



Yüzüncü Yıl Üniversitesi
Tarım Bilimleri Dergisi
(YYU Journal of Agricultural Science)

<http://dergipark.gov.tr/yyutbd>



Derleme Makalesi (Review Article)

Nanomateriyallerin Tarımda Kullanımı

Kağan Tolga CİNİSLİ*¹, Sevda UÇAR¹, Neslihan DİKBAŞ¹

¹Atatürk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Biyoteknoloji Bölümü, 25000, Erzurum, TÜRKİYE

*Sorumlu yazar e-posta: kagantolgacinisli2525@gmail.com

Makale Bilgileri

Geliş: 23.07.2019
Kabul: 28.09.2019
Online Yayınlanma 31.12.2019
DOI: 10.29133/yyutbd.595658

Anahtar kelimeler

Büyüme Düzenleyici,
Gübre,
Nanomateriyaller,
Tarım.

Öz: "Nano-Era" adıyla bilinen akım giderek yaygınlaşarak çeşitli nanoteknoloji araştırma programları ve mühendislik uygulamaları ile birlikte son derece popülerlik kazanarak araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Tarımda nanomateriyallerin kullanımı "under explorer" olarak adlandırılmaktadır. Nanomateriyallerin kendilerine ait üstün özellikleri ile tarımsal uygulamalarda ne düzeyde olumlu katkı yaratabilecekleri merak konusudur. Bu hipotezle çalışma, çeşitli nanomateriyallerin gübre ve büyüme düzenleyici olarak kullanılabilirliği açısından güncel araştırmaları içermektedir. Derleme makale, nanomateriyallerin tarımda uygulanması konusunda ilgili araştırmacılar için önemli bir veri kaynağı ve hareket noktası olabilecek düzeyde önem arz etmektedir.

Use of Nanomaterials in Agriculture

Article Info

Received: 23.07.2019
Accepted: 28.09.2019
Online Published 31.12.2019
DOI: 10.29133/yyutbd.595658

Keywords

Growth regulator,
Fertilizer,
Nanomaterials,
Agriculture.

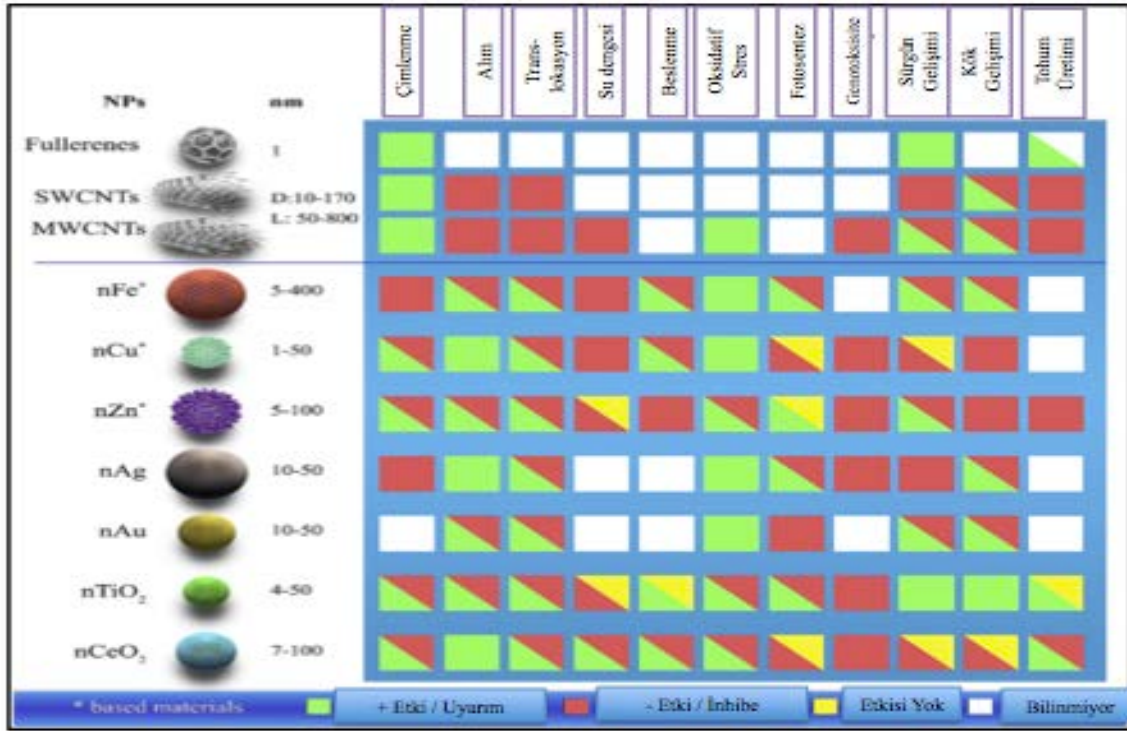
Abstract: The current known as "Nano-Era" is becoming increasingly widespread, gaining extremely popularity along with various nanotechnology research programs and engineering applications, attracting the attention of researchers. The use of nanomaterials in agriculture is called "under explorer". Nanomaterials with their superior characteristics, what order of agricultural applications can create a positive contribution is a matter of wonder. Working with this hypothesis includes current research in terms of the availability of various nanomaterials as fertilizers and growth regulators. The review paper is important for the researchers concerned in the application of nanomaterials in agriculture at a level that may be an important data source and point of action.

1

1. Giriş

Gelişen Dünyada, 2000'li yılların başlarında 35'ten fazla ülkenin nanoteknoloji araştırma programları ve mühendislik uygulamalarında nanomateriyallerin kullanılmasıyla "Nano-era", adıyla bilinen yeni bir akım ortaya çıkmıştır (Roco, 2003). Bu akım giderek yaygınlaşmış hatta nanomateriyallerin tarımda kullanılabileceği öngörüsüyle araştırmacılar bu alanda çeşitli çalışmalara

başlamışlardır. Boyutu 100 nm'nin altında olan maddeler nano madde olarak adlandırılmış, üretim, işleme taşıma, paketlenme ve tarımsal ürünlerin taşınması konusunda kullanılabilmesi görülmüştür (Scott and Chen, 2003; Wiesner *et al.*, 2006). Bitki gelişim üzerine farklı nanopartiküllerin etkisi Şekil 1' de verilmiştir. Nanomalzemeler tarımda gübre uygulamalarında önemli bir yer edinerek, bitkiyi yavaş yavaş kontrollü bir biçimde besleyebileceği Sohrab *et al.* (2016) tarafından bildirilmiştir. Nano-gübreler, kimyasal gübrelerin neden olduğu toprak kirliliğinden doğan çevresel risk etmenlerini azaltarak bitki ve doğaya olumlu bir etkide bulunabilir (Naderi *et al.*, 2011). En büyük avantajlarından biri de diğer gübrelere göre daha az miktarda kullanılmasıdır (Selivanov and Zorin, 2001; Reynolds, 2002; Raikova *et al.*, 2006; Batsmanova *et al.*, 2013; Subramanian *et al.*, 2015).



Şekil 1. Çeşitli nanomateriyallerin tarımda kullanılması ve bitki gelişimine farklı düzeylerdeki etkileri (Mukherjee ve ark., 2015).

Nano-gübreler konusunda yapılan pek çok çalışmada sahip oldukları geniş yüzey alanlarının yanı sıra bitkilerin yaprak ve kök gözenek boyutlarından daha küçük boyutlara sahip olduklarından temas ettikleri yüzeyden bitkiye geçişleri, besinlerin alımını daha kolay hale getirerek kullanım etkinliğini arttırdıkları belirtilmiştir (Sing ve ark., 2017). Nano-gübrelerin, bitkinin yaşam periyodu boyunca gelişime olumlu katkı sağlamasına yardımcı olmalarının temelinde bitki metabolizmasında yarattığı olumlu etkilerin, enzimsel ve hormonal düzeyde etki mekanizması ile değişken ve şiddetli atmosferik koşullara, biyotik-abiyotik strese ve hastalıklara karşı dirençli hale gelebildiği öne sürülmüştür (Mukherjee ve ark., 2015). Toprakta nanopartikül uygulamalarıyla elverişli ve yeterli miktarda mikro element içeriği bulunabilir, böylece bitkilerin patojenlere karşı direnci de artabilir. Fakat bazı faktörler toprakta bulunan besin elementlerinin bitkiler tarafından alımı üzerinde olumsuz etki yaparak sınırlandırır. Alkalin topraklarda mikro besin elementlerinin bitki tarafından alınabilirliği azalmaktadır. Örneğin; toprak pH'sı bazikleştikçe topraklarda çinko, mangan ve demir biyo yararlanılabilirliği azalmaktadır. Bu elementlerin alımları kökler tarafından sınırlandırılarak bitki enfeksiyona açık hale gelmiş olur (Güneş ve ark., 2007; Servin ve ark., 2015).

Nano-gübrelerin boyutlarının küçük olması, mineralin stomalardan kolaylıkla geçmesine yol açarak bitkinin minerallerden kolayca faydalanmasını sağlarlar (Liu ve Lal, 2016; Sing ve ark., 2017). Böylelikle uygulanmış gübrelere maksimum verim alınabileceği Liu and Lal, 2016 tarafından bildirilmiştir. Nano-gübrelerin geleneksel gübrelere göre, birçok avantajları vardır (Liu ve Lal, 2016; Sing ve ark., 2017; Dağhan, 2017; Ahmad, 2019). Bu avantajların bazıları; gübreyi çok az miktarda

kullanarak en düşük maliyetle en yüksek verimin alınabilecek olması, halihazırda olan besinin bitkide kullanım verimliliğini arttırması, gübre kullanım etkinliğinin arttırılması, sürekli gübre kullanılmasının önüne geçilmesi, bitkiler için yararlı olan besinlerin kayıplarını azaltarak çevre üzerine olası olumsuz etkilerinin minimize edecek olması, toprak muhtemel oluşacak toksisite riskini azaltılıp, toprak verimliliğinin ve ürün kalitesinin arttırılması olarak sıralanabilir. Nano-gübreler bitkinin yetiştirme periyodu boyunca sağlıklı olarak gelişme ve büyümesini imkan sağlayarak ürün verimi ve besin değerini arttırırlar. Böylelikle sağlıklı olan bitki hastalıklara ve olumsuz çevre koşullarına karşı daha fazla direnç kazanması açısından nano-gübreler önemlidir (Dağhan, 2017).

Nano-gübrelerin pek çok üstün özelliklerine rağmen bazı olumsuz etkileri de bulunmaktadır. Nano boyuttaki partiküller sağlığa ve çevreye karşı bazı riskler barındırmaktadır. Nano-malzemelerle ilgili yapılan ilk çalışmalarda, insanlar üzerinde toksik etkilere neden olduğunu göstermiştir. Nanopartiküller insan vücuduna girerek tüm hayati organlara ulaşip dokularda zararlara neden olabilmektedir (Dağhan, 2017). Literatür bilgisine göre nano-gübrelerin toksik etkilere de sahip oldukları, ekosistem için önemli problemlerin oluşmasında etken ve oluşturdukları çevre sorunlarının onarımının oldukça güç olduğu bildirilmiştir (Dağhan, 2017).

Bu derleme çalışmasının amacı; tuz stresinden kaynaklanan bitkisel ürün kaybının nanopartiküller çinko ve mikrobiyal sentez formülasyonu kullanılarak biyoteknolojik yöntemlerle azaltılması yönünde gübre formülasyonlarının oluşturulmasıdır. Böylelikle, muhtemelen üretici mikrobiyal gübre ve nano-gübre adı altında pahalı gübreleri ayrı ayrı almak yerine oluşturulacak gübre formülasyonunun tek bir ürün olarak kullanılabilirliği denemelerle araştırılmıştır.

1.1. Bazı Nanopartiküllerin Bitkiler Tarafından Alım Formları

Nanopartiküller (NP), bitki besin elementlerini şu üç yoldan biriyle bitkiye iletirler; 1) Besin elementi, nano-tüpler veya nano gözenekli malzemeler gibi nanomalzemeler içine kapsülenebilir, 2) ince bir koruyucu polimer film ile kaplanır veya 3) nano ölçekli boyutlardaki partiküller veya emülsiyonlar halinde bitkiye taşınırlar (Nair *et al.*, 2010). Nano-gübre formülasyonlarındaki nanopartiküller'in boyutları, hücre duvarı gözeneklerinden küçükse, direkt bitki hücrelerine girmesi mümkündür. Ancak NP'lerin daha ileri aşamaları hücre zarı, besin maddelerinin sitoplazma ile etkileşimleri incelemenin ötesinde ve NP taşınım mekanizması çok karmaşıktır (Nair *et al.* 2010). Bununla birlikte, besin elementleri su/toprak çözeltisinde nanoparçacık çözülmesi yoluyla bitki kökü sistemi tarafından absorplanmaktadır. Başka bir deyişle, NP'ler suda çözülür ve besin maddelerini çözünmüş iyonlar halinde serbest bırakır (Denklem 1-3). Bitkiler ayırım gözetmeden besleyici çözünmüş iyonları konveksiyonel gübrelerden alabilir. Ancak, su/toprak çözeltisindeki NP'lerin çözünme hızı ve kapsamı, yüksek spesifik yüzey alanları ve boyutları ilgili katı yüzeylerden daha yüksek olmasından dolayı konveksiyonel gübrelere göre daha etkin bir işleve sahip olabilirler (Ma *et al.*, 2010; Nair *et al.*, 2010; Lin *et al.*, 2008;).

1.2. Nanopartiküler Makro Besin Elementi İçeren Gübrelerle Yapılan Çalışmalar

1.2.1. Nanopartiküler fosfor (P) içeren gübreler

Liu and Lal (2014) yaptığı çalışmada 16 nm boyutlarında yeni bir hidroksiapatit türü ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$) NP'ler sentezleyerek sera denemesi ve atıl büyüme ortamında NP'lerin %50 perlit ve %50 turba yosunu ortamında yetiştirilen soya fasulyesi üzerindeki gübreleme etkisini değerlendirmişlerdir. Çalışma sonucunda elde edilen veriler ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$) NP'lerin uygulanmasının büyüme oranını ve tohum gelişimini sırasıyla %33 ve %20 oranlarında arttırdığını tespit edilmiştir. Biyokütle üretimi, yerüstü aksam için sırasıyla %18 ve yeraltı aksamlar için %41 oranında artırılmıştır. Veriler, soya fasulyesinin köklerinin hidroksiapatit NP'leri etkin bir fosfor besin kaynağı olarak emebileceğini ve sağlıklı büyümeyi ve yüksek verim sağlayabileceğini göstermiştir. Aynı zamanda fosfor ek olarak, NP'ler bitkilere besin Ca da sağlayabileceği tesbit edilmiştir. Apatit NP'leri yeni bir P sınıfı gübre olarak kullanmak, tarımsal verimliliği potansiyel olarak arttırabileceği, NP'ler sayesinde fosforun mobilizasyonunun geleneksel fosforlu gübrelere göre azalmasıyla ötrifikasyon riskini engelleyebileceği ortaya konmuştur. Örneğin, apatit NP'ler yüklü PO_3^{4-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- veya Ca_2^+ iyonlarına kıyasla zemin bileşenleri ile çok daha zayıf etkileşime sahiptir. Bu nedenle, NP'lerin önemli

bir kısmı köklerin emilmesi için toprak çözeltisinde kalır. Geleneksel fosforlu gübreler ise NP'lere göre yüklü fosfat iyonlarının çoğu toprak parçacıkları tarafından absorbe edildiği için bitkiler tarafından alımı azalır (Liu ve Lal 2014). Buna ek olarak, apatit NP'ler çözünebilir fosfat iyonlarına göre daha az biyolojik olarak bulunabilir ve ötrofikasyon açısından düşük riskler oluşturabilir. Apatit NP'lerin, toprak parçacıklarıyla olan etkileşimleri, toprak gözeneklerindeki taşınım, alglerin biyo-yararlılıkları ve tarla koşullarında ürün tepkisi üzerine diğer düzenli fosfor gübrelere kıyasla bu potansiyel yararlarını teyit etmek için ek araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

1.2.2. Nanopartiküler kalsiyum (Ca) içeren gübreler

Liu ve ark. (2005) tarafından Hoagland çözeltisi ile kumda 80 gün boyunca yetiştirilen fıstık fidelerine Ca besin maddesi olarak CaCO_3 NP'leri (20-80 nm, 160 mg Ca L^{-1}) olacak şekilde uygulayarak, Ca-NP'lerin fide büyümesini kontrol'e kıyasla önemli ölçüde geliştirdiğini gözlemlemişlerdir. Ca kaynağı olarak kullanılan Ca-NP'leri kök gelişimini sırasıyla %3.04 ve %1.58 arttırdığı gözlemlenmiştir.

Liu ve ark. (2005) aynı zamanda Ca-NP'ler ve hümitik asitlerin (1.000 mg L^{-1}) birlikte uygulanmasının fıstık fidelerinde maksimum büyümeyi sağladığını bildirmişlerdir. Bu çalışma Ca-NP'lerin tarla bitkileri için Ca içeriği açısından büyük bir potansiyeli olduğunu göstermiştir.

1.2.3. Nanopartiküler magnezyum (Mg) içeren gübreler

Delfani ve ark. (2014) bezelyede Mg-NP ve Fe-NP eriyiklerinin yapraktan uygulanmasını test etmişler ve 0.5 g Mg-NP ve Fe-NP L^{-1} kombinasyonunun 1.000 tane ağırlığına %7 oranında ağırlık artışı sağlayarak, klasik Fe ve Mg uygulamalarından yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Söz konusu çalışmada bu iki elementin yapraktan uygulanmasının bitkinin fotosentez miktarını arttırdığı gözlenmiştir. Fakat Mg-NP uygulaması yalnız başına verimliliği kontrole göre %6 oranında düşürmüştür. Ancak, araştırmacılar Mg NP'lerin uygulanmasının bitki sapları ve yapraklarında düzenli Mg tuzu kullanımıyla karşılaştırıldığında Mg alımını geliştirdiğini ve Mg-NP'lerin daha yüksek kullanılabilirlik ve hareketliliğini gösterdiğini gözlemlemişlerdir.

1.3. Nanopartiküler Mikrobesein Elementli Nano-Gübrelere Yapılan Çalışmalar

Genellikle bitki beslenmesinde rol alan önemli mikro besin maddeleri, demir (Fe), çinko (Zn), mangan (Mn), bakır (Cu), bor (B), klor (Cl) ve molibden (Mo)'dir. Mikro besin elementleri makro besin maddeleri (N, P, K, Ca, Mg ve S) ile karşılaştırıldığında, Hoagland çözeltisinin bileşiminde gösterildiği gibi, bitki ve diğer bitkilerin sağlıklı bir şekilde büyümesi için daha az miktarda mikro besin maddesi gereklidir (Hoagland ve Arnon 1950). Ancak bitkiye yararlılık konusunda mikrobesein elementlerinin yararlılığını azaltan durumlar (kaba tekstür, alkalilik, düşük organik madde vb.) vardır. Bu kötü durumlara karşı mikrobeseinlerle nano-gübreleme bu besinlerin biyolojik olarak kullanılabilirliğini artırır.

Mikrobeseinler, çoğunlukla N, P ve K içerikli gübrelere etkin alımı için düşük oranlarda çözünebilir tuzlar olarak ilave edilir. Bu kompozit gübrelere bulunan mikro besinler genellikle yeterli besin sağlar ve çevresel riskleri az etkiler. Mikro besin maddesi içeren NP'lerin, mikrobeseinli nano-gübreleme konusunda araştırma ve geliştirme yapmak için bazı temel bilgiler besin maddelerinin bitki gelişimini arttırabileceği öngörülmektedir (Mahajan ve ark., 2011).

1.3.1. Nanopartiküler demir (Fe) içeren gübreler

Ghafariyan ve ark. (2013) tarafından yapılan bir sera denemesinde, süper paramanyetik Fe-NP'lerin düşük konsantrasyonlarının bile hidrofobik koşullar altında, soya fasulyesi yapraklarındaki klorofil içeriğini önemli ölçüde arttırdığını bildirmişlerdir. Böylelikle Fe-NP'lerin soya fasulyesinde demir kaynağı olarak kullanılabilir ve demir eksikliğini klorotik belirtilerini azaltabileceği gösterilmiştir. Fe-NP'lerin 45 mg L^{-1} konsantrasyonundaki kullanma etkisi Fe-EDTA'nın aynı dozdaki kullanım etkisinin bitkiye yaptığı etkilerinin benzer olduğu gözlenmiştir. Delfani ve ark. (2014), bezelyede yaptıkları çalışmada 500 mg Fe-NP'ler L^{-1} 'nin yapraktan uygulamasının, bitki başına bakla

sayısını (%47 oranında), 1.000 tane ağırlığında (%7 oranında), Fe içeriğini (%34 oranında) ve klorofil içeriğini (%10 oranında) ise kontrole göre arttırdığını tespit etmişlerdir. Fe-NP'lerin uygulanması ile elde edilen ürün performansı, Fe tuzu ile elde edilen ürün performansından daha fazla olmuştur. Fe-NP muamelesi altında olan bitkilerde sırasıyla %28, %4, %45 ve %12 artmıştır.

1.3.2. Nanopartiküller Çinko (Zn) İçeren Gübreler

ZnO-NP'ler yıllardır endüstride en çok kullanılan metal oksit nanopartiküllerinden biridir. Böylece, Zn-NP'lerin bitkiler ve diğer organizmalar üzerindeki etkileri yoğun olarak incelenmektedir. Mahajan ve ark. (2011) tarafından bitki agar yöntemini kullanarak, ZnO-NP'lerin düşük konsantrasyonlarda fasulye ve nohut fidelerinin büyümesini arttırdığını gözlemlemişlerdir. Fasulye fidelerinin kökleri için en iyi büyüme tepkisi (uzunlukta %42 veya %41 artış, biyokütlede %98, %76), kontrol grubunda 20 mg L⁻¹ konsantrasyonunda gözlenmiştir. Nohut fideleri için 1 mg L⁻¹ konsantrasyonunda, kökte (%53) biyokütlede (%37) ve sürgünde uzunluk (%6) oranında önemli artışlara neden olmuştur. Bununla birlikte, kök ve sürgünlerin büyüme hızlarındaki düşüş, bu optimal konsantrasyonların ötesinde gözlenmiştir.

Zhao ve ark. (2013) tarafından yapılan bir sera çalışmasında, bir toprak karışımına 400 ve 800 mg ZnO-NP kg⁻¹ uygulanmasının salatalık biyokütlesini arttırdığı bildirilmiştir. Sonuçlar, meyvelerin kuru ağırlığının, kontrol grubuna kıyasla sadece %6 ve %8 oranında artmasına rağmen, bitki kökü kuru kütlelerinin kontrol grubuna göre 1,1 ve 1,5 kat daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Hasat edilmiş salatalık meyvelerinde, ZnO-NP'lerin uygulanması da, nişasta içeriğini (1.1-1.6 kat), glutelin (0.9-2 kat) ve Zn'yi (1.7-2.5 kat) arttırdığını bildirmişlerdir (Zhao ve ark., 2013). Lin ve Xing (2007), 2 mg ZnO-NP L⁻¹ uygulanmasının çimlendirilmiş turp tohumlarının kök uzamasını kontrole göre arttırdığını bildirilmiştir. Optimum konsantrasyonlarda Zn-NP'lerin kullanılması bu fideler üzerinde önleyici veya toksik etkilere sahiptir. Bununla birlikte, bu raporların hepsinde ZnO-NP'lerin ciddi fitotoksitesisi, 400 ile 2000 mg L⁻¹ arasındaki yüksek NP-Zn konsantrasyonlarında olduğu anlaşılmıştır (Lee ve ark., 2010; Lin ve Xing, 2007; Lopez-Moreno ve ark., 2010; Zhao ve ark., 2014).

1.3.3. Nanopartiküller manganez (Mn) içeren gübreler

Pradhan ve ark..(2013), metalik Mn-NP'lerin piyasada bulunan MnSO₄ tuzundan daha iyi bir mikrobeselementi olduğunu bildirmişlerdir. Aynı araştırmacılar Mn-NP'lerin fasulye büyümesini ve fotosentez oranını arttırdığını gözlemlemişlerdir. Diğer bir çalışmada fasulye fideleri, büyütme odaları içinde Hoagland çözeltisiyle birlikte perlit ortamında 15 gün inkübe edilmiştir. Litrede 0.05 mg Mn-NP'lerin uygulanması ile kontrole kıyasla kök uzunluğu (%52), sürgün uzunluğu (%38), köklenme sayısı (%71) ve maksimum büyüme artışı sağlanmıştır. Taze biyokütle ve kuru biyokütle de MnSO₄ tuzu ile muamele edilen fideler ile karşılaştırıldığında, bu parametreler sırasıyla %2, %10, %28, %8 ve %100 Mn-NP'lerin kullanımı ile artırılmıştır. İlginç bir şekilde MnSO₄ uygulaması, 1 mg L⁻¹ konsantrasyonunda bitki büyümesi üzerinde inhibe edici bir etki sergilerken, Mn-NP'lerin uygulanmasıyla bu seviyede hala pozitif bir etki seyrettiğini bildirmiştir. Bitkiler, sağlıklı bir büyüme için toprak çözeltisinde genellikle 0.5 mg Mn L⁻¹ konsantrasyonuna ihtiyaç duyarlar.

1.3.4. Nanopartiküller bakır (Cu) içeren gübreler

Bir tür su otunda (*Elodea densa*) kullanan 3 günlük inkübasyon çalışması sonucunda, Cu-NP'lerin düşük konsantrasyonlarının (0.25 mg Cu L⁻¹) bitki fotosentez hızını kontrol grubuna kıyasla %35 oranında arttırdığını göstermiştir (Nekrasova ve ark., 2011). Shah ve Belozerova (2009), metalik NP-Cu (130 ve 600 mg kg⁻¹) ile değiştirilen toprağın, 15 günlük marul fide büyümesini, sırasıyla %40 ve %91 oranında önemli ölçüde arttırdığını bildirmiştir. Ancak, yüksek konsantrasyonlarda (200-1.000 mg L⁻¹) metalik NP-Cu, fasulye, buğday (*Triticum aestivum*) ve sarı kabağın (*Cucurbita pepo subspecies*) fide gelişimi üzerine toksik etkileri gözlemlenmiştir (Lee ve ark., 2008; Musante ve White, 2012). Stampoulis ve ark. (2009), 1.000 mg metalik Cu-NP L⁻¹ uygulamasının, kabakların biyolojik kütlelerini Hoagland çözeltisinde 14 gün süreyle uyguladıktan sonra, kontrole göre %90 düşürdüğünü bildirmiştir. Bununla birlikte, bitki büyümesi için optimal sulu Cu konsantrasyonu sadece 0.02 mg L⁻¹ olup, yüksek Cu seviyelerinde fitotoksitesite ortaya çıkabileceği bildirilmiştir.

1.3.5. Nanopartiküler molibden (Mo) içeren gübreler

Batsmanova ve ark. (2014) tarafından nohutta molibden mikrobesein kaynağı olarak Mo-NP'ler çözeltilisi kullanılmasını esas alan bir çalışma yapılmıştır. Tınlı topraklarda nohut tohumları ekiminden önce dört grup (su, Mo-NP'ler, azot bakterileriyle mikrobiyal inkübasyon ve mikroorganizmaların bir kombinasyonu) oluşturulmuştur. Ortalama 1-2 saat olacak şekilde ayrı ayrı inkübasyona tabi tutulmuştur. Nohut rizosferinin kapsamlı bir mikrobiyolojik testi yapılarak, dördüncü uygulamanın 'agronomik açıdan değerli' mikroorganizmalarla hemen hemen tüm grupların gelişmesini kontrole göre iki ile üç kat arttırdığını göstermiştir. Bu sonuçlar aynı zamanda bitki başına kök sayısı ve nodül kütlelerinin kontrol grubu için 20 kat ve 8 kat fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Nohutta yapılan bir çalışmada Mo-NP uygulanmasının nohudun gelişim parametreleri üzerine direkt faydaları gözlemlenmiştir. Örneğin, bu uygulamayla bitki başına nodüllerin sayısı ve kütlesi sırasıyla kontrollerden 10 ve 6 kat daha fazla olmuştur. Ayrıca, kontrol ile karşılaştırıldığında, 10 mg L⁻¹ gibi konsantrasyona sahip tüm Mo-NP uygulamaları, nohutta bir antioksidan enzimin aktivitesini 2-3 kez, bitki patojenlerine direncin arttığını bir göstergesi olmuştur. Bu nedenle, Mo-NP'lerin tek başına veya mikrobiyal tedavi ile birlikte uygulanması, baklagilin ve diğer ürün türlerinin performansını, verimini ve hastalık direncini artırabilir. Normal metabolizma için bitkiler genellikle toprak çözeltilisinde 0.01 mg Mo L⁻¹ konsantrasyonuna ihtiyaç duyarlar (Batsmanova ve ark., 2014).

1.4. Nanomalzemelerle Güçlendirilmiş Gübreler

NM ile güçlendirilmiş gübreler, bitki besin maddeleri ile zenginleştirildiğinde, besin maddelerinin bitki alım etkinliğini arttıracak ve/veya geleneksel gübre uygulamasının olumsuz etkilerini azaltabilecek olan nanomalzemeler olarak tanımlanır. Bu NM'ler hedeflenen besin maddelerini içererek bitkiye ulaşmasını sağlar. Bu tipin en önemli örneği, besin artırıcı-zeolitlerdir.

1.4.1. Nano yapılı zeolit materyali

Zeolit parçacıkları genellikle nano ölçeklerde görülmez. Fakat zeolitlerin SiO₄ ve AlO₄ tetrahedranın 3 boyutlu çerçevesinde Al ve Si'nin düzenlenmesi, nanometre (0.3-10 nm çap) içindeki kanallar ve boşlukların oluşmasına neden olur (Ming ve Allen, 2001). Bu nedenle, zeolitler, nano-yapılı materyallerdir. Benzersiz nano gözenekli özelliklerinden dolayı, zeolitler genellikle çok yüksek spesifik yüzey alanı, yüksek katyon değişim kapasitesine sahiptirler ve bitki makro besin maddeleri (K⁺ ve NH⁴⁺) yönünden oldukça seçicidirler. Bu temel elementler zeolit değişim yüzeyleri boyunca değiştirilebilir, böylelikle bitki yetiştirme için besin maddeleri yavaş yavaş serbest bırakılabilir. Bu nedenle bu besinlerin yeraltı suyuna taşınması ve çevre kirliliği riskleri azaltılır. Dahası, gaz halindeki azotun (NH₃, N₂ veya N₂O) buharlaşması da azaltılabilir, çünkü adsorbe olan N, toprak mikroorganizmaları ile amonifikasyon süreci için kullanılamaz. Zeolitlerin bitki besin maddeleri ile yüklenmesi yeni bir kavram değildir ve 1970'lerden beri yoğun bir şekilde incelenmiştir (Ming ve Allen, 2001).

Fakat besinlerce zenginleştirilmiş zeolit gübreler birçok laboratuvar ve tarla örneği üzerinden test edilmiş ve kanıtlanmış nadir nanomalzemedir. Şimdiye kadar zeolitler, azot kullanım verimliliğini arttırmak, besin kayıplarını azaltmak ve çevresel riskleri azaltmak için halen ideal bir alt-tabaka halindedir. İlgilenen okuyucular için bazı besin artırıcı zeolit gübrelerinin tarımda kullanılmasının yararlarını gösteren bazı saha çalışmaları Ming ve Allen (2001) tarafından detaylı bir şekilde yapılmaktadır. Azot kullanımı verimliliği, (NH₄)₂SO₄ ile uygulanan toprakların %30-76'sına kıyasla, 42 günlük bitki büyümesinden sonra NH₄-zeolit ile değiştirilmiş topraklarda %72-95 arasında değişmiştir. MacKown ve Tucker (1985) tarafından yapılan çalışmada, 30 ton h⁻¹ NH₄ ile değiştirilmiş zeolit açısından zengin tuf kullanıldığında, nitrifikasyon oranlarının bir tınlı kumda %11, siltli kil tında %4 oranında azaldığını bildirmiştir. Azaltılmış nitrifikasyon oranları, zeolit NH₄'ün tutulması ve dolayısıyla NH₄'ün nitrifikasyona uğramış bakteriler tarafından dönüştürülmesinden kaynaklanmaktadır. Malekian ve ark. (2011) NO₃-N sızıntı suyu ve mısır gelişimine zeolit değişikliğinin etkilerini incelemek için lizimetrik deneyler uygulayarak, 60 kg'lık bir değişikliğin, kontrol için 18 kg'lık ha⁻¹'den 13.8 kg'lık bir ha⁻¹'e kadar %22 oranında azot sızıntısını azalttığını bildirmiştir. Buna ek olarak, hububat verimi (5.907 kg ha⁻¹) ve kuru yük (10,361 kg ha⁻¹), kontrole göre

sırasıyla %4.9 ve %10.3 artmıştır (5.631 ve 9.393 kg ha⁻¹). Ayrıca, zeolit uygulaması ile ürünün beslenme etkinliği %77.4'ten %85.8'e yükselmiş olduğuna dikkat çekmişlerdir.

1.4.2. Doğal olarak bazı besin elementlerini taşıyıcı nanopartiküller

Bazı laboratuvar deneylerinde, NP'lerin (silis, Fe oksitler, C kaplı demir ve polimerler vb.) bitki dokularına/hücrelere girebileceği ve doku/hücrelerde DNA ve kimyasalların taşınmasına rol oynayabileceği belirtilmiştir (Ghafariyan ve ark., 2013; Liu ve ark., 2002). Bu tür çalışmalar, bu NP'lerin bitki besleme konusunda yeni bir teknik olarak kullanılabilmesini, bitkilere besin maddeleri verebileceği hipotezini geliştirmiştir. Bununla birlikte, bu yaklaşımın, gübre kullanımının etkinliğini arttıran ya da çevresel bozulma risklerini azaltmak için kullanılan geleneksel yöntemlere göre avantajlarının kanıtlanması için kesin bir kanıt bulunmamaktadır. Örneğin, bitkiler doğal olarak kök sistemleri yoluyla toprak çözeltilerinden çözünür besin maddelerini (N, P ve K gibi) emebildiğinden büyümelerini arttırmak için bitki dokularına besin yüklü NP'leri enjekte etmek gerekli olabilir. Bu asal NP'ler aracılığıyla bitkilere yeni besin madde aktarma yaklaşımının araştırılmasını ve uygulanmasını desteklemek için daha kuvvetli ve özel çalışmalar gerekmektedir (Ming ve Allen, 2001).

1.5. Bitki Gelişimini Teşvik Edici Diğer Nanopartiküller

Diğer bazı nanopartikül türlerinin bitki gelişimine olumlu etki yapan önemli besin elementlerini içermemesine rağmen, bitki büyümesini bir dereceye kadar geliştirebileceğini gösteren birkaç rapor bulunmaktadır. Bu çalışmaların bazıları TiO₂ nanopartiküller (Ti-NP'leri) ve karbon nanotüpler (CNT'ler)'dir (Yang ve ark., 2007).

1.6. Nanopartiküler Titanyum Dioksit İçeren Gübreler

Bitkilere mutlak gerekli veya bazı bitkilere yararlı besin elementleri arasında titanyum yoktur. Diğer bir ifade ile titanyum bitki beslemede olmazsa olmaz bir besin maddesi değildir. Çoğu toprakta genellikle %0,1-%0,9 arasında değişen yüksek Ti seviyeleri ve toprak çözeltilerinde ortalama 0,03 mg Ti L⁻¹ bulunur (Kabata-Pendias ve Pendias, 1984). Ancak, Ti-NP uygulamasının (güneş ışığına maruz kalma üzerine) bitki-fotosentezinin etkinliğini artırabileceğini; bitki-enzim aktivitesini arttırabileceği ve havada N₂'nin kimyasal olarak fiksasyonu ile bitkilere daha fazla N besin sağlayan bitki büyümesini dolaylı olarak arttırabileceğine ilişkin bulgular vardır (Yang ve ark., 2007; Gao ve ark., 2008; Su ve ark., 2009).

Örneğin, Yang ve ark. (2007) ıspanak (*Spinacia oleracea*) tohumlarını 2.5 g Ti-NP L⁻¹ solüsyonunda 2 gün süreyle ıslatmışlar ve bunları inert bir büyüme ortamında ekmişlerdir. Çözelti, daha sonra çimlendirilmiş fidanlar üzerinde 35 gün boyunca haftada bir kez bir serada yapraklara püskürtülmüştür. Sonuçlar, bitkilerin taze ve kuru ağırlıklarının, kontrollere oranla (TiO₂ olmadan veya toplu TiO₂ muamelesi ile) yaklaşık 2 kat fazla olduğunu göstermiştir. Yapraklardaki toplam N, klorofil ve protein içerikleri sırasıyla %23, %34 ve %13 artış göstermiştir.

Gao ve ark. (2008) tarafından yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar gözlemlenmiştir. Uygulamalar on kat daha düşük 0.3 g Ti-NP L⁻¹ konsantrasyonunda gerçekleştirilmiştir. Song ve ark. (2012), 7 günlük bir sürede 0.5 g L⁻¹ Ti-NP'lerin fasulye (*Lemna minor*)'nin uzamasını 2,5 kattan fazla ve taze ağırlığı da 2 kat arttırdığını bildirmişlerdir. Benzer şekilde düşük konsantrasyonlarda bir SiO₂ ve TiO₂ NP'ler karışımı, soya fasulyesinin rizosferinde nitrat redüktaz aktivitesini arttırdığı ve dolayısıyla soya fasulyesinin çimlenmesi ve büyümesini hızlandırdığını bildirmişlerdir (Lu ve ark., 2002). TiO₂-NP, morötesi ışın altında etkili bir foto-katalizör olup, organik bileşiklerin ayrışması ve güneş enerjisi kullanılarak bir yakıt olarak H₂ üretimi de dahil olmak üzere, fotokatalitik uygulamalar için kapsamlı olarak incelenmiştir (Gupta ve Tripathi, 2011). Uygun konsantrasyonlarda Ti-NP'lerin yapraktan uygulanmasının, bitki fotosentezinin ve ilgili fizyolojik etkinliklerini arttırarak bitki büyümesini teşvik edebileceği ortaya konmuştur. Bununla birlikte, bitki büyümesinin iyileştirilmesinde Ti-NP'lerin saf kimyasal reaksiyonlarının (foto-kataliz) bitkinin biyokimyasal süreçleri ile nasıl koordine olduğunu veya olmadığını gösteren ayrıntılı çalışmalar veya kanıtlara ihtiyaç vardır. Tohum çimlenmesi üzerine de Ti-NP'lerin negatif etkileri bildirilmiştir (Castiglione ve ark., 2011).

1.7. Nanopartiküler Boyutta Kapsüllenmiş Karbon Materyalleri (CNT)

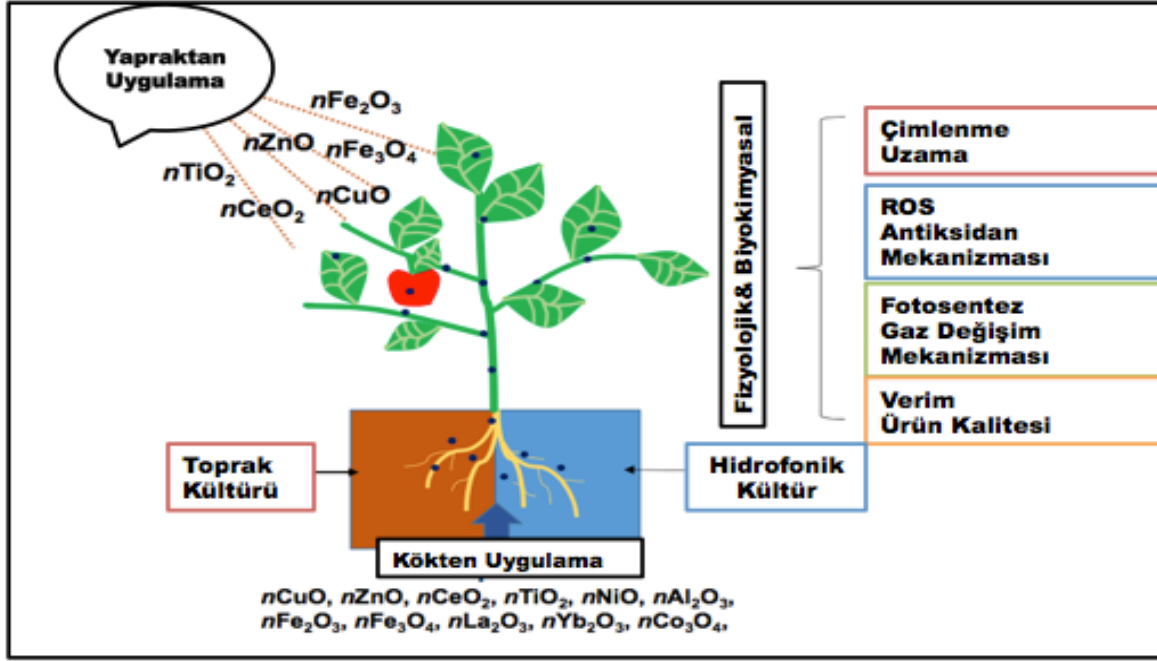
Yapılan bazı çalışmalarda düşük dozlarda CNT'lerin tohum çimlenmesi ve bitki büyümesini uyurabileceği belirtilmiştir. Lin ve Xing (2007), 2 g L⁻¹ olacak şekilde çok katmanlı CNT'lerin uygulamasının mısırın çimlendirilmiş tohumlarının 5 günlük inkübasyonu ile kök uzunluğunu kontrole kıyasla arttırdığını bildirmişlerdir. Ancak, turp, marul veya salatalık tohumlarında hiçbir olumlu sonuç alınmazken benzer şekilde, çimlenmiş soğan (*Allium cepa*) ve hıyar (*Cucumis sativus*) tohumlarının kök büyümesi, 48 saatlik bir inkübasyon süresince 0.16, 0.9 ve 5 g L⁻¹'de (Canas ve ark., 2008) tek duvarlı CNT'lere maruz bırakılması sonucu arttırdığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, aynı koşullar altında, CNT'ler lahana tohumları (*Brassica oleracea*) veya havuç (*Daucus sativus*) üzerinde önemsiz etkilere sahipken çimlendirilmiş domates tohumlarının kök gelişimini engellediği bildirilmiştir. Daha yakın zamanlarda, her iki tip CNT'nin de tohum çimlenme yüzdesini arttırdığı domates, soya fasulyesi ve mısırın fide büyümesini arttırdığını bildirmişlerdir (Khodakovskaya ve ark., 2013; Lahiani ve ark., 2013; Villagarcia ve ark., 2012). Örneğin, Khodakovskaya ve ark. (2013) tarafından yapılan bir çalışmada, suya ve aktif karbon uygulamasına karşılık gelen kontrollere tabi tutulanların her ikisine kıyasla, 50 mg L⁻¹ CNT'lerin uygulanmasının domates verimini iki kat arttırdığını bildirmişlerdir. Yazarlar, domates bitkilerinde su kanal proteinlerinin ekspresyonunu ve büyümesini hızlandırmak (Hodakovskaya ve ark., 2013; Villagarcia ve ark., 2012), dolayısıyla bitki su alımını ve kullanım verimliliğini arttırmak için, CNT kullanılmasını önermişlerdir. CNT'lerin bitkiler üzerindeki büyüme uyarıcı işlev görmesi konusunda önemli ve umut verici bir yaklaşım olduğu bildirilmiştir. Bu CNT'lerin soya fasulyesi ve mısır gibi önemli bazı tarla bitkilerinin verimleri üzerindeki etkilerini incelemek için daha fazla alan araştırması yapılması gerekmektedir (Khodakovskaya ve ark., 2013).

Genel olarak bakacak olursak, bitkilerde tek duvarlı karbon nanotüpler (SWCNT'ler) ve çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT'ler) bitkinin çeşitli fizyoloji ve biyokimyasını etkiler. Tek duvarlı karbon nanotüpleri (SWCNT'ler), kök gelişimini bitkinin türüne bağımlı olacak bir şekilde etkiler (Canas ve ark., 2008). Khodakovskaya ve ark. (2013) tarafından yapılan bir çalışmada, karbon bazlı tüm nanopartiküllerin, bitki genlerinin ekspresyon düzeyini potansiyel olarak değiştirebileceğine işaret etmiştir. Örneğin, SWCNT'ler domateslerde stres tepkilerine katılan genlerin ekspresyonunu etkiler, bu da bitki gelişimini kontrol etmek için kontrol edilebilir bir özelliktir (Lahiani ve ark., 2015). Karbon tabanlı NM'ler tarafından indüklenen mısır (*Zea mays*) hücre duvar matrisinde katyonik değişim biyokimyasal değişiklikler gibi bazı iyonlarda redoks modifikasyonlarını etkiler (Tiwari ve ark., 2014).

1.8. Nanopartiküler Besin Elementlerinin Bitki Bünyesine Alınımı ve Kullanım Alanları

Bitki sistemlerinde nanopartiküler olmayan besin elementleri gibi, NP'lerin alınması ve taşınması için de iki doğrulanmış yol vardır: kökten yaprak-meyvelere veya yapraktan-köklere doğru taşınmadır (Ma ve ark., 2015a). Şekil 2'de gösterildiği gibi, bir taraftan, kökten yaprak-meyve yoluna yapılan çalışmalar, hidrofonik (Hernandez-Viezcas ve ark., 2016) ya da toprak kültürü (Rico ve ark., 2015a) yöntemleri yoluyla gerçekleştirilir ve bildirilen NP'lerin translokasyonu fideler (Servin ve ark., 2012) veya olgun yumrularından başlar (Ghodake ve ark., 2011). Yapılan bazı çalışmalarda, NP'lerin apoplastik yollarla kökün endodermisi tarafından absorbe edilebileceğini ve daha sonra simplastik yollarla vasküler silindire transfer edilebileceğini göstermektedir (Zhao ve ark., 2012b).

NP'lerin bitki kökünden, yaprağa veya meyveye yer değiştirmesi, ksilem veya filoem yoluyla oluşabilir (Hernandez-Viezcas ve ark., 2013; Servin ve ark., 2013; Zhao ve ark., 2014). Öte yandan, yapraktan köke doğru olan yollar, NP'lerin stoma yoluyla nüfuz etmesini veya NP'lerin sıkışmasını kapsar ve saplara yeniden dağılır (Hong ve ark., 2014; Larue ve ark., 2014). NP'lerin bitkiye alınımında, her iki yolda araştırmacılar tarafından fizyolojik parametreler (çimlenme oranı, uzama ve su içeriği gibi), antioksidan aktiviteleri (enzimler, H₂O₂ seviyesi ve lipid peroksidasyonu gibi), tarımsal parametreleri mikro-makro element değerleri, gıda kalitesi ve fotosentetik parametreler (klorofil içeriği, kloroplast sayısı ve fotosentetik oran gibi) olarak değerlendirilmiş ve farklılıklar gözlemlenmiştir.

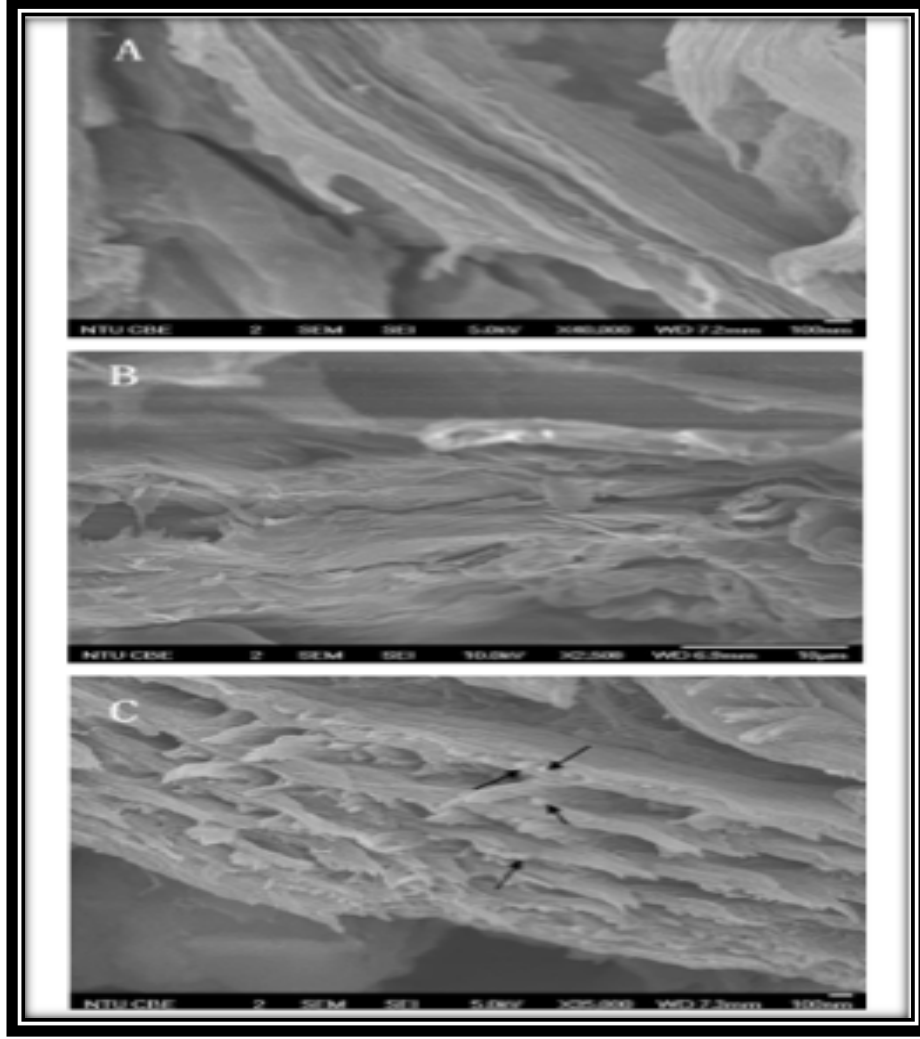


Şekil 2. Farklı ortam ve uygulamaların nanopartiküllerin taşınımı konusunda bitkinin fiziksel ve biyokimyasal içerikleri üzerine etkisi (Zhao ve ark., 2012b).

NP'lerin bitki dokularındaki birikimi hakkında, iletim elektron mikroskopisi (TEM) (Du ve ark., 2011), taramalı elektron mikroskopisi-SEM (Bandyopadhyay ve ark., 2015), konfokal mikroskopi (Xanes) yakınında X-ışını emilimi (Hernandez-Viezcas ve ark., 2012b), iki foton uyarım mikroskobu (Wild ve Jones, 2009), mX-ışını flüoresansı (Servin ve ark., 2013) ve uzatılmış X-ışını emme ince yapısı (Lv ve ark., 2015) ve diğer teknikler kullanılarak bilgiler vermişlerdir.

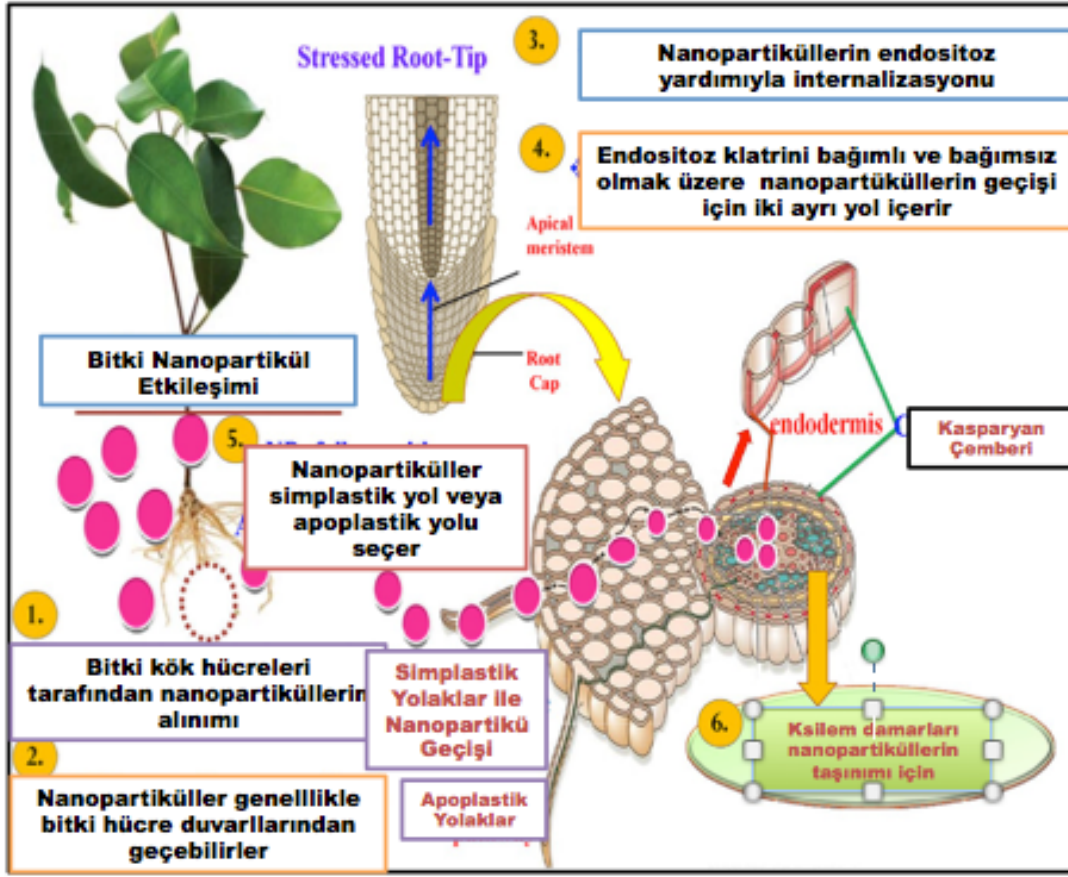
Şekil 3' de görüldüğü gibi sonuçlar, ZnO-NP'ler topraktaki inkübasyondan bir saatlik periyot boyunca nano-formda tespit edilmemiştir. Nano-ZnO ve nano-CuO nano-partiküllerinin formunu muhafaza etmek yerine çözünür tuzlara biyotransformasyon yaptığını göstermiştir. Börülce (*Vigna unguiculata*) (Wang ve ark., 2013a), buğday (*Triticum aestivum*) soya fasulyesi (*Glisin max*) (Hernandez-Viezcas ve ark., 2013) ve mısır (*Zea mays*) dokuları ile (Lv ve ark., 2015) benzer bir etki gözlemlenmiştir.

Bitkilerle temas halinde olan nanopartiküller Şekil 4'deki gibi kök epidermisinin hücre duvarına ve hücre zarına nüfuz eder. Bitki vasküler demetine (ksilem) girmek için karmaşık bir olaylar dizisiyle stelize yapraklara translokasyon yapmak üzere simplastığe geçer. Bununla birlikte, bozulmamış hücre zarını geçmek için NP, hücre zarındaki gözeneklerle hareket eder ve bu da, nanomateryalin alınımının boyuta özel olduğunu gösterir (Ma ve ark., 2010a, 2010b; Rico ve ark., 2011). NP'ler stele ulaşmadan önce endodermis apoplastı yoluyla pasif olarak entegre edilir .



Şekil 3. *S. tabernaemontani* kök yüzeyindeki ZnO NP'ler, Zn²⁺ iyon birikiminin SEM görüntüleri (A) kontrol; (B) 1.000 mg Zn²⁺ L⁻¹ ve (C) 1.000 mg ZnO NP'ler L⁻¹ (Bandyopadhyay ve ark., 2015).

Ksilem, nanopartiküllerin dağılımı ve translokasyonunda en önemli araçtır. NP'lerin alım mekanizması, genel olarak, sinyal verme, geri dönüşüm ve plazma zarının regülasyonu gibi birkaç hücresel işlemi içeren bir aktif aktarım mekanizması olarak düşünülür. Birçok çalışmada, bitki hücre duvarının yalnızca seçilen nano parçacıkların gözeneklerden geçmesini kolaylaştıran yarı geçirgen bir bariyer gibi davrandığı gözlenmiştir (Lin ve ark., 2009a-2009b; Chen ve ark., 2003). Nanopartikülün hücre içine girişi, hücre süspansiyonu ortamında farklılaşır. Burada, vakuoldaki endositoz, plazma zarından oluşan vesiküller yoluyla apoplast yoluyla olur (Chen ve ark., 2003). Örneğin, yonca (*Medicago sativa*) hücrelerinde, nanopartiküllerin (CdSe/ZnS) birikimi, özellikle sitoplazmada ve çekirdekte meydana gelir. Tohumda, nanopartiküller sıvı solüsyonun kotiledona difüzyonuna yardımcı olan parenkimal hücreler arası boşluklardan geçebilir (Van Dongen ve ark., 2003; Lee ve ark., 2010; Ma ve ark., 2010a,b). Lee ve ark. (2010), SiO₂NP'lerin ve Al₂O₃NP'lerin Fare Kulağı Teresi'nin (*Arabidopsis thaliana*) çimlenmesini ve büyümesini etkilemediğini, ZnONP'lerin çimlenmesini engellediğini öne sürmüşlerdir. Çekirdekte, nanoparçacıkların girişini düzenleyen başka bir yapı akuaporin varlığı gözlemlenmiştir (Khodakovskaya ve ark., 2009). Hidroelektrik iletkenlik farkı, hücre duvarı gözenek boyutu vb. gibi bitki türleri arasındaki çeşitli fiziko-kimyasal değişimler, nanoparçacıkların taşınması ve birikimine etki edebilir. Son zamanlarda, molekül/iyon toplama ve translokasyon kinetiğinin anlaşılmasında çok ilerleme kaydedilmiş ve üretilen NP'lerin bu toplama, translokasyon ve aglomerasyon kinetiğini izlemek için genişletilebilmiştir. NM'lerin alımının ve translokasyonunun şekil, boyut ve kompozisyona bağlı olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Kökleri vasıtasıyla nanopartiküllerin bitki bünyesine alım süresince oluşan akış şeması (Ma ve ark., 2010a).

1.9. Farklı Dozlarda Uygulanan Nanomateryallerin Bitkiler Üzerinde Kritik Toksik Etkileri

Raliya ve ark. (2015), ZnO (<50 nm) nanopartiküllerini domates bitkisine 10, 100, 250, 500, 750, 1.000 mg L⁻¹ olacak şekilde topraktan uygulama yapmışlar, 66 gün süren deneme sonucunda 750 mg L⁻¹'ye kadar olan dozlarda çimlenme, kök gelişimi ve toprak üstü aksamalarının gelişiminin kontrole göre arttığını gözlemlemişlerdir. Fakat 1.000 mg L⁻¹'de kök gelişimi, çimlenme ve toprak üstü aksamaların gelişiminin kontrole göre olumsuz etkilendiğini bildirmişlerdir.

Mukherjee ve ark. (2014), ZnO (<10 nm) nanopartiküllerini 125, 250, 500 mg L⁻¹ olacak şekilde yeşil bezelyeye topraktan uygulayarak 25 günlük süre sonucunda 500 mg L⁻¹ uygulamasının klorofil içeriğini %77 oranında azalttığını gözlemlemişlerdir.

Lee ve ark. (2013a), ZnO (<50 nm) ve CuO nanopartikülleri karışımını 50, 500, 2.000, 4.000 mg L⁻¹ olacak şekilde karabuğday köklerine uygulamış, 7 günlük süre sonucunda 2.000 ve 4.000 mg L⁻¹ uygulamasının kök uzunluğunu ve biyokütlesini azalttığını gözlemlemişlerdir.

Servin ve ark. (2013), TiO₂ (< 27 nm) nanopartikülleri 250, 500, 750 mg L⁻¹ olacak şekilde bibere topraktan uygulamışlar ve 90 günlük sürede CAT aktivitesinin arttığını, 500 mg L⁻¹ uygulamasının APX aktivitesini azalttığını gözlemlemiştir.

2. Sonuç ve Öneriler

Bitkiler için öneme sahip olan bitki besin elementlerinin bitkilerce alımın formlarının nanomateryal şeklinde uygulanması ile bitkinin ihtiyacı olan besin elementlerinden maksimum düzeyde istifade edebileceği öngörülmektedir. Nanomalzemelerin geniş spesifik yüzey alanları sayesinde toprak kolloidleri tarafından tutunma potansiyelleri artarak, yıkanıp uzaklaşma riskinin de düşürüleceği öngörülmektedir. En önemli faktörlerden biri de konvansiyonel gübrelerin maliyeti ve aşırı dozda uygulanması çevresel risk potansiyeli oluşturmaktadır. Fakat nanomateryallerin bu gübrelere göre daha

düşük miktarda kullanımları ile hem maliyetlerin düşmesine hem de risk etmenlerinin minimize edilmesine neden olacaktır. Nanomalzemeler içerisine kapsüllenmiş elementler bitkiye direk kayba maruz kalmadan ulaşacaktır.

Tüm bu bilgilerin ışığında günümüz teknolojisinden faydalanarak doğru ve ilkeli modelleri tarıma entegre etmek biz bilim insanlarının en büyük sorumluluğudur. Bu derleme makale henüz bakir olan bu alanda çalışmak isteyen ve çalışmış olan bilim insanlarına ışık tutacak ve düşünce altyapısı oluşturacak potansiyele sahiptir.

Kaynakça

- Ahmad M.A., Nida S., Monther M. T., (2019). Effect of Nano Technology in Combination with Soil Solarization to Control Panama Disease of Banana in Jordan Valley. *Yüz.Yıl Üni.Tar. Bil. Der.* 29 / (Mayıs 2019): 16-23 . <https://doi.org/10.29133/yyutbd.466531>.
- Bandyopadhyay, S., Plascencia-Villa, G., Mukherjee, A., Rico, C.M., Jose -Yacama n, M., Peralta-Videa, J.R., & Gardea-Torresdey, J.L. (2015). Comparative phytotoxicity of ZnO NPs, bulk ZnO, and ionic zinc onto the alfalfa plants symbiotically associated with *Sinorhizobium meliloti* in soil. *Sci. Total Environ.*, 515-516, 60-69.
- Batsmanova, L.M, Taran, N.Y., Gonchar, O.M., Lopatko, K.G.,, Patyka, M.V., & Volkogon, M.V. (2014). The effect of colloidal solution of molybdenum nanoparticles on the microbial composition in rhizosphere of *Cicer arietinum* L. *Nanoscale Res. Lett.*9, 289.
- Batsmanova, L.M., Gonchar, L.M., Taran, N.Y., & Okaneneko, A.A. (2013). *Using a colloidal solution of metal nanoparticles as micronutrient fertilizer for cereals*. Proceedings of the International Conference Nanomaterials: Applications and Properties.
- Castiglione, M.R., Giorgetti, L., Geri, C., & Cremonini, R. (2011). The effects of nano-TiO₂ on seed germination, development and mitosis of root tip cells of *Vicia narbonensis* L. and *Zea mays* L. *J. Nanoparticle Res.* 13, 2443–2449.
- Chen, W.S. (1991). Changes in cytokinins before and during early flower bud differentiation in lychee (*Litchi chinensis* Sonn.). *Plant Physiology*, 96, 1203- 1206.
- Dağhan, H. (2017). Nano-Gübreler. *Turk J Agric Res.*, 4(2), 197-203
- Delfani, M., Firouzabadi, M.B., Farrokhi, N., & Makarian, H. (2014). Some physiological responses of black-eyed pea to iron and magnesium nanofertilizers. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 45, 530–540.
- Du, W.C., Sun, Y.Y., Ji, R., Zhu, J.G., Wu, J.C., & Guo, H.Y. (2011). TiO₂ and ZnO nanoparticles negatively affect wheat growth and soil enzyme activities in agricultural soil. *J. Environ. Monit.* 13 (4), 822-828.
- Gao, F., Liu, C., Qu, C., Zheng, L., Yang, F., Su, M., et al. (2008). Was improvement of spinach growth by nano-TiO₂ treatment related to the changes of Rubisco activase? *Biometals* 21, 211–217.
- Ghafariyan, M.H., Malakouti, M.J., Dadpour, M.R., Stroeve, P., & Mahmoudi, M. (2013). Effects of magnetite nanoparticles on soybean chlorophyll. *Environ. Sci. Technol.* 47, 10645–10652.
- Ghodake, G., Seo, Y.D., & Lee, D.S. (2011). Hazardous phytotoxic nature of cobalt and zinc oxide nanoparticles assessed using *Allium cepa*. *J. Hazard. Mater.* 186, 952-955.
- Güneş, A., Alpaslan, M., & İnal, A., (2007). *Bitki Besleme ve Gübreleme*. Ankara Üniv., Ziraat Fak. Ders Kitabı, Ankara Üniv. Basımevi, Ankara.
- Gupta, S.M., & Tripathi, M. (2011). A review of TiO₂ nanoparticles. *Chin. Sci. Bull.* 56, 1639–1657.
- Hernandez-Viezcas, J.A., Castillo-Michel, H., Andrews, J.C., Cotte, M., Rico, C., Peralta- Videa, J.R. & Gardea-Torresdey, J.L. (2013). In situ synchrotron X-ray fluorescence mapping and speciation of CeO₂ and ZnO nanoparticles in soil cultivated soy- bean (*Glycine max*). *ACS Nano* 7, 1415-1423.
- Hershey, D.R., Paul, J.L., & Carlson, R.M., (1980). Evaluation of potassium-enriched clinoptilolite as a potassium source for potting media. *HortSci.* 15, 87–89.
- Hong, J., Peralta-Videa, J.R., Rico, C., Sahi, S., Viveros, M.N., Bartonjo, J., Zhao, L.J., & Gardea-Torresdey, J.L. (2014). Evidence of translocation and physiological impacts of foliar applied CeO₂ nanoparticles on cucumber (*Cucumis sativus*) plants. *Environ. Sci. Technol.* 48, 4376-4385.

- Khodakovskaya, M.V., de Silva, K., Nedosekin, D.A., Dervishi, E., Biris, A.S., Shashkov, E.V., Galanzha, E.I., & Zharov, V.P. (2011). Complex genetic, photothermal, and photoacoustic analysis of nanoparticle-plant interactions. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 108 (3), 1028-1033.
- Lahiani, M.H., Chen, J., Irin, F., Poretzky, A.A., Green, M.J. & Khodakovskaya, M.V. (2015). Interaction of carbon nanohorns with plants: uptake and biological effects. *Carbon* 81, 607e619.
- Lee, W., An, Y., Yoon, H., & Kweon, H. (2008). Toxicity and bioavailability of copper nanoparticles to the terrestrial plants mung bean (*Phaseolus radiatus*) and wheat (*Triticum aestivum*): plant agar test for water-insoluble nanoparticles. *Environ. Toxicol. Chem.* 27, 1915–1921.
- Lin, D., & Xing, B. (2007). Phytotoxicity of nanoparticles: inhibition of seed germination and root growth. *Environ. Pollut.* 150, 243–250.
- Lin, D., & Xing, B. (2008). Root uptake and phytotoxicity of ZnO nanoparticles. *Environ. Sci. Technol.* 42, 5580–5585.
- Liu, R., & Lal, R., 2014. Synthetic apatite nanoparticles as a phosphorus fertilizer for soybean (*Glycine max*). *Sci. Rep.* 4, 5686–5691.
- Liu, R., Zhang, H., & Lal, R. (2016). Effects of stabilized nanoparticles of copper, zinc, manganese, and iron oxides in low concentrations on lettuce (*Lactuca sativa*) seed germination: nanotoxicants or nanonutrients? *Water Air Soil Pollut.*, 227, 42.
- Liu, X., Zhang, D., Zhang, S., He, X., Wang, Y., Feng, Z., et al. (2005). Responses of peanut to nanocalcium carbonate. *J. Plant. Nutr. Fert. (Chin.)* 11, 385–389.
- Liu, Y., Laks, P., & Heiden, P. (2002). Controlled release of biocides in solid wood. I. Efficacy against brown rot wood decay fungus (*Gloeophyllum trabeum*). *J. Appl. Polym. Sci.* 86, 596–607.
- Lopez-Moreno, Hernandez-Viezcas, J.A., Castillo-Michel, H.A., M., Peralta-Videa, J.R., & Gardea-Torresdey, J.L. (2016). Interactions between CeO₂ nanoparticles and the desert plant mesquite: a spectroscopy approach. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 4 (3), 1187-1192.
- Lv, J., Zhang, S., Luo, L., Zhang, J., Yang, K., Christie, P. (2015). Accumulation, speciation and uptake pathway of ZnO nanoparticles in maize. *Environ. Sci. Nano* 2, 68-77.
- Ma, C.X., White, J.C., Dhankher, O.P., & Xing, B. (2015a). Metal-based nanotoxicity and detoxification pathways in higher plants. *Environ. Sci. Technol.* 49 (12), 7109-7122.
- MacKown, C.T. & Tucker, T.C. (1985). Ammonium nitrogen movement in a coarse-textured soil amended with zeolite. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49, 235–238.
- Mahajan, P., Dhoke, S.K. & Khanna, A.S. (2011). *Effect of Nano-Zno Particle Suspension on Growth of Mung (Vigna radiata) and Gram (Cicer arietinum) Seedlings Using Plant Agar Method.* *J. Nanotechnol.* 7 pp (Article ID 696535).
- Malekian, R., Abedi-Koupai, J., & Eslamian, S.S. (2011). Influences of clinoptilolite and surfactant-modified clinoptilolite zeolite on nitrate leaching and plant growth. *J. Hazard. Mater.*, 185: 970–976.
- Ming, D.W., & Allen, E.R. (2001). *Use of Natural Zeolites in Agronomy, Horticulture, and Environmental Soil Remediation.* In: Bish, D.L., Ming, D.W. (Eds.), *Natural Zeolites: Occurrence, Properties, Applications* vol. 45. Mineralogical Soc. Am., Chantilly, pp. 619–654.
- Mukherjee, A., Peralta-Videa, J.R., Bandyopadhyay, S., Rico, C.M., Zhao, L., & Gardea-Torresdey, J.L., (2014). Physiological effects of nanoparticulate ZnO in green peas (*Pisum sativum* L.) cultivated in soil. *Metallomics* 6, 132-138.
- Mukherjee, A., Sinha, I., & Das, R. (2015). *Application of nanotechnology in agriculture: Future prospects.* Outstanding Young Chemical Engineers (OYCE) Conference, March 13-14, *DJ Sanghvi College of Engineering*, Mumbai, India.
- Musante, C. & White, J.C. (2012). Toxicity of silver and copper to *Cucurbita pepo*: differential effects of nano and bulk-size particles. *Environ. Toxicol.* 27, 510–517.
- Naderi, M., Danesh Shahraki, A.A., & Naderi, R. (2011). Application of nanotechnology in the optimization of formulation of chemical fertilizers. *Iran J. Nanotech.* 12, 16–23.
- Nair, R., Varghese, S.H., Nair, B.G., Maekawa, T., Yoshida, Y. & Kumar, D.S. (2010). Nanoparticulate material delivery to plants. *Plant Sci.* 179, 154–163.
- Nekrasova, G.F., Ushakova, O.S., Ermakov, A.E., Uimin, M.A. & Byzov, I.V. (2011). Effects of copper(II) ions and copper oxide nanoparticles on *Elodea densa* Planch. *Russ. J. Ecol.* 42, 458–463.

- Pradhan, S., Patra, P., Das, S., Chandra, S., Mitra, S., Dey-Kumar, K., Akbar, S., Palit, P. & Goswami, A. (2013). Photochemical Modulation of Biosafe Manganese Nanoparticles on *Vigna radiata*: A Detailed Molecular, Biochemical, and Biophysical Study. *Environ. Sci. Technol.* 47(22) 13122-13131
- Raikova, O.P., Panichkin, L.A., & Raikova, N.N. (2006). *Studies on the Effect of Ultrafine Metal Powders Produced by Different Methods on Plant Growth and Development*. Nanotechnologies and Information Technologies in the 21st Century. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, 108–111.
- Raliya, R., Nair, R., Chavalmane, S., Wang, W.N., & Biswas, P. (2015). Mechanistic evaluation of translocation and physiological impact of titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles on the tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plant. *Metallomics* 7, 1584e1594.
- Reynolds, G.H. (2002). Forward to the future nanotechnology and regulatory policy. *Pac. Res. Inst.* 24, 1–23.
- 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. *J. Agric. Food Chem.* 59, 3485-3498.
- Rico, C.M., Peralta-Videa, J.R., Gardea-Torresdey, J.L., 2015b. Chemistry, biochemistry of nanoparticles, and their role in antioxidant defense system in plants. *Nanotechnol. Plant Sci.* 1-17. Springer International Publishing.
- Roco, M.C. (2003). Nanotechnology: convergence with modern biology and medicine. *Curr. Opin. Biotechnol.* 14, 337e346.
- Scott, N., & Chen, H. (2003). Nanoscale Science and Engineering for Agriculture and Food Systems. A Report Submitted to Cooperative State Research, Education and Extension Service. USDA. National Planing Workshop, Washington.
- Selivanov, V.N., Zorin, E.V., 2001. Sustained Action of ultrafine metal powders on seeds of grain crops. *Perspekt. Materialy* 4, 66–69.
- Servin, A., Elmer, W., Mukherjee, A., De La TorreRoche, R., Hamdi, H., White, J.C., Bindraban, P., & Dimkpa, C. (2015). A review of the use of engineered nanomaterials to suppress plant disease and enhance crop yield. *Journal of Nanoparticle Research*, 17, 92-113.
- Servin, A.D., Morales, M.I., Castillo-Michel, H., Hernandez-Viezcas, J.A., Munoz, B., Zhao, L.J., Nunez, J.E., Peralta-Videa, J.R. & Gardea-Torresdey, J.L. (2013). Synchrotron verification of TiO₂ accumulation in cucumber fruit: a possible pathway of TiO₂ nanoparticle transfer from soil into the food chain. *Environ. Sci. Technol.* 47 (20), 11592e11598.
- Shah, V., & Belozeroval, I. (2009). Influence of metal nanoparticles on the soil microbial community and germination of lettuce seeds. *Water Air Soil Pollut.* 197, 143–148.
- Singh, M.D., Chirag, G., Prakash, P.O., Mohan, M.H., Prakasha, G., & Vishwajith, (2017). Nano fertilizers is anew way to increase nutrients use efficiency in crop production. *International Journal of Agriculture Sciences*, 9(7), 3831-3833.
- Sohrab, D., Tehranifara, A., Davarynejada, G., Abadifab, J., Khorasani, R., Effects of foliar applications of zinc and boron nano-fertilizers on pomegranate (*Punica granatum* cv. Ardestani) fruit yield and quality. *Scientia Horticulturae*, 210 (2016), 57–64
- Song, G., Gao, Y., Wu, H., Hou, W., Zhang, C., & Ma, H. (2012). Physiological effect of anatase TiO₂ nanoparticles on *Lemna minor*. *Environ. Toxicol. Chem.* 31, 2147–2152.
- Stampoulis, D., Sinha, S.K., White, J.C. (2009). Assay-dependent phytotoxicity of nanoparticles to plants. *Environ. Sci. Technol.* 43, 9473–9479.
- Su, M., Liu, H., Liu, C., Qu, C., Zheng, L., & Hong, F. (2009). Promotion of nano-anatase TiO₂ on the spectral responses and photochemical activities of D1/D2/Cyt b559 complex of spinach. *Spectrochim. Acta A* 72, 1112–1116.
- Subramanian, K.S., Manikandan, A., Thirunavukkarasu, M., & Sharmila Rahale, C. (2015). *Nano-Fertilizers for Balanced Crop Nutrition*. In: Rai, M., Ribeiro, C., Mattoso, L., Duran, N. (Eds.), *Nanotechnologies in Food and Agriculture*. Springer Int. Publishing, Switzerland, pp. 69–80.
- Tiwari, D.K., Dasgupta-Schubert, N., Villasenor-Cendejas, L.M., Villegas, J., Carreto-Montoya, L., Borjas-Garcia, S.E. (2014). Interfacing carbon nanotubes (CNT) with plants: enhancement of growth, water and ionic nutrient uptake in maize (*Zea mays*) and implications for nanoagriculture. *Appl. Nanosci.* (4), 577-591.

- Wang, P., Menzies, N.W., Lombi, E., McKenna, B.A., Johannessen, B., Glover, C.J., Kappen, P., Kopittke, P.M. (2013a). Fate of ZnO nanoparticles in soils and cowpea (*Vigna unguiculata*). *Environ. Sci. Technol.* 47, 13822e13830.
- Wiesner, M.R., Lowry, G.V., Alvarez, P., Dionysion, D. & Biswas, P. (2006). Assessing the risks of manufactured nanomaterials. *Environ. Sci. Technol.* 40, 4336–4345.
- Wild, E., & Jones, K.C. (2009). Novel method for the direct visualization of in vivo nanomaterials and chemical interactions in plants. *Environ. Sci. Technol.* 43, 5290-5294.
- Yang, F., Liu, C., Gao, F., Su, M., Wu, X., Zheng, L., et al. (2007). The improvement of spinach growth by nano-anatase TiO₂ treatment is related to nitrogen photoreduction. *Biol. Trace Elem. Res.* 119, 77–88.
- Zhao, L., Peralta-Videa, J.R., Rico, C.M., Hernandez-Viezcas, J.A., Sun, Y., Niu, G., et al. (2014). CeO₂ and ZnO nanoparticles change the nutritional qualities of cucumber (*Cucumis sativus*). *J. Agric. Food Chem.* 62, 2752–2759.
- Zhao, L.J., Peralta-Videa, J.R., Ren, M., Varela-Ramirez, A., Li, C., Hernandez- Viezcas, J.A., Aguilera, R.J. & Gardea-Torresdeya, J.L., (2012b.) Transport of Zn in a sandy loam soil treated with ZnO NPs and uptake by corn plants: electron microprobe and confocal microscopy studies. *Chem. Eng. J.* 184, 1-8.