

Yeşil Sentez ile Üretilen ZnO-NP'lerin Sürdürülebilir Tarımdaki Etkinliğinin Değerlendirilmesi

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 26.03.2025

Kabul/Accepted: 27.09.2025

Yayınlandı/Published: 03.02.2026

Evaluation of the Effectiveness of ZnO-NPs Produced by Green Synthesis in Sustainable Agriculture

Yağmur UYSAL^{*} , Zeynep Görkem DOĞAROĞLU 

Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Mersin, Türkiye



© 2026 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Bitki ekstraktları kullanılarak sentezlenen çinko oksit nanopartiküllerinin (ZnO-NP'ler), bitki büyümesi üzerindeki potansiyel etkileri nedeniyle yeşil sentezle üretilen nanopartiküller özellikle tarımsal uygulamalarda dikkat çekmektedir. Bu çalışma, kekik (*Thymus vulgaris*) özütü ile üretilen ZnO-NP'lerin (K-ZnO-NP) buğday bitkilerinin büyüme performansını artırmadaki rollerine dair etkilerini araştırmayı amaçlamaktadır. K-ZnO-NP'ler SEM, FTIR ve XRD analizleri ile karakterize edilmiş olup, ortalama partikül boyutu 19.72 nm olarak belirlenmiştir. Nanopartiküller, çimlenme ve büyüme parametreleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla buğday bitkilerine toprak uygulamaları yoluyla verilmiştir. Çimlenme testleri, K-ZnO-NP'lerin buğday çimlenme yüzdesini olumlu yönde etkilediğini ortaya koymuştur. Klorofil içeriği analizi, doz bağımlı bir yanıt göstermiş; düşük konsantrasyonlarda (250 ve 500 mg/L) belirgin bir artış gözlemlenirken, yüksek konsantrasyonlarda (4000 mg/L ve üzeri) anlamlı bir değişiklik tespit edilmemiştir. Sonuç olarak, kekik ekstraktı kullanılarak sentezlenen K-ZnO-NP'ler, buğday bitkilerinin büyüme ve gelişimini olumlu yönde etkilemektedir. Bu bulgular, bitki bazlı sentezlenen nanopartiküllerin tarımsal uygulamadaki potansiyelini vurgulamakta ve maksimum fayda sağlamak için nanopartikül konsantrasyonlarının optimize edilmesi gerekliliğinin altını çizmektedir.

Anahtar Kelimeler: Buğday Çimlenmesi, Çinko Oksit Nanopartikülleri, Nanopartikül, Yeşil Sentez, ZnO

Abstract

Zinc oxide nanoparticles synthesized with *Thymus vulgaris* extract (K-ZnO-NPs) have gained attention for their potential impact on plant growth. In this context, our study aims to explore the effects of K-ZnO-NPs on wheat plants and provide insights into their role in enhancing growth performance. K-ZnO-NPs were characterized using SEM, FTIR, and XRD, with an average particle size of 19.72 nm. The nanoparticles were applied to wheat plants through soil applications to evaluate their impact on germination and growth parameters. Germination tests showed that K-ZnO-NPs positively influenced wheat germination percentage. Chlorophyll content analysis revealed a dose-dependent response, with notable increases at low concentrations (250 and 500 mg/L) for soil applications. In contrast, higher concentrations (4000 mg/L and above) did not increase significantly. In conclusion, K-ZnO-NPs synthesized using thyme extract positively affect the growth and development of wheat plants. These findings highlight the potential of plant-synthesized nanoparticles in agriculture and underscore the need for optimizing nanoparticle concentrations for maximum benefit.

Keywords: Germination, Zinc Oxide Nanoparticles, Green Synthesis, Nanoparticle, ZnO

1. Giriş

Son yıllarda nano boyutlu yarı iletkenler, optoelektronikten tarıma kadar geniş bir yelpazede uygulama alanı bulmakta ve özellikle sürdürülebilir tarımda potansiyel çözümler sunmaktadır. Çinko oksit nanoparçacıkları (ZnO-NP'ler), geniş ve doğrudan bant aralığı (~3,36 eV), güçlü UV soğurma kapasitesi ve yüksek fotostabilite gibi özellikleri sayesinde öne çıkan II–VI grubu yarı iletken bileşikler arasındadır (Król vd., 2017). Bununla birlikte, ZnO-NP'lerin geleneksel kimyasal yöntemlerle üretimi yüksek maliyet, yoğun enerji tüketimi ve çevresel açıdan zararlı yan ürünler gibi dezavantajlara

sahiptir. Bu durum, yeşil sentez gibi çevre dostu, ekonomik ve sürdürülebilir üretim tekniklerini ön plana çıkarmaktadır [Ovais vd., 2018].

Yeşil sentez yaklaşımında, bitki özütlerinde bulunan fitokimyasallar metal iyonlarının indirgenmesi ve oluşan nanoparçacıkların stabilizasyonunda aktif rol oynar. Literatürde farklı bitki türleri ile ZnO-NP sentezi yapılmış ve kullanılan bitki türünün nanoparçacıkların boyut, morfoloji ve yüzey özelliklerini önemli ölçüde etkilediği gösterilmiştir (Pakzad vd., 2019; Barzinjy vd., 2020; Abdulqudos vd., 2022). Ayrıca ZnO-NP'lerin, bitkilerde besin alımını kolaylaştırarak çimlenme oranını artırdığı,

fotosentetik kapasiteyi iyileştirdiği ve patojenlere karşı direnci güçlendirdiği rapor edilmiştir (Rani vd., 2020; Rai-Kalal ve Jajoo, 2021). Ancak yüksek konsantrasyonlarda ZnO-NP uygulamalarının fitotoksik etkilere yol açabileceği de bilinmektedir (Meléndez -Mori vd., 2025). Son dönem çalışmalarda, ZnO-NP uygulamalarının buğday bitkisinde büyüme, fizyolojik parametreler ve antioksidan savunma mekanizmaları üzerinde pozitif etkiler sağladığı (Nazir vd., 2024) ve farklı gelişim evrelerinde kuraklık stresine karşı toleransı artırdığı (Raza vd., 2025) belirtilmiştir.

Her ne kadar yeşil sentezlenmiş ZnO-NP'lerin bitki gelişimi üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalar artsa da farklı bitki özütleri ile üretilen nanoparçacıkların tarla bitkilerinde karşılaştırmalı değerlendirilmesine yönelik araştırmalar sınırlıdır. Özellikle *Thymus vulgaris* (kekik) özütü ile sentezlenen ZnO-NP'lerin buğday (*Triticum aestivum*) gelişimi üzerindeki etkileri konusunda literatürde kapsamlı veriler bulunmamaktadır. Ayrıca, tarımsal uygulamalarda optimum nanoparçacık dozlarının belirlenmesine yönelik bilgi eksikliği hem verimlilik hem de güvenlik açısından kritik bir boşluk oluşturmaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, *Thymus vulgaris* özütü ile yeşil sentezlenen ZnO-NP'lerin buğday bitkisinin çimlenme ve erken gelişim parametreleri üzerindeki etkilerini belirlemek ve farklı konsantrasyonlardaki uygulamalar ile optimum büyüme koşullarını ortaya koymaktır. Çalışmanın hipotezi, bitki bazlı sentezlenen ZnO-NP'lerin düşük ve orta konsantrasyonlarda büyümeyi teşvik edeceği, yüksek konsantrasyonlarda ise toksik etkilere neden olabileceğidir.

Bu araştırma, (i) kekik özütü kullanılarak ZnO-NP sentezinin ayrıntılı karakterizasyonunu yapması, (ii) bu nanoparçacıkların toprak uygulamalarıyla buğday gelişimi üzerindeki etkilerini değerlendirmek ve (iii) optimum doz aralıklarını belirleyerek sürdürülebilir tarım uygulamalarına bilimsel veri sağlaması bakımından özgün bir katkı sunmaktadır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyaller

ZnO-NP'lerin sentezinde kullanılan çinko asetat dihidrat ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, >98) ve sodyum hidroksit (NaOH) Sigma-Aldrich firmasından temin edilmiştir. Kekik (*Thymus vulgaris* L.) yaprakları ve buğday tohumları (*Triticum aestivum* - Adana 99) ise Türkiye'nin Mersin ilindeki bir pazardan temin edilmiştir.

2.2. Bitki Özütünün Hazırlanması

Bitki özütü hazırlanırken Abdullah vd. (2021) tarafından belirtilen yöntem uygulanmıştır. Kekik yaprakları

yıkılarak temizlenmiş, ardından 30 g yaprak 450 mL çift distile su içinde 80°C'de 30 dakika ısıtılmıştır. Elde edilen özüt, oda sıcaklığında soğutulup süzülerek tortulardan arındırılmış ve 4°C'de saklanmıştır.

2.3. ZnO-NP'lerin Yeşil Sentezi

ZnO-NP'lerin sentezi, Abdullah vd. (2020) yöntemine göre yeşil sentez yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Kısaca, çinko asetat dihidrat stok çözeltisine bitki özütü eklenerek karıştırılmış, ardından pH 12 olacak şekilde NaOH eklenmiştir. Karışım oda sıcaklığında karıştırıldıktan sonra çökelti süzülerek saf su ile yıkanmış ve 60°C'de kurutulmuştur. Elde edilen toz halindeki ZnO-NP'ler karakterizasyon için saklanmıştır.

2.4. Karakterizasyon Teknikleri

K-ZnO-NP'lerin karakterizasyonu taramalı elektron mikroskobu (SEM), Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ve X-ışını kırınımı (XRD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SEM ve FTIR analizleri nanopartiküllerin morfolojisi ve fonksiyonel grupları hakkında detaylı bilgi sağlarken, XRD ortalama partikül boyutunu belirlemiştir. K-ZnO-NP'lerin ortalama boyutları, Debye-Scherrer denklemi kullanılarak hesaplanmıştır (Eq.1).

$$D = 0.9\lambda / \beta \cos\theta \quad (1)$$

Burada, D kristal taneciklerinin boyutunu, β (radyan cinsinden) XRD pikinin yarı maksimum genişliğini (FWHM), λ X-ışınlarının dalga boyunu, θ gözlemlenen pik açısını ve k ise sabit değeri ($k=0,9$) ifade etmektedir (Zakirov vd. 2018).

2.5. Çimlenme Testleri

Çimlenme testleri, farklı konsantrasyonlardaki K-ZnO-NP'ler içeren distile su ile nemlendirilmiş filtre kâğıdı bulunan petri kaplarında gerçekleştirilmiştir. Kontrol grupları için 5 mL distile su kullanılmıştır. Her grupta 10 tohum olacak şekilde üç tekrar yapılmıştır. Petri kapları, 25°C'de 12 saatlik fotoperiyotla büyüme kabinde inkübe edilmiştir. Yedi gün sonra çimlenme yüzdesi kaydedilmiş ve radikula ile plumula uzunlukları ölçülmüştür (Doğaroğlu, 2019).

2.6. Saksı Deneyleri

Saksı deneyleri, torf dolu plastik saksılarda (pH 6,0-7,0, organik madde: %76,4, nem eşdeğeri: %107) gerçekleştirilmiştir. Buğday tohumları ekilmiş ve farklı konsantrasyonlardaki K-ZnO-NP'ler (250-5000 mg/L) 10 mL olacak şekilde toprağa uygulanmıştır. Her grupta beş bitki olacak şekilde üç tekrar yapılmıştır. Saksılar, kontrollü sıcaklık ve ışık koşullarına sahip bir ortamda

tutulmuştur. 21 gün sonra kök ve sürgün uzunluğu, kuru/yaş ağırlık oranları ve klorofil içeriği (SPAD-502 klorofil ölçer, Konica-Minolta, Japonya) ölçülmüştür (Uysal vd. 2024).

2.7. Bitki Dokusundaki Çinko Miktarının Belirlenmesi

Bitkilerin 65°C'de 48 saat kurutulan sürgünleri tartılmış ve 220°C'de sıcak plakada 5 mL 12 M HNO₃ ile parçalanmıştır (Doğaroğlu ve Köleli, 2017). Bitkilerdeki Zn²⁺ miktarı, indüktif eşleşmiş plazma kütle spektrometresi (ICP-MS) (Agilent 7500ce Model) ile belirlenmiştir.

2.8. İstatistiksel Analizler

Elde edilen veriler, varyans analizi (ANOVA) ve ardından gruplar arasındaki anlamlı farkları belirlemek için Post Hoc en küçük anlamlı fark (LSD) testi kullanılarak istatistiksel olarak analiz edilmiştir. $p < 0,05$ değeri istatistiksel olarak anlamlı kabul edilmiştir.

3. Bulgular

3.1. K-ZnO-NP'lerin Karakterizasyonu

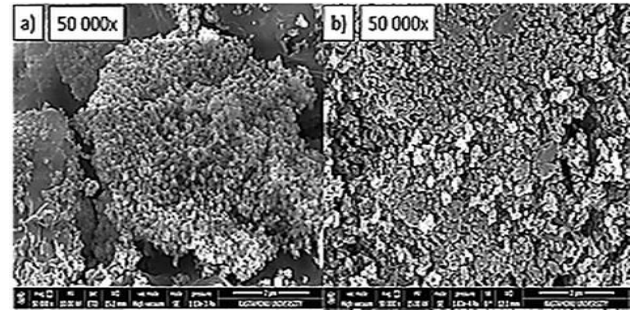
Şekil 1(a ve b), kekik ekstraktı ile sentezlenen ZnO-NP ve K-ZnO-NP'lerin yüzey morfolojisini göstermektedir. SEM görüntülerinde, ZnO-NP kristallerinin üçgen-yıldız yapısında olduğu ve homojen bir dağılım sergilediği görülmüştür. Ancak, yeşil sentez yöntemiyle üretilen nanoparçacıklarda yaygın olarak gözlenen bir durum olarak, zaman zaman kümelenmeler meydana gelmiştir (Vidya vd. 2013).

FTIR analizleri, ZnO-NP'lerin bitki ekstraktındaki bileşiklerle etkileşimini ve sentez sırasında rol oynayan biyomolekülleri belirlemek için gerçekleştirilmiştir (Şekil 2a ve b). Ham ZnO-NP'lerin spektrumu (Şekil 2b), 3364 cm⁻¹'de O-H gerilme titreşimlerini, 1386 cm⁻¹'de C=O asimetrik gerilmesini ve 554 cm⁻¹'de Zn-O bağlarını

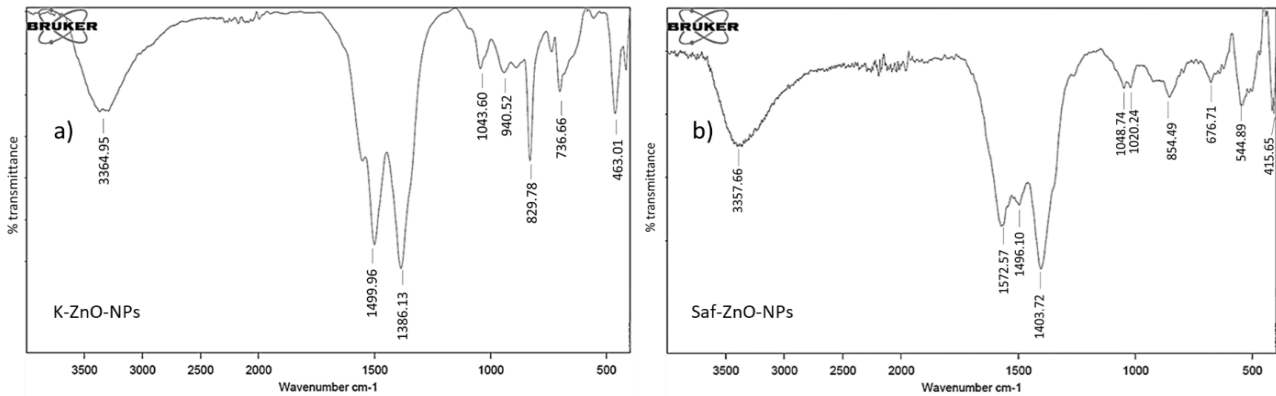
göstermektedir. K-ZnO-NP'lerin spektrumu (Şekil 2a), 3357 cm⁻¹'de hidroksil (O-H) gruplarına, 1572 cm⁻¹'de polifenolik C=C gerilmesine, 1496 ve 1403 cm⁻¹'de karboksilat (COO⁻) titreşimlerine karşılık gelen pikler içermektedir (Matinise vd. 2017). Zn-O bağı 544 cm⁻¹'de

Pik göstermiştir. 1048 ve 1020 cm⁻¹'deki pikler, kekik ekstraktında bulunan doymuş esterler, alkoller, fenoller ve asit anhidritlerinin C-O, C-C ve C-O-C gerilme titreşimleriyle ilişkilendirilmiştir (Gabriela vd. 2017; Arumugam vd. 2021). 400-600 cm⁻¹ arasındaki geniş absorpsiyon bandı ve 544 cm⁻¹'deki pik Zn-O titreşimlerini doğrulamaktadır (Rathnasamy vd. 2019; Tantiwatcharothai vd. 2019). Ayrıca, 854 ve 622 cm⁻¹'de gözlenen pikler alkan ve alkenlerin C=C bükülme titreşimlerine karşılık gelmektedir (Larkin, 2017; Bharathi ve Bhuvaneshwari, 2019). Bu sonuçlar, ZnO-NP'lerin kekik ekstraktı ile başarıyla sentezlendiğini ve nanoparçacık yüzeyinde bitkisel bileşiklerin varlığını doğrulamaktadır.

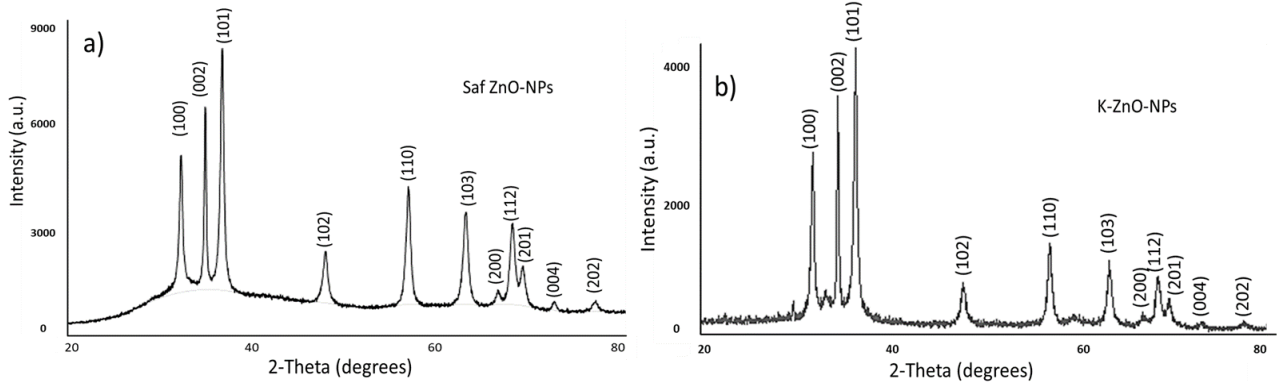
XRD analizi (Şekil 3), K-ZnO-NP ve ham ZnO-NP'lerin 2θ = 31,76°, 34,40°, 36,17°, 47,52°, 56,58°, 62,83°, 66,36°, 67,93°, 69,07°, 72,52°, 76,94° ve 81,34°'de belirgin pikler gösterdiğini ortaya koymuştur. Debye-Scherrer denklemi ile hesaplanan ortalama partikül boyutu 19,72 nm'dir.



Şekil 1. Sentezlenen a) Ham-ZnO-NP'lerin ve b) K-ZnO-NP'lerin SEM görüntüleri



Şekil 2. a) Kekik özütü kullanılarak yeşil sentezlenen ZnO-NP'lerin (K-ZnO-NP'ler) ve b) Ham-ZnO-NP'lerin FTIR spektrumları



Şekil 3. Sentezlenen a) Ham ZnO-NP'lerin ve b) K-ZnO-NP'lerin XRD desenleri

3.2. K-ZnO-NP'lerin Çimlenme ve Erken Büyüme Üzerine Etkileri

Çimlenme testleri, K-ZnO-NP'lerin buğday tohumları üzerindeki etkisini değerlendirmiştir (Şekil 4a). K-ZnO-NP süspansiyonu, kontrole kıyasla çimlenmeyi anlamlı şekilde artırmış ($p<0,05$) ve 2000-5000 mg/L konsantrasyonlarında %97-100 çimlenme oranına ulaşılmıştır. Kök büyümesi 250-2000 mg/L'de teşvik edilirken ($p<0,05$), 3000-5000 mg/L'de inhibe edici etki göstermiştir ($p<0,05$) (Şekil 4b). Sürgün uzaması da 3000 mg/L'de maksimum azalma göstermiştir ($p<0,05$).

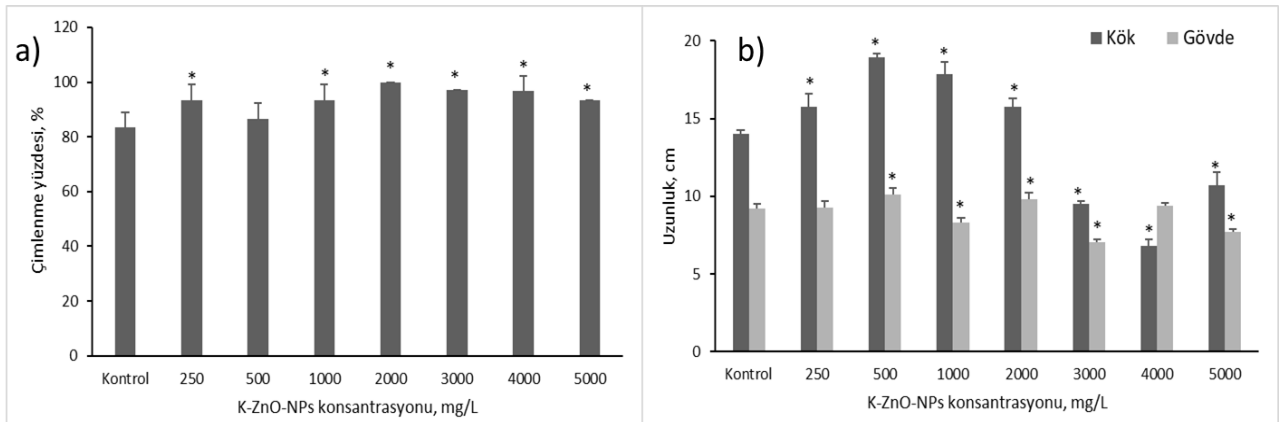
3.3. K-ZnO-NP'lerin Bitki Büyümesine Etkileri

Toprak uygulamalarında K-ZnO-NP süspansiyonunun bitki büyümesine etkileri değerlendirilmiş ve artan K-ZnO-NP konsantrasyonları ile bitki boyunun anlamlı şekilde arttığı belirlenmiştir (Şekil 5a) ($p<0,05$). En yüksek ve en düşük

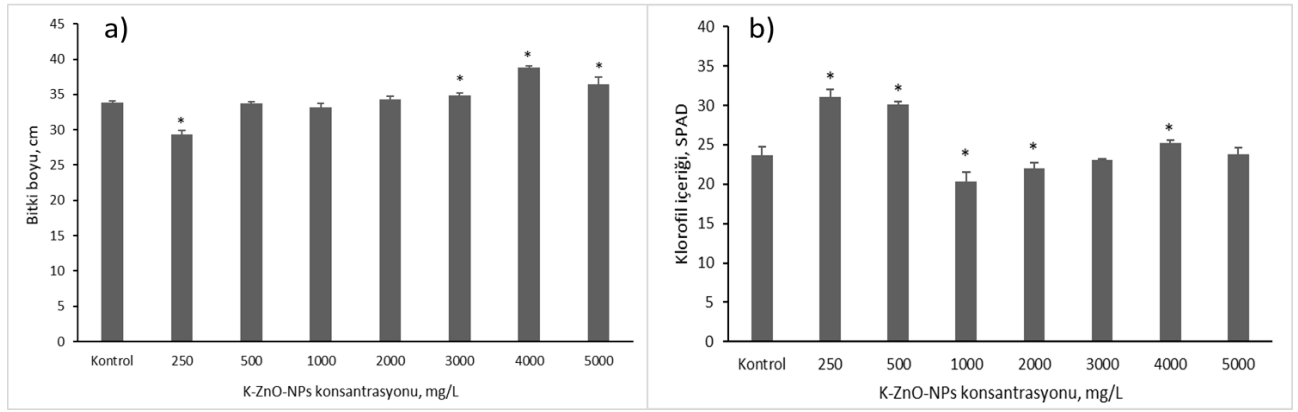
bitki boyları sırasıyla 4000 mg/L ve 250 mg/L konsantrasyonlarında 38,9 cm ve 29,3 cm olarak kaydedilmiş, kontrol grubunun ortalama bitki boyu ise 33,9 cm olmuştur. Bitki sağlığının önemli bir göstergesi

olan klorofil içeriği, 250 ve 500 mg/L K-ZnO-NP süspansiyonu ile artış göstermiş ($p<0,05$), ancak daha yüksek konsantrasyonlarda kontrol grubuna kıyasla belirgin bir değişiklik gözlenmemiştir (Şekil 5b). En yüksek klorofil içeriği, 250 mg/L konsantrasyonunda 31,9 SPAD olarak ölçülmüştür. Ayrıca, bitki gelişimi açısından kritik bir parametre olan kuru/aşırı yaş ağırlık oranı incelenmiş ve farklı konsantrasyonlar arasında anlamlı farklılıklar tespit edilmiştir ($p<0,05$) (Şekil 6a).

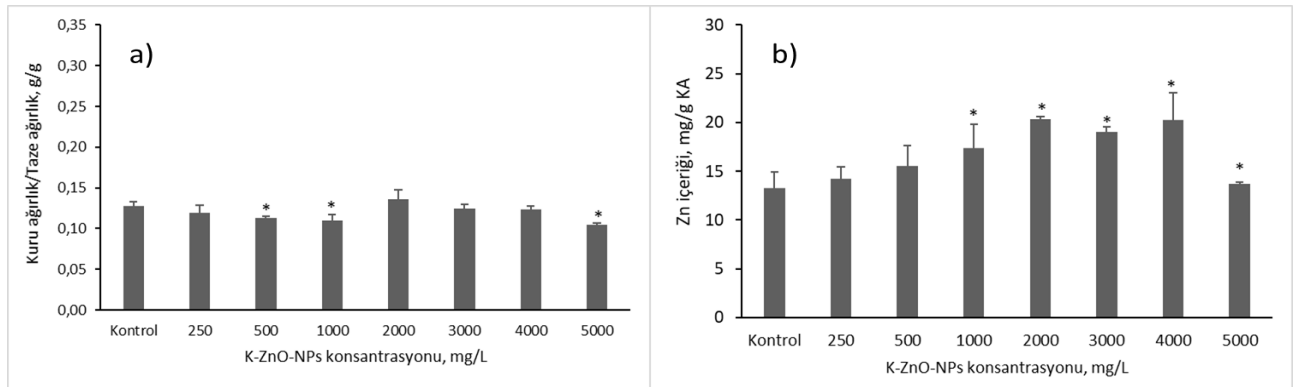
K-ZnO-NP süspansiyonu, toprak uygulamasında Zn içeriğini 2000 mg/L'ye kadar anlamlı şekilde artırmış (Şekil 6b) ($p<0,05$), ancak 5000 mg/L'de Zn^{2+} alımı kontrol seviyelerine geri dönmüştür (13,72 mg Zn/g dw). Maksimum Zn^{2+} alımı 2000 mg/L konsantrasyonunda 20,32 mg/g dw olarak belirlenirken, kontrol bitkilerinde bu değer 13,26 mg Zn^{2+} /g dw olarak ölçülmüştür. Yeşil sentezlenmiş ZnO-NP'lerin farklı bitki ekstraktlarıyla üretilmesine yönelik çalışmaların sonuçları Çizelge 1'de sunulmaktadır. Bu bulgular, yüksek ZnO-NP konsantrasyonlarının bitkilerde Zn^{2+} alım mekanizmalarını sınırlandırabileceğini göstermektedir.



Şekil 4. K-ZnO-NP süspansiyonunun farklı konsantrasyonlardaki a) çimlenme yüzdesi ve b) buğdayın kök ve gövde uzaması üzerindeki etkileri (* kontrol grubuna kıyasla anlamlı etki gösteren değerler, $p<0,05$).



Şekil 5. K-ZnO-NP'lerin a) bitki boyu ve b) klorofil içeriği üzerindeki etkileri (* kontrol grubuna kıyasla anlamlı bir etki olduğunu göstermektedir, $p<0,05$).



Şekil 6. K-ZnO-NP'lerin a) yaş/kuru ağırlık ve b) buğday fidelerinin çinko içeriği üzerindeki etkileri (* kontrol grubuna kıyasla anlamlı bir etki olduğunu göstermektedir, $p<0,05$)

Çizelge 1. Literatürde Yeşil Sentezle Üretilen ZnO Nanopartiküllerinin Farklı Bitkiler Üzerindeki Etkileri

Bitki kaynağı	Süspansiyon	Test edilen bitkiler	Etkiler	Referans
<i>Catharanthus roseus</i> (Zakkum)	Çimlenme	<i>Triticum aestivum</i> (buğday)	ZnO-NP'ler çimlenme üzerinde anlamlı bir etki göstermemiştir. Ancak kök-sürgün uzunluğu, fide uzunluğu, kök-sürgün kuru ağırlığı ve tohum canlılık indeksi artmıştır.	(Meher vd. 2020)
<i>Coriandrum sativum</i> (Kıyış)	Petri kabında çimlenme	<i>L. esculentum</i> (domates)	100 ppm ZnO-NP uygulaması fitotoksiste göstermemiştir	(Asmat-Campos vd. 2022)
<i>Aloe barbadensis</i> (Aloe-vera)	Toprakta çimlenme	<i>Vigna radiata</i> (mung fasulyesi) ve <i>Cajanus cajan</i> (red gram) tohumu	ZnO-NP'ler çimlenme oranını, sürgün-kök uzunluğunu, taze ve kuru biyokütle artırmıştır	(Rani vd. 2020)
<i>Salvia rosmarinus</i> (Biberiye)	Toprak süspansiyonu	<i>Triticum durum L.</i> (buğday)	Klorofil içeriği ve sürgün kuru ağırlığı önemli ölçüde artmıştır. ZnO-NP uygulamasıyla birlikte bitkideki çinko (Zn) miktarı yükselmiştir.	(Balcı ve Dağhan, 2023)
<i>Artemisia annua</i> (Tatlı pelin)	Hoagland besin çözeltisi	<i>Cucumis melo L.</i> (kavun)	ZnO-NP'ler kuraklık stresinin olumsuz etkilerini azaltarak morfolojik özellikleri korumuş ve fotosentetik pigmentlerin bozulmasını önlemiştir.	(Rehman vd. 2023)
<i>Thymus vulgaris</i> (Kekik)	Petri kabında çimlenme ve toprakta bitki gelişimi	<i>Triticum aestivum</i> - Adana 99 (buğday)	ZnO-NP süspansiyon uygulamasının çimlenmeyi olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Toprak süspansiyon uygulaması kök uzunluğunu artırırken, düşük konsantrasyonlarda klorofil içeriğini yükseltmiştir.	Bu çalışma

4. Tartışma

Bu çalışmada, *Thymus vulgaris* özütü ile yeşil sentezlenen ZnO nanoparçacıklarının (K-ZnO-NP'ler) buğday bitkisinin çimlenme, erken gelişim ve büyüme parametreleri üzerine etkileri incelenmiştir.

Karakterizasyon deneylerinde SEM görüntülerinde gözlemlenen aglomerasyon, nanoparçacıkların yüksek yüzey alanı ve biyosentetik ZnO-NP'lerin elektrostatik çekim kuvvetlerinden kaynaklanmaktadır (Aminuzzaman vd. 2018). pH seviyesinin ZnO-NP'lerin oluşumunu, şeklini ve yapısını etkilediği bilinmektedir. Daha yüksek pH seviyeleri, daha küçük nanoparçacıkların oluşmasını sağlarken, fazla OH⁻ iyonları Zn²⁺ ile daha güçlü etkileşime girerek Zn-O bağlarının oluşumunu güçlendirmektedir (Wahab vd. 2009). Wang vd. (2008) tarafından yapılan çalışmalarda, çözelti pH'ının değiştirilmesiyle farklı ZnO morfolojilerinin (çubuk, çiçek vb.) elde edilebileceği belirtilmiştir.

XRD analizinde gözlemlenen pikler, K-ZnO-NP'lerin Miller indeksleriyle uyumlu olup, ZnO'nun hekzagonal wurtzite kristal yapısına işaret etmektedir (JCPDS kart numarası: 36-1451) (Kumar vd. 2019). XRD piklerinin genişliği, nanoparçacıkların nanometre ölçeğinde olduğunu doğrulamış ve sentezlenen ZnO-NP'lerin yüksek kristalliniteye ve saflığa sahip olduğunu göstermiştir. Çünkü analizlerde yabancı fazlarla ilişkili herhangi bir pik gözlemlenmemiştir. Bu bulgular, literatürdeki önceki çalışmalarla da uyumludur (Rana vd. 2016). Önceki araştırmalarda ZnO-NP sentezi için yüksek sıcaklıklar kullanılırken, bu çalışmada sentez işlemi oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir (Anbuvaran vd. 2015; Karnan ve Selvakumar, 2016). Bu durum, ZnO-NP'lerin çevre dostu, hızlı ve enerji verimli bir yöntemle üretilebileceğini göstermektedir.

Çimlenme testlerinin bulguları, K-ZnO-NP süspansiyonunun çimlenmeyi olumsuz etkilemediğini ve kontrole kıyasla çimlenmeyi anlamlı şekilde artırdığını ortaya koymuştur. Literatürde, yeşil sentezlenmiş ZnO-NP'lerin çeşitli tohum türlerinde olumlu etkileri bildirilmiştir (Singh vd. 2019; Rani vd. 2020; Umavathi vd. 2021). Benzer şekilde, Meléndez-Mori vd. (2025) mısır tohumlarında ZnO-NP uygulamasının düşük dozlarda çimlenme ve fide gelişimini artırdığını, ancak yüksek dozlarda fitotoksitesite riskinin arttığını bildirmiştir; bu durum çalışmamızdaki yüksek konsantrasyon etkileri ile paralellik göstermektedir. Çimlenme süreci su alımıyla başlayıp embriyo genişlemesiyle devam eder (Jampi vd. 2021), ancak büyüme sürecini değerlendirmek için kök ve sürgün uzaması da önemlidir (Azim vd. 2022). Bitki büyüme parametrelerinin incelendiği deneylerden elde

edilen bulgular, K-ZnO-NP uygulamalarının düşük ve orta konsantrasyonlarda (250–2000 mg/L) kök ve sürgün gelişimini teşvik ettiğini, yüksek konsantrasyonlarda (3000–5000 mg/L) ise kısmi inhibisyon oluşturduğunu göstermektedir. Örneğin, Meher vd. (2020) yeşil sentezlenmiş ZnO-NP'lerin buğday tohumlarında çimlenme oranını artırdığını, ancak yüksek dozların kök ve sürgün gelişimini sınırladığını rapor etmiştir. Rani vd. (2020) ise *Vigna radiata* ve *Cajanus cajan* türlerinde ZnO-NP uygulamasının biyokütle artışı sağladığını, fakat doz artışının büyüme parametrelerinde düşüşe neden olabildiğini belirtmiştir.

Klorofil içeriği bulgularımız, düşük konsantrasyonlarda (250 ve 500 mg/L) klorofil içeriklerinde anlamlı artış olduğunu, yüksek dozlarda ise kontrol seviyelerine yakın değerler elde edildiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, Balci ve Dağhan (2023) tarafından durum buğdayında ZnO-NP uygulaması ile gözlenen klorofil artışı ile uyumludur. Ayrıca, Rehman vd. (2023) melon bitkisinde ZnO-NP'lerin fotosentetik pigmentlerin bozulmasını önleyerek stres toleransını artırabileceğini bildirmiştir. Gupta vd. (2024) ise *Phaseolus vulgaris* bitkisinde düşük doz ZnO-NP uygulamasının net fotosentetik oranı, stomatal iletkenliği ve klorofil içeriğini artırarak verim bileşenlerini iyileştirdiğini, yüksek dozlarda ise bu etkilerin azaldığını rapor etmiştir.

ZnO-NP'lerin geleneksel büyümeyi destekleyici gübrelerle karşılaştırılması kritik bir konudur. Literatürde bazı çalışmalar, ZnO-NP'lerin geleneksel Zn gübrelerine kıyasla benzer ya da daha üstün etkiler sağladığını ortaya koymuştur. Singh vd. (2019) ZnO-NP'lerin geleneksel ZnSO₄ gübrelerine kıyasla daha düşük dozlarda benzer ya da daha iyi performans sergilediğini belirtmiştir. Benzer şekilde, Rai-Kalal ve Jajoo (2021) ZnO-NP uygulamalarının buğday fidelerinde taze ve kuru ağırlıkları artırdığını ve ticari ZnSO₄ gübreleri ile karşılaştırılabilir büyükte olumlu etkiler sağladığını bildirmiştir. Coppa vd. (2024) ise durum buğdayında biyojenik ZnO-NP'lerin kadmiyum toksisitesini azalttığını, klorofil içeriğini ve fotosentetik verimliliği artırdığını, böylece stres koşullarında da büyüme avantajı sağladığını göstermiştir; bu bulgu, çalışmamızdaki toprak uygulamalarının olası stres azaltıcı potansiyeline işaret etmektedir. Gelecek çalışmalar, ZnO-NP'lerin ticari Zn gübreleri ile doğrudan karşılaştırılmasını içermelidir.

Çinko, bitkilerde enzimatik ve hormonal aktiviteyi teşvik eden hayati bir element olup, metabolik süreçler, su alımı ve enzim aktivitesi gibi birçok kritik işlevi destekler (Hafeez vd. 2013). Sahoo et al. (2021), kuru madde birikiminin tahıl verimi açısından önemine dikkat

çekmiştir. Yaprak kuru/aşırı yaş ağırlık oranı bireysel yapraklar arasında değişkenlik gösterebilir birçok araştırmacı yaprak biyokütlesini değerlendirirken kuru ağırlığı temel parametre olarak kullanmaktadır (Huang vd. 2019). Literatürde, 50 ppm ZnO+CaO'nun sürgün uzunluğu, sürgün ve kök sayısı, bitki verimi ve yaprak alanı üzerinde olumlu etkiler gösterdiği, kök uzunluğu ve bitki ağırlığının ise 200 ppm ZnO+CaO uygulamasında en yüksek değerlere ulaştığı bildirilmiştir. Bu çalışmada gözlenen pozitif etkiler, ZnO-NP'lerin bitki metabolizmasında önemli roller üstlenmesinden kaynaklanabilir. K-ZnO-NP'lerin düşük ve orta konsantrasyonlarda buğday gelişimi üzerinde olumlu etkiler gösterdiği, yüksek konsantrasyonlarda ise toksisite riskinin ortaya çıkabileceği görülmüştür. Bu durum, tarımsal uygulamalarda optimum nanoparçacık dozlarının belirlenmesinin gerekliliğini ortaya koymakta ve sürdürülebilir tarım uygulamaları açısından önemli bir veri sağlamaktadır. Bununla birlikte, bu çalışma laboratuvar

koşullarında yürütülmüş olup farklı çevresel koşullar ve toprak tipleri değerlendirilmemiştir. Yüksek konsantrasyonlarda gözlenen kısmi inhibisyonun uzun vadeli etkilerinin anlaşılabilmesi için saha koşullarında ek araştırmalara ihtiyaç vardır.

Özetle, bu çalışma K-ZnO-NP'lerin buğday bitkilerinin büyüme performansı üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır. Çevre dostu bir sentez yöntemi olarak kekik ekstraktının kullanılması, yeşil sentezin sürdürülebilir bir seçenek olma ihtimalini güçlendirmektedir. Bununla birlikte, toprak uygulama tekniklerinin daha kapsamlı bir değerlendirme için ek araştırmalarla desteklenmesi gerektiği ön görülmektedir. Elde edilen bulgular, nano özelliklere sahip bileşiklerin bitki büyümesini nasıl etkilediğini anlamak ve bunların tarımsal uygulamadaki potansiyelini değerlendirmek için gelecekteki araştırmalara yön verebilir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Bu çalışmanın hazırlanma sürecinde bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan olunur.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Kaynaklar, Araştırma, Deney, Doğrulama, Metodoloji, Biçimsel analiz, Yazma – orijinal taslak, Görselleştirme

Yazar 2: Kaynaklar, Araştırma, Deney, Doğrulama, Metodoloji, Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak,

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Yazarlar, bu çalışmanın bulgularını destekleyen ana verilerin makale içerisinde mevcut olduğunu beyan ederler.

5. Kaynaklar

- Abdullah, F.H., Abu Bakar, N.H.H. and Abu Bakar, M., 2021. Comparative study of chemically synthesized and low temperature bio-inspired *Musa acuminata* peel extract mediated zinc oxide nanoparticles for enhanced visible-photocatalytic degradation of organic contaminants in wastewater treatment. *Journal of Hazardous Materials*, **406**, 124779.
- Abdullah, F.H., Abu-Bakar, N.H.H. and Abu Bakar, M., (2020). Low temperature biosynthesis of crystalline zinc oxide nanoparticles from *Musa acuminata* peel extract for visible-light degradation of methylene blue. *Optik*, **206**, 164279.
- Abdulqudos, A.N. and Abdulrahman, A.F., 2022. Biosynthesis and characterization of ZnO nanoparticles by using leaf extraction of *Allium calocephalum* Wendelbow plant. *Passer Journal*, **4** (2), 113-126.

- Aminuzzaman, M., Ying, L. P., Goh, W.-S. and Watanabe, A., 2018. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using aqueous extract of *Garcinia mangostana* fruit pericarp and their photocatalytic activity. *Bulletin of Materials Science*, **41**.
<https://doi.org/10.1007/s12034-018-1568-4>

- Anbuvaran, M., Ramesh, M., Viruthagiri, G., Shanmugam, N. and Kannadasan, N., 2015. Anisochilus carnosus leaf extract mediated synthesis of zinc oxide nanoparticles for antibacterial and photocatalytic activities. *Materials Science in Semiconductor Processing*, **39**, 621–628.

- Arumugam, M., Manikandan, D.B., Dhandapani, E., Sridhar, A., Balakrishnan, K., Markandan, M. and Ramasamy, T. 2021. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) using *Syzygium cumini*: Potential multifaceted applications on antioxidants, cytotoxic and as nanonutrient for the growth of *Sesamum indicum*. *Environmental Technology and Innovation*, **23**, 101653.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101653>.

- Asmat-Campos, D., López-Medina, E., Montes de Oca-Vásquez, G., Gil-Rivero, E., Delfín-Narciso, D., Juárez-Cortijo, L., Villena-Zapata, L., Gurreonero-Fernández, J. and Rafael-Amaya, R. 2022. ZnO nanoparticles obtained by green synthesis as an alternative to improve the germination characteristics of *L. esculentum*. *Molecules*, **27**, 2343.
<https://doi.org/10.3390/molecules27072343>.

- Azim, Z., Singh, N. B., Khare, S., Singh, A., Amist, N., Niharikaa and Yadava, R.K. 2022. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using *Vernonia cinerea* leaf extract and evaluation as nano-nutrient on the growth and development of tomato seedling. *Plant Nano Biology*, **2**, 100011.

- <https://doi.org/10.1016/j.plana.2022.100011>.
- Balci, G.N. and Dağhan, H. 2023. Effects of zinc oxide nanoparticle application on growth and zinc uptake of durum wheat. *MAS JAPS*, **8**, 907–923.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.10003026>
- Barzinjy, A.A., Hamad, S.M., Aydın, S., Ahmed, M.H. and Hussain, F.H.S. 2020. Green and eco-friendly synthesis of nickel oxide nanoparticles and its photocatalytic activity for methyl orange degradation. *J Mater Sci: Mater Electron* **31**, 11303–11316.
<https://doi.org/10.1007/s10854-020-03679-y>
- Bharathi, D. and Bhuvaneshwari, V. 2019. Synthesis of zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) using pure bioflavonoid rutin and their biomedical applications: Antibacterial, antioxidant and cytotoxic activities. *Research on Chemical Intermediates*, **45**(4), 2065–2078.
<http://dx.doi.org/10.1007/s11164-018-03717-9>
- Coppa, E., Quagliata, G., Palombieri, S., Iavarone, C., Sestili, F., Del Buono, D., and Astolfi, S. 2024. Biogenic ZnO nanoparticles effectively alleviate cadmium-induced stress in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) Plants. *Environments*, **11**(12), 285.
<https://doi.org/10.3390/environments11120285>
- Doğaroğlu, Z.G. and Köleli, N. (2017). TiO₂ and ZnO nanoparticles toxicity in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Clean–Soil, Air, Water*, **45**, 1700096.
<https://doi.org/10.1002/clen.201700096>
- Doğaroğlu, Z.G. (2019). Role of EDDS and ZnO-nanoparticles in wheat exposed to TiO₂Ag-nanoparticles. *Archives of Environmental Protection*, **45**(4), 78–83.
<https://doi.org/10.24425/aep.2019.130244>.
- Gabriela, Á.M., Gabriela, M.O.V., Luis A.M., Reinaldo, P.R., Michael, H.M., Rodolfo, G.P. and Roberto, V.B.J. 2017. Biosynthesis of silver nanoparticles using mint leaf extract (*Mentha piperita*) and their antibacterial activity advanced science. *Engineering and Medicine*, **9**, 1–10.
- Gupta, A., Bharati, R., Kubes, J., Popelkova, D., Praus, L., Yang, X., Severova, L., Skalicky, M., and Brestic, M. 2024. Zinc oxide nanoparticles application alleviates salinity stress by modulating plant growth, biochemical attributes and nutrient homeostasis in *Phaseolus vulgaris* L. *Frontiers in Plant Science*, **15**, 1432258.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1432258>
- Hafeez, B.M., Khanif, Y.M. and Saleem, M. 2013. Role of zinc in plant nutrition-a review. *American Journal of Experimental Agriculture*, **3**, 374–391.
<https://doi.org/10.9734/AJEA/2013/2746>.
- Huang, W., Ratkowsky, D.A., Hui, C., Wang, P., Su, J. and Shi, P. 2019. Leaf fresh weight versus dry weight: which is better for describing the scaling relationship between leaf biomass and leaf area for broad-leaved plants? *Forests*, **10**(3), 256.
<https://doi.org/10.3390/f10030256>
- Jampi, A.L.W., Chin, S.F., Wasli, M.E. and Chia, C.H. 2021. Preparation of cellulose hydrogel from sago pith waste as a medium for seed germination. *Journal of Physical Science*, **32**(1), 13–26.
<https://doi.org/10.21315/jps2021.32.1.2>
- Karnan, T. and Selvakumar, S.A.S. 2016. Biosynthesis of ZnO nanoparticles using rambutan (*Nephelium lappaceum* L.) peel extract and their photocatalytic activity on methyl orange dye. *Journal of Molecular Structure*, **1125**, 358–365.
- Król, A., Pomastowski, P., Rafinska, K., Railean-Plugaru, V. and Buszewski, B. (2017). Zinc oxide nanoparticles: synthesis, antiseptic activity and toxicity mechanism. *Adv Colloid Interface Sci.*, **249**, 37-52.
<https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.07.033>.
- Kumar, R.S., Rajendran, D., Balaraman, H.B. and Viswanathan, G. 2019. Functional deep eutectic solvent-based chaotic extraction of phycobiliprotein using microwave-assisted liquid-liquid micro-extraction from *Spirulina* (*Arthrospira platensis*) and its biological activity determination. *Algal Research*, **44**, 101709.
- Larkin, P. 2017. Infrared and Raman spectroscopy: principles and spectral interpretation. Elsevier, 2017.
- Matinise, N., Fuku, X. G., Kaviyarasu, K., Mayedwa, N. and Maaza, M. 2017. ZnO nanoparticles via *Moringa oleifera* green synthesis: Physical properties and mechanism of formation. *Applied Surface Science*, **406**, 339-347.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.01.219>.
- Meher, B.B., Sahu, S., Singhal, S., Joshi, M., Maan, P. and Gautam, S. 2020. Influence of green synthesized zinc oxide nanoparticles on seed germination and seedling growth in wheat (*Triticum aestivum*). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, **9**(5), 258-270.
<https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.905.029>.
- Meléndez-Mori, J.B., Lapid-Culqui, Y.K., Huaman-Huaman, E., Zuta-Puscan, M. and Oliva-Cruz, M. 2025. Can zinc oxide nanoparticles alleviate the adverse effects of salinity stress in *coffea arabica*? *Agronomy*, **15**, 1239.
<https://doi.org/10.3390/agronomy15051239>
- Nazir, R., Mahpara, S., Kamran, M., Niazi, N.K., Mehmood, K., and Danish, S., et al. 2024. Zinc oxide nano-fertilizer differentially affects growth, physiology, and grain biofortification in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Scientific Reports*, **14**, 12671.
<https://doi.org/10.1038/s41598-024-63987-9>
- Ovais, M., Khalil ,A.T., Islam, N.U., Ahmad, I., Ayaz, M., Saravanan, M., Shinwari, Z.K. and Mukherjee, S. 2018. Role of plant phytochemicals and microbial enzymes

- in biosynthesis of metallic nanoparticles. *Appl Microbiol Biotechnol* **102**(16), 6799-6814.
<https://doi.org/10.1007/s00253-018-9146-7>.
- Pakzad, K., Alinezhad, H. and Nasrollahzadeh, M. 2019. Green synthesis of Ni@Fe₃O₄ and CuO nanoparticles using Euphorbia maculata extract as photocatalysts for the degradation of organic pollutants under UV-irradiation. *Ceramics International*, **45**(14), 17173-17182.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.05.272>.
- Rai-Kalal, P. and Jajoo, A. 2021. Priming with zinc oxide nanoparticles improve germination and photosynthetic performance in wheat. *Plant Physiology and Biochemistry*, **160**, 341-351.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.01.032>.
- Rana, N., Chand, S. and Gathania, A.K. 2016. Green synthesis of zinc oxide nano-sized spherical particles using Terminalia chebula fruits extract for their photocatalytic applications. *International Nano Letters*, **6**, 91-98.
- Rani, P., Kaur, G., Rao, K. V., Singh J. and Rawat M. 2020. Impact of green synthesized metal oxide nanoparticles on seed germination and seedling growth of Vigna radiata (mung bean) and Cajanus cajan (red gram). *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers*, **30**, 4053-4062.
<https://doi.org/10.1007/s10904-020-01551-4>.
- Rathnasamy, S.K., Rajendran, D., Balaraman, H.B. and Viswanathan, G. 2019. Functional deep eutectic solvent-based chaotic extraction of phycobiliprotein using microwave-assisted liquid-liquid micro-extraction from Spirulina (Arthrospira platensis) and its biological activity determination. *Algal Research*, **44**, 101709.
<https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101709>.
- Raza, M.A.S., Muhammad, F., Farooq, M. et al. 2025. ZnO nanoparticles and stage-based drought tolerance in wheat (Triticum aestivum L.): Effect on morphology, physiology, nutrients uptake, grain yield and quality. *Scientific Reports*, **15**, 5309.
<https://doi.org/10.1038/s41598-025-89718-2>
- Rehman, A., Weng, J., Li, P., Shah, I.H., Rahman, S. and Khalid, M., et al. 2023. Green synthesized zinc oxide nanoparticles confer drought tolerance in melon (Cucumis melo L.). *Environmental and Experimental Botany*, **212**, 105384.
<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105384>.
- Sahoo, S.K., Dwivedi, G.K., Dey, P. and Praharaj, S. 2021. Green synthesized ZnO nanoparticles for sustainable production and nutritional biofortification of green gram. *Environmental Technology and Innovation*, **24**, 101957.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101957>.
- Singh, J., Kumar, S., Alok, A., Upadhyay, S. K., Rawat, M., Tsang, D.C.W., Bolan, N. and Kim, K.H. 2019. The potential of green synthesized zinc oxide nanoparticles as nutrient source for plant growth. *Journal of Cleaner Production*, **214**, 1061-1070.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.018>.
- Tantiwatcharothai, S. and Prachayawarakorn, J. 2019. Characterization of an antibacterial wound dressing from basil seed (Ocimum basilicum L.) mucilage-ZnO nanocomposite. *International Journal of Biological Macromolecules*, **135**, 133-140.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.118>
- Umavathi, S., Mahboob, S., Govindarajan, M., Al-Ghanim, K. A., Ahmed, Z. and Virik, P., et al. 2021. Green synthesis of ZnO nanoparticles for antimicrobial and vegetative growth applications: A novel approach for advancing efficient high quality health care to human wellbeing. *Saudi Journal of Biological Sciences*, **28**(3), 1808-1815.
<https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.12.025>.
- Uysal, Y., Doğaroğlu, Z.G., Çaylali, Z. And Karakulak, D.S. 2024. Rosemary-mediated green synthesis of zno nanoparticles and their integration into hydrogel matrices: evaluating effects on wheat growth and antibacterial properties. *Global Challenges*, **8**, 2400120.
<https://doi.org/10.1002/gch2.202400120>
- Vidya, C., Hiremath, S., Chandraprabha, M.N., Antonyraj, M.L., Gopal, I.V., Jain, A. and Bansal, K. 2013. Green synthesis of ZnO nanoparticles by Calotropis gigantea. *International Journal of Current Engineering and Technology*, **1**, 118-120.
- Wahab, R., Ansari, S., Kim, Y. S., Song, M. and Shin, H.S. 2009. The role of pH variation on the growth of zinc oxide nanostructures. *Applied Surface Science*, **255**, 4891-4896.
- Wang, Y., Li, X., Wang, N., Quan, X. and Chen, Y. 2008. Controllable synthesis of ZnO nanoflowers and their morphology-dependent photocatalytic activities. *Separation and Purification Technology*, **62**, 727-732.
- Zakirov, M.I., Semen'ko, M.P. and Korotchenkov, O.A. 2018. A simple sonochemical synthesis of nanosized ZnO from zinc acetate and sodium hydroxide. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, **10**(5), 05023.
[https://doi.org/10.21272/jnep.10\(5\).05023](https://doi.org/10.21272/jnep.10(5).05023).