

Bitki Ekstraktlarından Sentezlenen Nanopartiküllerin Domates (*Solanum lycopersicum* L.) Gelişimi Üzerine Etkileri

Selma KIPÇAK BİTİK^{1,✉}, Duygu ALPASLAN², Tuba ERŞEN DUDU³, Abdullah TURAN⁴, Aytekin EKİNCİALP⁵

^{1,5}Van YYU, Başkale MYO, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Van, Türkiye. ^{2,3}Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Van, Türkiye. ⁴Fen Fakültesi, Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü, Van, Türkiye.

¹<https://orcid.org/0000-0002-0563-1130>, ²<https://orcid.org/0000-0002-6007-3397>, ³<https://orcid.org/0000-0001-5564-2834>

⁴<https://orcid.org/0000-0003-3330-4468>, ⁵<https://orcid.org/0000-0003-1500-3215>

✉: selmakipcak@gmail.com

ÖZET

Domates (*Solanum lycopersicum* L.), dünyada tarım ürünleri arasında üretim ve tüketim miktarı en yüksek olan sebzelerin başında gelmektedir. Türkiye'nin uygun iklim koşullarına sahip olması dünya da domates üreticiliğinde ilk 4 ülke sıralamasında yer almasına olanak sağlamaktadır. Bitkilerin sağlıklı büyümesi, gelişmesi ve meyve kalitesi üzerine gübre uygulamaları, genetik ve çevresel faktörler önemli katkı sağlamaktadır. Nanoteknoloji ile üretilen nanomalzemeler, kimyasal ve fiziksel yapıları nedeniyle birçok alanda kullanım olanağı sağlamaktadır. Bitki özlerinden elde edilen nanopartiküller, çevre dostu ve sürdürülebilir yöntemlerle bitki büyümesini, gelişimini ve verimliliğini artırmayı amaçlayan uygulamalardır. Bu uygulamalar, kimyasal gübre ve pestisitlerin oluşturduğu olumsuz etkileri ortadan kaldırarak daha sağlıklı bitkiler elde etmek de dahil olmak üzere insan ve çevre üzerine de faydalar sağlar. Nanopartikül uygulamaları ile tarımsal üretimin sürdürülebilir bir şekilde yoğunlaştırılması ve aynı zamanda olumsuz çevresel etkiler (biyotik ve abiyotik stres, iklimsel değişimler) minimuma indirilmektedir. Bu çalışma tesadüf blokları deneme desenine göre 6 tekrarlı ve her tekrarda 1 bitki olacak şekilde yürütülmüştür. Tohum ekiminden önce 2:1 torf-perlit karışımı saksılara önce nanopartikül bırakılmış, ardından domates tohumları ekilmiştir. Elde edilen veriler dikkate alındığında, nanopartiküllerin domateste fide gelişim kriterleri üzerine olumlu etkilerinin olduğu, p(OBt)e-w uygulamasının yaprak sayısını %22, gövde çapını %59, p(Rt)e uygulamasının bitki boyunu %64, kök uzunluğunu ise %18 oranında artırdığı belirlenmiştir.

Bahçe Bitkileri

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi

Geliş Tarihi : 18.06.2025

Kabul Tarihi : 24.11.2025

Anahtar Kelimeler

Antioksidatif enzimler

Bitki gelişimi

Nanopartikül

Sürdürülebilir uygulamalar

Yeşil sentez

The Effects of Nanoparticles Synthesized from Plant Extracts on Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Development

ABSTRACT

Tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) are among the most produced and consumed agricultural products worldwide. Turkey, thanks to its favorable climate, ranks among the top four tomato producers globally. Fertilizer applications, genetics, and environmental factors significantly contribute to healthy plant growth and development, as well as fruit quality. Nanomaterials produced through nanotechnology offer a wide range of applications due to their chemical and physical structures. Nanoparticles derived from plant extracts are applications that aim to enhance plant growth, development, and productivity through environmentally friendly and sustainable methods. These applications provide benefits for the human and environmental environment, including healthier plants by eliminating the negative effects of chemical fertilizers and pesticides. With nanoparticle applications, agricultural production can be intensified in a sustainable manner and at the same time negative environmental effects (biotic and abiotic stress, climatic changes) can be minimized.

Article Concepts

Research Article

Article History

Received : 18.06.2025

Accepted : 24.11.2025

Keywords

Antioxidant enzymes

Plant growth

Nanoparticle

Sustainable applications

Green synthesis

The study was conducted according to the randomized block design with 6 replications and 1 plant in each replication. Before sowing the seeds, the nanoparticles were placed in pots with a 2:1 peat-perlite mixture and then tomato seeds were planted. Considering the obtained data, it was determined that nanoparticles had positive effects on seedling development criteria in tomato, p(OBt)e-w application increased the number of leaves by 22%, stem diameter by 59%, p(Rt)e application increased plant length by 64% and root length by 18%.

- Atıf İçin :** Kıpçak Bitik, S., Alpaslan, D., Erşen Dudu, T., Turan, A., & Ekincialp, A. (2026). Bitki ekstraktlarından sentezlenen nanopartiküllerin domates (*Solanum lycopersicum* L.) gelişimi üzerine etkileri. *KSÜ Tarım ve Doğa Dergisi*, 29 (5), 1194-1204. DOI: 10.18016/ksutarimdog.vi.1721574.
- To Cite:** Kıpçak Bitik, S., Alpaslan, D., Erşen Dudu, T., Turan, A., & Ekincialp, A. (2026). The effects of nanoparticles synthesized from plant extracts on tomato (*Solanum lycopersicum* L.) development. *KSU Journal of Agriculture and Nature*, 29 (5), 1194-1204. DOI: 10.18016/ksutarimdog.vi.1721574

GİRİŞ

Nanoteknoloji, tarım alanında giderek daha fazla ilgi görmektedir. Nanopartiküller (NP), boyutları 1-100 nm arasında değişen ve bitkilerin büyüme süreçlerini iyileştirmek, hastalıklara karşı direnç sağlamak ve besin alımını artırmak amacıyla kullanılan malzemelerdir. Fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle nanomalzemeler, farklı mühendislik, çevre, tıp vb. çeşitli bilim alanlarında kullanımları için incelenmektedir (Ghormade ve ark., 2011; Yuwei ve Jianlong, 2011). Tıpta NP'ler kanser tedavisi, ilaç dağıtımı veya teşhis ve görüntülemedeki uygulamaları için araştırılmaktadır (Baldi ve ark., 2007; Amiri ve Shokrollahi, 2013; Romih ve ark., 2015; Atici ve Altın Çolak, 2025). Çevre alanında, Fe NP'ler sulardan ve topraklardan kirleticilerin uzaklaştırılması için incelenmektedir. NP'ler ayrıca tekstil kaplamalarında katkı maddesi olarak, boyalarda, verniklerde, dizel yakıtlarda katalizör olarak veya elektronikte yarı iletken olarak endüstriyel üretim süreçlerine entegre edilmektedir (García ve ark., 2011). Bu faydalarına rağmen tarımla ilgili bazı endişeler (NP'lerin topraklardaki taşınması ve kalıcılığı) hâlâ devam etmektedir (Rajan, 2011).

NP malzemelerin bitkiler üzerindeki etkileri, özellikle bitki biyolojisi ve tarımsal verimlilik açısından önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir (Rizwan ve ark., 2019). Nanopartiküllerin çoğu hem boyutlarından dolayı hem de negatif yüzey yüküne sahip olmalarından dolayı bitki içine entegrasyonu daha kolay olmakta; ayrıca bitki içinde yer değiştirebildiklerinden dolayı da daha etkili bir şekilde besin maddelerinin alınmasına yardımcı olmaktadır (Omar ve ark., 2019). Nanoteknolojiden üretilen nanogübreler kimyasal gübre uygulamalarına göre küçük boyut ve büyük yüzey alanı sayesinde toprakta yüksek çözünürlük, bitkiler tarafından alımın kolaylaştığı yüksek penetrasyon gücü, yavaş ve hedefe yönelik kontrollü salınım gibi avantajlara sahiptir (Munjal ve Munjal, 2022). Bu da beraberinde bitki büyümesini teşvik eden hormonların aktivitesini artırmakta, böylece tohum çimlenme oranı, bitki büyümesi ve verimi artmaktadır (Wang ve ark., 2016; Ruttkay-Nedecky ve ark., 2017). Nano gübreler, toprakta bulunan besin elementlerini adsorpsiyonlayarak besin elementlerinin bitkiler tarafından etkin bir şekilde alınmasını ve kontrollü salınımını sağlamaktadır. Bu sayede besin maddesinin çözünürlüğünün artırılmasına katkıda bulunarak, biyoyararlanımı artırılmaktadır (De Rosa ve ark., 2010; Balaban ve İnal., 2024). Araştırmacılar tarafından yapılan bazı çalışmalarda çinkonun tohum çimlenmesine olumsuz etkisi görülürken, nano boyuttaki çinkooksit (ZnO) NP'nin olumlu etkilere sahip olduğunu belirlemiştir (Prasad ve ark., 2012; Singh ve ark., 2013).

Bazı NP tipleri bitki kök büyümesini uyarabilirken bazıları da kök uzunluğunu azaltma eğilimindedir (Boonyanitipong ve ark., 2011; Faisal ve ark., 2013). Bazı araştırmacılar, bazı bitkilerin NP alabildiğini ve bunları dokularında biriktirebildiğine dair kanıtlar bulmuştur (Lee ve ark., 2010; Rico ve ark., 2011; Schwab ve ark., 2011; Prasad ve ark., 2012). Bitki dokularındaki NP birikimi, NP büyüklüğüne ve bileşimine, etkileşimde bulunan bitki türlerine ve ortamdaki NP bulunabilirliğine bağlıdır (Ghormade ve ark., 2011; Rico ve ark., 2011).

Domates (*Solanum lycopersicum* L.), dünya genelinde yaygın olarak yetiştirilen bir sebze olup hem besin değeri hem de ekonomik açıdan oldukça önemli olan bir sebze türüdür. Domates, besin maddeleri ve su alımını optimize etmek için çeşitli stratejiler geliştirmiştir. Ancak, çevresel stres faktörleri (kuraklık, tuzluluk, hastalıklar) bu stratejileri olumsuz etkileyebilmektedir (Kıpçak ve ark., 2019; Yılmaz ve ark., 2020; Ekincialp ve ark., 2025; Kıpçak Bitik., 2025). Nanopartiküllerin bitki gelişimi üzerindeki etkilerini incelemek tarımsal verimliliği artırmak için kritik öneme sahiptir. Literatürlerde, nanopartiküllerin bitki büyümesi ve gelişimi üzerindeki etkileri üzerine birçok çalışma bulunmaktadır (Ocsoy ve ark., 2013; Djanaguiraman ve ark., 2018; Gao ve ark., 2018; Thakur ve ark., 2021; Kareem ve ark., 2022; Wang ve ark., 2022). Yapılan bir çalışmada kullanılan çeşitli nanopartiküllerin kuraklık stresi altındaki fidelerin gelişimini olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir. TiO₂ nanopartikülünün, tohum çimlenmesi, fide büyümesi ve kuraklık stresi altındaki bitkilerde bağl su içeriğinin korunduğu, antioksidan

enzimlerini artırmaya yardımcı olduğu, Fe₂O₃ nanopartiküllerinin stoma hareketlerini etkileyerek kuraklık stresine karşı toleransı artırdığı, ZnO nanopartiküllerinin ise fotosentetik pigment bozunmasını azalttığı, buna bağlı olarak da fotosentez hızını ve stoma hareketlerini artırdığı raporlanmıştır (Sarraf ve ark., 2022).

Farklı birçok mühendislik alanında nanomalzemeler kullanılmaktadır. Ancak bu malzemeler oluşturulurken ve kullanılırken hem insana hem de çevreye zarar verilmemelidir. NP'ler; kozmetik, ilaç, tarım ve kimya endüstrisine kadar geniş bir uygulama alanına sahiptir ve insan sağlığı üzerinde potansiyel olarak ciddi toksik etkiler yaratabilmektedir (Gao ve ark., 2013; Sykes ve ark., 2014; Hadrup ve ark., 2018; Sen ve ark., 2024). NP'lerin toksik etkileri, boyutları, yüzey özellikleri ve kimyasal bileşimleri gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Nanopartiküllerin sentezi sırasında çevre dostu ve biyouyumlu malzemelerin kullanımı ile bazı teknikler kullanılarak (suyun kullanımı, ultrases, mikrodalga, biyolojik yöntemler, reaksiyonların oda sıcaklığında gerçekleşmesi vb) "yeşil sentez" adı verilen nanopartiküller oluşturulmaktadır. Son yıllarda özellikle bitki ekstraktı ile oluşturulan nanopartikül çalışmaları yaygınlaşmaktadır (Kharissova ve ark., 2013; Yuvakkumar ve ark., 2014). Bitki ekstaktı dışında, bakteri, maya, alg gibi mikroorganizmalar da kullanılmaya başlanmıştır. Yeşil sentezde esas olan geleneksel kimyasal çözücülere alternatif olarak doğada kolayca bulunan tamamen organik yapıların kullanılmasıdır (Saranya ve ark., 2017).

Tarımsal alanda genel olarak yeşil sentez (green synthesis) yoluyla elde edilen nanopartiküller kullanılmıştır. Polimerik olarak yani bitki ekstraktı yoluyla elde edilen nanopartiküllerin özellikle domatestte kullanımıyla ilgili herhangi bir bulguya rastlanmamıştır. Bu nedenle, bu çalışma kök boya (Rubia tinctorum) ve meşe kabuğu (Oak bark) gibi spesifik bitki kaynaklarından yeşil sentezle elde edilen NP'lerin domates gelişimi üzerindeki etkilerini sistematik olarak inceleyen ilk kapsamlı çalışmalardan biridir. Bu çalışmada, kök boya (Rubia tinctorum) ve meşe kabuğu (Oak bark) bitkilerinden farklı çözeltiler kullanılarak sentezlenen nanopartiküllerin domatesin morfolojik ve antioksidatif yanıtlarını iyileştireceği hipotezi test edilmiştir.

MATERYAL ve METOD

Çalışmada, Rio Grande standart domates çeşidi kullanılmıştır. 2:1 torf- perlik karışımli saksılara önce her saksıya 0.1 gr NP serpilip üzeri toprak ile örtüldükten sonra tohum ekimi yapılmıştır. Kullanılan NP Çizelge 1'de sunulmuştur. Çalışma, tesadüf parselleri deneme desenine göre 6 tekrarlı ve her saksıda 1 bitki, toplamda n:42 örnek ile 12 saat aydınlık 12 saat karanlık, 23±2°C sıcaklık ve % 60-65 nem koşullarının sağlandığı iklim odası koşullarında yürütülmüştür. Bitkiler 3 ay kadar stressiz koşullarda yetiştirilmiştir. Deneme sonunda bitkilerde yaprak sayısı, bitki-kök boyu, gövde çapı, sürgün-kök yaş ve kuru ağırlıkları gibi fide gelişim kriterlerinin yanı sıra bazı fizyolojik ve biyokimyasal parametreler incelenmiştir. Çalışmada kullanılan NP'lerin karakterizasyonları FTIR, ZETA ve boyut analizleri daha önceden yapılmıştır (Yavuzcanli, 2023; Alpaslan ve ark., 2023).

Çizelge 1. Bitki yetiştirme sürecinde kullanılan nanopartikül uygulamalarının numaralandırılması.

Table 1. Numbering of nanoparticle treatments used in the plant growing proces

Uygulamalar Treatments	Uygulama kodu Treatments code
Kontrol (Nanopartikül yok) Control (no NP)	NP0
Poli (Kök boya)_etanol Poly (Rubia tinctorum)_ethanol	p(Rt) _e
Poli (Kök boya)_Metanol Poly (Rubia tinctorum)_methanol	p(Rt) _m
Poli (Kök boya)_su Poly (Rubia tinctorum)_water	p(Rt) _w
Poli (Meşe kabuk)_etanol Poly (Oak bark)_ethanol	p(OBt) _e
Poli (Meşe kabuk)_su Poly (Oak bark)_water	p(OBt) _w
Poli (Meşe kabuk)_etanol-su Poly (Oak bark)_ethanol-water	p(OBt) _{e-w}

Antioksidatif enzimler

Katalaz (CAT), süperoksit dismutaz, (SOD) ve askorbat peroksidaz (APX) antioksidatif enzimler için 1 g dondurulmuş yaprak örnekleri üzerine 5 mL soğuk 50 mM potasyum fosfat ve 0,1 mM Na-EDTA karışımı (pH 7.6) ile homojenize edildikten sonra 709 g'de 10 dakika boyunca 4°C'de santrifüj edildi. Enzim ekstraksiyonunun tüm

aşamaları +4 °C'de tamamlandı. SOD, 560 nm dalga boyunda nitro mavi tetrazolyumun (NBT) inhibisyonuna (Jebara ve ark., 2005) göre ölçüldü. CAT, aktivitesi, Cakmak ve Marschner (1992)'a göre 240 nm dalga boyunda H₂O₂ kaybının gözlemlenmesiyle belirlendi. APX aktivitesi, 290 nm dalga boyunda askorbik aside bağlı H₂O₂'nin indirgenmesine göre ölçüldü (Çakmak ve Marschner 1992).

Malondialdehide (MDA)

Domates yapraklarından alınan 0,5 g örnekler %0,1'lik trikloroasetik asitte (TCA) homojenize edildi ve ardından 15 dakika boyunca 492 g'de santrifüj edildi. Santrifüj edilen örneklerin üst kısmından 1 mL, %0,5 tiyobarbiturik asit (TBA) ve %20 TCA karışımından 2 ml alınarak hazırlanan karışım 95 °C'de 30 dakika bekletildi, ardından buz banyosunda hızla soğutuldu ve 10 dakika boyunca 219 g'de santrifüj edildi. Berrak kısmın 532 nm ve 600 nm dalga boyunda okutularak belirlendi (Rao ve Sresty 2000).

Toplam Fenol İçeriği ve Serbest Radikal Giderme (DPPH) Aktivitesi

Toplam fenol içeriği Swain ve Hillis (1959)'e göre hesaplanmıştır. Toplam fenol için, 1 gr yaprak örneği 5 ml metanol ile homojenizatörde parçalandıktan sonra santrifüj edilerek elde edilen süpernant kısmından 150 µl alınarak üzerine 2400 µl saf su, 150 µl Folin cioucelta (1:10 çözelti) eklenip 30-40 sn vortexlendikten sonra 300 µl %20'lik sodyum bikarbonat eklenip 30 dk karanlıkta oda sıcaklığında bekletildikten sonra 725 nm dalga boyu spektrofotometrede okuma yapılmıştır. Hesaplamada galik asit eşdeğerinden yararlanılmıştır. DPPH aktivitesi Blois (1958)'e göre yapılmıştır.

İstatistik Analizler

Çalışmada elde edilen veriler, tek yönlü varyans analizi (ANOVA) kullanılarak SPSS yazılımı (sürüm 22.0) ile analiz edildi. Ortalama değerler arasındaki anlamlı farklılıkları belirlemek için Duncan Çoklu Karşılaştırma Testi, p < 0,05 anlamlılık düzeyine göre gruplandırıldı.

BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, bitki ekstraktlarından elde edilen nanopartikül (NP) uygulamalarının domates (*Solanum lycopersicum* L.) bitkilerinin büyüme ve fizyolojik parametreleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen bulgular, bitki ekstraktlarının ve farklı çözücülerin hem bitki gelişimini olumlu yönde etkilediğini hem de strese karşı etkili olabileceğini ortaya koymuştur.

Morfolojik Büyüme Parametreleri

Yaprak sayısı, bitki boyu, gövde çapı, sürgün yaş ve kuru ağırlıkları, kök boyu, kök yaş ve kuru ağırlıkları gibi morfolojik parametreler, NP bitki büyümesi ve gelişimi üzerindeki potansiyel etkilerini değerlendirmede temel göstergelerdir (Çizelge 2). İstatistiksel analiz sonucunda elde edilen bulgular, kontrol ve nanopartikül uygulamaları arasında farkın anlamlı olduğunu ortaya koymaktadır (p < .05).

Yaprak sayısı açısından, p(OBt)_{e-w} uygulamasının (15 adet/bitki) en yüksek değeri vermesi, fotosentetik yüzey artışına ve kuru madde miktarına olumlu katkı sağladığını düşündürmektedir. Elde edilen bulgular ışığında, nanopartikül oluşturmada çözücülerin kombinasyonlarının nanopartikül etkinliğini artırarak bitki gelişimini olumlu yönde etkilediği söylenebilir. Demir nanopartiküllerinin (Fe NPs) domates bitkilerinde klorofil sentezini artırdığı, kuru madde artışı ve bitki büyümesini teşvik ettiği raporlanmıştır (Khan ve ark.,2021). Ayrıca, nanopartiküllerin fotosentetik verimliliği artırarak ve klorofil içeriğini yükselterek bitki gelişimini hızlandırdığı ortaya konulmuştur (Hussain, 2017; Barris ve ark.,2025; Zeinalipour ve ark.,2025).

p(Rt)_m uygulaması, bitki boyunda (99 cm) NP0 (79 cm) kıyasla en belirgin artışı sağlamıştır. Bu durumun, NP'lerin bitki büyümesini teşvik eden hormonların aktivitesini artırdığı söylenebilir (Abu-Saied ve ark., 2020). Metanol ekstraktının, bitki büyümesini düzenleyen endojen hormonların sentezini veya etkinliğini optimize eden biyoaktif bileşikler içerdiği varsayılmaktadır. NP'lerin hormonal yolları düzenleyerek bitki büyümesini ve verimliliğini artırma potansiyeline sahip olduğunu belirtilmiştir (Zaman ve ark., 2025).

Gövde çapı açısından, p(OBt)_{e-w} uygulaması (6.21 mm) ile gözlenen dikkate değer artış, nanopartiküllerin bitkinin yapısal sağlamlığını ve dolayısıyla potansiyel ürün verimini artırma kabiliyetini desteklemektedir. Artan gövde çapı, bitkinin su ve besin taşıma kapasitesinin artışıyla ilişkili olabilir. Sürgün yaş ve kuru ağırlıklarına bakıldığında, p(OBt)_w (18.93 gr) ile en yüksek yaş ağırlığına ulaşılırken, p(OBt)_{e-w} (1.61 gr) en yüksek kuru ağırlığı vermiştir. Bu bulgular, nanopartiküllerin besin alımını artırdığına dair genel kabulle uyumludur. Zhao ve ark. (2020) nanopartiküllerin bitkilerin kök sistemleri aracılığıyla besin maddelerini daha etkili bir şekilde almasına yardımcı olduğunu bildirmektedir. Ayrıca, nano-gübrelerin geleneksel gübrelere göre daha yüksek besin kullanım

verimliliği sağladığı ve bitki büyümesini artırdığı rapor edilmiştir (Zhao ve ark., 2020). NP'lerin küçük boyutlu olması kolay penetrasyonu sağlar ve bitkilerin stres altında stresi daha rahat atlattıklarına yardımcı olur. Ayrıca, geliştirilmiş yüzey alanı daha fazla adsorpsiyon ve maddelerin hedefe yönelik taşınmasını kolaylaştırır. p(OBT)'den elde edilen nanopartiküller küçük boyutlu olduğundan bitkinin besin kullanım verimliliğini artırmış olabileceği düşünülmektedir.

Kök parametreleri (kök boyu, kök yaş ağırlığı, kök kuru ağırlığı) bitki sağlığı ve besin alımı için kritik öneme sahiptir. p(OBT)_{e-w} uygulaması, kök yaş ağırlığında (2.70 g) ve kök kuru ağırlığında (0.34 g) önemli artışların olduğu tespit edilmiştir. NP'lerin küçük boyutları, bitki kökleri veya yaprakları aracılığıyla kolayca emilimini ve çeşitli dokulara verimli taşınmasını sağlayarak besin asimilasyonunu ve metabolizmasını iyileştirebilir (Zulfiqar ve ark., 2019). Ancak, p(Rt)_w uygulamasında kök boyunun kontrol grubuna göre %68 oranında önemli ölçüde azalması dikkat çekicidir. Bu durum, nanopartiküllerin konsantrasyonunun, boyutu, yüzey özelliklerinin ve uygulama yollarının (yapraktan besleme, toprak vb.) bitki üzerindeki etkilerini belirlemede kritik rol oynadığını gösteren önceki çalışmalarla da paralellik göstermektedir (Khan ve ark., 2021; Abd El-Moneim ve ark., 2021; Zeinalipour ve ark., 2025). Bazı nanopartiküller, yüksek konsantrasyonlarda veya belirli fizikokimyasal özelliklere sahip olduklarında, hem bitki büyümesini engelleyebilmeleri hem de fitotoksik etkilere neden olabilecekleri rapor edilmiştir (Zayed ve ark., 2017). Çalışmada p(Rt)_w NP'nin kök boyunun uzamasını engellediği, fakat kök yaşını ve kuru ağırlığını artırdığı tespit edilmiştir. Kök yaş ve kuru ağırlığının artması, NP'lerin köklerde kuru madde birimini artırdığını düşündürmektedir. Morfolojik parametrelere bakıldığında, p(OBT)_{e-w} NP'nin ön plana çıktığı diğer nanopartiküllerin ise kontrole yakın veya kontrolden daha düşük değerlere sahip olduğu görülmektedir. Bu durumun nanopartikül hazırlama sırasında kullanılan çözücülerin tek başına kullanılmasından kaynaklanabilir. Morfolojik parametreler incelendiğinde, sadece kök yaş ve kuru ağırlık parametrelerinin de kontrol grubunun en düşük değeri aldığı görülmektedir. Bitki hücrelerinde nanopartikül birikimi, bitki sekonder metabolizması ve hormonal denge olumsuz etkilenmektedir. Bunun sonucu olarak da bitki büyümesi sekteye uğrayabilmektedir (Faisal ve ark., 2013; Pakrashi ve ark., 2014). Yapılan çalışmalarda metal bazlı nanopartiküllerin bitkilerde fazla birikmesi sonucu bu maddelerin elektron taşıma zincirine müdahale ettiği ve reaktif oksijen türlerini (ROS) bozarak oksidatif strese neden olduğu rapor edilmiştir (Dimkpa ve ark., 2013; Pagano ve ark., 2016). Bitkilerde nanopartikül kaynaklı hücre içi oksidatif stres, antioksidan aktivitesinin artmasına neden olur ve bunların ölçümü, toksisitenin biyogöstergesi olarak işlev görür (Sardoiwala ve ark., 2018; Zeinalipour ve ark., 2025). Çalışmada kontrol grubunun bitki büyüme parametrelerinde en düşük değeri alması nanopartikül hazırlama aşamasında kullanılan çözücülerin fitotoksik etki yaratmış olabileceğini düşündürmektedir. Ayrıca çözücülerin bitkiler arasında farklılık oluşturduğu, p(Rt) NP'lerde etanol ve metanol çözücülerinin, p(OBT) NP'lerde ise etanol-su kombinasyonunun öne çıktığı görülmektedir. Çalışmada elde edilen veriler ışığında, NP sentezinde kullanılan çözücülerin önem arz ettiği, etki derecesinin bitkiden bitkiye farklılık gösterebileceği, çözücülerin kombinasyon şeklinde kullanılmasının nanopartikül etkinliğini artırabileceği ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 2. Nanopartikül uygulamalarının morfolojik parametreler üzerine etkisi (ortalama ± standart hata).

Table 2. Effect of nanoparticle applications on morphological parameters (mean±standard error).

Uygulamalar Applications	Yaprak sayısı (adet/bitki) Number of leaves (piece/plant)	Bitki boyu (cm) Plant length (cm)	Gövde çapı (mm) Stem diameter (mm)	Sürgün yaş ağırlık (g) Shoot fresh weight (g)	Sürgün kuru ağırlık (g) Shoot dry weight (g)	Kök boyu (cm) Root length (cm)	Kök yaş ağırlık (g) Root fresh weight (g)	Kök kuru ağırlık (g) Root dry weight (g)
NP0	14±1.00ab	79±0.67b	4.09±0.23c	10.62±0.12c	1.32±0.08b	17±2.67a	0.55±0.01 ^e	0.04±0.01 ^e
p(Rt) _e	12±0.67bc	61±5.67c	3.90±0.00cd	12.50±0.06b	1.34±0.15b	17±0.33a	2.30±0.06b	0.25±0.03b
p(Rt) _m	14±0.00ab	99±2.67a	3.26±0.05f	8.66±0.06e	0.92±0.01c	20±2.33a	1.03±0.05d	0.08±0.03 ^{de}
p(Rt) _w	12±0.00bc	77±0.00b	3.72±0.00d	9.36±0.47de	0.48±0.01d	6±0.00b	0.84±0.01de	0.11±0.01cd
p(OBT) _e	11±0.00c	88±6.33ab	3.50±0.04ed	9.86±0.33cd	0.75±0.06c	19±1.00a	1.19±0.22cd	0.14±0.01c
p(OBT) _w	12±1.16bc	77±3.51b	4.23±0.14b	18.93±0.00a	0.74±0.012	18±1.86a	1.49±0.24c	0.12±0.01cd
p(OBT) _{e-w}	15±0.00a	65±0.00c	6.21±0.00a	12.53±0.57b	1.61±0.01a	17±0.00a	2.70±0.06a	0.34±0.01a
Pvalue	<.002	<.000	<.000	<.000	<.000	<.000	<.000	<.000
LSD (5%)	0.891	5.130	0.148	0.438	0.098	2.211	0.180	0.023

*Aynı sütunda değişik harfler ile gösterilen ortalamalar arasındaki farklar önemlidir (p<.05)

Nanopartikül yok (NP0), Poly (Rubia tinctorum)_ethanol (p(Rt)_e), Poly (Rubia tinctorum)_methanol (p(Rt)_m), Poly (Rubia tinctorum)_water (p(Rt)_w), Poly (Oak bark)_ethanol (p(OBT)_e), Poly (Oak bark)_water (p(OBT)_w), Poly (Oak bark)_ethanol-water (p(OBT)_{e-w}).

Biyokimyasal parametreler

Bitkilerin çevresel stres faktörlerine karşı geliştirdiği antioksidan savunma mekanizmaları, CAT, SOD ve APX gibi enzimlerin aktivite seviyeleri ile MDA içeriği, toplam fenol içeriği ve DPPH süpürme aktivitesi gibi parametrelerle değerlendirilmektedir (Çizelge 3). Elde edilen bulgular, NP0 ve NP uygulamaları arasında farkın

istatistiksel açıdan anlamlı olduğunu ortaya koymaktadır ($p < 0,05$).

Nanopartiküllerin, kuraklık stresi gibi abiyotik stresler altında H_2O_2 ve MDA birikimini azaltarak ve fotosentez verimliliğini koruyarak bitkileri oksidatif hasardan koruduğu bildirilmiştir (Abd El-Moneim ve ark., 2021). Nitekim $p(OBt)_w$ NP uygulaması en yüksek CAT aktivitesine (0.030) sahip olmuşken, $p(OBt)_e$ NP uygulaması en düşük (0.001) CAT aktivitesine sahip olduğu belirlenmiştir. Reaktif oksijen türleri (ROT) bitkilerin hemen hemen tüm streslere ortak bir yanıtı şeklindedir. ROT, bitkinin savunma sistemini aktive etmek için bir stres sinyali görevi görürken, aynı zamanda hücresel hasarı da artırır. NP'ler bir yandan ROT üretimini tetiklerken, diğer yandan antioksidan enzimlerin aktivitelerini taklit ederek ROT'u süzer (Sarraf ve ark., 2022). $p(OBt)_e$ NP uygulamasının CAT enzim aktivitesini aktive etmemesi ve böylece en düşük değeri alması ROT üretimini tetiklediğini düşündürmektedir.

SOD aktivitesi, $p(Rt)_m$ uygulamasında (3633.33) çarpıcı bir şekilde yükselmiştir. SOD'nin yüksek aktivitesi, süperoksit radikallerinin etkili bir şekilde temizlendiğini ve bitkinin oksidatif strese karşı direncini artırdığını göstermektedir. Benzer şekilde, APX aktivitesi $p(Rt)_w$ NP uygulamasında (0.69) en yüksek değere ulaşmıştır. Sharma ve ark. (2019; Barris ve ark., 2025) tarafından gümüş nanopartiküllerin (Ag NPs) bitkilerde patojenlere karşı direnç sağladığı ve genel bitki sağlığını iyileştirdiği rapor edilmiştir. Çalışmada yüksek SOD ve APX aktiviteleri, $p(Rt)_m$ ve $p(Rt)_w$ NP uygulamasının bitkinin savunma sistemini artırıcı bir etki göstermiştir.

MDA seviyeleri, lipid peroksidasyonunun ve dolayısıyla oksidatif hasarın bir göstergesidir. $p(OBt)_w$ (7.81) uygulamasında yüksek MDA seviyesi gözlenirken, $p(Rt)_m$ (3.87) uygulamasında en düşük MDA seviyesi belirlenmiştir. Bu durum, bazı nanopartikül formülasyonlarının belirli konsantrasyonlarda veya uygulama şekillerinde bitkide oksidatif strese neden olabileceğini, ancak $p(Rt)_m$ uygulamasının bu stresi azaltmada etkili olabileceği ifade edilmektedir (Abd El-Moneim ve ark., 2021; Zeinalipour ve ark., 2025). Ayrıca çalışmada kullanılan NP'ler farklı çözeltiler ile ekstraktlar elde edilmiştir. Metanol, etanol ve su çözümlerinin bitkide bulunan sekonder metabolitleri çözme gücünün birbirinden farklı olduğu ve bu maddelerin metanol çözgeninde daha iyi açığa çıktığı bilinmektedir. (Li ve ark., 2011; Büyüktücel, 2012). MDA değerinin $p(Rt)_m$ uygulamasında daha düşük çıkması, diğer uygulamalara göre sekonder metabolit miktarının daha fazla olduğu ile ilişkilendirilmektedir.

Toplam fenol içeriği, bitkinin antioksidan kapasitesiyle yakından ilişkilidir ve $p(Rt)_e$ uygulaması (47.40) en yüksek değeri almıştır. Fenolik bileşikler, serbest radikalleri temizleyerek bitkiyi oksidatif hasardan korur (Ghasemi ve ark., 2018). DPPH süpürme aktivitesi, genel antioksidan potansiyelinin bir ölçüsüdür. $p(Rt)_m$ ve $p(Rt)_w$ uygulamalarında (sırasıyla 89.91 ve 90.66) en belirgin şekilde gözlenmiştir. Bu yüksek aktivite, bu ekstraktların güçlü serbest radikal süpürme yeteneklerine sahip olduğunu ve bitkinin oksidatif strese karşı genel savunma kapasitesini artırdığını göstermektedir. Nanopartiküllerin, antioksidan yanıtları artırarak bitkileri oksidatif hasardan koruduğu literatürde de belirtilmiştir (Raliya ve ark., 2017). Nanopartikül üzerine yapılan başka bir çalışmada edilen tüm bulgular, ZnO NP uygulamasının *Phaseolus vulgaris* L. yapraklarında antioksidan savunma sistemini aktive ettiğini ortaya koymuştur (Kireççi ve ark., 2025).

Bitkilerde nanopartikül etkisiyle oluşan hücre içi oksidatif stres, peroksidazlar (glutatyon peroksidaz, askorbat peroksidaz ve guaiacol peroksidaz), süperoksit dismutaz ve katalaz gibi antioksidan enzimleri artırmaktadır. Ayrıca fenolik bileşikler, çeşitli karotenoidler, MDA ve prolin gibi düşük moleküler ağırlıklı bileşikler de nanopartikül stresi altında reaktif oksijen türlerinin zararlı etkisine yanıt olarak bitki sistemi tarafından daha yüksek miktarlarda üretilir (Das ve Roychoudhury., 2014; Zelalem ve ark., 2015; Ozyiğit ve ark., 2016). Çalışmada CAT, SOD, APX, MDA, toplam fenol ve DPPH içeriğinin yüksek olması, nanopartikül üretiminde kullanılan hem bitki özütleri hem de çözücülerin etkisiyle bitkide nanopartikül birikiminin meydana geldiği ve bunun da hücre içi oksidatif strese neden olduğu sanılmaktadır. Nanopartiküllerin toksik etkileri, bitkinin fizyolojik parametrelerini, çimlenme yüzdesini ve verimini, kök ve gövde uzamasını, biyokütleyi ve yaprak sayısını, antioksidatif enzimler, MDA ve prolin miktarını etkileyebilir, hatta bitki ölümüne bile neden olabilir (Gökdemir ve ark., 2023).

SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışma, iki farklı bitki ekstraktından farklı çözücüler kullanılarak sentezlenen nanopartikül uygulamalarının, domates (*Solanum lycopersicum*) bitkisinde morfolojik ve biyokimyasal stres yanıt mekanizmaları üzerinde belirgin ve farklı etkiler ortaya koyduğunu göstermiştir. Özellikle, $p(Rt)_m$ uygulaması bitki boyu artışında anlamlı iyileşmeler sağlarken, meşe kabuğu etanol-su ($p(OBt)_e-w$) sentezlenen NP'lerin domates fide gelişimini ve kök biyokütlesini önemli ölçüde artırdığı belirlenmiştir. Biyokimyasal analizlerde, $p(Rt)_m$ nanopartiküllerinin antioksidan enzim aktivitelerini ve serbest radikal süpürme kapasitesini önemli ölçüde artırarak oksidatif stresin azaltılmasında etkin olduğunu, güçlü bir antioksidan savunma uyarımı sağladığını ortaya koymuştur. Bu bulgular, nanopartikül sentezinde kullanılan çözücülerin, nanopartiküllerin biyolojik etkinlik düzeyini belirlemede kritik rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Çizelge 3. Nanopartikül uygulamalarının CAT, SOD, APX, MDA, toplam fenol içeriği ve DPPH üzerine etkisi (ortalama±standard hata).

Table 3. Effect of nanoparticle applications on CAT, SOD, APX, MDA, total phenol content, and DPPH (mean±standard error).

Uygulamalar Applications	CAT (mmol g ⁻¹ FW)	SOD (U mg ⁻¹ FW)	APX (mmol g ⁻¹ FW)	MDA (μmol g ⁻¹ FW)	Toplam fenol (mg GaE 100 g ⁻¹) Total phenol	DPPH (% inhibisyon değeri/ inhibition value)
NP0	0.005±0.001de	352.57±64.60d	0.11±0.017de	5.89±0.946b	41.79±1.133b	77.29±0.653d
p(Rt) _e	0.009±0.001cd	143.32±16.21e	0.51±0.064b	6.84±0.223ab	47.40±0.211a	78.77±0.368cd
p(Rt) _m	0.009±0.000cd	3633.33±0.00a	0.14±0.011de	3.87±0.149c	40.63±0.598b	89.91±0.301a
p(Rt) _w	0.017±0.002b	639.31±106.58c	0.69±0.061a	5.55±0.129b	41.00±0.81b	90.66±0.1a
p(OBt) _e	0.001±0.000e	1362.50±0.00b	0.08±0.008e	6.80±0.262ab	29.78±2.288cd	74.91±1.055d
p(OBt) _w	0.030±0.004a	358.99±17.05d	0.20±0.014d	7.81±0.112a	26.55±0.352d	83.59±0.134b
p(OBt) _{e-w}	0.011±0.002c	290.21±22.24d	0.38±0.002c	5.85±0.602b	32.81±0.677c	82.22±3.299bc
P _{value}	<.000	<.000	<.000	<.001	<.000	<.000
LSD (5%)	0.003	68.827	0.049	0.639	1.527	1.903

*Aynı sütunda değişik harfler ile gösterilen ortalamalar arasındaki farklar önemlidir (p<.05)

Nanopartikül yok (NP0), Poly (Rubia tinctorum)_ethanol (p(Rt)_e), Poly (Rubia tinctorum)_methanol (p(Rt)_m), Poly (Rubia tinctorum)_water (p(Rt)_w), Poly (Oak bark)_ethanol (p(OBt)_e), Poly (Oak bark)_water (p(OBt)_w), Poly (Oak bark)_ethanol-water (p(OBt)_{e-w}).

Literatürde, bitki ekstraktlarından biyolojik sentez yoluyla elde edilen nanopartiküllerle ilgili çalışmaların sınırlı olması, bu araştırmanın özgünlüğünü ve bilimsel katkısını artırmaktadır. Gelecekteki araştırmalar, bu bitki özütlerinden doğal yolla sentezlenen nanopartiküllerin yapısal özelliklerinin karakterizasyonu (örneğin; partikül boyutu, morfoloji, yüzey yükü gibi parametreler), NP'lerin bitki dokularındaki alınımları ve birikimi, farklı konsantrasyonlarının bitkiler üzerindeki biyolojik etkileri ve uygulama yöntemlerinin (yapraktan uygulama, toprağa uygulama vb.) spesifik etkileri ile uzun vadeli çevresel risklerinin kapsamlı değerlendirilmesini içermelidir. Çalışmamızda etkili olan NP uygulamalarının (p(OBt)_{e-w}, p(Rt)_m) açık veya örtü altında toprak mikrobiyomu, verim (meyve sayısı, ağırlığı) ve kalite (likopen, C vitamini) parametreleri üzerine olası etkileri, bitki fizyolojisi üzerindeki moleküler mekanizmaları ve gen ekspresyonu üzerindeki düzenleyici etkilerinin detaylı incelenmesi, alandaki bilgi birikimini önemli ölçüde ilerletecektir.

Bu tür disiplinlerarası ve kapsamlı araştırmalar, sürdürülebilir tarım uygulamalarında çevre dostu ve yenilikçi nanopartikül teknolojilerinin geliştirilmesine temel teşkil ederek, tarımsal üretimde verimlilik ve stres toleransının artırılmasına katkı sağlayacaktır.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

KAYNAKLAR

- Abd El-Moneim, D., Fa, D.M., Moursi, Y.S., Farghaly, A.A., Afifi, M., & Sallam, A. (2021). Positive and negative effects of nanoparticles on agricultural crops. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 6(2). <https://doi.org/10.1007/s41204-021-00117-0>
- Abu-Saied, M.A., Elnouby, M., Taha, T., El-Shafeey, M.G., Alshehri, A., Alamri, S., & Moustafa, M. (2020). Potential decontamination of drinking water pathogens through k-carrageenan integrated green bottle fly bio-synthesized silver nanoparticles. *Molecules*, 25(8), 1936. <https://doi.org/10.3390/molecules25081936>
- Alpaslan, D., Dudu Ersen, T., & Aktas, N. (2023). Synthesis of poly (Oak bark) particles from oak bark extract and its utilization as a drug carrier material. *Vietnam Journal of Chemistry*, 61(6), 719-731. <https://doi.org/10.1002/vjch.202200177>
- Amiri, S., & Shokrollahi, H. (2013). The role of cobalt ferrite magnetic nanoparticles in medical science. *Materials Science and Engineering: C*, 33(1), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2012.09.003>
- Atici, T., & Çolak, D. A. (2025). Combination of Silver Nanoparticles Synthesized Using Karaerik Extract and Cisplatin: Effects on Breast Cancer Cells. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*,

- 28(5), 1229-1240. <https://doi.org/10.18016/ksutarimdog.vi.1554474>
- Balaban, M., & İnal, B. (2024). Tarımsal Üretimde Nanoteknoloji Uygulamaları. *Doğa Bilimlerinde*, 72.
- Baldi, G., Bonacchi, D., Innocenti, C., Lorenzi, G., & Sangregorio, C. (2007). Cobalt ferrite nanoparticles: The control of the particle size and surface state and their effects on magnetic properties. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 311(1), 10-16. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2006.11.157>
- Barris, S., Belkhebir, A., Vanpee, B., Toumi, M., Aïd, F., & Lutts, S. (2025). Progressive drought impact on *Eruca sativa* Mill.: a kinetic approach. *South African Journal of Botany*, 184, 748-760. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2025.06.043>
- Benzie, I.F., & Strain, J.J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of “antioxidant power”: the FRAP assay. *Analytical Biochemistry*, 239(1), 70-76. <https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292>
- Blois, M.S. (1958). Antioxidant determinations by the use of a stable free radical. *Nature*, 181(4617), 1199-1200.
- Boonyanitipong, P., Kositsup, B., Kumar, P., Baruah, S., & Dutta, J. (2011). Toxicity of ZnO and TiO₂ nanoparticles on germinating rice seed *Oryza sativa* L. *International Journal of Bioscience, Biochemistry and Bioinformatics*, 1(4), 282.
- Büyüktuncel, E. (2012). Gelişmiş Ekstraksiyon Teknikleri I, *Hacettepe Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Dergisi*. 32(2), 209-242.
- Cakmak, I., & Marschner, H. (1992). Magnesium deficiency and high light intensity enhance activities of superoxide dismutase, ascorbate peroxidase, and glutathione reductase in bean leaves. *Plant Physiology*, 98(4), 1222-1227. <https://doi.org/10.1104/pp.98.4.1222>
- Das, K., & Roychoudhury, A. (2014). Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS-scavengers during environmental stress in plants. *Frontiers in environmental science*, 2, 53. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00053>
- De Rosa, M.C., Monreal, C., Schnitzer, M., Walsh, R., & Sultan, Y. (2010). *Nanotechnology in fertilizers*. *Nat Nanotech* 5 (2): 91–91.
- Dimkpa, C. O., McLean, J. E., Martineau, N., Britt, D. W., Haverkamp, R., & Anderson, A. J. (2013). Silver nanoparticles disrupt wheat (*Triticum aestivum* L.) growth in a sand matrix. *Environmental science & technology*, 47(2), 1082-1090. <https://doi.org/10.1021/es302973y>
- Djanaguiraman, M., Nair, R., Giraldo, J.P., & Prasad, P.V.V. (2018). Cerium oxide nanoparticles decrease drought-induced oxidative damage in sorghum leading to higher photosynthesis and grain yield. *ACS Omega*, 3(10), 14406-14416. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b01894>
- Ekincialp, A., Kipcak Bitik, S., Erdinç, Ç., & Sensoy, S. (2025). Influence of Combinations of Chemical and Organic Fertilizers on Biochemical Responses of Tomato Fruits in Different Maturity Stages. *ACS omega*, 10(28), 30599-30615. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c02531>
- Faisal, M., Saquib, Q., Alatar, A.A., Al-Khedhairi, A.A., Hegazy, A.K., & Musarrat, J. (2013). Phytotoxic hazards of NiO-nanoparticles in tomato: a study on mechanism of cell death. *Journal of Hazardous Materials*, 250, 318-332. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.01.063>
- Gao, F., Hong, F., Liu, C., Zheng, L., Su, M., Wu, X., & Yang, P. (2006). Mechanism of nano-anatase TiO₂ on promoting photosynthetic carbon reaction of spinach: Inducing complex of rubisco-rubisco activase. *Biological trace element research*, 111, 239-253. <https://doi.org/10.1385/BTER:111:1:239>
- Gao, H., Qin, Y., Guo, R., Wu, Y., Qiu, D., & Fu, Y. (2018). Enhanced plant growth promoting role of mPEG-PLGA-based nanoparticles as an activator protein PeaT1 carrier in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 93(11), 3143-3151. <https://doi.org/10.1002/jctb.5668>
- García, A., Espinosa, R., Delgado, L., Casals, E., González, E., Puentes, V., & Sanchez, A. (2011). Acute toxicity of cerium oxide, titanium oxide and iron oxide nanoparticles using standardized tests. *Desalination*, 269(1-3), 136-141. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.10.052>
- Ghasemi, S., Koohi, D.E., Emmamzadehashemi, M.S.B., Khamas, S.S., Moazen, M., Hashemi, A.K., & Yousefbeyk, F. (2018). Investigation of phenolic compounds and antioxidant activity of leaves extracts from seventeen cultivars of Iranian olive (*Olea europaea* L.). *Journal of Food Science and Technology*, 55, 4600-4607.
- Ghormade, V., Deshpande, M.V., & Paknikar, K.M. (2011). Perspectives for nano-biotechnology enabled protection and nutrition of plants. *Biotechnology Advances*, 29(6), 792-803. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.06.007>
- Gökdemir, F. Ş., Gündoğdu, M., Muftareviç, S., Sunar, A., & Eyidoğan, F. (2023). Nanopartiküllerin tarımsal bilimlerdeki önemi ve kullanım alanları. *Selcuk University Journal of Science Faculty*, 49(1), 11-17. <https://doi.org/10.35238/sufefd.1218183>
- Hadrup, N., Sharma, A.K., & Loeschner, K. (2018). Toxicity of silver ions, metallic silver, and silver nanoparticle materials after in vivo dermal and mucosal surface exposure: A review. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 98, 257-267. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2018.08.007>

- Hussain, T. (2017). Nanocides: smart delivery system in agriculture and horticultural crops. *Adv Plants Agric Res*, 6(6), 00233. <https://doi.org/10.15406/apar.2017.06.00233>
- Jebara, S., Jebara, M., Limam, F., & Aouani, M.E. (2005). Changes in ascorbate peroxidase, catalase, guaiacol peroxidase and superoxide dismutase activities in common bean (*Phaseolus vulgaris*) nodules under salt stress. *Journal of Plant Physiology*, 162(8), 929-936. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2004.10.005>
- Kareem, H.A., Saleem, M.F., Saleem, S., Rather, S.A., Wani, S.H., Siddiqui, M.H., & Wang, Q. (2022). Zinc oxide nanoparticles interplay with physiological and biochemical attributes in terminal heat stress alleviation in mungbean (*Vigna radiata* L.). *Frontier Plant Sciences in Plant Science*, 13, 842349. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.842349>
- Khan, I., Awan, S.A., Raza, M.A., Rizwan, M., Tariq, R., Ali, S., & Huang, L. (2021). Silver nanoparticles improved the plant growth and reduced the sodium and chlorine accumulation in pearl millet: a life cycle study. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 13712-13724.
- Kharissova, O.V., Dias, H.R., Kharisov, B.I., Pérez, B.O., & Pérez, V.M.J. (2013). The greener synthesis of nanoparticles. *Trends in biotechnology*, 31(4), 240-248.
- Kıpçak Bitik, S. (2025). Domateste Esansiyel Yağ Kaynaklı Organo-Nanopartikül Uygulamalarının Morfolojik ve Biyokimyasal Parametreler Üzerine Etkisi. *ISPEC Journal of Agricultural Sciences*, 9(3), 810-818. <https://orcid.org/0000-0002-0563-1130>
- Kıpçak, S., Ekincialp, A., Erding, Ç., Kabay, T., & Şensoy, S. (2019). Tuz stresinin farklı fasulye genotiplerinde bazı besin elementi içeriği ile toplam antioksidan ve toplam fenol içeriğine etkisi. *Yuzuncu Yıl University Journal of Agricultural Sciences*, 29(1), 136-144. <https://doi.org/10.29133/yyutbd.504748>
- Kireççi, O. A., Üzgen, S., Okutan, T., & Yılmaz, Ö. (2025). Çinko Oksit Nanopartikülünün Fasulye Bitkisi Yapraklarında Antioksidan Sistem Üzerine Etkileri. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, 28(1), 25-35. <https://doi.org/10.18016/ksutarimdoga.vi.1530864>
- Lee, C.W., Mahendra, S., Zodrow, K., Li, D., Tsai, Y.C., Braam, J., & Alvarez, P.J. (2010). Developmental phytotoxicity of metal oxide nanoparticles to Arabidopsis thaliana. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 29(3), 669-675. <https://doi.org/10.1002/etc.58>
- Li, Y., Skouroumounis, G.K., Elsey, G.M., & Taylor, D.K. (2011). Microwave-assistance provides very rapid and efficient extraction of grape seed polyphenols. *Food Chemistry*, 129(2), 570-576. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.04.068>
- Munjal, P., & Munjal, R. (2022). Agricultural nanobiotechnology: Current possibilities and constraints. In *Nanotechnology in agriculture and environmental science* (pp. 1-14). CRC Press.
- Ocsoy, I., Paret, M.L., Ocsoy, M.A., Kunwar, S., Chen, T., You, M., & Tan, W. (2013). Nanotechnology in plant disease management: DNA-directed silver nanoparticles on graphene oxide as an antibacterial against Xanthomonas perforans. *ACS Nano*, 7(10), 8972-8980. <https://doi.org/10.1021/nn4034794>
- Omar, R.A., Afreen, S., Talreja, N., Chauhan, D., & Ashfaq, M. (2019). Impact of nanomaterials in plant systems. *Plant Nanobionics: Volume 1, Advances in the Understanding of Nanomaterials Research and Applications*, 117-140.
- Ozyigit, I. I., Filiz, E., Vatansever, R., Kurtoglu, K. Y., Koc, I., Öztürk, M. X., & Anjum, N. A. (2016). Identification and comparative analysis of H₂O₂-scavenging enzymes (ascorbate peroxidase and glutathione peroxidase) in selected plants employing bioinformatics approaches. *Frontiers in Plant Science*, 7, 301. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00301>
- Pagano, L., Servin, A. D., De La Torre-Roche, R., Mukherjee, A., Majumdar, S., Hawthorne, J., ... & Marmiroli, N. (2016). Molecular response of crop plants to engineered nanomaterials. *Environmental science & technology*, 50(13), 7198-7207. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01816>
- Pakrashi, S., Jain, N., Dalai, S., Jayakumar, J., Chandrasekaran, P. T., Raichur, A. M., ... & Mukherjee, A. (2014). In vivo genotoxicity assessment of titanium dioxide nanoparticles by Allium cepa root tip assay at high exposure concentrations. *PloS one*, 9(2), e87789. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0098828>
- Prasad, T.N.V.K.V., Sudhakar, P., Sreenivasulu, Y., Latha, P., Munaswamy, V., Reddy, K.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>
- Rajan, C.S. (2011). Nanotechnology in groundwater remediation. *International Journal of Environmental Science and Development*, 2(3), 182.
- Raliya, R., Saharan, V., Dimkpa, C., & Biswas, P. (2017). Nanofertilizer for precision and sustainable agriculture: current state and future perspectives. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(26), 6487-6503. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02178>
- Rao, K.M., & Sresty, T.V.S. (2000). Antioxidative parameters in the seedlings of pigeonpea (*Cajanus cajan* (L.) Millspaugh) in response to Zn and Ni stresses. *Plant Science*, 157(1), 113-128. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(00\)00273-9](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(00)00273-9)

- Rico, C.M., Majumdar, S., Duarte-Gardea, M., Peralta-Videa, J.R., & Gardea-Torresdey, J.L. (2011). Interaction of nanoparticles with edible plants and their possible implications in the food chain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(8), 3485-3498. <https://doi.org/10.1021/jf104517j>
- Rizwan, M., Ali, S., Rehman, M.Z.U., & Maqbool, A. (2019). A critical review on the effects of zinc at toxic levels of cadmium in plants. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 6279-6289.
- Romih, T., Drašler, B., Jemec, A., Drobne, D., Novak, S., Golobič, M., & Kogej, K. (2015). Bioavailability of cobalt and iron from citric-acid-adsorbed CoFe₂O₄ nanoparticles in the terrestrial isopod Porcellio scaber. *Science of the Total Environment*, 508, 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.11.080>
- Ruttkay-Nedecky, B., Krystofova, O., Nejd, L., & Adam, V. (2017). Nanoparticles based on essential metals and their phytotoxicity. *Journal of Nanobiotechnology*, 15, 1-19.
- Saranya, S., Eswari, A., Gayathri, E., Eswari, S., & Vijayarani, K. (2017). Green synthesis of metallic nanoparticles using aqueous plant extract and their antibacterial activity. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci*, 6(6), 1834-1845. <http://dx.doi.org/10.20546/ijcmas>
- Sardoiwala, M. N., Kaundal, B., & Choudhury, S. R. (2018). Toxic impact of nanomaterials on microbes, plants and animals. *Environmental Chemistry Letters*, 16(1), 147-160. <https://doi.org/10.1007/s10311-017-0672-9>
- Sarraf, M., Vishwakarma, K., Kumar, V., Arif, N., Das, S., Johnson, R., & Hasanuzzaman, M. (2022). Metal/metalloid-based nanomaterials for plant abiotic stress tolerance: an overview of the mechanisms. *Plants*, 11(3), 316. <https://doi.org/10.3390/plants11030316>
- Schwab, F., Bucheli, T.D., Lukhele, L.P., Magrez, A., Nowack, B., Sigg, L., & Knauer, K. (2011). Are carbon nanotube effects on green algae caused by shading and agglomeration? *Environmental Science & Technology*, 45(14), 6136-6144. <https://doi.org/10.1021/es200506b>
- Sen, H., Secilmis, H., Assani, A., & Sen, C. (2024). Lignin extraction and characterization from lavender waste. *The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics*, 30, 28-38. <https://doi.org/10.55549/epstem.1593296>
- Sharma, V.K., Sayes, C.M., Guo, B., Pillai, S., Parsons, J.G., Wang, C., & Ma, X. (2019). Interactions between silver nanoparticles and other metal nanoparticles under environmentally relevant conditions: A review. *Science of the Total Environment*, 653, 1042-1051. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.411>
- Singh, N.B., Amist, N., Yadav, K., Singh, D., Pandey, J.K., & Singh, S.C. (2013). Zinc oxide nanoparticles as fertilizer for the germination, growth and metabolism of vegetable crops. *Journal of Nanoengineering and Nanomanufacturing*, 3(4), 353-364. <https://doi.org/10.1166/jnan.2013.1156>
- Sykes, E.A., Dai, Q., Tsoi, K.M., Hwang, D.M., & Chan, W.C. (2014). Nanoparticle exposure in animals can be visualized in the skin and analysed via skin biopsy. *Nature communications*, 5(1), 3796. <https://doi.org/10.1038/ncomms4796>
- Swain, T., & Hillis, W.E. (1959). The phenolic constituents of *Prunus domestica*. I.—The quantitative analysis of phenolic constituents. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 10(1), 63-68. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740100110>
- Thakur, S., Asthir, B., Kaur, G., Kalia, A., & Sharma, A. (2021). Zinc oxide and titanium dioxide nanoparticles influence heat stress tolerance mediated by antioxidant defense system in wheat. *Cereal Research Communications*, 1-12.
- Wang, P., Lombi, E., Zhao, F.J., & Kopittke, P.M. (2016). Nanotechnology: a new opportunity in plant sciences. *Trends in Plant Science*, 21(8), 699-712.
- Wang, S., Fu, Y., Zheng, S., Xu, Y., & Sun, Y. (2022). Phytotoxicity and accumulation of copper-based nanoparticles in brassica under cadmium stress. *Nanomaterials*, 12(9), 1497. <https://doi.org/10.3390/nano12091497>
- Yavuzcanli, M. 2023. Van YYU *Rubia Tinctorum* L. (kök boyası) Bitkisinin Ekstraktından Partikül Sentezi, Yapısal Karakterizasyonu ve Biyoaktivite Özellikleri (Tez no 776993). [Yüksek Lisans Tezi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı]. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.
- Yılmaz, Y., Erdinc, C., Akköprü, A., & Kıpçak, S. (2020). Use of plant growth promoting rhizobacteria against salt stress for tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedling growth. *Acta Scientiarum Polonorum, Hortorum Cultus*, 19(6). <https://doi.org/10.24326/asphc.2020.6.2>
- Yuvakkumar, R., Suresh, J., Nathanael, A.J., Sundrarajan, M., & Hong, S.I. (2014). Novel green synthetic strategy to prepare ZnO nanocrystals using rambutan (*Nephelium lappaceum* L.) peel extract and its antibacterial applications. *Materials Science and Engineering: C*, 41, 17-27. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2014.04.025>
- Yuwei, C., & Jianlong, W. (2011). Preparation and characterization of magnetic chitosan nanoparticles and its application for Cu (II) removal. *Chemical Engineering Journal*, 168(1), 286-292. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.01.006>
- Zhao, L., Lu, L., Wang, A., Zhang, H., Huang, M., Wu, H., & Ji, R. (2020). Nano-biotechnology in agriculture: use of nanomaterials to promote plant growth and stress tolerance. *Journal of Agricultural and Food*

- Chemistry*, 68(7), 1935-1947. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b06615>
- Zaman, W., Ayaz, A., & Park, S. (2025). Nanomaterials in agriculture: A pathway to enhanced plant growth and abiotic stress resistance. *Plants*, 14(5), 716. <https://doi.org/10.3390/plants14050716>
- Zayed, M.M., Elkafafi, S.H., Zedan, A.M., & Dawoud, S.F. (2017). Effect of nano chitosan on growth, physiological and biochemical parameters of Phaseolus vulgaris under salt stress. *Journal of Plant Production*, 8(5), 577-585. <https://doi.org/10.21608/jpp.2017.40468>
- Zeinalipour, N., Galehdari, F., Saadati, S., Arvin, M. J., & Sarcheshmehpour, M. (2025). Zearalenone and nanozeolite improve Arugula (Eruca sativa) drought tolerance by enhancing photosynthesis and water relations. *Scientific Reports*, 15(1), 28770. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-14765-8>
- Zelalem Getnet, Z. G., Azamal Husen, A. H., Masresha Fetene, M. F., & Gietahun Yemata, G. Y. (2015). Growth, water status, physiological, biochemical and yield response of Stay Green sorghum (Sorghum bicolor (L.) Moench) varieties-a field trial under drought-prone area in Amhara Regional State, Ethiopia.
- Zulfiqar, F., Navarro, M., Ashraf, M., Akram, N.A., & Munné-Bosch, S. (2019). Nanofertilizer use for sustainable agriculture: Advantages and limitations. *Plant Science*, 289, 110270. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110270>