



Nanoparçacıkların Özellikleri ve Akuatik Çevreye Etkisi

¹Mehmet Ateş

¹Veyssel Demir

²Hüsnüye İmamoğlu

¹Tunceli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, Tunceli

²İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, İstanbul

Özet

Günümüzde nano boyuttaki malzemelerin etkileyici bazı özellikleri sebebiyle, uygulama alanlarındaki artışına rağmen, insan hayatı ve akuatik çevre üzerindeki yan etkileri konusunda çok az şey bilinmektedir. Günlük hayatta insanlar, hayvanlar ve akuatik organizmalar birçok farklı yollarla nano-malzemelere maruz kalabilirler. Sucul sistemlerde ki nanopartiküller için bilimsel topluluğun ilgisi oldukça yeni, hızlı gelişiyor olsa da, nanopartiküller hakkında bilgiler sadece başlangıç aşamasındadır. Nanopartiküller akuatik ekosisteme ya doğrudan ya da abiyotik modifiye edilmiş olarak ulaşırlar. Biyolojik sistemin besin zincirinin en önemli halkalarından birini oluşturan akautik organizmaların nanoparçacıklara maruz kalması endişe verici bir konudur. Bazı durumlarda, nanopartiküller diğer maddeler veya kirleticiler ile de etkileşir, böylece organizmaları ve daha uzun bir sürede de bütün toplulukları ve ekosistemleri etkilemiş olur. Bu makalenin amacı doğal ve insan yapımı nanoparçacıklar hakkında temel bilgileri sunmakla birlikte, akuatik ortamda nano boyuttaki parçacıkların davranışlarını ve organizmalar ile etkileşimi hakkında bilgi vermektir.

1. Giriş

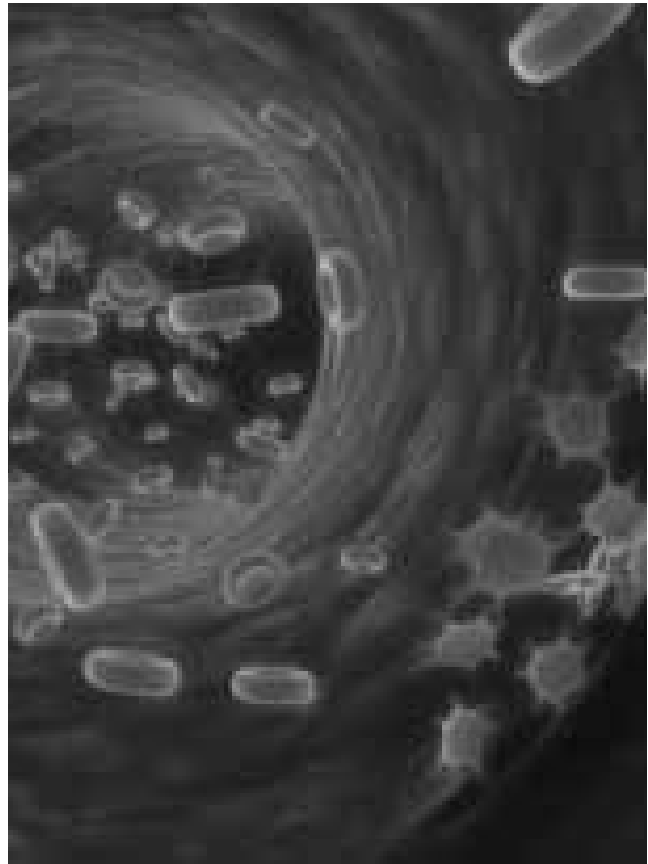
Nanoteknoloji, nanoölçek boyutlardaki yapıların ve bileşenlerinin fiziksel, kimyasal, biyolojik özellikleri ile değişen malzeme sistemlerini kapsar. Nanoölçekte belli bir işlevi olabilecek yapıların malzemelerini ve kendilerini kontrollü bir şekilde üretebilmek, özelliklerini ve işlevlerini belirleyecek nano ebatlarda aygıt yapabilmek, bu aygıtları günlük hayatımızda kullanılır hale getirebilmek nanobilim ve nanoteknolojinin hedefleri arasında yer alır (Erkoç, 2008). Günümüzde, nanoteknoloji hızla gelişen, mühendislik, biyoloji, kimya, fizik ve tıp alanları ile kombine olabilen ve bu bilim dalları arasında geleneksel sınırları ortadan kaldıran disiplinlerarası bir bilim dalıdır (Ray ve ark., 2009). Nanoteknoloji, bireysel atom ve molekülleri gözlemleme ve kontrol etme imkânı sağlar ve nanoölçek olarak bilinen yaklaşık olarak 1-100 nanometre aralığındaki yapılarla ilgilenir. Nano sözcük olarak, bir fiziksel büyüklüğün milyarda biri anlamına gelir. Bir nanometre (nm) metrenin (m) bir milyarda birine eşit bir uzunluk birimi olarak ifade edilir. Nano yapıların olağanüstü özellikleri çok öncelerden tahmin edilmekteydi (Alberts, 2004).

Nanoteknolojik gelişmelere paralel olarak nanomateriyaller ile ilgili araştırma çalışmaları çok çeşitli alanlarda sürdürülmektedir. Nanomateriyallerin daha büyük boylardaki materyallerden farklı olmasına sebep olan ana faktörlerden birisi nispi yüzey alanının artmasıdır (Batley ve McLaughlin, 2010). Bir parçacık küçüldükçe, yüzeyin hacme oranı giderek artar, parçacığın yüzeyi üzerindeki atomlarının sayısal oranı, içerisinde bulunan atom sayısına nazaran artar. Örneğin 30 nm boyundaki bir parçacığın atomlarının %5'i o parçacığın yüzeyinde iken, 3 nm boyundaki bir parçacığın atomlarının %50'si o parçacığın yüzeyindedir (The Royal Society, 2004). Bu yüzden kütlesi verilen bir nanomateriyalin yüzeyi, aynı kütledeki daha büyük parçacıklardan yapılmış olan materyale nazaran daha fazla sayıda elverişli atoma sahiptir. Bu yüzeylerde kimyasal reaksiyonlar oluşacağı zaman, daha büyük parçacıklı örneklerle nazaran, çevre ile daha etkili bir etkileşim olmaktadır (Krug ve Wick, 2011). Tüm bu özelliklerden dolayı nanomalzemeler kimyasal olarak daha reaktif bir yapı göstermekte ve potansiyel olarak güçleri ve elektriksel özellikleri değişmektedir (Batley ve McLaughlin, 2010).

2. Nanomateriyaller

2.1. Doğal ve insan yapımı nanoparçacıklar

Nanopartiküllerin kaynağı çok çeşitli olmakla beraber, çoğunluğu doğal kökenlidir ve ortamda sürekli bulunabilirler (Wigginton ve ark., 2007). Suda bulunan koloitler, ince taneli çöl kumu, petrol dumanları, volkanik aktivitelerden veya orman yangınlarından ortaya çıkan duman ve bazı atmosferik tozlar, doğada üretilen nanoparçacıkları temsil etmektedir. Ayrıca canlılardaki biyolojik proseslerin birçoğu, nanoölçek aralığında meydana gelir ve doğada meydana gelen nanoteknoloji olarak düşünülebilir. Örneğin, DNA molekülü yaklaşık

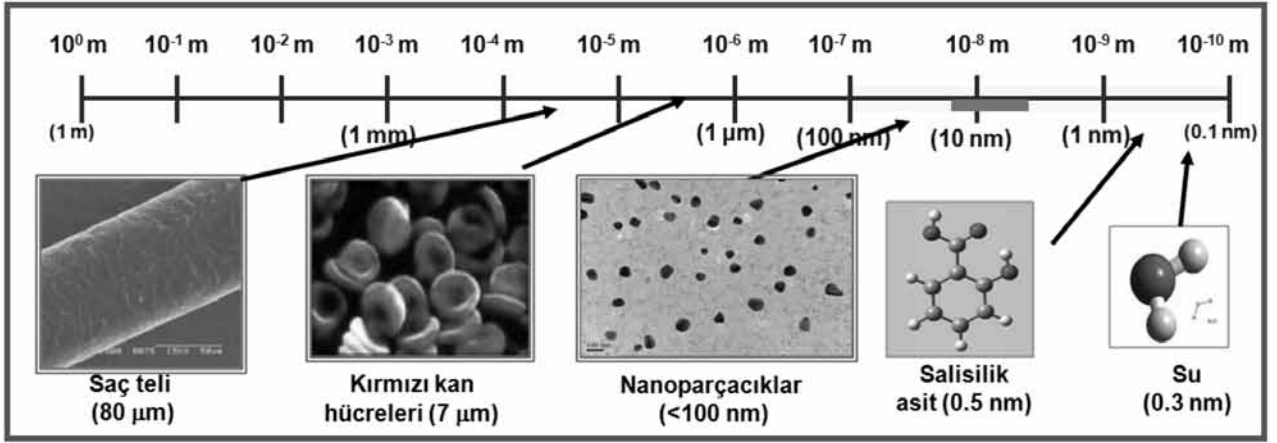


2,5 nm çapıyla nanoölçek aralığındadır (Şekil 1). Ayrıca ribozomlar aminoasitleri özel bir sıralama ile dizip protein yapan bir nanoölçek fabrika gibi çalışırlar (Alberts, 2004; Ashby ve ark. 2009) ve alyuvarlarda oksijen transferi yapan bir protein olan hemoglobin 5.5 nm çapındadır. Diğer nanomateriyallere örnek olarak araba eksozu, endüstriyel emisyonlar ve kaynak yapımında kullanılan lehim dumanları verilebilir. Bunlar insan faaliyetlerinin yan ürünü olarak, antropojenik kaynaklardan çevreye istem dışı olarak salınırlar (Nowack ve Bucheli, 2007). İnsan yapımı tasarlanmış nanomateriyaller nanoölçekte ortaya çıkan özgün özelliklerinden faydalanmak için özellikle üretilirler. Bu tasarlanmış insan yapımı nanoparçacıkların çevresel etkilerinin diğer parametreler ile ilgili olup olmadığının değerlendirilmesi önemlidir. İnsan yapımı veya doğal olarak meydana gelen nanoparçacıklar tüm sularda gözlenebilir; yüzey suyu, yeraltı suyu, okyanuslar, buzul ve atmosferik sular gibi tüm akuatik ortamlarda nanoparçacıklar bulunabilmektedir (Wigginton ve ark., 2007).

2.2. Nanomateriyaller sınıflandırılması

Nanomateriyaller farklı tiplerle sınıflandırılabilirler, nano boyuttaki parçacıklar genelde 3 grupta sınıflandırılırlar. Kimyasal kompozisyonlarına dayalı olarak yapılan genel sınıflandırma;

1. Karbon nanotüpler ve C₆₀ sınıfı fuleren'i de (karbonun grafit ve elmas haricindeki allotroplarına verilen isim) içine alan karbon bazlı yapılar,

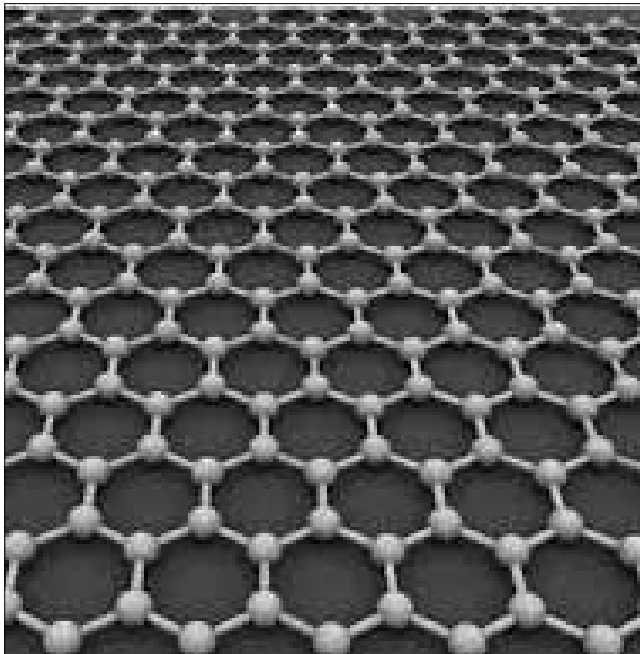


Şekil 1. Nanoölçek boyutu ve bu ölçeğe görsel örnekler

2. Demir, demir oksit, bakır, bakır oksit ve titanyum dioksit gibi metal ve metal oksitleri de kapsayan metal içeren nanopartiküller,

3. Kuantum noktaları olarak bilinen [CdSe, PbSe v.b) semî kondöktör nanokristaller gibi geniş kategorilere ayrılırlar.

Nanomateriyalleri kategorize etmenin bir diğer yolu da boyutlarına göre yapılan sınıflandırmadır. Uluslararası standardizasyon teşkilatına (ISO) göre, iki ana tip nanomateriyal vardır –nano objeler ve nano yapı malzemeler-. Nano yapı malzemeler, bütünü nanoölçek boyutta olmak şartı olmaksızın, nanoölçek yapılar içeren geniş bir materyaller sınıfını içerir. Bunlar nano gözenekli materyalleri (nanoölçekteki gözenekleri içeren ve nanoölçek boyutlarda olan veya olmayan parçacıklar), nano kristal materyalleri (nanoölçek kristal tanecikler içeren ve nanoölçek boyutlarda olan veya olmayan parçacıklar) ve nanoölçek (gösterge çizelgesi) objeleri içeren karmaşık akışkanları içerirler (Krug ve Wick, 2011).



2.3 Neoparçacıkların özellikleri

Bir nanopartikül en az iki ayrı bölüme sahip heterojen bir maddedir. Bu da parçacıkta yüzey ve çekirdek malzemesi şeklinde belirtilebilir. Bir nanoparçacığın dış atom katmanı kendi çekirdeğine farklı kimyasal özellikler göstermekle birlikte, aynı zamanda farklı bir kompozisyon özelliğini de göstermektedir. Tasarlanmış nanoparçacıkların yüzeyleri genellikle farklı bir kimyasal grup ile fonksiyonlandırılmıştır. Nanoparçacıklarda, çekirdeğin özellikleri partikülün ana uygulama alanlarını belirlediği için, genellikle bu çekirdek malzemesi ile adlandırılırlar. Bununla birlikte, nanoparçacıkların yüzey alanı aynı zamanda nanoparçacıkların çevresel davranışlarını belirler, örneğin bazı fonksiyonel gruplar hidrofobik partiküllerin çözünürlüğünü artırır ve bir sulu çözelti içinde bunları stabilize eder (Christian ve ark., 2008).

Bulk halinde bulunan aynı malzemelere nazaran nanoparçacıklara olan yoğun ilginin sebebi; nanoparçacıkların kısmen çok yüksek bir yüzey:hacim oranına sahip olmasıdır. Böylece reaktif yüzey alanı, diğer büyük partiküller ile karşılaştırıldığında, nanoparçacıklar da daha yüksek olmaktadır. Partikül yüzeyindeki atomların mol fraksiyonu, azalan partikülün boyutu ile orantılı olduğu için, partikülün yüzey serbest enerjisi partikülün büyüklüğünün bir fonksiyonudur (Wigginton ve ark., 2007). Bu nedenle, nanopartikül ölçeğinde, reaktivite genel olarak, boyut azaldıkça artar. Bazı durumlarda, nano-malzeme ile karşılık gelen bulk faz arasındaki reaksiyon değişim hızı, alan normalizasyonu yapıldıktan sonra bile yüksek kalır. Nanoparçacıklarda agregasyon olarak bilinen nanoparçacıkların topaklanması veya kümeler halinde birleşmesi bu malzemelerin reaktif yüzey alanını etkiler.

2.4. Uygulama Alanları

Nanomalzeme, olağanüstü özelliklerinden dolayı, hemen hemen her alanda birçok yeni materyal uygulamasına olanak sağlamaktadır. Savunma sanayinde, tekstilde, otomotiv sanayinde, inşaat, elektronikte, yeni tedavi yöntemlerinde ve ilaç sanayinde, nanoparçacıklar çok etkin bir alan oluşturmaktadır. Ayrıca, materyali daha güçlü, daha dayanıklı ve hafif yapmak için, tenis

raketlerinin çerçevelerine, motosiklet kasklarına nano-parçacıkların ilave edilmesi ve kumaşlara nanoölçekte katkı maddelerinin kullanılması sonucu kırışmalara, lekelenmeye ve bakteri üremelerine karşı daha dayanıklı malzemeler elde edilir. Bilgisayar, gözlük ve fotoğraf makinesi ekranlarında, pencerelerde ve diğer yüzeylerin üzerinde bulunan nanoölçek ince filmler, onları su geçirmez, yansıtma, kendi kendini temizleyen, ultraviyole veya kızıl ötesi ışığa dayanıklı, buğu tutmaz, anti mikrobik veya çizik dirençli özelliği kazandırır (U.S. National Nanotechnology Initiative).

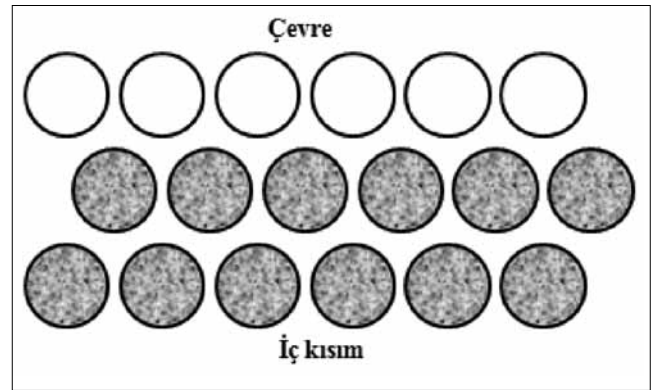


Tıp alanında ise nanoteknolojinin kullanımı yeni tedavi yöntemlerinde olumlu imkânlar sunmaktadır. Nanoteknoloji araştırmacılara nanoölçek aletler yapma imkânı sağlar, bu aletler antikorlar ile bağlı oldukları zaman tümör hücrelerini yüksek spesifiklikle ve yakınlıkla hedefleyebilirler. Bu ilaç taşıyıcı sistemlere, nanomateriyallerden yapılmış mişeller içinde kapsüllenmiş küçük ilaç moleküllerini istenilen yerlere taşıyabilme imkânı sağlar ve böylece toplam ilaç tüketimi ve yan etkileri azalmış olur (Jain, 2010). Bazı araştırmacılar, damar sertleşmesinin erken teşhisinde kullanılan, özellikle plaklarda biriken antikor-nanopartikül komplekslerinin sayısını ölçmede kullanılan bir görüntüleme tekniğinde geliştirmişlerdir (Wickline ve ark., 2006). Çevre bilminde ise, yer altı sularını kirleten organik çözücülerini tespit ederek arıtma ve temizlenmesinde kullanılacak nano-parçacıkların kullanımı için yöntemler geliştirilmektedir. Buna ek olarak, nanoteknoloji temiz enerji üretiminde de önemli bir etkiye sahiptir, örneğin daha verimli güneş pilleri ve çevre dostu pillerin üretimi sağlanmaktadır (Tian ve ark., 2007).

2.5. Toksik etkileri

Nanomateriyallerin açıkça görülen faydalarına rağmen, nanoölçekte görülen bu yenilikçi özelliklerin çevreye ve insan sağlığına tehdit oluşturup oluşturmayacağına dair, oluşturacaksa ne ölçüde zarar vereceği ile ilgili birçok soru işareti vardır (Buzea ve ark., 2007). Nanopartiküllerin toksikliği ya doğrudan zehir etki oluşturarak ya da bir yan etkiyi tetikleyecek şekilde ortaya çıkabilir.

Nano formdaki malzemelerin bloğu daha küçük parçalarına bölünürse ve nanoparçacıklar olarak dağılırsa, yüzey alanları çok büyür (on üzeri birkaç derece artar). Bu yüzden önemsiz gibi görünen bir bağışıklık tepkisi çok ciddi bir tehlikeye dönüşebilir. İkinci olarak, genelde nanoparçacıklar yığın halinde iken kavışıklığından dolayı kimyasal olarak çok daha reaktif özellik gösterirler (Şekil 2). Bu nedenle, metalik nanoparçacıkların yığın metal halinde iken çok daha kolay iyonlaştığı anlaşılar. Örneğin kurşun veya gümüşün toksikliği sadece element formundaki metalden değil, atomun blok haldeki maddeden kopmuş ve iyonlaşmış metallerinden kaynaklanır. Üçüncü olarak, nanoparçacıklar küçük olduğu için büyük parçacıkların içinden geçmesine engel olabileceği yapılardan geçebilir. Günümüzde nanoparçacıkların yaşayan hücrelerin içine bir kere girdiklerinde ne yaptıkları hakkında nispeten çok az şey bilinmektedir (Ramsden, 2011).



Şekil 2. Nanoparçacıkların, iki boyutta, bir kesit olarak gösterilmesi. (Yüzey atomları (beyaz) iç kısımdaki atomlardan (siyah) niteliksel açıdan farklıdır. Çünkü iç kısımdaki atomların kendi türünden altı adet en yakın komşusu (iki boyutlu yüzey alanında) varken, yüzey atomlarının sadece dört adet en yakın komşusu vardır).

Nanomateriyallerin üretiminin artmasıyla birlikte, insan teması ve istek dışı çevreye salınım imkânı da artmaktadır. Bu nanoparçacıkların çevreye atılımı veya istek dışı sızması da akuatik organizmalar üzerinde toksik etki oluşturmaya sebep olur (Ray ve ark., 2009). Toksikite mekanizması tam olarak açıklanamasa da, akuatik omurgalılarda nanoparçacıkların öldürücü olmayan etkileri ile ilgili mevcut ekotoksikoloji verileri, bu toksisitenin ana özelliklerinin oksidatif stres, genotoksisite ve bağışıklık sistemi üzerindeki etkiler olduğunu tahmin etmektedir (Handy ve Shaw, 2007). Akuatik omurgalılarda nanoparçacıkların etkilerinin belirlenmesi üzerine yapılan çalışmaların çoğu tatlısu canlıları üzerine odaklanmıştır, özellikle *Daphnia magna*, kabuklu canlıları ve zebra balıkları üzerine olmuştur (Scown ve ark., 2010).

3. Nanoparçacıkların akuatik organizmalara etkisi

Sucul organizmalara nanoparçacıkların etkisinin ortaya çıkarılmasına yönelik araştırmalar son zamanlarda ortaya çıkmaya başlamıştır. Özellikle akuatik sistemlerde, nanoparçacıkların etkilerinin incelenmesinde yüksek

ilgi odağı olmuştur, çünkü akuatik sistemler birçok kirlenici madde için evsel ve endüstriyel kaynaklardan atık su ve yüzey akışı alan bir alıcı ortam vazifesi görürler (Batley ve McLaughlin, 2010). Nanoparçacıkların alınımı, yer değişimi, akıbeti ile ilgili potansiyel yollar ve etkileri, deniz ve tatlısu organizmalarında nanoparçacıklara maruz bırakılması sonucunda oluşacak potansiyel etkileri incelenmiştir.

Omurgalılar, balıklar, artemia ve algler üzerine yapılan ekotoksikite testlerinin verileri akuatik canlı türlerinde nanoparçacıkların düşük tehlike potansiyeli oluşturduğunu belirtmektedirler (Lovern ve Klaper, 2006, Lovern ve ark., 2007, Oberdörster ve ark., 2006, Smith ve ark., 2007a, Ates ve ark., 2013a). Bununla birlikte, öldürücü olmayan etkileri üzerine yapılan çalışmalar, karbon bazlı fuleren C_{60} 'a maruz bırakılan levrek balıklarının beyinlerinde oksidatif tahrip olduğunu göstermiştir (Oberdörster, 2004). TiO_2 nanoparçacıklarına maruz bırakılan genç sazan balıklarının ve gökkuşağı alabalıklarının solungaçlarında, beyinde ve karaciğerinde bu dokuların oksidatif stres hastalıklı olduğunu gösteren lipid peroksidasyonu bulunmuştur (Federici ve ark., 2007, Hao ve ark., 2009). Nanoparçacıkların balık yumurtaları tarafından alındığı ve yetişkin balıkların solungaç ve bağırsaklarında biriktiği görülmüştür ve aynı zamanda beyin, testis, karaciğer ve kanda nanoparçacıklar tespit edilmiştir (Nowack ve Bucheli, 2007). Kuantum noktaları olarak bilinen semi konduktör nanoparçacıkların, midyelerin sindirim bezlerinde ve solungaçlarında oksidatif stres ve DNA tahribine sebep oldukları görülmüştür (Gagne ve ark., 2008, Tedesco ve ark., 2008). Buna ilave olarak, Zn ve ZnO nanoparçacıkların artemia üzerindeki etkilerini belirlemek için yapılan bir araştırma çalışmamızda, uzun süreli metal ve metal oksit nanoparçacıklara maruz kalan artemialarda oksidatif stres ve birikme olduğu tesbit edilmiştir (Ates ve ark., 2013b).

3.1 Akuatik Sistemlere Nanoparçacıkların Girişi

Akuatik sistemlerdeki nanopartiküllerin tahmini miktarı hakkında çok az şey bilinmektedir (Nowack ve Bucheli, 2007). Nanomateryeller içeren ürünlerin sayısı arttıkça, akuatik biyosferdeki organizmaların nanoparçacıklara maruz kalma potansiyeli de artmaktadır. Akuatik sistemler, nanomateryelleri, atmosferik depozisyon, topraktan süzülme, atık su deşarjları gibi direk atılımlar şeklinde birçok değişik kaynaktan alabilirler (Scown ve ark., 2010). Bazı nanomateryeller büyük oranlarda üretilirler, bu yüzden muhtemelen, üreticilerin atık sularından veya üretim ve proses esnasındaki sızma şeklinde çevreye atılabilirler (Oberdörster ve ark., 2005). Çevreye salınan nanomateryeller, rüzgâr, yağmur suyu yüzeysel akışı gibi etkilerle akuatik sisteme taşınabilmekte, buradaki birikimleri ile de akuatik organizmalar için tehdit oluşturabilmektedirler (Colvin, 2003, Moore, 2006). Akuatik çevrede nanoparçacıkların dağılım modelleri, akuatik çevre basamağına girişinden sonra, parçacıkların taşınımı, dağılımı, transformasyonu ve parçalanmalarına

bağlıdır. Örneğin, kozmetik ve güneş kremleri gibi nanoölçek materyaller içeren ürünlerin yıkanması ile düzenli olarak nanomateryellerin çevreye girişi olmaktadır (Oberdörster ve ark., 2005), bununla birlikte çevresel iyileştirme uygulamaları ile de planlı bir şekilde önemli seviyede nanomateryeller, toprağa ve yer altı sularına enjekte edilmektedir (Tratnyek ve Johnson, 2006).

3.2. Nanoparçacıkların Sudaki davranışları

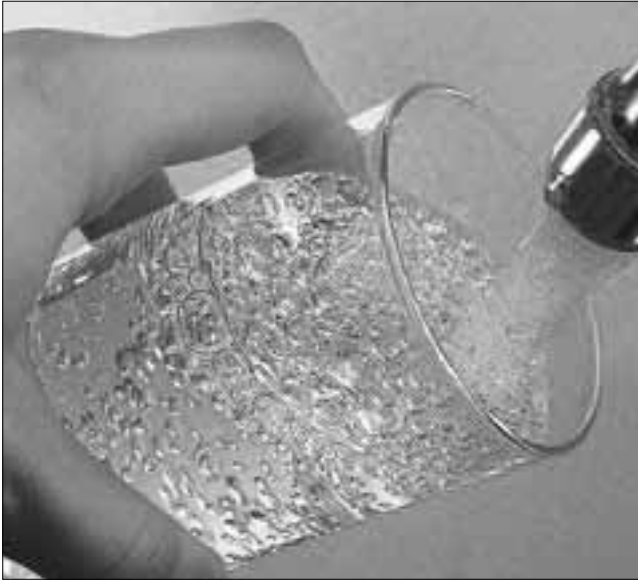
Su yoluyla taşınan nanoparçacıklar genel olarak aynı materyalin daha büyük parçacıklarına nazaran daha geç çökerler (EPA, 2007). Bu da onlara, suyun kitle hareketlerinin bir sonucu olarak daha uzak mesafelere taşınma kapasitesi sağlar. Bununla birlikte bu mesafe agregasyon (nanoparçacıkların topaklanmaları) olayından dolayı daha düşük seviyelere düşürülebilir. Üretilen nanoparçacıkların akuatik sistemlerde davranışı ile ilgili bilgi sınırlıdır. Bununla birlikte mevcut bilgi, akuatik sistemlerdeki doğal koloitler ile ilgili kapsamlı literatürle birlikte, nanoparçacıkların akıbetinin tahmin edilmesinde faydalı bir temel sağlamaktadır (Jarvie ve King, 2010). Bunların akıbeti muhtemelen, nanoparçacıkların birbirine yapışması ile daha büyük kümeler oluşturmaları (agregasyon) ve sistemdeki doğal maddelerle etkileşimi ile yönetilirler. Akuatik ortamda bulunan tüm organizmalar bu nanoparçacıklardan etkilenirler (Şekil 3).

Su sisteminde, nanopartiküllerin davranışını ve akıbeti birçok fiziko-kimyasal özelliklere ve faktörlere bağlıdır. Nano boyuttaki paraçacıklar, birbirine yapışarak topaklanabilir ve çökelmiş olarak suda kalabilir ya da su ile taşınabilirler. Sonuçta su kaynaklı nanoparçacıklar tatlısu kaynaklarından denizlere ulaşırlar. Deniz suyunda artan iyonik kuvvet, partikülün etrafında çift katmanlı elektriksel alanı azaltarak kolloidlerin kararlılığını etkiler, nanoparçacıkların topaklanmaları ve çökelmelerini kolaylaştırır. Bunların bazıları denizlere kadar ulaşır, bazıları da denizlere ulaşan bazı dayanıklı atıkların degradasyonunun sonucu olarak bile üretilebilirler (Greenberg, 2009). Bu nedenle, su sedimentleri, nanopartiküller için bir kaynak olarak kabul edilebilir (Koelmans ve ark., 2009).

Fiziko-kimyasal prosesler nanopartiküllerin biyolojik olarak kullanılabilirliklerini ve ortamdaki davranışlarını etkilerler. Nanopartiküllerin stabilizasyonu, su sütununda onları kullanılabilir tutar ve su sistemindeki taşınmasını kolaylaştırır. Nanoparçacıkların topaklanması sedimentasyon ile sonuçlanabilir ve böylece su kolonundan uzaklaştırılmış olurlar. Bentik organizmalar bu nanoparçacıklara maruz kalır ve böylece potansiyel toksik etkiler açığa çıkar. Çökelmiş nanopartiküller sediment içinde kalmaya devam edebilir ya da yeniden mobilize olabilirler.

3.3. Akuatik koloit

Doğal akuatik koloitler, en az bir boyutu 1 μm den küçük olan materyaller olarak tanımlanır. Doğal ve insan yapımı boyutu 100 nm'den küçük nanoparçacıkları içerir. Virüsler, bakteriler, doğal organik materyaller, humik



salınabilirler, sonunda toprak ve suya karışırlar.

Sedimentasyon ile sudan alınmadan önce, nanopartiküllerin sucul ortamda ve su organizmaları ile birden fazla etkileşimi vardır. Bu etkileşimlerin sucul biyosferi ne kadar etkileyeceği bilinmemektedir. Ancak, sonuçları önemli olabilir ve sonuçta, sucul ekosistem üzerindeki bu etkilerin insanlar dâhil genel biyosfer üzerinde yan etkileri olabilir. Bunu önlemek için, sucul çevre üzerindeki insan yapımı nanopartiküllerin etkilerini değerlendirmesi ve geri dönüşü olmayan etkilerini önlemek için uygun mevzuatın belirlenmesi ve azaltıcı önlemlerin uygulanması kaçınılmazdır. Bu bağlamda, sucul sistemlerinin yanı sıra organizmalar ile olan etkileşimleri içinde nanopartiküllerin akıbeti ve davranışları hakkında bilgi sahibi olmak çok önemlidir.

Nanoteknolojiler nispeten yeni ve önünde parlak bir gelecek var. Sonuç olarak, sucul sistemlerde insan yapımı nanoparçacıkların salınımının artması beklenmektedir. Nanoparçacıkların bazı organizmalar üzerinde toksik etkiler gösterdiği kanıtlanmıştır, bu nedenle toksisitesinden dolayıya da kirleticiler veya besin gibi diğer çözünmüş su bileşenleri ile etkileşim yoluyla, sucul ekosistemler için potansiyel bir tehdit oluşturmaktadır. Bu etkileri doğru değerlendirebilecek uygun analitik yöntemler ve ekotoksikolojik kavramlar henüz mevcut değildir. Ancak, bu etkileşimlerin anlaşılması, sucul sistemlerde, uzantısı olarak tüm biyosferde, geri dönüşü olmayan sonuçlarından kaçınmak için çok önemlidir. Bu nedenle, nanoparçacıklarla yapılan bilimsel araştırmalar mevcut sınırlarının ötesine ulaşmalı ve bugüne kadar ihmal edilen çeşitli yönlerinin de ele alması gerekmektedir. Özellikle insan yapımı nanopartiküllerin sayısındaki artıştan dolayı ekosistem için günümüzde ve gelecekte endişe verici durumlar oluşabilir.

Kaynaklar

- Alberts, B. *Essential cell biology*, New York, Garland Science. 2004.
- Ashby, M.F., Schodek, D.L., Ferreira, P.J.S.G. *Nanomaterials, nanotechnologies and design: an introduction for Engineers and Architects*, Butterworth-Heinemann. 2009.
- Ates, M., Daniels, J., Arslan, Z., Farah, O.I. 2013a. Effects of aqueous suspensions of titanium dioxide nanoparticles on *Artemia salina*: assessment of nanoparticle aggregation, accumulation, and toxicity. *Environ. Monit. Assess.* 185(4), 3339-48.
- Ates M., Daniels, J., Arslan, Z., Farah, I.O., Felix-Rivera H. 2013b. Comparative evaluation of impact of Zn and ZnO nanoparticles on brine shrimp (*Artemia salina*) larvae: effects of particle size and solubility on toxicity. *Environmental Science: Processes & Impacts*. 15, 225-233.
- Batley, G.E., McLaughlin, M.J. *Fate of Manufactured Nanomaterials in the Australian Environment*. CSIRO Niche Manufacturing Flagship Report. 2010.
- Buzea C., Pacheco II., Robbie K. 2007. Nanomaterials and nanoparticles: sources and toxicity. *Biointerphases*, 2, MR17-71.
- Christian, P., Von der Kammer, F., Baalousha, M., Hofmann, T. 2008. Nanoparticles: structure, properties, preparation and behaviour in environmental media. *Ecotoxicology*, 17, 326-343.
- Christian, P., Von Der Kammer, F., Baalousha, M., Hofmann, T. 2008. Nanoparticles: structure, properties, preparation and behaviour in environmental media. *Ecotoxicology*, 17, 326-343.
- Colvin, V. L. 2003. The potential environmental impact of engineered nanomaterials. *Nat. Biotechnol.* 21, 1166-70.
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency). Erişim tarihi: Aralık 2009. www.epa.gov.
- Federici, G., Shaw, B.J., Handy, R.D. 2007. Toxicity of titanium dioxide nanoparticles to rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): Gill injury, oxidative stress, and other physiological effects. *Aquatic Toxicology*, 84, 415-430.
- Gagne, F., Auclair, J., Turcotte, P., Fournier, M., Gagnon, C., Sauve, S., Blaise, C. 2008. Ecotoxicity of CdTe quantum dots to freshwater mussels: Impacts on immune system, oxidative stress and genotoxicity. *Aquatic Toxicology*, 86, 333- 340.
- Greenberg, N. Captain Charles Moor. Talks Trash. *The Ocean Issue*, 24. Erişim tarihi Aralık 2009. www.earthisland.org.
- Handy, R.D., Shaw, B.J. 2007. Toxic effects of nanoparticles and nanomaterials: Implications for public health, risk assessment and the public perception of nanotechnology. *Health Risk & Society*, 9, 125-144.
- Hao, L.H., Wang, Z.Y., Xing, B.S. 2009. Effect of sub-acute exposure to TiO₂ nanoparticles on oxidative stress and histopathological changes in Juvenile Carp (*Cyprinus carpio*). *Journal of Environmental Sciences-China*, 21, 1459-1466.
- Jain, K.K. 2010. Advances in the field of nanooncology. *BMC medicine*, 8, 83.
- Jarvie, H.P., King, S.M. 2010. Just scratching the surface? New techniques show how surface functionality of nanoparticles influences their environmental fate. *NanoToday*, 5, 248-250.
- Klaine, S.J., Alvarez, P.J.J., Batley, G.E., Fernandes, T.F., Handy, R.D., Lyon, D.Y., Mahendra, S., McLaughlin, M.J., Lead, J.R. 2008. Nanomaterials in the environment: Behavior, fate, bioavailability, and effects. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 27, 1825-1851.

- Koelmans, A.A., Nowack, B., Wiesner, M.R. 2009. Comparison of manufactured and black carbon nanoparticle concentrations in aquatic sediments. *Environmental Pollution*, 157, 1110-1116.
- Krug, H.F., Wick, P. 2011. Nanotoxicology: An Interdisciplinary Challenge. *Angew.Chem. Int. Ed*, 50, 1260-1278.
- Lead, J.R., Wilkinson, K.J. 2006. Aquatic Colloids and Nanoparticles: Current Knowledge and Future Trends. *Environmental Chemistry*, 3, 159-171.
- Lovern, S.B., Klaper, R. 2006. *Daphnia Magna* mortality when exposed to titanium dioxide and fullerene (C60) nanoparticles. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 25, 1132-1137.
- Lovern, S.B., Strickler, J.R. & Klaper, R. 2007. Behavioral and physiological changes in *Daphnia magna* when exposed to nanoparticle suspensions (titanium dioxide, nano-C-60, and C[60] HxC[70]Hx). *Environmental Science & Technology*, 41, 4465-4470.
- Moore, M.N. 2006. Do nanoparticles present ecotoxicological risks for the health of the aquatic environment? *Environmental International*, 32, 967-976.
- Navarro, E., Baun, A., Behra, R., Hartmann, N.B., Filser, J., Miao, A.J., Quigg, A., Santschi, P.H., Sigg, L. 2008. Environmental behavior and ecotoxicity of engineered nanoparticles to algae, plants, and fungi. *Ecotoxicology*, 17, 372-386.
- Nowack, B., Bucheli, T.D. 2007. Occurrence, behavior and effects of nanoparticles in the environment. *Environmental Pollution*, 150, 5-22.
- Oberdörster, E. 2004. Manufactured Nanomaterials (Fullerenes, C60) Induce Oxidative Stress in the Brain of Juvenile Large-mouth Bass. *Environmental Health Perspective*, 112, 1058-1062.
- Oberdörster, E., Zhu, S.Q., Blickley, T.M., McClellan-Green, P., Hasch, M.L. 2006. Ecotoxicology of carbon-based engineered nanoparticles: Effects of fullerene (C-60) on aquatic organisms. *Carbon*, 44, 1112-1120.
- Oberdörster, G., Oberdörster, E., Oberdörster, J. 2005. Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environ Health Perspect*, 113, 823-39.
- Ramsden J. *Nanoteknolojinin esasları*, ODTÜ yayıncılık. ISBN: 978-605-4362-48-6, Sözkese matbaacılık. Ankara, 2011.
- Ray, P.C., Yu, H. & Fu, P.P. 2009. Toxicity and environmental risks of nanomaterials: challenges and future needs. *J Environ Sci Health C Environ Carcinog Ecotoxicol Rev*, 27, 1-35.
- Scown, T.M., Van Aerle, R., Tyler, C.R. 2010. *Review: Do engineered nanoparticles pose a significant threat to the aquatic environment?* *Critical Reviews in Toxicology*, 40,(7), 653-670.
- Smith, C.J., Shaw, B.J., Handy, R.D. 2007. Toxicity of single walled carbon nanotubes to rainbow trout, (*Oncorhynchus mykiss*): Respiratory toxicity, organ pathologies, and other physiological effects. *Aquatic Toxicology*, 82, 94-109.
- Tedesco, S., Doyle, H., Redmond, G., Sheehan, D. 2008. Gold nanoparticles and oxidative stress in *Mytilus edulis*. *Marine Environmental Research*, 66, 131-133.
- The Royal Society 2004. Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties. Report by the Royal Society and The Royal Academy of Engineering. Erişim tarihi: Ocak 2012. http://brage.bibsys.no/uis/bitstream/URN:NBN:no-bibsys_brage_20606/1/Busk,%20Siw%20Anette.pdf.
- Tian, B., Zheng, X., Kempa, T.J., Fang, Y., Yu, N., Yu, G., Huang, J., Lieber, C.M. 2007. Coaxial silicon nanowires as solar cells and nanoelectronic power sources. *Nature*, 449, 885-9.
- Tratnyek, P.G., Johnson, R.L. 2006. Nanotechnologies for environmental cleanup. *Nano Today*, 1, 44-48.
- U.S. National Nanotechnology Initiative. "Benefits and Applications" <http://www.nano.gov/you/nanotechnology-benefits>. Erişim tarihi: Nisan 2011.
- Wickline, S.A., Neubauer, A.M., Winter, P., Caruthers, S., Lanza, G. 2006. Applications of nanotechnology to atherosclerosis, thrombosis, and vascular biology. *Arteriosclerosis, thrombosis, and vascular biology*, 26, 435-41.
- Wigginton, N.S., Haus, K.L., Hochella, M.F. Jr. 2007. Aquatic environmental nanoparticles. *Journal of Environmental Monitoring*, 9, 1306-1316.