



## Nanoatıklar ve çevre: Atık yönetiminde yeni bir yaklaşım

### Nanowastes and environment: A new approach in waste management

Merve ÖZKALELİ<sup>1</sup>, Ayça ERDEM<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, Türkiye.  
merveozkaleli@akdeniz.edu.tr, ayerdem@akdeniz.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 18.08.2014, Kabul Tarihi/Accepted: 12.02.2015  
\* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2015.52207  
Derleme Makalesi/Review Article

#### Öz

Doğada yaygın olarak bulunan nanopartiküller (NP'ler), günümüzde çeşitli alanlarda kullanılmak üzere sentezlenmekte ve kullanım alanlarına uygun olacak şekilde fiziksel ve kimyasal özellikleri değiştirilmektedir. Özellikle son 20 yılda, NP ve nanoürünlerin üretim ve kullanım alanının artmasına paralel olarak atık miktarında da hızlı bir artış olduğu düşünülmektedir. NP'lerden kaynaklanan atıklar üretimden tüketimine kadar birçok aşamada atık olarak alıcı ortamlara deşarj edilmektedir. Ancak söz konusu nanoatıkların miktar ve özelliklerinin alıcı ortamlardaki etkilerinin net olarak belirlenememesi nedeniyle henüz geleneksel atık yönetimi kapsamında verimli bir şekilde ele alınamamaktadır. Nanoatıkların toksik etkilerinin minimuma indirilmesi için etkili ve sürdürülebilir bir çerçevede atık tanımlarının yapılarak gerekli plan ve uygulamaların gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, uluslararası atık yönetmelikleri göz önünde bulundurularak nanoatıkların tanımı, sınıflandırması ve bertarafına ilişkin öneriler verilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Nanoatık yönetimi, Nanoatıklar, Nanoatık sınıflandırılması, Nanomalzemeler, Nanoteknoloji.

#### Abstract

Naturally occurring nanoparticles (NPs) have been synthesized to be used in many sectors, and their physical and chemical properties have been modified for intended usages. Especially in the last 20 years, in parallel with an increase in production and application of NP and nanoproducts, a rapid increase in the amount of waste has been considered. Wastes occurred from production to consumption of NPs at several stages are discharged into the receiving environment. However, nanowastes cannot be discussed efficiently due to the lack of a proper determination of nanowaste quantity and characterization. In order to minimize the toxic effects of nanowastes, within an effective and sustainable framework, waste definition and necessary plans and practices need to be applied. In this study, definition, classification and recommendations on disposal of nanowastes are presented taking into account the existing international waste management legislatives.

**Keywords:** Nanowaste management, Nanowastes, Classification of nanowaste, Nanomaterials, Nanotechnology

## 1 Giriş

Nanoteknoloji, 1-100 nm arasındaki boyutlarda olan nanomalzemelerin özelliklerini inceleyip anlama, kontrol edebilme ve bu teknolojiyi kullanan sistemleri geliştirmek amacıyla uygulanmaktadır. Günümüzde nanoteknolojinin dünya ekonomisine katkısı tartışılmaz durumdadır. Genel amaçlı teknoloji olarak da adlandırılan nanoteknoloji neredeyse tüm üretim ve tüketim sektörlerinde kullanılmaktadır. Doğada bol miktarda bulunabilen nanopartiküller (NP'ler) ile imal edilmiş/tasarımlanmış nanoteknoloji ürünleri ve nanomalzemeler (NM'ler), sahip oldukları işlevsel yapı, şekil, boyut ve reaktivite gibi fiziksel ve kimyasal özellikleri günümüz teknolojisiyle birleştirildiğinde bugün ilaç sanayisinden savunma sanayisine, kişisel ürünlerden yapı malzemelerine kadar her alanda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Süre gelen gelişmelerden sonra nanoteknoloji, nanobilim ve nanomalzeme kavramları günümüzde yaygın bir şekilde kullanılır hale gelmiştir. Ülkemizde de gerçekleştirilen Ar-Ge çalışmaları 19 farklı üniversite, kurum ve kuruluşlarda kurulan nanoteknoloji laboratuvarları ve ürünlerinin kullanımının gelişimini amaçlayan ve çalışmaların her geçen gün geliştiği bir alan haline gelmiştir. Aynı gelişimci politika Vizyon 2023 [1] ve Devlet Planlama Teşkilatının koordinasyonu ile hazırlanan 9. Kalkınma Planı [2] çerçevesinde de oluşturulmuş nanoteknoloji ve ürünlerinin gelecek yıllarda büyük bir gelişme sağlayacağına öngörü çalışmaları gerçekleştirilmiş ve bu alanlara yönelik yatırımların artırılması konusuna dikkat çekilmiştir.

Mart 2006-Ağustos 2009 tarihlerini kapsayan bir envanter çalışmasına göre nanoteknoloji ile üretilmiş 212 adet ürün bulunmaktadır. 2013 verilerine göre ise 30 ülkede, 587 şirket ve 1317 tane nanotabanlı ürün, 2014'ün ilk 2 ayında ise 3 adet yeni ürün ilave girmiş bulunmakta ve böylece toplamda 1798 adet tüketici ürünü olarak piyasada bulunmaktadır [3]. BCC Araştırma grubunun araştırmalarına göre 2012 yılında nanoteknolojiyi kullanarak üretilen ürünlerden elde edilen gelir 20.7 milyar \$ iken 2017 yılında %18.7 birleşik yıllık büyüme oranı ile 48.9 milyar \$ olması beklenmektedir. Gelecek yıllarda ise bu oranın daha da artacağı, nanoteknoloji bazı ürünlerden elde edilecek gelirin trilyonlar mertbesinde olacağı öngörülmektedir [4].

Özellikle üretim teknolojisinde yeni gelişmelere ön ayak olan NP'lerin teknolojiye adapte olup alternatif ve yeni ürünlerin üretim aşamalarında kullanılmasıyla birlikte bilim dünyasında da dikkatleri üzerine çekmiştir. NP'lerin geniş yüzey alanları, kuantum etkileri, biyolojik reaktiviteleri, şekil ve boyut, optik hassasiyet, agrega olma eğiliminde olmaları, fiziksel özelliklerinin değiştirilebilmesi ile birlikte alıcı ortamlarda daha hızlı yayılabileceğine ve zararlı etkilerinin bu sebeplerden dolayı artacağı düşünülmektedir. Bu nedenle Avrupa Birliği (AB) ülkeleri ile diğer gelişmiş ülkelerde nanomalzemelerin olası risklerinin belirlenmesine yönelik araştırma ve mevzuat çalışmaları başlatılmıştır. Mayıs 2011 tarihinde ISO bir teknik rapor yayınlarken, imal edilmiş NM'lerin geliştirilmesi, üretilmesi ve kullanılması sırasında oluşabilecek risklerin belirlenmesi, değerlendirilmesi ve yönetilmesi konularında kurum ve kuruluşlara destek olmayı hedeflemiştir. ISO TR13121 [5] -*Nanotechnologies-Nanomaterial Risk Evaluation*

(Nanoteknolojiler-Nanomateriyal Risk değerlendirmesi) isimli raporda yaşam boyu ürün yönetimi tanımlaması ile imal edilmiş NM'lerin risk profillerini oluşturma amaçlanmaktadır. Ayrıca NM'lerin fiziksel, kimyasal özellikleri ile oluşturabilecekleri tehlike ve maruz bırakma yollarının da belirlenmesi hedeflenmektedir. Bunun yanında hızla ilerleyen nanoteknoloji sektöründe meydana gelebilecek sorunların çözümü için NM'lerin insan ve çevre sağlığı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi raporda önerilmektedir. Rapordaki yönetim modeli, ISO 14001-Çevre Yönetim Sistemi veya ISO 9001-Kalite Yönetim Sistemi ile uyumlu bir şekilde uygulamayı da sağlamaktadır [5].

NM ve NP'lerin çevre ve insan sağlığı üzerindeki olası olumsuz etkilerinin belirlenmesi amacıyla pek çok araştırma gerçekleştirilmekle beraber, söz konusu toksik ve ekotoksik etkilere neden olan mekanizma net olarak açıklanamamıştır. Adams ve diğ. [6], *Bacillus subtilis* ve *Escherichia coli* bakterileri üzerinde yaptıkları çalışmada TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, ve ZnO NP'lerinin bakterilerin aktivitelerini durdurduğunu ve toksik etkiyi arttırdıklarını tespit etmişlerdir. Cheng ve diğ. [7] karbon nanotüplerin zebrafish'in (*Danio rerio*) embriyonik gelişimine etkili bir zararı olmadığını ancak yumurtlama sürecini ertelediğini saptamışlardır. Aruoja ve diğ. [8] CuO, ZnO ve TiO<sub>2</sub> NP'lerin etkilerini mikroalg türü olan *P. subcapitata* üzerinde incelemiş ve toksik etkilerinin olduğunu saptamıştır. Cardinale ve diğ. [9] tatlı su algleri üzerinde yaptıkları çalışmada TiO<sub>2</sub> NP'lerinin alglerin büyüme ve metabolizmalarında önemli değişikliklere neden olduğunu saptamışlardır.

Ülkemizde ve dünya genelinde atıksu arıtma teknolojileri henüz yaygın olarak NP'leri arıtma derecesine ulaşmadığı için ızgara-ön çöktürme-son çöktürme-deşarj yolunu izleyerek alıcı ortamlara ulaşacağı düşünülmektedir [10]. Aynı durum katı atık depolama tesisleri için de geçerli olmakta NP içeren ürünler hiç bir işlemde geçirilmeden direkt olarak atılmakta, tehlikeleri ve bertaraf yöntemleri araştırılmamaktadır [10]. Söz konusu NP'lerin doğal ortamlardaki davranışları ve akıbetleri konusunda oluşan büyük bilgi boşluğu bilim dünyasını kaygılandırmaktadır [11], [12]. Bununla beraber nanoteknolojik faaliyetler sonucu oluşan ve/veya tüketim sonrası açığa çıkan nanoatıkların yönetimine ilişkin henüz yeterli düzeyde çalışma bulunmamaktadır.

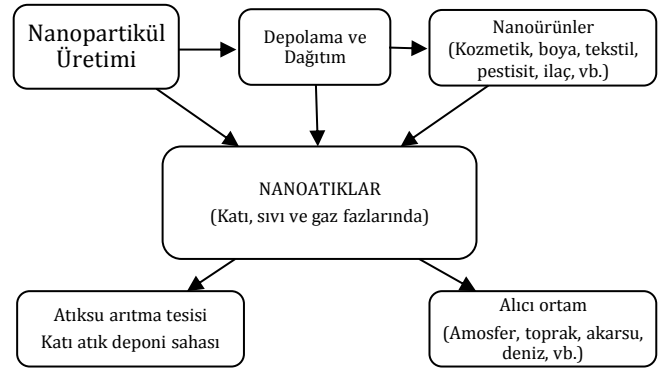
Bu çalışmada nanoatıkların tanımı ve mevcut uluslararası mevzuatlardaki düzenlemeler göz önünde bulundurularak atık yönetimi içinde sınıflandırılması ve bertaraf edilme yöntemlerine ilişkin öneriler sunulmaktadır.

## 2 Nano-Atık yönetimi

### 2.1 Nanoatık kavramı

Son yıllarda dünya çapında NP'ler ve nanoteknoloji ile ilgili birçok yayın ve teknik rapor bulunmaktadır. Ancak eldeki veriler NP'lerin, buldukları ortamlardaki etkilerini ve sonuçlarını tam olarak açıklayamamaktadır. Araştırmaların sınırlı olması ve yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçların yetersiz olması, NP'lerin insan ve çevre sağlığı üzerindeki etkilerinin tam olarak belirlenememesi sebebiyle nanoatık yönetiminin tam anlamıyla yapılmasına engel olmaktadır. Özellikle son 15 yılda, NP ve nanoürünlerin üretim miktar ve hacimlerinin birkaç kilogramdan binlerce tona ulaşması ile dünya genelinde kullanım alanının artmasına paralel olarak NP üretim ve atık miktarında da hızlı bir artış olduğu görülmüştür [13],[14].

Genel tanım olarak tüketicisi tarafından istenmeyen ürünler atık olarak nitelendirilmektedir. *Nanoatık* kavramı ise, nanomalzeme içeren veya en az bir boyutu nano formda üretilmiş sentetik ürünlerin üretim, depolama veya dağıtım sırasında açığa çıkan yan ürünler ile nanomalzemeler ile üretilmiş ömrünü tamamlamış her türlü malzeme bu tanım içerisine girmektedir [15]. Şekil 1'de görüldüğü üzere nanoatıkların meydana geliş halleri ve izledikleri yollar, tipik bir katı atık oluşum ve atıkların bertaraf işlemlerine benzetilebilir. Ancak nanoatığın içeriğinin net bir şekilde belirlenmesi ile nanoatıkların bertaraf ve arıtım aşamalarının doğru bir şekilde yapılması sağlanabilecektir. Dolayısıyla geniş kapsamlı bir nanoatık yönetiminin gerçekleştirilebilmesi için sistematik bir nanoatık sınıflandırma sisteminin belirlenmesi gerekmektedir.



Şekil 1: Nanoatık oluşumu ve nanoatıkların alıcı ortama ulaşmaları sırasında izledikleri yol.

Nanoatığın özelliklerinin tanımlanmasının ardından alıcı ortamdaki davranış ve etkileri belirlenerek en uygun bertaraf işlemi gerçekleştirilmelidir. Ancak bu noktada cevaplanmamış pekçok soru bulunmaktadır. Üretim ve tüketim sonrası kullanımdan kaynaklanan nanoatıkların yanında aynı zamanda direkt olarak alıcı ortamlara karışan herhangi bir atık koluna girmeyen NP'ler de bulunmaktadır. NP'lerin kontrolsüz şekilde alıcı ortamlara karışması kesikli şekilde devam etmekte, alıcı ortamlarda birikime sebep olmakta ve bu durum NP toksisitesini bir miktar daha arttırmaktadır. Bununla beraber NP'lerin alıcı ortam içerisindeki fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak gelişen çeşitli transformasyonlar da (örneğin, agloerasyon, sedimentasyon, çözünme, yüzey özelliklerinin değişmesi gibi) çevresel salınımlarını etkilemektedir [16].

NP'ler için etkili bir atık yönetimi ve sınıflandırma belirlenemez ve kullanım sonucu oluşan atıkların kontrolsüz şekilde depolanmasına devam edilirse yakın gelecekte canlı ortamlarda çeşitli zararlı etkilere sebep olabileceği ve aynı zamanda kaynakları verimsiz hale getirebileceği düşünülmektedir.

### 2.2 Nanoatıkların sınıflandırılması

Nanoatıklar için etkin bir atık yönetimi oluşturulmadığı takdirde uygun koşullarda bertarafı sağlanamayacak ve aynı zamanda söz konusu atıklar yaşam döngüsünün herhangi bir kademesine dahil olabilecek ve toksik etkilere sebep olabileceği yapılan çalışmalar dahilinde tahmin edilmektedir.

Etkili bir atık yönetimi için öncelikle atığın özellikleri ve özelliklerinden dolayı nihai ortamdaki davranışlarının bilinmesi gerekmektedir. Musee [17] nanoatıkları NP özelliklerine göre "az toksik etkiye sahip olan"dan "çok toksik

etkiye neden olacak" şekilde sınıflandırmaktadır (Tablo 1). Yapılan sınıflandırmada atıkların özellikleri ve alıcı ortamlardaki etkilerinin tam olarak bilinmemesine karşılık, nanoatıkların risklerini ortaya çıkarıp risk profillerini oluşturmuşlardır. Yapılan atık sınıflandırması sayesinde nanoatıkların güvenli şekillerde bertaraf edilmesi için uygulanması gereken proseslerin seçimine yardımcı olabileceği düşünülmektedir. Ancak yapılan sınıflandırmaya uygun bir atık yönetimi oluşturabilmek için literatürdeki NP maruziyeti sonucu oluşan toksik ve ekotoksik etkileri destekleyen daha fazla bilgi ve verinin olması gerekmektedir ve aynı zamanda NP'lerin alıcı ortamlardaki etki mekanizmalarının anlaşılması gerekmektedir.

Beş farklı sınıfa ayrılabilen nanoatıkların her biri için risk, maruziyet, bertaraf sırasındaki riskleri ile maruziyet sonucu oluşabilecek etkileri ve nanoatık kaynakları söz konusu çalışmada özetlenmiş ve Tablo 2'de NM içeren bazı nanoürün ve uygulamalarının risk profilleri değerlendirilmiştir. Tablo 2'de ayrıca (son sütun) Ag, TiO<sub>2</sub> ve ZnO NP'lerinin alg kültürleri üzerindeki ekotoksik etkilerinin belirlendiği bir çalışmanın sonuçlarına göre nanoatık sınıflandırması verilmektedir [18]. Bu sınıflandırma sayesinde NP katkılı ürünler için çeşitli sınıflandırmalar yapılarak sürdürülebilir atık yönetiminin gerçekleştirilmesi ve risk haritalarının çıkarılmasına referans olabilecektir. Tablo 2'den görüleceği

üzere uygulama alanlarında kullanılan NP'lerin maruziyetlerinin orta ve yüksek derecede olduğu görülmektedir. Risk açısından orta ve düşük seviyede görülen NP'lerin Musee [17]'ya göre nanoatıklar Sınıf I-III arasında sınıflandırılırken, Erdem [18]'ye göre ise Sınıf II-IV arasında değerlendirilmektedir.

### 2.3 Nanoatıkların bertarafı ve depolanması

Teknolojilerin gelişmesi ve artan tüketici ihtiyaçları ile birlikte NP'lerin öneminin her geçen gün arttığı görülmektedir. Ancak talepteki artış, aynı zamanda üretilen atık miktarını da doğrudan etkilemektedir. NM içeren atıklar katı, sıvı ve gaz fazda bulunabilmektedir. Sıvı fazda bulunan nanoatıklar arıtılmak üzere atıksu arıtma tesislerine gönderilirken, katı fazda nanoatıklar ise herhangi bir ek işlem uygulanmadan deponi sahalarında bertaraf edilmektedir. Benn ve Westerhoff [19], Ag NP'lerinin atıksu arıtma tesislerindeki çamurda adsorbe edilerek biriktirilmesi ve arıtımın kirliliğin faz değiştirmesi temeline dayalı yapılmasını ön gören bir model geliştirmişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre Ag NP içeren çok sayıda tüketici ürünü kullanımına bağlı olarak, çamur içeriğinde beklenenden daha yüksek bir nanoatık konsantrasyonu saptanmıştır. Konsantrasyonun bu denli yüksek olması ancak NP'lerin mevcut özelliklerinin değişmesi ile açıklanabilmektedir.

Tablo 1: Nanoatık sınıflandırması, NP'lerin risk, maruziyet potansiyelleri ve tanımları [17].

Nanoatık Sınıfı	Risk / Maruziyet Durumu	Yorum/Tanım
Sınıf I	NP riski: Toksik olmayan Maruziyet: Düşükten yüksek dereceye	Eğer limit konsantrasyon değerleri aşırsa çevre ve insanoğlu için toksik etkilere sahip olabilmektedir. Özel olarak bertaraf gerektirmemektedir. Risk Profili: Çok düşük
Sınıf II	NP riski: Zararlı veya toksik Maruziyet: Düşükten orta dereceye	Dağıtım, taşınması veya bertarafı sırasında akut veya kronik etkilere sahip olabilir. Bertarafı için en iyi ve en uygun yöntem seçilmelidir. Risk Profili : Düşük
Sınıf III	NP riski: Toksik veya çok toksik Maruziyet: Düşükten orta dereceye	Nano boyutlu kirleticiler için tehlikeli atık yönetimi seçenekleri araştırılmalı ve bertaraf edilmelidir. Risk Profili: Orta
Sınıf IV	NP riski: Toksik veya çok toksik Maruziyet: Ortadan yüksek dereceye	Atıkları sadece özel olarak tasarlanmış alanlarda depolanmalıdır. Risk Profili: Yüksek
Sınıf V	NP riski: Toksik veya aşırı toksik Maruziyet: Ortadan yüksek dereceye	Bertarafı yalnızca özel sistemlerle gerçekleştirilmelidir. Eğer özel sistemler uygulanmazsa çeşitli nanokirilliklere sebep olabilmektedir. Risk Profili: Çok yüksek

Tablo 2. NM içeren bazı nanoürün ve uygulamalarının risk profilleri [17],[18].

Uygulama	NM	Risk	Maruziyet	Bertaraf Sırasındaki Risk	Potansiyel Nanoatık Sınıfı	Ekotoksik Verilere Göre Belirlenen Nanoatık Sınıfı
Kişisel bakım ürünleri	Ag	Orta	Yüksek	Orta	Sınıf II/Sınıf III	Sınıf III
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Orta	Yüksek	Orta	Sınıf I	Sınıf II
	TiO <sub>2</sub>	Düşük	Yüksek	Düşük	Sınıf I	Sınıf III
Gıda/içecek ürünleri	TiO <sub>2</sub>	Düşük	Orta	Düşük	Sınıf I	Sınıf III
	ZnO	Orta	Orta	Orta	Sınıf II/Sınıf III	Sınıf III / Sınıf IV
Güneş koruma ürünleri	ZnO	Orta	Yüksek	Düşük	Sınıf II/Sınıf III	Sınıf III / Sınıf IV
	TiO <sub>2</sub>	Düşük	Yüksek	Orta	Sınıf I	Sınıf III
Cilalama ürünleri	TiO <sub>2</sub>	Düşük	Yüksek	Düşük	Sınıf I	Sınıf III
	ZnO	Orta	Yüksek	Orta	Sınıf II/Sınıf III	Sınıf III / Sınıf IV

Yine aynı çalışmada Ag NP atığını içeren çamurun tarımsal faaliyetlerde gübre veya kompost olarak kullanılmasını önermişlerdir. Böylece atık daha zararsız bir forma dönüştürülmüş ve aynı zamanda toksik etkileri yok edilerek toprak iyileştirici madde olarak kullanımı öngörmüşlerdir. Limbach ve diğ. [20] CeO<sub>2</sub> kullanarak gerçekleştirdikleri çalışma ile NP'lerin büyük bir çoğunluğunun adhezyon prosesi ile Jarvie ve diğ. [21] SiO<sub>2</sub> NP'lerinin flokülasyon prosesi sonrası NP'lerin atıksu arıtma tesislerinden arıtılabileceğini ortaya çıkarmışlardır. Ancak arıtma tesisine gelen NP'lerin önemli bir kısmının da aynı zamanda kayba uğradığını ortaya çıkarmışlardır.

Literatürdeki çalışmalardan özetle, NP içerikli atıklar birçok proses sonrası atıksu arıtma tesislerine ulaşabilmekte ancak bunların bir kısmı atıksu arıtma tesislerinde çamur yapısına girme mantığına dayanarak sıvı formdan ayrılmakta, önemli bir kısmı ise arıtılmadan direkt alıcı ortamlara deşarj edilmektedir. Kaynağı belli olan ve taşınımları sonucunda atıksu arıtma tesislerine ulaşan NP atıklarının yanı sıra kaynağı belli olmayan ve hiçbir arıtım sürecine dahil olmayan NP'lerin atıklarının da önemli bir zarar kaynağı olduğu düşünülmektedir. NP'lerin katı atık olarak depolandığı takdirde de benzer şekilde zararlı ve toksik etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Katı NP atıkları deponi alanlarına depolandıklarında hem toprak ekosistemi için hem de su kaynakları açısından önemli bir tehlike kaynağı oluşturabilmektedir [15],[22],[23].

#### 2.4 Nanoatıklar ile ilgili yasal düzenlemeler

Dünya çapında, teknolojinin ilerlemesi ve teknoloji ürünlerine artan talepler sonucunda NP üretim miktarındaki hızlı yükselme, atık miktarındaki artış beraberinde atık yapısında ciddi bir çeşitliliği getirmektedir. Ülkemizde atık yönetimi için çeşitli mevzuatlar ve yönetmelikler bulunmakta ancak bunların hiç biri nanoatıkları kapsamamaktadır. Bununla beraber Avrupa Birliği, Amerika ve diğer pek çok ülkenin çevre ve atık mevzuatlarında da benzer şekilde herhangi bir düzenleme bulunmamakta ancak sağlık ve çevre ile ilgili olan yasal düzenlemelerde NP'lere ve dolaylı olarak atıklarına yer verilmiştir.

İlk olarak, AB Çevre ve Sağlık Aksiyon Planı (The European Union Environment and Health Action Plan, 2004-2010) ve AB 67/548/EEC yönetmeliğine adapte edilen REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemical substances) teklifinde imal edilmiş NP'ler ile ilgili olası zararlarının incelenmesine yönelik çalışmalara hız verilmesine değinilmiştir [24]. Daha sonra AB Komisyonları, 2005 yılında "Nanobilim ve Nanoteknolojiler: Avrupa için Aksiyon Planı (Nanosciences and nanotechnologies: an Action Plan for Europe 2005-2009, COM(2005)243" yürürlüğe koymuştur. Bu planın "c" bendinde nanobilim ve nanoteknolojilerin, özellikle imal edilmiş NP'lerin insan ve çevre sağlığına yönelik potansiyel etkilerinin toksikolojik ve ekotoksikolojik çalışmalarla belirlenmesi, NP'lerin etkilerinin izlenebilmesi ve en aza indirilebilmesi için uygun metot ve cihazların uygulanması esas gösterilmiştir [25].

ABD'nin Bilim ve Teknoloji Politikaları Bürosu, Yönetim ve Bütçe Bürosu'na bağlı Bilgi ve Düzenleme Birimi ile Ticaret Temsilcilik Bürosu'nun Haziran 2011'de ilan ettiği genelgede nanoteknolojik faaliyetlerin düzenlenmesi ile ilgili temel ilkeler açıklanmıştır. Buna göre; ekonomiyi büyüme, risk yönetimi ve bilimsel faaliyetlerin birlikte teşvik edilmesi ve yürütülmesi sırasında halk sağlığının korunması ile çevresel güvenliğin

sağlanması öncelikler arasında olması gerekliliği öne sürülmüştür. Bununla birlikte, bilimsel olarak kanıtlanmamış nanoteknolojik ürünlerin faydaları ile risklerinin tam olarak belirlenmesi gerektiği bildirilmektedir. Raporda ayrıca A.B.D. Hükümetine bağlı bir çalışma grubunun NM'ler ile ilgili terminolojinin tamamlanması ve yasal düzenlemelerin oluşturulması için Çevre Koruma Ajansı (EPA) ile birlikte çalışmalara başlayacağı da verilmektedir [26].

ABD Gıda ve İlaç İdaresi (FDA) Haziran 2011'de hazırladığı taslak çalışmayı, FDA-lisanslı ürünlerde uygulanacak nanoteknolojik uygulamaların yönetsel durumları, verimlilikleri veya halk sağlığı yönünden olası tehlikelerinin belirlenebilmesi için endüstriyel kurum ve kuruluşlara bildirilmiştir. Taslakta NM veya nanoteknoloji terminolojileri net bir şekilde tanımlanmamakla birlikte, taslak ABD Hükümetinin "malzemenin en az bir boyutunun nano ölçekte olması veya malzemenin gelişmiş özellikler göstermesi" yaklaşımı ile daha uyumlu olduğu görülmektedir. Ayrıca FDA, gelişmiş özelliklerini değerlendirmek amacıyla malzemelerin incelenmesi sırasında göz önünde bulundurulması gereken boyutun en fazla 1000 nm olması gerektiğini önermektedir [27]. Haziran 2014'te yayınlanan final raporunda ise 2001 yılında yayınlanan rapora ek olarak FDA ürünlerine özel, pazarlama öncesinde nanoteknoloji uygulamalarını içeren ürünlerde davranış ve özelliklerini daha net belirlemek amacıyla gereklilikleri belirlenmiştir. Böylece üretimin, düzenleme sınıflandırmaları, güvenlik ve geçerlilikleri ya da halk sağlığı üzerindeki etkisi hakkındaki tüm sorulara cevap verilebilir ve yeterli tanımlamaları yapabilir hale gelmiştir [28].

Mayıs 2011 tarihinde ISO bir teknik rapor yayımlanarak, sentezlenmiş NM'lerin geliştirilmesi, üretilmesi ve kullanılması sırasında oluşabilecek risklerin belirlenmesi, değerlendirilmesi ve yönetilmesi konularında kurum ve kuruluşlara destek olmayı hedeflemiştir. ISO TR13121 Nanotechnologies-Nanomaterial Risk Evaluation (Nanoteknolojiler-Nanomalzeme Risk değerlendirilmesi) isimli raporda yaşam boyu/ürün yönetimi tanımlaması ile imal edilmiş NM'lerin risk profillerini oluşturma amaçlanmaktadır. Ayrıca NM'lerin fiziksel, kimyasal özellikleri ile oluşturabilecekleri tehlike ve maruz bırakma yollarının da belirlenmesi hedeflenmektedir. Bunun yanında hızla ilerleyen nanoteknoloji sektöründe meydana gelebilecek sorunların çözümü için bir yol da raporda önerilmektedir. Rapordaki yönetim modeli, ISO 14001-Çevre Yönetim Sistemi veya ISO 9001-Kalite Yönetim Sistemi ile uyumlu bir şekilde uygulamayı da sağlamaktadır [5].

Ülkemizde ise hali hazırda nanoteknolojik faaliyetlerin düzenlenmesine yönelik herhangi bir mevzuat çalışması bulunmamaktadır. TÜSİAD [29] tarafından hazırlanan raporda, nanoteknolojinin dünyadaki gelişimi ve farklı alanlarda Türkiye için yaratabileceği fırsatlara yer verilmiştir. Bunun yanı sıra Türkiye için yeni bakış açıları ve teknolojik gelişmelerin Avrupa normlarına daha kolay uyum sağlanması açısından ülkemize sağlayacağı faydalar değerlendirilmiştir. Ancak söz konusu raporda uygulanması önerilen nanoteknolojik faaliyetlerin çevresel boyutları ile ilgili ulusal bir çevre politikasının geliştirilmesine yönelik bir hedef bulunmamaktadır. Bununla beraber AB'ye uyum aşamasında açılan çevre faslı ile birlikte ülkemizde uygulanmakta olan mevzuat, yönerge ve yönetmeliklerin büyük bir çoğunluğu AB normlarına uygun hale getirilmeye çalışılmaktadır. Ancak gelişmelerin bu kadar hızlı olmasına karşın nanoteknolojik faaliyetler ile ilgili henüz bir düzenleme bulunmamaktadır. AB

REACH yönetmeliğine benzer şekilde Yeni Kimyasallar Politikasını oluşturan "Kimyasalların Kaydı, Değerlendirilmesi, İzni ve Kısıtlanmasına İlişkin REACH Tüzüğü" ile kimyasal maddeler için ayrı bir kayıt mekanizması oluşturulmasına karar verilmiş, kullanımdan kaynaklanan risklerin değerlendirilmesini ise kullanan endüstriye bırakılmıştır [30].

### 3 Tartışma ve sonuç

Atık yönetimi kapsamında değerlendirilen atıkların birçoğunda NP ve NP katkılı malzemeler bulunmakta ancak bu özellikteki nanoatıklar için özel bir bertaraf ve arıtım tekniği uygulanmamaktadır. Geleneksel risk değerlendirme esasları temel alınarak yapılan uygulamaların, nanoatıklar konusunda yetersiz kaldığı görülmekte, dolayısıyla nihai değerlendirmelerin NP'lerin bütün özelliklerinin göz önüne alınarak yapılması gerekmektedir. Nanoatıkların sürdürülebilir atık yönetimi kapsamında değerlendirilebilmesi ancak NP katkılı malzemelerin çevre ve insan sağlığına etkilerinin belirlenmesi ve alıcı ortamdaki akıbet ve yol izlerinin tam olarak anlaşılması ile gerçekleştirilebilecektir. Çünkü bir kez alıcı ortama ulaşan NPler ekosistemdeki en ilkel canlı yapısından en gelişmiş canlı olan insanoğluna kadar kelebek etkisi gibi yayılarak ciddi toksik etkilere sebep olabileceği düşünülmektedir.

Nanoatıkların yönetimine ilişkin alternatif çözümlerin geliştirilebilmesi için öncelikle NP'lerle ilgili yasal düzenlemelerin tamamlanması gerekmektedir. Yasal düzenlemelere temel teşkil etmek üzere NP'lerin yaşam boyu döngü değerlendirmeleri yapılmalıdır. Bu kapsamda öncelikle ulusal ve uluslararası normlara uygun atık sınıflandırması yapılmalıdır. Hali hazırda mevcut yönetmelikler incelendiğinde pek çok NP "yeni madde" kapsamına alınmamakla birlikte, aynı ismi taşıyan ancak nano özellik taşımayan "mevcut maddeler" ile eşdeğer tutulmakta ve fiziko-kimyasal özelliklerinin yanı sıra toksik özellikleri de aynı kabul edilmektedir. Dolayısıyla özellikle sınıflandırma aşamasında önemli sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu sorunun ortadan kaldırılabilmesi için malzeme güvenlik bilgi belgelerinin (MSDS) sıklıkla kullanılan NP ve NM'ler için öncelikli sırada tamamlanması gerekmektedir. Bu kapsamda MSDS'lere özellikle ekotoksik ve toksik etki bilgileri eklenmelidir.

NP veya NM üretim faaliyetlerinin gerçekleştiği yerlerde NP'lerin atık durumuna geçmeden önce üretimin gerçekleştiği faaliyet basamaklarının belirlenmesi gerekmektedir. Her bir basamakta meydana gelebilecek atık durumunun oluşturulacak envanter sisteminde işaretlenmesi, atıkların sınıflandırılması, oluşan emisyonların etkilerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmanın sonunda hammadde-ürün arasında gerçekleşen atık miktarları ile atık yönetiminin ilk aşaması tamamlanmış olacaktır. Sonrasında ürünün dağıtım-taşıma, tüketici tarafından kullanımı, kullanım sırasında oluşan emisyonların belirlenmesi ve atık durumuna gelmesi durumunda atık ayrıştırmasının yapılması gerekmektedir. Söz konusu verilerin ulusal/uluslararası ortak bir veri tabanında toplanması ve NP'lerin veya diğer nanoürünlerin üretim metotlarını daha verimli şekilde çalışan sistemler ile değiştirilmesiyle beraber alternatif çözümler üretilebilecektir. Araştırma faaliyetleri sonucunda elde edilen verilerin yola çıkarak, toksik etkileri fazla olan NP'lerin kullanımını kısıtlanması, nanoatık miktarında ciddi azalmayı beraberinde getireceği düşünülmektedir. Kaynakların verimli kullanımı, sürdürülebilir atık yönetimi ve gelecek kuşaklara temiz ve yaşanılabilir bir çevre aktarabilmemiz için söz konusu

atıklar için uygun arıtma ve bertaraf tekniklerin tespit edilmesi ve geliştirilmesi yönünde çalışmaların hızla yürütülmesi gerekmektedir.

### 4 Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleşmesi sırasında destek veren TÜBİTAK'a teşekkür ederiz (Proje No: 110Y136).

### 5 Kaynaklar

- [1] TÜBİTAK. "Ulusal Bilim ve Teknoloji Politikaları 2003-2023 Strateji Belgesi". Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu, Ankara, Türkiye, 19, 2004.
- [2] Dokuzuncu Kalkınma Planı. "01.07.2006, Resmi Gazete, Sayı: 26215". <http://pbk.tbmm.gov.tr/dokumanlar/%20kalkinma-plani-9-genel-kurul.pdf> (05.07.2014).
- [3] Products. "The Project on Emerging Nanotechnologies". <http://www.nanotechproject.org/cpi/products/?sort=-datestamp> (02.07.2014).
- [4] BCC Research "Nanotechnology: A Realistic Market Assessment - NAN031E". <http://www.bccresearch.com/market-research/nanotechnology/nanotechnology-market-applications-products-nan031e.html> (02.07.2014)
- [5] International Organization for Standardization. "ISO/TR 13121:2011 - Nanotechnologies -- Nanomaterial risk evaluation". [http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail.htm?csnumber=52976](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=52976) (05.07.2014).
- [6] Adams KL, Lyon YD, Alvarez JJP. "Comparative eco-toxicity of nanoscale TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> and ZnO water suspensions". *Water Research*, 40(19), 3527-3532, 2006.
- [7] Cheng J. "Effect of carbon nanotubes on developing zebrafish (Danio rerio) embryos". *Environmental Toxicology and Chemistry*, 26(4), 708-716, 2006.
- [8] Aruoja V, Dubourguier CH, Kasemets K, Kahru A. "Toxicity of nanoparticles of CuO, ZnO and TiO<sub>2</sub> to microalgae pseudokirchneriella subcapitata". *Science of the Total Environment*, 407(4), 1461-1468, 2008.
- [9] Cardinale JB, Bier R, Kwan C. "Effects of TiO<sub>2</sub> on the growth and metabolism of three species of fresh water algae". *Journal of Nanoparticles Research*, 14(8), 913, 2012.
- [10] Mueller NC, Nowack B. "Exposure Modeling of engineered nanoparticles in the environment". *Environmental Science & Technology*, 42(12), 4447-4453, 2008.
- [11] Nel A, Xia T, Mädler L, Li N. "Toxic potential of materials at the nanolevel". *Science*, 311(5761), 622-627, 2006.
- [12] Oberdörster, G, Oberdörster E, Oberdörster J. "Nanotoxicology: An emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles". *Environ Health Perspect*, 113(7), 823-839, 2005.
- [13] Woodrow Wilson International Centre for Scholars. "A Nanotechnology Consumer Products Inventory Project on Emerging Nanotechnologies". <http://www.nanotechproject.org/cpi/search-products/> (02.07.2014).
- [14] Li X, Lin Y, Chen H, Roco MC. "Worldwide nanotechnology development: A comparative study of USPTO, EPO and JPO patents (1976-2004)". *Journal of Nanoparticle Research*, 9(6), 977-1002, 2007.
- [15] Musee N. "Nanowastes and the environment: Potential new waste management paradigm". *Environment International*, 37(1), 112-128, 2011.
- [16] Maurer-Jones MA, Gunsolus IL, Murphy CJ, Haynes CL. "Toxicity of engineered nanoparticles in the environment". *Analytical Chemistry*, 85(6), 3036-3049, 2013.

- [17] Musee N. "Nanotechnology risk assessment from a waste management perspective: Are the current tools adequate?" *Human and Experimental Toxicology*, 30(8), 820-835, 2008.
- [18] Erdem A. "TÜBİTAK 110Y136-Metal oksit Nanopartiküllerin Suda Yaşayan Organizmalar Üzerindeki Ekotoksik Etkilerinin Belirlenmesi". Araştırma Projesi Final Raporu, Antalya, Türkiye, 2013.
- [19] Benn TM, Westerhoff P. "Nanoparticle silver released into water from commercially available socks fabrics". *Environmental Science Technology*, 42(11), 4133-4139, 2008.
- [20] Limbach LK, Bereiter R, Müller E, Krebs R, Gälli R, Stark WJ. "Removal of oxide nanoparticles in a model wastewater treatment plant: Influence of agglomeration and surfactants on clearing efficiency". *Environmental Science Technology*, 42(15), 5828-5833, 2008.
- [21] Jarvie PH, Al-Obaidi H, King SM, Bowes MJ, Lawrence, MJ, Drake AF, et al. "Fate of silica nanoparticles in simulated primary wastewater treatment". *Environmental Science and Technology*, 43(22), 8622-8628, 2009.
- [22] Liu WZ, Huang F, Liao YQ, Zhang J, Ren G, Zhuang Z, Zhen J, Lin Z, Wang C. "Treatment of Cr<sup>VI</sup>-Containing Mg(OH)<sub>2</sub> nanowaste". *Angewandte Chemie International Edition*, 47(30), 5619-5622, 2008.
- [23] Liu WZ, Xu XJ, Wang YJ, He Z, Zhuo N, Huang F, Lin Z. "Treatment of Cr(VI)-Containing nanowastes via the growth of nanomaterial". *Chinese Science Bulletin*, 55(4-5), 373-377, 2010.
- [24] The European Commission. "The European Union Environment and Health Action Plan, 2004-2010" European Commission, Final Report, 2010.
- [25] The European Commission. "Nanosciences and Nanotechnologies: An Action Plan for Europe 2005-2009". Commission of the European Communities, Final Report, 2005.
- [26] The White House Office of Science and Technology Policy. "Report to the President on Ensuring American Leadership in Advanced Manufacturing". Executive Office of the President President's Council of Advisors on Science and Technology Report, 2011.
- [27] FDA. "Considering Whether an FDA-Regulated Product Involves the Application of Nanotechnology-Guidance for Industry". FDA, US, 2011.
- [28] FDA. "Considering Whether an FDA-Regulated Product Involves the Application of Nanotechnology-Guidance for Industry". FDA, US, Final Report, 2014.
- [29] ABB. "Avrupa Birliği Bakanlığı-Avrupa Birliği Sürecinde Çevre Fasli". T.C, ABB, Ankara, Türkiye, 64, 2013.
- [30] TÜSİAD. "Nanoteknoloji ve Türkiye". TÜSİAD, İstanbul, Türkiye, 11, 2008.