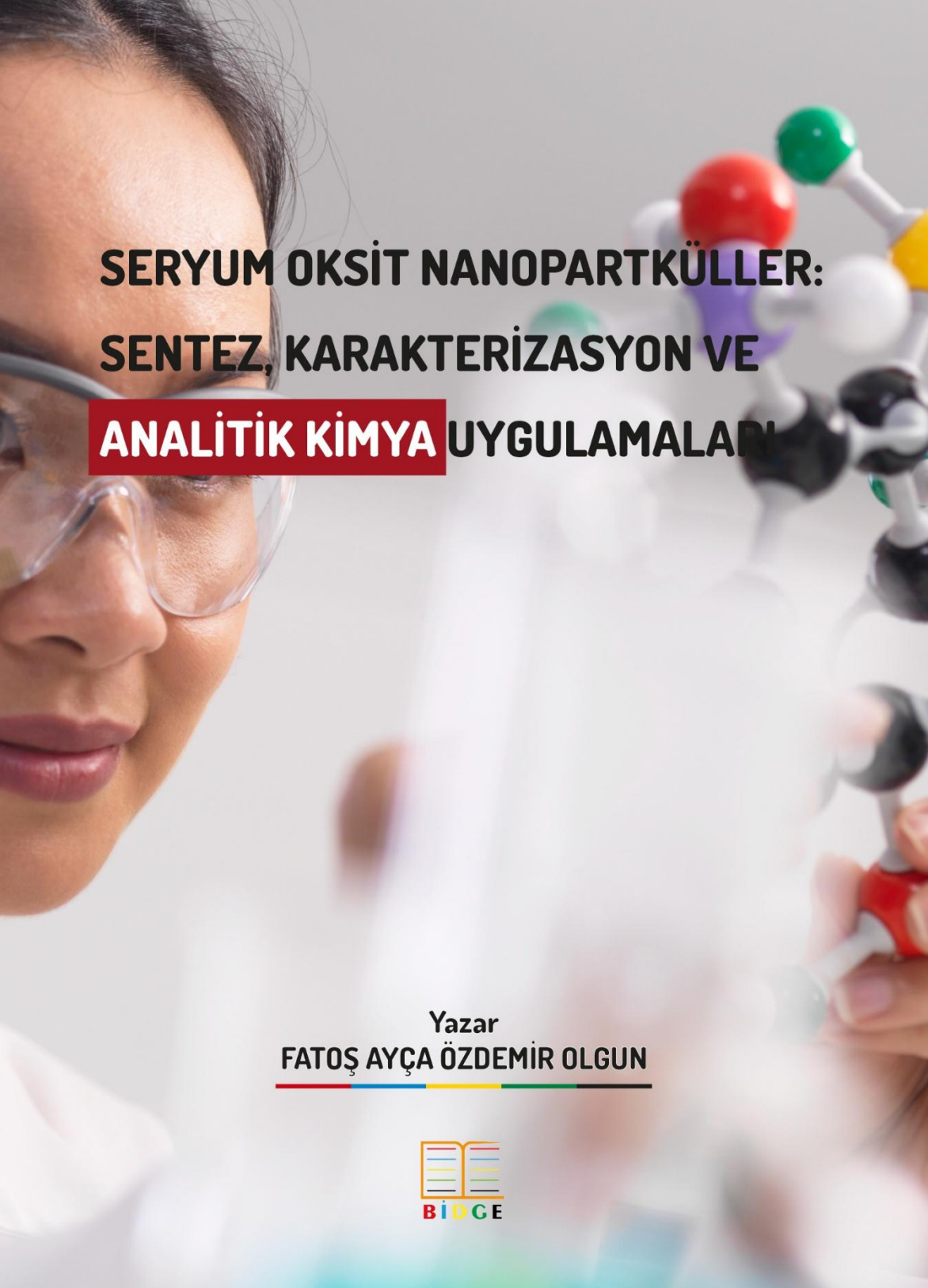




# SERYUM OKSİT NANOPARTKÜLLER: SENTEZ, KARAKTERİZASYON VE **ANALİTİK KİMYA** UYGULAMALARI

Yazar  
FATOŞ AYÇA ÖZDEMİR OLGUN

---



## **BİDGE Yayınları**

**SERYUM OKSİT NANOPARTKÜLLER: SENTEZ,  
KARAKTERİZASYON VE ANALİTİK KİMYA  
UYGULAMALARI**

**Yazar: FATOŞ AYÇA ÖZDEMİR OLGUN**

**ISBN: 978-625-372-633-1**

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 24.03.2025

**BİDGE Yayınları**

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

[www.bidgeyayinlari.com.tr](http://www.bidgeyayinlari.com.tr) - [bidgeyayinlari@gmail.com](mailto:bidgeyayinlari@gmail.com)

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /  
Ankara



## İçindekiler

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| SİMGE LİSTESİ.....                                                         | 5  |
| KISALTMA LİSTESİ .....                                                     | 6  |
| ŞEKİL LİSTESİ .....                                                        | 7  |
| TABLO LİSTESİ .....                                                        | 8  |
| 1. GİRİŞ .....                                                             | 9  |
| 2. NANOPARTİKÜLLER HAKKINDA BİLGİLER.....                                  | 11 |
| 2.1. Nanopartiküllerin sınıflandırılması .....                             | 12 |
| 2.1.1. Karbon bazlı nanopartiküller .....                                  | 12 |
| 2.1.2. Organik nanopartiküller .....                                       | 13 |
| 2.1.3. İnorganik nanopartiküller.....                                      | 13 |
| 3. SERYUM OKSİT NANOPARTİKÜLLER (NANOCERIA) ....                           | 15 |
| 3.1. Seryum Oksit Nanopartiküllerinin Sentez Yöntemleri .....              | 16 |
| 3.1.1. Seryum Oksit Nanopartiküllerinin Fiziksel Yöntemler ile Eldesi..... | 17 |
| 3.2. Seryum oksit Nanopartiküllerinin Kimyasal Yöntemler ile Eldesi.....   | 19 |
| 3.2.1. Çöktürme Yöntemi.....                                               | 19 |
| 3.2.2. Sol-jel yöntemi.....                                                | 21 |
| 3.2.3. Hidrotermal yöntem .....                                            | 23 |
| 3.2.4. Solvotermal yöntem .....                                            | 25 |
| 3.3. Seryum Oksit Nanopartiküllerinin Yeşil Sentez ile Eldesi .            | 26 |

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.3.1. Seryum oksit nanopartiküllerin bitki özleri kullanılarak yeşil sentezi .....   | 26 |
| 3.3.2. Seryum nanopartiküllerinin mikroorganizma kullanılarak yeşil sentezi .....     | 31 |
| 3.3.3. Seryum oksit nanopartiküllerin biyolojik ürün kullanılarak yeşil sentezi ..... | 33 |
| 3.4. Seryum Oksit Nanopartiküllerin Karakterizasyon Yöntemleri .....                  | 35 |
| 3.4.1. Mikroskopik Tabanlı Karakterizasyon Yöntemleri .....                           | 36 |
| 3.4.2. Spektroskopik Tabanlı Karakterizasyon Yöntemleri ...                           | 38 |
| 3.4.3. X Işını Kırınımı (XRD).....                                                    | 39 |
| 3.4.4. Dinamik Işık Salınımı (DLS).....                                               | 39 |
| 3.4.5. Zeta potansiyeli .....                                                         | 39 |
| 3.5. Seryum Oksit Nanopartiküllerin Uygulamaları .....                                | 40 |
| 3.5.1. Elektrokimyasal uygulamalar .....                                              | 40 |
| 3.5.2. Fotokatalitik uygulamalar .....                                                | 41 |
| 3.5.3. Adsorpsiyon uygulamaları .....                                                 | 43 |

## SİMGE LİSTESİ

|                                                      |                           |
|------------------------------------------------------|---------------------------|
| As                                                   | Arsenik                   |
| dk                                                   | Dakika                    |
| Fe                                                   | Demir                     |
| Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>                       | Demir (II,III) Oksit      |
| HCl                                                  | Hidroklorik Asit          |
| g                                                    | Gram                      |
| K                                                    | Kelvin                    |
| Ce                                                   | Seryum                    |
| CeO                                                  | Seryum oksit              |
| CeO <sub>2</sub>                                     | Seryum dioksit            |
| CeCl <sub>3</sub> ·7H <sub>2</sub> O                 | Seryum klorür heptahidrür |
| Ce(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O | Seryum nitrat heksahidrür |
| mL                                                   | Mililitre                 |
| nm                                                   | Nanometre                 |
| s                                                    | Saniye                    |
| °C                                                   | Santigrat Derece          |

## KISALTMA LİSTESİ

|        |                                             |
|--------|---------------------------------------------|
| AFM    | Atomik Kuvvet Mikroskopi                    |
| BET    | Yüzey Alanı Ölçüm Cihazı                    |
| DLS    | Dinamik Işık Saçılımı                       |
| DOM    | Doğal organik madde                         |
| EDX    | Enerji Dağılım X ışını spektrometresi       |
| FA     | Fulvik Asit                                 |
| FTIR   | Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi |
| HA     | Hümik Asit                                  |
| NP     | Nanopartikül                                |
| ROS    | Reaktif Oksijen Türleri                     |
| SEM    | Taramalı Elektron Mikroskobu                |
| TEM    | Geçirimli Elektron Mikroskop                |
| UV-VIS | Ultraviyole-Görünür Bölge                   |
| XPS    | Spektrofotometresi                          |
|        | X-Işını Fotoelektron Spektroskopi           |
| XRD    | X-Işını Difraktometresi                     |

## ŞEKİL LİSTESİ

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 2.</b> Nanopartiküllerin sınıflandırılması (Altammar, 2023) .....                                                           | 3  |
| <b>Şekil 3.</b> Seryum oksitin kübik florit yapısı (Swartz, 2002) .....                                                              | 5  |
| <b>Şekil 3.1.</b> CeO <sub>2</sub> nanopartikülünün sıvı ortamında lazer ablasyonu<br>(S. A. Abid et al., 2020) .....                | 7  |
| <b>Şekil 3.2.</b> Sol-jel sentez basamakları (Korsvik et al., 2007) .....                                                            | 9  |
| <b>Şekil 3.3.</b> Hidrotermal yöntem kullanılarak farklı seryum<br>öncüllerinden seryum oksit eldesi (Zdravković et al., 2015) ..... | 11 |
| <b>Şekil 3.4.</b> Nanopartiküllerin karakterizasyon yöntemleri (Titus et<br>al., 2018) .....                                         | 17 |

## **TABLO LİSTESİ**

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 3.1.</b> Bitki özleri kullanılarak seryum oksit nanopartiküllerin sentez çalışmaları .....     | 12 |
| <b>Tablo 3.2.</b> Mikroorganizma kullanarak seryum oksit nanopartiküllerin sentez çalışmaları.....      | 15 |
| <b>Tablo 3.3.</b> Biyolojik ürünler kullanılarak seryum oksit nanopartiküllerin sentez çalışmaları..... | 16 |
| <b>Tablo 3.4.</b> Literatürde seryum bazlı nanokompozitlerin boya giderim çalışmaları.....              | 22 |
| <b>Tablo 3.5.</b> Bitki özleri kullanılarak seryum oksit nanopartiküllerin sentez çalışmaları .....     | 23 |



## 1. GİRİŞ<sup>1</sup>

Nanoteknoloji, nano boyutta mühendisliği ve teknolojiyi kapsayan endüstri, elektronik ve sağlık alanında birçok uygulaması olan bir bilim dalıdır. Nanopartiküller 1-100 nm boyutlarına sahip nano boyutlu malzemeleri kapsamaktadır (Khan Ibrahim et al., 2017). Nanopartiküllerin nano ölçekli olmasıyla yığın malzemelerden farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir. Yığın malzemelerden daha iyi özellik göstermesiyle pek çok alanda nanopartiküller yenilikler sunarak malzemelerin özellikleri iyileştirmek ve daha verimli hale getirmek için sıklıkla kullanılırlar. Bu alandaki araştırmalar nanopartiküllerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini inceleyerek çeşitli uygulama alanlarındaki rollerini anlamayı hedeflemektedir. Seryum oksit nanopartikülleri bu bakımdan önemli bir tür olup çeşitli endüstriyel ve çevre uygulamalarında kullanım alanları geliştirilen bir malzemedir (Altammar, 2023).

Seryum yer kabuğunda bulunan nadir toprak metallerinin en sık rastlanan elementtir. Toprak metalleri arasında seryum oksit yakıt hücreleri, su arıtma sistemleri, UV koruyucu kaplamalar katalizörler, sensörler gibi birçok uygulama alanına sahiptir. Seryum oksit nanopartiküllerinin biyouyumluluğu, benzersiz yüzey kimyası ve yüksek stabilitesi nedeniyle birçok kullanım alanına sahiptir. Seryum

---

<sup>1</sup> FATOŞ AYÇA ÖZDEMİR OLGUN, İstanbul sağlık ve teknoloji üniversitesi mühendislik ve doğa bilimleri fakültesi, kimya mühendisliği bölümü, fatos.olgun@istun.edu.tr

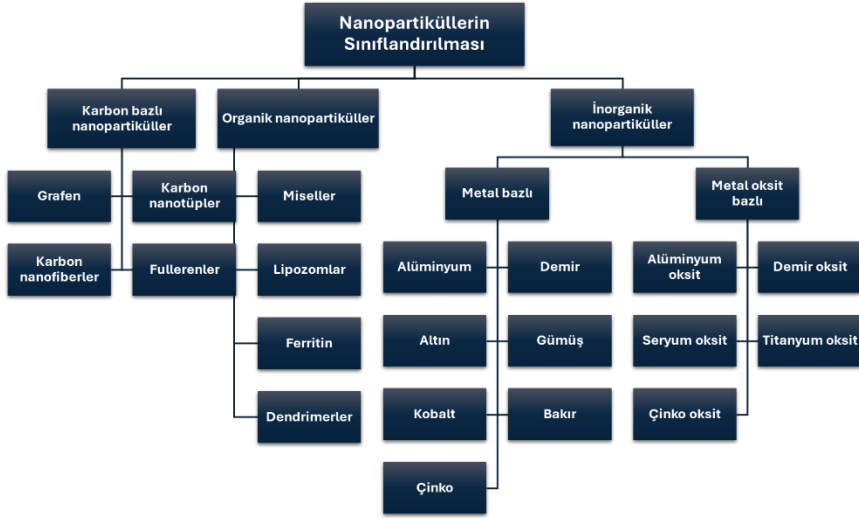
oksit nanopartiküllerin sentezi yukarıdan aşağı ve aşağıdan yukarıya birçok yöntemi kapsamaktadır. Seryum oksit nanoparçacıklarının farklı uygulamalar için sentez yöntemlerini gösteren çalışmalar yapılmıştır. Sentez koşullarındaki farklılıklar, nihai ürünü etkiler. Bu, sonuçta oluşan nanoyapıların farklı fiziksel/morfolojik ve kimyasal özelliklere sahip olacağı anlamına gelir; dolayısıyla her birinin davranışını etkiler. Nanoyapıların hedeflenen uygulamasını dikkate almak, sentez yöntemini belirlemek için çok önemlidir. Nanoyapıların son özellikleri, özellikle tıbbi uygulamalarda, bu özelliklerin biyolojik arayüzle etkileşimi etkilemesi nedeniyle oldukça önemlidir (Song et al., 2021) .

Seryum oksitin yeşil yaklaşımı ile sentezlenen nanopartiküllerin çevre dostu, sürdürülebilir, geleneksel fiziksel ve kimyasal sentez yöntemlerine göre kimyasal reaktiflerinin ve enerji tüketiminin azaltılması, kolayca ölçeklendirilebilir oluşuyla tercih edilmektedir. Yeşil sentez yaklaşımında çeşitli bitkiler, bakteriler, algler gibi biyolojik materyaller kullanılarak içerdikleri enzim, protein, amin grupları, fenolik bileşikler indirgeme yoluyla nanopartikül sentezi yapılmaktadır metal tuzlarının kararlı nanopartiküllere indirgenmesini kapsamaktadır (Nadaroğlu et al., 2017).

## **2. NANOPARTİKÜLLER HAKKINDA BİLGİLER**

Nanopartiküller, üç boyutu da 100 nm'den küçük nano boyutlarındaki yapıları içeren bir malzeme sınıfıdır. Nanopartiküllerin yüzey-hacim oranlarının büyük olması, iyi mukavemet göstermesi, kimyasal bir etkende reaktivitenin ve stabilitenin artması nedeniyle yüksek ölçekli malzemelere göre fiziksel, kimyasal ve optik özelliklerinin daha iyi olduğu gözlemlenmiştir (Khan Ibrahim et al., 2017). Bu gelişmiş özelliklere göre bir malzemenin özelliklerinin iyileştirilmesinde, ilaç taşıma teşhis-tedavi, görüntüleme sistemleri gibi biyomedikal ve tıp alanlarında, katalizörler, sensörler, güneş pilleri, su arıtımı, gıda ve kozmetik endüstrisinde sıklıkla kullanılmaktadır

**Şekil 2.** Nanopartiküllerin sınıflandırılması (Altammar, 2023)



Nanopartiküller, çeşitli bileşimlerine, boyut ve morfolojilerine göre sınıflandırılabilirler. Boyutlarına göre, sıfır boyutlu (nanonoktalar), tek boyutlu (1D), iki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D) olarak sınıflandırılabilirler. Nanopartiküller şekillerine göre ise, silindirik, küresel, düz, konik ya da düzensiz yapılı olarak da sınıflandırılırlar. En yaygın kullanılan sınıflandırma şekli ise Şekil 2.1.1’de gösterildiği üzere bileşimlerine göre yapılan sınıflandırmadır (Altammar, 2023).

## **2.1. Nanopartiküllerin sınıflandırılması**

### **2.1.1. Karbon bazlı nanopartiküller**

Karbon bazlı nanopartiküller; grafen, karbon nanotüpler, karbon fiberler gibi tamamen karbondan yapılmış nanomalzemelerdir (Marta et al., 2023). Grafenler karbonun

allotroplarından biridir ve iki boyutlu altıgen yapıda kafes şeklinde bulunur. Ticari uygulamalarda, otomotivde, katalizörlerde ve kanser tedavilerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Fullerenler  $sp^2$  hibritleşmeli ve küresel şekilli karbon atomlarından oluşan moleküllerdir. Yüksek mukavemeti ve iletkenliğinin iyi olması sebebiyle sensörlerde ve elektrokimyasal uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadırlar (Ealias et al., 2017).

### ***2.1.2. Organik nanopartiküller***

Organik nanopartiküller genellikle polimerik veya lipit bazlı malzemelerdir. Lipit bazlı olarak lipozomlar ve katı lipitler, kullanılmaktadır. Bunların dışında poliakrilik asit içeren kitosan, dekstran gibi maddeler de organik nanopartikül sentezinde kullanılmaktadır. Toksik olmaması ve biyoyumlulukları sebebiyle genellikle ilaç dağıtımı gibi biyomedikal alanlarda kullanılmaktadırlar (Natesan et al., 2023; Shatrohan Lal, 2014).

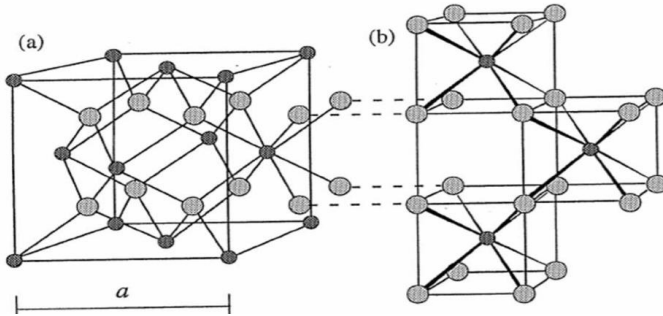
### ***2.1.3. İnorganik nanopartiküller***

İnorganik nanopartiküller metal ve metal oksit bazlı olmak üzere genellikle ikiye ayrılırlar. Metal nanopartiküller, yalnızca bir metalden oluşan tek atomlu ya da çok atomlu bulunabilen nanopartiküllerdir. Yaygın olarak Au, Ag, Fe, Zn, Cu ve Co metal nanopartiküller kullanılmaktadır. Bu nanopartiküller optik, termal, iletkenlik, manyetik, katalitik, antibakteriyel, özelliklerinin iyi olması sebebiyle birçok yerde kullanılmaktadır (Jin et al., 2023)

Metalik elementlerin birçoğu oksijen ile reaksiyona girerek metal oksit yapısını oluşturmaktadır. Genellikle metal bazlı nanopartiküller fiziksel ve kimyasal özellikleri değiştirmek için örneğin reaktivitesini arttırmak amacıyla metal oksit yapısı ile kullanılmaktadır. Metal oksit nanopartiküller katalizör, optik sensörler, biyomedikal uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Sık kullanılan metal oksit nanopartikülleri  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  nanopartikülleridir (Alhalili, 2023).

### 3. SERYUM OKSİT NANOPARTİKÜLLER (NANOCERIA)

Seryum (Ce), lantanit grubunda toprak elementleri arasında yer alır ve en reaktif toprak elementlerinden biridir. Seryum oksit nadir toprak oksit nanoparçacıklardan biridir. Nadir toprak elementleri genellikle 3+ değerlikli bulunabilirken seryum hem 3+ hem de 4+ değerlikli durumda bulunabilmektedir. Bu iki değerlikler arasındaki geçiş redoks tepkimeleriyle oluşmaktadır (Korsvik et al., 2007).



**Şekil 3.** Seryum oksitin kübik florit yapısı (Swartz, 2002)

Seryum oksit nanopartikülleri Şekil 2.2.1'de kübik florit yapıları yer almaktadır. Şekilde gözüken kristal kafeslerde  $Ce^{3+}$  ve  $Ce^{4+}$  oksidasyon durumundaki atomlar bir arada bulunur. Yük

dengelemek için kafes yapısında oksijen boşlukları oluşur. Bu durum katalitik reaksiyonlar için potansiyel alanlar oluşturmaktadır. Karışık değerlik durumları reaktif oksijen ve azotu temizlemekte yardımcı olmaktadır(Hailstone et al., 2009).

Katalitik aktivitelere bakıldığında seryum oksit nanopartikülleri farklı ortamlarda katalitik davranışlarını devam edebilme yeteneğine sahiptir ve reaktif oksijen türlerini (ROS) parçalayabilmektedirler. Katalitik aktivitelerinin  $Ce^{4+}$  oranına bağlı olduğu düşünülmektedir. Katalitik aktivitelerinin ana sebeplerinden biri de seryum oksit nanopartiküllerinin büyük oranda yüzey alanı/hacim oranına göre katalitik aktivitesinin arttığına dair yapılan çalışmalardır (Wu et al., 2021).

### **3.1. Seryum Oksit Nanopartiküllerinin Sentez Yöntemleri**

Seryum oksit nanopartikülleri, metal oksit nanopartiküllerini yukarıdan aşağı ve aşağıdan yukarı sentez yaklaşımları ile fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemler kullanılarak sentez edilmektedir. Yukarıdan aşağı sentez yaklaşımında yığın malzemelerin boyutunun nano ölçeğe küçülmesi işlemidir. Mekanik öğütme, lazer ablasyon, kimyasal aşındırma gibi yöntemler yer almaktadır(Nosrati et al., 2023). Aşağıdan yukarı sentez yaklaşımında ise nano yapı taşlarından çeşitli kimyasal ve biyolojik yöntemler ile nanopartikül sentezini içermektedir. Kimyasal çöktürme, Sol-jel yöntemi, lazer ve sprey pirolizi, kimyasal buhar biriktirme yöntemleri yer almaktadır. Biyolojik yöntemlerde ise bitki, bakteri enzimler, biyomoleküllerden



metabolitler elde edilerek nanopartikül sentezi yapılmaktadır (Mekuye et al., 2023) .

Seryum oksit nanoparçacıklarının farklı uygulamalar için sentez yöntemlerini gösteren çalışmalar yapılmıştır. Sentez koşullarındaki farklılıklar, nihai ürünü etkiler. Bu, sonuçta oluşan nanoyapıların farklı fiziksel/morfolojik ve kimyasal özelliklere sahip olacağı anlamına gelir; dolayısıyla her birinin davranışını etkiler. Nanoyapıların hedeflenen uygulamasını dikkate almak, sentez yöntemini belirlemek için çok önemlidir. Nanoyapıların son özellikleri, özellikle tıbbi uygulamalarda, bu özelliklerin biyolojik arayüzle etkileşimi etkilemesi nedeniyle oldukça önemlidir (Kokila et al., 2022).

### ***3.1.1. Seryum Oksit Nanopartiküllerinin Fiziksel Yöntemler ile Eldesi***

#### ***3.1.1.2. Bilyeli Öğütme Yöntemi***

Yukarıdan aşağı sentez yaklaşımı olan bilyeli öğütme mekanik bir kuvvet uygulanarak yığın maddelerin nano boyutlara küçültmesi işlemidir (Ullah et al., 2014). Bilyeli öğütme işleminde istenilen boyutlara öğütülebilmesi için düşük enerji, yüksek enerji, planet, titreşim kullanılarak birçok teknik geliştirilmiştir. Endüstride büyük ölçekli üretimler için tercih edilmektedir. Fakat uzun taşlama süresi, aglomerasyon, yüksek ekipman maaliyeti, yüksek enerji kullanımı, üretilen nanopartikül boyutunun homojen olmaması bu yöntemin dezavantajlarından (Balasubramanian et al., 2022).

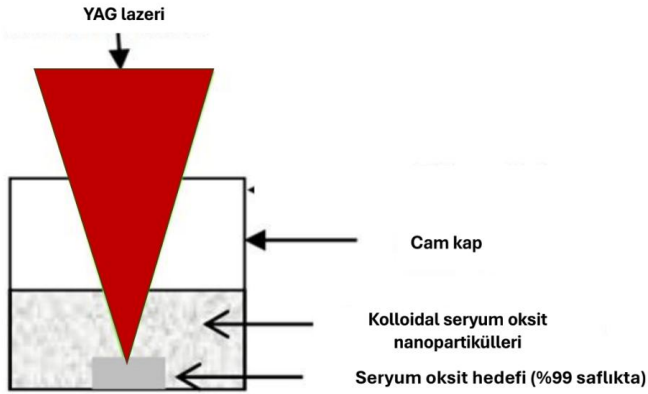
Seryum oksit nanopartiküllerin üretiminde yüksek enerjili yöntem tercih edilmektedir. Yapılan bir çalışmada 30 saat taşlama süresinde paslanmaz bir silindir kapta 40/1: seryum/bilye oranı ile 10 nm boyutunda seryum oksit nanopartikülleri sentezlenerek, taşlama süresi 50 saate çıkarıldığında aglomerasyon yani üretilen ince tozların birbirine tutunmasıyla daha büyük parçacık haline gelmesiyle edilen malzemenin homojen olmadığı gözlemlenmiştir (Yadav et al., 2012). Ayrıca yapılan başka bir çalışmada da bilyeli öğütme yöntemleriyle hazırlanan seryum nanopartikülün homojen olmadığı vurgulanmıştır (Chadwick et al., 2009).

### ***3.1.1.3. Lazer ablasyon***

Lazer ablasyon, yüzey atomlarının uzaklaştırılması için katı malzemeleri enerji kaynağı olarak lazer kullanılarak nanopartikül üretilen bir yöntemdir ve yukarıdan aşağı yaklaşımdır. Ablasyon kimyasal bağların kırılması (tek foton) ve çoklu foton uyarılması kapsamaktadır. Lazer ışını sıvı ya da gaz ortamda bulunan katı hedefi keserek nanopartikülün toz ya da kolloidal forma geçme işlemidir. Lazer ablasyon kimyasal yöntemlere göre daha basit, kolay ve çevre dostu bir yöntemdir. Fakat serbest hareketler nedeniyle nanopartikülün kristal yapısı, boyut dağılımı ve kümeleşmesini kontrol etmek zordur (Chadwick et al., 2009).

Yapılan bir çalışmada seryum oksit nanopartiküllerinin üretimi için preslenmiş  $\text{CeO}_2$  plakasına 7 ns darbe süresi ile suda lazer ablasyon yöntemi uygulanmıştır. Sentezlenen nanopartikül

boyutu 16-37 nm olarak ölçülmüştür (S. A. Abid et al., 2020). Aynı yöntem ile bir başka çalışmada 3.6 nm partikül boyutlu seryum oksit nanopartikülleri üretilmiştir (Takeda et al., 2014). Svetlich ve Lupin ise sıvı lazer ablasyon yöntemini su ve alkol ortamında sıvı fazın etkisini karşılaştırmak için bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada nanopartikül sentez hızının ortalama alkolde 25mg/saat suda ise 50mg/saat olduğu bulunmuştur (Svetlichnyi et al., 2016).



**Şekil 3.1.** *CeO<sub>2</sub> nanopartikülünün sıvı ortamında lazer ablasyonu*

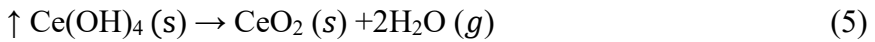
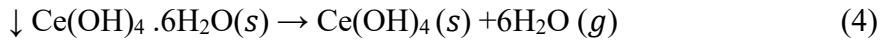
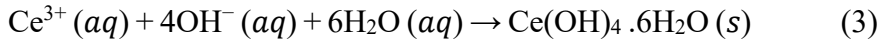
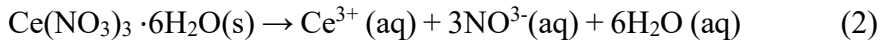
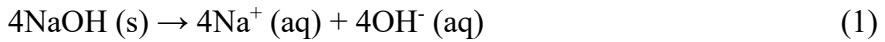
(S. A. Abid et al., 2020)

### **3.2. Seryum oksit Nanopartiküllerinin Kimyasal Yöntemler ile Eldesi**

#### **3.2.1. Çöktürme Yöntemi**

Çöktürme yöntemi, aşağıdan yukarı sentez yaklaşımı esasına dayanan, metal tuzunun sıvı ortamda baz eklenerek indirgenmesiyle

metal oksit nanopartiküllerin oluşmasıdır. Bu yöntemde pH, çözücü, sıcaklık gibi parametreler nanopartikülün boyutunu doğrudan etkilememektedir (Kolalahalam et al., 2019). Elde edilen nanopartiküller ısı enerjisi ile kristal yapıları arttırılabilmektedir. Çöktürme yönteminde kimyasal reaksiyon, çekirdeklenme, büyüme, Ostwald olgunlaşması, aglomerasyon ve stabilizasyon aşamaları ile çöktürme gerçekleşir. Ardından sıvı faz nanopartikülün özelliklerine göre katıdan ayrıştırılır ve katı madde kurutulur. Eş çöktürme yöntemi ise farklı iyonik metallerin birlikte çöktürülmesiyle gerçekleşmektedir (Mr Sharad Kamble et al., 2023).



Yapılan bir çalışmada seryum nitrat heksahidrat  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ve Setiltrimetil amonyum bromür çözeltisi karıştırılmıştır ve ardından sodyum hidroksit çözeltisi damla damla çözeltiye eklenerek, 2 saat oda sıcaklığında karıştırıldıktan sonra çöken nanopartiküller sıvı fazdan ayrılmıştır. Elde edilen seryum oksit nanopartiküllerinin partikül boyutu 15.39 nm olarak ölçülmüştür (Suresh et al., 2013). Bir diğer çalışmada  $\text{CeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  ve  $\text{NH}_4\text{OH}$  çözeltileri kullanarak oda sıcaklığında çöktürme

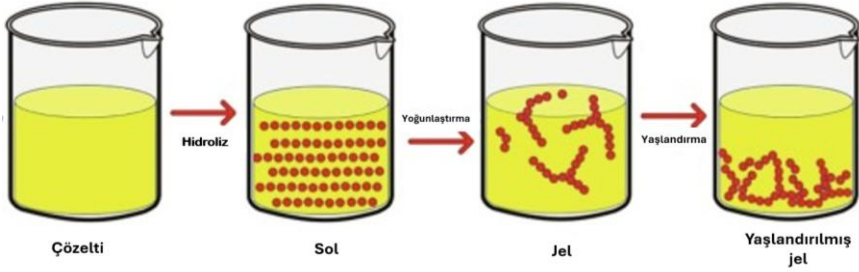
yöntemiyle 45 nm boyutlu seryum oksit nanopartikülleri sentezlenmiştir (Hassanzadeh-Tabrizi et al., 2010).

### **3.2.2. Sol-jel yöntemi**

Sol-jel yöntemi, bir çözeltiyi genellikle pH değerini değiştirerek çift fazlı jel formu oluşturulması temeline dayanır. Hidroliz ve polikondenzasyon tepkimeleri ile çözücüler, yaşlandırma yöntemiyle kolloidal parçacıkları jel formuna dönüşür. Bu jel yapısı sıvı-katı formunda olduğundan sıvı fazı ortamdan uzaklaştırarak katı kısımda nanopartikül sentezlenmiş olur (Meena et al., 2021). Sentezlenen nanopartikül yüksek saflık ve homojenlikte olur ve oda sıcaklığında gerçekleşmektedir. Sol-jel yöntemi mikrodalga, yeşil sentez destekli birçok nanopartikül sentez yöntemleri ile iyileştirilebilmektedir (Fudala et al., 2021). Seryum oksit nanopartiküllerinin sol-jel yöntemiyle sentez adımları;

- Çözeltinin hazırlanması; homojen bir çözelti oluşturulması için seryum öncü kimyasalı uygun bir çözücüde çözülür ve polimer gibi bir dengeleyici kimyasal ile karıştırılır.
- Hidroliz ve yoğunlaştırma; hazırlanan çözeltideki seryum öncü kimyasalı ile su arasındaki reaksiyonu ve seryum-oksijen arasındaki kimyasal bağların oluşumuyla jel oluşturulması yani yoğunlaştırma işlemlerini içerir.
- Yaşlandırma; sentezlenen jelin bir süre bekletilerek olgunlaştırma işlemidir ve bu sayede jel daha yoğun hale gelir, nanopartikül boyutu ve şekli stabil kalır.

- Kurutma; olgunlaşan jeldeki sıvı fazı ortamdan uzaklaştırması ve buharlaştırma işlemlerini kapsar.
- Kalsinasyon; içerdiği diğer organik maddeler ve kullanılan stabilizatörü uzaklaştırmak için daha yüksek sıcaklıklarda nanopartiküller ısıtılır (Azam et al., 2022).



**Şekil 3.2** Sol-jel sentez basamakları (Korsvik et al., 2007)

Yapılan bir çalışmada 5-20 nm seryum oksit nanopartiküllerini seryum nitrat, asetat ve asetilasetonat, stabilizatör olarak amonyum hidroksit kullanarak sentezlemiştir (Fudala et al., 2021). Bir diğer çalışmada öncül maddenin etkisini gözlemlemek için farklı konsantrasyonlarda çözelti hazırlanmış ve oda sıcaklığında 13.6-14.6 nm seryum oksit nanopartikülleri sentezlenmiştir (Fudala et al., 2021). Aynı başlangıç kimyasalları kullanarak sentez sıcaklığı yükseltilerek nanopartikül katalizörleri sentezlenmiştir (Tambat et al., 2016). Stabilizatör etkisi gözlemlemek içinde yapılan bir çalışmada stabilizatör olarak jelatin ve öncü kimyasal olarak seryum nitrat hekzahidrat kullanılarak farklı

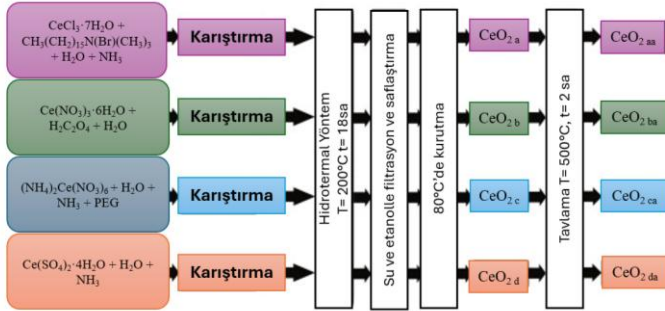
oranlarda seryum oksit nanopartikülleri sentezlenmiştir. Çalışmanın sonucunda seryum öncü kimyasal miktarı arttırıldığında ve jelatinin miktarı azaldıkça nanoparçacıkların boyutunun büyüdüğü gözlemlenmiştir ve stabilizatörün miktarının sentez sırasında dikkat edilmesi gerektiği vurgulanmıştır (Ioannou et al., 2023)

### **3.2.3. Hidrotermal yöntem**

Hidrotermal Roderick Murchison tarafından yüksek basınç ve sıcaklıkta suyun kayalarının oluşumunda meydana getirdiği eylem olarak tanımlamıştır. Nanopartiküllerin sentezinde hidrotermal yöntem yüksek basınç ve sıcaklık altında suyun metal ile reaksiyona girerek kristallerin oluşturulması işlemidir. Hidrotermal yöntem, yüksek basınç gerektiğinden otoklavda gerçekleşmektedir (Gan et al., 2020). Kullanılan metal hidroksit ve metal alkoksitleri metalin çözeltide çözünmesini ve metal iyonlarının stabilizasyonunu sağlar. Otoklavda sıcaklık farkı oluşturulur ve çözelti aktarılır. Sıcaklık farkıyla iyonlar düşük sıcaklıktaki bölgeye doğru ilerler ve kristaller birikir. Ardından oluşan kristaller yıkanır ve kurutulur. Sentezlenen nanopartiküller yüksek kristallikte sentezlenmektedir fakat otoklav sırasında reaksiyonun gözlemlenememesi ve cihaz maliyetinin fazla olması bu yöntemin dezavantajlarından (N. Abid et al., 2022).

Seryum oksit nanopartiküllerinin hidrotermal yöntem kullanılan bir çalışmada Seryum (III) nitrat hekzahidrat [ $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ] ve , üre [ $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ ] karıştırarak saf suda çözelti

hazırlanmıştır. Ardından otoklavda 180°C ve 8 saat reaksiyon gerçekleştirilmiştir. Elde edilen nanopartiküller kurutulduktan sonra boyut analizi yapılmıştır. 15 nm boyutunda seryum oksit nanopartikülleri sentezlenmiştir (Sankar et al., 2021). Bir başka çalışmada trisodyum fosfat çözeltisine seryum nitrat eklenerek 180°C 15 saat hidrotermal yöntemi uygulanmıştır (Syed Khadar et al., 2019). Öncüllerin etkilerini karşılaştırmak için yapılan bir çalışmada 4 farklı öncül bileşikler  $[\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$ ,  $\text{Ce}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{Ce}(\text{NO}_3)_6$  ile seryum oksit nanopartikülleri hidrotermal yöntem kullanılarak sentezlenmiştir.  $\text{CeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  hariç diğer öncüller ile sentezlenen nanopartiküllerin kristal yapıları düzgün olduğu gözlemlenmiştir.  $\text{Ce}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  ile sentezlenen nanopartiküllerde adsorbe edilmiş  $\text{SO}_4^{2-}$  iyonu gözlemlenmiş ve aglomerasyona neden olduğu için tercih edilmemesi gerektiği vurgulanmıştır (Zdravković et al., 2015).



**Şekil 3.3.** Hidrotermal yöntem kullanılarak farklı seryum öncüllerinden seryum oksit nanopartikülleri eldesi (Zdravković et al., 2015)



### **3.2.4. Solvothermal yöntem**

Solvothermal yöntem, yüksek basınç ve sıcaklık altında bir çözücü kullanılarak, çözücünün metal tuzu ile reaksiyona girmesiyle metal oksit nanopartiküllerin sentezlenmesi temeline dayanır. Bu yöntemde çözücü olarak su, metanol, polioller, dimetilformamid veya bu kimyasalların karışımı kullanılır. Basınç değiştirilerek sentezlenen kristallerin özellikleri ve boyutları belirlenmektedir ve reaksiyon sıcaklığının değiştirilmesiyle kullanılan çözücünün polaritesi, yoğunluğu, reaksiyon kinetiği gibi parametrelerde değişmektedir (Ouyang et al., 2019).

Solvothermal yöntem kullanılarak yapılan bir çalışmada, seryumnitrat hekzahidrat ve dietilen glikol 1mL, 2mL ve 5mL su ile çözülmüş ve dietil glikol çözeltisi eklenmiştir. 180°C’de 6 saat otoklavda bekletilerek 48 nm, 98 nm ve 210 nm boyutlarında seryum oksit nanopartikülleri sentezlenmiştir (L. Li et al., 2017). Solvothermal yöntem ile sentezlenen bir başka çalışmada sodyum hidroksit ve seryum nitrat hekzahidrat karışımı ile hazırlanan çözelti 180°C’de 12 saat otoklavda bekletilmiştir. Reaksiyon süresinin belirlenmesi için, aynı numune 24 saat otoklavda bekletilmiştir. XRD karakterizasyon çalışmalarında 12 saat otoklavda bekletilen numunenin parçacık boyutu 12.8 nm, 24 saat tutulan numune de ise 9.4 nm olduğu gözlemlenmiştir (Jayakumar et al., 2017). Bir başka çalışmada çöktürme yöntemiyle sentezlenen seryum oksit nanopartiküller, susuz alkol ile karıştırılarak 180°C’de 18 saat

otoklavda ısıtılmıştır. Sentezlenen nanopartiküller 10 nm boyutta olduğu gözlemlenmiştir (Pang et al., 2019). Yapılan bu üç çalışmada da seryum oksit nanopartiküller, sentezlendikten sonra adsorplama yeteneğini gözlemlemek için çalışmalar yapılmıştır.

### **3.3. Seryum Oksit Nanopartiküllerinin Yeşil Sentez ile Eldesi**

Yeşil sentez; kimyasal ve fiziksel yöntemlerin dışında nanopartiküllerin sentezlenmesinde çevre dostu bir yol sağlar ve diğer yöntemler gibi zararlı toksik kimyasal kullanımları gerektirmez. Sentezde bitkiler, bakteriler, algler gibi biyolojik maddeler kullanılarak içerdikleri enzim, protein, amin grupları, fenolik bileşikler indirgeme yoluyla nanopartikül sentezi yapılmaktadır (Nadaroğlu et al., 2017).

#### ***3.3.1. Seryum oksit nanopartiküllerin bitki özleri kullanılarak yeşil sentezi***

Bitkiler, metal oksit nanopartiküllerin çevre dostu sentezini kolaylaştıran birtakım biyoaktif maddeler içermektedir. Bu bitki özleri metal tuzlarını azaltabilen ve stabilize edici güçlü fitokimyasal ajanlara sahiptir (Naikoo et al., 2021). Bitki özleri hazırlamak için bitkilerin kök, gövde, kabuk, yaprak, polen, çiçek kısımları kullanılır. Ekstrakt hazırlanırken yeşil sentez sırasında bitki özünde bulunan fonksiyonel gruplar nanopartikül yüzeylerini kapsüller ve biyoyumlu, biyolojik olarak parçalanabilen, toksik olmayan ürünlere dönüştürür. Bitki bazlı CeO<sub>2</sub> nanopartikülleri ekstrakt ile metal tuzunun reaksiyonunun laboratuvar koşullarında kısa zaman

aralığında meydana geldiği basit bir prensip ile üretilir (Nadeem et al., 2020). Son zamanlarda, kimyasal yöntemlerin neden olduğu çevresel sorunları azaltmak için yeşil bir yaklaşım kullanılarak nanomalzemelerin sentezi yaygın olarak gerçekleştirilmektedir. Seryum oksit nanopartiküllerin literatürde bitki bazlı bitkiler ile sentezlendiği çalışmalar Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 3.1.** Bitki özleri kullanılarak seryum oksit nanopartiküllerin sentez çalışmaları

| ÖNCÜL                                                | BİTKİ                   | BİTKİ BÖLÜMÜ | PARTİKÜL BOYUTU | UYGULAMA ALANI                              | REFERANS                    |
|------------------------------------------------------|-------------------------|--------------|-----------------|---------------------------------------------|-----------------------------|
| $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | <i>Aleo barbadensis</i> | yaprak       | 63.6nm          | Antibakteriyel aktivite                     | (Priya et al., 2014)        |
| $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | <i>Aleo vera</i>        | yaprak       | 50nm            | -                                           | (Gel et al., 2014)          |
| $\text{CeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$            | <i>Gloriosa superba</i> | yaprak       | 5nm             | Antibakteriyel aktivite                     | (Arumugam et al., 2015)     |
| $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | <i>O. majorana</i>      | yaprak       | 10-70nm         | Antioksidan aktivite ve antikanser aktivite | (Aseyd Nezhad et al., 2020) |
| $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | <i>Moringa oleifera</i> | yaprak       | 17nm            | Antimikrobiyal aktivite                     | (Eka Putri et al., 2021)    |

|                                                      |                            |        |        |                                                   |                        |
|------------------------------------------------------|----------------------------|--------|--------|---------------------------------------------------|------------------------|
| $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | <i>Olea europaea</i>       | yaprak | 24nm   | Antibakteriyel aktivite                           | (Maqbool et al., 2016) |
| $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | <i>Rheum turkestanicum</i> | yaprak | 30nm   | Fotokatalitik aktivite<br>Organik boya giderimi   | (Sabouri et al., 2022) |
| $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | <i>Terminalia catappa</i>  | yaprak | 58.7nm | Antibakteriyel aktivite                           | (Ray et al., 2023)     |
| $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | <i>Hibiscus sabdariffa</i> | çiçek  | 3.9nm  | -                                                 | (J, 2014)              |
| $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | <i>Musa sapientum</i> L.   | meyve  | 13nm   | Antibakteriyel aktivite<br>Fotokatalitik aktivite | (Miri et al., 2021)    |
| $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | <i>Musa sapientum</i> L.   | tohum  | 4-13nm | Antibakteriyel aktivite                           | (Amaliya, 2021)        |
| $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | <i>Amomum subulatum</i>    | tohum  | 0.5 µm | Antibakteriyel aktivite                           | (Zafar et al., 2021)   |

Bitki bazlı yapılan bir yeşil sentez çalışmasında biyolojik indirgeme ajanını *aloe vera* bitkisinin yaprağı kullanılarak seryum nitrattan seryum oksit nanopartikülleri sentezlemiştir. Sentezlenen nanopartiküller küresel şekilli ve 50 nm boylarında olduğu tespit edilmiştir (Gel et al., 2014). *O. Majorana* yaprak ekstratı ile yapılan bir çalışmada nanopartikülün boyutlarının 10-70nm arasında olduğu ve nanopartikülün fenolik birleşiklere bağlandığı gözlemlenmiştir. Ardından nanopartikülün antioksidan ve antikanser aktiviteleri incelenmiş ve sentezlenen nanopartikülün antikanser ajanı olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır (Aseyd Nezhad et al., 2020). *Moringa oleifera* yaprak özütünün kullanıldığında, 4-5 saatlik bir yeşil sentez çalışmasıyla kübik yapıda 17 nm boyutlarında seryum oksit nanopartikülleri sentezlenmiştir ve antimikrobiyal aktiviteleri incelenmiştir (Eka Putri et al., 2021). Bir başka makalede *olea europea* ekstratları kullanılarak düzgün tek düze ve küresel 24 nm boyutlarında seryum oksit nanopartikülleri sentezlemiştir. Antimikrobiyal alışmalar yapılp bakteri ve mantarlara karşı durdurucu etki göstermiştir. Bu çalışmanın sonunda bitki özleriyle sentezin kimyasal sentezdeki çevresel etkileri azalttığı ve sentezlenen nanopartikülün biyomedikal uygulamalarda kullanılabileceği sonucuna varılmıştır (Maqbool et al., 2016). Sol-jel yöntemiyle seryum oksit nanopartiküllerin *Rheum Turkestanicum* yaprak özleriyle biyosentezi yapılmıştır. Nanopartiküllerin karakterizasyonu sonucu kübik florit şekilli 30 nm boyutlarında seryum oksit nanopartikülleri elde edilmiştir. Ardından su

kirleticileri metilen mavisi ve rhodamine B boyalarının giderimi için nanopartiküllerin fotokatalitik aktivitesi incelenmiştir (Sabouri et al., 2022). Bir başka makalede *Terminalia catappa* bitki özütü kullanılarak seryum oksit nanopartikülü sentezlenmektedir. Çeşitli karakterizasyon yöntemleri kullanılarak 58.7 nm partikül boyutu saptanmıştır. Antibakteriyel etkinliği değerlendirilip katalitik uygulamalarda ve ilaç taşınımında kullanılabileceği öngörülmüştür (Ray et al., 2023).

### ***3.3.2. Seryum nanopartiküllerinin mikroorganizma kullanılarak yeşil sentezi***

Seryum oksit nanopartiküllerinin yeşil sentezinde bakteriler kullanılmasıyla istenilen boyutta nanopartikül elde edilebilmektedir. Mikroorganizma türleri kullanılarak CeO<sub>2</sub> nanopartiküllerin yeşil sentezi güvenilir, kolay çevre dostu ve uygun maliyetli bir üretim yöntemidir. Heterosiklik yapılar, proteinler ve enzimler gibi mikrobiyal türevler seryum tuzlarının nanopartiküllere indirgenmesinde ve stabilize etmesinde etki göstermektedir (Nadeem et al., 2020). Literatürde mikroorganizma kullanılarak yapılan birkaç çalışma Tablo 2.2.3.2.1' de verilmiştir.

**Tablo 3.2. Mikroorganizma kullanarak seryum oksit nanopartiküllerin sentez çalışmaları**

| ÖNCÜL                                              | MİKROORGANİZMA           | PARTİKÜL BOYUTU | UYGULAMA ALANI                           | REFERANS                 |
|----------------------------------------------------|--------------------------|-----------------|------------------------------------------|--------------------------|
| $\text{CeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$          | <i>Aspergillus niger</i> | 5-20 nm         | Antibakteriyel aktivite                  | (Gopinath et al., 2015)  |
| $\text{CeN}_3\text{O}_9 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | <i>Humicola sp.</i>      | 10-20 nm        | Antibakteriyel aktivite                  | (Khan et al., 2013)      |
| $\text{CeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$          | <i>Curvularia lunata</i> | 5-20 nm         | Antibakteriyel aktivite                  | (Munusamy et al., 2014)  |
| $\text{CeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$          | <i>Fusarium solan</i>    | 20-30 nm        | Antibakteriyel ve antibiyofilik aktivite | (Venkatesh et al., 2016) |

*Aspergillus niger* özütü ile yapılan seryum oksit nanopartikül sentezinde küresel yapıda ortalama 5 nm boyutunda seryum oksit nanopartikülleri sentezlenmiştir. FTIR analizinde indirgenme ajanlarının fenol ve karboksilik grupların rol oynadığı gözlemlenmiştir (Gopinath et al., 2015). *Humicola* mantarı ile



küresel şekilli seryum oksit nanopartiküller sentezlenmiş, ardından Alzheimer ve Parkinson hastalıklarının tedavisinde kullanılabileceğine dair çalışmalar yapılmıştır. Bakteriyle çalışılan nanopartiküllerde antioksidan özelliklerin iyi olduğu sonucuna varılmış fakat patojenite oranının fazla olması, uzun kültürleme çalışmaları ve kontaminasyon sorunları gibi dezavantajları saptandı (Khan et al., 2013). Bir başka çalışmada *Curvularia lunata* kullanılarak küresel şekilli seryum oksit nanopartikülleri sentezlenmiş ve patojenlere karşı etkisi araştırılmıştır (Munusamy et al., 2014).

### ***3.3.3. Seryum oksit nanopartiküllerin biyolojik ürün kullanılarak yeşil sentezi***

Biyolojik ürün bazlı seryum oksit nanopartikülleri bitkilerin ve mikrobiyal ürünler ile sentez yönteminin aksine daha ölçeklendirilebilir, güvenli ve biyouyumlulukları fazladır. Örneğin yumurta beyazı kullanılarak içerdiği proteinler ile hidroksil, fenol, eter gruplarının seryumu indirgemesiyle yaklaşık 10 nm boyutunda seryum oksit nanopartikülleri sentezlenmiştir (Kargar et al., 2015). Biyolojik ürün kullanımı, organik polimerlerin kaplama çalışmalarını da kapsamaktadır. Dekstran, selüloz gibi biyolojik ürünler kullanılarak da hem kaplama hem de seryum oksit nanopartikülün üretilmesinde yer almıştır (Alpaslan et al., 2015). Tablo 3.2.de literatürde biyolojik ürün kullanılarak sentezlenen seryum oksit nanopartiküller verilmiştir. Sentezlenen

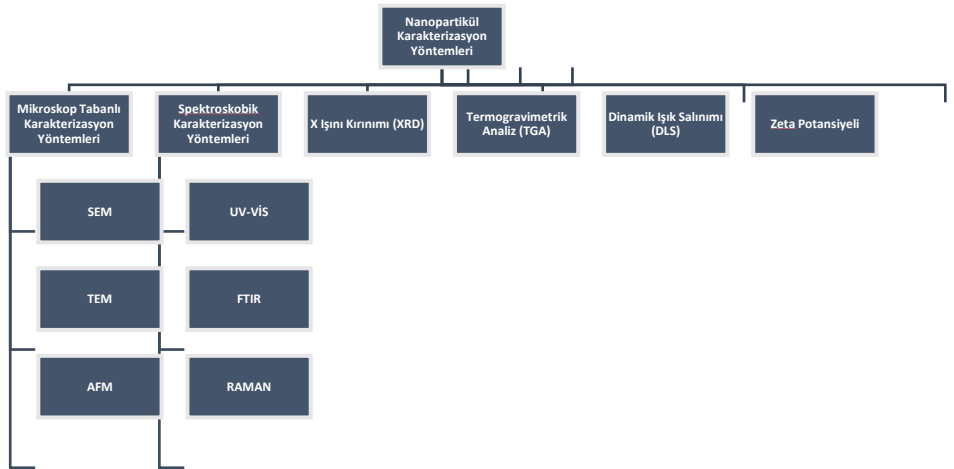
nanopartiküller ilaç dağıtımında ve gıda paketlemesinde kullanılabileceği gözlenmiştir.

**Tablo 3.3.** *Biyolojik ürün kullanılarak seryum oksit nanopartiküllerin sentez çalışmaları*

| ÖNCÜL                                                | BİYOLOJİK ÜRÜN    | PARTİKÜL BOYUTU | UYGULAMA ALANI                       | REFERANS                |
|------------------------------------------------------|-------------------|-----------------|--------------------------------------|-------------------------|
| $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | Yumurta proteini  | 10-17 nm        | İn-vitro toksisite çalışmaları       | (Kargar et al., 2015)   |
| $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | Bal               | 23 nm           | Nörotoksisite etki                   | (Darroudi et al., 2014) |
| $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | Dekstran          | 5-10 nm         | Antikanser aktivite                  | (Alpaslan et al., 2015) |
| $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | Polietilen glikol | 2 nm            | UV-absorpsiyon iyileştirilmesi       | (Qi et al., 2012)       |
| $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | Pektin            | 30-40 nm        | Antimikrobiyal, antioksidan aktivite | (Patil et al., 2016)    |
| $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | Kitosan           | 4 nm            | Elektrokimyasal çalışma              | (Kaushik et al., 2009)  |
| $\text{CeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$            | Tanik asit        | 10 nm           | Antimikrobiyal aktivite              | (Kumar et al., 2018)    |

### 3.4. Seryum Oksit Nanopartiküllerin Karakterizasyon Yöntemleri

Sentezlenen nanopartiküllerin şekil, yüzey alanı, boyutu, yüzey yükü, yapılarını fiziksel ve kimyasal olarak tanımlamak ve incelemek için yöntemlere ihtiyaç vardır. Nanopartiküllerin karakterizasyonu mikroskopik ölçümler, spektroskopik ölçümler, x-ışını kullanılan ölçümler, ışık saçınım ölçümleri ve zeta potansiyeli gibi yöntemler ile nanopartiküller karakterize edilmektedir (Titus et al., 2018).



**Şekil 3.4.** Nanopartiküllerin karakterizasyon yöntemleri (Titus et al., 2018)

Nanopartikül oluşumunu incelemek ve sentez sonucu oluşan ürünün kararlılığını doğrulanması için UV-görünür bölge, spektrofotometre cihazı kullanılmaktadır. Boyut ve morfoloji

analizleri için SEM, TEM, AFM, STM ve DLS cihazları ile kristalografik yapı tayini ve topoloji incelenebilmektedir. Yapı analizlerinde XRD ve XPS cihazları ile nanopartiküllerin kristal yapısı, yüzey analizleri tayin edilebilmektedir. Element analizi için EDX, XAS cihazlarıyla nanopartiküllerin saflığı ve geometrisi incelenebilmektedir. Optik karakterizasyon analizleri için FTIR cihazı ile absorpsiyon, boyut şekil ve bileşimler karakterize edilebilmektedir. Yüzey analizi için BET cihazı kolloidal kararlılığı, yüzey yükü ve gözenek boyut dağılımı incelenebilmektedir (Kaur et al., 2019).

### **3.4.1. Mikroskopik Tabanlı Karakterizasyon Yöntemleri**

#### ***3.4.1.1. Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM)***

Madde ile elektron etkileşime girerek bir elektron demetinin maddede geçişini görüntüleyen bir ölçüm cihazıdır. Malzemenin kristal yapısını, şekli, boyutu gibi morfolojik yapısını incelemek ve karakterize etmek için kullanılır (Kaur et al., 2019). Bu yöntemle birçok metal, metal oksit, polimerik ve manyetik nanopartiküller geçirimli elektron mikroskopu ile karakterize edilebilmektedir. Nanopartiküllerin ölçümü için ön işleminden geçirmek gerekir, çünkü görüntülemelerde elektron yoğunluğu yüksek maddeler kullanılır ve malzemenin iletken olması gerekir. Nanopartiküller genelde karbon tabakası ile kaplanarak ölçüm yapılır. Bir diğer husus ise malzemenin belirli bir kalınlığa sahip olması(Joudeh et al., 2022).

### **3.4.1.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)**

Taramalı elektron mikroskopunun temel prensibi maddeyi yoğunlaştırılmış elektron demeti ile tarayarak görüntülenmesini sağlamaktır. Elektron madde etkileşimi sırasında geri saçılan elektronlar ve sekonder elektronlar toplanıp 3 boyutlu görüntü elde edilir (Joudeh et al., 2022). Elektron etkileşimlerinden dolayı metal partiküller harici diğer nanopartiküller ön işlemlerden geçirilerek görüntülenmeye uygun hale getirilmektedir (Crouzier et al., 2019).

### **3.4.1.3. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AKM)**

Malzemenin üç boyutlu görüntüsünü ve yüzey ölçümünü analiz etmek için kullanılan prop-malzeme arasındaki kuvvet-mesafe ölçümü prensibine dayanan bir karakterizasyon mikroskobudur. AFM cihazında mikro ölçekli bir probun madde yüzeyini tarayarak fiziksel özelliklerinin ölçülmesini sağlar. Prop bir lazer ışını ile güçlendirilir. Tarama işlemi sırasında bir potansiyel enerji farkı oluşur ve bu probun dikey yönde gitmesini sağlar. Bu hareket bir sinyale dönüşür ve geri besleme döngüsü kurularak malzemenin üç boyutlu görüntüsü çizilir. Diğer mikroskop türlerine kıyasla, daha hassas, kullanım alanları geniş ve kolaydır (Crouzier et al., 2019). Dezavantaj olarak probun boyutunun analiz edilecek malzemenin boyutundan küçük olması nedeniyle hatalı ölçüm sonuçlarına sebebiyet vermesi görülür (Modena et al., 2019) .

### **3.4.2. Spektroskopik Tabanlı Karakterizasyon Yöntemleri**

#### ***3.4.2.1. Ultraviyole-Görünür Bölge Spektroskopisi (UV-VIS)***

UV-Görünür Bölge Spektroskopisi, Lambert-Beer kanununa göre UV ve görünür bölgedeki dalga boylarında absorbe ışımının miktarı ölçülür. Nanopartiküllerin karakterizasyonunda parçacık boyutunu belirlemek, kararlılıklarını, aglomerasyon özelliklerini incelemek ve konsantrasyonunu belirlemek için kullanılır (Borowska et al., 2023). Nanopartiküllerin yüzeye yakın kırılma indisleri duyarlı olduğundan bu yöntem uygun olmaktadır.

#### ***3.4.2.2. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR)***

Kızıl ötesi ışınların maddeden geçirilip emisyon ve absorpsiyon spektrumları incelenerek nanopartiküllerin yük ve yüzey kimyasını analiz etmeye yardımcı olan karakterizasyon yöntemidir. FTIR özellikle metal nanopartiküllerin yüzey yükleri ve organik grupların tespiti için kullanılmaktadır (Thain, 2022)

#### ***3.4.2.3. Raman Spektroskopisi***

Raman spektroskopisi madde üzerine gönderilen lazer ışının raman saçılma prensibine göre çalışan bir titreşim spektroskopi çeşididir. Nanopartiküllerde yapısal karakterizasyon için kullanılmaktadır. Karbon bazlı nanopartiküllerde genel karakterizasyon yöntemi olarak tercih edilir. Bu kullanım dışında metal oksit ve nanotüplerin karakterizasyonunda da kullanılmaktadır (Z. Li et al., 2023).

### **3.4.3. X Işını Kırınımı (XRD)**

X ışını kırınımı yöntemiyle kristal malzemenin kristalografik yapısını, partikül boyutlarını, kristal kusurlarını ve elementer yapılarını görüntülenebilmektedir (Kiani, 2023) X ışını katot tüpünde üretilir, filtrelenir, kristal yapıya gönderilir. Işın malzemenin kristal yapısının içerdiği her element yapıdaki dizilişlere göre kırılır. XRD polimer nanokompozit bileşimlerinde yapı tayininde ve proses hızı çalışmalarında kullanılmaktadır (Nayak et al., 2007).

### **3.4.4. Dinamik Işık Salınımı (DLS)**

Nanopartiküllerin kolloidal çözeltilerde lazerden ışık saçılımı ile parçacık boyutunu ölçen karakterizasyon yöntemidir. Çözeltinin içerisindeki partiküller browian hareketlerinden dolayı gelen ışığın saçılmasına göre çalışır. DLS ölçümü bir parçacıktan saçılan ışığın frekansının yoğunluk sinyaline dönüştüğü sistemlerdir. Bu sayede saçılan ışığın değişmesiyle molekül parçacık boyutu ölçülebilir (Bhattacharjee, 2016).

### **3.4.5. Zeta potansiyeli**

Zeta potansiyeli nanopartiküllerdeki yüzey yükünün bir ölçüsüdür. Yüzey yükü belli bir elektrik alanında nanoparçacık çözeltisinden zıt yüklü iyonlar geçirilir. Doppler etkisinden kaynaklanan frekanstaki hidrodinamik kaymalar ile yüzey ve sıvı tabaka arasında potansiyel fark ölçülür. Nanopartikülün

karakterizasyonu, yüzey şekilleri, kararlılığı ve formülasyondaki yüzey yükünü incelemede kullanılmaktadır (Xu, 2008).

### **3.5. Seryum Oksit Nanopartiküllerin Uygulamaları**

Seryum oksit nanopartiküller, süper kapasitörler, yakıt hücreleri, fotovoltaiik hücreler, yakıt hücrelerinde oksidasyon katalizi, fotovoltaiik hücreler, mekanik ve kimyasal parlatma, korozyon kaplamaları, ilaç taşıma, biyomedikal uygulamalar ve otomobil egzoz işlemi dahil olmak üzere çeşitli ürünlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Seryum, toksik olmaması, yüksek fotokimyasal kararlılığı ve uygun maliyeti nedeniyle çevreden kirleticileri ortadan kaldırmak için bir fotokatalitik yarı iletken olarak kullanılmıştır (Andreescu et al., 2014).

#### ***3.5.1. Elektrokimyasal uygulamalar***

Seryum oksit nanopartikülleri kristal yapılarından ve yüksek iletkenlik özelliklerinden dolayı elektrokimyasallarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrokimyasal sensörlerde oksijen transfer etmesi, redoks reaktivesinin değıştirilebilmesi, yüzey reaktivesi ve katalitik aktivite göstermesiyle tercih edilir. Elektrokimyasal sensörler kimyasal tanıma sistemi ve tanıma sisteminden gelen cevabı elektronik sinyallere dönüştüren elektrotlardan oluşur. Seryum oksit nanopartiküllerinin elektrotlarda kullanılmasıyla elektrotun yüzey alanından dolayı ölçüm hassasiyeti artar (Ansari et al., 2014).



Biyosensörler, biyokimyasal reaksiyonlarda hedef analitleri tespit etmek için kullanılan analitik cihazlardır. Biyosensörlerin performansını arttırmak amacıyla çeşitli nanopartiküller kullanılmaktadır. Seryum oksit nanopartiküllerin toksik olmaması, biyoyumlulukları ve sensörlerde performansın yüksek olması nedeniyle biyosensörlerde tercih edilmektedir. Seryum oksit seramikleri,  $Ce^{3+}$  ve  $Ce^{4+}$  değerlik geçişleri nedeniyle ve oksijen boşluklarıyla katı yakıt hücrelerinde ve pillerde kullanım alanlarına sahiptir. Ayrıca yüksek oksijen depolama kapasitesine sahiptir (Hartati et al., 2021) .

### ***3.5.2. Fotokatalitik uygulamalar***

Organik boyalar birçok endüstride renklendirici olarak kullanılır fakat bu endüstrilerden çıkan atık sular ekosistemi etkileyerek suda ve çevredeki bitkileri, canlıları ve insan sağlığını olumsuz yönde etkilemektedir. Boya atıkları karmaşık ve aromatik yapılarından dolayı oksidasyona ve ışığa karşı duyarlıdır. Bu nedenle boyaların atık sulardan nasıl giderileceği sürdürülebilir kalkınma için önemli sorunlardan biridir. Boya giderimi için filtrasyon, damıtma, membran geliştirme gibi birçok farklı yöntem geliştirilmiştir fakat yüksek işletme maaliyeti, zararlı atık üretimi gibi dezavantajları vardır ve çoğu boya bu tür arıtma yöntemlerine karşı dirençlidir. Bu yöntemlere karşı yenilenebilir bir alternatif yöntem olarak fotokatalizörler geliştirilmiştir (Mishra et al., 2021)

Fotokataliz ler kararlı,  evre dostu ve  evre kirliliğinin kontrol edilmesinde ileri oksidasyon (degradasyon) tekniklerinden biridir. Organik kirleticilerin UV ve görünür bölge ışınları altında daha küçük parçalara, hatta karbondioksit ve su moleküllerine ayırabilmektedir. Seryum Oksit Nanopartikülleri fotokatalik özelliklerinden dolayı yarı iletken fotokatalizörler olarak kullanılabilir. Fotokataliz tepkimesinde, degradasyon işlemi foton uyarma ile başlamaktadır. Bir elektron ışınlama üzerinde değerlik bandından iletkenlik bandına uyarılır. Ardından elektron çifti su ile reaksiyona girerek hidroksi radikalleri oluşur. Boyadaki yapılar ile oluşan radikaller reaksiyona girer ve ortamdaki oksijen molekülleriyle radikal zincir reaksiyonu bozunur, karbondioksit ve su açığa çıkar (Koe et al., 2020).

Yeşil sentez ile sentezlenen seryum oksit nanopartiküllerinin fotokatalitik özelliğini incelenen çalışmalar yapılmıştır. Bir  alışmada Muthuvel ve arkadaşları (2020), Seryum oksit nanoparçacıklar kullanarak güneş ışığı ile metil turuncusunun bozunmasını incelemiştir. Seryum oksit nanopartikülleri *Calotropis procera*  i eği kullanılarak yeşil sentez ile sentezlenmiştir. Fotokataliz tepkimesi sonucu, metilen turuncusunun 50 dakikada %98 verimlilikle giderildiği gözlemlenmiştir. (Muthuvel et al., 2020).

Seryum oksit nanopartiküller nanokompozit olarak da yaygın olarak fotokatalitik degradasyon özelliği ile boya giderimin

çalışmalarında kullanılmıştır. Tablo 2.5.1.1.'de literatürde yapılan çalışmaların bir kısmı verildi.

**Tablo 3.4.** *Literatürde seryum bazlı nanokompozitlerin boya giderim çalışmaları*

| <b>Nanokompozit</b>                              | <b>Boya</b>     | <b>Süre (dk)</b> | <b>Yüzde giderim</b> | <b>Referans</b>            |
|--------------------------------------------------|-----------------|------------------|----------------------|----------------------------|
| ZnO/CeO <sub>2</sub>                             | Direct blue-15  | 120              | %95                  | (Lamba et al., 2015)       |
| CeO <sub>2</sub> /Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Metilen mavisi  | 75               | %94                  | (Sabari Arul et al., 2017) |
| CeO <sub>2</sub> /CuO                            | Metilen mavisi  | 210              | %70                  | (Zou et al., 2013)         |
| CeO <sub>2</sub> /MnO <sub>2</sub>               | Metil turuncusu | 240              | %100                 | (Zhao et al., 2015)        |
| CeO <sub>2</sub> /Alumina                        | Kongo kırmızısı | 120              | %91                  | (Latha et al., 2017)       |
| CeO <sub>2</sub> /Alumina                        | Metil turuncusu | 90               | %93                  | (Latha et al., 2017)       |
| Cds/CeO <sub>2</sub>                             | Rhodamin B      | 50               | %96                  | (Gu et al., 2015)          |
| Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /CeO <sub>2</sub> | Metilen mavisi  | 90               | %100                 | (K. Li et al., 2017)       |

### 3.5.3. Adsorpsiyon uygulamaları

Adsorpsiyon su ortamdaki metal iyonlarını, fosfat florür gibi bileşikler ve boyaları ayrıştırmak için kullanılan bir tekniktir. Fiziksel ve kimyasal adsorpsiyon olarak ikiye ayrılır. Kimyasal adsorpsiyonda adsorbat molekülleri ile adsorban yüzeyi arasında kimyasal etkileşimler oluşur. Fiziksel adsorpsiyonda ise yüzeyler arasında Van der Waals bağları sayesinde tutunmaktadır. Seryum oksit nanopartikülleri kullanılarak suda arsenik, krom, kurşun

giderimi ve organik boya giderimleriyle ilgili çalışmalar yapılmıştır ve kinetik modeller çıkarılmıştır (Song et al., 2021).

**Tablo 3.5.** *Literatürde seryum oksit ve seryum oksit bazı nanokompozitlerin adsorpsiyon çalışmaları*

| <b>Nanopartikül</b>                | <b>Adsorbe Edilen Tür</b> | <b>İzoterm</b>      | <b>Referans</b>          |
|------------------------------------|---------------------------|---------------------|--------------------------|
| CeO <sub>2</sub>                   | Pb, Zn, Cu                | Langmuir İzotermi   | (Meepho et al., 2018)    |
| CeO <sub>2</sub>                   | Cd                        | Freundlich İzotermi | (Contreras et al., 2012) |
| CeO <sub>2</sub> -Grafen           | Arsenat                   | Langmuir İzotermi   | (Yu et al., 2015)        |
| CeO <sub>2</sub>                   | Florit                    | Langmuir İzotermi   | (Dhillon et al., 2016)   |
| CeO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> | Fosfat                    | Langmuir İzotermi   | (C. min Li et al., 2019) |

Meepho ve arkadaşları seryum oksit nanopartiküller kullanarak suda Zn, Pb ve Cu giderimiyle ilgili çalışma yapmıştır. Çalışmanın sonucunda en hızlı giderimin Pb giderimine ait olduğu gözlemlenmiş gözlemlenmiştir (Meepho et al., 2018). Diğer bir çalışmada ise seryum oksit nanopartikülleri solvotermal yöntem ile sentezlendikten sonra suda arsenik giderimi için kullanılmıştır. Ortam pH değerinin, adsorpsiyon verimliliği, adsorban dozu ve adsorpsiyon süresi üzerinde etkili olduğu belirtilmiştir. Çalışmanın sonucunda düşük konsantrasyonlardaki arseniğin seryum oksit

nanopartikülleri tarafından yüksek verimlilikle adsorbe edildiği gözlemlenmiştir (Yu et al., 2015).

#### 4. KAYNAKÇA

Abid, N., Khan, A. M., Shujait, S., Chaudhary, K., Ikram, M., Imran, M., Haider, J., Khan, M., Khan, Q., & Maqbool, M. (2022). Synthesis of nanomaterials using various top-down and bottom-up approaches, influencing factors, advantages, and disadvantages: A review. In *Advances in Colloid and Interface Science* (Vol. 300). doi: 10.1016/j.cis.2021.102597

Abid, S. A., Taha, A. A., Ismail, R. A., & Mohsin, M. H. (2020). Antibacterial and cytotoxic activities of cerium oxide nanoparticles prepared by laser ablation in liquid. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(24). doi: 10.1007/s11356-020-09332-9

Alhalili, Z. (2023). Metal Oxides Nanoparticles: General Structural Description, Chemical, Physical, and Biological Synthesis Methods, Role in Pesticides and Heavy Metal Removal through Wastewater Treatment. In *Molecules* (Vol. 28, Issue 7). doi: 10.3390/molecules28073086

Alpaslan, E., Yazici, H., Golshan, N. H., Ziemer, K. S., & Webster, T. J. (2015). PH-Dependent Activity of Dextran-Coated Cerium Oxide Nanoparticles on Prohibiting Osteosarcoma Cell Proliferation. *ACS Biomaterials Science and Engineering*, 1(11). doi: 10.1021/acsbiomaterials.5b00194

Altammar, K. A. (2023). A review on nanoparticles: characteristics, synthesis, applications, and challenges. In *Frontiers in Microbiology* (Vol. 14). doi: 10.3389/fmicb.2023.1155622

Amaliya, R. (2021). Karakterisasi Planet Pisang Raja Bulu (Musa Paradisiaca L. var. sapientum) yang Resisten Terhadap Cekaman Garam (NaCl) Secara in Vitro. *SKRPS: Universitas Lampung*.

Andreescu, D., Bulbul, G., Özel, R. E., Hayat, A., Sardesai, N., & Andreescu, S. (2014). Applications and implications of nanoceria reactivity: Measurement tools and environmental impact. In *Environmental Science: Nano* (Vol. 1, Issue 5). doi: 10.1039/c4en00075g

Ansari, S. A., Khan, M. M., Ansari, M. O., Kalathil, S., Lee, J., & Cho, M. H. (2014). Band gap engineering of CeO<sub>2</sub> nanostructure using an electrochemically active biofilm for visible light applications. *RSC Advances*, 4(32). doi: 10.1039/c4ra00861h

Arumugam, A., Karthikeyan, C., Haja Hameed, A. S., Gopinath, K., Gowri, S., & Karthika, V. (2015). Synthesis of cerium oxide nanoparticles using *Gloriosa superba* L. leaf extract and their structural, optical and antibacterial properties. *Materials Science and Engineering C*, 49. doi: 10.1016/j.msec.2015.01.042

Aseyd Nezhad, S., Es-haghi, A., & Tabrizi, M. H. (2020). Green synthesis of cerium oxide nanoparticle using *Origanum*

majorana L. leaf extract, its characterization and biological activities. *Applied Organometallic Chemistry*, 34(2). doi: 10.1002/aoc.5314

Azam, M. A., & Mupit, M. (2022). Carbon nanomaterial-based sensor: Synthesis and characterization. In *Carbon Nanomaterials-Based Sensors: Emerging Research Trends in Devices and Applications*. doi: 10.1016/B978-0-323-91174-0.00015-9

Balasubramanian, J., Lemere, J., Khan, S. S., & Agarwal, N. R. (2022). Plasmonic nanosensors and their spectroscopic applications—current trends and future perspectives. In *Molecular and Laser Spectroscopy: Advances and Applications: Volume 3* (Vol. 3). doi: 10.1016/B978-0-323-91249-5.00001-6

Bhattacharjee, S. (2016). DLS and zeta potential - What they are and what they are not? In *Journal of Controlled Release* (Vol. 235). doi: 10.1016/j.jconrel.2016.06.017

Borowska, M., & Jankowski, K. (2023). Basic and advanced spectrometric methods for complete nanoparticles characterization in bio/eco systems: current status and future prospects. In *Analytical and Bioanalytical Chemistry* (Vol. 415, Issue 18). doi: 10.1007/s00216-023-04641-7

Canellas, L. P., Olivares, F. L., Aguiar, N. O., Jones, D. L., Nebbioso, A., Mazzei, P., & Piccolo, A. (2015). Humic and fulvic



acids as biostimulants in horticulture. In *Scientia Horticulturae* (Vol. 196). doi: 10.1016/j.scienta.2015.09.013

Chadwick, A. V., & Savin, S. L. P. (2009). EXAFS study of nanocrystalline CeO<sub>2</sub> samples prepared by sol-gel and ball-milling routes. *Journal of Alloys and Compounds*, 488(1). doi: 10.1016/j.jallcom.2006.10.164

Contreras, A. R., García, A., González, E., Casals, E., Puentes, V., Sánchez, A., Font, X., & Recillas, S. (2012). Potential use of CeO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles for the removal of cadmium from water. *Desalination and Water Treatment*, 41(1–3). doi: 10.1080/19443994.2012.664743

Crouzier, L., Delvallée, A., Ducourtieux, S., Devoille, L., Noircle, G., Ulysse, C., Taché, O., Barruet, E., Tromas, C., & Feltin, N. (2019). Development of a new hybrid approach combining AFM and SEM for the nanoparticle dimensional metrology. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 10. doi: 10.3762/bjnano.10.150

Darroudi, M., Hoseini, S. J., Kazemi Oskuee, R., Hosseini, H. A., Gholami, L., & Gerayli, S. (2014). Food-directed synthesis of cerium oxide nanoparticles and their neurotoxicity effects. *Ceramics International*, 40(5). doi: 10.1016/j.ceramint.2013.12.089

Das, C., Panigrahi, S., Saha, V., Panda, B., Dhak, P., Dhak, D., Pulhani, V., Singhal, P., & Biswas, G. (2024). Humic acid-nanoceria composite as a sustainable adsorbent for simultaneous

removal of uranium(VI), chromium(VI), and fluoride ions from aqueous solutions. *Environmental Science and Pollution Research*. doi: 10.1007/s11356-024-32730-2

De Melo, B. A. G., Motta, F. L., & Santana, M. H. A. (2016). Humic acids: Structural properties and multiple functionalities for novel technological developments. In *Materials Science and Engineering C* (Vol. 62). doi: 10.1016/j.msec.2015.12.001

Dhillon, A., Kumar Sharma, T., Soni, S. K., & Kumar, D. (2016). Fluoride adsorption on a cubical ceria nanoadsorbent: Function of surface properties. *RSC Advances*, 6(92). doi: 10.1039/c6ra16962g

Ealias, A. M., & Saravanakumar, M. P. (2017). A review on the classification, characterisation, synthesis of nanoparticles and their application. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 263(3). doi: 10.1088/1757-899X/263/3/032019

Eka Putri, G., Rilda, Y., Syukri, S., Labanni, A., & Arief, S. (2021). Highly antimicrobial activity of cerium oxide nanoparticles synthesized using *Moringa oleifera* leaf extract by a rapid green precipitation method. *Journal of Materials Research and Technology*, 15. doi: 10.1016/j.jmrt.2021.09.075

Feng, H., Liang, Y. N., & Hu, X. (2022). Natural organic matter (NOM), an underexplored resource for environmental

conservation and remediation. In *Materials Today Sustainability* (Vol. 19). doi: 10.1016/j.mtsust.2022.100159

Fudala, A. S., Salih, W. M., & Alkazaz, F. F. (2021). Synthesis different sizes of cerium oxide CeO<sub>2</sub> nanoparticles by using different concentrations of precursor via sol–gel method. *Materials Today: Proceedings*, 49. doi: 10.1016/j.matpr.2021.09.452

Gan, Y. X., Jayatissa, A. H., Yu, Z., Chen, X., & Li, M. (2020). Hydrothermal Synthesis of Nanomaterials. In *Journal of Nanomaterials* (Vol. 2020). doi: 10.1155/2020/8917013

Gel, B. M., Priya, G. S., Kanneganti, A., Kumar, K. A., Rao, K. V., & Bykkam, S. (2014). Bio Synthesis of Cerium Oxide Nanoparticles using Aloe. *International Journal of Scientific and Research Publication*, 4(6).

Gopinath, K., Karthika, V., Sundaravadivelan, C., Gowri, S., & Arumugam, A. (2015). Mycogenesis of cerium oxide nanoparticles using *Aspergillus niger* culture filtrate and their applications for antibacterial and larvicidal activities. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 5(3). doi: 10.1007/s40097-015-0161-2

Gu, S., Chen, Y., Yuan, X., Wang, H., Chen, X., Liu, Y., Jiang, Q., Wu, Z., & Zeng, G. (2015). Facile synthesis of CeO<sub>2</sub> nanoparticle sensitized CdS nanorod photocatalyst with improved visible-light photocatalytic degradation of rhodamine B. *RSC Advances*, 5(97). doi: 10.1039/c5ra16114b

Hailstone, R. K., DiFrancesco, A. G., Leong, J. G., Allston, T. D., & Reed, K. J. (2009). A study of lattice expansion in CeO<sub>2</sub> Nanoparticles by Transmission Electron Microscopy. *Journal of Physical Chemistry C*, 113(34). doi: 10.1021/jp903468m

Hartati, Y. W., Topkaya, S. N., Gaffar, S., Bahti, H. H., & Cetin, A. E. (2021). Synthesis and characterization of nanoceria for electrochemical sensing applications. In RSC Advances (Vol. 11, Issue 27). doi: 10.1039/d1ra00637a

Hassanzadeh-Tabrizi, S. A., Mazaheri, M., Aminzare, M., & Sadrnezhad, S. K. (2010). Reverse precipitation synthesis and characterization of CeO<sub>2</sub> nanopowder. *Journal of Alloys and Compounds*, 491(1–2). doi: 10.1016/j.jallcom.2009.10.243

Ioannou, M. E., Pouroutzidou, G. K., Chatzimentor, I., Tsamesidis, I., Florini, N., Tsiaoussis, I., Lymperaki, E., Komninou, P., & Kontonasaki, E. (2023). Synthesis and Characterization of Cerium Oxide Nanoparticles: Effect of Cerium Precursor to Gelatin Ratio. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(4). doi: 10.3390/app13042676

J, N. F. S. J. (2014). Determination of Ascorbic Acid Levels in Hibiscus Sabdariffa (Zobo Rod) and Other Tropical Leaves. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 3(6).

Jayakumar, G., Irudayaraj, A. A., & Raj, A. D. (2017). Particle size effect on the properties of cerium oxide (CeO<sub>2</sub>)

nanoparticles synthesized by hydrothermal method. *Mechanics, Materials Science & Engineering Journal*, 9(April 2019).

Jin, C., & Wei, J. (2023). The combined effect of water and nanoparticles on diesel engine powered by biodiesel and its blends with diesel: A review. In *Fuel* (Vol. 343). doi: 10.1016/j.fuel.2023.127940

Joudeh, N., & Linke, D. (2022). Nanoparticle classification, physicochemical properties, characterization, and applications: a comprehensive review for biologists. In *Journal of Nanobiotechnology* (Vol. 20, Issue 1). doi: 10.1186/s12951-022-01477-8

Kargar, H., Ghazavi, H., & Darroudi, M. (2015). Size-controlled and bio-directed synthesis of ceria nanopowders and their in vitro cytotoxicity effects. *Ceramics International*, 41(3). doi: 10.1016/j.ceramint.2014.11.108

Kaur, S., & Kaur, P. (2019). Nanoparticles Characterization and Applications: An Overview. *Indo Global Journal of Pharmaceutical Sciences*, 09(02). doi: 10.35652/igjps.2019.92s44

Kaushik, A., Solanki, P. R., Pandey, M. K., Ahmad, S., & Malhotra, B. D. (2009). Cerium oxide-chitosan based nanobiocomposite for food borne mycotoxin detection. *Applied Physics Letters*, 95(17). doi: 10.1063/1.3249586

Khan Ibrahim, Saeed Khalid, & Khan Idrees. (2017). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*.

Khan, S. A., & Ahmad, A. (2013). Fungus mediated synthesis of biomedically important cerium oxide nanoparticles. *Materials Research Bulletin*, 48(10). doi: 10.1016/j.materresbull.2013.06.038

Kiani, D. (2023). X-Ray Diffraction (XRD). In Springer Handbooks. doi: 10.1007/978-3-031-07125-6\_25

Klocking, R., Felber, Y., Guhr, M., Meyer, G., Schubert, R., & Schoenherr, J. I. (2013). Development of an innovative peat lipstick based on the UV-B protective effect of humic substances. *Mires and Peat*, 11.

Koe, W. S., Lee, J. W., Chong, W. C., Pang, Y. L., & Sim, L. C. (2020). An overview of photocatalytic degradation: photocatalysts, mechanisms, and development of photocatalytic membrane. In *Environmental Science and Pollution Research* (Vol. 27, Issue 3). doi: 10.1007/s11356-019-07193-5

Kokila, G. N., Mallikarjunaswamy, C., & Ranganatha, V. L. (2022). A review on synthesis and applications of versatile nanomaterials. In *Inorganic and Nano-Metal Chemistry*. doi: 10.1080/24701556.2022.2081189

Kolahalam, L. A., Kasi Viswanath, I. V., Diwakar, B. S., Govindh, B., Reddy, V., & Murthy, Y. L. N. (2019). Review on

nanomaterials: Synthesis and applications. *Materials Today: Proceedings*, 18. doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.371

Korsvik, C., Patil, S., Seal, S., & Self, W. T. (2007). Superoxide dismutase mimetic properties exhibited by vacancy engineered ceria nanoparticles. *Chemical Communications*, 10. doi: 10.1039/b615134e

Kumar, K. M., Mahendhiran, M., Diaz, M. C., Hernandez-Como, N., Hernandez-Eligio, A., Torres-Torres, G., Godavarthi, S., & Gomez, L. M. (2018). Green synthesis of Ce<sup>3+</sup> rich CeO<sub>2</sub> nanoparticles and its antimicrobial studies. *Materials Letters*, 214. doi: 10.1016/j.matlet.2017.11.097

Lamba, R., Umar, A., Mehta, S. K., & Kansal, S. K. (2015). CeO<sub>2</sub>ZnO hexagonal nanodisks: Efficient material for the degradation of direct blue 15 dye and its simulated dye bath effluent under solar light. *Journal of Alloys and Compounds*, 620. doi: 10.1016/j.jallcom.2014.09.101

Latha, P., Prakash, K., & Karuthapandian, S. (2017). Enhanced visible light photocatalytic activity of CeO<sub>2</sub>/alumina nanocomposite: Synthesized via facile mixing-calcination method for dye degradation. *Advanced Powder Technology*, 28(11). doi: 10.1016/j.appt.2017.08.017

Li, C. min, Zhang, Y. sheng, Wang, X. peng, Yin, X. biao, Luo, N. neng, Khayambashi, A., & Wei, Y. zhou. (2019). The

synthesis and characterization of hydrous cerium oxide nanoparticles loaded on porous silica micro-sphere as novel and efficient adsorbents to remove phosphate radicals from water. *Microporous and Mesoporous Materials*, 279. doi: 10.1016/j.micromeso.2018.11.034

Li, K., Zhao, Y., Song, C., & Guo, X. (2017). Magnetic ordered mesoporous Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/CeO<sub>2</sub> composites with synergy of adsorption and Fenton catalysis. *Applied Surface Science*, 425. doi: 10.1016/j.apsusc.2017.07.041

Li, L., Li, C., Liu, M., & Wang, C. (2017). Synthesis of CeO<sub>2</sub> Porous Nanospheres with Tunable Pore and Particle Sizes and Their Adsorption to Methyl Orange. *Nano*, 12(11). doi: 10.1142/S1793292017501326

Li, Z., Deng, L., Kinloch, I. A., & Young, R. J. (2023). Raman spectroscopy of carbon materials and their composites: Graphene, nanotubes and fibres. In *Progress in Materials Science* (Vol. 135). doi: 10.1016/j.pmatsci.2023.101089

Ling, Q., Wei, J., Chen, L.-Y., Zhao, H.-J., Lei, Z., Zhao, Z.-G., Xie, R.-L., Ke, Q.-P., & Cui, P. (2019). Solvothermal Synthesis of Humic Acid-Supported CeO<sub>2</sub> Nanosheets Composite as High Performance Adsorbent for Congo Red Removal . *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 20(5). doi: 10.1166/jnn.2020.17384



Lv, X., Gao, B., Sun, Y., Shi, X., Xu, H., & Wu, J. (2014). Effects of humic acid and solution chemistry on the retention and transport of cerium dioxide nanoparticles in saturated porous media. *Water, Air, and Soil Pollution*, 225(10). doi: 10.1007/s11270-014-2167-7

Mahdavi, S., Molodi, P., & Zarabi, M. (2018). Functionalized MgO, CeO<sub>2</sub> and ZnO nanoparticles with humic acid for the study of nitrate adsorption efficiency from water. *Research on Chemical Intermediates*, 44(9). doi: 10.1007/s11164-018-3408-y

Maqbool, Q., Nazar, M., Naz, S., Hussain, T., Jabeen, N., Kausar, R., Anwaar, S., Abbas, F., & Jan, T. (2016). Antimicrobial potential of green synthesized CeO<sub>2</sub> nanoparticles from *Olea europaea* leaf extract. *International Journal of Nanomedicine*, 11. doi: 10.2147/IJN.S113508

Marta, H., Rizki, D. I., Mardawati, E., Djali, M., Mohammad, M., & Cahyana, Y. (2023). Starch Nanoparticles: Preparation, Properties and Applications. In *Polymers* (Vol. 15, Issue 5). doi: 10.3390/polym15051167

Meena, P. L., Poswal, K., Surela, A. K., & Saini, J. (2021). Facile synthesis of ZnO/CuO/Ag<sub>2</sub>O ternary metal oxide nanocomposite for effective photodegradation of organic water pollutants. *Water Science and Technology*, 84(9). doi: 10.2166/wst.2021.431

Meepho, M., Sirimongkol, W., & Ayawanna, J. (2018). Samaria-doped ceria nanopowders for heavy metal removal from aqueous solution. *Materials Chemistry and Physics*, 214. doi: 10.1016/j.matchemphys.2018.04.083

Mekuye, B., & Abera, B. (2023). Nanomaterials: An overview of synthesis, classification, characterization, and applications. *Nano Select*, 4(8). doi: 10.1002/nano.202300038

Menya, E., Olupot, P. W., Storz, H., Lubwama, M., & Kiros, Y. (2018). Production and performance of activated carbon from rice husks for removal of natural organic matter from water: A review. In *Chemical Engineering Research and Design* (Vol. 129). doi: 10.1016/j.cherd.2017.11.008

Miri, A., Beiki, H., Najafidoust, A., Khatami, M., & Sarani, M. (2021). Cerium oxide nanoparticles: green synthesis using Banana peel, cytotoxic effect, UV protection and their photocatalytic activity. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 44(9). doi: 10.1007/s00449-021-02569-9

Mishra, S. R., & Ahmaruzzaman, Md. (2021). Cerium oxide and its nanocomposites: Structure, synthesis, and wastewater treatment applications. *Materials Today Communications*, 28. doi: 10.1016/j.mtcomm.2021.102562

Modena, M. M., Rühle, B., Burg, T. P., & Wuttke, S. (2019). Nanoparticle Characterization: What to Measure? In *Advanced Materials* (Vol. 31, Issue 32). doi: 10.1002/adma.201901556

Mr Sharad Kamble, Miss Kaveri Bhosale, Mr Mahesh Mohite, & Mrs Swapnali Navale. (2023). Methods of Preparation of Nanoparticles. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*. doi: 10.48175/ijarset-9485

Munusamy, S., Bhakayaraj, K., Vijayalakshmi, L., Stephen, A., & Narayanan, V. (2014). Synthesis and characterization of cerium oxide nanoparticles using *Curvularia lunata* and their antibacterial properties. *Int J Innovative Res Sci Eng*, 12.

Muthuvel, A., Jothibas, M., Mohana, V., & Manoharan, C. (2020). Green synthesis of cerium oxide nanoparticles using *Calotropis procera* flower extract and their photocatalytic degradation and antibacterial activity. *Inorganic Chemistry Communications*, 119. doi: 10.1016/j.inoche.2020.108086

Nadaroğlu, H., Alaylı Güngör, A., & İnce, S. (2017). Synthesis of Nanoparticles by Green Synthesis Method. *International Journal of Innovative Research and Reviews*, 1(1).

Nadeem, M., Khan, R., Afridi, K., Nadhman, A., Ullah, S., Faisal, S., Mabood, Z. U., Hano, C., & Abbasi, B. H. (2020). Green synthesis of cerium oxide nanoparticles (CeO<sub>2</sub> nps) and their

antimicrobial applications: A review. In International Journal of Nanomedicine (Vol. 15). doi: 10.2147/IJN.S255784

Naikoo, G. A., Mustaqeem, M., Hassan, I. U., Awan, T., Arshad, F., Salim, H., & Qurashi, A. (2021). Bioinspired and green synthesis of nanoparticles from plant extracts with antiviral and antimicrobial properties: A critical review. In Journal of Saudi Chemical Society (Vol. 25, Issue 9). doi: 10.1016/j.jscs.2021.101304

Natesan, V., & Kim, S. J. (2023). The Trend of Organic Based Nanoparticles in the Treatment of Diabetes and Its Perspectives. In Biomolecules and Therapeutics (Vol. 31, Issue 1). doi: 10.4062/biomolther.2022.080

Nayak, P. S., & Singh, B. K. (2007). Instrumental characterization of clay by XRF, XRD and FTIR. *Bulletin of Materials Science*, 30(3). doi: 10.1007/s12034-007-0042-5

Nosrati, H., Heydari, M., & Khodaei, M. (2023). Cerium oxide nanoparticles: Synthesis methods and applications in wound healing. In Materials Today Bio (Vol. 23). doi: 10.1016/j.mtbio.2023.100823

Ouyang, W., Santiago, A. R. P., Cerdán-Gómez, K., & Luque, R. (2019). Nanoparticles within functional frameworks and their applications in photo(electro)catalysis. In Photoactive Inorganic Nanoparticles: Surface Composition and Nanosystem Functionality. doi: 10.1016/B978-0-12-814531-9.00005-1

Pang, J. H., Liu, Y., Li, J., & Yang, X. J. (2019). Solvothermal synthesis of nano-CeO<sub>2</sub> aggregates and its application as a high-efficient arsenic adsorbent. *Rare Metals*, 38(1). doi: 10.1007/s12598-018-1072-4

Parsons, J. W. (1983). Humus Chemistry—Genesis, Composition, Reactions. *Soil Science*, 135(2). doi: 10.1097/00010694-198302000-00014

Patil, S. N., Paradeshi, J. S., Chaudhari, P. B., Mishra, S. J., & Chaudhari, B. L. (2016). Bio-therapeutic Potential and Cytotoxicity Assessment of Pectin-Mediated Synthesized Nanostructured Cerium Oxide. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 180(4). doi: 10.1007/s12010-016-2121-9

Priya, G. S., Kanneganti, A., Kumar, K. A., Rao, K. V., & Bykkam, S. (2014). Bio Synthesis of Cerium Oxide Nanoparticles using Aloe Barbadensis Miller Gel. *International Journal of Scientific and Research Publication*, 4(6).

Qi, L., Fresnais, J., Muller, P., Theodoly, O., Berret, J. F., & Chapel, J. P. (2012). Interfacial activity of phosphonated-peg functionalized cerium oxide nanoparticles. *Langmuir*, 28(31). doi: 10.1021/la302173g

Ray, L., Das, M., & Tripathy, J. (2023). Terminalia catappa leaf extract mediated eco-friendly synthesis of cerium oxide

nanoparticles. *Materials Today: Proceedings*. doi: 10.1016/j.matpr.2023.12.035

Sabari Arul, N., Vidya, J., Ramya, V., & Mangalaraj, D. (2017). Synthesis, Characterization and Electrochemical Sensing of Tb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanotubes. *Journal of Electronic Materials*, 46(2). doi: 10.1007/s11664-016-5048-6

Sabouri, Z., Sabouri, M., Amiri, M. S., Khatami, M., & Darroudi, M. (2022). Plant-based synthesis of cerium oxide nanoparticles using *Rheum turkestanicum* extract and evaluation of their cytotoxicity and photocatalytic properties. *Materials Technology*, 37(8). doi: 10.1080/10667857.2020.1863573

Sankar, J., & Kumar, S. S. (2021). Synthesis and characterization of nano cerium oxide using hydrothermal technique. *INCAS Bulletin*, 13(1). doi: 10.13111/2066-8201.2021.13.1.18

Shatrohan Lal, R. K. (2014). Synthesis of Organic Nanoparticles and their Applications in Drug Delivery and Food Nanotechnology: A Review. *Journal of Nanomaterials & Molecular Nanotechnology*, 03(04). doi: 10.4172/2324-8777.1000150

Sillanpää, M., Ncibi, M. C., Matilainen, A., & Vepsäläinen, M. (2018). Removal of natural organic matter in drinking water treatment by coagulation: A comprehensive review. In *Chemosphere* (Vol. 190). doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.09.113

Song, G., Cheng, N., Zhang, J., Huang, H., Yuan, Y., He, X., Luo, Y., & Huang, K. (2021). Nanoscale cerium oxide: Synthesis, biocatalytic mechanism, and applications. In *Catalysts* (Vol. 11, Issue 9). doi: 10.3390/catal11091123

Suresh, R., Ponnuswamy, V., & Mariappan, R. (2013). Effect of annealing temperature on the microstructural, optical and electrical properties of CeO<sub>2</sub> nanoparticles by chemical precipitation method. *Applied Surface Science*, 273. doi: 10.1016/j.apsusc.2013.02.062

Svetlichnyi, V. A., & Lapin, I. N. (2016). Production of CeO<sub>2</sub> Nanoparticles by Method of Laser Ablation of Bulk Metallic Cerium Targets in Liquid. *Russian Physics Journal*, 58(11). doi: 10.1007/s11182-016-0689-8

Swartz, S. L. (2002). Catalysis by Ceria and Related Materials Edited by Alessandro Trovarelli (Università di Udine, Italy). *Journal of the American Chemical Society*, 124(43).

Syed Khadar, Y. A., Balamurugan, A., Devarajan, V. P., Subramanian, R., & Dinesh Kumar, S. (2019). Synthesis, characterization and antibacterial activity of cobalt doped cerium oxide (CeO<sub>2</sub>:Co) nanoparticles by using hydrothermal method. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(1). doi: 10.1016/j.jmrt.2017.12.005

Tadini, A. M., Bernardi, A. C. C., Milori, D. M. B. P., Oliveira, P. P. A., Pezzopane, J. R. M., & Martin-Neto, L. (2022). Spectroscopic characteristics of humic acids extracted from soils under different integrated agricultural production systems in tropical regions. *Geoderma Regional*, 28. doi: 10.1016/j.geodrs.2021.e00476

Takeda, Y., & Mafuné, F. (2014). Formation of wide bandgap cerium oxide nanoparticles by laser ablation in aqueous solution. *Chemical Physics Letters*, 599. doi: 10.1016/j.cplett.2014.03.026

Tambat, S., Umale, S., & Sontakke, S. (2016). Photocatalytic degradation of Milling Yellow dye using sol-gel synthesized CeO<sub>2</sub>. *Materials Research Bulletin*, 76. doi: 10.1016/j.materresbull.2016.01.010

Tejeda-Agredano, M. C., Mayer, P., & Ortega-Calvo, J. J. (2014). The effect of humic acids on biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons depends on the exposure regime. *Environmental Pollution*, 184. doi: 10.1016/j.envpol.2013.09.031

Thain, S. (2022). IR Spectroscopy and FTIR Spectroscopy: How an FTIR Spectrometer Works and FTIR Analysis. *Technology Networks Analysis & Separations*.

Titus, D., James Jebaseelan Samuel, E., & Roopan, S. M. (2018). Nanoparticle characterization techniques. In *Green*



Synthesis, Characterization and Applications of Nanoparticles. doi: 10.1016/B978-0-08-102579-6.00012-5

Ullah, M., Ali, M. E., & Hamid, S. B. A. (2014). Surfactant-assisted ball milling: A novel route to novel materials with controlled nanostructure-A review. In *Reviews on Advanced Materials Science* (Vol. 37, Issues 1–2).

Venkatesh, K. S., Gopinath, K., Palani, N. S., Arumugam, A., Jose, S. P., Bahadur, S. A., & Ilangovan, R. (2016). Plant pathogenic fungus: *F. solani* mediated biosynthesis of nanoceria: Antibacterial and antibiofilm activity. *RSC Advances*, 6(48). doi: 10.1039/c6ra05003d

Wang, Y., Peng, C., Fang, H., Sun, L., Zhang, H., Feng, J., Duan, D., Liu, T., & Shi, J. (2015). Mitigation Of Cu(II) Phytotoxicity to Rice (*Oryza Sativa*) In The Presence Of TiO<sub>2</sub> and CeO<sub>2</sub> Nanoparticles Combined With Humic Acid. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 34(7). doi: 10.1002/etc.2953

Wu, Y., & Ta, H. T. (2021). Different approaches to synthesising cerium oxide nanoparticles and their corresponding physical characteristics, and ROS scavenging and anti-inflammatory capabilities. In *Journal of Materials Chemistry B* (Vol. 9, Issue 36). doi: 10.1039/d1tb01091c

Xu, R. (2008). Progress in nanoparticles characterization: Sizing and zeta potential measurement. *Particuology*, 6(2). doi: 10.1016/j.partic.2007.12.002

Yadav, T. P., & Srivastava, O. N. (2012). Synthesis of nanocrystalline cerium oxide by high energy ball milling. *Ceramics International*, 38(7). doi: 10.1016/j.ceramint.2012.04.025

Yu, L., Ma, Y., Ong, C. N., Xie, J., & Liu, Y. (2015). Rapid adsorption removal of arsenate by hydrous cerium oxide-graphene composite. *RSC Advances*, 5(80). doi: 10.1039/c5ra08922k

Zafar, N., Uzair, B., Niazi, M. B. K., Menaa, F., Samin, G., Khan, B. A., Iqbal, H., & Menaa, B. (2021). Green Synthesis of Ciprofloxacin-Loaded Cerium Oxide/Chitosan Nanocarrier and its Activity Against MRSA-Induced Mastitis. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 110(10). doi: 10.1016/j.xphs.2021.06.017

Zdravković, J., Simović, B., Golubović, A., Poleti, D., Veljković, I., Šćepanović, M., & Branković, G. (2015). Comparative study of CeO<sub>2</sub> nanopowders obtained by the hydrothermal method from various precursors. *Ceramics International*, 41(2). doi: 10.1016/j.ceramint.2014.08.122

Zhao, H., Zhang, G., Chong, S., Zhang, N., & Liu, Y. (2015). MnO<sub>2</sub>/CeO<sub>2</sub> for catalytic ultrasonic decolorization of methyl orange: Process parameters and mechanisms. *Ultrasonics Sonochemistry*, 27. doi: 10.1016/j.ultsonch.2015.06.009

Zou, Z., Xie, C., Zhang, S., Yu, X., Zou, T., & Li, J. (2013). Preparation and photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub>/CeO<sub>2</sub>/Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite for Rhodamine B degradation under visible light irradiation. *Journal of Alloys and Compounds*, 581. doi: 10.1016/j.jallcom.2013.07.087

