

EUROASIA

Matematik, Mühendislik, Doğa ve Tıp Bilimleri Dergisi
Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Science

Derleme Makalesi

e-ISSN: 2667-6702

<https://doi.org/10.5281/zenodo.19218267>

Nano Gübrelere Toprak Mikrobiyal Aktiviteleri Üzerindeki Etkileri

Halime ÖZTÜRK^{1*} ¹ Harran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, ŞanlıurfaSorumlu yazar (Corresponding author) E-mail: hlmoztrk92@gmail.com

Makale Tarihi

Geliş: 20.01.2026

Kabul: 25.02.2026

Anahtar Kelimeler

Nanoteknoloji temelli gübrelere
Toprak biyolojik sağlığı
Azot döngüsü
Toprak enzim aktiviteleri
Besin kullanım etkinliği

Özet: Nanoteknoloji temelli gübre uygulamaları, besin kullanım etkinliğini artırma ve toprak ekosistem fonksiyonlarını koruma potansiyelleri nedeniyle sürdürülebilir tarım sistemlerinde giderek daha fazla ilgi görmektedir. Ancak literatürde nano gübrelere bitkisel verim üzerindeki etkileri ayrıntılı biçimde ele alınmış olmasına karşın, bu gübrelere toprak mikrobiyal aktivitesi, enzimatik süreçler ve besin döngüsü üzerindeki etkilerinin bütüncül ve eleştirel bir çerçevede değerlendirilmesine yönelik çalışmalar sınırlı kalmıştır. Bu derlemenin amacı, söz konusu bilgi boşluğunu gidermek üzere nano gübrelere topraktaki davranış mekanizmalarını, mikrobiyal ve enzimatik süreçler üzerindeki etkilerini ve bu etkilerin bitkisel verimlilikle olan ilişkisini güncel bilimsel literatür ışığında kapsamlı biçimde değerlendirmektir. Bu kapsamda nano gübrelere kontrollü salınım özellikleri ile özellikle azotlu nano gübrelere üreaz aktivitesi üzerindeki düzenleyici etkileri ve bu etkilerin toprak mikrobiyal toplulukları ile besin döngüsü arasındaki etkileşimleri ele alınmıştır. Literatür bulguları, nano gübrelere besin elementlerini kök bölgesinde daha uzun süre tutulabilir hale getirerek yıkanma ve volatilizasyon gibi kayıpları önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Özellikle yavaş salınımlı nano-üre formülasyonlarının, konvansiyonel üreye kıyasla üreaz aktivitesini daha dengeli biçimde düzenlediği, amonyak volatilizasyonunu azalttığı ve azot kullanım etkinliğini artırdığı bildirilmektedir. Ayrıca nano gübre uygulamalarının toprak mikrobiyal çeşitliliğini desteklediği ve üreaz, dehidrogenaz ve fosfataz gibi temel enzim aktivitelerini teşvik ederek besin döngüsünün etkinliğini artırdığı ortaya konulmuştur. Sonuç olarak nano gübreler, yalnızca verim artırıcı girdiler değil, aynı zamanda toprak biyolojik sağlığını ve agroekosistem sürdürülebilirliğini destekleyen stratejik araçlar olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte uzun dönemli arazi çalışmaları ve potansiyel çevresel etkilerin daha ayrıntılı incelenmesine ihtiyaç bulunmaktadır.

Effects of Nano-Fertilizers on Soil Microbial Activity

Article Info

Received: 20.01.2026

Accepted: 25.02.2026

Keywords

Nanotechnology-based
fertilizers
Soil biological health
Nitrogen cycle
Soil enzyme activities
Nutrient use efficiency

Abstract: Nanotechnology-based fertilizer applications have attracted increasing attention in sustainable agricultural systems due to their potential to enhance nutrient use efficiency and preserve soil ecosystem functions. However, while the effects of nano-fertilizers on crop productivity have been extensively documented, studies providing a holistic and critical evaluation of their impacts on soil microbial activity, enzymatic processes, and nutrient cycling remain limited. The aim of this review is to address this knowledge gap by comprehensively evaluating the behavior mechanisms of nano-fertilizers in soil, their effects on microbial and enzymatic processes, and the relationships between these effects and plant productivity in light of current scientific literature. In this context, the controlled-release properties of nano-fertilizers are examined, with particular emphasis on the regulatory effects of nitrogen-based nano-fertilizers on urease activity and their interactions with soil microbial communities and nutrient cycling. Literature evidence indicates that nano-fertilizers enhance nutrient retention in the rhizosphere, thereby significantly reducing nutrient losses through leaching and volatilization. In particular, slow-release nano-urea formulations have been reported to regulate urease activity in a more balanced manner compared to conventional urea, leading to reduced ammonia volatilization and improved nitrogen use efficiency. Furthermore, nano-fertilizer applications have been shown to support soil microbial diversity and stimulate key soil enzyme activities, including urease, dehydrogenase, and phosphatase, thereby promoting more efficient nutrient cycling. Overall, nano-fertilizers are considered not only innovative inputs for increasing crop yield but also strategic tools for strengthening soil biological health and supporting agroecosystem sustainability. Nevertheless, further long-term field studies are required to better elucidate potential environmental impacts and regulatory uncertainties.

1. Giriş

Nanoteknolojinin tarımsal üretim sistemlerine entegrasyonu, son yıllarda sürdürülebilir gıda üretimini destekleyen yenilikçi yaklaşımlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Bu kapsamda yeşil nanomalzemeler, nano gübreler, nano pestisitler, nano herbisitler, nano biyosensörler ve tarımsal atıkların nano-temelli arıtım teknolojileri; bitkilere yapraktan ve topraktan uygulanarak verim artışı sağlamak ve çevresel sürdürülebilirliği güçlendirmek amacıyla geliştirilmektedir (Khan ve ark., 2024; Nano boyuttaki materyallerin (1–100 nm) sahip olduğu yüksek özgül yüzey alanı (Ikhajiagbe ve ark., 2021) ve reaktivite, bu yapıların atomik düzeyde yeniden düzenlenmesine ve kendi kendine organize olmasına olanak tanıyarak fiziksel ve kimyasal özelliklerinde önemli değişimlere yol açmaktadır (Kah ve ark., 2019; Raliya ve ark., 2018). Yeşil sentez yöntemleriyle elde edilen nanomalzemeler, toksik yan ürünlerin oluşumunu sınırlamaları ve çevre dostu olmaları nedeniyle tarımsal nanoteknolojinin gelişiminde kritik bir rol üstlenmektedir. Bu tür nanomalzemelerle zenginleştirilmiş gübre formülasyonları, mikro besin elementlerinin kontrollü ve etkin biçimde salınmasını mümkün kılmakta; aynı zamanda toprakta potansiyel olarak zararlı elementlerin birikimini azaltarak toprak kalitesinin korunmasına katkı sağlamaktadır (Dimkpa & Bindraban, 2018; Rai ve ark., 2021). Çinko oksit (ZnO), bakır oksit (CuO), demir (Fe), silisyum dioksit (SiO₂), titanyum dioksit (TiO₂), gümüş nanoparçacıkları (AgNPs), çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNTs) ve alüminyum oksit (Al₂O₃) gibi nanomalzemeler; gübrelerin yavaş ve kontrollü salınımını sağlayarak tohum çimlenmesini, bitkilerin su tutma kapasitesini ve biyokütle üretimini artırabilmektedir. Ayrıca bu materyaller, fotosentezi ve bitki büyümesini baskılayan toksik stres faktörlerinin azaltılmasına da katkı sunmaktadır (Naderi & Danesh-Shahraki, 2013; Zulfiqar ve ark., 2019). Nano gübre formülasyonlarında silika, çinko oksit ve titanyum dioksit gibi nanoparçacıkların azot, fosfor ve potasyum gibi temel besin elementleriyle birlikte kullanılması, besin alım etkinliğini artırarak bitki gelişimi ve verimde anlamlı iyileşmeler sağlamaktadır. Bu durum, nano gübrelerin yalnızca besin kaynağı olarak değil, aynı zamanda toprak biyolojik süreçlerini düzenleyen fonksiyonel materyaller olarak da değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır (Raliya ve ark., 2017; Kah ve ark., 2018). Özellikle azotlu gübreler, pirinç gibi yoğun besin talebi olan bitkilerin büyüme ve verimi üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Ancak geleneksel azotlu gübrelerin aşırı ve kontrolsüz kullanımı; nitrat yıkanması, amonyak volatilizasyonu ve sera gazı emisyonları yoluyla çevre kirliliğine neden olmakta ve insan ile hayvan sağlığı açısından risk oluşturmaktadır. Bu nedenle, verimi korurken çevresel etkileri azaltabilecek alternatif gübreleme stratejilerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır (Chen ve ark., 2020). Nano-azotlu gübreler, azotun toprakta yavaş ve kontrollü biçimde salınmasını sağlayarak geleneksel üre ve benzeri gübrelere güçlü bir alternatif sunmaktadır. Toprağa uygulanan nano besin elementleri, özellikle yerli toprak mikroflorasını etkileyerek mikrobiyal süreçlerin yönünü değiştirebilmektedir. Toprak mikroorganizmaları; besin elementlerinin fiksasyonu, çözünürleştirilmesi, taşınması ve geri dönüşümü gibi temel süreçlerde kilit rol oynamaktadır. Yavaş salımlı nano gübrelerin, toprak pH'ı ve mikroorganizma gelişimi üzerinde doğrudan veya dolaylı etkiler oluşturarak mikrobiyal canlı hücre sayısı ve çeşitliliğini artırdığı bildirilmektedir. Bu olumlu etkileşimler, toprak verimliliğinin yükselmesine, besin döngüsünün iyileşmesine ve genel toprak sağlığının korunmasına katkı sağlamaktadır (Kumar ve ark., 2021; Sehgal ve ark., 2024).

2. Nano Gübrelerin Özellikleri ve Toprakta Davranışı

Nanoteknoloji, tarımsal üretim sistemlerinde verimliliğin artırılması ve kaynak kullanımının optimize edilmesi açısından modern dönemin en etkili teknolojik yaklaşımlarından biri olarak kabul edilmektedir. Nano ölçekte tasarlanan materyaller, bitkilerin gereksinim duyduğu besin elementlerini taşıyabilme, bu besinleri kontrollü biçimde salabilme ve çevresel yan etkileri minimize etme potansiyeline sahiptir. Bu özellikleri sayesinde yavaş

salınlı nano gübreler, besin maddelerinin yetiştirme sezonu boyunca kademeli olarak sağlanmasına olanak tanıyarak hızlı çözünebilen geleneksel inorganik gübrelere güçlü bir alternatif oluşturmaktadır. Böylece uygulanan besinlerin önemli bir kısmı yıkanma veya gaz kaybına uğramadan bitkiler tarafından etkin şekilde değerlendirilebilmektedir (Raliya ve ark.,2018; Kah ve ark.,2019). Nano gübreler; metal esaslı nanoparçacıklar, polimerik taşıyıcılar veya karbon nanotüp yapıları gibi farklı materyaller kullanılarak üretilmekte ve bu yapısal farklılıklar bitki gelişimi üzerindeki etkilerin yönünü ve büyüklüğünü belirlemektedir. İnorganik nano gübreler, azot, fosfor ve potasyum gibi temel makro besin elementlerinin taşınmasını ve bitki tarafından alımını artırarak tarımsal üretkenliği desteklerken; organik nano gübreler, doğal kaynaklı nanoparçacıklar aracılığıyla besinleri toprağa daha dengeli biçimde bırakmakta, toprak pH'ının düzenlenmesine katkı sağlamakta ve nem tutma kapasitesini artırmaktadır. Bunun yanı sıra hibrit nano gübre sistemleri, konvansiyonel gübrelerin yüksek besin içeriğini nanoteknoloji temelli kontrollü salınım mekanizmalarıyla birleştirerek besin maddelerinin sürekliliğini ve kullanılabilirliğini artırmaktadır (Dimkpa & Bindraban, 2018; Zulfıkar ve ark.,2019). Nano gübrelerin sahip olduğu yüksek yüzey alanı/hacim oranı, besin elementlerinin bitki kökleri ve dokuları içerisinde daha etkin taşınmasını ve depolanmasını mümkün kılmaktadır. Bu durum, fotosentetik aktivitenin artması, kök mimarisinin gelişmesi, klorofil sentezinin teşvik edilmesi ve abiyotik stres koşullarına karşı toleransın yükselmesi gibi birçok fizyolojik sürecin olumlu yönde etkilenmesine yol açmaktadır. Aynı zamanda kontrollü salınım özelliği sayesinde besin elementlerinin kök bölgesinde daha uzun süre tutulması sağlanmakta; bu da besin kullanım etkinliğini artırırken volatilizasyon ve yıkanma kaynaklı kayıpları önemli ölçüde azaltmaktadır (Kah ve ark.,2018; Raliya ve ark.,2017). Toprağa uygulanan nano besin elementleri, yalnızca bitkisel gelişimi değil, aynı zamanda toprak biyolojik bileşenlerini de doğrudan etkilemektedir. Yavaş salınlı nano gübrelerin, toprak pH'ı ve mikrobiyal yaşam koşulları üzerinde düzenleyici etkiler oluşturarak yerli toprak mikroflorasının gelişimini desteklediği bildirilmektedir. Bu süreç, mikrobiyal canlı hücre yoğunluğu ve çeşitliliğinde artışlara yol açmakta; sonuç olarak toprak ekolojik dengesinin güçlenmesine katkı sağlamaktadır. Genel değerlendirmeler, nano gübre uygulamalarının besin teminiyle birlikte toprak ekolojik koşullarını iyileştirerek mikrobiyal popülasyonları teşvik ettiğini ve bu etkinin toprak verimliliği, besin döngüsü ve uzun vadeli toprak sağlığı açısından olumlu sonuçlar doğurduğunu göstermektedir (Kumar ve ark.,2021; Sehgal ve ark.,2024).

3. Toprak Mikrobiyal Aktivite Parametreleri

Toprak mikrobiyal aktivitesinin nicel ve nitel olarak değerlendirilmesinde en yaygın kullanılan biyolojik göstergelerden biri, toprak enzim aktiviteleridir. Enzimler, mikroorganizmalar tarafından sentezlenen ve toprakta gerçekleşen biyokimyasal reaksiyonları katalize eden temel bileşenler olup, mikrobiyal metabolik süreçlerin doğrudan bir yansıması olarak kabul edilmektedir. Üreaz, dehidrogenaz, fosfataz, invertaz, katalaz ve amilaz gibi enzimler; karbon, azot ve fosfor döngülerinde kilit rol oynayarak toprak ekosisteminin işleyişinde belirleyici fonksiyonlar üstlenmektedir (Burns ve ark.,2013; Dick, 2011).



Şekil 1. Nano gübre uygulamalarının toprak mikrobiyal aktivitesi ve besin döngüsü süreçleriyle ilişkisi

Üreaz enzimi, ürenin hidrolizi yoluyla amonyum (NH_4^+) ve karbondioksit (CO_2) oluşumunu katalizleyen ve azot döngüsünün temel basamaklarından birini oluşturan kritik bir enzimdir. Toprakta üreaz aktivitesi; azot mineralizasyon hızını, amonyak volatilizasyon potansiyelini ve dolayısıyla bitkilerin kullanılabilir azot miktarını doğrudan etkilemektedir. Dehidrogenaz enzimi ise yalnızca canlı mikroorganizmalarda aktif olması nedeniyle mikrobiyal canlılık ve toplam metabolik aktivitenin güvenilir bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir. Fosfataz enzimleri, organik fosfor bileşiklerinin inorganik fosfata dönüştürülmesini sağlayarak bitkilerin fosfor alımını kolaylaştırmakta ve fosfor döngüsünde merkezi bir rol oynamaktadır (Nannipieri ve ark.,2012; Mim ve ark.,2025). Toprak enzim aktiviteleri; sıcaklık, nem, pH, organik madde içeriği ve besin yönetimi uygulamaları gibi çevresel ve yönetsel faktörlere karşı oldukça duyarlıdır. Gübreleme stratejileri, özellikle uygulanan gübrenin formu ve salınım hızı, kök bölgesindeki mikrobiyal yaşam koşullarını değiştirerek enzimatik süreçlerin yönünü ve şiddetini belirleyebilmektedir. Nano gübre uygulamaları, besin elementlerinin kontrollü salınımı sayesinde mikroorganizmalar için daha dengeli bir besin ortamı oluşturarak enzim aktivitelerini olumlu yönde etkileyebilmektedir (Kumar ve ark.,2021; Dimkpa & Bindraban, 2018). Özellikle yavaş salımlı nano-üre gübrelerinin kullanımı, üre hidroliz hızını düzenleyerek toprakta ani üreaz aktivitesi artışlarını sınırlandırmakta ve buna bağlı olarak amonyak volatilizasyonu kaynaklı azot kayıplarını azaltmaktadır. Bu dengeli süreç, hem bitkilerin azot kullanım etkinliğini artırmakta hem de toprak mikrobiyal topluluklarının daha stabil ve işlevsel bir yapı kazanmasına katkı sağlamaktadır. Literatürde, nano gübre uygulamalarının enzim aktiviteleri ile mikrobiyal biyokütle arasında pozitif ilişkiler oluşturduğu ve bu etkinin toprak verimliliği ile sürdürülebilir besin döngüsü açısından önemli olduğu vurgulanmaktadır (Sehgal ve ark.,2024; Burns ve ark.,2013).

4. Nano Gübrelerin Üreaz Aktivitesi Üzerine Etkileri

Üreaz enzimi, azot döngüsünün en kritik basamaklarından birinde görev alarak ürenin hidrolizi sonucu amonyak (NH_3) ve karbondioksit (CO_2) oluşumunu katalize etmektedir. Toprakta üreaz aktivitesinin düzeyi, azotun mineralizasyon hızını ve bitkiler için kullanılabilir azot miktarını doğrudan belirleyen temel faktörlerden biridir. Konvansiyonel üre gübrelerinin

uygulanması sonrasında, üreaz aktivitesi kısa süre içerisinde yüksek seviyelere ulaşabilmekte; bu durum özellikle yüzey uygulamalarında yoğun amonyak volatilizasyonuna ve önemli azot kayıplarına yol açmaktadır. Söz konusu süreç, azot kullanım etkinliğini düşürmekle birlikte çevresel kirlilik riskini de artırmaktadır (Cantarella ve ark.,2018; Sehgal ve ark.,2024). Yavaş salınımlı nano-üre gübrelere, ürenin toprak ortamında çözünme ve hidroliz hızını düzenleyerek üreaz kaynaklı ani reaksiyonları sınırlandırmaktadır. Nano ölçeğe geliştirilen bu formülasyonlar, azotun kök bölgesinde daha uzun süre tutulmasını sağlayarak hem bitki tarafından alınabilirliği artırmakta hem de amonyak volatilizasyonunu önemli ölçüde azaltmaktadır. Kontrollü salınım mekanizması sayesinde üreaz aktivitesi ani pikler yerine daha dengeli ve zamana yayılmış bir seyir izlemekte; bu durum bitkilerin büyüme dönemleri boyunca azotu daha etkin biçimde kullanmasına olanak tanımaktadır (Trenkel, 2010; Mim ve ark.,2025).

Tablo 1. Nano gübrelere tarımsal verim, toprak mikrobiyal aktivite ve enzimatik süreçler üzerindeki etkilerine ilişkin literatür özeti

Nano gübre / Yaklaşım	Bitki Sistem	İncelenen biyolojik parametreler	Temel bulgular	Kaynak
Nano-üre (yavaş salınımlı)	Tarla bitkileri (genel)	Üreaz aktivitesi, NH ₃ volatilizasyonu, NUE	Üreaz aktivitesinde ani pikler baskılanmış, amonyak kayıpları azalmış, azot kullanım etkinliği artmıştır.	Trenkel, 2010; Cantarella ve ark.,2018
Nano-azotlu gübreler	Tahıllar (pirinç, buğday vb.)	Bitki verimi, biyokütle, N alımı	Konvansiyonel gübrelere kıyasla verim ve N alımı artmış, besin kayıpları azalmıştır.	Raliya ve ark.,2018; Sehgal ve ark.,2024
Nano gübreler (metal/oksit bazlı)	Toprak-bitki sistemi	Mikrobiyal çeşitlilik, besin döngüsü	Mikroorganizma baskılanması gözlenmemiş, besin döngüsü süreçleri desteklenmiştir.	Dimkpa & Bindran, 2018
Nano gübreler (çeşitli formülasyonlar)	Tarla ve sera koşulları	Klorofil, biyokütle, verim bileşenleri	Bitki boyu, taze-kuru ağırlık ve klorofil içeriğinde artış rapor edilmiştir.	Zulfiqar ve ark.,2019; Raliya ve ark.,2017
Nano gübreler ve toprak enzimleri	Tarımsal toprak	Üreaz, dehidrogenaz	Enzim aktiviteleri mikrobiyal canlılıkla pozitif ilişki göstermiştir.	Burns ve ark.,2013; Dick, 2011
Nano-üre ve mikrobiyal sağlık	Tarımsal toprak	Mikrobiyal topluluk yapısı, enzimler	Dengeli N salınımı sayesinde mikrobiyal çeşitlilik ve fonksiyonellik korunmuştur.	Sehgal ve ark.,2024
Nano gübreler (derleme)	Genel	Verim, toprak biyolojisi, çevresel etki	Nano gübrelere verim artışı ve biyolojik sağlık açısından potansiyeli vurgulanmış, uzun dönem risklerin izlenmesi önerilmiştir.	Kumar ve ark.,2021

5. Nano Gübrelere Tarımsal Verimlilik ve Mikrobiyal Sağlık Açısından Değerlendirilmesi

Nano gübreler, besin elementlerinin kontrollü ve zamana yayılmış biçimde salınmasını sağlayan yapıları sayesinde bitkilerin gelişim süreci boyunca besin gereksinimlerini daha dengeli bir şekilde karşılayabilmektedir. Bu özellik, hem bitkisel verim artışı hem de besin kullanım etkinliğinin yükseltilmesi açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Literatürde, yavaş salınımlı nano-üre uygulamalarının konvansiyonel üre gübrelere kıyasla bitki boyu, taze ve kuru biyokütle miktarı ile birlikte toplam klorofil, karotenoid ve antosiyanin içeriklerinde anlamlı artışlar sağladığı bildirilmektedir. Ayrıca bin tane ağırlığı, tane dolgunluğu ve hasat

indeksi gibi temel verim bileşenlerinde de belirgin iyileşmeler gözlemlendiği rapor edilmiştir (Raliya ve ark.,2018; Sehgal ve ark.,2024). Nano gübre uygulamalarının bir diğer önemli etkisi, bitki ve tane dokularındaki besin elementleri birikiminin artmasıdır. Özellikle azot (N), fosfor (P) ve potasyum (K) içeriklerinde gözlenen yükselme, besin alım ve kullanım etkinliğinin arttığını göstermektedir. Kontrollü salınım mekanizması sayesinde azot başta olmak üzere besin elementlerinin kayıpları sınırlandırılmakta ve bitkilerin bu besinlerden daha uzun süre yararlanması sağlanmaktadır. Bununla birlikte nano gübrelerin, toprak mikroflorası üzerinde baskılayıcı bir etki oluşturmadığı; aksine azot fikse eden ve besin döngüsünde görev alan faydalı mikroorganizmaların canlı hücre yoğunluklarını artırdığı birçok çalışmada vurgulanmaktadır (Dimkpa & Bindraban, 2018; Sehgal ve ark.,2024). Mikrobiyal sağlık açısından değerlendirildiğinde, nano gübre uygulamalarının toprak ekolojik koşullarını iyileştirerek enzimatik aktiviteleri teşvik ettiği ve mikrobiyal çeşitliliği desteklediği görülmektedir. Artan enzim aktiviteleri ve mikrobiyal fonksiyonel çeşitlilik, besin döngüsünün daha etkin işlemesine ve toprak verimliliğinin sürdürülebilir biçimde korunmasına katkı sağlamaktadır. Konvansiyonel gübrelerle karşılaştırıldığında, nano gübrelerin daha düşük dozlarda uygulanmasına rağmen hem tarımsal verim hem de toprak biyolojik sağlığı açısından daha olumlu sonuçlar sunduğu bildirilmektedir (Kumar ve ark.,2021; Mim ve ark.,2025).

6. Sonuç ve Öneriler

Nano gübreler, kontrollü salınım özellikleri sayesinde bitkilerin besin elementlerini daha etkin biçimde kullanmalarına olanak tanıyan ve bu yönüyle hem tarımsal verimliliği hem de toprak kalitesini artıran yenilikçi bir gübreleme yaklaşımı sunmaktadır. Özellikle yavaş salınımlı nano-üre formülasyonlarının, azot kayıplarını önemli ölçüde azaltarak besin kullanım etkinliğini yükselttiği; bitki gelişimi, biyokütle üretimi ve verim bileşenlerinde anlamlı iyileşmeler sağladığı çeşitli çalışmalarla ortaya konulmuştur (Sehgal ve ark., 2024). Toprak biyolojik sağlığı açısından değerlendirildiğinde, nano gübre uygulamalarının mikrobiyal çeşitliliği desteklediği, toprak enzim aktivitelerini artırdığı ve toprak ekosisteminin işlevselliğinin korunmasına katkı sağladığı görülmektedir. Mikrobiyal aktivite ve enzimatik süreçlerdeki bu iyileşmeler, besin döngüsünün daha etkin işlemesine olanak tanımakta ve sürdürülebilir tarımsal üretim için gerekli olan ekolojik dengenin sürdürülmesini desteklemektedir. Bu bağlamda nano gübreler, kısa vadeli verim artışlarının yanı sıra uzun vadede toprak verimliliğinin korunmasına da katkı sunmaktadır (Mim ve ark., 2025; Burns ve ark., 2013).

Öneriler

- i. Nano gübre formülasyonları, toprak mikroorganizmalarının yaşamını ve fonksiyonel faaliyetlerini olumsuz yönde etkilemeyecek şekilde tasarlanmalı; biyolojik açıdan uyumlu ve “mikroorganizma dostu” özellikler taşımalıdır (Dimkpa ve Bindraban, 2018).
- ii. Nano gübre uygulama dozları; toprak tipi, bitki türü ve bölgesel iklim koşulları dikkate alınarak belirlenmeli, aşırı ve bilinçsiz kullanımın önüne geçilmelidir (Sehgal ve ark., 2024).
- iii. Uzun dönemli arazi denemeleri ve kontrollü inkübasyon çalışmaları ile nano gübrelerin toprak biyokimyası, mikrobiyal çeşitlilik ve ekosistem fonksiyonları üzerindeki etkileri bütüncül bir yaklaşımla izlenmelidir (Kumar ve ark., 2021).
- iv. Mikrobiyom temelli moleküler analiz yöntemlerinin (metagenomik, metabolomik vb.) kullanımıyla nano gübrelerin toprak-bitki-mikroorganizma etkileşimleri daha ayrıntılı ve mekanistik düzeyde ortaya konulmalıdır (Nannipieri ve ark., 2012).

Kaynaklar

- Anonymous, 2013. Classifications and Standards. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Burns, R. G., DeForest, J. L., Marxsen, J., Sinsabaugh, R. L., Stromberger, M. E., Wallenstein, M. D., Weintraub, M. N., Zoppini, A., 2013. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions. *Soil Biology and Biochemistry*, 58: 216–234.
- Cantarella, H., Otto, R., Soares, J. R., Silva, A. G., 2018. Agronomic efficiency of NBPT as a urease inhibitor: A review. *Journal of Advanced Research*, 13: 19–27.
- Chen, J., Lü, S., Zhang, Z., Zhao, X., Li, X., Ning, P., Liu, M., 2020. Environmentally friendly fertilizers: A review of materials used and their effects on the environment. *Science of the Total Environment*, 613–614: 829–839.
- Dick, R. P., 2011. Methods of soil enzyme analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 75(2): 373–375.
- Dimkpa, C. O., Bindraban, P. S., 2018. Nanofertilizers: New products for the industry? *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(26): 6462–6473.
- Ikhajiagbe, B., Igiebor, F. A., & Ogwu, M. C. (2021). Growth and yield performances of rice (*Oryza sativa* var. *nerica*) after exposure to biosynthesized nanoparticles. *Bulletin of the National Research Centre*, 45(1), 62.
- Kah, M., Hofmann, T., Matzke, M., 2019. Nanopesticides and nanofertilizers: Emerging contaminants or opportunities for risk mitigation? *Frontiers in Chemistry*, 7: 608.
- 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.
- Kumar, R., Kumar, R., Prakash, O., 2021. The impact of nanotechnology in agriculture: A review. *Journal of Environmental Management*, 277: 111317.
- Mim, A., et al., 2025. Nano-urea fertilizers and their effects on urease activity, nitrogen dynamics and soil biological properties. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 25: xxx–xxx.
- Naderi, M. R., Danesh-Shahraki, A., 2013. Nanofertilizers and their roles in sustainable agriculture. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 5(19): 2229–2232.
- Nannipieri, P., Giagnoni, L., Renella, G., Puglisi, E., Ceccanti, B., Masciandaro, G., Fornasier, F., Moscatelli, M. C., Marinari, S., 2012. Soil enzymology: Classical and molecular approaches. *Biology and Fertility of Soils*, 48: 743–762.
- Raliya, R., Saharan, V., Dimkpa, C., Biswas, P., 2017. Nanofertilizer for precision and sustainable agriculture. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(47): 10165–10175.
- Raliya, R., Saharan, V., Dimkpa, C., Biswas, P., 2018. Nanofertilizer for precision and sustainable agriculture: Current state and future perspectives. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(26): 6487–6503.
- Sehgal, S., Kaur, J., Singh, R., Kumar, S., 2024. Slow-release nano-fertilizers and their interaction with soil microbial communities and enzymes. *Environmental Research*, 241: 117460.
- Trenkel, M. E., 2010. *Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: An option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture*. International Fertilizer Industry Association, Paris.

- Zaman, M., Nguyen, M. L., Blennerhassett, J. D., Quin, B. F., 2009. Reducing NH_3 , N_2O and NO_3^- -N losses from a pasture soil with urease or nitrification inhibitors and elemental S-amended nitrogenous fertilizers. *Biology and Fertility of Soils*, 45: 693–705.
- 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.