

Mikro- ve Nanoplastiklerin Kişisel Bakım Ürünlerinde Kullanımı ve Toksikolojik Etkileri: Geleneksel Derleme

Use and Toxicological Effects of Microplastics and Nanoplastics in Personal Care Products: Traditional Review

^{1b} Dilan AŞKIN ÖZEK^a, ^{1b} Songül ÜNÜVAR^b

^aFırat Üniversitesi Eczacılık Fakültesi, Farmasötik Toksikoloji AD, Elazığ, Türkiye

^bİnönü Üniversitesi Eczacılık Fakültesi, Farmasötik Toksikoloji AD, Malatya, Türkiye

ÖZET Mikro- ve nanoplastikler, boyutlarına göre sırasıyla 1 µm-5 mm ve 1-1.000 nm arasında değişen sentetik polimer parçacıklarıdır. Bu partiküller, kişisel bakım ürünlerinde (KBÜ) yaygın olarak kullanılmakta olup; peeling, diş macunu, kozmetik ve şampuan gibi çeşitli ürünlerde bulunmaktadır. Birincil mikroplastikler, doğrudan üretim süreçlerinden kaynaklanırken; ikincil mikroplastikler, daha büyük plastiklerin çevresel etkilerle parçalanması sonucu oluşmaktadır. KBÜ kaynaklı mikroplastikler, atık su sistemleri aracılığıyla su ekosistemine karışmakta, deniz canlılarında birikerek besin zinciri yoluyla insan sağlığına yönelik potansiyel riskler oluşturmaktadır. Günümüzde artan mikro- ve nanoplastik kirliliği, insan sağlığı ve ekosistem bileşenleri için ciddi bir tehdit hâline gelmiştir. KBÜ'lerden kaynaklanan mikro- ve nanoplastik maruziyeti; oral, dermal ve inhalasyon yollarıyla gerçekleşmektedir. Diş macunu ve ağız bakım ürünlerinin kullanımı sırasında yutulan mikroplastikler, bağırsak iltihabı ve bağırsak mikrobiyotasının bozulmasına neden olabilmektedir. Dermal yolla uygulanan kozmetik ürünlerde bulunan mikro- ve nanoplastikler, cilt bariyerini aşarak oksidatif stres ve inflamasyonu tetikleyebilmektedir. Solunum yoluyla alınan mikroplastikler ise akciğer dokusunda birikerek solunum hastalıklarını şiddetlendirebilir. Mikro- ve nanoplastik maruziyeti hormonal bozukluklara, üreme toksitesine, sitotoksositeye, deoksiribonükleik asit hasarına ve kanser görülme riskinin artmasına neden olabilir. Mikroplastiklerin plasenta, anne sütü ve kan gibi dokularda tespit edilmesi, bu etkilerin nesiller arası aktarılabilirliğini göstermektedir. Amerika Birleşik Devletleri, Avrupa Birliği ülkeleri, Güney Kore, Kanada ve Yeni Zelanda gibi birçok ülkede, mikrobioncuk içeren KBÜ'lerin üretimine yönelik kısıtlamalar getirilmiştir. KBÜ'de mikro- ve nanoplastik yerine biyolojik olarak parçalanabilen polimerler ve doğal alternatifler önerilmektedir. KBÜ'de bulunan mikro- ve nanoplastiklerin çevre ve insan sağlığı açısından oluşturduğu riskler göz önüne alındığında, bu incelemede hem sürdürülebilir alternatiflerin geliştirilmesinin gerekliliği hem de küresel düzeyde düzenleyici önlemlerin uygulanmasının önemi vurgulanmaktadır.

ABSTRACT Micro- and nanoplastics are synthetic polymer particles that vary in size between 1 µm-5 mm and 1-1,000 nm, respectively. These particles are commonly used in personal care products (PCPs) and are found in various items such as exfoliants, toothpaste, cosmetics, and shampoos. Primary microplastics originate directly from production processes, while secondary microplastics are formed as a result of the breakdown of larger plastics due to environmental effects. Microplastics originating from PCPs enter the aquatic ecosystem through wastewater systems, accumulate in marine organisms, and pose potential risks to human health via the food chain. Today, the increasing micro- and nanoplastic pollution has become a serious threat to human health and ecosystem components. Exposure to micro- and nanoplastics from PCPs occurs through oral, dermal, and inhalation routes. Microplastics swallowed during the use of toothpaste and oral care products can cause intestinal inflammation and disrupt the intestinal microbiota. Micro- and nanoplastics in cosmetics applied dermally can cross the skin barrier, triggering oxidative stress and inflammation. Microplastics taken in through respiration may accumulate in lung tissue and worsen respiratory diseases. Exposure to micro- and nanoplastic may cause hormonal disorders, reproductive toxicity, cytotoxicity, deoxyribonucleic acid damage, and an increased risk of cancer. The detection of microplastics in tissues such as placenta, breast milk, and blood indicates that these effects can be transmitted across generations. In many countries, such as the United States, European Union member states, South Korea, Canada, and New Zealand, restrictions have been imposed on the manufacture of PCPs containing microbeads. Biodegradable polymers and natural alternatives are being recommended in PCPs instead of micro- and nanoplastics. Considering the risks micro- and nanoplastics in PCPs pose to the environment and human health, this review emphasizes both the necessity of developing sustainable alternatives and the importance of implementing regulatory measures on a global scale.

Anahtar Kelimeler: Kozmetikler; plastikler; mikroplastikler; toksisite; cilt emilimi

Keywords: Cosmetics; plastics; microplastics; toxicity; skin absorption

Correspondence: Dilan AŞKIN ÖZEK

Fırat Üniversitesi Eczacılık Fakültesi, Farmasötik Toksikoloji AD, Elazığ, Türkiye

E-mail: daskin@firat.edu.tr

Peer review under responsibility of Journal of Literature Pharmacy Sciences.

Received: 11 Mar 2025

Received in revised form: 24 Jul 2025

Accepted: 21 Aug 2025

Available online: 14 Oct 2025

2630-5569 / Copyright © 2025 by Türkiye Klinikleri. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



PLASTİK TÜKETİMİ: GENEL BİR BAKIŞ

Plastikler; ilaç, kozmetik, tekstil ve cerrahi aletler gibi çeşitli ürünlerde ve bazı ambalaj malzemelerinde temel malzeme olarak kullanılmaktadırlar. Plastikler; dayanıklılık, hafiflik, sızdırmazlık, düşük maliyet, enerji verimliliği ve üretim kolaylığı gibi özelliklerinden dolayı yaygın olarak tercih edilmektedirler. Bu özellikler, plastikleri özellikle tıbbi cihazlar (şırınga, tıbbi infüzyon torbası, tıbbi malzeme ambalajları, protez eklemler, yapay uzuvlar ve doku mühendisliği malzemeleri) ve gıda kapları üretimi açısından uygun bir seçenek hâline getirmektedir. Plastik üretimi son 70 yılda hızla artarak, 1950’li yıllarda 1,7 milyon tondan 2017 yılında 348 milyon tonun üzerine çıkmıştır.¹ Bununla beraber plastiklerin geniş kullanım alanına sahip olmaları, doğada uzun süre bozulmadan kalabilmeleri çevresel kaygılara neden olmuştur.^{2,3} Çevresel etkilere maruz kalan plastik atıklar zamanla mikroplastiklere parçalanmakta; bu partiküller okyanuslara ulaşarak sucul yaşamı tehdit etmekte ve besin zinciri yoluyla karasal ekosistemlere kadar ulaşmaktadır.^{4,5} Birçok araştırma, mikroplastik barındıran yabani balıkların ve çift kabuklu yumuşakçaların tüketilmesi durumunda insan sağlığını tehlikeye atabileceğine dikkat çekmiştir.^{6,7}

Bu nedenle plastiklerin ve mikroplastiklerin insan sağlığı ve ekosistem üzerindeki kısa ve uzun dönemdeki etkilerini anlamaya yönelik yapılan araştırmalar ve sürdürülebilir çözümlerin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

MİKRO- VE NANOPLASTİKLER

Mikroplastikler, çapı 1 µm-5 mm arasında olan, nanoplastikler ise çapı 1-1.000 nm arasında olan çok küçük plastik parçacıklardır. Günümüzde mikro- ve nanoplastikler yaşamın her alanında yaygın kullanılan maddelerdir.³ İnsan popülasyonu, mikro- ve nanoplastiklere beslenme, kozmetik ve kişisel bakım ürünleri (KBÜ), toz partiküllerinin solunması, musluk suyu ve ambalajlı sular, sofraya tuzu, deniz ürünleri ve diğer gıda maddeleri aracılığı ile maruz kalmaktadırlar.⁸ Bu nedenle mikro- ve nanoplastik kirliliği, insan sağlığı ve tüm ekosistem bileşenleri için ciddi bir endişe kaynağı hâline gelmiştir.

Mikroplastik ürünler, üretim kaynaklarına göre ikiye ayrılmaktadır. İlki, tüketici polimer ürünlerinde doğrudan ya da dolaylı olarak ham madde şeklinde kullanılan ve “birincil mikroplastik” olarak adlandırılan gruptur. Birincil mikroplastik; genellikle yüz temizleme ve peeling ürünleri, çeşitli kozmetik ürünler, mikroboncuklar, diş macunları, eksfoliantlar ve aşındırıcılar gibi KBÜ’lerde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bunun yanı sıra endüstriyel süreçlerde (örneğin kumlama), sentetik tekstil, kauçuk malzemeler ve çay poşetlerinin üretiminde de kullanılmaktadırlar. Mikroplastikler, sağlık sektöründe ilaç taşıyıcı ajanlar olarak da önemli bir rol oynar.^{9,10} Birincil mikroplastikler, %52 oranında polietilenden (PE) oluşan renksiz parçacıklardır.¹¹ Daha büyük plastik parçaların, çevresel etkenler ile zamanla parçalanması, çatlaması veya bozunmasıyla “ikincil mikroplastikler” oluşmaktadır.¹⁰ Güncel çalışmalar, birincil mikroplastiklerin en önemli kaynağının kozmetik ve KBÜ olduğunu göstermektedir.

Kozmetik formülasyonlarda, farklı polimerler ve kopolimerler kullanılmaktadır. Günümüzde özellikle polipropilen (PP), PE ve polistiren (PS) peeling, renk verme ya da viskozite ayarlama amacıyla kullanılmaktadır.⁴ Bunun dışında çeşitli mikro- ve nanoplastikler; film oluşturmak ve emülsiyonları stabilize etmek gibi işlevler doğrultusunda tüketici ürünlerine eklenmektedir. Kontrollü kullanımın yanında çevresel kontaminasyon, ambalaj materyalinden salınım veya tedarik zincirindeki plastik kirleticiler (PE tereftalat gibi) nedeniyle de ürünlerde istenmeyen mikro- ve nanoplastiklere rastlanabilmektedir.

Kozmetik ve KBÜ’ler, Avrupa Birliği (AB) düzenlemelerine (EC No 1223/2009) göre “durulanan” ve “üzerinde bırakılan” ürünler olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır.¹² Durulanan diş macunu, yüz ve vücut temizleyicileri dâhil çeşitli kişisel bakım ve kozmetik ürünlerinin atık su arıtma tesislerindeki parça ve küre şeklindeki mikroplastiklerin ana kaynağı olduğu öne sürülmüştür.¹³ Bu mikroplastiklerin, denizde yaşayan canlılarda histopatolojik değişikliklere ve gelişim geriliğine neden olduğu öne sürülmüştür.¹⁴

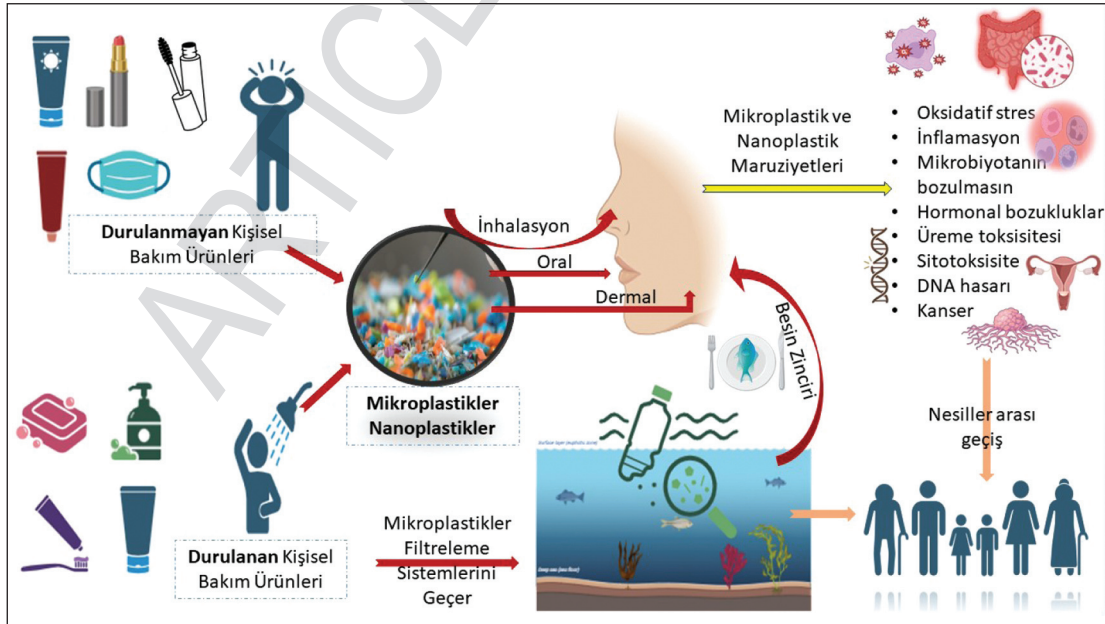
Durulanmayan veya bir süre cilt yüzeyinde kalanlar (güneş kremi, nemlendirici, deodorant, oje ve saç spreyi vb.) ise yutma ve/veya ciltten emilim yoluyla dolaşıma katılmaktadırlar.¹⁵ Epidemiyolojik veriler ve deney hayvanlarından elde edilen kısıtlı sayıda çalışma, mikro- ve nanoplastiklere maruziyet ile obezite, kısırlık ve kanser arasında bağlantı olduğunu göstermektedir.^{9,16} Mikro- ve nanoplastik parçacıklarına maruziyetin, hücresel düzeyde oksidatif stres, sitotoksiste, deoksiribonükleik asit (DNA) hasarı ve inflamasyonu tetiklemesi nedeniyle sindirim, bağışıklık, solunum, üreme ve sinir sistemleri üzerinde olumsuz etkiler oluşturma potansiyeline sahip olduğu düşünülmektedir.¹⁰

Mikroplastiklerin çevrede ve tüketici ürünlerinde yaygın bulunması, insan maruziyetini kaçınılmaz hâle getirmektedir. Ancak bu maruziyetin, insan sağlığı üzerindeki akut ve kronik toksisitesi tam olarak bilinmemektedir. Özellikle KBÜ kullanımına bağlı maruz kalınan mikro- ve nanoplastik miktarı ve insan sağlığı üzerindeki etkilerine ilişkin mevcut bilgiler oldukça sınırlıdır. Bu derlemede, KBÜ kaynaklı mikro- ve nanoplastik maruziyet yollarını, insan vücudundaki potansiyel olumsuz etkilerini ve toksisite mekanizmalarını anlamak ve bu alanda gelecekte ya-

pılacak araştırmalara ve yasal düzenlemelere temel oluşturacak bilimsel bir çerçeve sunmak amaçlanmaktadır (Şekil 1).

KİŞİSEL BAKIM ÜRÜNLERİ İLE MİKRO- VE NANOPLASTİKLERE MARUZİYET

Mikroplastiklerin kozmetik ve KBÜ’de bulunmasına ilişkin çevresel sorun, ilk olarak 1991 yılında Zitko ve Hanlon’un bir yüz peeling ürününün %46’sının PS olduğunu tespit etmesi ile ortaya konulmuştur.¹⁷ Daha sonraki araştırmalarda ise durulanabilir ürünlerde PE mikroplastiklerin varlığı tespit edilmiş olup, bu ürünlerdeki mikroplastik konsantrasyonunun ağırlıkça %6’ya kadar çıktığı gözlenmiştir. 1 mL yüz peeling ürününün 19.000’e kadar mikroplastik parçacığı içerebileceği ve bu parçacıkların, fenantren ve diklorodifeniltrikloroetan (Avrupa’da 1970’li yılların sonunda yasaklanmış ancak çevrede kalıcılığı yüksek bir pestisit) gibi zararlı kimyasalları adsorplayıp taşıyabildiği önerilmiştir.¹⁸ Kozmetiklerde bulunan mikro- ve nanoplastiklere oral yolla, solunum sistemi aracılığıyla veya dermal temas sonucu maruz kalılabilmektedir. Bu parçacıkların, insan sağlığı üzerinde potansiyel olumsuz etkilerinin bulunması, kamuoyu



ŞEKİL 1: Kişisel bakım ürünlerden kaynaklı mikro- ve nanoplastik maruziyetinin toksikolojik etkileri

DNA: Deoksiribonükleik asit

farkındalığının her geçen gün artmasına ve bu alanda yasal düzenlemelerin geliştirilmesinin zorunluluğuna işaret etmektedir.¹⁰

ORAL YOL İLE MARUZİYET

Mikro- ve nanoplastikler, ağız hijyeni uygulamaları için kullanılanlar da dâhil olmak üzere çok çeşitli kozmetik ve kişisel bakım formüllerinde mevcuttur.¹⁹ Örneğin geleneksel diş fırçalarının kılları, mikrobiyal çoğalmayı engellemelerinden dolayı naylon veya termoplastik elastomerden oluşur.²⁰ Diş macunu, diş fırçası, diş ipi ve hizalayıcılar gibi modern diş aletlerinde de yüksek kaliteli plastikler kullanılmakta ve bu ürünlere büyük ölçüde güvenilmektedir. Plastikler, modern diş hekimliğinde hayati işlevlere sahip olsa da rutin diş prosedürleri ve ağız bakımı sırasında mikro- ve nanoplastiklerin istem dışı salınımları, önemli çevre ve sağlık sorunlarına yol açmaktadır.¹⁹ Mikro- ve nanoplastik, ağız biyomu ve gastrointestinal sistem de dâhil olmak üzere insan vücudunun dokuları ve organları için toksik etkilere neden olabilir.^{9,21,22} Diş macunu, diş fırçaları ve diş hizalayıcıları gibi ağız sağlığı bakım malzemelerinde bulunan çeşitli mikro- ve nanoplastik türleri, araştırmacılar tarafından taramalı elektron mikroskopu, Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi [Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)], kızılötesi spektroskopisi ve Raman spektroskopisi gibi ileri düzey tekniklerin yardımıyla tespit edilmiştir.¹⁹ Protyusha ve ark., diş ipinin kullanımı sırasında, ip ile diş yüzeyleri arasında gerçekleşen sürtünme hareketinin mikroplastik parçacıklarının salınmasına neden olabileceğini ve bu durumun insan sağlığı açısından endişe verici olduğunu öne sürmüştür. Aynı çalışmada, ağız gargaralarının 74 milyar parçacık/gün, diş macunlarının 33,4 milyar parçacık/gün, diş tozlarının 22 milyar parçacık/gün ve ağız spreylерinin 0,36 milyar parçacık/gün mikroplastik salınımına neden olduğu gösterilmiştir. Bununla birlikte yıllık mikroplastik maruziyetine ilişkin değerlendirmelerde, diş fırçalarının daha yüksek bir risk oluşturduğu ve ortalama bir bireyin yılda 48.910 mikroplastik parçacığa maruz kaldığı tespit edilmiştir.¹¹ Kişiler, farklı ağız bakım ürünlerini düzenli olarak kullanarak çeşitli seviyelerde mikroplastiklere maruz kalmakta, ancak bu parçacıkların tümü yutulmamak-

tadır. Kullanım sonrası durulanan ürünler, genellikle atık su sistemleri aracılığıyla su kaynaklarına taşınmaktadır. Yine de ağız boşluğunda kalan mikroplastiklerin bir kısmının yutulma ihtimali bulunmaktadır. Bu durum, diş fırçaları gibi ürünlerin doğada bozunma aşamalarında mikroplastik salınımını detaylı bir şekilde değerlendiren araştırmalara duyulan gereksinimi artırmaktadır. Bu bağlamda, ağız hijyenine yönelik ürünlerde mikroplastik kullanımını düzenlemek için katı yasal çerçevelerin oluşturulması gereklidir.¹⁹

İstanbul'da market ve eczanelerde satılan 20 farklı diş macununda mikroskop ve FTIR incelemeleri yapan bir çalışma, PE yapılı mikroboncukların bulunduğunu bildirmiştir. Bu çözünebilir mikroboncukların, insan sağlığı üzerinde tükürük viskozitesinin değiştirerek, periodontal hastalık ve çürük riskini artırabileceği öne sürülmüştür. Ayrıca atık suya karıştığında, suda yaşayan canlılarda potansiyel biyolojik birikime yol açabileceği bildirilmiştir.^{23,24} Oral yolla mikro- ve nanoplastiğe maruz kalan deney hayvanlarında bağırsakta iltihaplanma, bariyer bozulması ve bağırsak mikrobiyotasında değişiklikler gibi çeşitli gastrointestinal toksik etkilere neden olduğu bildirilmiştir.²⁵

Mikroboncuklar, PE, PS veya PP'den oluşan, 1 mm'den küçük katı ve hidrofilik parçacıklardır.¹⁹ Mikroboncuklar gibi diğer mikroplastik formları da sentetik olarak üretilir ve bazı diş macunlarına peeling olarak eklenir. Bu yıkama ürünleri, evsel atıklar yoluyla drenaj sistemine giren kirleticiler gibi davranır. Sonuç olarak bu plastikler, atık su arıtma tesislerinin filtrelerinden bir kısmının kaçması nedeniyle okyanusları kirletmektedir. Bu plastikler ayrışmaz ve suda yaşayan canlılar tarafından tüketilir. Kanalizasyonlar, bu kirleticileri göllere veya okyanuslara iletir ve bunlar, ayrıca plastikle kirlenmiş suyu emen deniz ürünleri veya meyve ve sebzelerin tüketilmesi yoluyla insana ulaşır.²⁶ Mikroplastikler, sucul ekosistemde büyüme geriliği, üreme sorunları ve düşük yaşam oranlarına yol açabilirler. İnsan sağlığı açısından ise obezite, kısırlık, kanser ve diyabet gibi hastalıklarla ilişkilendirilmiştir.^{13,16}

DERMAL YOL İLE MARUZİYET

1990'lı yıllarda ilk defa kısıtlı sayıda tüketicinin kullandığı sıvı plastik-kum sabunları kullanımının de-

nizlerdeki mikroplastik kirliliğine katkı sağladığı öne sürülmüştür.²⁷ Son yıllarda poza taşı, yulaf ezmesi, kayısı veya ceviz kabukları gibi doğal kaynaklı peeling ürünleri yerini mikroplastik peeling katkılı ürünlere bırakmıştır. Artık ortalama her evde mikroplastik içeren bir ürün bulunmakta ve bu ürün, günlük veya en azından haftalık olarak kullanılmaktadır.¹³

Günümüzde, dünya genelinde PE gibi birincil mikroplastikler emülsifikasyon stabilitesi, viskozite düzenlemesi ve cilt düzenlemesi işlevlerini elde etmek için çeşitli KBÜ'lere (diş macunu, şampuan, yüz temizleyici, nemlendirici, kozmetik ve tıraş sıvısı gibi) eklenmektedir. Ayrıca şampuan, göz kalemi, dudak parlaticısı, deodorant ve güneş kremi çubukları da mikroplastik içerebilir. AB ülkeleri, Norveç ve İsviçre'de her yıl kişisel bakım ve kozmetik ürünleri üretiminde katkı maddesi olarak yaklaşık 4.360 ton mikroplastik kullanıldığı tahmin edilmektedir.²⁸ Peeling bileşimlerinin formülasyonunda kullanılan aşındırıcı parçacıklar (PE, PS ve PP) KBÜ'de kullanılabilirken, aynı zamanda emici olarak kozmetiklerde de bulunmaktadır. KBÜ'de mikroplastiklerin varlığı ispatlanmış olsa da nanoplastikler (<100 nm) metodolojik zorluklar nedeniyle daha az çalışılmıştır. Ancak çalışmalar, mikrobuncukların nanoplastiklere parçalanabildiği yüz peelingleri gibi ürünlerdeki varlığını doğrulamıştır.¹⁴ Ayrıca Birleşmiş Milletler Çevre Programı 2015 raporunda, mikro-ve nanoplastiklerin KBÜ'de yaygın kullanımına bağlı hem çevre hem insan sağlığı açısından tehlike yarattığı vurgulanmış ve bu konuda önlemler alınması önerilmiştir.²⁹

Günlük kullanım alışkanlıkları göz önüne alındığında, kişisel bakım ve kozmetik ürünlerinde kullanılan mikroplastik miktarı kişi başına ortalama 2,4 mg/gün olarak hesaplanmıştır. Bu, kişi başına yılda yaklaşık 212 g mikroplastığe, küresel ölçekte ise yıllık yaklaşık 1,53 milyon ton birincil mikroplastik kullanımına denk gelmektedir.^{30,31} Öte yandan yalnızca bir eksfoliant (soyucu) ürün kullanımı sonucunda çevreye 4.594-94.500 arasında mikroplastik salınımı gerçekleşmektedir.¹⁸ Kozmetik ürünlerde bulunan başlıca mikroplastik türü PE'dir. Kalčíková ve ark., kozmetik ürünlerde bulunan PE mikrobuncukların, kişi başına günde ortalama 15,2 mg kadar kanalizasyona salındığını öne sürmüşlerdir.³² Yüz temizleyici-

lerinin %7,1'i, duş jeli ürünlerinin %2,2'si mikroplastik içermektedir. Her yıl duş jellerinden çevreye yaklaşık 39 ton mikroplastik doğaya salınmaktadır.³³ Bu durum, doğrudan çevresel etkiler doğurabilecek ciddi bir kirlilik kaynağıdır. Örneğin kozmetik ve KBÜ kaynaklı mikroplastiklerin, kuzey deniz ortamındaki toplam plastik atık miktarının %0,1-1,5'ini oluşturduğu belirtilmektedir.^{28,34}

Mikro-ve nanoplastiklerin emilimi, parçacıkların boyutuna, cilt bütünlüğüne, maruziyet miktarına bağlıdır. 4 nm'den küçük parçacıklar cilde kolayca nüfuz ederken, 21-45 nm arasındaki nanoplastikler yalnızca atopik dermatit, iktiyozis veya büllöz dermatozlar gibi cilt bariyerinin bozulduğu veya cildin hasar gördüğü durumlarda cilde nüfuz edebilirler.³⁵ Kozmetikler ve cilt bakım ürünlerine, genellikle kremlerin, losyonların ve sabunların kıvamını ve kullanıcı deneyimini geliştirmek için suda çözünen polimerler eklenir. Poliakrilamid, poliakrilik asit, PE glikol, PE oksit ve polivinil alkol gibi sentetik plastikler, suda çözünen polimerler olarak da adlandırılırlar.³⁶ Risk değerlendirmeleri, bu ürünlerin nispeten zararsız olduğunu göstermektedir.^{37,38} Suda çözünen polimerlerin çoğunun, insan sağlığı ve çevre üzerine etkileri zararsız kabul edilse de bozunma ürünlerinin bazen daha tehlikeli ürünler oluşturabileceği göz ardı edilmemelidir (örneğin poliakrilamid). Bu nedenle mikroplastikler için yapılan düzenlemelere biyolojik olarak parçalanmayan suda çözünen plastiklerin dâhil edilmesi ve farklı suda çözünen plastikler için risk değerlendirmelerinin yapılması gerekmektedir.³⁶

Poliakrilik asit, akrilik asidin polimerizasyonu ile elde edilen zayıf anyonik sentetik suda çözünür bir polimerdir. Deterjanlarda, su arıtma sistemlerinde, boyalarda, eczacılıkta ve kozmetik ürünlerde kullanılmaktadırlar. Poliakrilik asit kopolimerlerinin, örneğin PE glikolün daha yavaş bir oranda biyolojik olarak parçalandığı gözlenmiştir ve polimerlerin, artan moleküler ağırlıkla daha yavaş bir oranda parçalandığı bilinmektedir. Yavaş parçalanan suda çözünür polimerlerin, çevreye ulaşırlarsa toprağın üst tabakasında oldukça uzun süreler kalması beklenir, ancak uzun vadeli etkileri tam olarak bilinmemektedir.³⁷ Poliakrilamid, yaygın olarak kullanılan sentetik suda çözünür akrilik polimerdir. Poliakrilamid, atık sudaki ağır metalleri temizlemek için

kullanılan oldukça etkili bir flokülant ve kıvam artırıcıdır. Poliakrilamid, akut olarak toksik olmaması nedeniyle kozmetik ve KBÜ’de kullanım için onaylanmıştır.³⁹

Formüllerinde mikroplastik ve mikroboncuklar içeren fırçalama tozu temizleyiciler, şampuan, yüz makyajı ve balsamlar gibi çok sayıda KBÜ’nün ve nanoplastiklerin dermal bariyeri geçme potansiyelinin olduğu öne sürülmesine rağmen dermal maruziyetin değerlendirilmesine çok az dikkat edilmiştir.⁴⁰ Ayrıca göz farı, maskara, ruj ve kontakt lens gibi ürünlerden gelen mikro- ve nanoplastik mukoza membranlarından geçebilir. *in vitro* çalışmalar, kornea ve konjonktival epitel hücrelerinin PS mikroplastik parçacıklarını absorbe edebildiğini ve mikroplastiklerin hücre çekirdeklerinin etrafında biriktiğini göstermiştir.⁴¹ Bu, doğrudan toksisiteye, iltihaplanmaya/oksidatif hasara ve bağırsak mikrobiyotasında bozulmalara yol açabilir.⁴²

Deney hayvanlarında yapılan çalışmalar, mikro- ve nanoplastiklere dermal yolla maruz kaldıktan sonra emilen partiküllerin rahimde, akciğerlerde ve gastrointestinal sistemde tespit edildiğini göstermektedir.⁴³ Plastik üretiminin 2060 yılına kadar 3 katına çıkması beklenmektedir. Bu etkiler göz önüne alındığında, KBÜ’de mikro- ve nanoplastik kullanımının gelecekte daha önemli sorunlara neden olacağı söylenebilir.

İNHALASYON YOLU İLE MARUZİYET

Sabitleyici pudralar, bronzlaştırıcılar, aydınlatıcılar ve allık gibi ürünler yüz pudraları olarak kabul edilmektedir. Pudralar, mineral veya plastik kökenli çözünmeyen ince partiküller içerir. Pudralardaki mikroplastik içeriklerin konsantrasyonu toplam içeriğin %43,7’sine kadar ulaşabilmektedir.⁴⁴ Parfümlerde, çeşitli koku vericilerde ve deodorantlarda da mikro- ve nanoplastik bulunmaktadır ve bu partiküllere solunum yoluyla maruziyet gözlenebilir. Akciğerlerin alveoler yüzey alanı yaklaşık 150 m²’dir ve 1 µm’den daha az ölçülen çok ince bir doku bariyerine sahiptir. Nanopartiküllerin ince yapısı, bu bariyerin içinden geçip kılcal damarlara geçişine imkân sağlayarak tüm vücuda yayılmasına neden olur.⁴⁵

Koronavirüs hastalığı-2019 salgını sırasında sıklıkla kullanılan, propilen kaynaklı tek kullanımlık

tıbbi maskeler, solunum yoluyla mikroplastik maruziyetine neden olmuştur. Çalışmalar, makyaj ürünleri ve tıbbi maskelerin beraber kullanılmasının hem kozmetik ürün hem de maske kaynaklı mikroplastik maruziyetinin arttığını göstermiştir.⁴⁴ Han ve ark., PS nanoplastiklere inhalasyon yoluyla maruz kalmanın mitokondriyal disfonksiyon, oksidatif hasar, inflamasyon, DNA hasarı ve nekroz süreçlerini tetikleyerek akciğer hastalıklarının patogeneze katkıda bulunabileceğini öne sürmüşlerdir.⁴⁶ Ayrıca farklı bir çalışma, polivinil klorür mikroplastiklerin, mitokondriyal disfonksiyona, reaktif oksijen türleri üretiminin artışına, akciğer septumunda kalınlaşmaya ve akciğer dokusunda inflamatuvar hücre infiltrasyonuna yol açtığını bildirmiştir.⁴⁷ Mikroplastiklerin tekrarlanan inhalasyonunun, akciğer epitel hücrelerinin hücresel hasarı yoluyla akciğerde inflamatuvar yanıtla yol açabileceği gösterilmiştir.⁴⁸ 100 nm mikroküreler formundaki PS mikroplastiklere 35 gün boyunca solunum yoluyla maruz kalan sıçanlarda alveoler epitel hücre yaşlanması ve akciğer inflamasyonu tespit edilmiştir.⁴⁹ Araştırmalar, mikroplastiklerin insan vücudunun çeşitli organlarında, özellikle de akciğerlerde birikim gösterdiğini ortaya koymaktadır. Mikroplastiklerin akciğerlere ulaşması durumunda, akciğer dokusunda ve hücrelerinde hasara neden olabileceği, ayrıca bağışıklık sistemi üzerinde olumsuz etkiler oluşturabileceğini bildirmiştir. Özellikle astım veya kronik obstrüktif akciğer hastalığı gibi prekondisyonel akciğer rahatsızlıkları bulunan bireylerde, mikroplastik maruziyeti ciddi bir endişe kaynağı olabilmektedir. Bu süreçler, mevcut hastalıkların ilerlemesini hızlandırabilir ve ikincil sağlık komplikasyonlarının ortaya çıkmasına zemin hazırlayabilir.⁵⁰

Çevredeki mikro- ve nanoplastik miktarının artışı, inhalasyon yoluyla maruziyet riskini de artırmaktadır. Bununla birlikte KBÜ’nün bu tür maruziyetlere olan katkısı henüz tam olarak bilinmemektedir. Farklı çalışmalar, mikroplastiklerin inhalasyon yoluyla toksisitelerini bildirilmiş olsa da kesin bir kaniye varmak için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.⁵⁰

■ MİKRO- VE NANOPLASTİKLERİN TOKSİKOLOJİK ETKİLERİ

Kozmetiklerde bulunan mikro- ve nanoplastikler; oksidatif stres, inflamasyon ve plastik katkı maddele-

rinden kaynaklanan toksisite yoluyla insan sağığına zarar verme potansiyeline sahiptirler.⁴⁰ Ayrıca KBÜ'deki mikroplastiklerin, cilt yoluyla emilerek akciğerlere ve mide-bağırsak sistemine ulaştığı tespit edilmiştir.⁵¹ Son yıllarda yapılan klinik çalışmalarda, mikro- ve nanoplastiklerin plasenta dokusu, anne sütü ve kan gibi biyolojik örneklerde tespit edildiği bildirilmiştir.⁵²⁻⁵⁴ Çalışmalarında, insan örneklerinde herhangi bir müdahale yapılmaksızın yalnızca mevcut durum ortaya konulmuştur. Bu çalışmalarda, mikroplastiklerin varlığı, FTIR spektroskopisi, Raman mikroskobu ve termooanalitik yöntemler gibi ileri analitik teknikler kullanılarak doğrulanmıştır.⁵²⁻⁵⁴ Bulgular, çevresel mikro- ve nanoplastik maruziyetinin sistemik dolaşıma ulaşabildiğini ve özellikle gebelik ile erken yaşam dönemlerinde potansiyel sağılık riskleri oluşturabileceğini göstermektedir. Bu nedenle mikro- ve nanoplastiklerin, çevresel maruziyet yolları ve biyolojik sistemler üzerindeki toksikolojik etkileri nedeniyle giderek artan bir endişe mevcuttur. Bu derlemede, mikro- ve nanoplastiklerin çeşitli toksikolojik sonuçlarına dair mevcut literatürdeki geniş kapsamlı sonuçlar göz önünde bulundurulmakla birlikte özellikle KBÜ aracılığıyla gerçekleşen maruziyetlerin biyolojik sonuçlarına odaklanılmıştır.

HÜCRESEL ETKİLEŞİM

Mikro- ve nanoplastikler, hücrede birçok yolla absorpsiyona uğrayabilirler. Ana yol, kanal veya taşıma proteinlerinin nanopartiküllerle yapışkan bir şekilde bağlandığı veya hücre zarına inaktif olarak nüfuz ettiği endositotik nanopartikül alımıdır. Klatrin ve kaveola aracılı endositoza ek olarak fagositoz ve makropinositoz dâhil olmak üzere bir dizi başka endositotik yol keşfedilmiştir.⁵⁵ Schirizzi ve ark., mikro- ve nanoplastiklerin ciltle temas ettiğinde epitel hücrelerde oksidatif strese neden olabileceğini *in vivo* olarak göstermişlerdir.⁵⁶ Ayrıca mikroplastiklerin, reaktif oksijen türleri üretimi ile oksidatif strese neden olduğu kanıtlanmıştır. Bu durum, hücresel düzeyde hasara yol açabilmekte ve yaşlanma süreçleri dâhil çeşitli patolojik durumlarda önemli rol oynamaktadırlar.^{57,58} Yapılan çalışmalar, mikroplastiklerin zebra balığı (*Danio rerio*) ve memeli hücre modelleri de dâhil olmak üzere farklı biyolojik sistemlerde, oksidatif stres belirteçlerinin ve antioksidan enzimlerin

ekspresyon düzeylerini artırarak oksidatif strese yol açabileceğini ortaya koymaktadır. Bu bulgular, mikroplastiklerin biyolojik sistemler üzerindeki potansiyel toksik etkilerini anlamak açısından önem taşımaktadır.⁵⁹ Oksidatif stres üzerindeki etkilerini belirlemek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

Yakın tarihli bir çalışma, kozmetik ürünler ve KBÜ'lerden izole edilen 30-300 nm boyutlarındaki PE ve PS nanopartiküllerinin etkilerini, durulanabilen ürünlerin uygulanmasını taklit eden *in vitro* koşullarda incelemiştir. Ultra saf suyla tekrarlanan kültür yıkamalarından sonra bile nanoplastiklerin hücrelerde bulunduğu tespit edilmiştir. Aynı çalışmada, 24 saatlik akut ve 144 saatlik kronik maruziyetler sonrasında, 50-500 µg/mL konsantrasyon aralığındaki nanoplastiklerin hücre proliferasyonunu reaktif oksijen türleri oluşumuna bağlı olarak inhibe ettiği gösterilmiştir.⁶⁰

ÜREME TOKSİSİTESİ

Mikroplastikler, çevremizde yaygın bir şekilde bulunmaktadır. Araştırma bulguları, mikroplastiklerin organizmaların fizyolojik süreçlerine müdahale edebileceğini, üreme ve gelişimsel süreçleri etkilediğini ve organa özgü toksik etkiler yaratabileceğini göstermektedir. Özellikle gebelikte uzun süreli mikroplastik maruziyeti, yavruların büyüme ve gelişim süreçlerini olumsuz etkileyebilir. Bu durum, mikroplastiklerin organizmanın büyüme ve gelişimi üzerinde potansiyel zararlı etkiler doğurabileceğine dair önemli bir gösterge sunmaktadır. İnsanlarda mikroplastik yükünün ise öncelikli olarak annenin çevresel maruziyeti, kirlenmiş gıda ve su tüketimi, solunum yoluyla partikül alımı, toz yutulması ve KBÜ'nün kullanımı gibi çeşitli faktörlerden kaynaklandığı öne sürülmektedir.^{61,62} Oral yolla PS mikroplastiklerine maruz bırakılan farelerde, Ca²⁺/reaktif oksijen türleri/nükleer faktör kappa B sinyal yolu aracılığıyla erken testis yaşlanmasının tetiklendiği ayrıca mitofajiye inhibe ederek, yaşlanan TM4 hücrelerinin sürekli birikmesine yol açtığı gösterilmiştir.⁶³ Ragusa ve ark., Raman spektroskopisi incelemelerinde insan plasentasının tüm kısımlarında mikroplastikler tespit etmişlerdir. Bulunan mikroplastiklerin renkleri dikkat çekicidir. Bu renkli mikroplastiklerin leke kremlemede, fondöten, ruj, maskara ve göz farı gibi kozme-

tik ürünlerinin kullanılması sonucu emildiği ve plasentada biriktiği tespit edilmiştir.⁵² Fetüsün gelişiminin erken dönemlerinde endokrin bozucu rolleri olan mikroplastığe maruz kalınması üreme sisteminde kalıcı fonksiyon bozukluklarına neden olabilir.⁶⁴ Bir diğer endişe verici durum, insan ve inek sütünde mikroplastiklerin bulunmuş olmasıdır.⁶⁵ Mikroplastiklere yenidoğan döneminde maruz kalmanın uzun dönem sonuçları bilinmemektedir. Bir sistematik inceleme, mikroplastiklerin kadın üreme sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerini ortaya koyan deneysel çalışmalara dikkat çekmiş ve mikroplastik maruziyetinin yumurtalık fonksiyonu, doğurganlık, hormon seviyeleri ve embriyo gelişimi üzerinde belirgin olumsuz etkiler yaratabileceğini göstermiştir.⁶⁶

İNFLAMATUAR TEPKİLER

Farelerde, erken dönem PS mikroplastiklere maruziyetin bağırsak bariyerinde hasara ve karaciğer metabolizmasında bozukluklara yol açtığı gözlenmiştir.⁶⁷ Solunum yoluyla mikro- ve nanoplastığe maruz kalmanın, sıçan akciğerlerinde iltihaplanmaya neden olduğu bulunmuştur.⁶⁸ Mikro- ve nanoplastikler, bağırsak veya akciğer bariyerlerini geçerek kardiyak dokuda birikim gösterebilirler. Bu birikimin başlıca kardiyak etkileri arasında anormal kalp ritmi (aritm), perikardiyal ödem ve miyokardiyal fibrozis yer almaktadır. Vasküler sistem üzerindeki etkileri ise hemoliz, tromboz ve kan pıhtılaşma bozukluklarını içermektedir.⁶⁹ Deniz canlılarında da durum, benzer sonuçlar göstermiştir. Deniz ortamındaki mikroplastiklerin, deniz canlılarında inflamasyona neden olduğu gösterilmiştir.⁷⁰ Yakın zamanlı bir sistematik inceleme, mikroplastiklere maruz kalmanın *in vivo* ve *in vitro* inflamatuvar süreçlere katkı sağladığını öne sürmüştür. Aynı çalışma, nanoplastiklerin daha az bilinmesi ancak absorpsiyon yeteneklerinin daha fazla olması nedeniyle nanoplastiklerin rolü konusunda daha fazla dikkatli olunması gerektiğini vurgulamıştır.⁷¹

Mevcut toksisite mekanizmalarının bazıları, doğrudan KBÜ kaynaklı olmasa da mikro- ve nanoplastik insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkilerini hücresel, bağışıklık ve üreme sistemi düzeyinde anlamaya yönelik bulgular; KBÜ kaynaklı mikro- ve nanoplastik maruziyetinin toksisitesi hakkında de-

ğerlendirmeler yapma ve ilgili yasal düzenlemelerin güçlendirilmesi açısından önem taşımaktadır.

KİŞİSEL BAKIM ÜRÜNLERİNDE MİKRO- VE NANOPLASTİK KULLANIMINA DAİR YASAL DÜZENLEMELER

İlk olarak 2015 yılında mikroplastik kirliliğine ilişkin “Amerika Birleşik Devletleri-Mikroboncuksuz Sular Yasası 2015” kapsamında, “mikroboncuk” içeren durulanabilen kozmetik ürünlerin üretimi ve satışına kademeli olarak kısıtlama getirilmiştir. 2017 yılı itibarıyla özellikle peeling ve diş macunu gibi ürünlere kasıtlı mikroplastik eklenmesi tamamen yasaklanmıştır. Gıda ve İlaç Dairesi, KBÜ ve kozmetik ürünlerde mikroplastiklerin kullanımı hakkında özel bir düzenleme henüz yayımlanmamıştır.⁷² Güney Kore, Ekim 2016 tarihinde durulanan ürünlerde ve Şubat 2017 tarihinde diş macunlarında mikroboncukların yasaklandığını duyurmuştur.⁷³ 2017 yılı sonrasında Kanada, İngiltere, Fransa ve Yeni Zelanda gibi birçok ülke mikroplastiklerin kullanımına kısıtlamalar getirmiştir.⁷⁴ Avrupa Kimyasallar Ajansı, Ekim 2023 tarihinde 2023/2055 (CELEX: 32023R2055) metninde çevreyi korumak ve mikroplastik emisyonunu azaltmak amacıyla sentetik polimer mikropartiküllerinin tek başına kullanımı veya kasıtlı olarak karışımlara eklenmesine kademeli olarak sınırlamalar getirmiştir. Bu kapsamda 2023 yılında glitter (parıltı) gibi serbest mikroplastik içeren ürünler yasaklanmış; peeling, duş jeli gibi kozmetik ürünlerdeki mikroplastiklerin 2027’ye kadar kademeli olarak kaldırılması kararı alınmıştır.⁷⁵ Türkiye’de, mikro- ve nanoplastiklerin KBÜ’de kullanımına ilişkin henüz net bir ulusal standart belirlenmemiştir. Ancak AB’deki düzenlemeler ve küresel eğilimler göz önüne alındığında, Türkiye’de de benzer düzenlemelerin gelecekte gündeme gelmesi beklenmektedir.

SONUÇ

Mikroplastikler, nanoplastikler ve plastik mikroboncuklar ilaç, kozmetik ve yaygın kullanılan bileşenlerdir. İnsan sağlığı ve çevre üzerindeki potansiyel riskleri nedeniyle giderek daha fazla dikkat çekmektedir. Özellikle toksikolojik etkilerinin tam olarak ay-

dınlatılamamış olması, bu alandaki araştırmaların önemini artırmaktadır. Bu çalışma, mikro- ve nanoplastiklerin kozmetiklerde eksfoliant, emülgatör ve bağlayıcı madde olarak kullanıldığını ve insan sağlığı ile çevre açısından kısırlık, kanser ve ekosistem bozulması gibi potansiyel riskler taşıdığını ortaya koymaktadır.

Mikroboncukların yasaklanması önerisi, 2015 yılından beri kamuoyu tarafından desteklenmektedir. Ayrıca pek çok ilaç ve KBÜ üreticisi mikroboncuk kullanmayı bırakmıştır. KBÜ'den plastik mikroboncukların uzaklaştırılması, çevre ve insan sağlığı açısından önemli bir adımdır. Mikro- ve nanoplastiklerin insan dokularında ve organlarında birikebildiği, hücre zarlarını geçebildiği ve biyolojik sistemlerde çeşitli olumsuz etkilere yol açabildiği gösterilmiştir. Bu nedenle uzun vadeli toksik etkilerine ilişkin giderek artan sayıda kanıt bulunmaktadır. Ancak mikro- ve nanoplastik maruziyetinin, insan sağlığı üzerindeki toksisite mekanizmalarını ve uzun vadeli sonuçlarını tam olarak ortaya koymak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. Bu alanda araştırmalar devam ederken, bilinen toksik etkileri en aza indirmek için mikro- ve nanoplastik yerine geçebilecek güvenli, sürdürülebilir ve çevre dostu olan yeni alternatif maddeler üretilmelidir. Biyolojik temelli materyaller veya biyolojik olarak parçalanabilir polimerler, geleneksel malzemeler için uygun ve çevre dostu bir alternatiftir. Doğal kaynakların hızla azalması ve plastik atık-

ların yayılması gibi yaygın sorunlara biyolojik temelli ve parçalanabilir maddelerin alternatif olması umut verici çözümler sunmaktadır. Bununla birlikte doğal sert malzemeler (örneğin ceviz kabukları), doğal polimerler (örneğin selüloz ve aljinat) ve biyobazlı ve biyolojik olarak parçalanabilir sentetik polimerler örneğin polilaktik asit ve polikaprolakton alternatif maddeler olarak mikro- ve nanoplastik yerine kullanılması teşvik edilebilir.

Finansal Kaynak

Bu çalışma sırasında, yapılan araştırma konusu ile ilgili doğrudan bağlantısı bulunan herhangi bir ilaç firmasından, tıbbi alet, gereç ve malzeme sağlayan ve/veya üreten bir firma veya herhangi bir ticari firmadan, çalışmanın değerlendirme sürecinde, çalışma ile ilgili verilecek kararı olumsuz etkileyebilecek maddi ve/veya manevi herhangi bir destek alınmamıştır.

Çıkar Çatışması

Bu çalışma ile ilgili olarak yazarların ve/veya aile bireylerinin çıkar çatışması potansiyeli olabilecek bilimsel ve tıbbi komite üyeliği veya üyeleri ile ilişkisi, danışmanlık, bilirkişilik, herhangi bir firmada çalışma durumu, hissedarlık ve benzer durumları yoktur.

Yazar Katkıları

Fikir/Kavram: Dilan Aşkın Özek; **Tasarım:** Songül Ünüvar; **Denetleme/Danışmanlık:** Songül Ünüvar; **Veri Toplama ve/veya İşleme:** Dilan Aşkın Özek; **Analiz ve/veya Yorum:** Dilan Aşkın Özek, Songül Ünüvar; **Kaynak Taraması:** Dilan Aşkın Özek; **Makalenin Yazımı:** Dilan Aşkın Özek; **Eleştirel İnceleme:** Songül Ünüvar.

KAYNAKLAR

1. Plastics Europe. Plastics-the facts 2019: an analysis of European plastics production, demand and waste data. Plastic Europe; 2019. <https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/10/2019-Plastics-the-facts.pdf>
2. Lebreton L, Andrady A. Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. *Palgrave Commun.* 2019;5:6. <https://www.nature.com/articles/s41599-018-0212-7>
3. Khan A, Jia Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. *iScience.* 2023;26(2):106061. PMID: 36818296; PMCID: PMC9929686
4. Lin L, Zuo LZ, Peng JP, Cai LQ, Fok L, Yan Y, et al. Occurrence and distribution of microplastics in an urban river: a case study in the Pearl River along Guangzhou City, China. *Sci Total Environ.* 2018;644:375-81. PMID: 29981986
5. Moore CJ. Synthetic polymers in the marine environment: a rapidly increasing, long-term threat. *Environ Res.* 2008;108(2):131-9. PMID: 18949831
6. Collard F, Gilbert B, Eppe G, Parmentier E, Das K. Detection of anthropogenic particles in fish stomachs: an isolation method adapted to identification by Raman spectroscopy. *Arch Environ Contam Toxicol.* 2015;69(3):331-9. PMID: 26289815
7. Van Cauwenberghe L, Janssen CR. Microplastics in bivalves cultured for human consumption. *Environ Pollut.* 2014;193:65-70. PMID: 25005888
8. Kannan K, Vimalkumar K. A review of human exposure to microplastics and insights into microplastics as obesogens. *Front Endocrinol (Lausanne).* 2021;12:724989. PMID: 34484127; PMCID: PMC8416353
9. Prata JC, da Costa JP, Lopes I, Duarte AC, Rocha-Santos T. Environmental exposure to microplastics: an overview on possible human health effects. *Sci Total Environ.* 2020;702:134455. PMID: 31733547
10. Sangkham S, Faikhaw O, Munkong N, Sakunkoo P, Arunlertaree C, Chavali M, et al. A review on microplastics and nanoplastics in the environment: their occurrence, exposure routes, toxic studies, and potential effects on human health. *Mar Pollut Bull.* 2022;181:113832. PMID: 35716489

11. Protyusha GB, B K, Robin RS, A N, Ineyathendral TR, Shivani SS, et al. Microplastics in oral healthcare products (OHPs) and their environmental health risks and mitigation measures. *Environ Pollut.* 2024;343:123118. PMID: 38092338
12. Kukkola A, Chetwynd AJ, Krause S, Lynch I. Beyond microbeads: examining the role of cosmetics in microplastic pollution and spotlighting unanswered questions. *Journal of Hazardous Materials.* 2024;476:135053. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389424016327>
13. Fendall LS, Sewell MA. Contributing to marine pollution by washing your face: microplastics in facial cleansers. *Mar Pollut Bull.* 2009;58(8):1225-8. PMID: 19481226
14. da Silva LF, Nobre CR, Moreno BB, Pereira CDS, Gonçalves ARN, do Nascimento NSS, et al. Exposure to microplastics contaminated with pharmaceuticals and personal care products: histological effects on *Ucides cordatus*. *Sci Total Environ.* 2024;956:177042. PMID: 39437916
15. Hernandez LM, Yousefi N, Tufenkji N. Are there nanoplastics in your personal care products? *Environ Sci Technol Lett.* 2017;4(7):280-5. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.estlett.7b00187>
16. Rahim NAS, Islahudin F, Abu Tahir N, Jasamai M. Microplastics in cosmetics and personal care products: impacts on aquatic life and rodents with potential alternatives. *Sains Malaysiana.* 2022;51(8):2495-506. <http://doi.org/10.17576/jsm-2022-5108-12>
17. Zitko V, Hanlon M. Another source of pollution by plastics: skin cleaners with plastic scrubbers. *Mar Pollut Bull.* 1991;22(1):41-2. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0025326X9190444W?via%3Dihub>
18. Napper IE, Bakir A, Rowland SJ, Thompson RC. Characterisation, quantity and sorptive properties of microplastics extracted from cosmetics. *Mar Pollut Bull.* 2015;99(1-2):178-85. PMID: 26234612
19. Saha U, Jena S, Simnani FZ, Singh D, Choudhury A, Naser SS, et al. The unseen perils of oral-care products generated micro/nanoplastics on human health. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2025;290:117526. PMID: 39674028
20. Ballini A, Di Cosola M, Saini R, Benincasa C, Aiello E, Marrelli B, et al. A comparison of manual nylon bristle toothbrushes versus thermoplastic elastomer toothbrushes in terms of cleaning efficacy and the biological potential role on gingival health. *Appl Sci.* 2021;11(16):7180. <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/16/7180>
21. Haldar S, Yhome N, Muralidaran Y, Rajagopal S, Mishra P. Nanoplastics toxicity specific to liver in inducing metabolic dysfunction-a comprehensive review. *Genes (Basel).* 2023;14(3):590. PMID: 36980862; PMCID: PMC10048484
22. Saha U, Kumari P, Ghosh A, Sinha A, Jena S, Kirti A, et al. Detrimental consequences of micropolymers associated plasticizers on endocrinal disruption. *Mater Today Bio.* 2024;27:101139. PMID: 39027679; PMCID: PMC11255117
23. Ustabasi GS, Baysal A. Occurrence and risk assessment of microplastics from various toothpastes. *Environ Monit Assess.* 2019;191(7):438. PMID: 31203457
24. Ustabasi GS, Baysal A. Bacterial interactions of microplastics extracted from toothpaste under controlled conditions and the influence of seawater. *Sci Total Environ.* 2020;703:135024. PMID: 31734496
25. Huang Z, Weng Y, Shen Q, Zhao Y, Jin Y. Microplastic: a potential threat to human and animal health by interfering with the intestinal barrier function and changing the intestinal microenvironment. *Sci Total Environ.* 2021;785:147365. PMID: 33933760
26. Kole PJ, Löhr AJ, Van Belleghem FGAJ, Ragas AMJ. Wear and tear of tyres: a stealthy source of microplastics in the environment. *Int J Environ Res Public Health.* 2017;14(10):1265. PMID: 29053641; PMCID: PMC5664766
27. Gregory MR. Plastic 'scrubbers' in hand cleansers: a further (and minor) source for marine pollution identified. *Mar Pollut Bull.* 1996;32(12):867-71. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0025326X96000471>
28. Gouin T, Avalos J, Brunning I, Brzuska K, de Graaf J, Kaumanns J, et al. Use of micro-plastic beads in cosmetic products in Europe and their estimated emissions to the North Sea environment. *SOFW J.* 2015;141:40-6. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2661683>
29. UNEP. Plastic in Cosmetics: Are We Polluting the Environment Through Our Personal Care?: Plastic Ingredients That Contribute to Marine Microplastic Litter. 2015. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/9664/-Plastic_in_cosmetics_Are_we_polluting_the_environment_through_our_personal_care_-2015Plas.pdf?sequence=3&isAllowed=y
30. Gouin T, Roche N, Lohmann R, Hodges G. A thermodynamic approach for assessing the environmental exposure of chemicals absorbed to microplastic. *Environ Sci Technol.* 2011;45(4):1466-72. PMID: 21268630
31. Boucher J, Friot D. Primary Microplastics in the Oceans: A Global Evaluation of Sources. Gland, Switzerland: IUCN; 2017. <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2017-002-En.pdf>
32. Kalčíková G, Alič B, Skalar T, Bundschuh M, Gotvajn AŽ. Wastewater treatment plant effluents as source of cosmetic polyethylene microbeads to freshwater. *Chemosphere.* 2017;188:25-31. PMID: 28865790
33. Lei K, Qiao F, Liu Q, Wei Z, Qi H, Cui S, et al. Microplastics releasing from personal care and cosmetic products in China. *Mar Pollut Bull.* 2017;123(1-2):122-6. PMID: 28911870
34. Sun Q, Ren SY, Ni HG. Incidence of microplastics in personal care products: an appreciable part of plastic pollution. *Sci Total Environ.* 2020;742:140218. PMID: 32629242
35. Lin YD, Huang PH, Chen YW, Hsieh CW, Tain YL, Lee BH, et al. Sources, degradation, ingestion and effects of microplastics on humans: a review. *Toxics.* 2023;11(9):747. PMID: 37755757; PMCID: PMC10534390
36. Nilsson F, Elf P, Capezza A, Wei X, Tsegaye B, Polisetti V, et al. Environmental concerns on water-soluble and biodegradable plastics and their applications - a review. *Science of the Total Environment.* 2025;958:177926. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969724080835>
37. Duis K, Junker T, Coors A. Environmental fate and effects of water-soluble synthetic organic polymers used in cosmetic products. *Environ Sci Eur.* 2021;33:21. <https://doi.org/10.1186/s12302-021-00466-2>
38. Rozman U, Kalčíková G. The first comprehensive study evaluating the ecotoxicity and biodegradability of water-soluble polymers used in personal care products and cosmetics. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2021;228:113016. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113016>
39. Connors KA, Arndt D, Rawlings JM, Brun Hansen AM, Lam MW, Sanderson H, et al. Environmental hazard of cationic polymers relevant in personal and consumer care products: a critical review. *Integr Environ Assess Manag.* 2023;19(2):312-25. PMID: 35649733
40. Llorca M, Farré M. Current insights into potential effects of micro-nanoplastics on human health by in-vitro tests. *Front Toxicol.* 2021;3:752140. PMID: 35295102; PMCID: PMC8915894
41. Zhou X, Wang G, An X, Wu J, Fan K, Xu L, et al. Polystyrene microplastic particles: in vivo and in vitro ocular surface toxicity assessment. *Environ Pollut.* 2022;303:119126. PMID: 35307497
42. Wu D, Lim BXH, Seah I, Xie S, Jaeger JE, Symons RK, et al. Impact of microplastics on the ocular surface. *Int J Mol Sci.* 2023;24(4):3928. PMID: 36835339; PMCID: PMC9962686
43. Dzierżyński E, Gawlik PJ, Puźniak D, Flieger W, Jóźwik K, Teresiński G, et al. Microplastics in the human body: exposure, detection, and risk of carcinogenesis: a state-of-the-art review. *Cancers (Basel).* 2024;16(21):3703. PMID: 39518141; PMCID: PMC11545399
44. Dai H, He S, Han J, Xing B. Mask wearers at risk of inhaling respirable hazards from leave-on facial cosmetics. *Environ Sci Technol.* 2024;58(49):21464-74. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.4c07604>
45. Lehner R, Weder C, Petri-Fink A, Rothen-Rutishauser B. Emergence of nanoplastic in the environment and possible impact on human health. *Environ Sci Technol.* 2019;53(4):1748-65. PMID: 30629421

46. Han M, Liang J, Wang K, Si Q, Zhu C, Zhao Y, et al. Integrin A5B1-mediated endocytosis of polystyrene nanoplastics: implications for human lung disease and therapeutic targets. *Science of the Total Environment*. 2024;953:176017. <https://pure.ecnu.edu.cn/zh/publications/integrin-a5b1-mediated-endocytosis-of-polystyrene-nanoplastics-im>
47. Jin W, Zhang W, Tang H, Wang P, Zhang Y, Liu S, et al. Microplastics exposure causes the senescence of human lung epithelial cells and mouse lungs by inducing ROS signaling. *Environ Int*. 2024;185:108489. PMID: 38367553
48. Jeon MS, Kim JW, Han YB, Jeong MH, Kim HR, Sik Kim H, et al. Polystyrene microplastic particles induce autophagic cell death in BEAS-2B human bronchial epithelial cells. *Environ Toxicol*. 2023;38(2):359-67. PMID: 36485005
49. Luo H, Xiao T, Sun X, Song Y, Shi W, Lu K, et al. The regulation of circRNA_kif26b on alveolar epithelial cell senescence via miR-346-3p is involved in microplastics-induced lung injuries. *Sci Total Environ*. 2023;882:163512. PMID: 37084911
50. Saha SC, Saha G. Effect of microplastics deposition on human lung airways: a review with computational benefits and challenges. *Heliyon*. 2024;10(2):e24355. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024003864>
51. Tan E, Saha S, Niebel D. Plastics in dermatology: a review and solutions. *J Eur Acad Dermatol Venereol*. 2025;39(10):1715-24. PMID: 39835415; PMCID: PMC12466091
52. Ragusa A, Svelato A, Santacroce C, Catalano P, Notarstefano V, Carnevali O, et al. Plasticenta: first evidence of microplastics in human placenta. *Environ Int*. 2021;146:106274. PMID: 33395930
53. Ragusa A, Notarstefano V, Svelato A, Belloni A, Gioacchini G, Blondeel C, et al. Raman microspectroscopy detection and characterisation of microplastics in human breastmilk. *Polymers (Basel)*. 2022;14(13):2700. PMID: 35808745; PMCID: PMC9269371
54. Leslie HA, van Velzen MJM, Brandsma SH, Vethaak AD, Garcia-Vallejo JJ, Lamoree MH. Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environ Int*. 2022;163:107199. PMID: 35367073
55. Yee MS, Hii LW, Looi CK, Lim WM, Wong SF, Kok YY, et al. Impact of microplastics and nanoplastics on human health. *Nanomaterials (Basel)*. 2021;11(2):496. PMID: 33669327; PMCID: PMC7920297
56. Schirinzi GF, Pérez-Pomeda I, Sanchis J, Rossini C, Farré M, Barceló D. Cytotoxic effects of commonly used nanomaterials and microplastics on cerebral and epithelial human cells. *Environ Res*. 2017;159:579-87. PMID: 28898803
57. Kadac-Czapska K, Oško J, Knez E, Grembecka M. Microplastics and oxidative stress-current problems and prospects. *Antioxidants (Basel)*. 2024;13(5):579. PMID: 38790684; PMCID: PMC11117644
58. Hu M, Palić D. Micro- and nano-plastics activation of oxidative and inflammatory adverse outcome pathways. *Redox Biol*. 2020;37:101620. PMID: 32863185; PMCID: PMC7767742
59. Qiao R, Sheng C, Lu Y, Zhang Y, Ren H, Lemos B. Microplastics induce intestinal inflammation, oxidative stress, and disorders of metabolome and microbiome in zebrafish. *Sci Total Environ*. 2019;662:246-53. PMID: 30690359
60. Gopinath PM, Twayana KS, Ramanan P, John Thomas, Mukherjee A, Jenkins DF, et al. Prospects on the nano-plastic particles internalization and induction of cellular response in human keratinocytes. *Part Fibre Toxicol*. 2021;18(1):35. PMID: 34496914; PMCID: PMC8424902
61. Hu J, Qin X, Zhang J, Zhu Y, Zeng W, Lin Y, et al. Polystyrene microplastics disturb maternal-fetal immune balance and cause reproductive toxicity in pregnant mice. *Reprod Toxicol*. 2021;106:42-50. PMID: 34626775
62. Panneerselvam D, Murugesan A, Raveendran SK, Kumar JS, Venkataraman P. Examining the hidden dangers: understanding how microplastics affect pregnancy. *Eur J Obstet Gynecol Reprod Biol*. 2025;304:53-62. PMID: 39580908
63. Wu D, Zhang M, Bao TT, Lan H. Long-term exposure to polystyrene microplastics triggers premature testicular aging. *Part Fibre Toxicol*. 2023;20(1):35. PMID: 37641072; PMCID: PMC10463354
64. Nelson W, Liu DY, Yang Y, Zhong ZH, Wang YX, Ding YB. In utero exposure to persistent and nonpersistent endocrine-disrupting chemicals and anogenital distance. A systematic review of epidemiological studies†. *Biol Reprod*. 2020;102(2):276-91. PMID: 31621835
65. Caba-Flores MD, Martínez-Valenzuela C, Cárdenas-Tueme M, Camacho-Morales A. Micro problems with macro consequences: accumulation of persistent organic pollutants and microplastics in human breast milk and in human milk substitutes. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2023;30(42):95139-54. PMID: 37597149
66. Inam Ö. Impact of microplastics on female reproductive health: insights from animal and human experimental studies: a systematic review. *Arch Gynecol Obstet*. 2025;312(1):77-92. PMID: 39821449; PMCID: PMC12176963
67. Li H, Xu S, Zhou F, Liu S, Zhang D, Wei X. Polystyrene microplastics exposure: disruption of intestinal barrier integrity and hepatic function in infant mice. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2024;288:117357. PMID: 39577047
68. Lim D, Jeong J, Song KS, Sung JH, Oh SM, Choi J. Inhalation toxicity of polystyrene micro(nano)plastics using modified OECD TG 412. *Chemosphere*. 2021;262:128330. PMID: 33182093
69. Zhu X, Wang C, Duan X, Liang B, Genbo Xu E, Huang Z. Micro- and nanoplastics: a new cardiovascular risk factor? *Environ Int*. 2023;171:107662. PMID: 36473237
70. Pirsaeheb M, Hossini H, Makhdoui P. Review of microplastic occurrence and toxicological effects in marine environment: experimental evidence of inflammation. *Process Safety and Environmental Protection*. 2020;142:1-14. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957582020315366>
71. Pulvirenti E, Ferrante M, Barbera N, Favara C, Aquilia E, Palella M, et al. Effects of nano and microplastics on the inflammatory process: in vitro and in vivo studies systematic review. *Front Biosci (Landmark Ed)*. 2022;27(10):287. PMID: 36336869
72. U.S. Congress. H.R.1321-Microbead-Free Waters Act of 2015. 114th Congress. 2015. <https://www.congress.gov/bills/114th-congress/house-bill/1321>
73. Committee on Technical Barriers to Trade. Notification G/TBT/N/KOR/672. 6 October 2016. Notification G/TBT/N/KOR/706. 1 February 2017.
74. Kentin E, Kaarto H. An EU ban on microplastics in cosmetic products and the right to regulate. *Review of European, Comparative & International Environmental Law*. 2018;27(3):254-66. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/reel.12269>
75. European Commission. Regulation (EC) No 1907/2006, Annex XVII, as amended by Regulation (EU) 2023/2055. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=CELEX:32023R2055>