

Derleme Makale/ Review Article

Plastik Kirliliğinin Önlenmesinde Biyodegradasyon Sürecinin Yeri

İlknur ERKİLİNÇ^{1*}, Tuba ARTAN ONAT^{1*}

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoteknoloji Bölümü, Niğde, TÜRKİYE
erkilincilknur@gmail.com, tubaartan@ohu.edu.tr

Received/Geliş Tarihi: 12.07.2024

Accepted/Kabul Tarihi: 19.12.2024

Özet: Çevreye karışan plastikler doğal süreçlerle (biyolojik metabolizma, UV ve mekanik aşınma gibi) ayrışma ve bozunmaya uğramakta ve çapı 5 mm'den küçük mikroplastiklere (MP'lere) ve çapı maksimum 1000 nm'den küçük olan parçacıklara ayrılarak nanoplastiklere (NP'lere) dönüşmektedir. Mikroplastiklerin temel kaynakları arasında peeling sabunlar, yüz temizleyiciler, köpükler, sigara izmaritleri, giysi mikrofiberleri, iç mekan tozları, bebek bezi, diş macunu, kapaklar, çatal bıçak takımları gıda kapları ve deniz ürünleri gibi kaynaklar bulunmaktadır. Bu ürünlerin çoğu fosil yakıtlardan veya işlenmemiş hammaddelerden üretilmekte ve çöplüklere veya kontrolsüz atıklara karışarak çevre kirliliğini arttırmaktadır. Geleneksel plastik üretimi ve atık yönetimi süreçleri, sera gazı emisyonlarını artırarak iklim değişikliğine neden olmaktadır. Özellikle denizlerde veya okyanuslarda görülen plastik kirliliği üzerine yapılan çalışmalar ve plastiklerin enzimler tarafından biyolojik olarak parçalanmasıyla ilgili araştırmalar önem kazanmıştır. Bu derleme makalesi bakteriler, funguslar gibi mikroorganizmaların metabolik süreçleri ile plastik atıkların biyolojik bozunması üzerine mevcut araştırmalara güncel bir genel bakış sağlamayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Mikroplastik, Nanoplastik, Plastik degradasyonu, Plastik giderimi

The Role of Biodegradation In The Preventing Plastic Pollution

Abstract: Plastics reach the environment and, naturally break down into microplastics (MPs) with a diameter of less than 5 mm and nanoplastics (NPs) with a maximum diameter of less than 1000 nm due to processes including biological metabolism, UV light, and mechanical abrasion. The primary sources of microplastics encompass exfoliating soaps, face cleansers, foams, cigarette butts, microfibers from clothing, indoor dust, nappies, toothpaste, caps, cutlery, food containers, and seafood. These products are derived from fossil fuels or unrefined natural resources and ultimately disposed of in landfills or unregulated waste sites, hence exacerbating environmental damage. Conventional plastic production and waste management methods contribute to climate change by amplifying the release of greenhouse gases. Research on plastic pollution, particularly in marine environments, and the enzymatic biodegradation of plastics have become increasingly significant. This review article seeks to present a comprehensive and recent overview of the ongoing research on the metabolic activities of microorganisms, specifically bacteria and fungi, and their ability to break down plastic waste through biodegradation.

Keywords: Microplastics, Nanoplastics, Plastic Removal, Plastic Degradation

1. Giriş

Sentetik plastiklerin polimerik özelliklerinin sağladığı düşük maliyet, yüksek stabilite, dayanıklılık ve esneklik gibi özellikleri günümüzde kullanılan temel bir malzeme olmasına neden olmaktadır (Ru vd., 2020; Ali vd., 2021). Bu özellikler plastiklerin biyolojik bozunmaya dirençli olmasını da sağlar, bu durum ise atık depolama alanlarında ve ekosistemlerde birikmelerine yol açmaktadır (Barnes vd., 2009). Düzenli depolama gelişmekte olan ülkelerde düşük maliyeti nedeniyle hala tercih edilmektedir. Yakma işlemi, plastik birikim sorununu azaltmak için bir çözüm olarak değerlendirilmekte ancak dioksinler, dioksin benzeri bileşikler, karbon monoksit, nitrojen oksitler vb. gibi toksik kirlleticilerin atmosfere salınmasına yol açmaktadır (Ru vd., 2020). Mekanik ayrıştırma ve geri dönüşüm, termoplastik atıkların yeniden kullanımı giderek daha fazla tercih edilmektedir. Ancak, plastik malzemeler fizikokimyasal özellikleri nedeni ile geri dönüşüm döngüsünden sonra ciddi

şekilde bozulmaktadır ve bu da polimerlerin ticari değerini sınırlayabilmektedir. Kimyasal geri dönüşüm plastik atıkların monomerler ve diğer kimyasalların geri kazanılma potansiyeline sahiptir; ancak bu sürecin uygunluğu, kullanılan katalizörlerin etkinliği ve geliştirilen süreçlerin ekonomik uygulanabilirliğine bağlı kalmaktadır (Rahimi ve García, 2017). Bu sebeple, geleneksel atık bertaraf yöntemlerinin zararlı çevresel sonuçlarını azaltmak için etkili çevre dostu tekniklerin hızla geliştirilmesi gerekmektedir (Ali vd., 2021).

Kullanımı en yaygın plastikler arasında; polietilen (PE), polipropilen (PP), polistiren (PS), polivinil klorür (PVC), polietilen tereftalat (PET), poliüretan (PU), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), lineer düşük yoğunluklu polietilen (LLDPE), poli (butilenadipat-ko-tereftalat) (PBAT), polilaktik asit (PLA) ve Polivinil klorür (PVC) yer almaktadır (Ali vd., 2021; Kim vd., 2023; Sun vd., 2024). Her plastik malzeme farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir, bununla birlikte tekstil endüstrisi, gıda, paketlenme, tarımsal malç, yapı malzemeleri ve tıbbi cihazlar gibi çeşitli endüstriyel ve günlük kullanımlarda kullanılmaktadır (Thakur vd., 2023). Çevreye karışan plastikler doğal süreçlerle (biyolojik metabolizma, UV ve mekanik aşınma gibi) ayrışma ve bozunmaya uğramakta ve çapı 5 mm'den küçük mikroplastiklere (MP'lere) ve çapı maksimum 1000 nm'den küçük olan parçacıklara ayrılarak nanoplastiklere (NP'lere) dönüşmektedir (Hartmann vd., 2019; He vd., 2023; Gigault vd., 2021; Thompson vd., 2004; Sun vd., 2024; Zhang vd., 2021). Mikroplastikler ve NP'ler yüksek taşınma kapasitesi ve yüksek hareketliliğe sahiptir (Rillig ve Lehmann, 2020; Zhang vd., 2021). Bu nedenle MP ve NP partiküllerinin buldukları ortamla etkileşim potansiyelleri yüksektir (Wang vd., 2022).

Plastikleri parçalayan çeşitli organizmalar ve/veya enzimatik yollar bulunmaktadır. Literatürde bu organizmalar ve degradasyon mekanizmalarına dair temel bir yaklaşım ve bilgi birikimi oluşmuştur. Bu derlemenin temel amacı plastiklerin biyolojik yollarla bozunmasında son yıllarda (2020-2024) yapılan araştırmaları bir araya getirerek biyodegradasyonu gerçekleştiren organizmalara genel bir bakış sunmaktır.

2. Mikroplastiklerin Çevresel Etkileri

Mikroplastikler pestisitler, polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH'lar), poliklorlu bifeniller (PCB'ler) ve ağır metaller gibi kirleticileri adsorbe edebilir ve çevreye yayılabilir (Sa vd., 2018; Yu vd., 2019). Çevrede biriken mikroplastiklerin temel kaynakları arasında peeling sabunlar, yüz temizleyiciler, köpükler, sigara izmaritleri, giysi mikrofiberleri, iç mekan tozları, bebek bezi, diş macunu, kapaklar, çatal bıçak takımları gıda kapları ve deniz ürünleri gibi diğer kaynaklarda da bulunmaktadır (Hernandez vd., 2017, Galvão vd., 2020; Kannan ve Vimalkumar, 2021). Ayrıca, polistiren ve poliüretan gibi polimerlerin gübrelerle eklenmesi, toprak performansını artırabilir ve mahsul üretimini artırabilir (Wright vd., 2013). Mikro (nano) plastikler, boyutları, şekilleri ve yüzey işlevselleştirmeleri nedeniyle çevreye salındıktan sonra pestisitler, polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH'lar), poliklorlu bifeniller (PCB'ler) ve ağır metaller gibi diğer kirleticileri adsorbe edebilir ve konsantre edebilir (Sa vd., 2018; Yu vd., 2019). Çevrede farklı kökenlere, boyutlara, yoğunluklara, kimyasal yapıya ve şekle sahip çeşitli mikro (nano) plastik türleri bulunmaktadır (Ali vd., 2024). Deniz suyunda, yüksek yoğunluklu partiküller tortuya batar ve bentik organizmalar tarafından alınabilirken, düşük yoğunluklu partiküller su sütununda kalabilir. Mikroplastiklerin kimyasal ve fiziksel özellikleri çevresel koşullarla değişebilir (Yu vd., 2019). Kıyı bölgelerinde plastiklerin parçalanması ve bozulması daha hızlı olabilmektedir (Andrady, 2011; Barboza vd., 2019).

2.1. Mikroplastiklerin Dağılımda Atmosferin Etkisi

Sentetik tekstiller, mikro (nano) plastiklerin çevreye yayılmasında önemli bir rol oynamaktadır (Dris vd., 2016; Dris vd., 2017). Sentetik elyaflar, dayanıklılığı ve konfor sağlamaları nedeniyle geniş kullanımı alanı sağlamaktadır (Liu vd., 2019). Yıkama işlemi esnasında, yaklaşık 1900 farklı ince

elyafın havada serbest kaldığı gözlemlenmiştir (Browne vd., 2011). Endüstride, sentetik tekstillerin öğütülmesi ve kesilmesi sırasında birçok mikrofiber üretilmesine yol açmaktadır (Chen vd., 2020a). Mikro (nano) plastiklerin atmosferdeki varlığı, büyük plastiklerin parçalanması, çöp sahalarının yanması ve araçların egzoz emisyonuyla da gerçekleşmektedir (Chen vd., 2020b). Mikroplastikler atmosferde genellikle 20 ila 5000 mikrometre arasında değişir ve farklı kimyasal bileşimleri içermektedir (Chen vd., 2020b).

2.2. Mikroplastiklerin Dağılımında Sucul Sistemlerin Etkisi

Okyanuslar, mikroplastik kirliliği için özellikle kritik alanlar olarak kabul edilmektedir. Yaklaşık 5,25 trilyon plastik parçasının okyanus yüzeyinde yüzdüğü tespit edilmiştir (Romera-Castillo vd., 2018). Polikarbonat ve polistiren mikro boncuklar, düzenli depolama alanlarının (Golwala vd., 2021; Silva vd., 2021) ve kanalizasyon arıtma tesislerinin (Kataoka vd., 2019) sızıntı sularına karışabilmektedir. Mikro (nano) plastikler ayrıca kara kökenli plastikler hava yolu (hava akım izleri), toprak izleri ve nehir yoluyla (su izleri) okyanuslara ulaşabilmektedir (He vd., 2018; Wang vd., 2019). Mikro (nano) plastiklerin yaygınlığı, okyanus bölgelerinin insan faaliyetleriyle doğru orantılıdır (Li vd., 2018). Kıyı bölgelerde daha düşük konsantrasyonlar gözlemlenmiştir (Desforges vd., 2014, Desforges vd., 2015).

Plastiklerin çoğunda yoğunluk sudan daha düşüktür, bu nedenle nehirler ve deniz akıntılarıyla kolayca taşınabilirler ve sonunda çeşitli biyolojik ve fiziksel faktörlerin etkisiyle sedimentlerde birikmektedirler (Cauwenberghe vd., 2015). Mikroplastiklerin sedimentlerdeki birikimi zamana bağlı olarak artmıştır, özellikle giysilerin yıkama sürecinden kaynaklanan liflerin önemli bir kaynak olduğu belirlenmiştir. Özellikle ev tipi çamaşır makinelerinden alınan örneklerde, tek bir giysi parçasından binlerce lif türü elde edilebilmektedir. Plaj sedimanlarında bulunan mikroplastik liflerin çoğu çamaşır makinelerinin atık sularıyla ilişkilidir (Browne vd., 2011). Bu nedenle, kentsel alanlardaki sedimentlerdeki mikro(nano)plastik liflerin miktarını belirlemek büyük önem taşımaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'ndeki güney kıyılarında yapılan araştırmalar, çeşitli plastik türlerinin sedimentlerde farklı konsantrasyonlarda bulunduğunu ve en yaygın olanların lifli yapıya sahip olanlar olduğunu göstermiştir (Yu vd., 2018). Ülkemizde buna benzer bir çalışmaya rastlanılamamıştır.

3. Mikroplastiklerin İnsan ve Hayvan Sağlığına Etkisi

Toksikoloji verileri, mikro (nano) plastiklerin bağırsak hasarına ve oksidatif stres neden olabileceğini göstermektedir. Ayrıca, mikroplastiklerin balıklarda büyüme, glikoz seviyeleri, oksidatif stres, bağışıklık sistemleri biyobelirteç yanıtlarını değiştirebileceğini, aynı zamanda kalıcı organik kirleticilerin ve ağır metallerin taşınmasını etkileyebileceğini gösterilmiştir (Jeong vd., 2016). Polisiklik aromatik hidrokarbonlar veya poliklorlu bifeniller gibi mikroplastiklerin, toprak solucanları, deniz amfipodları, gökkuşuğu balıkları, mikroalgler ve midyeler gibi çeşitli biyolojik organizmalarda adsorpsiyon yoluyla biriktiği ve konsantrasyonunun arttığı tespit edilmiştir (Fisner vd., 2017; Guo vd., 2020; Llorca vd., 2018; Rehse vd., 2018; Wang vd., 2020).

Mikroplastikler, organizmaların normal işlevlerini bozabilir ve çeşitli organlarda, gelişim, sindirim, nörolojik ve üreme sistemlerinde zararlı etkilere sahip olabilir (Yin vd., 2021; Sun vd., 2023). Plastik endüstrisinde çalışanlarda, düşük sperm kalitesi ve üreme sorunları gibi sağlık sorunlarına dair belirtiler görülmüştür (Jelnes, 1988; Hougaard, 2021). Canlı organizmalar üzerinde nano partiküllerin zararlı etkileri, nanotoksosite olarak bilinmektedir. Nano partiküller, biyolojik, fiziksel ve kimyasal süreçler kullanılarak üretilir (Samrot ve Noel Richard Prakash, 2023). Sperm olgunlaşmasını etkileyen moleküler sinyal iletim yollarında araçlar olarak hareket eden reaktif oksijen türlerinin üretimi yoluyla erkek üreme sisteminde toksisiteye neden olabilir. Dişi üreme sisteminde ise, nano partiküller, oosit olgunlaşması, döllenme ve gelişim gibi fizyolojik süreçleri etkileyebilir (Working 1988; Baskaran vd., 2021; Hou ve Zhu 2017).

İnsan sağlığına yönelik riskler, kirli gıda ve su tüketimi, iç ve dış ortam havasının solunması kişisel bakım ürünleri veya deniz ürünleri kaynakları aracılığıyla mikro(nano)plastiklere maruz kalma ile ilişkilendirilmiştir (Cox vd., 2019; Rahman vd., 2021; Shamsavaripour vd., 2023). Epidemiyolojik araştırmalar, mikroplastiklere (nanoplastikler) maruz kalmanın bağışıklık fonksiyonunu bozabileceğini ve immünosupresyon veya otoimmün bozukluklara yol açabileceğini göstermektedir (Rahman vd., 2021; Wick vd., 2010). Mikroplastiklerin insan vücudunda akut toksikolojik etkilere yol açabileceği, oksidatif stres, apoptoz, inflamasyon ve bağışıklık tepkisi gibi faktörleri tetikleyebileceği belirtilmektedir (Santos vd., 2011).

Mikroplastikler, besin zinciri boyunca birikerek ve hayvanların sağlığını tehdit edecek şekilde risk oluşturabilmektedir (Wang vd., 2016; Wright vd., 2013). Sahillerde, karaya vurmuş veya ölmüş deniz kuşlarının sindirim sistemlerinde büyük plastik parçaları ve mikroplastikler bulunmuştur (Terepocki vd., 2017). Bu mikroplastikler, sindirim sistemine zarar vererek yaralı dokuların şişmesine ve alerjik bağışıklık tepkilerine yol açabilmektedir (Lei vd., 2018; Santillo vd., 2017). Ayrıca, mikroplastik tüketimi, deniz kuşlarının üreme süreçlerini geciktirebilmekte veya sucul türlerin üreme yeteneklerini etkileyebilmektedir. Balıkların (Savoca vd., 2019), derin deniz türlerinin (Courtene-Jones vd., 2017), büyük memelilerin ve farklı beslenme seviyelerine sahip bentik omurgasızların bağırsaklarında mikroplastikler bulunmuştur (Besseling vd., 2015a). Mikroplastikler, deniz planktonlarının solunumunu ve fotosentezini engelleyebilir ve deniz ekosistemi için bir tehdit oluşturabilmektedir (Amin vd., 2020). Ayrıca, mikro (nano) plastiklerin zooplanktonlar tarafından tüketildiği ve bu yolla sucul organizmalar ve deniz ekosistemi için tehdit oluşturabileceği gösterilmiştir (Amin vd., 2020).

4. Plastik Degradasyonu

Plastik malzemeler, ultraviyole (UV) tarafından gerçekleştirilen fotooksidatif bozunma olarak bilinen bir süreç aracılığıyla parçalanmaktadır (Yousif vd., 2013). Bu süreç, polimer zincirlerinin parçalanması, serbest radikallerin oluşması ve sonrasında moleküler ağırlıkta bir azalma ile plastiklerin bozulmasına neden olmaktadır. Ancak, tüm plastik türlerinin UV ışığını etkili bir şekilde absorbe edemediği göz önünde bulundurulmalıdır (Zaini vd., 2024). Ultraviyole radyasyonu, plastikler tarafından absorbe edildiğinde fotonların uyarılmasına ve serbest radikallerin oluşmasına neden olmaktadır. Ancak, bazı organik bileşikler UV radyasyonunu emerek termal enerji olarak yeniden yayabilir, bu da plastiklerin UV bozulmasını azaltabilmektedir. Farklı plastik türleri, UV bozulmasına farklı derecelerde duyarlılık gösterebilmektedir. Dış mekanda kullanılan PVC borularda UV radyasyonunun neden olduğu bozulma belirgin hale gelebilmekte ve tekstillerde renk solması da UV kaynaklı polimer bozulması gözlenmektedir (Zaini vd., 2024).

Polimerlere şeker birimlerinin dahil edilmesi, UV radyasyonuna maruz kaldıklarında bozunabilirliklerini artırmaktadır (Hardy vd., 2022). Polimer yapısı, çeşitli UV radyasyon formları tarafından indüklenen fotokimyasal etki nedeniyle fotokimyasal bozulmaya uğrayabilmektedir. Plastik filmler, güneş ultraviyole radyasyonuna ve mekanik aşınmaya (MA) maruz kaldıklarında yüzey bozulmasına ve mikroplastik salınımına maruz kalmaktadır (Sun vd., 2022).

Plastiklerin yüzey ayrışması genellikle güneşe maruz kaldığında meydana gelir ve plastiği kırılğan hale getirir. Ayrıca, inatçı kirleticiler kimyasal olarak oksidasyon veya hidroliz yoluyla parçalanabilir. Okyanusa veya karaya giren plastikler UV ışığına maruz kalır ve mikroplastığe dönüşebilir (Song vd., 2017).

4.1. Mekanik Bozunma

Plastiklerin bozunma süreci: başlatma, yayılma ve sonlandırma olmak üzere üç adımda gerçekleşmektedir. Bu süreçte plastiklerin moleküler yapısı, ışığa karşı duyarlılığına, yüzey alanının hacme oranına, sıcaklığa ve moleküler formülüne bağlı olarak değişir. Ancak, bu sonuçlar sadece

fotoreaktif plastikler için geçerlidir ve okyanustan uzaklaştırılmaları daha kolaydır. Diğer plastik türlerinin okyanustan uzaklaştırılması daha uzun zaman alabilir (Gewert vd., 2015; Stubbins vd., 2022). Çevre kirliliğine etkilerini belirlemek için plastiklerin mikroplastığa parçalanma sürecini anlamak önemlidir (Song vd., 2017) Fiziksel faktörlerin yanı sıra fotokimyasal oksidasyon ve mekanik aşınmanın plastik enkazın parçalanmasını artırdığı bilinmektedir (Asiandu vd., 2022).

Mekanik aşınma, plastiklerin kaya veya kum gibi yüzeylerle temas ettiğinde ve bu yüzeyler tarafından aşındırıldığında meydana gelir. Rüzgar ve dalgalar genellikle sahilde plastiklerin mekanik aşınmasına neden olduğundan, bu durum özellikle sahillerde sık görülür (Bunty vd., 2017). Plastiklerin deniz ortamında, suyun gölgelenmesi ve derinlik nedeniyle güneş ışığına maruz kalma miktarı azalır. Bu da plastiklerin deniz ortamında daha uzun süre bozulmasına neden olmaktadır (Bejgarn vd., 2015).

Plastik atıkların parçalanmasına yönelik fiziksel ve kimyasal yaklaşımlar arasında ultraviyole (UV) ısıtma, fiziksel stres, hidroliz ve ammonoliz gibi yöntemler bulunmaktadır. Ancak, bu yöntemlerde yüksek sıcaklıkların kullanılması gerekebilmekte ve yan ürünlerin çoğu doğa için toksik olabilmektedir. Ayrıca, bu prosedürlerin çoğu laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir, bu da doğal koşullar altındaki etkinliklerini sınırlayabilir. Ultraviyole ışınlar uygulanması plastik bozunmasında önemli bir adımdır çünkü malzemeyi daha küçük parçalara ayırarak zincir parçalanmasını başlatır. Ancak, UV radyasyonu plastikleri bozarken, plastiklerde bulunan katkı maddeleri de çevreye etkileyebilecek diğer maddeleri açığa çıkarabilir (Ghosh vd., 2019, Gewert vd., 2015).

4.1.2. Hidroliz ve Ammonoliz ile bozunma

Hidroliz, su içeriği yüksek olduğunda plastiklerin zincirlerinin bölünmesiyle meydana gelir. Asidik bileşiklerin varlığı hidroliz sürecini hızlandırabilir ve poliüretandaki ester bağı, karboksilik asit üreterek otokatalitik bir süreç oluşturabilir. PET hidrolizinin bir dezavantajı, sistemin yüksek korozyonlu ve üretilen inorganik tuzların fazlalığıdır (Al-Sabagh vd., 2016; Webb vd., 2021). Ammonoliz, poliesterlerin ve polikarbonatın kimyasal olarak geri dönüştürülmesi için öne çıkan bir yöntemdir ve hidrotermal koşullar altında gerçekleşir (Funazukuri, 2015).

5. Biyolojik Bozunma

Plastiklerin biyolojik bozunması ve biyodegradasyonu, modern plastik endüstrisinin başlangıcından itibaren araştırma konusu olmuştur. Özellikle 1940'ların başlarından itibaren, plastiklerin biyolojik olarak nasıl etkilendiği ve doğal ortamlarda ne tür değişikliklere uğradığı merak konusu olmuştur. PVC'deki mantar gelişmesinin tespit edilmesi, plastiklerin biyolojik etkilere maruz kalabileceğine dair erken bir işarettir (Brown, 1945). Ancak, biyodegradasyon terimi, sentetik plastik polimerlerin biyolojik dağılımını ve parçalanmasını tanımlamak için 1970'lere kadar yaygın olarak kullanılmamıştır. İlk plastik biyodegradasyonu ile ilgili araştırma makaleleri 1974 yılında ortaya çıkmıştır (Mills ve Klausmeier, 1974). Örneğin, 1971'de PVC'nin bakteriler tarafından kütle azaltımıyla ilgili önemli bulgular rapor edilmiştir. Bu bulgular, PVC'nin katkı maddelerinden kaynaklanan bir bozulma sürecine sahip olduğunu göstermiştir. 1978'de yapılan bir çalışmada, 14C etiketli PE'nin sadece %0,5'inin iki yıl içinde mantarlar tarafından CO₂'ye dönüştürüldüğü bulunmuştur (Albertsson vd., 1993). Plastiklerin biyolojik bozunmasının çeşitli faktörlerle etkilendiği görülmüştür. UV ışığına maruz kalmanın plastiklerin biyolojik parçalanmasını artırdığı ve bazı yüzey aktif maddelerin bu süreci hızlandırabileceği belirlenmiştir. Mikroorganizmaların plastikler üzerindeki etkisi de araştırma konusudur. Özellikle, belirli bakteri türlerinin plastik biyodegradasyonunu artırabileceği bulunmuştur (Albertsson vd., 1993).

Son yıllarda, plastik biyolojik bozunmasıyla ilgili araştırmalar artmıştır. Deniz plastik kirliliği üzerine yapılan çalışmalar ve plastiklerin enzimler tarafından biyolojik olarak parçalanmasıyla ilgili

araştırmalar önem kazanmıştır. Ayrıca, biyobazlı ve biyolitik olarak bozunabilen plastiklerin değer zincirleri üzerine yapılan araştırmalar da plastik atık yönetimi açısından önemlidir (Yang vd., 2023).

5.1. Mikroplastiklerin Biyolojik Bozunmasında Kullanılan Mikroorganizmalar

Yapılan taksonomik çalışmalarda Proteobacter (%80-93), Actinobacteria (%2-14), Firmicutes (%1) sınıfları, Moraxellaceae familyası konsorsiyumu (%50-84), Bradyrhizobiaceae (2-10), Xanthomonadaceae (%2-8), Bacillaceae (%3-5) aileleri, *Mycobacterium* ile Mycobacteriaceae (%12) üyeleri ile poli(eter-üretan) biyodegradasyonu yapıldığı gözlenmiştir (Faccia vd., 2021).

5.1.2. Mikroplastiklerin biyodegradasyonunda kullanılan bakteri türleri

Mikroplastik biyodegradasyonunda bakterilerle yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Bu derlemede yapılmış olan literatür taramasında farklı bakteriyel suşların farklı plastik türlerinde bulunmuş olan biyodegradasyon oranları çizelgelerde gösterilmiştir (Tablo 1 ve Tablo 2).

Yapılan literatür taramasında HPDE biyodegradasyonunda en yüksek biyodegradasyon oranına *Bacillus aryabhatai* VRKPV15'nin ulaştığı, en düşük oran biyodegradasyon oranının ise *Bacillus* sp. VRKPP17 (%6.7) ile yapıldığı belirlenmiştir (Sangeetha vd., 2019). Polipropilen biyodegradasyonunda en yüksek oran (%78) *Bacillus paramycooides* tarafından sağlanırken (Nanthini vd., 2021), en düşük oran (%3) *Lysinibacillus* sp. JJY0216 tarafından elde edilmiştir (Jeon vd., 2021). PVC plastik biyodegradasyonunda en yüksek oran (%93.48) *Bacillus flexus* (DSM 1320) ile (Giacomucci vd., 2019), en düşük oran ise *Cobetia* sp. S-237 (MT907446) suşu ile elde edilmiştir (Khandare vd., 2022).

Tablo 1. *Bacillus* sp. türü ile yapılan plastik biyodegradasyonu çalışmaları

<i>Bacillus subtilis</i> H-248	LDPE film	%1.54	Khandare vd, 2022
<i>Bacillus velezensis</i> C5	LDPE film	%8.01	Liu vd, 2022
<i>Bacillus siamensis</i> ATKU1	LDPE partikül	%4.71	Tarafdar vd, 2021
<i>Bacillus aryabhatai</i> VRKPV15	HDPE film	%23.14	Sangeetha vd, 2019
<i>Bacillus pumilus</i> VRKPC1 (KJ958503)	HDPE film	%18.19	Sangeetha vd, 2019
<i>Bacillus cereus</i> VRKPK25	HDPE film	%19.37	Sangeetha vd, 2019
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> VRKPR13	HDPE film	%16.43	Sangeetha vd, 2019
<i>Bacillus licheniformis</i> VRKPCH23	HDPE film	%11.82	Sangeetha vd, 2019
<i>Bacillus subtilis</i> VRKPP1 (KJ958502)	HDPE film	%7.51	Sangeetha vd, 2019
<i>Bacillus</i> sp. VRKPP17 (KM879154)	HDPE film	%6.7	Sangeetha vd, 2019
<i>Bacillus paramycooides</i>	UV ve PP	%78.99	Nanthini vd, 2021
<i>Bacillus cereus</i>	UV ve PP	%67.69	Nanthini vd, 2021
<i>Bacillus</i> sp. BS-1	UV ve PP	%60.54	Nanthini vd, 2021
<i>Bacillus</i> sp. BS-2	UV ve PP	%29.04	Nanthini vd, 2021
<i>Bacillus</i> sp. strain 27	UV ve PP mikroplastik	%4.0	Auta vd., 2018

Tablo 1'in devamı

<i>Bacillus amyloquefaciens</i> JB4	PVC film	%33.2	Novotný vd., 2022
<i>Bacillus flexus</i> (DSM 1320)	PVC film	%93.48	Giacomucci vd., 2019
<i>Bacillus paralicheniformis</i> G1	PS şerit	%18	Kumar vd., 2021
<i>Bacillus</i> sp. ITP 10.1.1	PS films	%29.28	Ruslan vd., 2018

Yapılan literatür taramasından elde edilerek oluşturmuş Tablo2'de farklı bakteriler ile yapılan çalışmalar derlenmiştir. Araştırma sonuçlarına göre, LPDE plastik biyodegradasyonunda *Acinetobacter pittii* IRN19 en yüksek (%26.8) oranıyla biyodegradasyon gerçekleştirirken (Montazer vd., 2018), en düşük oranı ise *Marinobacter* sp. H-244 (%1.46) elde etmiştir (Khandare vd., 2022). PET plastik biyodegradasyonunda en yüksek oran (%69) *Priestia aryabhatai* VT 3.12 (OK135732.1) tarafından sağlanırken (Dhaka vd., 2022), en düşük oran (%30.52) *Rhodococcus* sp. SSM1 (MN045174) tarafından elde edilmiştir (Kumar vd., 2020). PL plastik biyodegradasyonunda ise oran %30 *Pseudomonas* sp. AKS31 (KY849590) tarafından elde edilmiştir (Roy vd., 2021). PS plastik biyodegradasyonunda en yüksek oran (%29.28) *Bacillus* sp. ITP 10.1.1 (Ruslan vd., 2018) tarafından sağlanırken, en düşük oran (%0.4) *Exiguobacterium* sp. DR11 (MG645229) tarafından elde edilmiştir (Chauhan vd., 2018).

Tablo 2. Çeşitli bakteriler ile yapılan plastik biyodegradasyonu ile ilgili çalışmalar

Bakteriler	Plastik Ürünü	Plastik Biyodegradasyonu	
<i>Achromobacter denitrificans</i>	LDPE	%6.5	Maleki vd, 2022
<i>Marinobacter</i> sp. H-244	LDPE film	%1.46	Khandare vd, 2022
<i>Marinobacter</i> sp. H-246	LDPE film	1%.68	Khandare vd, 2022
<i>Alcaligenes faecalis</i> LNDR-1	PE şerit	%37.2	Nag vd, 2021
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> VRKPC5	HDPE film	%13.73	Sangeetha vd, 2019
<i>Leucobacter</i> sp. VRKPC22	HDPE film	%8.50	Sangeetha vd, 2019
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> VRKPCH4 (KJ958504)	HDPE film	%7.33	Sangeetha vd, 2019
<i>Acinetobacter pittii</i> IRN19	LDPE parça	%26.8	Montazer vd, 2018
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> WZH-4 (OK448418)	PP particles	%9.35	Wang vd, 2022a
<i>Lysinibacillus</i> sp. JJY0216	PP film	%3.1	Jeon vd, 2021
<i>Pseudomonas</i> sp. ADL15 (KX812776)	PP mikroplastik	%17.3	Habib vd, 2020
<i>Rhodococcus</i> sp. ADL36 (KX812777)	PP mikroplastik	%7.3	Habib vd, 2020
<i>Escherichia coli</i>	PP parça	%66.8	Gamage vd., 2019
<i>Rhodococcus</i> sp. strain 36	UV ve PP mikroplastik	%6.4	Auta vd., 2018
<i>Aneurinibacillus aneurinilyticus</i> btDSCE01 (MF359591)	PP şerit	%24.4	Skariyachan vd., 2018

Tablo 2'nin devamı

Bakteriler	Plastik Ürünü	Plastik Biyodegradasyonu	
<i>Brevibacillus agri</i> btDSCE02 (MF359592)	PP şerit	%21.2	Skariyachan vd., 2018
<i>Achromobacter denitrificans</i> Eb113 (OK274068)	PVC mikroplastik	% 12.3	Maleki vd., 2022
<i>Vibrio</i> sp. starin T-1.3 (MT919396)	PVC film	% 1.1-1.23	Khandare vd., 2021
<i>Altermonas</i> sp. starin BP-4.3 (MT907447)	PVC film	% 1.0-1.73	Khandare vd., 2021
<i>Cobetia</i> sp. starin S-237 (MT907446)	PVC film	%0.9-1.23	Khandare vd., 2021
<i>Pseudomonas citronellolis</i> (DSM 50083)	Waste PVC film	% 18.58	Giacomucci vd., 2019
<i>Priestia aryabhatai</i> VT 3.12 (OK135732.1)	PET films	%69.23	Dhaka vd., 2022
<i>Rhococcus</i> sp. SSM1 (MN045174)	PET films	%30.52	Kumar vd., 2020
<i>Alicyclophilus denitrificans</i> BQ ₁	PS-PU	%85	Fuentes-Jaime vd., 2022
<i>Pseudomonas</i> sp. AKS31 (KY849590)	PU films	%30	Roy vd., 2021
<i>Acinetobacter johnsonii</i> JNU01	PS film	% 1.52	Kim vd., 2021
<i>Pseudomonas lini</i> JNU01	PS film	% 1.45	Kim vd., 2021
<i>Exiguobacterium</i> sp. DR11 (MG645229)	PS chips	%0.4	Chauhan vd., 2018
<i>Exiguobacterium</i> sp. DR14 (MG645233)	PS chips	%,0.44	Chauhan vd., 2018

5.1.2. Mikroplastiklerin biyodegradasyonunda kullanılan fungus türleri

Çalışmada Tablo3'te funguslar ile yapılan mikroplastik giderim çalışmaları özetlenmiştir. Yapılan çalışmalara göre, LPDE plastik biyodegradasyonunda en yüksek seviyede %95 oranıyla *Alternaria alternata* FB1 (Gao vd., 2022) fungi suşu, en düşük seviyede ise %18 oranıyla *Aspergillus nidulans* E1, 2 (MG779511) (Muhonja vd., 2018) fungi suşu; PE plastik biyodegradasyonunda en yüksek seviyede %58.51 oranıyla *Aspergillus terreus* MANGF1 suşu konsorsiyum oluşturularak *A. Sydowii* suşu PNPf15/TS suşu eklenmiştir, en düşük seviyede ise %37.94 oranıyla *Penicillium chrysogenum* ERNF1 fungi suşu tespit edilmiştir (Sangale vd., 2019); PET plastik biyodegradasyonunda en yüksek seviyede %22 oranıyla *Aspergillus* sp. (MH119104.1) (Sarkhel vd., 2020) fungi suşu, en düşük seviyede ise %0.16 oranıyla *Microsphaeropsis arundinis* CBMAI 2110 (Malafatti-Picca vd., 2019) fungi suşu; PU plastik biyodegradasyonunda en yüksek seviyede %88.84 oranıyla *Embarria clematidis* (KT306593) (Khruengsai vd., 2022) fungi suşu, en düşük seviyede ise %05-20 oranıyla *Aspergillus* sp. Strain S45 (KU948302) (Osman vd, 2018) fungi suşu ve PS plastik biyodegradasyonunda en yüksek seviyede %2.17 oranıyla *Cephalosporium* sp. NCIM 1251 fungi suşu, en düşük seviyede ise %1.81 oranıyla *Mucor* sp. NCIM 881 fungi suşu tespit edilmiştir (Chaudhary ve Vijayakumar, 2020b).

Tablo 3. Funguslar ile yapılan plastik biyodegradasyonu ile ilgili çalışmalar

Funguslar	Plastik Ürünü	Plastik Biyodegradasyonu	Kaynak
<i>Alternaria alternata</i> FB1	LDPE film	%95	Gao vd., 2022
<i>Penicillium citrinum</i> CF-3 (MT597828.1)	LDPE	%38.82	Khan vd., 2023
<i>Cephalosporium</i> sp. NCIM 1251	HDPE	%7.18	Chaudhary ve Vijayakumar, 2020a
<i>Aspergillus terreus</i> MANGF1	PE şerit	%58.51	Sangale vd., 2019
<i>Aspergillus terreus</i> BAYF5	PE şerit	%41.82	Sangale vd., 2019
<i>Penicillium chrysogenum</i> ERNF1	PE şerit	%37.94	Sangale vd., 2019
<i>Aspergillus oryzae</i> strain A5, 1 (MG779508)	LDPE	%36.4	Muhonja vd., 2018
<i>Aspergillus fumigatus</i> strain B2, 2 (MG779513)	LDPE	%24	Muhonja vd., 2018
<i>Aspergillus nidulans</i> E1, 2 (MG779511)	LDPE	%18	Muhonja vd., 2018
<i>Coriolus versicolor</i>	PP	%13.17	Kord vd., 2021
<i>Trichoderma hamatum</i> HF4	PVC film	%29.3	Novotný vd., 2022
<i>Penicillium simplicissimum</i> 28f2	PET	%3.09	Moyses vd., 2021
<i>Aspergillus</i> sp. (MH119104.1)	PET	%22	Sarkhel vd., 2020
<i>Microsphaeropsis arundinis</i> CBMAI 2109	PET şişe	%0.5	Malafatti-Picca vd., 2019
<i>Microsphaeropsis arundinis</i> CBMAI 2110	PET şişe	%0.16	Malafatti-Picca vd., 2019
<i>Embarria clematidis</i> (KT306593)	PU	%88.84	Khruengsai vd., 2022
<i>Alternaria</i> sp. (MH410558)	PU film	%3.2	Magnin vd., 2019
<i>Penicillium</i> section Lanata-Divaricata (MH410559)	PU film	%8.9	Magnin vd., 2019
<i>Aspergillus</i> section flavi (MH594856)	PU films	%1.9	Magnin vd., 2019
<i>Aspergillus</i> sp. Strain S45 (KU948302)	PU films	%05-20	Osman vd, 2018
<i>Cephalosporium</i> strain NCIM 1251	PS films	%20.62	Chaudhary vd., 2021
<i>Cephalosporium</i> sp. NCIM 1251	PS şerit	%2.17	Chaudhary ve Vijayakumar, 2020b
<i>Mucor</i> sp. NCIM 881	PS şerit	%1.81	Chaudhary ve Vijayakumar, 2020b
<i>Alternaria</i> sp. (MH410558)	PU film	%3.2	Magnin vd., 2019
<i>Penicillium</i> section Lanata-Divaricata (MH410559)	PU film	%8.9	Magnin vd., 2019
<i>Aspergillus</i> section flavi (MH594856)	PU films	%1.9	Magnin vd., 2019
<i>Aspergillus</i> sp. Strain S45 (KU948302)	PU films	%05-20	Osman vd, 2018
<i>Cephalosporium</i> strain NCIM 1251	PS films	%20.62	Chaudhary vd., 2021
<i>Cephalosporium</i> sp. NCIM 1251	PS şerit	%2.17	Chaudhary ve Vijayakumar, 2020b
<i>Mucor</i> sp. NCIM 881	PS şerit	%1.81	Chaudhary ve Vijayakumar, 2020b

5.1.3. Algler-Mikroalgler ile yapılan plastik biyodegradasyonu ile ilgili çalışmalar

Mikroalglerle yapılan mikroplastik biyodegradasyon çalışmasında, Sarmah ve Rout (2018) LPDE plastik biyodegradasyonunda *Phormidium lucidum*, *Oscillatoria subbrevis* alg suşları ile %30 biyodegradasyon gerçekleştirildiğini tespit edilmiştir.

5.1.4. Larvalar ile yapılan plastik biyodegradasyonu ile ilgili çalışmalar

Mikroplastik gideriminde çeşitli larvalar ile mikroorganizmaların oluşturduğu birlikler ve larvaların giderim kapasiteleri de belirlenmiştir. Yapılan çalışmalara dair plastik biyodegradasyon verileri Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Larvalar ile yapılan plastik biyodegradasyonu ile ilgili çalışmalar

Larva	Plastik Ürünü	Plastik Biyodegradasyonu	
<i>Galleria mellonella</i>	LDPE	% 7	Barrionuevo vd., 2022
<i>Tenebrio molitor</i>	LDPE	% 3.33	Yang vd., 2021
<i>G. mellonella</i>	HDPE	% 3.9025	Zhang vd., 2020
<i>T. molitor</i>	PE	% 5.92	Przemieniecki vd., 2020
<i>Achroia grisella</i>	PE Films	% 1.46	Kundungal vd., 2019
<i>Lumbricus terrestris</i>	LDPE	53.1–41.3	Lwanga vd., 2018
<i>T. molitor</i>	PP	% 1.0	Yang vd., 2021
<i>T. molitor</i>	PVC	% 36.62	Peng vd., 2020
<i>G. mellonella</i>	PS	% 22	Wang vd., 2022b
<i>G. mellonella</i>	PS film	% 12.97	Jiang vd., 2021
<i>G. mellonella</i>	PS film	% 27.94	Lou vd., 2020
<i>Achatina fulica</i>	PS	% 18.5	Song vd., 2020
<i>Tribolium castaneum</i>	PS film	% 12.14	Wang vd., 2020
<i>Z. atratus</i>	PS	% 1.36	Kim vd., 2020

Mikroplastiklerin en yaygın tiplerinden biri olan LPDE plastik biyodegradasyonunda *Lumbricus terrestris* türü larvasının *Microbacterium awajiense*, *Rhodococcus jostii*, *Mycobacterium vanbaalenii*, *Streptomyces fulvissimus*, *Bacillus simplex* ve *Bacillus* sp. bakteri suşları ile konsorsiyumu en yüksek seviyede biyodegradasyon gerçekleştirdiği tespit edilirken (Lwanga vd., 2022), en düşük giderim oranı ise *Tenebrio molitor* türü larvası ile gözlemlenmiştir (Yang vd., 2021). Benzer olarak PE plastik biyodegradasyonunda en yüksek oran *Clostridium*, *Pantoea*, *Agrobacterium*, *Rhizobium*, *Elizabethkinga* konsorsiyumu ile *Tenebrio molitor* larvası tarafından sağlanırken (Przemieniecki vd., 2020), en düşük giderim oranı *Achroia grisella* türü larvası ile tespit edilmiştir (Kundungal vd., 2019). Ayrıca PVC biyodegradasyonunda Streptococcaceae, Spiroplasmataceae, Enterobacteriaceae ve Clostridiaceae familyaları konsorsiyumu ile *T. molitor* türü larvası ile biyodegradasyon (%36.62) gözlemlenmiştir (Peng vd., 2020). *Galleria mellonella* türü larvası ile PS biyodegradasyonu gerçekleştirilebilmiş ancak en düşük giderim oranının *Pseudomonas*

aeruginosa suşu ile konsorsiyum oluşturulan *Zophobas atratus* türü larvası (%1.36) ile olduğu belirlenmiştir.

6. Sonuçlar

Mikroplastikler ve NP'ler yüksek taşınma kapasitesi ve yüksek hareketliliğe sahiptir. Bu nedenle MP ve NP partiküllerinin buldukları ortamlarla etkileşim potansiyelleri yüksektir. Günümüzde, plastikleri parçalayabilen özellikle funguslar olmak üzere çeşitli organizmalar ve bu organizmalara ait enzimler ve/veya metabolik yollar tespit edilmiş ve parçalanma mekanizmalarına dair temel bir yaklaşım ve bilgi birikimi oluşmuştur. Derlememiz, bu alandaki son araştırmaları (2020-2024) özetleyerek biyolojik bozunmayı sağlayan canlılara genel bir bakış sağlamıştır. Biyolojik olarak parçalanabilen polimerlere etki eden mikroorganizmalar ve enzimler hakkında temel birçok çalışma bulunmakla birlikte farklı plastik bozunma potansiyellerine sahip suşlar ve enzimlerle ilişkili genleri ve metabolik yollar önemli bir araştırma alanı olarak karşımıza çıkmaktadır. Uzun vadede, biyolojik bozunma veya biyo-geri dönüşüm ve plastik atıkların iyileştirilmesinde elde edilecek başarılar, dünya genelinde plastik atıkların sürdürülebilir şekilde yönetilmesine önemli katkılar sağlayacaktır. Biyolojik bozunmanın laboratuvar ortamında doğrulanmasından, bu yöntemlerin pratik uygulamalarına kadar, plastik bozunması için yüksek verimli adayların keşfi veya yapımını gerektiren önemli bilgi boşlukları mevcuttur. Genetik mühendisliği ve biyoinformatik yoluyla hedefe yönelik ıslah sağlanarak, plastik atık kirliliğinin etkili bir şekilde arıtılması için potansiyel oluşturulabilir. Ayrıca mikrobiyal gruplar ve özellikle enzimatik yollar hakkında yapılacak araştırmalar ile plastik kirliliği üzerinde yenilikçi ve sürdürülebilir bir yaklaşım ortaya konabilecektir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Kaynaklar

Albertsson, A.C., Sares, C. & Karlsson, S. (1993). Increased biodegradation of LDPE with nonionic surfactant. *Acta Polym.* 44 (5), 243–246.

Ali, S. S., Elsamahy, T., Koutra, E., Kornaros, M., El-Sheekh, M., Abdelkarim, E. A. & Sun, J. (2021). Degradation of conventional plastic wastes in the environment: A review on current status of knowledge and future perspectives of disposal. *Science of The Total Environment* 771, 144719.

Ali, W., Buriro, R. S., Gandahi, J. A., Chen, Y., ul Aabdin, Z., Bhutto, S. & Zou, H. (2024). A critical review on male-female reproductive and developmental toxicity induced by micro-plastics and nano-plastics through different signaling pathways. *Chemico-Biological Interactions* 110976.

Al-Sabagh, A. M., Yehia, F. Z., Eshaq, G., Rabie, A. M., & ElMetwally, A. E. (2016). Greener routes for recycling of polyethylene terephthalate. *Egyptian Journal of Petroleum*,25(1), 53-64.

Amin, R., Sohaimi, E.S., Anuar, S.T. & Bachok, Z. (2020). Microplastic ingestion by zooplankton in Terengganu coastal waters, southern South China Sea. *Mar. Pollut. Bull.* 150, 110616.

Andrady, A.L., (2011). Microplastic in the marine environment. *Mar. Pollut. Bull.* 62, 1596–1605.

Asiandu, A. P., Wahyudi, A. & Sari, S. W. (2022). Aquatic plastics waste biodegradation using plastic degrading microbes. *Journal of microbiology, biotechnology and food sciences*, 11(5), e3724-e3724.

- Barboza, L. G. A., Cózar, A., Gimenez, B. C., Barros, T. L., Kershaw, P. J. & Guilhermino, L. (2019). Macroplastics pollution in the marine environment. *In World seas: An environmental evaluation* (pp. 305-328).
- Barnes, D. K., Galgani, F., Thompson, R. C., & Barlaz, M. (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical transactions of the royal society B: biological sciences*, 364(1526), 1985-1998.
- Barrionuevo, J.M.R., Martín, E., Cardona, A.G., Malizia, A., Chalup, A., de Cristóbal, R.E. & Garzia, A.C.M., (2022). Consumption of low-density polyethylene, polypropylene, and polystyrene materials by larvae of the greater wax moth, *Galleria mellonella* L. (Lepidoptera, Pyralidae), impacts on their ontogeny. *Environ. Sci. Pollut. R.* 29, 68132–68142.
- Baskaran, S., Finelli, R., Agarwal, A. & Henkel, R. (2021). Reactive oxygen species in male reproduction: A boon or a bane?. *Andrologia*, 53(1), e13577,
- Bejgarn, S., MacLeod, M., Bogdal, C. & Breitholtz, M. (2015). Toxicity of leachate from weathering plastics: An exploratory screening study with *Nitocra spinipes*. *Chemosphere*, 132, 114-119,
- Besseling, E., Foekema, E.M., Van Franeker, J.A., Leopold, M.F., Kuhn, S., Bravo Rebolledo, E.L., Hesse, E., Mielke, L.J.I.J., Kamminga, P. & Koelmans, A.A. (2015). Microplastic in a macro filter feeder: humpback whale *Megaptera novaeangliae*. *Mar. Pollut. Bull.* 95, 248–252,
- Brown, A.E. 1945. The problem of fugal growth on synthetic resins. *Mod. Plast.* 23, 189.
- Browne, M. A., M.A., Crump, P., Niven, S.J., Teuten, E., Tonkin, A., Galloway, T. & Thompson, R. (2011). Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks. *Environ. Sci. Technol.* 45, 9175–9179.
- Bunty Sharma, Himanshi Rawat, Pooja & Ruchika Sharma. (2017). Bioremediation-A Progressive Approach toward Reducing Plastic Wastes. *Int.J.Curr.Microbiol.App.Sci.* 6(12): 1116-1131.
- Cauwenberghe, L. & Janssen, C.R. (2014). Microplastic in bivalves cultured for human consumption. *Environ. Pollut.* 193, 65–70.
- Chaudhary, A. K., Chaitanya, K. & Vijayakumar, R. P. (2021). Synergistic effect of UV and chemical treatment on biological degradation of Polystyrene by *Cephalosporium* strain NCIM 1251. *Archives of Microbiology*, 203, 2183-2191.
- Chaudhary, A.K. & Vijayakumar, R.P. (2020a). Effect of chemical treatment on biological degradation of high-density polyethylene (HDPE). *Environ. Dev. Sustain.* 22(2), 1093-1104.
- Chaudhary, A.K. & Vijayakumar, R.P., (2020b). Studies on biological degradation of polystyrene by pure fungal cultures. *Environ. Dev. Sustain.* 22(5), 4495-4508.
- Chauhan, D., Agrawal, G., Deshmukh, S., Sinha Roy, S. & Priyadarshini, R., (2018). Biofilm formation by *Exiguobacterium* sp. DR11 and DR14 alter polystyrene surface properties and initiate biodegradation. *Rsc Adv.* 8(66), 37590-37599.
- Chen, G., Feng, Q. & Wang, J. (2020a). Mini-review of microplastic in the atmosphere and their risks to humans. *Sci. Total Environ.* 703, 135504.

- Chen, G.L., Fu, Z.L., Yang, H.R. & Wang, J. (2020b). An overview of analytical methods for detecting microplastic in the atmosphere. *TrAC Trends Anal. Chem.* 130, 115981.
- Courtene-Jones, W., Quinn, B., Gary, S.F., Mogg, A.O.M. & Narayanaswamy, B.E., (2017). Microplastic pollution identified in deep-sea water and ingested by benthic invertebrates in the Rockall Trough. North Atlantic Ocean. *Environ. Pollut.* 231, 271–280.
- Cox, K.D., Covernton, G.A., Davies, H.L., Dower, J.F., Juanes, F. & Dudas, S.E. (2019). Human consumption of microplastic. *Environ. Sci. Technol.* 53, 7068–7074.
- Desforges, J.P.W., Galbraith, M. & Ross, P.S., (2015). Ingestion of Microplastic by Zooplankton in the Northeast Pacific Ocean. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 69, 320–330.
- Desforges, J.P.W., Galbraith, M., Dangerfield, N. & Ross, P.S., (2014). Widespread distribution of microplastic in subsurface seawater in the NE Pacific Ocean. *Mar. Pollut. Bull.* 79, 94–99.
- Dhaka, V., Singh, S., Ramamurthy, P. C., Samuel, J., Swamy Sunil Kumar Naik, T., Khasnabis, S., & Singh, J. (2023). Biological degradation of polyethylene terephthalate by rhizobacteria. *Environmental Science and Pollution Research*,30(55), 116488-116497.
- Dris, R., Gasperi, J., Mirande, C., Mandin, C., Guerrouache, M., Langlois, V. & Tassin, B., (2017). A first overview of textile fibers, including microplastic, in indoor and outdoor environments. *Environ. Pollut.* 221, 453–458.
- Dris, R., Gasperi, J., Saad, M., Mirande, C. & Tassin, B., (2016). Synthetic fibers in atmospheric fallout: a source of microplastic in the environment. *Mar. Pollut. Bull.* 104, 290–293.
- Faccia, P.A., Pardini, F.M., Agnello, A.C., Amalvy, J.I. & Del Panno, M.T., (2021). Degradability of poly(ether-urethanes) and poly(ether-urethane)/acrylic hybrids by bacterial consortia of soil. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 160, 105205.
- Fisner, M., Majer, A., Taniguchi, S., Bicego, M., Turra, A. & Gorman, D. (2017). Colour spectrum and resin-type determine the concentration and composition of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in plastic pellets. *Mar. Pollut. Bull.* 122, 323–330.
- Fuentes-Jaime, J., Vargas-Suárez, M., Cruz-Gómez, M.J. & Loza-Tavera, H., 2022. Concerted action of extracellular and cytoplasmic esterase and urethane-cleaving activities during Impranil biodegradation by *Alicyclophilus denitrificans* BQ1. *Biodegradation* 33(4), 389-406.
- Funazukuri, T. (2015). Hydrothermal Depolymerization of Polyesters and Polycarbonate in the Presence of Ammonia and Amines. *Recycling Materials Based on Environmentally Friendly Techniques.*
- Galvão, A., Aleixo, M., De Pablo, H., Lopes, C. & Raimundo, J. (2020). Microplastic in wastewater: microfiber emissions from common household laundry. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 26643-26649,
- Gamage, P.L., Ren, Y.X., Slape, C.M., Ambike, I.M., Wallace, A.C., Fiedler, A.K., González, J.E., Biewer, M.C., Zimmern, P. & Stefan, M.C., (2019). Oxidative degradation of polypropylene mesh in *E. coli* Environment. *Acs Appl. Bio. Mater.* 2(9), 4027-4036.

- Gao, R., Liu, R. & Sun, C. (2022). A marine fungus *Alternaria alternata* FB1 efficiently degrades polyethylene. *J. Hazard. Mater.* 431, 128617
- Gewert, B., Plassmann, M. M. & MacLeod, M. (2015). Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment. *Environmental science: processes & impacts*, 17(9), 1513-1521.
- Ghosh, S., Qureshi, A. & Purohit, H. J. (2019). Microbial degradation of plastics: Biofilms and degradation pathways. *Contaminants in agriculture and environment: health risks and remediation*, 1, 184-199.
- Giacomucci, L., Raddadi, N., Soccio, M., Lotti, N. & Fava, F., (2019). Polyvinyl chloride biodegradation by *Pseudomonas citronellolis* and *Bacillus flexus*. *New Biotechnol.* 52, 35-41.
- Gigault, J., El Hadri, H., Nguyen, B., Grassl, B., Roweczyk, L., Tufenkji, N., Feng, S. & Wiesner, M., (2021). Nanoplastics are neither microplastic nor engineered nanoparticles. *Nat. Nanotechnol.* 16, 501–507,
- Golwala, H., Zhang, X., Iskander, S.M. & Smith, A.L. (2021). Solid waste: an overlooked source of mikroplastik to the environment. *Sci. Total Environ.* 769, 144581.
- Guo, J.J., Huang, X.P., Xiang, L., Wang, Y.Z., Li, Y.W., Li, H., Cai, Q.Y., Mo, C.H. & Wong, M.H. (2020). Source, migration and toxicology of mikroplastik in soil. *Environ. Int.* 137, 105263.
- Habib, S., Iruthayam, A., Abd Shukor, M.Y., Alias, S.A., Smykla, J. & Yasid, N.A. (2020). Biodeterioration of untreated polypropylene microplastic particles by antarctic bacteria. *Polymers* 12(11), 2616.
- Hardy, C., Kociok-Köhn, G., & Buchard, A. (2022). UV degradation of poly (lactic acid) materials through copolymerisation with a sugar-derived cyclic xanthate. *Chemical Communications*,58(36), 5463-5466.
- Hartmann, N. B., Huffer, T., Thompson, R. C., Hassellöv, M., Verschoor, A., Daugaard, A. E. & Wagner, M. (2019) Are we speaking the same language? Recommendations for a definition and categorization framework for plastic debris. *Environmental Science & Technology*. Vol53, Issue 3, 1039-1047.
- He, D.F., Luo, Y.M., Lu, S.B., Liu, M.T., Song, Y. & Lei, L.L. (2018). Microplastic in soils: analytical methods, pollution characteristics and ecological risks. *TrAC Trends Anal. Chem.* 109, 163–172.
- Hernandez, E., Nowack, B. & Mitrano, D. M. (2017). Polyester textiles as a source of microplastic from households: a mechanistic study to understand microfiber release during washing. *Environmental science & technology*, 51(12), 7036-7046.
- Hou, C. C., & Zhu, J. Q. (2017). Nanoparticles and female reproductive system: how do nanoparticles affect oogenesis and embryonic development. *Oncotarget*, 8(65), 109799.
- Hougaard, K. S. (2021). Next generation reproductive and developmental toxicology: Crosstalk into the future. *Frontiers in Toxicology*, 3, 652571.
- Jelnes, J. E. (1988). Semen quality in workers producing reinforced plastic. *Reproductive Toxicology*, 2(3-4), 209-212.

- Jeon, J.-M., Park, S.-J., Choi, T.-R., Park, J.-H., Yang, Y.-H. & Yoon, J.-J. (2021). Biodegradation of polyethylene and polypropylene by *Lysinibacillus* species JJY0216 isolated from soil grove. *Polym. Degrad. Stabil.* 191, 109662.
- Jeong, C.B., Won, E.J., Kang, H.M., Lee, M.C., Hwang, D.S., Hwang, U.K., Zhou, B., Souissi, Lee, S.J. & Lee, J.S. (2016). Microplastic size-dependent toxicity, oxidative stress induction, and p-jnk and p-p38 activation in the monogonont rotifer (*Brachionus koreanus*). *Environ. Sci. Technol.* 50, 8849–8857,
- Jiang, S., Su, T., Zhao, J. & Wang, Z. (2021). Isolation, identification, and characterization of polystyrene-degrading bacteria from the gut of *Galleria mellonella* (Lepidoptera: Pyralidae) Larvae. *Front. Bioeng. Biotech.* 9.
- Kannan, K. & Vimalkumar, K. A. (2021). Review of human exposure to mikroplastik and insights into microplastic as obesogens. *Frontiers in Endocrinology*, 12, 724989.
- Kataoka, T., Nihei, Y., Kudou, K. & Hinata, H. (2019). Assessment of the sources and inflow processes of microplastic in the river environments of Japan. *Environ. Pollut.* 244, 958–965.
- Khan, S., Ali, S. A. & Ali, A. S. (2023). Biodegradation of low density polyethylene (LDPE) by mesophilic fungus '*Penicillium citrinum* isolated from soils of plastic waste dump yard, Bhopal, India. *Environmental Technology*, 44(15), 2300-2314.
- Khandare, S.D., Agrawal, D., Mehru, N. & Chaudhary, D.R., (2022). Marine bacterial based enzymatic degradation of low-density polyethylene (LDPE) plastic. *J. Environ. Chem. Eng.* 10(3), 107437. doi: 10.1016/j.jece.2022.107437.
- Khruengsai, S., Sripahco, T. & Pripdeevech, P. (2022). Biodegradation of polyester polyurethane by *Embarria clematidis*. *Front. Microbiol.* 13, 874842.
- Kim, H.R., Lee, H.M., Yu, H.C., Jeon, E., Lee, S., Li, J.J. & Kim, D.H. (2020). Biodegradation of Polystyrene by *Pseudomonas* sp. isolated from the gut of superworms (larvae of *Zophobas atratus*). *Environ. Sci. Technol.* 54(11), 6987-6996.
- Kim, S. H., Cho, J. Y., Hwang, J. H., Kim, H. J., Oh, S. J., Kim, H. J. & Yang, Y. H. (2023). Revealing the key gene involved in bioplastic degradation from superior bioplastic degrader *Bacillus* sp. JY35. *International Journal of Biological Macromolecules*, 244, 125298.
- Kord, B., Ayrilmis, N. & Ghalehno, M.D., (2021). Effect of fungal degradation on technological properties of carbon nanotubes reinforced polypropylene/rice straw composites. *Polym. Polym. Compos.* 29(5), 303-310.
- Kumar, A.G., Hinduja, M., Sujitha, K., Rajan, N.N. & Dharani, G., (2021). Biodegradation of polystyrene by deep-sea *Bacillus paralicheniformis* G1 and genome analysis. *Sci. Total. Environ.* 774, 145002
- Kumar, V., Maitra, S. S., Singh, R., & Burnwal, D. K. (2020). Acclimatization of a newly isolated bacteria in monomer tere-phthalic acid (TPA) may enable it to attack the polymer poly-ethylene terephthalate (PET). *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(4), 103977.

- Kundungal, H., Gangarapu, M., Sarangapani, S., Patchaiyappan, A. & Devipriya, S.P., (2019). Efficient biodegradation of polyethylene (HDPE) waste by the plastic-eating lesser waxworm (*Achroia grisella*). *Environ. Sci. Pollut. R.* 26(18), 18509-18519.
- Lei, L.L., Wu, S.Y., Lu, S.B., Liu, M.T., Song, Y., Fu, Z.H. & Shi, H.H. (2018). Microplastic particles cause intestinal damage and other adverse effects in zebrafish *Danio rerio* and nematode *Caenorhabditis elegans*. *Sci. Total Environ.* 619, 1–8.
- Li, J., Liu, H. & Paul Chen, J. (2018). Microplastics in freshwater systems: a review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection. *Water Res.* 137, 362–374.
- Liu, X., Zhang, Y., Sun, Q., Liu, Z., Zhao, Y., Fan, A. & Su, H. (2022). Rapid colonization and biodegradation of untreated commercial polyethylene wrap by a new strain of *Bacillus velezensis* C5. *J. Environ. Manage.* 301, 113848.
- Liu, Z., Yu, P., Cai, M., Wu, D., Zhang, M., Huang, Y. & Zhao, Y. (2019). Polystyrene nanoplastic exposure induces immobilization, reproduction, and stress defense in the freshwater cladoceran *Daphnia pulex*. *Chemosphere* 215, 74–81.
- Llorca, M., Schirinzi, G., Martinez, M., Barcelo, D. & Farre, M. (2018). Adsorption of perfluoroalkyl substances on microplastic under environmental conditions. *Environ. Pollut.* 235, 680–691.
- Lou, Y., Ekaterina, P., Yang, S.-S., Lu, B., Liu, B., Ren, N., Corvini, P.F.-X. & Xing, D., (2020). Biodegradation of polyethylene and polystyrene by greater wax moth larvae (*Galleria mellonella* L.) and the effect of co-diet supplementation on the core gut microbiome. *Environ. Sci. Technol.* 54(5), 2821-2831.
- Lwanga, E. H., Thapa, B., Yang, X., Gertsen, H., Salánki, T., Geissen, V., & Garbeva, P. (2018). Decay of low-density polyethylene by bacteria extracted from earthworm's guts: A potential for soil restoration. *Science of the Total Environment*, 624, 753-757.
- Magnin, A., Hoornaert, L., Pollet, E., Laurichesse, S., Phalip, V. & Avérous, L. (2019). Isolation and characterization of different promising fungi for biological waste management of polyurethanes. *Microb. Biotechnol.* 12(3), 544-555.
- Malafatti-Picca, L., de Barros Chaves, M.R., de Castro, A.M., Valoni, É., de Oliveira, V.M., Marsaioli, A.J., de Franceschi de Angelis, D. & Attili-Angelis, D., (2019). Hydrocarbon-associated substrates reveal promising fungi for poly (ethylene terephthalate) (PET) depolymerization. *Braz. J. Microbiol.* 20, 633–648.
- Maleki Rad, M., Moghimi, H. & Azin, E., (2022). Biodegradation of thermo-oxidative ve low-density polyethylene (LDPE) and polyvinyl chloride (PVC) microplastic by *Achromobacter denitrificans* Ebl13. *Mar. Pollut. Bull.* 181, 113830.
- Mills, J., & Klausmeier, R. E. 1(974). The biodeterioration of synthetic polymers and plasticizers. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 4(1-4), 341-351.
- Montazer, Z., Habibi-Najafi, M.B., Mohebbi, M. & Oromiehei, A. (2018). Microbial degradation of UV-ve low-density polyethylene films by novel polyethylene-degrading bacteria isolated from plastic-dump soil. *J. Polym. Environ.* 26, 3613–3625.

- Moyses, D.N., Teixeira, D.A., Waldow, V.A., Freire, D.M.G. & Castro, A.M., (2021). Fungal and enzymatic bio-depolymerization of waste post-consumer poly(ethylene terephthalate) (PET) bottles using *Penicillium* species. *3 Biotech* 11(10), 435.
- Muhonja, C.N., Makonde, H., Magoma, G. & Imbuga, M., (2018). Biodegradability of polyethylene by bacteria and fungi from Dandora dumpsite Nairobi-Kenya. *Plos One* 13(7), e0198446.
- Nag, M., Lahiri, D., Dutta, B., Jadav, G. & Ray, R.R., (2021). Biodegradation of used & polyethylene bags by a new marine strain of *Alcaligenes faecalis* LNDR-1. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28, 41365–41379.
- Nanthini Devi, K., Raju, P., Santhanam, P., Dinesh Kumar, S., Krishnaveni, N., Roopavathy, J. & Perumal, P., (2021). Biodegradation of low-density polyethylene and polypropylene by microbes isolated from Vaigai River, Madurai, India. *Arch. Microbiol.* 203(10), 6253-6265.
- Novotný, C., Fojtík, J., Mucha, M. & Malachová, K., (2022). Biodeterioration of compost-ve polyvinyl chloride films by microorganisms isolated from weathered plastics. *Front. Bioeng. Biotech.* 10, 832413.
- Osman, M., Satti, S.M., Luqman, A., Hasan, F., Shah, Z. & Shah, A.A., (2018). Degradation of polyester polyurethane by *Aspergillus* sp. strain S45 isolated from soil. *J. Polym. Environ.* 26(1), 301-310.
- Peng, B.-Y., Chen, Z., Chen, J., Yu, H., Zhou, X., Criddle, C.S., Wu, W.-M. & Zhang, Y., (2020). Biodegradation of polyvinyl chloride (PVC) in *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) larvae. *Environ. Int.* 145, 106106.
- Przemieniecki, S.W., Kosewska, A., Ciesielski, S. & Kosewska, O., (2020). Changes in the gut microbiome and enzymatic profile of *Tenebrio molitor* larvae biodegrading cellulose, polyethylene and polystyrene waste. *Environ. Pollut.* 256, 113265.
- Rahimi, A. & García, J. M. (2017). Chemical recycling of waste plastics for new materials production. *Nature Reviews Chemistry*, 1(6), 0046.
- Rahman, A., Sarkar, A., Yadav, O.P., Achari, G. & Slobodnik, J. (2021). Potential human health risks due to environmental exposure to nano- and mikroplastik and knowledge gaps: a scoping review. *Sci. Total Environ.* 757, 143872.
- Rehse, S., Kloas, W. & Zarfl, C. (2018). Microplastic reduce short-term effects of environmental contaminants. part i: effects of bisphenol a on freshwater zooplankton are lower in presence of polyamide particles. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 15, 280.
- Rillig, M.C. & Lehmann, A. (2020). Microplastic in terrestrial ecosystems. *Science* 368, 1430–1431.
- Romera-Castillo, C., Pinto, M., Langer, T.M., Alvarez-Salgado, X.A. & Herndl, G.J. (2018). Dissolved organic carbon leaching from plastics stimulates microbial activity in the ocean. *Nat. Commun.* 9, 1430.
- Roy, R., Mukherjee, G., Das Gupta, A., Tribedi, P. & Sil, A. K. (2021). Isolation of a soil bacterium for remediation of polyurethane and low-density polyethylene: a promising tool towards sustainable cleanup of the environment. *3 Biotech*, 11, 1-14.

- Ru, J., Huo, Y., & Yang, Y. (2020). Microbial degradation and valorization of plastic wastes. *Frontiers in Microbiology*, 11, 507487.
- Ruslan, R., Iqbal, M., Pekey, A.Y., Dewi, A.P. & Djamaan, A., (2018). Isolation and characterization of polystyrene-degrading bacteria *Bacillus* sp. ITP 10.1.1 from soil sample of Jayawijaya mountains, Papua, Indonesia. *Int. Res. J. Pharm.* 9(10), 85-88.
- Sa, L.C., Oliveira, M., Ribeiro, F., Rocha, T.L. & Futter, M.N. (2018). Studies of the effects of microplastic on aquatic organisms: what do we know and where should we focus our efforts in the future?. *Sci. Total Environ.* 645, 1029–1039.
- Samrot, A. V., & Noel Richard Prakash, L. X. (2023). Nanoparticles induced oxidative damage in reproductive system and role of antioxidants on the induced toxicity. *Life*, 13(3), 767.
- Sangale, M.K., Shahnawar, M. & Ade, A.B., (2019). Potential of fungi isolated from the dumping sites mangrove rhizosphere soil to degrade polythene. *Sci. Rep.* 9, 5390.
- Sangeetha Devi Ramya, R., Kannan, K., Antony, A. R. & Kannan, V. R. (2019). Investigation of biodegradation potentials of high density polyethylene degrading marine bacteria isolated from the coastal regions of Tamil Nadu, India. *Marine pollution bulletin*, 138, 549-560.
- Santillo, D., Miller, K. & Johnston, P. (2017). Microplastic as contaminants in commercially important seafood species. *Integr. Environ. Assess Manag.* 13, 516–521.
- Santos, T., Varela, J., Lynch, I., Salvati, A. & Dawson, K. A. (2011). Effects of transport inhibitors on the cellular uptake of carboxylated polystyrene nanoparticles in different cell lines. *PloS one*, 6(9), e24438.
- Sarkhel, R., Sengupta, S., Das, P. & Bhowal, A., (2020). Comparative biodegradation study of polymer from plastic bottle waste using novel isolated bacteria and fungi from marine source. *J. Polym. Res.* 27(1), 16.
- Savoca, S., Capillo, G., Mancuso, M., Bottari, T., Crupi, R., Branca, C., Romano, V., Faggio, C., D'Angelo, G. & Spano, N. (2019). Mikroplastik occurrence in the Tyrrhenian waters and in the gastrointestinal tract of two congener species of seabreams. *Environ. Toxicol. Pharmacol.* 67, 35–41.
- Shahsavaripour, M., Abbasi, S., Mirzaee, M. & Amiri, H. (2023). Human occupational exposure to mikroplastik: a cross-sectional study in a plastic products manufacturing plant. *Sci. Total Environ.* 882, 163576.
- Silva, A.L., Prata, J.C., Walker, T.R., Duarte, A.C., Ouyang, W., Barcelo, D. & Rocha-Santos, T. (2021). Increased plastic pollution due to COVID-19 pandemic: challenges and recommendations. *Chem. Eng. J.* 405, 126683.
- Skariyachan, S., Patil, A.A., Shankar, A., Manjunath, M., Bachappanavar, N. & Kiran, S., (2018). Enhanced polymer degradation of polyethylene and polypropylene by novel thermophilic consortia of *Brevibacillus* sps. and *Aneurinibacillus* sp. screened from waste management landfills and sewage treatment plants. *Polym. Degrad. Stabil.* 149, 52-68.
- Song, Y. K., Hong, S. H., Jang, M., Han, G. M., Jung, S. W. & Shim, W. J. (2017). Combined effects of UV exposure duration and mechanical abrasion on microplastic fragmentation by polymer type. *Environmental science & technology*, 51(8), 4368-4376.

- Song, Y., Qiu, R., Hu, J., Li, X., Zhang, X., Chen, Y., Wu, W.-M. & He, D., (2020). Biodegradation and disintegration of expanded polystyrene by land snails *Achatina fulica*. *Sci. Total Environ.* 746, 141289.
- Stubbins, A., Zhu, L., Zhao, S., Li, D., Bittar, T. B., Spencer, R. G., Law & K. L. L. (2020). Photochemical dissolution of buoyant mikroplastik to dissolved organic carbon: Rates and microbial impacts. *In Ocean Sciences Meeting*.
- Sun, J., Qu, H., Ali, W., Chen, Y., Wang, T., Ma, Y. & Zou, H. (2023). Co-exposure to cadmium and mikroplastik promotes liver fibrosis through the hemichannels-ATP-P2X7 pathway. *Chemosphere*, 344, 140372.
- Sun, J., Zheng, H., Xiang, H., Fan, J. & Jiang, H. (2022). The surface degradation and release of mikroplastik from plastic films studied by UV radiation and mechanical abrasion. *Sci. Total Environ.* 838, 156369.
- Sun, W., Zhang, Y., Zhang, H., Wu, H., Liu, Q., Yang, F. & Zhang, W. (2024). Exploitation of *Enterobacter hormaechei* for biodegradation of multiple plastics. *Science of The Total Environment*, 907, 167708.
- Tarafdar, A., Lee, J. U., Jeong, J. E., Lee, H., Jung, Y., Oh, H. B., & Kwon, J. H. (2021). Biofilm development of *Bacillus siamensis* ATKU1 on pristine short chain low-density polyethylene: a case study on microbe-mikroplastiks interaction. *J. Hazard. Mater.* 409, 124516.
- Thakur, B., Singh, J., Singh, J., Angmo, D. & Vig, A. P. (2023). Biodegradation of different types of mikroplastiks: Molecular mechanism and degradation efficiency. *Sci. Total Environ.* 877, 162912.
- Thompson, R. C., Olsen, Y., Mitchell, R. P., Davis, A., Rowland, S. J., John, A. W. & Russell, A. E. (2004). Lost at sea: where is all the plastic. *Science*, 304(5672), 838-838.
- Terepocki, A.K., Brush, A.T., Kleine, L.U., Shugart, G.W. & Hodum, P. (2017). Size and dynamics of mikroplastik in gastrointestinal tracts of Northern Fulmars (*Fulmarus glacialis*) and Sooty Shearwaters (*Ardenna grisea*). *Mar. Pollut. Bull.* 116, 143–150.
- Wang, C., Wang, L., Ok, Y. S., Tsang, D. C. & Hou, D. (2022). Soil plastisphere: exploration methods, influencing factors, and ecological insights. *J. Hazard. Mater.* 430, 128503.
- Wang, J., Liu, X., Li, Y., Powell, T., Wang, X., Wang, G. & Zhang, P. (2019). Mikroplastik as contaminants in the soil environment: a mini-review. *Sci. Total Environ.* 691, 848–857.
- Wang, P., Lombi, E., Zhao, F.J. & Kopittke, P.M. (2016). Nanotechnology: a new opportunity in plant sciences. *Trends Plant Sci.* 21, 699–712.
- Wang, P., Zhao, J., Ruan, Y., Cai, X., Li, J., Zhang, L. & Huang, H., (2022a). Degradation of polypropylene by the *Pseudomonas aeruginosa* strains LICME WZH-4 and WGH-6. *J. Polym. Environ.* 30(9), 3949-3958.
- Wang, S., Shi, W., Huang, Z., Zhou, N., Xie, Y., Tang, Y., Hu, F., Liu, G. & Zheng, H., 2022b. Complete digestion/biodegradation of polystyrene mikroplastiks by greater wax moth (*Galleria mellonella*) larvae: Direct in vivo evidence, gut microbiota independence, and potential metabolic pathways. *J. Hazard. Mater.* 423, 127213.

- Wang, Y.L., Lee, Y.H., Chiu, I.J., Lin, Y.F. & Chiu, H.W. (2020). Potent impact of plastic nanomaterials and micromaterials on the food chain and human health. *Int. J. Mol. Sci.* 21, 1727.
- Webb, H. K., Arnott, J., Crawford, R. J. & Ivanova, E. P. (2012). Plastic degradation and its environmental implications with special reference to poly (ethylene terephthalate). *Polymers*, 5(1), 1-18.
- Wick, P. & Malek, A., Manser, P., Meili, D., Maeder-Althaus, X., Diener, L. & von Mandach, U. (2010). Barrier capacity of human placenta for nanosized materials. *Environmental health perspectives*, 118(3), 432-436.
- Working, P. K. (1988). Male reproductive toxicology: comparison of the human to animal models. *Environmental health perspectives*, 77, 37-44.
- Wright, S.L., Rowe, D., Thompson, R.C. & Galloway, T.S. (2013). Microplastic ingestion decreases energy reserves in marine worms. *Curr. Biol.* 23, R1031–R1033.
- Yang, S. S., Wu, W. M., Pang, J. W., He, L., Ding, M. Q., Li, M. X. & Ding, J. (2023). Bibliometric analysis of publications on biodegradation of plastics: Explosively emerging research over 70 years. *Journal of Cleaner Production*, 139423.
- Yang, S.-S., Ding, M.-Q., He, L., Zhang, C.-H., Li, Q.-X., Xing, D.-F., Cao, G.-L., Zhao, L., Ding, J., Ren, N.-Q. & Wu, W.-M., 2021b. Biodegradation of polypropylene by yellow mealworms (*Tenebrio molitor*) and superworms (*Zophobas atratus*) via gut microbe-dependent depolymerization. *Sci. Total. Environ.* 756, 144087.
- Yin, K., Wang, Y., Zhao, H., Wang, D., Guo, M., Mu, M. & Xing, M. A comparative review of microplastics and nanoplastics: Toxicity hazards on digestive, reproductive and nervous system. *Sci. Total. Environ.*, 774, 145758. 2021.
- Yousif, E. & Haddad, R. (2013). Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: review. *SpringerPlus* 2, 398.
- Yu, F., Yang, C., Zhu, Z., Bai, X., & Ma, J. (2019). Adsorption behavior of organic pollutants and metals on micro/nanoplastics in the aquatic environment. *Sci. Total. Environ.*, 694, 133643.
- Yu, X.B., Ladewig, S., Bao, S.W., Toline, C.A., Whitmire, S. & Chow, A.T. (2018). Occurrence and distribution of microplastics at selected coastal sites along the southeastern United States. *Sci. Total Environ.* 613, 298–305.
- Zaini, N., Kasmuri, N., Mojiri, A., Kindaichi, T. & Nayono, S. E. (2024). Plastic pollution and degradation pathways: A review on the treatment Technologies. *Heliyon*.
- Zhang, J., Gao, D., Li, Q., Zhao, Y., Li, L., Lin, H., Bi, Q. & Zhao, Y. (2020). Biodegradation of polyethylene microplastic particles by the fungus *Aspergillus flavus* from the guts of wax moth *Galleria mellonella*. *J. Hazard. Mater.* 704, 135931.
- Zhang, K., Hamidian, A. H., Tubić, A., Zhang, Y., Fang, J. K., Wu, C. & Lam, P. K. (2021). Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: A review. *Environmental Pollution*, 274, 116554.