



## Gıda Endüstrisinde Küresel Plastik Kirliliği: Mikro-Nanoplastikler ve Çevresel Etkileri

Müge UYARCAN<sup>1,a,✉</sup>, Sude Cansın GÜNGÖR<sup>1,b</sup>

<sup>1</sup>Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Manisa, TÜRKİYE

<sup>a</sup>ORCID: 0000-0003-1474-672X; <sup>b</sup>ORCID: 0009-0005-9166-6952

Geliş Tarihi/Received  
13.06.2024

Kabul Tarihi/Accepted  
30.10.2024

Yayın Tarihi/Published  
17.12.2024

### Öz

Son yıllarda gıda ambalajlamada petrol bazlı plastik kullanımının ham madde kaynağının bulunabilirliği, düşük maliyet, iyi yalıtım, zayıf elektrik/ısı iletkenlik ve korozyon direnci, hafiflik, yüksek mukavemet ve çok yönlü üretilebilirlik gibi çeşitli faktörler nedeniyle arttığı görülmektedir. 2022 yılında toplam plastik üretimi 400.3 milyon metrik ton olarak gerçekleşirken, plastik atık üretimi 300 milyon metrik ton seviyesine ulaşmıştır ve plastik atıkların sadece %14'ünün geri dönüştürüldüğü rapor edilmiştir. Bu üretim verilerinin arasında gıda ambalajları fosil yakıtlardan elde edilen plastiklerin %50'sini oluşturmaktadır. Plastik ambalajlar gıda endüstrisinde uzun süredir kullanılmasına rağmen kararlılıkları, dayanıklılıkları ve biyobozunur olmamaları sebebiyle çevreye zarar vermektedir. Plastik üretiminde genellikle ham madde olarak ham petrol, gaz ve kömür gibi fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Fosil yakıtlar, çevre kirliliği ve toksik sera gazlarının (metan ve etilen) başlıca kaynaklarıdır. Günümüzde plastik üretiminden kaynaklanan bu yakıtların dünya genelinde yüksek bir oranda tüketilmesi, ciddi olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. İklim ve mevsim düzenindeki değişiklikler, buzulların geri çekilmesi ve yükselen deniz seviyeleri dahil olmak üzere olumsuz sonuçlar meydana getirmektedir. Ayrıca parçalara ayrıldıklarında mikroplastiklere ve nanoplastiklere dönüşmekte, bunlar da nihayetinde besin zincirine girerek, insanlar ve çevredeki diğer canlılar için sağlık sorunları oluşturmaktadır. Mikroplastikler ve nanoplastikler, plastik kaynaklı kirlenmeler arasında son yıllarda en fazla dikkati çeken konu olmuştur. Mikro ve nanoplastik formlarındaki plastikler, boyutlarının çok küçük olması (mikroplastik (<5 mm) ve nanoplastik (<1 µm)) nedeniyle insan vücuduna hava yoluyla ve besin zinciri gibi çeşitli yollarla kolayca girerek insan sağlığını tehdit etmektedir. Özellikle son yıllarda yapılan çalışmalar plastiklerin 'yararlı' kullanımından küresel sorunlara sebebiyet veren 'atıklara' dönüşümüne dikkat çekmekte ve plastik bazlı malzemelerin insan ve çevre sağlığı üzerindeki potansiyel zararlı etkilerini azaltmaya odaklanmıştır. Bu derlemede gıda ambalajlamada petrol bazlı plastiklerin ekolojik döngüsü, mikro-nanoplastik atıkların deniz, kara ve doğa ekosistemine ve küresel iklim değişikliklerine etkisi irdelenecektir.

**Anahtar Kelimeler:** Gıda ambalajlama, mikroplastikler, nanoplastikler, plastik kirliliği

### Global Plastic Pollution in the Food Industry: Micro-Nanoplastics and Their Environmental Impact

#### Abstract

In recent years, the use of petroleum-based plastics in food packaging has increased due to various factors such as availability of raw material source, low cost, good insulation, poor electrical/heat conductivity and corrosion resistance, light weight, high strength and versatile manufacturability. In 2022, total plastic production was to 400.3 million metric tons, while plastic waste production reached 300 million metric tons, and only 14% of plastic waste was reported to be recycled. Among these production data, food packaging accounts for 50% of plastics derived from fossil fuels. Although plastic packaging has been used in the food industry for a long time, it harms the environment due to its stability, durability and non-biodegradability. In plastic production, fossil fuels such as crude oil, gas, and coal are commonly used as raw materials. Fossil fuels are the main sources of environmental pollution and toxic greenhouse gases (methane and ethylene). Today, the high global consumption of these fuels due to plastic production leads to serious adverse consequences. Changes in climate and seasonal patterns have negative consequences, including retreating glaciers and rising sea levels. In addition, when they break down, they turn into microplastics and nanoplastics, which eventually enter the food chain, posing health problems for humans and other living things in the environment. Microplastics and nanoplastics have attracted the most attention in recent years among plastic pollutants. Plastics in micro and nanoplastic forms pose a threat to human health due to their tiny sizes (microplastics (<5 mm) and nanoplastics (<1 µm)), allowing them to easily enter the human body through airways and various pathways, including the food chain. Especially in recent years, studies have drawn attention to the transformation of plastics from their 'beneficial' use into 'waste', which causes significant global problems, and have focused on reducing the potential harmful effects of plastic-based materials on human and environmental health. In this review, the ecological cycle of petroleum-based plastics in food packaging, the effects of micro-nanoplastic wastes on marine, land and nature ecosystems, and global climate changes will be examined.

**Key Words:** Food packaging, microplastics, nanoplastics, plastic pollution

## GİRİŞ

Plastikler, esas olarak fosil yakıtlardan elde edilen ve uzun hidrokarbon zincirinden oluşan malzemelerdir ve hafiflik, esneklik, neme dayanıklılık, yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, düşük ısı ve elektrik iletkenliği, korozyona karşı direnç gösterme gibi mükemmel fizikokimyasal özellikleri ile ekonomik uygulanabilirlikleri nedeniyle gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (1-4).

Plastik endüstrisi 1950'den bu yana muazzam bir şekilde büyüme göstermiştir ve küresel plastik üretimi 2022'de 400,3 milyon tona ulaşmıştır (5). 2050 yılına kadar bu miktarın 33 milyar tona ulaşması beklenmektedir (6). Plastikler yenilenemeyen petrol bazlı ham maddelerden üretilmeleri, çok yönlü muazzam özelliklere sahip olmalarından dolayı özellikle tek kullanımlık ürünlerde tüketimlerinin ve dolayısıyla atık miktarının fazla olması ve atıkların sadece yakılarak bertaraf edilebilmesi nedeniyle önemli çevresel sorunlar meydana getirmektedir (7). Toplam kentsel katı atıkların yaklaşık %15-20'sini oluşturan ambalaj atıklarının birçok ülke için önemli bir sorun haline geldiği bildirilmektedir (8).

Plastik ambalajlar, 1950'lerden bu yana üretilen tüm plastiklerin yaklaşık %40'ını oluşturmaktadır ve bu ambalajların yaklaşık %41'i gıda endüstrisi için kullanılmaktadır (9). Gıda endüstrisinde plastik ambalaj kullanımı esneklik, dayanıklılık, çok yönlülük ve düşük maliyet gibi cazip özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Ancak bu özelliklerinden bağımsız olarak, plastik ambalajların yenilenemeyen malzemelerden üretilmeleri, doğada yüzlerce yıl boyunca kalabilmeleri nedeniyle atık sorunu oluşturmaları, üretimlerinin sera gazı emisyonunda artışa dolaylı olarak da küresel ısınma, iklim değişikliği gibi çevresel sorunlara sebebiyet vermesi ve bertarafı sırasında uygulanan fiziksel ve kimyasal işlemlerle ortaya çıkan kanserojen bileşiklerin doğaya karışması sonucu ekosisteme zararlı etkilerinin olduğu bilinen bir gerçektir (10-13). Gıda ambalaj endüstrisinin de yıllık %12'lik büyüme gösterdiği ve bu büyümenin sera gazı emisyonu ve karbon ayak izini önemli düzeyde arttırmışından dolayı çevresel endişe oluşturduğu bildirilmektedir (14).

Plastik atıkların yakma ile kalıcı olarak ortadan kaldırılabileceği yaygın olarak kabul edilse de, yapılan bir çalışmada yakma ile plastik atıkların çevresel etkilerinin tamamen ortadan kaldırılmadığı ve yakma sonucu kalan külün çevreye salınan potansiyel bir mikroplastik kaynağı olduğu rapor edilmiştir (15). Ayrıca çevredeki plastikler, güneş radyasyonuna maruz kaldıklarında metan ve etilen olmak üzere iki sera gazı (GHG) üretmektedir. Dünya çapında en çok üretilen ve atılan sentetik polimer olan polietilenin her iki gazın da en yoğun yayıcısı olduğu belirtilmektedir (16).

Plastik bozunması, polimerlerin ortamdaki fiziksel kuvvet, ultraviyole (UV) ışınları, sıcaklık değişimleri, biyolojik reaksiyonlar nedeniyle parçalanması ve bozunması aşamalarından oluşan çok yavaş bir süreçtir (17). Plastiklerin kullanım miktarındaki artışa bağlı olarak plastiklerin bozunmasından kaynaklı atıklar farklı ekosistemlerde birikmekte, "mikro" (<5.000 µm) veya "nano" (<100 nm) boyutlarında mikroplastikler (MP'ler) ve nanoplastikler (NP'ler) olarak adlandırılan çevresel kirleticilere dönüşmektedir (18). Son zamanlarda yapılan çalışmalar mikroplastik ve nanoplastiklerin, küçük boyutları ve hafiflikleri nedeniyle besin zincirini kontamine

ederek tüketim yoluyla insan vücuduna kolaylıkla girebildiği ve sağlık için potansiyel bir tehdit oluşturduğuna dikkat çekmektedir (19,20).

## GIDA ENDÜSTRİSİNDE KÜRESEL PLASTİK KİRLİLİĞİ

Günümüzde polimerik malzemeler, hafif ve korozyona dayanıklı olmaları, üretimlerinin kolay olması ve mekaniksel özelliklerinin iyi olması nedeniyle gıda ambalaj malzemelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (21). Bu nedenle gıda endüstrisi de küresel plastik kirliliğinin artmasında önemli bir paya sahiptir. Gıda ambalaj endüstrisinin yıllık yaklaşık %12 oranında büyüme göstermesinin küresel plastik kirliliğinin dolaylı olarak GHG emisyonlarının ve karbon ayak izlerinin artmasına neden olarak çevresel endişelere yol açtığı bildirilmektedir. Gıda ambalajlarının önemli bir kısmını kısa ömürlü tek kullanımlık plastik ambalaj malzemeleri oluşturduğu için kullanımları sonucu açığa çıkan yüksek miktarda atık çevre kirliliğine neden olmaktadır (14). Ek olarak, gıda ambalajlamada kullanılan plastiklerin üretim sürecinde çok fazla su ve enerji harcanmaktadır (22).

Gıda ambalajlamada kullanılan plastikler, esas olarak yenilenemeyen hammaddelere dayandıkları için ve genellikle kısa ömürlü ürünlerde (örneğin, tek kullanımlık ambalajlarda) kullanıldıkları için önemli çevre sorunlarına yol açmaktadır. Atıldıklarında ise çoğunlukla çöpe atılmakta ya da yakılmaktadırlar, bu da çevresel etkilerini artırmaktadır (7).

Gıda ambalajlamada kullanılan plastikler, kullanım ömürlerinin sonunda genellikle depolama alanlarına atılarak, yakma fırınlarında yakılarak veya çöpe atılarak bertaraf edilmektedir. Çöpe atıldıklarında plastik atıklar depolama alanlarına ya da yakma fırınlarına ulaşmamaktadır. Bu, plastiklerin uygunsuz bir şekilde bertaraf edilmesine yol açmakta ve çeşitli ekolojik sorunların kaynağı olarak tanımlanmaktadır. Plastik atıkların yakılması, bertaraf edilmesi gereken atık hacmini önemli ölçüde azaltmaktadır; ancak, bu süreç zehirli ağır metallerin açığa çıkmasına ve dioksin ile furan gibi zararlı gazların atmosfere yayılmasına neden olmaktadır (23).

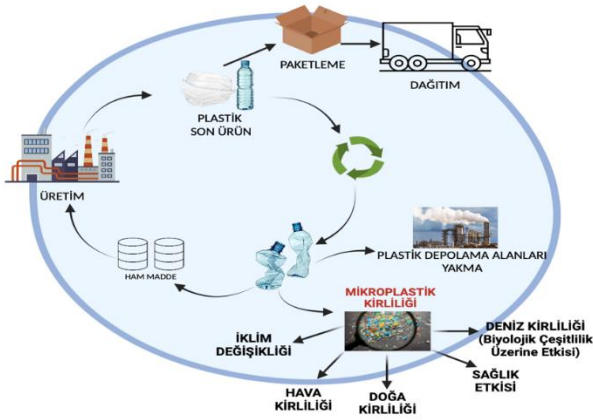
Plastik atık kaynaklarını genel olarak %14.9 şişeler/kapaklar, %12.5 polietilentereftalat (PET) şişeler, %9.3 süpermarket poşetleri/perakende poşetler, %6.5 gıda poşetleri ve %2.1 gıda kapları oluşturmaktadır. Plastikler, yüksek stabilite ve dayanıklılıkları nedeniyle doğada sınırlı bir bozunma göstermektedirler. Plastiklerin bozunma süreci, güneş ışığı, ısı, kimyasal ve biyolojik aktiviteler gibi çevresel faktörlerin yanı sıra, polimerlerin boyutu, yoğunluğu ve moleküler ağırlığı gibi fiziksel özelliklere de bağlıdır. Plastiklerin biyolojik olarak bozunma sürelerinin 100 ile 1000 yıl arasında değiştiği ve kullanılan plastiklerin yaklaşık %80'nin doğada biriktiği bu nedenle, ilk üretimi yapılan plastiklerin de doğada hala var olabileceği bildirilmektedir (24). 2019 yılında toplam plastik üretimi 368 milyon metrik tona, plastik atık üretimi ise 300 milyon metrik tona ulaşmıştır. Bununla birlikte plastik atıkların sadece %14'ünün geri dönüştürüldüğü ifade edilmektedir (25). Mevcut üretim ve atık yönetimi uygulamaları ile birlikte, 2050 yılına kadar yaklaşık 12000 milyon ton plastik atığın çöplüklerde veya çevrede olacağı tahmin edilmektedir (26). Gıda ambalajının toplam plastik kullanımındaki büyük payı ve tek kullanımlık ürünler olarak geniş uygulaması göz

önüne alındığında, çevre kirliliğine önemli bir katkıda bulunduğu görülmektedir (19).

## GIDA AMBALAJLAMADA KULLANILAN PLASTİKLER VE EKOLOJİK DÖNGÜSÜ

Gıda ambalaj malzemelerinde en yaygın olarak kullanılan plastikler, düşük ve yüksek yoğunluklu polietilen, polipropilen, polivinil klorür, PET ve polistirendir. Gıda ambalajlarının fosil yakıtlardan elde edilen plastiklerin yaklaşık %50'sini oluşturduğu bildirilmektedir (27).

Plastiklerin ekolojik döngüsü, ham petrolün çıkarılmasıyla başlayan dönüştürme, taşıma, üretim ve dağıtım ile devam eden geniş bir süreçten oluşmaktadır (Şekil 1) (28). Petrol, rafinerilerde çeşitli fraksiyonlara ayrılmakta ve ardından petrokimya tesislerinde monomerlerin üretimi için işlenmektedir. Bu monomerler daha sonra polimerizasyon işlemi ile plastik malzemelere dönüştürülmektedir. Üretilen plastikler, çeşitli ürünlerin üretiminde ham madde olarak kullanılmaktadır ve son ürünler tüketiciye ulaştırılmak üzere paketlenmektedir. Kullanım ömrünün sonunda, bu ürünler genellikle atık haline gelmektedir. Plastik atıklar, geri dönüşüm tesislerine yönlendirilmezse, çevreye önemli zararlar verebilecek şekilde çöplüklerde, denizlerde ve diğer doğal ortamlarda birikmektedir (13,29).



Şekil 1. Plastiklerin ekolojik döngüsü (biorender.com kullanılarak oluşturulmuştur)

Petrol bazlı plastikler, yenilenemeyen kaynaklardan üretilmektedir ve ekolojik döngüsü boyunca doğal habitatların tahrip edilmesi, su kütlelerinin kirlenmesi ve GHG emisyonu dahil olmak üzere önemli çevresel etkiler meydana getirmektedir. Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü (OECD) (2022)'ne göre, plastiklerin ekolojik döngüsü sonucu şu anda 1,8 Giga ton (Gt) CO<sub>2</sub> sera gazı oluşturmaktadır; ancak artan kullanım nedeniyle bu rakamın 2060 yılına kadar iki katına, yani >4,3 Gt CO<sub>2</sub> çıkması beklenmektedir (30). Bu emisyonların oranının küresel havacılık endüstrisinden kaynaklanan yıllık doğrudan hava kirliliğine yol açan sera gazı emisyonlarından önemli ölçüde yüksek olduğu bildirilmiştir (31).

2020 yılında yapılan bir çalışmada (32), yuvarlak ve dikdörtgen şekilli plastik kaplar ile plastik bardaklardaki mikroplastik (MP) varlığı incelenmiştir. Araştırma sonucunda, yuvarlak plastik kaplardan 12±5.12 mg, dikdörtgen kaplardan

38±5.29 mg ve plastik bardaklardan ise 3±1.13 mg MP parçacığı izole edilmiştir. Bu çalışma, plastik kapların şeklinin mikroplastik varlığı açısından önemli bir parametre olduğunu göstermekte ve plastik kapların insan ve çevreye doğrudan mikroplastik maruziyetinin önemli bir kaynağı olabileceğini ortaya koymaktadır.

## MİKRO-NANO PLASTİKLER

Plastikler, türüne ve bulunduğu ortama bağlı olarak yüzlerce hatta binlerce yıl varlığını sürdürebilmektedir (33). Çevreye atılan plastikler, mekanik güç, fiziksel, kimyasal ve biyolojik modifikasyonlar dahil olmak üzere dış etkenlere maruz kalmakta ve bu da mikro-nanoplastiklerin oluşumuna neden olmaktadır (34).

Mikroplastik kavramı ilk kez 2004 yılında ortaya çıkmıştır (35). Mikroplastikler boncuk, çekirdek, lif, köpük, parça/kırıntı, pelet, filament, film vb. gibi çok çeşitli şekillerde sınıflandırılmaktadır (36,37). Mikroplastikler çevrede kalma sürelerine ve maruz kaldıkları parçalanma işlemlerine göre şekil değiştirerek silindirik, disk, düz, küresel, uzun, yuvarlak ve şekilsiz görünümde doğada bulunmaktadır (38). Plastiklerin kullanıldığı ve atıldığı her yerde (toprakta, yüzey sularında, kıyılarda, plaj kumlarında, tatlı su alanlarında, denizde, nehirlerde, atmosferde, kar ve buzullarda) mikroplastik bulunabilmektedir. Plastik malzemelerin çevrede birikmesi bu nedenle önemli bir kirlilik sorunu olarak kabul edilmektedir (39).

Nanoplastikler büyük plastik atıkların fotokimyasal, oksidasyon, mekanik aşınma ve biyolojik bozunma gibi reaksiyonlar yoluyla parçalanması sonucu oluşan karışık şekillere ve kimyasal bileşimlere sahip nano boyutlarda küçük plastik parçalardır (40-42).

Nanoplastikler, çok küçük boyutları ve geniş yüzey alanları nedeniyle su ve toprakta kolayca taşınabildikleri için daha fazla çevresel kirlenmeye potansiyeline sahiptirler. Bu yüzden nanoplastiklerin yüksek düzeyde ekolojik risk oluşturdukları ifade edilmektedir (42). Ortamda biriken nanoplastikler çeşitli yollarla tatlı su alanlarına taşınarak bu ortamlarda önemli düzeyde kirlilik oluşturmaktadır. Nanoplastikler, benzersiz kimyasal yapıları nedeniyle tatlı su ortamlarında uzun süre boyunca kararlı kalabilmekte ve kalıcılığını sürdürebilmektedir. Bu nedenle tatlı su kaynaklarındaki nanoplastik kirliliği, küresel olarak büyüyen bir sorun haline gelmiştir (43). Nanoplastiklerin deniz ekosisteminde plastik kirliliğinin en önemli parçası olduğu belirtilmektedir (44). Ayrıca nanoplastiklerin atık su arıtma tesislerinde mikroplastiklerden 10<sup>14</sup> kat daha fazla olduğu bildirilmektedir (45).

## Mikro-Nanoplastiklerin Çevresel Etkileri

Gıda endüstrisinde küresel plastik kirliliğinin çevreye salınması dünya çapında ciddi bir sorun olarak kabul edilmektedir. Mikroplastik parçacıklar çevrenin her yerinde (havada, içme suyunda, gıdalarda, göllerde, nehirlerde ve denizlerde) bulunabilmektedir (38). Son zamanlarda yapılan çalışmalar mikroplastik ve nanoplastik varlığının çevrede önemli bir düzeye ulaşmasının gıdalara da kontaminasyonuna sebep olduğuna dikkat çekmektedir. Çalışmalarda poşet çay (46), bira (47), kabuklu deniz ürünleri (48), kanatlı eti (49), şişelenmiş

su (50), sofr tuzu (51), şeker, bal (52,53) gibi çeşitli gıdalarda da mikropplastik varlığı rapor edilmiştir. Gıdalarda mikropplastik kontaminasyonu ile ilgili yapılan bazı çalışmalar Tablo 1’de gösterilmektedir.

**Tablo 1.** Gıdalarda mikropplastik kontaminasyonu ile ilgili yapılan bazı çalışmalar

Gıda	Bulgular	Kaynaklar
Poşet çay	Tek bir plastik çay poşetini demleme sıcaklığında (95 °C, 5 dakika) demlemenin, içeceğin tek bir fincanına yaklaşık 11,6 milyar mikropplastik ve 3.1 milyar nanoplastik tespit edilmiştir.	46
Bal, süt, bira ve alkolsüz içecekler	Çalışma sonucunda alınan örneklerde mikropplastiklerin sayısının 10 ila 100 MPs/L arasında değişim gösterdiği ve ortalama 40 MPs/L civarında olduğu saptanmıştır.	47
Şişe suyu	9 farklı ülkede incelenen 259 şişe suyun %93’ünün mikropplastikler ile kontamine olduğu tespit edilmiştir. 1 litre şişelenmiş suda ortalama 10.4 adet >100 um boyutunda mikropplastik partikül bulunmuştur.	50
Deniz tuzu, göl tuzu, kuyu tuzu	Çin’deki süpermarketlerde satılan deniz tuzlarında 550-681 partikül/kg, göl tuzlarında 43-364 partikül/kg ve kaya / kuyu tuzlarında 7-204 partikül/kg mikropplastik tespit edilmiştir.	51
Şeker	Bangladeş’de farklı süpermarketlerden elde edilen şekerlerde ortalama 343.7 ± 32.08 mikropplastik/kg şeker varlığı tespit edilmiştir.	52
Midye dolma	Çalışma sonucunda bir tüketicinin ortalama porsiyon başına 100 g midye dolma tüketmesi durumunda porsiyon başına 5.8 mikropplastik tüketme riskinin olduğu ifade edilmiştir	86
Armut, elma, domates, soğan, patates ve hıyar	Çalışma sonucunda tüm örneklerde (n=72) toplam 210 mikropplastik partikül (ortalama 2.9 ± 1.6 partikül/g) varlığı tespit edilmiş ve en yüksek mikropplastik varlığı domateste (3.63 ± 1.39 partikül/g) bulunmuştur.	87

Nanoplastiklerin gıdalarda tespitine yönelik literatürde herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Ancak yapılan bir çalışmada salatalık bitkisinde fizyolojik ve biyokimyasal değişimler üzerine nanoplastiklerin etkisi araştırılmış çalışma sonucunda nanoplastiklerin salatalık yapraklarının şeker metabolizmasını, fotosentetik ve antioksidan özelliklerini etkilediği tespit edilmiştir (54).

Gıda endüstrisinde işleme, depolama ve nakliye gibi çeşitli alanlarda plastik ambalajların kullanımı mikropplastiklerin gıda zincirine girmesine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Çeşitli gıda işleme faaliyetleri sırasında plastik ambalaj malzemelerinin ve ekipmanlarının kullanılması, mikropplastiklerin işlenen gıdaya geçmesine yol açmaktadır (55). Bununla birlikte, son zamanlarda yapılan çalışmalar gıda ambalaj malzemelerinden mikropplastik partiküllerin salındığını ve bu durumun gıda kontaminasyonuna sebep olduğunu göstermektedir (56,57).

Gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılan plastikler çevrede mikropplastiklere dönüşerek önemli düzeyde kirlilik sorunu oluşturmaktadır. Mikropplastikler çevrede homojen

dağılmayan ve özellikle karasal ve sucul ekosistemlerde yaygın olarak bulunan kirleticiler olarak bilinmektedir. Güncel çalışmalar genellikle sucul ekosistemler üzerine yoğunlaşsa da, plastiklerin karasal ortamlarda kullanılması nedeniyle, karasal ekosistemler bu kirleticilerin sucul alanlara taşınmasında önemli rol oynamaktadır. Örneğin, toprağa karışan mikropplastikler burada birikmekte, erozyonla taşınabilmekte ve zamanla bozunarak yeraltı sularına sızabilmektedir. Ayrıca, toprakta yaşayan canlılar bu mikropplastikleri vücutlarına alabilmekte ve köstebek, sincap gibi hayvanların hareketiyle de bu kirleticiler başka bölgelere yayılarak kirliliği arttırabilmektedir (58).

Gıda endüstrisinde tek kullanımlık plastik kapların kullanımını her geçen gün artmakta ve insanların tüketimi için kaçınılmaz bir hal almaktadır. Gıda endüstrisinde kullanılan plastiklerin üretim sürecinden tüketime kadar mekanik kuvvet, ısı, ışık gibi fiziksel etkilere maruz kalması sonucunda mikropplastikler oluşmakta ve bunlar da gıda kabının iç yüzeylerinde pürüzlü döküntü yapılar oluşturarak gıda kontaminasyonuna sebep olmaktadır. Örneğin, plastik şişe kapaklarının açılıp kapanması sırasında uygulanan mekanik gerilmeler bile milyonlarca mikropplastik parçacığının suya karışmasına neden olmaktadır (59). 2019 yılında yapılan bir çalışmada (60), mekanik stresin Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE) kapak ve PET şişelerde mikropplastik oluşumunu doğrudan etkilediğini göstermiştir. Ayrıca, aynı tek kullanımlık plastik şişenin tekrar tekrar kullanılmasıyla, insanların mikropplastikleri yutma riskinin arttığı belirtilmektedir. Gıda endüstrisinde sıklıkla kullanılan tek kullanımlık ambalajlar, özellikle kısa ömürlü ürünler için kullanıldıktan kısa bir süre sonra atık haline gelmektedir. Bu ambalajların büyük bir kısmı çöplüklere ve okyanuslara atılmakta ve çok azı geri dönüştürülmektedir. Bu atıklar, çevreye yayıldıkça mekanik kuvvetlerle mikropplastiklere dönüşerek çevre kirliliğine katkıda bulunmaktadır (14).

Mikropplastikler gıda endüstrisine hazırlama, pişirme ve işleme aşamalarında da kontaminasyona yol açabilmektedir. Yapılan bir çalışmada, gıda hazırlama sırasında kullanılan plastik kesme tahtalarının belirli bölgesinde yapılan analizlerde her bir kesimde mm başına yaklaşık 100-300 mikropplastik/nanoplastik parçacığı ve mm<sup>2</sup> alan başına da yaklaşık 3000 mikropplastik/nanoplastik parçacığın kesim işlemi boyunca salınım gösterebileceği rapor edilmiştir (61). Ayrıca, plastik gıda kaplarının mikrodalga veya fırın ısıtması sonrası ambalajlanmış gıdanın yüzeyine mikropplastiklerin sızdığı bildirilmektedir (62). Mikropplastikler, bitki fotosentezini ve mikrobiyal karbon kullanım verimliliğini engelleyerek ekosistem sağlığı üzerinde olumsuz etkilere yol açmaktadır. Ayrıca, karbon bağlama ve oksijen üretiminde önemli bir rol oynayan fitoplanktonların büyümesi, mikropplastik kirliliği nedeniyle engellenmektedir. Bu durum, deniz ekosistemlerinde karbon havuzunun azalmasına ve sera gazı emisyonlarının artmasına neden olarak küresel ısınma potansiyelini artırmaktadır. Son olarak, mikropplastikler karbon döngüsü ve enerji akışı gibi ekolojik işlevleri değiştirerek çevresel sürdürülebilirliği ve insan sağlığını tehdit etmektedir (63).

Günümüzde yapılan çalışmalar mikropplastik kirliliği sorununun giderek daha ciddi hale geldiğini ve çevre üzerindeki

potansiyel risklerinden dolayı endişe oluşturduğunu göstermektedir. Bu çalışmalarda okyanusta (64), içme suyunda (65), toprakta (66), canlı organizmalarda (67) ve hatta insan plasentası (68) ve kanında (69) mikroplastik varlığının tespit edilmesi yeni bir küresel çevre kirliliği sorununu beraberinde getirmiştir.

Plastik atıklar, çeşitli karasal (kentsel atıklar, turizm vb.) ve sucul (balıkçılık ve denizcilik faaliyetlerinden kaynaklanan atıklar) kaynaklardan çevreye yayılmaktadır (70) ve her yıl deniz ekosistemine karışarak giderek artan bir endişe kaynağı oluşturmaktadır. Plastik atıkların büyük bir kısmı karada üretilmekte ve çeşitli yollarla atıkların ana birleşim yeri olarak kabul edilen deniz ortamına ulaşmaktadır. Askıda kalan küçük plastik parçacıklar deniz yüzeyinde birikirken, diğer parçacıklar deniz tabanında ve plajlarda birikerek habitat için risk oluşturmaktadır (71).

Okyanus ortamlarında yaşamı tehdit eden yoğun mikroplastik kontaminasyonu giderek artmakta ve mikroplastik miktarının 2060 yılına kadar 270 milyon tona ulaşacağı öngörülmektedir (72). Plastik atıklardan kaynaklanan sucul ekosistemlerin kontaminasyonunun iklim değişikliğine sebebiyet verdiği bilinmektedir. İklim değişikliği, dünya genelinde artan okyanus sıcaklıkları, deniz seviyesindeki yükselme, okyanus asitlenmesi ve aşırı hava olaylarıyla birlikte büyük ekolojik ve sosyo-ekonomik zararlara neden olmaktadır. Bu durumun, küresel bir tehdit unsuru olarak etkilerinin gelecekte daha da yoğunlaşması beklenmektedir (73). Ayrıca iklim değişikliği küresel ısınmaya yol açarak mercan türlerinde yüksek ölüm oranlarına ve bazı türlerin neslinin tükenmesine neden olmaktadır (74).

Nanoplastikler ise küçük boyutları nedeniyle çıplak gözle görülemeyebilirler, bu durum tespit edilmelerini zorlaştırmaktadır. Bu küçük plastik parçacıklar okyanuslar başta olmak üzere (75), toprak (76) ve atmosfer (77) gibi çeşitli ekosistemlere yayıldıkça, insan sağlığı ve çevre için potansiyel tehlike oluşturmaktadır (78). Atmosferdeki nanoplastiklerin insanlar ve karada yaşayan hayvanlar tarafından kolayca solunabileceği ve sağlığı olumsuz etkileyebileceği belirtilmektedir (79). Yapılan bir çalışmada (80), karasal ortamda nanoplastiklerin topraktan bitkiye (maş fasulyesi, *Vigna radiata*) ve ardından tüketiciye (salyangoz, *Achatina fulica*) geçişi araştırılmıştır. Sonuçlar, nanoplastiklerin bitkide kök büyümesini azalttığını ve bitkiyi tüketen salyangozda büyüme hızının düşmesine ve beslenme zorluğu çekmesine neden olduğu bildirilmektedir.

### Mikro-Nanoplastiklerin Toksik Etkileri

Mikroplastiklerin her yerde bulunması, organizmalar ve insan sağlığı açısından risk oluşturmaktadır. Hayvanlarda, sindirim sisteminin tıkanmasına neden olarak hayvanın ölümüne veya beslenme alışkanlıklarının bozulmasına yol açabilir. İnsanlarda ise sağlık etkileri henüz tam olarak belirlenmemiştir. Ancak potansiyel olarak akciğer iltihabına, birincil ve ikincil düzeyde genotoksik etkilere neden olabileceği ifade edilmektedir (81).

Suda yaşayan organizmalarda mikroplastiklerin araştırılması önemlidir; çünkü bu parçacıklar besin zinciri yoluyla taşınabilmekte, organizmaların büyüme ve üreme süreçlerini

olumsuz etkileyebilmekte ve insan vücudunda birikerek sağlık üzerinde zararlı etkilere yol açabilmektedir (82). Özellikle keskin yapıya sahip mikroplastik parçacıkları, insan vücudunu fiziksel olarak uyararak toksisiteye neden olabilmektedir. Ayrıca, bu parçacıklar, plastik polimerlerin yapılarında bulunan endokrin bozucuların salınımını sağlayarak insan vücudunu olumsuz etkileyebilmektedir. Endokrin bozucular, hormon aktif maddeler olarak da adlandırılan, insan vücuduna çeşitli kanser hücrelerinin üretimini teşvik ederek ve üreme sistemi bozukluklarına yol açarak zarar verebilen maddelerdir. Bunun yanı sıra, mikroplastikler ortamda bulunan ağır metaller ve organik kirleticiler gibi toksik kimyasalları adsorbe ederek taşıyabilmekte; bu durum da insan vücudunu olumsuz etkileyebilmektedir (83).

Deniz canlılarının mikroplastikleri yutmasının sonucu gastrointestinal sistem fizyolojisindeki değişiklikler, bağışıklık sisteminde bozulma, oksidatif stres, sitotoksikite ve büyüme inhibisyonu olduğu bildirilmektedir (84, 85). Mikroplastiklerin toksik etkileri ile ilgili yapılan bazı çalışmalar Tablo 2'de gösterilmektedir.

Toksik Etki	Organizma	Boyut / Maruz kalma süresi	Kaynaklar
Karaciğerde inflamasyon ve lipid birikimi	Zebra balığı ( <i>Danio rerio</i> )	5 µm / 0-7 gün	88
Ortalama spesifik büyüme oranında düşüş	<i>Tetraselmis chuii</i>	5 nm / 96 saat	89
Büyüme oranında düşüş ve üremede azalma	<i>Hyalella azteca</i>	<5 mm / 10 gün	90
Larva uzunluğunda azalma	<i>Paracentrotus lividus</i>	<5 mm / 24 saat	91
Serum albümin proteinlerinin yapı ve işlevlerinin zarar görmesi	İnsan	5 µm	92
Bağırsakta birikim	Japon balığı ( <i>Carassius auratus</i> )	<5 mm / 1.5 saat - 6 gün	93
Kök büyümesinin engellenmesi	Su mercimeği ( <i>Lemna minor</i> )	< 5 mm / 48 saat	94
Besin alımının azalması, büyüme oranında düşüş, üremede azalma	Zooplankton	< 50 µm	95
Yüksek mikroplastik seviyelerinde beslenme bozuklukları ve üremede azalma	<i>Daphnia magna</i>	1-5 µm	96

## SONUÇ

Petrol bazlı plastikler, sahip oldukları özellikler nedeniyle gıda ambalajlamada önemli rol oynamaktadır. Gıda endüstrisinde plastiklerin yaygın olarak kullanımı, mikroplastiklerin gıdalara geçmesine ve dolayısıyla insan tüketimine zemin hazırlamaktadır. Endüstride yaygın olarak kullanılan plastik ambalajlar, nakliye ve depolama süreçlerinde gıdaların plastik yüzeylerle temas etmesi sonucunda mikro ve nanoplastiklerin gıdalarda birikmesine yol açabilmektedir. Ayrıca, gıda endüstrisinde kullanılan plastiklerin çevreye atılması, ekosistemlerin zarar görmesine neden olmakta ve çevresel kirliliğin yoğun olduğu bölgelerde bulunan bitkiler, hayvanlar, su kaynakları ve toprak mikro ve nanoplastiklere maruz kalmaktadır. Plastiklerin dayanıklı yapısı, bozunmaya karşı direnç göstermekte ve bozduğunda bile mikroplastiklere ve nanoplastiklere dönüşerek plastik atıkların bertaraf edilmesini zorlaştırmaktadır. Özellikle deniz ekosistemlerinde biriken mikroplastikler, deniz canlıları tarafından besin sanılarak tüketilmekte ve bu organizmaların biyolojik işlevlerini bozabilmektedir. Araştırmalar, mikroplastiklerin sadece fiziksel zararlar vermediğini, aynı zamanda organizmalar üzerinde toksik etkilere neden olabileceğini göstermektedir. İnsan sağlığı açısından potansiyel riskler henüz tam olarak anlaşılmamış olsa da, gıda zincirine dahil olmaları ve vücutta birikmeleri konusundaki endişeler giderek artmaktadır. Sonuç olarak, gıda endüstrisindeki artan plastik kirliliği, çevresel sürdürülebilirliği ciddi biçimde tehdit eden bir sorun olarak ön plana çıkmaktadır. Plastikler su kaynaklarından toprak kalitesine, hava kirliliğinden biyoçeşitliliğe kadar birçok alanda olumsuz etkileri yol açmaktadır. Uzun vadede ekosistemler ve insan sağlığı üzerinde kalıcı hasarlar bırakabilecek bu sorunla baş edebilmek için, gıda endüstrisinin plastik kullanımını azaltmaya yönelik yenilikçi ve sürdürülebilir çözümler üretmesi büyük bir gereklilik haline gelmiştir.

## KAYNAKLAR

- Jasso-Salcedo AB, Díaz-Cruz CA, Rivera-Vallejo CC, Jiménez-Regalado EJ, Aguirre-Loredo RY. (2024). Human Consumption of Microplastics via Food Type and Habits: Recent Review. *Wat Air and Soil Poll.* 235(2):1-22.
- Frias JPGL, Nash R. (2019). Microplastics: Finding a Consensus on the Definition. *Mar Pollut Bull.* 138:145-147.
- Iroegbu AOC, Sadiku RE, Ray SS, Hamam Y. (2020). Plastics in Municipal Drinking Water and Wastewater Treatment Plant Effluents: Challenges and Opportunities for South Africa—a Review. *Environ Sci Pollut Res Int.* 27:12953–12966.
- Pan D, Su F, Liu C, Guo Z. (2020). Research Progress for Plastic Waste Management and Manufacture of Value-Added Products. *Adv Compos Hybrid Mat.* 3:443–461.
- Pereyra-Camacho MA, Pardo I. (2024). Plastics and The Sustainable Development Goals: from Waste to Wealth with Microbial Recycling and Upcycling. *Microb Biotechnol.* 17(4): e14459.
- Xu S, Ma J, Ji R, Pan K, Miao AJ. (2020). Microplastics in Aquatic Environments: Occurrence, Accumulation, and Biological Effects. *Sci Total Environ.* 703: 134699.
- Pivnenko K, Eriksen MK, Martín-Fernández JA, Eriksson E, Astrop TF. (2016). Recycling of Plastic Waste: Presence of Phthalates in Plastics from Households and Industry. *Waste Manag.* 54: 44-52.
- Tencati A, Pogutz S, Moda B, Brambill M, Cacia C. (2016). Prevention Policies Addressing Packaging and Packaging Waste: Some Emerging Trends. *Waste Manag.* 56: 35-45.
- Majder-Lopatka M, Weśnierski T, Ankowski A, et al. (2022). Thermal Analysis of Plastics Used in the Food Industry. *Mater.* 15, 248.
- Qasim U, I. Osman A, H. Al-Muhtaseb A, et al. (2021). Renewable Cellulosic Nanocomposites for Food Packaging to Avoid Fossil Fuel Plastic Pollution: A Review. *Environ. Chem. Lett.* 19:613–641.
- J. Groh K, Backhaus T, Carney-Almroth B, et al. (2019). Overview of Known Plastic Packaging-Associated Chemicals and their Hazards. *Sci. Total Environ.* 651:3253–3268.
- Shen M, Song B, Zeng G, et al. (2020). Are Biodegradable Plastics a Promising Solution to Solve the Global Plastic Pollution? *Environ. Pollut.* 263:114469.
- Evode N, Qamar SA, Bilal M, Barcelo D, Iqbal HMN. (2021). Plastic Waste and Its Management Strategies for Environmental Sustainability. *Case Stud. Chem. Environ. Eng.* 4:100142.
- Ncube LK, Ude AU, Ogunmuyiwa EN, Zulkifli R, Beas IN. (2021). An Overview of Plastic Waste Generation and Management in Food Packaging Industries. *Recycl.* 6, 12.
- Yang Z, Lü, F, Zhang H, et al. (2021). Is Incineration the Terminator of Plastics and Microplastics? *J Hazard Mater.* 401: 123429.
- Royer SJ, Ferrón S, Wilson ST, Karl DM. (2018). Production of Methane and Ethylene from Plastic in The Environment. *PLoS ONE*, 13(8): e0200574.
- Zurub RE, Cariaco Y, Wade MG, Bainbridge SA. (2024). Microplastics Exposure: Implications for Human Fertility, Pregnancy and Child Health. *Front Endocrinol.* 14: 1330396.
- Rubio L, Marcos R, Hernández A. (2020). Potential Adverse Health Effects of Ingested Micro- and Nanoplastics on Humans. Lessons Learned From in Vivo and in Vitro Mammalian Models. *J Toxicol Env Health B Crit Rev.* 23(2): 51-68.
- Boone L, Prétat N, Nhu TT, et al. (2023). Environmental Performance of Plastic Food Packaging: Life Cycle Assessment Extended with Costs on Marine Ecosystem Services. *Sci Total Environ.* 894: 164781.
- Zhang J, Li T, Tao S, Shen M. (2024). Microplastic Pollution Interaction with Disinfectant Resistance Genes: Research Progress, Environmental Impacts, and Potential Threats. *Environ Sci Pollut Res Int.* 31: 16241–16255
- Agarwal A, Shaida B, Rastogi M, Singh NB. (2023). Food Packaging Materials with Special Reference to Biopolymers-Properties and Applications. *Chem Afr.* 6: 117-144.
- Kan, M, & Miller, SA. (2022). Environmental Impacts of Plastic Packaging of Food Products. *Resour Conserv Recycl.* 180: 106156.
- Acquavia MA, Pascale R, Martelli G, Bondoni M, Bianco G. (2021). Natural Polymeric Materials: a Solution to Plastic Pollution from the Agro-Food Sector. *Polym.* 13,158.
- Pilapitiya NTPGC, Ratnayake AS. (2024). The World of Plastic Waste: a Review. *Cleaner Materials.* 11: 100220.
- Das, D., Panesar, P. S., Saini, C. S., Kennedy, J. F. 2022. Improvement in Properties of Edible Film Through Non-Thermal Treatments and Nanocomposite Materials: A Review, *Food Packaging and Shelf Life*, 32, 100843.
- Geyer R, Jambeck JR, Law KL. (2017). Production, Use, and Fate of All Plastics Ever Made. *Sci Adv.* 3: e1700782.
- Ncube LK, Ude AU, Ogunmuyiwa EN, Zulkifli R, Beas IN. (2020). Environmental Impact of Food Packaging Materials: A Review

- of Contemporary Development from Conventional Plastics to Polylactic Acid Based Materials. *Mater.* 13(21): 4994.
28. Lithner D, Larsson A, Dave G. (2011). Environmental and Health Hazard Ranking and Assessment of Plastic Polymers Based on Chemical Composition. *Sci Total Environ.* 409: 3309-3324.
  29. Alhazmi H, Almansour FH, Aldhafeeri Z. (2021). Plastic Waste Management: A Review of Existing Life Cycle Assessment Studies. *Sustainability*, 13: 5340. 23
  30. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2022). *Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060*. OECD Publishing.
  31. Jiao H, Ali SS, Alsharbaty MHM, et al. (2024). A Critical Review on Plastic Waste Life Cycle Assessment and Management: Challenges, Research Gaps, and Future Perspectives. *Ecotoxicol Environ Saf.* 271: 115942.
  32. O. Fadare O, Wan B, Guo L, Zhao L. (2020). Microplastics from Consumer Plastic Food Containers: Are We Consuming It? 253-126787.
  33. Bishop G, Styles D, Lens PNL. (2020). Recycling of European Plastic is a Pathway for Plastic Debris in the Ocean. *Environ Int.* 142: 105893.
  34. Wen S, Zhao Y, Wang M, Yuan H, Xu H. (2024). Micro(Nano) Plastics in Food System: Potential Health Impacts on Human Intestinal System. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 64(5): 1429-1447.
  35. Thompson RC, Olsen Y, Mitchell RP, Davis, A., et al. (2004). Lost at Sea: Where is All The Plastic? *Science*, 304 (5672): 838.
  36. Hirt N, Body-Malapel M. (2020). Immunotoxicity and Intestinal Effects of Nano- and Microplastics: A Review of The Literature. *Part Fibre Toxicol.* 17: 1-22.
  37. Esmeray E, Armutcu C. (2020). Mikroplastikler, Çevre-İnsan Sağlığı Üzerine Etkileri ve Analiz Yöntemleri. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(1): 839-868.
  38. Ziani K, Ioniță-Mîndrican CB, Mititelu M, et al. (2023). Microplastics: A Real Global Threat for Environment and Food Safety: a State of the Art Review. *Nutr.* 15(3): 617.
  39. Reynaud S, Aynard A, Grassl B, Gigault J. (2022). Nanoplastics: From Model Materials to Colloidal Fate. *Curr Opin Colloid Interface Sci.* 57: 101528.
  40. Samsudin MS, Azman A, Latiffah ARN. (2023). Nanoplastics in Environment Environmental Risk, Occurrence, Characterization, and Identification. In: Nanofillers for Sustainable Application. NM Nurazzi, E Bayraktar, MNF Norrahim, HA Aisyah, N Abdullah, MRM Asyraf (eds). 1<sup>st</sup> ed. pp. 188-197, CRC Press, Boca Raton.
  41. Gulati S, Amar A, Olihan S. (2024). Environmental Fate, Behavior, and Risk Management Approaches of Nanoplastics in the Environment: Current Scenario and Future Insights. In: *Solid Waste Treatment Technologies: Challenges and Perspectives*. P Gautam, V Kumar, S Kumar(eds). 1<sup>st</sup> ed. pp. 148-172, CRC Press, Boca Raton.
  42. Ye J, Ren Y, Dong Y, Fan D. (2024). Understanding The Impact of Nanoplastics on Reproductive Health: Exposure Pathways, Mechanisms, and Implications. *Toxicology*, 504: 153792.
  43. Wang L, Zhu Q, Hu M, et al. (2024). Toxic Mechanisms of Nanoplastics Exposure at Environmental Concentrations on Juvenile Red Swamp Crayfish (*Procambarus clarkii*): from Multiple Perspectives. *Environ Pollut.* 352: 124125.
  44. Hietbrink ST, Materic D, Holzinger R, Niemann H. (2023). High nanoplastic concentrations across the North Atlantic. *Research Square*. In press. Doi: 10.21203/rs.3.rs-3376869/v1
  45. Yoganandham ST, Hamid N, Junaid M, Duan JJ, Pei DS. (2023). Micro(Nano) Plastics in Commercial Foods: a Review of Their Characterization and Potential Hazards to Human Health. *Environ Res.* 236: 116858.
  46. Hernandez LM, Xu EG, Larsson HCE, Tahara R, Maisuria VB, Tufenkji N. (2019). Plastic Teabags Release Billions of Microparticles and Nanoparticles into Tea. *Environ. Sci. Technol.* 53(21), 12300–10.
  47. Diaz-Basantes MF, Conesa JA, Fullana A. (2020). Microplastics in Honey, Beer, Milk and Refreshments in Ecuador as Emerging Contaminants. *Sustainability.* 12:551.
  48. Daniel DB, Ashraf PM, Thomas SN, Thomson KT. (2021). Microplastics in The Edible Tissues of Shellfishes Sold for Human Consumption. *Chemosphere.* 264:128554.
  49. Kedzierski M, Lechat B, Sire O, Le Maguer G, Le Tilly V, Bruzaud S. (2020). Microplastic Contamination of Packaged Meat: Occurrence and Associated Risks. *Food Packag. Shelf Life*, 24:100489.
  50. Mason SA, Welch VG, Neratko J. (2018). Synthetic Polymer Contamination in Bottled Water. *Front Chem.* 6: 389699.
  51. Yang D, Shi H, Li L, Li J, Jabeen K, Kolandhasamy P. (2015). Microplastic Pollution in Table Salts from China. *Environ Sci Technol.* 49: 13622-13627.
  52. Afrin S, Rahman MM, Hossain MN, Uddin MK, Malafaia G. (2022). Are There Plastic Particles in My Sugar? A Pioneering Study on the Characterization of Microplastics in Commercial Sugars and Risk Assessment. *Sci Total Environ.* 837: 155849.
  53. Mühlischlegel P, Hauk A, Walter U, Sieber R. (2017). Lack of Evidence for Microplastic Contamination in Honey. *Food Addit Contam.* 34(11): 1982-1989.
  54. Li Z, Li R, Li Q, Zhou J, Wang G. (2020). Physiological Response of Cucumber (*Cucumis sativus L.*) Leaves to Polystyrene Nanoplastics Pollution. *Chemosphere*, 255: 127041.
  55. Sharma P. (2024). Microplastic Contamination in Food Processing: Role of Packaging Materials. *Food Sci. Eng.* 147:110516.
  56. Cella C, La Spina R, Mehn D, et al. (2022). Detecting Micro- and Nanoplastics Released from Food Packaging: Challenges and Analytical Strategies. *Polymers.* 14:1238.
  57. Schymanski D, Goldbeck C, Humpf HU, Fürst P. (2018). Analysis of Microplastics in Water by Micro-Raman Spectroscopy: Release of Plastic Particles from Different Packaging into Mineralwater. *Water Research*, 129, 154-62.
  58. Arı M, Ögüt S. (2021). Mikroplastikler ve Çevresel Etkileri. *Düzce Univ. Sci. Technol. J.* 9:864-877.
  59. Jadhav EB, Sankhla MS, Bhat RA, Bhagat DS. (2021). Microplastics from Food Packaging: an Overview of Human Consumption, Health Threats, and Alternative Solutions. *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag.* 16: 100608.
  60. Winkler A, Santo N, Ortenzi MA, Bolzoni E, Bacchetta R, Tremolada P. (2019). Does Mechanical Stress Cause Microplastic Release from Plastic Water Bottles? *Water Research*, 166:115082.
  61. Luo Y, Chuah C, Amin MA, et al. (2022). Assessment of Microplastics and Nanoplastics Released from a Chopping Board Using Raman Imaging in Combination With Three Algorithms. *J. Hazard. Mater.* 431:128636.
  62. Marazuela MD, Klaiber M, Moreno-Gordaliza E, Barata A, Gómez-Gómez MM. (2022). Safety Assessment of Commercial Antimicrobial Food Packaging: Triclosan and Microplastics, a Closer Look. *Food Packag. Shelf Life*, 31:100780.
  63. Li X, Wang X, Ren C, Palansooriya KN, Wang Z, Chang SX. (2024). Microplastic Pollution: Phytotoxicity, Environmental Risks, and Phytoremediation Strategies. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 54:6, 486-507.

64. Lusher AL, Tirelli V, O'Connor I, Officer R. (2015). Microplastics in Arctic Polar Waters: The First Reported Values of Particles in Surface and Sub-Surface Samples. *Sci Rep.* 5(1): 14947.
65. Shen M, Song B, Zhu Y, et al. (2020). Removal of Microplastics via Drinking Water Treatment: Current Knowledge and Future Directions. *Chemosphere*, 251: 126612.
66. Chang X, Fang Y, Wang Y, Wang F, Shang L, Zhong R. (2022). Microplastic Pollution in Soils, Plants, and Animals: A Review of Distributions, Effects and Potential Mechanisms. *Sci Total Environ.* 850: 157857.
67. Wieczorek AM, Croot PL, Lombard F, Sheahan JN, Doyle TK (2019). Microplastic Ingestion By Gelatinous Zooplankton May Lower Efficiency of the Biological Pump. *Environ Sci Technol.* 53(9): 5387-5395.
68. Ragusa A, Svelato A, Santacroce C, et al. (2021). Plasticenta: First Evidence of Microplastics in Human Placenta. *Environ Int.* 146: 106274.
69. Leslie HA, van Velzen MJM, Brandsma SH, Vethaak AD, Garcia-Vallejo JJ, Lamoree MH. (2022). Discovery and Quantification of Plastic Particle Pollution in Human Blood. *Environ Int.* 163: 107199.
70. Gündoğdu S, Rathod N, Hassoun A, et al. (2023). The Impact of Nano/Micro-Plastics Toxicity on Seafood Quality and Human Health: Facts and Gaps. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 63(23): 6445-6463.
71. Imhof HK, Ivleva NP, Schmid J, Niessner R, Laforsch C. (2013). Contamination of Beach Sediments of A Subalpine Lake with Microplastic Particles. *Curr Biol.* 23(19): R867-R86855
72. Benson NU, Agboola OD, Fred-Ahmadu OH, De-la-Torre GE, Oluwalana A, Williams AB. (2022). Micro(Nano)Plastics Prevalence, Food Web Interactions, and Toxicity Assessment in Aquatic Organisms: A Review. *Front Mar Sci.* 9: 851281.
73. Ford HV, Jones NH, Davies AJ, et al. (2022). The Fundamental Links Between Climate Change and Marine Plastic Pollution. *Sci Total Environ.* 806: 150392.
74. Bento R, Hoey AS, Bauman AG, Feary DA, Burt JA. (2016). The Implications of Recurrent Disturbances Within The World's Hottest Coral Reef. *Mar Pollut Bull.* 105: 466-472.
75. Halle AT, Jeanneau L, Martignac M, et al. (2017). Nanoplastic in the North Atlantic Subtropical Gyre. *Environ Sci Tech.* 51(23): 13689-13697.
76. Wahl A, Le Juge C, Davranche M, et al. (2021). Nanoplastic Occurrence in A Soil Amended with Plastic Debris. *Chemosphere*, 262: 127784.
77. Bhat MA, Gedik K, Gaga EO. (2023). Atmospheric Micro (Nano) Plastics: Future Growing Concerns for Human Health. *Air Qual Atmos Health.* 16(2): 233-262.
78. Gupta J, Rajamani P. (2023). Beyond Microplastics: Concern of Nanoplastic Pollution on Human and Environmental Health. *Plastic Pollution. EIACP: Geodiversity and Impact on Environment*, 28(4): 1-10.
79. Joksimovic N, Selakovic D, Jovicic N, et al. (2022). Nanoplastics As an Invisible Threat to Humans and the Environment. *J Nanomater.* 2022(1): 6707819.
80. Chae Y, An Y. (2020). Nanoplastic Ingestion Induces Behavioral Disorders in Terrestrial Snails: Trophic Transfer Effect via Vascular Plants. *Environ Sci Nano.* 7(3): 975-983.
81. Verla AW, Enyoh CE, Verla EN, Nwarnorh KO. (2019). Microplastic-Toxic Chemical Interaction: a Review Study on Quantified Levels, Mechanism And Implication. *SN Applied Sciences.* 1:1400.
82. Chen YY, Cheng XT, Zeng YQ. (2023). The Occurrence of Microplastic in Aquatic Environment and Toxic Effects for Organisms. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 20:10477-10490.
83. Lee Y, Cho J, Sohn J, Kim C. (2023). Health Effects of Microplastic Exposures: Current Issues and Perspectives in South Korea. *Yonsei Med J.* 64(5):301-308.
84. Meaza I, Toyoda JH, Wise Sr JP. (2021). Microplastics in Sea Turtles, Marine Mammals and Humans: A One Environmental Health Perspective. *Front. Environ. Sci.* 8:575614.
85. Kedzierski M, D'Almeida M, Magueresse A, et al. (2018). Threat of Plastic Ageing in Marine Environment. Adsorption/Desorption of Micropollutants. *Mar. Pollut. Bull.* 127:684-694.
86. Gündoğdu S, Çevik C, Ataş NT. (2020). Stuffed with Microplastics: Microplastic Occurrence in Traditional Stuffed Mussels Sold in the Turkish Market. *Food Biosci.* 37: 100715.
87. Aydın RB, Yozukmaz A, Şener İ, Temiz F, Giannetto D. (2023). Occurrence of Microplastics in Most Consumed Fruits and Vegetables from Turkey and Public Risk Assessment for Consumers. *Life*, 13(8): 1686.
88. Lu Y, Zhang Y, Deng Y, et al. (2016). Uptake and Accumulation of Polystyrene Microplastics in Zebrafish (*Danio Rerio*) and Toxic Effects in Liver. *Environ. Sci. Technol.* 50(7):4054-4060
89. Davarpanah E, Guilhermino L. (2019). Are Gold Nanoparticles and Microplastics Mixtures More Toxic to the Marine Microalgae *Tetraselmis chuii* than the Substances Individually? *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 181:60-65.
90. Au SY, Bruce TF, Bridges C, J. Klaine S. (2015). Responses of *Hyalomma Azteca* To Acute and Chronic Microplastic Exposures. *Environ. Toxicol. Chem.* 34:11, 2564-2572.
91. Oliviero M, Tato T, Schiavo S, et al. (2019). Leachates of Micronized Plastic Toys Provoke Embryotoxic Effects Upon Sea Urchin *Paracentrotus Lividus*. *Environ. Pollut.* 247:706-715.
92. Ju P, Zhang Y, Zheng Y, et al. (2020). Probing The Toxic Interactions Between Polyvinyl Chloride Microplastics and Human Serum Albumin by Multispectroscopic Techniques. *Sci. Total Environ.* 734:139219.
93. Grigorakis S, Mason SA, Drouillard KG. (2017). Determination of The Gut Retention of Plastic Microbeads and Microfibers in Goldfish (*carassius auratus*). *Chemos.* 169:233-238.
94. Kalcıkova G, Gotvajn AZ, Kladnik A, Jemec A. (2017). Impact of Polyethylene Microbeads on the Floating Freshwater Plant Duckweed *Lemna minor*. *Environ. Pollut.* 230:1108-1115.
95. Cole M, Lindeque P, Fileman E, et al. (2013). Microplastic Ingestion by Zooplankton. *Environ. Sci. Technol.* 47, 6646-6655.
96. Ogonowski M, Schür C, Jarsén Å, Gorokhova E. (2016). The Effects of Natural and Anthropogenic Microparticles on Individual Fitness in *Daphnia Magna*. *PLoS ONE* 11(5): e0155063.

✉ **Sorumlu Yazar:**

Müge UYARCAN

Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa

Bilimleri Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü,

Manisa, TÜRKİYE

E-posta: muge.akkara@cbu.edu.tr