

Derleme

**NANOTEKNOLOJİNİN TEMELİ NANOPARTİKÜLLER VE
NANOPARTİKÜLLERİN FİTOREMEDİASYONU**

Esra ÜÇÜNCÜ TUNCA¹

¹ *Dolunay mah. Fikir sok. Fatsa/ORDU*

ÖZET

Nanoteknolojik gelişmeler, günümüzde nanopartiküllerin ortamdaki konsantrasyonlarının hızla artmasına sebep olmaktadır. İnsan sağlığı veya çevre üzerindeki etkileri hakkında yeterli bilgi olmayan bu materyallerin ortamlardaki tespiti ve remediasyonu büyük önem taşımaktadır. Pek çok fiziksel, kimyasal ya da biyolojik yöntemle sentezlenebilen nanopartiküllerin ortamlardan gideriminde, çevre dostu ve ucuz bir yöntem olan fitoremediasyon yöntemi kullanılabilir. Bu derleme çalışması ile nanopartiküllerin fitoremediasyonu ile ilgili güncel gelişmeler incelenmiş, ciddi literatür eksiğinin bulunduğu bu konuda yapılacak yeni çalışmaların önemi vurgulanmak istenmiştir.

Anahtar kelimeler: Uzaklaştırma, nanopartikül, remediasyon, absorsiyon

Eserin kısa başlığı: Nanopartikül Fitoremediasyonu

**NANOPARTICLES AS THE BASE OF NANOTECHNOLOGY AND
PHYTOREMEDIATION OF NANOPARTICLES**

ABSTRACT

Nowadays nano-technological development has caused to a rapid increase of the concentration of nanoparticles in the environment. There is not enough information about the effects of nanoparticles on human health and the environment. So it's of great importance to identify and remediation of the nanomaterials in the environment. Nanoparticles can be synthesized by many biological, chemical and physical methods. Phytoremediation methods can be used in the removal of nanoparticles. Phytoremediation is environmentally friendly and inexpensive way to removal. With this review current developments relating to the phytoremediation of nanoparticles were studied and emphasized to the importance of new studies about this issue which has serious literature lacking.

Keywords: removal, nanoparticle, remediation, absorption

* esra.ucuncu@gmail.com

GİRİŞ

Günümüzde nanoteknolojik gelişmeler oldukça popüler olup, bilimsel araştırmalar için yeni bir alan oluşturmaktadır. Nanoteknolojik uygulamaların artışıyla birlikte nanomateryaller, pek çok tüketici ürünü için kullanılmaya başlanmıştır [1]. Nanomateryaller, yüksek yüzey-hacim oranı ile ilişkili eşsiz özellikleri sebebiyle önem taşımakta olup, katalizörler, ilaç sanayi, optik materyaller, sensörler, enerji depolama-transmisyonu da dahil olduğu pek çok alanda uygulamaları mevcuttur [2]. Bu materyallerin fonksiyonları ve kullanım alanları nanopartiküllerin (NP) boyutuna ve bileşimine göre farklılık göstermektedir [3]. Gümüş NP' leri (AgNP) ev aletlerinde [4], platinyum (Pt) NP'leri endüstride ve biyomedikal uygulamalarda [5], altın (Au) NP'ler sensör alanındaki çalışmalarda[6] kullanılabilir.

Kullanım alanlarının ve uygulamalarının artması; nanomateryallerin, çevre ile etkileşimlerinin önemli ölçüde artmasına sebebiyet vermektedir. Nanopartiküllerin yüksek yüzey-hacim oranı, elektronik yapı, ara yüzey reaktivitesi gibi belirgin derecede farklı fizikokimyasal özelliklerinin son derece farklı çevresel davranışlara ve etkilere sebep olabileceği düşünülmektedir [7]. Ayrıca, ekosistemdeki çeşitli komponentlerle olan direkt etkileşimde mühendislik nanopartiküllerin (ENP), kendileriyle birlikte bulunan kontaminantlarla çevredeki akıbetlerini ve taşınmalarını etkileyecek etkileşimlerde bulunabilecekleri düşünülmektedir [8]. Bu sebeple, çevreyle etkileşim içinde olan nanomateryallerin olası potansiyel negatif etkileri günümüzde önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir [1].

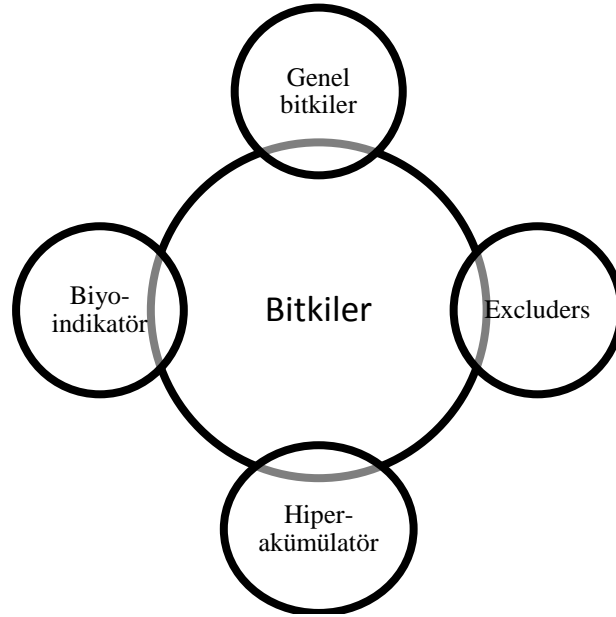
Ortamda bulunan kontaminantların uzaklaştırılması ekosistemlerin korunması açısından büyük önem taşımaktadır. Kontaminantların uzaklaştırılmasında fiziksel ve kimyasal pek çok yöntem mevcut olmakla birlikte, bu yöntemlere alternatif olarak geliştirilen bioremediasyon yöntemi diğer yöntemlere göre daha ucuz ve çevre dostu olması açısından büyük önem taşımaktadır. Kontaminantların biyolojik olarak uzaklaştırılması, taşınması anlamına gelen bioremediasyon yönteminde bitkiler sıklıkla kullanılmaktadır. Tüm ekosistemler için önemli bir bileşen olan bitkilerin; absorpsiyon ve biyolojik birikim özelliklerinden dolayı nanopartiküllerin taşınımında önemli rol oynayabilecekleri düşünülmektedir [9, 10].

Nanoteknolojik araştırma ve uygulamalar için yapılan yatırımlar günden güne artmakta ve bu durum nanopartiküllerin doğadaki konsantrasyon artışını da beraberinde getirmektedir. Yapılan bu derleme çalışmasında nanopartiküller ve fitoremediasyon hakkında bilgiler verilmiş, oldukça önem taşıyan bir konu haline gelen nanopartiküllerin fitoremediasyonu ile ilgili gelişmeler ve çalışmalar derlenmiştir. Çok az sayıda mevcut olan çalışmanın yetersizliği vurgulanarak bu konuyla ilgili yeni çalışmaların gerekliliği vurgulanmaya çalışılmıştır.

1. FİTOREMEDİASYON

Bioremediasyon, bir ortamda bulunan kontaminantların biyolojik yollarla uzaklaştırılması olarak tanımlanabilmektedir. Fitoremediasyon ise, ortamdaki kontaminantların bitkilerce uzaklaştırıldığı doğal bir yöntemdir. Bu yöntem nutrient ve kontaminantları uzaklaştırmada bitkilerin metabolik sistemlerini kullanmaktadır [1]

Pek çok bitkinin ortamdaki kontaminantları absorblayabildiği ve uzaklaştırabildiği bilinmektedir. Fitoremediasyon için en ideal bitkilerin, agresif bir metal ve besin akümülatörü olan ve daha fazla alana ulaşabilmeleri açısından geniş kök sistemine sahip olanlar olduğu düşünülmektedir [1]. Karasal bitkiler kontaminantlara daha çok kökleriyle, sucul bitkiler ise tüm yüzeyleriyle maruz kalabilmekte olup, metallerin birikimi tüm bitkiler için ağırlıklı olarak köklerde gerçekleşmektedir [11]. Fitoremediasyon başarısı, maruz kalınan kontaminant, bitkinin türü, kontaminanta maruz kalma süresi, ortam parametreleri ve kontaminantın konsantrasyonu gibi pek çok parametreye göre farklılık gösterebilmektedir. Bitkiler metal akümülayon kapasitelerine göre 4 sınıfta toplanabilmektedir [Şekil 1].



Şekil 1. Metal akümülayon kapasitelerine göre bitkiler

Genel bitkiler: Düşük metal depolama kapasitesine sahip bitkilerdir. Metal konsantrasyonun artışıyla birlikte artan toksik etki bu bitkilerin ölümüne sebebiyet verir.

Excluders (hariciler): Güçlü regülasyon sistemlerine sahip bitkilerdir. Genel bitkilere oranla daha yüksek seviyedeki metal konsantrasyonlarına direnç gösterebilmektedirler fakat, artan metal konsantrasyonu ile birlikte oluşan toksik etki sonucu ölürlür.

Biyoindikatörler: Toksikiteye karşı daha dirençlidirler ve genel bitkilere göre daha fazla metali toksik etki görülmesinin bünyelerinde biriktirebilirler. Çevrelerindeki metal değişimlerine duyarlı oldukları için büyük önem taşımakta ve pek çok toksisite çalışmasında tercih edilmektedirler.

Hiperakümülatörler: Toksikiteye karşı oldukça dirençli olup, diğer tüm bitkilere oranla daha yüksek konsantrasyonlarda metalleri akümüle edebilme yeteneğine sahiptirler.

Yüksek konsantrasyondaki metaller, bitkiler üzerinde ciddi toksik etkiler oluşturabilmekte ve bitkinin ölümüne sebep olabilmektedir [12-15]. Bu sebeple bitkiler, absorblanan fazla metaller ve bunların etkilerinin azaltılması için farklı cevaplar geliştirmişlerdir. Bitkiler; fazla metalin hücre içine alınmaması için, metalin hücre duvarına sabitlenmesi ya da plazma membranının geçirgenliğinin azaltılması gibi cevaplar oluşturabilmektedir. Böylece hücre içine metal girişinin zorlaşması söz konusu olmaktadır. Ortamdaki kontaminant konsantrasyonunun çok yüksek olduğu durumlarda hücre içine metal girişi olasılığı daha yüksektir. Bitkiler, bu gibi durumlarda, hücre içine girmesi engellenememiş olan metallerin vakuollerde depolanma ya da metallothioneinler, organik asitler, amino asitler, phytochelatinler gibi ligandlar tarafından tutulup metal-ligand kompleksi oluşturularak sabitlenmesi gibi cevaplar oluşturabilmektedir [16, 17]. Bu cevap mekanizmalarıyla, fitoremediasyon süresince, bitkiler tarafından absorblanmış metallerin etkileri azaltılabilmektedir.

Fitoremediasyonun; fitoekstraksiyon, fitovolatilizasyon, rizofiltrasyon, fitodegradasyon ve fitostabilizasyon olmak üzere 5 farklı mekanizması mevcuttur.

Fitoekstraksiyon: Kontaminantların, metal uzaklaştırma yeteneği olan bitkilerin kökleriyle alınarak bitkinin üst kısımlarına taşınmasıdır.

Fitovolatilizasyon: Bitkilerce akümüle edilen çözünebilir kontaminantların, uçucu formlara dönüştürülerek bitkilerin yapraklarından uzaklaştırılmasıdır.

Rizofiltrasyon: Kontaminantların uzaklaştırılması işleminde bitki köklerinin kullanılmasıdır.

Fitodegradasyon: Organik kontaminantları indirgemek için gerekli olan enzimlerin bitkilerce üretilmesi ve bu kontaminantların toksisitesi azaltılmış bileşik yapılarına dönüştürülmesidir.

Fitostabilizasyon: Rizosferde kimyasal modifiyelerin yapılmasıyla topraktaki kirletici çözünürlüğünün azaltılmasıdır.

Fitoremediasyon teknikleri, nanopartiküllerin hem geri kazanımında hem de kontamine olmuş ortamlardan uzaklaştırılmasında çevre dostu düşük maliyetli ve etkili olmaları sebebiyle büyük umut vaad etmektedir [18, 19].

2. NANOPARTİKÜL

Nanoteknoloji; atomsal, moleküler yapılar düzeyinde fonksiyonel materyallerin, cihazların ve sistemlerin geliştirilmesidir. Özellikle son 20 yılda nanoteknolojik gelişmelerde hızlı bir artış gözlenmekte ve bu alandaki yatırımlar günden güne artmaktadır.

Nanoteknolojinin gelişmesi ile birlikte nanokristal, nanopartikül, nanotüp gibi nano boyutlu malzemelerin üretilmesi sağlanabilmektedir. Son yıllarda büyük önem kazanan NP'ler, nanoteknolojinin temelini oluşturmaktadır. Çevreye ve insan sağlığına olan etkileri ve riskleri ile ilgili çok az bilgi olmasına rağmen, mühendislik NP'leri çok çeşitli ticari ürünlerin bileşimine entegre edilmiş durumdadır [10]. Ev aletleri ve ürün kaplamaları [1], biyomedikal uygulamalar [20, 21] mücevhercilik [5], elektrokimyasal sensörler ve biyosensörler uygulamaları [3, 22-24], tıp [25-27] ve daha pek çok alanda kullanılabilmektedir.

NP'lerin pek çok endüstriyel alanda sıkça kullanılmaya başlanması, nanopartikül sentezlenmesinin de önemini artırmaktadır. Mühendislik yöntemleri ile üretilen NP'ler doğal yollarla da oluşabilmektedir. Hem halihazırda doğada bulunması hem de nanoteknolojinin gelişmesinin bir sonucu olarak, NP'lerin konsantrasyonlarının ortamlarda yükselmesi de muhtemeldir [Şekil 2].



Şekil 2. Nanopartiküllerin doğaya salınım yollarından bazıları

NP'lerin boyutları 1-100 nm arasında değişmektedir [7]. Küçük boyutları nedeniyle np'ler benzersiz fizikokimyasal ve morfolojik özelliklere (nano boyut, yüksek

yüzey kütle oranı [28] ve kuantum etkileri gibi) sahiptir. Bu benzersiz özellikleri nanomateryalleri diğer ticari malzemelere göre daha önemli kılmaktadır. Herhangi bir maddede dışarıdan mekaniksel ya da kimyasal uygulamalarla enerji verilerek maddenin nanoboyuta parçalanması sağlanabilmekte olup, NP sentezi için pek çok farklı yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden bazıları;

- ✓ lazer kesme (Laser ablated) yöntemi
- ✓ hidrojen redüksiyonu
- ✓ alev sentezi yöntemi
- ✓ mekanik aşındırma
- ✓ asal gaz yoğunlaştırma
- ✓ kimyasal buhar yoğunlaştırma yöntemi
- ✓ ultrasonik sprey piroliz (USP) yöntemidir.

Mikroorganizmaların, bitkilerin ya da bitki parçalarının kullanıldığı biyolojik yöntemler NP sentezi için kimyasal ve fiziksel alternatif yöntemlere göre daha çekici ve çevre dostudur [5, 29-31]. Bitkiler, NP üretiminde yeşil bir yol sunabilmeleri açısından büyük önem taşımaktadır [2]. Bitki dokularında metalik NP'lerin üretilebildiği, yapılan çalışmalarla belirlenmiştir [32-34]. Bitkide np senteziyle ilgili farklı görüşler mevcuttur. Bazı araştırmacılar metalik NP'lerin hücre dışında oluştuktan sonra kök zarı boyunca taşınıp hücre içine alındığı ya da bitki içerisinde metal tuzlarının indirgenmesiyle oluştuğunu savunmaktadır [2]. Diğer bir görüş ise, NP'lerin kökte oluştuğu ve sonrasında bitkiye taşındığı yönündedir [2, 35]. Bitkide NP sentezi için çoğunlukla kabul edilen görüş, ilgili metalin iyonik formunun kök zarı boyunca taşınabilmesi, bitkide transloke olması ve tuz formunun elemente indirgenmesi yönündedir [36]. Bu durumda, metalik NP'lerin bitkide sentezlenebilmesi için maruz kalınan metalin çözünebilir olması, taşınabilmesi ve transloke olabilmesi önem taşımaktadır.

3. NANOAPARTİKÜL FİTOREMEDİASYONU

Literatürde metallerin fitoremediasyonu ya da bitkiler ile metaller arasındaki etkileşimlerle ilgili pek çok çalışma mevcuttur [37-41]. Fakat, bitkilerin NP'ler ile olan etkileşimleriyle ilgili bilgiler yetersiz kalmaktadır. Doğada yaygın olmalarına rağmen, organizmaların NP'lere olan tepkileri hala bilinmemektedir [10, 42]. Metalik NP'lerin bitkilerce absorpsiyonu ve birikimi konusunda da az sayıda çalışma mevcuttur [1, 43-46]. NP'lerin sentezi, toksisitesi ya da remediasyonu ile ilgili yapılmış sınırlı sayıda çalışmada özellikle endüstriyel ortamlarda sık kullanılmalarından dolayı gümüş (Ag), altın (Au), platin (Pt), çinko (Zn), titanyum (Ti) nanopartikülleri tercih edilmektedir. Organizmalar üzerindeki etkisinin ne olduğu hakkında pek fazla bilgi olmamakla birlikte, pek çok bitkinin NPI absorpsiyon yeteneği de bilinmemektedir. Bu konudaki çalışmaların artması, potansiyel bir kirletici olan ve son yıllarda endüstriyel anlamda sık kullanılan bir materyal olması sebebiyle, ortamlardaki konsantrasyonlarında potansiyel artışların beklendiği NP'lerin, olası pozitif ya da negatif etkilerinin belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. En son yapılan bazı çalışmalara göre NP'lerin

fotosentezin uyarılması, tohum çimlenmesi üzerine negatif etkilerinin olduğu fakat, aynı zamanda NP'lerin ayrıcalıklı özelliklerinin tohum çimlenmesi ya da ekin performansında kullanılabileceğini öne sürülmektedir [28].

Nanopartiküllerce kirletilmiş ortamların temizlenebilmesi açısından, hangi bitkilerin verimli uzaklaştırma sağlayabileceğinin tespit edilmesi de oldukça önemli bir konudur.

Yapılan bir çalışmada, Ag(I) ve Ag NP'leri tarafından kontamine olmuş sularda *Pistia stratiotes*'in nanopartikülleri uzaklaştırma yeteneği belirlenmiştir. Ag iyonları ve NP'leri farklı konsantrasyonlarda (0.02, 0.2, and 2 mg L⁻¹) uygulanmış, *Pistia stratiotes*' in 0.02 mg L⁻¹ altındaki Ag ve AgNp konsantrasyonlarında hayatta kalabildiği, ağır metal NP'lerinin uzaklaştırılmasında *Pistia stratiotes*' in potansiyel bir fitoremediator olduğu sonucuna varılmıştır [1]. NP uzaklaştırma verimliliği üzerine yapılan başka bir çalışmada; *Sinapis alba* ve *Lepidium sativum* bitkilerinin Pt NP'lerini alma yeteneklerini belirleme ve alınan NP'lerin yerüstü organlara transloke olmalarını sağlama; Pt' un değişik formlarının akümülyasyon verimliliklerini kıyaslama ve bitki dokularında depolanan Pt formlarını tanımlamak amaçlı amaçlanmıştır. Çalışmada kullanılan bu iki bitkinin uygulanan Pt konsantrasyonlarına toleranslı olduğu, mediumdan Pt alımında başarılı olduğu ve alınan partiküllerin organlara transloke olduğu belirlenmiştir [5]. tuz bataklığı bitkileri (*Halimione portulacoides* ve *Phragmites australis*) kullanılarak farklı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu bitkiler ile bakır oksit nanopartikülleri (CuONP) arasındaki etkileşimin belirlendiği bir çalışmada Cu NP'lerinin fitoremediasyondaki potansiyelleri de değerlendirilmiştir. Çalışılan iki bitkinin de bakırı köklerinde akümüle ettiğini fakat, bu akümülyasyonun metalin NP formunda eklendiğinde 4-10 kat daha düşük olduğu tespit edilmiştir [10].

NP'lerin absorpsiyonu, ortamlardan uzaklaştırılması, çevreye ve organizmalara olan etkileri hakkında sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Yapılan bir çalışmada, iz elementlerin akümülyasyonunda nano-magnemitlerin etkileri araştırılmış ve fitoremediasyon sürecinde nanomagnemitlerin *Helianthus annuus* bitkisinin büyümesini desteklediği belirlenmiştir [47]. Demir oksit NP'lerinin yeraltı suyu arıtımında polyamid membranlar üzerindeki etkisinin belirlendiği bir çalışma mevcuttur. Bu çalışmada; optimal nanopartikül konsantrasyonunda, NP'lerin membran performansını arttırdığını belirlemişlerdir [48].

Su arıtmanın birincil süzme öncesi aşamalarında titanyum dioksit NP'lerinin remediasyonu ve TiNp' lerin ortamdan uzaklaştırılmasında kaplamanın, doğal organik maddenin, kaynak suyu ve çözelti kimyasının rolü araştırılmıştır. Sentetik kaplama ile doğal organik madde kaplamasının uzaklaştırma oranını %80 oranında azalttığı tespit edilmiştir [49]. Yürütülen başka bir çalışmada, enerji santrallerinin yıkama sularından, selenyumun adsorpsiyonu ve azaltımı için işlevselleştirilmiş demir membranların kullanılmış ve demir (Fe) iyonlarının sıfır değerlikli Fe nanopartiküllerine değişimi ve indirgenmesini takiben membranlar, poliviniliden florit (PVFD) membranların poliakrilik asit (PAA) ile kaplanmasıyla hazırlanmıştır. Bu membranların endüstriyel atık su arıtımındaki potansiyeli gösterilmiştir [50]. Nikel ve kobaltın ortamdan uzaklaştırılması için ise yapılan bir

çalışmada; kahverengi bir alg olan *Sargassum glaucescens*' den elde edilen NP'ler kullanılmış, nano- biyoadsorbentlerin nikel ve kobalt adsorbsiyonundaki başarıları membran reaktörü içinde araştırılmış ve metal iyonlarının biyosorpsiyonlarının çok güçlü derecede pH ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. Yapılan termodinamik parametre hesaplamalarına göre de metal iyon biosorbsiyonunun uygulanabilir, endotermik ve doğal olarak kendiliğinden olabildiği sonucuna varılmıştır [51]. Ag NP'lerinin güneş ışığı uyarımı ile fotosentezi üzerine yürütülen bir çalışma ile çevreci olan bu yöntemin diğer metalik NP'lerin sentezin de kullanılabileceği önerilmiştir [52]. Ag NP'lerinin kullanıldığı başka bir çalışmada, AgNP'lerin akuatik bir makrofit olan *L. minor* üzerindeki toksisitesi ve *L. minor* tarafından absorpsiyonu yapılan bir çalışma ile modellenmiştir. *L. minor*'un AgNP için başarılı bir bioremediasyon faktörü olduğunu belirlemişler ve AgNP konsantrasyonu arttıkça yüksek uzaklaştırma oranlarının elde edildiğini tespit etmişlerdir [45]. Silika NP'lerinin *Zea mays*' ın büyümesi üzerindeki etkileri ve fizyolojik cevaplarının belirlendiği çalışmada silika NP'lerinin yapraktaki birikimini yüksek olduğunu tespit etmişlerdir [53]. Ag NP'lerinin (20 nm ve 100 nm boyutunda) kullanıldığı başka bir çalışmada, *L.minor* üzerindeki fitotoksitite belirlenmeye çalışılmış, düşük konsantrasyonlarda NP'lere maruz kalan bitkinin büyümesinde inhibisyon olduğu, Ag' un çevre için önemli ölçüde potansiyel risk oluşturabileceği tespit edilmiştir [54]. NP'lerin fizyolojik etkileri ile ilgili yürütülen başka bir çalışmada, anataz TiO₂ NP'lerinin *L.minor* üzerindeki fizyolojik etkileri, bitki büyümesi, klorofil antioksidan defans enzimleri (peroksidaz, katalaz,süperoksit dismutaz aktiviteleri), malondialdehit içeriği çalışılmıştır. TiO₂ NP'lerin TiO₂ göre daha bariz bir etkisinin olduğu, TiO₂ NP'lerinin düşük konsantrasyonlarda bitki gelişimini uyarırken, yüksek konsantrasyonlarda inhibe ettiği görülmüştür [55]. Al NP'lerinin *L.minor*'un büyümesi, morfolojisi ve fotosentezi üzerine etkileri belirlenmeye çalışılmış ve NP'lerin biyomas birikimini büyük oranda arttırdığı belirlenmiştir[56].

Bitkiler ortamdan NP ile ilişkili metallerin uzaklaştırılmasında da kullanılabilir [44]. Yapılan bir çalışmada, Cr(VI)'nin *Yarrowia lipolytica* hücreleri (FeO/Fe₃O₄ nanopartikülleriyle modifiye edilmiş) tarafından uzaklaştırılması sağlanmıştır. Modifiye edilmemiş olan hücrelerin diğerlerine göre daha yüksek Cr uzaklaştırması sağladığı belirlenmiştir [57]. Nötron aktivasyonunun Fe₃O₄ NP'lerinin *Lepidium sativum* and *Pisum sativum* L. tarafından akümülyasyonunu nasıl etkilediğinin araştırıldığı bir çalışmada, NP'lerin nötron aktivasyonunun NP alımını, organizmalardaki birikimini ve çevredeki akıbetini izlemeye güçlü bir araç olduğu belirlenmiştir . Fitoremediasyon sistemlerinde, nC₆₀ fulleren NP'lerinin potansiyel etkileri ve bitkiler tarafından trikloroetilenin alımı üzerine yürütülen bir çalışmada, çözücü değişimi yoluyla sentezlenen fulleren NP'lerinin (2 and 15mg/L) ilavesiyle, trikloroetilenin bitki tarafından alınımının %26-82 oranında arttığı tespit edilmiştir. Fulleren NP'lerinin fitoremediasyon sisteminde organik kontaminantların alınımını ve akıbetini önemli ölçüde etkileyebildiği ilk kez bu çalışmayla belirlenmiştir [7].

Bitki tarafından akümüle edilen, Ag NP'leri ile iyonik formdaki Ag arasındaki ilişkinin belirlenebilmesi için yapılan bir çalışmada, birikebilecek gümüş NP'lerinin bir sınırının olduğu; yüksek gümüş seviyelerinin metal birikimiyle değil, sadece bitki içindeki metal tuzlarından elde edildiği sonucuna varmışlardır. Metal nanopartikülü birikimi üzerindeki limitin, bitkilerin toplam indirgeme kapasitesi tarafından kontrol edilmesini önermişlerdir [2]. Yapılan başka bir çalışmada, arsenit türleşmesi üzerinde TiO₂ NP'lerinin birlikte bulunmasının etkisi, bunların adsorpsiyonu ve değerlik değişimleri gözlemlenerek belirlenmeye çalışılmıştır. TiO₂ NP'lerinin As(III) için önemli adsorpsiyon kapasitesine sahip olduğunun belirlenmesi büyük önem taşımaktadır [8]. Spesifik bileşimde katalizörlerin üretimi için karışık metal NP'lerinin bitkiler tarafından üretilebileceği, bitkilerin bu işlem için kullanılmasının mümkün olduğu da yapılan bir çalışma ile öne sürülmüştür [3].

SONUÇ

Doğada kendiliğinden oluşabilen nanopartiküllerin, sanayide de kullanılmasıyla birlikte çevredeki konsantrasyonlarının artması beklenen bir durumdur. Günümüzde nanoteknolojinin gelişmesine paralel olarak önem kazanan nanopartiküllerin çevre ve insan sağlığı üzerindeki etkileri ve riskleri hakkında çok az bilgi bulunmaktadır. Bu materyallerin ortamlardaki tespit çalışmalarının yanı sıra, çevre ve canlılar üzerindeki toksik etkilerinin belirlenmesi ve remediasyonları üzerine yapılacak çalışmalar bu sebeple büyük önem taşımaktadır. Pek çok kontaminantın ortamlardan uzaklaştırılmasında kullanılan fitoremediasyon yönteminin, nanopartiküller için de kullanılabileceği az sayıdaki çalışma ile belirtilmiştir. Yapılan bu derleme çalışmasıyla nanopartiküller ve pek çok kontaminantın ortamlardan giderilmesinde sıklıkla kullanılan çevre dostu fitoremediasyon yöntemi hakkında genel bilgi verilmesi ve bu konuyla ilgili literatür açığının gösterilmesi hedeflenmiştir. Sonuç olarak; ortamdaki konsantrasyonları hızlı bir şekilde artan, pozitif ya da negatif etkileri hakkında çok az bilginin bulunduğu nanopartiküllerin ortamlardaki tespiti ve remediasyonu büyük önem taşımakta olup, bu alandaki çalışmaların artırılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Hanks N.A., J.A. Caruso P. Zhang. (2015), *Journal of Environmental Management*, 164: p. 41-45.
- [2] Haverkamp R.G. A.T. Marshall. (2009), *Journal of Nanoparticle Research*, 11, (6): p. 1453-1463.
- [3] Haverkamp R.G., A.T. Marshall D. Van Agterveld. (2007), *Journal of Nanoparticle Research*, 9, (4): p. 697-700.
- [4] Siripattanakul-Ratpukdi S., C. Ploychankul, T. Limpiyakorn, A.S. Vangnai, C. Rongsayamanont E. Khan. (2014), *Journal of Nanoparticle Research*, 16, (2).
- [5] Asztemborska M., R. Steborowski, J. Kowalska G. Bystrzejska-Piotrowska. (2015), *Water, Air, and Soil Pollution*, 226, (4).

- [6] Yáñez-Sedeño P. J.M. Pingarrón. (2005), *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 382, (4): p. 884-886.
- [7] Ma X. C. Wang. (2010), *Environmental Engineering Science*, 27, (11): p. 989-992.
- [8] Sun H., X. Zhang, Z. Zhang, Y. Chen J.C. Crittenden. (2009), *Environmental Pollution*, 157, (4): p. 1165-1170.
- [9] Monica R.C. R. Cremonini. (2009), *Caryologia*, 62, (2): p. 161-165.
- [10] Andreotti F., A.P. Mucha, C. Caetano, P. Rodrigues, C. Rocha Gomes C.M.R. Almeida. (2015), *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 120: p. 303-309.
- [11] Üçüncü E., A.D. Özkan, T.T. Ölmez E. Tunca 2014. *Phytoremediation of Multiply Metal-Contaminated Environments: Synergistic and Competitive Effects between Heavy Metals during Uptake and Transport* Heavy Metal Remediation: Transport and Accumulation in Plants p. 179-200.
- [12] Oláh V., A. Hepp I. Mészáros. (2015), *Chemosphere*, 132: p. 40-46.
- [13] Eleftheriou E.P., I.D.S. Adamakis, E. Panteris M. Fatsiou. (2015), *International Journal of Molecular Sciences*, 16, (7): p. 15852-15871.
- [14] Singh H.P., P. Mahajan, S. Kaur, D.R. Batish R.K. Kohli. (2013), *Environmental Chemistry Letters*, 11, (3): p. 229-254.
- [15] Liu J., H. Zhang, Y. Zhang T. Chai. (2013), *Plant Physiology and Biochemistry*, 68: p. 1-7.
- [16] Basile A., S. Sorbo, B. Conte, R.C. Cobianchi, F. Trinchella, C. Capasso V. Carginale. (2012), *International Journal of Phytoremediation*, 14, (4): p. 374-387.
- [17] Manara A. (2012): p. 27-53.
- [18] Kidd P., J. Barceló, M.P. Bernal, F. Navari-Izzo, C. Poschenrieder, S. Shilev, R. Clemente C. Monterroso. (2009), *Environmental and Experimental Botany*, 67, (1): p. 243-259.
- [19] Paz-Alberto A.M. (2013), *American Journal of Climate Change*, 02, (01): p. 71-86.
- [20] Uskoković V. (2015), *Materials Science and Engineering C*, 57: p. 434-451.
- [21] Stone R.C., B.D. Fellows, B. Qi, D. Trebatoski, B. Jenkins, Y. Raval, T.R. Tzeng, T.F. Bruce, T. McNealy, M.J. Austin, T.C. Monson, D.L. Huber O.T. Mefford. (2015), *Journal of Colloid and Interface Science*, 459: p. 175-182.
- [22] Yu Y., M. Guo, M. Yuan, W. Liu J. Hu. (2016), *Biosensors and Bioelectronics*, 77: p. 215-219.
- [23] Yamada K., W. Choi, I. Lee, B.K. Cho S. Jun. (2016), *Biosensors and Bioelectronics*, 77: p. 137-143.
- [24] Li H., Y. Qiao, J. Li, H. Fang, D. Fan W. Wang. (2016), *Biosensors and Bioelectronics*, 77: p. 378-384.
- [25] Zhu K., M. Wu, H. Lai, C. Guo, J. Li, Y. Wang, Y. Chen, C. Wang J. Shi. (2016), *Biomaterials*, 74: p. 188-199.
- [26] Göbel G., R. Lange, J.M. Hollidt F. Lisdat. (2016), *Talanta*, 146: p. 49-54.
- [27] Schwaminger S.P., P.F. García, G.K. Merck, F.A. Bodensteiner, S. Heissler, S. Günther S. Berensmeier. (2015), *Journal of Physical Chemistry C*, 119, (40): p. 23032-23041.
- [28] Capaldi Arruda S.C., A.L. Diniz Silva, R. Moretto Galazzi, R. Antunes Azevedo M.A. Zezzi Arruda. (2015), *Talanta*, 131: p. 693-705.
- [29] Konishi Y., K. Ohno, N. Saitoh, T. Nomura, S. Nagamine, H. Hishida, Y. Takahashi T. Uruga. (2007), *Journal of Biotechnology*, 128, (3): p. 648-653.
- [30] Mohanpuria P., N.K. Rana S.K. Yadav. (2008), *Journal of Nanoparticle Research*, 10, (3): p. 507-517.

- [31] Thakkar K.N., S.S. Mhatre R.Y. Parikh. (2010), *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 6, (2): p. 257-262.
- [32] Nasrollahzadeh M. S. Mohammad Sajadi. (2016), *Journal of Colloid and Interface Science*, 462: p. 243-251.
- [33] Mishra P., S. Ray, S. Sinha, B. Das, M.I. Khan, S.K. Behera, S.I. Yun, S.K. Tripathy A. Mishra. (2016), *Biochemical Engineering Journal*, 105: p. 264-272.
- [34] Harshiny M., C.N. Iswarya M. Matheswaran. (2015), *Powder Technology*, 286: p. 744-749.
- [35] Gardea-Torresdey J.L., E. Gomez, J.R. Peralta-Videa, J.G. Parsons, H. Troiani M. Jose-Yacamán. (2003), *Langmuir*, 19, (4): p. 1357-1361.
- [36] Gardea-Torresdey J.L., E. Rodriguez, J.G. Parsons, J.R. Peralta-Videa, G. Meitzner G. Cruz-Jimenez. (2005), *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 382, (2): p. 347-352.
- [37] Sasmaz M., E.I. Arslan Topal, E. Obek A. Sasmaz. (2015), *Journal of Environmental Management*, 163: p. 246-253.
- [38] Rezanian S., M. Ponraj, A. Talaiekhosani, S.E. Mohamad, M.F. Md Din, S.M. Taib, F. Sabbagh F.M. Sairan. (2015), *Journal of Environmental Management*, 163: p. 125-133.
- [39] Baudddh K., K. Singh, B. Singh R.P. Singh. (2015), *Ecological Engineering*, 84: p. 640-652.
- [40] Zaheer I.E., S. Ali, M. Rizwan, M. Farid, M.B. Shakoor, R.A. Gill, U. Najeeb, N. Iqbal R. Ahmad. (2015), *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 120: p. 310-317.
- [41] Boechat C.L., V.C. Pistóia, C. Gianelo F.A.D.O. Camargo. (2015), *Environmental Science and Pollution Research*.
- [42] Baker T.J., C.R. Tyler T.S. Galloway. (2014), *Environmental Pollution*, 186: p. 257-271.
- [43] Al-Shalabi Z. P.M. Doran 2013. *Metal Uptake and Nanoparticle Synthesis in Hairy Root Cultures*. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, 134: p. 135-153.
- [44] Jacob D.L., J.D. Borchardt, L. Navaratnam, M.L. Otte A.N. Bezbaruah. (2013), *International Journal of Phytoremediation*, 15, (2): p. 142-153.
- [45] Üçüncü E., A.D. Özkan, C. Kurşungöz, Z.E. Ülger, T.T. Ölmez, T. Tekinay, B. Ortaç E. Tunca. (2014), *Chemosphere*, 108: p. 251-257.
- [46] Barton L.E., M. Auffan, M. Durenkamp, S. McGrath, J.Y. Bottero M.R. Wiesner. (2015), *Science of the Total Environment*, 511: p. 535-543.
- [47] Martínez-Fernández D., M. Vítková, M.P. Bernal M. Komárek. (2015), *Water, Air, and Soil Pollution*, 226, (4).
- [48] Al-Hobaib A.S., K. Al-Sheetan L. El Mir. (2015), *Materials Science in Semiconductor Processing*.
- [49] Kinsinger N., R. Honda, V. Keene S.L. Walker. (2015), *Environmental Engineering Science*, 32, (4): p. 292-300.
- [50] Gui M., J.K. Papp, A.S. Colburn, N.D. Meeks, B. Weaver, I. Wilf D. Bhattacharyya. (2015), *Journal of Membrane Science*, 488: p. 79-91.
- [51] Esmaeili A. A. Aghababai Beni. (2015), *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12, (6): p. 2055-2064.
- [52] Phatak R.S. A.S. Hendre. (2015), *Der Pharmacia Lettre*, 7, (5): p. 313-324.
- [53] Suriyaprabha R., G. Karunakaran, R. Yuvakkumar, P. Prabu, V. Rajendran N. Kannan. (2012), *Journal of Nanoparticle Research*, 14, (12): p. 1-14.
- [54] Gubbins E.J., L.C. Batty J.R. Lead. (2011), *Environmental Pollution*, 159, (6): p. 1551-1559.

- [55] Song G., Y. Gao, H. Wu, W. Hou, C. Zhang H. Ma. (2012), *Environmental Toxicology and Chemistry*, 31, (9): p. 2147-2152.
- [56] Juhel G., E. Batisse, Q. Hugues, D. Daly, F.N.A.M. van Pelt, J. O'Halloran M.A.K. Jansen. (2011), *Aquatic Toxicology*, 105, (3-4): p. 328-336.
- [57] Rao A., A. Bankar, A.R. Kumar, S. Gosavi S. Zinjarde. (2013), *Journal of contaminant hydrology*, 146: p. 63-73.