



Sürdürülebilir tarımda yeşil sentez ile üretilen ZnO-nanopartiküllerinin etkinliği: Yapraktan spreyleme uygulaması

Effectiveness of ZnO-Nanoparticles produced with green synthesis in sustainable agriculture: Leaf spraying applications

Zeynep Görkem DOĞAROĞLU¹ , Yağmur UYSAL²

^{1,2}Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Mersin, TÜRKİYE

¹<https://orcid.org/0000-0002-6566-5244>; ²<https://orcid.org/0000-0002-7217-8217>

To cite this article:

Doğaroğlu, Z.G. & Uysal, Y. (2025). Sürdürülebilir tarımda yeşil sentez ile üretilen ZnO-nanopartiküllerinin etkinliği: Yapraktan spreyleme uygulaması. Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi, 29(2): 316-327

DOI: 10.29050/harranziraat.1662667

*Address for Correspondence:

Zeynep Görkem DOĞAROĞLU
e-mail:
gorkemdogaroglu@gmail.com

Öz

Çinko oksit nanoparçacıklarının (ZnO-NP'ler) yeşil sentezi, bitki büyümesini artırma potansiyelleri nedeniyle önemli ölçüde dikkat çekmiştir. Bu çalışmada, kekik ekstresi kullanılarak sentezlenen ZnO-NP'lerin (Tv-ZnO-NP'ler) buğday bitkisi üzerindeki etkileri, 250 ila 5000 mg L⁻¹ arasında değişen yedi farklı konsantrasyon uygulanarak araştırılmıştır. Amaç, bu nanoparçacıkların bitki büyümesi üzerindeki etkilerini değerlendirmek ve büyüme performansını artırmadaki potansiyel rollerine ilişkin öngörüler sağlamaktır. Tv-ZnO-NP'ler, ortalama 19,72 nm parçacık boyutu ortaya koyan SEM, FTIR ve XRD analizleri ile karakterize edilmiştir. Buğday fidelerinin büyümesi üzerindeki etkileri değerlendirmek amacıyla sentezlenen çinko oksit nanoparçacıkları (Tv-ZnO-NP'ler) yapraktan püskürtme yöntemiyle uygulanmıştır. Uygulamanın ardından, tüm uygulama konsantrasyonlarında kontrol grubuna kıyasla fide boyunda anlamlı bir artış gözlemlenmiştir. Ayrıca, düşük konsantrasyonlarda (250 ve 500 mg L⁻¹) klorofil içeriğinde anlamlı bir artış meydana gelmiş; buna karşın, daha yüksek konsantrasyonlarda (≥4000 mg L⁻¹) istatistiksel olarak anlamlı bir değişim tespit edilmemiştir. Bununla birlikte, 250 ila 3000 mg L⁻¹ konsantrasyonları arasında Tv-ZnO-NP'lere maruz kalan bitkilerde kuru/yaş ağırlık oranında istatistiksel olarak anlamlı değişiklikler ve Zn²⁺ içeriğinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, Tv-ZnO-NP'lerin buğday fidelerinin büyüme ve gelişimini olumlu yönde etkilediğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, nanoparçacık konsantrasyonu ile bitki tepkisi arasında açık bir doz-tepki ilişkisi saptanmıştır. Bu bulgu, bitki kaynaklı nanoparçacıkların tarımda kullanım potansiyelini göstermekte ve en yüksek tarımsal verimin sağlanabilmesi için uygun dozun dikkatle belirlenmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Buğday, Kekik, Klorofil, Sürdürülebilir tarım, Yaprak uygulaması

ABSTRACT

The green synthesis of zinc oxide nanoparticles (ZnO-NPs) has garnered significant attention due to their potential to enhance plant growth. In this study, the effects of ZnO-NPs synthesized using thyme extract (Tv-ZnO-NPs) on wheat plants were investigated by applying seven different concentrations ranging from 250 to 5000 mg L⁻¹. The aim was to evaluate the effects of these nanoparticles on plant growth and to provide insights into their potential roles in improving growth performance. Tv-ZnO-NPs were characterized by SEM, FTIR, and XRD analyses, revealing an average particle size of 19.72 nm. To assess their effects on the growth of wheat seedlings, the synthesized ZnO nanoparticles (Tv-ZnO-NPs) were applied via foliar spraying. Following the application, a significant increase in seedling height was observed at all treatment concentrations compared to the control group. Additionally, a significant increase in chlorophyll content was noted at low

Received Date:

21.03.2025

Accepted Date:

26.05.2025



concentrations (250 and 500 mg L⁻¹), whereas no statistically significant change was detected at higher concentrations (≥4000 mg L⁻¹). However, in plants exposed to Tv-ZnO-NPs at concentrations between 250 and 3000 mg L⁻¹, statistically significant changes in dry/fresh weight ratio and a marked increase in Zn²⁺ content were observed. These findings indicate that Tv-ZnO-NPs positively affect the growth and development of wheat seedlings. Furthermore, a clear dose-response relationship between nanoparticle concentration and plant response was established. This shows the agricultural potential of plant-derived nanoparticles and emphasizes the need to optimize the appropriate dose for achieving maximum agricultural benefits.

Key Words: Chlorophyll, Foliar treatment, Sustainable agriculture, Thyme, Wheat

Giriş

Benzersiz fiziksel ve kimyasal özellikleri sayesinde nanobilim, son yıllarda en hızlı gelişen ve en fazla ilgi gören çok disiplinli araştırma alanlarından biri haline gelmiştir. Nanopartiküller (NP'ler), boyutları 1–100 nanometre arasında değişen ve nanoteknolojinin temel bileşenlerini oluşturan partiküller olarak tanımlanır. Bu yapılar hem doğada doğal olarak bulunabilir hem de kontrollü laboratuvar koşullarında sentetik olarak üretilebilir. Boyut ve morfolojik özelliklerinden kaynaklanan yüksek yüzey alanı, iletkenlik, mekanik dayanıklılık gibi özgün özellikleri sayesinde, nanopartiküller günümüzde sağlık, çevre, enerji ve tarım gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle çevre dostu özellikleriyle öne çıkan doğal ve biyojenik nanopartiküller, son dönemde sürdürülebilir teknolojiler kapsamında dikkat çeken bir araştırma konusu olmuştur. Bu nanopartiküllerin biyosentezine dayalı üretim yöntemleri, geleneksel kimyasal ve fiziksel sentez tekniklerine kıyasla daha az enerji ve kimyasal gereksinimi duymaları, çevresel toksisiteyi azaltmaları ve daha düşük maliyetli olmaları nedeniyle avantajlı bir alternatif sunmaktadır (Chimbekujwo ve ark., 2024).

Nanoteknoloji, birçok alanda potansiyel uygulamalara ve avantajlara sahip, laboratuvar alanından pratik alana geçen yeni bir teknoloji olarak günlük hayata dahil olmuştur (Sharma ve ark., 2023). Bitki özlerinin kullanıldığı yeşil sentez metodu, sürdürülebilir, uygun maliyetli ve çevre dostu alternatif bir metod olarak ortaya çıkmaktadır. Bol ve kolay erişilebilir olan bitkiler, nanopartikül üretiminde etkili kaynaklar olarak hizmet etmektedir. Bitki özlerinde bulunan

fitokimyasallar kütle formundaki metalleri kaplayıcı, stabilize edici ve indirgeyici ajanlar olarak kullanılmakta ve diğer kimyasal ajanlara olan ihtiyacı azaltmaktadır. Bitki özlerindeki fitokimyasallar, metal iyonunu indirgeme ve ortaya çıkan nanopartiküllerin stabilizasyonunda oldukça önemlidir (Ovais ve ark., 2018). Birçok çalışmada, bitki seçiminin nanoparçacık özellikleri üzerindeki etkisi vurgulanarak farklı bitki türlerinin kullanıldığı ZnO nanopartiküllerinin (ZnO-NP'ler) yeşil sentezi araştırılmıştır (Pakzad ve ark., 2019; Potbhare ve ark., 2019; Sone ve ark., 2020).

Özellikle iklim değişikliği ve çevresel sürdürülebilirlik ile ilgili sorunların üstesinden gelebilmek ve ekosistem dostu nanomalzemeler üretmek için uygulanabilir ve etkili çözümler bulmak gereklidir. İklim değişikliğinden en çok etkilenen sistemlerden biri tarım sistemleridir. Tarımsal üretimi arttırmak ve bitki büyümesini desteklemek için kullanılan kimyasal gübrelerle alternatif olarak geliştirilen nano-gübreler, son yıllarda yaygın olarak araştırılan bir konudur (Zhu ve ark., 2020). İklim değişikliğine bağlı öngörülemeyen mevsimsel değişikliklere bağlı olarak bitkilerin değişen yaşam döngüsü, ürünün beslenme kalitesini değiştirir (Sharma ve ark., 2023). Buna bağlı olarak kimyasal gübre ve pestisitlerin aşırı kullanımı toprak verimliliğini azaltmakta, gıda güvenliğini tehdit etmekte, yeraltı suyu ve hava kirliliği gibi doğal ekosistemleri bozmaktadır (Verma ve ark. 2022; Sharma ve ark., 2023). Tüm bu olumsuzluklarla başa çıkmak, tarımsal uygulamaları verimli hale getirmek ve doğal kaynakları korumak için sistematik çalışmalarla tarımsal ve çevresel sürdürülebilirlik sağlanabilir (Babu ve ark., 2022). Bu bağlamda, nanoteknolojik gelişmelerle ortaya çıkan nano-gübrelerin araştırma ve geliştirme

çalışmaları, özellikle besin alımının artırılmasında ve toprak-bitki sistemindeki besin eksikliklerini azaltma konusunda umut vericidir (Saurabh ve ark., 2024). Nano-gübre olarak kullanılan nanopartiküller, biyotik ve abiyotik stres koşulları altında savunma sistemlerini aktive ederek bitkilerin stresle başa çıkma yeteneğinde oldukça önemli bir rol oynarlar (Usman ve ark., 2020a; Usman ve ark., 2020b; Sharma ve ark., 2023). Nano-gübreler makro (azot-N, fosfor-P, potasyum-K, kalsiyum-Ca, magnezyum-Mg ve kükürt-S) ve/veya mikro (demir-Fe, çinko-Zn, bakır-Cu, bor-B, nikel-Ni vb.) besin elementleri içeren nanopartiküller olarak tanımlanabilir. Bu gübreler iklim değişikliği nedeniyle toprak-bitki sisteminde oluşabilecek besin elementi noksanlığının yol açacağı tarımsal zararları azaltmak için araştırmacılara ve çiftçilere yeni bir çözüm yolu sunmaktadır. Özellikle metal ve metal oksit nanopartiküller besin elementi alımını kolaylaştırabilme, tohum çimlenmesini arttırma ve patojenlere karşı bitki direncini iyileştirebilme gibi özelliklere sahiptirler (Dimpka ve ark., 2012). Çinko (Zn), bitkilerin enzim ve protein yapılarının biyosentezinde aktif bir rol oynayarak çimlenme, büyüme ve gelişim aşamalarını etkileyen en önemli mikro besin elementlerinden biridir (Sturikova ve ark., 2018; Saini ve ark., 2021; Azam ve ark., 2022). Bitkilerde Zn eksikliğinde, enzim aktiviteleri bozulur, büyüme ve gelişme azalır ve kloroz gibi semptomlar gözlenebilir (Chandra ve ark., 2015; Sturikova ve ark., 2018; Azam ve ark., 2022). Bu nedenle, bir metal oksit nanopartikülü olan ZnO nanopartiküllerinin (ZnO-NP), pestisitler ve diğer gübrelerden daha iyi performans sergilemesi, üretkenlik artışına katkısı ve toprak sağlığının korunması gibi birçok avantajından dolayı tarımsal sürdürülebilirlik alanında dikkat çekmektedir (Ruttikay-Nedecky ve ark., 2017). Öte yandan, yüksek konsantrasyonlardaki ZnO-NP uygulamalarının bitkilerde toksik etki gösterdiği çalışmalar da mevcuttur (Cao ve ark., 2021; Babu ve ark., 2022). Bu nedenle, uygulanan ZnO-NP'lerin etkili eşik konsantrasyonunun doğru bir şekilde araştırılması ve değerlendirilmesi gerekmektedir.

Biyojenik olarak üretilen ZnO-NP'lerin tarım sektöründe uygulanabilirliğinin araştırıldığı bu çalışmada, sürdürülebilir ve çevre dostu bir üretim yaklaşımı ile kekik bitki özütü kullanılarak çinko oksit nanopartiküller sentezlenmiştir. Çalışmada, kekik özütünü stabilize edici ve indirgeyici ajan olarak kullanarak ZnO-NP üretimi için basit ve sürdürülebilir bir metod uygulanmıştır. Ayrıca, kekik özütünden elde edilen ZnO-NP'lerin buğdayın (*Triticum aestivum* - Adana 99) büyüme parametreleri ve klorofil içeriği üzerine etkisi açıklanmaya çalışılmıştır. Bu nanopartiküllerin bitki yapraklarına spreyleme metodu ile uygulaması gerçekleştirilerek nanopartiküllerin bitki tarafından alımı belirlenmiştir. Bu çalışmada; I) bitki özütü kullanılarak elde edilen ZnO-NP'lerin yeşil sentezi hakkında değerli bilgiler sağlamak, II) ZnO-NP'lerin bitki büyümesi üzerindeki etkilerine ışık tutmak ve III) sürdürülebilir tarım uygulamaları kapsamında bitkisel üretimde karşılaşılan beslenme sorunlarına yeni çözümler üretmek amaçlanmıştır.

Materyal ve Yöntem

Materyal

ZnO-NP'lerin sentezinde kullanılan çinko asetat dihidrat ($Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ > %98) ve sodyum hidroksit (NaOH) özel bir firmadan satın alınmıştır. Kekik (*Thymus vulgaris* L.) yaprakları ve buğday (*Triticum aestivum* - Adana 99) tohumları, Mersin ili yerel piyasasından temin edilmiştir.

Bitki özütü hazırlama ve ZnO-NP'lerin yeşil sentezi

Bitki özütünün hazırlanması yöntemi Abdullah ve ark. (2020) tarafından geliştirilen yöntemle uyarlanmıştır. Kekik (*Thymus vulgaris* L.) yaprak özütü elde etmek için yapraklar musluk suyu ve damıtılmış su ile yıkanarak tüm kirliliklerden arındırılmıştır. Daha sonra, 30 g kekik yaprağı tartılmış ve 450 mL distile su içeren bir behere bırakılarak hot-plate üzerinde (80°C) 30 dakika ısıtılmıştır. Süre sonunda hazırlanan çözelti oda sıcaklığına kadar soğutulmuş ve iki kez filtre edilmiştir. Elde edilen bitki özleri daha sonra kullanılmak üzere 4°C'de buzdolabında saklanmıştır.

ZnO-NP'lerin yeşil sentezi için ilk olarak 33.33 g/L çinko asetat dihidrat ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) stok çözeltisi hazırlanmıştır (Abdullah ve ark., 2020). Daha önce hazırlanan bitki özütü (90 mL) ve çinko asetat stok çözeltisi (150 mL) 10 dakika boyunca hızlı bir şekilde karıştırılmıştır. Süre sonunda, pH 12.0'a ayarlamak için karışıma 1 M NaOH damlatılmış ve ardından oda sıcaklığında 2 saat boyunca sürekli olarak çalkalanmıştır. Elde edilen çözelti içerisindeki ZnO-NP'lerin çökmesini sağlamak amacıyla bekletilmiş ve çökelti süzülerek deiyonize su ile 3 kez yıkanmıştır. Filtre kâğıdı üzerinde toplanan çökelti bir etüvde 60°C'de gece boyunca kurutulmuştur. Yeşil sentez metodu ile üretilen kekik özütü katkılı ZnO-NP'ler (Tv-ZnO-NP) ince bir toz haline gelene kadar öğütülmüş ve karakterizasyon için saklanmıştır.

Karakterizasyon çalışmaları

Üretilen Tv-ZnO-NP'lerin karakterizasyonu taramalı elektron mikroskobu (SEM, FEI Quanta FEG 250 Model), Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR, Bruker ALPHA Model) ve X-ışını kırınımı (XRD, Bruker D8 Advance Model) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tv-ZnO-NP'lerin ortalama boyutları Debye-Scherrer denkleminde (Denklem 1) göre hesaplanmıştır.

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

Burada; D: kristal tanelerin boyutunu, β (rad): XRD zirvesinin yarım-maksimumda tam genişliğini (FWHM), λ : X-ışınlarının dalga boyunu, θ : gözlemlenen açının pik değerini ve k: sabit değeri ifade etmektedir ($k = 0.9$) (Zakirov ve ark., 2018).

Saksı denemesi: Tv-ZnO-NP süspansiyonlarının yapraktan uygulaması

Ülkemiz toprakları Zn açısından fakir olup özellikle tahıl bitkilerinin Zn ihtiyacı fazladır (Ekiz ve ark. 1998; Çakmak ve Kutman, 2018). Bu nedenle özellikle bitki gelişiminin erken döneminde Zn içeren yaprak gübreleme uygulamasının bitkiler üzerinde olumlu etkilerinin olduğu bilinmektedir (Prasad ve ark., 2012; Davarpanah ve ark., 2016; Kah ve ark., 2018).

Saksı denemelerinde bitkiler torf (pH 6.0-7.0,

organik madde: %76.4, nem eşdeğeri: %107) ortamında, oda sıcaklığında laboratuvar koşullarında yetiştirilmiştir. Her saksıya 80 g torf doldurulmuş ve 5'er adet buğday tohumu ekilerek musluk suyu ile sulanmıştır. Çimlenmenin ardından bitkiler erken gelişim evresi olan 3 yapraklı döneme (Zadoks skalasına göre Z20: ana saptta dördüncü yaprağın gelişmeye başladığı dönem (Zadoks ve ark., 1974; Tiryakioğlu ve ark., 2014) kadar 28 gün büyütülmüştür. Süre sonunda her saksının torf yüzeyi folyo ile kaplanarak üretilen Tv-ZnO-NP'lerin toprakla teması kesilmiş ve yapraktan spreyleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Adrees ve ark. (2021)'nin çalışmasına benzer şekilde, Tv-ZnO NP'lerin ilk yaprak uygulaması çimlenmeden sonraki ikinci haftada (çimlenmeden sonraki 14. gün) bir el püskürtücüsü ile yapılmıştır. Toplamda, tüm deneyde birer haftalık aralıklarla üç spreyleme gerçekleştirilmiştir. Bu işlemde bitkiler her spreylemede 5 mL olmak üzere 3 kez toplamda 15 mL farklı konsantrasyonlarda hazırlanmış Tv-ZnO-NP'ler (250, 500, 1000, 2000, 3000, 4000 ve 5000 mg L⁻¹) ile muamele edilmiştir.

Denemeler tam tesadüf deneme desenine göre 3 paralelli olarak, laboratuvar koşullarında gün ışığı altında gerçekleştirilmiştir. Spreylemenin yapıldığı son hafta (çimlenmeden sonraki 28. gün) bitkilerin boyları ve klorofil içerikleri (SPAD-502 Klorofil metre, Konica-Minolta, Japonya) ölçülmüştür. Tüm bitkiler toprak yüzeyinin 1 cm yukarısından hasat edildikten sonra olası kirleticilerden uzaklaştırmak için damıtılmış su ile yıkanmış, kurulanmış ve hassas terazi yardımı ile yaş ağırlıkları belirlenmiştir.

Kuru ağırlıkları, 48 saat 65°C'de bir etüvde tutulan bitki örnekleri tartılarak kuru ağırlıkları hesaplanmıştır. Bitkiler oda sıcaklığına gelene kadar soğuması için bir desikatörde bekletilmiş ve sabit tartıma gelen kuru bitkilerin ağırlıkları bir hassas terazi yardımı ile belirlenmiştir.

Bitkilerde Zn içeriği tayini

Kuru ağırlıkları belirlenen bitki örnekleri, bitki öğütme değirmeninde öğütülmüştür. Ardından yaklaşık 0.5 gram kuru bitki örneği, 5 mL %12 derişimli nitrik asit (HNO_3) içerisinde, 220 °C

sıcaklıktaki bir hot-plate üzerinde çözündürülmüştür (Doğaroğlu ve Köleli, 2017). Elde edilen çözelti, çinko (Zn) içeriğinin belirlenmesi amacıyla indüktif eşleşmiş plazma-kütle spektrometresi (ICP-MS, Agilent 7500ce modeli) ile analiz edilmiştir.

İstatistiksel analiz

Her bir analizin üç tekrarlı yapıldığı deneylerden elde edilen veriler ayrı ayrı varyans analizine (ANOVA) tabi tutulmuştur. ANOVA, SPSS sürüm 26.0 (IBM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Normallik testi ve varyansların homojenliği testi yapılarak verilerin normal dağılıma sahip olduğu ve gruplar arasında homojenliğin olduğu tespit edilmiştir. En küçük önemli fark (LSD) testi post-hoc olarak kullanılarak istatistiksel analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında $p < 0.05$ değeri istatistiksel olarak anlamlı kabul edilmiştir.

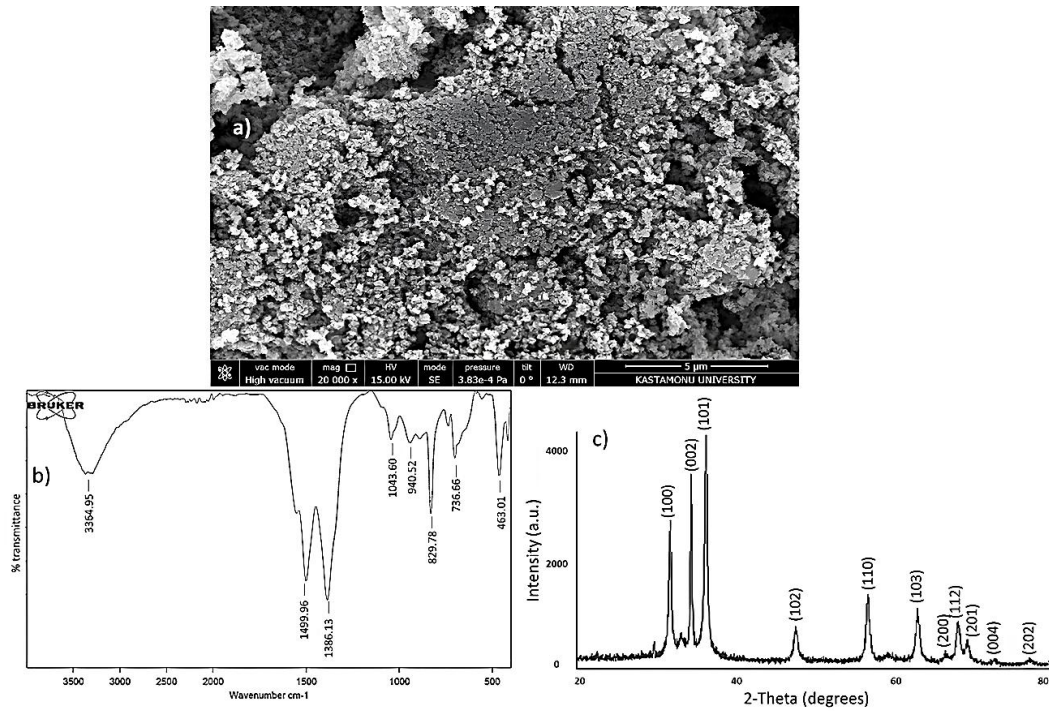
Araştırma Bulguları ve Tartışma

Üretilen Tv-ZnO-NP'lerin karakterizasyonu

Çalışma kapsamında kekik bitkisi özütü kullanılarak yeşil sentez yoluyla sentezlenen Tv-ZnO-NP'lere ait SEM görüntüsü, FTIR spektrumu ve XRD difraktogramı Şekil 1'de verilmektedir. Üretilen kekik özütü Tv-ZnO-NP kristallerinin amorf yapıda olduğu belirlenmiştir (Şekil 1a). Önceki çalışmalarda, geleneksel metodlarla sentezlenen ZnO-NP'ler genel bir eşit dağılım sergilediği belirlense de, bu çalışmada olduğu gibi özellikle yeşil yöntemiyle sentezlenen nanopartiküllerde yaygın bir karakteristik özellik olarak zaman zaman önemli bir agregasyona sahip oldukları görülmektedir. Bu olgu, biyojenik NP'lerin yükseltilmiş yüzey alanına ve kalıcı afinitesine atfedilir ve bu da kümelenme veya bir

araya gelme eğilimlerini arttırmaktadır (Vidya ve ark., 2013). Parçacık kümelenmesi, nanopartiküllerin polaritesinden ve elektrostatik çekimlerinden etkilenmektedir (Aminuzzaman ve ark., 2018).

Üretilen nanopartiküllerle ilişkili fonksiyonel grupları belirlemek için Tv-ZnO-NP'lerin FTIR analizi gerçekleştirilmiştir. Tv-ZnO-NP'lerin üretiminden sorumlu biyomoleküller, 4000 ile 400 cm^{-1} arasındaki FTIR çalışmaları kullanılarak tanımlanmıştır (Şekil 1b). Çinko asetatından gelen Zn^{2+} iyonları bitki özütünde bulunan polifenollerle bağlanarak ZnO-NP'lerin sentezi sırasında Zn^{2+} 'ya indirgenmesi nedeniyle reaksiyon çözeltisinde Zn^{+} -polifenollerin karmaşık bir üretimi olarak gözlenmektedir. Bu reaksiyonlarda rol alan fonksiyonel gruplar, bitki özütlerinden sentezlenen yeşil Tv-ZnO-NP'lerin FTIR spektrumlarındaki karşılaştırılabilir tepe noktalarıyla gösterilmektedir (Şekil 1b). Tv-ZnO-NP'lerin FTIR spektrumunda gözlenen 3357, 1572, 1496, 1403, 854, 676, 544, 468 ve 415 cm^{-1} 'deki pikler absorpsiyon bantlarını temsil etmektedir. 3357 cm^{-1} 'deki geniş ve çok güçlü bant hidroksil fonksiyonel gruplarını göstermektedir. 1572 cm^{-1} 'deki tepe noktası, polifenolik maddelerin aromatik halkalarındaki C=C gerilme titreşimleriyle ilişkilidir. Asitlerin simetrik COO gerilme modu, 1496 ve 1403 cm^{-1} 'deki tepe noktalarından sorumludur (Matinise ve ark., 2017). 1048 ve 1020 cm^{-1} 'deki spektrumlar ise bitki özündeki doymuş esterler, alkoller, fenoller, sikloalkanlar ve asit anhidritlerden kaynaklanan C-O, C-C ve C-O-C bağlarının gerilmesine bağlanabilir (Gabriela ve ark., 2017; Arumugam ve ark., 2021).



Şekil 1. Yeşil sentez metodu ile sentezlenen Tv-ZnO-NP'lerine ait a) SEM görüntüsü, b) FTIR spektrumu ve c) XRD difraktogramı

Figure 1. Tv-ZnO-NPs synthesized by green synthesis method a) SEM image, b) FTIR spectrum, and c) XRD Difraktogram

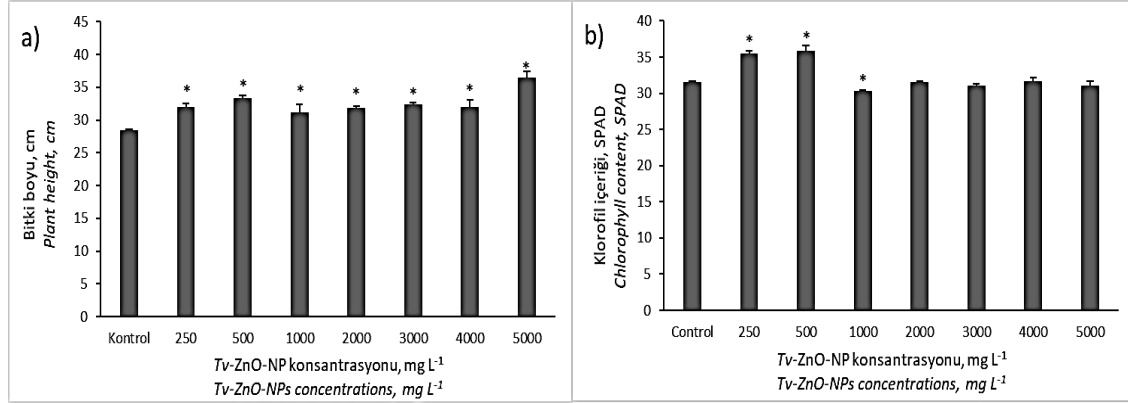
Tv-ZnO-NP'lerin XRD difraktogramlarında gözlenen pikler (JCPDS kart numarası: 36-1451), hekzagonal wurtzite yapısını tanımlamaktadır (Şekil 1c) (Kumar ve ark., 2019). Tv-ZnO-NP'lerin XRD desenleri $2\theta = 31.76^\circ, 34.40^\circ, 36.17^\circ, 47.52^\circ, 56.58^\circ, 62.83^\circ, 66.36^\circ, 67.93^\circ, 69.07^\circ, 72.52^\circ, 76.94^\circ$ ve 81.34° 'de belirgin tepe noktaları olduğunu ortaya koymuştur. Bu tepe noktaları, Tv-ZnO-NP'ler için düzlem Miller indisleriyle (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112), (201), (004), (202) ve (104) iyi uyuşmaktadır (Kaliraj ve ark., 2019). XRD tepelerinin gözlemlenebilir pik genişlemesi, malzemenin nanometre ölçeğindeki kristal boyutunu doğrulamaktadır. XRD verilerine dayanarak, ortalama parçacık boyutlarını hesaplamak için Debye-Scherrer denklemi kullanılmıştır ve sentezlenen Tv-ZnO-NP'lerin 19.72 nm boyutunda olduğu belirlenmiştir. Bu sayede hızlı, kolay ve çevresel açıdan güvenli yeşil sentez metodunun yüksek kristalli nanomalzemeler oluşturulmasında kullanılabilir. Bu nedenle, enerji verimliliği açısından, bu çalışma ZnO-NP'ler sentezlemek için geleneksel sentez metodlarına göre üstün performans ve uygulanabilir bir seçenek olarak ortaya çıkmaktadır.

Saksı denemeleri

Spreyleme işlemi sonunda Tv-ZnO-NP'lerin düşük konsantrasyonları da dahil tüm uygulamalarında, kontrol bitkilerine kıyasla buğday bitki boyunu önemli düzeyde ($p < 0.05$) artırmıştır (Şekil 2a). Tv-ZnO-NP'lerin artan konsantrasyonuna bağlı olarak bitki boylarında gözlenen artışın, bitki boyunun uzamasına sebep olan oksin hormonu sentezi ile Zn arasındaki ilişkiden kaynaklandığı bildirilmiştir (Rizwan ve ark., 2019; Pandaya ve ark., 2023). Literatür çalışmaları ZnO-NP'lerin buğday bitkisine spreyleme yolu ile verildiğinde bitki boyunun ZnO-NP konsantrasyonuna ve bitki yetiştirme koşullarına göre farklılık gösterdiğini bildirmektedir. Iqbal ve ark. (2019), ZnO-NP spre uygulamasının buğdayın bitki boyunu kuraklık stresi altında önemli ölçüde etkilenmediğini ortaya koyarken, Raza ve ark. (2025), buğdayın erken dönem gelişiminde kuraklık koşullarında ZnO-NP uygulamasının bitki boyunu arttırdığını bildirmişlerdir. Bununla birlikte, Nazir ve ark. (2024), yeşil sentez metodu ile *Withania coagulans* bitki özütünden üretilen ZnO-NP'lerin buğday bitki boyunu kontrole kıyasla % 23 arttırdığını bildirmişlerdir.

Klorofil içeriği, bitki sağlığı için hayati bir parametredir ve sonuçlar, Tv-ZnO-NP'lerin süspansiyonunun yapraktan uygulamasının, düşük konsantrasyonlarda (250 ve 500 mg L⁻¹, p <0.05) kontrole kıyasla buğday klorofil içeriğini desteklediğini ve daha yüksek konsantrasyonlarda anlamlı bir değişiklik olmadığını göstermektedir

(Şekil 2b). Bu sonuç Dimpka ve ark. (2012) ve Das ve ark. (2023)'ün, ZnO-NP'lerin yapraktan spreyleme uygulaması ile çinko-kitosan-salisilik asit nanopartikülleri ile sorgum ve buğday bitkilerinde artan fotosentetik pigment içeriğini gösteren çalışmalarıyla uyumluluk göstermektedir.



Şekil 2. Tv-ZnO-NP'lerin yapraktan spreyleme uygulamasının buğday bitkisi a) bitki boyuna ve b) klorofil içeriğine etkisi (* istatistiksel olarak anlamlı, p <0.05)

Figure 2. Effect of foliar spraying of Tv-ZnO-NPs on a) plant height and b) chlorophyll content of wheat plants (* statistically significant, p <0.05)

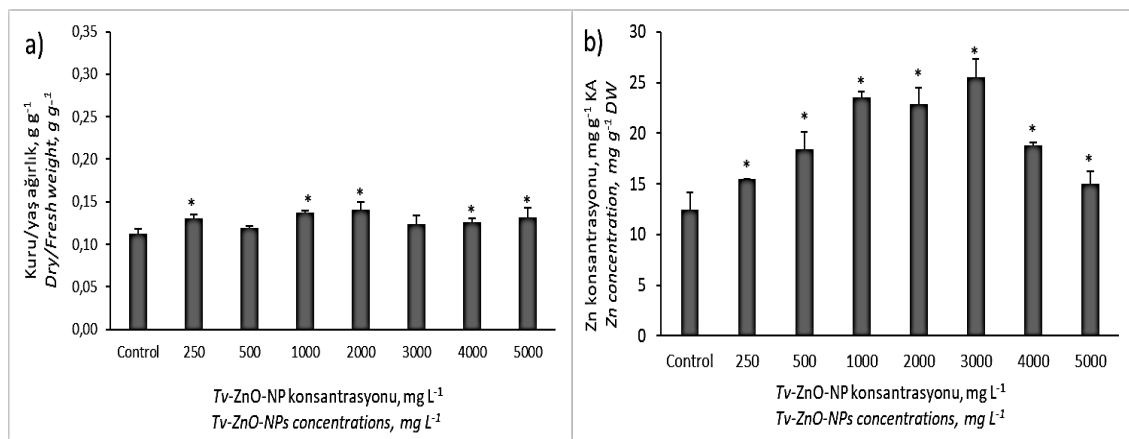
Yapraktan spreyleme uygulaması, özellikle düşük konsantrasyonlarda, en yüksek SPAD değeri ile belirtildiği gibi klorofil içeriğinin teşvik edilmesinde etkili bir yöntem olarak ortaya çıkmaktadır. Maksimum klorofil içeriği, yapraktan spreyleme uygulamasında 35.9 SPAD değeri (500 mg L⁻¹) olarak belirlenmiştir. Hu ve Xianyu (2021), sağlıklı bitki büyümesini teşvik etmek için çalışmalarda yaygın olarak kullanılan biyokimyasal ajanların çoğunluğunun amaçlanan hedef bölgeye sınırlı bir penetrasyon sergilediğini vurgulamıştır. Bu sınırlamayı ele almak için nanoteknolojinin kullanılması yaygınlık kazanmaktadır. Araştırmalar, nanopartiküllerin bitkilere biyokimyasalların iletilmesini kolaylaştırmada önemli rolünü göstermiştir. Örneğin, CeO₂, SiO₂ ve karbon noktaları spreyleme yolu ile bitkilere verildiğinde koruma hücrelerine % 100, hücre dışı boşluğa % 90.3 ve mısır ve pamuk yapraklarındaki kloroplastlara ise % 55.8'lik dağılım yüzdeleri sergiledikleri tespit edilmiştir (Adhikari ve ark., 2016; Hu ve ark., 2020). Ayrıca, Adhikari ve ark. (2016), ZnO-NP'lerin uygulanmasının hem bitki büyüme performansını hem de klorofil içeriğini artırabileceğini belirtmişlerdir.

Bu çalışmada, yapraktan spreyleme yolu ile Tv-ZnO-NP'lere maruz kalan buğday bitkilerindeki önemli bir büyüme parametresi olan kuru/yaş ağırlık oranı da değerlendirilmiştir. Yapraktan spreyleme yolu ile yedi farklı konsantrasyonda (250-5000 mg L⁻¹) Tv-ZnO-NP'lere maruz kalan buğday bitkilerinin kuru/yaş bitki ağırlık oranında istatistiksel olarak anlamlı değişiklikler gözlenmiştir (p <0.05) (Şekil 3a). Bazı çalışmalar genellikle yaş ve kuru ağırlıkları ayrı ayrı rapor ederken, yaprak kuru ağırlığının yaş ağırlığa oranına odaklanmak büyüme dinamikleri hakkında daha kapsamlı bir bilgi sağlamaktadır (Huang ve ark., 2019; Rani ve ark., 2020).

Çinko, bitkilerde enzimatik ve hormonal aktiviteyi teşvik eder (Asmat-Compos ve ark., 2022). Bunu destekleyen Sahoo ve ark. (2021), kuru maddenin tahıl bitkisi verimiyle ilgisini vurgularken, Rai-Kalal ve Jajoo (2021), ZnO-NP'lerle muamele edilen buğday fidelerinde yaş ve kuru kütlelerin arttığı bildirmiştir. Yapraklar arasındaki farklı kuru/yaş ağırlık oranının değişkenliğine rağmen, birçok araştırmacı yaprak biyokütlesi ve yaprak yüzey alanı arasındaki ölçeklendirme ilişkisini araştırırken, yaprak kuru

ağırlığı biyokütlenin temsili bir ölçüsü olarak kabul edilir. Bu ölçeklendirmenin, kuru biyokütlenin artışı etkileyen fotosentetik aktivite (ışık yakalama yüzey alanı) ile doğrudan ilişkili olduğu bilinmektedir. Ancak çoğu bitki türü için yaprak kuru ağırlığının yaprak yaş ağırlığı ile orantılı bir ilişki göstermediği de yapılan çalışmalarda belirtilmiştir (Huang ve ark., 2019). Yapılan bir çalışmada domates bitkilerine 50 mg L⁻¹ ZnO + CaO'nin kombine uygulamasının sürgün uzunluğu, sürgün sayısı, kök sayısı, bitki başına verim, meyve

ağırlığı ve yaprak alanı üzerinde olumlu etkiler gösterdiği bildirilmiştir. Tersine, kök uzunluğu, bitki ağırlığı ve meyve çapının 200 mg L⁻¹ ZnO + CaO konsantrasyonunda daha yüksek değerler sergilediği vurgulanmıştır. Ayrıca, Zn nanopartiküllerinin spreyleme işleminin geleneksel çinko tuzu ile muamele edilmiş domates bitkilerine kıyasla bitki yaş ağırlığında % 7.7'lik bir artışa neden olduğu bildirilmiştir (Farooq ve ark., 2023).



Şekil 3. Tv-ZnO-NP'lerin yapraktan spreyleme uygulamasının buğday fidelerinin a) kuru/yaş ağırlık ve b) çinko konsantrasyonuna etkisi (* istatistiksel olarak anlamlı, p < 0.05)

Figure 3. Effect of foliar spraying of Tv-ZnO-NPs on a) dry/fresh weight and b) zinc content of wheat seedlings (* statistically significant, p < 0.05)

Çinko, protein sentezi, gen ekspresyonu, metabolik fonksiyonlar, su alımı ve taşıma ve enzim aktivitesi dahil olmak üzere bitki yaşamının birçok farklı yönünü etkileyen önemli bir besin elementidir (Hafeez ve ark., 2013). Çinko nanopartiküllerinin bitkilere uygulanmasında yaprak ve toprak uygulamaları olmak üzere iki temel yöntem bulunmaktadır. Yaprak uygulaması, toprak uygulamasına kıyasla besin maddesini bitkiler tarafından alınmasında daha etkili bir yoldur (Zhu ve ark., 2020). Bu çalışmada, spreyleme metodu ile buğday bitkisine artan dozlarda Tv-ZnO-NP uygulaması gerçekleştirilmiş ve sonuçlar, bitki büyümesinin bu uygulamadan olumlu etkilendiğini göstermiştir. Yapraktan spreyleme ile Tv-ZnO-NP uygulanan buğday fidelerinde 250-3000 mg L⁻¹ dozları arasında Zn²⁺ konsantrasyonunda önemli bir artış gözlenmiştir. 4000 ve 5000 mg Tv-ZnO-NP L⁻¹ uygulama dozlarında ise, Zn²⁺ alımı düşük dozlara göre azalış

gösterse de kontrol bitkilerine göre artış olduğu belirlenmiştir (Şekil 3b, p < 0.05). Yapraktan spreyleme uygulamasında, maksimum Zn²⁺ konsantrasyonu 3000 mg Tv-ZnO-NP L⁻¹ dozunda 25.59 mg g⁻¹ olarak belirlenirken, kontrol bitkilerinde 12.41 mg g⁻¹ olarak belirlenmiştir. Literatürde farklı bitkiler üzerine ZnO-NP'lerin yapraktan uygulanmasının bitki büyüme ve gelişimine olumlu etkisini rapor eden birçok çalışma bulunmaktadır. Wang ve ark. (2023), pirinçteki Zn konsantrasyonunun, ZnO-NP uygulaması ile kontrole kıyasla % 82.4 artış gösterdiği, Lv ve ark. (2023) ise, ZnO NP'lerin yaprak uygulamasının, buğdayın Zn konsantrasyonunu (40.34 mg kg⁻¹) önemli ölçüde arttırdığı bildirilmiştir. Kadmiyum (Cd) ile kirlenmiş toprakta yetiştirilen buğday bitkilerine yapraktan uygulanan ZnO-NP'lerin ise farklı kuraklık koşullarında bile Zn alımını önemli ölçüde artırırken Cd alımını azalttığı rapor edilmiştir

(Adrees ve ark., 2021). Yapılan çalışmalarda spreyleme ile buğdaya uygulanan ZnO-NP'lerin ilk olarak stomalar aracılığı ile bitkiye alındığını ve zamanla apoplast boyunca hareket ettiğini, ZnO-NP'lerin bir kısmının apoplastta çözünerek mezofil hücreleri tarafından emildiğini ve çözülmemiş ZnO-NP'lerin ise kısmen hücrelere aktarıldığını göstermiştir (Zhu ve ark., 2020).

Sonuçlar

Bu çalışmada, kekik bitkisi ekstraktı kullanılarak yeşil sentez yöntemiyle çinko oksit (ZnO) metal oksit nanoparçacıkları (Tv-ZnO-NP'ler) üretilmiş ve yapraktan uygulama yöntemiyle buğday bitkisinin klorofil içeriği, büyüme performansı ve Zn alımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapraktan spreyleme uygulamasının, düşük konsantrasyonlarda dahi bitki büyümesini ve klorofil içeriğini artırma potansiyeline sahip etkili bir yöntem olduğu belirlenmiştir.

Elde edilen bulgular, Tv-ZnO-NP'lerin buğday bitkisinin gelişimi üzerinde anlamlı ve olumlu etkiler yarattığını ortaya koymaktadır. Bu çalışma, geleneksel toprak uygulamalarına alternatif olarak yapraktan nanogübre uygulamasını ele almakta ve bu yöntemin buğdayın büyüme parametreleri üzerindeki etkisini kapsamlı şekilde değerlendirmektedir. Ayrıca, kekik ekstraktı ile çevre dostu bir şekilde sentezlenen Tv-ZnO-NP'lerin sürdürülebilir tarım uygulamaları açısından taşıdığı potansiyeli vurgulamakta ve bu konuda değerli bilgiler sunmaktadır.

Bununla birlikte, çalışmada yüksek konsantrasyonlarda uygulanan Tv-ZnO-NP'lerin olumsuz etkiler gösterebildiği de belirlenmiştir. Bu durum, tarımsal uygulamalarda kullanılacak ZnO nanoparçacıklarının optimum konsantrasyonlarının belirlenmesine yönelik doz-temelli araştırmalara ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, bu bulgular dikkatli doz ayarlamalarının gerekliliğine ve potansiyel çevresel etkilerin değerlendirilmesinin önemine işaret ederek, gelecekte yapılacak çalışmalar için yol gösterici niteliktedir.

Çıkar çatışması beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

Yazar katkısı

Araştırma konseptinin oluşturulması, verilerin işlenmesi ve düzenlenmesi, istatistik analizler ve makalenin yazımı Zeynep Gökem DOĞAROĞLU ve Yağmur UYSAL tarafından eşit oranda katkı sağlanarak gerçekleştirilmiştir.

Etik Kurulu Kararı

Bu çalışmada etik kurul onayına ihtiyaç yoktur.

Kaynaklar

- Abdullah, F. H., Abu-Bakar, N. H. H., & 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 - International Journal for Light and Electron Optics*, 206, 164279. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164279>
- Adhikari, T., Kundu, S., & Rao, S. A. (2016). Zinc delivery to plants through seed coating with nano-zinc oxide particles. *Journal of Plant Nutrition*, 39(1), 136-146. <https://doi.org/10.1080/01904167.2015.1087562>
- Adrees, M., Khan, Z. S., Hafeez, M., Rizwan, M., Hussain, K., Asrar, M., Alyemeni, M. N., Wijaya, L., & Ali, S. (2021). Foliar exposure of zinc oxide nanoparticles improved the growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) and decreased cadmium concentration in grains under simultaneous Cd and water deficient stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 208, 111627. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111627>
- Aminuzzaman, M., Ying, L. P., Goh, W.-S., & 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>
- Arumugam, M., Manikandan, D. B., Dhandapani, E., Sridhar, A., Balakrishnan, K., Markandan, M., & 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 & 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., & 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>
- Azam, M., Bhatti, H.N., Khan, A., Zafar, L., & Iqbal, M. (2022). Zinc oxide nano-fertilizer application (foliar and soil) effect on the growth, photosynthetic pigments and antioxidant system of maize cultivar. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 42, 102343. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102343>
- Babu, S., Singh, R., Yadav, D., Rathore, S.S., Raj, R., Avasthe, R., Yadav, S.K., Das, A., Yadav, V., Yadav, B., Shekhawat, K., Upadhyay, P.K., Yadav, D.K., & Singh, V.K. (2022). Nanofertilizers for agricultural and environmental sustainability, *Chemosphere*, 292, 133451, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133451>
- Cao, H., Duan, L., Zhang, Y., Cao, J., & Zhang, K. (2021). Current hydrogel advances in physicochemical and biological response-driven biomedical application diversity. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 6, 426. <https://doi.org/10.1038/s41392-021-00830-x>
- Chandra, S., Chakraborty, N., Dasgupta, A., Sarkar, J., Panda, K., & Acharya, K. (2015). Chitosan nano-particles: a positive modulator of innate immune responses in plants. *Sci. Rep.* 5(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/srep15195>
- Chimbekujwo, K.I., Sani, A.R., Oyewole, O.A., & Isibor, P.O. (2024). Sources of Nanoparticles. In I.P.O., D.G., E.A.A. (Ed.), *Environmental Nanotoxicology*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-54154-4_3
- Çakmak, I., & Kutman, U. B. (2018). Agronomic biofortification of cereals with zinc: a review. *European Journal of Soil Science*, 69, 172–180. <https://doi.org/10.1111/ejss.12437>
- Das, D., Bisht, K., Chauhan, A., Gautam, S., Jaiswal, J. P., Salvi, P., & Lohani, P. (2023). Morpho-physiological and biochemical responses in wheat foliar sprayed with zinc-chitosan-salicylic acid nanoparticles during drought stress. *Plant Nano Biology*, 4, 100034. <https://doi.org/10.1016/j.plana.2023.100034>
- Davarpanah, S., Tehranifar, A., Davarynejad, G., Abadía, J., & Khorasani, R. (2016). Effects of foliar applications of zinc and boron nano-fertilizers on pomegranate (*Punica granatum* cv. Ardestani) fruit yield and quality. *Scientia Horticulturae*, 10, 57-64. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.07.003>
- Dimpka, C. O., McLean, J. E., Latta, D. E., Manangon, E., Britt, D. W., Johnson, W. P., Boyanov, M. I., & Anderson, A. J. (2012). CuO and ZnO nanoparticles: phytotoxicity, metal speciation, and induction of oxidative stress in sand-grown wheat. *Journal of Nanoparticle Research*, 14, 1125. <https://doi.org/10.1007/s11051-012-1125-9>
- Doğaroğlu, Z. G., & 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>
- Ekiz, H., Bağcı, S.A., Kiral, S., Eker, S., Gultekin, I., Alkan, A., & Çakmak, I. (1998). Effects of zinc fertilization of various cereals grown in zinc-deficient calcareous soils. *Journal of Plant Nutrition*, 21, 2245–2256. <https://doi.org/10.1080/01904169809365558>
- Farooq, A., Javad, S., Jabeen, K., Shah, A. A., Ahmad, A., Shah, A. N., Alyemeni, M. N., Mosa, W. F. A., & Abbas, A. (2023). Effect of calcium oxide, zinc oxide nanoparticles and their combined treatments on growth and yield attributes of *Solanum lycopersicum* L. *Journal of King Saud University – Science*, 35(5), 102647. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.102647>
- Gabriela, Á.-M., Gabriela, M. O.-V., Luis A.-M., Reinaldo, P.-R., Michael, H.-M., Rodolfo, G.-P., & 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. <https://doi.org/10.1166/ase.2017.2076>
- Hafeez, B. M., Khanif, Y. M., & Saleem, M. (2013). Role of zinc in plant nutrition-a review. *Am. J. Exp. Agric*, 3, 374–391. <https://doi.org/10.9734/AJEA/2013/2746>
- Hu, P., An, J., Faulkner, M. M., Wu, H., Li, Z., Tian, X., & Giraldo, J. P. (2020). Nanoparticle charge and size control foliar delivery efficiency to plant cells and organelles. *ACS Nano*, 14(7), 7970-7986. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b09178>
- Hu, J., & Xianyu, Y. (2021). When nano meets plants: A review on the interplay between nanoparticles and plants. *Nano Today*, 38, 101143. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2021.101143>
- Huang, W., Ratkowsky, D. A., Hui, C., Wang, P., Su, J., & 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>
- Iqbal, R., Raza, M. A. S., Saleem, M. F., Khan, I. H., Zaheer, M. S., Ahmad, S., Haider, I., Aslam, M. U., & Tolekiene, M. (2019). Foliar applied iron and zinc improves the growth, physiological and yield related traits of wheat under drought. *International Journal of Biosciences*, 14(3), 376-387. <https://doi.org/10.12692/ijb/14.3.376-387>
- Kah, M., Kookana, R.S., Gogos, A., & Bucheli, T.D. (2018). A critical evaluation of nanopesticides and nanofertilizers against their conventional analogues. *Nature Nanotechnology*, 13, 677-684. <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0131-1>
- Kaliraj, L., Ahn, J. C., Rupa, E. J., Abid, S., Lu, J., & Yang, D. C. (2019). Synthesis of panos extract mediated ZnO nano-flowers as photocatalyst for industrial dye degradation by UV illumination. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 199, 111588. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2019.111588>
- Kumar, R. S., Rajendran, D., Balaraman, H. B., & 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>
- Lv, Z., Zhong, M., Zhou, Q., Li, Z., Sun, H., Bai, J., Liu, J., & Mao, H. (2023). Nutrient strengthening of winter wheat by foliar ZnO and Fe₃O₄ NPs: Food safety,

- quality, elemental distribution and effects on soil bacteria. *Science of The Total Environment*, 893, 164866. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164866>
- Nazir, M. A., Hasan, M., Mustafa, G., Tariq, T., Ahmed, M. M., Dehno, R. G., & Ghorbanpour, M. (2024). Zinc oxide nano-fertilizer differentially effect on morphological and physiological identity of redox-enzymes and biochemical attributes in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Scientific Reports*, 14, 13091. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63987-9>
- Matinise, N., Fuku, X. G., Kaviyarasu, K., Mayedwa, N., & Maaza, M. (2017). ZnO nanoparticles via Moringa oleifera green synthesis: Physical properties & mechanism of formation. *Applied Surface Science*, 406, 339-347. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.01.219>
- Ovais, M., Khalil, A. T., Islam, N. U., Ahmad, I., Ayaz, M., Saravanan, M., Shinwari, Z. K., & Mukherjee, S. (2018). Role of plant phytochemicals and microbia enzymes in biosynthesis of metallic nanoparticles. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102(16), 6799-6814. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9146-7>
- Pakzad, K., Alinezhad, H., & 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>
- Pandya, P., Kumar, S., Sakure, A. A., Rafaliya, R., & Patil, G. B. (2023). Zinc oxide nanopriming elevates wheat drought tolerance by inducing stress-responsive genes and physio-biochemical changes. *Current Plant Biology*, 35-36, 100292. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2023.100292>
- Potbhare, K. A., Chaudhary, R. G., Chouke, P. B., Yerpude, S., Mondal, A., Sonkusare, V. N., Rai, A. R., & Juneja, H. D. (2019). Phytosynthesis of nearly monodisperse CuO nanospheres using *Phyllanthus reticulatus/Conyza bonariensis* and its antioxidant/antibacterial assays. *Materials Science and Engineering: C*, 99, 783-793. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.02.010>
- Prasad, T. N., Sudhakar, P., Sreenivasulu, Y., Latha, P., Munaswamy, V., Reddy, K. R., Sreeprasad, T. S., Sajanlal, P. R., & Pradeep T. (2012). Effect of nanoscale zinc oxide particles on the germination, growth and yield of peanut. *Journal of Plant Nutrition*, 35 (6), 905-927. <https://doi.org/10.1080/01904167.2012.663443>
- Rai-Kalal, P., & 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>
- Rani, P., Kaur, G., Rao, K. V., Singh J., & 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>
- Raza, M. A. S., Muhammad, F., Farooq, M., Aslam, M. U., Akhter, N., Toleikienė, M., Binobead, M. A., Ali, M. A., Rizwan, M., & Iqbal, R. (2025). ZnO-nanoparticles and stagebased drought tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.): effect on morpho-physiology, nutrients uptake, grain yield and quality. *Scientific Reports*, 15, 5309. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89718-2>
- Rizwan, M., Ali, S., ur Rehman, M.Z., Adrees, M., Arshad, M., Qayyum, M.F., Ali, L., Hussain, A., Chatha, S.A.S., & Imran, M. (2019). Alleviation of cadmium accumulation in maize (*Zea mays* L.) by foliar spray of zinc oxide nanoparticles and biochar to contaminated soil. *Environmental Pollution*, 248, 358-367. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.02.031>
- Ruttkey-Nedecky, B., Krystofova, O., Nejd, L., & Adam, V. (2017). Nanoparticles based on essential metals and their phytotoxicity. *J. Nanobiotechnol.* 15, 1-19. <https://doi.org/10.1186/s12951-017-0268-3>
- Sahoo, S. K., Dwivedi, G. K., Dey, P., & Praharaj, S. (2021). Green synthesized ZnO nanoparticles for sustainable production and nutritional biofortification of green gram. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 101957. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101957>
- Saini, P., Nagpal, S., Saini, P., Kumar, A., & Gani, M. (2021). Microbial mediated zinc solubilization in legumes for sustainable agriculture. *Phytomicrobiome Interact. Sustain. Agric.* 254-276. <https://doi.org/10.1002/9781119644798.ch14>
- Saurabh, K., Prakash, V., Dubey, A.K., Ghosh, S., Kumari, A., Sundaram, P.K., Jeet, P., Sarkar, B., Upadhyaya, A., Das, A., Kumar, S., Makarana, G., Kumar, U., Kumar, A., & Singh, R.R. (2024). Enhancing sustainability in agriculture with nanofertilizers. *Discover Applied Sciences*, 6, 599. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06267-5>
- Sharma, B., Tiwari, S., Kumawat, K. C., & Cardinale, M. (2023). Nano-biofertilizers as bio-emerging strategies for sustainable agriculture development: Potentiality and their limitations. *Science of the Total Environment*, 860, 160476. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160476>
- Sone, B. T., Diallo, A., Fuku, X. G., Gurib-Fakim, A., & Maaza, M. (2020). Biosynthesized CuO nano-platelets: physical properties & enhanced thermal conductivity nanofluidics. *Arabian Journal of Chemistry*, 13, 160-170. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.03.004>
- Sturikova, H., Krystofova, O., Huska, D., & Adam, V. (2018). Zinc, zinc nanoparticles and plants. *J. Hazard Mater.* 349, 101-110. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.01.040>
- Tiryakioğlu, M., Karanlık, S., & Aslanyürek, D. (2014). Farklı su baskını sürelerinin ekmeklik buğday fidelerinde yaprak alanı, kuru madde ve klorofil içeriğine etkisi. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 1(2), 281-288. <https://dergipark.org.tr/en/pub/turkjans/issue/13305/160726>
- Usman, A., Gbanguba, U.A., Ismaila, A., & Umar, A. (2020a). Evaluation of maxicrop foliar fertilizer on the performance of sesame (*Sesamum indicum* L.) in Badeggi North Central, Nigeria. *J. Underut. Legum.* 2 (1), 1-6.

- <https://julegumes.org/index.php/jul/article/view/25>
- Usman, M., Farooq, M., Wakeel, A., Nawaz, A., Cheema, S.A., Rehman, H., & Sanaullah, M. (2020b). Nanotechnology in agriculture: current status, challenges and future opportunities. *Sci. Total Environ.* 721, 137778. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137778>
- Verma, K.K., Song, X.P., Joshi, A., Tian, D.D., Rajput, V.D., Singh, M., Arora, J., Minkina, T., & Li, Y.R. (2022). Recent trends in nano-fertilizers for sustainable agriculture under climate change for global food security. *Nanomat.* 12 (1), 173. <https://doi.org/10.3390/nano12010173>
- Vidya, C., Hiremath, S., Chandrababha, M. N., Antonyraj, M. L., Gopal, I. V., Jain, A., & Bansal, K. (2013). Green synthesis of ZnO nanoparticles by *Calotropis gigantea*. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 1, 118–120.
- Wang, S., Fang, R., Yuan, X., Chen, J., Mi, K., Wang, R., Zhang, H., & Zhang, H. (2023). Foliar spraying of ZnO nanoparticles enhanced the yield, quality, and zinc enrichment of rice grains. *Foods*, 12, 3677. <https://doi.org/10.3390/foods12193677>.
- Zadoks, J.C., Chang, T.T., & Konzak, C.F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weeds Research*, 14, 415–412. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x>
- Zakirov, M. I., Semen'ko, M. P., & 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. doi: 10.21272/jnep.10(5).05023.
- Zhu, J., Li, J., Shen, Y., Liu, S., Zeng, N., Zhan, X., White, J. C., Gardea-Torresdey, J., & Xing, B. (2020). Mechanism of zinc oxide nanoparticle entry into wheat seedling leaves. *Environmental Science: Nano*, 7, 3901-3913. <https://doi.org/10.1039/D0EN00658K>