

## Plastik Biyodegradasyonu: Genel Sorunlar ve Biyoteknolojik Çözümler

Dilara Özden<sup>1</sup> 

### ÖZET

Plastik kirliliği tüm dünyayı etkilediği gibi Türkiye’de de giderek artmakta olan çevresel bir sorundur. Plastik atıklarının uzaklaştırılması için kullanılan yöntemler yetersiz olup farklı çevresel sorunları beraberinde getirmektedir. Bu nedenle çevre dostu ve etkili bir yöntem geliştirilmelidir. Mikroorganizmaların plastik yüzeylerinde üreyebilmelerinin ve enzim aktiviteleriyle plastik biyodegradasyonu gerçekleştirebilmelerinin görülmesiyle, plastik kirliliği için mikroorganizmaların kullanılması potansiyel bir çözüm olarak görülmüştür. Birçok mikroorganizmanın plastik biyodegradasyonu gerçekleştirebildiği ve birçok enzimin biyodegradasyon süreciyle ilişkili olduğu çalışmalarla gösterilmiş olsa da plastik kirliliğine karşı biyodegradasyon etkili bir yöntem olarak kullanılmamaktadır. Biyoteknolojik yaklaşımlar ile biyodegradasyon iyileştirilerek sürecin hızlandırılması ve plastik kirliliğine karşı kullanımının yaygınlaşması amaçlanmaktadır. Bu derlemede mikroorganizmaların genel plastik biyodegradasyon mekanizmalarının yanı sıra, plastik biyodegradasyonunda görülen sorunlar ve sorunların iyileştirilmesi için biyoteknolojik yaklaşımların kullanımı ele alınmıştır. Biyodegradasyon için mikroorganizmaların bir arada kullanılması, biosümfaktanların etkisi, genetik mühendisliği yaklaşımları, metagenomiks ve biyoinformatik yaklaşımları üzerinde durulmuştur. Önemli gelişmeler ve çalışmalara yer verilmiştir. Türkiye’de gerçekleştirilen çalışmalar ve plastik kirliliğine karşı yapılan araştırmalar da değerlendirilmiştir.

### MAKALE GEÇMİŞİ

**Geliş**  
31 Aralık 2020  
**Kabul**  
08 Mart 2021

### ANAHTAR KELİMELEK

Mikrobiyal degradasyon,  
biyoremediasyon,  
Çevre biyoteknolojisi,  
biyobozunma,  
plastik kirliliği

## Plastic Biodegradation: General Problems and Biotechnological Solutions

### ABSTRACT

Plastic pollution is a significant environmental problem. The damage caused by plastic pollution to the environment is increasing all over the world, as in Turkey. Plastic waste management methods are insufficient, and they cause different environmental pollution problems. Therefore, there is a need for an effective and environmentally friendly method. With the discovery of the microorganisms that can grow on plastics and degrading plastics enzymatically, plastic biodegradation became a potential solution for plastic pollution. Although there are lots of microorganisms and enzymes which are responsible for plastic biodegradation, the biodegradation process is not efficient to use against plastic pollution problem. Biotechnological approaches are used to improve efficiency of plastic biodegradation process and increase the usage. The general mechanism of plastic biodegradation, disadvantages and biotechnological approaches based on those problems were discussed in this review. Plastic biodegradation by microbial communities, effects of biosurfactants, genetic engineering approaches, metagenomics and bioinformatics approaches are emphasized. In addition, researches performed against plastic pollution in Turkey were evaluated.

### ARTICLE HISTORY

**Received**  
31 December 2020  
**Accepted**  
08 March 2021

### KEY WORDS

Microbial degradation,  
bioremediation,  
environmental  
biotechnology,  
plastic pollution

<sup>1</sup>Department of Molecular Biology and Genetics, Başkent University, 06790, Etimesgut, Ankara, Turkey

\*Corresponding Autor: Dilara Özden, e-mail: [ozdendilara1@gmail.com](mailto:ozdendilara1@gmail.com)

## Giriş

Plastik kirliliği bütün dünyayı ilgilendiren önemli çevresel sorunlardan biridir. Türkiye’de 2010 yılında günlük üretilen plastik atığı kişi başına 0,21kg; üretilen yıllık plastik atık ise 5,6 milyon tondur. Akdeniz’de 2013 yılında deniz yüzeyinde bulunan plastik atığı 23,150 tondur [1]. Plastik kirliliğinin etkileri Türkiye’de artan tüketim ve üretimle beraber giderek artmakta ve görünür hale gelmektedir. 2018 yılında dünya genelinde açığa çıkan plastik atığı 359 milyon tondur [1,2]. 2019 yılında üretilen plastik, Avrupa’da 57,9 milyon ton, dünya genelinde ise 368 milyon tondur [3]. COVID-19 salgını dünyada maske, eldiven gibi tek kullanımlık plastiklerin kullanımının artmasına ve böylelikle plastik atık sayısının 2020 yılında 2019’a göre %30 artmasına sebep olmuştur [4]. Plastik kirliliği dünya genelinde tüketimin artması, plastik ürünlerinin kullanımının ve üretiminin artması, nüfusun artması ile beraber giderek daha da ciddi bir sorun haline gelmektedir.

Plastik atıklarının uzaklaştırılması için en çok kullanılan yöntemler sırasıyla plastik atıklarının arazilerde depolanması ve yakılmasıdır. Plastik atıklarının geri dönüştürülerek tekrar kullanılması maliyetli bir yöntem olduğu için tercih edilmemektedir [5]. Arazilerde depolama yöntemi, atıkların biriktirilmesine dayanan bir yöntemdir. Atıkların doğadan kaybolmasını sağlamamakla beraber benzen, dioksin gibi çevreye zararlı kimyasalların açığa çıkmasına neden olur ve uzun vadede toprak verimliliği olumsuz yönde etkilenir. Bir diğer uzaklaştırma yöntemi olan plastik atıklarının yakılması ise karbondioksit gibi zararlı gazların açığa çıkmasına neden olmaktadır [6]. Kullanılan yöntemler çevreye zararlı olması, plastik atıklarının tam olarak uzaklaştırılmaması ve uygun maliyetli olmaması sebebiyle yeterli değildir. Bu nedenle uygun maliyetli, çevre dostu ve etkili bir yöntem geliştirilmesi gerekmektedir.

Plastik atıklarının biriktirildiği alanlarda, okyanuslar ve denizlerdeki mikroorganizmaların incelenmesi birçok mikroorganizmanın plastik biyodegradasyonuna (biyo-bozunma) sebep olduğunu göstermiştir. Plastik biyodegradasyonu yapabildiği görülen iki balmumu kurdu *Galeria mellonella* ve *Plodia interpunctella*’nın bağırsağında yaşayan mikroorganizmaların incelenmesi çalışmalarıyla plastik biyodegradasyonu gerçekleştirebilen farklı mikroorganizmalar da bulunmuştur [7,8]. Böylelikle plastik atıklarının uzaklaştırılması için

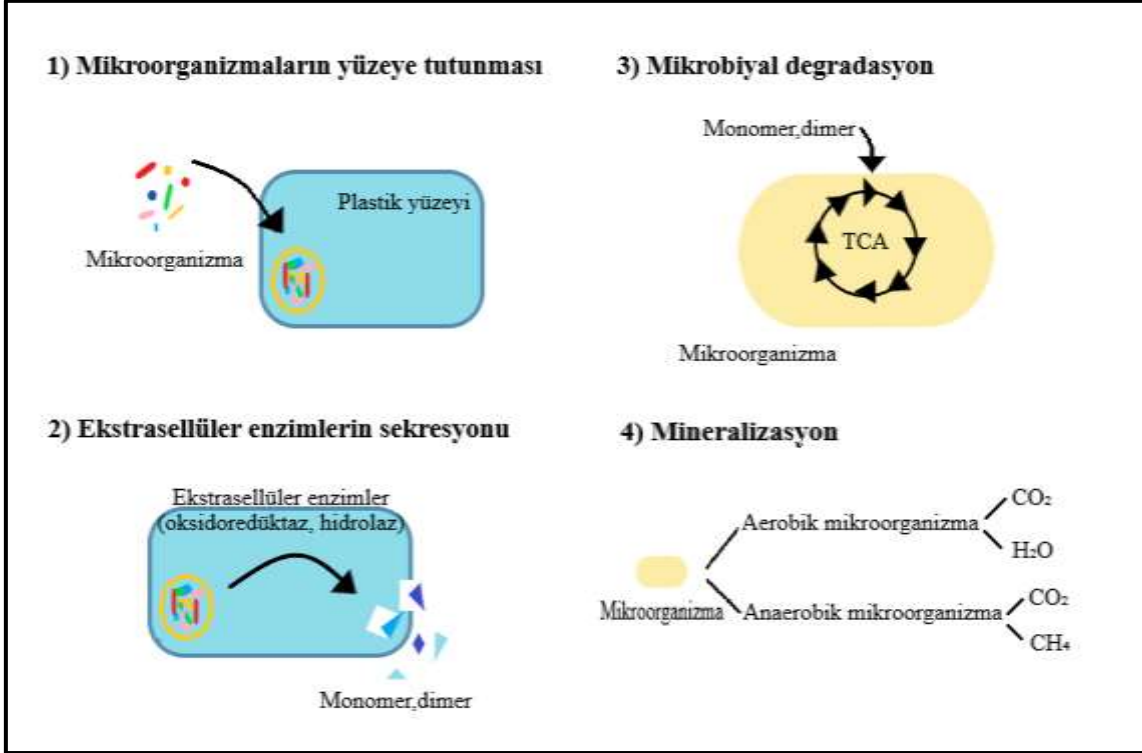
mikroorganizmaların kullanılması, yani biyodegradasyon potansiyel bir çözüm olarak ortaya çıkmış ve zamanla popüler bir konu haline gelmiştir.

Bu derlemede biyodegradasyon süreciyle beraber, mikroorganizmaların plastik atıklarının uzaklaştırılmasında kullanımının arttırılması için geliştirilen biyoteknolojik yaklaşımlara yer verilmiştir. Plastik biyodegradasyonunun biyoteknolojik çözümler ile gerçekleştirilmesiyle elde edilen yararlı sonuçlara ve Türkiye’de bu yaklaşımlar doğrultusunda gerçekleştirilen araştırmalara değinilmiştir.

## **Biyoremediasyon ve Biyodegradasyon**

Biyoremediasyon mikroorganizmaların metabolik aktiviteleri sonucu kimyasal atıkların ve çevreye zararlı materyallerin etkisinin azaltılmasını ya da çevreden temizlenmesini sağlamasıdır [9]. Kimyasal atıklar, ağır metaller, pestisitler, zenobiyotikler, hidrokarbonlar, plastikler gibi sağlık ve ekoloji açısından zararlı birçok kirletici için biyoremediasyon çalışmaları gerçekleştirilmektedir [10,11]. Mikroorganizmaların ve enzimlerin çevre kirliliğinin giderilmesi için optimize edilmesi ve biyodegradasyon mekanizmalarının etkinleştirilmesi ile etkili biyoremediasyon gerçekleştirilebilir [12].

Biyodegradasyon, mikroorganizmaların doğal olarak polimerleri ve organik maddeleri daha küçük maddelere parçalayabilmesidir [13]. Plastik biyodegradasyonu, mikroorganizmaların plastiğin yüzeyine tutunarak plastiği çoğalmak için karbon kaynağı olarak kullanabilmesi olarak tanımlanabilir [5].



Şekil 1 Biyodegradasyonun 4 temel aşaması

Plastik biyodegradasyonu mikroorganizmaların enerji mekanizmalarına göre aerobik ve anaerobik olmak üzere ikiye ayrılır. Mikroorganizmalar arasında süreçte farklılıklar bulunsa da plastik biyodegradasyonu genel olarak Şekil 1’de gösterildiği gibi 4 temel adımdan oluşmaktadır. Mikroorganizmaların, bakterilerin ve mantarların plastik yüzeyine tutunarak koloni oluşturması ilk adımdır. Plastikler yüksek moleküler ağırlıkları nedeniyle hücre içine alınamazlar. Mikroorganizmalar ekstrasellüler enzimlerin, hidrolaz oksidoredüktaz gibi depolimerazların sekresyonu ile plastiği daha küçük parçalara ayırarak monomer ve dimer plastik parçalarını oluştururlar. Monomer ve dimer parçalar kolaylıkla çözünerek hücre içine girebilir ve hücre içi enzimlerle enerji kaynağı olarak kullanılabilir. Aerobik mikroorganizmalarda son ürün olarak karbondioksit ve su ürünleri oluşurken, anaerobik mikroorganizmalarda karbondioksit ve metan gibi ürünler oluşur. Bu ürünlerin oluşmasına genel olarak mineralizasyon adı verilir [14,15].

Plastik biyodegradasyon veri tabanı olan PBMD’in (Plastics Microbial Biodegradation Database) verilerine göre bu zamana kadar 950 mikroorganizmanın plastik biyodegradasyonu gerçekleştirebildiği veya plastik biyodegradasyonu süreci ile ilgili olduğu belirtilmiştir [16].

**Tablo 1** Plastik biyodegradasyonu gerçekleştirebilen bazı bakteri ve mantarlar ile plastiklerde gözlenen ağırlık kayıpları

Mikroorganizma	Plastik	Süre (gün)	Ağırlık Kaybı (%)	Referans
Bakteri				
<i>Bacillus subtilis</i>	PE	60	23,15	[17]
<i>Streptomyces sp.</i>	PE	6 ay	46,16	[18]
<i>Pseudomonas citronellolis</i>	PVC	45	10,00	[19]
<i>Bacillus cereus</i>	PP	40	12,00	[20]
<i>Sporosarcina globispora</i>	PP	40	11,00	[20]
<i>Bacillus wiedmannii</i>	PE	90	5,39	[21]
Mantar				
<i>Aspergillus flavus</i>	PE	100	5,50	[22]
<i>Coriolus versicolor</i>	N.E.B.P*	93	20,00	[23]
<i>Spicaria spp.</i>	PUR	21	22,90	[24]
<i>Aspergillus fumigatus</i>	PUR	21	39,50	[24]
<i>Alternaria solani</i>	PUR	21	63,60	[24]
<i>Cephalosporium sp.</i>	PS	56	2,17	[25]

\*: Nişasta esaslı biyoplastik

Polietilen (PE), polivinil klorür (PVC), polipropilen (PP), polietilen tereftalat (PET), poliüretan (PUR), polistiren (PS) gibi birçok plastiğin biyodegradasyona uğrayabildiği çalışmalarla gösterilmiştir. Plastik biyodegradasyonundan sorumlu olan bazı mikroorganizmalar ve etkili oldukları plastikler, ağırlık kayıpları ile birlikte **Tablo 1**'de özetlenmiştir. Plastik biyodegradasyonunda kütinaz, proteaz, esteraz, lipaz, lakkaz, PETase enzimlerinin önemli olduğu ve 79 genin plastik biyodegradasyon süreciyle ilgili olduğu belirtilmiştir [16].

Birçok mikroorganizmanın plastik biyodegradasyonu gerçekleştirebildiği, plastik biyodegradasyonunda hangi enzimlerin önemli olduğu ve hangi enzimlerin degradasyondan sorumlu olduğu yapılan araştırmalarda görülse de mikrobiyal degradasyon ticari olarak plastik atıklarının uzaklaştırılması için kullanılamamaktadır. Biyodegradasyon sürecinin yavaş olması ticari olarak kullanımını engellemektedir. Plastik yüzeylerinde fonksiyonel grupların eksik olması ve plastiğin yüzey hacim oranı mikroorganizmaların yüzeye tutunmasını yavaşlatan ya da engelleyen faktörlerdir. Polipropilen, polistiren gibi plastiklerin hidrofobik doğası ve plastiklerde kristalize

yapının fazla olması da mikroorganizmaların yüzeye tutunmasını engelleyerek biyodegradasyonu etkilemektedir. Mikroorganizmalar açısından ise biyodegradasyondan sorumlu enzimlerin az miktarda bulunması ve aktivitesinin düşük olması sürecin yavaşlamasına sebep olmaktadır [14,26].

## **Biyodegradasyonun Arttırılması ve Biyoteknolojik Yaklaşımlar**

Mikroorganizmalar tarafından gerçekleştirilen plastik biyodegradasyonunun veriminin arttırılması ve ticari kullanımının yaygınlaştırılması için biyoteknolojik yaklaşımlar kullanılmaktadır. Tek bir mikroorganizmanın kullanılmasının yerine mikrobiyal komüniteler oluşturulması, biosümfaktanların eklenmesi ya da mikroorganizmalar tarafından ürettirilmesi, genetik mühendisliği yaklaşımlarıyla önemli enzimlerin düzenlenmesi, metagenomik ve biyoinformatik analizlerin uygulanması sürecin iyileştirilmesi için uygulanmakta olan yaklaşımlardır [14,27,28].

### **Mikrobiyal komüniteler**

Doğal sistemlerin örnek alınmasıyla farklı türler bir arada kullanılarak mikrobiyal komüniteler geliştirilmektedir. Plastik yüzeylerinde mikroorganizmaların biyofilm oluşturması ile tek tür mikroorganizmanın aktivitesine göre metabolik aktivitenin arttığı bilinmektedir [29]. Mikrobiyal komünitelerde biyodegradasyon, mikroorganizmaların metabolik aktivitelerinin birleşmesi ile gerçekleşir. Bu sebeple mikroorganizmaların plastik biyodegradasyonu için bir arada kullanımı ve kültürü ile biyodegradasyon süreci hızlandırılmaktadır [28].

Farklı mikroorganizmaların bir arada kullanılması ile türler arasında mikroorganizmalardan birinin faaliyetinin, diğer mikroorganizmanın faaliyetini etkileyerek plastik biyodegradasyonunu sağlamasından dolayı biyodegradasyon artar. *Noyosphingobium sp.* sadece metiyonin eklendiğinde PVA (Polivinil alkol) biyodegradasyonu gerçekleştirebilen bir mikroorganizmadır. *Xanthobacter flavus* ile beraber kültürlendiğinde ise metiyonine gerek kalmadan PVA biyodegradasyonun etkili şekilde gerçekleşebildiği görülmüştür. Biyodegradasyon için gerekli olan metiyoninin *Xanthobacter flavus*'un metabolik aktivitesinden elde edildiği düşünülmektedir [30].

Seneviratne ve arkadaşlarının (2006) gerçekleştirdikleri çalışmada DPE (Bozunabilir polietilen) üzerinde koloni oluşturabilen mikroorganizmaların incelenmesi ile etkili büyüme gerçekleştirebilen iki mikroorganizma belirlenmiştir. *Penicillium frequentans* ve *Bacillus mycoides* DPE üzerinde 21 gün ayrı ve birlikte kültüre edilmiştir. Sadece

*Penicillium frequentans* ile kültüre edilen DPE'ye göre mikroorganizmaların birlikte kullanımı ve biyofilm oluşumu sayesinde ağırlık kaybının 14 kat arttığı görülmüştür [31].

Çetin ve Çıtak (2013), izole edilen mikroorganizmaların tekli olarak kültüründe PVA (Polivinil alkol) biyodegradasyonu gözlenmezken, mikroorganizmaların çoklu kültüründe biyodegradasyon gözlendiğini belirtmiştir. Böylelikle simbiyotik olarak PVA biyodegradasyonu sağlanabildiği ve 16-25 günde başlangıç değerine göre %90 PVA miktarında azalmaya sebep olduğu belirtilmiştir [32].

Dwicania ve arkadaşlarının (2019) gerçekleştirdiği çalışmada, *Pseudomonas aeruginosa* ve *Brevilbacterium sp.* bakterilerinin birlikte kültürü ile 30 günde PE (Polietilen)'de %7 ye kadar ağırlık kaybı sağlanmıştır [33]. Bir diğer çalışmada *Tenebrio molitor* larvasından izole edilen *Acinetobacter sp.* ve *Bacillus sp.* PE biyodegradasyonu için birlikte kültüre edilmiştir [34]. Çalışmada PE degradasyonu için iki farklı bakteri türünün bir arada kullanımı ile 30 günde plastik miktarında %18 azalma sağlanabildiği ve plastik biyodegradasyonunun farklı mikroorganizmaların bir arada kullanımı ile arttırılabileceği gösterilmiştir [34].

### **Biyosürefektanların eklenmesi ve ürettirilmesi**

Biyosürefektanlar; mikroorganizmalar tarafından üretilen, yüzey aktif ve amfifilik bileşenlerdir. Mikroorganizmaların yüzeylerinde ve hidrofobik maddelerin yüzeylerinde değişikliklere sebep olurlar. Yüzey gerilimini azaltarak etkileşimi kolaylaştırır ve çözünürlüğü arttırarak hidrofobik organik bileşiklerin biyo-erişilebilirliğini arttırırlar. Biyodegradasyon sürecini iki şekilde etkileyerek plastik biyodegradasyonunun artmasını sağlayabilirler. İlk olarak biyosürefektanlar mikroorganizmaların substratlara erişimini arttırabilir ya da bakteri hücrelerinin plastik yüzeyleriyle daha kolay etkileşmesini sağlayabilirler [35,36].

Mukherjee ve arkadaşlarının (2016) gerçekleştirdikleri çalışmada *Bacillus licheniformis* tarafından üretilen biyosürefektanın yüzey gerilimini azaltarak *Lysinibacillus fusiformis*'in PE yüzeyine tutunmasını arttırdığı ve PE oksidasyonunu arttırması ile PE biyodegradasyonunu arttırdığı belirtilmiştir [37]. Vimala ve Mathew'ın (2016) elde ettiği sonuçlara göre *Bacillus subtilis* tarafından sürefektan üretimi (Sürefektin) gerçekleştirilmesi ile 30 günde PE'de %9,26'ya kadar ağırlık kaybı sağlandığı belirtilmiştir [38]. Biyosürefektanların amfifilik yapısıyla mikroorganizmaların

hidrofobik yüzeylere tutunmasını sağladığı veya arttırdığını böylelikle biyodegradasyon hızının artırılabilceği görülmüştür. Furukawa ve arkadaşlarının (2019) gerçekleştirdikleri çalışmada ise *TfCut2* (*Thermobifida fusca*, kütinaz) enzimiyle katyonik sürfektan dodesil trimetil amonyumun ( $C_{12}-N(CH_3)_3^+$ ) birlikte eklenmesiyle PET ağırlık kaybının 2 kat arttığı ve 24 saatte %15 ağırlık kaybına ulaşıldığı görülmüştür [39]. Eklenen katyonik sürfektan reaksiyon hızını 13 kat arttırmıştır [39]. Gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen sonuçlarda da görüldüğü gibi biyosürfektanların mikroorganizmalar tarafından üretilmesi ya da biyodegradasyon sürecinde eklenmesiyle mikroorganizmaların plastik yüzeylerine tutunması daha etkili duruma getirilebilir. Böylelikle biyodegradasyon sonucu plastiklerde gözlenen ağırlık kaybı artmaktadır. Aynı zamanda substratlara erişimin artmasıyla reaksiyon hızının artması ve daha hızlı biyodegradasyon sağlanabilir.

Türkiye’de *Streptococcus thermophilus*, *Lactobacillus acidophilus*, *Pseudomonas* spp gibi mikroorganizmalarda biyosürfektan üretiminin petrol kirliliği üzerindeki etkileri gibi farklı biyoremediasyon çalışmaları gerçekleştirilmektedir [40,41,42]. Fakat plastik biyodegradasyonuna yönelik biyosürfektanların etkilerinin incelendiği bir çalışma görülmemiştir.

### **Genetik modifikasyonlar**

Moleküler klonlama, enzim modifikasyonları, metabolik yolların düzenlenmesi gibi çeşitli moleküler modifikasyonlar ile plastik biyodegradasyonu iyileştirilebilmektedir. Genetik modifikasyonlar ile mikroorganizmaların plastik biyodegradasyon ile ilgili özellikleri düzenlenerek plastik biyodegradasyon süreci hızlandırılabilir [43,44]. Enzim aktivitesinin artırılması için protein mühendisliği yaklaşımları kullanılarak enzimin verimliliğinin düzenlenmesi sağlanmaktadır. Enzimlerin aktif bölgelerinde gerçekleştirilen mutasyonlar sonucunda enzim aktiviteleri incelenerek plastik biyodegradasyonunu arttıracak daha etkili enzimler tasarlanabilir. *Ideonella sakaiensis* PETase enziminin aktif bölgesinde gerçekleştirilen ikili mutasyonlar sonucunda PET (Polietilen tereftalat) degradasyonunun arttığı görülmüştür [45]. *Ideonella sakaiensis* PETase enziminde çoklu mutasyonların gerçekleştirilmesi ve plastik biyodegradasyonu açısından yararlı olanların seçilmesiyle enzim tekrardan düzenlenerek DuraPETase enzimi tasarlanmıştır [46]. PET biyodegradasyonunun 10



günde 400 kat arttığı ve 20 günde eklenen plastiklerin degradasyonunun tamamlanabildiği belirtilmiştir [46].

Plastik biyodegradasyonunda önemli olduğu görülen enzimlerin farklı organizmalarda yüksek verimde ve miktarda ekspresyonunun sağlanması ile biyodegradasyon arttırılabilmektedir. *Fusarium solani pisi* kütinaz enzimi ve *Cellulomonas fimi* selüloz bağlanma bölgesinin *Escherichia coli*'de ekspresyonu ile 48 saatte PET plastiklerinde %0,90 azalma belirtilmiştir [47]. *Pseudomonas* sp. alkan hidroksilaz geninin (*alkB*) *Escherichia coli* BL21'de ekspresse edilmesi ile 80 gün LMWPE (Düşük moleküler ağırlıklı polietilen) inkübasyonu sonucunda %19,3 karbon minerilizasyonu ve daha aktif biyodegradasyon sağlanabildiği görülmüştür [48]. *Aspergillus niger* lipaz enziminin *Pichia pastoris*'de ekspresyonu ile PLA (polilaktik asit) ve PCL (polikaprolakton) plastiklerinde biyodegradasyon gerçekleşebildiği gözlenmiştir [49]. Kim, Park ve arkadaşlarının (2020) gerçekleştirdikleri çalışmada bir yeşil alg olan *Chlamydomonas reinhardtii*'de PETase enziminin ekspresyonu ile 4 haftada eklenen PET'in tamamen degrade olması sağlanmıştır [50]. Doğal süreçte mikroorganizmalarda enzim miktarının az olması ya da yavaş elde edilmesi ekspresyon kapasitesi daha yüksek bir organizmanın kullanılması ile aşılabilir.

Gerçekleştirilen mutasyonların diğer yaklaşımlarla birleştirilmesiyle beraber daha hızlı ve yüksek verimde biyodegradasyon gerçekleştirilebilmektedir. *Thermobifida fusca* kütinaz (*TfCut2*) enziminin aktif bölgesinde gerçekleştirilen ikili mutasyonlar ve katyonik sürfektanın bir arada kullanılmasıyla PET degradasyonunun 13 kat artması, 24 saatte %90 plastik ağırlığının azalması sağlanmıştır [39]. Gerçekleştirilen çalışmada bu zamana kadar belirtilen en yüksek PET hidrolaz değeri elde edilmiştir. *Thermobifida cellulolytica* kütinaz 1 (*Thc\_Cut1*) enzimi yüksek konsantrasyonlarda enzim elde edilebilen ve biyoteknolojide ekspresyon sistemleri açısından artan ilgi gören *P.pastoris* kullanılarak ekspresse edilmiştir [51]. Glikozilasyon bölgesinde gerçekleştirilen mutasyon ile PBS (Polibütillen süccinat) hidrolizi 96 saatte %92'ye ulaşmıştır [51].

Enzimlerde gerçekleştirilen mutasyonların etkilerinin ve enzimin aktivitesinin gözlenmesi ile plastik biyodegradasyonu için önemli olan enzimlerin yapısal özellikleri anlaşılmaktadır. Mutasyon çalışmaları plastik biyodegradasyonu sırasında açığa çıkan monomer-dimer substratlara enzimin bağlanabilme özelliklerinin incelenmesine de olanak sağlamaktadır. Mikrobiyal enzimlerin ve genlerin modifikasyonu ile plastik

biyodegradasyonu sürecinde açığa çıkan substratlara karşı mikroorganizmaların spesifik aktivitesi artırılıp biyodegradasyon süreci iyileştirilebilir [52]. Palm ve arkadaşlarının (2019) gerçekleştirdikleri çalışmada, PET biyodegradasyonu sırasında önemli olan MHETase enziminin yapısının incelenmesi ile enzimin aktif merkezinin substrata bağlanma özellikleri belirlenmiştir. Katalitik özelliklerin artırılması için MHETase enzim varyantı geliştirilerek BHET (bis- (2-hidroksietil) teraftalat) substratına enzimin özgüllüğü artırılmıştır [53].

Türkiye’de gerçekleştirilen çalışmalarda enzimlerin aktivitelerinin düzenlenmesine yönelik yaklaşımlara rastlanmamıştır.

### **Metagenomiks ve biyoinformatik**

Metagenomiks genetik materyalin direk olarak çalışılması, sekans ya da fonksiyonlarının izlenmesi ile mikrobiyal komüniteler ve kültüre edilemeyen organizmalar ile ilgili bilgi vermektedir [54]. Mikroorganizmaların kültür ortamında çoğaltılarak incelenmelerinin yanı sıra nükleik asitlerin, proteinlerin ve lipitlerin direk olarak çalışılması birçok biyoremediasyon çalışmasıyla beraber plastik biyodegradasyonu için de önem kazanmaktadır [55]. Metaproteomiks, metatranskriptomiks ve metabolomiks çalışmalarının biyodegradasyon çalışmalarına dahil edilmesi mikroorganizmalar arasında fonksiyonel ve yapısal farklılıkların daha detaylı ve hızlı analizine olanak sağlamaktadır [55].

Metagenomiks çalışmaları farklı koşullarda mikroorganizmaların metabolizmalarında gerçekleşen değişimleri gösterir. Ekstrasellüler ve intrasellüler metabolitler, plastik biyodegradasyonu için önemli ve yeni yolların aydınlatılması ve sorumlu enzimlerin bulunması için incelenmektedir. Genom analizleri ile mikroorganizmaların plastiği karbon kaynağı olarak kullanabilme potansiyelleri incelenebilmektedir. Genom analizleri örneklerdeki mikroorganizmaların türlerinin tayin edilmesi için kullanılarak plastik biyodegradasyonu gerçekleştirebilen yeni mikroorganizmaların keşfedilmesini de sağlamaktadır [56].

Meyer-Cifuentes ve arkadaşlarının (2020) gerçekleştirdikleri çalışmada denizden elde edilen mikroorganizma örnekleri, mikroorganizma komünitelerinin polifenolik plastikleri (PF) biyodegradasyon süreçleri açısından, metagenomiks analizlerle incelenmiştir. *Marinobacter* ve *Gammaproteobacteria*’nın plastik yüzeyinde büyüyebildikleri ve PF depolimerizasyonunda görevli olan *Ples* genini kodladıkları

görülmüştür. Elde edilen mikrobiyal komünitenin proteomiks ve transkriptomiks değişimleri incelenerek 6 PETase benzeri enzimin alifatik-aromatik polimer degradasyonundan sorumlu olabileceği görülmüştür [29].

Pinnell ve Turner'ın (2019) benzer bir yaklaşımla gerçekleştirdikleri çalışmada, denizlerden elde edilen mikrobiyal komünite örneklerinin metagenomiks analizleri gerçekleştirilmiştir. PHA (Polihidroksialkanoat) degradasyonunda, sülfat indirgeyen bakterilerin (SRB) önemli olduğu gösterilmiştir. Esteraz, depolimeraz ve adenil sülfat redüktaz (*aprBA*) enzimlerinin biyodegradasyondaki rolü ile *Desulfovibrio*, *Desulfobacteraceae* ve *Desulfobulbaceae* gibi plastik biyodegradasyonu gerçekleştirebilen yeni türler rapor edilmiştir [57].

Sekanslama teknolojilerinin ve biyoinformatik analizlerin gelişmesiyle beraber metagenomiks analizleri ilerlemektedir. 16S rRNA sekanslama tekniği mikrobiyal komünitelerin çalışılması için kullanılan önemli bir yöntemdir [58]. Sekanslama teknolojilerinin gelişmesi, maliyetlerinin düşmesi ile metagenomiks çalışmalarının ilerlemesi ve kültürden bağımsız metotlar ile mikrobiyal komünitelerin incelenmesi sağlanmıştır [58]. Biyoinformatik ve metagenomiks, plastik biyodegradasyonu ile ilgili enzim ve gen bilgileri elde edilerek degradasyon yollarının daha iyi anlaşılması ve plastik biyodegradasyonunun iyileştirilmesi için kullanılmaktadır [59]. Elde edilen bilgiler genetik mühendisliği yaklaşımları ile birlikte kullanılarak enzimlerin aktivitesinin artırılması sağlanabilir.

UM-BBD (University of Minnesota Biocatalysis/ Biodegradation database), OxDBase, MetaCyc gibi veri tabanları üzerinden biyodegradasyonla ilgili genlere, enzimlere ve biyodegradasyon yollarına ulaşılabilmektedir [60]. BioSurfDB metagenom, organizma bilgileri, biyodegradasyon yolları, enzimler hakkında bilgi vermekle beraber biyosümfaktanların kullanımı ve sonuçları hakkında bilgilerin elde edinebildiği bir veri tabanıdır [61]. PICRUSt bakteri protein fonksiyonlarının 16S rRNA metagenomiks verilerine göre belirlenmesini sağlayan ve biyoremediasyon potansiyallerine erişilmesini sağlayan bir veri tabanıdır [59]. Önceden belirtildiği gibi PBMD diğer veri tabanlarının yanı sıra plastik biyodegradasyonu için oluşturulmuş bir veri tabanıdır.

Oyewusi ve arkadaşlarının (2020) gerçekleştirdikleri çalışma da, Tuz Gölü'ndeki mikroorganizmaların biyoinformatik ve metagenomiks analizleri sonucunda

biyoremediasyon ve biyoteknoloji açısından önemli özelliklerinin olduğu ve ileri çalışmaların gerçekleştirilmesi gerektiği bildirilmiştir [59]. Benzer yaklaşımlarla Akdeniz gibi plastik kirliliğinin yoğun görüldüğü denizlerdeki mikrobiyal komünitelerin incelenmesi ile değerli bilgilerin elde edilebileceği düşünülmektedir. Bu veriler, bahsedilen biyoteknolojik yaklaşımlarla birleştirilerek önemli sonuçlar elde edilebilir.

## **Sonuç**

Plastik biyodegradasyonu, tüm dünyada artmakta olan plastik kirliliğinin azaltılmasında günümüzde kullanılan plastik atık uzaklaştırma yöntemlerinin aksine çevre dostu olması sebebiyle potansiyel çözüm olarak görülmektedir. Plastik atıklarının bulunduğu alanlardaki mikroorganizmaların incelenmesi, mikroorganizmaların çeşitli plastiklerde biyodegradasyon gerçekleştirebildiğini göstermiştir. Süreçte aktif olan birçok bakteri, mantar ve enzimler bildirilmiştir. Fakat biyodegradasyonun yavaş gerçekleşmesi ve etkisinin düşük olması nedeniyle mikroorganizmaların plastik atıklarının uzaklaştırılması için ticari kullanımı bulunmamaktadır. Mikroorganizmalarda enzim miktarının veya aktivitesinin düşük olması ve plastik yüzeyinin özelliklerinden dolayı mikroorganizmaların yüzeye tutunamaması sürecin yavaş olmasının nedenleridir.

Plastik biyodegradasyonunun kısıtlayıcı etmenleri biyoteknolojik yaklaşımlar kullanılarak iyileştirilmeye ve bertaraf edilmeye çalışılmaktadır. Doğada mikroorganizmaların etkileşimleri ve ortak metabolik süreçlerde görev almaları örnek alınarak farklı tür mikroorganizmaların bir arada kullanılması ve mikrobiyal komünitelerin oluşturulması yaklaşımı geliştirilmiştir. Mikroorganizmalar arası etkileşim ile biyodegradasyon süreci hızlanır mikroorganizmalar ek düzenleyicilere gerek kalmadan aktivite gösterebilir [30,34]. Mikroorganizmalarının plastik yüzeyine tutunmaları ve substrata erişimi ise biyosümfektanların eklenmesi veya üretimi sayesinde arttırılabilir.

Plastik biyodegradasyonunda enzim aktivitelerinin arttırılması için protein mühendisliği, mutasyon çalışmaları ve diğer genetik modifikasyonların kullanılması sürecin iyileşmesine yüksek miktarda katkı sağlamaktadır [50,51]. Metagenomiks analizleri; mikrobiyal komünitelerin, enzimlerin ve yolakların direk incelenebilmesi sayesinde önemli bilgiler verir.

Türkiye’de plastik biyodegradasyonu için gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde birçok yaklaşımlar için çalışma eksikliklerinin bulunduğu görülmüştür. Bu alanda yapılan çalışmalar artırılarak plastik kirliliğine karşı yeni çözümler üretilmelidir.

Tüm dünya açısından önemli bir sorun haline gelen plastik kirliliği; metagenomik çalışmaların, biyoinformatik veri tabanlarının artması ve diğer biyoteknolojik yaklaşımların da bir arada kullanılması ile azaltılabilir ve engellenebilir. Plastik biyodegradasyonunun iyileştirilmesi ve var olan sorunların çözülmesi, biyodegradasyonun ticari boyutunu da arttıracaktır.

#### **Çıkar Çatışması**

Yazarın çıkar çatışması oluşturabilecek herhangi bir kurum ya da kuruluşla ilgisi bulunmamaktadır.

#### **Kaynaklar**

1. Ritchie, H. and M. Roser, Plastic pollution. Our World in Data, 2018, <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>; Erişim tarihi: [23.12.2020].
2. Plastics Europe, Plastics-the facts 2019. Plastics Europe, 2019, <https://www.plasticseurope.org/en/resources/publications/1804-plastics-facts-2019>; Erişim tarihi: [23.12.2020].
3. Plastics Europe, Plastics-the facts 2020. Plastics Europe, 2020, <https://www.plasticseurope.org/en/resources/publications/4312-plastics-facts-2020>; Erişim tarihi: [23.12.2020].
4. Dave, F., COVID-19 has worsened the ocean plastic pollution problem. ScientificAmerican, 2020, <https://www.scientificamerican.com/article/covid-19-has-worsened-the-ocean-plastic-pollution-problem/>; Erişim tarihi: [25.02.2021].
5. Drzyzga, O. and A. Prieto, Plastic waste management, a matter for the ‘community’. Microbial Biotechnology, 2018. 12: p. 1-3.
6. Ilyas, M., et al., Plastic waste as a significant threat to environment – a systematic literature review. Reviews on Environmental Healthy, 2018. 33(4): p. 383-406.
7. Lou, Y., et al., Biodegradation of polyethylene and polystyrene by greater wat moth larvae (*Galleria mellonella L.*) and the effect of co-diet supplementation on the core gut microbiome. Environmental Science & Technology, 2020. 54 (5): p. 2821-2831.
8. Yang, J., et al., Evidence of polyethylene biodegradation by bacterial strains from the guts of plastic – eating waxworms. Environmental Science & Technology, 2014. 48 (23): p. 13776-13784.
9. Sharma. I., Bioremediation techniques for polluted environment: concept, advantages, limitations, and prospects, in Trace Metals in the Environment- New Approaches and Recent Advances, M.A.Murillo-Tovar, H. S. Norena and A. Saeid, Editors. 2021, IntechOpen, number: 6647.
10. Heidarrezaei, M., et al., Isolation and characterization of a novel bacterium from the marine environment for trichloroacetic acid bioremediation. Applied Science, 2020. 10 (13): p. 4593.
11. Oyewusi, H. A., et al., Alternative bioremediation agents against haloacids, haloacetates and chlorpyrifos using novel halogen-degrading bacterial isolates from the hypersaline lake Tuz. Catalysts, 2020. 10 (6): p. 651.
12. Sheth, M. U., et al., Bioengineering a future free of marine plastic waste. Frontiers in Marine Science, 2019. 6: p. 624.
13. Meereboer, K. W., M. Misra and A. K. Mohanty, Review of recent advances in the biodegradability of polyhydroxyalkanoate (PHA) bioplastics and their composites. Green Chemistry, 2020. 22: p. 5519-5558.

14. Danso, D., J. Chow and W. Streit, Plastics: environmental and biotechnological perspectives on microbial degradation. *Applied and Environmental Microbiology*, 2019. 85 (19): p. e01095-19.
15. Fesseha H. and F. Abebe, Degradation of plastic materials using microorganisms: A review. *Public Health Open Journal*, 2019. 4(2): p. 57-63.
16. Plastics Microbial Biodegradation Database, <http://pmbd.genomemining.cn/home/> ; Erişim tarihi: [28.12.2020].
17. Ibiene, A.A., H. O. Stanley and O. M. Immanuel, Biodegradation of polyethylene by *Bacillus sp.* indigenous to niger delta mangrove swamp. *Nigerian Journal of Biotechnology*, 2013. 26: p. 68-79.
18. Usha, R., T. Sangeetha and M. Palaniswamy, Screening of polyethylene degrading microorganisms from garbage soil. *Libyan Agriculture Research Center Journal International*, 2011. 2 (4): p. 200-204.
19. Giacomucci, L., et al., Polyvinyl chloride biodegradation by *Pseudomonas citronellolis* and *Bacillus flexus*, abstract. *New Biotechnology*, 2019. 52: p. 35-41.
20. Helen, A. S., E.C. Uche and F. S. Hamid, Screening for polypropylene degradation potential of bacteria isolated from mangrove ecosystems in peninsular malaysia. *International Journal of Bioscience, Biochemistry and Bioinformatics*, 2017. 7(4): p. 245-251.
21. Maroof, L., et al., Identification and characterization of low density polyethylene- degrading bacteria isolated from soils of waste disposal sites. *Environmental Engineering Research*, 2020. 26 (3): Article 20016-200167-0.
22. Taghavi, N., et al., Degradation of plastic waste using stimulated and naturally occurring microbial strains, abstract. *Chemosphere*, 2020. 263: Article 127975.
23. Arıkan, E. B. and H. D Bilgen, Investigation of fungal biodegradation of starch based bioplastic spoon wastes. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 2019. 7(2): p. 294-300.
24. Ibrahim, I. N., et al., Assessment of potential plastic-degrading fungi in Jordanian habitats. *TÜBİTAK, Turkish Journal of Biology*, 2011. 35: p. 551- 557.
25. Chaudhary, A. K. C. and R. P Vijayakumar, Studies on biological degradation of polystyrene by pure fungal cultures, abstract. *Environment, Development and Sustainability*, 2020. 22: p. 4495 - 4508.
26. Min, K., J. D. Cuiffi and R. T. Mathers, Ranking environmental degradation trends of plastic marine debris based on physical properties and molecular structure. *Nature Communications*, 2020. 11: p.727.
27. Purohit, J., A. Chattopadhyay and B. Teli, Metagenomic exploration of plastic degrading microbes for biotechnological application. *Current Genomics*, 2020. 21(4): p.253-270.
28. Esan, E. O., L. Abbey and S. Yurgel, Exploring the long-term effect of plastic on compost microbiome. *PLoS ONE*, 2019. 14(3): Article e0214376.
29. Meyer-Cifuentes, I. E. and B. Öztürk, Synergistic biodegradation of aromatic- aliphatic copolyester plastic by marine microbial consortium. *Nature Communications*, 2020. 11: p. 5790.
30. Rong,D., et al., Symbiotic degradation of polyvinyl alcohol by *Novosphingobium sp.* and *Xanthobacter flavus*. *Journal of Environmental Biotechnology*, 2009. 9 (2): p. 131-134.
31. Seneviratne, G., et al., Polyethylene biodegradation by a developed *Penicillium-Bacillus* biofilm. *Current Science*, 2006. 90 (1): p. 20-21.
32. Çetin, D. and S. Çıtak, Degradation of polyvinyl alcohol by a mixed microbial culture isolated from paper mill treatment. *Gazi University Journal of Science*, 2013. 27 (2): p. 839-845.
33. Dwicania, E., A. Rinanti, and M. F. Fachrul, Biodegradation of LLDPE plastic by mixed bacteria culture of *Pseudomonas aeruginosa* and *Brevibacterium sp.* *Journal of Physics: Conference Series*, 4th Annual Applied Science and Engineering Conference, 2019. 1402 (2): Article 0221105.
34. Yin, C. F., Y. Xu and N. Y. Zhou, Biodegradation of polyethylene mulching films by a co-culture of *Acinetobacter sp.* strain NyZ450 and *Bacillus sp.* strain NyZ451 isolated from

- Tenebrio molitor* larvae, abstract. International Biodegradation & Biodegradation, 2020: Article 155: 105089.
35. Aulwar, U. and R.S. Awasthi, Production of biosurfactant and their role in bioremediation. Journal of Ecosystem & Ecography, 2016. 6 (3): Article 1000202.
  36. Pacwa- Plociniczak, M., et al., Environmental applications of biosurfactants: recent advances. International Journal of Molecular Sciences, 2011. 12 (1): p. 633-654.
  37. Mukherjee, S., U. R Chowdhuri and P.P. Kundu, Biodegradation of polyethylene waste by simultaneous use of two bacteria: *Bacillus licheniformis* for production of bio-surfactant and *Lysinibacillus fusiformis* for bio-degradation, abstract. RSC Advances, 2016. 6: p. 2982-2992.
  38. Vimala, P. P. and L. Mathew, Biodegradation of polyethylene using *Bacillus subtilis*. Procedia Technology, 2016. 24: p. 232-239.
  39. Furukawa, M., et al., Efficient degradation of poly(ethylene terephthalate) with *Thermobifida fusca* cutinase exhibiting improved catalytic activity generated using mutagenesis and additive-based approaches. Scientific Reports, 2019. 9: Article 16038.
  40. Alkan, Z., et al., Production of biosurfactant by lactic acid bacteria using whey as growth medium. TÜBİTAK, Turk J Vet Anim Sci, 2019. 43: p.676-683.
  41. Kaya, T., B. Aslim and E. Kariptaş, Production of biosurfactant by *Pseudomonas* spp. Isolated from industrial waste in Turkey. TÜBİTAK, Turk J Biol, 2014. 38: p. 307-317.
  42. Keskin, N. O. S, et al., Production and structural characterization of biosurfactant produced by newly isolated staphylococcus xylosus STF1 from petroleum contaminated soil. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2015. 133: p. 689-694.
  43. Amobonye, A., et al., Plastic biodegradation: frontline microbes and their enzymes, abstract. Science of The Total Environment, 2021. 759: Article 143536.
  44. Tachibana, Y., et al., Environmental biodegradability of recombinant structural protein. Scientific Reports, 2021. 11: Article 242.
  45. Austin, H. P., M.D Allen and B. S. Donohoe, Characterization and engineering of a plastic-degrading aromatic polyesterase. PNAS, 2017. 115 (19): p. E4350-E4357
  46. Cui, Y., et al., Computational redesign of PETase for plastic biodegradation by GRAPE strategy, preprint. 2019, <https://www.researchgate.net/publication/336157019> Computational redesign of PETase for plastic biodegradation by GRAPE strategy; Erişim tarihi [30.12.2020].
  47. Gomes, D. S., et al., Production of heterologous cutinases by *E. coli* improved enzyme formulation for application on plastic degradation. Electronic Journal of Biotechnology, 2013. 16 (5).
  48. Yoon, M. G. and H. J. Jeon, Biodegradation of polyethylene by a soil bacterium and AlkB cloned recombinant cell. Journal of Bioremediation & Biodegradation, 2012. 3 (4): Article 145.
  49. Nakajima- Kambe, T., et al., Purification, cloning and expression of an *Aspergillus niger* lipase for degradation of poly(lactic acid) and poly( $\epsilon$ -caprolactone). Polymer Degradation and Stability, 2012. 97(2): p. 139-144.
  50. Kim, J. W., S. B Park and H. S. Kim, Functional expression of polyethylene terephthalate degrading enzyme (PETase) in green microalgae. Microbial Cell Factories, 2020. 19: p. 97.
  51. Gamerith, C., et al., Enzymatic degradation of aromatic and aliphatic polyesters by *P. pastoris* expressed cutinase 1 from *Thermobifida cellulosilytica*. Frontiers in Microbiology, 2017. 8: p. 938.
  52. Gambarini, V., et al., Phylogenetic distribution of plastic-degrading microorganisms. Applied and Environmental Science, 2021. 6 (1): p. e01112-20.
  53. Palm, G. J., et al., Structure of plastic- degrading *Ideonella sakaiensis* MHETase bount to a substrate. Nature Communications, 2019. 10: p. 1717.
  54. Datta, S., et al., Metagenomic applications in microbial diversity, bioremediation, pollution monitoring, enzyme and drug discovery. A review, abstract. Environmental Chemistry Letters, 2020. 18: p. 1229-1241.

55. Dash, H. R and S. Das, Chapter4- Molecular methods for studying microorganisms from atypical environments, abstract. *Methods in Microbiology*,2018. 45: p. 89-122.
56. Handelsman, J., Metagenomics: application of genomics to uncultured microorganisms. *Microbial Molecular Biology Reviews*, 2004. 68 (4): p. 669-685.
57. Pinnel, L. J. and J. W. Turner, Shotgun metagenomics reveals the benthic microbial community response to plastic and bioplastic in coastal marine environment. *Frontiers in Microbiology*, 2019. 10: Article 1252.
58. Lear, G., et al., Plastics and the microbiome: impacts and solutions. *Environmental Microbiome*, 2021. 16(2): Article 2.
59. Oyewusi, H. A., et al., Functional profiling of bacterial communities in Lake Tuz using 16S rRNA gene sequences. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 2020. 35(1): p. 1-10.
60. Arora, P. K. and H. Bae, Integration of bioinformatics to biodegradation. *Biological Procedures Online*, 2014. 16 ( 8): p.1-10.
61. Oliveira, J. S., et al., BioSurfDB: knowledge and algorithms to support biosurfactants and biodegradation studies. *Database*, 2015: p. 1-8.