



## Toprak ekosistemi üzerine mikroplastiklerin etkileri

**Muhittin Onur Akça\***, **Sonay Sözüdoğru Ok**

Ankara Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Ankara

### Özet

Mikroplastikler (MP'ler) yeni nesil olarak ortaya çıkan kirleticiler olmakla birlikte, su ve toprak ekosistemlerindeki varlıkları, tüm ekosistemler için büyük bir tehdit oluşturdukları için son zamanlarda büyük ilgi çekmektedir. MP'lerin denizel ekosistemlerde su üzerindeki olumsuz etkilerinin sıklıkla ortaya konulmasıyla birlikte, büyük miktarlarda MP varlığı çoğu denizel ekosistemlerde görülmeye başlanmıştır. Plastik malzemelerin üretiminin ve kullanımının küresel artışı, uygun olmayan plastik atık yönetimi ve bertarafına yönelik stratejilerinin tam belirlenmemiş olması, karasal ekosistemlerde de MP kirliliğinde artışa yol açmaktadır. Buna karşın, MP'lerin karasal ortamlardaki etkileri henüz tam olarak belirlenmemiştir. Mikroplastik parçacıklar (<1mm-5mm) doğrudan (arıtma çamuru uygulamaları, sulama suları, atmosferik birikim vb. uygulamalarla), ya da dolaylı olarak büyük plastik parçaların iklimsel faktörler neticesinde yerinde bozunması (plastik malç materyali) ile toprak ekosistemine dahil olabilmektedir. Toprak ekosistemindeki MP'ler, toprağın fizikokimyasal özelliklerini değiştirebilmektedirler. Bu etki MP'lerin boyutuna, şekline, türüne ve miktarına bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Toprakta bulunan MP'ler polimer türü, şekli ve boyutu açısından toprak organik maddesinin ayrışması ve bazı bitki besin maddeleri döngülerinde farklı etkiler sergilemektedir. Bunun yanısıra, toprağın fizikokimyasal özelliklerinden toprak mikrobiyal aktivitesi, hacim ağırlığı, agregat stabilitesi, su tutma kapasitesi, buharlaşma gibi parametreler toprak ve bitki sağlığı üzerine olumsuz etkiler göstermektedir. Bu derleme, MP'lerin toprak özellikleri üzerine etkilerine ve toprak ekosisteminde varlığı neticesinde meydana gelen değişikliklere ışık tutmayı amaçlamaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Toprak, ekosistem, mikroplastik, toprak özellikleri, toprak sağlığı, bitki sağlığı.

### The effects of microplastics on the soil ecosystem

#### Abstract

Microplastics (MPs) are emerging pollutants yet recently there has been substantial attention on them since their presence on soil and water environments pose a great threat to all ecosystems. While the adverse effects of MPs on aquatic ecosystems are often expressed, large amounts of MP presence were reported in almost all marine ecosystems. Moreover, the increase in plastic materials in global scope, inappropriate plastic waste management, and lack of specification in the strategies over their disposal led to the increased MP contamination in terrestrial ecosystems. The effects of MPs in terrestrial environments have not yet been fully determined. Microplastic particles (<1 mm - 5mm) can be incorporated into the soil ecosystem either directly with applications such as sewage sludge, irrigation water or atmospheric deposition, etc. or indirectly via the disintegration of bigger plastic particles (plastic mulch materials) in situ with climatic factors. The MPs in soil ecosystems alter the physicochemical characteristics of the soil. This effect may vary depending on the size, shape, type and amount of MPs. Different types of MPs' polymer, size, and change might impact the decomposition of soil organic matter and the cycles of some plant nutrients differently. In addition to this impact over soil organic matter decomposition and nutrient cycles, altered soil microbial activity, bulk density, aggregate stability, water holding capacity, evaporation affect the soil and plant health adversely. This review aims to illuminate the direct impacts of MPs over soil and the changes occurring in soil characteristics due to the presence of MPs in the soil ecosystem.

**Keywords:** Soil, ecosystem, microplastics, soil properties, soil health, plant health.

© 2021 Türkiye Toprak Bilimi Derneği. Her Hakkı Saklıdır

### Giriş

Çeşitli alanlarda kullanılan plastiklerin atıklarının küresel ölçekte yayılımı ve ekosistem üzerine etkileri, bir ekosistemden diğerine taşınabilecek kadar küçük olmaları, fauna ve flora tarafından bünyelerine alınmaları ve birikmeleri gibi olaylardan ötürü küresel bir sorun haline gelmiştir (Thompson ve ark., 2009). 1950 ile 2015 yılları arasında toplam 6300 milyon ton (MT) küresel plastik atık ortaya çıkmıştır (Geyer ve ark., 2017). 2015 yılında küresel olarak 60 ila 99 (MT) MP üretilmiş, bu rakamın 2060 yılına kadar üç katına

\* Sorumlu yazar:

Tel. : 0312 596 1188

E-posta : moakca@ankara.edu.tr

Makale Türü: DERLEME

Geliş Tarihi : 20 Eylül 2021

Kabul Tarihi : 28 Ekim 2021

e-ISSN : 2146-8141

DOI : 10.33409/tbbdd.997807

çıkarak 155–265 MT'a çıkabileceği tahmin edilmektedir (Lebreton ve Andradı, 2019). Mikroplastik kirliliği okyanuslar, tatlı su kaynakları ve sedimentlerden sonra topraklar için de artan bir endişe kaynağı oluşturmaya başlamıştır (Helmlberger ve ark., 2019). Bu MP'lerin toprak ekosistemlerindeki birikimleri ve etkileri büyük ölçüde keşfedilmemiştir (He ve ark., 2018). Karasal ekosistemlerin bu materyallerin hem üretildiği hem de kullanıldığı yerler olması dolayısıyla toprakların bu tür kirliliğe okyanuslardan daha fazla maruz kaldığı ileri sürülmektedir (Horton ve ark., 2017). Sulardaki plastik kirliliği, suyun şeffaf yapısı nedeniyle kolayca belirlenirken toprağın karmaşık yapısı uzun süre bu tür kirliliklerin fark edilmesini geciktirmektedir. Okyanuslara plastik kirliliğinin yıllık akışının 4.8-12.7 MT olduğu tahmin edilmektedir. Bu plastiklerin büyük bir kısmının karasal kaynaklı olduğu, akarsu veya rüzgar yoluyla okyanuslara taşındığı bildirilmiştir (Jambeck ve ark., 2015).

Plastik sorunu, aslında insanların yaratıcılık gücünün sonucu olarak doğada bulunmayan ancak çeşitli faydalar sağlayan birçok materyalin keşfi gibi plastik hammaddesinin keşfedilmesi ve geliştirilmesi ile ortaya çıkmıştır. Kauçuk, kereste gibi birçok doğal hammaddenin yerine kullanılmak üzere bu tür sentetik materyaller üretilmiştir. Plastik malzemelerin çok geniş alanlarda kullanılabilir olması ve kullanımının yaygınlaşmasındaki en önemli faktörler dayanıklılık, işlenebilirlik, hafiflik ve düşük maliyet gibi özelliklerdir. Buna karşın, plastiklerin büyük üretim hacimleri, uzun vadeli çevresel kalıcılıkları ve potansiyel ekolojik etkileri kirlilik oluşturan unsurlar arasına girmesine neden olmuştur (Thompson ve ark., 2009). Plastik kullanımından kaynaklanan en önemli sorun, plastiğin doğada ayrışmasının son derece yavaş olmasıdır. Bu nedenle doğada birikmesi ve en az gelecek birkaç yüzyıl daha doğada kalacak olması beklenmektedir (Wright ve Kelly, 2017; Hale ve ark., 2020). Çoğu MP'nin biyolojik olarak parçalanması zordur ve yalnızca daha küçük parçacıklara bölünebilmektedirler. Doğanın en önemli ayrıştırıcıları olan mikroorganizmaların enzimlerinin yapay olarak elde edilen bu materyallere karşı pek etkin olmadıkları ya da çok az etkin oldukları görülmektedir. Plastik atıklar fiziksel ve kimyasal etkenler (ultraviyole ışınlar, radyasyon, rüzgar veya su erozyonu vb.) tarafından da bozunabilir ve daha küçük parçacıklara ayrılabilir.

Plastik atık miktarının hızla artışı sonucu hem deniz hem de karasal ekosistemlerinde ihmal edilemeyecek derecede kirlilik oluşmaktadır. Plastiklerin düşük bozunma hızının yanında uygun plastik atık yönetiminin olmaması sonucu sorun her geçen gün büyümektedir. Küresel ekosistemde plastik birikimi, mevcut üretim, tüketim ve atık yönetimi uygulamalarının değişmeden kalması durumunda daha da artacaktır.

Plastik boyutlarının metreden mikrona değişim göstermesi, şekillerinin, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin çok çeşitli olması bu kirlileti grubun belirlenmesini güç kılmaktadır (Rochman, 2015). Plastik partiküllerin ekosistemler içinde yer alan bozunma ve parçalanma süreçleri bu partiküllerin özellikle de çok küçük boyutta olanların tanımlanması ve uzaklaştırılmasını güçleştirmektedir. Bu nedenle topraklara çeşitli yollarla ulaşan MP'lerin toprak özellikleri üzerine etkileri ve akıbetlerinin araştırılması ve ortaya konması gelecek için son derece önem taşımaktadır.

Bu derlemede, toprak ekosistemine herhangi bir yolla dahil olan MP'lerin toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri üzerindeki etkileri üzerinde durulmuştur. Toprak ekosistemleri günümüzde doğrudan veya dolaylı olarak insan kökenli (antropojenik) faaliyetlerden kaynaklanan çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyolojik stres faktörlerine maruz kalmaktadır. Toprak ekosisteminde abiyotik ve biyotik etkenler arasında bir denge bulunmaktadır. Bu dengedeki sisteme dışarıdan herhangi bir etkide bulunulduğunda, besin döngüsü, karbon döngüsü gibi toprak fonksiyonları da bozulmaktadır. Madencilik, tarım, ormancılık ve atık bertarafı gibi faaliyetler toprak ekosisteminin yapısını, toprak fonksiyonlarını ve hizmetlerini olumsuz etkilemektedir. Bu derleme ile toprak ekosistemlerinde MP varlığının etkilerini gösteren çalışma sonuçlarının olumlu/olumsuz yönleri ele alınarak MP'lerin toprak ekosistemi üzerindeki etkilerinin ortaya konulması amaçlanmıştır. Yapılan tespitlerin MP'lerin olumsuz etkilerinin iyileştirilmesinde yeni stratejilerin geliştirilmesinde faydalı olacağı ve ekolojik ayak izlerinin azaltılmasında yardımcı olacağı düşünülmektedir.

## Plastik kullanımı

Plastikler ambalajlar, araba imalatı, inşaat, tarım, evsel gereçler, kişisel bakım ürünleri gibi birçok alanda çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Bakalit 1907 yılında büyük çapta ilk üretilen sentetik plastiktir. Daha sonra plastik terimi doğal ve insan yapımı polimerlerden yapılan materyaller için kullanılmaya başlanmıştır. İlk başta bu materyaller ekonomik ve çevresel kullanımları ile birçok avantaj sağlamış ve doğal olarak üretilen materyallerin üretimini ve kullanımını azaltmıştır. Plastiklerin II. dünya savaşından sonra tip ve çeşit üretimi

artmış, 1950'lerde ise insanların hemen hemen her ihtiyacını karşılayacak bir materyal haline gelmiştir (Crespy ve ark., 2008).

Plastiklerin çok sayıda faydası olmasına rağmen atık düzeyindeki yüksekliği ve çevreye dağılım göstermeleri çevresel bir sorun yaratmaya başlamıştır. Bu duruma gelinmesinin başlıca sebepleri arasında yetersiz kullanım ömrü, yeniden kullanılabilirlik ve geri dönüştürülebilirlik oranlarının düşük olması nedeniyle tek kullanımlık plastik uygulamalarının etkisi büyüktür (Geyer ve ark., 2017).

Dünyada yıllık plastik atık miktarına bakıldığında 2021 yılı için yaklaşık 60 MT plastik atık ile Çin ilk sırada yer almaktadır. Türkiye yaklaşık 5600000 ton atıkla 9. sırada bulunmaktadır (Çizelge 1). Dünya genelinde plastik atıkların yaklaşık % 79'u düzenli depolama alanlarına atılmıştır (Geyer ve ark., 2017).

Çizelge 1. Ükelere göre 2021 yılı plastik kirliliği sıralaması

Ülke sıralaması	Plastik atık miktarı (Ton)
1. Çin	59 079 741
2. Amerika Birleşik Devletleri	37 825 550
3. Almanya	14 476 561
4. Brezilya	11 852 055
5. Japonya	7 993 489
6. Pakistan	6 412 210
7. Nijerya	5 961 750
8. Rusya	5 839 685
9. Türkiye	5 596 657
10. Mısır	5 464 471

Kaynak: <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/plastic-pollution-by-country>

## Mikroplastikler

### Mikroplastiklerin sınıflandırılması

Plastikler büyüklüklerine göre nano-(<100 nm), mikro-(0.0001–5 mm), mezo-(5–25 mm) ve makropartiküller (>25 mm) olarak sınıflandırılmaktadır (Windsor, 2019). Plastiklerin çapı 5 mm ve altında olan parçacıkları MP (Hidalgo-Ruz ve ark., 2012), 0.1–1 µm çapındaki parçacıkları ise nanoplastik olarak sınıflandırılmaktadır (Gigault ve ark., 2018).

Mikroplastikler farklı şekillerde olabilir. Yaygın rastlanılan MP'ler birincil ve ikincil olarak sınıflandırılmaktadır. Mikroplastikler biyolojik olarak parçalanmadığından çeşitli ortamlarda makroplastiklerin büyük atık parçaları giderek daha küçük plastik parçalarına ayrılır. Birincil MP'ler içinde mikro boncuklar ve mikro fiberler yer almaktadır. Mikro boncuklar kozmetiklerde, kişisel bakım ürünlerinde, mikro fiberler ise sentetik kumaşlarda bulunmaktadır. Parçacıklar (fragman) büyük plastiklerin parçalanma ürünleri, mikrofilmler de plastik poşetlerin ve plastik örtülerin ayrışma ürünleridir. Sekonder MP'ler, birincillerin parçalanması ya da ayrışması ile oluşmakta, parçacıklar (fragman) ve mikrofilmler halinde bulunmaktadır (Helmberger, 2020).

Mikroplastikler plastik polimerlerdir (polimer: birçok parçadan oluşan). Polimerler doğal yollarla kendiliğinden oluşmuş polimerler ve insan eliyle sentetik olarak oluşturulmuş polimerler şeklinde ikiye ayrılırlar. Sentetik polimerlerden Polietilen (PE), Polistren (PS), Polipropilen (PP), Polivinil klorür (PVC), Poliüretan (PUR), Polietilen tereftalat (PET) yaygın olarak bulunmaktadır (Geyer ve ark., 2017). Su ortamında en yaygın olarak üç MP türü polietilen (PE), polipropilen (PP) ve polistiren (PS) saptanmıştır.

### Topraklarda mikroplastiklerin kaynakları

Toprak, doğal çevrenin önemli bir parçasıdır ve yaşamın sürekliliği için gerekli bir ekosistemdir (Daily ve ark., 1997). Bu özelliği ile son derece uzun toprak oluşum sürecine dayanan insan-zaman ölçeğinde yenilenemez bir kaynak olarak kabul edilmektedir (Dominati ve ark., 2016). Toprak, hava ve su arasındaki kritik varlığı nedeniyle atmosferde (hava), biyosferde (bitkiler ve organizmalar) oldukça önemli olan karbon (C), oksijen (O<sub>2</sub>) ve su gibi yaşam sağlayan döngülerin düzenlenmesinde kritik etkiye sahiptir. Bu nedenle, MP'lerin toprak özellikleri üzerindeki etkilerinin daha iyi anlaşılması gerekmektedir.

Topraklar, kentsel ve kırsal olarak göz önüne alındığında: kentsel alanda MP kirliliği kaynaklarını araba lastiklerinden kopan parçacıklar, çöpler, endüstriyel atıklar gibi plastiğin kullanıldığı birçok materyal oluşturmaktadır. Kentsel alanda 0.3–67.5 g kg<sup>-1</sup> arasında değişen miktarlarda MP saptanmıştır (Fuller ve Gautam, 2016). Farklı ülke topraklarında belirlenen MP miktarları ve özellikleri Çizelge 2’de verilmiştir. En yaygın plastik türlerinin PE ve PS olduğu görülmektedir. Tarımsal alanlardaki MP kaynaklarını atık suyun tarımsal amaçlı sulamada kullanımı, atık su arıtma çamuru kullanımı (Corradini ve ark., 2019; Li ve ark., 2018; Mintenig ve ark., 2017; Ziajahromi ve ark., 2017) sera naylonları, plastik malçlama materyalleri, sulama boruları, gübre kapsülleri (Mason ve ark., 2016; Gündoğdu ve ark., 2018) gibi uygulamalar oluşturmaktadır (Şekil 1 ve 2). Bu MP’ler elyaf, film, küre, granül, köpük gibi çeşitli formlarda çapı <5 mm olan plastik parçacıkları ifade etmektedir (Andrady, 2011).

Çizelge 2. Mikroplastiklerin farklı toprak türlerinde bulunuşu ve özellikleri (He ve ark., 2018)

Toprak tipi	Miktar	Boyut Aralığı	Şekil	Kompozisyon	Yer
Endüstriyel alandaki topraklar	300-67.500 mg kg <sup>-1</sup>	-	-	PVC (>80%), PE, PS	Avusturalya
Sahil toprağı	317 madde 500 g <sup>-1</sup> (ortalama)	1.56 mm	parça, granül, lif, film	-	Çin
Sahil toprağı	1.3-14.712 madde kg <sup>-1</sup>	<1 mm (% 60)	köpük, pellet, parça, lif, film, sünger	PE, PP, PS	Çin
Taşkın yatağı toprağı	55.5 mg kg <sup>-1</sup> veya 593 madde kg <sup>-1</sup>	125-500 µm (%88)	-	PE, PS, PVC	İsviçre
Tarım toprağı	<0.54 mg kg <sup>-1</sup>	>100 µm	-	PE	Çin
Orman toprağı	7100-42.960 madde kg <sup>-1</sup>	10-0.05 mm	lif, parça, film	-	Çin
Tarım toprağı	78.0- 62.5 madde kg <sup>-1</sup>	0.03-16 mm	film, parça	PE (%50.51), PP (%43.43), PES (%6.06)	Çin

PVC: Polivinilklorür, PE:Polietilen, PS:Polistren, PP:Polipropilen, PES:Polietersülfon



A



B

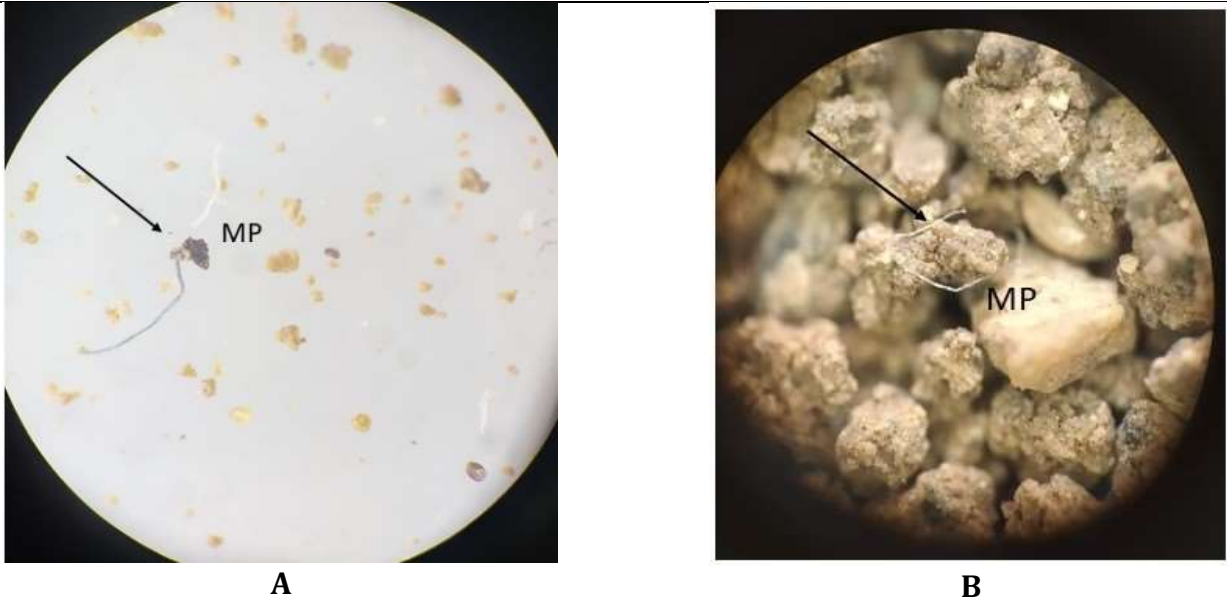


C



D

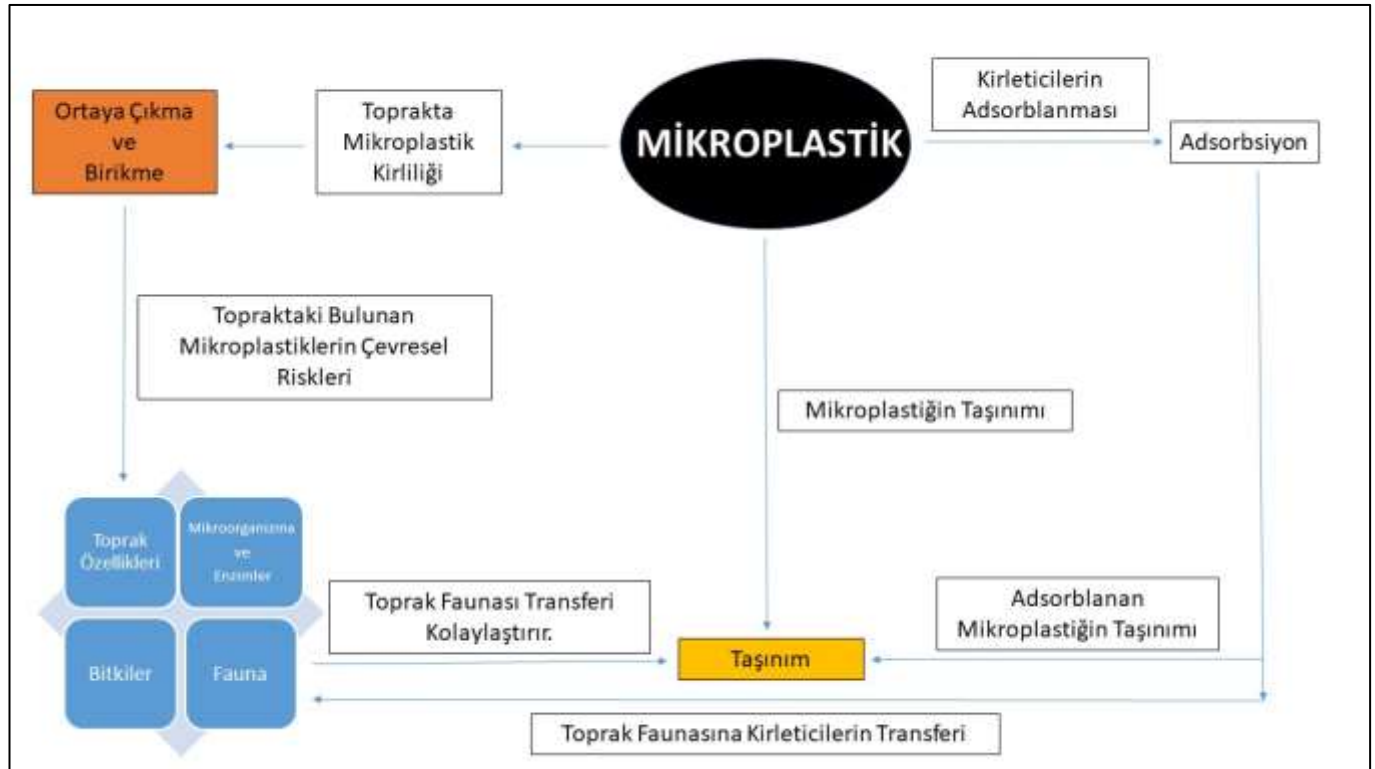
Şekil 1. Toprakta makroplastik kalıntısı olarak sulama borusu parçası (A), yonca tarlasında makroplastik kalıntıları: balya ipleri (B, C) ve plastik şişe kapağı parçası (D) (Foto A, B, C, D: Sonay Sözüdoğru Ok, 2021).



Şekil 2. Malç uygulanan toprakta binoküler stereomikroskopta mikroplastik kalıntıları görüntüsü (Leica S8AP0/1.0-8.0 X Zoom) (A), Toprakta binoküler stereomikroskopta mikroplastik kalıntısı görüntüsü (Leica S8AP0/1.0-8.0 X Zoom) (B) (Foto A, B: Sonay Sözüdoğru Ok ve Muhittin Onur Akça, 2021).

### Toprakta mikroplastiklerin hareketi ve taşınımı

Toprağa herhangi bir şekilde dahil olan MP'ler toprağın içinde yatay veya dikey hareket edebilmektedir. Topraktaki çatlaklar, gözenekler, sürüm, hasat gibi tarımsal uygulamalar, bitki köklerinin uzaması, toprak faunasının özellikle solucanların toprağı sindirim sisteminden geçirme faaliyetleri ve diğer toprak hayvanlarının toprağı kazma davranışları, MP'lerin toprakta derinlere doğru taşınımını sağlamaktadır. Bazı solucanların beslenme faaliyetleri, yaşam aktiviteleri ve tarımsal uygulamalar, MP'lerin toprakta yatay dağılımını kolaylaştırabilmektedir (Gabet ve ark., 2003) (Şekil 3).



Şekil 3. Topraktaki mikroplastiklerin çevresel riskleri ve süreçlerinin şematik gösterimi (Xu ve ark., 2020)

Mikroplastikler toprağa girdikten sonra toprak profilinde birikmekte veya toprak profili boyunca su iletimine etki edebilmektedir (Dong ve ark., 2018; O'Connor ve ark., 2019). Ayrıca, bu MP'ler bitki verimini düşürebilmekte (Boots ve ark., 2019), topraktaki diğer kirleticilerin etkilerini artırabilmekte (Rodriguez-Seijo ve ark., 2019), ve potansiyel olarak kirleticilerin yeraltı suyuna sızmasına neden olabilmektedir (O'Connor ve ark., 2019; Yu ve ark., 2019). Diğer yandan, MP'ler rüzgar vasıtasıyla tozlarla havaya, havadan da etrafa yayılabilir. Erozyon veya yüzey akışları ile karasal ve sucul sistemlere taşınabilirler (Ockelford ve ark., 2017; O'Connor ve ark., 2019).

## Mikroplastiklerin Toprağın Bazı Fiziksel Özellikleri Üzerine Etkileri

### Toprak strüktürü

Toprak agregatları, toprak strüktürünün temel bileşeni olup, toprak mikroorganizmaları ile bir denge halindedir (Rillig ve Lehmann, 2020). Ayrıca, toprak agregatları, toprak gözenekliliğinde önemli bir role sahiptir. Bu durum topraktaki hava ve suyun hareketini, ve ayrıca mikrobiyal faaliyetleri doğrudan etkilemektedir (Rillig ve ark., 2017; Rillig ve Lehmann 2020). Toprakta MP varlığında, toprak hacim ağırlığı düşmekte ve bu durum tüm toprak tipleri üzerinde tamamen farklı etkiler göstermektedir. Toprakta büyük miktarlarda makroplastik bulunduğu, genellikle toprak strüktüründe bozulma meydana getirmektedir. Böyle durumlar, yağmur suyu ve sulama suyunun toprağa sızmasını azaltmakta, toprağın su tutma kapasitesini olumsuz etkilemekte ve anoksik koşullar oluşturabilmesi açısından zararlı olabilmektedir (Liu ve ark., 2014). Ayrıca, kullanılan plastik malç materyalleri toprak agregatlarının yapısını bozmakta, toprağın havalanmasını ve su geçirgenliğini azaltmaktadır. Böylece kök büyümesini ve genel bitki verimliliğini olumsuz etkilemektedir (Jiang ve ark., 2017; Zeng ve ark., 2013; Zhang ve ark., 2018). Makroplastiklerin aksine, MP ile toprak strüktürü ve agregatlar arasındaki ilişki üzerine daha az çalışma mevcuttur.

### Hacim ağırlığı

Hacim ağırlığı, yaygın olarak bilinen bir toprak fiziksel özelliği olup, toprak erozyonu riski ile yakından ilişkilidir (Gohlami ve ark., 2020). Genel olarak, toprağa karışan MP'ler toprağın hacim ağırlığını azaltmaktadır. Örneğin, de Souza Machado ve ark., (2018 ve 2019) yaptıkları çalışmada, yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), polyester (PES), polietilen (PET), polipropilen (PP) ve polimetilmetakrilat (PMMA) parçacıklarının toprağa uygulanması ile tınlı kumlu topraklarda toprak hacim ağırlığının azaldığını bildirmişlerdir. Bu araştırmacılar toprak hacim ağırlığının azalmasını MP'lerin düşük yoğunluklu olmalarına bağlamışlardır. Ancak, Zhang ve ark., (2019) yaptıkları bir çalışmada, polyester mikrofiber (PMF) uygulamasının tarla ve sera koşullarında kil tınlı toprağın hacim ağırlığını önemli ölçüde etkilemediğini, bunu da araştırmada kullanılan MP'lerin düşük dozda olmasından (%0.3) kaynaklandığını belirtmişlerdir. Yapılan başka bir çalışmada de Souza Machado ve ark., (2018), lifli polyester tipindeki MP'lerin toprak hacim ağırlığını parça ve boncuk şeklindeki MP'lerden daha fazla azalttığını bildirmişlerdir. Toprak hacim ağırlığı üzerindeki MP etkilerine ilişkin yapılan çalışmalar sınırlı olsa da, genel bulgular bu toprak özelliğinin toprak ortamına sürekli MP girdilerinden etkilenebileceğini göstermektedir.

### Agregat stabilitesi

Sera ve tarla denemeleri sonuçları topraklara ilave edilen MP'lerin polimer morfolojisine bağlı olarak toprak agregasyonunu etkilediğini göstermiştir (Boots et al., 2019; de Souza Machado ve ark., 2018; Zhang ve ark., 2019). Toprağa ilave edilen MP'ler agregat stabilitesini azaltmaktadır (de Souza Machado ve ark., 2018, 2019; Lehmann ve ark., 2019). MP'ler, toprak agregatlarına farklı derecelerde bağlı bulunmaktadır. Toprak agregatlarında yapısal olarak parça şeklinde gevşek bir şekilde, lif türlerinde ise daha sıkı tutunmaktadır (Guo ve ark., 2020). MP'ler, toprakta bulunan suya dayanıklı agregatları etkileyerek toprağın biyofiziksel özellikleri üzerine etki göstermektedirler (de Souza Machado ve ark., 2019). Azalan agregat stabilitesi genellikle toprağın biyolojik aktiviteleri, özellikle; hava, su ve bitki besin maddelerinin değişimleri üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır (Six ve ark., 2006; Zheng ve ark., 2016). Topraktaki MP içeriği arttıkça, toprak parçacıklarını bir arada tutan kuvvetler zayıflamakta ve toprağın agregasyon özelliği azalmaktadır (de Souza Machado ve ark., 2018). Lehmann ve ark., (2019), toprak biyotasının varlığında mikro liflerin eklenmesiyle toprak agregat stabilitesinin azaldığını, ancak Zhang ve ark., (2019), ıslak-kuru döngülerin makro-agregat stabilitesini artırdığını belirtmişlerdir.

### Por büyüklük dağılımı

Por büyüklük dağılımı önemli bir toprak fiziksel özelliğidir (Cary ve Hayden, 1973). Büyük boyutlu gözenekler, yüzey suyu drenajını hızlandırmakta, ancak zayıf toprak yapısının bir göstergesi olarak

bilinmektedir. Oysa küçük gözenekler daha fazla su tutma kapasitesi ve bitkiye yararlı su sağlamaktadır (Greenland, 1977). Zhang ve ark., (2019) yaptıkları bir çalışmada, su hareketi üzerinde önemli etkileri olabilecek iki ana gözenek çapının (makro gözenek >30 µm ve mikro gözenek <30 µm) topraktaki MP varlığından güçlü bir şekilde etkilendiğini, %0.1 ve %0.3 dozlarında Nitisol topraklara (FAO sınıflandırma sistemi, derin, kırmızı ve iyi drenajlı derin, kırmızı, iyi drenajlı) ilave edilen poliester mikro fiberin (PMF), bir yıl sonra tarla ve saksı koşullarında makro gözeneklerin hacmini arttırdığını, mikro gözeneklerin hacmini ise azalttığını bildirmişlerdir.

### **Hidrolik iletkenlik**

Toprakta suyun iletimi toprak strüktürüne yakından bağlı olup oldukça önemlidir. Hidrolik iletkenlik (Hİ), toprak strüktürüne bağlı olarak toprağın suyu iletme yeteneğini etkilemektedir (Klute ve Dirksen, 1986). Kumlu topraklar, su hareketine kolayca izin veren yüksek bir Hİ'ye sahiptir. Zhang ve ark., (2019), mikrofiberlerle birlikte organik maddenin varlığının toprak Hİ'sini arttırdığını öne sürmektedirler. Bu durum, organik materyaller tarafından makro gözenek oluşumunun stabilitesine bağlanabilir. Yapılan çalışmalar, organik madde varlığı dışında, polimerin tipi ve konsantrasyonundan bağımsız olarak topraklara MP eklenmesinin Hİ üzerinde önemli bir etkisi olmadığını göstermektedir.

Toprakta MP varlığında, toprak hacim ağırlığı düşmekte ve bu durum tüm toprak tipleri üzerinde tamamen farklı etkiler göstermektedir. Toprakta büyük miktarlarda makroplastik bulunduğu, genellikle toprak strüktüründe bozulma meydana getirmektedir. Böyle durumlar, yağmur suyu ve sulama suyunun toprağa sızmasını azaltmakta, toprağın su tutma kapasitesini olumsuz etkilemekte ve anoksik koşullar oluşturması açısından zararlı olabilmektedir. MP'lerin; agregat stabilitesini azalttığını, makro gözeneklerin hacmini arttırdığını, ve mikro gözeneklerin hacmini ise azalttığını bildirmişlerdir (Mbachu ve ark., 2021).

### **Su tutma kapasitesi**

Topraklara MP ilavesiyle gözenek boyutu dağılımındaki değişiklik toprağın su tutma kapasitesini (STK) etkileyebilmektedir. de Souza Machado ve ark., (2018), değişen konsantrasyonlarda farklı polimer türlerinin uygulanmasının, tınlı topraklarda toprak STK'sini arttırdığını, polyester liflerin toprağın su tutma kapasitesini de etkilediğini, % 0.1-0.3 arasındaki uygulamalarda doza bağlı olarak artışın meydana geldiğini bildirmişlerdir. Poliakrilik (PAA), polietilen (PE) ve poliamidlerin (PA) su tutma kapasitesine etkisinin önemli olmadığını saptamışlardır.

### **Toprak suyunun buharlaşması, evapotranspirasyon ve kuruma**

Toprakta MP varlığı topraktan suyun buharlaşmasını ve buharlaşma oranını etkilemektedir (Wan ve ark., 2019; de Souza Machado ve ark., 2019). Araştırmacılar topraklara MP ilavesinin topraktan suyun buharlaşmasını ve evapotranspirasyon oranlarını artırdığını, MP'lerin toprakta su tutulmasını azalttığını, bunun da artan buharlaşma/buharlaşma-terleme, özellikle partikül boyutu ve konsantrasyonu ile ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Toprak agregatlarına benzer büyüklükteki plastik partiküller (~2 mm) toprak profiline kolayca girmekte ve su iletimini kolaylaştırmaktadırlar (de Souza Machado ve ark., 2019; Wan ve ark., 2019). Daha büyük partiküller ise (~5-10 mm) başlangıçta buharlaşmayı önleyen toprak yüzeylerini kaplayabilmekte ancak, daha büyük MP parçacıkları (~10-15 mm), toprak yüzeyindeki çatlamayı artırarak buharlaşmayı ve toprağın kurummasını teşvik edebilmektedir (Wan ve ark., 2019).

Toprakta suyun buharlaşması ve toprağın kuruması üzerine sınırlı sayıda çalışma, toprak ekosistemlerinde plastik varlığının, özellikle kurak alanlarda toprak-su kıtlığını artırabileceğini göstermektedir. Örneğin, bazı tarımsal alanlarda, malçlama toprakta suyu muhafaza stratejisi olarak kullanılmaktadır, ancak iklimsel bazı özellikler (yağmur, güneş ve rüzgar gibi) bu malç malzemelerini daha küçük parçalara ayırabilmekte, bahsedildiği üzere daha küçük parçalara ayrılan bu plastik malzemeler topraklarda artan buharlaşmaya neden olmakta, böylelikle toprağın nem içeriği azalabilmektedir.

### **Mikroplastiklerin Toprağın Bazı Biyolojik Özellikleri Üzerine Etkileri**

Toprak mikrobiyal aktivitesi ve biyolojik çeşitlilik gibi özellikler bitki besin maddesi döngüsü, filtrasyon ve tamponlamadan sorumlu olan toprak kalitesinin biyolojik göstergeleridir. Toprağa ilave edilen MP'lerin toprağın biyofiziksel özelliklerini değiştirdiği, bitki sağlığı kadar toprağın biyolojik aktivitesini ve çeşitliliğini de etkileme potansiyelinin de olduğu bilinmektedir.

Yapılan çeşitli araştırmalar, MP'lerin; karbon (C) ve azot (N) döngüsü, toprak mikrobiyal aktivitesi ve bitki besin maddelerinin bitki tarafından alınımı üzerinde olumsuz etkilerinin olduğunu ortaya koymuştur (Cao ve ark., 2017; Liu ve ark., 2017; Rillig, 2012, 2018). Liu ve ark., (2017), toprağa MP ilavesinin toprak enzim

aktivitelerini etkileyeceğini ve toprakta çözünür bitki besin maddelerinin birikmesini teşvik edebileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca toprağa ilave edilen plastik malç materyali kalıntıları istemeden de olsa stabil toprak organik C havuzunun boyutunun artmasına katkıda bulunmaktadır. Buna örnek vermek gerekirse, 1 yılda hektara 5-25 kg plastik malç materyali karıştırılırsa, ortalama olarak hektara 4-20 kg C verilmiş olacaktır. Ancak bu durumun yoğun tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan organik C kaybı oranlarına kıyasla düşük olduğu ve bu nedenle olumlu bir özellik olarak gösterilmemesi gerekliliği gözden kaçırılmamalıdır. [Hodson ve ark., \(2017\)](#) MP'lerin Zn biyoyararışlılığı üzerine etkilerini değerlendirdikleri çalışmada, toprağa ilave edilen MP'lerin solucanlar ile Zn arasındaki teması artırdığını, ancak bu durumun solucanlar açısından yaratabileceği potansiyel risklerin neler olduğunu ve bu biyoyararışlılık mekanizmalarının tam olarak bilinmediğini belirtmişlerdir.

Tarımda kullanılan plastik malç materyalleri bazı toprak kalitesinin biyolojik göstergelerini iyileştirirken, bazılarında ise düşüş meydana getirmiştir ([Jiang ve ark., 2017](#); [Liu ve ark., 2014](#); [Steinmetz ve ark., 2016](#)). Bazı araştırmalar, topraklarda MP birikiminin toprağın fizikokimyasal özelliklerini olumsuz yönde etkilediğini ve çevre kirliliklerine yol açabileceği sonucuna varmıştır ([Andrés Rodríguez-Seijo, 2018](#)). [Ramos ve ark., \(2015\)](#), MP kalıntılarının topraktaki pestisitleri biriktirecek toprak habitatında değişikliklere yol açabileceğini belirtmişlerdir. Yapılan bazı çalışmalarda, topraklarda artan miktarda MP birikimi ile toprak mikrobiyal biyokütlesinin C ve N içeriğinin ile önemli ölçüde azaldığı ortaya konulmuştur ([Moreno ve Moreno 2008](#); [Wang ve ark., 2016](#)).

### **Mikrobiyal Aktivite**

Topraklara MP ilavesi ile tüm mikrobiyal topluluğun metabolik hızının önemli ölçüde etkilendiği gözlemlenmiştir ([de Souza Machado ve ark., 2018](#); [2019](#)). Bununla birlikte, MP'lerin mikrobiyal aktivite üzerindeki etkileri çok net değildir. [de Souza Machado ve ark., \(2018\)](#), poliamid (PA) ve PE türü MP'lerin mikrobiyal aktivite üzerine önemli bir artışa neden olduğunu, PMMA ve PES türü MP'lerin ise mikrobiyal aktiviteyi azalttığını bildirmişlerdir. Tınlı kumlu topraklara uygulanan PA, HDPE ve PES'in toprak mikrobiyal aktivitesini artırdığı rapor edilmiştir ([de Souza Machado ve ark., 2019](#)). Genel olarak, bu çalışmalar MP şeklinin ve konsantrasyonunun mikrobiyal aktivite üzerindeki etkiyi belirlediğini ve mikrobiyal dinamikler üzerinde değişen toprak fiziksel fonksiyonu arasında olası bir doğrudan bağlantı olduğunu işaret etmektedir.

Toprağa PP türü MP'ler ilave edilip 30 gün süreyle yürütülen bir inkübasyon denemesinde, toprak solunumunun arttığı, ancak substrat kaynaklı solunumun (SIR) azaldığı belirtilmiştir ([Yang ve ark., 2018](#)). Ancak, toprağa uygulanan MP miktarı %7'den, %28'e kadar daha yüksek bir oranda uygulandığında toprak solunumu önemli ölçüde azalmaktadır. Bu durum, özellikle yoğun plastik malç uygulaması yapılan topraklarda MP artıklarının birikmesinin, toprağın mikrobiyal aktivitesi üzerine oldukça önemli bir etkisinin olduğunu göstermektedir. Çin'de lős toprağına çeşitli oranlarda (%7 ve %28) PP türü MP ilavesi, toprakta beta-glikozidaz ve fosfataz aktivitelerini artırırken, üreaz aktivitesini azaltmıştır ([Yang ve ark., 2018](#)). Düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) filmleriyle (0.076 g kg<sup>-1</sup> toprak), kirlenilip 90 gün boyunca inkübasyona tabi tutulan bir toprakta üreaz ve katalaz aktivitelerinin arttığı, invertaz aktivitesinin ise dalgalandığı bildirilmiştir ([Huang ve ark., 2019](#)). Çeltik yetiştiriciliği yapılan toprağa eklenen polilaktik asit (PLA) türü MP'lerin, 70 günlük inkübasyondan sonra bile beta-glikosidaz ve üreaz enzim aktiviteleri üzerinde bir etkisinin olmadığı belirtilmiştir ([Chen ve ark., 2020](#)).

### **Mikrobiyal çeşitlilik**

Topraklarda MP'lerin varlığının uzun zamandır mikrobiyal çeşitliliği önemli ölçüde etkilediği düşünülmüştür. Bu etkileri belirlemek için farklı toprak tiplerinde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Polietilen türü MP'lerin (13 µm ve 150 µm) killi toprağa ilave edilmesinin ardından mantar ve bakteri topluluklarında değişiklikler gözlenmiştir. Çalışmada elde edilen değişikliklerin büyük ölçüde parçacık boyutuna bağlı olduğu, daha küçük boyutun (13 µm), daha büyük boyuta (150 µm) kıyasla mantar ve bakteri miktar ve çeşitliliğini artırdığı belirtilmiştir ([Ren ve ark., 2019](#)). Buna karşılık, [Chen ve ark., \(2020\)](#) yaptıkları çalışmada, toprağa PLA türü MP'lerin uygulayıp 70 günlük inkübasyondan sonra çeltik toprağında bakteri çeşitliliği üzerinde hiçbir etkisi olmadığını belirtmişlerdir. [Huang ve ark., \(2019\)](#) LDPE türü MP ile kirlenilen toprakta bakteri çeşitliliğinin değişmediğini, ancak, MP yüzeylerinin bakteri topluluğu tarafından mikrobiyal topluluklar için benzersiz bir yaşam alanı olarak kullanıldığını ve bunun da düşük düzeyde bakteri çeşitliliği ile sonuçlandığını belirtmişlerdir. Taksonomi verilerine dayanarak, [Huang ve ark., \(2019\)](#), toprağa uygulanan LDPE filmlerinin Acidobacteria, Bacteroidetes, Gemmatimonadetes, Nitrospirae ve Proteobacteria'nın zenginleşmesini sağladığını, Actinobacteria ve Nitrospirae'nin bazı üyeleri gibi bazı bakteri cinslerinin azaldığını belirtmişlerdir. [Ren ve ark., \(2019\)](#) yaptıkları çalışmada, küçük parçalara



ayrılmış PE uygulanmış topraklarda Actinobacteria miktarının arttığını, Acidobacteria, Nitrospirae ve Bacteroidetes miktarının ise azaldığını belirtmişlerdir. Buna ilaveten bu uygulama ile ayrıca Ascomycota ve Zygomycota miktarının arttığını ve Basidiomycota, Chytridiomycota, Ciliophora ve Rozellomycota miktarının ise azaldığını bildirmişlerdir. Toprağa PLA uygulamasının (%2), kontrol uygulamalarıyla karşılaştırıldığında bakteri topluluklarında önemli bir değişiklik oluşturmadığı belirtilmiştir (Chen ve ark., 2020). Bakteri topluluğu stabilitesi, baskın bakteri taksonlarının PLA'ların varlığında tepki verme derecesine bağlıdır. Bu durum, %2 PLA dozunun mikrobiyal aktivite süreçleri üzerinde zayıf bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

## Mikroplastiklerin Bitki Sağlığı ve Toprağın Bazı Kimyasal Özellikleri Üzerine Etkileri

### Bitki sağlığı

Kumlu killi tın toprakta yetiştirilen Lolium perenne (çok yıllık çim) topraklarına %0.1 (w/w) MP ilavesi ile fide gelişiminin engellendiği, sürgün uzunlukları ve kuru biyokütlenin azaldığı belirtilmiştir (Boots ve ark., 2019). Kumlu toprağa eklenen nişasta bazlı biyolojik olarak parçalanabilen LDPE MP'ler, Triticum aestivum (buğday)'de bitki boyu ve kardeş sayısını azaltmıştır (Qi ve ark., 2018). Benzer şekilde, PP, PA ve HDPE partiküllerinin, tınlı kumlu topraklara ilavesi ile Allium fistulosum (bahar soğanı)'un kök ve meyve biyokütlesini azalttığı bildirilmiştir (de Souza Machado ve ark., 2019).

MP'lerin bitki üzerindeki gösterdiği etkileri esas olarak MP'lerin (i) morfolojisi (ii) uygulama oranı ve (iii) bileşimi tarafından kontrol edilmektedir. Doğrusal şekildeki partiküller, küçük miktarlarda bile çimlenme oranlarını azaltmaktadır. Boots ve ark., (2019) yaptıkları çalışmada, %0.001 lif tipi MP ilavesinin, %0.1 dozunda PLA ve HDPE'den daha belirgin bir şekilde fide çimlenmesini kontrole kıyasla %7 oranında azalttığını bildirmişlerdir. Topraklara uygulanan polimer tipi plastikler (sentetik ve biyoplastik) de ayrıca bitki gelişimi üzerine etki etmektedir. Qi ve ark., (2018) yaptıkları çalışmada, biyolojik olarak parçalanabilir (biyo bozunur) film uygulanmış topraklarda yetiştirilen Buğday (Triticum aestivum) bitkisinde, bitki biyokütlesinde, LDPE ve kontrol uygulamalarına kıyasla önemli olumsuz etkilerin olduğunu bildirmişlerdir. Bu durum, toprak-bitki sistemleri üzerinde olumsuz etkilere sahip olabilecek sentetik plastik malzemelerin fraksiyonlarını içeren, biyolojik olarak parçalanabilen filmin bileşiminden kaynaklandığı düşünülmektedir. Fide gelişimi ve bitki biyokütlesine benzer şekilde, yaprak alanı, yaprak sayısı, gövde çapı ve klorofil içeriği gibi vejetatif parametreler MP ilavesiyle değişmektedir. Qi ve ark., (2018) yaptıkları çalışmada, buğday (Triticum aestivum) yetiştirilen topraklara ilave edilen (biyo bozunur) plastik filmin hem yaprak alanında hem de yaprak sayısında bir azalma meydana getirdiği, ancak LDPE muameleleri ile yaprak alanının arttığı belirtilmiştir. Lolium perenne yetiştiriciliğinde toprağa ilave edilen PLA ile çim bitkisinin klorofil-a/klorofil-b içerikleri, kontrole uygulamasına göre %22 artış sağlamıştır (Boots ve ark., 2019). Bu artış, bitki stresinin göstergesi olan ve fotosentez ile ilişkili gerekli pigment proteininin azalmasına yol açan klorofil-b sentezindeki azalmaya bağlanmıştır (Katz ve ark., 1978). MP ilavesiyle bitkide değişen diğer vejetatif parametreler, yaprak azot içeriği ve C-N oranı gibi yaprak özellikleridir (de Souza Machado ve ark., 2019).

### Toprak Organik Maddesi

MP'lerin çok fazla karbon içeren partiküller olması ( tipik olarak %80), toprak için potansiyel C kaynağı oluşturur. MP karbonu bazı durumlarda toplam toprak organik madde karbonunun yalnızca küçük bir bölümünü oluşturmaktadır. Petrol bazlı MP'ler büyük ölçüde biyolojik olarak parçalanamayan materyaller olduğu için, bu MP'ler doğrudan toprak organik maddesi dinamiklerine dahil edilememektedir. Ancak, toprağa uygulanan MP'ler mikrobiyal süreçleri dolaylı olarak etkileyerek toprak organik maddesinin ayrışması üzerine etki gösterebilmektedirler. Örneğin, PE elyafın hidrofobik yapısı, uygulandığı toprağın mevcut su içeriğini azaltabilmekte ve böylece MP yüzeyinin çevresinde daha iyi havalandırılmış bir ortam yaratabilmekte (Guo ve ark., 2021), bu durum toprak organik maddesinin mineralizasyonunu hızlandırabilmektedir (von Lütow ve ark., 2006). Liu ve ark., (2017) yaptıkları bir çalışmada, PP'nin %28'lik dozunun toprak solunumunu, floresan diasetat hidrolaz aktivitesini ve toprak organik maddesi mineralizasyonunu hızlandırdığını göstermiştir. Buna karşılık, PE uygulanan ortamdaki düşük toprak organik maddesi ayrışması, çözünür proteinlerin bozulması ve Proteobacteria miktarının azalması ile ilişkilendirilmiştir (de Souza Machado ve ark., 2018; Wei ve ark., 2019).

Toprağa ilave edilen biyobozunur MP'lerin daha düşük kalıcılığı ve daha kolay bozunması göz önüne alındığında, biyobozunur MP'lerden elde edilen biyoyarayışlı C kaynaklarının mikrobiyal aktiviteyi ve ekzoenzim aktivitesini artırdığını ve potansiyel olarak doğal toprak organik maddesinin mineralizasyonunun artmasına yol açtığı, bu nedenle, MP'lerin toprak organik maddesi mineralizasyonu

üzerindeki ana etkisinin, toprak özelliklerindeki ve ilgili mikrobiyal süreçlerdeki değişikliklere bağlı olduğu belirtilmiştir (Zhou ve ark., 2021). Genel olarak, MP'lerin toprak organik maddesi mineralizasyonu üzerindeki etkisi yeni bir araştırma konusu olup ve topraklarda karbon dinamikleri üzerine detaylı çalışmalar yapılması önemli bir husustur.

### **Bazı Bitki Besin Maddelerinin Döngüsü**

MP'ler çoğunlukla çok az miktarda azot (N) ve fosfor (P) içermesine rağmen, toprakta bitki besin maddelerinin mikrobiyal kaynaklı dönüşümü üzerinde önemli etkileri olabilmektedir. Örneğin, toprağa ilave edilen MP'ler toprağın gözenekliliğini artırarak toprağın oksijen içeriğini artırmakta ve böylelikle nitrifikasyon artmaktadır (Green ve ark., 2016; de Souza Machado ve ark., 2018; Chen ve ark., 2020). Topraktaki N döngüsü, toprak organik maddesini hidrolize eden enzimlerden dolayı olarak etkilenebilmektedir. Toprağa dahil edilen PS ve PE türevli MP'ler, örneğin kitinaz ve aminopeptidaz gibi N döngüsünde önemli enzimlerin aktivitesini sınırlayarak N döngüsünü bozabilmektedir (Wang ve ark., 2016; Bandopadhyay ve ark., 2019; Zang ve ark., 2020). Toprak agregasyonu üzerindeki olumlu etkisinden dolayı, PE ve PE lifler (%0.4), N ve P gibi bitki besin maddelerinin absorpsiyonlarını artırabilmektedir (Lozano ve ark., 2021).

### **Toprak Verimliliği**

Toprak enzimleri, toprakta meydana gelen biyokimyasal süreçler ile yakından ilişkilidir. Enzimler, toprak verimliliğini değerlendirmek için bir gösterge görevi görmekte ve ayrıca C, N ve P gibi bitki besin maddelerinin döngüsü üzerine oldukça önemli rol oynamaktadırlar (Allison ve Jastrow, 2006; Trasar-Cepeda ve ark., 2008). Toprak verimliliğinde belirtilen bu makro elementlerin etkinliğinde topraklara ilave edilen MP'ler; üreaz, katalaz, hidrolaz ve oksidazın aktivitesi üzerinde önemli etkileri olduğu bildirilmiştir (Liu ve ark., 2017; Huang ve ark., 2019).

Toprak hacim ağırlığı, topraklarda C depolanmasını tahmin etmek için önemli bir parametredir ve MP'lerin varlığı toprakta karbon depolamasının yanlış tahmin edilmesine yol açabilmektedir (Rillig, 2018). Ayrıca, MP'ler yüksek karbonlu polimerler içerdiğinden, MP-C, toprak organik karbon havuzunun önemli bir antropojenik bileşeni olarak gizlenebilir (Rillig, 2018). MP'ler doğal özelliklerinden bağımsız olarak yıkanma veya yüzey akışı yoluyla toprak matrisinden uzaklaşmazlarsa, yavaş yavaş hareketsiz hale gelmekte, biyotik ve abiyotik süreçler yoluyla toprak mineralleri veya organik bileşiklerle bağlanmaktadır. Bu bileşikler daha sonra toprak agregatları içinde kalabilmekte, mikrobiyal ayrışmadan fiziksel olarak da korunabilmektedir (de Souza Machado ve ark., 2019). Ayrıca, yüksek moleküler ağırlıklı aromatik bileşiklerin oluşumunu kolaylaştırarak, toprak organik maddesi depolanmasını farklılaştırabilmektedir. Liu ve ark., (2017) yaptıkları çalışmada, 30 günlük bir inkübasyon deneyinde, toprağa %28 (w/w) oranında ilave edilen MP, çözülmüş organik madde birikimini artırmış, aynı zamanda C, N ve P'nin topraktaki miktarını da artırmıştır. Ancak, MP içeriği azaldığında (%7 w/w), çözülmüş organik madde birikimi yavaşlamıştır. İlave edilen MP'lerin etkileri 0-7. günlerde ihmal edilebilir düzeyde olup ve bitki besin maddesi konsantrasyonları 14-30. günlere kadar önemli bir değişiklik göstermemiştir. Bu nedenle, MP'lerin toprak verimliliği üzerindeki etkileri, konsantrasyonunun yanı sıra, toprakta kalma süresine de büyük ölçüde bağlı olmaktadır (de Souza Machado ve ark., 2018; Liu ve ark., 2017).

### **Sonuç ve Öneriler**

Plastik kirliliği küresel bir sorundur ve tüm ekosistemler için bir tehdit oluşturmaktadır. Bu nedenle "tarım topraklarında MP" kavramı, tarımsal ekosistemlerin işleyişi, gıda güvenliği ve insan sağlığı üzerine uzun vadeli etkileri nedeniyle üzerinde durulması gereken önemli bir konudur. Mikroplastiklerin toprak ekosistemi üzerindeki etkilerini ortaya koymak için yapılan çalışmalar görüldüğü üzere henüz istenilen düzeyde değildir. Yapılan bu derleme sonucunda literatürdeki araştırmaların çok az bir kısmında MP'lerin toprak özellikleri üzerinde olumlu etki yaptığı, ancak genel etkinin olumsuz yönde olduğu ortaya konulmuştur. Bu etki, MP'lerin çeşidi, yapısı ve şekline bağlı olarak değişim göstermektedir. Mikroplastikler toprak verimliliğini azaltıcı etkileri nedeniyle toprak sağlığının sürdürülebilirliği açısından potansiyel bir tehdit oluşturmaktadırlar. Sağlıklı topraklar başta gıda ve yem üretimine yönelik çeşitli ihtiyaçların karşılanması açısından ve dünyanın tüm bölgelerinde birden fazla ekosistem servisinin sağlanabilmesi bakımından kilit bir rol oynamaktadır.

Dünyada topraklarda görülen MP kirliliğini en çok tarımsal alanlarda kullanılan atık su, arıtma çamuru, sera naylonları, plastik malçlama materyalleri, sulama boruları, gübre kapsülleri gibi uygulamalar

oluşturmaktadır. Küresel bazda mikroplastik kirliliğinde, yoğun tarımsal üretim yapılmasından dolayı ülkeler arasında Çin ilk sırayı almaktadır. Her ne kadar ülkemizde MP ile ilgili çalışmalar yeterli düzeyde değilse de, ülkemizin en büyük avantajlarından birisinin tarımsal atık çamurların tarımsal alanlarda kullanılmaması olduğu düşünülmektedir.

Bilindiği üzere, tarımsal alanlarda MP'lerin birikimi ile birden fazla faktörün birlikte ortaya çıkardığı etkiler farklı toprak ekosisteminde değişkenlikler gösterebilmektedir. Bu nedenle MP'lerin toprak özelliklerine etkilerini belirlemek toprak ve bitki sağlığını etkileyen tarımsal ekosistemlerdeki diğer bileşenlerle nasıl etkileşime girdiğini belirleyecek çalışmalara ihtiyaç vardır. Mikroplastiklerin toprak özellikleri üzerine etkilerinin temel mekanizmaları ortaya konulmalıdır. Bu mekanizmaları açıklarken toprakta bulunan MP çeşitleri yanında boyut, şekil, konsantrasyon gibi özellikler de dikkate alınmalıdır.

Sonuç olarak, MP'lerin tarımsal aktivitelere bağlı olarak topraklara dahil olduğu ve gelecekte de MP'lerin topraklarda uzun zaman parçalanmadan kalabilecekleri görülmektedir. Mikroplastikler, diğer kirleticilerde olduğu gibi gelecek nesillerin beslenmesi açısından tehlike yaratabilecek oldukça önemli bir potansiyel teşkil etmektedir. Belki bu çalışmalar tarımda kullanılan bu tür materyallerin yerini topraklarda biyolojik olarak parçalanabilir materyallerin alması gerekliliğini hızlandıracaktır.

## KAYNAKLAR

- Allison SD, Jastrow JD, 2006. Activities of extracellular enzymes in physically isolated fractions of restored grassland soils. *Soil Biol. Biochem.* 38: 3245–3256.
- Andrady AL, 2011. Microplastics in the marine environment. *Mar. Pollut. Bull.* 62(8):1596–1605.
- Andrés Rodríguez-Seijo RP, 2018. Microplastics in agricultural soils are they a real environmental hazard? Chapter 3. *Bioremediation of Agricultural Soils*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Bandopadhyay S, Sintim HY, DeBruyn JM, 2019. Structural and functional responses of soil microbial communities to biodegradable plastic film mulching in two agroecosystems. *bioRxiv*.
- Boots B, Russell CW, Green DS, 2019. Effects of microplastics in soil ecosystems: above and below ground. *Environ. Sci. Technol.* 53(19):11496–11506.
- Cao D, Wang X, Luo X, Liu G, Zheng H, 2017. Effects of polystyrene microplastics on the fitness of earthworms in an agricultural soil. *IOP Conf. Ser. Earth Environ.* 61:012148.
- Cary J, Hayden C, 1973. An index for soil pore size distribution. *Geoderma*, 9(4): 249–256.
- Chen H, Wang Y, Sun X, Peng Y, Xiao L, 2020. Mixing effect of polylactic acid microplastic and straw residue on soil property and ecological function. *Chemosphere* 243, 125271.
- Corradini F, Meza P, Eguiluz R, Casado F, Huerta-Lwanga E, Geissen V, 2019. Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal, *Sci of The Total Environ.* 671:411-420.
- Crespy D, Bozonnet M, Meier M, 2008. "100 Years of Bakelite, the material of a 1000 uses," *Angewandte Chemie-International Edition*.
- Daily GC, Matson PA, Vitousek PM, 1997. Ecosystem services supplied by soil. In: *Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems* (ed. Daily GC). Island Press, Washington, D.C. pp, 113-132.
- de Souza Machado AA, Lau CW, Kloas W, Bergmann J, Bachelier JB, Faltin E, Becker R, Görlich AS, Rillig MC, 2019. Microplastics can change soil properties and affect plant performance. *Environ. Sci. Technol.* 53(10): 6044–6052.
- de Souza Machado AA, Lau CW, Till J, Kloas W, Lehmann A, Becker R, Rillig MC, 2018. Impacts of microplastics on the soil biophysical environment. *Environ. Sci. Technol.* 52(17): 9656–9665.
- Dominati EJ, MacKay AD, Bouna J, Green S 2016. An ecosystems approach to quantify soil performance for multiple outcomes: The future of land evaluation? *Soil Science Society of America Journal*, 80:438-449.
- Dong Z, Qiu Y, Zhang W, Yang Z, Wei L, 2018. Size-dependent transport and retention of micron-sized plastic spheres in natural sand saturated with seawater. *Water Res.* 143:518–526.
- Fuller S, Gautam A, 2016. A Procedure for Measuring Microplastics using Pressurized Fluid Extraction. *Environmental Science & Technology* 50 (11): 5774-5780.
- Gabet EJ, Reichman OJ, Seabloom EW, 2003. The effect of bioturbation on soil processes and sediment transport. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 31: 249–273.
- Geyer R, Jambeck J, Law L K, 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7).
- Gigault J, El Hadri H, Nguyen B, Grassl B, Roweczyk L, Tufenjki N, Feng S, Weisner M, 2021. Nanoplastics are neither microplastics nor engineered nanoparticles. *Nat. Nanotechnol.* 16:501–507.
- Gohlami H, Mohammadifar A, Bui DT, Collins A, 2020. Mapping wind erosion hazard with regression-based machine learning algorithms. *Sci. Rep.* 10:20494.
- Green DS, Boots B, Sigwart J, Jiang S, Rocha C, 2016. Effects of conventional and biodegradable microplastics on a marine ecosystem engineer (*Arenicola marina*) and sediment nutrient cycling. *Environ. Pollut.* 208: 426–434.
- Greenland D, 1977. Soil damage by intensive arable cultivation: temporary or permanent? *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B, Biological Sciences*, 281(980):193–208.

- Guo JJ, Huang XP, Xiang L, Wang YZ, Li YW, Li H, Cai QY, Mo CH, Wong MH (2020). Source, migration and toxicology of microplastics in soil. *Environ. Int.*, 137 Article 105263.
- Guo QQ, Xiao MR, Ma Y, Niu H, Zhang GS, 2021. Polyester microfiber and natural organic matter impact microbial communities, carbon-degraded enzymes, and carbon accumulation in a clayey soil. *J. Hazard. Mater.* 405: 124701.
- Gündoğdu S, Çevik C, Güzel E, Kilercioğlu S, 2018. Microplastics in municipal wastewater treatment plants in Turkey: a comparison of the influent and secondary effluent concentrations. *Environ Monit Assess.* 2018: 190(11):626.
- Hale RC, Seeley ME, La Guardia MJ, Mai L, Zeng EY, 2020. A Global Perspective on Microplastics. *Journal of Geop. Res.* 125(1).
- He D, Luo Y, Lu S, Liu M, Song Y, Lei L, 2018. Microplastics in soils: Analytical methods, pollution characteristics and ecological risks. *Trends in Analytical Chemistry*, 09:63-172.
- Helmberger MS, Tiemann LK, Grieshop MJ, 2020. Towards an ecology of soil microplastics. *Functional Ecology.* 34:550–560.
- Hidalgo-Ruz V, Gutow L, Thompson RC, Thiel M, 2012. Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification. *Environmental Science & Technology*, 46: 3060-3075.
- Hodson ME, Duffus-Hodson CA, Clark A, Prendergast-Miller MT, Thorpe KL, 2017. Plastic bag derived-microplastics as a vector for metal exposure in terrestrial invertebrates. *Environ. Sci. Technol.* 51:4714–4721.
- Horton AA, Walton A, Spurgeon DJ, Lahive E, Svendsen C, 2017. Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. *Sci. Total Environ.* 15(586):127-141.
- Huang Y, Zhao Y, Wang J, Zhang M, Jia W, Qin X, 2019. LDPE microplastic films alter microbial community composition and enzymatic activities in soil. *Environ. Pollut.* 254.
- Jambeck JR, Geyer R, Wilcox C, Siegler TR, Perryman M, Andrady A, Narayan R, Law KL, 2015. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science* 347:768–771.
- Jiang XJ, Liu W, Wang E, Zhou T, Xin P, 2017. Residual plastic mulch fragments effects on soil physical properties and water flow behavior in the Minqin Oasis, northwestern China. *Soil Till. Res.* 166:100–107.
- Katz JJ, Norris JR, Shipman LL, Thurnauer MC, Wasielewski MR, 1978. Chlorophyll function in the photosynthetic reaction center. *Annu. Rev. Biophys. Bioeng.* 7(1): 393–434.
- Klute A, Dirksen C, 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. *Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods (methodsofsoilan1)*, pp. 687–734.
- Lebreton L, Andrady A, 2019. Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. *Palgrave Communications*, 5:1-11.
- Lehmann A, Fitschen K, Rillig MC, 2019. Abiotic and biotic factors influencing the effect of microplastic on soil aggregation. *Soil Systems*, 3(1): 21.
- Li X, Chen L, Mei Q, Dong B, Dai X, Ding G, Zeng EY, 2018. Microplastics in sewage sludge from the wastewater treatment plants in China. *Water Res.* 142: 75–85.
- Liu EK, He WQ, Yan CR, 2014. 'White revolution' to 'white pollution' – agricultural plastic film mulch in China. *Environ. Res. Lett.* 9.
- Liu H, Yang X, Liu G, Liang C, Xue S, Chen H, Ritsema CJ, Geissen V, 2017. Response of soil dissolved organic matter to microplastic addition in Chinese loess soil. *Chemosphere*, 185: 907–917.
- Lozano YM, Aguilar-Trigueros CA, Onandia G, Maaß S, Zhao T, Rillig MC, 2021. Effects of microplastics and drought on soil ecosystem functions and multi functionality. *J. Appl. Ecol.* 00: 1–9.
- Mason SA, Garneau D, Sutton R, Chu Y, Ehmann K, Barnes J, Fink P, Papazissimos D, Rogers DL, 2016. Microplastic Pollution Is Widely Detected in US Municipal Wastewater Treatment Plants Effluent. *Environ. Poll.* 218: 1045-1054.
- Mbachu O, Jenkins G, Kaparaju P, Pratt C, 2021. The rise of artificial soil carbon inputs: Reviewing microplastic pollution effects in the soil environment. *Science of The Total Environment*, 146569.
- Mintenig SM, Int-Veen I, Loder MGJ, Primpke S, Gerdt G, 2017. Identification of microplastic in effluents of waste water treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging, *Water Research*, 108, 365-372.
- Moreno MM, Moreno A, 2008. Effect of different biodegradable and polyethylene mulches on soil properties and production in a tomato crop. *Sci. Horticult.* 116: 256–263.
- O'Connor D, Pan S, Shen Z, Song Y, Jin Y, Wu WM, Hou D, 2019. Microplastics undergo accelerated vertical migration in sand soil due to small size and wet-dry cycles. *Environ. Pollut.* 249:527–534.
- Ockelford A, Bulalrd J, McKenna-Neuman C, O'Brien P, 2020. Wind erosion of microplastics from soils: linking soil surface properties with microplastic flux, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-17818.
- Qi Y, Yang X, Pelaez AM, Lwanga EH, Beriot N, Gertsen H, Garbeva P, Geissen V, 2018. Macro-and-micro-plastics in soil-plant system: effects of plastic mulch film residues on wheat (*Triticum aestivum*) growth. *Sci. Total Environ.* 645: 1048–1056.
- Ramos L, Berenstein G, Hughes EA, Zalts A, Montserrat JM, 2015. Polyethylene film incorporation into the horticultural soil of small periurban production units in Argentina. *Sci. Total Environ.* 523, 74–81.
- Ren X, Tang J, Liu X, Liu Q, 2019. Effects of microplastics on greenhouse gas emissions and the microbial community in fertilized soil. *Environmental Pollution*, 113347.

- Rillig MC, 2012. Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? *Environ. Sci. Technol.* 46: 6453–6454.
- Rillig MC, 2018. Microplastic disguising as soil carbon storage. *Environ. Sci. Technol.* 52: 6079–6080.
- Rillig MC, Lehmann A, 2020. Microplastic in terrestrial ecosystems. *Science* 368, 1430–1431.
- Rillig MC, Ziersch L, Hempel S, 2017. Microplastic transport in soil by earthworms. *Sci. Rep.* 7:1362.
- Rochman CM, 2015. The complex mixture, fate and toxicity of chemicals associated with plastic debris in the marine environment, in *Marine Anthropogenic Litter* eds Bergmann, M., Gutow, L., and Klages, M. (Cham: Springer), 117–140.
- Rodriguez-Seijo A, Santos B, da Silva EF, Cachada A, Pereira R, 2019. Low-density polyethylene microplastics as a source and carriers of agrochemicals to soil and earthworms. *Environ. Chem.* 16(1):8–17.
- Six J, Frey S, Thiet R, Batten K, 2006. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70(2): 555–569.
- Steinmetz Z, Wollmann C, Schaefer M, Buchmann C, David J, Troger J, Munoz K, Fror O, Schaumann GE, 2016. Plastic mulching in agriculture. Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation? *Sci. Total Environ.* 550: 690–705.
- Thompson RC, Moore CJ, vom Saal FS, Swan SH, 2009. Plastics, the environment and human health: current consensus and future trends. *Philos Trans. R. Soc. Lond B. Biol. Sci.* 364(1526): 2153–66.
- Trasar-Cepeda C, Leiros MC, Gil-Sotres F, 2008. Hydrolytic enzyme activities in agricultural and forest soils. some implications for their use as indicators of soil quality. *Soil Biol. Biochem.* 40: 2146–2155.
- von Lützw M, Kogel-Knabner I, Ekschmitt K, Matzner E, Guggenberger G, Marschner B, Flessa H, 2006. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions—a review. *Eur. J. Soil Sci.* 57: 426–445.
- Wan Y, Wu C, Xue Q, Hui X, 2019. Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil. *Sci. Total Environ.* 654: 576–582.
- Wang J, Lv S, Zhang M, Chen G, Zhu T, Zhang S, 2016b. Effects of plastic film residues on occurrence of phthalates and microbial activity in soils. *Chemosphere* 151: 171–177.
- Wei W, Huang QS, Sun J, Wang JY, Wu SL, Ni BJ, 2019. Polyvinyl chloride microplastics affect methane production from the anaerobic digestion of waste activated sludge through leaching toxic bisphenol-A. *Environ. Sci. Technol.* 53: 2509–2517.
- Windsor FM, Durance I, Horton AA, Thompson RC, Tyler CR, Ormerod SJ, 2019. A catchment-scale perspective of plastic pollution. *Glob. Chang. Biol.* 25:1207–1221.
- Wright SL Kelly FJ, 2017. Plastic and human health: a micro issue? *Environ. Sci. Technol.* 51: 6634–6647
- Xu B, Liu F, Cryder Z, Huang D, Lu Z, He Y, Wang H, Lu Z, Brookes PC, Tang C, Gan J, Xu J, 2020. Microplastics in the soil environment: occurrence, risks, interactions and fate—a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 50(21): 2175–2222.
- Yang X, Bento CP, Chen H, Zhang H, Xue S, Lwanga EH, Zomer P, Ritsema CJ, Geissen V, 2018. Influence of microplastic addition on glyphosate decay and soil microbial activities in Chinese loess soil. *Environ. Pollut.* 242: 338–347.
- Yu M, Van Der Ploeg M, Lwanga EH, Yang X, Zhang S, Ma X, Ritsema CJ, Geissen V, 2019. Leaching of microplastics by preferential flow in earthworm (*Lumbricus terrestris*) burrows. *Environmental Chemistry*, 16(1): 31–40.
- Zang H, Zhou J, Marshall MR, Chadwick DR, Wen Y, Jones DL, 2020. Microplastics in the agroecosystem: are they an emerging threat to the plant-soil system? *Soil Biol. Biochem.* 148: 107926.
- Zeng LS, Zhou ZF, Shi YX, 2013. Environmental problems and control ways of plastic film in agricultural production. *Appl. Mech. Mater.* (295–298):2187–2190.
- Zhang G, Zhang F, Li X, 2019. Effects of polyester microfibers on soil physical properties: perception from a field and a pot experiment. *Sci. Total Environ.* 670, 1–7.
- Zhang M, Dong B, Qiao Y, Yang H, Wang Y, Liu M, 2018. Effects of sub-soil plastic film mulch on soil water and salt content and water utilization by winter wheat under different soil salinities. *Field Crop Res.* 225:130–140.
- Zheng W, Morris EK, Lehmann A, Rillig MC, 2016. Interplay of soil water repellency, soil aggregation and organic carbon. A meta-analysis. *Geoderma*, 283:39–47.
- Zhou J, Gui H, Banfield CC, Wen Y, Zang HD, Dippold MA, Charlton A, Jones DL, 2021. The microplastisphere: biodegradable microplastics addition alters soil microbial community structure and function. *Soil Biol. Biochem.* 156: 108211.
- Ziajahromi S, Neale PA, Rintoul L, Leusch FD, 2017. Wastewater treatment plants as a pathway for microplastics: Development of a new approach to sample wastewater-based microplastics. *Water Res.* 1;112:93–99.