



**ÜRE VE LAKTİK ASİTTEN KARBON KUANTUM
NOKTALARININ ÜRETİMİ VE Fe⁺³ TANI SİSTEMİ
OLARAK KULLANIMI**

Selin AYDIN

Danışman: Doç. Dr. Aslı YILMAZ

İkinci Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet YILMAZ

Yüksek Lisans Tezi

Moleküler Biyoloji ve Genetik Ana Bilim Dalı

2023

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MOLEKÜLER BİYOLOJİ ve GENETİK ANA BİLİM DALI

**ÜRE VE LAKTİK ASİTTEN KARBON KUANTUM NOKTALARININ ÜRETİMİ VE
Fe³⁺ TANI SİSTEMİ OLARAK KULLANIMI**

(Production of Carbon Quantum Dots From Urea and Lactic Acid and Their Use as a Sensing
System of Fe³⁺)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Selin AYDIN

Danışman: Doç. Dr. Aslı YILMAZ
İkinci Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet YILMAZ

Erzurum
Aralık, 2023

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Selin AYDIN tarafından hazırlanan “Üre ve Laktik Asitten Karbon Kuantum Noktalarının Üretimi ve Fe+3 Tanı Sistemi Olarak Kullanımı” başlıklı çalışması 28 / 12 / 2023 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Moleküler Biyoloji ve Genetik Ana Bilim Dalı, Biyoteknoloji Bilim Dalında yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Doç.Dr. Yağmur ÜNVER <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Danışman:	Doç.Dr. Aslı YILMAZ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Tuğrul YUMAK <i>Sinop Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Ferhunde AYSİN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
İkinci Tez Danışmanı	Doç.Dr. Mehmet YILMAZ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN

Enstitü Müdürü

Aslı ıslak imzalıdır

Bu çalışma BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: FYL-2022-11107

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak *Doç. Dr. Aslı YILMAZ* danışmanlığında sunulan “Üre ve Laktik Asitten Karbon Kuantum Noktalarının Üretimi ve Fe+3 Tanı Sistemi Olarak Kullanımı” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	2	30
Kuramsal Temeller	1	30
Materyal ve Metot	6	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	3	20
Sonuçlar	0	20
Tezin Geneli	4	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Selin AYDIN	Doç. Dr. Aslı YILMAZ
28.12.2023	28.12.2023
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☒ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☒ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.



TEŞEKKÜR

Gerçekleştirmiş olduğum tez çalışmasında bana desteğini hiçbir zaman esirgemeyen danışmanlığımı üstlenen tez danışmanım Doç.Dr. Aslı YILMAZ'a içtenlikle teşekkür ederim.

Beni bu çalışmaya yönlendiren, bilgi ve tecrübeleriyle bana her zaman destek olan ikinci danışmanım Doç. Dr. Mehmet YILMAZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez kapsamında oluşturulan 'Üre ve Laktik Asitten Karbon Kuantum Noktalarının Üretimi ve Fe^{+3} Tanı Sistemi Olarak Kullanımı' başlıklı ve 'FYL-2022-11107' numaralı proje Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) koordinasyon birimi tarafından desteklenmeye hak kazanmıştır. Proje kapsamında ihtiyaç duyulan bütçe tahsisini sağladıkları ve değerli katkılarından dolayı Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri koordinasyon birimine teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarım sırasında bana her türlü imkânı sağlayan Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) bünyesinde çalışan kıymetli hocalarıma ve sevgili arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen aileme de çok teşekkür ederim.

Selin AYDIN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÜRE VE LAKTİK ASİTTEN KARBON KUANTUM NOKTALARININ ÜRETİMİ VE Fe^{+3} TANI SİSTEMİ OLARAK KULLANIMI

Selin AYDIN

Danışman: Doç. Dr. Aslı YILMAZ

İkinci Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet YILMAZ

Amaç: Karbon kuantum noktaları (CQD) son yirmi yılda ortaya çıkan ve düşük toksik etki, floresan ağarma direncinin yüksek olması, kolay sentezlenebilmeleri gibi özellikleriyle oldukça dikkat çeken yeni bir nanomalzeme sınıfıdır. Kolay işlevselleştirilme ve yüzey pasivasyonu gibi ayarlanabilir özelliklere sahip olmaları, biyogörüntüleme, fotokataliz, nanotıp, biyoalgılama gibi çeşitli alanlarda ve uygulamalarda avantaj sunmakta ve bununla ilgili yapılan çalışmaların sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Bu tezde, uyarılma dalga boyu bağımlı, yüksek kuantum verimine sahip CQD sistemlerinin üre ve laktik asit kullanılarak, hidrotermal sentez yöntemiyle üretilmesi ve Fe^{+3} tanı sistemi olarak kullanılması amaçlanmıştır.

Yöntem: Bu çalışma sentez süresinin, sıcaklığın ve öncüllerin oranının etkisi, hazırlanan CQD'lerin UV-görünür absorpsiyonu ve floresans spektrumları aracılığıyla sistematik olarak değerlendirilmiştir. Optimize edilmiş koşullarda hazırlanan CQD'ler ayrıca elektron mikroskobu (TEM), X-ışını kırınımı (XRD) spektroskopisi, Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) ve X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) yoluyla analiz edilmiştir.

Bulgular: Yüksek QY, yüksek çözünürlük, düşük sitotoksosite, yüksek stabilite ve uyarılmaya bağlı emisyon yapısına sahip CQD'ler üretildi. CQD'ler Fe^{3+} iyonlarına karşı yüksek seçicilik ve hem su hem de kan plazmasında geniş bir konsantrasyon aralığı için doğrusal bir korelasyon sergilemiştir. Sitotoksosite ve antibakteriyel testler, biyomedikal uygulamalar için CQD'lerin düşük sitotoksitesini ve yüksek biyouyumluluğunu göstermiştir.

Sonuç: Bu tez kapsamında elde edilen CQD'lerin kolay ve etkili sentetik yöntemini, ayarlanması kolay optik özelliklerini, uyarılmaya bağlı doğasını, yüksek floresans aktivitesini ve düşük sitotoksitesini birleştiren N-katkılı CQD'lerin teşhis, biyogörüntüleme ve biyosensörler gibi çeşitli biyomedikal uygulamalarda benzersiz avantajlar sağlayabileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Karbon kuantum noktaları, Hidrotermal yöntem, Fe^{+3} tayini, Floresan malzemeler, Tanı sistemleri.

Aralık 2023, 71 sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

PRODUCTION OF CARBON QUANTUM DOTS FROM UREA AND LACTIC ACID AND THEIR USE AS A SENSING SYSTEM OF Fe³⁺

Selin AYDIN

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ashi YILMAZ

Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet YILMAZ

Purpose: Carbon quantum dots (CQDs) are a new class of nanomaterials that have emerged in the last twenty years and attract attention with their features such as low toxic effects, high resistance to fluorescence bleaching, and easy synthesis. Their tunable features such as easy functionalization and surface passivation offer advantages in various fields and applications such as bioimaging, photocatalysis, nanomedicine, biosensing, and the number of studies on this subject is increasing day by day. In this thesis, it is aimed to produce excitation wavelength-dependent, high quantum yield CQD systems by hydrothermal synthesis using urea and lactic acid and to use them as a Fe³⁺ diagnostic system.

Method: In this study, the effect of synthesis time, temperature, and ratio of precursors was systematically evaluated through the UV–visible absorption and fluorescence spectra of the prepared CQDs. CQDs prepared under optimized conditions were further analyzed via electron microscopy (TEM), X-ray diffraction (XRD) spectroscopy, Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS).

Results: CQDs with high QY, high solubility, low cytotoxicity, high stability and excitation-dependent emission structure were produced. CQDs exhibited high selectivity towards Fe³⁺ ions and a linear correlation for a wide range of concentrations in both water and blood plasma. Cytotoxicity and antibacterial tests have demonstrated the low cytotoxicity and high biocompatibility of CQDs for biomedical applications.

Conclusion: Combining the easy and effective synthetic method, easy-to-tune optical properties, excitation-dependent nature, high fluorescence activity and low cytotoxicity of the CQDs obtained in this thesis, N-doped CQDs can provide unique advantages in various biomedical applications such as diagnostics, bioimaging and biosensors. shown.

Keywords: Carbon quantum dots, Hydrothermal method, Fe³⁺ determination, Fluorescent materials, Diagnostic systems.

December 2023, 71 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	xii
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	5
Floresans	5
Floresans Boyalar.....	6
Hoechst boyası	7
Auramin-Rodamin.....	8
Akridin turuncusu	8
İnorganik Quantum Noktalar	8
Kadmiyum selenit (CdSe).....	9
Kurşun sülfür (PbS)	9
Çinko oksit (ZnO)	9
İnorganik Kuantum Noktalarının Avantajları	12
İnorganik Kuantum Noktalarının Dezavantajları.....	12
Karbon Temelli Floresans Malzemeler	13
Konjuge polimerler	13
Karbon nanotüpler.....	14
Grafen oksit.....	15
Karbon kuantum noktaları.....	17
Karbon Kuantum Noktalarının Sentez Yöntemleri.....	17
Ark-Deşarj yöntemi.....	18
Lazer ablasyonu	19
Asidik oksidasyon	19
Mikrodalga- piroliz	19
Hidrotermal/Solvotermal yöntem.....	19
Karbon Kuantum Noktalarının Fotoluminesans ve Absorbans Özellikleri	20

Karbon Kuantum Noktalarının Uygulamaları.....	22
Biyogörüntüleme.....	22
Biyosensör uygulamaları.....	23
Antimikrobiyal aktivite	24
Fotokataliz.....	25
Metal iyon algılama.....	26
Cıva (Hg^{+2}) İyonlarının Algılanması	27
Çinko (Zn^{+2}) İyonlarının Algılanması.....	27
Alüminyum (Al^{+3}) İyonlarının Algılanması.....	28
Ferrik (Fe^{+3}) İyonların Algılanması	28
MATERYAL VE METOT.....	30
Karbon Kuantum Nokta (CQD) Sentezi ve Karakterizasyonu	32
CQD'lerin Sitotoksik Etkilerinin Belirlenmesi.....	33
Hücre hatlarının stoktan çıkarılması ve büyütülmesi.....	33
Hemositometre ile hücre sayımı	33
96 kuyucuklu plakalara hücre ekimi	33
MTT testi.....	34
CQD'lerin Antibakteriyel Aktivitesi.....	34
CQD'lerin Metal İyon Seçiciliği.....	35
Metal iyon algılama.....	35
Kanda Fe^{+3} tespiti	35
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	36
Optimum Sentez Koşullarının Belirlenmesi ve Karakterizasyonu	36
CQD'lerin Sitotoksitesi	42
CQD'lerin Antibakteriyel Aktivitesi.....	43
CQD'lerin Metal İyon Seçiciliği.....	44
Kan Plazmasında Fe^{+3} Tespiti	45
SONUÇ.....	47
KAYNAKLAR.....	49
ÖZGEÇMİŞ.....	58

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Tez Çalışmasında Elde Edilen Nanoparçacıkların Karakterizasyonu İçin	
Kullanılan Cihazlar.....	30
Tablo 2. Tez Çalışmalarında Kullanılan Kimyasal Malzemeler.....	31
Tablo 3. Tez Çalışmalarında Kullanılan Sarf Malzemeler	31



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Jablonski diyagramı	6
Şekil 2. Süspansiyonların UV lamba altında çekilmiş resimleri; 0.dakika (a) ve CaCl ₂ ilavesinden 50 dakika sonrası	10
Şekil 3. Turuncu ve yeşil floresan yayan kuantum noktalarının, elektrolit ilavesinden sonra floresan spektrumlarındaki değişim;0.125 mM (i), 0.25 mM(ii), 0.5 mM CaCl ₂	11
Şekil 4. APTES başlıklı ZnO-QD'lerin (siyah) floresan emisyon spektrumları ve APTES başlıklı ZnO-QD'ler ile Dopamin (kırmızı) karışımı (i), APTES ile kapatılmamış ZnO-QD'lerin (siyah) emisyon spektrumları ve APTES ile kapatılmamış ZnO-QD'ler ile Dopamin karışımı.....	12
Şekil 5. Karbon nanotüplerin yapısal şekilleri. SWCNT'lerin çapı 0,5-1,5 nm arasında olurken, MWCNT'lerin çapı 100 nm ve üzeridir.....	14
Şekil 6. Grafen oksit oluşturmak için grafen tabakasının oksidasyonu	15
Şekil 7. Serbest klorun yokluğunda ve varlığında GQD çözeltisinin UV ve floresan spektrumu. Ek: 365nm'lik bir UV ışınıyla aydınlatılan, klorun yokluğunda (sağda) ve varlığında (solda) GQD çözeltisinin floresans görüntüsü	16
Şekil 8. Karbon kuantum noktalarının kimyasal yapısı	17
Şekil 9. Nanoparçacıkların yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya sentezinin şeması	18
Şekil 10. Kuantum parçacıkların büyüklüklerine bağlı olarak yasak bölgedeki değişimleri .	22
Şekil 11. Laktik asit ve üre kullanılarak elde edilen karbon kuantum noktalarının hidrotermal sentezi	32
Şekil 12. MTT ile muamele edilmiş akciğer kanseri (A549) hücrelerinde formazan kristallerinin görünümü	34
Şekil 13. Farklı sentez sürelerinde hazırlanan CQD'lerin farklı uyarma dalga boylarında toplanan UV-vis ve floresans spektrumları	37
Şekil 14. Farklı sentez sıcaklıklarında hazırlanan CQD'lerin farklı uyarma dalga boylarında alınan UV-vis ve floresans spektrumları	38
Şekil 15. Farklı öncü oranlarında hazırlanan CQD'lerin farklı uyarma dalga boylarında toplanan UV-Vis ve floresans spektrumları:	39
Şekil 16. CQD'lerin çeşitli yöntemlerle daha fazla karakterizasyonu. Gün ışığı ve UV lamba (365nm) altında CQD süspansiyonunun optik görüntüleri (a), farklı uyarma dalga boyları altında optimum sentez koşullarında normalleştirilmiş floresans spektrumları (b), TEM görüntüsü ve partikül boyut dağılımı (c), XRD	

spektrumu (d), FTIR spektrumu (e), XPS tarama spektrumu ve element oranı (f), yüksek çözünürlüklü C1s spektrumları (g), O1s spektrumu (h) ve N1s spektrumu (j), gün ışığı ve karanlık koşullarda depolanan CQD'lerin floresans yoğunluğundaki değişimi (k), farklı pH değerlerinde floresan spektrumları (l) ve normalize edilmiş PL yoğunluğu (m).....	41
Şekil 17. CQD'lerin ve referans malzemenin absorbansına karşı entegre floresans yoğunluğu.....	42
Şekil 18. A549 ve MRC5 hücreleriyle muamele edilen CQD'lerin hücre canlılığı.....	43
Şekil 19. CQD'lerin gün ışığı (a) ve karanlıkta (b) farklı konsantrasyonlarda <i>E.coli</i> suşlarına karşı antimikrobiyal aktivitesi.....	44
Şekil 20. Farklı metal iyonlarının varlığında CQD süspansiyonunun floresans şiddetleri (a). Farklı konsantrasyonlarda metal iyonlarının varlığında PL yoğunluğundaki değişiklik (b), spektrumlar (c), yoğunluk ve konsantrasyonlar arasındaki doğrusal ilişki (d) ve UV-vis spektrumları (e)	45
Şekil 21. Farklı konsantrasyonlarda Fe^{3+} iyonlarının varlığında kan plazmasındaki CQD'lerin PL spektrumundaki değişim (a) ve şiddet ile konsantrasyon arasındaki doğrusal ilişki (b)	46

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

°C	Derece (sıcaklık)
a, b,c	Örgü parametreleri
A549	İnsan akciğer kanseri hücresi
CQD	Karbon kuantum noktaları
DAYTAM	Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi
DNA	Deoksiribonükleik asit
MRC5	İnsan akciğer fibroblast hücresi
M	Molar
mL	Mililitre
MTT	(3- (4,5-dimetiltiyazol-2-il) -2-5-difeniltetrazolyum bromür)
nm	Nanometre
PL	Fotoluminesans
RNA	Ribonükleik asit
rpm	Dakikada devir sayısı
UV	Ultraviyole

GİRİŞ

Nanoteknoloji, maddenin ve sistemlerinin moleküler veya atomik düzeyde tasarlanması, üretilmesi, karakterize edilmesi ve kontrol edilmesiyle ilgilenen bir bilim dalıdır. Bunun yanı sıra temel bilimlere (fizik, kimya, biyoloji) ek olarak mühendislik, tıp, çevre bilimleri ve malzeme bilimleri gibi birçok farklı disiplini içermektedir. Nano kelimesi, temel bir birim olan nanometrenin (1 nanometre = 1 milyarda 1 metre) ölçeğini ifade etmektedir. Nanoteknoloji, bu boyuttaki malzemeleri, yapıları ve cihazları inceleyerek yeni uygulamalar ve özellikler kazandırmayı amaçlamaktadır (Silva, 2004).

Nanoteknoloji 20.yüzyılın sonlarında ve 21.yüzyılın başlarında gelişme göstermeye başlamış bir alan olmakla birlikte, ilk olarak 1959 yılında fizikçi Richard Feynman'ın 'There's Plenty of Room at the Bottom' adlı ünlü konuşmasında atomik ölçekte manipülasyonun mümkün olabileceğini önermesiyle başlamaktadır. Bu konuşma, nanoteknolojinin temel fikirlerini ortaya çıkarmıştır ve bir dönüm noktası olarak kabul edilmektedir (Toumey, 2008). Feynman'ın bu konuşmasından yaklaşık 15 yıl sonra, Norio Taniguchi, nanometre düzeyinde meydana gelen yarı iletken süreçlerin anlaşılabilmesi için, nanoteknoloji kavramını ilk kez kullanan kişilerden birisi olmuştur. Taniguchi nanoteknoloji terimini malzemelerin bir atom veya molekül tarafından işlenmesi, ayrılması, birleştirilmesi ve deforme edilmesiyle oluştuğunu savunmuştur (Hulla *et al.* 2015).

Nanoteknoloji alanında önemli bir adımda 1985 yılında Richard Smalley, Harold Kroto ve Robert Curl tarafından fullerenlerin keşfedilmesiyle olmuştur. Fullerenler, karbon atomlarının düzenli bir şekilde bir araya geldiği küre, silindir veya elipsoit şekillerinde bir yapıya sahip moleküllerdir (Shahzad *et al.* 2015). Bu yapıların keşfi ile, nanoteknoloji daha fazla ilgi çekmiş ve yeni araştırma ve geliştirmelere olanak sağlamıştır. 1990'lı yıllara gelindiğinde ise, taramalı tünel mikroskobu ve atomik kuvvet mikroskobu gibi yüksek çözünürlüğe sahip görüntüleme cihazlarının geliştirilmesiyle nanomalzemelerin manipülasyonu ve karakterizasyonunda önemli ilerlemeler sağlanmıştır. 2000'li yıllarda nanoteknoloji altın çağını yaşamaya başlamış ve tıp, elektronik, malzeme üretimi, enerji, çevre koruma gibi birçok çeşitli alanda uygulamaları olan bir alana dönüşmüştür (Mobasser & Firoozi, 2017).

Nanoboyuttaki malzemelerin, makroboyuttaki malzemelere kıyasla gösterdiği farklı özellikler oldukça dikkat çekicidir. Nanoboyutlu malzemeler, genellikle herhangi bir boyutu 1

ile 100 nanometre arasında değişen boyutlara sahip olan nanomalzemelerdir (Hersam, 2020). Makroboyuttaki malzemeler ise mikrometre, milimetre hatta daha büyük boyutlara sahip olabilmektedirler. Nanoboyutlu malzemelerin yüzey/bölge oranı oldukça fazladır. Bu durum, birim hacimde daha fazla yüzey alanının bulunması anlamına gelirken, makroboyutlu malzemelerde bu oran daha düşük seviyelerdedir. Nanoboyutlu malzemelerin diğer bir özelliği ise, atomik veya moleküler düzeydeki özellikleri nedeniyle, optik ve elektronik açıdan farklı özelliklere sahip olmalarıdır. Örneğin, nanoboyutlu bir malzemenin optik absorbandsı, elektrik iletkenliği veya termal iletkenliği makroboyutlu malzemedenden oldukça farklılık gösterebilmektedir. Diğer bir fark ise makro ve mikroboyuttaki malzemelerin mekanik özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Bu, atomik ve moleküler düzeydeki etkileşimlerin ve yapıların mekanik davranış üzerinde büyük bir etkiye sahip olmasından kaynaklanır. Ayrıca, nanoboyutlu malzemeler yüksek yüzey/bölge oranı nedeniyle yüzey etkilerinin daha belirgin olduğu malzemelerdir. Bu etkiler, fiziksel, kimyasal ve reaktivite özelliklerini farklılaştırabilmekte ve bunun sonucu malzemenin davranışını değiştirebilmektedir (Albanese *et al.* n.d.).

Nanoteknolojideki en önemli konulardan bir tanesi de boyuttur. Boyutlarında meydana gelen değişimler ile malzemenin özellikleri değişim gösterebilmektedir. Son yıllarda, çalışmalarda sıklıkla kullanılan nanomalzemeler ile aynı tür maddeden yapılmış olsa bile boyutlarının küçültülmesiyle farklı özellikler kazandırılabilceği gösterilmiş ve bu özellik oldukça ilgi çekmiştir (Andrievski & Glezer, 2001). Nanoboyutlu malzemeler, nanotüpler, nanokristaller, nanoteller, nanopartiküller veya nano ince filmler gibi farklı türlere ayrılmaktadır.

Nanoboyutlu malzemeler içerisinde en önemli yer kaplayanlardan birisi de nanopartiküllerdir. Nanopartiküller, boyutları nanometre ölçeğinde olan küçük parçacıklardır. Bu parçacıkların boyutları 1 ile 100 nanometre arasında değişebilmektedir. American Society for Testing and Materials (ASTM)'ın yaptığı tanıma göre nanoteknolojide kullanılan nanoparçacıklar, partikül boyutları 1-100 nm arası uzunluğa sahip parçacıklardır. Bu küçük boyutları onlara benzersiz özellikler sağlar ve farklı endüstrilerde uygulama potansiyeli sunar (Collier *et al.* 2015). Büyük bir yüzey/bölge oranına sahip olmaları birim hacimde daha fazla aktif yüzey alanının olmasına yol açar. Sahip oldukları bu özellikler katalitik reaksiyonlarda etkinliği arttırır, sensör teknolojilerinde kullanımı destekler ve biyomedikal uygulamalarda ilaç taşıyıcısı olarak kullanılmasını sağlar. Küçük boyutları sayesinde elektromanyetik spektrumda farklı dalga boylarında etkileşimlere olanak sağlar. Gümüş ve altın nanopartiküller gibi bazı metaller, plazmon rezonans adı verilen bir fenomenle ışığın absorplanmasını ve saçılmasını

sağlar. Bu özellikleri ile fotovoltaik cihazlar, görüntüleme teknolojileri veya biyosensörler gibi alanlarda kullanılmaktadır (Kang *et al.* 2019). Bazı nanopartiküller süperparamanyetik veya ferromanyetik özelliklere sahip olabilmektedir. Örneğin, demir oksit nanopartiküller manyetik özelliklere sahiptir ve manyetik rezonans görüntüleme ve hipertermi tedavisinde kullanılmaktadır (Tetean *et al.* n.d.). Nanopartiküller bu avantajları sayesinde tıp, enerji, tekstil, çevre koruma, gıda, kozmetik gibi birçok alanda çeşitli uygulamalara sahiptir.

Nanopartiküller genellikle nanometrik ölçekte organik, inorganik ve karbon bazlı parçacıklar olarak sınıflandırılır ve ilgili malzemelerin daha büyük boyutlarıyla karşılaştırıldığında gelişmiş özelliklere sahiptir. Nanopartiküller küçük boyutları nedeniyle yüksek reaktivite, mukavemet, yüzey alanı hassasiyet, stabilite vb. gelişmiş özellikler gösterirler (Anu Mary Ealia & Saravanakumar, 2017).

Biyogörüntüleme ve ilaç taşınımı gibi çalışmalarda en çok öne çıkan özellikleri ise floresan etkileridir. Floresan etkiye sahip nanopartiküller, ışık emisyonu gösteren nanoboyuttaki partiküllerdir. Bu partiküller, çeşitli uygulamalarda, optik izleme görüntüleme teknolojileri veya biyosensör mekanizmaları gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Floresan nanopartiküller, farklı malzemelerin nanoboyuta yapılandırılması ile elde edilmektedir. Genellikle bu parçacıklar, metal oksitler (titanyum oksit, çinko oksit gibi), yarı iletken malzemeler (örneğin kuantum noktaları) veya organik bileşikler gibi floresan özellik gösteren maddelerin kullanılmasıyla üretilir. Bu partiküller, belirli bir dalga boyunda, gelen enerjiyi alarak daha uzun dalga boylarında floresan yayabilirler. Ayrıca, floresan nanopartiküller, ayarlanabilir boyutları, şekilleri ve kontrol edilebilir yüzey özellikleri ile birçok çalışmada uygun bir şekilde tasarlama imkânı sunmaktadır.

Floresan nanopartiküller arasında en çok dikkat çeken grup ise karbon tabanlı kuantum noktalarıdır. Karbon kuantum noktaları (CQD) veya floresan karbon nanopartiküller, son 20 yılda ortaya çıkan, boyutları 2 ila 100 nanometre arasında değişiklik gösteren yeni bir nanomalzeme sınıfıdır. Yüksek dozda bile toksik etki göstermemeleri, fotoağarma direncinin yüksek olması ve biyoyumlulukları, sentez yöntemlerinin basit ve ekonomik olması sebebiyle geleneksel kuantum noktaları ile karşılaştırıldıklarında önemli avantajlar sunmaktadırlar. CQD'lerin yüzey pasivasyonu ve işlevselleştirilebilmesi bu nanoparçacıkların fiziksel özelliklerinin ayarlanabilmesine olanak sağlamaktadır. 2004 yılında keşfedilmelerinden bu yana sensör, görüntüleme, fotokataliz veya nanotıp gibi birçok alanda sıklıkla kullanılmaktadırlar (Manikandan & Lee, 2022).

Bu tez kapsamında, başlatıcı olarak ilk kez bir arada kullanılan laktik asit ve üreden, N-katkılı CQD'lerin üretilmesi amaçlanmıştır. Elde edilen kuantum noktaları çeşitli

karakterizasyon işlemlerine tabi tutularak, antibakteriyel ve sitotoksik etkileri incelenmiştir. Ayrıca bu kuantum noktalar ferrik iyonunun (Fe^{+3}) tespitinde yenilikçi bir tanı sistemi geliştirmek için farklı metal iyonlarıyla karşılaştırılmıştır. Yetişkin bir bireyden alınan kan plazmasında Fe^{+3} iyonlarının tespiti için CQD'lerle floresan sönümleme mekanizması incelenmiştir. Bu kapsamda yüksek hassaslık, seçicilik ve spesifiklik ile Fe^{+3} iyonlarını tespit etme potansiyeline sahip, uyarma dalga boyu bağımlı, N-katkılı CQD'lerin üretimi ve uygulanması hedeflenmiştir.



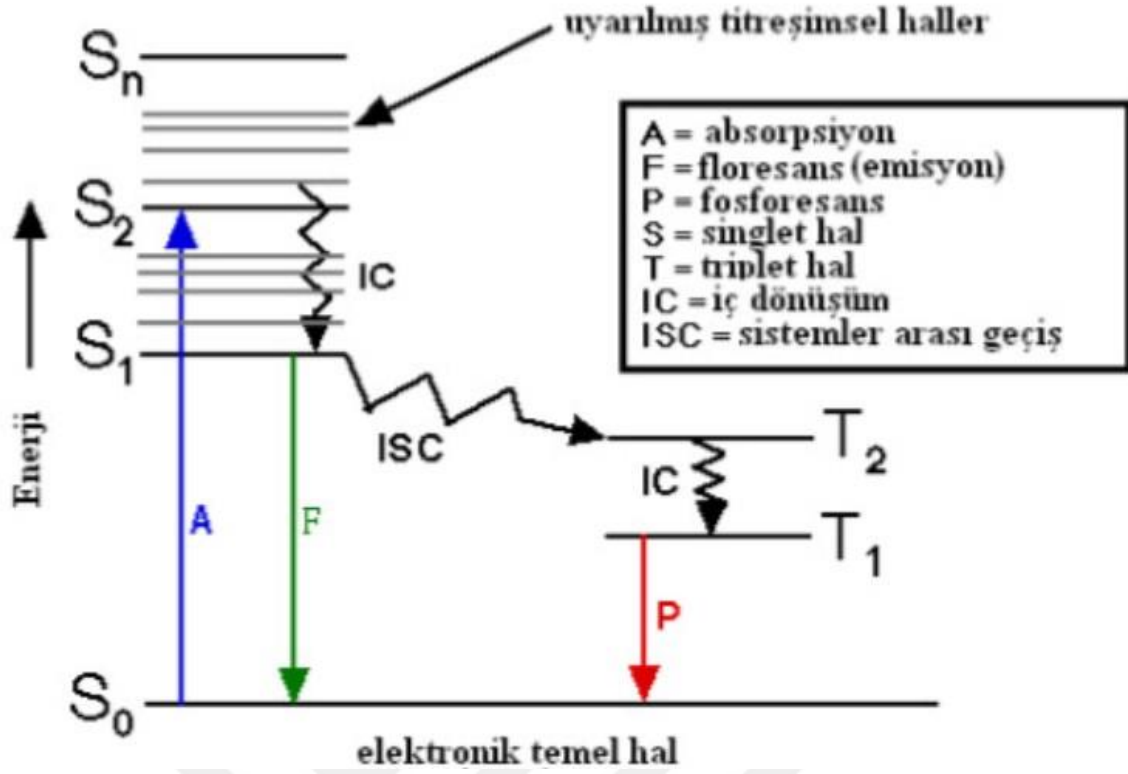
KURAMSAL TEMELLER

Floresans

Lüminesans, sıcaklığın arttırılması dışındaki yollarla, uyarım yoluyla ışık üretimidir. Bunlar kimyasal araçları (kemilüminesans), elektriksel deşarjları (elektrolüminesans) veya kırmayı (tribolüminesans) içerir. Floresan elektromanyetik uyarılmanın yarattığı kısa ömürlü bir lüminesans türüdür. Yani, bir madde kısa (daha yüksek enerjili) dalga boyunda ışık enerjisini absorbe ettiğinde ve sonrasında daha uzun (daha düşük enerjili) dalga boyunda ışık enerjisi yaydığında floresans meydana gelir. Absorbsiyon ve emisyon arasındaki süre genellikle nispeten kısadır ve sıklıkla 10^{-9} ile 10^{-8} saniye arasındadır (Behlke *et al.* 2005).

Jablonski diyagramı (Şekil 1) bir molekülün farklı elektronik durumlarını ve bunlar arasındaki geçiş süreçlerini gösteren, organik moleküler fotofiziğin temel prensiplerini aydınlatan ve organik fototeranostik ajanların tasarımında altın kural olarak kabul edilen bir diyagramdır (Feng *et al.* 2020).

Bir molekül, S_1 , S_2 veya S_3 singlet durumlarının herhangi bir titreşim durumuna elektronik olarak uyarıldığında, bir dizi işlemle enerji kaybedebilir. Şekil 1'deki Jablonski diyagramı, ışınlı ve ışınlı olmayan süreçlerin çeşitli türlerini göstermektedir. Genel olarak uyarılmış molekül, iç dönüşüm adı verilen titreşimsel gevşeme yoluyla hemen $S_1(V_0)$ durumuna gelir. $S_1(V_0)$ durumundan temel durumun (S_0) titreşim durumlarından herhangi birine ışınlısal emisyonuna floresans adı verilir. Floresans her zaman S_1 durumunun V_0 'ından kaynaklandığından uyarılma dalga boyundan bağımsızdır. Floresans emisyonu için enerji açığı, titreşim gevşemesi nedeniyle kaybedilen enerjiden daha azdır. Bu nedenle floresans her zaman absorpsiyona (kırmızı bölgeye) doğru kayar. Floresans spektrumları sıcaklıktaki küçük bir değişiklikten pek etkilenmez. Çok düşük sıcaklıklarda numune donar, böylece emisyon daha yapılandırılmış olur ve mavi, normal sıcaklık spektrumuna kayar.



Şekil 1. Jablonski diyagramı

Sistemler arası geçişle, $S_1(V_0)$ durumundaki molekül üçlü (triplet) duruma (T_1) gidebilir ve ışınlımlı veya ışınlımsız süreçle $T_1(V_0)$ durumundan, S_0 'ın titreşim durumlarından herhangi birine enerji kaybedebilir. $T_1(V_0)$ durumundan temel duruma geçişe fosforesans adı verilir. T_1 durumu S_0 durumuna çok yakın olduğundan, molekül enerjiyi yalnızca oda sıcaklığında ışınlımsız bir süreçle kaybeder. Dolayısıyla normal koşullar altında fosforesans oda sıcaklığında gözlemlenemez. Çok düşük bir sıcaklıkta gözlenebilir. Fosforesans kırmızıya kayar ve floresansa dönüşür, triplet (üçlü) durumundan singlet (tekli)'e geçiş yasaklı olduğundan bu durum gecikmeli bir emisyon sergiler. Üçlü durumun ömrü 10^{-2} ile 10^{-4} saniye arasındadır (Preeti Gupta, S. S. Das, 2023).

Floresans Boyalar

Son yıllarda geleneksel boyalar floresan görüntülemeye oldukça tercih edilmektedir (Bera *et al.* 2010). Fakat, bu malzemeler birçok kısıtlama ve zorluğu beraberinde getirmektedir (W. Wu & Li, 2007). Floresans malzemeye ait bu zorluklar şu şekilde özetlenebilir: İlk olarak, hücre kültürü çalışmalarında hücre kaynaklı görünür bölgede oto floresans göstermektedir ve floresans boyalar bu sorunu çözmemektedir. İkinci bir zorluk ise, organik boyaların ışık altında, zaman içerisinde foto ağarma ile özelliklerinin kaybolmasıdır. Bu nedenle, *in-vivo* görüntüleme çalışmalarında analiz süresi kısıtlanmaktadır.

Floresans boyaların diğ er bir zorluğu ise dar bir uyarılma aralığına sahip olmalarıdır. Bu durum, farklı boyaların farklı enerjilerle uyarılması ve bu malzemelerin üst üste getirilmesiyle c z lmektedir. Fakat bu durum, maliyetin artmasına ve süre kaybına yol açmaktadır. Floresans boyalarla ilgili bir diğ er zorluk ise ortam şartlarına karşı direnç gösterememeleridir. pH, sıcaklık, iyonik denge gibi faktörlerin değişmesiyle floresans malzemelerin özellikleri de değişmektedir ve bu durum uygulamalarda tekrarlanabilirliği azaltmaktadır (Steinegger *et al.* 2020).

Floresans boyalar ile ilgili diğ er bir zorluk ise kırmızı bölgede geniş bir emisyon spektrumu göstermeleridir. Bu durum, farklı boyaların aynı bölgede c akışmaları ile spektrum oluşturmalarını ve birçok analizde değerlendirme açısından zorluk göstermelerine sebebiyet vermektedir. Ek olarak, floresans boyalar, aptamer vb. tanıyıcı moleküllerle entegre edilip, hedeflenmiş bir sistem oluşturulmasını sağlayamamaktadır. Tanıyıcı moleküller, floresans özellik gösteren boyalarla bir araya getirildiğinde oluşan sistemin floresans verimi oldukça düşük olmakta ve değişkenlik göstermektedir (Hawe *et al.* 2008).

İki tip floresans vardır. Bunlardan ilki, doğal-otofloresans denilen maddelerin doğal olarak floresans özelliklere sahip olmasını ifade eder. Bu belirli moleküler yapıların veya bileşenlerin ışığı absorbe etme ve daha sonra farklı bir dalga boyunda yeniden yayma yeteneğiyle ilgilidir. Bu malzemelere örnek olarak porfirinler, vitamin A, klorofiller ribofilavin gibi maddeler verilebilir. İkincisi ise, yapay-indüklenmiş floresanstır. Bunlar, kendiliğinden floresans özelliklere sahip olmamasına rağmen bir florokrom boya veya işaretleyici ile etkileşiminden sonra floresans özellik kazanırlar. Floresans mikroskobi tekniklerinde oluşturulan bu yapay floresans malzemenin birçok avantajı bulunmaktadır. Akridin turuncusu, rodamin B, piranin, auramin-rodamin, kumarin gibi malzemeler bunlara örnek gösterilmektedir (Muyskens & Ed Vitz, 2006).

Hoechst boyası

Hoechst boyası bis-benzemid türü olan 460 nm civarlarında maksimum yayılımda mavi/siyah renkte floresans aktivite sergileyen boyalardır. Hoechst DNA'yı, diğ er hücresel yapıları veya spesifik proteinleri aynı anda görselleştiren boyama uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Uyarma emisyon spektrumları, yeşil kırmızı aralığında yayılan, diğ er yaygın olarak kullanılan küçük moleküllü floroforlar ve floresans proteinlerle örtüşmez (Bucevi ius *et al.* 2018). DNA'ya bağlanma özelliği gösteren DAPI boyasından farkı, Hoechst boyasının daha fazla hücre geçirgenliği ve daha düşük toksik etki sunmasıdır. Hoechst boyaları, hücre bölünmesi sırasında DNA'ya bağlandığı için DNA replikasyonunu bozabilmektedir. Dolayısıyla, potansiyel olarak karsinogenik ve mutajenik etki göstermektedir.

Auramin-Rodamin

Rodamin boyaları biyoteknolojide floresan işaretleyiciler olarak veya iyi optik fiziksel özellikleri nedeniyle biyomoleküllerin tespiti için yaygın olarak kullanılmaktadır. Buna bağlı olarak canlı sistemlerin görselleştirilmesinde güçlü bir araç olarak ortaya çıkmışlardır. Floresan biyogörüntülemeye ek olarak, rodamin türevlerinin kanser ve bakteriyel enfeksiyonlar gibi hastalıkları hedeflemek gibi terapötik işlevlere sahip moleküler tasarımları son zamanlarda artan bir ilgi görmektedir. Bu teşhis ve tedavinin entegrasyonuna yönelik moleküler kütüphanelerin geliştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bununla birlikte rodamin boyalarına dayalı teşhis ve tedavi uygulamalarına odaklanan çalışmalar oldukça nadirdir. Auramin rodamin boyaları, rodamin B ve auramin O boyasının karışımıdır ve auramin maddesinin kanserojen olması açısından çalışmalar sırasında oldukça titiz davranılması gerekmektedir (Zeng *et al.* 2023) .

Akridin turuncusu

Hücreler, akridin boyası ile muamele edildiğinde elektrostatik etkileşimler kurarak nükleik asite (DNA veya RNA) bağlanırlar. Bu entegrasyon sonucunda, UV ışık altında bakıldığında RNA’da kırmızı-turuncu renkte, DNA’da ise parlak yeşil bir floresans sergilerler. Bu boyalar, etkinleştirilmiş makrofajları tespit etmek için kullanılmaktadırlar.

Yukarıda verilen bölümlerde, floresans boyalarla ilgili zorluklar ele alındığında floresans görüntüleme konusunda yeni sistemlere ihtiyaç duyulduğu açıktır. Son yıllarda, nanoteknoloji alanında yaşanan yenilikler beraberinde sıradışı sistemlerin oluşturulmasına olanak sağlamıştır. Bu sebeple, ilgi çekici özellikleri sayesinde kuantum noktaları, başta floresans görüntüleme olmak üzere birçok çalışmada araştırmacıların ilgisini çekmiştir. İlerleyen bölümlerde bu noktacıların sunduğu fırsatlar, üretim yöntemleri ve biyolojik uygulamaları kapsamlı bir şekilde sunulmuştur.

İnorganik Quantum Noktalar

İnorganik kuantum noktalarının keşfi 1980’li yılların sonlarında bilim insanlarının nanometre boyutlarında yarı iletkenlik gösteren malzemelerin optik özelliklerini incelemesiyle başlamıştır. Yaklaşık 40 yıl önce Alexei I. Ekimov, yarı iletken katkılı camlarda renklendirme üzerine çalışırken, cam içindeki koloidal parçacıkların optik özelliklerini boyutlarına bağlı olarak incelemiş ve parçacıkların boyutlarından kaynaklanan kuantum etkilerini ortaya çıkarmıştır. Aynı dönemde Louis E. Brus da benzer çalışmalar yürütmüş ve CdS kolloidlerinin optik özelliklerinde boyutlarına bağlı değişimleri göstermiştir. Brus, bu gözlemleri temel alarak ünlü ‘Brus Formülü’nü geliştirmiş ve bu formül, kuantum boyut etkileriyle parçacıkların optik

özellikleri arasındaki ilişkiyi tanımlamıştır. Ayrıca, Mounji G. Bawendi 1980'lerin sonlarına doğru CdSe parçacıklarının sentezi için sıcak enjeksiyon yöntemini geliştirerek kuantum noktalarının kontrol edilebilir boyutlarda ve optik özelliklerde sentezlenmesini sağlayarak birçok uygulama alanının kapısını açmıştır. Kuantum noktalarının keşfi ve üretimi üzerine yaptıkları bu çalışmalarla 2023 Nobel Kimya Ödülünü kazanmışlardır (K. Yu & Schanze, 2023).

İnorganik kuantum noktaları, boyutları birkaç nanometre olan yarı iletken özellikteki parçacıklardır (W. W. Yu *et al.* 2006). İnorganik kuantum noktaları, çoğunlukla geçiş metalleri veya toprak alkali metallerinden oluşan nanokristallerdir (Krishna *et al.* 2013). Bu nanoparçacıklar arasında en yaygın kullanılan malzemeler kadmiyum selenit (CdSe), kurşun sülfür (PbS), çinko oksit (ZnO) ve indiyum arsenittir (InAs).

Kadmiyum selenit (CdSe)

Kadmiyum selenit (CdSe) inorganik kuantum noktalarının üretiminde en çok kullanılan, selenyum ve kadmiyumdaki oluşan malzemedir. Yüksek kuantum verimi sağlaması, yüksek fotostabilite özellikleriyle LED sistemlerinde, optoelektronik sistemlerde, görüntüleme çalışmalarında oldukça sık tercih edilmektedir. Fakat, toksik etkiye sahip olmasından dolayı çevresel etkileri göz önünde bulundurularak tedbirli bir şekilde kullanımı gerekmektedir (Surana *et al.* 2014).

Kurşun sülfür (PbS)

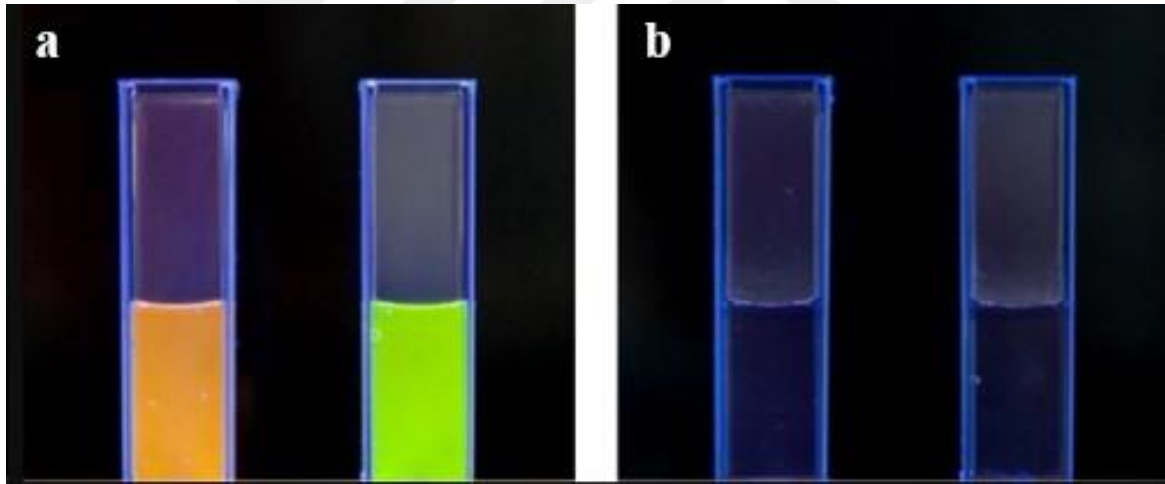
Yarı iletken bir malzeme olup kurşun ve sülfür atomlarından oluşan bir bileşiktir. Boyutlarına bağlı olarak farklı floresans ışımaya yapabilmektedirler. Bu nanoparçacıkların sentezi, buhar fazı yöntemi, çözelti bazlı yöntemler gibi çeşitli kimyasal yöntemler kullanılarak gerçekleştirilir. Bu sayede, boyutları ve şekilleri kontrol edilebilir nanoparçacık üretimi sağlanmaktadır.

Çinko oksit (ZnO)

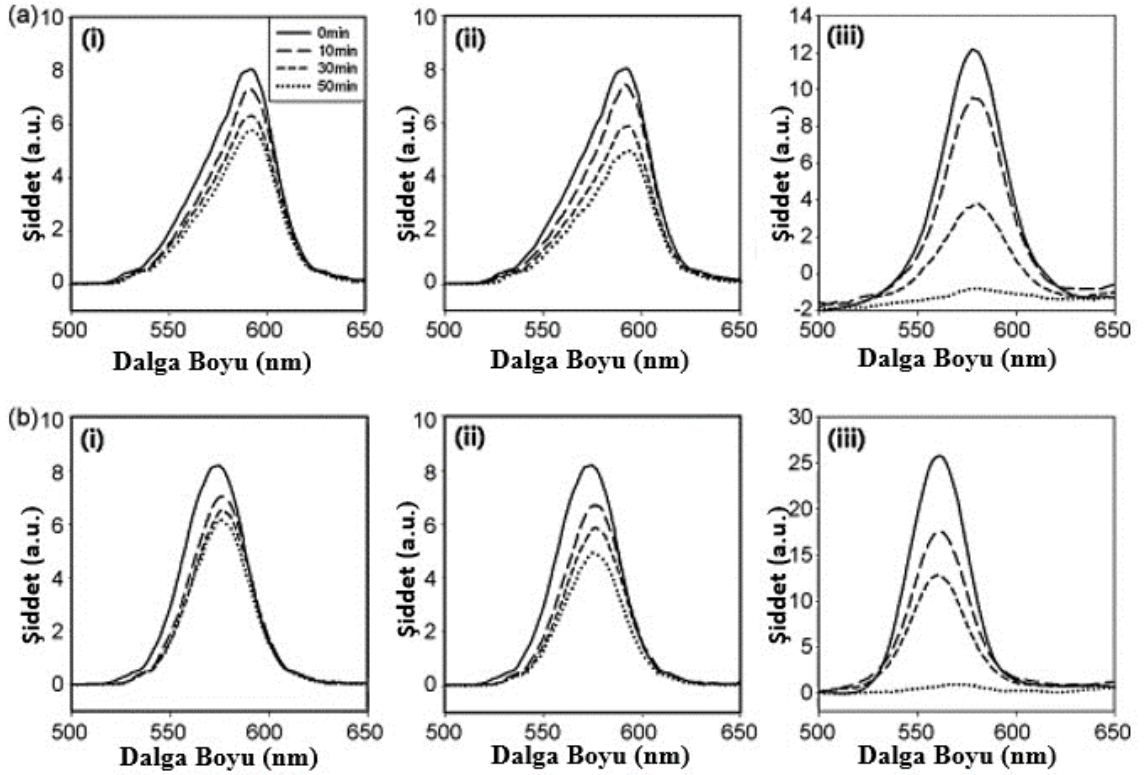
İnorganik kuantum noktalarının üretiminde en sık kullanılan malzemelerdendir. Çinko oksitin fiziksel ve kimyasal özellikleri birçok uygulamada avantaj sağlamaktadır. İnce film formunda kullanıldığında saydam-iletken özellik gösterebilmektedirler. ZnO, moleküler formülü ile yüksek kimyasal kararlılığa, genişletilmiş bir radyasyon absorpsiyon spektrumuna, yüksek elektrokimyasal bağlanma katsayısına ve yüksek fotostabiliteye sahiptir. (X.-Q. Zhou *et al.* 2023). Ayrıca, ZnO'nun fotokatalitik özelliklere sahip olması, su ve hava arıtmada, hidrojen üretimi gibi çeşitli uygulamalarda avantaj sağlamaktadır. ZnO, düşük toksisite

göstermesinden dolayı çevre dostu bir malzeme olarak kabul edilmesine karşın çevresel etkileri ve insan sağlığı üzerine olan etkileri hala tartışma konusudur.

2010 yılında yapılan bir çalışmada, hidrofobik ve iki farklı boyutta hazırlanan kadmiyum selenür (CdSe) kuantum noktaları, merkaptasetik asit ile muamele edilerek yüzey ligand değişimi sağlanmış ve hidrofilik özellik kazandırılmıştır. Ardından süspansiyona elektrolit ekleyerek CdSe kuantum noktalarının agregasyonu sağlanmıştır. Agregasyon sonucu fotokimyasal ve fiziksel özelliklerdeki değişimin izlenebilmesi için çeşitli karakterizasyon işlemleri yapılmıştır. Elektrolit miktarının artırılması, kuantum noktalarının toplanmasını ve floresan sönümlenmesini hızlandırdığı tespit edilmiştir. Bu durum, elektrolit konsantrasyonunu ayarlayarak ışıkla ağartma süresini kontrol etmenin mümkün olduğu göstermiştir. Bu sayede, moleküler ölçekte görüntüleme problemleri ve sensörlerinin geliştirilmesinde kuantum noktalarının optik özelliklerinden yararlanılabileceği kanıtlanmıştır. İki farklı boyutta hazırlanan CdSe kuantum noktalarının UV ışık altındaki görüntüleri (Şekil 2) ve elektrolit ilavesinden sonra floresans spektrumlarında meydana gelen değişimler (Şekil 3) aşağıda gösterilmektedir (Noh *et al.* 2010).

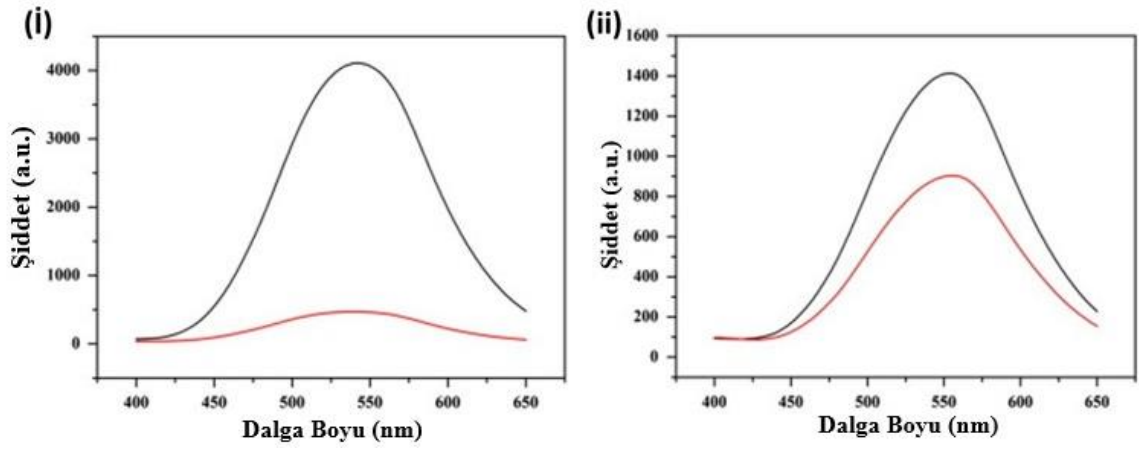


Şekil 2. Süspansiyonların UV lamba altında çekilmiş resimleri; 0.dakika (a) ve CaCl_2 ilavesinden 50 dakika sonrası (b) (Noh *et al.* 2010)



Şekil 3. Turuncu ve yeşil floresan yayan kuantum noktalarının, elektrolit ilavesinden sonra floresan spektrumlarındaki değişim; 0.125 mM (i), 0.25 mM(ii), 0.5 mM CaCl_2 (iii) (Noh *et al.* 2010)

2013 yılında yapılmış olan başka bir çalışmada ise, (3-aminopropil) trietoksisilan (APTES) ile kaplanmış ZnO kuantum noktaları (QD'ler) kullanılarak dopamin (DA) tespiti için son derece hassas ve seçici bir floresan yöntem geliştirilmiştir. Ayrıca, dopamin moleküllerinin QD'lerin yüzeyine adsorbe edildiğini ve foto-uyarılmış QD'lerin oksitlenmiş dopamin kinonuna elektron transferi ile sonuçlanan önemli bir floresan sönmüleme mekanizması önermişlerdir. Bu bulgulara dayanarak, serum örneklerinde DA'nın, etiketlenmemiş ZnO -QD tabanlı bir floresan prob kullanılarak seçici ve hassas bir şekilde tespit edilebileceği gösterilmiştir (D. Zhao *et al.* 2013). Şekil 4'te APTES başlıklı ve başlıksız ZnO -QD'lerin floresan spektrumları ve dopamin ile karıştırıldığında floresan spektrumlarında meydana gelen değişim gösterilmiştir.



Şekil 4. APTES başlıklı ZnO-QD'lerin (siyah) floresan emisyon spektrumları ve APTES başlıklı ZnO-QD'ler ile Dopamin (kırmızı) karışımı (i), APTES ile kapatılmamış ZnO-QD'lerin (siyah) emisyon spektrumları ve APTES ile kapatılmamış ZnO-QD'ler ile Dopamin karışımı (ii) (D. Zhao *et al.* 2013)

İnorganik Kuantum Noktalarının Avantajları

Yüksek kuantum verimi: İnorganik kuantum noktaları absorplanan enerjinin büyük bir kısmını ışıığa çevirmektedir. Bu durum daha az enerjinin kaybolmasına ve yüksek verimli ışık emisyonu elde edilmesine olanak sağlamaktadır.

Yoğun renk spektrumu: Geniş bir renk aralığında floresans ışıma yayabilirler. Bu özellikleriyle başta biyolojik görüntüleme olmak üzere, güneş pilleri vb. diğer çalışmalarda avantaj sağlarlar.

Boyut ayarlanabilirliği: İnorganik kuantum noktaların boyutları sentez aşamasında değiştirilebilir. Boyutlarının değiştirilmesiyle nanoparçacıklara çeşitli optik özellikler kazandırılabilir.

Fotostabilite: Gün ışığı altında bile oldukça kararlı özellik gösterirler. Bu özelliklerinden dolayı gün ışığına maruz kalsalar bile floresans özelliklerini korumaktadırlar.

İnorganik Kuantum Noktalarının Dezavantajları

Sentez: İnorganik kuantum noktalarının sentezindeki zorluklar, yüksek maliyetleri gibi faktörler büyük ölçekte üretimlerinde oldukça sıkıntı çıkarmaktadır.

Toksisite: İçerdikleri ağır metaller sonucunda toksik etki gösterebilmektedirler. Bu sebeple, çevre ve insan sağlığı açısından tehlike arz etmekte ve birçok uygulamada çalışmaları kısıtlanmaktadır.

Karbon Temelli Floresans Malzemeler

Karbon temelli floresans malzemelerin tarihçesi, karbonun çeşitli formlarının keşfiyle başlamaktadır. Karbon yapıları, doğal olarak var olan elmas veya grafit gibi maddelerden oluşan, bilinen en eski malzemelerdir. 1998 yılında, Japon bilim insanları Lijima, Lahihashi ve Ajayan, karbon nanotüplerin varlığını keşfetmiştir (Iijima & Ichihashi, 1993). Karbon nanotüpler, tek katmanlı veya çok katmanlı grafen yapısının bir tüp şeklinde sarılmasıyla oluşur ve benzersiz elektronik ve optik özelliklere sahiptirler (Ajayan & Zhou, n.d.). Bu keşifle beraber, karbon temelli floresans malzemeler ilgi odağı haline gelmişlerdir. Karbon temelli floresans malzemeler, karbon tabanlı bileşiklerin floresans özelliklere sahip olmasıyla karakterize edilen malzemelerdir. Bu malzemeler grafen oksit, karbon nanotüpler, karbon noktaları ve konjuge polimerler gibi farklı karbon yapılarından üretilebilmektedir.

Karbon temelli floresans malzemeler, yüksek floresans verimliliğine sahip olabilirler. Bu absorbe edilen ışığın büyük bir kısmının floresans olarak geri yayıldığı anlamına gelmektedir. Bu bağlamda parlak ve yoğun floresan sinyaller elde edilmektedir. Genellikle basit ve ekonomik yöntemlerle sentezlenebilmektedirler. Bu da büyük ölçekte üretimlerini kolaylaştırmaktadır. Karbon temelli floresan malzemeler geniş bir emisyon spektrumu gösterirler. Bu durum da farklı dalga boylarında floresans yayılımının mümkün olması anlamına gelmektedir. Bu özellikleriyle, görüntüleme ve etiketleme uygulamaları için oldukça tercih edilmektedirler. Ek olarak, inorganik kuantum noktalarının en büyük sıkıntılarından olan toksik etki, karbon temelli floresans malzemelerde çok düşük seviyededir. Göstermiş oldukları yüksek biyouyumluluk sayesinde, diğer floresans malzemelere kıyasla üstün avantajlar sunmaktadırlar (Jelinek, 2017).

Konjuge polimerler

Konjuge polimerler, genellikle π elektronlarının konjuge yapıya sahip olmasıyla karakterizedir. Yapı ve özellikleri bakımından ele alındığında, konjuge polimerler, düzenli olarak tekrarlanan ünitelerin bir araya gelmesiyle oluşur. Monomerler arasında çift bağlar bulunur ve bu çift bağlar konjuge yapıyı oluşturacak şekilde düzenlenir. Konjuge polimerlerin elektronik yapıları, π elektronlarının konjuge bağlantıları boyunca delokalize olmasına izin verir. Bu delokalizasyon, polimerin elektronik ve optik özelliklerini etkiler (Mikie *et al.* 2021).

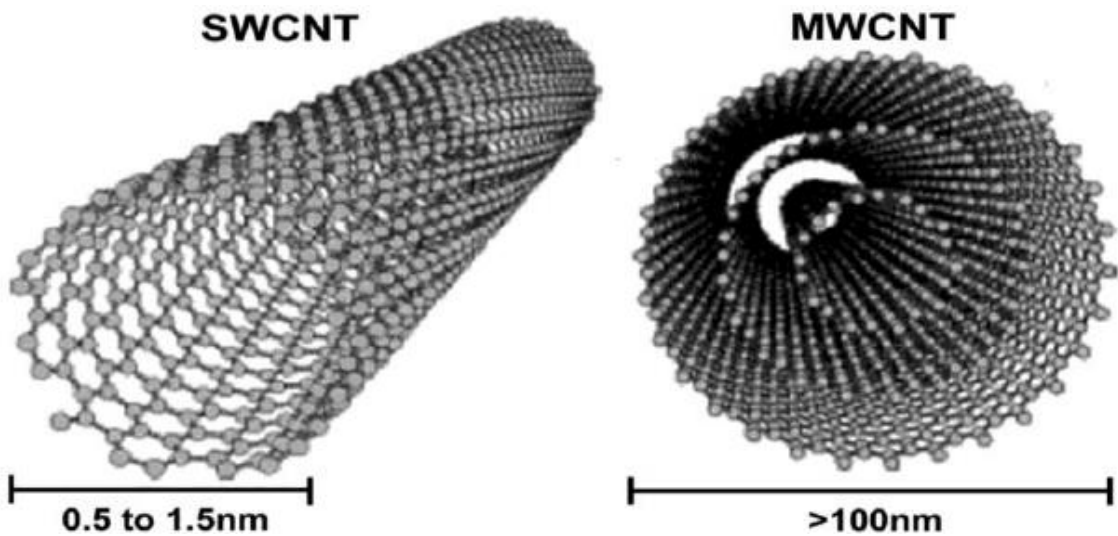
Konjuge polimerler, çeşitli sentez yöntemleri ile üretilebilirler. En yaygın sentez yöntemleri arasında Suzuki-Miyaura çapraz eşleştirme (Muenmart *et al.* 2014), polimerizasyon (Stranks *et al.* 2013) gibi yöntemler yer almaktadır. En sık kullanılan konjuge polimerlere

Poli(p-fenilen vinilen), Poli(anilin), Poli(tiyofen), Poli(3-heksil tiyofen), Poli(p-fenilenetilen) örnek verilebilir (Pecher & Mecking, 2010).

Yüksek elektronik iletkenlik, yarı iletkenlik ve optimum absorbands sağlaması, çeşitli çözücülerde kolayca çözünebilmesi ve işleme teknikleriyle kolayca işlenmeleri, doğal polimerlere kıyasla daha esnek ve hafif olmaları, düşük maliyetleri ve büyük ölçekte üretilibilmeleri sebebiyle önemli avantajlar sunmaktadırlar. Fakat, yüksek sıcaklıklar, oksidasyon ve UV radyasyonu gibi faktörlerin konjuge polimerlerin performansını kolayca etkileyebilmesi, uzun süreli depolanmaya olanak sağlamamaları sebebiyle stabilite sorunları yaşanması, bazı polimerlerin sentezlerindeki karmaşıklık ve özel ekipman/reaktif gerektirmesi gibi birtakım dezavantajlara da sahip oldukları bilinmektedir.

Karbon nanotüpler

Karbon nanotüpler (CNT'ler) karbon atomlarının düzenli bir şekilde sarılarak oluşturduğu silindirik yapılar şeklinde tanımlanmaktadır. CNT'ler tek duvarlı nanotüpler (SWNT) veya çok duvarlı nanotüpler (MWNT) olarak farklı şekillerde bulunurlar (M. Zhang & Li, 2009). CNT'ler keşfedilmelerinden bu yana, elektriksel, kimyasal, mekanik ve yapısal özellikleriyle araştırmalarda oldukça ilgi çekici hale gelmişlerdir. Ayrıca, CNT'ler metalik yarı iletken ve süper iletken elektron taşıma özelliği sergilerler. Bunun yanı sıra yabancı bir molekülü depolamak için kullanılabilecek içi boş bir çekirdeğe sahiptirler. Bilinen herhangi bir malzeme en büyük elastik modüle sahiptirler (Malhotra *et al.* 2015). Tek duvarlı nanotüpler, tek bir grafit tabakasının silindirik bir şekilde sarılması sonucu oluşurken, çok duvarlı nanotüpler birkaç grafit tabakasının birbirine sarılmasıyla oluşmaktadır (**Hata! Başvuru k aynağı bulunamadı.**).



Şekil 5. Karbon nanotüplerin yapısal şekilleri. SWCNT'lerin çapı 0,5-1,5 nm arasında olurken, MWCNT'lerin çapı 100 nm ve üzeridir (Malhotra *et al.* 2015)

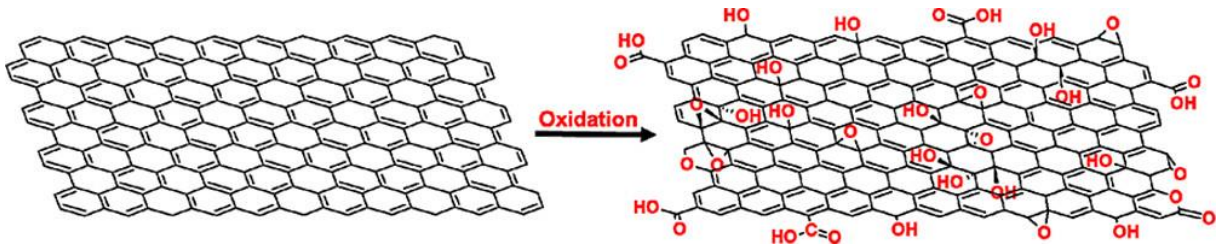
Karbon nanotüplerin en belirgin özellikleri arasında olağanüstü mekanik mukavemet, elastikiyet, yüksek elektriksel ve termal iletkenlik bulunur. Bu özellikleri sayesinde, elektrik, optoelektronik, malzeme bilimi enerji depolama, nanoteknoloji ve biyomedikal alanlarda geniş bir kullanım potansiyeline sahiptirler (Baddour & Briens, 2005).

Karbon nanotüplerin üretimi için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. En yaygın olarak kullanılan yöntemler kimyasal buhar biriktirme ve ark deşarjı yöntemidir. Bu üretim yöntemleri karbon nanotüplerin kontrol edilebilir ve tekrarlanabilir ölçekte sentezlenmesine olanak sağlamaktadır.

Grafen oksit

Grafen, karbon atomlarının düzlemde birbirine bağlandığı tek tabaka kalınlığına sahip bir karbon allotropudur. Bu tek tabaka, sp^2 hibridizasyonu ile düzenlenmiş altıgen karbon halkalarının oluşturduğu bir yapıya sahiptir (W. Yu *et al.* 2020; W. W. Yu *et al.* 2006). Grafen, karbon nanotüpler ve fullerenler gibi diğer karbon yapılarının da temel yapı taşıdır.

Grafen oksit (GO), grafen tabakalarının oksidasyonu ile elde edilen bir malzemedir (Şekil 6). Grafen oksit, grafen tabakalarının karbon atomları arasında oksijen atomlarının da yer aldığı bir yapısı olan oksit karışımıdır. Genel olarak GO, Brodie ("XIII. On the Atomic Weight of Graphite," 1859), Staudenmaier veya Hummers (Hummers & Offeman, 1958) yöntemi veya bu yöntemlerin bazı varyasyonları ile sentezlenir. Grafen oksit, grafenin elektriksel ve mekanik özelliklerinden farklı özellikler sunar (Y. Zhu *et al.* 2010).



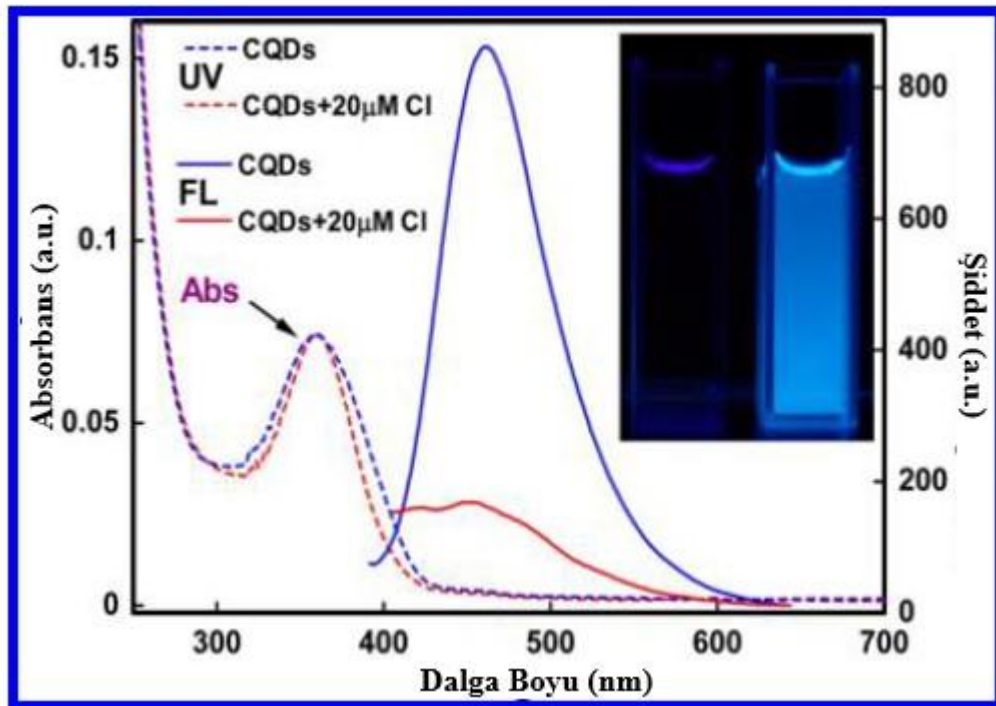
Şekil 6. Grafen oksit oluşturmak için grafen tabakasının oksidasyonu. (Georgakilas *et al.* 2016)

Grafen ve grafen oksit, ile ilgili farklı alanlarda yoğun araştırmalar yapılmakta ve ilgi görmektedir. Bunun temel nedeni bu malzemelerin benzersiz fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklere sahip olmalarıdır. Grafenin mükemmel iletkenlik özelliği, esnekliği ve termal iletkenliği elektronik, optik, yüksek mukavemet, enerji depolama, ve biyomedikal uygulamalar gibi birçok alanda önemli fırsatlar sunmaktadır.

Grafen oksit ise, grafenin bazı özelliklerinin değiştirilmesi ile, elektrik yalıtkanı veya yarı iletkeni olarak kullanılabilir hale getirilebilir. Bu, elektronik cihazlarda, güç depolama sistemlerinde ve biyomedikal uygulamalarda kullanım potansiyeli sunar.

Grafen ve grafen oksit üzerinde yapılan çalışmalarda sentez zorlukları, kontaminasyon riski, karakterizasyon zorlukları, maliyet ve ölçeklenebilirlik gibi sıkıntılar hali hazırda devam etmektedir.

2012 yılında yapılan bir çalışmada, serbest klorun, sitrik asidin pirolize edilmesiyle meydana gelen grafen kuantum noktalarının (GQDs) pasifleştirilmiş yüzeyini yok edebildiği ve bunun floresan sinyallerinin önemli ölçüde söndürülmesiyle sonuçlandığı bulunmuştur. Şekil 7'da serbest klorun varlığında ve yokluğunda GQD'lerin UV ve floresans spektrumları gösterilmiştir. Bazı deneysel parametrelerin optimize edilmesinin ardından GQD'lerin floresans söndürülmesine dayalı olarak içme suyundaki artık klorun tespit edilmesinde yeşil ve kolay bir algılama sistemi geliştirilmiştir (Dong, Li, *et al.* 2012).



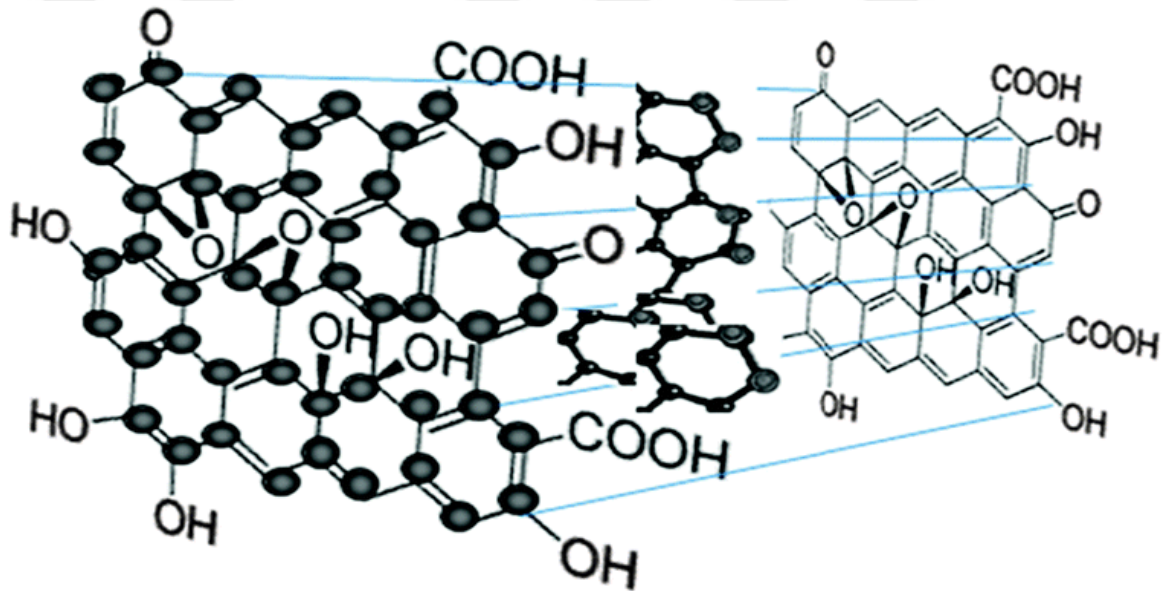
Şekil 7. Serbest klorun yokluğunda ve varlığında GQD çözeltisinin UV ve floresan spektrumu. Ek: 365nm'lik bir UV ışınıyla aydınlatılan, klorun yokluğunda (sağda) ve varlığında (solda) GQD çözeltisinin floresans görüntüsü (Dong, Li, *et al.* 2012)

Önceki bölümlerde anlatıldığı üzere, karbon temelli malzemeler son yıllarda geniş bir ilgi görmektedir. Bununla birlikte sentez ve saflaştırılma yöntemleri, grafen malzemelerin veya karbon nanotüplerin fotoağarma dirençlerinin düşük olması ve suda düşük çözünürlük göstermeleri gibi faktörler uygulamalarda sorun teşkil etmektedir. Ayrıca, üretimlerinde ağır metallerin kullanılması nedeniyle yüksek toksisite gibi belirli sınırlamalara sahiptir (Cao *et al.* 2007; R. Liu *et al.* 2009; W. W. Yu *et al.* 2006). Ağır metallerin çok düşük bir seviyede bile oldukça toksik olduğu bilinmektedir. Bu durum floresan özellikleri açısından benzer fakat biyoyumlu, daha düşük toksisite gösteren, düşük maliyetli ve kimyasal eylemsizlikleri

nedeniyle yarı iletken kuantum noktalarına bir alternatif olarak karbon kuantum noktalarının ortaya çıkmasını sağlamıştır.

Karbon kuantum noktaları

Karbon kuantum noktaları (CQD'ler), ilk olarak 2004 yılında tek duvarlı karbon nanotüplerin saflaştırılması sırasında keşfedilmiştir (Das *et al.* 2018). CQD'ler boyutları 1-10 nm arasında değişen, floresans özelliğe sahip, sıfır boyutlu, karbon temelli nanomalzemelerdir. Karbon kuantum noktaları karbon yapıda bir iskelete ve yüzeyde bol miktarda oksijen grupları içeren yapıya sahiptir. Genellikle yarı küresel nanopartiküllerdir ve bu partiküller grafen ve grafen oksit tabakalarıyla birleştirilen amorf veya nanokristal çekirdeklerden oluşurlar. Bu yapılar tipik olarak sp^2 karbon (grafitik veya turbostratik karbon) veya elmas benzeri sp^3 hibritlenmiş karbon eklemelerini içerirler (Şekil 5).



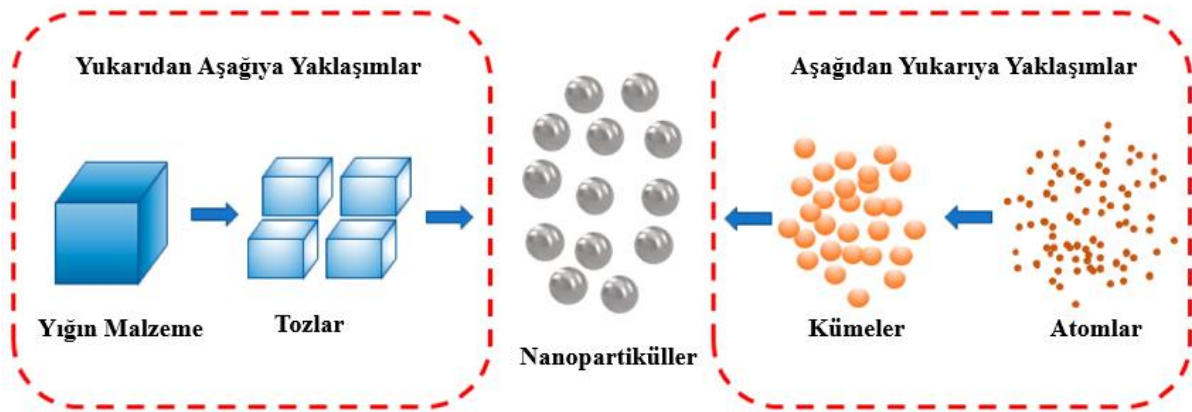
Şekil 5. Karbon kuantum noktalarının kimyasal yapısı (Lim *et al.* 2015)

Karbon kuantum noktalarının kimyasal içeriği ve yüzey grupları, boyutları, meydana gelen floresans özellikleri ve elektronik yapıları ayarlanabilmektedir. Yüzey pasivasyonundaki değişiklikler ile CQD'lerin floresans şiddeti artırılabilirken, yüzey işlevselleştirme ile sulu ve susuz çözücülerdeki çözünürlükleri gibi bir takım fiziksel özellikleri başkalaştırılabilmektedir. Olağanüstü bu özellikleri sayesinde biyogörüntüleme, kimyasal ve biyolojik sensör uygulamaları (Dong, Wang, *et al.* 2012), fotoelektrokataliz (R. Wang *et al.* 2017), nanotıp (Devi *et al.* 2019), metal iyon algılama (Gao *et al.* 2016) gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır.

Karbon Kuantum Noktalarının Sentez Yöntemleri

Karbon kuantum noktaların sentezlenmesinde iki tür yaklaşım kullanılmaktadır: yukarıdan-aşağıya (top-down) yaklaşımlar ve aşağıdan-yukarıya (bottom-up) yaklaşımlar.

Yukarıdan-aşağıya üretim yöntemleri, yığın (bulk) bir malzemenin çeşitli işlemlere maruz bırakılarak nanoboyuta indirgenmesini esas alır. Bu yöntem, karbon nanotüp, elmas, grafit oksit gibi yapıların elektrokimyasal oksidasyon, ark deşarjı, lazerle kesme gibi yöntemlerle daha küçük parçalar elde edilmesini sağlayan metottur. İkinci yaklaşım ise, atom/moleküllerden başlayarak nanoboyutta parçacık üretilmesine dayanır (Şekil 6). Bu yöntemler arasında hidrotermal, solvotermal, mikrodalga destekli sentez, karbonizasyon (yanma), piroliz gibi uygulamalar yer almaktadır. İki yönteminde kendi içinde avantaj ve dezavantajları olmasına karşın, aşağıdan yukarıya olan yöntemler ucuz ve basit olmaları, büyük ölçekte üretime izin vermeleri gibi avantajlarından dolayı daha fazla tercih edilmektedir. İzleyen bölümlerde CQD üretimi için uygulanan temel yöntemler hakkında kısa bilgiler verilmiştir (Arole & Munde, 2014).



Şekil 6. Nanoparçacıkların yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya sentezinin şeması (H. Lu *et al.* 2020)

Ark-Deşarj yöntemi

Ark deşarj yönteminde, biri katot biri anot olmak üzere hazırlanmış iki grafit arasında kanal-mesafe oluşturularak doğru akım sonucu nanoparçacık üretimi sağlanmaktadır. Xu ve arkadaşları, tek duvarlı karbon nanotüplerin ark deşarj yöntemiyle sentezlerken, yanlışlıkla üç çeşit karbon nanoparçacık elde etmişlerdir. Ortaya çıkan CQD'lerin 365 nm'de mavi-yeşil, turuncu ve sarı floresan emisyon oluşturduğunu tespit etmişlerdir (X. Xu *et al.* 2004). Bu parçacıkların elde edilmesinden sonraki analizlerde CQD'lerin yüzeyinin, karboksil grubu ile etkileşime girdiğini göstermişlerdir. Bu durum karbon kuantum noktalarının suda iyi çözünürlüğe sahip olduğunu doğrulamıştır. Fakat, ark deşarj yöntemi sırasında farklı büyüklüklerde karbon parçacıklarının oluşması, geniş bir parçacık boyutu dağılımına sebebiyet vermiştir. Büyük parçacık boyutu, elektrokatalitik işlem sırasında aktif reaksiyon bölgelerini sınırlayabilen CQD'lerin, spesifik yüzey alanını büyük ölçüde azaltmaktadır (X. Wang *et al.* 2019).

Lazer ablasyonu

Lazer ablasyonu, bir maddenin yüksek enerjili lazer ışınına maruz bırakılarak fiziksel ve kimyasal modifikasyona uğratılmasıdır. Bu yöntem ince filmler ve diğer nanoyapılara kıyasla oldukça geniş bir uygulama alanı sağlamaktadır. Li ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, karbon öncüsünün farklı organik çözücüler içerisinde dağılımı ve lazer demetine maruz bırakılması ile CQD'lerin sentezlenmesinde kolay bir yöntem bildirmişlerdir. Bu yöntemle elde edilen CQD'ler ayarlanabilir ve görünür bölgede floresans göstermişlerdir (X. Li *et al.* 2011) .

Yapılan başka bir çalışmada ise, karbon kuantum noktalarının yüzeyleri, fotolüminesans özelliklerini ayarlamak için, ışınlama ile uygun bir çözücü seçilerek farklılaştırılabileceği gösterilmiştir (Hu *et al.* 2009). Fakat bu yöntem karmaşıklığı ve maliyetinin yüksek olması sebebiyle tercih edilmemektedir.

Asidik oksidasyon

Asidik oksidasyon, karbon temelli nanomalzemeler elde etmek için dökme karbon malzemelerinin parçalarının pul şeklinde döküldüğü sentetik bir işlemdir. Daha sonra, fotolüminesans CQD'ler elde etmek için güçlü asitler kullanılarak –OH ve –COOH grupları ile işlevselleştirilmektedirler. Başlangıçta bu teknik, bir grafen tabakasından toplu grafen oksit elde etmek için kullanılsa da sonraları CQD elde etmek için de kullanılmıştır. Ancak bu sentetik yöntem CQD'lerin kalitesi, boyut dağılımları ve geniş fotolüminesans açısından birçok dezavantajlar sunması nedeniyle tercih edilmemektedir (Hagiwara *et al.* 2021).

Mikrodalga- piroliz

Aşağıdan-yukarıya yaklaşım yöntemleri arasında mikrodalga-piroliz yöntemi hızlı sentezlenme ve ticarileştirilebilmesi açısından oldukça sık kullanılan bir yöntemdir (K. Jiang *et al.* 2016; Schwenke *et al.* 2015). Zhu ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, renksiz bir çözelti oluşturmak için sulu ortamda polietilen ve sakkaritler bir araya getirilmiştir ve mikrodalga ile ısıtılarak CQD'lerin elde edilmesini sağlayan bir yöntem bildirmişlerdir. Bu çalışmada uyarılma bağımlı CQD'ler elde edilmiş ve elektrokemilüminesans özellik gösteren CQD'lerin, basit ve çevre dostu bir şekilde hazırlanabileceğini göstermişlerdir (H. Zhu *et al.* 2009).

Hidrotermal/Solvotermal yöntem

Karbon kuantum noktalarının üretiminde en sık kullanılan yöntem hidrotermal yöntemdir (Shen *et al.* 2012; L. Wang *et al.* 2017). Kolay ve düşük maliyetli olması sebebiyle

en sık kullanılan prosedürlerden bir tanesidir. Kapalı bir reaktör içerisinde, sulu ortamda, ortam sıcaklığı ve basıncından çok daha yüksek sıcaklık ve basınç altında gerçekleşen sentez işlemidir. Bu sentezin avantajları arasında çözeltinin elektrik iletkenliğinde oldukça yüksek artışa sebep olmaktadır. Aynı zamanda, madde taşınımı oldukça kolay ve hızlı olmakla birlikte yüksek kristalinite gösterir.

Hola ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, hidrotermal sentez yöntemiyle, grafit nitrojen oranı ayarlanarak çeşitli dalga boylarında floresans ışıma veren CQD'ler elde edilmiştir. Karbon ve nitrojen kaynağı olarak sitrik asit ve etilen diamin kullanılmıştır ve canlı sistemlerde Fe^{+3} tespiti için biyosensör olarak kullanılabilirliği kanıtlanmıştır (Holá *et al.* 2017).

Ayrıca, yapılan bir başka çalışmada ise, karbon ve nitrojen kaynağı olarak kullanılan biyomoleküllerden, hidrotermal yoğunlaşma ile karbon noktalarının iç yapılarının ayarlanabileceği bulunmuştur. Bu heteroatom katkılama ile yeni elektrokatalizör üretimi ve tasarlanmasında kullanılabilirliğinden bahsedilmektedir (S. Lu *et al.* 2019).

Karbon Kuantum Noktalarının Fotoluminesans ve Absorbans Özellikleri

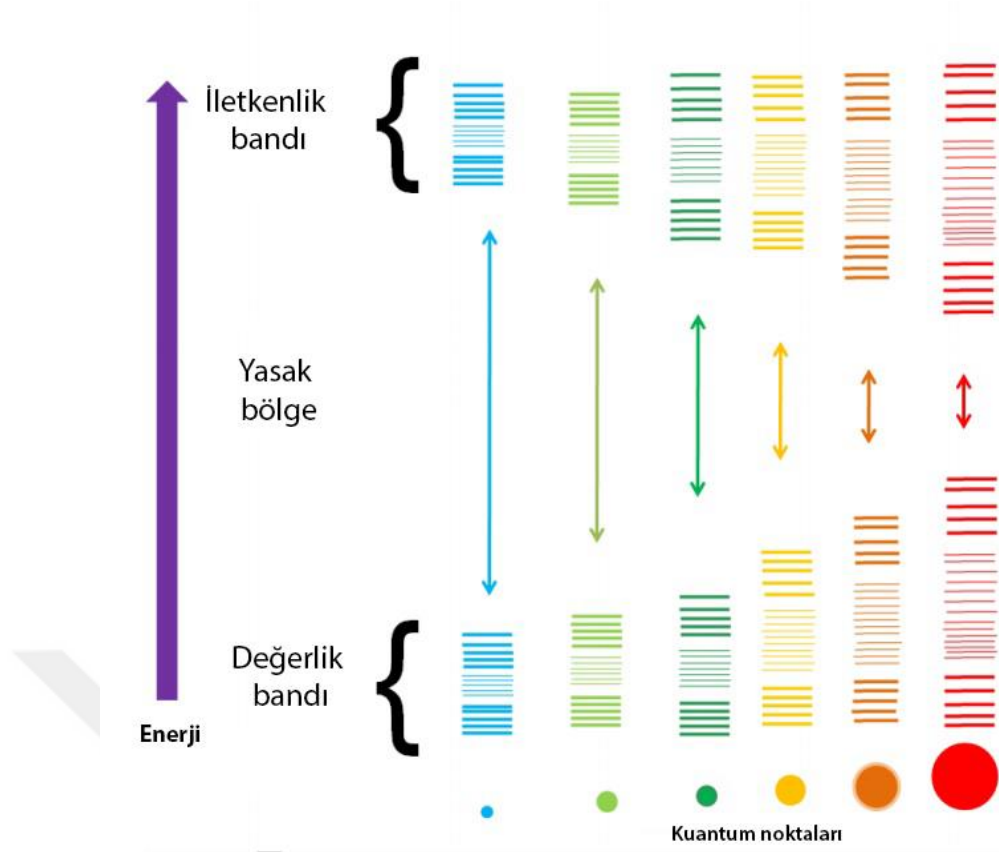
Genel olarak CQD'lerin UV-görünür bölgedeki absorpsiyon spektrumları, C=C bağının $\pi-\pi^*$ ve C=O gruplarının $n-\pi^*$ geçişlerine karşılık gelen, yaklaşık 280 nm ve 300 nm'de iki güçlü tepe noktası şeklinde gözlemlenmektedir (Anwar *et al.* 2019; Y. Zhao *et al.* 2015). Tipik olarak, $\pi-\pi^*$ geçişi karbon çekirdeğindeki aromatik sp^2 alanlarından kaynaklanmaktadır. $n-\pi^*$ geçişi ise floresan karbon noktasının yüzeyindeki karboksil gruplarından kaynaklanmaktadır (F. Zhao *et al.* 2023).

UV ışığına maruz bırakılan karbon noktalarının yapısında bulunan elektronlar, belirli bir enerjiye maruz kalırlar. Bu olay elektronların temel enerji seviyesinden yüksek enerji seviyesine çıkmalarını sağlar. Bu durumda elektronlar kararsız hale gelir ve tekrardan kararlı yapılarını kazanma isteğinden dolayı bir süre sonra eski haline geri dönerler. Bu uyarılma şekli fotoluminesans olarak adlandırılır. Meydana gelen floresanın rengi iletim ve değer bandı arasındaki mesafeye bağlanmaktadır. Ortaya çıkan enerji floresan olarak görünmektedir ve bant boşluğu ne kadar fazlaysa, elektronun sahip olduğu enerji ile emisyonu o kadar fazla olmaktadır (Jasieniak *et al.* 2011).

Katı hal fizikine göre malzemeler elektron iletkenliğine göre 3 gruba ayrılmaktadır; metaller, yarı iletkenler ve izolatörler. Katı malzemelerin iletkenliği valans ve iletim bantları arasındaki enerji seviyesi farkına dayanır. Valans bandı (VB), elektronların oda sıcaklığında işgal ettiği en yüksek enerji seviyesidir. İletim bandı ise elektronların işgal etmediği en düşük enerji seviyesini temsil eder. Bir elektron, valans bandındaki enerji seviyesinden iletim bandına

geçmek için belirli bir enerji kazanmalıdır. Bu enerji farkı, valans ve iletim bantları arasındaki bant aralığı enerjisi olarak bilinir ve elektron volt (eV) cinsinden ifade edilir (Y. Xu & Schoonen, 2000).

Yarı iletken malzemeler, metal iletkenler ve yalıtkanlar arasındaki özel bir bant yapısına sahiptir. Valans ve iletim bantları, metal iletkenler ve yalıtkanların bant aralığı ortasında bulunan bir bant boşluğu ile ayrılır. Işığa maruz kaldığında, malzeme ışığı absorbe eder ve bu valans bandındaki elektronların uyarılmasına ve iletim bandına geçmesine yol açar. Bu süreç sonucunda valans bandında bir boşluk (H^+) oluşur. Elektronlar valans bandına geri döndüğünde floresans yayılır. Işık absorpsiyonu hızlı bir süreçte meydana geldiğinde, elektronlar ve boşluklar birbirini yakından takip eder ve malzeme içinde serbestçe hareket ederler. Bu durum, Bohr atom modelinde olduğu gibi elektronların boşlukların yörüngesinde döndüğü ve elektrostatik çekimle bir arada tutulduğu bir sistem yaratır. Bu elektron-boşluk çiftleri 'eksiton' olarak adlandırılır ve aralarındaki mesafe eksiton Bohr yarıçapı olarak adlandırılır. Ancak, yarıiletken malzeme boyutları nanometre ölçeğine indirildiğinde, elektronlar ve boşluklar çok yakın olurlar, bu da enerjinin hapsedilmesine ve kuantum mekanik etkilerin belirgin hale gelmesine neden olur. Sentetik olarak üretilen kuantum noktaları ne kadar küçük olursa, elektron boşluk çiftlerinin daha fazla sıkışmasına neden olur. Bu durum, daha yüksek enerji seviyelerine ve daha kısa dalga boylarına yol açar. Daha büyük QD'ler ise daha düşük enerji seviyelerine ve daha uzun dalga boylarına sahiptir bu nedenle kırmızı floresans yayabilirler. Özetle, kuantum noktalarının boyutu, optik özelliklerini belirleyen temel bir faktör olarak ele alınmaktadır (Reshma & Mohanan, 2019) . Şekil 7'da artan QD boyutuyla birlikte emisyon dalga boyundaki artışı gösteren, QD'lerin boyutları ayarlanabilir optik özelliklerinin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 7. Kuantum parçacıkların büyüklüklerine bağlı olarak yasak bölgedeki değişimleri (Reshma & Mohanan, 2019)

Kuantum noktalarının boyutlarının değiştirilebilmesi, birden çok optik ve elektronik özellikler kazanmasına yol açmıştır. Bu durum CQD'lerin güneş panelleri, LED'ler, hastalık tanısı ve tedavisi gibi birçok alanda ve uygulamalarda kullanılabilirliğini sağlamaktadır (Kargozar *et al.* 2020).

Karbon Kuantum Noktalarının Uygulamaları

Biyogörüntüleme

Biyogörüntüleme, cildi istila edebilecek veya fiziksel olarak vücuda girebilecek hiçbir aletin dahil olmadığı bir prosedürü ifade eden bir terimdir ve bilim insanlarının biyolojik fonksiyonları gerçek zamanlı olarak görüntülemelerine olanak tanır. Fiziksel etkileşim gerektirmeden görüntülenen ögenin, üç boyutlu yapısı hakkında veri elde etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Daha geniş anlamda, biyogörüntüleme, izleme için sabitlenmiş biyolojik maddeleri görüntülemeye yönelik teknolojileri ifade eder. Temel ve tıp bilimlerinde, tipik anatomi ve fizyolojiyi incelemek ve araştırma verilerini toplamak için biyogörüntüleme kullanılabilir (Lahoti & Jogdand, 2022).

Atchudan ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, basit bir hidrotermal sentez yöntemi kullanılarak muz kabuğu atıklarından karbon kuantum noktalarının sürdürülebilir bir

sentezi bildirilmiştir. Ortaya çıkan CQD'ler dar bir boyut dağılımına sahip ve parçacık boyutu 5 nm olarak ölçülmüştür. Çeşitli karakterizasyon işlemleriyle, sentezlen CQD'lerin nematodlarda yüksek bir konsantrasyonda bile düşük bir toksisite gösterdiğini doğrulamışlardır. Elde edilen CQD'lerin mükemmel floresan stabilitesi ve biyouyumluluk ile nematodlarda biyogörüntüleme için kullanılabileceği vurgulanmıştır (Atchudan *et al.* 2021).

Xue ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada ise, sitrik asit, etilendiamin ve alkali lignin kullanılarak elde edilen karbon kuantum noktalarının biyogörüntüleme ve biyoetiketleme potansiyeli incelenmiştir. Bu öncü maddelerin varlığında hidrotermal sentez yöntemi ile L-CQD'ler elde edilmiştir. Bu kuantum noktaları 10 nm'nin altında boyutları ve küresel formda bir morfoloji göstermiştir. Aynı zamanda, 375-460 nm arasında uyarıldıklarında 454 ila 535nm arasında değişen maksimum emisyon ile uyarma bağımlı floresans davranışı sergilemişlerdir. Yapılan sitotoksosite testlerinde, L-CQD'ler HeLa hücrelerine karşı düşük toksik etki göstermiştir. Bu durumdan yola çıkarak yapılan biyogörüntüleme çalışmalarında L-CQD'lerin çok renkli floresansı biyogörüntüleme ve biyoetiketleme alanında kullanılabilirliğini ispatlamıştır (Xue *et al.* 2019).

Benzer bir çalışmada, atık biyokütleyi hammadde olarak kullanarak kolay bir yöntemle biyouyumlu karbon kuantum noktaları sentezlenmiştir. Elde edilen nanoparçacıklar ayarlanabilir floresan ve %14'e varan kuantum verimine sahip olduğu test edilmiştir. Yapılan diğer karakterizasyon çalışmaları ile pH duyarlılığı ve proteinler gibi biyolojik olarak ilgili maddeleri algılama yeteneği sergilemiştir. CQD'lerin hücre zarına nüfuz etme ve floresan yayma, böylece sitoplazmayı boyama yetenekleri araştırılıp doğrulanmıştır. Elde edilen veriler fare fibroblastlarında biyogörüntüleme amacıyla kullanılan CQD'lerin, pahalı antikolar gibi ticari olarak temin edilebilen ürünlere ilginç bir alternatif olacağını göstermiştir (Janus *et al.* 2020).

Biyosensör uygulamaları

CQD'ler ekonomik olmaları, kolay sentezlenebilmeleri, suda çözünürlüğü, kimyasal stabilite, yüksek optik özellikleri, düşük toksisite özelliklerinin yanı sıra kolay işlevselleştirilebilmeleri açısından birçok alanda kullanılmaktadır. En çok kullanıldığı uygulamalardan birisi de biyosensör çalışmalarıdır.

Biyosensörler, biyolojik sinyali ölçülebilir bir sinyale dönüştürerek biyolojik veya kimyasal bir analiti seçici olarak ölçmek için bir sinyal dönüştürücü, bir sinyal işlemci ve bir biyolojik tanıma elamanı olmak üzere üç ana bileşen içeren cihazlardır (Pourmadadi *et al.* 2023).

CQD tabanlı sensörler veya biyosensörler, floresans sönümleme (fluorescence quenching), statik sönümleme (static quenching), dinamik sönümleme (dynamic quenching), enerji transferi (energy transfer), iç filtre etkisi (internal filter effect), foto kaynaklı elektron transferi (photoinduced electron transfer) ve floresan rezonans enerji transferi (fluorescence resonance energy transfer) dahil olmak üzere farklı mekanizmalarla çalışır. CQD tabanlı sensörler, metal iyonları, asitler, proteinler, polipeptitler, DNA ve miRNA, su kirleticileri, hematin, ilaçlar, vitaminler ve diğer kimyasallar gibi farklı türlerin tespiti için uygulanmıştır (Molaei, 2020).

Cho ve arkadaşları tarafında yapılan bir çalışma, karbon noktalarına ve rodamin 6G'ye dayalı bir oranmetrik floresan glikoz biyosensörü geliştirmişlerdir. Glikoz oksidaz ve yaban turpu peroksidazının glikoz ile bienzimatik reaksiyonu nedeniyle floresan sönümleme ile oranmetrik bir floresan renk değişimi gözlenmiştir. 360 nm'de uyarıldığında, sitrik asit ve etilen diamin ile bir solvotermal yöntemle hazırlanan CD'lerin mavi floresans emisyonu, glikoz ile bienzimatik reaksiyonla sönümlenirken, rodamin 6G'nin glikoza karşı inert olduğu belirlenmiştir. Böylece, glikoz konsantrasyonu arttıkça maviden yeşile bir floresans renk değişimi gözlenmiştir. Elde edilen biyosensör ile kanda glukoz tespiti için kullanılabileceği belirtilmiştir (Cho & Park, 2019).

Yapılan başka bir çalışmada ise, dopaminin kolorimetrik tayini için bir sensör geliştirilmiştir. Sensörün temelleri, altın nanopartiküllerin, fenilenamin sülfonik asit katkılı karbon noktaları (S-CQDs) tarafından modifikasyonu ve modifiye edilmiş altın nanopartiküllerin yüzeyindeki karboksilik grupların dopaminin amino grupları ile etkileşimi ve Fe^{+3} varlığında bu parçacıkların bir araya getirilmesiyle oluşmaktadır. Fe^{+3} sistemde rengin kırmızıdan mavimsi mora dönüşümüne sebebiyet vermektedir. Analitik sinyal olarak kullanılan 520-670 nm'deki absorbans oranı, sulu çözeltideki dopamin konsantrasyonu ile uyumludur. Tasarlanan bu sensörün, kan ve idrar numunelerinde dopamin tespiti amacıyla kullanılabilir olduğu gözlemlenmiştir (Amiri *et al.* 2019).

Antimikrobiyal aktivite

Antimikrobiyal direnç, muazzam bir küresel sağlık krizini ve insanların bugün karşı karşıya olduğu en ciddi tehditlerden birini temsil etmektedir. Bazı bakteri suşları neredeyse tüm antibiyotiklere karşı direnç kazanmıştır. Bu nedenle, dirençli bakterilerin üstesinden gelebilmek için yeni antibakteriyel maddelere ihtiyaç duyulmaktadır. 2017 yılında Dünya Sağlık Örgütü (WHO), antibiyotiğe dirençli öncelikli patojenlerin, insanlar için büyük tehdit oluşturan ve acilen yeni antibiyotiklere ihtiyaç duyulan patojenlerin bir listesini yayınlamıştır. WHO listesinin çoğunluğu Gram-negatif bakteriyel patojenlerdir (Breijyeh *et al.* 2020).

Karbon kuantum noktalarının doğrudan antibakteriyel aktivitesi, büyük ölçüde, karbon kuantum noktaları tarafından üretilen reaktif oksijen türleri tarafından indüklenen oksidatif strese bağlıdır. Düşük konsantrasyonlarda ROS, örneğin bir patojen tehdidine yanıt olarak hücreler içinde bir sinyal molekülü görevi görür. Oksidatif stres, bir bakterinin doğal antioksidan savunmasını aştığında gelişir ve aşırı miktarda mevcut olduğunda, nükleotidlerde, lipidlerde ve proteinlerde oksidatif hasara neden olarak hücre duvarı hasarına ve bakteri ölümüne yol açmaktadır (Y. Wu *et al.* 2021).

Gram-negatif bakterilerin hücre duvarı, gram-pozitif bakterilerin hücre duvarına kıyasla oldukça incedir. Gram negatif bakteriler, dış katmanlarındaki ince zar yapıları sebebiyle dışarıdan gelen yabancı maddeleri absorbe etmez. Böylelikle uygulanan maddelere karşı direnç gösterir. Bu nedenle, gram-negatif bakteriler, ayırt edici yapıları nedeniyle gram-pozitif bakterilere göre daha dirençlidir ve dünya çapında önemli morbidite ve mortaliteye neden olabilmektedirler (Mahat *et al.* 2022) .

Li ve arkadaşları, farklı sıcaklıklarda kolay kalsinasyonla, gentamisin sülfattan karbon kuantum noktaları üretmişlerdir. Üretilen CQD'ler, başlangıç malzemelerinin aktif yapısını koruyarak pozitif yük yüzeyinden ve indüklenmiş reaktif oksijen türlerinden kaynaklanan ek bir antibakteriyel mod sağlayarak, antibiyotik muadili ve düşük ilaç direnci ile karşılaştırıldığında çok daha üstün bir antibakteriyel aktivite göstermiştir. Ayrıca *Staphylococcus aureus* biyofilmini etkili bir şekilde bozduğu ve memeli hücreleri üzerindeki bakterileri seçici olarak ortadan kaldıracak şekilde gösterilmiştir (P. Li *et al.* 2020).

Yapılan başka bir çalışmada ise, bakteriyel keratit topikal tedavisi için bir antibakteriyel madde olarak biyojenik poliaminlerden karbon kuantum noktaları üretilmiştir. CQD'ler, basit bir kuru ısıtma işlemi yoluyla spermidin tozuyla doğrudan sentezlenmiştir. Spermidinden elde edilen CQD'lerin *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa* ve *Salmonella enterica* subsp. *enterica* (ex Kauffmann and Edwards) Le Minor and Popoff serovar Enteritidis karşı etkili antibakteriyel aktivite sergilemiştir. Sentezlenen CQD'lerin bakterilere karşı etki mekanizmasının, boyutlarının küçük olması ve CQD'lerin oldukça pozitif yüklü süper katyonik olmalarının bakterilerin hücre zarını kolayca etkileyerek öldürücü etki göstermelerinden kaynaklandığı vurgulanmıştır (Jian *et al.* 2017).

Fotokataliz

Fotokataliz, birçok çevresel olarak tehlikeli refrakter kirleticileri ortadan kaldırmak için sıklıkla kullanılan bir yeşil yaklaşımdır. Buna göre, yarı iletken fotokatalizörlerin karbon kuantum noktaları ile modifikasyonu, çekici fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı bu tür

kirleticilerin arıtımı için büyük önem taşımaktadır. Karbon kuantum noktaları, yardımcı katalizörler ve görünür bölge ışık toplayıcılar olarak çalıştıklarından, yüksek performanslı fotokatalizörleri işlemek için mükemmel bir adaydır (M. *et al.* 2022).

Zhang ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, CQD'ler hidrotermal sentez yöntemiyle hazırlanmıştır ve titanyum oksit-karbon kuantum nokta kompozitleri elde etmek için inorganik çökeltme-peptizasyon yöntemiyle hazırlanan titanyum oksit ile birleştirilmiştir. Elde edilen parçacık, spesifik yüzey alanını arttıran ve fotokatalitik reaksiyon için daha fazla reaksiyon alanı sağlayan özel katmanlı mezo gözenek morfolojisine sahiptir. CQD'lerin nanoyapısı, sentezlenen nanoparçacık ile iyi bir şekilde bütünleşebilmektedir ve böylece titanyum oksitin fotokatalitik performansının sinerjistik etki altında önemli ölçüde desteklenebildiği gösterilmiştir (L.-Y. Zhang *et al.* 2021).

Metal iyon algılama

Metal iyonları, bir metal atomunun elektron kaybıyla oluşan pozitif yüklü iyonlardır. Bu iyonlar genellikle sulu çözeltilerde veya eriyiklerde bulunmaktadır. Metal iyonlarının özellikleri, iyonun spesifik metal atomuna ve elektron kaybının miktarına bağlıdır. Bir metalin iyonik yarıçapı, yük kaybıyla birlikte azalmaktadır. Bu durum, metal iyonunun daha yüksek bir elektron çekirdek çekimiyle daha küçük bir boyuta sahip olmasına sebebiyet vermektedir.

Metal iyonları kimyasal reaktivite ve bağ oluşturma yetenekleri açısından önemlidir. Diğer bileşiklerle reaksiyona girerek çeşitli bileşikler oluşturabilirler. Örneğin metal iyonları kimyasal reaktivite ve bağ oluşturma yetenekleri açısından önemlidir. Diğer bileşiklerle reaksiyona girerek çeşitli bileşikler oluşturabilirler. Örneğin, metal iyonları oksijen, klor, sülfat gibi anyonlarla reaksiyona girerek metal oksitler, metal sülfatlar, metal halojenürler gibi bileşikler oluşturabilmektedirler. Bazı metal iyonları, katalitik özelliklere sahip olabilir. Bu iyonlar kimyasal reaksiyona katılarak reaksiyon hızını değiştirebilmektedirler. Metal iyonlarının katalitik etkinlikleri, iyonun yükü, yapısı ve çevre şartları gibi faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir.

CQD'lerin floresans özelliklerindeki değişikliklerden sorumlu birkaç mekanizma olmasına rağmen bu olgu, floresans yoğunluğunu söndüren veya arttıran CQD'ler ve florofor etkileşimine dayanmaktadır (Šafranko *et al.* 2021). Floresans şiddetinin artırılması veya söndürülmesi üzerinde etkili olduğu bilinen birkaç mekanizma vardır. Bunlar, IFE, ET, statik söndürme, PET ve dinamik söndürme mekanizmalarıdır.

Metal iyonları, biyolojik ve çevresel sistemlerde önemli rol oynamaktadır. Örneğin, magnezyum (Mg^{+2}), demir (Fe^{+2}/Fe^{+3}), kalsiyum (Ca^{+2}) gibi metal iyonları enzimlerin

aktivitesini düzenlemekte ve hücrel işlevlerde görev almaktadır. Bu özelliklerine ek olarak, bazı metal iyonları, hücre içi sinyal iletiminde ve nörotransmitterlerin salınmasında da görev almaktadırlar.

Metal iyonlarının konsantrasyonları ve varlığı, çevresel sistemlerde de önemli rol oynamaktadır. Endüstriyel atıklar, madencilik faaliyetleri, tarım ilaçları gibi aktiviteler su kaynaklarında ve topraklarda metal iyonlarının birikmesine yol açmaktadır. Bu durum, çevresel kirlilik ve toksisite sorunlarına yol açabilmekte ve ekosistemi etkilemektedir. Bu sebeple, metal iyonlarının algılanması ve değerlendirilmesi, çok yönlü kimyasal analit algılama için, basit, ucuz ve verimli tekniklerin geliştirilmesi önem arz etmektedir.

Cıva (Hg^{+2}) İyonlarının Algılanması

Cıva (Hg^{+2}) iyonları, insan ve çevre için ciddi sorunlar temsil eden, yüksek derecede toksik etki gösteren metal iyonları olarak sınıflandırılmaktadır. Oldukça düşük konsantrasyonlarda bile, cıva iyonları, biyobirikimleri veya toksisiteleri sebebiyle ekolojik dengeyi bozabilmekte ve önemli sağlık sorunlarına neden olabilmektedir (Pacyna, 2020).

Zhu ve arkadaşları Hg^{+2} iyonlarının tespitinde kullanılmak amacıyla azot katkılı CQD'ler (N-CQDs) tabanlı sensör geliştirilmiştir. Yapılan bu çalışmada başlatıcı madde olarak, L-Arginin ve tartarik asit, etanol içerisinde, solvotermal yöntem kullanılarak karbon kuantum noktaları elde edilmiştir. Hazırlanan CQD'ler karakterizasyon işlemleri sonrasında Hg^{+2} ve Fe^{+3} tespiti için kullanılmıştır. Ortamın pH seviyesi cıva iyonlarının algılanmasında etki göstermiştir. pH değeri 3'ten 7'ye doğru çıktıkça floresans sönümleme yoğunluğunda yükseliş, pH 7'den 11'e kadar çıkarıldığında ise büyük oranda düşüş gözlemlenmiştir. Protonlanmış N-CQD'ler ile cıva iyonları, asidik ortamlarda N-CQDs- Hg^{+2} bileşiminin oluşumunu engelleyerek floresans mekanizmasının sönümlenmesine neden olmuştur. Ayrıca yüksek asidik koşullarda cıva iyonlarında meydana gelen hidroliz ile birlikte sönümleme mekanizmasında düşüşe sebebiyet verdiği açıklanmıştır (Huang *et al.* 2021).

Çinko (Zn^{+2}) İyonlarının Algılanması

Çinko (Zn^{+2}) iyonları, insan vücudu için oldukça önemli elementlerden bir tanesidir ve birçok biyolojik süreçte önemli rol oynamaktadır. Çinko, birçok enzimin yapısal ve katalitik aktivitelerinde kritik bir rol oynamaktadır. Örneğin, DNA sentezi ve onarımında görev alan enzimler çinko iyonlarını kofaktör olarak kullanmaktadır. Ek olarak, bu iyonlar çeşitli enzimatik reaksiyonların katalizörü olarak görev yapmakta ve bağışıklık sistemindeki fonksiyonları, protein metabolizması, hücre bölünmesi gibi çok sayıda biyokimyasal süreçte aktif olarak rol oynamaktadır. Bütün bu özelliklerinin yanı sıra bağışıklık sistemi, DNA ve

protein sentezi, büyüme ve gelişme açısından oldukça önemlidir. Tüm bu avantajlarının yanı sıra, aşırı çinko alımı veya uzun süreli yüksek dozda çinko maruziyeti toksisite, bağışıklık sistemi bozuklukları gibi durumlara sebebiyet vermektedir (Alengebawy *et al.* 2021).

Yang ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, çinko glukonattan piroliz yöntemi ile Zn^{+2} pasifleştirilmiş CQD'ler sentezlenmiştir ve CQD'lerin yüzeylerini Zn^{+2} ile pasifleştirebilmek için yeni bir yöntem sunulmuştur. Yapılan karakterizasyonlardan sonra etilendiamintetraasetik asit (EDTA) iyonlarının kademeli bir şekilde eklenmesiyle çinko iyonlarının giderildiği gösterilmiştir ve floresansta sönümlene gözlenmiştir. Zn^{+2} iyonlarının ortama tekrar eklenmesiyle, Zn-CQD'lerin pasivasyonu tekrardan elde edilmiştir. Bu durumda, Zn-CQD'lerin, EDTA ve Zn^{+2} iyonlarının algılanması için verimli bir sensör olabileceğini göstermişlerdir (Yang *et al.* 2018).

Alüminyum (Al^{+3}) İyonlarının Algılanması

Alüminyum, yer kabuğunda en zengin üçüncü ve en çok bulunan metal elementlerinden bir tanesidir. Kimya endüstrisinde, pişirme kaplarında, tıbbi cihaz ve gıda katkı maddelerinde, klinik ilaçlarda oldukça sık olarak kullanılmaktadır. Ancak, yüksek düzeyde Al^{+3} alımı bazı nörolojik hastalıklar (Alzheimer, Parkinson hastalığı gibi), amiotrofik lateral skleroz, demans ve merkezi sinir sisteminde hasara yol açtığı bilinmektedir. Bütün bu yönleriyle ele alındıklarında, biyolojik ve çevresel sistemlerde Al^{+3} iyonlarının tespiti önem taşımaktadır.

Al^{+3} tespiti için yapılan bir çalışmada, bir bitki özütü kullanılarak hidrotermal yöntemle N-CQD'ler üretilmiştir. Elde edilen, N-CQD'lerin, kuersetin ve Al^{+3} iyonlarını bağlamaya yönelik afinitesi gözlemlenmiştir. Kuersetin (QT), N-CQDs solüsyonuna eklendiğinde floresans aktivitesinde sönümlene gözlemlenmiştir. Al^{+3} iyonlarının eklenmesi, N-CQDs/QT sisteminin floresan geri kazanımına neden olurken, N-CQDs solüsyonuna alüminyum iyonlarının eklenmesi floresan yoğunluğunda herhangi bir değişikliğe yol açmadığı gözlemlenmiştir. Bu ikili algılama sistemi ile klinik teşhis ve diğer biyomedikal alanlarda, elde edilen CQD'lerin uygun bir araç olabileceği öne sürülmüştür (C. Yu *et al.* 2021).

Ferrik (Fe^{+3}) İyonların Algılanması

Metal iyonlarının algılanmasında sıklıkla çalışan bir diğer metal ise demirdir. Demir yerkabuğunda en çok bulunan metaldir ve çeşitli hücre fonksiyonlarında görev alır. Bu durum onu canlı hücrelerin doğru bir şekilde çalışması için önemli kılar. Özellikle ferrik iyonların enzim ve proteinlerde yaygın olarak kullanıldığı bilinmektedir. Ferrik iyonların çevrede ve biyolojik sistemlerde varlığı önemlidir fakat bu iyonlara aşırı dozda veya uzun süreli maruz kalma sonucunda karaciğer hastalığı, nörodejeneratif bozukluklar, böbrek yetmezliği gibi

birçok hastalığa sebebiyet vermektedirler. Bu sebeple, Fe^{+3} tespiti için CQD tabanlı sensörlerin geliştirilmesi oldukça önemlidir.

Yapılan bir çalışmada, floresans N-katkılı karbon kuantum noktaları kullanılarak, sudaki Fe^{+3} iyonlarının tespiti için kullanılabileceğinden bahsedilmiştir. Bu çalışmada başlatıcı madde olarak, kiraz meyvesinin özütü ve sulu amonyak kullanılmıştır. Basit ve verimli bir hidrotermal karbonizasyonu yoluyla azot-katkılı CQD'ler elde edilmiştir. Elde edilen kuantum noktalarının karakterizasyon sonrası meme kanseri hücrelerinde görüntüleme için bir boyama probu olarak ayrıca sudaki ferrik iyonlarının algılanmasına yönelik floresan prob olarak kullanılabileceği ortaya çıkarılmıştır. (Edison *et al.* 2016).

Diğer bir çalışmada ise, karbon kaynağı olarak sitrik asit ve azot katkılarını için fenilalanin kullanılarak, floresans karbon kuantum noktaları sentezlemek için hidrotermal yöntem kullanılmıştır. Karakterizasyon ardından elde edilen nanoparçacıkların suda oldukça kararlı olması floresans prob olarak kullanımına olanak sağlamıştır. Ek olarak, farklı pH değerlerinde test edilen kuantum noktalarının floresan yoğunluğu üzerindeki çok az etkiye sahip olması ve floresan yoğunluğunu koruması musluk suyu numunelerinde demir iyonlarının tespiti için kullanılabileceğini ispatlamışlardır (Pu *et al.* 2020).

Liu ve arkadaşları tarafından yapılan başka bir çalışmada ise, öncü madde olarak anaerobik, gram pozitif bir bakteri olan *Fusobacterium nucleatum*'dan hidrotermal sentez yöntemi ile nitrojen katkılı CQD'ler elde edilmiştir. Yapılan çalışmalarda elde edilen nanoparçacıkların Fe^{+3} iyonlarına karşı seçicilik gösterdiği tespit edilmiştir. Sönümlenme mekanizmasının temel nedeninin iyon değişimi veya enerji transferinden kaynaklandığı vurgulanmıştır. Ek olarak, Fe^{+3} 'ün hücre içi biyosensör olarak uygulanabilirliği için Fe^{+3} ve CQD arasındaki etkileşim araştırılmıştır. Canlı hücrelerde floresans mekanizmasının Fe^{+3} varlığıyla sönümlenebildiğini öne sürmüşlerdir. Bu durum, elde edilen CQD'lerin *in vivo* ve *in vitro* görüntüleme ve biyoalgılama çalışmaları için potansiyellerini ortaya çıkarmaktadır (L. Liu *et al.* 2021).

Özetle, literatüre bakıldığında ferrik iyonlar, karbon kuantum noktaları kullanılarak, floresans nanoprobolar olarak en çok tespit edilen metal iyonlarından bir tanesi olmuştur. Bunun nedenine bakıldığında ise, elde edilen karbon kuantum noktalarının yüzeyindeki karboksil, amino veya hidroksil gibi grupların Fe^{+3} iyonlarıyla kolayca etkileşime girebilmesinden kaynaklandığı görülmektedir. Ayrıca, karbon kuantum noktalarının sentezlenmesinde seçilen öncül maddelerin veya katkılanan maddelerin, farklı pH şartlarında kimyasal kararlılığını koruması ve Fe^{+3} tespiti gibi farklı metal iyonlarının algılanmasında seçicilik ve duyarlılık açısından oldukça önemlidir.

MATERYAL VE METOT

Tablo 1. Tez Çalışmasında Elde Edilen Nanoparçacıkların Karakterizasyonu İçin Kullanılan Cihazlar

Kullanılan Cihazlar	Marka
Floresans Spektrofotometre	Agilent Cary Eclipse
UV-vis Spektrofotometre	Shimadzu UV-3600 Plus
Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM)	Hitachi HighTech HT7700
Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR)	Bruker VERTEX 70v
X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS)	Specs-Flex
X-Işını Difraktometresi (XRD)	Panalytical Empyrean
pH Metre	Mettler Toledo
Etüv Fırını	Memmert UN55
Soğutmalı Santrifüj	Hettich
Vorteks Cihazı	Heidolph
Hassas Terazi	Shimadzu
Manyetik Karıştırıcı	Serlab
İnkübatör	Nuaire NU4750
Laminar Kabin	Nuaire 425-500E
Su Banyosu	Isolab
Otoklav	Hirayama
Santrifüj	Hettich Rotofix 32A
Buzdolabı	Arçelik
Derin Dondurucu (-20°C)	Uğur
Ultra Derin Dondurucu (-80°C)	Nuaire
Floresan Mikroskop	Zeiss Scope A1
İnvert Mikroskop	Zeiss Primovert

Tablo 2. Tez Çalışmalarında Kullanılan Kimyasal Malzemeler

Kullanılan Kimyasallar	Marka
Laktik Asit (C ₃ H ₆ O ₃)	Fluka
Üre (CH ₄ N ₂ O)	Isolab
Etanol (C ₂ H ₆ O)	Isolab
Stronsiyum Klorür (SrCl ₂)	Sigma Aldrich
Alüminyum Sülfat (Al ₂ (SO ₄) ₃)	Sigma Aldrich
Kadmiyum Klorür (CdCl ₂)	Sigma Aldrich
Antimon Triklörür (SbCl ₃)	Sigma Aldrich
Gümüş Nitrat (AgNO ₃)	Sigma Aldrich
Kadmiyum Sülfat (CdSO ₄)	Sigma Aldrich
Baryum Klorür (BaCl ₂)	Sigma Aldrich
Manganez Sülfat (MnSO ₄)	Sigma Aldrich
Demir (III) Klorür (FeCl ₃)	Sigma Aldrich
Bakır Sülfat (CuSO ₄)	Sigma Aldrich
Hidroksimetil Aminometan (Tris) (C ₄ H ₁₀ O ₃)	Sigma Aldrich
Dimetil Sülfoksit (DMSO) (C ₂ H ₆ OS)	Sigma Aldrich
Hidrojen Peroksit (H ₂ O ₂)	Sigma Aldrich
Besiyeri (DMEM/RPMI)	EcoTech
3-4,5-dimetil-tiyazolil-2,5-difeniltetrazolyum bromür (MTT)	Sigma Aldrich
Penisilin/Streptomisin	Sigma Aldrich
Fetal Sığır Serum (FBS)	Sigma Aldrich
Fosfat Tampon Salin (PBS)	Sigma Aldrich
Tripsin	Multicell
Agar	Himedia

Tablo 3. Tez Çalışmalarında Kullanılan Sarf Malzemeler

Kullanılan Malzemeler	Marka
Floresan-UV kuvars küvet	Chromxpert
Falkon tüpü (15 ml-50 ml)	Isolab
Ependorf tüp (2 ml)	Microcult
Otomatik Pipet	Eppendorf
Pipet Ucu	Labsolute
Beher/Erlen	Isolab
Steril petri	Fıratmed
96'lık well plate	Nest
Flask (T-25)	Arılab
Kriyovial tüp	Isolab

dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), bağ yapısı hakkında daha fazla bilgi edimek amacıyla X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalara ek olarak, gündüz ve karanlık koşullarda depolanan CQD'ler için stabilite testi yapılmıştır. PL spektrumları kullanılarak CQD'lerin stabilitesi farklı pH değerlerinde test edilmiştir. Ayrıca, üretilen CQD sistemlerinin floresan aktivitesini belirlemek için kuantum verimi hesaplanmıştır.

CQD'lerin Sitotoksik Etkilerinin Belirlenmesi

Hücre hatlarının stoktan çıkarılması ve büyütülmesi

Sentezlenen CQD'lerin sitotoksik etkileri sağlıklı akciğer fibroblastı (MRC5) ve akciğer kanseri (A549) hücrelerinde araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan hücre hatları DAYTAM'da mevcut olan hücre bankasından temin edilmiştir.

Hücre hatlarının büyütülmesi ve çoğaltılması amacıyla kriyovialler -80 °C'den alınarak el sıcaklığı veya sıcak su banyosu kullanılarak tamamen çözündürülmeden eritilmiştir. Hücre süspansiyonu, hücrenin büyümesi için gerekli şartları sağlayan besiyeri içerisine alınarak falkon tüpe aktarıldıktan sonra ortamdaki DMSO'yu uzaklaştırmak amacı ile 1500 rpm'de 5 dak santrifüj edilmiştir. Üst kısım aspire edildikten sonra pellete 1 ml besiyeri eklenmiştir. Hücreler iyice çözüldükten sonra, içerisinde 4 ml besiyeri bulunan 25 cm²'lik flaska alınarak, büyümesi için 37°C'de %5 CO₂ içeren inkübatöre kaldırılmıştır.

Hemositometre ile hücre sayımı

Hücreler konfluent duruma geldiklerinde ortamdaki besiyeri uzaklaştırılmıştır. Hücrelerin serumdan arındırılabilmesi için 1X PBS ile hafifçe yıkanmış ve PBS aspire edilmiştir. Hücreler inkübatörde yaklaşık 5 dak boyunca tripsinle (25 cm²'lik flask için 0.5 ml tripsin) muamele edilmiştir. Besiyeri içerisindeki serum tripsini inaktif hale getirdiğinden, tripsin hacminin en az 3 katı besiyeri ilave edilmiştir. Tripsinizasyon işleminden sonra, elde edilen hücre süspansiyonundan 10 µL alınır ve thoma lamının ilgili kısmına damlatılmıştır. Lamel hava kabarcığı kalmayacak şekilde kapatılmıştır. Hemositometre inverted mikroskoba konulmuş ve 10x objektifte 4x4'lük alana odaklanılmıştır. Hücre sayısı X sulandırma katsayısı X10.000 formülü ile ml başına düşen hücre sayısı hesaplanmıştır.

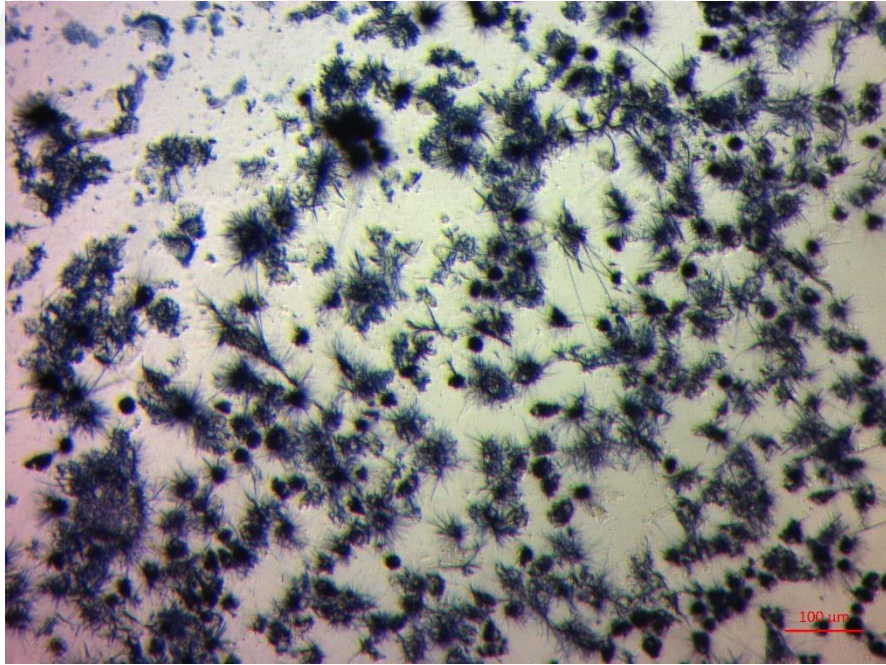
96 kuyucuklu plakalara hücre ekimi

Hücreler çoğaltılıp thoma lamı ile sayım yapıldıktan sonra 10⁴ hücre/ml olacak şekilde hazırlanmıştır. Hazırlanan hücre süspansiyonu her bir kuyucuğa 5x10⁴ hücre/kuyucuk olacak şekilde ekilmiştir. Hücrelerin yüzeye tutunması için 24 saat boyunca inkübasyona bırakılır. 24

saat sonunda ortamdan besiyerleri çekilmiştir. Hücreler, 30-1000 ppm konsantrasyon aralığında hazırlanan CQD'lere maruz bırakılmıştır. Yalnızca besiyeri ihtiva eden ortam negatif kontrol olarak kullanılmıştır. 250 µM hidrojen peroksit (H₂O₂) ile muamele edilen hücreler pozitif kontrol olarak kabul edilmiştir. Hücre-CQD süspansiyonu 24 saat boyunca 37°C, %5 CO₂ içeren etüvde inkübasyona bırakılmıştır.

MTT testi

24 saat inkübasyondan sonra, CQD'lerin MTT ile interferansını önlemek amacıyla her bir kuyucuk, besiyeri uzaklaştırıldıktan sonra PBS ile yıkanmıştır. Sitotoksik etkinin hücrelerin mitokondriyal aktiviteleri açısından değerlendirilmesi için 3-(4,5-Dimetiltiyazol-2-il)-2,5-Difeniltetrazolyum bromür (MTT) yöntemi kullanılmıştır. Bunun için her kuyucuğa 5 mg/ml MTT solüsyonu içeren 100µL besiyeri eklendi ve 37°C'de 4 saat inkübasyona bırakılmıştır. Süre sonunda MTT solüsyonu ortamdan uzaklaştırılır ve formazan kristallerini çözmek için kuyucuklara 100 µL DMSO eklenmiştir. Şekil 12'de, A549 hücrelerine uygulanan MTT solüsyonu DMSO ile çözdürüldükten sonra oluşan formazan kristallerinin görüntüsü verilmiştir. Hücrelerin optik yoğunlukları 570 nm'de bir mikropilaka okuyucu aracılığıyla spektrofotometrik olarak ölçülmüştür.



Şekil 9. MTT ile muamele edilmiş akciğer kanseri (A549) hücrelerinde formazan kristallerinin görünümü

CQD'lerin Antibakteriyel Aktivitesi

CQD'lerin gram-negatif (*Escherichia coli*) bakteri suşlarına karşı aktivitesi farklı konsantrasyonlarda, karanlık ve gün ışığı altında test edilmiştir. Bunun için, öncelikle steril

petri kaplarına LB Agar dökülmüş ve oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Bakteri suşları, -80 °C'den çıkarılmış ve hafifçe çözdürüldükten sonra 50 µL alınıp katı besiyerine ekim yapılmıştır. Petriler, 37°C'de 24 saat boyunca inkübatöre bırakılmıştır. Süre sonunda koloni oluşumu gözlemlenmiş ve bakteriler öze yardımı ile katı besiyerinden sıvı besiyerine alınmıştır. Ardından 37°C'de 100 rpm'de 24 saat boyunca çalkalayıcı içerisinde bırakılmıştır. Antibakteriyel aktivite testi için her kuyucuğa 125 µL besiyeri 75 µL bakteri eklenmiştir. Kuyucuklara farklı dozlarda (7-1000 ppm) CQD ilave edilmiştir. 96 kuyucuklu plakalar gün ışığı ve karanlık ortam olmak üzere 2 farklı ortamda 37 °C'de 36 saat boyunca bekletilmiştir. Son olarak, 600 nm'de mikroparka okuyucu kullanılarak antibakteriyel aktivitesi tespit edilmiştir.

CQD'lerin Metal İyon Seçiciliği

Metal iyon algılama

Floresans spektrumundaki değişimler gözlemlenerek metal iyonlarının herhangi bir seçici tespiti olup olmadığını belirlemek amacıyla çeşitli metal tuzları ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, MnSO_4 , CdSO_4 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, SrCl_2 , SbCl_3 , CdCl_2 , AgNO_3 , BaCl_2) kullanılmıştır. Herbir metal çözeltisinin stoğu, uygun miktarda metal tuzunun 10 mg/ml'lik bir metal iyonu konsantrasyonuna sahip PBS tamponunda (pH=9.4) çözdürülmüştür. CQD solüsyonu, uygun miktarda metal iyonu çözeltisi ile karıştırılmıştır. 30 dak boyunca karanlık bir ortamda inkübe edilmiş ve süre sonunda UV-vis ve floresans spektrumları alınmıştır.

Kanda Fe^{+3} tespiti

Sağlıklı bir erkek bireyden alınan kan 4000 rpm'de 10 dak santrifüj edilmiş, plazma ve serum kısımları birbirinden ayrıştırılmıştır. Daha sonra, 1 mL plazma üzerine 2 mL CQD solüsyonu eklenmiştir. Farklı doz aralığında hazırlanan Fe^{+3} çözeltileri, plazma-CQD karışımına eklenmiştir. Ardından 30 dak boyunca inkübasyona bırakılmıştır. Optik özelliklerindeki değişim UV-vis ve floresans spektrofotometre ile değerlendirilmiştir.

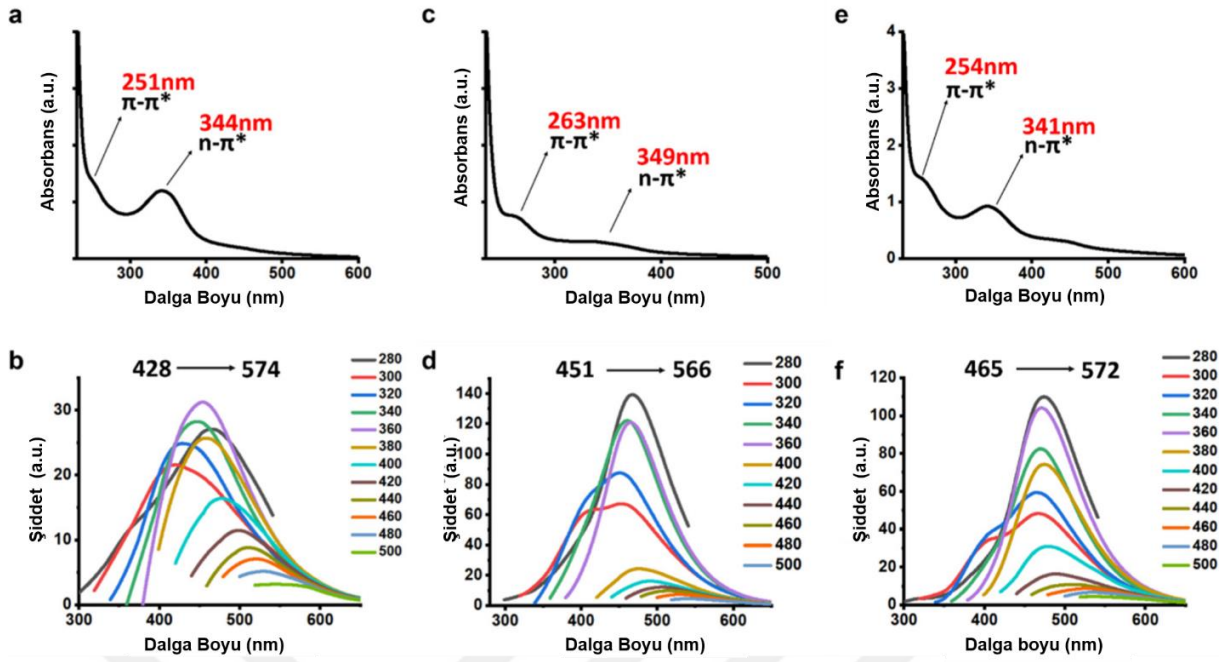
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Optimum Sentez Koşullarının Belirlenmesi ve Karakterizasyonu

Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) laboratuvarında sentezlenen CQD'lerin optimum şartı sağlayan koşulları belirlemek için bazı deneysel parametreler denenmiştir. Başlatıcı maddelerin sentez süresi, sıcaklığı ve maddelerin birbirlerine kütle oranları ayrıntılı olarak incelenmiştir. Sentezlenen CQD'leri değerlendirmek için PL spektroskopisi ve UV-vis absorpsiyon spektroskopisi kullanılmıştır. İlk olarak, sabit bir sıcaklık (180°C) ve oranda (1:1 M:M) farklı zaman aralığında (3-24 saat) sentez süresi manipüle edilmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak oluşturulan absorpsiyon grafiği ve emisyon özellikleri Şekil 10'te sunulmuştur. UV-vis spektrometresinde 251-263 nm arasında değişen bir tepe noktası gözlemlenmiştir (Şekil 13 a, c, e). Bu tepe noktası karbon kuantum noktalarının aromatik C-C bağının varlığından kaynaklanmaktadır (Y. Jiang *et al.* 2015; P. Wu *et al.* 2017). Sentez süresi arttıkça, $\pi-\pi^*$ bandı daha belirgin hale gelmiştir. Bu durum, öncü maddelerin daha düşük bir sentez süresinde düşük karbonizasyonuna bağlanmıştır. Ek olarak, yaklaşık 340 nm'de geniş bir tepe noktası, N-ilişkili fonksiyonel yüzey gruplarının yanı sıra C=O bağlarının $n-\pi^*$ bağlarının varlığını göstermiştir (R. Liu *et al.* 2013; Zhuo *et al.* 2015).

Karbon kuantum nokta süspansiyonunun fotoluminesans spektrumları 280-500 nm'lik geniş bir aralıkta ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir (Şekil 13b, d, f). Tüm floresans spektrumları için, CQD'lerdeki işlevsel yüzey grupları, farklı enerji seviyelerine sahip ayırt edici özellikler sergilemiş ve CQD'lerin uyarılmaya bağlı doğasına yol açmıştır. Uyarma dalga boylarındaki artış floresans maksimumunda 428 nm'den 574 nm'ye kaymaya neden olmuştur.

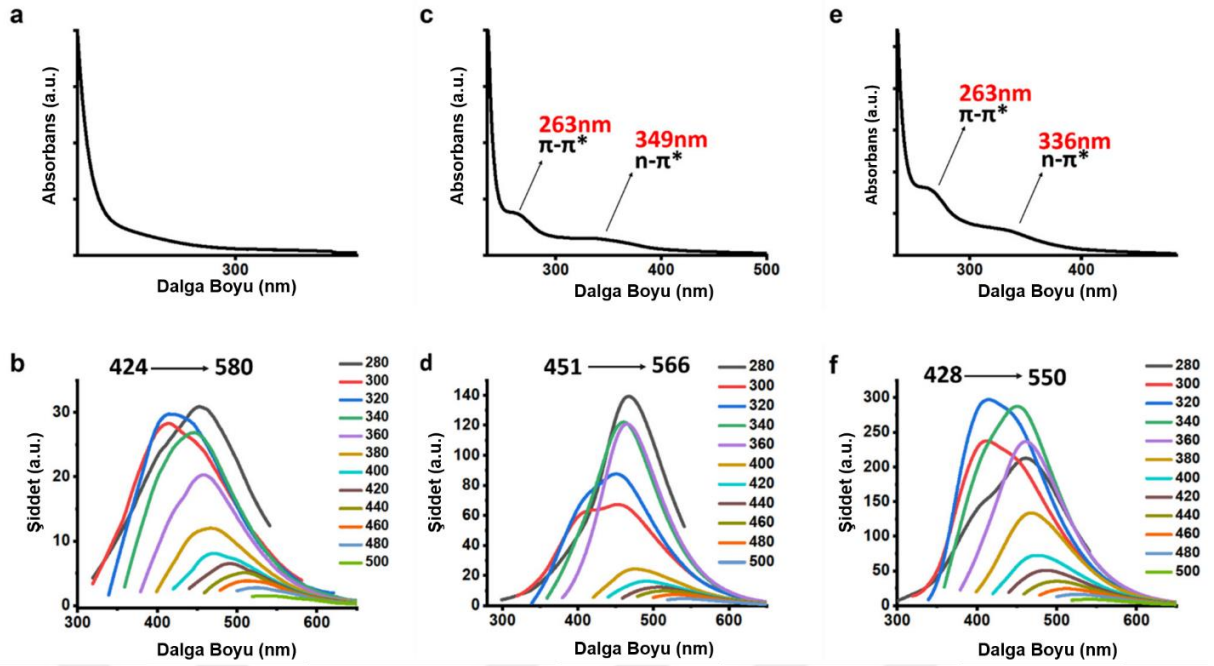
3 saatlik bir sentez süresi (Şekil 13b), 12 ve 24 saatlik sentez süreleriyle karşılaştırıldığında belirgin şekilde daha düşük bir floresans aktivitesi göstermiştir (Şekil 13 d,f). UV-vis ve PL verileri doğrultusunda, daha düşük sentez süresinin önemli miktarda karbonizasyon ve floresans aktivitesi sağlamadığı tespit edilmiştir. Ancak, sentez süresindeki artış floresans emisyonunda önemli ölçüde artış sağlamıştır. 12 ve 24 saatlik çalışma durumları için kayda değer bir fark gözlemlenmemiştir.



Şekil 10. Farklı sentez sürelerinde hazırlanan CQD'lerin farklı uyarma dalga boylarında toplanan UV-vis ve floresans spektrumları : 3 saat (a,b) 12 saat (c,d) ve 24 saat (e,f) (Aydin *et al.* 2022)

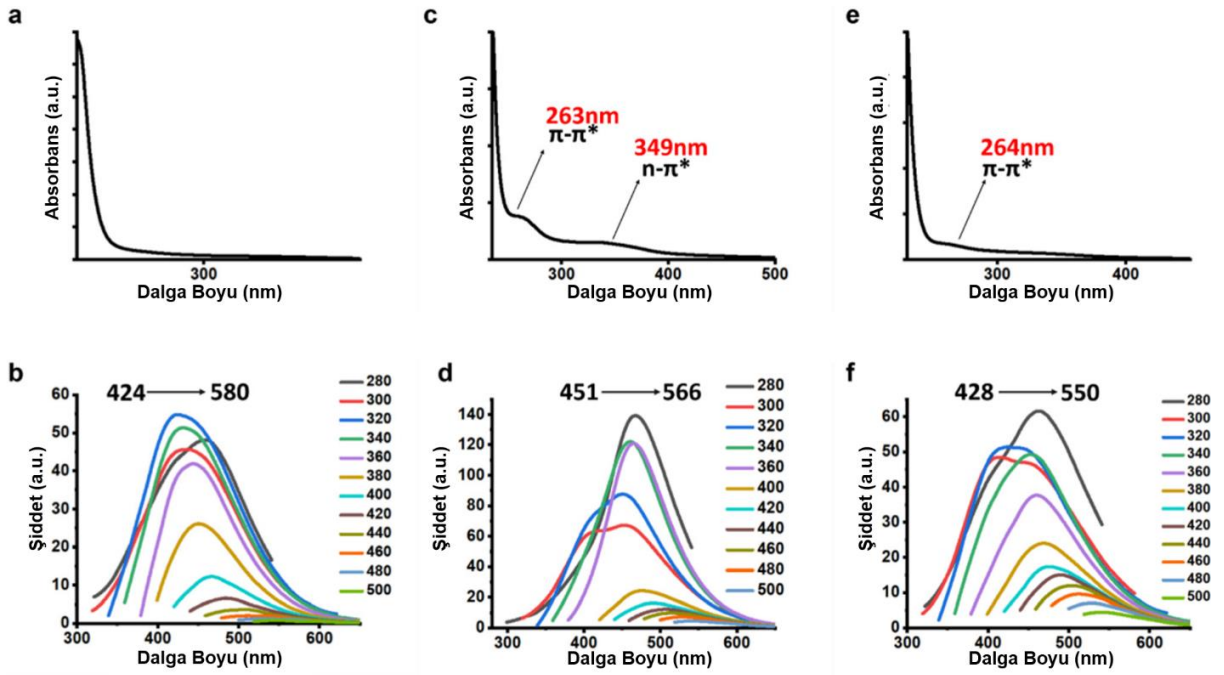
İkinci olarak, sentez süresi (12 saat) ve başlatıcı maddelerin oranı (1:1 M:M) sabit tutulup sıcaklık değeri 140°C-220°C arasında değiştirilmiştir. Bir önceki bölümde olduğu gibi UV-vis ve PL spektrumları toplanmıştır ve Şekil 14'de sunulmuştur. Daha düşük bir sıcaklıkta (140 °C) sentezlenen CQD'ler için hiçbir absorpsiyon piki tespit edilmemiştir (Şekil 14a). Düşük sentez sıcaklığının yol açtığı bu durum sonucu yetersiz karbonizasyon ve bunun bir sonucu olarak da zayıf floresans aktivitesi tespit edilmiştir (Şekil 14b) (Q. Wu *et al.* 2015).

180 °C ve 220 °C durumları için (Şekil 14c, e), $\pi-\pi^*$ geçiş bandı (aromatik C-C bağları), $n-\pi^*$ geçiş bantları (C=O bağları) ve N-ilişkili fonksiyonel yüzey veya diğer yüzey grupları sırasıyla 260 nm ve 340 nm'de gözlemlenmiştir. Farklı uyarma dalga boylarında uyarılan CQD'ler 413-576 nm arasında floresans maksimumu göstermişlerdir ve tüm sentez sıcaklıkları (Şekil 14b, d, f) için uyarılma bağımlı yapı sergilemiştir. Sentez sıcaklığındaki artış (Şekil 14d, f) floresans emisyon aktivitesini önemli ölçüde arttırmıştır. Sentez sıcaklığındaki artışın başlatıcı maddelerin yeterli karbonizasyonunu ve yüksek floresans aktivite meydana getirdiği belirlenmiştir. 220°C sıcaklık durumunda gözlemlenen yüksek floresans (Şekil 14f) daha fazla karbonizasyon oluşumuna bağlanmıştır.



Şekil 11. Farklı sentez sıcaklıklarında hazırlanan CQD'lerin farklı uyarma dalga boylarında alınan UV-vis ve floresans spektrumları : 140 °C (a,b) , 180 °C (c,d) , 220 °C (e,f) (Aydın *et al.* 2022)

Farklı süre ve sıcaklık parametreleri denendikten sonra, UV-vis ve PL spektrumları kullanarak başlatıcı maddelerin farklı oranlar altında hazırlanmasıyla elde edilen CQD'lerin optik özellikleri değerlendirilmiştir. Öncüllerin 1:1 M:M oranında olması durumunda absorpsiyon maksimum değeri saptanmamıştır (Şekil 15a). Bu bağlamda öncülerin düşük içeriğine atfedilen nispeten düşük fotoluminesans aktivitesi (Şekil 15b) gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, üre veya laktik asit içeriğindeki artış (Şekil 15c, e) ile yaklaşık 260 nm ve 350 nm civarında gözlemlenen $\pi-\pi^*$ (aromatik C-C bağları) ve $n-\pi^*$ (C=O bağları) geçiş bantlarının ve N ile ilişkili fonksiyonel yüzey veya diğer yüzey gruplarının oluşumuna yol açmıştır. Herbir sentez için, CQD'lerin PL spektrumları farklı uyarma dalga boylarında 424-580 nm aralığında değişen floresans maksimumuna sahip uyarılmaya bağlı yapı sergilemiştir (Şekil 15b, d, f). En yüksek floresans aktivitesi (Şekil 15d) 1:3 M:M şeklinde hazırlanan daha yüksek laktik asit içeriğine sahip sentezde gözlemlenmiştir. Yüksek oranda laktik asit içeriği, daha fazla $\pi-\pi^*$ ve $n-\pi^*$ geçiş bantlarının ortaya çıkmasına ve sonucunda yüksek floresans verimi elde edilmesine yol açmıştır (Mehta *et al.* 2019).



Şekil 12. Farklı öncü oranlarında hazırlanan CQD'lerin farklı uyarma dalga boylarında toplanan UV-Vis ve floresans spektrumları: 1:1 M:M (a,b), 1:3 M:M (c,d), 3:1 M:M (e,f) (Aydin *et al.* 2022)

Optimum sentez koşulları (12 saat, 220°C, 1:3 M:M) belirlendikten sonra, sentezlenen CQD'lerin daha ayrıntılı karakterizasyonu yapılmıştır ve Şekil 16'da sunulmuştur. Toplanan optik görüntülerden CQD'lerin gün ışığı altında soluk kahverengi bir renge sahip olduğu görülürken, UV lamba (365 nm) altında parlak mavi bir emisyon sergilemiştir (Şekil 16a). Normalleştirilmiş floresans emisyon spektrumları, 280-500 nm aralığında uyarma dalga boylarındaki artışın floresans maksimumunda 411 nm'den 542 nm'ye kadar bariz bir kırmızıya kaymaya (red-shift) yol açtığını göstermiştir (Şekil 16b).

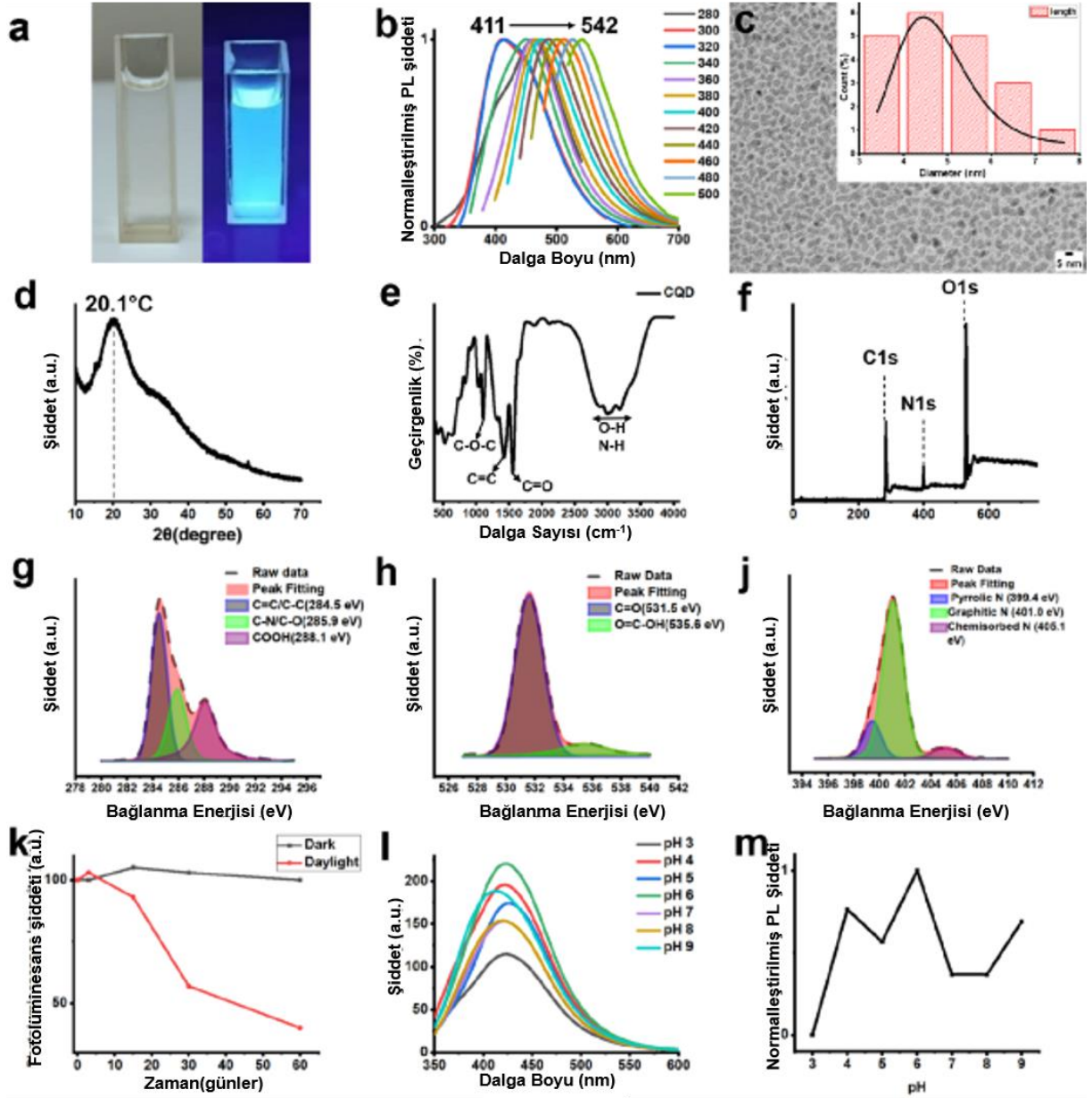
TEM görüntüleri aracılığıyla CQD'lerin morfolojisi ve boyut incelemesi yapılmıştır ve ortalama çapı 5.6 ± 4 nm olan, çoğunlukla küresel formda nanoparçacıkların varlığı tespit edilmiştir (Şekil 16c). CQD'lerin XRD modeli (Şekil 16d) 002 düzlemine karşılık gelen 20.1° 'de geniş bir tepe noktası sergilemiştir. Bu yapı düzgün sınırlara sahip olmayan karbonun oldukça rastgele bir şekilde oluştuğunu kanıtlamıştır (Asghar *et al.* 2017; Shaikh *et al.* 2019). CQD'lerin kimyasal bileşiminin ve moleküler yapısının daha fazla analizi için FTIR spektroskopisi kullanılmıştır (Şekil 16e). 3186, 3047, 1562, 1425, 1314, 1110 ve 1035 cm^{-1} 'gözlemlenen bantlar, (-OH), (-NH), (C=C), (C-H), (C=O), (CN) ve (C-O-C) olarak atfedilmiştir. (-OH), (-NH) ve (C=O) gibi bazı hidrofilik gruplar CQD'lerin sudaki yüksek stabilitesini doğrulamıştır (Ding *et al.* 2017; Pan *et al.* 2016). Bunlara ek olarak, (C=C) (C-H)

ve (C-N) grupları CQD'lerin poliaromatik yapısını kanıtlamıştır (Chen *et al.* 2017; J. Zhou *et al.* 2013).

Bağ yapıları ve yüzey kompozisyon noktaları, ayrıntılı bir XPS analizi ile saptanmıştır (Şekil 16f,h,j). Tam XPS tarama spektrumları sırasıyla C1s, N1s ve O1s'lere atfedilen yaklaşık 285, 401 ve 531 eV'de üç ana tepe noktası belirlenmiştir (Şekil 16f). C,N ve O için CQD'lerin temel içeriği 56,7/7,8/35,5 olarak tespit edilmiştir. C1s grupları için yüksek çözünürlüklü XPS spektrumları sırasıyla 284,5, 285,9 ve 288,1 eV'de C-C/C=C, C-N/C-O ve C=O bağlarına karşılık gelen üç tepe noktası sergilemiştir (Şekil 16g). Sırasıyla C=O ve C-OH gruplarının varlığını gösteren 531,5 ve 535,6 eV'de O1s'in yüksek çözünürlüklü spektrumları gözlemlenmiştir. N1s spektrumları (Şekil 16j) sırasıyla pirolük N, grafit N ve kimyasal olarak absorbe edilmiş N'ye atanan 399,4 , 401,0 ve 405,1 eV'de üç tepe noktası sergilemiştir (Guo *et al.* 2019).

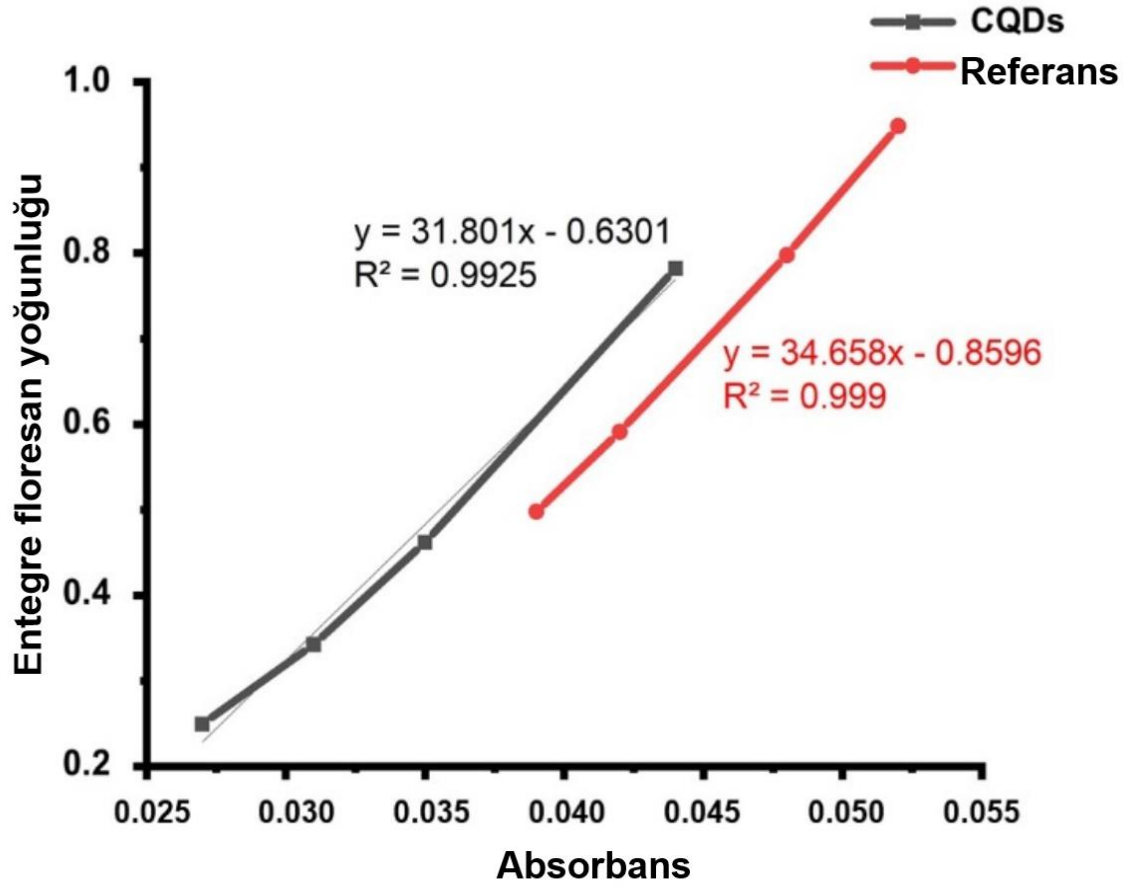
Bu bağlamda, üre ve laktik asit kullanılarak hidrotermal yöntemle yüksek derecede kusur ve bozukluklara sahip grafit çekirdekli CQD'lerin yeterince hazırlandığı ve yapıya nitrojenin başarıyla katkılандığı ispatlanmıştır. CQD'lerin farklı saklanma koşullarında uzun süre kararlı olmaları pratik uygulamalarda kullanımını kolaylaştırmaktadır. Bunun için gün ışığı ve karanlık şartlarda depolanan CQD'ler için stabilite testi gerçekleştirilmiştir. PL ve UV-Vis absorpsiyon spektrumları farklı zaman aralıklarında toplanmıştır ve zaman içinde floresans yoğunluğundaki değişim Şekil 16k'de özetlenmiştir. Gün ışığı altında depolanan CQD'lerin 15.günün sonunda floresans aktivitesi önemli ölçüde azalmıştır. Ancak, karanlık ortamda saklanan CQD'ler 60.günün sonunda floresans aktivitesini koruduğu gözlemlenmiştir. Aktiviteye ek olarak, karbon noktalarının uyarılmaya bağlı doğasında herhangi bir değişiklik kaydedilmemiştir.

Metal iyon tespiti dahil birçok çalışmada, CQD'lerin geniş bir pH değeri aralığında kararlılığı önem arz etmektedir. Bu nedenle, CQD'lerin fotoluminesans spektrumları kullanılarak stabilitesi farklı pH aralığında test edilmiştir (Şekil 16m). Sadece pH 3 değeri için PL aktivitesinde gözle görülür bir düşüş gözlemlenmiştir. 4 ile 9 aralığındaki farklı pH değerleri için sonuç oldukça kabul edilebilirdir ve bu sonuç malzemenin belirli koşullar altında uygun şekilde kullanıldığını ispatlamıştır.



Şekil 13. CQD'lerin çeşitli yöntemlerle daha fazla karakterizasyonu. Gün ışığı ve UV lamba (365nm) altında CQD süspansiyonunun optik görüntüleri (a), farklı uyarma dalga boyları altında optimum sentez koşullarında normalleştirilmiş floresans spektrumları (b), TEM görüntüsü ve partikül boyut dağılımı (c), XRD spektrumu (d), FTIR spektrumu (e), XPS tarama spektrumu ve element oranı (f), yüksek çözünürlüklü C1s spektrumları (g), O1s spektrumu (h) ve N1s spektrumu (j), gün ışığı ve karanlık koşullarda depolanan CQD'lerin floresans yoğunluğundaki değişimi (k), farklı pH değerlerinde floresan spektrumları (l) ve normalize edilmiş PL yoğunluğu (m) (Aydin *et al.* 2022)

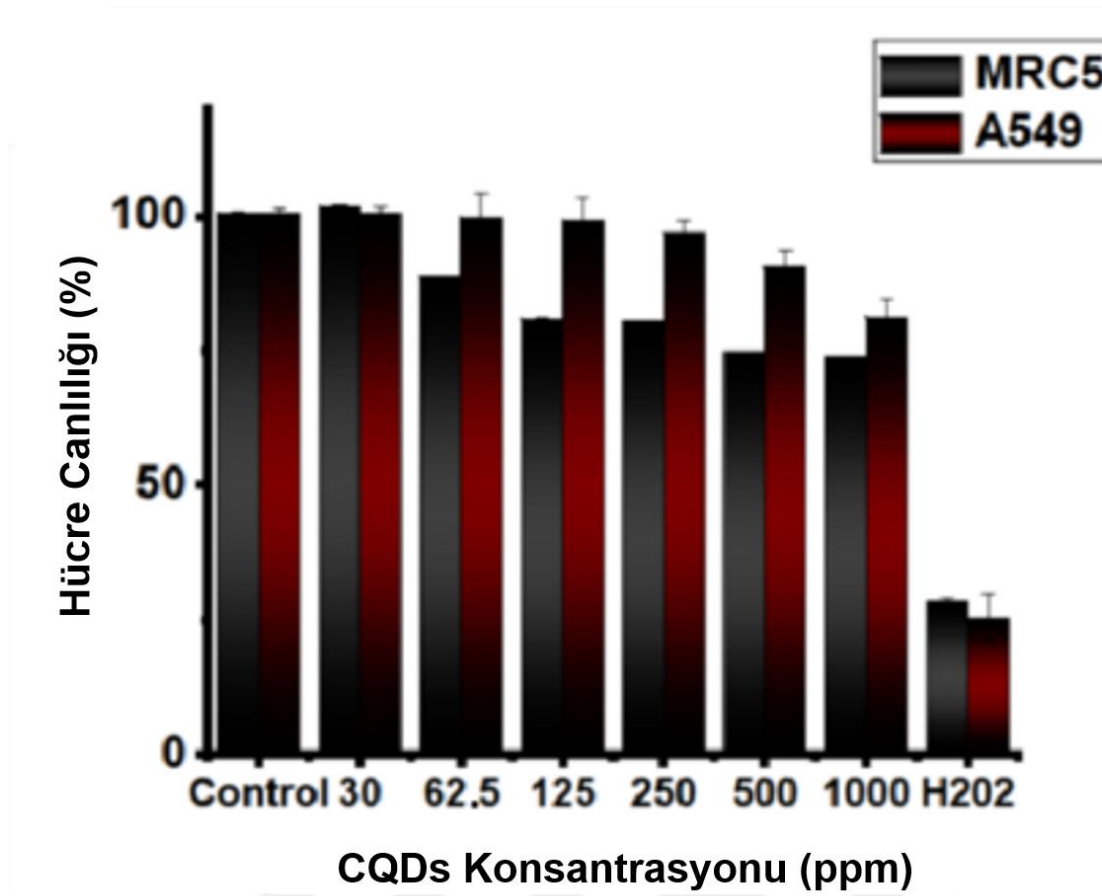
Tüm çalışmalara ek olarak CQD'lerin floresans aktivitesini belirlemek amacıyla kuantum verimi hesaplanmıştır. CQD'lerin güçlü emisyon özellikleri, referans malzeme olarak kinin sülfat kullanılarak, Şekil 17'de özetlenen veriler aracılığıyla 360 nm uyarma dalga boyunda elde edilen %48'lik yüksek bir kuantum verimi sağlamıştır. Elde edilen kuantum verim değerinin literatürdeki diğer çalışmalarla oldukça kıyaslanabilir nitelikte olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 14. CQD'lerin ve referans malzemenin absorbansına karşı entegre floresans yoğunluğu (Aydın *et al.* 2022)

CQD'lerin Sitotoksitesi

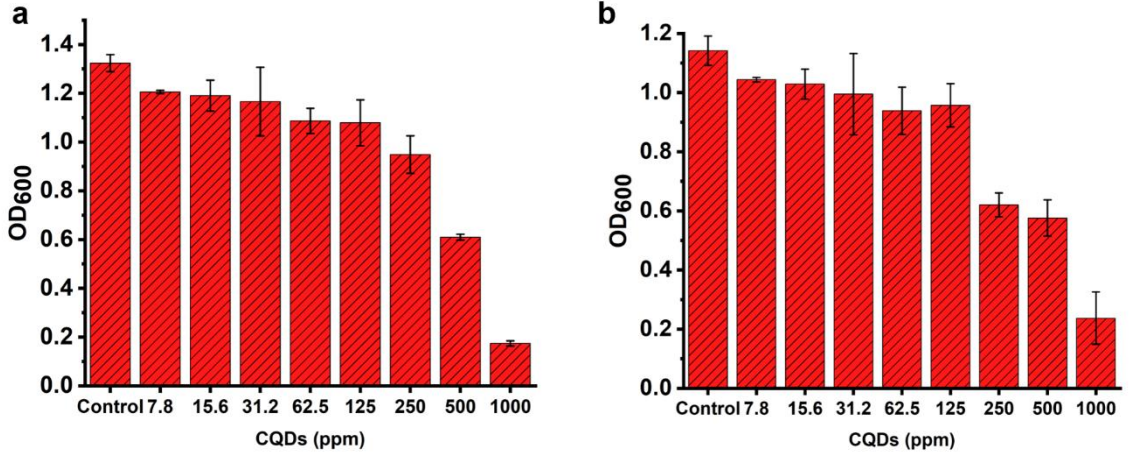
Nanoparçacıkların biyomedikal uygulamalarda potansiyel kullanımı büyük ölçüde sitotoksitelerine bağlıdır. Bu nedenle, bu tez çalışmasında CQD'lerin MRC5 ve A549 hücre hatları üzerinde toksisitesinin belirlenmesi amacıyla standart bir MTT protokolü izlenmiştir. 30-1000 ppm arasında değişen farklı CQD konsantrasyonları ile muamele edilen her bir hücre hattı 24 saatlik inkübasyondan sonra değerlendirilmiştir ve Şekil 18'de sunulmuştur. CQD'ler konsantrasyona bağlı bir şekilde her iki hücre hattı üzerinde benzer toksik etki göstermiştir. Maksimum konsantrasyonda (1000 ppm) bile hücre canlılığı değerleri MRC5 ve A549 için sırasıyla %73,8 ve %81,1 olarak bulunmuştur. Hücre canlılığı testleri hazırlanan CQD'lerin düşük toksisitesini ve biyoyumluluğunu kanıtlamıştır.



Şekil 15. A549 ve MRC5 hücreleriyle muamele edilen CQD’lerin hücre canlılığı (Aydin *et al.* 2022)

CQD’lerin Antibakteriyel Aktivitesi

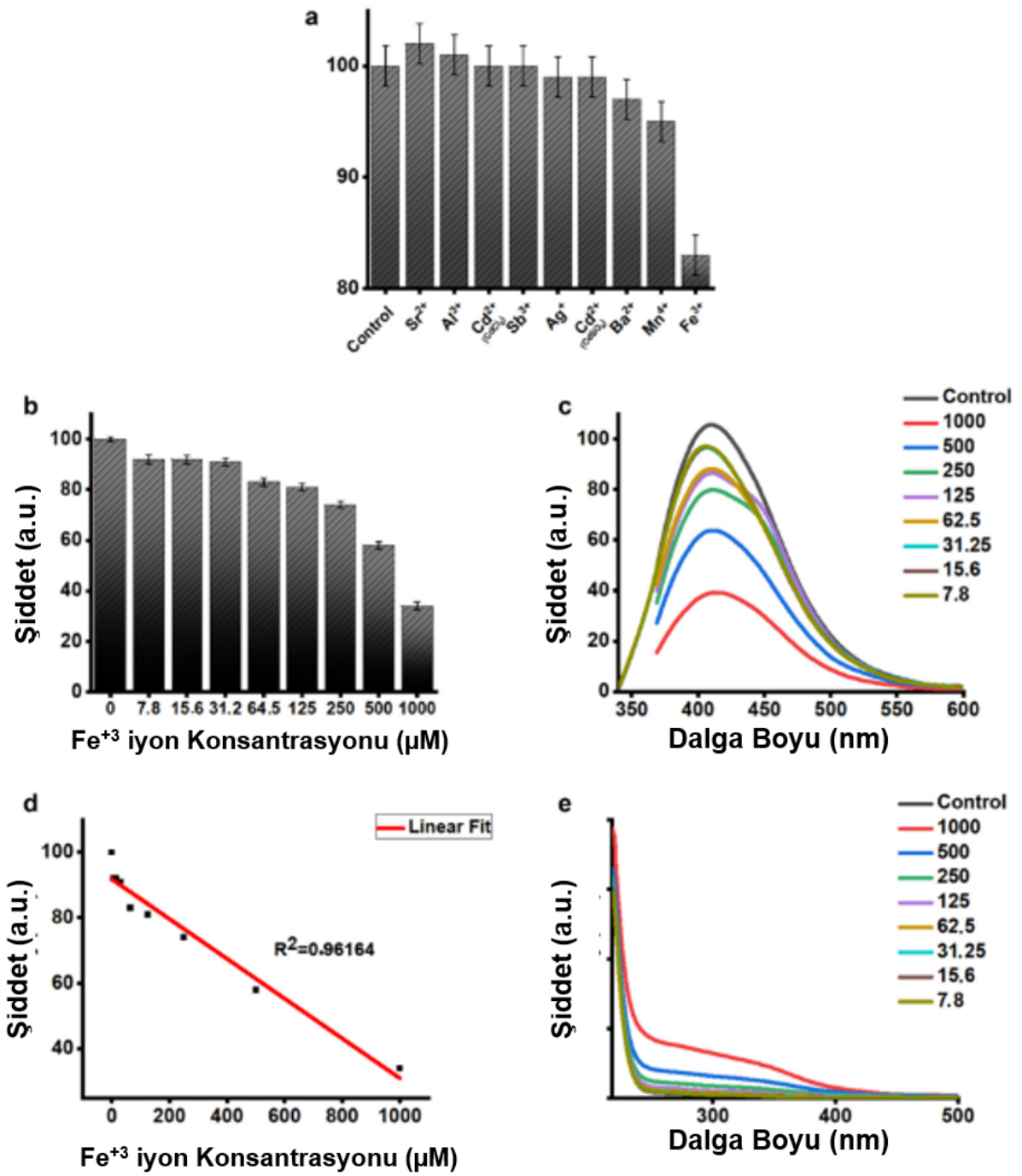
Sentezlenen CQD’lerin antibakteriyel aktivitesinin değerlendirilmesi için *E.coli* suşlarına karşı gün ışığı ve karanlık ortamda, farklı konsantrasyonlarda CQD’lerin aktivitesi test edilmiştir (Şekil 19). Bakteriyel aktiviteyi gösteren 600 nm’de OD, hem gün ışığında hemde karanlıkta konsantrasyona bağlı bir şekilde antibakteriyel aktivite göstermiştir. Bununla birlikte gün ışığı altında bırakılan CQD’lerin karanlıkta bırakılanlara göre çok daha yüksek antibakteriyel özellik gösterdiği belirlenmiştir. CQD’ler için hesaplanan ortalama öldürücü doz (LD₅₀) değeri >1000 ppm’dir.



Şekil 16. CQD’lerin gün ışığı (a) ve karanlıkta (b) farklı konsantrasyonlarda *E.coli* suşlarına karşı antimikrobiyal aktivitesi (Aydın *et al.* 2022)

CQD’lerin Metal İyon Seçiciliği

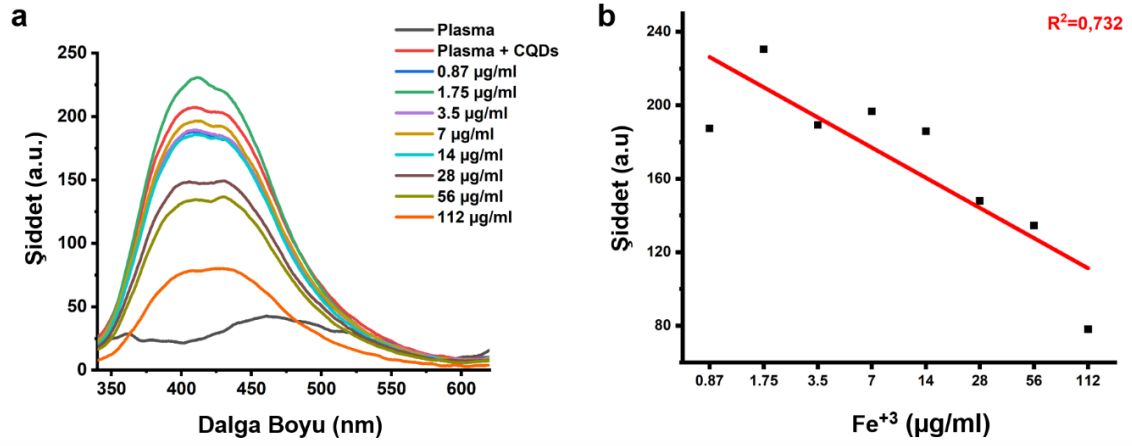
CQD’lerin çeşitli karakterizasyonu ve biyolojik uygulamalarından sonra farklı metal iyonları için algılama yetenekleri tespit edilmiştir. Kuantum noktaların yüzeyinde bulunan –OH, –COOH ve –NH₂ gibi çeşitli fonksiyonel grupların varlığı metal iyonlarının algılanmasında çeşitli avantajlar sağlamaktadır. Bunun için, CQD süspansiyonu, deiyonize suda sabit bir konsantrasyonda (125 µM), Sr⁺², Cd⁺², Al⁺³, Ag⁺, Sb⁺³, Ba⁺², Mn⁺², Fe⁺³ gibi çeşitli metal iyonları ile muamele edilmiştir (Şekil 20). Seçicilik testi, Fe⁺³ iyonlarının diğer metal iyonları ile karşılaştırıldığında CQD’lerin floresan aktivitesini söndürmek için daha yüksek bir eğilim göstermiştir. CQD’lerin Fe⁺³ iyonunun tespit edilmesine yönelik yüksek seçiciliği bu iyonların diğer metal iyonlarından daha güçlü afinitesine bağlanmıştır. Ayrıca, Fe⁺³ iyonlarının algılanmasında nanopartiküllerin hassasiyetini belirlemek için farklı konsantrasyonlarda metal iyonlarının varlığında floresan titrasyonları gerçekleştirilmiştir (Şekil 20b,d). Fe⁺³ iyonlarının konsantrasyonları 0’dan 1000 µM’ye çıktıkça CQD’lerin floresans yoğunluğu kademeli bir şekilde azalmıştır. Metal iyonlarının eklenmesinden sonra PL spektrumlarında dikkate değer bir kayma tespit edilmemiştir (Şekil 20c). Geniş bir Fe⁺³ konsantrasyon aralığı için oldukça kabul edilebilir bir R² değeri (0,96) ile doğrusal bir korelasyon saptanmıştır (Şekil 20d). Bütün bu veriler, pratik uygulamalarda Fe⁺³ iyonlarının saptanmasında CQD’lerin yüksek potansiyelini göstermiştir. Ek olarak, Fe⁺³ iyonlarının eklenmesinden sonra CQD’lerin UV-vis absorpsiyon spektrumları ölçülmüştür (Şekil 20e). Ancak optik özelliklerinde önemli bir değişiklik tespit edilmemiştir.



Şekil 17. Farklı metal iyonlarının varlığında CQD süspansiyonunun floresans şiddetleri (a). Farklı konsantrasyonlarda metal iyonlarının varlığında PL yoğunluğundaki değişiklik (b), spektrumlar (c), yoğunluk ve konsantrasyonlar arasındaki doğrusal ilişki (d) ve UV-vis spektrumları (e) (Aydın *et al.* 2022)

Kan Plazmasında Fe³⁺ Tespiti

Kan plazmasında Fe³⁺ iyon tespiti için gelecek vaat eden bir çalışma gerçekleştirilmiştir (Şekil 21). Fe³⁺ iyonları geniş bir konsantrasyon aralığında, kan plazması numuneleri ile doğrusal bir korelasyon ve kademeli bir sönümleme sergilemiştir. Özetle, seçicilik ve duyarlılık çalışmaları, biyolojik numunelerde Fe³⁺ iyonlarının saptanmasında CQD'lerin yüksek potansiyelini kanıtlamıştır.



Şekil 18. Farklı konsantrasyonlarda Fe^{3+} iyonlarının varlığında kan plazmasındaki CQD'lerin PL spektrumundaki değişim (a) ve şiddet ile konsantrasyon arasındaki doğrusal ilişki (b) (Aydın *et al.* 2022)

SONUÇ

Karbon kuantum noktaları, boyutları 10 nm'nin altında olan, sıfır boyutlu, yarı iletken nanopartiküller olup floresan özellikli nanopartiküllerin en yeni üyesidirler. Ağır metal içermemeleri, düşük toksik etki göstermeleri, insan ve çevre sağlığı açısından tehdit oluşturmamaları gibi çeşitli avantajlarından dolayı geleneksel kuantum noktalarına oranla üstün özellikler göstermektedirler. Ayrıca hidrofilik ve fotostabil olmaları sebebiyle bu nanopartiküllere ilgi gün geçtikçe artmaktadır.

Karbon kuantum noktaları, birçok çeşitli karbon kaynaklarından farklı metodlarla sentezlenebilmektedir. Bu amaçla tezimizde, düşük maliyetli, basit ve esnek bir yöntemle önemli ölçüde yüksek kuantum verimine (%48) ve uyarılma bağımlı özelliklere sahip N-katkılı karbon kuantum noktaları üretilmiştir. Sentezde laktik asit ve üre gibi ucuz, basit ve biyoyumlu başlatıcılar ile kolay ve verimli bir hidrotermal yöntem kullanılmıştır. Öncüllerin sentez süresi, sıcaklığı ve kütle oranı dahil olmak üzere çeşitli parametrelerin etkisi, UV-vis ve floresans spektroskopisi ile ayrıntılı olarak incelenmiştir ve optimum sentez koşulları saptanmıştır.

Optimum koşullar belirlendikten sonra CQD'lerin daha fazla karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. TEM, XRD, UV-Vis, PL, FTIR ve XPS kullanılarak CQD'lerin ayrıntılı analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda üretilen CQD'lerin absorpsiyon piki olan 230 nm ile 300 nm aralığındaki değerlere ulaşılmıştır. Element analizleri ile parçacığın içeriği, yüzeyindeki fonksiyonel gruplar belirlenmiştir. Sentezlenen CQD'lerin boyutları TEM cihazında görüntülenerek küresel formda ve boyutları yaklaşık 5 nm civarında olan parçacıklar gözlemlenmiştir. Karakterizasyon çalışmalarına ek olarak CQD'lerin toksisite ve antibakteriyel aktivite testleri yapılarak, düşük toksisite ve yüksek biyoyumluluğa sahip oldukları kanıtlanmıştır.

Diğer yandan, CQD'lerin Fe^{+3} algılamasında yüksek derecede hassasiyet ve seçicilik sergilediği gözlenmiştir. Fe^{+3} iyonlarının konsantrasyonları 0'dan 1000 M'ye yükselirken, CQD'lerin floresan yoğunluğundaki azalmada doğrusal bir korelasyonun gözlenmesi pratik uygulamalarda karbon kuantum noktalarının yüksek potansiyelini ortaya çıkarmıştır. Bu çalışma kapsamında, elde edilen CQD'lerin kolay ve verimli sentez yöntemi, ayarlaması kolay optik özellikleri, uyarılmaya bağlı doğası, yüksek floresan aktivitesini ve düşük sitotoksitesini

birleştirerek N-katkılı CQD'lerin teşhis, biyogörüntüleme ve biyosensörler gibi çeşitli biyomedikal uygulamalarda benzersiz avantajlar sağlayabileceği kanıtlanmıştır.



KAYNAKLAR

- Ajayan, P. M., & Zhou, O. Z. (n.d.). Applications of Carbon Nanotubes. In *Carbon Nanotubes* (pp. 391–425). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-39947-X_14
- Albanese, A., Tang, P. S., & Chan, W. C. W. (n.d.). *The Effect of Nanoparticle Size , Shape , and Surface Chemistry on Biological Systems*. <https://doi.org/10.1146/annurev-bioeng-071811-150124>
- Alengebaw, A., Abdelkhalek, S. T., Qureshi, S. R., & Wang, M.-Q. (2021). Heavy Metals and Pesticides Toxicity in Agricultural Soil and Plants: Ecological Risks and Human Health Implications. *Toxics*, 9(3), 42. <https://doi.org/10.3390/toxics9030042>
- Amiri, M., Dadfarnia, S., Haji Shabani, A. M., & Sadjadi, S. (2019). Non-enzymatic sensing of dopamine by localized surface plasmon resonance using carbon dots-functionalized gold nanoparticles. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 172, 223–229. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2019.04.037>
- Andrievski, R. ., & Glezer, A. . (2001). Size effects in properties of nanomaterials. *Scripta Materialia*, 44(8–9), 1621–1624. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(01\)00786-2](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(01)00786-2)
- Anu Mary Ealia, S., & Saravanakumar, M. P. (2017). A review on the classification, characterisation, synthesis of nanoparticles and their application. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 263, 032019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/263/3/032019>
- Anwar, S., Ding, H., Xu, M., Hu, X., Li, Z., Wang, J., Liu, L., Jiang, L., Wang, D., Dong, C., Yan, M., Wang, Q., & Bi, H. (2019). Recent Advances in Synthesis, Optical Properties, and Biomedical Applications of Carbon Dots. *ACS Applied Bio Materials*, 2(6), 2317–2338. <https://doi.org/10.1021/acsabm.9b00112>
- Arole, V. M., & Munde, P. S. V. (2014). *Fabrication Of Nanomaterials By Top-Down And Bottom-Up Approaches – An Overview*. 1(2), 89–93.
- Asghar, K., Qasim, M., & Das, D. (2017). *One-pot green synthesis of carbon quantum dot for biological application*. 050117. <https://doi.org/10.1063/1.4980350>
- Atchudan, R., Jebakumar Immanuel Edison, T. N., Shanmugam, M., Perumal, S., Somanathan, T., & Lee, Y. R. (2021). Sustainable synthesis of carbon quantum dots from banana peel waste using hydrothermal process for in vivo bioimaging. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 126, 114417. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2020.114417>
- Aydin, S., Ustun, O., Ghosigharehaghaji, A., Tavaci, T., Yilmaz, A., & Yilmaz, M. (2022). Hydrothermal Synthesis of Nitrogen-Doped and Excitation-Dependent Carbon Quantum Dots for Selective Detection of Fe³⁺ in Blood Plasma. *Coatings*, 12(9), 1311. <https://doi.org/10.3390/coatings12091311>
- Baddour, C. E., & Briens, C. (2005). Carbon Nanotube Synthesis: A Review. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 3(1). <https://doi.org/10.2202/1542-6580.1279>
- Behlke, M. A., Huang, L., Bogh, L., Rose, S., & Devor, E. J. (2005). *Fluorescence and Fluorescence Applications*. 1–13.

- Bera, D., Qian, L., Tseng, T.-K., & Holloway, P. H. (2010). Quantum Dots and Their Multimodal Applications: A Review. *Materials*, 3(4), 2260–2345. <https://doi.org/10.3390/ma3042260>
- Breijyeh, Z., Jubeh, B., & Karaman, R. (2020). Resistance of Gram-Negative Bacteria to Current Antibacterial Agents and Approaches to Resolve It. *Molecules*, 25(6), 1340. <https://doi.org/10.3390/molecules25061340>
- Bucevičius, J., Lukinavičius, G., & Gerasimaitė, R. (2018). The Use of Hoechst Dyes for DNA Staining and beyond. *Chemosensors*, 6(2), 18. <https://doi.org/10.3390/chemosensors6020018>
- Cao, L., Wang, X., Meziani, M. J., Lu, F., Wang, H., Luo, P. G., Lin, Y., Harruff, B. A., Veca, L. M., Murray, D., Xie, S.-Y., & Sun, Y.-P. (2007). Carbon Dots for Multiphoton Bioimaging. *Journal of the American Chemical Society*, 129(37), 11318–11319. <https://doi.org/10.1021/ja0735271>
- Chen, B. Bin, Li, R. S., Liu, M. L., Zhang, H. Z., & Huang, C. Z. (2017). Self-exothermic reaction prompted synthesis of single-layered graphene quantum dots at room temperature. *Chemical Communications*, 53(36), 4958–4961. <https://doi.org/10.1039/C7CC00546F>
- Cho, M.-J., & Park, S.-Y. (2019). Carbon-dot-based ratiometric fluorescence glucose biosensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 282, 719–729. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.11.055>
- Collier, Z. A., Kennedy, A. J., Poda, A. R., Cuddy, M. F., Moser, R. D., Maccuspie, R. I., Harmon, A., Plourde, K., Haines, C. D., & Steevens, J. A. (2015). *Tiered guidance for risk-informed environmental health and safety testing of nanotechnologies*. <https://doi.org/10.1007/s11051-015-2943-3>
- Das, R., Bandyopadhyay, R., & Pramanik, P. (2018). Carbon quantum dots from natural resource: A review. *Materials Today Chemistry*, 8, 96–109. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2018.03.003>
- Devi, P., Saini, S., & Kim, K.-H. (2019). The advanced role of carbon quantum dots in nanomedical applications. *Biosensors and Bioelectronics*, 141, 111158. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2019.02.059>
- Ding, H., Wei, J.-S., Zhong, N., Gao, Q.-Y., & Xiong, H.-M. (2017). Highly Efficient Red-Emitting Carbon Dots with Gram-Scale Yield for Bioimaging. *Langmuir*, 33(44), 12635–12642. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.7b02385>
- Dong, Y., Li, G., Zhou, N., Wang, R., Chi, Y., & Chen, G. (2012). Graphene Quantum Dot as a Green and Facile Sensor for Free Chlorine in Drinking Water. *Analytical Chemistry*, 84(19), 8378–8382. <https://doi.org/10.1021/ac301945z>
- Dong, Y., Wang, R., Li, H., Shao, J., Chi, Y., Lin, X., & Chen, G. (2012). Polyamine-functionalized carbon quantum dots for chemical sensing. *Carbon*, 50(8), 2810–2815. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.02.046>
- Edison, T. N. J. I., Atchudan, R., Shim, J.-J., Kalimuthu, S., Ahn, B.-C., & Lee, Y. R. (2016). Turn-off fluorescence sensor for the detection of ferric ion in water using green synthesized N-doped carbon dots and its bio-imaging. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 158, 235–242. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2016.03.010>
- Feng, G., Zhang, G., & Ding, D. (2020). *Chem Soc Rev Design of superior phototheranostic agents guided by Jablonski diagrams*. <https://doi.org/10.1039/d0cs00671h>

- Gao, X., Du, C., Zhuang, Z., & Chen, W. (2016). Carbon quantum dot-based nanoprobe for metal ion detection. *Journal of Materials Chemistry C*, 4(29), 6927–6945. <https://doi.org/10.1039/C6TC02055K>
- Georgakilas, V., Tiwari, J. N., Kemp, K. C., Perman, J. A., Bourlinos, A. B., Kim, K. S., & Zboril, R. (2016). Noncovalent Functionalization of Graphene and Graphene Oxide for Energy Materials, Biosensing, Catalytic, and Biomedical Applications. *Chemical Reviews*, 116(9), 5464–5519. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00620>
- Guo, C., Li, Y., Xu, Y., Xiang, Q., Sun, L., Zhang, W., Li, W., Si, Y., & Luo, Z. (2019). A Highly Nanoporous Nitrogen-Doped Carbon Microfiber Derived from Bioresource as a New Kind of ORR Electrocatalyst. *Nanoscale Research Letters*, 14(1), 22. <https://doi.org/10.1186/s11671-019-2854-9>
- Hagiwara, K., Horikoshi, S., & Serpone, N. (2021). Photoluminescent Carbon Quantum Dots: Synthetic Approaches and Photophysical Properties. *Chemistry – A European Journal*, 27(37), 9466–9481. <https://doi.org/10.1002/chem.202100823>
- Hawe, A., Sutter, M., & Jiskoot, W. (2008). Extrinsic fluorescent dyes as tools for protein characterization. *Pharmaceutical Research*, 25(7), 1487–1499. <https://doi.org/10.1007/s11095-007-9516-9>
- Hersam, M. C. (2020). *Nanotechnology research directions for societal needs in 2020: summary of international study*. 2011, 897–919. <https://doi.org/10.1007/s11051-011-0275-5>
- Holá, K., Sudolská, M., Kalytchuk, S., Nachtigallová, D., Rogach, A. L., Otyepka, M., & Zboril, R. (2017). Graphitic Nitrogen Triggers Red Fluorescence in Carbon Dots. *ACS Nano*, 11(12), 12402–12410. <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b06399>
- Hu, S.-L., Niu, K.-Y., Sun, J., Yang, J., Zhao, N.-Q., & Du, X.-W. (2009). One-step synthesis of fluorescent carbon nanoparticles by laser irradiation. *J. Mater. Chem.*, 19(4), 484–488. <https://doi.org/10.1039/B812943F>
- Huang, H., Ge, H., Ren, Z., Huang, Z., Xu, M., & Wang, X. (2021). Controllable Synthesis of Biocompatible Fluorescent Carbon Dots From Cellulose Hydrogel for the Specific Detection of Hg²⁺. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.617097>
- Hulla, J., Sahu, S., & Hayes, A. (2015). Nanotechnology. *Human & Experimental Toxicology*, 34(12), 1318–1321. <https://doi.org/10.1177/0960327115603588>
- Hummers, W. S., & Offeman, R. E. (1958). Preparation of Graphitic Oxide. *Journal of the American Chemical Society*, 80(6), 1339–1339. <https://doi.org/10.1021/ja01539a017>
- Iijima, S., & Ichihashi, T. (1993). Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter. *Nature*, 363(6430), 603–605. <https://doi.org/10.1038/363603a0>
- Janus, Ł., Radwan-Pragłowska, J., Piątkowski, M., & Bogdał, D. (2020). Facile Synthesis of Surface-Modified Carbon Quantum Dots (CQDs) for Biosensing and Bioimaging. *Materials*, 13(15), 3313. <https://doi.org/10.3390/ma13153313>
- Jasieniak, J., Califano, M., & Watkins, S. E. (2011). Size-Dependent Valence and Conduction Band-Edge Energies of Semiconductor Nanocrystals. *ACS Nano*, 5(7), 5888–5902. <https://doi.org/10.1021/nn201681s>
- Jelinek, R. (2017). *Characterization and Physical Properties of Carbon-Dots* (pp. 29–46). https://doi.org/10.1007/978-3-319-43911-2_3

- Jian, H.-J., Wu, R.-S., Lin, T.-Y., Li, Y.-J., Lin, H.-J., Harroun, S. G., Lai, J.-Y., & Huang, C.-C. (2017). Super-Cationic Carbon Quantum Dots Synthesized from Spermidine as an Eye Drop Formulation for Topical Treatment of Bacterial Keratitis. *ACS Nano*, 11(7), 6703–6716. <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b01023>
- Jiang, K., Zhang, L., Lu, J., Xu, C., Cai, C., & Lin, H. (2016). Triple-Mode Emission of Carbon Dots: Applications for Advanced Anti-Counterfeiting. *Angewandte Chemie International Edition*, 55(25), 7231–7235. <https://doi.org/10.1002/anie.201602445>
- Jiang, Y., Han, Q., Jin, C., Zhang, J., & Wang, B. (2015). A fluorescence turn-off chemosensor based on N-doped carbon quantum dots for detection of Fe³⁺ in aqueous solution. *Materials Letters*, 141, 366–368. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.10.168>
- Kang, H., Buchman, J. T., Rodriguez, R. S., Ring, H. L., He, J., Bantz, K. C., & Haynes, C. L. (2019). Stabilization of Silver and Gold Nanoparticles: Preservation and Improvement of Plasmonic Functionalities. *Chemical Reviews*, 119(1), 664–699. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00341>
- Kargozar, S., Hoseini, S. J., Milan, P. B., Hooshmand, S., Kim, H., & Mozafari, M. (2020). Quantum Dots: A Review from Concept to Clinic. *Biotechnology Journal*, 15(12). <https://doi.org/10.1002/biot.202000117>
- Krishna, K. S., Li, Y., Li, S., & Kumar, C. S. S. R. (2013). Lab-on-a-chip synthesis of inorganic nanomaterials and quantum dots for biomedical applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 65(11–12), 1470–1495. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2013.05.006>
- Lahoti, H. S., & Jogdand, S. D. (2022). Bioimaging: Evolution, Significance, and Deficit. *Cureus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.28923>
- Li, P., Liu, S., Cao, W., Zhang, G., Yang, X., Gong, X., & Xing, X. (2020). Low-toxicity carbon quantum dots derived from gentamicin sulfate to combat antibiotic resistance and eradicate mature biofilms. *Chemical Communications*, 56(15), 2316–2319. <https://doi.org/10.1039/C9CC09223D>
- Li, X., Wang, H., Shimizu, Y., Pyatenko, A., Kawaguchi, K., & Koshizaki, N. (2011). Preparation of carbon quantum dots with tunable photoluminescence by rapid laser passivation in ordinary organic solvents. *Chem. Commun.*, 47(3), 932–934. <https://doi.org/10.1039/C0CC03552A>
- Lim, S. Y., Shen, W., & Gao, Z. (2015). Carbon quantum dots and their applications. *Chemical Society Reviews*, 44(1), 362–381. <https://doi.org/10.1039/C4CS00269E>
- Liu, L., Zhang, S., Zheng, X., Li, H., Chen, Q., Qin, K., Ding, Y., & Wei, Y. (2021). Carbon dots derived from *Fusobacterium nucleatum* for intracellular determination of Fe³⁺ and bioimaging both in vitro and in vivo. *Analytical Methods*, 13(9), 1121–1131. <https://doi.org/10.1039/D1AY00020A>
- Liu, R., Li, H., Kong, W., Liu, J., Liu, Y., Tong, C., Zhang, X., & Kang, Z. (2013). Ultra-sensitive and selective Hg²⁺ detection based on fluorescent carbon dots. *Materials Research Bulletin*, 48(7), 2529–2534. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2013.03.015>
- Liu, R., Wu, D., Liu, S., Koynov, K., Knoll, W., & Li, Q. (2009). An Aqueous Route to Multicolor Photoluminescent Carbon Dots Using Silica Spheres as Carriers. *Angewandte Chemie International Edition*, 48(25), 4598–4601. <https://doi.org/10.1002/anie.200900652>
- Lu, H., Tang, S.-Y., Yun, G., Li, H., Zhang, Y., Qiao, R., & Li, W. (2020). Modular and Integrated Systems for Nanoparticle and Microparticle Synthesis—A Review. *Biosensors*, 10(11), 165. <https://doi.org/10.3390/bios10110165>

- Lu, S., Sui, L., Wu, M., Zhu, S., Yong, X., & Yang, B. (2019). Graphitic Nitrogen and High-Crystalline Triggered Strong Photoluminescence and Room-Temperature Ferromagnetism in Carbonized Polymer Dots. *Advanced Science*, 6(2), 1801192. <https://doi.org/10.1002/advs.201801192>
- M., A., John, B. K., Chacko, A. R., Mohan, C., & Mathew, B. (2022). A Review on Carbon Quantum Dot Based Semiconductor Photocatalysts for the Abatement of Refractory Pollutants. *ChemPhysChem*, 23(12). <https://doi.org/10.1002/cphc.202100873>
- Mahat, N. A., Nor, N. S. M., & Shamsudin, S. A. (2022). Effects of Positive Carbon Quantum Dots on Gram-Negative Bacteria as an Antimicrobial Agent. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 32(7), 2428–2440. <https://doi.org/10.1007/s10904-022-02314-z>
- Malhotra, B. D., Srivastava, S., & Augustine, S. (2015). Biosensors for Food Toxin Detection: Carbon Nanotubes and Graphene. *MRS Proceedings*, 1725, mrsf14-1725-i05-02. <https://doi.org/10.1557/opl.2015.165>
- Manikandan, V., & Lee, N. Y. (2022). Green synthesis of carbon quantum dots and their environmental applications. *Environmental Research*, 212, 113283. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113283>
- Mehta, A., Mishra, A., Basu, S., Shetti, N. P., Reddy, K. R., Saleh, T. A., & Aminabhavi, T. M. (2019). Band gap tuning and surface modification of carbon dots for sustainable environmental remediation and photocatalytic hydrogen production – A review. *Journal of Environmental Management*, 250, 109486. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109486>
- Mikie, T., Hayakawa, M., Okamoto, K., Iguchi, K., Yashiro, S., Koganezawa, T., Sumiya, M., Ishii, H., Yamaguchi, S., Fukazawa, A., & Osaka, I. (2021). Extended π -Electron Delocalization in Quinoid-Based Conjugated Polymers Boosts Intrachain Charge Carrier Transport. *Chemistry of Materials*, 33(21), 8183–8193. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.1c02072>
- Mobasser, S., & Firoozi, A. A. (2017). *Review of Nanotechnology Applications in Science and Engineering Review of Nanotechnology Applications in Science and Engineering*. July 2016.
- Molaei, M. J. (2020). Principles, mechanisms, and application of carbon quantum dots in sensors: a review. *Analytical Methods*, 12(10), 1266–1287. <https://doi.org/10.1039/C9AY02696G>
- Muenmart, D., Foster, A. B., Harvey, A., Chen, M.-T., Navarro, O., Promarak, V., McCairn, M. C., Behrendt, J. M., & Turner, M. L. (2014). Conjugated Polymer Nanoparticles by Suzuki–Miyaura Cross-Coupling Reactions in an Emulsion at Room Temperature. *Macromolecules*, 47(19), 6531–6539. <https://doi.org/10.1021/ma501402h>
- Muyskens, M., & Ed Vitz. (2006). The Fluorescence of Lignum nephriticum: A Flash Back to the Past and a Simple Demonstration of Natural Substance Fluorescence. *Journal of Chemical Education*, 83(5), 765. <https://doi.org/10.1021/ed083p765>
- Noh, M., Kim, T., Lee, H., Kim, C.-K., Joo, S.-W., & Lee, K. (2010). Fluorescence quenching caused by aggregation of water-soluble CdSe quantum dots. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 359(1–3), 39–44. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.01.059>
- Pacyna, J. M. (2020). Recent advances in mercury research. *Science of The Total Environment*, 738, 139955. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139955>

- Pan, L., Sun, S., Zhang, L., Jiang, K., & Lin, H. (2016). Near-infrared emissive carbon dots for two-photon fluorescence bioimaging. *Nanoscale*, 8(39), 17350–17356. <https://doi.org/10.1039/C6NR05878G>
- Pecher, J., & Mecking, S. (2010). Nanoparticles of Conjugated Polymers. *Chemical Reviews*, 110(10), 6260–6279. <https://doi.org/10.1021/cr100132y>
- Pourmadadi, M., Rahmani, E., Rajabzadeh-Khosroshahi, M., Samadi, A., Behzadmehr, R., Rahdar, A., & Ferreira, L. F. R. (2023). Properties and application of carbon quantum dots (CQDs) in biosensors for disease detection: A comprehensive review. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 80, 104156. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2023.104156>
- Preeti Gupta, S. S. Das, N. B. S. (2023). *spectroscopy*. <https://books.google.com.tr/books?id=cIK2EAAAQBAJ&lpq=PA279&ots=J8B-uh5552&dq=jablonski%22fluorescence%22&lr&hl=tr&pg=PA269#v=onepage&q=jablonski%22fluorescence%22&f=false>
- Pu, Z.-F., Wen, Q.-L., Yang, Y.-J., Cui, X.-M., Ling, J., Liu, P., & Cao, Q.-E. (2020). Fluorescent carbon quantum dots synthesized using phenylalanine and citric acid for selective detection of Fe³⁺ ions. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 229, 117944. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2019.117944>
- Reshma, V. G., & Mohanan, P. V. (2019). Quantum dots: Applications and safety consequences. *Journal of Luminescence*, 205, 287–298. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2018.09.015>
- Šafranko, S., Goman, D., Stanković, A., Medvidović-Kosanović, M., Moslavac, T., Jerković, I., & Jokić, S. (2021). An Overview of the Recent Developments in Carbon Quantum Dots—Promising Nanomaterials for Metal Ion Detection and (Bio)Molecule Sensing. *Chemosensors*, 9(6), 138. <https://doi.org/10.3390/chemosensors9060138>
- Schwenke, A. M., Hoeppener, S., & Schubert, U. S. (2015). Synthesis and Modification of Carbon Nanomaterials utilizing Microwave Heating. *Advanced Materials*, 27(28), 4113–4141. <https://doi.org/10.1002/adma.201500472>
- Shahzad, M. I., Tagliaferro, A., & Shahzad, M. I. (2015). Introduction to carbon materials. *Carbon for Sensing Devices*, 9, 3–14. https://doi.org/10.1007/978-3-319-08648-4_1
- Shaikh, A. F., Tamboli, M. S., Patil, R. H., Bhan, A., Ambekar, J. D., & Kale, B. B. (2019). Bioinspired Carbon Quantum Dots: An Antibiofilm Agents. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 19(4), 2339–2345. <https://doi.org/10.1166/jnn.2019.16537>
- Shen, J., Zhu, Y., Yang, X., Zong, J., Zhang, J., & Li, C. (2012). One-pot hydrothermal synthesis of graphenequantum dots surface-passivated by polyethylene glycol and their photoelectric conversion under near-infrared light. *New J. Chem.*, 36(1), 97–101. <https://doi.org/10.1039/C1NJ20658C>
- Silva, G. A. (2004). Introduction to nanotechnology and its applications to medicine. *Surgical Neurology*, 61(3), 216–220. <https://doi.org/10.1016/j.surneu.2003.09.036>
- Steinegger, A., Wolfbeis, O. S., & Borisov, S. M. (2020). Optical Sensing and Imaging of pH Values: Spectroscopies, Materials, and Applications. *Chemical Reviews*, 120(22), 12357–12489. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00451>
- Stranks, S. D., Habisreutinger, S. N., Dirks, B., & Nicholas, R. J. (2013). Novel Carbon Nanotube-Conjugated Polymer Nanohybrids Produced By Multiple Polymer Processing. *Advanced Materials*, 25(31), 4365–4371. <https://doi.org/10.1002/adma.201205250>

- Surana, K., Singh, P. K., Rhee, H.-W., & Bhattacharya, B. (2014). Synthesis, characterization and application of CdSe quantum dots. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(6), 4188–4193. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.01.019>
- Tetean, R., Stiufiuc, R., & Lucaciu, C. M. (n.d.). *Small versus Large Iron Oxide Magnetic Nanoparticles: Hyperthermia and Cell Uptake Properties*. 1–21. <https://doi.org/10.3390/molecules21101357>
- Toumey, C. (2008). Reading Feynman into Nanotechnology: A Text for a New Science. *Techne: Research in Philosophy and Technology*, 12(3), 133–168.
- Wang, L., Wu, X., Guo, S., Han, M., Zhou, Y., Sun, Y., Huang, H., Liu, Y., & Kang, Z. (2017). Mesoporous nitrogen, sulfur co-doped carbon dots/CoS hybrid as an efficient electrocatalyst for hydrogen evolution. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(6), 2717–2723. <https://doi.org/10.1039/C6TA09580A>
- Wang, R., Lu, K.-Q., Tang, Z.-R., & Xu, Y.-J. (2017). Recent progress in carbon quantum dots: synthesis, properties and applications in photocatalysis. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(8), 3717–3734. <https://doi.org/10.1039/C6TA08660H>
- Wang, X., Feng, Y., Dong, P., & Huang, J. (2019). A Mini Review on Carbon Quantum Dots: Preparation, Properties, and Electrocatalytic Application. *Frontiers in Chemistry*, 7. <https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00671>
- Wu, P., Li, W., Wu, Q., Liu, Y., & Liu, S. (2017). Hydrothermal synthesis of nitrogen-doped carbon quantum dots from microcrystalline cellulose for the detection of Fe³⁺ ions in an acidic environment. *RSC Advances*, 7(70), 44144–44153. <https://doi.org/10.1039/C7RA08400E>
- Wu, Q., Li, W., Wu, P., Li, J., Liu, S., Jin, C., & Zhan, X. (2015). Effect of reaction temperature on properties of carbon nanodots and their visible-light photocatalytic degradation of tetracycline. *RSC Advances*, 5(92), 75711–75721. <https://doi.org/10.1039/C5RA16080D>
- Wu, W., & Li, A. D. (2007). Optically switchable nanoparticles for biological imaging. *Nanomedicine*, 2(4), 523–531. <https://doi.org/10.2217/17435889.2.4.523>
- Wu, Y., Li, C., van der Mei, H. C., Busscher, H. J., & Ren, Y. (2021). Carbon Quantum Dots Derived from Different Carbon Sources for Antibacterial Applications. *Antibiotics*, 10(6), 623. <https://doi.org/10.3390/antibiotics10060623>
- XIII. On the atomic weight of graphite. (1859). *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 149, 249–259. <https://doi.org/10.1098/rstl.1859.0013>
- Xu, X., Ray, R., Gu, Y., Ploehn, H. J., Gearheart, L., Raker, K., & Scrivens, W. A. (2004). Electrophoretic Analysis and Purification of Fluorescent Single-Walled Carbon Nanotube Fragments. *Journal of the American Chemical Society*, 126(40), 12736–12737. <https://doi.org/10.1021/ja040082h>
- Xu, Y., & Schoonen, M. A. A. (2000). The absolute energy positions of conduction and valence bands of selected semiconducting minerals. *American Mineralogist*, 85(3–4), 543–556. <https://doi.org/10.2138/am-2000-0416>
- Xue, B., Yang, Y., Sun, Y., Fan, J., Li, X., & Zhang, Z. (2019). Photoluminescent lignin hybridized carbon quantum dots composites for bioimaging applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 122, 954–961. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.018>

- Yang, M., Tang, Q., Meng, Y., Liu, J., Feng, T., Zhao, X., Zhu, S., Yu, W., & Yang, B. (2018). Reversible “Off–On” Fluorescence of Zn²⁺-Passivated Carbon Dots: Mechanism and Potential for the Detection of EDTA and Zn²⁺. *Langmuir*, 34(26), 7767–7775. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b00947>
- Yu, C., Qin, D., Jiang, X., Zheng, X., & Deng, B. (2021). N-doped carbon quantum dots from osmanthus fragrans as a novel off-on fluorescent nanosensor for highly sensitive detection of quercetin and aluminium ion, and cell imaging. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 192, 113673. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2020.113673>
- Yu, K., & Schanze, K. S. (2023). Commemorating The Nobel Prize in Chemistry 2023 for the Discovery and Synthesis of Quantum Dots. *ACS Central Science*, 9(11), 1989–1992. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.3c01296>
- Yu, W., Sisi, L., Haiyan, Y., & Jie, L. (2020). Progress in the functional modification of graphene/graphene oxide: a review. *RSC Advances*, 10(26), 15328–15345. <https://doi.org/10.1039/D0RA01068E>
- Yu, W. W., Chang, E., Drezek, R., & Colvin, V. L. (2006). Water-soluble quantum dots for biomedical applications. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 348(3), 781–786. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2006.07.160>
- Zeng, S., Liu, X., Kafuti, Y. S., Kim, H., Wang, J., Peng, X., Li, H., & Yoon, J. (2023). Fluorescent dyes based on rhodamine derivatives for bioimaging and therapeutics: recent progress, challenges, and prospects. *Chemical Society Reviews*, 52(16), 5607–5651. <https://doi.org/10.1039/D2CS00799A>
- Zhang, L.-Y., Han, Y.-L., Yang, J.-J., Deng, S.-L., & Wang, B.-Y. (2021). Construction and photocatalysis of carbon quantum dots/layered mesoporous titanium dioxide (CQDs/LM-TiO₂) composites. *Applied Surface Science*, 546, 149089. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.149089>
- Zhang, M., & Li, J. (2009). Carbon nanotube in different shapes. *Materials Today*, 12(6), 12–18. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(09\)70176-2](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(09)70176-2)
- Zhao, D., Song, H., Hao, L., Liu, X., Zhang, L., & Lv, Y. (2013). Luminescent ZnO quantum dots for sensitive and selective detection of dopamine. *Talanta*, 107, 133–139. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2013.01.006>
- Zhao, F., Li, X., Zuo, M., Liang, Y., Qin, P., Wang, H., Wu, Z., Luo, L., Liu, C., & Leng, L. (2023). Preparation of photocatalysts decorated by carbon quantum dots (CQDs) and their applications: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(2), 109487. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109487>
- Zhao, Y., Liu, X., Yang, Y., Kang, L., Yang, Z., Liu, W., & Chen, L. (2015). Carbon Dots: From Intense Absorption in Visible Range to Excitation-Independent and Excitation-Dependent Photoluminescence. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 23(11), 922–929. <https://doi.org/10.1080/1536383X.2015.1018413>
- Zhou, J., Yang, Y., & Zhang, C. (2013). A low-temperature solid-phase method to synthesize highly fluorescent carbon nitride dots with tunable emission. *Chemical Communications*, 49(77), 8605. <https://doi.org/10.1039/c3cc42266f>
- Zhou, X.-Q., Hayat, Z., Zhang, D.-D., Li, M.-Y., Hu, S., Wu, Q., Cao, Y.-F., & Yuan, Y. (2023). Zinc Oxide Nanoparticles: Synthesis, Characterization, Modification, and Applications in Food and Agriculture. *Processes*, 11(4), 1193. <https://doi.org/10.3390/pr11041193>
- Zhu, H., Wang, X., Li, Y., Wang, Z., Yang, F., & Yang, X. (2009). Microwave synthesis of fluorescent carbon nanoparticles with electrochemiluminescence properties. *Chemical Communications*, 34, 5118. <https://doi.org/10.1039/b907612c>

- Zhu, Y., Murali, S., Cai, W., Li, X., Suk, J. W., Potts, J. R., & Ruoff, R. S. (2010). Graphene and Graphene Oxide: Synthesis, Properties, and Applications. *Advanced Materials*, 22(35), 3906–3924. <https://doi.org/10.1002/adma.201001068>
- Zhuo, Y., Miao, H., Zhong, D., Zhu, S., & Yang, X. (2015). One-step synthesis of high quantum-yield and excitation-independent emission carbon dots for cell imaging. *Materials Letters*, 139, 197–200. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.10.048>



ÖZGEÇMİŞ

İşisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Selin AYDIN
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Ordu Lisesi
Lisans:	Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Fakültesi
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Moleküler Biyoloji ve Genetik Anabilim Dalı (2021)
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
1. Hydrothermal Synthesis of Nitrogen-Doped and Excitation-Dependent Carbon Quantum Dots for Selective Detection of Fe ³⁺ in Blood Plasma, Coatings 2022, 12, 1311, https://doi.org/10.3390/coatings12091311 . Yazarlar: Selin Aydın, Oğuzhan Üstün, Atena Ghosigharehaghaji, Taha Tavaci , Aslı Yılmaz, Mehmet Yılmaz.	