

Mikroplastik Toprak Kirlletici Kaynaklarının İnsan ve Toprak Sağlığı Üzerine Etkisi

Meliha Burcu Gürdere¹

Ayşegül Nazlı Özcan²

Özet

Plastik kirliliği, 21. yüzyılın en büyük çevresel sorunlarından biridir. Özellikle pandemi döneminde kontrolsüz kullanılan eldiven, maske gibi biyomedikal plastik ürünler uygun şekilde bertaraf edilmedikleri için su ve karasal ekosistemlere karışarak ciddi çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Son yıllarda artan nüfus artışına bağlı olarak plastiklerin aşırı miktarda kullanılması karasal ve su ekosistemlerinde mikroplastik kirliliğine sebep olmaktadır. Mikroplastik kirlilik; toprak, su ve böcek ekosistemlerini etkileyen kritik bir küresel çevre sorunu olarak ortaya çıkmıştır. Mikroplastiklerin yaygın varlığı, tarım topraklarına sızarak gıda güvenliğini ve insan sağlığını tehdit etmesi nedeniyle, küresel ölçekte acil bir çevre sorunu olarak ortaya çıkmaktadır. Olağanüstü dayanıklılıkları ve biyolojik bozulmaya karşı dirençleri, tarımsal topraklarda sürekli olarak bulunmalarına katkı sağlar. Topraktaki mikroplastikler, toksik katkı maddelerini toprağa salarak mikrobiyal toplulukları bozabilir. Besin döngüsü gibi temel toprak işlevlerini de bozarak insan sağlığı için fizyolojik ve/veya mekanik hasara neden olabilir. Ayrıca, mikroplastikler bitkiler içinde birikip taşınma potansiyeline sahiptir ve bitkinin büyümesini de önemli ölçüde etkileyebilir. Bu çalışmada; günümüzde oldukça yaygın olarak kullanılan plastiklerin parçalanarak mikroplastığa dönüşmesi sürecinde; mikroplastik kirlilik kaynakları, bunların ekosisteme, tarım toprağı ve besin zinciri üzerinden insan sağlığı üzerine etkisi incelenerek mikroplastik kirliliği önlemeye yönelik etkili öneriler sunulmuştur. Tarım topraklarında mikroplastik kalıntıların önlemek için; olabildiğince plastik malzeme kullanımının azaltılması, biyolojik parçalanabilir ve çevre dostu alternatiflerin

- 1 Prof. Dr., Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Tokat, 60200, Türkiye, burcugurdere@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4285-5528
- 2 Ünvan, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Tokat, 60200, Türkiye, aysegulnozcan05@gmail.com, ORCID ID: 0009-0008-4716-5263

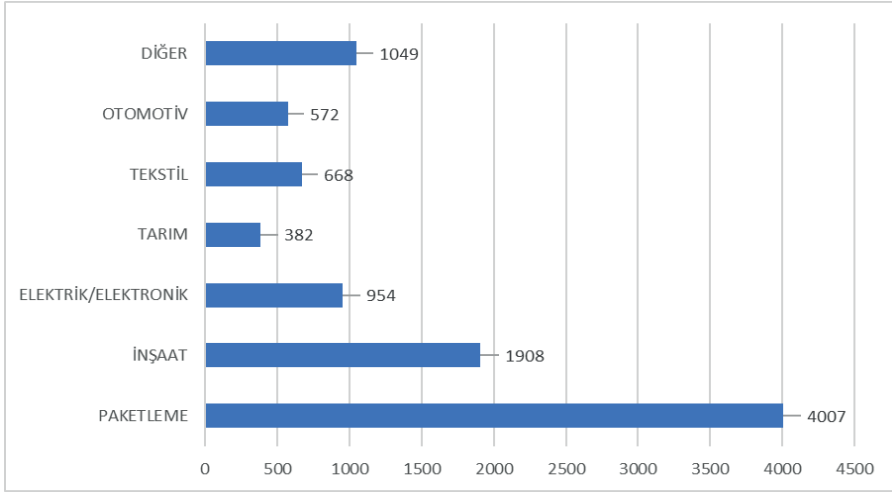
teşvik edilmesi, halkın bilinçlendirilerek atık yönetiminin iyileştirilmesi, geri dönüşüm sürecinin desteklenmesi, sürdürülebilir tarım uygulamalarının benimsenmesi ve toprak iyileştirme tekniklerinin uygulanmasının gerekliliği vurgulanmıştır. Çevrede mikroplastik oluşumunu ve varlığını azaltmak için uygun düzenlemelerin önerilmesi ve uygulanması hayati önem taşımaktadır.

1. Giriş

1.1. Plastikler

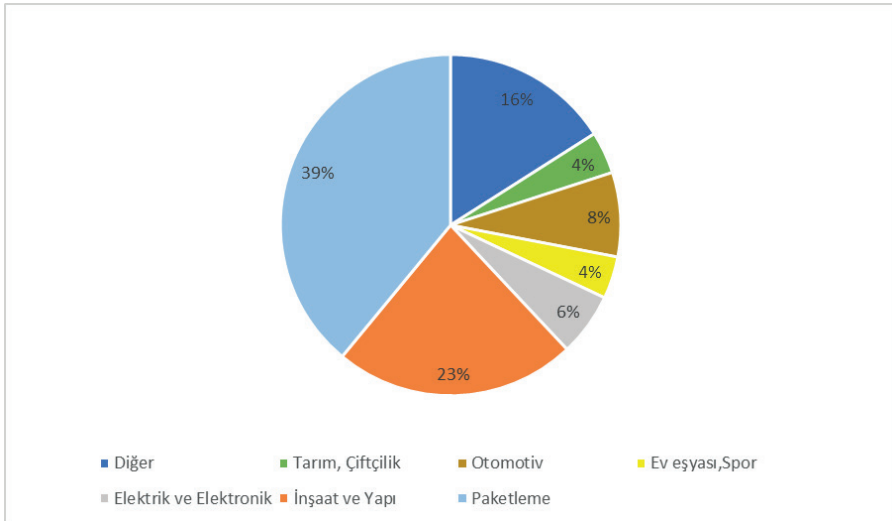
Çeşitli sentetik polimer malzemelerin bir grubunu oluşturan plastikler, yapay atıkların ve çevre kirliliğinin önemli bir göstergesi haline gelmiştir [1]. Plastik, hafifliği ve dayanıklı olması sebebiyle çeşitli kullanım alanlarında tercih edilmesiyle birlikte çevrede mikroplastiklerin yaygınlaşmasında önemli bir rol oynamıştır [2]. 2020 yılında pandemi döneminde, COVID-19 salgını nedeniyle kişisel koruyucu ekipmanların yanlış yönetimi küresel plastik kirliliğini arttırdı ve aylık yaklaşık olarak 129 milyar yüz maskesi ve 65 milyar eldiven kullanıldı [3]. Küresel plastik üretimi 2018 yılında 359 milyon tona ulaştı ve 2050 yılına kadar da 33 milyar metrik tona çıkacağı tahmin ediliyor [4]. Karasal ekosistemlerdeki plastik birikim miktarının, su ekosistemlerinden 4 ila 23 kat daha fazla olduğunun bildirilmesiyle giderek artan bir çevre sorunu haline gelmektedir [5].

Toplam 9,5 milyon ton üretimle Türkiye, Avrupa' nın en büyük plastik üreticilerinden biridir ve 2020 yılına ait sektörlere göre plastik üretimi (Şekil 1)' de verilmiştir. 7 milyon tonun üzerindeki değeriyle ambalaj sektörü, toplam plastik üretiminde en büyük paya sahiptir [6].



Şekil 1. 2020 yılında alt sektörlere göre plastik üretimi (1000 ton) (Çevik ve ark, 2022)

Son yetmiş yılda plastik üretimindeki artış, bu malzemeye olan bağımlılığımızı vurgulamaktadır. Plastiklerin yaygın kullanımı özellikle tarım, inşaat, elektronik, mobilya, tüketici ürünleri, tıbbi cihazlar, ambalaj ve ulaşım gibi kilit sektörlerde yaygındır. Şekil 2’de plastiklerin uygulama alanlarına göre 2022 yılı için yüzde tüketim miktarları gösterilmektedir [7]. 2020 yılında olduğu gibi ambalaj ve inşaat sürekli olarak plastik tüketiminin en büyük payını oluşturmaktadır.

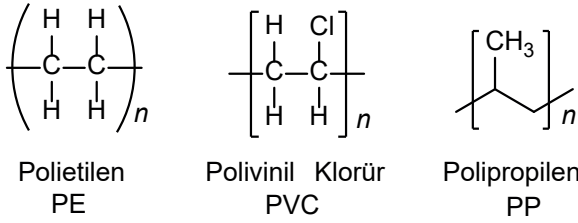


Şekil 2. 2022 yılına göre plastiklerin uygulama alanlarına göre yüzde kullanım miktarları (Haba ve ark, 2025)

1.2. Mikroplastikler

Mikroplastikler, kişisel bakım ürünlerinde bulunan mikro boncuklar gibi büyük plastik parçaların veya küçük plastik parçacıkların ultraviyole, radyasyon, tarımsal faaliyetler ve hava koşulları gibi bir dizi çevresel değişkenin etkisiyle parçalanması sonucu ortaya çıkan, tipik boyutu 5 mm' den küçük plastik parçacık olarak tanımlanırlar ve mikroplastikler (MP' ler) hem kara (karasal) hem de su (sucul) ekosistemlerinde potansiyel kirleticisi kaynaklardır [5,8].

Tarımsal topraklardaki polietilen (PE), polivinil klorür (PVC) ve polipropilen (PP) gibi mikroplastik kirliliği; toprak sağlığı, azot döngüsü ve mahsul verimliliği üzerindeki zararlı etkileri nedeniyle önemli bir çevresel sorun olarak ortaya çıkmaktadır [9]. Çevre kirleticisi olarak yeni tanınan mikroplastikler; ekolojik toksisiteyi büyük ölçüde artırabilecek çeşitli katkı maddeleri içermesinden dolayı, biyolojik çeşitlilik kaybı ve insan sağlığı ve faaliyetleri için potansiyel bir tehdit olarak kabul edilmektedir [10].



Şekil 3. Polietilen, Polivinil klorür ve Polipropilen' in Yapıları

1.3. Mikroplastiklerin Ekosisteme Olan etkisi

Toprakta bulunan çeşitli bileşenler arasında, bakteriler, mantarlar ve arkeaları içeren mikroflora, toprak sağlığının ve ekosistem işlevselliğinin korunmasında çok önemli bir rol oynar. Bu mikroorganizmalar, besin döngüsü, organik madde ayrışması ve toprak yapısının korunmasından sorumludur ve plastiklerin, özellikle de mikroplastiklerin ve nanoplastiklerin toprağa girmesi, bu kritik mikrobiyal topluluklar için önemli bir tehdit oluşturarak toprak sağlığı, tarımsal verimlilik ve ekosistem direnci üzerinde geniş kapsamlı sonuçlar doğurmaktadır [11].



Resim 1. Fotoğraf tarafımdan çekilmiştir.

Mikroplastikler toprak havalanmasını, su tutma kapasitesini ve geçirgenliğini değiştirerek normal toprak işlevini bozarlar. Polietilen (PE) ve polipropilen (PP) gibi çeşitli plastik parçacık türleri, toprak parçacıklarının kohezyonunu etkileyerek toprak yapısının gevşemesine veya sıkışmasına ve su tutma kapasitesinin zayıflamasına neden olabilir. Bu değişiklikler, bitki köklerinin büyümesini doğrudan etkileyerek etkili su ve besin alımını engeller ve böylece genel bitki büyümesi ve verimini etkileyebilir. [12]. Bu bozulmalar toprak ekosisteminde zincirleme reaksiyonlara yol açarak, besin döngüsünü, bitki köklerinin etkileşimlerini ve genel toprak sağlığını değiştirerek tarımsal verimliliği etkiler [13]. Ek olarak, mikroplastiklerin yüksek karbon içeriği, topraktaki biyolojik olarak kullanılabilir karbon seviyesini etkileyen gizli bir karbon kaynağıdır ve geniş bir spesifik yüzey alanına sahiptir, bu nedenle bakteriler için bir karbon kaynağı ve taşıyıcı görevi görür, bu da toprak mikrobiyal topluluklarının yapısını ve işlevini değiştirerek jeokimyasal döngüyü etkileyebilir [14].

Mikroplastiklerin ve nanoplastiklerin toprak ekosistemine geçmesiyle birlikte bitkiler tarafından emilip insan gıda zincirine geçerek gıda güvenliği

ve insan sağlığı üzerine ciddi riskleri de söz konusudur. Uzun vadede sağlık etkileri hala tam olarak bilinmese de mikroplastiklerin yaygın kullanımının, ekolojik ve sağlık üzerindeki etkilerini azaltmak için kapsamlı araştırma ve yönetim yaklaşımı gerekmektedir [15].

2. Tarımsal Topraklarda Mikroplastik Kirlilik

Son yıllarda, plastik malzemenin üretimi ve kullanımı, çok sayıda sosyoekonomik avantajı, hafiflik, stabilite ve esneklik gibi arzu edilen özellikleri sayesinde eşi benzeri görülmemiş seviyelere ulaşmıştır; bu özellikler, plastik malzemeyi çeşitli endüstriler için uygun hale getirmektedir [16]. Mikroplastikler deniz, tatlı su, atmosferik ve karasal ekosistemlerde yaygın olarak dağılmıştır. Özellikle karasal ekosistemler plastik kirliliği için önemli bir depo görevi görür [17].

Plastiklerin tarıma entegrasyonu, polyester, polivinil klorür (PVC) ve polipropilen (PP) gibi çeşitli polimerlerin tanımlanmasının ardından önemli bir ivme kazandı. Bu polimerler; borular, bağlantı parçaları, gübre uygulama aletleri ve koruyucu örtüler dahil olmak üzere çeşitli tarımsal bileşenlerde uygulama alanı buldu [18].

Son yıllarda, tarımsal plastik malç filmlerinden kaynaklanan mikroplastikler, acil bir çevresel sorun haline gelmiştir. Plastik malç filmleri, toprak özelliklerini, flora ve fauna mikrobiyal fonksiyonlarını etkileyen mikroplastikler üretir [19]. Malç filmleri özellikle tarımsal üretimin önemli ölçüde kısıtlandığı kurak ve yarı kurak bölgelerde, dünya çapında yaygın olarak tanıtılmış ve ürün üretiminde kullanılmıştır [20].

Plastik ürünlerin yaygın kullanımı ve yoğun sera yetiştiriciliği, toprak ortamında mikroplastik birikimine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Buna ek olarak, atık su ile sulama, organik gübre uygulaması ve ambalaj poşetleri tesis tarımı ve geleneksel tarım arazilerinde mikroplastiklerin potansiyel kaynakları olarak belirlenmiştir [21].

Toprağın mikroplastiklerle kirlenmesi, mahsuller üzerinde istenmeyen sonuçlar doğurabilir ve etkiler farklı mahsuller arasında değişiklik gösterebilir. Farklı tip ve şekillerdeki mikroplastiklere maruz kalan taze soğanlarda biyokütle, hücre bileşimi, kök sağlığı ve ilgili toprak mikrobiyal aktivitelerinde değişiklikler gözlemlenmiştir [22].

Tarımsal topraklardaki mikroplastik kirliliği ile ilgili ilk makalelerden biri 2018 yılında Nature dergisinde yayınlanmıştır [23]. Tarımsal alanlarda mikroplastiklerin yaygınlığını belirlemek için Almanya' nın güneydoğusundaki Orta Frankonya' daki tarım arazisinden toprak

numunesi alınarak incelendi. Çiftçiler, yalnızca standart tarım yöntemlerini kullandıklarını ve mikroplastikleri toprağa sokma potansiyeli olan herhangi bir plastik veya gübre gibi organik toprak katkı maddesi kullanmadıklarını bildirdiler. Çiftçilerin plastik kullanımı açıkça görülmese de araştırmacılar üst toprak örneklerinde kg başına $0,34 \pm 0,36$ mikroplastik parçacık buldular. Mikroplastik miktarının yüksek olması yeni bilimsel endişelere yol açtı ve araştırmacılar, tarım alanlarında temel mikroplastik kirlilik seviyesi belirlenmesi önerisinde bulundular [24].

Çoğu atıksu arıtma tesisinde, küçük plastik parçacıkların uzaklaştırılmasının düşük verimliliği nedeniyle, büyük miktarda mikroplastik kanalizasyon çamurunda ve atık sularda tutulmaktadır. alışmalar, büyük miktarda mikroparacığın atık sudan salındığını ve sulama yoluyla tarım alanlarına girdiğini göstermiştir. İspanya' nın doğusunda yer alan ve kanalizasyon çamuru uygulanan sekiz tarım alanından toplanan toprak örneklerinden elde edilen verilere göre, hafif ve ağır yoğunluklu mikroplastiklerin miktarı sırasıyla 2130 ± 950 adet/kg ve 3060 ± 1680 adet/ kg' a ulaşmıştır; bu değerler, çamur uygulaması yapılmayan topraklara göre önemli ölçüde daha yüksektir. Tarım alanlarının yanı sıra, sonuçlar ayrıca, atık su ile sulama nedeniyle sebze toprağındaki mikroplastiklerin tampon topraktakinden daha fazla mikroplastik miktarına sahip olduğunu da doğrulamıştır [25].

Ayrıca, mikroplastiklerin toprak mikrobiyal topluluklarının çeşitliliği üzerinde çok az etkisi olduğuna dair kanıtlar da mevcuttur. Bu, mikroplastiklerin toprak mikroorganizmaları ve enzimleri üzerindeki etkisinin oldukça değişken olduğunu göstermektedir; dolayısıyla, mikroorganizmaların farklı koşullar altında mikroplastiklere verdiği tepki göz ardı edilemez [26]. Toprak mikrobiyal biyotasının temel bileşenleri olan bakteri ve mantar toplulukları, ekosistem fonksiyonlarının ve toprak biyokimyasının düzenlenmesinde önemli roller oynar. Hem bakteriler hem de mantarlar organik maddeyi paralayabilse de bakteriler genellikle topraklardaki hızlı karbon döngüsü yollarının önemli düzenleyicileri olarak kabul edilirken, mantarlar esas olarak dirençli organik maddenin parçalanmasından sorumludur. Bakteriler ve mantarlar toprak fonksiyonlarında farklı roller oynasalar da toprak biyokimyasal süreçlerine birlikte hakimdirler ve birbirleriyle yakından ilişkilidirler. Mikroplastiklerin toprak mikroortamını değiştirdiği bilinmektedir ve aynı ortamda mantarların ve bakterilerin mikroplastiklere farklı tepkiler verebileceği tahmin edilebilir. [27].

2.1. Tarım Topraklarında Mikroplastik Kirlilik Kaynakları

2.1.1. Tarımsal Malç filmleri

Mikroplastiklerin toprağa sızabileceği birçok yol vardır ve dünya çapında yapılan birçok çalışma, plastikten yapılmış malç filmlerinin en yaygın kaynak olduğunu göstermiştir. Malç filmleri gelişmiş ülkelerde genellikle toprak sıcaklığını düzenlemek, mahsul verimini artırmak, yabancı otların büyümesini engellemek ve su ve gübreyi tutmak için kullanılır [28].

Malç filmleri doğada parçalanamayan düşük ve yüksek yoğunluklu polietilenden (PE)' den üretilir ve genellikle 6-8 μm olan düşük kalınlıkları ve %60' ın altındaki geri kazanım oranları nedeniyle sonraki mahsullerde yeniden kullanılması zordur. Bu nedenle, hasat mevsiminden sonra yaygın kullanımı nedeniyle önemli miktarda film kalıntısı oluşur. Oluşan kalıntıların giderilmesi, zaman alıcı olması ve yüksek işçilik maliyeti nedeniyle zordur. [29].

Malç filmlerinin UV kaynaklı bozunma gibi çevresel bileşenlere uzun süre maruz kalması sonucunda yüzey aşınması ve parçalanması nedeniyle toprakta mikroplastik kalıntılarının artmasına neden olmaktadır [30]. Toprakta mikroplastik artışı solucanlar gibi canlı organizmaları da olumsuz etkileyerek, mahsul büyümesini azaltır ve toprak kalitesini bozar. Ayrıca; toprak dokusu, mahsul yetiştirmek için arazi kullanım süresi ve sulama sistemi gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak farklı toprak katmanlarında değişiklik gösterebilir [31].

2.1.2. Gübreler

Organik gübreler, Bunlar arasında günlük evsel atıklar, belediye atıkları ve kanalizasyon çamuru gibi kentsel kaynakların yanı sıra gübre ve saman gibi tarımsal girdiler ile gıda işleme atıkları gibi endüstriyel yan ürünleri de içeren ağırlıklı olarak insan faaliyetlerinden kaynaklanan katı organik atıklardan elde edilir [32]. Organik atıkların kompostlama veya fermantasyon yoluyla geri dönüştürülmesi ve ardından tarım arazilerine uygulanması, temel olarak besin maddelerini, eser elementleri ve humusu toprağa geri kazandırmak için çevreye duyarlı bir uygulamadır. Ancak, evsel ve kentsel biyolojik atıkların çoğu plastik malzemelerle temas ederek kirlenmektedir. Eleme ve eleme işlemleri bu kirleticileri önemli ölçüde azaltabilir, fakat tamamen ortadan kaldıramaz, bu da toprakta mikroplastik oluşumuna sebep olur [33].

Yavaş ve kontrollü salınımlı inorganik gübrelerde kullanılmak üzere tasarlanmış biyolojik olarak parçalanamayan polimerler, mikroplastik parçacıkların doğrudan kaynağıdır. Öte yandan hayvan dışkısı, yemler,

plastik aletler, ekipmanlar ve ambalaj malzemeleri hem inorganik gübrelerin hem de çiftlik gübresinin dolaylı olarak mikroplastik kaynağı olabilir [34].

2.1.3. Sulama

Yapılan çalışmalarda, nehir suyu ile sulama, derin topraklarda mikroplastik kirliliğini artırarak mikroplastiklerin çevreye ikincil olarak yayılmasına neden olduğu belirtilmiştir. Bu, sulanan tarım alanlarında mahslleri sulamak için kullanılan suyun, plastik parçacıklarıyla kirlenmiş nehirler, gller veya yeraltı suları gibi çeşitli kaynaklardan gelen mikroplastikleri içerebileceğı anlamına gelir [28]. Aynı zamanda yüzey sulama, damla sulama ve damla sulama ile yağmurlama sulamanın sırasıyla 437 ila 4148, 836 ila 2013 ve 310 ila 1747 parça/kg arasında değışen toprak mikroplastik birikimine katkıda bulunduğı bildirilmiştir [35].

Mikroplastiklerin suyla çok yavaş ve etkisiz bir şekilde taşınarak ve toprağın üst 10 cm'lik kısmında kaldığı, sadece toprak matrislerinde değıl, aynı zamanda toprağın akışı ileten kırık bölgelerinde de kaldığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, mikroplastikler sığ topraklarda ve kök bölgelerinde birikmeye meyillidir, bu da kara ekosistemleri ve tarım üzerinde olası olumsuz etkilerin en üst düzeye çıkmasına neden olabilir [36]. Aynı zamanda mikroplastiklerin tarım topraklarında birikmesi, toprak neminin buharlaşmasını %25,9–30,2 oranında artırarak tarım topraklarındaki su kıtlığını daha da şiddetlendirir [35].

Yeraltı suyu akiferleri, tarım arazilerinin toprağından mikroplastiklerin dikey taşınmasından etkilenebilir ve bu durum akifer mikroorganizmaları ve yeraltı suyu içenler için zararlı olabilir ve potansiyel sağık riskleri oluşturabilir [37].

2.1.4. Plastik İpler

Plastik ipler çoğunlukla polipropilenden (PP) yapılır ve tarımda birçok amaçla kullanılır. Polipropilen ipler domates, tatlı biber gibi başlıca mahsullerde bitkileri kazıklara bağlamak için ve muz üretiminde bitkilerin devrilmesini önlemek için birbirlerine bağlanmasında kullanılır [24]. Tarımsal topraklarda polipropilen parçacıkları ve polyester lifleri de muhtemelen sulama yoluyla topraklara girdiğı tahmin edilmektedir, bu da sulama suyunun mikroplastiklerin kaynağı ve dağılımında önemli bir rol oynayabileceğini göstermektedir [38].

2.1.5. Plastik borular

Polivinil klorür (PVC); sera filmleri, sulama boruları ve malç malzemelerinde bulunması sebebiyle tarımda, özellikle de tesis tarımında yaygın olarak kullanılmaktadır ve bunların tümü topraklardaki mikroplastik kirliliğine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Ayrıca polivinil klorür (PVC); polietilen (PE) gibi yaygın diğer polimerlerle kıyaslandığında, daha yüksek yoğunluk ve klor atomlarının varlığı gibi belirgin kimyasal özelliklere sahip olmasından dolayı çevresel davranışını ve kirleticilerle etkileşimlerini önemli ölçüde etkiler [39].

Türkiye’deki tarım toprakları üzerinde yapılan bir çalışmada, tespit edilen mikroplastiklerin %13’üne kadarının tek kullanımlık damla sulama borularından (çoğunlukla polivinil klorür PVC) kaynaklandığı tespit edilmiş ve sulama altyapısının toprak mikroplastik kirliliğine katkısındaki önemli rolü vurgulanmıştır. Biyolojik olarak parçalanamayan ve çevrede yıllarca kalabilen bir plastik olan Polivinil Klorür (PVC), dünya çapındaki toplam plastik üretiminin yaklaşık %46’ını oluşturan ilk üç plastikten biridir [39, 40].

Yapılan çalışmalar, tarım toprağında bulunan mikroplastiklerin varlığı toprak mikroorganizmalarının bileşimini ve metabolik aktivitesini etkileyebileceğini göstermiştir. %5 polivinil klorür (PVC) mikroplastikler, toprak bakteri topluluğunun zenginliğini ve çeşitliliğini azalttığı ve Burkholderiaceae familyası gibi birçok bakteri grubunun bolluğunu önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir [41].

3. Mikroplastiklerin İnsan Sağlığı Üzerine Etkisi

İnsan faaliyetlerinden kaynaklanan mikroplastikler, insan yaşam ortamının bütünlüğü için önemli bir risk oluşturmaktadır [42]. Mikroplastikler besin zinciri yoluyla toprak kirliliğini artırarak insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere neden olur. Besin zinciri, bir ekosistemde enerji veya besin maddelerinin birincil üreticilerden temel tüketicilere ve oradan da ayrıştırıcılara aktarıldığı sıralı adımlardır; besin zinciri, yaşamın sürdürülmesi için hayatı öneme sahiptir [43].

Mikroplastikler, çeşitli organizmalarda, hayvanlarda ve insan vücudunun birçok yerinde tespit edilmiştir. Plastikler; monomerler, katkı maddeleri, işleme maddeleri ve kasıtsız olarak eklenen maddeler dahil olmak üzere binlerce kimyasal madde içerir. Bunlar arasında bilinen kalıcı organik kirleticiler, endokrin bozucular, insan kanserojenleri ve nörotoksik maddeler bulunmaktadır. Bu zararlı kimyasallar, plastiklerin insan sağlığı ve atmosfer üzerindeki zararlı etkilerine önemli ölçüde katkı sağlamaktadır. İnsanlar,

çeşitli pasif yollarla istemeden mikroplastikleri yutabilir veya taşıyabilir ve bu mikroplastikler metabolizma, fizyolojik fonksiyonlar ve genel sağlık üzerinde bir dizi zararlı etkiye sebep olabilir [32].

Mikroplastikler, vücuda emildiğinde üreme ve endokrin sistemlerini etkileyen çeşitli hastalıklara neden olabilen bisfenol A gibi çevresel toksinlerin taşıyıcısı olabilir, bu da insan sağlığı için tehlike oluşturur [44].

İnsan plasentasında mikroplastiklerin varlığı, bunların insan vücudu üzerinde nesiller arası potansiyel etkisi ve gelişmekte olan fetus üzerinde olası ciddi etkileri söz konusudur. Sonuç olarak, erken maruziyetin bebekler ve embriyoların erken gelişimi üzerindeki potansiyel etkisi göz ardı edilemez [45].

Mikroplastikler, mikroorganizmaları barındırır ve antibiyotik dirençli genlerin transferini teşvik edebilir. Yapılan araştırmalarda, bazı patojenlerin mikroplastiklere yapıştığını ve insanların bu kontamine gıdaları tükettiğinde enfeksiyon olasılığını artırdığını göstermiştir.

Mikroplastiklerin yutulması, solunması ve ciltle teması yoluyla kronik maruz kalma, birçok sağlık riskini de beraberinde getirir. Mikroplastikler insan vücuduna girdikten sonra organlarda birikir ve metabolik bozukluklara, iltihaplanmaya ve endokrin bozukluklara yol açar. [46].

Mikroplastik parçacıklar solunabilecek kadar küçüktür. Yapılan araştırmalarda akciğer ve kan örneklerinde mikroplastikler tespit edilmiştir; bu da solunum sistemine nüfuz edebilme ve potansiyel olarak vücutta dolaşabilme yeteneklerini göstermektedir. Solunması çeşitli potansiyel sağlık riskleri taşır. Çünkü, akciğerlerin epitel bariyerini geçerek, kan dolaşımına ve lenfatik sisteme girmesi potansiyel olarak diğer organ ve dokulara ulaşabileceğinin göstergesidir [47].

Hayvan çalışmaları, mikroplastiklerin biyolojik bariyerleri geçebildiğini göstermiştir. Bu bulgular endişe vericidir, çünkü mikroplastiklere kronik maruz kalmanın insanlarda nörolojik hasara yol açabileceği olasılığını göstermektedir. Yapılan çalışma, mikroplastiklerin beyinde birikebileceğini ve nöroinflamasyona neden olarak uzun vadeli bilişsel ve motor bozukluklara yol açabileceğini göstermiştir [48].

Ftalat esterleri, plastiklerde esnekliği ve dayanıklılığı artırmak için plastikleştirici olarak kullanılır ve ayrıca polivinil klorür (PVC) polimerlerin üretiminde de kullanılır. Ftalat esterlerine maruz kaldığında potansiyel olarak zararlıdır ve anormal cinsel gelişime ve doğum kusurlarına neden olabilir. Ek olarak, ABD Çevre Koruma Ajansı (USEPA) tarafından bütül

benzil ftalat (BBP) ve di-2-etilheksil ftalat (DEHP) muhtemel ve olası insan kanserojenleri olarak sınıflandırıldı [49].

Mikroplastik maruziyetinden kaynaklanan kanser riski, mikroplastik türü, boyutu, maruz kalma süresi ve bireysel duyarlılık gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Mikroplastikler, akciğer, deri ve sindirim sistemi kanserleriyle ilişkilendirilmiştir; çünkü bu bölgeler, bu kirleticilerin vücuda en sık girdiği yerlerdir.

Düzensiz şekilli mikroplastik parçacıklar, özellikle 5 mm'den küçük olanlar, hücresel hasarı artırabilir ve nihayetinde DNA mutasyonlarına ve potansiyel olarak kanser gelişimine yol açabilir. Mikroplastikler, mekanik stres ve hücre zarlarının delinmesi yoluyla hücrelere fiziksel hasar vererek programlanmış hücre ölümü olan apoptoz veya nekroza, doku iltihabına ve reaktif oksijen türlerinin salınımına yol açar. Hücreler içinde reaktif oksijen türlerinin birikmesi oksidatif strese yol açarak DNA hasarına, baz modifikasyonlarına, zincir kırılmalarına ve çapraz bağlanmalara neden olur ve bu da kansere yatkınlığı artırır. Dahası mikroplastikler, kanserojenler olarak bilinen ağır metaller ve kalıcı organik kirleticiler gibi toksik kimyasalları taşıyıcı olarak da davranır [50].

Mikroplastiklerin kanserojen olma potansiyeli, fiziksel özellikleri, kimyasal yapısı ve diğer çevresel toksinleri taşıma kapasitesi gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır. Yapılan çalışmalarda, dokularda mikroplastiklerin farklı düzeylerde birikimiyle oksidatif stres, inflamasyon ve genetik materyale doğrudan zarar verme gibi çeşitli mekanizmalar yoluyla akciğer, kolorektal, karaciğer, böbrek, meme, yumurtalık ve prostat kanserleri de dahil olmak üzere birçok kanser türüne sebep olabileceği gösterilmiştir [51].

4. Sonuç

Hafif yapıları, dayanıklılıkları, uygun fiyatlı olmaları, yüksek güç-ağırlık oranları ve düşük ısı iletkenlikleri nedeniyle, plastiklerin günlük yaşamda yaygın kullanımı son 50 yılda önemli ölçüde artmıştır. Kullanılan plastik miktarının artmasıyla da her gün, çevreye çok büyük miktarda karbon ve diğer zehirli kimyasallar salınmaktadır.

Zararlı etkilerine dair çok sayıda literatür bulunmasına rağmen, plastik endüstrisi ekonomik büyümeye katkıda bulunmaktadır. Küresel plastik pazarı büyüklüğü 2016 yılında yaklaşık 502 milyar dolar olan miktarının, 2028 yılına kadar yaklaşık 750,1 milyar dolara çıkması beklenmektedir [52].

Şu anda plastik atıkların yaklaşık %9' u geri dönüştürülüyor, %12' si yakılıyor ve kalan %79' u ise çöplüklerde birikiyor veya doğal yaşam alanlarına dağılıyor [53].

Mikroplastikler, plastik kaynaklı kalıcı kirleticiler olarak kabul edilmekte ve su, kara ve toprak ekosistemlerindeki kirliliğe sebep olan maddelerdir. Plastik malç filmleri, evsel ve endüstriyel atıklar, yağışlar, damla sulama sistemleri, polivinil klorür (PVC) borular, polietilen (PE) ipler ve kompost bazlı gübreleme gibi çeşitli insan faaliyetleri, karasal ortamlarda mikroplastik kirliliğine katkıda bulunan önemli kaynaklardır. Mikroplastikler, toprak sistemlerinde tarımsal faaliyetler sonucu taşınarak toprak ekosistemini özelliklerini ciddi şekilde etkileyerek, canlılarda doğrudan sindirim veya birikim ve toprak özelliklerinin dolaylı olarak değişmesi gibi çeşitli etkiler gösterir. Mikroplastikler toprak ekosistemleri için çok ciddi risk oluştururlar.

Topraktaki küçük mikroplastik parçacıklar bitkiler ve hayvanlar tarafından absorplanabilir. Bu nedenle, toprakta bulunan mikroplastikler gıda zincirine girme potansiyeline sahiptir ve bu da insanların doğrudan maruz kalma riskini artırır. Tarımsal ürünler ve hayvancılık ürünleri insanlar için hayati gıda kaynakları olduğundan, mikroplastiklerin ürünler üzerinde ciddi etkileri söz konusudur.

Mikroplastiklerin toksik etkileri, sentetik veya doğal olmalarına bağlı olarak özelliklerine ve üretim kaynaklarına göre değişir. Elyaf gibi sentetik plastikler yavaş bozunur ve çevreye ve insan sağlığına zarar veren organik kirleticiler olarak kalırlar.

Toprak mikroplastik kirliliğinin etkili bir şekilde yönetilmesi için, plastik malç filmlerinin kullanımında tasarruf sağlamak, sürdürülebilir sulama yapmak ve toprak mikroplastik kirliliğini kaynağında kontrol etmek gibi seçeneklerin belirlenerek öncelikle toprağı kirleten mikroplastik kaynaklarının bilinmesi gerekmektedir.

Plastik malç filmlerinin aşınması ve bozunması sonucunda toprakta mikroplastik kalıntıları oluşmaktadır. Bu sebeple mikroplastik kalıntısını önlemek ve sürdürülebilir tarıma etkin bir şekilde katkıda bulunmak için biyolojik olarak parçalanabilen polimerler üzerine yoğun araştırmalar yapılmıştır. Doğada parçalanabilen polimerler mikroplastik atık üretmeden hızla ayrılan malçların geliştirilmesini kolaylaştırmıştır. Bu malzemeler, amaçlanan kullanım süreleri boyunca mekanik bütünlüklerini ve performanslarını korumak için sürekli olarak optimize edilmektedir. Ancak, yüksek üretim maliyetleri ve performans sorunları nedeniyle, uygulamaları ve yaygınlaştırılmaları bazı zorluklar ortaya çıkarmıştır. Düşük maliyetli,

biyolojik olarak parçalanabilir malç filmlerinin geliştirilmesi ve biyolojik olarak parçalanabilir plastik malç filmlerin kontrol edilebilirliğini ve stabilitesini daha da iyileştirmek için düşük maliyetli bozulmayı hızlandırıcı katkı maddelerinin geliştirilmesi gerekmektedir; böylece malç filmlerinin toprakta doğal bozunma süresi etkili bir şekilde kısaltılabilir ve plastik film kalıntılarının ekolojik ve çevresel etkisi azaltılabilir. Ayrıca, biyolojik olarak parçalanabilir malç filmlerinin geniş ölçekli kullanımından sonra, atıkların geri dönüşümü ve bunun tarım ekosistemleri üzerindeki etkisi konusunda daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir.

Toprak ekosistemindeki mikroplastik kirliliğini ele almak için, çevre dostu çözümler arasında biyolojik olarak parçalanabilir alternatiflerin teşvik edilmesi, atık yönetiminin iyileştirilmesi, sürdürülebilir tarım uygulamalarının benimsenmesi ve toprak iyileştirme tekniklerinin uygulanması yer almaktadır. Ek olarak, kamuoyunu bilinçlendirmek, destekleyici politikalar uygulamak ve araştırma ve yeniliği teşvik etmek, mikroplastik kirliliğini azaltmak çevre ve insan sağlığını iyileştirmek için çok önemlidir. Bu nedenle, bu çevre dostu çözümlerin uygulanması, toprak ekosistemlerindeki mikroplastik kirliliğini önemli ölçüde azaltarak daha sağlıklı çevreye ve insan sağlığının iyileşmesine katkı sağlar.

Plastik tüketimini azaltmak, mikroplastik kirliliğini önlemenin en etkili yoludur. Bu, tek kullanımlık plastikler yerine yeniden kullanılabilir alışveriş çantaları, su şişeleri ve gıda kapları kullanılarak başarılabılır. Ayrıca ekolojik dengeyi sağlamak için, aşırı plastik ambalajlı ürünler satın almaktan kaçınabilir ve doğal malzemelerden yapılmış çevre dostu ürünleri tercih edebiliriz.

Yeniden kullanım ve geri dönüşüm, plastik kirliliğini önlemede en etkili araçlardandır. Plastik ürünlerin geri dönüşümü, çöplüklere giden ve nihayetinde okyanusa karışan atık miktarını azaltmaya yardımcı olabilir.

Biyolojik olarak parçalanabilir ve geri dönüştürülebilir polimerlerin geliştirilmesi gibi yeşil kimyadaki yenilikler, plastiklerin çevredeki kalıcılığını azaltmak için umut vadeden bir yol sunmaktadır. Ayrıca, plastiklerin enzimatik ve mikrobiyal bozunumu üzerine devam eden araştırmalar, plastikleri daha verimli ve güvenli bir şekilde parçalayabilen biyolojik temelli çözümlerin önünü açabilir.

Sonuç olarak, mikroplastik kirliliğiyle mücadele, uzun vadeli çevresel sürdürülebilirliği sağlamak için bilimsel ilerlemeleri ve teknolojik yenilikleri entegre eden çok disiplinli bir yaklaşım gerektirmektedir.

Plastik, mikroplastik ve nanoplastik kirliliğini azaltmaya yönelik öneriler şunlardır:

- Mümkün olduğunca plastik ambalaj malzemeleri yerine biyolojik olarak parçalanabilen ambalajlar, bambu ürünler ve bitki bazlı alternatifler kullanılmalıdır.
- Atık sınıflandırması, plastik atıkların geri dönüşümü ve kullanımını gerçekleştirmek için gerekli bir yöntemdir; farklı türdeki plastik atıkların makul ve bilimsel bir şekilde sınıflandırılması ile depolama sırasında tarım ekosistemlerine giren plastik miktarı önlenebilir veya azaltılabilir.
- Plastikler, bertaraf edilirken diğer atıklardan ayrı tutulmalı ve uygun şekilde işlenmelidir.
- Geri dönüştürülmüş plastik ürünlerin tümü için kalite şartları oluşturulmalı ve uygulanmalıdır.
- Plastik atıkların yönetimi için yerel ve zgn czmler geliştirilmelidir.
- Plastik atık yönetimi politikaları geliştirilirken ve uygulanırken, toplumun her düzeyinin ihtiyaçları dikkate alınmalıdır. İlkokuldan başlayarak eğitim sistemimizin her aşamasında, plastik atık yönetimine ilişkin sosyal sorumluluk aşılanmalıdır.
- Mevcut en iyi teknoloji ve teknikler hakkında sürekli bilgi paylaşımı yapılmalıdır.
- Standart veya biyolojik olarak parçalanamayan malzemeler, nişasta gibi yüksek oranda biyolojik olarak parçalanabilen malzemelerle değiştirilmelidir.
- Sanayiden kaynaklanan plastik atıklar ya geri dönüştürülmeli ya da yeniden değerlendirilmelidir.
- Atıksu arıtma tesisleri, atıksudan plastik parçacıklarını uzaklaştırarak mikroplastik kirliliğinin önlenmesinde ck önemli bir rol oynayabilir. Ekosistemdeki mikroplastik miktarını azaltmak için bu tesislerin kapasitesini ve verimliliğini artırmaya yönelik calışmalar yapılabilir.
- İşletmeleri sürdürülebilir uygulamaları benimsemeye ve plastik kullanımını azaltmaya teşvik etmek, mikroplastik kirliliğini en aza indirmenin etkili bir yolu olabilir.

Kaynaklar

- [1] Weber, C. J., & Opp, C. (2020). Spatial patterns of mesoplastics and coarse microplastics in floodplain soils as resulting from land use and fluvial processes. *Environmental Pollution*, 267, 115390.
- [2] Dindar, E. (2024). The effect of N mineralization, nitrification and ammonification rates in soils contaminated with microplastics. *Water, Air, & Soil Pollution*, 235(11), 699.
- [3] Debrah, J. K., Vidal, D. G., & Dinis, M. A. P. (2021). Innovative use of plastic for a clean and sustainable environmental management: Learning cases from Ghana, Africa. *Urban Science*, 5(1), 12.
- [4] Rathikannu, S., Gautam, S., Joshi, S. K., Katharine, P., Mithra, K. E., Banusaranya, P., ... & Ho, C. H. (2025). FTIR based assessment of microplastic contamination in soil water and insect ecosystems reveals environmental and ecological risks. *Scientific Reports*, 15(1), 28615.
- [5] Liu, Z., Li, Y., Xu, G., & Yu, Y. (2025). Effects of microplastics on black soil health: A global meta-analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 490, 137850.
- [6] Çevik, C., Kideys, A. E., Tavşanoğlu, Ü. N., Kankılıç, G. B., & Gündoğdu, S. (2022). A review of plastic pollution in aquatic ecosystems of Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(18), 26230-26249.
- [7] Haba, B., Djellali, S., Abdelouahed, Y., Boudjelida, S., Faleschini, F., & Carraro, M. (2025). Transforming plastic waste into value: A review of management strategies and innovative applications in sustainable construction. *Polymers*, 17(7), 881.
- [8] Bhattacharjee, U., Baruah, K. N., & Shah, M. P. (2025). Exploring sustainable strategies for mitigating microplastic contamination in soil, water, and the food chain: A comprehensive analysis. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*.
- [9] Sarfraz, U., Qian, Y. S., Yu, Q., Cao, Y., Jiang, X., Mahreen, N., ... & Zhu, X. (2025). Microplastic effects on soil nitrogen storage, nitrogen emissions, and ammonia volatilization in relation to soil health and crop productivity: mechanism and future consideration. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1621542.
- [10] Xia, H., Shen, J., Riaz, M., Ran, F., Cheng, T., Wang, X., ... & Jiang, C. (2025). Effects of agricultural plastic films on crop growth and soil health in tobacco fields: A comparative study. *Applied Soil Ecology*, 206, 105795.
- [11] Das, D., Deb, D., & Paul, P. (2025). Plastic Pollution Impacting Soil Microflora: A Study Toward Agricultural Productivity. In *Micro-Nano Plastics Exposure, Environmental Degradation and Public Health Crisis: Perspectives and Concerns for Sustainable Development* (pp. 281-300). Singapore: Springer Nature Singapore.

- [12] Gao, S., Mu, X., Li, W., Wen, Y., Ma, Z., Liu, K., & Zhang, C. (2025). Invisible threats in soil: Microplastic pollution and its effects on soil health and plant growth. *Environmental Geochemistry and Health*, 47(5), 158.
- [13] Sakin, E., Dilekoğlu, M. F., & Yanardağ, İ. H. (2025). Unseen threat: The devastating impact of microplastics on soil health in agricultural lands. *Catena*, 253, 108904.
- [14] Liu, S., Chen, B., Wang, K., Wang, J., Wang, K., Suo, Y., ... & Liu, Y. (2025). Unveiling the impact of biodegradable polylactic acid microplastics on meadow soil health. *Environmental Geochemistry and Health*, 47(2), 45.
- [15] Hasan, M. M., & Tarannum, M. N. (2025). Adverse impacts of microplastics on soil physicochemical properties and crop health in agricultural systems. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 17, 100528.
- [16] Gökkaya, A., & İzmirli, Ş. G. (2025). Microplastic contamination in some herbal teas and human risk assessment: Türkiye. *Food and Chemical Toxicology*, 205, 115718.
- [17] Liu, Y., Wang, X., Duo, J., Pei, L., Wang, S., Rehemanjiang, W., & Li, W. (2025). Microplastic contamination in cotton soils following long-term mulching: A field study for the Xinjiang Production and Construction Corps in China. *Results in Engineering*, 108028.
- [18] Sahai, H., del Real, A. M. A., Alcayde, A., Bueno, M. M., Wang, C., Hernando, M. D., & Fernández-Alba, A. R. (2025). Key insights into microplastic pollution in agricultural soils: A comprehensive review of worldwide trends, sources, distribution, characteristics and analytical approaches. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 185, 118176.
- [19] Wang, K., Flury, M., Kuzyakov, Y., Zhang, H., Zhu, W., & Jiang, R. (2025). Aluminum and microplastic release from reflective agricultural films disrupt microbial communities and functions in soil. *Journal of Hazardous Materials*, 491, 137891.
- [20] Wang, K., Liu, X., Chadwick, D. R., Yan, C., Reay, M., Ge, T., ... & Jones, D. L. (2025). The agricultural plastic paradox: Feeding more, harming more?. *Environment International*, 198, 109416.
- [21] Wang, X., Feng, Q., Yang, L., Li, M., Zhao, F., Tang, J., ... & Chen, L. (2025). Effect of land use on occurrence and spatial variability of soil microplastics in agricultural watershed. *Ecological Frontiers*, 45(2), 497-506.
- [22] Tang, K. H. D. (2023). Microplastics in agricultural soils in China: Sources, impacts and solutions. *Environmental Pollution*, 322, 121235.
- [23] Piehl, S., Leibner, A., Löder, M. G., Dris, R., Bogner, C., & Laforsch, C. (2018). Identification and quantification of macro-and microplastics on an agricultural farmland. *Scientific reports*, 8(1), 17950.

- [24] Lwanga, E. H., Beriot, N., Corradini, E., Silva, V., Yang, X., Baartman, J., ... & Geissen, V. (2022). Review of microplastic sources, transport pathways and correlations with other soil stressors: a journey from agricultural sites into the environment. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9(1), 20.
- [25] Tian, L., Jinjin, C., Ji, R., Ma, Y., & Yu, X. (2022). Microplastics in agricultural soils: sources, effects, and their fate. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 25, 100311.
- [26] Zhang, X., Li, Y., Ouyang, D., Lei, J., Tan, Q., Xie, L., ... & Yan, W. (2021). Systematical review of interactions between microplastics and microorganisms in the soil environment. *Journal of Hazardous Materials*, 418, 126288.
- [27] Fan, P., Tan, W., & Yu, H. (2022). Effects of different concentrations and types of microplastics on bacteria and fungi in alkaline soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 229, 113045.
- [28] Bello, F. A., Folorunsho, A. B., Chia, R. W., Lee, J. Y., & Fasusi, S. A. (2025). Microplastics in agricultural soils: sources, impacts on soil organisms, plants, and humans. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(4), 448.
- [29] Sattar, B., Liu, G., Yousaf, B., Arif, M., Gulzar, M. Z., Haider, M. I. S., ... & Aziz, K. (2025). Microplastic contamination in agricultural soils from mulch films and organic amendments: transformation mechanism, soil-biota toxicity, and future perspectives. *Waste Management*, 205, 115032.
- [30] Salama, K., & Geyer, M. (2023). Plastic mulch films in agriculture: Their use, environmental problems, recycling and alternatives. *Environments*, 10(10), 179.
- [31] Boonsong, P., Ussawarujikulchai, A., Prapagdee, B., & Pansak, W. (2025). Contamination of microplastics in greenhouse soil subjected to plastic mulching. *Environmental Technology & Innovation*, 37, 103991.
- [32] Hoang, V. H., Nguyen, M. K., Hoang, T. D., Ha, M. C., Huyen, N. T. T., Bui, V. K. H., ... & Nguyen, D. D. (2024). Sources, environmental fate, and impacts of microplastic contamination in agricultural soils: A comprehensive review. *Science of the Total Environment*, 950, 175276.
- [33] Weithmann, N., Möller, J. N., Löder, M. G., Piehl, S., Laforsch, C., & Freitag, R. (2018). Organic fertilizer as a vehicle for the entry of microplastic into the environment. *Science advances*, 4(4), eaap8060.
- [34] Cusworth, S. J., Davies, W. J., McAinsh, M. R., Gregory, A. S., Storkey, J., & Stevens, C. J. (2024). Agricultural fertilisers contribute substantially to microplastic concentrations in UK soils. *Communications Earth & Environment*, 5(1), 7.

- [35] Guo, S., Zhang, J., Liu, J., Guo, N., Zhang, L., Wang, S., ... & Chen, Y. (2023). Organic fertilizer and irrigation water are the primary sources of microplastics in the facility soil, Beijing. *Science of the total environment*, 895, 165005.
- [36] Yang, X., Chen, R., & Tang, D. W. (2025). Minimal preferential transport of microplastics through macropores in irrigated disturbed and undisturbed soil columns. *Agricultural Water Management*, 318, 109751.
- [37] Rana, M. M., Haque, M. R., Tasnim, S. S., & Rahman, M. M. (2023). The potential contribution of microplastic pollution by organic fertilizers in agricultural soils of Bangladesh: quantification, characterization, and risk appraisals. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1205603..
- [38] Jiang, J. J., Hanun, J. N., Chen, K. Y., Hassan, F., Liu, K. T., Hung, Y. H., & Chang, T. W. (2023). Current levels and composition profiles of microplastics in irrigation water. *Environmental Pollution*, 318, 120858.
- [39] Li, A., Zhou, X., Zhang, X., Wang, Y., Li, X., Gao, S., ... & Xing, B. (2025). Effect of PVC microplastics on pesticide sorption behavior in soil: Key roles of particle size and aging. *Science of The Total Environment*, 1000, 180422.
- [40] Khalid, A. R., Shah, T., Asad, M., Ali, A., Samee, E., Adnan, F., ... & Haider, G. (2023). Biochar alleviated the toxic effects of PVC microplastic in a soil-plant system by upregulating soil enzyme activities and microbial abundance. *Environmental Pollution*, 332, 121810.
- [41] Yan, Y., Chen, Z., Zhu, F., Zhu, C., Wang, C., & Gu, C. (2021). Effect of polyvinyl chloride microplastics on bacterial community and nutrient status in two agricultural soils. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 107(4), 602-609.
- [42] 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. *Science of the Total Environment*, 850, 157857.
- [43] Okeke, E. S., Okoye, C. O., Atakpa, E. O., Ita, R. E., Nyaruaba, R., Mgbekhidinma, C. L., & Akan, O. D. (2022). Microplastics in agroecosystems-impacts on ecosystem functions and food chain. *Resources, Conservation and Recycling*, 177, 105961.
- [44] Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V., & Uricchio, V. F. (2020). A detailed review study on potential effects of microplastics and additives of concern on human health. *International journal of environmental research and public health*, 17(4), 1212.
- [45] Li, Y., Tao, L., Wang, Q., Wang, F., Li, G., & Song, M. (2023). Potential health impact of microplastics: a review of environmental distribution, human exposure, and toxic effects. *Environment & Health*, 1(4), 249-257.

- [46] Wolff Leal, T., Tochetto, G., Lima, S. V. D. M., de Oliveira, P. V., Schossler, H. J., de Oliveira, C. R. S., & da Silva Júnior, A. H. (2025). Nanoplastics and microplastics in agricultural systems: Effects on plants and implications for human consumption. *Microplastics*, 4(2), 16.
- [47] Mahajan, M., Singh, A. K., Singh, R. P., Gupta, P. K., Singh, S., & Pratap, M. (2025). Preventing Microplastic Pollution in Surface Waters: Legal Frameworks and Strategic Actions. *Environmental Quality Management*, 35(1), e70116.
- [48] Jin, H., Yang, C., Jiang, C., Li, L., Pan, M., Li, D., ... & Ding, J. (2022). Evaluation of neurotoxicity in BALB/c mice following chronic exposure to polystyrene microplastics. *Environmental health perspectives*, 130(10), 107002.
- [49] Karbalaei, S., Hanachi, P., Walker, T. R., & Cole, M. (2018). Occurrence, sources, human health impacts and mitigation of microplastic pollution. *Environmental science and pollution research*, 25(36), 36046-36063.
- [50] Kumar, N., Lamba, M., Pachar, A. K., Yadav, S., & Acharya, A. (2024). Microplastics—a growing concern as carcinogens in cancer etiology: emphasis on biochemical and molecular mechanisms. *Cell Biochemistry and Biophysics*, 82(4), 3109-3121.
- [51] Joseph, M. M., Nair, J. B., & Joseph, A. M. (2025). Microscopic Menace: Exploring the Link Between Microplastics and Cancer Pathogenesis. *Environmental Science: Processes & Impacts*.
- [52] Massoud, T., & Dsilva, J. (2025). Closing the PET plastic recycling loop: A sustainable transformation from plastic to fiber. *Next Sustainability*, 6, 100095.
- [53] Guo, Z., Wu, J., & Wang, J. (2025). Chemical degradation and recycling of polyethylene terephthalate (PET): a review. *RSC Sustainability*, 3(5), 2111-2133.