
ÇEVRE BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Saadet HACISALİHOĞLU

ÇEVRE BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ

Editör

Dr. Öğr. Üyesi Saadet HACISALİHOĞLU

yaz
yayınları

2024

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-6104-60-0

Ekim 2024 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

info@yazyayinlari.com

İÇİNDEKİLER

Patates Kabuğu ile Atıksudaki Kirleticilerin Gideriminin Araştırılması	1
---	----------

Zehra SAPCI, Melih ONAY, Hülya DURMAZ

Mikroplastik Kirliliği: Mikroplastiklerin Kaynakları ve Karakterizasyonu	25
---	-----------

Saadet HACISALİHOĞLU

Gıda Ürünlerinin Üretiminde Su Ayak İzi	46
--	-----------

*Ayşe Neslihan DÜNDAR, Oya Irmak ŞAHİN,
Furkan Türker SARICAOĞLU*

Mikroalgal Biyoremediasyon	68
---	-----------

*Oya Irmak ŞAHİN, Ayşe Neslihan DÜNDAR,
Furkan Türker SARICAOĞLU*

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

PATATES KABUĞU İLE ATIKSUDAKİ KİRLETİCİLERİN GİDERİMİNİN ARAŞTIRILMASI¹

Zehra SAPCI²

Melih ONAY³

Hülya DURMAZ⁴

1. GİRİŞ

Demir (Fe) ve Çinko (Zn) gibi bazı ağır metaller enzim ve hormonların yapısına katılması veya onları aktif hale getirmesi gibi görevler alması nedeniyle “iz elementler” olarak isimlendirilmektedir. Örneğin, klorofil oluşumu için gerekli olan demir, hayvanlarda hemoglobin yapısına katılmaktadır. Hayvanlarda bağışıklığın desteklenmesinde ve cilt yaralarının hızlı iyileşmesine katkı sağlayan çinko, bitkilerde ise suyun alınımını sağlamaktadır.

Metalik iz elementler yaşamın temel taşı niteliğinde olsalar da yüksek konsantrasyon düzeylerinde temel fonksiyon gruplarını bloke edebilmekte, diğer metal iyonlarının yerine geçmek veya aktif biyolojik moleküllerin uygunluğunu değiştirmek suretiyle olumsuz yönde etki gösterebilmektedirler

¹ Bu çalışma Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FBA-2017-6143 kodlu proje ile desteklenmiştir.

² Prof. Dr., Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fak., Çevre Müh. Böl., zehraayas@yyu.edu.tr , ORCID: 0000-0002-7811-2235.

³ Doç. Dr., Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fak., Çevre Müh. Böl., melihonay@yyu.edu.tr , ORCID: 0000-0002-9378-0856.

⁴ Dr., Bitlis Eren Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fak., Çevre Müh. Böl. hulyadumaz80@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5164-7750.

(Collins ve Stotzky, 1989). Bazı atıkların içeriğinde bulunan metaller, su ve hava yoluyla taşınmakta, besin zincirine geçmekte ve sonucunda canlı bünyesinde birirmektedir (Sapci ve Ustun, 2005). Mesela atık suların tarım alanlarını kirletmesiyle, tarım ürünlerinde metal birikimi ve üretim kapasitesinde azalma gözlemlenmektedir. Metal iyonlarının miktarı nedeniyle bitkiler üzerindeki bu olumsuz etkiler, kritik stres olarak tanımlanmaktadır. Bu stres, bitki dokularına zarar verir ve serbest radikallerin (süperoksit radikalleri gibi radikaller) üretimini uyarak oksidatif hasara neden olur (Foyer vd., 1997; Halliwell ve Gutteridge, 2002). Bu sorunu en aza indirmek hatta ortadan kaldırmak için endüstriyel çıkış suyundan ağır metalleri gidermek gerekmektedir. Kitabın bu bölümünde atık sularda yaygın bulunan Fe ve Zn'nun giderimi üzerine odaklanılmıştır.

Günümüzde klasik metotların yanı sıra alternatif bir yöntem olarak endüstriyel, tarımsal veya kentsel atıklardan elde edilen düşük maliyetli maddelerin ağır metal gideriminde adsorbent olarak kullanımı araştırılmaktadır (Arampatzidou ve Deliyanni 2016, Topal vd., 2011). Memleketimizde her yıl çok fazla tarımsal ve bitkisel atık üretilmesine rağmen bu atıkların kullanım oranı oldukça düşüktür. Çeşitli tarımsal atıkların adsorbent olarak kullanıldığı başka çalışmalarda bulunmaktadır. Adsorbentlerin bazıları şunlardır; portakal posası (Karaman ve Aksu, 2014), levrek balığı pulu (Küntaş vd., 2014), muz kabuğu (Uslu vd., 2014), çam kozalağı (Erçalışkan vd., 2014), fındık kabuğu (Okur ve Şenöz, 2014), badem kabuğu (Kılıç ve Sarıcı Özdemir, 2014), antep fıstığı kabuğudur (Yetilmezsoy ve Demirel, 2008). Her bir adsorbent maddenin adsorpsiyon etkileri boyar maddelerle test edilmiştir.

Çoğu tarım ülkesinin en önemli tarım ürünü patatestir. 2020 yılında dünya patates üretimi 16,5 milyon hektar alanda 359 milyon ton olarak gerçekleşmiştir (Patates Mayıs Bülteni). Patates, düşük maliyetli, düşük yağ oranı içeren iyi bir

karbonhidrat kaynağı olup, yüksek kalitede protein, lif ve vitaminler içermesinden dolayı insan beslenmesinde önemli bir besindir. Gelişmiş ülkelerde fastfood yiyeceklerde kullanılmasından dolayı önemli miktarda patates atığı çıkmaktadır. Taze patatesin ağırlığının yaklaşık %12'si patates soyulduğunda atık olarak atılmaktadır (Arampatzidou ve Deliyanni, 2016). Bu atıklar genellikle gübreleme amacıyla toprağa gömülür, hasattan sonra yakılır, çürümeye bırakılır veya hayvan yemi olarak depolanmaktadır (Karaca vd., 2016). Oysaki, tarımsal atıklar gibi organik maddelerin biosorbent olarak kullanıldığında, organik maddede bulunan fonksiyonel gruplar (karboksil, hidroksil, sülfidril, ve amit) atıksulardaki metal iyonlarının sorpsiyonundan sorumludur (Farooq vd., 2010). Patateste de yoğun olarak bulunan nişasta üzerine de araştırmalar yapılmıştır. Nişasta granüllerindeki d-glukoz birimindeki hidroksil grupları, polisakkarit zincirler ile metal iyonlarının muhtemel etkileşim yeridir. C-6 veya C-3 pozisyonlarında mono-esterleştirilmiş fosfat grupları içeren patates nişastası, küçük miktarda amilopektin glukoz içerir ki, bu durum katyonun nişastaya bağlanabilirliğini göstermiştir (Szymonska vd., 2015). Bu konudaki araştırmalar yeni olduğundan çoğu sorpsiyon çalışmaları tek metal sorpsiyonu üzerine yapılmıştır. Örneğin, Asuquo ve Martin (2016) sulu çözeltideki Cd^{+2} 'nin tatlı patates kabuğunu kullanarak sorpsiyon kapasitesini, Moreno-Pirajána ve Giraldo (2011) de pirolizlenmiş patates kabuğu ile Cu^{+2} 'nin giderimini incelemişlerdir. Farklı olarak, Feizi ve Jalali (2015) altı elementin bulunduğu sentetik sulu çözeltide patatesin sorbent olarak kullanıldığı çalışmalarında elementlerin sorpsiyon yarışlarını incelemişlerdir.

Yapılan literatür çalışmasında, sentetik veya orijinal atıksudaki ağır metalin patates kabuğuna sorpsiyonu ile ilgili yeterli çalışmaya denk gelinememiştir. Bu nedenle, dünyada hektar başına patates üretiminde verimin en yüksek olduğu

ülkeler arasında olan ülkemizin (Patates Mayıs Bülteni), patates atığının çevre kirliliğini önlemede kullanılabilirliğinin incelenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla yine ülkemizde en yaygın endüstrilerden olan tekstil atık suyu tercih edilmiştir.

Kısaca özetlemek gerekirse bu bölümde, ülkemizdeki önemli sektörlerden olan tekstil sektörünün atıksuyu kullanılmıştır. Atıksudaki ağır metallerin giderilmesi için sorbent olarak atık olan patates kabuğu kullanılmıştır. En uygun pH değeri ve temas süresi parametrelerine bakılarak patates kabuğunun sorpsiyon verimi araştırılmıştır. Patates kabuğunun sorpsiyon kapasitesini arttırmada ön işlemin etkisi irdelenmiştir. Çalışmanın ön denemelerinde organik (Şapcı Ayas vd, 2019) ve inorganik giderim denemeleri (Sapci, 2021) yapılmıştır. Giderimin gözlenmesi üzerine yaygın olarak atıksularda bulunan Fe ve Zn giderimine odaklanılmıştır. Bu giderime etki eden faktörler üzerine detaylı araştırma yapılmış ve elde edilen sonuçlar bu bölümde açıklanmıştır.

2. METALLERİN CANLI SAĞLIĞINA ETKİLERİ

Doğal ve antropojenik faktörler nedeniyle çevresel sistemlerde yüksek konsantrasyonlarda bulunan eser metaller, organizmalar tarafından bünyelerine alınarak ortamdan uzaklaştırılır ve Şekil 1'de gösterildiği gibi (KKAYG, 2004) besin zinciri yoluyla tropik bölgelere artan miktarlarda aktarılır (Tisler ve Zargorc- Koncan, 1999; Şapçı ve Üstün, 2002, Sapci ve Ustun, 2014). Bu nedenle eser elementler havada, toprakta ve suda az miktarda bulunsada da yüksek konsantrasyonlarda insanlara ulaşarak insan sağlığını tehlikeye atabilmektedir. İzmir Körfezi'nde yapılan bir çalışmada nehirlerin taşıdığı ağır metallerin toprak yapısında biriktiği ve bu suyla sulanan sebzelerde de ağır metal birikiminin meydana geldiği doğrulandı (Özer, 1987). Aden Körfezinde yapılan bir araştırma, atıklarda

3. METAL GİDERME YÖNTEMLERİNDEN ADSORPSİYON

Adsorpsiyon, iyonların veya moleküllerin, iki faz arasında uygun bir temas yüzeyinde veya onların arayüzlerinde biriktiği süreçtir (Noll vd., 1991, Tchobanoglous vd., 2003). Bu fazlar, sıvı – sıvı, sıvı – katı, gaz – sıvı ve gaz – katı kombinasyonları şeklinde olmaktadır (Noll vd., 1991). Yüzeyde biriken maddeye adsorbat, biriktiren maddeye ise adsorban (adsorbent) adı verilir. Genellikle üç tür adsorpsiyon vardır: fiziksel, kimyasal ve iyon değişimi.

Fiziksel adsorpsiyon, moleküller arası Van der Waals çekim kuvvetlerine dayanan zayıf bir adsorpsiyondur. Burada adsorbat, adsorban yüzeyinin belirli bir kısmına bağlı olmadığı sürece serbest yüzey etrafında hareket edebilir. Ancak adsorban farklı adsorbent katmanlarında birikebilir. Bu adsorpsiyon genellikle geri dönüşümlü bir süreçtir; yüzeyde tamamen tutunan partiküller daha sonra desorbe de olabilirler (Sawyer ve McCarty 1978).

Kimyasal adsorpsiyon karmaşık bir işlemdir ve adsorbat ile adsorban arasındaki kimyasal özelliklere bağlıdır. Kimyasal adsorpsiyonda adsorbat yüzeyde tek bir katmanda bulunur ve adsorbat adsorbanın diğer kısımlarına hareket edemez. Yüzey, adsorbat ile tek kat olarak kaplandığında adsorbanın adsorpsiyon kapasitesi doygunluğa ulaşmıştır. Bu adsorpsiyon çok reaktif değildir ancak sistem daha yüksek sıcaklıklara alınırsa adsorban nadiren de olsa geri kazanılabilir. (Sawyer ve McCarty, 1978).

Başka bir adsorpsiyon türü, adsorbat ile temas yüzeyi arasındaki elektrostatik çekim ile karakterize edilir. Bu tip adsorpsiyonda iyonların yüzeyde birikmesi, adsorban ile yüklü adsorbat arasındaki elektrostatik çekime bağlıdır. Genel olarak, adsorbent üzerinde yüksek yüklü iyonlar (yükli iyonlar), az yüklü iyonlardan daha büyük bir bölümü kaplar. Ayrıca boyutları daha

küçük olan iyonlarla adsorbent arasındaki çekim güçleri daha fazladır (Sawyer ve McCarty, 1978).

3.1.Adsorpsiyonu Etkileyen Faktörler

Adsorpsiyon işlemi, adsorbatın çözeltideki çözünürlüğü ile yakından ilgilidir. Çözünürlüğü düşük olan maddelerin adsorbe olasılığı daha yüksektir. Hidrofilik ve hidrofobik moleküllerde, hidrofobik moleküllerin yüzeyde toplanma olasılığı daha yüksektir. Ayrıca malzeme ile yüzey arasındaki etkileşim de adsorpsiyonu etkiler. Son olarak adsorbatın boyutu da çok önemlidir çünkü adsorbatın yüzeydeki difüzyonunu ve adsorbanın gözeneklerine nüfuz etme yeteneğini etkiler. İyon değiştirici ortam dışındaki diğer iki ortam türünde iyonların adsorpsiyon kapasitesi nötrden azdır. Genel olarak ortamın pH'ı arttıkça nötr yüklerin adsorpsiyonu da artar. Ancak pH aynı zamanda yüzeyin elektrik yükünü de etkilediğinden, tutma kapasitesinin değişmesine neden olur. Atıksularda pek çok farklı kirletici vardır ve her kirleticinin adsorpsiyon özellikleri farklıdır. Maddeler rekabet halindedir, dolayısıyla çözelti içindekilerin diğer kirleticilerin miktarı, giderilmek istenen kirleticinin adsorplanmasını azaltabilir. (Sawyer ve McCarty, 1978). Adsorpsiyonu etkileyen faktörler pH, sıcaklık, adsorbentin özellikleri, temas süresi ve adsorbatın yapısıdır.

Sıvı-katı faz adsorpsiyonunda sıvı fazın pH'ının asidik, bazik veya nötral olması adsorpsiyonu etkilemektedir. Adsorbanın pH'ı da bu süreci etkiler. Çözeltinin pH'ının düşürülmesi hidrojen iyonlarının miktarını artırarak adsorban yüzeyinde olumsuz değişikliklerin oluşmasına neden olur. Shukla (2002) H^+ iyonlarının asidik koşullar altında katı yüzeylerde adsorpsiyon için metal iyonlarıyla rekabet ettiğini belirtmektedir.

Adsorpsiyon işlemi genellikle ekzotermik bir reaksiyondur ve adsorpsiyon sıcaklığın azalmasıyla artar. Ancak

adsorban yüksek sıcaklığa maruz kalırsa adsorbatın geri kazanılabilir (Üstün ve Okumuş, 2006).

Adsorpsiyon prosesinin hızını ve randımanını adsorbentin yapısı etkilemektedir. Düzgün yüzeyli adsorbent ile gözenekli yüzeye sahip aynı adsorbentin adsorpsiyon verimi aynı değildir. Adsorpsiyon hızı düzgün yüzeyli adsorbent çapının tersi ile orantılıdır. Diğer yandan adsorbent gözenekli bir yapıdaysa adsorpsiyon hızı danenin kuvvetleri ile ters orantılıdır.

Moleküler büyüklük adsorbatın molekül ağırlığı ile ilişkilidir. Molekül ağırlığı ise molekülün hareket edebilme özelliğini etkilemektedir. Bu da gözenek difüzyonu üzerinde etkilidir. Molekül ağırlığı azaldıkça adsorpsiyon hızı artmaktadır (Okumuş, 2007).

3.2.Adsorplanmış Miktarının Tespiti

Adsorplanmış metal miktarı (q_e mg/g) aşağıdaki matematiksel eşitlik ile anlatılmaktadır.

$$q_e = (C_o - C_e)V / m \quad (2)$$

Denklem 2’de C_o ve C_e : giriş ve çözeltideki metalin denge derişimini (mol/L), V : çözeltinin hacmini (L) ve m : adsorbentin miktarını (g) ifade etmektedir.

4. MATERYAL VE METOT

4.1.Adsorbentin Hazırlaması

Bölge halkına katkıda bulunması için bölgemizde yetişen Ahlat patatesinin (*Solanum tuberosum*) adsorbent olarak kullanılması tercih edilmiştir. Literatürde belirtildiği gibi örnekler çamurları gidene kadar yıkanmış, soyulmuş daha sonra 3 kere distile sudan geçirilmiştir (Feizi ve Jalali, 2015). Etüvde 80 °C’ de 24 saat süre ile kurutulup karakterizasyon analizlerine hazırlanmıştır. Ayrıca farklı fiziksel boyutlarda çalışılacağı için

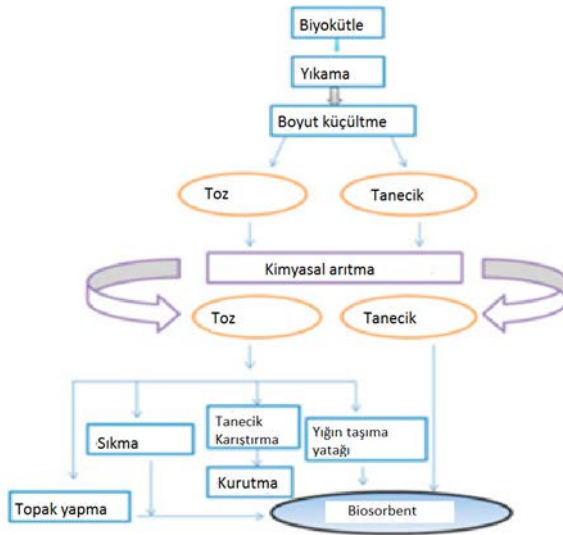
parçalanmış ve elek analizi yapılarak boyutlarına göre ayrılmıştır. Kurutma işlemi (80 °C de 24 saat) (NÜVE NC 40M) sonucu yeterli adsorbent oranı olmadığından ikinci patates çuvalı alımı yapılmıştır. Elekten geçen örnekler deneye kadar ağzı kapalı plastik kaplarda saklanmıştır. Deneylerde sadece öğütme işleminden geçen patates kabuklarına “P-PP-P” ismi verilmiştir.

Adsorbanın yüzey alanının büyük olması demek, onun adsorban ile temasının daha çok olmasına yani adsorpsiyonun artmasına neden olur (Aytan, 2010). Biokütleden adsorbent hazırlanırken partikül boyutları küçültülür (Şekil 2) (Gautam vd., 2014). 2016’da Abdullah ve arkadaşlarının taramalı elektron mikroskobu ile yürüttükleri çalışma göstermiştir ki, ultrasonik ve otoklavla ön arıtım yapılmış tarımsal atık olan biokütle (palmiyenin boş meyveleri), selüloz fibrinlerinin yüzeyde delikler ve gözenekler olarak tamamen ayrılmaktadır. Hidrojen peroksit ve ultrasonik ön arıtmanın kullanıldığı çalışmada %49 selüloza dönüşüm verimliliği elde edilirken, otoklavla yapılan ön arıtmada %64 gibi yüksek oranda selüloz dönüşüm verimliliği elde edilmiştir. Bu veriler ışığında elekten geçen kabukların bir kısmı da otoklavlanmıştır (121 °C de 15 dk). Otoklavlanan kabuklar 80 °C de 24 saat boyunca kurutulduktan sonra “P-PP-A” ismi ile etiketlenmiş ağzı kapalı plastik kaplara alınarak deneye kadar saklanmıştır.

Literatür çalışmaları tuzlu suyla ıslatılmış nişasta granüllerinin alkali katyonlarını ve geçiş metallerini tuttuğunu göstermiştir (Szczygiel vd., 2014, Szymonska vd., 2015). Feizi ve Jalali (2015) kimyasal ön işleme sokulmuş (tuzlu su ile muamele edilmiş) patates kabuğunun, Ni giderimin de etkili olduğunu bildirmişlerdir. Bu nedenle bu araştırmada, ikinci ön işlem olarak, NaOH ile muamele edilmiş kabukların sorpsiyon kapasitesi yani “**kimyasal ön işlem**” in ağır metalin giderime etkisi incelenmiştir. Feizi ve Jalali (2015)’nin yaptığı gibi katı/sıvı oranı 1:5 olacak şekilde, adsorbent (1 mm’den büyük patates kabukları) ve NaOH

ile muamele edilmiştir. 0,1 N NaOH ile 1 saat muamele sonrasında çift distile su ile iyice yıkanmıştır. Daha sonra 0,1 N CH₃COOH ile yarım saat muamele edilmiş ve çözeltisi renksiz oluncaya kadar distile su ile yıkanıp kurutularak (80 °C de 24 saat) (NÜVE NC 40M) deneye hazırlanmıştır. Bu patates kabukları “P-PP-C” olarak isimlendirilmiştir.

Şekil 2. Fiziksel ve Kimyasal Metotlar Kullanarak Biokütleden Biosorbent Hazırlama



Kaynak: (Gautam vd., 2014)

Atıksu arıtımında alg, bakteri, mantar ve ekmek mayasının etkili olduğunu başka araştırmacılarca ifade edilmiştir. Literatür araştırmalarında ilk defa 2007’de, lignoselülozik biyokütle olan papaya ağacı bir mantar türü olan *Phanerochaete chrysosporium* ile hibritleştirilerek Ni giderimi araştırılmıştır. Hibrit biyokütlenin tek başına mantarın gideriminden daha fazla Ni giderdiği ifade edilmiştir (Iqbal ve Saeed, 2007). Bu bilgi ışığında üçüncü ön işlem olarak, doğada her yerde bulunabilen ve tek hücreden oluşan mikroorganizma türü olan maya kullanılmıştır. En çok bilinen maya türü ekmek mayası yani *Saccharomyces*

cerevisiae'dir. Otoklavlanmış patates kabuğuna ekmek mayası eklenerek biyolojik ön işleme tabi tutulmuş ve hibrit biokütleler elde edilmiştir. *S. cerevisiae* ticari olarak satın alınmıştır. 20 g kuru maya/L içeren maya çözeltisi hazırlanmıştır. 121 °C de 15 dk otoklavlanmış (Sarioglu ve Bisgin, 2007) kabuklar, 80 °C de 24 saat maya çözeltisi ile muamele edilip deneye hazırlanmıştır. Her bir denemede 3 mL maya olacak şekilde erlenlere eklenmiş, 100 rpm de 18 saat boyunca Orbital çalkalayıcı (JSR, JSOS – 700) ile çalkalanmıştır. İşlem sonunda etüvde kurutularak (NÜVE NC 40M) kuru ağırlık başına giderilen metal miktarını hesaplanmıştır. Patates kabuğuna yapılan bu “*biyolojik ön işlem*” “P-PP-Y” olarak isimlendirilmiştir.

4.2.Adsorbent Karakterizasyonu

Patates kabuğunun karakterizasyonunun çıkarılması için kullanılan analizler ve yöntemler Tablo 1 de verilmiştir.

4.3.Atıksuyun Karakterizasyonu

Çalışmada orijinal atıksu ile çalışılması böylece laboratuvar ortamında yapılacak bu projenin ileride uygulanabilirliğinin olması hedeflenmiştir. Bu nedenle içinde ağır metal bulunan tekstil atıksuyu ile çalışılmıştır. Çalışma kapsamında sorpsiyonda etkili olan genel su kalitesi parametreleri (pH, sıcaklık, iletkenlik, tuzluluk vs.) (Bench Top Water Quality Meter, AZ86505) ile atıksu kalitesini gösteren Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ), Askıda Katı Madde (AKM), Toplam Madde (TM), Alkalinite vs. ve ağır metallerin analizleri standart metotlara uygun olarak (APHA–AWWA, 1989) yapılmıştır.

Tablo 1. Patates Kabuklarının Analiz Yöntemleri

Analiz	Yöntem
Boyut analizi	Elek Analizi
pH	Grewelling and Peech, 1960 ve Allen 1989
Tuzluluk	Grewelling and Peech, 1960 ve Allen 1989
İletkenlik	Grewelling and Peech, 1960 ve Allen 1989
Nem	ASTMD 2016-74
Kül	ASTMD-1102-84
Uçucu Madde	ASTME 897-8 70,11
Ham protein	ASTM E-258-67
C/N	Orandan
Ağır metaller	EPA, Method 3010

4.4.Adsorpsiyon Deneyleri

Denemelerde fiziksel (öğütülmüş otoklavlanmamış ve öğütülmüş otoklavlanmış), kimyasal (NaOH ile muamele edilmiş) ve biyolojik (*S. cerevisiae* ile muamele edilmiş) ön işlemlere tabi tutulmuş kabuk ile ön işleme tabi tutulmamış kabuk olmak üzere beş adet adsorbent atıksuyun içindeki metallerin giderim verimliliği açısından incelenmiştir. Bu verime etki eden en iyi koşullar (pH, temas süresi ve sorbent miktarı) ayrıca araştırılmıştır. Metallerin gidermek için gereken en uygun koşulların belirlenmesi için 1. Farklı sorbent miktarları (0,2 g/L ile 2 g/L arası), 2. Farklı temas süreleri (5 dk ile 24 saat aralığında), 3. Farklı pH değeri (2 ve 8 aralığında değişen değerler) olarak çalışmalar yürütülmüştür. Metal çözeltilisinin pH'sı 0,1 M HNO₃ ve 0,1 M NaOH ile ayarlanmıştır. Deneyler kesikli sistem olarak çalıştırılmıştır. Deneyler 150 devir/dakika karıştırıcılarda erlenler içinde gerçekleştirilmiştir. Deneme sonunda alınacak süpernatant 20 dakika 4000 rpm santrifüjlenerek (veya 0,45 µm filtre kâğıdı kullanarak Whatman) ayrılmış ve sonra Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilim Uygulama ve Araştırma Merkezi Laboratuvarında bulunan atomik absorpsiyon (Thermo Scientific, ICE-3000 series) cihazında okutulmuştur.

4.5.Adsorpsiyon Deneylerinin Değerlendirilmesi

Deneylerden sonra süpernatant (suda kalan) ağır metal değişimi Denklem 2'ye göre hesaplanıp, yorumlanmıştır.

5. BULGULAR

Materyal ve metotta bahsedildiği gibi iki kere patates alımı yapıp, örnekler analiz için hazırlanmıştır. Her iki alımdaki elek analiz sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. Kot fabrikasından temin edilen gerçek atıksuyun karakteristiği Tablo 3'de ki gibi elde edilmiştir.

5.1.Çinko Giderimi

Denemelerde partikül boyutunun etkisini anlamak ve proje boyunca kullanılacak en uygun partikül boyutunun tespiti için 5 -30 dk lık temas sürelerinde numune alınmıştır. Adsorpsiyonun ilk 5 dk içinde gerçekleştiği belirlenmiştir. Şekil 3'de görüleceği üzere 1 mm'den büyük parçaların adsorpsiyonun beklenenin tersine küçük dane boyutlu patates kabuklarından yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Farklı ön işleme tabi tutulmuş sorbentlerin metal giderimi için en uygun pH'ın bulunması için pH 3, 4, 6, 7, 8 ve 10 ile denemeler yapılmıştır. Şekil 4'de görüleceği gibi bazik koşullarda giderim verimi artmıştır. Maya (P-PP-Y) ile yapılan ön işlemlili patates kabuğu dışındakilerde pH 8 ile pH 10 giderim verimleri birbirine yakın bulunmuştur. Atıksuyun pH sınırın da bu pH'lar arasında olması nedeniyle sonraki denemeler için orijinal pH seçilmiştir.

Tablo 2. Elek Analizi Sonuçları

		1. Çuval		2. Çuval	
		Miktar (gr)	Dağılım oranı (%)	Miktar (gr)	Dağılım oranı (%)
Tane boyutu	>4mm	23,80	4,50	13,88	4,37
	4mm-2mm	161,85	30,61	86,01	27,10
	2mm-1mm	180,66	34,16	85,95	27,08
	1mm-0,5mm	57,87	10,94	41,40	13,04
	<0,5mm	104,60	19,78	90,14	28,40
Toplam		528,78	100	317,38	100

Tablo 3. Kot Tekstil Atıksuyunun Karakteristiği

Parametre	Değer
pH	8,88 ± 0,15
İletkenlik (µS)	1453 ± 27
Tuzluluk (ppt)	0,75 ± 0,02
Toplam Çözünmüş Katı, TDS (mg/L)	727 ± 5
Toplam Katı, TS (mg/L)	825 ± 1 8
Kimyasal Oksijen İhtiyacı (mg/L)	1675 ± 27
Zn (mg/L)	2,2 ± 0,03
Fe (mg/L)	1,2 ± 0,03

Farklı ön işlemlere tabi tutulmuş adsorbentlerin en iyi metal giderimini bulmak için 0, 5, 15, 30, 60, 120 ve 1440 dk olacak şekilde farklı temas sürelerini içeren deney düzenekleri kurulmuştur. Şekil 5’den de anlaşılabacağı gibi ilk 5 dk içinde Zn giderimin yüksek olduğu tespit edilmiştir.

5.2.Demir Giderimi

Denemelerde parçacık boyutunun etkisini anlamak ve proje boyunca kullanılacak en uygun parçacık boyutunun tespiti için 5 -30 dk. lık temas sürelerinde numune alınmıştır. Adsorpsiyonun ilk 5 dk. içinde gerçekleştiği belirlenmiştir. Şekil 6’da görüleceği üzere 1 mm’den büyük parçaların adsorpsiyonun beklenenin tersine küçük dane boyutlu patates kabuklarından yüksek olduğu tespit edilmiştir.

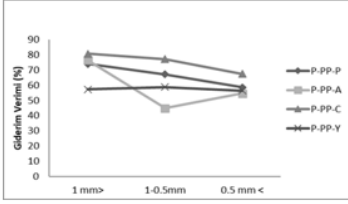
Farklı ön işleme tabi tutulmuş adsorbentlerin metal giderimi için en uygun pH'ın bulunması için pH 3, 4, 6, 7, 8 ve 10 ile denemeler yapılmıştır. Şekil 7'de de görüleceği gibi bazik koşullarda giderim verimi artmıştır. Maya (P-PP-Y) ile yapılan ön işlemlili patates kabuğu dışındakilerde pH 8 ile pH 10 giderim verimleri birbirine yakın bulunmuştur. Zn giderim araştırmasında olduğu gibi bu araştırmada da orijinal pH seçilmiştir.

Şekil 8'den de anlaşılacağı gibi P-PP-Y hariç ilk 5 dk içinde Fe giderimin yüksek olduğu tespit edilmiştir. P-PP-Y içinde 15 dk da yüksek adsorpsiyon gözlenmiştir.

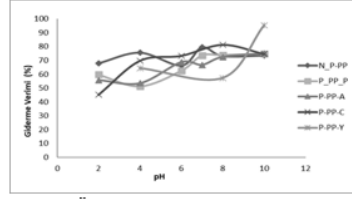
6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada; farklı ön işleme tabi tutulmuş adsorbentlerin tekstil atıksuyundaki metal giderimi izlenmiştir. Sonuçlar ve tartışmaları aşağıda listelenmiştir.

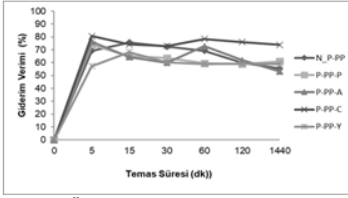
* Adsorbanın yüzey alanının büyük olması demek, onun adsorban ile temasının daha fazla olması nedeniyle alan büyüdükçe adsorpsiyon da artmaktadır (Aytan, 2010). Yüzey alanı arttırmak için 3 farklı dane boyutu; 1 mm'den büyük, 1-0,5mm, 0,5mm den küçük olarak çalışılmıştır. Enteresan bir sonuç gözlenmiştir. Partikül boyutu küçüldükçe, yani yüzey alanı arttırıldıkça giderim verimi artmamış hatta azalma göstermiştir. Maalesef bunun nedenini araştırmak için gerekli olan ileri analizler (SEM gibi) ekonomik nedenlerle yapılamamıştır.



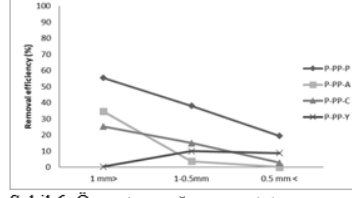
Şekil 3. Dane çapına göre Zn metalinin giderim verimi (t=5 dk) (150 rpm).



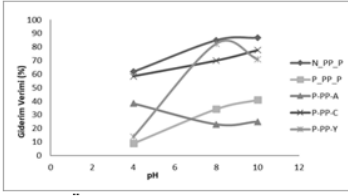
Şekil 4. Ön arıtıma uğramış patates kabuklarının Zn metalini giderim verimi (t=5 dk) (150 rpm).



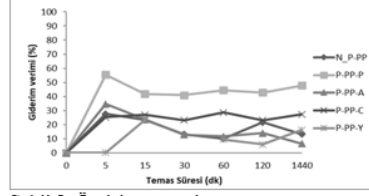
Şekil 5. Ön arıtıma uğramış patates kabuklarının Zn metalini giderim verimi (t=5 dk) (150 rpm) (orijinal pH= 8.2).



Şekil 6. Ön arıtıma uğramış patates kabuklarının Fe metali giderim verimi (t=5 dk) (150 rpm).



Şekil 7. Ön arıtıma uğramış patates kabuklarının Fe metali giderim verimi (t=5 dk) (150 rpm) (orijinal pH= 8.2).



Şekil 8. Ön işleme uğramış patates kabuklarının zamana bağlı Fe metali giderim verimi (150 rpm).

* İşlem yapılmamış patates kabuğunda (N-PP-P) Zn giderimi 5. dak da %69 iken, patates kabuklarına ön işlem yapıldığında (P-PP-Y hariç) Zn giderimin %80'e kadar çıktığı gözlenmiştir. Benzer olarak işlem yapılmamış patates kabuğunda 5. dk giderim %12 gözlenirken, ön işleme tabi tutulmuşlarda Fe giderimi %60'lara yavaşmıştır.

* İlk 5 dk içinde Zn ve Fe gideriminin (P-PP-Y hariç) en yüksek olduğu tespit edilmiştir. Adsorpsiyonun hızlı gerçekleştiğini göstermektedir. Adsorbent etrafını saran sıvı filmdeki maddeyi hızla adsorplamaktadır. Kirletici ile

adsorbentin ilk temas anında adsorpsiyonun hızının yüksek olduğu anlaşılmaktadır.

* Mantarla ön muamele edilmiş absorbanlarda (P-PP-Y) hem Zn hem de Fe giderimi 15. dk da gerçekleşmiştir. Literatür araştırmalarında ilk defa 2007’de, lignoselülozik biyokütle olan papaya ağacı bir mantar türü olan *Phanerochaete chrysosporium* ile hibritleştirilerek Ni giderimi araştırılmıştır. Hibrit biyokütlenin tek başına mantarın gideriminden daha fazla Ni’i giderdiği ifade edilmiştir (Iqbal ve Saeed, 2007). Ancak bu çalışmada, ekmek mayası muhtemelen patates kabuklarındaki boşlukların kapanmasına, buda adsorpsiyonun azalmasına, neden olduğunu düşündürmektedir.

* Atıksu gerçek tekstil atık suyu olduğundan metaller arasında giderim incelendiğinde; ön işleme tabi tutulmuş patates kabuklarının Zn’yi Fe’den daha fazla giderdiği gözlenmiştir. Son olarak adsorbatın yüzeye difüzyonu ve adsorbentin gözenekleri arasına girebilme kabiliyetini etkilediğinden adsorbatın büyüklüğü de çok önemlidir (Sawyer ve McCarty, 1978). Molekül ağırlıkları bakımından incelendiğinde Zn’nin Fe’den daha büyük olmasına rağmen giderimin fazla olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak; çoğu tarım ülkesinin en önemli tarım ürünü patatestir. Patatesin taze ağırlığının yaklaşık %12’si patates soyulduğunda atık olarak atılmaktadır (Arampatzidou ve Deliyanni 2016). Tüm bu çalışma göstermiştir ki bu artıklar gübre amacıyla toprağa gömülmesi dışında metallerin atıksudan gideriminde de kullanılabilir. Üstelik bu işlem için dane boyutun 1-1,5 mm arasında olması ve basit ön işlem (NaOH ile yıkama) yapılması adsorbentin hazırlanmasında yeterlidir. Sadece 5 dk bir çalkalama ile yüksek giderim elde edilebilir ki bu da çok küçük bir enerji harcaması demektir. Örneğin laboratuvar ölçekli çalkalayıcının harcadığı enerji 25 wattlıktır. Bu da 25×10^{-3} kW/h

harcama demektir. 2024 tarifesine göre sanayi 1kWh için 4.37 TL ödemektedir. 1 m³lük bu atıksu için 20,83 kWh enerjiye ihtiyaç vardır. Yani bu yöntemle 1 m³ atıksu arıtılacaksa, sanayici çalkalama cihazından dolayı 91.02 TL'lik fatura ile karşılaşacaktır. Buna ek olarak patates kabuğunu arıtmaya getirme ve patates kabuğunun parçalanması ek maliyetler olmakla beraber diğer yöntemlere göre kıyaslandığında ucuz ve uygulanabilir bir proses olduğu söylenebilir.

KAYNAKÇA

- Abdullah, M.A., Nazir, M.S., Raza, M.R., Wahjoedi, B.A., Yussof A.W. (2016). Autoclave and ultra-sonication treatments of oil palm empty fruit bunch fibers for cellulose extraction and its polypropylene composite properties, *Journal of Cleaner Production*, 126, 686-697.
- APHA–AWWA (1989). Standard methods for water and wastewater (17th Ed.) *American Public Health Association/American Water Works Association*, Washington, DC, USA.
- Arampatzidou, A.C., Deliyanni, E.A. (2016). Comparison of activation media and pyrolysis temperature for activated carbons development by pyrolysis of potato peels for effective adsorption of endocrine disruptor bisphenol-A, *Journal of Colloid and Interface Science*, 466, 101–112.
- Asuquo, E.D., Martin, A.D. (2016). Sorption of Cadmium (II) Ion from aqueous solution onto sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) Peel adsorbent: characterisation, kinetic and isotherm studies, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4 (4 Part A), 4207–4228.
- Aytan, N. (2010). Atık madde olarak patates kabuğundan biyosorban üretimi ve metilen mavisi için adsorpsiyon karakteristikleri, *İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul.
- Collins, Y.E., Stotzky, G. (1989). Factors affecting the toxicity of heavy metals to microbes. in metal ions and bacteria, *Edited by T.J. Beveridge and R.J. Doyle. 31-90, John Wiley and Sons*, New York.
- Erçalışkan, K., Atakav, Y., Uygut, M.A., Tanyıldızı, M.Ş. (2014). Çam kozalağıyla basic blue 3 bazik boyasının

- adsorpsiyonunun modellenmesi, 11. *Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi* (2-5 Eylül 2014), Eskişehir.
- Farooq, U., Kozinski, J.A., Khan, M.A., Athar, M. (2010). Biosorption of heavy metal ions using wheat based biosorbents—a review of the recent literature, *Bioresource Technology*, 101 (14), 5043–5053.
- Feizi M., Jalali M., 2015. Removal of Heavy Metals from Aqueous Solutions Using Sunflower, Potato, Canola and Walnut Shell Residues, *Journal of The Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 54, 125–136.
- Foyer, C.H., Lopez-Delgado, H., Dat, J.F., Scott, I.M., (1997). Hydrogen peroxide- and glutathione- associated mechanisms of acclimatory stress tolerance and signalling, *Physiologia Plantarum*, 100, 241-254.
- Gautam, R. K., Mudhoo, A., Lofrano, G., Chattopadhyaya, M.C., (2014). Biomass-Derived biosorbents for metal ions sequestration: adsorbent modification and activation methods and adsorbent regeneration, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2, 239–259.
- Halliwell, B., Gutteridge, J.M.C. (2002). *Free Radicals in Biology and Medicine*. Third Edition, Oxford University Press.
- Iqbal, M., Saeed, A. (2007). Production of an immobilized hybrid biosorbent for the sorption of Ni (II) from aqueous solution, *Process Biochemistry*, 42 (2), 148–157.
- Karaca, C., Öztürk, H.H., Ekinci, E. (2016). Aydın ilinde bitkisel kökenli tarımsal biyokütle potansiyeli ve enerji üretimi amacıyla değerlendirilmesi, 2. *Ulusal Biyoyakıtlar Sempozyumu*, 27-30 Eylül 2016, Samsun.
- Karaman, C., Aksu, Z. (2014). Kurutulmuş portakal posasından elde edilen adsorbentin anyonik ve katyonik

- boyarmaddelerin adsorpsiyonunda kullanılabilirliğinin araştırılması, *11. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi*, 2-5 Eylül 2014, Eskişehir.
- Kılıç, F., Sarıcı Özdemir, Ç. (2014). badem kabuğu kullanılarak sulu çözeltilerden metilen mavisi adsorpsiyonu. *11. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi*, 2-5 Eylül 2014, Eskişehir.
- KKAYG, (2004). *Kıyı Kentlerinde Kentsel Atıksu Yönetiminin Geliştirilmesi Eğitim Kursu Notları*, Şubat, 2004, http://144.122.60.215/pages/dokumanlar/manual_tr.pdf.
- Küntaş, A., Tuncay, E., Uzunoğlu, D., Özer, A. (2014). Acid Blue 324 boyarmaddesinin levrek balığı puluna adsorpsiyonu, *11. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi*, 2-5 Eylül 2014, Eskişehir.
- Moreno-Piraján, J.C., Giraldo, L. (2011). Activated carbon obtained by pyrolysis of potato peel for the removal of heavy metal Copper (II) from aqueous solutions, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 90 (1), 42–47.
- Noll, K.E., Gounaris, V., Hou, W. (1991). *Adsorption Technology for Air and Water Pollution Control*, Lewis Publishers, Inc., USA
- Okumuş, E. (2007). Küçükçekmece Gölü sedimentinde ağır metal (Zn^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+}) adsorpsiyonu, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Müh. ABD Yüksek Lisans Tezi*.
- Okur, M., Şenöz, Ö. (2014). Asit Violet 90 Boyarmaddesinin Fındık Kabuğu ile Adsorpsiyonu,. *11. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi*, 2-5 Eylül 2014, Eskişehir.
- Özer, A. (1987). körfeze açılan dereler ve getirdikleri kirlilikler, *İzmir Çevre Kirliliği ve Sağlık Sempozyumu İzmir Tabip Odası*, 11-13 Mart.

Patates Mayıs Bülteni.pdf, Mayıs 2022,
<https://www.tarimorman.gov.tr/BUGEM/Belgeler/B%C3%BCltenler/MAYIS%202022/Patates%20May%C4%B1s%20B%C3%BClteni.pdf> Bitkisel Üretim Genel Müdürlüğü, Tarla ve Bahçe Bitkileri Daire Başkanlığı

Sapci, Z.; Ustun, B. (2005). Importance of water & sediment quality for lagoons. a case: Küçükçekmece Lake in Turkey, *International Conference on Environmental Science and Technology*, Vol. II, Pp 341-347, American Science Press, 23-26 Oct. New Orleans, The United States Of America (USA).

Sapci, Z.; Ustun, E.B. (2014). Heavy metal uptakes by *myriophyllum verticillatum* from two environmental matrices: the water and the sediment, *International Journal of Phytoremediation*, 17 (3), 290-297. DOI: 10.1080/15226514.2014.898022

Sarioglu, M.; Bisgin, T. (2007). Removal of maxilon yellow gl in a mixed methanogenic anaerobic culture, *Dyes and Pigments* 75 (3), 544–549.

Sawyer, C, N., McCarty, P, L. (1978). *Chemistry for Environmental Engineering*, Third Edition.

Shukla, A., Zhang, Y.H., Dubey, P., Margrave, J.L., ve Shukla, S.S. (2002). The role of sawdust in the removal of unwanted materials from water, *Journal of Hazardous Materials B*, 95; 137 – 152

Soto-Jimenez, M., Paez- Osuna, F., Morales-Hernandez F. (2001). Selected Trace Metals in Oysters (*Crassostrea Iridescens*) and Sediment from the Discharge Zone of the Submarine Sewage Outfall in Mazatlan Bay (Southeast Gulf of California): Chemical Fractions and

- Bioaccumulation Factors, *Environmental Pollution*, 114 (3), 357-370.
- Szczygiel, J., Dyrek, K., Kruczała, K., Bidzińska, E., Brożek-Mucha, Z., Wenda E., Wieczorek, J., Szymonka, J. (2014). Interactions of chromium ions with starch granules in an aqueous environment, *Journal of Physical Chemistry B*. 118 (25), 7100–7107.
- Szymonska, J., Molenda, M., Wieczorek, J. (2015). Study of quantitative interactions of potato and corn starch granules with ions in diluted solutions of heavy metal salts, *Carbohydrate Polymers*. 134, 102–109.
- Şapçı Ayas, Z., Öztürk, D., Durmaz, Bekmezci H. (2019). Effect of adsorbent pretreatment on COD removal in the adsorption of textile industry wastewater with potato husk, *ISPEC 5th International Conference On Engineering & Natural Sciences*, December 20-22, Van, Turkey.
- Şapçı, Z., Üstün, B. (2002). Sediment kirliliğinin besin zinciri yoluyla canlıları etkilemesi, 4. *Ulusal Kıyı Mühendisliği Sempozyumu*, Sempozyum Kitabı, Antalya, Türkiye.
- Tchobanoglous, G., Burtaon, F, L., ve Stensel, D, H. (2003). Wastewater engineering, treatment, disposal and reuse 4th Edition, *Metcalf & Eddy, Inc., McGraw-Hill, New York*
- Tisler, T., Zargorc-Koncan, J. (1999). Toxicity evaluation of wastewater from pharmaceutical industry to aquatic organisms, *Water Science and Technology*. 39 (10-11); 71-76.
- Topal, M., Arslan Topal, E.I., Aslan, S. (2011). Limon kabuğu kullanarak sulu çözeltilerden Cu (II) giderimi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 27 (3); 265-270.

- Uslu, A.B., Elbağlı, O.G., Şen Y., Uzunoğlu, D., Özer A. (2014). Acid blue 121 boyar maddesinin muz kabuğuna kesikli sistemde adsorpsiyonunun araştırılması, *11. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi*, 2-5 Eylül 2014, Eskişehir.
- Ustun, B., Okumus, E. (2006). Orchestration conditions in heavy metal adsorption onto sediment, Sixth International Conference on Coastal Environmental 2006, *Wessex Institute of Technology*, 5-7 Haziran 2006, Rodos – Yunanistan
- Yetilmezsoy, K., Demirel, S. (2008). Artificial neural network (ANN) approach for modeling of Pb(II) adsorption from aqueous solution by Antep pistachio (*Pistacia Vera L.*) Shell, *Journal of Hazardous Materials*, 153 (3), 1288-1300.

MİKROPLASTİK KİRLİLİĞİ: MİKROPLASTİKLERİN KAYNAKLARI VE KARAKTERİZASYONU

Saadet HACISALİHOĞLU¹

1. GİRİŞ

Plastik kavramı, "esnek ve kolay şekillendirilebilen" anlamına gelir, ancak son yüz elli yılda polimer adı verilen bir malzeme kategorisinin adı olarak da kullanılmaktadır. Plastikler, yüksek moleküler ağırlığa sahip ve tekrar eden molekül zincirlerinden oluşan polimerlerdir. Polimerler doğada bol miktarda bulunur, bunun en iyi örneği bitkilerin hücre duvarlarını oluşturan çok yaygın bir doğal polimer olan selülozdur. Polimerlerden elde edilen plastiklerin üretimi, yaygın kullanımları, hafiflikleri, güçlü yapıları, korozyon direnci ve düşük maliyetleri nedeniyle hızla artmaktadır. Bu özellikler plastiğin modern yaşamın vazgeçilmez bir parçası haline gelmesine neden olmuştur. Dünya çapında plastik kullanımındaki hızlı artışla birlikte, çevrede endişe verici bir plastik birikimi meydana geldi. Özellikle 1950'den 2015'e kadar kullanılan plastiklerin çoğu çöplüklerde depolandı veya çevreye atıldı. Bu durum mikroplastik adı verilen plastik parçacıkların doğada önemli bir sorun haline gelmesine yol açmıştır (Panko vd., 2019).

Mikroplastikler, suda çözünmeyen, boyutu 5 mm'den küçük kalıcı plastik parçacıklar olarak tanımlanır (Leslie ve ark. 2017). İlk tanımlandıkları günden (2004) bu yana önemli çevresel

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, saadet.hacisalihoglu@btu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-5969-4180.

kirleticiler olarak dikkat çekmişlerdir (Tagg ve ark. 2017). Mikroplastikler topraklara, su sistemlerine ve denizlere yayılarak ekosistemlere ve canlı organizmalara zarar verme potansiyeline sahiptir. Plajlarda, yüzey sularında, tortularda ve birçok deniz organizmasında bulunabilirler. Bu atıklar hem biyolojik çeşitliliği hem de insan sağlığını olumsuz yönde etkilemektedir (Auta vd., 2017; Andrady, 2015).

Birçok araştırma, mikroplastiklerin canlı organizmalar üzerindeki etkilerini incelemiş ve organizmalarda ani ve kronik, mekanik ve kimyasal hasara neden olabilecekleri sonucuna varmıştır (Singh ve Sharma, 2016). Mikroplastik kirliliği çevre ve insan sağlığı için ciddi bir endişe kaynağıdır ve bu konuda alınacak önlemler acil önem taşımaktadır (Hill et al., 2021).

2. PLASTİK: TARİHİ VE GELİŞİMİ

Doğal kauçuk ve diğer doğal polimerler insanlık tarihinde önemli bir rol oynamıştır. M.Ö. 1600'den beri insanlar doğal kauçuğu toplamış ve kullanmıştır. Bununla birlikte, doğal kauçuğun bazı dezavantajları vardır. Özellikle sıcak havalarda yumuşayabilme, soğuk havalarda sertleşip çatlayabilme gibi. Bu nedenle, endüstriyel kullanım için daha kararlı ve yönetilebilir malzeme arayışları, termoplastiklerin geliştirilmesine yol açmıştır (Güleç, 1990).

19. yüzyılın ortalarında, kauçuğun vulkanizasyonu (kükürtleme) Charles Goodyear ve diğer mucitler tarafından keşfedilmiştir. Bu işlem, doğal kauçuğun sıcaklığa ve kimyasal etkilere karşı daha dayanıklı hale gelmesini sağlamıştır. Bu durum, kauçuğun daha geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmasını imkan sağlamıştır (Prata ve diğerleri, 2020).

Ayrıca, 19. yüzyılda sentetik polimerlerin gelişmesiyle birlikte plastik ve kauçuğun kullanımı daha da yaygın hale

gelmiştir. Özellikle 1907 yılında Leo Baekeland tarafından keşfedilen bakalit, ilk sentetik plastiklerden birisidir. Bu durum, plastiklerin endüstriyel ve günlük yaşamda çok daha yaygın hale gelmesine yol açmıştır (Rhodes, 2018).

'Plastik' terimi, kalıplanabilen veya şekillendirilebilen maddeleri tanımlamak için kullanılmıştır. Kökeni, her ikisi de kalıp veya şekil anlamına gelen eski Yunanca 'plastikos' kelimesine ve Latince 'plasticus' kelimesine dayanmaktadır. Bu kavram genellikle polimerik maddeleri ifade etmek için kullanılır ve endüstriyel, ticari ve günlük hayatta geniş bir kullanım alanına sahiptir (Güven vd., 2017).

2.1. Plastik Türleri

Plastikler, büyük zincir benzeri moleküllerden oluşan polimerlerdir. Bu polimerler, tekrar eden monomer birimlerinin bir araya gelmesiyle oluşur. Her monomer birimi, polimer zincirindeki tek bir birimi temsil eder. Polimerler, tekrar eden birçok monomerin uzun zincirleridir ve çoğu plastik bu yapıya sahiptir (Crawford ve Quinn, 2016; Güler ve Çobanoğlu, 1997).

Plastikler, termal davranışlarına göre termoset ve termoplastik olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır (Venghaus ve Barjenbruch, 2017).

Termoplastikler, moleküller arasındaki zayıf Van Der Waals kuvvetleri veya düzenli moleküler sıralama ile bir arada tutulan plastiklerdir. Bu tür plastikler ısıtıldığında yumuşar ve esnek hale gelir, ancak soğutulduğunda tekrar katılaşır. Polietilen, polietilen tereftalat, polipropilen ve polivinilklorür türleri örnek verilebilir (Crawford ve Martin, 2020).

Termoset plastikler, oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda çapraz bağlı bir yapıya dönüşebilen plastiklerdir. Bu plastiklerde, polimer zincirleri arasındaki çapraz bağlar onları herhangi bir sıcaklıkta katı hale getirir. Bu nedenle, bir kez

oluştuktan sonra eritilemezler veya tekrar şekillendirilemezler. Formaldehit reçineleri ve poliüretanlar örnek verilebilir (Aydın, 2020).

Kısacası, termoplastikler ısı ile şekil değiştirebilirken, termoset plastikler sıcaklık ile stabil bir yapıya sahiptir. Bu iki temel plastik türü, kullanım alanları ve geri dönüşüm olanakları açısından farklılık gösteren farklı termal davranışlara ve kimyasal yapılara sahiptir (Kılıç ve Yüce, 2014; Crawford ve Martin, 2020; Koç ve Bilgesu, 2007).

2.2. Plastiklerin Özellikleri ve Kullanım Alanları

Plastikler hafif, esnek, kolay işlenebilen, korozyona dayanıklı, yalıtkan, geri dönüşümü kolay ve düşük maliyetli olmaları nedeniyle birçok endüstri için vazgeçilmezdir ve geniş bir kullanım alanına sahiptir (Yurtsever, 2015).

Kendine özgü bir forma sahip olmayan plastiklerin katıdan sıvıya geçişi yavaş olmasına rağmen sıcaklığa karşı dirençleri düşüktür. Ancak plastikler çevresel, atmosferik ve kimyasal etkilere karşı dayanıklıdır. Ayrıca tekrar tekrar kullanıma uygun oldukları için yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Ekşi, 2007).

Plastik, kimya sektörünün önemli bir buluşu olarak hayatımızın her alanında karşımıza çıkan vazgeçilmez malzemelerden biridir. Ev eşyalarından inşaat malzemelerine, elektronik ürünlerden otomotiv sektörüne kadar geniş bir yelpazede kullanılan plastikler, endüstrinin çeşitli alanlarında önemli rol oynamaktadır (Kılıç ve Yüce, 2014; Ekşi, 2007).

Elektrik-elektronik sektöründe kullanımı giderek artan plastikler, esnekliği ve yalıtım özellikleri ile ön plana çıkmaktadır. Tarım alanlarında plastikler, sera örtüleri ve sulama boruları gibi uygulamalarda verimliliği artırmaktadır. Ambalaj sektöründe yaygın olarak kullanılan plastik ürünler, günlük

hayatımızın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. İnşaat sektöründe plastik, dayanıklı ve sağlam yapıları ile dikkat çekmektedir. Pencere ve kapı profillerinden su borularına kadar çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Bu sayede plastik, modern yaşamın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir ve endüstrinin birçok sektöründe kullanılmaktadır (Rhodes, 2018).

2.3. Plastik Atıklar

Plastik ürünler, modern endüstrinin ve tüketicilerin taleplerine cevap veren çok yönlü ve ekonomik bir malzeme olduğu için geniş bir kullanım alanına sahiptir (Sharuddin vd., 2016). İnşaat, sağlık, elektronik, tarım, otomotiv ve ambalaj endüstrileri gibi çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu yaygın kullanımın bir sonucu olarak plastik atıklar da küresel bir çevre sorunu haline gelmiştir. Özellikle gelişmiş ülkelerde, belediye katı atıklarının büyük bir bölümünü oluşturan plastikler, önemli bir çevresel ve ekonomik sorun oluşturmaktadır (Calero vd., 2021). Bu konuda yapılan araştırmalar, dünya genelinde atıkların %60 ila 80'inin plastik kaynaklı olduğunu göstermektedir (Brate vd., 2014; Avio ve diğerleri, 2017).

Plastik atıkların çoğu polietilen, polietilen tereftalat, polipropilen, polistiren ve polivinilklorür gibi ana plastik türlerinden kaynaklanmaktadır. Bu plastik türleri, küresel plastik üretiminin yaklaşık %90'ını oluşturmaktadır (Venghaus ve Barjenbruch, 2017).

Plastik atıklar çevre, ekonomi, sağlık ve estetik açıdan ciddi sorunlara neden olmaktadır (Aydın, 2020). Bu nedenle, plastik atıkların yönetimi çevrenin korunması için kritik öneme sahiptir. Plastik üretimi, kullanımı ve atık yönetimi stratejilerinin sürdürülebilirlik ilkelerine dayalı olarak geliştirilmesi bu sorunun çözümü için önemli adımlar olacaktır.

Plastiklerin sürdürülebilir üretimi, kullanımı ve atık yönetimi, gelecek nesiller için yaşanabilir bir çevrenin korunmasına katkı sağlayacaktır. Ayrıca bu alandaki bilimsel araştırmaların ve teknolojik gelişmelerin ilerlemesi, plastik atıkların azaltılması ve etkin yönetimi için önemli bir potansiyel sunmaktadır (Lusher vd., 2020).

3. MİKROPLASTİK: KAYNAKLAR

Plastikler, mikroplastik (MP) adı verilen, boyutları 5 mm'den küçük olan ve çevreye dağılabilen milyonlarca tehlikeli ve küçük parçacığa ayrılabilir (Kazour ve diğerleri, 2019).

Deniz, tatlı su ve tarım ekosistemlerinin yanı sıra atmosferde de mikroplastiklerin varlığı bilimsel literatürde kapsamlı bir şekilde belgelenmiştir (Pichtel ve Simpson, 2023; Duis ve Coors, 2016).

3.1. Mikroplastik Kaynakları

Mikroplastiklerin ortamlara yayılması çeşitli kaynaklardan gelmektedir. Özellikle mikroplastiklerin %20'si doğrudan denizlere ve okyanuslara ulaşırken, %80'i kara kaynaklı kirlilikten kaynaklanmaktadır. Bu kirlilik kaynakları arasında evsel atıklar, endüstriyel atıklar, tarımsal faaliyetler ve denizcilik faaliyetleri gibi insan faaliyetleri önemli bir rol oynamaktadır (Aslan, 2018). Tarımsal faaliyetler, plastik malçlar ve sulama için kullanılan plastikler gibi tarımsal uygulamalarda bir mikroplastik kaynağıdır. Ek olarak, tarımdan kaynaklanan akış da bu mikroplastikleri deniz ortamına taşıyabilir (Rochman ve diğerleri, 2016). Endüstriyel atıkların yanı sıra evsel atıklar da mikroplastiklerin su ortamına girmesine katkı sağlamaktadır. Özellikle evsel atık su arıtma tesislerinden çıkan mikroplastikler sucul ekosistemlerde önemli bir kirlilik kaynağıdır (Çelebi vd., 2021; Akarsu ve ark., 2017). Denizcilik faaliyetleri, ticari

balıkçılık ve yasa dışı atık boşaltımı gibi faaliyetler kara kökenli kirleticilerin denizlere ulaşmasına neden olmaktadır (Doğruyol, 2019). Bu kirlilik kaynakları nehirler aracılığıyla da denizlere ulaşabilmektedir. Mikroplastiklerin endüstriyel olarak üretildiği ve atmosferdeki tozlar yoluyla su ortamına taşındığı da bilinmektedir (Rochman vd., 2016; Esmeray ve Armutçu, 2020).

Mikroplastikler birincil ve ikincil mikroplastik kaynaklar olmak üzere iki şekilde gruplandırılmaktadır.

Tablo 1. Yaygın Olarak Kullanılan Mikroplastiklerin Kaynakları

Polimer Türü	Sembol	Uygulama Alanları
Düşük yoğunluklu polietilen	LDPE	Paketleme, genel amaçlı kaplar, duş perdeleri, yer karoları
Yüksek yoğunluklu polietilen	HDPE	Süt kapları, deterjan şişeleri, borular
Polietilen	PE	Süpermarket poşetleri, plastik şişeler
Polipropilen	PP	Paketleme, şişe kapakları, ipler, halılar, laboratuvar ekipmanları, pipetler
Polistiren	PS	Ambalaj köpüğü, tek kullanımlık bardaklar, yiyecek kapları, CD'ler, yapı malzemeleri
Polivinilklorür	PVC	Borular, pencere çerçeveleri, döşeme, duş perdeleri
Polietilen tereftalat	PET	Meşrubat şişeleri, gıda ambalajları, termal yalıtım, blister ambalajlar
Poliamidler	PA	Tekstiller, diş fırçası kolları, misinalar, otomotiv
Polikarbonat	PC	CD'ler, DVD'ler, inşaat malzemeleri, elektronik, lensler

Kaynak: Yurtsever (2015) (Erişim Tarihi 10/09/2024, <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/588157>)

3.2. Birincil Mikroplastik Kaynaklar

Birincil mikroplastikler, boyutları 5 mm'den küçük, günlük hayatta sıklıkla kullanılan ve aşındırıcı özelliğe sahip olan plastiklerdir (Auta ve ark., 2017). Mikroplastiklerin fiziksel özelliklerinin bilinmesi, kaynaklarının tahmin edilmesini kolaylaştırır ve parçacığın mikroplastik olup olmadığı hakkında bilgi sağlar (Lusher ve diğerleri, 2020). Birincil mikroplastikler, el sabunları, yüz temizleyicileri, diş macunları, kişisel bakım ürünlerinde kullanılmak üzere üretilen aşındırıcı maddeler ve

tekstilde kullanılmak üzere sentetik tekstil ürünlerinin yıkanması sonucu üretilen polyester içerikli sentetik liflerdir (PET, naylon, akrilik vb.). Ayrıca sanayi sektöründe hava üfleme teknolojisinde kullanılmak üzere üretilen akrilik, melamin veya polyester temizleyiciler de bu grupta yer almaktadır (Wu vd., 2017). Bu partiküllerin kullanıldıktan sonra kanalizasyon sistemlerinde arıtılmaması durumunda, doğrudan su ortamına ulaşmaktadırlar (Gesamp, 2015).

3.3. İkincil Mikroplastik Kaynaklar

İkincil mikroplastikler, büyük plastiklerin zamanla parçalanıp, 5 mm'den daha küçük boyutlara ulaşması durumunda oluşurlar. İkincil mikroplastiklere örnek olarak, plastik malzemelerden kaynaklanan aşınma parçacıkları, sentetik tekstillerden elde edilen lifler, araç lastiği kalıntıları ve çeşitli plastik parçacıklar verilebilir (Pinto Da Costa ve diğerleri, 2020).

İkincil mikroplastikler, makro boyuttaki plastiklerin rüzgâr, dalgalar ve ultraviyole ışınlarının etkisi altında parçalanmasıyla oluşur (Ugwu ve diğerleri, 2021). Bu işlem sıcaklık ve güneş ışığı gibi çevresel faktörlere göre değişmekle birlikte plastiğin boyutu ve yoğunluğu gibi yapısal özelliklerden de etkilenmektedir. Mikroplastikler, insan faaliyetlerinin bir sonucu olarak doğal ekosistemlere girer. Bu insan faaliyetlerinden en bilinenleri her türlü gemicilik, balıkçılık, tekstil ve endüstriyel süreçlerdir. Atık su arıtma tesislerinden çıkan mikroplastikler de önemli bir kaynaktır. Bu tür mikroplastikler, büyük plastik parçalarının çevresel etkilerle parçalanması sonucu oluşur ve atık su arıtma tesislerinden veya doğrudan çevreye yayılırlar (Boucher ve Friot, 2017).

3.4. Mikroplastiklerin Özellikleri

Mikroplastiklerin fiziksel özellikleri, bu parçacıkların morfolojisini, hareketliliğini ve dağılımını etkilemektedir. (Esmeray ve Armutçu, 2020). Mikroplastikler, doğal maddelere

benzer bir görünüm sergileyerek farklı boyutlardaki organizmalarda fiziksel hasarlara neden olabilirler. Bu nedenle, mikroplastiklerin boyutu, rengi, yoğunluğu ve şekli gibi özellikleri çevresel etkilere farklı şekilde katkıda bulunabilir. Bu özelliklerinin incelenmesi, mikroplastiklerin sucul ekosistemler üzerindeki etkilerini anlamak için önemlidir (Ma, 2020). Tablo 2’de mikroplastiklerin fizikokimyasal özellikleri listelenmiştir.

Tablo 2. Mikroplastiklerin Fizikokimyasal Özellikleri

Özellik	Açıklama
Lipofilik	Yağlara karşı çekimli oldukları için birçok canlının yağ dokularında birikebilirler.
Hidrofobik Yüzey	Yüzeyleri suyu iten bir yapıya sahiptir, bu da hidrofobik özellik gösterir.
Parçalanabilirlik	Biyolojik ve/veya termal olarak parçalanabilirler, bu da çevredeki organizmalar üzerinde olumsuz etkilere yol açabilir.
Yüzücü Özellik	Suda yüzme ve su yüzeyinde kalma eğilimindedirler.
Kirleticileri Taşıma	Çevredeki kirleticileri emme ve taşıma potansiyeline sahiptirler, bu da kirleticilerin biyolojik sistemlere taşınmasına katkıda bulunabilir.
UV Foto-oksidadasyon	Güneş ışığı altında UV radyasyonu, mikroplastiklerin foto-oksidadatif bozunmasına neden olabilir.
Adsorpsiyon	Çevredeki kirleticileri yüzeylerine adsorbe edebilirler, örneğin DDT gibi toksik kimyasallar.
Termooksidadatif Özellik	Termal oksidasyon süreçlerine karşı dayanıklıdır, yani yüksek sıcaklıkta çürüme eğiliminde değildir.
Biyofilm Oluşturma	Yüzeylerinde biyofilm oluşturabilirler, bu da biyolojik etkileşimlerde rol oynayabilir.
Katkı Maddeleri	Plastikleştirici, antioksidan, alev geciktiriciler, anti-statik ajanlar gibi çeşitli katkı maddelerini içerebilirler.
Suda Çözünmezlik	Suda çözünmezler ve sucul ortamlarda uzun süre kalabilirler.
Ekotoksikolojik Etkiler	Çevredeki organizmalar üzerinde toksik etkilere neden olabilir ve zararlı bileşenlerin besin zinciri yoluyla aktarılmasına katkıda bulunabilirler.

Kaynak: Yurtsever (2015) (Erişim Tarihi: 10/09/2024, <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/588157>)

4. MİKROPLASTİKLERİ SINIFLANDIRMA

Mikroplastikler, plastiğin şekli, boyutu, rengi ve türü gibi çeşitli özelliklere göre sınıflandırılabilir.

4.1. Boyuta Göre Sınıflandırma

Avrupa Birliği, denizlerdeki mikroplastiklerin tespiti için bir standart sağlamak amacıyla Avrupa Denizlerinde Deniz Çöpleri için bir İzleme Kılavuzu oluşturmuştur. Bu kılavuzda plastikler, megaplastikler (> 25 mm), mezoplastikler (5 mm - 25 mm), mikroplastikler (1 mm - 5 mm), nanoplastikler (20 μ m - 1 mm) olarak boyutlandırılmıştır (Verschoor, 2015).

Plastik atıklar çeşitli fiziksel, kimyasal ve diğer işlemlerle küçük plastik parçalara ayrılabilir. Bu küçük parçacıklar çevrede birikme, taşınma ve dönüşme eğilimindedirler ve boyutları 5 mm'den küçük olduğunda mikroplastik olarak adlandırılırlar. Bununla birlikte mikroplastik literatüründe farklı alt ve üst boy limitleri kullanılmaktadır. Bu terimin tutarsız kullanımı, küçük mikroplastikler (< 1 mm) ve büyük mikroplastikler (1 mm - 5 mm) arasında ayırım yapmak için daha kapsamlı bir sınıflandırma getirilerek kolayca ele alınabilir. Bu sınıflandırma, mikroplastiklerin çevresel etkilerini daha iyi anlamak ve uygun önlemleri almak için önemlidir (Van Cauwenberghe, 2015).

4.2.Şekle Göre Sınıflandırma

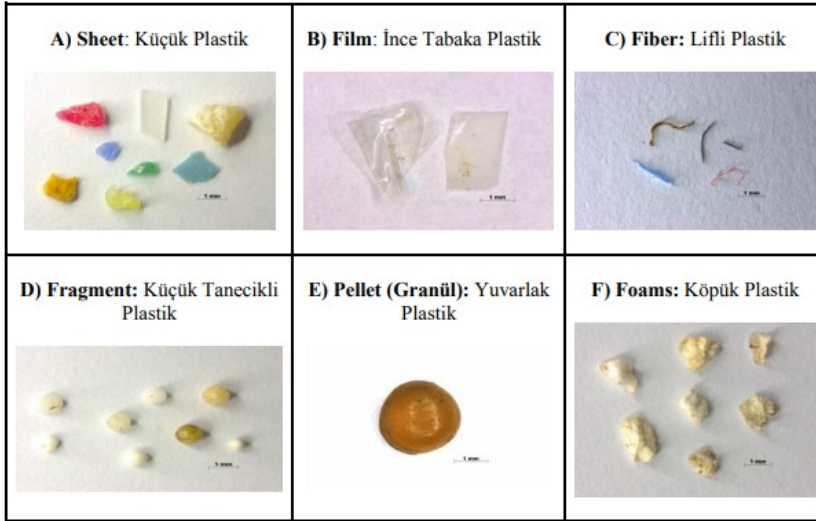
Plastikler amorf veya tek tip şekilli olarak sınıflandırılabilir. Deforme olmuş plastikler amorf olarak tanımlanırken, düzgün şekilli plastikler genellikle farklı bir formda bulunur. Örneğin, yuvarlak, kare veya silindirik olabilirler. Endüstriyel üretimde kullanılan ham plastik malzemeler genellikle pelet formunda bulunur ve bu peletler genellikle silindirik veya yuvarlak şekillere sahiptir. Bu sınıflandırmalar, plastik atıkların çeşitliliğini anlamak ve çevresel etkilerini değerlendirmek için önemlidir (Hidalgo-Ruz, 2012).

4.3. Türe Göre Sınıflandırma

Mikroplastikler çevrede fragman, film, lif, fiber, mikro boncuk, pelet ve köpük gibi farklı formlarda bulunabilirler (Lusher ve ark. 2020).

Boyutları, aşınma ve bozulma seviyesine bağlı olarak değişebilir. Örneğin, plastik parçacık büyükse ve keskin kenarlara ve pürüzlü bir yüzeye sahipse, ortamda kalma süresinin kısa olduğu tahmin edilmektedir. Parçacık pürüzsüz, küçük ve şekil olarak daha yuvarlatılmış ise kimyasal hava koşullarının veya fiziksel kuvvetlerin etkisi altında aşındığı söylenebilir. (Yurtsever, 2015).

Şekil 1. Mikroplastik Türleri



Kaynak: Tutoğlu (2019) (Erişim Tarihi 11/09/2024, <https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/Tezler/Uzmanlik%20Tezi%20%20Ni%20luffer%20Tutoglu.pdf>)

4.4. Renge Göre Sınıflandırma

Mikroplastikler, üretilen plastiğin ana rengini alır, ancak bazı durumlarda atmosferik olaylar nedeniyle renkleri değişebilir (Wu ve diğerleri, 2018). Çalışmalarda farklı renk

sınıflandırmaları belirlenirken, ana renklerin siyah, beyaz ve şeffaf olduğu, ikincil renkler olarak kırmızı, turuncu, sarı, yeşil, mavi ve mor olduğu öne sürülmüştür (Lusher ve ark., 2020). Renk parametresi bazı plastikler için ayırt edici bir özellik olabilirken, polimer yapıları hakkında da bilgi sağlayabilir. Örneğin, beyaz mikroplastik parçaların polietilen ve şeffaf mikroplastik parçaların ise polipropilen olması bu duruma örnektir.

5. MİKROPLASTİK TANIMLAMADA KULLANILAN ANALİTİK TEKNİKLER

Farklı boyutlarda, formlarda ve polimer bileşimlerindeki mikroplastikleri, tek bir analitik tekniğin kullanılması yoluyla karmaşık çevresel matrislerden tam ve güvenilir bir hassasiyetle tanımlamak zordur. Mikroplastikleri tanımlamak için en yaygın olarak kullanılan analitik yöntemler şunlardır:

5.1.Görsel Tanımlama

Mikroplastiklerin (1-5 mm) görsel olarak tanımlanması, morfolojilerine, renklerine ve boyutlarına göre mümkündür. Bu, minimum eğitimle elde edilebilir ve hem uzmanlar hem de profesyonel olmayanlar tarafından tamamlanabilecek basit bir süreçtir. Bununla birlikte, şeffaf renkli 1 mm'lik mikroplastiklerin tanımlanması zor olabilir ve bu da potansiyel olarak yanlış sınıflandırmaya yol açabilir (Hidalgo-Ruz, 2012). Görsel tanımlama, özellikle pahalı analitik cihazların mevcut olmadığı durumlarda, büyük hacimli numuneler için uygun bir yöntemdir. Bununla birlikte, mikroplastikleri görsel olarak tanımlarken, tespit sonuçlarının kalitesi, denetçinin öznelliği, numune matrisi, parçacık şekli ve boyutu gibi birçok faktöre bağlıdır. Ek olarak, bozulmuş mikroplastiklerin görünümünde zaman içinde bazı değişiklikler olabilir ve bu da görsel tanımlamayı daha zor hale getirebilir. İncelenen parçacıkların boyutu küçüldükçe, yanlış

tanımlama olasılığı da önemli ölçüde artmaktadır (Esmeray ve Armutçu, 2020).

5.2.Mikroskopik Gözlem

Stereomikroskopi, yüzlerce mikron içinde bir boyut aralığına sahip mikroplastikler için yaygın olarak kullanılan bir mikroskopik tanımlama yöntemini temsil eder. Taramalı elektron mikroskobu (SEM), plastik benzeri parçacıkların son derece net, yüksek büyütmeli görüntülerini sağlayabilir. Polarize ışık mikroskobu gibi diğer gelişmiş mikroskopi teknikleri, mikroplastiklerin kristallliğini tanımlamak için kullanılabilir. Bu yöntemler yüksek çözünürlüklü görüntüler sağlar ve mikroplastikleri diğer parçacıklardan ayırt edebilir (Abbasi, 2021).

5.3.Fourier Dönüşümü Kızılötesi (FTIR)

Spektroskopisi

Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), belirli bir kimyasal bağ için benzersiz bir kızılötesi spektrum sağlayabilir. Farklı malzemelerin farklı bağ bileşimleri vardır, bu da bilinmeyen bir maddenin spektrumunu bilinen maddelerinkiyle karşılaştırarak tanımlanmasını mümkün kılar (Phu ve diğerleri, 2024). Yüksek güvenilirliği nedeniyle FTIR, çevresel numunelerden elde edilen mikroplastiklerin kimyasal karakterizasyonu için en sık kullanılan tekniklerden biri haline gelmiştir. Mikroplastikler için izleme programlarında FTIR esas olarak iki şekilde kullanılır, bunlar tüm şüpheli parçacıkları taramak veya görsel tanımlama sonuçlarını doğrulamak için bir dizi alt numuneyi analiz etmek şeklindedir (Randhawa, 2023).

5.4.Raman Spektroskopisi

Raman spektroskopisi, çeşitli çevresel matrislerden mikroplastiklerin polimer tanımlaması için sıklıkla kullanılan ve oldukça güvenilir bir tekniktir. Mikroplastiklerin Raman

spektroskopisi ile tanımlanması, monokromatik bir lazer ışınının şüpheli bir numune üzerine ışınlanmasıyla elde edilir. Bu, numunenin spesifik moleküler yapısı ve atomik bileşimi tarafından absorpsiyon, saçılma veya yansıma nedeniyle farklı bir geri saçılma frekansı ile sonuçlanır (Löder ve Gerdts, 2015). Bu bilinen Raman kayması, her polimer için benzersiz bir spektrum üretebilir. Raman spektroskopisi, mikroplastiklerin tahribatsız kimyasal karakterizasyonunu mümkün kılar, bu da numunelerin daha fazla analizinin gerekli olduğu durumlarda oldukça avantajlıdır (Park ve Park, 2021).

6. SONUÇ

Mikroplastik kirliliği günümüzde önemli ve artan bir çevresel felakettir. Hem birincil hem de ikincil kaynaklardan kaynaklanan plastik parçacıklar, deniz, tatlı su ve karasal ekosistemler de dahil olmak üzere dünyanın hemen her köşesine dağılmıştır. Plastiklerin yaygın kullanımı ve dayanıklılığı, çevrede birikmelerine yol açmış, burada kalıcı hale gelmiş ve 5 mm'den küçük mikroplastiklere parçalanmıştır. Mikroplastiklerin etkisi çok yönlüdür, biyolojik çeşitliliği, ekosistem işlevselliğini ve insan sağlığını olumsuz yönde etkiler. Mikroplastikler ortamda bulunan kirleticileri taşıyabilir ve zararlı kimyasalları absorbe edebilirler. Bu durum çevresel ve sağlık etkilerini daha da kötüleştirir.

Mikroplastik kirliliğinin ele alınması, politika değişiklikleri, kamuoyu farkındalığı ve teknolojik ilerlemeleri içeren kapsamlı ve koordineli bir yaklaşım gerektirir. Etkili atık yönetim stratejileri ve plastik üretiminin ve tüketiminin azaltılması, mikroplastik kaynaklarının azaltılması için kritik öneme sahiptir. Ayrıca, mikroplastikleri tespit etmek ve karakterize etmek için analitik teknikler geliştirmek, dağılımları

ve etkileri hakkındaki anlayışımızı geliştirecek ve böylece daha etkili müdahaleler için bilgi sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Abbasi, S. (2021). Prevalence and physicochemical characteristics of microplastics in the sediment and water of Hashilan Wetland, a national heritage in NW Iran. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101782. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101782>
- Aydın, E. (2020). *Yüzey sularında mikroplastik kirliliğinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Erciyes Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Akarsu, S., Ekinci, C., & Tekin, M. (2017). Microplastics in the environment: A review. *Environmental Pollution*, 224, 212-223. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.01.023>
- Andrady, A.L. (2015). Plastics and environmental sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(44), 13509-13514, <https://doi.org/10.1073/pnas.1505339112>
- Aslan, S. (2018). *Mikroplastiklerin su ortamındaki davranışları ve etkileri* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Avio, C.G., Gorbi, S., & Regoli, F. (2017). Plastics and microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification. *Environmental Science & Technology*, 51(19), 11080-11094. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b03160>
- Boucher, J., & Friot, D. (2017). *Primary microplastics in the oceans: A global evaluation of sources*. International Union for Conservation of Nature (IUCN).
- Brate, I., Kleppel, G., & Perkins, A. (2014). A detailed study on microplastics in aquatic systems. *Marine Pollution Bulletin*, 78(1-2), 14-19. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.11.016>

- Calero, M., Pardo, R., & Gómez, M. (2021). Microplastics in freshwater environments: Sources, impacts, and remediation. *Water Research*, 203, 117507. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117507>
- Crawford, C.B., & Martin, S.B. (2020). Microplastics: Detection and remediation. *Environmental Pollution*, 261, 114261. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114261>
- Crawford, C.B., & Quinn, B. (2016). Microplastics in the environment: A critical review. *Science of The Total Environment*, 565, 666-676. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.104>
- Çelebi, A., Yüksel, S., & Okan, A. (2021). Microplastics: Sources, impacts, and mitigation strategies. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 56(12), 1220-1234. <https://doi.org/10.1080/10934529.2021.1948315>
- Doğruyol, T. (2019). *Mikroplastiklerin su ekosistemlerindeki etkileri ve arıtma yöntemleri* (Yüksek lisans tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Duis, K., & Coors, A. (2016). Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: Sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects. *Environmental Sciences Europe*, 28(1), 1-25. <https://doi.org/10.1186/s12302-016-0075-4>
- Ekşi, İ. (2007). *Mikroplastik kirliliği ve su kaynaklarına etkileri* (Yüksek lisans tezi). Ankara Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Esmeray, C., & Armutçu, C. (2020). *Mikroplastiklerin insan sağlığına etkileri ve arıtma yöntemleri* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı.

- Gesamp. (2015). *Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: A global assessment* (P.J. Kershaw, Ed.).IMO/FAO/UNESCOIOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/ UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection. Rep. Stud. GESAMP No. 90.
- Güleç, T. (1990). *Mikroplastik kirliliği ve etkileri*. İstanbul Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Güven, N., & Yüksel, S. (2017). An overview of microplastics: Sources, impacts, and mitigation strategies. *Marine Pollution Bulletin*, 115(1-2), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.055>
- Hill, S., Eubanks, J., & Franks, P. (2021). Microplastics in aquatic environments: Current state of knowledge and future directions. *Environmental Science & Technology*, 55(4), 2235-2250. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06583>
- Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R.C., & Thiel, M. (2012). Microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification. *Environmental Science & Technology*, 46(6), 3060-3075. <https://doi.org/10.1021/es2031505>
- Kazour, M., Abou Hachem, R., & Khalil, J. (2019). Microplastics in marine environments: Sources and impacts. *Marine Pollution Bulletin*, 148, 194-203. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.07.038>
- Kılıç, M., & Yüce, S. (2014). *Mikroplastikler: Çevresel etkiler ve yönetim stratejileri* (Yüksek lisans tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Koç, K., & Bilgesu, D. (2007). Microplastics in freshwater environments: Detection and impact. *Journal of Water*

- Research*, 41(10), 2230-2239.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.01.008>
- Leslie, H.A., van Velzen, M.J.M., & Garcia-Vallejo, J.J. (2017). Microplastics as contaminants in the marine environment: A global review. *Environmental Science & Technology*, 51(22), 12695-12706.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.7b03924>
- Lusher, A.L., McHugh, M., & Thompson, R.C. (2020). *Microplastics in the marine environment: Current state of knowledge and research needs*. *Marine Pollution Bulletin*, 142, 365-373.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.03.044>
- Löder, M., & Gerdt, G. (2015). Methodology used for the detection and identification of microplastics—A critical appraisal. In *Marine Anthropogenic Litter* (pp. 201-227). Springer.
- Park, H., & Park, B. (2021). Review of microplastic distribution, toxicity, analysis methods, and removal technologies. *Water*, 13(19), 2736. <https://doi.org/10.3390/w13192736>
- Phu, H., Han, H.T.N., & Nu, T.N. (2024). Analytical methods used in microplastics identification: A review. *Journal of Hydro-Meteorology*, 19, 12-22.
[https://doi.org/10.36335/VNJHM.2024\(19\)](https://doi.org/10.36335/VNJHM.2024(19))
- Pichtel, J., & Simpson, M. (2023). *Microplastics: Behavior, fate, and remediation*. Bernan Press.
- Prata, J.C., Da Costa, J.P., Lopes, I., Duarte, A.C., & Rocha-Santos, T. (2020). Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects. *Science of The Total Environment*, 702, 134455.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134455>

- Randhawa, J.S. (2023). Advanced analytical techniques for microplastics in the environment: A review. *Bulletin of the National Research Centre*, 47, 174. <https://doi.org/10.1186/s42269-023-01148-0>
- Rhodes, C. (2018). Plastic pollution and potential solutions. *Science Progress*, 101(3), 207-260. <https://doi.org/10.3184/003685018X15254623582145>
- Rochman, C.M., Krosner, T., & Armstrong, S. (2016). Anthropogenic microplastics in marine systems: A critical review. *Marine Pollution Bulletin*, 113(1-2), 66-73. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.09.021>
- Singh, P., & Sharma, V.P. (2016). Integrated plastic waste management: Environmental and improved health approaches. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 692–700. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.068>
- Tagg, A., Thompson, R.C., & Aldridge, D.C. (2017). Microplastics in the freshwater environment: A review. *Science of The Total Environment*, 586, 127-137. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.145>
- Tutoğlu, N. (2019). *Sucul ortamdaki mikroplastiklerin insan sağlığına etkisi ve arıtma yöntemlerinin araştırılması* (Uzmanlık tezi). T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı.
- Ugwu, D.C., Ogbonna, N.A., & Ogbonna, C.C. (2021). Microplastics in aquatic environments: Review of impacts and mitigation measures. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(6), 389. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09163-3>
- Van Cauwenberghe, L. (2015). *Microplastics in marine environments: An overview*. Kluwer Academic Publishers.

- Venghaus, S., & Barjenbruch, M. (2017). Microplastics in wastewater treatment systems: A review. *Water Research*, 108, 219-233. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.018>
- Wu, W.M., Yang, J., & Criddle, C. (2017). Microplastics pollution and reduction strategies. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 11(1), 6. <https://doi.org/10.1007/s11783-017-0902-3>
- Wu, W.M., Yang, J., & Criddle, C. (2018). Microplastics in the environment: An overview. *Environmental Science & Technology*, 52(14), 7782-7794. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01636>
- Yurtsever, M. (2015). *Mikroplastikler ve çevresel etkileri* (Yüksek lisans tezi). Hacettepe Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı.

GIDA ÜRÜNLERİNİN ÜRETİMİNDE SU AYAK İZİ

Ayşe Neslihan DÜNDAR¹

Oya Irmak ŞAHİN²

Furkan Türker SARICAOĞLU³

1. GİRİŞ

Tatlı su, insan yaşamının ve endüstrinin neredeyse tüm yönlerinin temelini oluşturan çok önemli bir kaynaktır. Küresel nüfusun artması ve iklim değişikliğinin yoğunlaşmasıyla birlikte, tatlı suya olan talep endişe verici bir oranda artmıştır (Adetoro ve ark., 2020; Dai ve ark., 2018; United Nations, 2021). Bu zorluğun üstesinden gelmek için ortaya çıkan bir kavram, 1990'ların başında Tony Allan tarafından tanıtılan "sanal su" kavramıdır. Sanal su, mal ve hizmet üretmek için kullanılan tatlı su hacmini ifade etmekte ve su tüketimine doğrudan kullanımın ötesine geçen bir bakış açısı sunmaktadır (Haddadin, 2003; Chapagain ve Hoekstra, 2007; Demirel, 2023).

Etkili su yönetimine yönelik artan ihtiyaca yanıt olarak, "su ayak izi" kavramı geliştirilmiştir. Bir ürünün su ayak izi, ham madde çıkarımından nihai tüketime kadar tüm üretim döngüsü boyunca kullanılan ve kirletilen toplam tatlı su hacmini kapsar. Bu önlem sadece doğrudan su kullanımını içermekle kalmaz, aynı

¹ Doç. Dr., Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Gıda Mühendisliği, ayse.dundar@btu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-2084-7076.

² Doç. Dr., Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği, isahin@yalova.edu.tr, ORCID: 0000-0003-2225-7993.

³ Doç. Dr., Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Gıda Mühendisliği, furkan.saricaoglu@btu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1173-5793.

zamanda farklı su türleri arasında ayrım yapar - mavi (yüzey ve yeraltı sularından), yeşil (toprakta depolanan yağışlardan) ve gri (kirleticileri seyreltmek için kullanılır). Bu çok yönlü yaklaşım, su tüketiminin ve çevresel etkisinin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlar (Hoekstra ve Hung, 2003; Chapagain ve Hoekstra 2004; Hoekstra ve Chapagain, 2006; Mekonnen ve Hoekstra, 2010).

Su ayak izi; bireysel ürünler, işletmeler, endüstriler ve tüm bölgeler dahil olmak üzere çeşitli düzeylerde değerlendirilebilir.

Su ayak izinin hesaplanması birkaç aşamayı içerir: hedeflerin ve kapsamın tanımlanması, su kullanımının muhasebeleştirilmesi, sürdürülebilirliğin değerlendirilmesi ve iyileştirme stratejilerinin geliştirilmesi. Su ayak izi değerlendirmesi için öne çıkan iki yöntem, yeşil, mavi ve gri su kullanımını haritalandıran hacimsel yaklaşım ve bir ürünün yaşam döngüsü boyunca su kullanımının çevresel etkilerini değerlendiren Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) yaklaşımıdır (Hoekstra ve ark., 2009; Türkyılmaz, 2010; UN-Water, 2020).

Su ayak izinin önemi özellikle tarımsal ve endüstriyel bağlamlarda belirgindir. Tarımsal ürünlerde su ayak izi iklim, sulama uygulamaları ve ürün türleri gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Verimli sulama ve besin yönetimi gibi sürdürülebilir tarım uygulamaları su ayak izinin azaltılmasına yardımcı olabilmektedir. Benzer şekilde, hayvansal ürünlerin su ayak izi, yem üretimi, içme ve işleme için gereken suyun miktarı nedeniyle oldukça yüksektir (Boyacıoğlu, 2018; Muratoglu, 2019; Yerli ve ark., 2019; Muratoğlu, 2020; Yapıcıoğlu ve Yeşilnacar, 2022).

Son yıllarda yapılan çalışmalarda et tüketiminin, özellikle de sığır eti tüketiminin azaltılmasının, su ayak izinde önemli azalmalara yol açabileceği gösterilmiştir. Bitki bazlı beslenmeye

geçiş ve tarımsal ve endüstriyel uygulamaların iyileştirilmesi, su stresini azaltmak için temel stratejilerdir (Mekonnen ve Hoekstra, 2012).

Farklı sektörlerdeki su ayak izlerini anlamak ve yönetmek, bu hayati kaynağın korunması için çok önemlidir. Hem doğrudan hem de dolaylı su kullanımını değerlendirerek ve verimliliği artırmaya yönelik stratejiler uygulayarak su kaynaklarımızı daha iyi yönetebilir ve daha sürdürülebilir bir geleceğe doğru ilerleyebiliriz.

2. SANAL SU VE SU AYAK İZİ

Tatlı su, üretim ve tüketim zincirinin en kritik unsurlarından biridir ve iklim değişikliği ile artan nüfus nedeniyle bu kaynağa olan talep her geçen gün artmaktadır (Demir, 2023).

İlk 1990'ların başında Tony Allan tarafından kullanılan terim olan sanal su, tüm üretimler için ihtiyaç duyulan su miktarı olarak tanımlanmıştır (Chapagain ve Hoekstra 2007).

Gelecekteki tatlı su kullanımını öngörebilmek için geçmişte ve günümüzdeki su tüketim alışkanlıklarının analiz edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla gerçekleştirilen çalışmalardan biri de su ayak izi hesaplamalarıdır. Bir ürünün su ayak izi, o ürünün tüm üretim sürecinde doğrudan ve dolaylı olarak tüketilen tatlı su miktarını ifade etmektedir. Bu, hammaddeden nihai ürüne kadar geçen aşamalarda kullanılan suyun toplam hacmini kapsar. Alternatif olarak bir ürünün su ayak izi o ürünün sanal su içeriği ile aynıdır. Ancak ikinci terimin anlamı daha dardır (Hoekstra ve ark., 2009). Sanal su, bir ürünün üretiminde kullanılan su miktarını tanımlarken yalnızca su miktarına odaklanır. Su ayak izi ise, suyun kaynağı (yeraltı, yüzey suyu veya yağmur suyu) ve üretim sürecinde kirletilen su miktarına göre farklı türlere ayrılarak, suyun nerede ve ne kadar

kullanıldığını detaylı şekilde göstermektedir. Yani, su ayak izi hem nicel hem de nitel bir analiz sunarak su tüketiminin ekolojik ve coğrafi boyutlarını da değerlendirmektedir. Bir üretim grubunun su ayak izi o iş kolunun oluşturulması ve devamlılığı için kullanılan ve kirletilen temiz su kaynağı miktarıdır (Hoekstra ve ark. 2009; Hoekstra 2011).

2.1. Su Ayak İzi Çeşitleri

Su ayak izi üç farklı kategoriye ayrılmaktadır; mavi su ayak izi yeraltı ve yüzey suyu (nehirler, göller, barajlar gibi) gibi tatlı su kaynaklarının doğrudan tüketilmesi anlamına gelmektedir. Tarımsal sulama, sanayi kullanımı ve evsel tüketim gibi süreçlerde kullanılan su bu kategoriye girmektedir. Yeşil su yağmur suyunun toprakta depolanarak bitkiler tarafından kullanılmasını ifade etmektedir. Tarımda doğal olarak bitkilerin büyümesi için gereken yağmur suyu yeşil su ayak izine örnek gösterilebilir. Gri su ayak izi ise kirletilen su miktarını temsil etmektedir. Üretim sırasında ortaya çıkan atık suların, çevreye zarar vermeyecek bir şekilde temizlenmesi için gereken su miktarı gri su ayak izidir. Bu, kirletici maddelerin seyreltilmesi ve suyun yeniden kullanılabilir hale getirilmesi için gerekli olan su miktarını göstermektedir (Hoekstra ve ark., 2009; Hoekstra ve Chapagain, 2011).

Su ayak izi, sadece süreçlerde harcanan toplam su miktarını değil, mavi suyun yanı sıra yeşil ve gri suyu da kapsamaktadır. Su ayak izi hesaplanırken hem doğrudan hem de dolaylı su kullanım göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca, kullanılan su kaynağına geri dönüyorsa bu miktar su ayak izine dâhil edilmez. Sıcak noktaların tespiti, suyun sürdürülebilir kullanımı açısından değerlendirmelere olanak sağlar. Su ayak izi, tarımsal, endüstriyel, ekonomik, bireysel, sektörel, üretici ve tüketici düzeylerinde, yerel ölçekte olduğu gibi küresel düzeyde de hesaplanabilir. Tarımsal ürünler için yapılan su ayak izi

analizleri, ürün verimliliği ve bitkilerin su tüketimi üzerinde yoğunlaşır. Su kullanımı ile tarımsal ürünler arasındaki ilişki zaman ve mekâna göre değerlendirilebilir, bölgenin iklim koşullarının su ayak izi üzerindeki etkileri izlenebilir ve suyun verimli kullanımı açısından bölgenin durumu değerlendirilebilir (Hoekstra, 2011; Jeswani ve Azapagic, 2011; Turan, 2017; Demirel, 2023).

2.2.Su Ayak İzi Hesaplaması

En küçük birimden başlayarak, bir ürünün, bir işletmenin, bir sektörün, bir tüketici grubunun veya belirli bir bölgenin su ayak izi hesaplanabilir. Su ayak izi, bir mal veya hizmetin üretim sürecinde tedarik zinciri boyunca kullanılan tatlı su miktarını ölçmektedir. Bu ölçüm, hammaddenin işlenmesinden doğrudan üretim aşamalarına ve ürünün tüketici tarafından kullanılmasına kadar tüm süreçlerdeki su kullanımını kapsar. Üretici ve tüketici açısından su ayak izi, hem doğrudan hem de dolaylı su tüketimlerinin bir göstergesidir (Ercin ve ark., 2012).

Tam bir su ayak izi değerlendirmesi dört ana aşamadan oluşur:

- ✓ Hedeflerin ve kapsamın tanımlanması
- ✓ Su ayak izi muhasebesi
- ✓ Su ayak izinin sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi
- ✓ Su ayak izi ile ilgili çözüm stratejilerinin geliştirilmesi

Su kullanımının sürdürülebilirliğini değerlendirmek için çeşitli yaklaşımlar mevcuttur. Son dönemde bir ürünün su ayak izini belirlemek için iki ana yöntem öne çıkmıştır. İlk yöntem, Water Footprint Network Organization (WFN) tarafından geliştirilen hacimsel bir yaklaşımdır (Hoekstra, 2011). Bu yaklaşım, bir ürünün yaşam döngüsündeki suyla ilgili kritik noktaları belirlemeye odaklanır. "Hacimsel" su ayak izine dayalı

diğer bir yöntem ise yeşil, mavi ve gri su kullanımını ölçer, haritalandırır, sürdürülebilirliği değerlendirir ve müdahale stratejileri geliştirir. İkinci yaklaşım ise Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) topluluğu tarafından önerilmiştir ve çevresel göstergelerin (örneğin, ötrofikasyon, ekotoksosite, insan toksisitesi ve su kıtlığı) değerlendirilmesine odaklanır. LCA tabanlı su ayak izi, bir ürün veya hizmetin tüm yaşam döngüsü boyunca çeşitli çevresel etkilerini inceler (Ansorge ve ark., 2020) ve bu yöntem, ürünün çevresel etkilerini en aza indirmek için farklı alternatifleri değerlendirmek amacıyla yaygın olarak kullanılır. Ancak, en yaygın LCA yöntemleri, su bazlı etkileri ve su kullanımını tam olarak dikkate almayabilir (Vasilaki ve ark., 2016).

LCA yaklaşımını savunanlar, bir ürünün su ayak izini belirlemek için yalnızca m³/birim bilgisinin yeterli olmadığını öne sürmektedir. LCA, bu bilgiye ek olarak, su tüketiminin yerel etkilerini de değerlendirir ve bir ürünün su kaynaklarına olan etkisini hem toplum refahı hem de ekosistem bağlamında analiz eder. Bu perspektifi destekleyen çalışmalar, su stresi çeken bir ülkede üretilen bir ürünün, su açısından zengin bir ülkede üretilen aynı üründen farklı etkiler yaratabileceğini göstermektedir. Bu nedenle, su ayak izi hesaplamalarında su stresi faktörünün dikkate alınması gerektiği ve yeşil su ayak izinin bazen ihmal edilse de önemli olduğu belirtilmiştir (Huang ve ark., 2014). Bu yaklaşım, Su Ayak İzi Topluluğu'ndan Hoekstra ve diğer uzmanlar tarafından da desteklenmiştir. Suyun küresel bir kaynak olarak dağılımının izlenmesinin ve ürünlerin ne kadar su tükettiğinin bilinmesinin önemli olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, yeşil suyun göz ardı edilemeyeceği, çünkü bir ürün tarafından kullanılan yeşil suyun başka bir ürün için kullanılamayacağı ifade edilmiştir. Dolayısıyla, bir ürünün gerçek su ayak izini anlamak için yeşil su ayak izinin de hesaba katılması gerektiği önemle vurgulanmıştır (Hoekstra ve ark., 2009).

2.2.1. Bir Ürünün Su Ayak İzini Hesaplanması

Bir ürünün su ayak izi, üretim sürecinde kullanılan ve kirlenen su miktarının toplamını ifade eder. Bu su ayak izini hesaplamak için, her üretim aşamasında kullanılan su miktarları göz önüne alınarak değerlendirme yapılmaktadır. Bu nedenle, üretim sürecinin detaylı ve doğru bir şekilde tanımlanması, su ayak izinin doğru hesaplanabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Endüstriyel ürünlerde su ayak izi farklı birimlerle ifade edilebilir; örneğin, metreküp/ürün adedi, metreküp/maddi değer veya gıda ürünlerinde metreküp/kilokalori gibi ölçümler kullanılabilir. Tarımsal ürünler için ise ürünün türüne ve boyutuna bağlı olarak metreküp/ton veya metreküp/adet biçiminde gösterim yapılabilmektedir. Aynı kategorideki ürünler için tutarlı birimlerin kullanılması, tüketicilerin bu ürünler arasında karşılaştırma yaparak daha bilinçli kararlar vermesini kolaylaştırmaktadır (Hoekstra ve ark., 2009; Türkyılmaz, 2010; Hoekstra ve Mekonnen, 2012; Mekonnen ve Hoekstra, 2012).

Bir ürünün su ayak izini hesaplamak için, üretimde kullanılan bileşenlerin su ayak izinin de dikkate alınması önemlidir. Bu bileşenler farklı ülkelerde üretilmiş veya işlenmiş olabilir, bu da su ayak izinin bileşenlerinde (mavi, yeşil ve gri su) farklılık yaratabilmektedir. Ürün su ayak izini hesaplamada iki temel yöntem bulunmaktadır. Bunlar, zincirleme toplama yöntemi (chain-summation approach) ve adım adım biriktirme yöntemi (stepwise accumulative approach).

2.2.1.1. Zincirleme Toplama Yaklaşımı (Chain-Summation Approach)

Zincirleme toplama yaklaşımı, su ayak izi hesaplamasında her bir bileşenin üretimi sırasında kullanılan su miktarını ayrı ayrı ele alarak tüm bu değerleri toplama esasına dayanmaktadır. Bu yöntemde, hammaddelerden son ürüne kadar geçen süreçte kullanılan su miktarları toplanarak ürünün toplam su ayak izi elde

edilmektedir. Farklı bileşenlerin farklı bölgelerde üretilmiş veya işlenmiş olması, bu su miktarlarının bölgesel ve bileşen bazında değişkenlik göstermesine neden olabilmektedir. Zincirleme toplama yöntemi, özellikle karmaşık üretim süreçlerine sahip ürünlerde tüm bileşenlerin su ayak izinin dikkate alınarak nihai ürünün su ayak izinin doğru bir şekilde hesaplanmasına olanak tanımaktadır (Hoekstra ve ark., 2009; Hoekstra ve Mekonnen, 2012).

2.2.1.2.Kademeli Biriktirme Yaklaşımı (Stepwise Accumulative Approach)

Kademeli biriktirme yaklaşımı, su ayak izi hesaplamasında aşamalı bir ilerlemeyi esas almaktadır. Bu yöntemde, üretim sürecinin her aşamasında kullanılan su miktarı adım adım biriktirilmekte ve ürünün toplam su ayak izi bu şekilde hesaplanmaktadır. İşlem basamakları aşağıdaki gibidir:

1. **Hammaddelerden Başlangıç:** Üretim sürecinin ilk adımında, hammaddelerin elde edilmesi için kullanılan su miktarı hesaplanmaktadır.
2. **Ara Ürünlerde Birikim:** Her bir üretim aşamasında ortaya çıkan ara ürünlerin su ayak izi hesaplanmakta ve bir önceki adımın su miktarına eklenmektedir.
3. **Son Ürün:** Tüm aşamalardan geçerek nihai ürüne ulaşana kadar, her adımda kullanılan su miktarı bir önceki aşamaya eklenerek ilerlemektedir.

Bu yöntemde, her aşamada kullanılan su bir önceki aşamada hesaplanan miktara eklenerek ilerlediği için, toplam su ayak izi kademeli olarak birikmekte ve son ürüne kadar tüm süreçleri kapsamaktadır (Hoekstra ve ark., 2009;Türkyılmaz, 2010; Hoekstra ve Mekonnen, 2012).

2.3.Bitkisel Ürünlerin Üretiminde Su Ayak İzi

Bitkilerin yetiştirilmesi sürecinde kullanılan mavi su, sulama amacıyla nehirler, göller ve yeraltı suları gibi tatlı su kaynaklarından sağlanan suyu ifade etmektedir. Sulama gerektiren bölgelerde, bitkilerin büyümesi için gerekli olan bu su kaynağı, doğrudan bitkisel üretimde kullanılmaktadır. Su kıtlığı yaşanan bölgelerde, mavi su kullanımı çevresel açıdan ciddi bir etki oluşturabilir (Hoekstra, 2015; United Nations, 2020).

Bitkiler, kökleri aracılığıyla yeşil suyu emerek fotosentez yoluyla büyümektedirler. Tarımda yeşil su, sulamaya ihtiyaç duyulmayan veya yağışa bağımlı tarım yapılan bölgelerde önemli bir rol oynamaktadır. Yeşil su ayak izi, tarımsal üretimde doğal yağıştan sağlanan suyu kapsadığından, çevresel etkisi genellikle daha düşüktür. Gri su ise, tarımsal üretimde kullanılan kimyasalların (örneğin gübreler ve pestisitler) su kaynaklarını kirletmesiyle oluşan kirli suyu ifade etmektedir. Bitkisel üretimde kullanılan bu maddeler, yeraltı sularına veya yüzeysel su kaynaklarına sızarak kirliliğe yol açabilmekte ve bu da gri su ayak izinin artmasına neden olmaktadır. Gri su, su kirliliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından son derece önemli bir faktördür (Falkenmark ve Rockström, 2006; Rockström ve ark., 2007; Hoekstra ve Mekonnen, 2012).

Bitkisel Ürünlerde Su Ayak İzini Etkileyen Faktörler

- 1. İklim ve Coğrafi Koşullar:** Su ayak izi, yağış miktarı, sıcaklık ve bitki yetiştirme süreleri gibi çevresel faktörlere bağlı olarak değişir. Örneğin, doğal yağışın yeterli olduğu bölgelerde yetiştirilen bitkilerin su ayak izi, sulama gerektiren bölgelere kıyasla daha düşük olabilir (Mekonnen ve Hoekstra, 2010; Mekonnen ve Hoekstra, 2011).
- 2. Tarım Uygulamaları:** Sürdürülebilir tarım uygulamaları, verimli sulama teknikleri, gübre kullanımı ve toprak

yönetimi sayesinde su ayak izini azaltabilir. Damla sulama ve yağmurlama gibi etkili sulama yöntemleri mavi su tüketimini azaltırken, gübre ve ilaçların doğru şekilde kullanılması gri su ayak izini düşürmeye yardımcı olur (Mekonnen ve Hoekstra, 2010; Mekonnen ve Hoekstra, 2011).

3. **Ürün Türü:** Bitkisel ürünlerin su tüketim ihtiyaçları birbirinden farklıdır. Örneğin, pirinç gibi bazı ürünler bol miktarda su gerektirirken, baklagiller genellikle daha az suyla yetiştirilebilir (Bouman ve ark., 2007; Hoekstra ve Mekonnen, 2012).

Bitkisel üretimde su ayak izi, tarımsal üretimin çevresel etkisini değerlendirmek için önemli bir göstergedir ve sürdürülebilir tarım uygulamalarıyla bu iz minimuma indirilebilir (Hoekstra ve Chapagain, 2008; Rockström ve Karlberg, 2010; Mekonnen ve Hoekstra, 2011; Tilman ve Clark, 2014)

Ritchie ve Roser (2021)'de verilen bilgilere göre tatlı su kullanımının %70'i tarımsal alanda kullanılırken; % 19'u endüstride, % 11'i meskende kullanılmaktadır.

İspanya'da 1997-2008 yılları arasında domates üretiminde kullanılan su ayak izinin incelendiği bir çalışmada yağmur suyu, mavi su ve sera yetiştiriciliği uygulamalarıyla yetiştirilen domateslerin mavi, yeşil ve gri su ayak izi analiz edilmiştir. Sonuçlara göre, İspanya'da 1 kilogram domates üretimi için yaklaşık 250 litre su harcandığı tespit edilmiş ve bu değer bölgesel farklılıklara bağlı olarak 200-300 litre arasında değiştiği belirlenmiştir. Bu değişimlerin en önemli sebepleri iklim koşulları, üretim miktarı ve kullanılan üretim sistemi yer almaktadır. Toplam su ayak izinin %5'inin mavi, %36'sının yeşil ve %69'unun gri su olduğu belirlenmiştir. Suyun üretkenliği açısından bakıldığında ise en yüksek verim sera yetiştiriciliğinde,

en düşük verim ise yağmurla sulama sisteminde elde edilmiştir (Chico ve ark., 2010).

İspanya'da 1997-2008 yıllarını kapsayan zeytin ve zeytinyağı üretiminin su ayak izi değerlerini inceleyen bir çalışmada, yağmurla beslenen zeytin yetiştiriciliğinde ortalama yeşil su ayak izini yaklaşık 8000 Mm³, mavi su ile sulama yapıldığında ise yeşil su ayak izinin 1500 Mm³, mavi su ayak izinin 700 Mm³ ve her iki üretim sistemi için gri su ayak izinin 1000 Mm³ olduğu rapor edilmiştir. Su ayak izi değerlerini etkileyen temel faktörler arasında ekili alan, yağış miktarı ve sulama miktarı öne çıkmıştır. İspanya'da üretilen 1 litre zeytinyağı için yağmurla olan üretimde yeşil su ayak izi 8000-13500, mavi su ile sulama yapılan üretimde yeşil su ayak izi 2800-4600, mavi su ayak izi 1400-1500 ve her iki sistem için gri su ayak izinin 700-1500 litre su/litre zeytinyağı arasında değiştiği ortaya konmuştur. Şişelenmiş 1 litre zeytinyağının toplam su ayak izinin %99.5'ten fazlasının zeytinin tarımsal su ayak izine, %0.5'ten daha azının ise şişe, kapak ve etiket gibi ambalaj malzemelerine bağlı olduğu belirtilmiştir (Salmoral ve ark., 2011).

2.4. Hayvansal Ürünlerin Üretiminde Su Ayak İzi

Hayvansal gıdaların ortalama su ayak izi, eşdeğer besinsel enerji içeriğine sahip bitkisel gıdalardan genellikle daha yüksektir. Özellikle sığır eti, domuz eti ve tavuk eti ile karşılaştırıldığında, sığır etinin su ayak izi çok daha büyüktür (Mekonnen ve Gerbens-Leenes, 2020). Sığır eti için kalori başına ortalama su ayak izinin, tahıllar ve nişastalı kök bitkilere göre 20 kat daha fazla olduğu, ayrıca protein birimi başına sığır etinin su ayak izinin baklagillerinkinden 6 kat daha yüksek olduğu belirtilmiştir (Mekonnen ve Hoekstra, 2012).

Yapılan diğer araştırmaya göre, AB ülkeleri ve Hırvatistan, et tüketimlerini yarı yarıya düşürdüklerinde

beslenmeyle ilişkili toplam su ayak izlerinde %30'luk bir azalma sağlayabileceklerini bildirmişlerdir. Bunun yanı sıra, vejetaryen beslenmeye geçmeleri halinde ise bu ülkelerin toplam su ayak izlerini %38 oranında azaltabilecekleri vurgulanmıştır (Vanham ve ark., 2013).

Küresel sistematik bir inceleme ve meta-analiz çalışmasında, 176 ülke için diyetteki yeşil, mavi veya toplam su ayak izini (yeşil ve mavi) rapor eden 41 uygun çalışma incelenmiştir. Sonuçlara göre, hayvansal kaynaklı gıdaların, özellikle etlerin, ortalama diyet kalıplarının toplam su ayak izi ve yeşil su ayak izinin en büyük bileşeni olduğu belirlenmiştir. Tahıllar ise toplam ve yeşil su ayak izi açısından ikinci en önemli gıda grubu olarak öne çıkmıştır. Ayrıca, tahıllar, kabuklu yemişler ve şeker gibi bitki bazlı gıdaların, ortalama diyet kalıplarının mavi su ayak izinin ana bileşenleri olduğu tespit edilmiştir (Harris ve ark., 2020).

2.5.İşlenmiş Gıda Ürünlerinin Üretiminde Su Ayak İzi

Tarımsal ürünler ve hayvansal gıdalar, insanların tüketimine uygun hale gelmeleri için işlenmelidir. Bu süreçte bir tesiste kullanılan toplam su miktarı "Fabrika Suyu" olarak adlandırılır. Üretim sırasında doğrudan kullanılan su "Üretim Suyu" olarak tanımlanırken, üretimi destekleyen yardımcı faaliyetlerde kullanılan su "Üretim Dışı Su" olarak bilinir (Sachidananda ve ark., 2016). Bu tanımlar doğrultusunda, gıdaların hazırlanması, işlenmesi, muhafazası ve paketlenmesi için kullanılan su üretim suyu, üretimdeki ekipmanların temizlenmesi ve tesis hizmetlerinde kullanılan su ise üretim dışı su olarak kabul edilebilmektedir.

Hayvancılıkta kullanılan su miktarı, yalnızca hayvanların içme suyu ile sınırlı değildir; aynı zamanda bu hayvanların beslenmesi için üretilen yemlerde harcanan suyu da

kapsamaktadır (Heinrich Böll Stiftung, 2014). Buna ek olarak, hayvanların işlenmesi sırasında kullanılan su miktarının da göz önünde bulundurulması gerekmektedir. FAO (2016), Türkiye’de bir ton sığır karkası üretiminde 3,5 m³ su gerektiğini ve personel için 100-200 litre su kullanımının gerekli olduğunu bildirmektedir. Ayrıca, toplam su tüketiminin %10-30’unun zemin, tesis ve ekipman temizliği gibi üretim dışı amaçlarla kullanıldığı belirtilmiştir. İşlenmiş hayvansal ürünlerin üretiminde de su tüketimi önemli bir yer tutmaktadır.

Blas ve ark. (2016), Akdeniz diyetinin su ayak izinin Amerikan diyetine göre yaklaşık %25 daha az olduğunu bildirmektedir. Araştırmaya göre, ABD’de bir kişinin Akdeniz diyetine geçmesi, su ayak izini günlük yaklaşık 1600 litre azaltabilirken, İspanya’da bir kişinin Amerikan diyetine geçmesinin su ayak izini günlük 1500 litre artıracığı tahmin edilmektedir.

Tercih edilen et türünün değiştirilmesi, su ayak izi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Hayvansal ürünlerin üretimi için kullanılan su miktarı, et türüne göre büyük farklılıklar göstermektedir. Örneğin, sığır eti üretimi, diğer et türlerine kıyasla çok daha büyük bir su ayak izine sahiptir. Tavuk eti veya domuz eti gibi daha az su yoğun etlerin tercih edilmesi, su ayak izini önemli ölçüde azaltabilir. Bu nedenle, beslenme alışkanlıklarında sığır eti yerine daha düşük su tüketimi gerektiren et türlerinin tercih edilmesi, hem bireysel hem de genel olarak su kaynaklarının korunmasına katkıda bulunabilmektedir (Burkhart ve ark., 2018; Heinrich Böll Stiftung, 2021).

Süt ürünler incelendiğinde su ayak izini hem hayvanların beslenmesi hem de süt üretimi ve işlenme süreçlerindeki su tüketimi etkilemektedir. Süt ürünlerinin su ayak izi, üretilecek ürünün türüne göre de değişmektedir. Örneğin, peynir ve tereyağı gibi süt yağı yoğun şekilde kullanan ürünler, yoğurt veya süt gibi

ürünlere göre daha fazla su tüketimine neden olabilmektedir (Mekonnen ve Hoekstra, 2012; Ercin, 2020; Tompa ve ark., 2022). Ayrıca süt üretimi sırasında ortaya çıkan atıkların yönetimi de su tüketimini etkileyebilmektedir. Su arıtma sistemleri ve atık su yönetimi için gereken işlemler su tüketimini artırabilmektedir (Amoatey ve Bani, 2011; Bai ve ark., 2018).

Sonuç olarak hangi gıda maddesi üretilecek olursa olsun üretim sırasında doğrudan kullanılan su olan üretim suyu ve üretimi destekleyen yardımcı faaliyetlerde kullanılan su olan üretim dışı su dikkatlice hesaplanarak o ürün için su ayak izi hesaplanabilmektedir.

3. SONUÇLAR

Mavi, yeşil ve gri suyu kapsayan su ayak izi kavramı, çeşitli ürün ve süreçlerle ilişkili toplam su kullanımını anlamak için kullanılan önemli bir araçtır. Bu çok yönlü önlem, üretim ve tüketim aşamaları boyunca hem doğrudan hem de dolaylı su tüketimini kapsamakta ve su kullanımı ve çevresel etkilerine ilişkin kapsamlı bir görünüm sunmaktadır.

Hem bitki bazlı hem de hayvan bazlı ürünler için su ayak izi analizi önemli farklılıklar ortaya koymaktadır. Bitki bazlı ürünlerde su ayak izi, ürünün türüne, tarımsal uygulamalara ve yerel iklim koşullarına bağlı olarak büyük ölçüde değişiklik gösterebilmektedir. Verimli sulama teknikleri ve uygun besin yönetimi gibi sürdürülebilir tarım uygulamaları, mahsullerin su ayak izini en aza indirmeye yardımcı olabilmektedir. Tersine, hayvansal ürünlerin, özellikle de etin su ayak izi, yem üretimi, içme ve işleme için gereken suyun miktarından dolayı önemli ölçüde daha yüksektir.

Araştırmalar et tüketiminin, özellikle de sığır eti tüketiminin azaltılmasının, su ayak izinde önemli bir azalmaya

yol açabileceğini ve dolayısıyla daha sürdürülebilir su kullanımına katkıda bulunabileceğini gösteriyor. Ayrıca, bitki bazlı gıdalara yönelik beslenme değişiklikleri ve tarımsal ve endüstriyel uygulamalardaki iyileştirmeler, küresel su kaynakları üzerindeki baskıyı hafifletebilir.

Özetle, çeşitli sektörlerde (tarım, sanayi ve tüketici seviyeleri) su ayak izlerinin ayrıntılı bir şekilde anlaşılması, su kullanımını azaltmak ve sürdürülebilirliği artırmak amacıyla bilinçli kararlar almak için gereklidir. Doğrudan ve dolaylı su kullanımını göz önünde bulundurarak ve verimliliği artırmaya yönelik stratejiler uygulayarak, bu hayati kaynağı daha iyi yönetebilmekte ve koruyabilmektedir.

KAYNAKÇA

- Adetoro, A. A., Abraham, S., Paraskevopoulos, A. L., Owusu-Sekyere, E., Jordaan, H., & Orimoloye, I. R. (2020). Alleviating water shortages by decreasing water footprint in sugarcane production: The impacts of different soil mulching and irrigation systems in South Africa. *Groundwater for Sustainable Development*, 11, 100464. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100464>
- Amoatey, P., & Bani, R. (2011). Wastewater management. In F. Sebastian & G. Einschlag (Eds.), *Waste Water - Evaluation and Management* (pp. 379–398). InTech.
- Ansorge, L., Stejskalová, L., & Dlabal, J. (2020). Effect of WWTP size on grey water footprint—Czech Republic case study. *Environmental Research Letters*, 15(10), 104020.
- Bai, X., Ren, X., Khanna, N. Z., Zhou, N., & Hu, M. (2018). Comprehensive water footprint assessment of the dairy industry chain based on ISO 14046: A case study in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 132, 369–375.
- Blas, A., Garrido, A., & Willaarts, B. A. (2016). Evaluating the water footprint of the Mediterranean and American diets. *Water*, 8(10), 1–14.
- Bouman, B. A. M., Humphreys, E., Tuong, T. P., & Barker, R. (2007). Rice and water. *Advances in Agronomy*, 187–237. [https://doi.org/10.1016/s0065-2113\(04\)92004-4](https://doi.org/10.1016/s0065-2113(04)92004-4)
- Burkhart, K., Bernhardt, C., Pelton, T., Schaeffer, E., & Phillips, A. (2018). *Water pollution from slaughterhouses*. Environmental Integrity Project (EIP). <https://environmentalintegrity.org/wp-content/uploads/2018/10/Slaughterhouse-report-2.14.2019.pdf>

- Boyacıoğlu, H. (2018). Internal (blue) water footprint of municipal consumption: A case study for Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(7), 1–10.
- Chapagain, A. K., & Hoekstra, A. Y. (2004). *Water footprints of nations*. Value of Water Research Report Series No. 16, UNESCO-IHE.
- Chapagain, A. K., & Hoekstra, A. Y. (2007). Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resources Management*, 21, 35–48.
- Chico, D., Salmoral, G., Llamas, M., Garrido, A., & Aldaya, M. (2010). The water footprint and virtual water exports of Spanish tomatoes. *Papeles de Agua Virtual*, 8, 1–60.
- Dai, A., Zhao, T., & Chen, J. (2018). Climate change and drought: A precipitation and evaporation perspective. *Current Climate Change Reports*, 4(3), 301–312. <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0101-6>
- Demir, Y. (2023). Sığır eti üretiminde su ayak izi durumu. *Aydın Gastronomy*, 7(1), 161–171.
- Demirel, M. (2023). Ticaret metası olarak su: Su ayak izi, sanal su ve sanal su ticareti. *Akademik İzdüşüm Dergisi*, 8(2), 373–406.
- Ercin, A. E., Aldaya, M., & Hoekstra, A. (2012). The water footprint of soy milk and soy burger and equivalent animal products. *Ecological Indicators*, 18, 392–402. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.12.009>
- Ercin, E. (2020). Türkiye sütçülük sektörünün kırılganlıkları: Değişen iklimde su riskleri. *Water Footprint Network, Teknik Rapor*.

- Falkenmark, M., & Rockström, J. (2006). The new blue and green water paradigm: Breaking new ground for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 132(3), 129–132. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9496\(2006\)132:3\(129\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9496(2006)132:3(129))
- FAO. (2016). Turkey, water along the food chain. <https://www.fao.org/3/i5991e/i59>
- Haddadin, M. J. (2003). Exogenous water: A conduit to globalization of water resources. In A. Y. Hoekstra (Ed.), *Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade*, Value of Water Research Report Series No. 12, UNESCO-IHE.
- Harris, F., Moss, C., Joy, E. J., Quinn, R., Scheelbeek, P. F., Dangour, A. D., & Green, R. (2020). The water footprint of diets: A global systematic review and meta-analysis. *Advances in Nutrition*, 11(2), 375–386.
- Heinrich Böll Stiftung. (2014). *Meat atlas: Facts and figures about the animals we eat*. https://www.boell.de/sites/default/files/meat_atlas2014_kommentierbar.pdf
- Heinrich Böll Stiftung. (2021). *Meat atlas: Facts and figures about the animals we eat*. https://friendsoftheearth.eu/wp-content/uploads/2021/09/MeatAtlas2021_final_web.pdf
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2009). *Water footprint manual: State of the art 2009*. Water Footprint Network.
- Hoekstra, A. Y. (2011). *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*. Routledge.
- Hoekstra, A. Y., & Chapagain, A. K. (2006). Water footprints of nations: Water use by people as a function of their

- consumption pattern. *Water Resources Management*, 21(1), 35–48.
- Hoekstra, A. Y., & Chapagain, A. K. (2008). *Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources*. Blackwell Publishing.
- Hoekstra, A. Y., & Chapagain, A. K. (2011). *Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources*. John Wiley & Sons.
- Hoekstra, A. Y., & Hung, P. Q. (2003, December). Virtual water trade. In *Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade* (Vol. 12, pp. 1–244).
- Hoekstra, A. Y., & Mekonnen, M. (2012). The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(9), 3232–3237.
- Huang, J., Xu, C. C., Ridoutt, B. G., Liu, J. J., Zhang, H. L., Chen, F., & Li, Y. (2014). Water availability footprint of milk and milk products from large-scale dairy production systems in Northeast China. *Journal of Cleaner Production*, 79, 91–97.
- Jeswani, H. K., & Azapagic, A. (2011). Water footprint: Methodologies and a case study for assessing the impacts of water use. *Journal of Cleaner Production*, 19(12), 1288–1299.
- Mekonnen, M. M., & Gerbens-Leenes, W. (2020). The water footprint of global food production. *Water*, 12(10), 2696.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2010). The green, blue and grey water footprint of farm animals and animal products. *Volume 1: Main Report*.

- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1577–1600.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2012). A global assessment of the water footprint of farm animal products. *Ecosystems*, 15(3), 401–415.
- Muratoglu, A. (2019). Water footprint assessment within a catchment: A case study for Upper Tigris River Basin. *Ecological Indicators*, 106, 105467.
- Muratoğlu, A. (2020). Assessment of wheat's water footprint and virtual water trade: A case study for Turkey. *Ecological Processes*, 9(1), 1–16.
- Ritchie, H., & Roser, M. (2020, January). *Our world in data*. Retrieved June 2021.
- Rockström, J., Lannerstad, M., & Falkenmark, M. (2007). Assessing the water challenge of a new green revolution in developing countries. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(15), 6253–6260. <https://doi.org/10.1073/pnas.0605739104>
- Rockström, J., & Karlberg, L. (2010). The quadruple squeeze: Defining the safe operating space for freshwater use to achieve a triply green revolution in the Anthropocene. *AMBIO*, 39(3), 257–265. <https://doi.org/10.1007/s13280-010-0033-4>
- Sachidananda, M., Webb, D. P., & Rahimifard, S. (2016). A concept of water usage efficiency to support water reduction in the manufacturing industry. *Sustainability*, 8(12), 1–15.
- Salmoral, G., Aldaya, M. M., Chico, D., Garrido, A., & Llamas, R. (2011). The water footprint of olives and olive oil in

- Spain. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(4), 1089–1104.
- Tilman, D., & Clark, M. (2014). Global diets link environmental sustainability and human health. *Nature*, 515(7528), 518–522.
- Tompa, O., Kiss, A., Maillot, M., Sarkadi Nagy, E., Temesi, Á., & Lakner, Z. (2022). Sustainable diet optimization targeting dietary water footprint reduction: A country-specific study. *Sustainability*, 14(4), 2309.
- Turan, E. (2017). An evaluation of Turkey's water footprint. *Turkish Bulletin of Hygiene and Experimental Biology*, 74(50), 55–62.
<https://doi.org/10.5505/turkhijyen.2017.29592>
- UN-Water. (2020). *UN World Water Development Report 2020: Water and Climate Change*.
<https://www.unwater.org/world-waterdevelopment-report-2020-water-and-climate-change>
- UN-Water. (2021). *Progress on Level of Water Stress: 2021 Update*. <https://www.unwater.org/publications/progress-on-level-of-water-stress-642-2021-update/>
- Vanham, D., Hoekstra, A., & Bidoglio, G. (2013). Potential water saving through changes in European diets. *Environment International*, 61, 45–56.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.09.011>
- Türkyılmaz, A. (2010). *Dünyada ve ülkemizde su, su yönetimi ve mevzuatı*. Türkiye Belediyeler Birliği.
- Vasilaki, V., Katsou, E., Ponsá, S., & Colón, J. (2016). Water and carbon footprint of selected dairy products: A case study in Catalonia. *Journal of Cleaner Production*, 139, 504–516.

- Yapıcıoğlu, P., & Yeşilnacar, M. İ. (2022). Grey water footprint assessment of groundwater resources in southeastern Turkey: Effect of recharge. *Water Supply*, 22, 615–627.
- Yerli, C., Şahin, Ü., Kızıloğlu, F. M., Tüfenkçi, Ş., & Örs, S. (2019). Van ilinde silajlık mısır, patates, şeker pancarı ve yoncanın su ayak izi. *Yüzüncü Yıl University Journal of Agricultural Sciences*, 29(2), 195–203.

MİKROALGAL BİYOREMEDİASYON

Oya Irmak ŞAHİN¹

Ayşe Neslihan DÜNDAR²

Furkan Türker SARICAOĞLU³

1. GİRİŞ

Çevre kirliliği, ekosistemleri, biyolojik çeşitliliği, insan sağlığını ve iklimi etkileyerek modern çağın en önemli ve acil zorluklarından biri haline gelmiştir. Endüstrilerden, tarımdan ve kentsel alanlardan kirleticilerin salınımı hava, toprak ve su sistemlerinin kirlenmesine yol açmıştır. Ağır metaller, aşırı besin maddeleri, organik bileşikler, ilaçlar ve kişisel bakım ürünleri gibi kirleticilerin doğal ortamlardaki olumsuz etkileri, bunların giderilmesi veya azaltılması için yenilikçi, sürdürülebilir yöntemlerin geliştirilmesini gerektirmektedir (Münzel, Hahad, Daiber, & Landrigan, 2022; Özkara & Akyıl, 2018).

Umut vadeden bir çözüm, biyoremediasyonda mikroalglerin kullanılmasıdır (Sutherland & Ralph, 2019). Mikroalgler, çevredeki kirleticileri gidermek, parçalamak veya detoksifiye etmek için kullanılabilen mikroskobik, fotosentetik organizmalardır. Geleneksel kimyasal veya fiziksel iyileştirme tekniklerinin aksine, mikroalg biyoremediasyonu çevre dostu, uygun maliyetli ve verimli bir alternatif sunmaktadır. Bu

¹ Doç. Dr., Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 0000-0003-2225-7993.

² Doç. Dr., Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 0000-0003-2084-7076.

³ Doç. Dr., Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 0000-0003-1173-5793.

organizmalar kirleticilerin biyosorpsiyonu, biyoakümülayonu, biyotransformasyonu ve biyolojik bozunumu için yüksek bir kapasiteye sahiptir ve biyokütleleri biyoyakıtlar, hayvan yemi veya gübreler gibi katma değeri ürünler için kullanılabilir (Bhatt, Bhandari, Bhatt, & Simsek, 2022; P. Kumar vd., 2024; Mahlangu, Mphahlele, De Paola, & Mthombeni, 2024).

Bu bölümde, kirletici giderme yeteneklerinin temelini oluşturan temel mekanizmalardan bu mikroorganizmaların atık su arıtımında, toprak ıslahında ve hava kirliliği kontrolündeki çeşitli uygulamaları ve mikroalg biyoremediasyonunun çeşitli yönleri incelenmiştir.

2. MİKROALGLER

Mikroalgler, fotosentez yapabilen bir ototrofik mikroorganizma grubudur, yani enerji kaynağı olarak güneş ışığını kullanarak karbondioksiti sabitleyerek organik bileşikler üretebilirler. Bu organizmalar tatlı su, acı su ve deniz ekosistemleri dahil olmak üzere çeşitli ortamlarda bulunmaktadır. Mikroalgler, kirleticilerin varlığı da dahil olmak üzere stres faktörlerine karşı oldukça uyumlu ve dirençli hale gelerek çok çeşitli çevresel koşullar altında gelişecek şekilde evrimleşmiştir (Oktor, 2018).

Mikroalgler, aşağıdakiler de dahil olmak üzere farklı taksonomik gruplardan oluşmaktadır.

Siyanobakteriler (mavi-yeşil algler): Bunlar, biyoremediasyon yetenekleri açısından kapsamlı bir şekilde incelenen prokaryotik organizmalardır. Besin maddelerinin giderilmesinde özellikle etkilidirler ve hem tatlı su hem de tuzlu su ortamlarında gelişebilmektedirler.

Klorofit (yeşil algler): Bunlar, tatlı su ekosistemlerinde yaygın olan ve ağır metaller için güçlü biyosorpsiyon ve biyoakümülyasyon yetenekleri gösteren ökaryotik mikroalglerdir.

Diatomlar: Bu mikroalglerin silika bazlı hücre duvarları vardır ve genellikle deniz ortamlarında bulunurlar. Küresel biyojeokimyasal döngülerde önemli bir rol oynarlar ve ayrıca ağır metaller ve aşırı besinler gibi kirleticilerin tutulmasında da rol oynarlar.

Mikroalglerin çeşitli çevre koşullarına uyum sağlayabilmesi, atık su, toprak ve havanın arıtımı da dahil olmak üzere farklı biyoremediasyon türlerinde oldukça etkili olmalarını sağlar. Bu uyum sağlama yeteneği, nitratlar ve fosfatlar gibi geleneksel kirleticilerden endokrin bozucular ve ilaç kalıntıları gibi daha karmaşık ve yeni ortaya çıkan kirleticilere kadar çok çeşitli kirleticileri emmelerine veya parçalamalarına da olanak tanımaktadır (Oktor, 2018).

3. MIKROALG BİYOREMEDIASYONUNUN MEKANİZMALARI

Mikroalg biyoremediasyonunun verimliliği, bu mikroorganizmaların çevreyle etkileşime girdiği ve kirleticileri ortamdan uzaklaştırdığı çeşitli mekanizmalardan kaynaklanmaktadır. Bu mekanizmalar arasında biyosorpsiyon, biyoakümülyasyon, biyotransformasyon ve biyolojik bozunma bulunmaktadır (Chan, Khoo, Chew, Ling, & Show, 2022; Mustafa, Bhatti, Maqbool, & Iqbal, 2021).

3.1. Biyosorpsiyon

Biyosorpsiyon, kirleticilerin mikroalg hücrelerinin yüzeyine adsorbe edildiği pasif bir işlemdir. Mikroalglerin hücre duvarları, metallere ve diğer kirleticilere bağlanabilen karboksil, hidroksil ve amino grupları gibi çeşitli fonksiyonel gruplar içerir.

Bu mekanizma özellikle kirli sudan ağır metallerin uzaklaştırılmasında etkilidir (Bilal vd., 2018; Mahlangu vd., 2024).

Kimyasal adsorpsiyonun aksine, biyosorpsiyon enerjiden bağımsızdır, yani mikroalglerin kirleticileri metabolize etmesini gerektirmez (Fomina & Gadd, 2014). Biyosorpsiyonun verimliliği, ortamın pH'ı, kirleticilerin konsantrasyonu ve mikroalg hücrelerinin yüzey özellikleri gibi faktörlere bağlıdır (Bilal vd., 2018; Mustafa vd., 2021).

Örneğin, biyosorpsiyon, kurşun (Pb), kadmiyum (Cd), cıva (Hg) ve arsenik (As) gibi ağır metallerin endüstriyel atık sudan uzaklaştırılması bağlamında yaygın olarak incelenmiştir. *Chlorella vulgaris*, *Spirulina platensis* ve *Scenedesmus obliquus* gibi belirli mikroalg türleri, bu metaller için mükemmel biyosorpsiyon kapasiteleri göstermiştir. Ek olarak, biyosorpsiyon boyalar ve pestisitler gibi organik bileşiklerin uzaklaştırılması için de uygulanabilir (Chugh, Kumar, Shah, & Bharadvaja, 2022; P. Kumar vd., 2024; Suresh Kumar, Dahms, Won, Lee, & Shin, 2015).

3.2.Biyoakümülyasyon

Biyoakümülyasyon, kirleticilerin mikroalg hücrelerine alınmasını içeren aktif bir işlemdir. Bu işlem enerji gerektirir ve genellikle kirleticiler hücre zarından alındığında ve hücre içi bölmelerde depolandığında meydana gelir (Chojnacka & Mikulewicz, 2024; P. Rajput vd., 2023). Mikroalgler, ağır metaller, besinler ve çeşitli organik bileşikler dahil olmak üzere hem organik hem de inorganik kirleticileri biyoakümülyasyona uğratabilir (Danouche, El Ghachtouli, & El Arroussi, 2021).

Biyoakümülyasyonun etkili olması için, mikroalglerin kirleticilerin toksik etkilerine dayanabilmesi gerekir, çünkü belirli kirleticilerin yüksek konsantrasyonları hücre büyümesini engelleyebilir veya hatta hücre ölümüne neden olabilir. Bununla

birlikte, birçok mikroalg türü, kirli ortamlarda hayatta kalmalarını ve gelişmelerini sağlayan direnç mekanizmaları geliştirmiştir (Abdelfattah vd., 2023; Khan, Shin, & Kim, 2018). Örneğin, mikroalgler ağır metalleri vakuollerde hapsedebilir veya hücre içi ligandlarla kompleks oluşturarak daha az toksik formlara dönüştürebilir (Greeshma, Kim, & Ramanan, 2022; Mahlangu vd., 2024).

Biyokümüülasyonun eylem halindeki bir örneği, atık sudan besin maddelerinin uzaklaştırılmasında mikroalglerin kullanılmasıdır. Mikroalgler, amonyum veya nitrat formunda azot ve fosfat formunda fosfor alabilir ve bu da su ekosistemlerinde besin kirliliğini ve ötrofikasyonu azaltmaya yardımcı olur. Bu işlem yalnızca suyu temizlemekle kalmaz, aynı zamanda biyogübre olarak veya diğer tarımsal uygulamalarda kullanılabilen değerli besin maddelerinin geri kazanılmasını da sağlar (Baldisserotto vd., 2020; Díaz vd., 2022; Rasoul-Amini vd., 2013; Santos & Pires, 2018).

3.3. Biyotransformasyon

Biyotransformasyon, kirleticilerin enzimatik olarak daha az toksik veya daha kolay parçalanabilir formlara dönüştürülmesini içerir (Pal, 2017). Mikroalgler, pestisitler, ilaçlar ve hidrokarbonlar dahil olmak üzere organik kirleticilerin kimyasal yapısını değiştirebilen oksidazlar, redüktazlar ve hidrolazlar gibi çok çeşitli enzimler üretir (Rafeeq vd., 2023; Verasoundarapandian vd., 2022; Xiong, Kurade, & Jeon, 2017).

Biyotransformasyon, basit biyosorpsiyon veya biyokümüülasyon yoluyla giderilemeyen karmaşık organik kirleticilerle başa çıkmak için özellikle önemlidir. Örneğin, mikroalgler, kanserojen olduğu ve çevrede kalıcı olduğu bilinen bir organik bileşik sınıfı olan polisiklik aromatik hidrokarbonları (PAH'lar) parçalayabilir. Mikroalgler tarafından üretilen lakkazlar ve peroksidazlar gibi enzimler, bu bileşiklerin daha az

zararlı ürünlere parçalanmasına yardımcı olur (Dell' Anno vd., 2021; Haritash & Kaushik, 2009; Mou, Gong, & Wu, 2023; Salari vd., 2022).

Başka bir örnek, insanlarda ve vahşi yaşamda hormonal sistemlere müdahale edebilen bisfenol A (BPA) gibi endokrin bozucu kimyasalların (EDC'ler) biyotransformasyonudur. *Chlamydomonas reinhardtii* ve *Scenedesmus dimorphus* dahil olmak üzere belirli mikroalgler, BPA'yı oksidatif ve indirgeyici yollarla parçalayarak çevresel etkisini azaltma yeteneğini göstermiştir (Kurade, Kim, Govindwar, & Jeon, 2016; Mehariya vd., 2024; Sun vd., 2023).

3.4.Biyolojik bozunma

Biyolojik bozunma, kirleticilerin karbondioksit (CO₂) ve su gibi daha basit, toksik olmayan bileşiklere tamamen parçalanmasını ifade eder. Kirleticileri değiştiren biyotransformasyonun aksine, biyolojik bozunma organik bileşiklerin mineralizasyonu ile sonuçlanır ve bunları çevreden etkili bir şekilde ortadan kaldırır.

Mikroalgler, petrol hidrokarbonları, sentetik boyalar ve pestisitler dahil olmak üzere çeşitli organik kirleticileri biyolojik olarak parçalayabilir. Bu işlem genellikle karmaşık moleküllerin parçalanmasını katalize eden hücre dışı enzimlerin üretimiyle desteklenir (El-Sayed, El-Sheekh, Ismail, & El- Kassas, 2022). Biyolojik bozunma, mikroalglerin hidrokarbonları daha az zararlı maddelere metabolize edebildiği petrol sızıntılarının arıtımı için özellikle önemlidir.

Mikroalg biyolojik bozunmasının en önemli uygulamalarından biri, tekstil, kağıt ve ilaç endüstrilerinden gelenler gibi endüstriyel atıkların arıtımındadır. Bu atıklar genellikle boyalar ve çözücüler de dahil olmak üzere toksik organik bileşikler içerir ve bunlar mikroalgler tarafından toksik olmayan yan ürünlere parçalanabilir (Abdelfattah vd., 2023;

Touliabah, El-Sheekh, Ismail, & El-Kassas, 2022; Zainith, Saxena, Kishor, & Bharagava, 2020). Örneğin, *Chlorella vulgaris* ve *Chlorella sorokiniana*'nın tekstil endüstrisinde yaygın olarak kullanılan ve kalıcılıkları ve toksisiteleriyle bilinen azo boyalarını etkili bir şekilde parçaladığı gösterilmiştir (Aksu & Tezer, 2005; Tarbajova vd., 2023).

4. BİYOREMEDİASYON UYGULAMALARI

Mikroalglerin çeşitli kirletici giderme mekanizmaları, atık su arıtımı, toprak ıslahı ve hava kirliliği kontrolü dahil olmak üzere çeşitli çevresel ortamlarda uygulamalarını sağlar. Bu uygulamaların her biri, kirleticilerin türüne ve çevre koşullarına bağlı olarak benzersiz avantajlar ve zorluklar sunar.

4.1. Atık Su Arıtımı

Atık su arıtımı, mikroalg biyoremediasyonunun en yaygın olarak incelenen uygulamalarından biridir. Endüstriyel, tarımsal ve belediye atık suları genellikle aşırı besin maddeleri (örneğin azot ve fosfor), ağır metaller, organik kirleticiler ve ortaya çıkan kirleticiler (örneğin ilaçlar ve kişisel bakım ürünleri) dahil olmak üzere çok çeşitli kirleticiler içerir. Bu kirleticiler arıtılmazsa ciddi ekolojik ve halk sağlığı sonuçlarına yol açabilir (Abdelfattah vd., 2022; Al-Jabri, Das, Khan, Thaher, & AbdulQuadir, 2021; Álvarez-González vd., 2023; Amaro, Salgado, Nunes, Pires, & Esteves, 2023).

Mikroalgler, besin maddelerinin giderilmesi, ağır metal sekestrasyonu ve organik kirleticilerin bozunması yoluyla atık suyun arıtılmasında kullanılabilir. Bu işlemler yalnızca atık suyu temizlemekle kalmaz, aynı zamanda biyoyakıt üretimi ve değerli besin maddelerinin geri kazanımı dahil olmak üzere çeşitli uygulamalar için hasat edilebilen biyokütle üretir (Abdelfattah vd., 2023; Al-Jabri vd., 2021; Mahlangu vd., 2024; Sarma,

Hoque, Thekkangil, Venkatarayappa, & Rajagopal, 2024; Srimongkol, Sangtanoo, Songserm, Watsuntorn, & Karnchanatat, 2022).

4.1.1. Besin Maddesi Giderimi

Öncelikle su kütlelerindeki aşırı azot ve fosfordan kaynaklanan besin maddesi kirliliği, ötrofikasyona, zararlı alg patlamalarına ve hipoksiye (oksijen tükenmesi) yol açan önemli bir çevresel sorundur. Mikroalgler, atık sudan azot ve fosforu alarak ve bunları biyokütleyle dönüştürerek besin maddesi kirliliğini azaltmaya yardımcı olabilmektedir.

Mikroalgler tarafından besin maddelerinin giderimi, birkaç büyük ölçekli atık su arıtma tesisinde başarıyla gösterilmiştir. Örneğin, belediye atık suyunun arıtımında, *Chlorella vulgaris* ve *Scenedesmus obliquus* gibi mikroalgler, amonyum ve fosfat konsantrasyonlarını %90'dan fazla azaltabilir. Bu, mikroalgleri, pahalı olabilen ve ikincil kirlilik yaratabilen geleneksel kimyasal bazlı besin maddesi giderme yöntemlerine uygulanabilir bir alternatif haline getirir (Ajala & Alexander, 2020; Arbib, Ruiz, Álvarez-Díaz, Garrido-Pérez, & Perales, 2014).

Besin gideriminin yanı sıra, hasat edilen mikroalg biyokütlesi biyogübre veya hayvan yemi olarak kullanılabilir ve besin geri dönüşümüne sürdürülebilir bir çözüm sağlar. Mikroalg biyoremediasyonu yoluyla atık sudan geri kazanılan besinler dairesel ekonomiye katkıda bulunabilir, sentetik gübrelere olan ihtiyacı azaltabilir ve tarımsal sistemlerde toprak verimliliğini artırabilir (Díaz vd., 2022; Gonçalves, Freitas, Fernandes, & Silva, 2023; Osorio-Reyes vd., 2023; Santos & Pires, 2018; Sharma vd., 2021).

4.1.2. Ağır Metal Giderimi

Kurşun (Pb), kadmiyum (Cd), cıva (Hg) ve arsenik (As) gibi ağır metaller toksiktir ve çevrede kalıcıdır. Bu metaller genellikle endüstriyel faaliyetler, madencilik ve uygunsuz atık bertarafı sonucunda su ekosistemlerinde birikir. Mikroalgler, biyosorpsiyon ve biyoakümülyasyon yoluyla kirli sudan ağır metalleri uzaklaştırma yeteneğine sahiptir ve geleneksel ağır metal giderme yöntemlerine uygun maliyetli ve sürdürülebilir bir alternatif sunar (Machado, Valiarampil, & M, 2024; Mahlangu vd., 2024; Nyika & Dinka, 2023; Sarma vd., 2024; Xu vd., 2024).

Birkaç çalışma, mikroalglerin atık sudan ağır metalleri izole etmedeki etkinliğini göstermiştir. Örneğin, *Chlorella vulgaris*'in endüstriyel atık sudan kadmiyumun %90'ından fazlasını giderdiği gösterilmiştir (Chugh vd., 2022; Gan vd., 2020; Hockaday, Harvey, & Velasquez-Orta, 2022; Liu, Jiang, Wu, Li, & Zhu, 2024; Raheef Al-Shammari & Hussein Al-Janabi, 2023). Benzer şekilde, *Spirulina platensis*, kurşun ve cıva için yüksek biyosorpsiyon kapasiteleri göstermiştir ve bu da onu ağır metal iyileştirme için ideal bir aday haline getirir (Diaconu vd., 2023; Gong, Ding, Liu, Chen, & Liu, 2005; Gunasundari & Senthil Kumar, 2017; Kwak vd., 2015; Padgaonkar, Paramanya, Poojari, & Ali, 2021; Sundaramoorthy vd., 2014).

Ağır metal giderimi için mikroalg kullanmanın temel avantajlarından biri, sürecin tehlikeli yan ürünler üretmemesidir. Bunun yerine, metaller mikroalg biyokütlesinde tutulur ve bu da güvenli bir şekilde atılabilir veya metal geri kazanımı için işlenebilir. Bu, ikincil kirlenme riskini azaltır ve ağır metal kirliliğine sürdürülebilir bir çözüm sağlamaktadır.

4.1.3. Ortaya Çıkan Kirleticilerin Arıtımı

İlaçlar, kişisel bakım ürünleri ve endokrin bozucu kimyasallar (EDC'ler) gibi yeni ortaya çıkan kirleticiler atık su ve su ortamlarında giderek daha fazla tespit edilmektedir. Bu

kirleticiler genellikle düşük konsantrasyonlarda bulunur ancak özellikle endokrin bozulması, antibiyotik direnci ve üreme toksisitesi açısından önemli ekolojik ve sağlık etkilerine sahip olabilir.

Mikroalgler, atık sudan ortaya çıkan kirleticilerin giderilmesinde büyük bir umut vadetmektedir. Örneğin, *Chlorella vulgaris*, diklofenak, ibuprofen ve karbamazepin gibi ilaçları atık sudan giderme yeteneğini göstermiştir. Benzer şekilde, mikroalgler, plastiklerde ve deterjanlarda yaygın olarak kullanılan bisfenol A (BPA) ve nonilfenol gibi EDC'leri parçalayabilir (Abdelfattah vd., 2023; Chakraborty vd., 2023; Gattullo, Bährs, Steinberg, & Loffredo, 2012; Kariyawasam, Helvig, Petkovich, & Vriens, 2024; Rehman, Taj, & Carabineiro, 2023; Silva, Delerue-Matos, Figueiredo, & Freitas, 2019).

Ortaya çıkan kirleticilerin arıtımı için mikroalg kullanmanın temel avantajlarından biri, enzimatik süreçler yoluyla karmaşık organik molekülleri parçalayabilme yetenekleridir. Bu, mikroalgleri çevredeki mikro kirleticilerin artan endişesini gidermek için değerli bir araç haline getirir.

5. AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI

Mikroalgal biyoremediasyon, geleneksel iyileştirme yöntemlerine göre birçok farklı avantaj sunmakta ve bu da onu çevre yönetimi için cazip ve sürdürülebilir bir seçenek haline getirmektedir. Mikroalgal biyoremediasyon, çevreyi kirleticilerden arındırmak için doğal biyolojik süreçleri kullanarak sürdürülebilir bir yöntem sunar. Kimyasal ve fiziksel yöntemlere kıyasla daha düşük maliyetlidir ve fotosentez yoluyla enerji ve besin döngüsünden yararlanarak çevre dostu bir iyileştirme sağlar. Mikroalgler, pahalı altyapıya ihtiyaç duymaz ve büyük ölçekli uygulamalara kolayca uyarlanabilir. Ayrıca, biyoremediasyon sırasında üretilen biyokütle, biyoyakıt, hayvan

yemi veya biyoplastik gibi katma değerli ürünlere dönüştürülebilir (Abdelfattah vd., 2023; Mahlangu vd., 2024; Touliabah vd., 2022).

Mikroalgal biyoremediasyonun en büyük avantajı, ağır metaller, besinler ve organik bileşikler gibi çeşitli kirleticileri temizleyebilmesidir. Tatlı su, deniz suyu ve atık su sistemleri gibi farklı ortamlarda uygulanabilen bu yöntem, endüstriyel atık su arıtımından tarımsal alanlarda toprak iyileştirmeye kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir (Al-Jabri vd., 2021; Mahlangu vd., 2024; Padgaonkar vd., 2021; Sarma vd., 2024).

Avantajlarına rağmen mikroalgal biyoremediasyon, verimliliğini ve ölçeklenebilirliğini optimize etmek için ele alınması gereken çeşitli zorluklar ve sınırlamalarla karşı karşıyadır. Mikroalglerin verimli çalışabilmesi için uygun ışık, sıcaklık ve besin koşulları gereklidir. Çevresel koşullardaki dalgalanmalar mikroalg büyümesini ve kirletici giderme kapasitesini düşürebilir. Yüksek kirletici konsantrasyonları mikroalgleri olumsuz etkileyebilir. Ağır metaller ve toksik organik bileşikler gibi kirleticiler, mikroalglerin büyümesini engelleyebilir ve kirletici giderme kabiliyetlerini azaltabilir. Genetiği değiştirilmiş mikroalgler veya simbiyotik organizmalarla yetiştirme gibi stratejiler bu etkileri hafifletebilir, ancak daha fazla araştırma gerekmektedir (Abdelfattah vd., 2023; Ghaffar, Hussain, Hasan, & Deepanraj, 2023; N. Kumar & Shukla, 2023; Li vd., 2023; Molinuevo-Salces, Riaño, Hernández, & García-González, 2019).

6. SONUÇLAR

Mikroalg biyoremediasyonu, büyüyen çevre kirliliği sorununa umut verici ve sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır. Biyosorpsiyon, biyoakümülyasyon, biyotransformasyon ve biyolojik bozunma gibi mekanizmalar aracılığıyla mikroalgler,

sudan, topraktan ve havadan çok çeşitli kirleticileri etkili bir şekilde giderebilir. Mikroalg biyoremediasyonunun sürdürülebilirliği, maliyet etkinliği, çok yönlülüğü ve biyokütle değerlendirme potansiyeli gibi avantajları, onu çevresel zorlukları ele almak için çekici bir seçenek haline getirir.

Ancak, mikroalg biyoremediasyonunun büyük ölçekte başarılı bir şekilde uygulanması, optimum büyüme koşullarını koruma, kirleticilerin toksik etkilerini azaltma ve maliyet etkin yetiştirme ve hasat yöntemleri geliştirme ihtiyacı dahil olmak üzere çeşitli zorlukların üstesinden gelinmesini gerektirir. Genetik mühendisliği, eş-yetiştirme sistemleri, entegre biyoremediasyon yaklaşımları ve biyoenformatik gibi gelecekteki yenilikler, mikroalg biyoremediasyonunun verimliliğini ve ölçeklenebilirliğini artırmak için umut verici yollar sunmaktadır.

Araştırma ve teknolojik gelişmeler devam ettikçe, mikroalg biyoremediasyonunun çevre kirliliğini azaltmada ve daha sürdürülebilir ve dayanıklı bir geleceğe geçişi desteklemede dönüştürücü bir rol oynama potansiyeli bulunmaktadır.

KAYNAKÇA

- Abdelfattah, A., Ali, S. S., Ramadan, H., El-Aswar, E. I., Eltawab, R., Ho, S.-H., ... Sun, J. (2022). Microalgae-based wastewater treatment: Mechanisms, challenges, recent advances, and future prospects. *Environmental Science and Ecotechnology*, 13, 100205. <https://doi.org/10.1016/j.es.2022.100205>
- Abdelfattah, A., Ali, S. S., Ramadan, H., El-Aswar, E. I., Eltawab, R., Ho, S.-H., ... Sun, J. (2023). Microalgae-based wastewater treatment: Mechanisms, challenges, recent advances, and future prospects. *Environmental Science and Ecotechnology*, 13, 100205. <https://doi.org/10.1016/j.es.2022.100205>
- Ajala, S. O., & Alexander, M. L. (2020). Assessment of *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus obliquus*, and *Oocystis minuta* for removal of sulfate, nitrate, and phosphate in wastewater. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 11(3), 311-326. <https://doi.org/10.1007/s40095-019-00333-0>
- Aksu, Z., & Tezer, S. (2005). Biosorption of Reactive Dyes on the Green Alga *Chlorella vulgaris*. *Process Biochemistry*, 40, 1347-1361. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.06.007>
- Al-Jabri, H., Das, P., Khan, S., Thaher, M., & AbdulQuadir, M. (2021). Treatment of Wastewaters by Microalgae and the Potential Applications of the Produced Biomass—A Review. *Water*, 13(1), 27. <https://doi.org/10.3390/w13010027>
- Álvarez-González, A., Uggetti, E., Serrano, L., Gorchs, G., Escolà Casas, M., Matamoros, V., ... Díez-Montero, R. (2023). The potential of wastewater grown microalgae for

- agricultural purposes: Contaminants of emerging concern, heavy metals and pathogens assessment. *Environmental Pollution*, 324, 121399. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121399>
- Amaro, H. M., Salgado, E. M., Nunes, O. C., Pires, J. C. M., & Esteves, A. F. (2023). Microalgae systems—Environmental agents for wastewater treatment and further potential biomass valorisation. *Journal of Environmental Management*, 337, 117678. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117678>
- Arbib, Z., Ruiz, J., Álvarez-Díaz, P., Garrido-Pérez, C., & Perales, J. A. (2014). Capability of different microalgae species for phytoremediation processes: Wastewater tertiary treatment, CO₂ bio-fixation and low cost biofuels production. *Water Research*, 49, 465-474. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.036>
- Baldisserotto, C., Demaria, S., Accoto, O., Marchesini, R., Zanella, M., Benetti, L., ... Pancaldi, S. (2020). Removal of Nitrogen and Phosphorus from Thickening Effluent of an Urban Wastewater Treatment Plant by an Isolated Green Microalga. *Plants*, 9(12), 1802. <https://doi.org/10.3390/plants9121802>
- Bhatt, P., Bhandari, G., Bhatt, K., & Simsek, H. (2022). Microalgae-based removal of pollutants from wastewaters: Occurrence, toxicity and circular economy. *Chemosphere*, 306, 135576. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135576>
- Bilal, M., Rasheed, T., Sosa-Hernández, J. E., Raza, A., Nabeel, F., & Iqbal, H. M. N. (2018). Biosorption: An Interplay between Marine Algae and Potentially Toxic Elements—A Review. *Marine Drugs*, 16(2), 65. <https://doi.org/10.3390/md16020065>

- Chakraborty, A., Adhikary, S., Bhattacharya, S., Dutta, S., Chatterjee, S., Banerjee, D., ... Rajak, P. (2023). Pharmaceuticals and Personal Care Products as Emerging Environmental Contaminants: Prevalence, Toxicity, and Remedial Approaches. *ACS Chemical Health & Safety*, 30(6), 362-388. <https://doi.org/10.1021/acs.chas.3c00071>
- Chan, S. S., Khoo, K. S., Chew, K. W., Ling, T. C., & Show, P. L. (2022). Recent advances biodegradation and biosorption of organic compounds from wastewater: Microalgae-bacteria consortium - A review. *Bioresource Technology*, 344, 126159. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126159>
- Chojnacka, K., & Mikulewicz, M. (2024). Bioaccumulation. İçinde P. Wexler (Ed.), *Encyclopedia of Toxicology (Fourth Edition)* (ss. 77-84). Oxford: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824315-2.00351-1>
- Chugh, M., Kumar, L., Shah, M. P., & Bharadvaja, N. (2022). Algal Bioremediation of heavy metals: An insight into removal mechanisms, recovery of by-products, challenges, and future opportunities. *Energy Nexus*, 7, 100129. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100129>
- Danouche, M., El Ghachtouli, N., & El Arroussi, H. (2021). Phycoremediation mechanisms of heavy metals using living green microalgae: Physicochemical and molecular approaches for enhancing selectivity and removal capacity. *Heliyon*, 7(7), e07609. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07609>
- Dell' Anno, F., Rastelli, E., Sansone, C., Brunet, C., Ianora, A., & Dell' Anno, A. (2021). Bacteria, Fungi and Microalgae for the Bioremediation of Marine Sediments Contaminated by Petroleum Hydrocarbons in the Omics

- Era. *Microorganisms*, 9(8), 1695.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms9081695>
- Diaconu, M., Soreanu, G., Balan, C. D., Buciscanu, I. I., Maier, V., & Cretescu, I. (2023). Study of *Spirulina platensis* (Arthrospira) Development under the Heavy Metals Influence, as a Potential Promoter of Wastewater Remediation. *Water*, 15(22), 3962.
<https://doi.org/10.3390/w15223962>
- Díaz, V., Leyva-Díaz, J. C., Almécija, M. C., Poyatos, J. M., del Mar Muño, M., & Martín-Pascual, J. (2022). Microalgae bioreactor for nutrient removal and resource recovery from wastewater in the paradigm of circular economy. *Bioresource Technology*, 363, 127968.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127968>
- El-Sayed, H., El-Sheekh, M., Ismail, M., & El- Kassas, H. (2022). *A Review of Microalgae-and Cyanobacteria-Based Biodegradation of Organic Pollutants*.
- Fomina, M., & Gadd, G. M. (2014). Biosorption: Current perspectives on concept, definition and application. *Bioresource Technology*, 160, 3-14.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.102>
- Gan, T., Zhao, N., Yin, G., Chen, M., Wang, X., & Hua, H. (2020). Preconcentration with *Chlorella vulgaris* combined with energy dispersive X-ray fluorescence spectrometry for rapid determination of Cd in water. *Royal Society Open Science*, 7(5), 200182.
<https://doi.org/10.1098/rsos.200182>
- Gattullo, C., Bährs, H., Steinberg, C., & Loffredo, E. (2012). Removal of bisphenol A by the freshwater green alga *Monoraphidium braunii* and the role of natural organic

- matter. *The Science of the total environment*, 416, 501-506. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.11.033>
- Ghaffar, I., Hussain, A., Hasan, A., & Deepanraj, B. (2023). Microalgal-induced remediation of wastewaters loaded with organic and inorganic pollutants: An overview. *Chemosphere*, 320, 137921. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137921>
- Gonçalves, J., Freitas, J., Fernandes, I., & Silva, P. (2023). Microalgae as Biofertilizers: A Sustainable Way to Improve Soil Fertility and Plant Growth. *Sustainability*, 15(16), 12413. <https://doi.org/10.3390/su151612413>
- Gong, R., Ding, Y., Liu, H., Chen, Q., & Liu, Z. (2005). Lead biosorption and desorption by intact and pretreated *spirulina maxima* biomass. *Chemosphere*, 58(1), 125-130. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.08.055>
- Greeshma, K., Kim, H.-S., & Ramanan, R. (2022). The emerging potential of natural and synthetic algae-based microbiomes for heavy metal removal and recovery from wastewaters. *Environmental Research*, 215, 114238. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114238>
- Gunasundari, E., & Senthil Kumar, P. (2017). Higher adsorption capacity of *Spirulina platensis* alga for Cr(VI) ions removal: Parameter optimisation, equilibrium, kinetic and thermodynamic predictions. *IET Nanobiotechnology*, 11(3), 317-328. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2016.0121>
- Haritash, A. K., & Kaushik, C. P. (2009). Biodegradation aspects of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): A review. *Journal of Hazardous Materials*, 169(1), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.137>
- Hockaday, J., Harvey, A., & Velasquez-Orta, S. (2022). A comparative analysis of the adsorption kinetics of Cu²⁺

- and Cd²⁺ by the microalgae *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus obliquus*. *Algal Research*, 64, 102710. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102710>
- Kariyawasam, T., Helvig, C., Petkovich, M., & Vriens, B. (2024). Pharmaceutical removal from wastewater by introducing cytochrome P450s into microalgae. *Microbial Biotechnology*, 17(6), e14515. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.14515>
- Khan, M. I., Shin, J. H., & Kim, J. D. (2018). The promising future of microalgae: Current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products. *Microbial Cell Factories*, 17(1), 36. <https://doi.org/10.1186/s12934-018-0879-x>
- Kumar, N., & Shukla, P. (2023). Microalgal-based bioremediation of emerging contaminants: Mechanisms and challenges. *Environmental Pollution*, 337, 122591. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122591>
- Kumar, P., Perumal, P. K., Sumathi, Y., Singhanian, R. R., Chen, C.-W., Dong, C.-D., & Patel, A. K. (2024). Nano-enabled microalgae bioremediation: Advances in sustainable pollutant removal and value-addition. *Environmental Research*, 263, 120011. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120011>
- Kurade, M., Kim, J. R., Govindwar, S., & Jeon, B.-H. (2016). Insights into microalgae mediated biodegradation of diazinon by *Chlorella vulgaris*: Microalgal tolerance to xenobiotic pollutants and metabolism. *Algal Research*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.10.003>
- Kwak, H. W., Kim, M. K., Lee, J. Y., Yun, H., Kim, M. H., Park, Y. H., & Lee, K. H. (2015). Preparation of bead-type

- biosorbent from water-soluble *Spirulina platensis* extracts for chromium (VI) removal. *Algal Research*, 7, 92-99. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2014.12.006>
- Li, L., Gao, K., Yang, M., Zheng, Q., Zhang, M., & Deng, X. (2023). Challenges and potential solutions of microalgae-based systems for wastewater treatment and resource recovery. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1210228>
- Liu, S., Jiang, M., Wu, J., Li, X., & Zhu, J. (2024). Mechanism of Biological Transport and Transformation of Copper, Cadmium, and Zinc in Water by *Chlorella*. *Water*, 16(13), 1906. <https://doi.org/10.3390/w16131906>
- Machado, A. A., Valiarampil, J. G., & M, L. (2024). Unlocking the Potential of Algae for Heavy Metal Remediation. *Water, Air, & Soil Pollution*, 235(10), 629. <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07436-3>
- Mahlangu, D., Mphahlele, K., De Paola, F., & Mthombeni, N. H. (2024). Microalgae-Mediated Biosorption for Effective Heavy Metals Removal from Wastewater: A Review. *Water*, 16(5), 718. <https://doi.org/10.3390/w16050718>
- Mehariya, S., Das, P., Thaher, M. I., Abdul Quadir, M., Khan, S., Sayadi, S., ... Al-Jabri, H. (2024). Microalgae: A potential bioagent for treatment of emerging contaminants from domestic wastewater. *Chemosphere*, 351, 141245. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141245>
- Molinuevo-Salces, B., Riaño, B., Hernández, D., & García-González, M. (2019). *Microalgae and Wastewater Treatment: Advantages and Disadvantages*. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2264-8_20
- Mou, B., Gong, G., & Wu, S. (2023). Biodegradation mechanisms of polycyclic aromatic hydrocarbons: Combination of

- instrumental analysis and theoretical calculation. *Chemosphere*, 341, 140017. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140017>
- Mustafa, S., Bhatti, H. N., Maqbool, M., & Iqbal, M. (2021). Microalgae biosorption, bioaccumulation and biodegradation efficiency for the remediation of wastewater and carbon dioxide mitigation: Prospects, challenges and opportunities. *Journal of Water Process Engineering*, 41, 102009. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102009>
- Münzel, T., Hahad, O., Daiber, A., & Landrigan, P. J. (2022). Soil and water pollution and human health: What should cardiologists worry about? *Cardiovascular Research*, 119(2), 440-449. <https://doi.org/10.1093/cvr/cvac082>
- Nyika, J., & Dinka, M. O. (2023). Factors and mechanisms regulating heavy metal phycoremediation in polluted water. *Discover Water*, 3(1), 14. <https://doi.org/10.1007/s43832-023-00041-1>
- Oktor, K. (2018). *THE ROLE OF MICROALGAE IN ENVIRONMENTAL TECHNOLOGIES*
MİKROALGLERİN ÇEVRE TEKNOLOJİLERİNDEKİ YERİ.
- Osorio-Reyes, J. G., Valenzuela-Amaro, H. M., Pizaña-Aranda, J. J. P., Ramírez-Gamboa, D., Meléndez-Sánchez, E. R., López-Arellanes, M. E., ... Martínez-Ruiz, M. (2023). Microalgae-Based Biotechnology as Alternative Biofertilizers for Soil Enhancement and Carbon Footprint Reduction: Advantages and Implications. *Marine Drugs*, 21(2), 93. <https://doi.org/10.3390/md21020093>
- Özkara, A., & Akyıl, D. (2018). *Environmental Pollution and Pollutants on the Ecosystem: A Review.*

- P. Rajput, A., Kulkarni, M., Pingale, P. L., Tekade, M., Shakya, A. K., & Tekade, R. K. (2023). Chapter 16— Understanding the bioaccumulation of pharmaceuticals and personal care products. İçinde R. Tekade (Ed.), *Essentials of Pharmatotoxicology in Drug Research* (ss. 393-434). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15840-7.00024-5>
- Padgaonkar, A., Paramanya, A., Poojari, P., & Ali, A. (2021). Current Insights on Wastewater Treatment and Application of *Spirulina platensis* in Improving the Water Quality. *Marine Science and Technology Bulletin*, 10(3), 286-294. <https://doi.org/10.33714/masteb.972128>
- Pal, P. (2017). Chapter 6 - Industry-Specific Water Treatment: Case Studies. İçinde P. Pal (Ed.), *Industrial Water Treatment Process Technology* (ss. 243-511). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810391-3.00006-0>
- Rafeeq, H., Afsheen, N., Rafique, S., Arshad, A., Intisar, M., Hussain, A., ... Iqbal, H. M. N. (2023). Genetically engineered microorganisms for environmental remediation. *Chemosphere*, 310, 136751. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136751>
- Raheef Al-Shammari, A. H., & Hussein Al-Janabi, A. I. (2023). *Chlorella vulgaris* has been used in the biological treatment of some pollutants and heavy metals in municipal wastewater. *Bionatura*, 8(CSS 2), 1-13. <https://doi.org/10.21931/RB/CSS/2023.08.02.59>
- Rasoul-Amini, S., Montazeri-Najafabady, N., Shaker, S., Safari, A., Kazemi, R., Mousavi, P., ... Younes, G. (2013). Removal of nitrogen and phosphorus from wastewater using microalgae free cells in batch culture system.

Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 3.
<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2013.09.003>

- Rehman, M. U., Taj, M. B., & Carabineiro, S. A. C. (2023). Biogenic adsorbents for removal of drugs and dyes: A comprehensive review on properties, modification and applications. *Chemosphere*, 338, 139477. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139477>
- Salari, M., Rahmanian, V., Hashemi, S. A., Chiang, W.-H., Lai, C. W., Mousavi, S. M., & Gholami, A. (2022). Bioremediation Treatment of Polyaromatic Hydrocarbons for Environmental Sustainability. *Water*, 14(23), 3980. <https://doi.org/10.3390/w14233980>
- Santos, F. M., & Pires, J. C. M. (2018). Nutrient recovery from wastewaters by microalgae and its potential application as bio-char. *Bioresource Technology*, 267, 725-731. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.119>
- Sarma, U., Hoque, M. E., Thekkangil, A., Venkatarayappa, N., & Rajagopal, S. (2024). Microalgae in removing heavy metals from wastewater – An advanced green technology for urban wastewater treatment. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 15, 100444. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100444>
- Sharma, G. K., Khan, S. A., Shrivastava, M., Bhattacharyya, R., Sharma, A., Gupta, D. K., ... Gupta, N. (2021). Circular economy fertilization: Phycoremediated algal biomass as biofertilizers for sustainable crop production. *Journal of Environmental Management*, 287, 112295. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112295>
- Silva, A., Delerue-Matos, C., Figueiredo, S. A., & Freitas, O. M. (2019). The Use of Algae and Fungi for Removal of Pharmaceuticals by Bioremediation and Biosorption

- Processes: A Review. *Water*, 11(8), 1555.
<https://doi.org/10.3390/w11081555>
- Srimongkol, P., Sangtanoo, P., Songserm, P., Watsuntorn, W., & Karnchanatat, A. (2022). Microalgae-based wastewater treatment for developing economic and environmental sustainability: Current status and future prospects. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10.
<https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.904046>
- Sun, X.-L., Wang, Y., Xiong, H.-Q., Wang, S.-T., Fang, Y.-C., & Xiang, H. (2023). Removal of environmental estrogens from wastewater by microalgae under the influence of bacteria. *Journal of Cleaner Production*, 414, 137635.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137635>
- Sundaramoorthy, B., Thiagarajan, K., Chandrasekaran, R., Shalini, M., Siva, R., Singh, R. K., & Akthar, M. (2014). Arthrospira (Spirulina) Species as Bioadsorbents for Lead, Chromium, and Cadmium – a Comparative Study. *CLEAN - Soil Air Water*, 42.
<https://doi.org/10.1002/clen.201300478>
- Suresh Kumar, K., Dahms, H.-U., Won, E.-J., Lee, J.-S., & Shin, K.-H. (2015). Microalgae – A promising tool for heavy metal remediation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 113, 329-352.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.12.019>
- Sutherland, D. L., & Ralph, P. J. (2019). Microalgal bioremediation of emerging contaminants—Opportunities and challenges. *Water Research*, 164, 114921. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114921>
- Tarbajova, V., Kolackova, M., Chaloupsky, P., Dobesova, M., Capal, P., Pilat, Z., ... Huska, D. (2023). Physiological and transcriptome profiling of *Chlorella sorokiniana*: A

- study on azo dye wastewater decolorization. *Journal of Hazardous Materials*, 460, 132450.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132450>
- Touliabah, H. E.-S., El-Sheekh, M. M., Ismail, M. M., & El-Kassas, H. (2022). A Review of Microalgae- and Cyanobacteria-Based Biodegradation of Organic Pollutants. *Molecules*, 27(3), 1141.
<https://doi.org/10.3390/molecules27031141>
- Verasoundarapandian, G., Lim, Z. S., Radziff, S. B. M., Taufik, S. H., Puasa, N. A., Shahrudin, N. A., ... Ahmad, S. A. (2022). Remediation of Pesticides by Microalgae as Feasible Approach in Agriculture: Bibliometric Strategies. *Agronomy*, 12(1), 117.
<https://doi.org/10.3390/agronomy12010117>
- Xiong, J.-Q., Kurade, M., & Jeon, B.-H. (2017). Can Microalgae Remove Pharmaceutical Contaminants from Water? *Trends in biotechnology*, 36.
<https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2017.09.003>
- Xu, K., Du, M., Yao, R., Luo, J., Chen, Z., Li, C., ... Wang, J. (2024). Microalgae-mediated heavy metal removal in wastewater treatment: Mechanisms, influencing factors, and novel techniques. *Algal Research*, 82, 103645.
<https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103645>
- Zainith, S., Saxena, G., Kishor, R., & Bharagava, R. (2020). *Application of Microalgae in Industrial Effluent Treatment, Contaminants Removal, and Biodiesel Production: Opportunities, Challenges, and Future Prospects*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820524-2.00020-1>

ÇEVRE BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com