın konumlandığı belirlenmiştir. CPB miselleri, moleküler seviyede güçlü bir stabilite göstermekte olup, yüzey özellikleri açısından oldukça dinamiktir. Ayrıca su molekülleri ile etkileşim halindedir. Yapılan bu çalışmalarda, CPB'nin farmasötik uygulamalarda ilaç taşıyıcısı olarak kullanımı, biyolojik sistemlerde enzim aktivitelerini düzenlemesi ve çevresel alanlarda su arıtımı gibi süreçlerde etkili olduğu gözlenmiştir (Verma vd., 2015).

Yüzey aktif maddeler, grafenin sulu ortamda etkin biçimde dağılmasını sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılmış ve bu doğrultuda çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar, grafen yüzeylerinin fiziksel adsorpsiyon yoluyla stabilize edilmesini ve aglomerasyonu önlemek amacıyla yüzey aktif maddelerin kullanılmasını ve bu sayede dispersiyonun kararlılığının sürdürülmesini ele almaktadır. Özellikle sulu dispersiyonlar, uçucu organik bileşiklerin kullanımını azaltma hedefi doğrultusunda çevresel açıdan önemli bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir (Texter, 2014).

1.4. Nanoakışkanlar

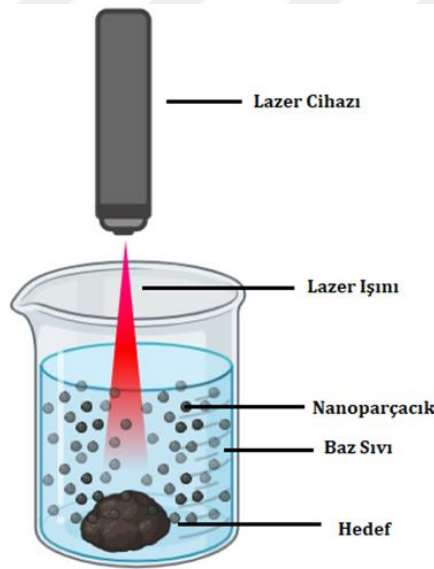
Nanoakışkanlar, bir taşıyıcı sıvı içinde dağılmış nanoparçacıklardan oluşan süspansiyonlardır. Bu kavram, 1995 yılında Choi tarafından tanımlanmış ve klasik ısı transfer sıvılarına kıyasla yüksek ısıl iletkenlik ve ısı taşıma kapasitesi potansiyeli sunmasıyla dikkat çekmiştir (Choi vd., 1995).

Nanoakışkan üretiminde kullanılan yöntemler tek aşamalı ve iki aşamalı yöntemler olarak iki ana başlık altında sınıflandırılabilir. Bu yöntemlerin her ikisinde de bazı avantajları ve dezavantajları olduğu görülmektedir. Tek aşamalı yöntemde nanoparçacıkların baz sıvılar içinde sentezlenmesi ve aynı anda dağılması sağlanır. Bu yöntem; kurutma, depolama, taşıma ve yeniden dağılma gibi işlemleri ortadan kaldırarak nanoparçacıkların aglomerasyonunu azaltır ve stabiliteyi artırır. Bu yöntemle elde edilen nanoakışkanlar homojen dağılımları sayesinde daha kararlı yapıdadırlar. Ayrıca bu yöntemde üretim maliyetleri düşüktür.

İki aşamalı yöntemde nanoakışkan üretimindeki zorluklar nedeniyle, tek aşamalı yöntemeye dayalı teknikler geliştirilmiştir. Bu kapsamda buharlaştırma ve yoğunlaştırma, lazer ile uzaklaştırma ve daldırılmış ark nanoparçacık sentez sistemi (DANSS) gibi yöntemler

kullanılarak metaller mekanik yöntemlerle buharlaştırılır ve dispersiyon içinde katılaştırılarak istenilen nanoakışkan elde edilir. Şekil 1.3'te lazerle uzaklaştırma yöntemine ilişkin bir görsel verilmiştir. Fiziksel yöntemler, parçacık boyutunun kontrolünü sağlayarak nanoakışkanın stabilitesine katkı sağlar. Vakum-DANSS yöntemi ise elektriği iletmeyen sıvılar kullanılarak çeşitli şekillerdeki nanoparçacıkların (iğne şeklinde, dairesel, kare, çokgen vb.) elde edilmesini sağlar ve istenmeyen aglomerasyonları önler. Bu yöntemin dezavantajı ise kimyasal reaksiyonların tam verimle gerçekleşmemesi nedeniyle dispersiyon içinde artık hammaddelerin kalmasıdır (Arshad vd., 2019).

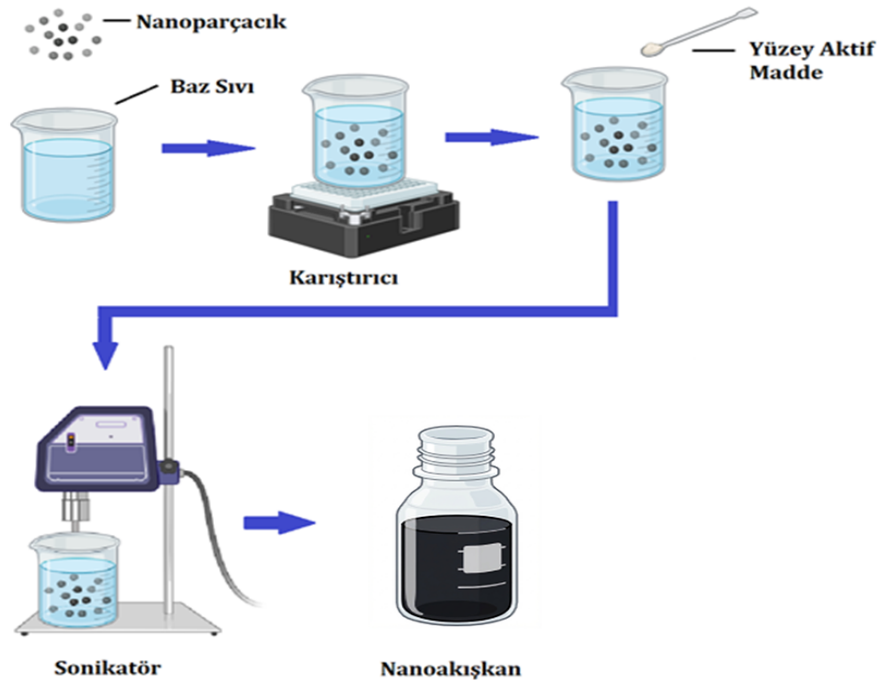
Son dönemlerde geliştirilen kimyasal çözelti yöntemi, tek aşamalı üretim yaklaşımına dayanmasına rağmen; mikro yapıların kontrol edilebilirliği sayesinde yüksek stabilite ve termal iletkenlik sunan nanoakışkanların sentezinde etkili bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Ancak tek aşamalı yöntemin büyük ölçekli üretimde uygulanması hâlâ zorluklar içermektedir (Wei vd., 2009).



Şekil 1.3. Tek aşamalı nanoakışkan üretim yöntemlerinden biri olan lazer ile uzaklaştırma yöntemi

En yaygın kullanılan üretim tekniği olan iki aşamalı yöntemde ise, öncelikle çeşitli mekanik ve kimyasal işlemlerle toz halinde nanoparçacıklar elde edilir. Bu toz; su, etilen glikol veya yağ gibi taşıyıcı sıvıların ultrasonik titreşim (sonikasyon), manyetik karıştırma, yüksek kesmeli karıştırma, homojenleştirme ve bilyalı öğütme gibi yöntemlerle karıştırılır. Bu yöntemler ile nanoakışkan üretiminde en yaygın sorunlardan biri olan aglomerasyonu azaltmaya yardımcı olmaktadır. Şekil 1.4'te sonikasyon ile iki aşamalı nanoakışkan üretim yöntemi verilmiştir.

Nanoparçacıkların yüksek yüzey alanı ve yüzey enerjisi, sıvı ortamlar içinde bir araya gelerek aglomere olma eğilimini artırmaktadır. Bu durum, nanoakışkanların stabilitesi üzerinde doğrudan bir etki yaratmakta ve homojen dağılımın sağlanmasını zorlaştırmaktadır. Yapılan çalışmalar, metalik nanoparçacıkların Van der Waals kuvvetlerinden kaynaklanan çekim etkileri nedeniyle özellikle aglomerasyona yatkın olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, oksit bazlı nanoparçacıklar kullanılarak hazırlanan nanoakışkanlar, metalik muadillerine göre daha kararlı bir yapı sergilemektedir. Oksit nanoparçacıkların yüzey özellikleri ve elektrostatik itici kuvvetleri, parçacıkların birbiriyle birleşmesini engelleyerek dispersiyonun uzun süreli stabilitesini artırmaktadır. Bu nedenle, nanoakışkan uygulamalarında oksit nanoparçacıkların tercih edilmesi hem fiziksel stabiliteyi iyileştirmek hem de istenilen termal ve akışkanlık özelliklerini korumak açısından önemlidir. Nanoakışkanların stabilitesini artırmak için en etkili ve ekonomik çözüm yüzey aktif maddelerin kullanımudur. Bu yöntem ekonomik olsa da kurutma, depolama ve taşıma gibi süreçlerde bazı sorunlara neden olabileceği görülmüştür. Bununla birlikte sıcaklık, pH, ultrasonik ve mikrodalga ışınımı, reaktan ve sürfaktan türleri ve konsantrasyonları gibi sentez parametrelerinin değiştirilmesiyle nanoparçacıkların mikro yapısı iyileştirilebilir. İki aşamalı yöntemlerde yaygın olarak kullanılan teknikler arasında doğrudan buharlaştırma ve yoğunlaştırma, kimyasal indirgeme, ark boşaltımı, lazer ile uzaklaştırma, poliyol yöntemi, mikrodalga ışınımı ve faz transfer yöntemi yer almaktadır (Arshad vd., 2019).



Şekil 1.4. İki aşamalı nanoakışkan üretim yöntemlerinden biri olan sonikasyon ile üretim yöntemi

Nanoakışkanlar üzerine yapılan yoğun çalışmalardan bir tanesi parçacık konsantrasyonuna ve türüne bağlı olarak değişen ısı iletkenlik artışıdır. Das ve arkadaşları, Al₂O₃ ve CuO nano sulu dispersiyonunda %1 hacimsel konsantrasyonda dahi saf suya kıyasla yüksek oranda ısı iletkenlik artışı sağladığını göstermiştir. Ayrıca nanoakışkanların ısı iletim katsayısı ortam sıcaklığı ile doğru orantılı olarak yükselmektedir (Das vd. 2003).

Çinko oksit (ZnO) nanoakışkanların antibakteriyel özellikleri, çeşitli bakterilere karşı gösterdiği inhibitör etkiler nedeniyle dikkat çekmektedir. Zhang ve arkadaşları, ZnO nano sulu dispersiyonların, gram-negatif bir bakteri olan Escherichia coli üzerinde antibakteriyel bir etki oluşturduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, ZnO nanoparçacıkları Staphylococcus aureus gibi gram-pozitif bakterilere karşı da antibakteriyel aktivite sergilediği bilinmektedir. Bu etkinin nedeni ZnO nanoparçacıklarının bakteri hücre duvarına temas ederek membran yapısını bozmasıdır. ZnO ile muamele edilen E. coli hücrelerinde membran hasarı SEM (taramalı elektron mikroskobu) analizleri ile görülebilmektedir (Zhang vd., 2007).

Oliviera ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada titanyum dioksit (TiO₂) nanopartikülleri, titanyum izopropoksidin hidrolizi ile sentezlenmiştir. Nanopartiküllerin yüzey modifikasyonu, polivinil alkol (PVA) polimeri ile işlenerek gerçekleştirilmiş ve böylece nanoakışkan stabilitesinin artırılması hedeflenmiştir. Modifiye edilmiş nanopartiküller, %0,00125 ile %0,1 arasında değişen hacim yüzdeleriyle sulu nanoakışkanlar hazırlanarak kullanılmıştır. Sonuçlar, nanopartikül konsantrasyonu arttıkça nanoakışkanların viskozite ve ısı iletkenliği değerlerinin arttığını ve baz akışkanlardan daha yüksek değerlere sahip olduğunu göstermektedir. Yüzey modifikasyonunun TiO₂ nanopartiküllerinin stabilitesinde önemli bir iyileştirme sağladığı ortaya konulmuştur. Bu bulgular, nanoakışkanların endüstriyel uygulamalardaki potansiyelini artırmaya yönelik önemli katkılar sunmaktadır (Oliveira vd., 2017).

Tablo 1.3'te grafen ve grafen oksit nanoparçacıklarının sıvı içerisindeki dağılım stabilitesini inceleyen çalışmalar verilmiştir. Bu çalışmalarda, stabiliteyi sağlamak amacıyla SDS, SDBS (Sodyum dodesil benzen sülfonat) ve PVA gibi yüzey aktif maddelerin yanı sıra, pH değişimi veya polimer kaplama gibi farklı yöntemler kullanılmıştır. Stabilite değerlendirmesi ise başlıca fotoğraflama, Ultraviyole Görünür Spektroskopi (UV-VIS), zeta potansiyel ölçümü ve termal iletkenlik kararlılık testleri ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen stabilite süreleri, kullanılan malzeme ve yöntemle bağlı olarak büyük farklılık göstermiştir. 24 saat gibi kısa sürelerden, 180 gün gibi uzun sürelere kadar değişen sonuçlar gözlemlenmiştir. Bu çalışmalar sayesinde uygun yüzey modifikasyonu ve karakterizasyon yöntemleri ile nanoakışkanların kararlılığının önemli ölçüde artırılacağı görülmüştür.

Tablo 1.3. Nanoakışkanlar hakkında yapılan bazı çalışmaların karşılaştırılması

Kaynak	Nanomalzeme	Yüzey Aktif Madde	Stabilite Test Yöntemi	Stabilite Süresi
Yu vd., 2010	GO Nanolevha	Yok	Termal iletkenlik sabitliği	Yaklaşık 7 gün
Park vd., 2012	GO Nanolevha	pH değişimi	Zeta potansiyel testi	Görülmedi
Dhar vd., 2013	Grafen Nanolevha	Yok	Fotoğraflama	180 gün
Sun vd., 2013	Grafen Nanolevha	P19 ve P20 polimerleri	Fotoğraflama + UV-Vis spektrofotometresi	Görülmedi
Lee vd., 2013	GO Nanolevha	pH değişimi	Zeta potansiyel testi	Görülmedi
Ghozatloo vd., 2013	Grafen Nanolevha	Yok	Fotoğraflama + Termal iletkenlik sabitliği	Yaklaşık 7 gün
Kole ve Dey, 2013	Grafen Nanolevha	Yok	Termal iletkenlik sabitliği	Yaklaşık 150 gün
Akhavan-Zanjani vd., 2013	Grafen Nanolevha	PVA	UV-Vis spektrofotometresi	7 gün
Ma vd., 2013	Grafen Nanolevha	Yok	Fotoğraflama + UV-Vis spektrofotometresi	256 saat
Li, Chen vd., 2014	Grafen Nanolevha	Yok	Fotoğraflama + UV-Vis spektrofotometresi	Yaklaşık 7 gün
Hadadian vd., 2014	GO Nanolevha	Yok	Fotoğraflama + UV-Vis spektrofotometresi + Zeta potansiyel testi	60 gün
Hajjar vd., 2014	GO Nanolevha	Yok	Fotoğraflama	Görülmedi
Li, Zheng vd., 2014	Grafen Nanolevha	Yok	Fotoğraflama	Görülmedi
Park ve Kim, 2014	Grafen Nanolevha	Yok	Fotoğraflama	24 saat
Mehrali vd., 2014	Grafen Nanolevha	Yok	Fotoğraflama + UV-Vis spektrofotometresi + Zeta potansiyel testi	600 saat
Asirvatham vd., 2015	Grafen Nanolevha	Yok	Fotoğraflama	7 gün
Zubir vd., 2015	GO Nanolevha	pH değişimi ve tannik asit	Fotoğraflama + Zeta potansiyel testi	Görülmedi
Kazi vd., 2015	Grafen Nanolevha	pH değişimi	Fotoğraflama	60 gün
Mahmudul Haque vd., 2015	Grafen Nanolevha	SDBS	Fotoğraflama	4 gün

1.4.1. Grafen nanoakışkanlar

Grafen nanoakışkanlar, grafen türevlerinin bir baz sıvı içinde dağıtılmasıyla oluşturulan yüksek termal iletkenlikli akışkanlardır ve ısı transferi uygulamalarında önemli bir potansiyele sahiptir. Grafen nanoakışkanlar, yüksek termofiziksel özellikleriyle modern mühendislik uygulamalarının vazgeçilmez bileşenleri arasına girmiştir. Grafenin yüksek yüzey alanı, yüksek termal iletkenliği ve kimyasal kararlılığı, sıvıların ısı transfer verimliliğini artırır. Bu özellikler sayesinde elektronik soğutma, otomotiv motorları, ısı eşanjörleri ve güneş kolektörleri gibi sistemlerde etkin bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır. Grafen parçacıklarının taşıyıcı sıvılar içinde homojen dağılması, akışkanın termal özelliklerini önemli ölçüde iyileştirirken, düşük konsantrasyonlarda dahi yüksek ısı iletim kapasitesi sunarak enerji iletiminde önemli gelişmelere yol açmıştır. Viskozite ve akışkan dinamikleri gibi parametreler, grafen nanoakışkanların akışkanlık özelliklerini belirleyerek sistem performansı üzerinde doğrudan etkili olur. Ayrıca bu parametreler Brownian hareketi ve geniş yüzey etkileşimleri sayesinde ısı transfer mekanizmalarını optimize etmektedir. Grafen nanoakışkanlar kimyasal stabilitesi sayesinde aşınma ve korozyona karşı direnç göstermektedir. Bu sayede uzun ömürlü ve kararlı ısı ve elektrik iletimi sağlayarak mevcut teknolojilerde verimliliği artıran yenilikçi bir çözüm sunar (Bahiraei ve Heshmatian, 2019; Arshad vd., 2019).

Nano dolgu maddeleri, yüksek yüzey alanı nedeniyle topaklanma ve birbirlerine yapışarak mikro partiküller oluşturma eğilimindedir. Bu nedenle, nano dolgu maddesinin matris boyunca tek tek partiküller halinde dağılması, özellikle de moleküler düzeyde dağılması önemli bir adımdır. Yüksek parçacıklar arası etkileşim nedeniyle nanotüpler ve nanolevhalar gibi anizotropik nanopartiküller için aglomerasyon daha olasıdır. Grafenin polimerik malzemeler için dolgu maddesi olarak kullanılması, yeni bir nanokompozit sınıfının ortaya çıkmasına yol açmıştır. Grafen, kovalent olarak bağlanmış karbon atomlarının atomik bir katmanından oluşması sebebiyle iki boyutlu bir yapıdadır. Boyutları nedeniyle grafen, nanoparçacıklar olarak sınıflandırılır ve 2626 m²/g spesifik yüzey alanına sahiptir. Saf haliyle grafen bugüne kadar bilinen en sert ve en güçlü malzemedir. Grafenin gerilme mukavemeti 130 GPa ile çeliğe göre (310-690 MPa) çok daha yüksektir. Buna ek olarak grafen, 6000 S/cm gibi yüksek bir elektrik iletkenliğine ve 1.000-5.000 W/m·K aralığında yüksek bir termal iletkenliğe sahiptir. Ayrıca grafen moleküler açıdan geçirimsizdir. Bu nedenle mükemmel bir bariyer etkisine sahiptir. Görünür ışıktaki %2,3 gibi çok düşük bir ışık emilimi ile optik özellikleri de dikkat çekicidir. Ancak Novoselov ve arkadaşlarına göre grafenin malzeme özellikleri üretim sürecinden etkilenmektedir. Üstün fiziksel özellikleri nedeniyle grafen, plastiklerde potansiyel bir fonksiyonel dolgu maddesidir. Çalışmalar, grafenin plastiklerde düşük oranlarda kullanıldığında dahi fiziksel özelliklerde önemli bir iyileşme olduğunu göstermiştir. Grafenin fonksiyonel bir dolgu maddesi olarak dahil edilmesi ile mekanik dayanım, elektrik iletkenliği, termal iletkenlik gibi özelliklerin iyileştiğini göstermiştir. Karışıma düşük konsantrasyonlarda grafen eklendiğinde, polimerin fiziksel ve mekanik özelliklerinde kayda değer iyileşmeler görülmüştür (Gudarzi ve Sharif, 2012; Hopmann ve Adamy, 2019).

Grafenin benzersiz fiziksel ve kimyasal özellikleri ile geniş uygulama potansiyeli, son yıllarda yoğun bilimsel araştırmalara konu olmuştur. Bu potansiyelin endüstriyel ölçekte değerlendirilebilmesi için, grafenin ekonomik ve verimli biçimde büyük miktarlarda üretilebilmesini sağlayacak yöntemlerin geliştirilmesi kritik öneme sahiptir. Bu nedenle grafitin çözücü içinde, sıvı eksfoliasyon yöntemiyle grafen dispersiyonlarının elde edilmesi, ölçeklenebilir üretim stratejileri arasında öne çıkmaktadır. N-Metil-2-pirolidon (NMP), dimetil sülfoksit ve N,N-dimetilformamid gibi çözücüler, grafen eksfoliyasyonu için en uygun ortamlar arasında yer almaktadır. Bu çözücülerde elde edilen dispersiyonlar yüksek kinetik kararlılık göstermektedir. Ancak saf grafen, hidrofobik yapısı nedeniyle sulu ortamlarda yeterli dağılma göstermez. Bu nedenle, yüzey aktif maddelerle işlevselleştirme veya oksidasyon yoluyla GO formuna dönüştürülerek sulu dispersiyonlarda kararlı yapı elde edilebilmektedir (Rodgers vd., 2015).

İki boyutlu bir karbon allotropu olan grafen, tek katmanlı altıgen sp^2 karbon tabakasıdır. Ancak ticari olarak çok tabakalı agregalar halinde mevcuttur. Hidrofobik bir malzemedir ve herhangi bir çözücüde çözünmediği bilinmektedir. Çözünebilir grafen tabakalarına ilişkin bazı çalışmalarda, kimyasal olarak modifiye edilmiş grafen dispersiyonlarından bahsedilmektedir. Grafen dispersiyonlarının, güçlü tabakalar arası van der Waals kuvvetleri nedeniyle termodinamik olarak kararsız olduğu ve agregasyon ile çökeceği genel olarak kabul görmektedir. Bu tür dispersiyonlar liyofobik kolloidler olarak adlandırılır ve genellikle Derjaguin, Landau, Verwey ve Overbeek teorisi ile tanımlanır (Texter, 2014; Rodgers vd., 2015).

Texter'in çalışmasında grafen ve GO'nun çeşitli çözücülerdeki dağılımları incelendiğinde grafen dispersiyonlarının tek katman gerektiren uygulamalar için uygun olmadığı görülmüştür. Ancak bu alanda yapılacak daha fazla çalışmanın grafenin dispersiyonlarının bu dezavantajını ortadan kaldıracığı düşünülmektedir (Texter, 2014).

Grafen dispersiyonlarının kararlılığı, nanomalzemenin performansını doğrudan etkileyen bir parametredir. Mateos ve arkadaşlarının çalışmasında, farklı türde yüzey aktif madde (anyonik, non-iyonik ve katyonik) çözeltilerinde hazırlanan grafen dispersiyonları, özellikle grafen nanolevha kalınlığı üzerinden değerlendirilmiştir. SEM analizleri, yüzey aktif madde türüne ve konsantrasyonuna bağlı olarak grafen nanolevha kalınlığında belirgin bir azalma olduğunu göstermiştir. Özellikle katyonik surfaktanlar (CTAB ve DTAB), elektrostatik çekim yoluyla grafen yüzeyine güçlü biçimde adsorbe edilmiş ve esnek grafen levhalarının oluşmasını sağlamıştır. CTAB ile hazırlanan dispersiyonlarda ortalama grafen levha kalınlığı 12–19 nm arasında değişirken, DTAB ile bu değer 15–21 nm aralığında gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, katyonik surfaktanların grafen dispersiyonunda yüksek etkinliğe sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Non-iyonik bir sürfaktan olan Brij L23 ile elde edilen dispersiyonlarda ise grafen levhaları daha kalın görünmektedir. Yüzey aktif maddenin grafen yüzeyini yoğun biçimde kapladığı gözlemlenmiştir. Aniyonik SDS ile hazırlanan dispersiyonlarda ise grafen levha kalınlığı 35–46

nm arasında değişmiş, ancak yüksek konsantrasyonlarda dispersiyon kararlılığının azaldığı gözlemlenmiştir. Sürfaktan türü ve grafen/sürfaktan oranı, dispersiyon kararlılığını belirleyen temel faktörler arasında yer almaktadır. Bununla birlikte katyonik surfaktanların daha homojen ve ince yapılı bir grafen dağılımı sağladığı görülmüştür (Mateos vd., 2018).

Dispersiyonları hazırlamak için birçok endüstriyel yöntem vardır. En yaygın yöntem ufalama olarak da bilinen küçük ortam öğütmedir. Bu yöntemde çok küçük bileyeler ile bilyeli değirmende öğütme yapılır. Başka bir yaygın yöntem ise sonikasyondur. Sonikasyon, grafeni laboratuvar ölçekli miktarlarda çeşitli çözücüler içinde dağıtma prensibi ile gerçekleştirilir. Grafen, grafit tozundan üretilir veya ticari grafen kullanılabilir. Tek katmanlı grafenin aşırı anizotropisi nedeniyle, grafen dağılımı homojen değildir. Bu dağılıma çeşitli ortamlarda killerin pul pul dökülmesine benzetilebilir. Sonikasyon yönteminde, grafen nanoparçacıklarının çarpışma, topaklanma veya flokülasyona karşı sterik ve elektrostatik stabilite sağlamak için yüzey aktif maddeler ve polimerler gibi stabilizatörler kullanır. Bu çalışmalarda elde edilen yöntemlerin yüksek hacimli üretimler için de uygulanabilir olduğu düşünülmektedir (Texter, 2014).

1.5. Literatür Özeti

Grafenin eksfoliasyonu veya çözücü içinde dağılması, ultrasonik işleme elde edilebilir. Grafenin çözücülerde eksfoliasyonu üzerine yapılan araştırmalar, 40 mJ/m² yüzey gerilimine sahip çözücülerin eksfoliasyon için uygun ortam olduğunu göstermektedir. Örneğin, NMP, N-dimetilasetamid, bütirolakton ve dimetilformamid optimum yüzey gerilimine sahiptir. Bu çözücülerde verimli ve yüksek kaliteli bir eksfoliasyonun mümkün olduğu görülmüştür. Ancak bu çözücülerin bazı dezavantajları vardır. Bu dezavantajlardan ilki, çözücüler yüksek kaynama noktasına sahiptir. Bu nedenle eksfoliasyondan sonra çözücünün uzaklaştırılması zordur. Öte yandan, NMP gözü tahriş edicidir. Dimetilformamid ise birden fazla organ üzerinde toksik etkileri vardır. Bu nedenle yeni çalışmalar grafenin ultrasonik işlemler ile eksfoliasyonu için alternatif çözücülere yoğunlaşmaktadır. Organik çözücülere ek olarak, grafenin eksfoliasyonu için su bazlı çözeltiler de kullanılabilir. Bu amaçla eksfoliasyon, iyonik yüzey aktif maddeler tarafından stabilize edilen çeşitli sulu çözeltilerde gerçekleşir. En sık kullanılan iyonik yüzey aktif maddeler arasında sodyum deoksikolat, sodyum dodesilbenzen sülfonat ve SDS bulunmaktadır (Hopmann ve Adamy, 2019).

Guardia ve arkadaşları, bu maddelere ek olarak, grafenin ultrasonik işleme eksfoliasyonu için Pluronic P123 ticari adıyla iyonik olmayan bir yüzey aktif madde kullanmışlardır. Su bazlı çözeltideki yüzey aktif madde konsantrasyonu ağırlıkça %0,5 ile 1,0 arasında değişmiştir. Yüksek miktarda grafen üretimi elde etmek için çözeltilerde 100 mg/ml grafit başlangıç konsantrasyonu kullanılmış ve başlangıçta sonikasyon işleminin süresini 2 saat ile sınırlandırılmıştır. Elde edilen sonuçlar iyonik olmayan su-yüzey aktif madde çözeltilerinin

kullanımının iyonik su-yüzey aktif madde çözeltilerinden önemli ölçüde daha yüksek bir grafen konsantrasyonu sağladığını göstermektedir. %0,5 yüzey aktif madde (Pluronic P123) konsantrasyonunda 0,9 mg/ml'lik bir grafen konsantrasyonu elde edilebilmiştir. Sonikasyon süresinin 2 ila 5 saat arasında değişmesiyle, kararlı dağılmış grafen konsantrasyonu 0,9 ila 1,5 mg/ml arasında artmıştır (Guardia vd., 2011).

Texter'in çalışmasında, grafenin dispersiyonu için üç farklı yöntem denenmiştir. Birinci yöntemde grafen yüzey aktif madde veya polimer kullanılmadan belirli bir çözücü içinde dağıtılır. Fiziksel işlemler uygulanarak, grafen yüzeyinde dispersiyonu kolaylaştıran kimyasal değişiklikler yapılabilir. İkinci yöntemde, grafen yüzeyine kimyasal fonksiyonel gruplar eklenir ve bu sayede grafenin çözücü içinde çözünmesi ve dağılması sağlanır. Üçüncü yöntem ise; yüzey aktif maddeler, polimerler veya benzeri maddeler kullanılır. Bu maddeler grafen yüzeyinde tutunarak grafenin çözücü içinde topaklanmadan (flokülasyon olmadan) stabil kalmasını sağlar. Bu işlemlerde, genellikle sonikasyon gibi ısı ve titreşimle desteklenen yöntemlerle gerçekleştirilir. Bu sayede stabilizatörlerin grafen yüzeyine tutunmasını sağlayarak dispersiyonun devamlılığı sağlanır (Texter, 2014).

Li ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, DDAB ortamında GO eksfoliasyonu yapılmış ve nanomalzeme dispersiyonlarındaki işlevselliği incelenmiştir. Amfifilik yapıya sahip olan DDAB, su bazlı ortamda çift tabaka ve vesikül oluşumu gerçekleştirebilen bir yüzey aktif maddedir. Nanomalzeme stabilizasyonunda yaygın olarak kullanılan DDAB, biyomedikal ve malzeme bilimi alanlarında önemli bir rol oynamaktadır. Grafenin sıvı faz eksfoliasyonu sürecinde, DDAB'in yüzey modifikasyonunu ve dispersiyon stabilitesini artırdığı gözlemlenmiştir. Özellikle anyonik GO gibi yüzeylerle etkileşime girerek çözünürlük sağladığı ve uzun vadeli stabilite sunduğu belirtilmiştir. DDAB'in sulu ortamdaki nanomalzeme dispersiyonlarını optimize etme kapasitesi, yüzey yükü düzenlemeleri ve kendiliğinden organize olan yapıları sayesinde ileri düzey uygulamalar için önemli avantajlar sunduğu görülmüştür (Li vd., 2017).

Salihi ve arkadaşlarının çalışmasında SDS ile modifiye edilmiş grafen oksit (GO-SDS) üretilmiş ve özellikleri incelenmiştir. SDS, GO'nun yüzeyine bağlanarak negatif yük yoğunluğunu artırmış ve Ni(II) iyonlarının elektrostatik çekim yoluyla daha etkili bir şekilde adsorbe edilmesini sağlamıştır. Oda sıcaklığında ek kimyasallar kullanılmadan yapılan analizler, GO-SDS'nin iyon değişimi ve kimyasal adsorpsiyon özelliğine sahip olduğunu göstermiştir. SDS ile modifiye edilen GO'nun yüzey özelliklerinin gelişmesi sayesinde adsorpsiyon kapasitesinin önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiş ve ağır metal giderimi için verimli bir adsorban olduğu ortaya konmuştur (Salihi vd., 2016).

Zheng ve arkadaşlarının çalışmasında grafitten yola çıkarak sıvı faz eksfoliasyon yöntemiyle saf su içinde grafen nanolevha üretilerek tek aşamalı grafen dispersiyonları hazırlanmıştır. Eksfoliasyon sürecinde grafiti stabilize etmek amacıyla katyonik sürfaktan olan setil trimetil amonyum bromür kullanılmıştır. Hazırlanan grafen dispersiyonları çok katmanlı grafen nanolevha içermektedir. UV-VIS absorpsiyon spektroskopisi ile yapılan analizler, maksimum

absorpsiyonun 270 nm civarında gerçekleştiğini, bunun da aromatik C-C bağlarının π - π geçişlerine karşılık geldiğini göstermiştir. Dinamik ışık saçılımı ölçümleri, grafen nanolevhaların ortalama parçacık büyüklüğünün setil trimetil amonyum bromür konsantrasyonuna bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. Yüksek sürfaktan konsantrasyonlarında nanoparçacıkların daha küçük boyutlara sahip olduğu görülmüştür. Raman spektroskopisi, eksfoliyedilen grafen nanolevhalarda katman sayısının beşin üzerinde olduğunu göstermiştir. Zeta potansiyeli ölçümleri, dispersiyonların elektrostatik stabilizasyon mekanizması ile dengelendiğini ve özellikle sürfaktan konsantrasyonu 1 mg/ml ve üzerindeyken zeta potansiyelinin 45-60 Mv aralığında olduğunu göstermiştir. Termal ve akışkan kararlılığı açısından yapılan deneylerde, dispersiyonların yüksek sıcaklıklarda ve akış hızlarında stabilitesinin bozulmaya başladığı, ancak sıcaklık döngüsü uygulanarak bu bozulmanın giderilebileceği belirlenmiştir. Sonuç olarak, hazırlanan dispersiyonlar endüstriyel uygulamalar için uzun süreli stabiliteye sahiptir. Özellikle elektrostatik etkileşimin korunmasıyla kararlı bir yapı sergilemektedir. Hazırlanan dispersiyon iki hafta süreyle stabil olarak kalmıştır (Zheng vd., 2023).

Mehrali ve arkadaşlarının çalışmasında nanomalzemenin yüzey alanının nanoakışkan kararlılığına etkisini incelenmiştir. Nanoakışkanlar, yüzey aktif madde kullanılmaksızın, saf su ortamında ultrasonik dispersiyon yöntemiyle hazırlanmıştır. Çalışmada, 300, 500 ve 750 m²/g özgül yüzey alanına sahip grafen nanoparçacıklar, ağırlıkça %0.025-0.1 oranlarında dağıtılarak nanoakışkanlar elde edilmiştir. Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM) görüntüleri, nanoparçacıkların iyi dağılmış olduğunu ve tabaka yapılarının korunduğunu göstermektedir. UV-VIS spektroskopisi ve zeta potansiyel ölçümleriyle koloidal stabilite değerlendirilmiş; 600 saatlik gözlemede en düşük çökme oranı 750 m²/g yüzey alanına sahip grafen ile %0.025 oranında hazırlanan numunede gözlenmiştir. Zeta potansiyel değerleri, özgül yüzey alanı arttıkça stabilitenin iyileştiğini göstermiştir. Yapılan reolojik analizlerde ayrıca nanoakışkanların viskozitesinin sıcaklık arttıkça azaldığı görülmüştür. Termal iletkenlik ölçümlerinde ise, grafen konsantrasyonu ve özgül yüzey alanı arttıkça iletkenliğin yükseldiğini göstermiştir. En yüksek artış %0,1 oranında, 750 m²/g yüzey alanına sahip grafen ile hazırlanan numune ile elde edilmiştir (Mehrali vd., 2014).

Sonikasyon süresi, grafen nanolevha sentezindeki en önemli parametrelerden biridir. Sarsam ve arkadaşlarının çalışmasında su bazlı grafen nanoakışkanlarının stabilitesi üzerine ultrasonikasyon süresinin etkisi incelenmiştir. Ağırlıkça %0,1 grafen nanolevha içeren numuneler, 15, 30, 60, 90 ve 120 dakika olmak üzere beş farklı ultrasonikasyon süresi uygulanarak hazırlanmıştır. Yapılan analizlerde, yüzey aktif madde içermeyen çözeltinin saf su ortamında karalı bir nanoakışkan oluşturamadığı belirlenmiştir. Buna rağmen 60 dakikalık ultrasonikasyon uygulanan saf su/grafen numunesinin, 60 gün boyunca karalılığını koruyabildiği görülmüştür. Bu bulgudan hareketle, 60 dakikalık ultrasonikasyon süresi, bu çalışmada nanoakışkan hazırlama süreci için en etkili süre olarak değerlendirilmiştir. Bu sonuç, yüzey aktif madde içeren (1-1) SDBS ile hazırlanmış dispersiyonlar ile de teyit edilmiştir.

60 dakika sonikasyon uygulanan numunenin, 15, 30 ve 120 dakika sonikasyon uygulanan numunelere göre daha yüksek stabilite sergilediği görülmüştür (Sarsam vd., 2016).

Mahmoud ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, grafen ve türevlerinin antimikrobiyal potansiyelini detaylı biçimde incelenmiştir. GO, rGO ve grafen kuantum noktaları gibi iki boyutlu karbon bazlı nanomalzemelerin bakterilere, mantarlara ve virüslere karşı gösterdiği doğrudan ve dolaylı etki mekanizmaları ele alınmıştır. Bu mekanizmalar arasında hücre zarında fiziksel stres oluşturma, mekanik sarma, oksidatif stres aracılığıyla hücre içeriğinin bozulması ve genomla etkileşim gibi etkiler yer almaktadır. Özellikle GO'nun, Gram-negatif bakteriler olan *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Proteus mirabilis*, *Serratia marcescens* ve Gram-pozitif bakteriler olan *Staphylococcus aureus* ile *Enterococcus faecalis* üzerinde düşük konsantrasyonlarda bile etkili olduğu gösterilmiştir.

Antimikrobiyal etkinlik; grafen tabaka sayısı, parçacık boyutu, yüzey modifikasyonları, konsantrasyon ve dispersiyon özellikleri gibi parametrelerden etkilenmektedir. GO'nun oksijen içeren fonksiyonel grupları sayesinde su içerisinde dispersiyon kabiliyeti yüksektir. Bu sayede biyolojik ortamda daha etkin etkileşim sağlamaktadır. Tek katmanlı nanolevhaların küçük parçacık boyutlarında ve yüksek konsantrasyonlarda hücre zarına daha kolay nüfuz ederek antimikrobiyal etkiyi artırdığı görülmüştür. Bakteriyel ölüm oranlarının %90'a ulaştığı belirtilmiştir. Yüzey aktif madde katkısı içermeyen grafen türevleri arasında en yüksek antimikrobiyal aktivite GO ile elde edilmiştir. GO, hem dispers haldeyken hücre zarını fiziksel olarak bozarak hücre içeriğinin dışarı sızmasına neden olmuş, hem de oksidatif stres aracılığıyla hücre ölümünü tetiklemiştir. Bu özellikleriyle GO, antimikrobiyal tekstiller, biyosensörler, ilaç taşıyıcı sistemler ve kişisel koruyucu ekipmanlar gibi çeşitli biyomedikal uygulamalarda umut vadeden bir nanomalzeme olarak öne çıkmaktadır (Mahmoud vd., 2024).

Ghozatloo ve arkadaşlarının çalışmasında, grafenin fonksiyonelleştirilmesi ile yüzey aktif madde kullanmadan kararlı bir nanoakışkan sentezi amaçlanmıştır. Çalışmada fonksiyonelleştirilmiş grafenden nanofluidozlar yeni bir alkali yöntem kullanılarak hazırlanmıştır. Çalışmanın temel amacı, grafenin yaklaşık 5000 W/m·K olan yüksek ısı iletkenliğinden faydalanmaktır. Ancak saf grafen suda uzun süre dağılmış halde kalamamaktadır. Bu çalışmada öncelikle CVD yöntemiyle grafen nanolevha sentezi yapılmıştır. Ardından grafeni hidrofilik hale getirmek için potasyum persülfat (KPS) ve potasyum hidroksit (KOH) kullanılarak grafen yüzeyine potasyum karboksilat (-COOK) gruplarının eklenmesi sağlanmıştır. Raman analizinde, I_D/I_G oranının işlenmemiş grafende 1.98 iken, alkali fonksiyonelleştirilmiş grafende (AFG) 3.01'e yükselmesi, fonksiyonelleştirme işleminin başarıyla gerçekleştiğini göstermiştir. FTIR analizleri, işlenmemiş CVD grafende bulunmayan oksijenli fonksiyonel grupların AFG numunesinde oluştuğunu göstermiştir.

Hazırlanan AFG tozu kullanılarak, ağırlıkça %0.01 ila %0.05 konsantrasyonlarda deiyonize su içinde 1 saatlik ultrasonik banyo ile iki aşamalı bir prosesle nanoakışkanlar hazırlanmıştır. Hazırlanan nanoakışkanların kararlılığı gözlemler ve zaman içindeki ısı iletkenlik değişimiyle

değerlendirilmiştir. Fonsiyonelleştirme işlemi görmemiş saf grafen içeren kontrol numunesi 7 gün sonra topaklanma ve çökme gösterirken, alkali işlem görmüş AFG numunelerinin aynı süre sonunda stabil ve iyi dağılmış kaldığı gözlemlenmiştir. Zamanla ısı iletkenlik ölçümleri, ilk 40 saat içinde ısı iletkenliğinin topaklanma nedeniyle hafifçe azaldığını, ancak bu süreden sonra sabit kaldığını göstermiştir. Bu durum, AFG kullanılarak hazırlanan nanoakışkanların düşük konsantrasyonlarda iyi bir dağılıma sahip olduğunu ve topaklanma eğiliminin düşük olduğunu göstermiştir. Isıl iletkenlik ölçümleri, 10 ila 50 °C sıcaklık aralığında ölçülmüştür. Sonuçlar, AFG nanoakışkanların ısı iletkenliğinin hem konsantrasyon hem de sıcaklık artışıyla birlikte yükseldiğini göstermiştir. Kararlı AFG numunelerinde sıcaklık artışıyla ısı iletkenliğinin artması, dağılmış nanolevhaların Brownian hareketi sayesinde enerji taşınımının güçlenmesiyle açıklanmıştır. Elde edilen en iyi sonuç, ağırlıkça %0,05 oranında AFG içeren numunede elde edilmiştir. Bu numune saf suya kıyasla 25 °C 'de %14,1 ve 50 °C 'de %17 ısı iletkenlik artışı göstermiştir (Ghozatloo vd., 2013).

2. BÖLÜM

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, grafenin uzun süreli stabil dispersiyonunu sağlamak amacıyla katyonik yapıdaki yüzey aktif maddelerin (DDAB ve CPB) etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Belirli oranlarda yüzey aktif madde ile karıştırılan grafen, ultra saf su ortamında ultrasonik homojenizatörde işlenerek sulu nano-mikro dispersiyonları elde edilmiştir. Dispersiyonların stabiliteleri UV-VIS spektrofotometre ile değerlendirilmiş, yapısal karakterizasyonları Zeta sizer, Zeta potansiyel, X-Işını Difraksiyon Spektroskopisi (XRD), Raman ve TEM analizleriyle yapılmıştır. Ayrıca, hazırlanan grafen dispersiyonlarının antimikrobiyal etkileri test edilerek araştırılmıştır.

2.1. Kullanılan Kimyasal Maddeler

Grafen nanolevha, DDAB, CPB ve "Grafen nano-mikro sulu dispersiyon"ların hazırlanmasında ileri saflaştırma yapılmaksızın kullanılmıştır. Nanografi firmasından temin edilen grafen nanolevhaya ait saflık oranı %99,9 'dur. Fiziksel özellikleri; kalınlığı 3 nm, çapının ise 1.5 µm dir. 800 m²/g'lik spesifik yüzey alanı ve 1500–1980 S/m aralığındaki elektriksel iletkenliğe sahiptir. DDAB (C₂₆H₅₆BrN, 462.63 gr/mol) ve CPB (C₂₁H₃₈BrN, 384.4 gr/mol) Sigma-Aldrich firmasından temin edilmiştir.

2.2. Yöntem

2.2.1. Grafen nano-mikro sulu dispersiyonlarının hazırlanması

Belirli miktarda grafen nanolevhalar, 5 mg/ml derişiminde olacak şekilde ultra saf su içerisine ilave edilmiştir. Yüzey aktif maddeler, grafen nanolevha miktarına göre "grafen nanolevha/stabilizatör" oranları 1:0, 1:0,1, 1:0,25, 1:0,5, 1:1 olacak şekilde grafen nanolevha çözeltisi içerisine eklenmiştir. Ardından prob sonikatörde (BANDELİN SONOPULS 4100) %50 Amp. gücünde 2 saat boyunca 2 sn. pulse 2 sn. dinlenme şeklinde buzsuz ortamda sonikasyon işlemi yapılmıştır. Elde edilen çözeltiye 13.500 rpm de 1 dakika santrifüj (OHAUS FC5513-K) işlemi yapılmıştır. Santrifüj yapılmış ve santrifüj yapılmamış numuneler alınarak UV-VIS analizi ile optik enerji bant aralıkları ve makrodağılım testleri yapılarak stabiliteleri belirlenmiştir.

2.2.2. Makrodağılım testi ve optik özelliklerinin belirlenmesi

Grafen nano-mikro sulu dispersiyon örneklerinden 10 ml alınarak 13.500 rpm'de santrifüjlenmiş ve hemen ardından örnekler 1:3 (örnek: çözelti) oranında seyreltilerek zeta potansiyel, zeta boyut ve UV-VIS analizleri gerçekleştirilmiştir. 200-900 nm aralığında absorpsiyon spektrumları alınarak makrodağılım dereceleri ile optik bant aralıkları belirlenmiştir.

2.2.3. Grafen nano-mikro sulu dispersiyon ürünlerinin yapısal ve morfolojik karakterizasyonu

Grafen nano-mikro sulu dispersiyon ürünlerinin kalitesinin belirlenmesi amacıyla, yapısal ve morfolojik karakterizasyonları hizmet alımı yoluyla aşağıda ayrıntıları verildiği üzere belirtilen merkezlerde yaptırılmıştır.

UV-Vis Analizi, Hitit Üniversitesi Bilimsel Teknik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde Thermo Scientific / Evolution-201 cihazı ile yaptırılmıştır. Zeta potansiyeli analizi, Hitit Üniversitesi Bilimsel Teknik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde 10 mW ve 633 nm lazerli Malvern ZetaSizer Nano ZSP lazer partikül analiz cihazı ile yaptırılmıştır. Hazırlanan dispersiyonların içerdiği grafen nanolevhaların parçacık büyüklüğü Zeta Boyut Analizi 10 mW ve 633 nm lazerli Malvern ZetaSizer Nano ZSP lazer partikül analiz cihazı kullanılarak Hitit Üniversitesi Bilimsel Teknik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde incelenmiştir. Hazırlanan dispersiyonların XRD analizleri Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (TUAM)'da Rigaku DMAX IIC model X-ışınları difraktometresi (35 kW, 15 mA, CuK α , 1,541871 Å) kullanılarak 2°/dk tarama hızında gerçekleştirilmiştir. Raman spektroskopisi, Erciyes Üniversitesi Nanoteknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (ERNAM)'da oda sıcaklığında 0-3500 cm⁻¹ (4 cm⁻¹ adım) frekans aralığında 532 nm lazer uyarma dalga boyuna sahip bir Renishaw inVia Raman Mikroskobu (İngiltere) kullanılarak yapılmıştır. Hazırlanan dispersiyonların morfolojik özellikleri Lantan heksaborür (LaB₆) elektron tabancalı, 20-120 kV aralığında hızlandırıcı voltaj altında çalışan FEI marka Tecnai G2 Spirit Biotwin model Yüksek Kontrastlı Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM) kullanılarak Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarı MERLAB'da incelenmiştir.

2.2.4. Grafen nano-mikro sulu dispersiyon ürünlerinin antimikrobiyal etkinliklerinin belirlenmesi

Stabilizatör oranı optimize edilmiş grafen nano-mikro sulu dispersiyon ürünlerinin antimikrobiyal etkinliklerini belirlemek amacıyla çeşitli antimikrobiyal etkinlik testleri uygulanmıştır. Maddelerin antimikrobiyal aktiviteleri, Balouiri ve arkadaşlarının çalışmasına dayalı olarak, gerekli görülen uyarlamalarla birlikte agar kuyucuk difüzyon yöntemiyle değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, Gram pozitif bakterileri temsilen Staphylococcus aureus (ATCC 25923) ve Streptococcus pyogenes (ATCC 19615); Gram negatif bakterileri temsilen ise Proteus vulgaris (ATCC 6897) ve Escherichia coli (ATCC 25922) seçilmiştir. Ayrıca, maya-küf grubu mikroorganizmaları temsilen Candida albicans (ATCC 10231) kullanılmıştır.

Pasajlanmış test mikroorganizmaları aktifleştirildikten sonra, taze kültürlerinin hazırlanması amacıyla bir gece önceden inkübasyona bırakılmıştır. Elde edilen taze kültürler steril saf su ile, McFarland densitometresi yardımıyla 0.5 McFarland bulanıklığına (1.5×10^8

mikroorganizma/ml) seyreltilerek hazırlanmıştır. Her bir mikroorganizma türü, eküvyon çubuğu kullanılarak Müller-Hinton Agar (MHA) ortamına yayma tekniği ile ekilmiştir. Ekimi yapılmış petri kutularında kuyucuklar açılmış ve her kuyucuğa test maddelerinden 90 µl pipetlenmiştir. Maddelerin agara difüzyonunu sağlamak amacıyla petri kutuları 2 saat boyunca 4 °C'de bekletilmiştir.

Pozitif kontrol olarak imipenem ve tetrasiklin tercih edilirken, negatif kontrol olarak test maddelerinin çözücüleri tercih edilmiştir. İnkübasyon işlemi bakteriler için 37 °C'de 24 saat, maya için ise 28 °C'de 48 saat boyunca gerçekleştirilmiştir. İnkübasyon süresi sonunda, kuyucukların çevresinde oluşan inhibisyon zon çapları cetvel yardımıyla ölçülerek antimikrobiyal etkinlik değerlendirilmiştir (Balouiri vd., 2016).



3. BÖLÜM

DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

DDAB ve CPB olmak üzere iki farklı dağıtıcı ajan kullanılarak hazırlanan farklı konsantrasyonlardaki grafen nano-mikro sulu dispersiyon örneklerinin özellikleri UV-VIS analizi, makro dağılım dereceleri, Zeta potansiyel ve zeta boyut analizi, TEM, XRD ve Raman analizleri ile incelenmiştir.

3.1. Grafen Nano-Mikro Sulu Dispersiyon Örnekleri Hazırlanmasında DDAB'nin Etkisi

3.1.1. UV-VIS analizi ve makro dağılım derecelerinin belirlenmesi

Grafen nano-mikro sulu dispersiyon örneklerinden 10 ml alınarak 13.500 rpm'de santrifüjlenerek hemen ardından örnekler 1:3 (örnek: çözelti) oranında seyreltilerek zeta potansiyeli analizi ve UV analizleri gerçekleştirilmiştir. 200-900 nm aralığında absorpsiyon spektrumları alınarak makro dağılım dereceleri ile optik bant aralıkları belirlenmiştir.

Buna göre, absorbansın sadece doğrudan grafen konsantrasyonu ile ilgili olduğunu varsayılmıştır. Santrifüjden önce ve sonra grafen dispersiyonlarının absorbansı sırasıyla $Ab(\lambda)$ ve $Aa(\lambda)$ olarak tanımlanmıştır. Böylece, grafen nanolevhaların makro dağılım derecesi Eşitlik 1 ile belirlenmiştir (Kim vd., 2009; Kim vd., 2011).

$$DM (\%) = \frac{Aa(\lambda)}{Ab(\lambda)} \times 100 \quad (1)$$

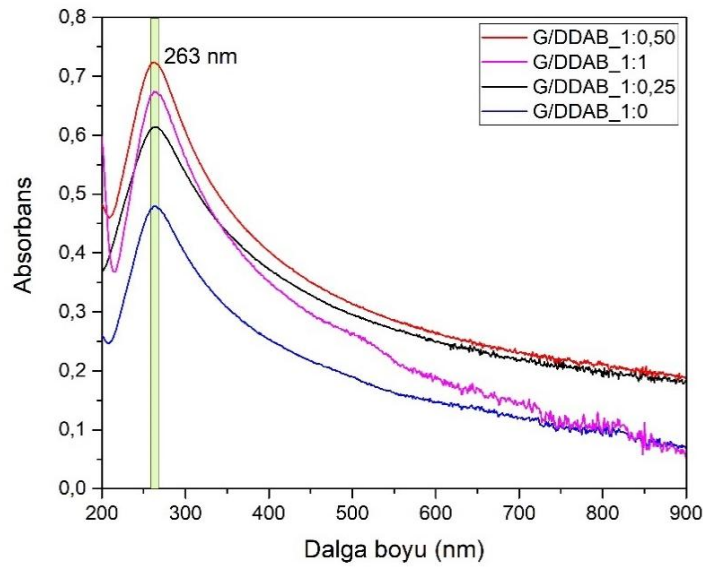
Burada λ dalga boyu, $Ab(\lambda)$ ve $Aa(\lambda)$ santrifüjden önceki ve sonraki absorbanstır. Bu anda, homojenizasyondan sonra şişenin dibinde grafen nanolevhaların herhangi bir çökeltisi meydana gelirse, bu çözelti standardizasyon için daha fazla kullanılamaz. Literatürde, UV-VIS spektroskopisi verileri kullanarak nanomalzemelerin makro dağılım derecesinin ölçülmesinin güvenilir bir değerlendirme yöntemi olarak kullanıldığı bildirilmektedir (Kim vd., 2009).

Kubelka-Munk denklemine (Eşitlik 2) göre çizilen $(\alpha hv)^2$ 'ye karşı hv grafiği Tauc grafiği olarak isimlendirilmekte olup, optik enerji bant aralıklarını belirlemek için kullanılabilir.

$$(\alpha hv)^2 = B(hv - E_g) \quad (2)$$

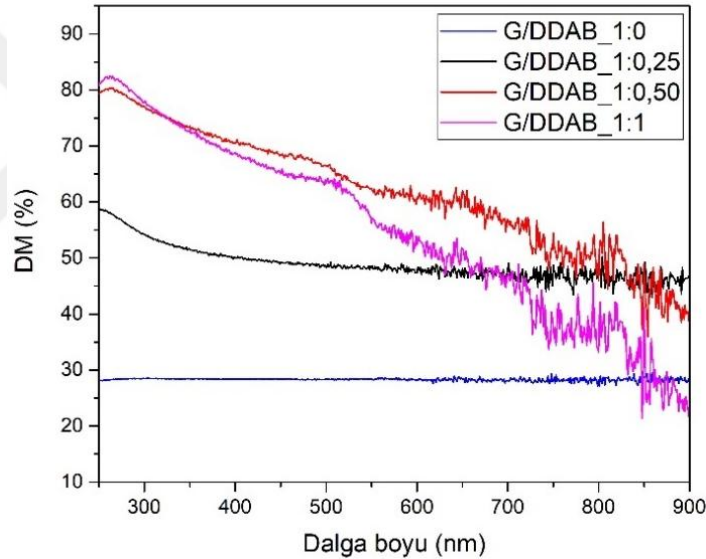
Burada, α absorpsiyon katsayısı, h Planck sabiti, ν fotonun frekansı, E_g optik enerji bant aralığı ve B sabittir (Nazim vd., 2021; Zhao vd., 2018). Literatürde, Tauc spektrumunun lineer bölümü tahmin edilirse, optik enerji bant aralığının (E_g) tahmin edilebildiği bildirilmiştir (Dwivedi vd., 2020; Keiteb vd., 2016).

Su ve katyonik DDAB çözeltilerin içinde dağılmış ticari grafenlerin absorpsiyon spektrumları, 200 ile 900 nm dalga boyu aralığında kaydedilmiştir. Grafen örneklerinin optik absorpsiyon spektrumu Şekil 3.1’de gösterilmektedir. Gözlenen sonuçlar, grafenin ultraviyole bölgesindeki tepkisini göstermektedir. 1:0,1 Grafen/Stabilizatör oranı (G/S) ile hazırlanan Grafen nano-mikro sulu dispersiyon örneği sonikasyondan hemen sonra çökmesinden dolayı UV ile ölçümü alınamamıştır. Absorpsiyon spektrumları, 1/0, 1/0,25, 1/0,50 ve 1/1 olmak üzere farklı oranlarda grafen/stabilizatör (DDAB) (G/S) içeren çözeltileri içerisinde 263 nm’de şiddetli absorpsiyon zirvesi göstermiştir. Bu absorpsiyon bandı, görünür bölgede absorpsiyon olmadığını göstermektedir. Farklı G/S oranlarında çözelti ortamlarında hazırlanan grafen örneklerinin absorbans değerleri, 1/0 G/S oranındaki örnekten yüksek bulunduğu görülmektedir. Belirli bir grafen konsantrasyonunda stabilizatör oranı 1:0,50 oranına arttırıldıkça absorbans artmıştır. 1:0,50 ve 1:1 G/S oranlarında absorbans değerleri yakın olduğu görülmektedir. Bu durum, grafenin stabilizatör etkisi ile çözeltilerde daha iyi dağılmasına bağlanabilir. Böylece santrifüjleme sırasında süpernatantta daha fazla grafen kalmış ve bunun bir sonucu olarak grafenler tarafından absorbansın arttığı görülmüştür.



Şekil 3.1. DDAB kullanılarak hazırlanan “Grafen nano-mikro sulu dispersiyon” örneklerinin santrifüjden hemen sonra ölçülen UV-VIS absorpsiyon spektrumları

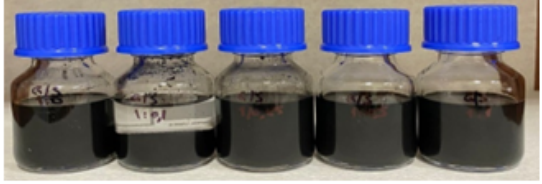
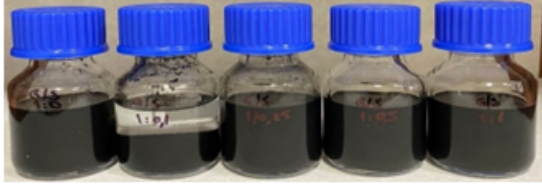
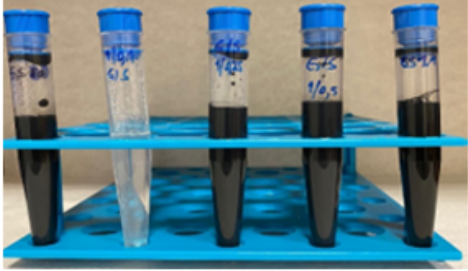
DDAB kullanılarak hazırlanan ‘‘Grafen nano-mikro sulu dispersiyon’’ örneklerinin makro dağılım dereceleri Şekil 3.2’de verilmiştir. 1:0,1 G/S oranı ile hazırlanan grafen nano-mikro sulu dispersiyon örneği sonikasyondan hemen sonra çökmesinden dolayı UV ile ölçümü alınmadığı için makro dağılım hesaplamaları yapılamamıştır. Grafenin su içerisindeki makro dağılım derecesi 25-30 aralığında değişirken, 1:0,25 G/S oranında hazırlanan grafen nano-mikro sulu dispersiyon örneğinin makro dağılım dereceleri artarak %50 aralıklarında stabil olarak belirlenmiştir. G/S oranı 1:0,50 ve 1:1 olarak DDAB miktarı artırıldığında grafen nano-mikro sulu dispersiyonlarının makro dağılım dereceleri sırasıyla %80-45 ve %80-25 aralıklarında belirlenmiştir. G/S oranı 1:0,50 ve 1:1 oranında DDAB içeren çözeltilerde makro dağılım dereceleri, 1:0 ve 1:0,25 oranına göre daha yüksek makro dağılım derecesine ulaşıldığı görülmektedir. Bu sonuçlar, DDAB kullanılarak hazırlanan ‘‘Grafen nano-mikro sulu dispersiyon’’ örneklerinin başarılı bir şekilde gerçekleştiğini ve DDAB kullanımının 1:0,25 oranından itibaren daha iyi dağılım gerçekleşmesini sağladığını göstermektedir.



Şekil 3.2. DDAB kullanılarak hazırlanan ‘‘Grafen nano-mikro sulu dispersiyon’’ örneklerinin makro dağılım dereceleri

Şekil 3.3’te grafenin distile su ve DDAB çözeltisi içindeki makro dispersiyonlarının, sonikasyon işleminden hemen sonra ve 2 hafta sonra, sonikasyon işleminden sonra yapılan santrifüj işleminden hemen sonraki fotografik görüntüleri verilmiştir. Bu görüntüler, grafenin makro dağılımlarının kabaca tahmini için yardımcı olabilir ve makro dağılım derece sonuçlarını da ayrıca desteklemektedir. Sonikasyon işleminden hemen sonra grafenin 1:0,1 G/S oranında çözelti içinde dağılmadan dipte çökelmiş olarak bulunduğu görülmektedir. Sonikasyon işleminden hemen sonra diğer oranlarda büyük miktarda grafenin dağıldığı ve bu dağılım stabilitesinin 2 haftaya kadar devam ettiği görülmektedir. Bununla beraber, 1:0,1 G/S oranı

dışındaki tüm nanoakışkanlar siyah ve karanlık görünmektedir. 1:0,1 G/S oranı ile hazırlanan grafen nano-mikro sulu dispersiyon örneğinin sonikasyondan hemen sonra çöktüğü görülmektedir. Bu durum, kullanılan stabilizatörün miktarının çok düşük olması nedeni ile dağıtıcı ajan olarak yetersiz kalmasına bağlanabilir.

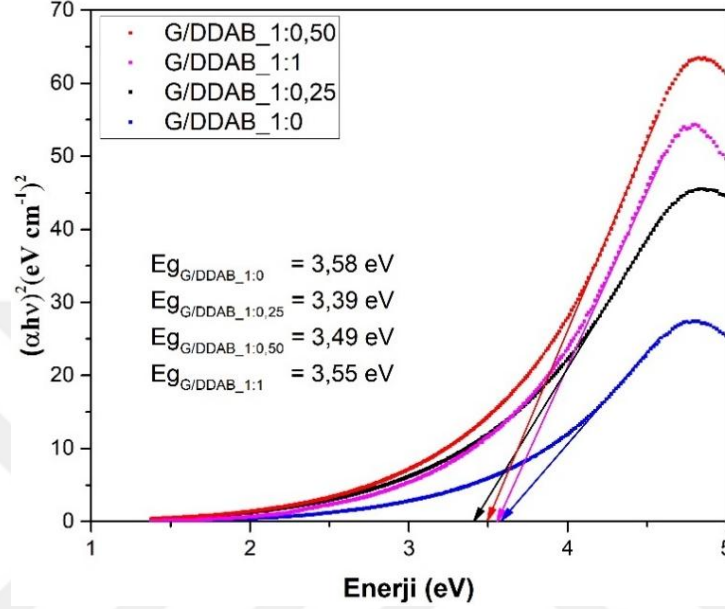
Sonikasyondan hemen sonra (Soldan sağa örnek sıralaması: 1/0, 1/0,1, 1/0,25, 1/0,50, 1/1)	
Sonikasyondan 2 hafta sonra (Soldan sağa örnek sıralaması: 1/0, 1/0,1, 1/0,25, 1/0,50, 1/1)	
Santrifüjden hemen sonra (Soldan sağa örnek sıralaması: 1/0, 1/0,1, 1/0,25, 1/0,50, 1/1)	

Şekil 3.3. DDAB kullanılarak hazırlanan “Grafen nano-mikro sulu dispersiyon” örneklerinin fotografik görüntüleri

Optik enerji bant aralığı, bir yarı iletkenin kendine has bir karakteridir ve temeldeki elektronik ve optik özellikleri yönetir. Bu nedenle, iletkenliği etkilemeden nanomalzemelerin optik enerji bant aralığını daha düşük bir değere getirmek gerekmektedir (Book, 2021).

DDAB kullanılarak hazırlanan “Grafen nano-mikro sulu dispersiyon” örneklerinin Tauc grafikleri ve tahmini bant aralıkları Şekil 3.4’te verilmiştir. 1:0,1 G/S oranı ile hazırlanan grafen nano-mikro sulu dispersiyon örneği sonikasyondan hemen sonra çökmesinden dolayı UV ile ölçümü alınamadığı için optik enerji bant aralığı hesaplaması yapılamamıştır. Bunun yanısıra, DDAB kullanılarak hazırlanan grafen nano-mikro sulu dispersiyon örneklerinin iyi dağılım sağlandığı G/S oranlarının 1:0,25 ve 1:0,50 farklı DDAB oranlarında daha düşük bant aralıklarına sahip olduğu görülmektedir. DDAB oranının artırılması ile bant aralığının arttığı

görülmektedir. Su içerisine sürfaktanın katılarak grafenlerin iyi dağılımının sağlanması ile bant aralıklarının 3,58 eV aralığından 3,39 eV aralığına düştüğü belirlenmiştir. Bu durum, düşük oranlarda DDAB kullanılması ile grafen nanopartiküllerin daha iyi dağılmasının sağlanmasına bağlanabilir.

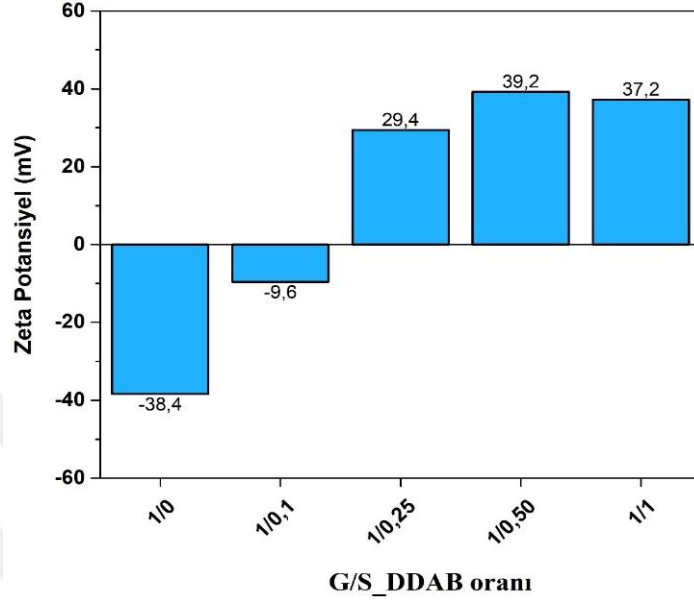


Şekil 3.4. DDAB kullanılarak hazırlanan “Grafen nano-mikro sulu dispersiyon” örneklerinin Tauc grafikleri ve tahmini bant aralıkları

3.1.2. Zeta potansiyel ve zeta boyut analizi

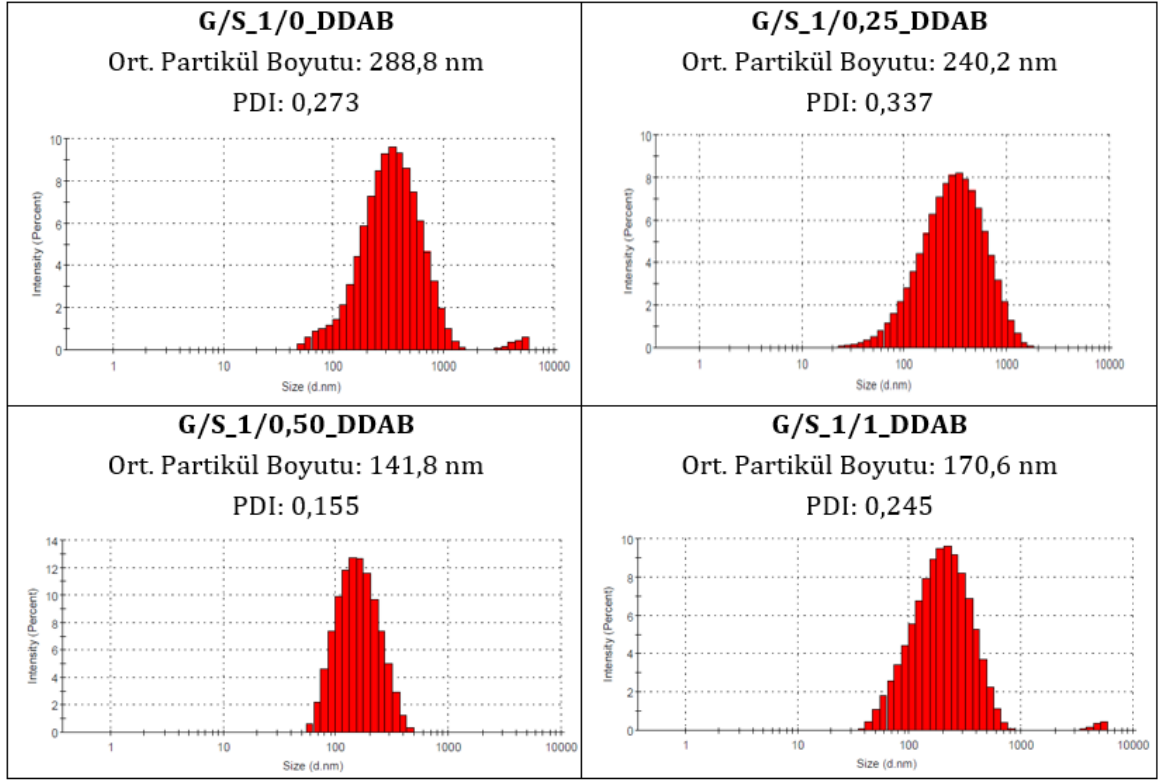
Zeta potansiyel değerlerine ayrıntılı bir bakış, grafen dağılımlarının kalitesi hakkında daha iyi bir açıklama yapılmasını sağlamaktadır. Zeta potansiyeli ölçümleri, iyonik olarak stabilize edilmiş kolloid sistemlerin bir göstergesidir. Kolloidal sistemin stabilitesi, asılı parçacıkların zeta potansiyelinin ± 25 mV'nin üzerine artmasıyla artar. Yani, zeta potansiyeli -25 mV'den düşük veya $+25$ mV'den fazla olan parçacıkların elektrostatik hususlara göre kararlı olması beklenmektedir (Oueiny, C., vd. 2016). Buna dayanarak çalışmamızda, DDAB kullanılarak hazırlanan “Grafen nano-mikro sulu dispersiyon” örneklerinin kolloidal stabiliteyi zeta potansiyelleri ölçülerek ayrıca değerlendirilmiştir. Şekil 3.5'te 1/0, 1/0,1, 1/0,25, 1/0,50 ve 1/1 farklı grafen/stabilizatör oranı içeren dört farklı dağıtma ortamı kullanılarak grafen nano-mikro sulu dispersiyonları için zeta potansiyeli verilmiştir. 1:0,1 G/S oranı ile hazırlanan grafen nano-mikro sulu dispersiyon örneği sonikasyondan hemen sonra çökmesi durumu zeta potansiyeli değeri ile açıklığa kavuşmaktadır. Bu oranda $-9,6$ mV değerindeki zeta potansiyel değeri bu örneğin kolloidal stabilitesinin de düşük olacağına işaret etmektedir. G/S oranında

DDAB'nin miktarı arttırıldığında zeta potansiyel değerlerinin arttığı ve 1:0,50 değerinde +39,2 mV ile en yüksek değere ulaştığı görülmektedir.



Şekil 3.5. DDAB kullanılarak hazırlanan “Grafen nano-mikro sulu dispersiyon” örneklerinin zeta potansiyelleri

Grafen nano-mikro sulu dispersiyon örneklerinin zeta boyut analizi ile parçacık boyutları belirlenmiş ve histogramları Şekil 3.6’da verilmiştir. Direk su ortamında hazırlanan grafenin ortalama partikül boyutu 288,8 nm bulunurken, 1: 0,50 G/S oranında hazırlanan grafen nano-mikro sulu dispersiyon örneğinin ortalama partikül boyutu 141,8 nm olarak en küçük boyutlara düşürülmüştür. 1:0,1 G/S oranı ile hazırlanan grafen nano-mikro sulu dispersiyon örneği sonikasyondan hemen sonra çökmesinden dolayı zeta boyut analizi ile ölçümü yapılamamıştır. 1: 0,50 G/S oranında hazırlanan grafen nano-mikro sulu dispersiyon örneğinin ortalama partikül boyutu en düşük bulunması yanı sıra partiküllerin boyutlarının daha dar bir alanda bulunduğu görülmektedir. Dispersan ilavesi ve ultrasonikasyon işlemi, nanomalzemenin agregasyon eğilimini azaltarak partiküllerin daha stabil bir şekilde dağılmasını sağlamış ve bu nedenle ortalama hidrodinamik partikül boyutunun daha düşük ölçülmesine katkıda bulunmuştur.

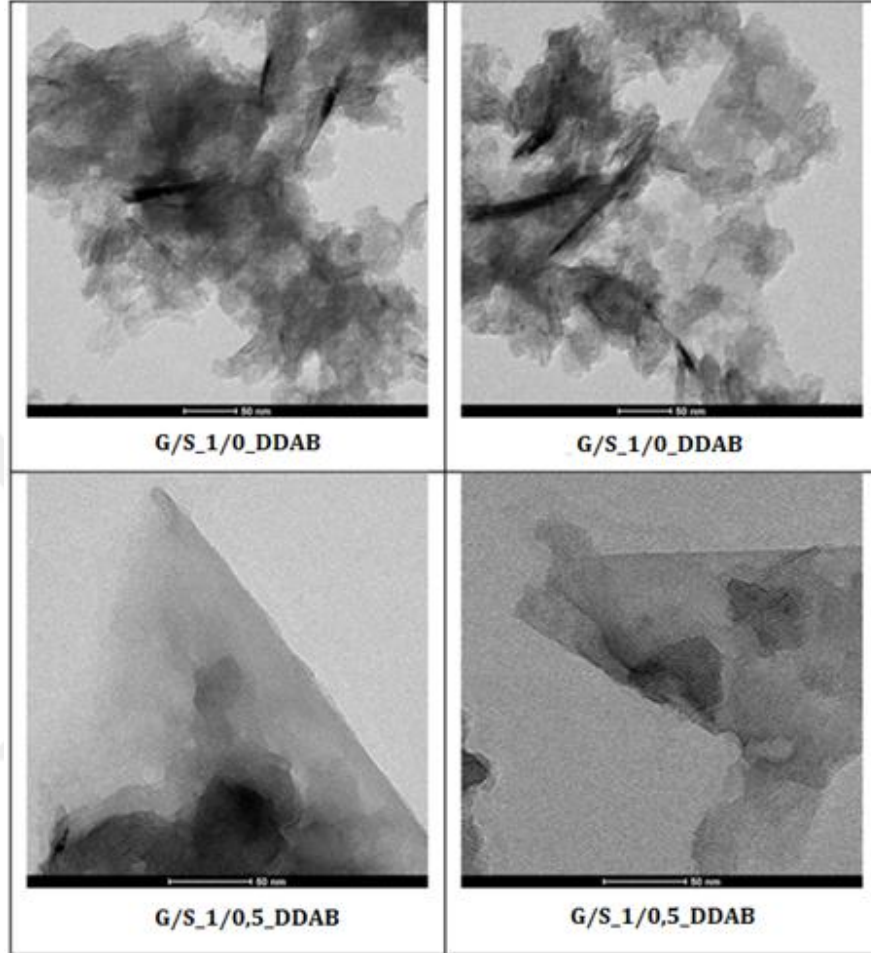


Şekil 3.6. DDAB kullanılarak hazırlanan “Grafen nano-mikro sulu dispersiyon” örneklerinin zeta boyut analiz sonuçları

3.1.3. TEM analizi

Grafen nano-mikro sulu dispersiyon örneklerinin TEM analiz sonuçları Şekil 3.7’de verilmiştir. TEM görüntüleri, yüzey aktif madde (DDAB) kullanılmayan su-temelli dispersiyonun grafen tabakalarının belirgin agregasyonlar oluşturduğunu göstermektedir. Tabakalar giderek kalın yığınlara dönüşmüş, düzensiz üst üste binmeler gözlenmiştir. Bu durum, grafenin yüksek yüzey enerjisi ve kuvvetli van der Waals çekimlerinin etkisiyle su ortamında kararsız olduğunu ve aglomerasyon eğiliminde olduğunu desteklemektedir. Benzer şekilde, saf su ortamında grafen dispersiyon konsantrasyonlarının çok düşük olduğu daha önce literatürde rapor edilmiştir (Georgakilas, 2025). DDAB kullanılarak hazırlanmış dispersiyon TEM görüntülerinde belirgin şekilde daha ince, birbirlerinden ayrık ve şeffaf grafen tabakaları göstermektedir. Tabakalar düzensiz yığınlar oluşturmak yerine, dağılım açısı yüksek ve homojen bir yapı ortaya koymaktadır. Bu gözlem, DDAB’nin grafen yüzeyine adsorbe olan katyonik bir yüzey aktif madde olarak elektrostatik ve sterik stabilizasyon sağlayarak dispersiyon kararlılığını belirgin biçimde artırdığını göstermektedir. Bu stabilizatörün hidrofobik kuyrukları grafen yüzeyine tutunurken, iyonik baş grupları su ile etkileşime girerek hidrofilik ortamda stabilize edici bir bariyer oluşturur. Literatürde, SDS, SDBS, HTAB (Heksadesiltrimetilamonyum bromür) gibi benzer iyonik yüzey aktif maddelerin belirli optimum konsantrasyonlarda grafen

dispersiyonunu stabilize ettiği ve daha yüksek dispersiyon kararlılığı sağladığı bildirilmiştir (Narayan ve Kim, 2015; Ibrahim vd., 2019).

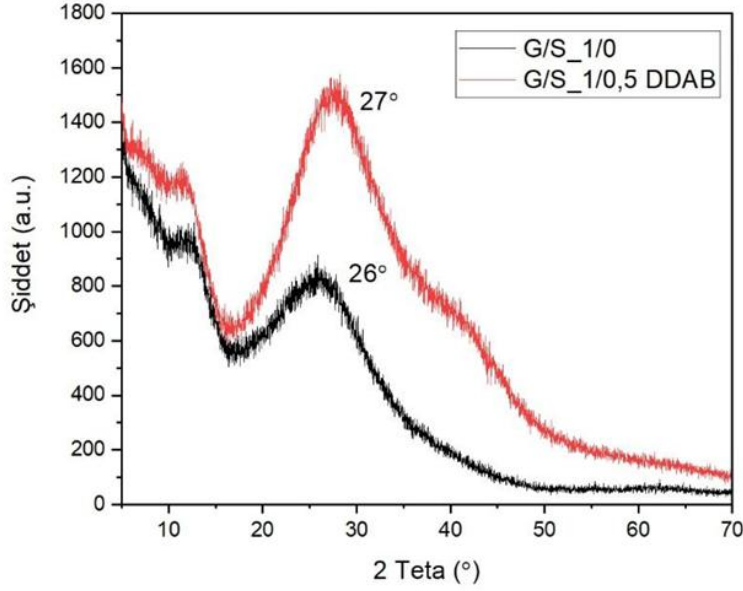


Şekil 3.7. DDAB kullanılarak ve kullanılmadan hazırlanan “Grafen nano-mikro sulu dispersiyon” örneklerinin TEM görüntüleri

3.1.4. XRD analizi

Grafen nano-mikro sulu dispersiyon örneklerinin XRD analizi Şekil 3.8’de verilmiştir. Şekil 3.8’de verilen XRD desenlerinde, kontrol örneği G/S_1/0’da yaklaşık 26° (2θ)’de geniş ve düşük yoğunluklu bir (002) pik gözlenmiştir. Bu, grafen tabakalarının kısmen istiflenme eğilimi gösterdiğini, fakat düzensiz bir yapı nedeniyle zayıf kristalin düzen sergilediğini göstermektedir. Buna karşılık, G/S_1/0,5 DDAB örneğinde aynı pik 27° (2θ) civarında daha yüksek şiddetle ortaya çıkmıştır. Pik konumundaki hafif kayma tabakalar arası mesafede değişime işaret ederken, şiddet artışı grafen tabakalarının daha düzenli istiflenmesini göstermektedir. Bu bulgular, TEM görüntülerinde elde edilen daha homojen dağılım ile

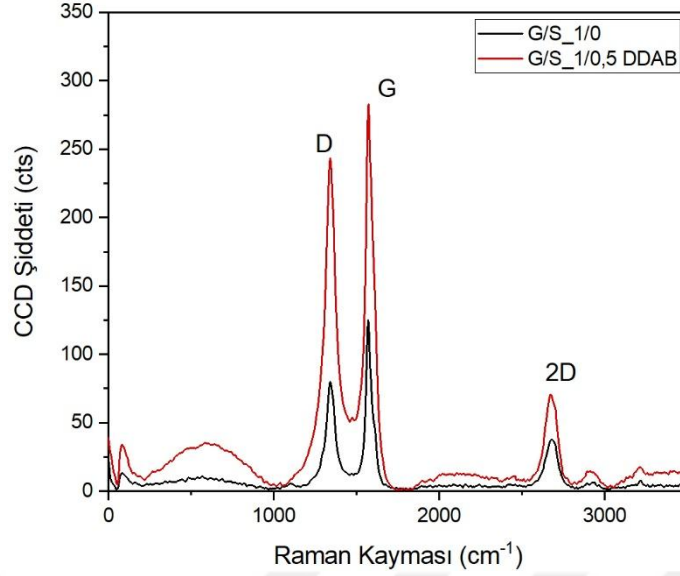
uyumludur. Bu durum, dispersan ilavesi ve ultrasonikasyon işlemi ile nanomalzemenin agregasyon eğilimini azaltarak partiküllerin daha stabil bir şekilde dağılmasının sağlanmasına bağlanabilir.



Şekil 3.8. DDAB kullanılarak ve kullanılmadan hazırlanan “Grafen nano-mikro sulu dispersiyon” örneklerinin XRD grafikleri

3.1.5. Raman analizi

Grafen nano-mikro sulu dispersiyon örneklerinin Raman analizi Şekil 3.9’da verilmiştir. Şekilde verilen Raman spektrumuna göre DDAB kullanılarak ve kullanılmadan hazırlanan “Grafen nano-mikro sulu dispersiyon” örneklerinin Raman pik yerleri, D, G ve 2D bant şiddetleri, D/G şiddet oranları Tablo 3.1’de verilmiştir. D, G ve 2D pik şiddetlerinin G/S_1/0,5DDAB örneğinde arttığı gözlenmiştir. 2 tepe yoğunluğunun (ID/IG) oranlarının karşılaştırılması, numunelerin kalitesini gösterir. Oranların sıfıra yaklaşması, karbon atomlarının daha düzenli bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir (Boran ve Güner, 2019). ID/IG’deki artış, karbon kafeslerinin yer değiştirmesi veya püskürtülmesiyle karbon kafeslerindeki kusurların üretimine bağlanırken, ID/IG’deki düşüş yapı restorasyonuna bağlanmıştır. Sonuç olarak, surfaktan katkısı (DDAB) grafen dispersiyonunu daha stabil ve ince hale getirirken, defekt miktarını artırabilmektedir.



Şekil 3.9. DDAB kullanılarak ve kullanılmadan hazırlanan “Grafen nano-mikro sulu dispersiyon” örneklerinin Raman spektrumları

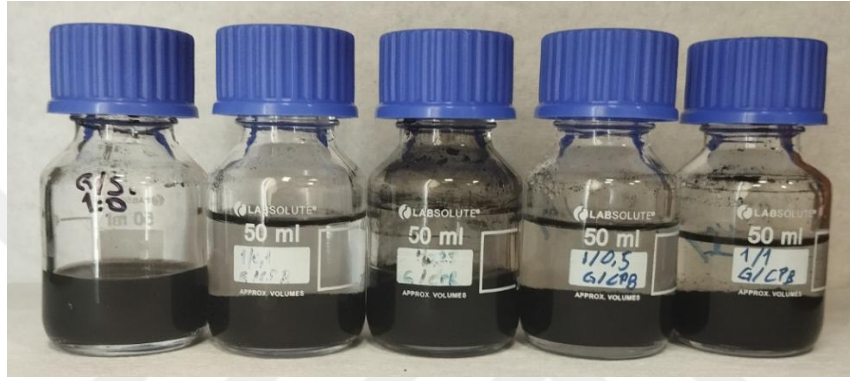
Tablo 3.1. DDAB kullanılarak ve kullanılmadan hazırlanan “Grafen nano-mikro sulu dispersiyon” örneklerinin Raman spektrum verileri

Örnekler	G/S_1/0	G/S_1/0,5 DDAB
D Band (cm⁻¹)	1339,03	1345,42
I_D	81,01	245,02
G Band (cm⁻¹)	1538,06	1568,06
I_G	126,17	283,74
2D Band (cm⁻¹)	2681,26	2676,47
I_{2D}	38,82	71,01
I_D/ I_G	0,64	0,86

3.2. Grafen Nano-Mikro Sulu Dispersiyon Örnekleri Hazırlanmasında CPB'nin Etkisi

Grafen nanolevha ve CPB kullanılarak hazırlanan “Grafen nano-mikro sulu dispersiyon” örneklerine CPB'nin etkisinin incelenmesi amacıyla, zeta boyut ve zeta potansiyel analizleri, TEM, XRD ve Raman analizleri yapılmıştır. CPB kullanılarak hazırlanan nanoakışkanlarda kararlı dağılım yalnızca tek bir derişimde sağlanabilmiş, diğer derişimlerde ise sistem hızlı bir şekilde çökme eğilimi göstermiştir (Şekil 3.10). Dağılımın yalnızca tek bir noktada kararlı olması nedeniyle UV-Vis analizine uygun bir derişim aralığı elde edilememiş ve bu nedenle UV-Vis ölçümleri CPB için gerçekleştirilmemiştir.

Şekil 3.10'da grafenin distile su ve CPB çözeltisi içindeki makro dispersiyonlarının, sonikasyon işlemi ardından 9 ay sonraki fotografik görüntüleri verilmiştir. Bu görüntüler, grafenin makro dağılımlarının kabaca tahmini için yardımcı olabilir. Sonikasyon işleminden hemen sonra grafenin 1:0,1 G/S oranında çözelti içinde dağılmadan dipte çökelmiş olarak bulunduğu görülmektedir. Sonikasyon işleminden hemen sonra 1:0,25 oranında büyük miktarda grafenin dağıldığı ve bu dağılım stabilitesinin 9 aya kadar devam ettiği görülmektedir. Bununla beraber, 1:0,25 G/S oranı dışındaki tüm grafen nano-mikro sulu dispersiyon örneklerinde sonikasyondan hemen sonra çökme gerçekleştiği görülmektedir.



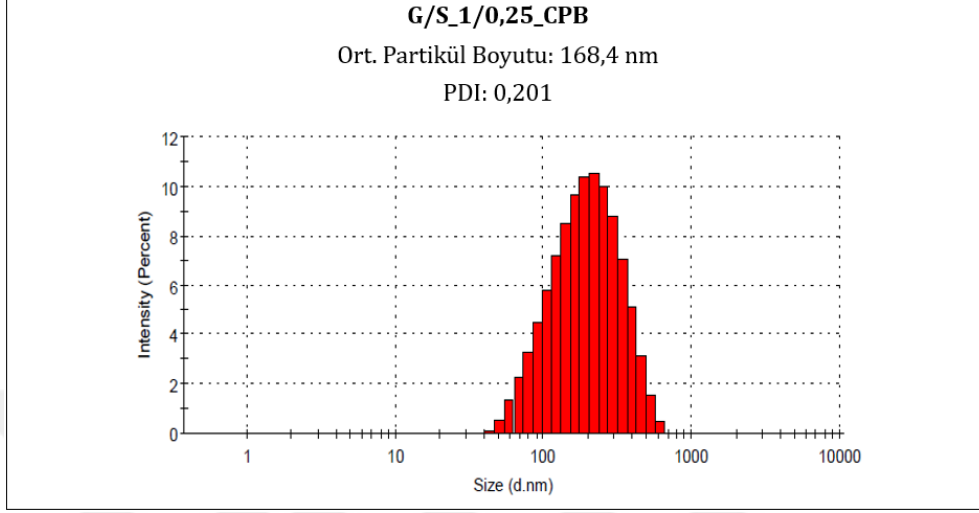
Şekil 3.10. CPB kullanılarak hazırlanan “Grafen nano-mikro sulu dispersiyon” örneklerinin fotografik görüntüleri

3.2.1. Zeta potansiyel ve zeta boyut analizi

Çalışmamızda, CPB kullanılarak hazırlanan “Grafen nano-mikro sulu dispersiyon” örneklerinin kolloidal stabilitesi zeta potansiyeli ölçülerek ayrıca değerlendirilmiştir. 1/0,25 oranında grafen/stabilizatör oranı içeren dağıtma ortamı kullanılarak grafen nano-mikro sulu dispersiyonu için +55,5 mV zeta potansiyeli değeri elde edilmiştir. Direk su ortamında hazırlanan grafenin zeta potansiyel değeri -38,4 mV bulunurken, 1: 0,25 G/S oranında hazırlanan grafen nano-mikro sulu dispersiyon örneğinin zeta potansiyel değerinin arttığı gözlenmiştir. G/S oranında CPB'nin miktarı arttırıldığında grafen nanomalzemesinin tamamen çökmesinden dolayı zeta potansiyel değerleri ölçülemezdir.

Grafen nano-mikro sulu dispersiyon örneklerinin zeta boyut analizi ile parçacık boyutları belirlenmiş ve histogramları Şekil 3.11'de verilmiştir. Direk su ortamında hazırlanan grafenin ortalama partikül boyutu 288,8 nm bulunurken, 1: 0,25 G/S oranında hazırlanan grafen nano-mikro sulu dispersiyon örneğinin ortalama partikül boyutu 168 nm olarak en küçük boyutlara düşürülmüştür. Diğer G/S oranları ile hazırlanan grafen nano-mikro sulu dispersiyon örnekleri sonikasyondan hemen sonra çökmesinden dolayı zeta boyut analizi ile ölçümü yapılamamıştır. 1: 0,25 G/S oranında hazırlanan grafen nano-mikro sulu dispersiyon örneğinin ortalama

partikül boyutu en düşük bulunması yanı sıra partiküllerin boyutlarının daha dar bir alanda bulunduğu görülmektedir.

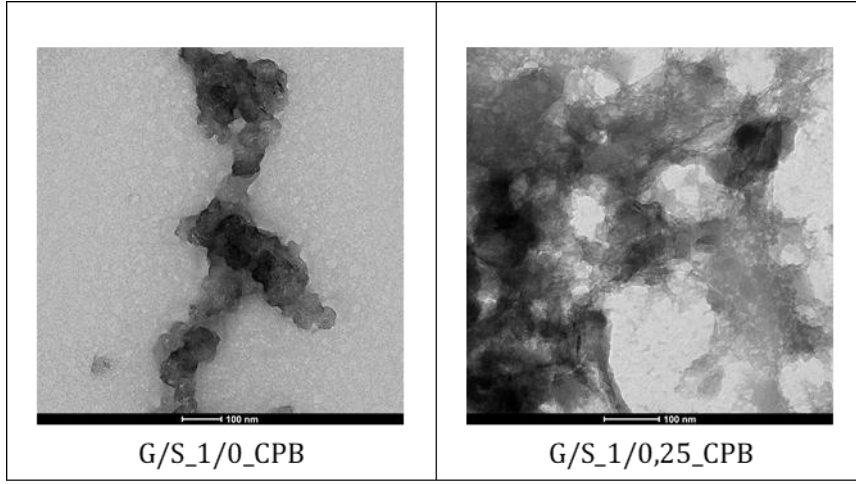


Şekil 3.11. CPB kullanılarak hazırlanan “Grafen nano-mikro sulu dispersiyon” örneğinin zeta boyut analiz sonucu

3.2.2. TEM analizi

Grafen nano-mikro sulu dispersiyonlarının TEM analiz sonuçları Şekil 3.12’de sunulmuştur. Görüntüler, yüzey aktif madde (CPB) kullanılmadan hazırlanan su bazlı dispersiyonlarda grafen tabakalarının belirgin şekilde bir araya toplanarak agregasyon oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Tabakaların zamanla kalın yığınlar dönüşüğü ve düzensiz üst üste binmelerin meydana geldiği gözlenmiştir. Bu durum, grafenin yüksek yüzey enerjisi ve güçlü van der Waals çekim kuvvetleri nedeniyle sulu ortamda kararlı olamadığını ve aglomerasyon eğilimi gösterdiğini doğrulamaktadır. Nitekim literatürde de saf su ortamındaki grafen dispersiyonlarının düşük konsantrasyonlarda elde edilebildiği rapor edilmiştir (Georgakilas, 2025).

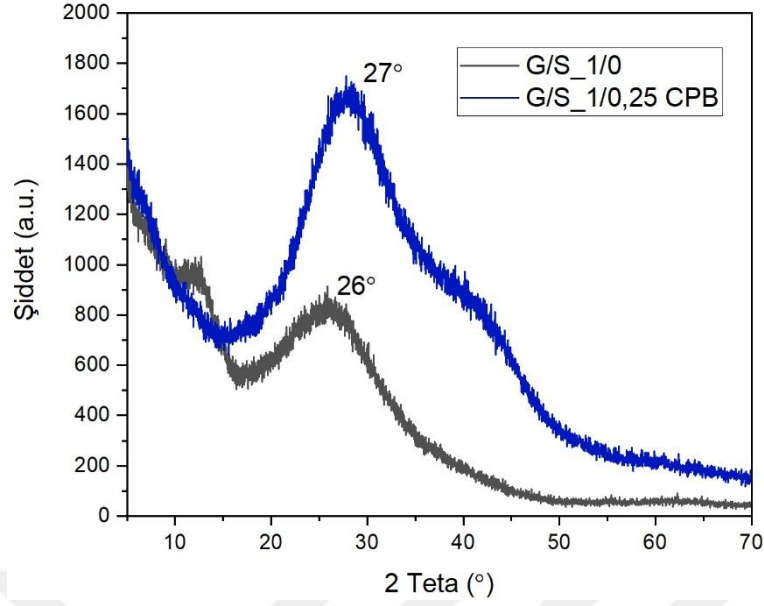
CPB ile hazırlanan dispersiyonların TEM görüntülerinde daha ince, birbirinden ayrılmış ve şeffaf grafen tabakalarının yer aldığı görülmektedir. Tabakaların, düzensiz yığınlar oluşturmak yerine daha homojen dağılım gösterdiği ve geniş açılarla yayıldığı dikkat çekmektedir. Bu bulgu, CPB’nin grafen yüzeyine adsorbe olan katyonik bir yüzey aktif madde olarak elektrostatik ve sterik stabilizasyon sağladığını göstermektedir. CPB’nin hidrofobik zincirleri grafen yüzeyine bağlanırken, iyonik baş grupları su ile etkileşime geçerek ortamda koruyucu ve stabilize edici bir bariyer oluşturur. Benzer şekilde, literatürde SDS, SDBS ve HTAB gibi iyonik yüzey aktif maddelerin uygun konsantrasyonlarda grafen dispersiyonunu stabilize ettiği ve daha yüksek kararlılık sağladığı bildirilmiştir (Narayan ve Kim, 2015; Ibrahim vd., 2019).



Şekil 3.12. CPB kullanılarak ve kullanılmadan hazırlanan “Grafen nano-mikro sulu dispersiyon” örneklerinin TEM görüntüleri

3.2.3. XRD analizi

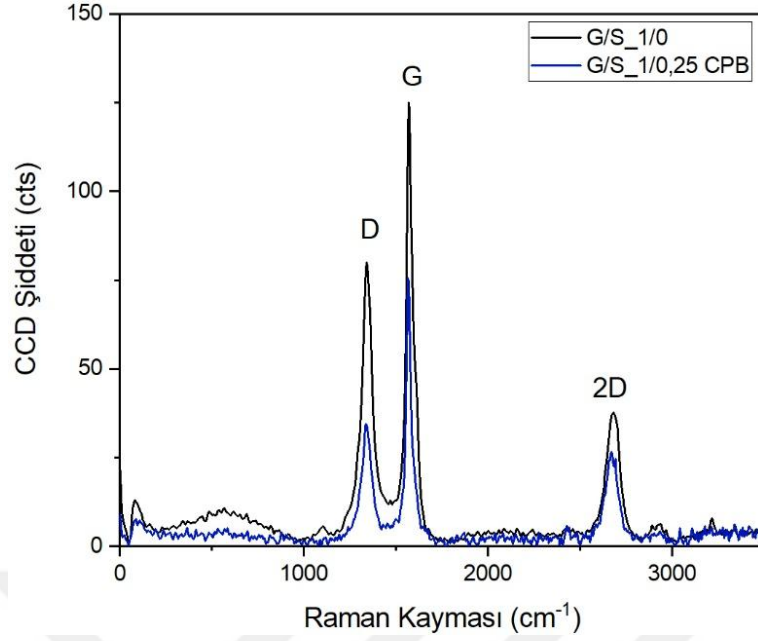
CPB katkılı grafen nano-mikro sulu dispersiyon örneklerinin XRD analizi Şekil 3.13'te verilmiştir. Şekil 3.13'te verilen XRD desenlerinde, DDAB stabilizatörü kullanılan örneklerde olduğu gibi kontrol örneği G/S_1/0'da yaklaşık 26° (2θ)'de geniş ve düşük yoğunluklu bir (002) pik gözlenmiştir. Bu, grafen tabakalarının kısmen istiflenme eğilimi gösterdiğini, fakat düzensiz bir yapı nedeniyle zayıf kristalin düzen sergilediğini göstermektedir. Buna karşılık, G/S_1/0,25 CPB örneğinde aynı pik 27° (2θ) civarında daha yüksek şiddetle ortaya çıkmıştır. Pik konumundaki hafif kayma tabakalar arası mesafede değişime işaret ederken, şiddet artışı grafen tabakalarının daha düzenli istiflenmesini göstermektedir. Pik konumundaki hafif kayma tabakalar arası mesafede değişime işaret ederken, şiddet artışı grafen tabakalarının daha düzenli istiflenmesini göstermektedir. Bu bulgular, TEM görüntülerinde elde edilen daha homojen dağılım ile uyumludur. Bu durum, dispersan ilavesi ve ultrasonikasyon işlemi ile nanomalzemenin agregasyon eğilimini azaltarak partiküllerin daha stabil bir şekilde dağılmasının sağlanmasına bağlanabilir.



Şekil 3.13. CPB kullanılarak ve kullanılmadan hazırlanan “Grafen nano-mikro sulu dispersiyon” örneklerinin XRD grafikleri

3.2.4. Raman analizi

Grafen nano-mikro sulu dispersiyon örneklerinin Raman analizi Şekil 3.14’te verilmiştir. Şekil 3.14’te verilen Raman spektrumuna göre CPB kullanılarak ve kullanılmadan hazırlanan “Grafen nano-mikro sulu dispersiyon” örneklerinin Raman pik yerleri, D, G ve 2D bant şiddetleri, D/G şiddet oranları Tablo 3.2’de verilmiştir. D, G ve 2D pik şiddetlerinin G/S_1/0,25CPB örneğinde düştüğü gözlenmiştir. 2 tepe yoğunluğunun (ID/IG) oranlarının karşılaştırılması, numunelerin kalitesini gösterir. Oranların sıfıra yaklaşması, karbon atomlarının daha düzenli bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir (Boran ve Gürer, 2019). ID/IG’deki artış, karbon kafeslerinin yer değiştirmesi veya püskürtülmesiyle karbon kafeslerindeki kusurların üretimine bağlanırken, ID/IG’deki düşüş yapı restorasyonuna bağlanmıştır. Sonuç olarak, CPB surfaktan katkısının grafen dispersiyonunu daha stabil ve düzenli bir yapı haline getirirken defekt miktarının azaldığı gözlenmiştir.



Şekil 3.14. CPB kullanılarak ve kullanılmadan hazırlanan “Grafen nano-mikro sulu dispersiyon” örneklerinin Raman spektrumları

Tablo 3.2. CPB kullanılarak ve kullanılmadan hazırlanan “Grafen nano-mikro sulu dispersiyon” örneklerinin Raman spektrum verileri

Örnekler	G/S_1/0	G/S_1/0,25 CPB
D Band (cm ⁻¹)	1.339,03	1.335,04
I _D	81,01	34,96
G Band (cm ⁻¹)	1.538,06	1.569,65
I _G	126,17	76,36
2D Band (cm ⁻¹)	2.681,26	2.672,48
I _{2D}	38,82	27,04
I _D / I _G	0,64	0,46

3.3. Optimize Grafen Nano-Mikro Sulu Dispersiyon Örneklerinin Antimikrobiyal Aktiviteleri

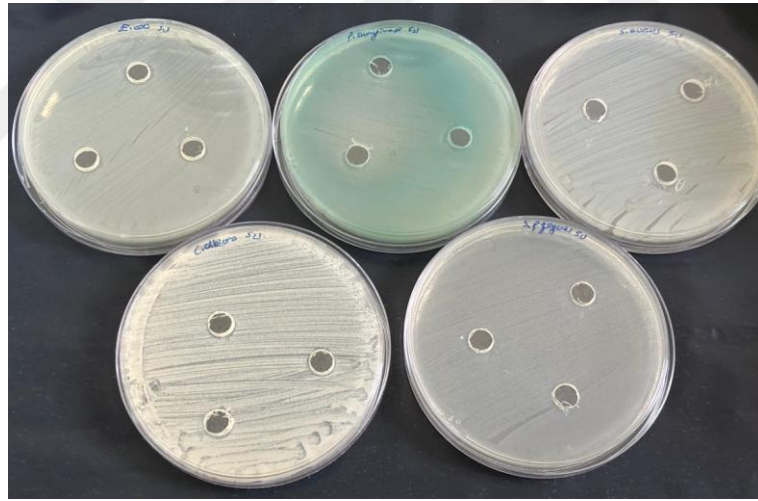
Optimize edilmiş grafen nano-mikro sulu dispersiyon örneklerinin antimikrobiyal aktiviteleri Tablo 3.3'te sunulmuştur. Kuyucuk çapları 8 mm olup, kuyucuk agar yöntemine göre çalışılmıştır. Antimikrobiyal aktivite sonuçları incelendiğinde, Şekil 3.15'te verilen saf su ve Şekil 3.16'da yer alan sürfaktan kullanılmadan hazırlanan G/S_1/0 kodlu negatif kontrol gruplarında herhangi bir inhibisyon zonu gözlenmemesi, test sisteminin güvenilirliğini ortaya koymuştur. Pozitif kontrol olarak kullanılan, Şekil 3.17'de gösterilen imipenem ve Şekil 3.18'de

yer alan tetrasiklin antibiyotikleri ise beklenildiği üzere yüksek zon çapları oluşturmuştur. Test edilen dispersiyonlardan DDAB kullanılarak hazırlanan ve Şekil 3.19'de gösterilen G/S_1/0,5 DDAB kodlu grafen nano-mikro sulu dispersiyon örneği, *S. pyogenes* (13,66 mm) ve *C. albicans* (10,66 mm) üzerinde antimikrobiyal aktivite ortaya koymuştur. CPB kullanılarak hazırlanan ve Şekil 3.20'de yer alan G/S_1/0,2 CPB kodlu grafen nano-mikro sulu dispersiyon örneği ise *S. aureus* (11,66 mm) ve *C. albicans* (11,33 mm) üzerinde inhibisyon göstermiştir. Gram negatif bakteriler olan *E. coli* ve *P. aeruginosa* hiçbir dispersiyona karşı duyarlılık göstermemiştir. Mikroorganizmalar bazında değerlendirildiğinde; bağırsak florasının üyesi olmakla birlikte patojen suşları çeşitli enfeksiyonlara neden olabilen *E. coli* ile bağışıklığı baskılanmış bireylerde fırsatçı enfeksiyonlara yol açan *P. aeruginosa* dirençli bulunmuştur. Buna karşılık, cilt ve solunum yolu enfeksiyonlarının önemli etkenlerinden biri olan *S. aureus* düşük konsantrasyonda sınırlı bir inhibisyon göstermiştir. Boğaz ve cilt enfeksiyonlarında rol oynayan *S. pyogenes* DDAB kullanılarak hazırlanan dispersiyona karşı anlamlı düzeyde duyarlılık göstermiştir. Normal flora üyesi olmasına rağmen bağışıklık sistemi baskılanmış bireylerde fırsatçı patojen hale gelebilen *C. albicans* ise her iki dispersiyona karşı da duyarlılık göstermiştir. Genel olarak elde edilen bulgular; hazırlanan dispersiyonların Gram pozitif bakterilere ve *C. albicans*'a karşı kısmi antimikrobiyal etki sergilediğini, Gram negatif bakteriler üzerinde ise herhangi bir inhibisyon oluşturmadığını ortaya koymaktadır.

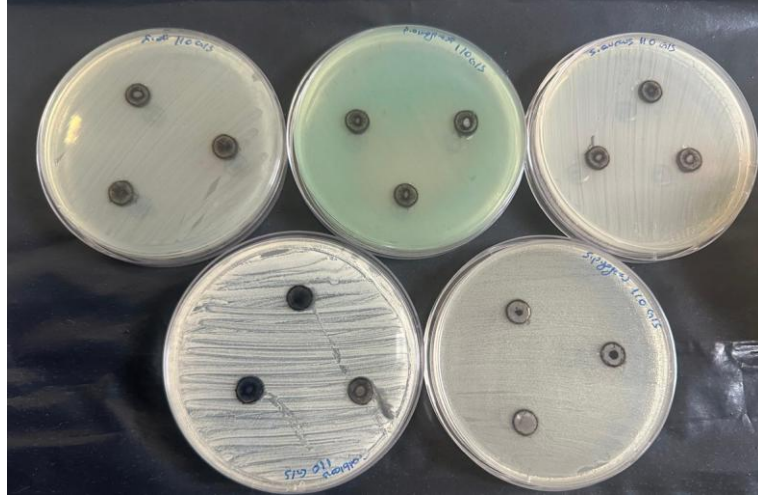
Gram pozitif ve Gram negatif bakterilerin hücre duvarı yapılarındaki farklılıklar, test edilen dispersiyonların etkinlik düzeylerini doğrudan etkilemiş olabilir. Gram pozitif bakterilerin hücre duvarı, kalın bir peptidoglikan tabakasından oluşmakta ve dış zar yapısı bulunmamaktadır. Bu nedenle, test edilen dispersiyonlarda yer alan antimikrobiyal bileşiklerin hücreye nüfuz etmesi görece daha kolay olmuş ve *S. aureus* ile *S. pyogenes* üzerinde kısmi bir inhibisyon etkisi ortaya çıkmıştır. Buna karşın Gram negatif bakteriler olan *E. coli* ve *P. aeruginosa*, hücre duvarlarının dışında bulunan lipopolisakkarit (LPS) içeren dış zar sayesinde ek bir geçirgenlik bariyerine sahiptir. Bu dış zar, özellikle hidrofobik veya büyük moleküllerin bakteri hücrelerine girişini engelleyerek direnç mekanizması oluşturur (Epand vd., 2016; Maher ve Hassan, 2023).

Tablo 3.3. DDAB, CPB kullanılarak ve kullanılmadan hazırlanan “Grafen nano-mikro sulu dispersiyon” örneklerinin ve antibiyotiklerin patojen mikroorganizmalara karşı inhibisyon zon ölçümleri (mm)

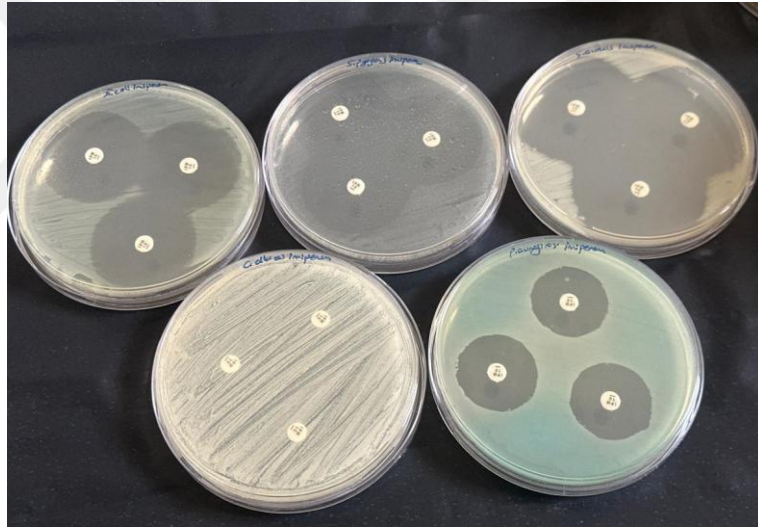
Örnek	Konsantrasyon (µg/disk)	Gram (-)		Gram (+)		Maya
		E. coli (ATCC 25922)	P. aeruginosa (ATCC 27853)	S. aureus (ATCC 25923)	S. pyogenes (ATCC 19615)	C. albicans (ATCC 10231)
G/S_1/0	450	--	--	--	--	--
G/S_1/0,2 CPB	450	--	--	11,66 mm	--	11,33 mm
G/S_1/0,5 DDAB	450	--	--	--	13,66 mm	10,66 mm
Su	--	--	--	--	--	--
İmipenem	10	37,33 mm	27 mm	49,33 mm	39,66 mm	--
Tetrasiklin	10	26,66 mm	10,33 mm	30,33 mm	49,33 mm	--



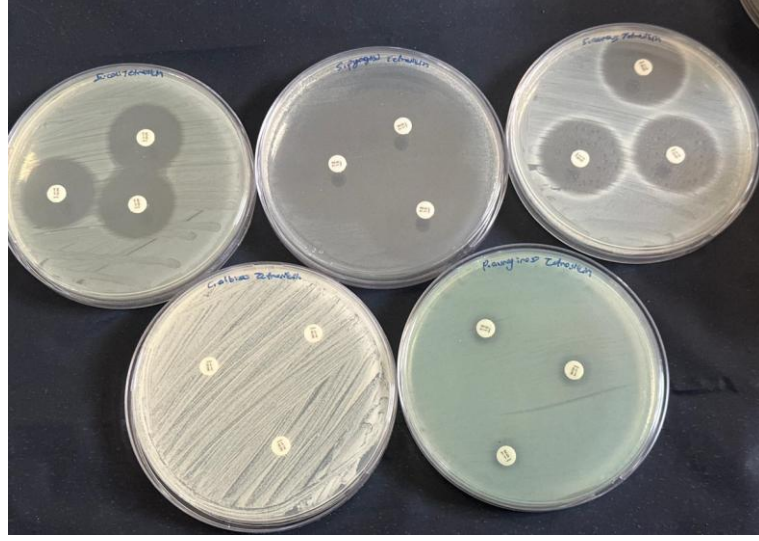
Şekil 3.15. Saf suyun patojen mikroorganizmalara karşı inhibisyon görüntüleri



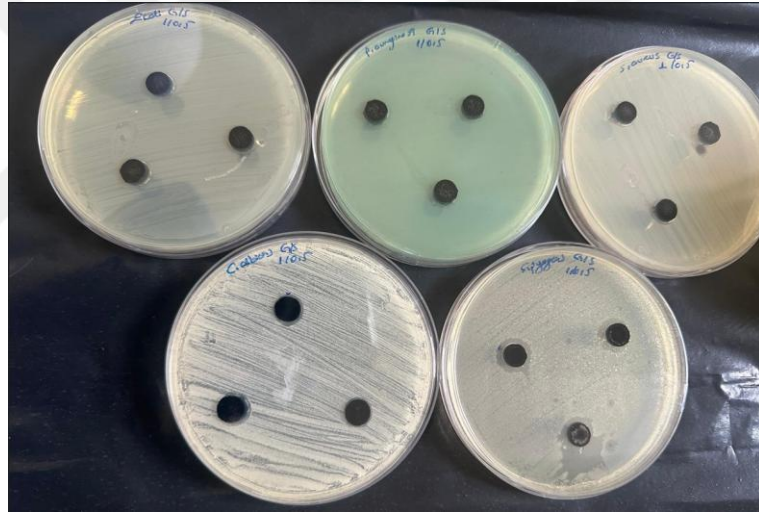
Şekil 3.16. Sürfactan kullanılmadan hazırlanan “Grafen nano-mikro sulu dispersiyon” örneğinin patojen mikroorganizmalara karşı inhibisyon görüntüleri



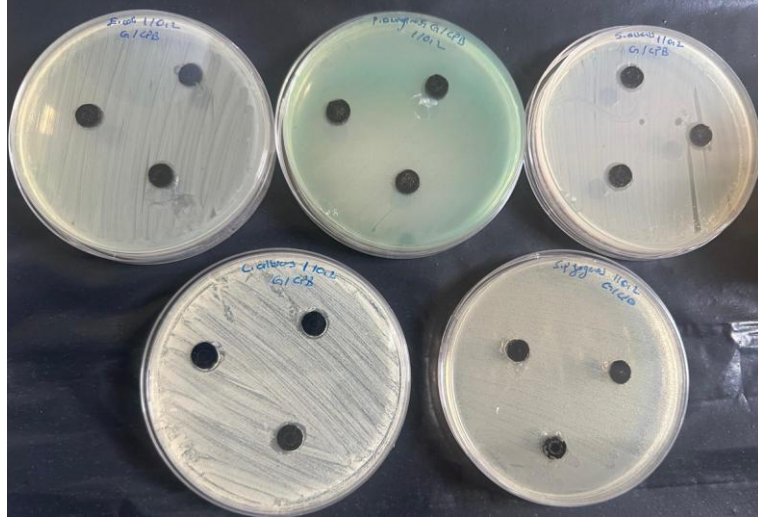
Şekil 3.17. İmipenemin patojen mikroorganizmalara karşı inhibisyon görüntüleri



Şekil 3.18. Tetrasiklinin patojen mikroorganizmalara karşı inhibisyon görüntüleri



Şekil 3.19. DDAB kullanılarak hazırlanan “Grafen nano-mikro sulu dispersiyon” örneğinin patojen mikroorganizmalara karşı inhibisyon görüntüleri



Şekil 3.20. CPB kullanılarak hazırlanan “Grafen nano-mikro sulu dispersiyon” örneğinin patojen mikroorganizmalara karşı inhibisyon görüntüleri

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, grafenin hidrofobik yapısından kaynaklanan sulu ortamlarda homojen dağılamama sorununun üstesinden gelmek ve uzun süreli stabil makrodispersiyonlar elde etmek amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, katyonik yüzey aktif maddeler olan DDAB ve CPB kullanılmıştır. Grafen nanoakışkanlar, 5 mg/ml grafen derişiminde, "grafen nanolevha/stabilizatör" (G/S) oranları 1:0, 1:0,1, 1:0,25, 1:0,5 ve 1:1 olacak şekilde hazırlanmıştır.

DDAB ile hazırlanan dispersiyonların analiz sonuçları, stabilizatör konsantrasyonunun kritik bir rol oynadığını göstermiştir. 1:0,1 G/S oranı, grafeni stabilize etmek için yetersiz kalmış, bu numune sonikasyondan hemen sonra çökmüş ve zeta potansiyel değeri -9,6 mV olarak ölçülmüştür. Buna karşılık, 1:0, 1:0,25, 1:0,5 ve 1:1 G/S oranları ile hazırlanan DDAB numuneleri, iki hafta boyunca stabilitelerini korumuştur. Kolloidal stabilite açısından en yüksek zeta potansiyel değeri 1:0,50 G/S numunesinde 39,2 mV olarak ölçülmüştür. Zeta boyut analizi de bu oranı desteklemiştir. 1:0 G/S çözeltisinde 288,8 nm olan ortalama parçacık boyutu; 1:0,50 G/S numunesinde 141,8 nm ile en küçük ortalama parçacık boyutu ve en dar dağılımı vermiştir.

UV-VIS analizlerinde en yüksek absorban değeri yine 1:0,50 oranında gözlenirken, makrodağılım derecesi (DM) %80 civarlarında dağılımı ortaya koymuştur. Ayrıca, DDAB kullanımı optik bant aralığını düşürmüş; 3,58 eV olan kontrol numunesine kıyasla en düşük bant aralığı 3,39 eV olarak saptanmıştır.

CPB kullanımının ise çok daha dar bir konsantrasyon aralığında başarılı olduğu tespit edilmiştir. 1:0,25 G/S oranı dışındaki tüm CPB numuneleri (1:0,1, 1:0,5, 1:1) sonikasyondan hemen sonra çöktüğü için analizleri yapılamamıştır. Başarılı olan 1:0,25 G/S CPB numunesi, +55,5 mV gibi çok yüksek bir zeta potansiyel değeri sergilemiştir. Bu stabil numunede ortalama parçacık boyutu 168 nm olarak ölçülmüştür.

Dispersiyonların morfolojik ve yapısal analizleri, yüzey aktif maddelerin fiziksel etkisini doğrulamıştır. TEM görüntüleri, yüzey aktif madde kullanılmayan (1:0 G/S) kontrol örneklerinde grafen tabakalarının belirgin agregasyonlar oluşturarak kalın ve düzensiz yığınlar dönüşüğünü göstermiştir. Buna karşılık, optimize edilmiş DDAB (1:0,5 G/S) ve CPB (1:0,25 G/S) numunelerinde, grafen tabakalarının belirgin şekilde daha ince, şeffaf ve birbirlerinden ayrık homojen bir yapı sergilediği gözlenmiştir. Bu durum, katyonik yüzey aktif maddelerin grafen yüzeyine adsorbe olarak etkin bir elektrostatik ve sterik stabilizasyon sağladığını kanıtlamıştır. XRD ve Raman analizleri de bu bulguyu desteklemiştir.

1/0,5 G/DDAB ve 1/0,25 G/CPB dispersiyonlarının antimikrobiyal aktiviteleri agar kuyucuk difüzyon yöntemiyle incelenmiştir. Her iki dispersiyon da Gram-negatif bakteriler olan E. coli ve P. aeruginosa'ya karşı herhangi bir inhibisyon zonu oluşturmamıştır. Bu direncin, Gram-negatif bakterilerin lipopolisakkarit (LPS) içeren dış zar yapısından kaynaklandığı ve bu zarın

bir geçirgenlik bariyeri oluşturduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte, bu dış zardan yoksun olan Gram-pozitif bakteriler ve mayalara karşı etkinlik gözlenmiştir. 1/0,25 G/CPB numunesi, *Staphylococcus aureus* (11,66 mm) ve *Candida albicans* (11,33 mm) üzerinde inhibisyona neden olmuştur. 1/0,5 G/DDAB numunesi ise *Streptococcus pyogenes* (13,66 mm) ve *C. albicans* (10,66 mm) üzerinde antimikrobiyal aktivite sergilemiştir. Kontrol grubu olarak kullanılan saf su ve 1/0 G/S numuneleri ise beklendiği gibi hiçbir mikroorganizma üzerinde aktivite göstermemiştir.

Sonuç olarak; grafenin üstün termal, elektriksel ve mekanik özelliklerinin pratik uygulamalara aktarılmasının önündeki en büyük engellerden biri olan sulu ortamdaki kararsız yapısı ve dağılım sorununun, bu çalışmada DDAB ve CPB katyonik yüzey aktif maddelerinin kullanılması ile çözümlenmesi sağlanmıştır. Grafen nanoakışkanların stabilizasyonunun sağlanması, bu ileri malzemenin yara örtüsü, hidrojel sentezi, nanokompozit üretimi, enerji depolama, elektronik ve ısı transferi gibi çok çeşitli bilimsel ve teknolojik alanlarda etkin kullanımının önünü açan kritik bir adımdır. Bu yaklaşım, grafenin homojen dağılımını sağlayarak ileri malzeme tasarımı ve uygulama alanlarının geliştirilmesi için yeni bir bakış açısı sunmaktadır. Ek olarak, optimize edilen bu dispersiyonların *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus pyogenes* ve *Candida albicans* gibi patojenlere karşı antimikrobiyal potansiyel sergilemesi, grafen bazlı nanoakışkanların biyomedikal uygulamalar için de değerli bir aday olabileceğini ve bu alandaki çalışmalara katkı sağlayabileceğini göstermiştir.

KAYNAKÇA

- Akhavan-Zanjani, H., Saffar-Avval, M., Mansourkiaei, M., Ahadi, M. & Sharif, F. 2013. "Turbulent Convective Heat Transfer and Pressure Drop of Graphene–Water Nanofluid Flowing inside a Horizontal Circular Tube." *Journal of Dispersion Science and Technology* 35: 1230–1240. <https://doi.org/10.1080/01932691.2013.834423>
- Akpan, E. I., Shen, X., Wetzal, B. & Friedrich, K. 2019. "Design and Synthesis of Polymer Nanocomposites." In *Polymer Composites with Functionalized Nanoparticles*, 47–83. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814064-2.00002-0>
- Arshad, A., Jabbal, M., Yan, F. & Reay, D. 2019. "A Review on Graphene Based Nanofluids: Preparation, Characterization and Applications." *Journal of Molecular Liquids* 279 (1): 444–484. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.153>
- Asirvatham, L. G., Wongwises, S. & Babu, J. 2015. "Heat Transfer Performance of a Glass Thermosyphon Using Graphene–Acetone Nanofluid." *Journal of Heat Transfer* 137: 111502. <https://doi.org/10.1115/1.4030479>
- Avouris, P. 2002. "Molecular Electronics with Carbon Nanotubes." *Accounts of Chemical Research* 35 (12): 1026–1034. <https://doi.org/10.1021/ar010152e>
- Bahiraei, M. & Heshmatian, S. 2019. "Graphene Family Nanofluids: A Critical Review and Future Research Directions." *Energy Conversion and Management* 196: 1222–1256. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.06.076>
- Bai, H., Gao, H., Feng, W., Zhao, Y. & Wu, Y. 2019. "Interaction in Li@Fullerenes and Li+@Fullerenes: First Principle Insights to Li-Based Endohedral Fullerenes." *Nanomaterials* 9 (4): 630. <https://doi.org/10.3390/nano9040630>
- Balandin, A. A., Ghosh, S., Bao, W., Calizo, I., Teweldebrhan, D., Miao, F., & Lau, C. N. 2008. "Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene." *Nano Letters* 8 (3): 902–907. <https://doi.org/10.1021/nl0731872>
- Balouiri, M., Sadiki, M. & Ibsouda, S. K. 2016. "Methods for In Vitro Evaluating Antimicrobial Activity: A Review." *Journal of Pharmaceutical Analysis* 6(2): 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.jpha.2015.11.005>
- Baruah, A., Newar, R., Das, S., Kalita, N., Nath, M., Ghosh, P., Chinnam, S., Sarma, H., & Narayan, M. 2024. "Biomedical Applications of Graphene-Based Nanomaterials: Recent Progress, Challenges, and Prospects in Highly Sensitive Biosensors." *Discover Nano* 19: 103. <https://doi.org/10.1186/s11671-024-04032-6>
- Bhattacharai, A., Niraula, T. P. & Chatterjee, S. K. 2014. "Sodium Dodecyl Sulphate: A Very Useful Surfactant for Scientific Investigations." *Journal of Knowledge-Based Innovation in China* 2 (1): 111–113.
- Bonaccorso, F., Sun, Z., Hasan, T. & Ferrari, A. C. 2010. "Graphene Photonics and Optoelectronics." *Nature Photonics* 4 (9): 611–622. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2010.186>
- Book, P. 2021. "Icaens 1." In *1st International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences*, 1–1115.
- Boran, F. & Çetinkaya Gürer, S. 2019. "The Effect of Starting Material Types on the Structure of Graphene Oxide and Graphene." *Turkish Journal of Chemistry* 43: 1322–1335. <https://doi.org/10.3906/kim-1901-47>
- Choi, S. U. S. & Eastman, J. A. 1995. "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles". In *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (Vol. 66)*. American Society of Mechanical Engineers
- Das, S. K., Putra, N., Thiesen, P. H. & Roetzel, W. 2003. "Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids." *Journal of Heat Transfer* 125 (4): 567. <https://doi.org/10.1115/1.1571080>

- Dhar, P., Ansari, M., Siva, V., Gupta, S. S., Pradeep, T., Pattamatta, A. & Das, S. K. 2013. "Percolation Network Dynamicity and Sheet Dynamics Governed Viscous Behavior of Polydispersed Graphene Nanosheet Suspensions." *Journal of Nanoparticle Research* 15: 1–12. <https://doi.org/10.1007/s11051-013-2095->
- Dreyer, D. R., Park, S., Bielawski, C. W. & Ruoff, R. S. 2010. "The Chemistry of Graphene Oxide." *Chemical Society Reviews* 39 (1): 228–240. <https://doi.org/10.1039/b917103g>
- Dwivedi, N., Dubey, K. C. & Shukla, R. K. 2020. "Structural and Optical Studies of Multi-Walled Carbon Nanotubes." *Materials Today: Proceedings* 29: 872–875. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.074>
- Eda, G. & Chhowalla, M. 2010. "Chemically Derived Graphene Oxide: Towards Large-Area Thin-Film Electronics and Optoelectronics." *Advanced Materials* 22 (22): 2392–2415. <https://doi.org/10.1002/adma.200903689>
- Endo, M., Strano, M. S., & Ajayan, P. M. 2007. "Potential Applications of Carbon Nanotubes." In *Carbon Nanotubes*, edited by A. Jorio, G. Dresselhaus ve M. S. Dresselhaus, Topics in Applied Physics, cilt 111, Berlin, Heidelberg: Springer, 13–61. https://doi.org/10.1007/978-3-540-72865-8_2
- Epand, R. M., Walker, C., Epand, R. F. & Magarvey, N. A. 2016. Molecular mechanisms of membrane targeting antibiotics. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranes*, 1858(5), 980-987. <https://doi.org/10.1016/j.bbamem.2015.10.018>
- Geim, A. K. & Novoselov, K. S. 2007. "The Rise of Graphene." *Nature Materials* 6 (3): 183–191. <https://doi.org/10.1038/nmat1849>
- Georgakilas, V. I. 2025. "Water as Solvent for the Dispersion of 2D Nanostructured Materials." *ChemPhysChem*, 26, e202400904 (1 of 14). <https://doi.org/10.1002/cphc.202400904>
- Ghozatloo, A., Shariaty-Niasar, M. & Rashidi, A. M. 2013. "Preparation of Nanofluids from Functionalized Graphene by New Alkaline Method and Study on the Thermal Conductivity and Stability." *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 42: 89–94. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.12.007>
- Guardia, L., Fernández-Merino, M. J., Paredes, J. I., Solís-Fernández, P., Villar-Rodil, S., Martínez-Alonso, A., & Tascón, J. M. D. 2011. "High-Throughput Production of Pristine Graphene in an Aqueous Dispersion Assisted by Non-Ionic Surfactants." *Carbon*, 49 (5): 1653–1662. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.12.049>
- Gudarzi, M. M. & Sharif, F. 2012. "Enhancement of Dispersion and Bonding of Graphene-Polymer through Wet Transfer of Functionalized Graphene Oxide." *eXPRESS Polymer Letters*, 6(12): 1017–1031. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2012.107>.
- Gupta, N., Gupta, S. M., & Sharma, S. K. 2019. "Carbon Nanotubes: Synthesis, Properties and Engineering Applications." *Carbon Letters*, 29: 419–447. <https://doi.org/10.1007/s42823-019-00068-2>
- Gupta, S. M., Sharma, S. K., & Gupta, N. 2024. "Advances in Carbon Nanomaterials." In *Nanotechnology: A Quick Guide to Materials and Technologies*, 152–204. <https://doi.org/10.2174/9789815256772124010008>
- Hadadian, M., Goharshadi, E. & Youssefi, A. 2014. "Electrical Conductivity, Thermal Conductivity, and Rheological Properties of Graphene Oxide-Based Nanofluids." *Journal of Nanoparticle Research*, 16: 1–17. <https://doi.org/10.1007/s11051-014-2788-1>
- Haddon, R. C. 1992. "Electronic Structure, Conductivity and Superconductivity of Alkali Metal Doped C60." *Accounts of Chemical Research*, 25 (3): 127–133. <https://doi.org/10.1021/ar00015a005>
- Hajjar, Z., Rashidi, A. M., & Ghozatloo, A. 2014. "Enhanced Thermal Conductivities of Graphene Oxide Nanofluids." *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 57: 128–131. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.07.018>

- Hopmann, C., & Adamy, M. 2019. "Preparation of Graphene-Based Compounds with Improved Dispersion by a Two-Stage Production Process." *Journal of Polymer Engineering*, 4: 368–76. <https://doi.org/10.1515/polyeng-2018-0126>
- Huang, Z. P., Xu, J. W., Ren, Z. F. & Wang, J. H. 1998. Growth of Highly Oriented Carbon Nanotubes by Plasma-Enhanced Hot Filament Chemical Vapor Deposition. *Applied Physics Letters*, 73 (26): 3845–3847. <https://doi.org/10.1063/1.122912>
- Ibrahim, A., Ridha, S., Amer, A., Shahari, R., Ganat, T. 2019. Influence of Degree of Dispersion of Noncovalent Functionalized Graphene Nanoplatelets on Rheological Behaviour of Aqueous Drilling Fluids, *International Journal of Chemical Engineering*, Volume 2019, Article ID 8107168, 11 pages. <https://doi.org/10.1155/2019/8107168>
- Iijima, S. 1991. "Helical Microtubules of Graphitic Carbon." *Nature*, 354 (6348): 56–58. <https://doi.org/10.1038/354056a0>
- Jensen, A. W., Wilson, S. R., & Schuster, D. I. 1996. "Biological Applications of Fullerenes." *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 4 (6): 767–779. [https://doi.org/10.1016/0968-0896\(96\)00081-8](https://doi.org/10.1016/0968-0896(96)00081-8)
- Kausar, A. 2025. "Fullerene hits for green energy—Marching towards solar cells." *Materials Technology Reports*, 3(1), 2351. <https://doi.org/10.59400/mtr2351>
- Kazi, S. N., Badarudin, A., Zubir, M. N. M., Ming, H. N., Misran, M., Sadeghinezhad, E., Mehrali, M., Shuhada, N. I. 2015. "Investigation on the Use of Graphene Oxide as Novel Surfactant to Stabilize Weakly Charged Graphene Nanoplatelets." *Nanoscale Research Letters*, 10: 1–15. <https://doi.org/10.1186/s11671-015-0882-7>
- Keiteb, A. S., Saion, E., Zakaria, A. & Soltani, N. 2016. "Structural and Optical Properties of Zirconia Nanoparticles by Thermal Treatment Synthesis." *Journal of Nanomaterials*, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2016/1913609>
- Kim, J. S., Song, K. S., Lee, J. H. & Yu, I. J. 2011. "Evaluation of Biocompatible Dispersants for Carbon Nanotube Toxicity Tests." *Archives of Toxicology*, 85 (12): 1499–1508. <https://doi.org/10.1007/s00204-011-0723-0>
- Kim, K., Kim, S.M., Cui, Y. & Jeong, M. S. 2009. "Evaluating the Degree of Macrodispersion of Carbon Nanotubes Using UV-VIS-NIR Absorption Spectroscopy." *Carbon Letters*, 10 (1): 14–18. <https://doi.org/10.5714/CL.2009.10.1.014>
- Kole, M. & Dey, T. K. 2013. "Investigation of Thermal Conductivity, Viscosity, and Electrical Conductivity of Graphene Based Nanofluids." *Journal of Applied Physics*, 113: 084307. <https://doi.org/10.1063/1.4793581>
- Kroto, H. W., Heath, J. R., O'Brien, S. C., Curl, R. F., & Smalley, R. E. 1985. "C60: Buckminsterfullerene." *Nature*, 318 (6042): 162–163. <https://doi.org/10.1038/318162a0>
- Kumar, S., Khan, S. I., Neidhe, M. M. R., Islam, M., & Hasan, M. M. 2024. "Nanomaterials in Industry: A Review of Emerging Applications and Development." *Control Systems and Optimization Letters*, 2 (3). <https://doi.org/10.59247/csol.v2i3.135342>
- Kurwadkar, S. T., Pugh, K., Gupta, A. & Ingole, S. 2014. "Nanoparticles in the Environment: Occurrence, Distribution, and Risks." *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 19 (3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000258](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000258)
- Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W., & Hone, J. 2008. "Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene." *Science*, 321 (5887): 385–388. <https://doi.org/10.1126/science.1157996>
- Lee, S. W., Kim, K. M. & Bang, I. C. 2013. "Study on Flow Boiling Critical Heat Flux Enhancement of Graphene Oxide/Water Nanofluid." *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 65: 348–356. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.06.013>

- Li, P., Zheng, Y., Wu, Y., Qu, P., Yang, R. & Zhang, A. 2014. "Nanoscale Ionic Graphene Material with Liquid-Like Behavior in the Absence of Solvent." *Applied Surface Science*, 314: 983–990. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.06.131>
- Li, W., McManus, D., Liu, H., Casiraghi, C., & Webb, S. J. 2017. "Aqueous Dispersions of Nanostructures Formed through the Self-Assembly of Iminolipids with Exchangeable Hydrophobic Termini." *Physical Chemistry Chemical Physics*, 19: 17036–17043. <https://doi.org/10.1039/C7CP02868G>
- Li, X., Chen, Y., Mo, S., Jia, L. & Shao, X. 2014. "Effect of Surface Modification on the Stability and Thermal Conductivity of Water-Based SiO₂-Coated Graphene Nanofluid." *Thermochimica Acta*, 595: 6–10. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2014.09.006>
- Liu, W. & Speranza, G. 2019. "Functionalization of Carbon Nanomaterials for Biomedical Applications." *C - Journal of Carbon Research*, 5 (4): 72. <https://doi.org/10.3390/c5040072>
- Liu, X., Ma, R., Wang, X., Ma, Y., Yang, Y., Zhuang, L., Zhang, S., Jehan, R., Chen, J. & Wang, X. 2019. "Graphene Oxide-Based Materials for Efficient Removal of Heavy Metal Ions from Aqueous Solution: A Review." *Environmental Pollution*, 252: 62–73. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.050>
- Ma, W., Yang, F., Shi, J., Wang, F., Zhang, Z. & Wang, S. 2013. "Silicone Based Nanofluids Containing Functionalized Graphene Nanosheets." *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 431: 120–126. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2013.04.031>
- Maher, C., & Hassan, K. A. 2023. "The Gram-negative permeability barrier: tipping the balance of the in and the out." *MBio*, 14(6), e01205-23. <https://doi.org/10.1128/mbio.01205-23>
- Mahmoud, A. E. D., Sultan, N. S. & Abdel-Fattah, T. M. 2024. "Role of Graphene-Related 2D Nanomaterials in Antimicrobial Potentials: An Overview." *Advanced Carbon Journal*, 1(1): 56–92. <https://doi.org/10.62184/acj.jacj1000202424>
- Mahmudul Haque, A. K. M., Kwon, S., Kim, J., Noh, J., Huh, S., Chung, H. & Jheong, H. 2015. "An Experimental Study on Thermal Characteristics of Nanofluid with Graphene and Multi-Wall Carbon Nanotubes." *Journal of Central South University*, 22: 3202–3210. <https://doi.org/10.1007/s11771-015-2857-3>
- Maiti, D., Tong, X., Mou, X. & Yang, K. 2018. "Carbon-Based Nanomaterials for Biomedical Applications: A Recent Study." *Frontiers in Pharmacology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fphar.2018.01401>
- Mateos, R., García-Zafra, A., Vera-López, S., San Andrés, M. P. & Díez-Pascual, A. M. 2018. "Effect of Graphene Flakes Modified by Dispersion in Surfactant Solutions on the Fluorescence Behaviour of Pyridoxine." *Materials*, 11 (6): 888. <https://doi.org/10.3390/ma11060888>
- Mehrali, M., Sadeghinezhad, E., Latibari, S. T., Kazi, S. N., Mehrali, M., Zubir, M. N. M. & Metselaar, H. S. C. 2014. "Investigation of Thermal Conductivity and Rheological Properties of Nanofluids Containing Graphene Nanoplatelets." *Nanoscale Research Letters*, 9: 1–12. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-9-15>
- Mekuye, B. & Abera, B. 2023. "Nanomaterials: An Overview of Synthesis, Classification, Characterization, and Applications." *Nanoselect*, 4 (8): 486–501. <https://doi.org/10.1002/nano.202300038>
- Narayan, R. And Kim, S. O. 2015. "Surfactant mediated liquid phase exfoliation of graphene." *Nano Convergence*, (2015) 2:20. <https://doi.org/10.1186/s40580-015-0050-x>
- Nazim, M., Khan, A. A. P., Asiri, A. M. & Kim, J. H. 2021. "Exploring Rapid Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants with Porous CuO Nanosheets: Synthesis, Dye Removal, and Kinetic Studies at Room Temperature." *ACS Omega*, 6 (4): 2601–2612. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04747>
- Oliveira, L. R., Silva, A. C. A., Dantas, N. O. & Bandarra Filho, E. P. 2017. "Thermophysical Properties of TiO₂-PVA/Water Nanofluids." *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115, Part A: 795–808. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.07.094>

- Oueiny, C., Berlioz, S., Patout, L. & Perrin, F. X. 2016. "Aqueous Dispersion of Multiwall Carbon Nanotubes with Phosphonic Acid Derivatives." *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 493: 41–51. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.01.028>
- Park, S. D., Lee, S. W., Kang, S., Kim, S. M. & Bang, I. C. 2012. "Pool Boiling CHF Enhancement by Graphene-Oxide Nanofluid under Nuclear Coolant Chemical Environments." *Nuclear Engineering and Design*, 252: 184–191. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2012.07.016>
- Park, S. S. & Kim, N. J. 2014. "Influence of the Oxidation Treatment and the Average Particle Diameter of Graphene for Thermal Conductivity Enhancement." *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20: 1911–1915. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.09.011>
- Rodgers, A. N., Velicky, M. & Dryfe, R. A. W. 2015. "Electrostatic Stabilization of Graphene in Organic Dispersions." *Langmuir*, 31 (48): 13068–76. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.5b04219>
- Rosen, M. J. & Kunjappu, J. T. 2012. "Surfactants and Interfacial Phenomena." Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118228920>
- Salihi, E. Ç., Wang, J., Coleman, D. J. L. & Siller, L. 2016. "Enhanced Removal of Nickel(II) Ions from Aqueous Solutions by SDS-Functionalized Graphene Oxide." *Separation Science and Technology*, 51 (8): 1317–1327. <https://doi.org/10.1080/01496395.2016.1162172>
- Sarasan, G., & Chouhan, I. 2015. "A Study on Micellization of Cetyl Pyridinium Bromide in Mixed Solvent System." *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 4(3), 2485–2487.
- Sarsam, W. S., Amiri, A., Kazi, S. N. & Badarudin, A. 2016. "Stability and Thermophysical Properties of Non-Covalently Functionalized Graphene Nanoplatelets Nanofluids." *Energy Conversion and Management*, 116: 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.082>
- Shah, A., Nosheen, E., Qureshi, R., Yasinzai, M. M., Lunsford, S. K., Dionysiou, D. D., ur-Rehman, Z., Siddiq, M., Badshah, A. & Ali, S. 2011. "Electrochemical Characterization, Detoxification and Anticancer Activity of Didodecyltrimethylammonium Bromide." *International Journal of Organic Chemistry*, 1 (4): 183–190. <https://doi.org/10.4236/ijoc.2011.14027>
- Singh, V., Yadav, P., & Mishra, V. 2020. "Recent Advances on Classification, Properties, Synthesis, and Characterization of Nanomaterials." *Green Synthesis of Nanomaterials for Bioenergy Applications*, Chapter 3. <https://doi.org/10.1002/9781119576785.ch3>
- Sun, Z., Pöller, S., Huang, X., Guschin, D., Taetz, C., Ebbinghaus, P., Masa, J., Erbe, A., Kilzer, A., Schuhmann, W. & Muhler, M. 2013. "High-Yield Exfoliation of Graphite in Acrylate Polymers: A Stable Few-Layer Graphene Nanofluid with Enhanced Thermal Conductivity." *Carbon*, 64: 288–294. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.07.063>
- Texter, J. 2014. "Graphene Dispersions." *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 19 (2): 163–74. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2014.04.004>
- Verma, R. K., Mishra, A. & Mitchell-Koch, K. R. 2015. "Molecular Modeling of Cetylpyridinium Bromide, a Cationic Surfactant, in Solutions and Micelle." *Journal of Chemical Theory and Computation*, 11 (11): 5415–5425. <https://doi.org/10.1021/acs.jctc.5b00475>
- Wei, X., Zhu, H., Kong, T. & Wang, L. 2009. "Synthesis and Thermal Conductivity of Cu₂O Nanofluids." *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52 (19–20): 4371–4374. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.03.073>
- Yu, M. F., Lourie, O., Dyer, M. J., Moloni, K., Kelly, T. F. & Ruoff, R. S. 2000. "Strength and Breaking Mechanism of Multiwalled Carbon Nanotubes Under Tensile Load." *Science*, 287 (5453): 637–640. <https://doi.org/10.1126/science.287.5453.637>
- Yu, W., Xie, H., Chen, L., Li, Y. & Li, D. 2010. "The Preparation and Thermal Conductivities Enhancement of Nanofluids Containing Graphene Oxide Nanosheets." *American Society of Mechanical Engineers. Proceedings of the 14th International Heat Transfer Conference*, 569–573. <https://doi.org/10.1115/IHTC14-22055>

Zaaba, N. I., Foo, K. L., Hashim, U., Tan, S. J., Liu, W. W. & Voon, C. H. 2017. "Synthesis of Graphene Oxide Using Modified Hummers Method: Solvent Influence." *Procedia Engineering*, 184: 469–477. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.118>

Zhang, L., Jiang, Y., Ding, Y., Povey, M. & York, D. 2007. "Investigation Into the Antibacterial Behaviour of Suspensions of ZnO Nanoparticles (ZnO Nanofluids)." *Journal of Nanoparticle Research*, 9 (3): 479–89. <https://doi.org/10.1007/s11051-006-9150-1>

Zhao, J., Ge, S., Pan, D., Shao, Q., Lin, J., Wang, Z., Hu, Z., Wu, T. & Guo, Z. 2018. "Solvothermal Synthesis, Characterization and Photocatalytic Property of Zirconium Dioxide Doped Titanium Dioxide Spinous Hollow Microspheres with Sunflower Pollen as Bio-Templates." *Journal of Colloid and Interface Science*, 529: 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.05.091>

Zheng, N., Wang, L., Wan, M., Fan, R. & Sun, Z. 2023. "Experimental Investigation on the Static and Dynamic Stability of Water-Based Graphene Nanofluids Prepared by One-Step Liquid Phase Shear Exfoliation of Graphite." *Journal of Molecular Liquids*, 381: 121848. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.121848>

Zubir, M. N., Badarudin, A., Kazi, S. N., Huang, N. M., Misran, M., Sadeghinezhad, E., Mehrali, M. & Yusoff, N. 2015. "Highly Dispersed Reduced Graphene Oxide and Its Hybrid Complexes as Effective Additives for Improving Thermophysical Property of Heat Transfer Fluid." *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 87: 284–294. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.04.017>

