

Nanoplastiklerin toksik etkileri

Zaib un Nisa Mughal¹, Gülgün Aylaz², Müge Andaç^{*3}

¹University of Sindh, National Centre of Excellence in Analytical Chemistry, Jamshoro, *ORCID:0000-0001-6513-1376*

²Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Nanoteknoloji ve Nanotıp Anabilim Dalı, Ankara, *ORCID: 0000-0003-0900-035X*

³Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Ankara, *ORCID: 0000-0002-0809-1037*

Geliş Tarihi:08.06.2022

Kabul Tarihi:30.06.2022

Özet

Günümüzde plastikler, düşük maliyetli olmaları ve düşük ağırlıkları nedeniyle yaygın şekilde kullanılmaktadır. Plastik kullanımına artan ilgi sebebiyle üretimi her geçen gün artmaktadır. Plastikler genel anlamda kullandıktan sonra atık olarak değerlendirilmekte ve doğa koşullarında fiziksel ve kimyasal yollarla mikroplastik ve nanoplastikler gibi küçük yapılara bölünmektedirler. Fiziksel ve kimyasal etkileşim nedeniyle nanoplastiklere dönüştürülen daha büyük plastikler, nanoplastik üretiminin ikincil kaynağı olarak adlandırılır. Bununla birlikte, nanoplastikler ticari olarak da sentezlenmekte ve bunlara birincil kaynaklar denmektedir. Birincil kaynaklar sıklıkla kişisel bakım ürünlerinde, boyalarda, bir dizi elektronik cihaz üretiminde kullanılmaktadır. Boyutları nedeniyle nanoplastikler, hidrofobik özellikleri, yüzey yükleri, daha hızlı nüfus etmeleri ve taşınmaları gibi özellikleri sebebiyle bazı biyolojik süreçlere dâhil edilmektedir. Özellikle taşınmalarının büyük yapılara göre daha kolay olması sebebiyle birikme ve dolayısı ile toksik etkiye sebep olmalarının önüne geçmek amacıyla daha uzun moleküler zincir düzenlemeleri son yıllarda araştırılmaktadır. Nanoplastiklerin nasıl bir etkiye sahip olacağı büyük ölçüde hareketliliğine, esnekliğine, topaklanma durumundaki kararlılığına bağlıdır. Bu özellikler nanoplastikleri daha toksik hale getirir ve sadece insanlarda sağlık sorunlarına neden olmakla kalmayıp aynı zamanda deniz biyotasını ve karasal türleri de etkilemektedir. Diğer nanomalzemeler gibi, nanoplastikler üzerindeki araştırmalar teknolojiye sınırlamalar nedeniyle derin araştırmalar gerektirmektedir.

Anahtar Kelimeler: Nanoplastik, Nanoplastik taşınımı, Toksik etki

Toxic effects of nanoplastics

Abstract

Plastics are widely used today due to their low cost and low weight. Due to the increasing interest in the use of plastic, its production is increasing day by day. Plastics are generally evaluated as waste after use and divided into small structures such as microplastics and nanoplastics by physical and chemical means under natural conditions. Larger plastics that are converted into nanoplastics due to physical and chemical interaction are referred to as the secondary source of producing nanoplastics. However, nanoplastics are also commercially synthesized and called primary sources. Primary sources are often used in the manufacture of personal care products, paints, and a range of electronic devices. Due to their size, nanoplastics are included in some biological processes due to their hydrophobic properties, surface charges, faster penetration and transport. Longer molecular chain arrangements have been investigated in recent years in order to prevent accumulation and thus toxic effects, especially since their transport is easier than larger structures. The effect of nanoplastics largely depends on their mobility, flexibility, and stability in the agglomeration state. These properties make nanoplastics more toxic and not only cause health problems in humans but also affect marine biota and terrestrial species. Like other nanomaterials, research on nanoplastics still requires deep research due to limitations in technology.

Keywords: Nanoplastic, Nanoplastic transport, Toxic effect

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Müge Andaç, andac@hacettepe.edu.tr.

Künye Bilgisi: Mughal, Z.N., Aylaz, G., Andaç, M. (2022). Nanoplastiklerin toksik etkileri. *Artibilim: Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(1), 51-59. **Doi: 10.55198/artibilimfen.1127541**

1. Giriş

Plastikler, Uluslararası Saf ve Uygulamalı Kimya Birliği (The International Union of Pure and Applied Chemistry, IUPAC) tarafından "performansları iyileştirmek ve/veya maliyetleri azaltmak için başka maddeler içerebilen polimerik malzeme" olarak tanımlanmaktadır. Plastikler, esneklikleri sayesinde çok sayıda şekil ve boyutta katı nesnelere kalıplanabilen çok çeşitli sentetik ve yarı sentetik organikler oluşturmaktadırlar [1].

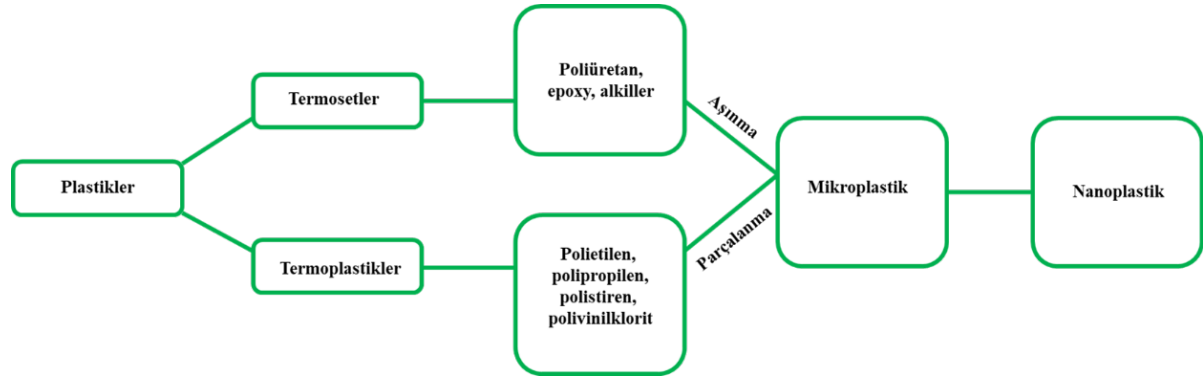
Plastik üretimi son 30 yılda sürekli artış göstermektedir. 2018 yılında 360 milyon tonun üzerinde plastik malzeme üretilmiş olup plastik polimerler günlük hayatımızdan profesyonel amaçlı kullanımlara kadar çok çeşitli uygulamalar için tercih edilmektedirler [2]. Bununla birlikte, plastik atıkların yalnızca %21-26'sı uygun şekilde geri dönüştürülmekte ya da parçalanmaktadır. Geri kalan plastik atıklar açık ocaklarda yakılmakta veya çevreye atılmaktadır. Bu atıklar su, hava, toprak vb. ortamların plastik kirliliğine maruz kalmasına yol açmaktadır [3]. Mikroplastiklerin (MP'ler) ve nanoplastiklerin (NP'ler) keşfi, hidrofobiklik, yüzey yükleri, daha uzun moleküler zincir düzenlemesi, daha yüksek spesifik yüzey alanı, renk, çeşitli fonksiyonel grupların varlığı, boyut ve şekil çeşitliliği gibi benzersiz özellikleri nedeniyle bilimsel araştırmalar yeni alanların açılmasını sağlamıştır [4]. Karbon nanomalzemeler ve metal nanomalzemeler gibi diğer nanomalzemelerle karşılaştırıldığında, nanoplastik araştırmaları henüz emekleme aşamasındadır. Teknolojinin sınırlaması nedeniyle, mikroplastiklerin nanoplastiklere bozunma süreçleri ve bozunma oranları henüz net değildir. Ancak bozunma süreçlerinin durmayacağı ve mikroplastiklerden nanoplastikler oluşturmaya devam edeceği kesindir [5]. Plastik üretimi sırasında kullanılan katkı maddeleri konusunda büyük bir endişe vardır. Katkı maddeleri esas olarak plastikleştirici, stabilizatör ve bromlu alev geciktirici olarak kullanılmaktadırlar. Ayrıca plastiğin bozunma süresinin artmasına katkıda bulunarak çevrede kalıcılıklarını sürdürebilir, deniz ortamına sızarak biyotaya ulaşabilir hale gelebilmektedirler. En yaygın olarak kullanılan katkı maddeleri, bisfenoller [örneğin, bisfenol A (BPA)] ve fitalatlardır [polibromlu difenil eterler (PBDE) ve tetrabromobisfenol A (TBBPA)] [6].

Nanoplastiklerin neden daha riskli olduğu düşünülürse, NP oluşumu parçacığın fiziksel-kimyasal özellikleri, yüzey alanı ve boyutunda değişikliklere yol açmakta, burada nano ölçekte güç, iletkenlik ve reaktivitenin makro/mikro boyutlu parçacıklardan önemli ölçüde farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Plastik parçacığın boyutu küçüldükçe biyolojik reaktiviteleri artmakta, bu nedenle nanoplastik mevcudiyetinin yükünü ve bunun tüm çevre üzerindeki etkisini anlamak da önemli hale gelmektedir. NP'lerin kaderi, hareketliliği ve esnekliği, agrega oluşturmadaki kararlılıklarına ve fizibilitelere büyük ölçüde bağlıdır. NP'lerin agregasyon mekanizması, agregalar çökeldiği veya hareketsiz hale geldiği için kritiktir, oysa dağılmış NP'ler difüze olabilir, daha hareketli oldukları için biyolojik olarak kullanılabilir ve potansiyel olarak daha tehlikeli hale gelebilmektedir. Doğal organik madde (NOM), inorganik kolloidler, hava koşullarına maruz kalma, UV radyasyonu ve biyolojik bozunma, bileşimi, kararlılığı, NP agregatlarının oluşumunu ve partiküllerin nano-spesifik özelliklerini etkileyen faktörlerdir.

Plastikler, sınıflandırma kriterlerinden biri termoset veya termoplastik olmalarıdır. Termoset prosesi, esas olarak termosetleri kararlı ve ayrışması kolay olmayan yeni ve geri döndürülemez kovalent bağlar oluşturmak için ısı kaynaklı çapraz bağlamaya dayanmaktadır. Termosetler poliüretan, epoksi ve alkid içerir ve genellikle yalıtkan, yapıştırıcı ve kontrplak olarak kullanılmaktadırlar. Termoplastiklerin

yeni oluşturulmuş kimyasal bağları yoktur ve geri dönüştürülebilir ve yeniden kalıplanabilir, bu da onları tüketim mallarında termosetlerden daha yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Polietilen (PE), polipropilen (PP), polistiren (PS) ve polivinil klorür (PVC) olmak üzere dört farklı termoplastik türü bulunmaktadır [7].

Termoset plastikler, mekanik aşınma sayesinde mikroplastiklere (<5 mm) dönüştürülebilmektedirler. Bununla birlikte, termoplastiklerin, örneğin biyolojik bozunma, foto bozunma, termo-oksidatif bozunma, termal bozunma ve hidroliz gibi bozunma nedeniyle mikroplastiklere dönüşüm de mümkündür [3]. Mikroplastikler, partikül boyutu 1 nm ile 100 nm arasında olan nanoplastiklere dahi indirgenebilmektedirler. Şekil 1’de plastikten nanoplastiklerin oluşumuna ait şematik özet görülmektedir [5, 8].



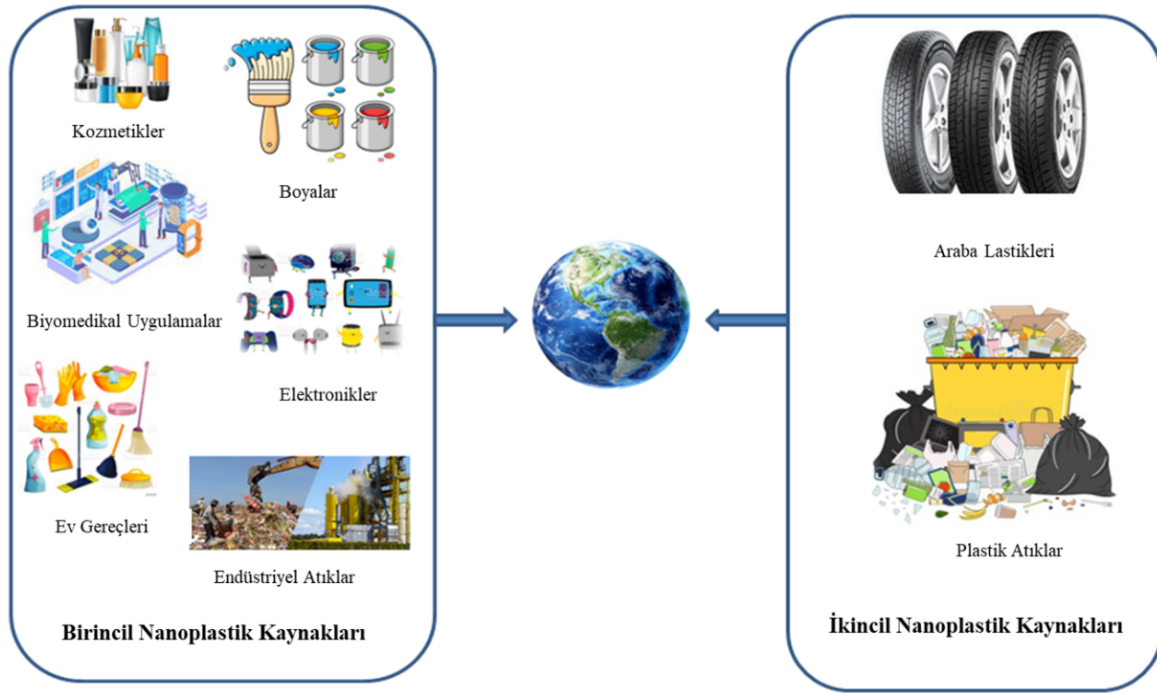
Şekil 1. Plastikten nanoplastiklere dönüştürülme yolları

2. Nanoplastik kaynakları

NP'lerin kaynakları genellikle birincil veya ikincil kaynaklar olarak sınıflandırılmakta ve Şekil 2'de görülmektedir. MP'ler/NP'ler gibi doğrudan mikro/nano boyut aralığında üretilen birincil plastikler [9] ve çevreye kendi ortamlarında girenler grubundadır. Bunlar belirli uygulamalar ve tüketici ürünlerinde kullanılacak özel amaçlarla hazırlanmış orijinal küçük boyutlu malzemelerdir [10]. Birincil NP'ler, tüketici ürünlerinde (örneğin kişisel bakım ürünleri, ilaçlar, tekstiller, gıda ambalajları ve hava filtreleri) belirli işlevler için üretilen plastik nanoparçacıklardır. Tüm birincil NP'ler arasında kozmetik mikro boncuklar en önemlileridir. PE mikro boncuklar içeren ticari yüz fırçalarında NP'lerin varlığı doğrulanmıştır [11]. Tıp endüstrisi aynı zamanda bir birincil NP kaynağıdır, bu sayede küresel plastik nanopartiküller esas olarak intravasküler ilaç dağıtımı için taşıyıcı araçlar olarak kullanılmaktadırlar [12]. Son yıllarda, 3D baskılamanın artan kullanımı göz önüne alındığında, 3D yazıcılardan yan ürün olarak NP'lerin emisyonu dikkat çekmektedir [13]. Giysi yıkama, plastik çay poşetleri, elektronik, biyomedikal ve ilaç ürünleri de çevredeki birincil NP'lerin ana kaynakları olarak görülmektedir.

Nanoplastiklerin Toksik Etkileri

Daha büyük plastiklerin veya diğer ürünlerin parçalanmasıyla üretilen [9] ve makro/mikroplastiklerin bozulmasının bir sonucu ikincil plastikler oluşmaktadır [10]. Çalışmalar ayrıca birincil NP'lerin biyolojik bozunma, hava koşullarına maruz kalma, mekanik aşınma, foto bozunma ve termal oksidasyon yoluyla ikincil NP'lere dönüştürülebileceğini de göstermiştir. Ayrıca, abiyotik ve biyotik ayrışma nedeniyle MP'lerin biyolojik olarak ayrışması veya parçalanması da NP'ler üretebilmektedir. Örneğin, sıradan bir plastik torbanın (0.2 m^2) özgül yüzey alanı, ortalama çapları 40 nm olan NP'lere tamamen ayrıştıktan sonra 2600 m^2 olacaktır. Benzer şekilde, başka bir çalışma, polietilen MP'lerin (ticari bir yüz ovma işleminden çıkarılan) geniş bir kesme kuvveti uygulanarak NP'lere parçalanabileceğini bildirilmiştir. MP'lerin ve birincil NP'lerin bozunması, moleküler ağırlıklarını önemli ölçüde azaltabilir ve deniz ve kara biyotasında biyoyararlanımlarını iyileştirebilmektedir. İkincil NP'ler sonunda su ortamına yüzey sel, hava, kanalizasyon deşarjı ve diğer yollarla girmekte, böylece su ortamına potansiyel zararı tetikleyebilmektedir [4, 13].



Şekil 2. Birincil ve ikincil nanoplastik kaynakları

3. Nanoplastiklerin çevresel etkisi

3.1. Nanoplastiklerin deniz ve su yaşamı üzerindeki etkisi

Deniz ortamındaki nanoplastiklerin kaynakları esas olarak karatabanlı girdiler, su ürünleri yetiştiriciliği ve balıkçılık ile kıyı turizmidir [5]. Birincil ve ikincil nanoplastiklerin suda birikmesi, maruz kalan omurgasızların ve bunlara dayanan daha yüksek trofik seviyelerden canlı türlerinin sağlık durumu için bir tehdit oluşturmaktadır. NP'lerin özellikleri ve çevresel su çözümü grubu, NP'lerin suda birikme veya süspansiyon haline gelmesine kadar kümelenmesini tetiklemekte ve farklı organizma seviyeleri üzerinde farklı etkilere neden olmaktadır. Kümelenme, iki parçacığın birbiriyle çarpışması ve ardından birbirine bağlanması anlamına gelir. Ek olarak, kümelenme, ortamdaki parçacıkların kaderini büyük ölçüde belirleyen bir faktördür. Su kimyası, NP'lerin çevresel kaderinin sadece kendi fiziksel ve kimyasal özellikleri (boyut, yapı, bileşim vb.) tarafından kontrol edilmediğini, aynı zamanda doğal su bileşenlerinden de bir dereceye kadar etkilendiğini göstermektedir. Bazı çalışmalar pH, zeta potansiyeli ve doğal organik madde (NOM) gibi sulu çözeltilerin özelliklerinin tatlı su ortamlarında NP birikimini değişen derecelerde etkileyebileceğini göstermektedir [14]. Deniz ortamında mikro ve nanoplastiklerin varlığı, biyotayı ve çevreyi diğer yollarla etkileyebilir. Daha küçük plastikler (hem mikro hem de nanoplastikler) yüksek yüzey alanına sahiptir. Bunlar deniz ortamından hidrofobik maddeleri, yani genel ifade ile polisiklik aromatik hidrokarbonları (PAH'ler) absorblamaktadır. Bu PAH'lara örnek olarak poliklorlu bifeniller (PCB'ler), dikloro difeniltrikloro etan (DDT), polibromlu difenil eterler (PBDE'ler) ve perflorooktanik asit (PFOA) gibi kalıcı organik kirleticiler (POP'lar) verilebilmektedir. Ayrıca metaller, LDPE, HDPE ve PP plastik döküntülerinin PCB'ler ve PAH'lar gibi kimyasal kirleticiler için büyük bir afiniteye sahip olduğu bulunmuştur. Bu kirleticileri absorblama ve katkı maddelerini salma yeteneği, mikro (nano) plastiklerin bu kirleticileri biyotaya aktarma olasılığını etkilemektedir [6].

NP'ler bakteri, alg, eklem bacaklılar, derisidikenliler, çift kabuklular, rotiferler ve balıklar dahil olmak üzere çeşitli tropik seviyelerdeki organizmaları etkilemektedir. NP'lerin dokularda biyobirikimi, büyüme ve üreme üzerindeki etkileri, bağışıklık sistemine verdiği zararlar, nörotoksite ve metabolizma yollarındaki değişiklikler (özellikle lipit metabolizması) bu alandaki birkaç önemli endişe kaynağıdır [15, 16]. Analitik sınırlamalar nedeniyle, su ortamındaki NP'leri ölçmek için yöntemler hala geliştirme aşamasındadır; bu nedenle, su kaynaklarında bulunan NP konsantrasyonlarının olumsuz etkilere neden olmak için yeterli olup olmadığını iddia eden tartışmalar mevcuttur. Bununla birlikte, çeşitli kaynaklardan salınmaları ve parçalanmaları nedeniyle, su ortamındaki NP konsantrasyonunun, MP'ler için bildirilenlerden 1014 kat daha yüksek olabileceği tahmin edilmektedir [13].

3.2. Nanoplastiklerin karasal yaşam üzerindeki etkisi

Karasal ortamdaki MP'ler/NP'ler esas olarak su akışı, hayvanlar ve insan faaliyetleri gibi dış kuvvetler tarafından taşınımaya dayanmaktadır. Toprak, herkesin bildiği gibi, karmaşık gözenek yapıları ve zengin biyolojik toplulukları ile ilgili araştırmaları da gerçek doğal ortamdan farklı kılan karmaşık bir ekosistemdir. Modern tarımın gelişmesi, tarımsal membranların ve çamurun yaygın olarak kullanılmasına ve ayrıca sulama yöntemlerindeki değişikliklere neden olarak toprak yüzeyinde bol miktarda MP/NP bırakmaktadır. Ayrıca, topraktaki tarım, hasat ve diğer tarımsal uygulamaların bozulması nedeniyle, yüzeydeki plastik alt katmanlara doğru hareket edebilmekte veya etrafa yayılabilmektedir. Ek olarak, yağmur veya sulama gibi su akışının toprakta yukarıdan aşağıya sızma süreci, MP'lerin/NP'lerin toprak boşlukları boyunca aşağı doğru transfer edilmesini ve nihayetinde muhtemelen yeraltı suyuna karışmasına sebep olmaktadır [9]. Kanıtlar, NP'lerin toprak mikrobiyomunu

Nanoplastiklerin Toksik Etkileri

etkilediğini göstermiştir. C, N ve P döngülerinde yer alan enzimlerin (yani, lösin aminopeptidaz, alkalın fosfataz, β -glukosidaz ve selobiyohidrolaz) aktiviteleri, polistiren NP'lerin eklenmesinden sonra (0.1–1 mg/kg) baskılanadığı değerlendirilmiştir [15].

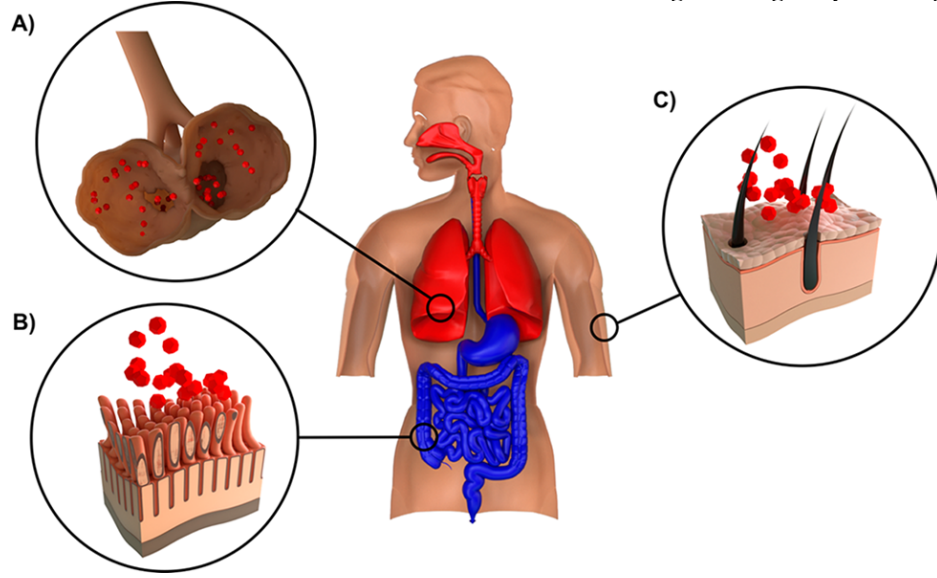
3.3. Nanoplastiklerin insan sağlığına etkisi

Soluma, deriyle temas ve yutma, NP'lerin potansiyel maruziyet yollarıdır (Şekil 3). NP içeren aerosollerin solunması ve NP'lerin kılcal kan sistemine nüfuz etmesi, bu nano boyutlu kirleticinin insan vücudunda dağılmasını sebep olmaktadır [15, 17].

Nanoplastik oluşturan aerosollerini içeren örneklerinde soluma ile maruziyet önemli iken NP içeren yıkama ürünleri ile cilt teması gözenekler aracılığıyla gerçekleşmektedir. NP'lerin ağız yoluyla alınması, çağdaş anlayışa göre, muhtemelen birincil alım yoludur, çünkü NP'lerin parçacıkları, deniz ürünleri tüketimi veya kontamine suların yutulması yoluyla olabilmektedir. Aslında, nanoplastik tüketimi ve birikimi, deneysel koşullar altında, suda yaşayan organizmalardaki trofik nanoplastik miktarı kadarı doğrulanmıştır; bu, NP'lerin besin zincirinde birikme potansiyelini arttırmakta ve sonuç olarak insan toksisitesine neden olmaktadır [18].

Kanıtlar, bu küçük parçacıkların besin zinciri boyunca daha yüksek trofik seviyeli organizmalara veya başka yollarla (deniz tuzu veya hayvan yemi gibi) insan besin zincirine aktarılabilirliğini göstermektedir. Nanoplastiklerin insan vücudundaki taşınması, absorpsiyonu ve toksik etkilerinin araştırılması ve değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Daha yakın zamanlarda, nanoplastiklerin toksik etkileri üzerine yapılan çalışmalar, temel olarak bağırsakta taşınma ve absorpsiyon etkinliğine ve çeşitli model hayvanların dokularında birikimlerine odaklanmaktadır [5]. Çalışmalar, NP içeren aerosollerin solunmasının ve NP'lerin kılcal kan sistemine difüzyonunun insan vücudundaki solunum sistemini bozabileceğini göstermiştir. Örneğin, yapılan bir çalışma, insanın iç mekan havasından günde 272 partiküle kadar havadaki plastik partikülleri soluyabildiğini bildirmiştir.

Aynı şekilde 2,5 μ m'den küçük partiküllerin akciğerlerde kalabileceği ve solunum bariyerini geçebileceği de raporlanmıştır [4]. Ayrıca NP'ler gastrointestinal sisteme girerse; doku iltihabına neden olabilmekte veya potansiyel olarak karaciğerde birikerek mezenterik lenf yoluyla dolaşım sistemine girebilmektedirler. En önemli değişiklikler bağırsak mikrobiyotasında, lipid metabolizmasında ve oksidatif strese gözlenmiştir. Ayrıca, NP'ler ayrıca kan-beyin bariyerini geçerek karides ve balıklarda davranış bozukluklarına neden oldukları bildirilmiştir. Bu nedenle, NP'lerin insanlarda merkezi sinir sistemini etkilemesi mümkündür [11]. İnsan sağlığı, plastik üretim sürecinde kullanılan plastikleştiriciler, pigmentler veya stabilizatörler gibi kimyasal katkı maddelerinin transferinden veya sızmasından da etkilenebilir. Bir sızıntı monomerinin en belirgin örneği, östrojenik aktivitesi nedeniyle insanlarda çeşitli metabolik hastalıkların yanı sıra üreme ve gelişimsel etkiler de dahil olmak üzere olumsuz etkilere neden olabilen BPA'dır [19].



Şekil 3. İnsanların nanoplastiklere maruz kaldığı üç ana yol (A) soluma (B) yutma (C) dermal [18]

4. Sonuç

Nanoplastikler, 1 nm'den 1000 nm'ye kadar değişen boyutlarda su ortamında koloidal özellikler gösteren ve endüstriyel plastik nesnelerin bozunması ya da laboratuvar koşullarında plastik nesnelerin fiziksel ya da kimyasal yöntemlerle parçalanması sonucu meydana gelen materyallerdir.

Bilimsel araştırma grupları doğal numunelerdeki nanoplastiklerin tanımlanması ve özellikle nicelleştirilmesi için yöntemler geliştirmek için yoğun çalışmalar ve sonuçlarına ihtiyaç duymaktadır. Bu nanoplastiklerin tam karakterize edilmeleri ve anlaşılması gereken bazı zorluklar vardır. Örneğin nanoplastiklerde aşınma/bozunma durumu var mıdır, nanoplastik miktarı katkı maddeleri ile orantısız olarak değişmekte mi, ağır metallerin ya da farklı kirleticilerin mevcudiyeti nanoplastikleri etkilemekte midir gibi sorular henüz cevaplanmamıştır.

Makro ve mikro plastiklerle karşılaştırıldığında, nanoplastiklerin boyutları sebebiyle nüfus ve taşınma miktarları/hızları oldukça yüksektir. Dolayısı ile diğer çevre kirleticilerinde olduğu gibi kirleticiye maruz kalan bölgenin ötesinde nanoplastikleri tüm ekosistemin kirleticisi olarak düşünmek gerekmektedir.

Araştırma ve yayın etiği beyanı: Yazarlar bu çalışmada bilimsel araştırma ve yayın etiğine uygun davranıldığını beyan etmektedirler.

Etik kurul onayı: Bu çalışma için etik kurul iznine gerek yoktur.

Yazar katkıları: Tüm yazarlar çalışmanın son halini okumuş ve onaylamıştır. Yazarlar bu çalışmaya eşit oranda katkı sağlamışlardır.

Çıkar çatışması: Bu çalışmayla ilgili olarak yazarların herhangi bir kurum veya kişi ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynakça

- [1] Chang, X., Xue, Y., Li, J., Zou, L., Tang, M. (2020). Potential health impact of environmental micro- and nanoplastics pollution, *Journal of Applied Toxicology*, 40, 4-15.
- [2] Paul, M. B., Stock, V., Cara-Carmona, J., Lisicki, E., Shopova, S., Fessard, V., Braeuning, A., Sieg, H., Böhmert, L. (2020). Micro- and nanoplastics—current state of knowledge with the focus on oral uptake and toxicity, *Nanoscale Advances*, 2, 4350-4367.
- [3] Jiang, B., Kauffman, A. E., Li, L., McFee, W., Cai, B., Weinstein, J., Lead, J. R., Chatterjee, S., Scott, G. I., Xiao, S. (2020). Health impacts of environmental contamination of micro- and nanoplastics: a review, *Environmental health and preventive medicine*, 25, 1-15.
- [4] Ali, I., Cheng, Q., Ding, T., Yiguang, Q., Yuechao, Z., Sun, H., Peng, C., Naz, I., Li, J., Liu, J. (2021). Micro- and nanoplastics in the environment: Occurrence, detection, characterization and toxicity—A critical review, *Journal of Cleaner Production*, 313, 127863.
- [5] Shen, M., Zhang, Y., Zhu, Y., Song, B., Zeng, G., Hu, D., Wen, X., Ren, X. (2019). Recent advances in toxicological research of nanoplastics in the environment: A review, *Environmental Pollution*, 252, 511-521.
- [6] Ferreira, I., Venâncio, C., Lopes, I., Oliveira, M. (2019). Nanoplastics and marine organisms: what has been studied?, *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 67, 1-7.
- [7] Svedin, J. (2020) Photodegradation of macroplastics to microplastics: A laboratory study on common litter found in urban areas.
- [8] Hale, R. C., Seeley, M. E., La Guardia, M. J., Mai, L., Zeng, E. Y. (2020). A global perspective on microplastics, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125, e2018JC014719.
- [9] Huang, D., Tao, J., Cheng, M., Deng, R., Chen, S., Yin, L., Li, R. (2021). Microplastics and nanoplastics in the environment: Macroscopic transport and effects on creatures, *Journal of hazardous materials*, 407, 124399.
- [10] Gonçalves, J. M., Bebianno, M. J. (2021). Nanoplastics impact on marine biota: A review, *Environmental Pollution*, 273, 116426.
- [11] Wang, J., Zhao, X., Wu, F., Niu, L., Tang, Z., Liang, W., Zhao, T., Fang, M., Wang, H., Wang, X. (2021). Characterization, occurrence, environmental behaviors, and risks of nanoplastics in the aquatic environment: Current status and future perspectives, *Fundamental Research*, 1, 317-328.
- [12] Cooley, M., Sarode, A., Hoore, M., Fedosov, D. A., Mitragotri, S. Gupta, A. S. (2018). Influence of particle size and shape on their margination and wall-adhesion: implications in drug delivery vehicle design across nano-to-micro scale, *Nanoscale*, 10, 15350-15364.
- [13] Junaid, M., Wang, J. (2021). Interaction of nanoplastics with extracellular polymeric substances (EPS) in the aquatic environment: A special reference to eco-corona formation and associated impacts, *Water Research*, 201, 117319.
- [14] Zhang, B., Chao, J., Chen, L., Liu, L., Yang, X., Wang, Q. (2021). Research progress of nanoplastics in freshwater, *Science of The Total Environment*, 757, 143791.

- [15] Wang, L., Wu, W. M., Bolan, N. S., Tsang, D. C., Li, Y., Qin, M., Hou, D. (2021). Environmental fate, toxicity and risk management strategies of nanoplastics in the environment: Current status and future perspectives, *Journal of hazardous materials*, 401, 123415.
- [16] Mattsson, K., Jovic, S., Doverbratt, I., Hansson, L. A. (2018). Nanoplastics in the aquatic environment, *Microplastic contamination in aquatic environments*, 379-399.
- [17] Yee, M.S.-L., Hii, L.-W., Looi, C. K., Lim, W.M., Wong, S. F., Kok, Y. Y., Tan, B. K., Wong, C. Y., Leong, C. O. (2021). Impact of microplastics and nanoplastics on human health, *Nanomaterials*, 11, 496.
- [18] Sana, S. S., Dogiparthi, L. K., Gangadhar, L., Chakravorty, A., Abhishek, N. (2020). Effects of microplastics and nanoplastics on marine environment and human health, *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 44743-44756.
- [19] Lehner, R., Weder, C., Petri-Fink, A., Rothen-Rutishauser, B. (2019). Emergence of nanoplastic in the environment and possible impact on human health, *Environmental science & technology*, 53, 1748-1765.