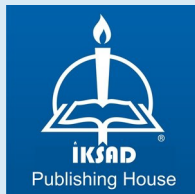


ÇEVRESEL PROBLEMLERİN ÇÖZÜMÜNDE YENİLİKÇİ YAKLAŞIMLAR III

Editörler:
Doç. Dr. Sinan KUL
Doç. Dr. İbrahim Hakkı KARAKAŞ



ÇEVRESEL PROBLEMLERİN ÇÖZÜMÜNDE YENİLİKÇİ YAKLAŞIMLAR III

Editörler:

Doç. Dr. Sinan KUL

Doç. Dr. İbrahim Hakkı KARAKAŞ

Yazarlar:

Prof. Dr. Beyhan KOCADAĞIŞTAN

Prof. Dr. Filiz Nuran ACAR

Prof. Dr. Hanefi BAYRAKTAR

Doç. Dr. Fatma EKMEKYAPAR TORUN

Doç. Dr. İbrahim Hakkı KARAKAŞ

Doç. Dr. Serkan BAYAR

Doç. Dr. Sinan KUL

Doç. Dr. Şahset İRDEMEZ

Dr. Öğr. Üyesi Cihan PALOLUOĞLU

Dr. Öğr. Üyesi Zeynep KARCIOĞLU KARAKAŞ



Copyright © 2023 by iksad publishing house
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, distributed or
transmitted in any form or by
any means, including photocopying, recording or other electronic or mechanical
methods, without the prior written permission of the publisher, except in the case of
brief quotations embodied in critical reviews and certain other noncommercial uses
permitted by copyright law. Institution of Economic Development and Social
Researches Publications®

(The Licence Number of Publicator: 2014/31220)

TÜRKİYE TR: +90 342 606 06 75

USA: +1 631 685 0 853

E mail: iksadyayinevi@gmail.com

www.iksadyayinevi.com

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.

Iksad Publications – 2023©

ISBN: 978-625-367-603-2

Cover Design: İbrahim KAYA

December / 2023

Ankara / Türkiye

Size = 16x24 cm

ÖNSÖZ

İnsan faaliyetlerinin çevre üzerindeki olumsuz sonuçlarının giderek daha belirgin hale geldiği günümüzde, çevre açısından sürdürülebilir uygulamalara ve yenilikçi çözümlere duyulan ihtiyaç her geçen gün daha açık bir şekilde hissedilir hale gelmektedir. Kentleşme hızlandıkça ve nüfus arttıkça, su kirliliği, hava kirliliği, atık sorunu ve sürdürülebilirlik gibi kavramların daha yoğun bir şekilde ele alınması zorunluluk haline gelmektedir. Çevresel problemler için sürdürülebilir çözümlerin üretilebilmesi kapsamlı araştırmalar gerektiren çok yönlü bir sorundur. Bu araştırmaların merkezinde, bir yandan atık oluşumunun azaltılması ve atık akışının etkisinin azaltılması bulunurken, bir yandan da mevcut atıklar ve kirlilikler için yeni yöntemlerin ya da süreçlerin tasarlanması veya teknolojik gelişmeler ışığında yeni stratejilerin geliştirilmesi bulunmaktadır. Çevresel sürdürülebilirlik geniş kapsamlı bir terimdir ve sürdürülebilir bir çevrenin sağlanması ancak, mevcut ve gelecek nesillerin refahını sağlayacak uyumlu bir denge arayışıyla, insan faaliyetleri ve doğal dünya arasındaki karmaşık etkileşimin iyice anlaşılması ile mümkün olabilir. Bu anlamda, hazırladığımız bu kitabımızla, sürdürülebilir çevre uygulamalarının daha derinlemesine anlaşılmasının sağlanması ve okuyucuların çevrenin korunmasındaki rolleri hakkında eleştirel düşünmeye ve olumlu değişimi savunmaya teşvik edilmesi amaçlanmaktadır. Alanlarında deneyimli araştırmacıların ortak çabalarıyla şekillenen bu derlemenin yeni fikirler ortaya çıkarması, çevre sorunlarının çözümü için yenilikçi yöntemlerin geliştirilmesi adına anlamlı tartışmaları teşvik etmesi ve daha sürdürülebilir bir gelecek için yenilikçi iyileştirmelere ilham vermesini umut ediyoruz.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	1
BÖLÜM 1	5
ARITMA ÇAMURU SORUNU VE SÜRDÜRÜLEBİLİR YÖNETİMİNDE YENİ YAKLAŞIMLAR	
Prof. Dr. Filiz Nuran ACAR	
BÖLÜM 2	37
HAVACILIK VE UZAY MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA KULLANILAN KARBON BAZLI KOMPOZİT ATIKLARININ OLASI ÇEVRESEL ETKİLERİ VE GERİ DÖNÜŞÜMÜ	
Doç. Dr. İbrahim Hakkı KARAKAŞ	
Dr. Öğr. Üyesi Zeynep KARCIOĞLU KARAKAŞ	
BÖLÜM 3	77
PM_{2,5}'LAR VE PM_{2,5}'LARA BAĞLI AĞIR METALLERİN KONSANTRASYON VE KAREKTERİZASYONLARININ BELİRLENMESİNE YÖNELİK YENİLİKÇİ MÜHENDİSLİK YAKLAŞIMLARI	
Dr. Öğr. Üyesi Cihan PALOLUOĞLU	
Prof. Dr. Hanefi BAYRAKTAR	
Doç. Dr. Serkan BAYAR	
BÖLÜM 4	107
ÇEVRE KAYNAKLARININ ETKİLİ KULLANIMI VE KAVRAMLAR	
Prof. Dr. Beyhan KOCADAĞIŞTAN	
Doç. Dr. Fatma EKMEKYAPAR TORUN	
BÖLÜM 5	127
TOPRAK KİRLİLİĞİ VE KİRLENMİŞ SAHALARIN İYİLEŞTİRİLMESİNDE BİYOREMEDİASYON	
Doç. Dr. Şahset İRDEMEZ	
Doç. Dr. Sinan KUL	
BÖLÜM 6	149
ATMOSFERİK ORGANOKLORLU PESTİSİTLERİN (OCP'LERİN) YENİLİKÇİ YÖNTEMLER İLE ANALİZLENMESİ	
Dr. Öğr. Üyesi Cihan PALOLUOĞLU	

BÖLÜM 7..... 175

GELECEĞİN MALZEMESİ KOMPOZİTLER

Doç. Dr. Fatma EKMEKYAPAR TORUN

Prof. Dr. Beyhan KOCADAĞIŞTAN

BÖLÜM 1

ARITMA ÇAMURU SORUNU VE SÜRDÜRÜLEBİLİR YÖNETİMİNDE YENİ YAKLAŞIMLAR

Prof. Dr. Filiz Nuran ACAR^{1*}

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10445637>

^{1*}Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 25240, Erzurum, Türkiye. (facar@atauni.edu.tr). ORCID ID: 0000-0002-8743-4666.

GİRİŞ

Dünya nüfusu hızla kentleşmektedir. Kentleşme olgusu çok eski tarihlere dayansa da kentleşme eğiliminin 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren ivme kazandığı ve günümüze kadar en hızlı kentleşme oranının gelişmekte olan ülkelerde gerçekleştiği görülmektedir (Cui and Shi, 2012). 1960 yılında dünya nüfusunun %34'ü, 2000 yılında %47'si kentlerde yaşarken, 2022 yılı itibarıyla bu oran %57'ye ulaşmıştır ve 2050 yılına kadar dünya nüfusunun %70'inin kentlerde yaşayacağı tahmin edilmektedir. Benzer durum Türkiye için de geçerlidir. 1960 yılında %32 olan kent nüfus oranı, 2000 yılında %65 ve 2022 yılında %77'ye yükselmiştir (Worldbank, 2023). Teknolojik gelişmelere bağlı olarak sanayi faaliyetlerinin artması, sanayinin sosyo ekonomik katkıları, insanların modern yaşam istekleri gibi birtakım faktörler kentleşmeyi artırmıştır. Dünyada 2023 yılı verilerine göre nüfusu bir milyonun üzerinde 578 şehir vardır. Bu şehirlerin bir kısmı mega şehirler olarak tanımlanmaktadır ve nüfusları 10 milyonu aşmaktadır (World Population Review, 2023).

Kentlerdeki yoğunlaşma, çevresel riskleri de artırmaktadır. Çevresel risklerin en aza indirgenebilmesi kentsel sürdürülebilirliğin gerçekleştirilmesine bağlıdır. Kentsel sürdürülebilirliğin kritik faktörlerinden biri su yönetimidir. Kentlerdeki yoğun nüfus; daha fazla su tüketimi ve daha fazla atıksu üretimi anlamına gelmektedir. Önümüzdeki 30 yılda kentlerde endüstriyel ve evsel su talebinin %50-80 oranında artması beklenmektedir (He *et al.*, 2021). Dolayısıyla kentleşme eğilimi, ham su kaynaklarının araştırılmasını, arıtma ve dağıtım sistemlerinin geliştirilmesini gerektiren taşınabilir su talebini artırmıştır. Artan talebin karşılanması ve güvenilir su temini son derece önemlidir. Kentlerde içme ve kullanma suyu genellikle yüzeysel sulardan temin edilmektedir. Esas olarak nehirlerden gelen yüzey suyu, askıda katıların yanı sıra koloidal katı ve diğer yabancı maddeleri de taşır. Bu nedenle, mevcut ham suyun kalitesine ve kullanıcıların ihtiyaç duyduğu kaliteye bağlı olarak uygun arıtma gerektirir (Ahmad *et al.* 2016). Geleneksel su arıtma tesislerinde, katı maddelerin, demir tuzları veya alüminyum tuzları kullanılarak, koagülasyon, flokülasyon, çökeltme prosesleri ile sudan elemine edilmesi sonucunda kimyasal çamur oluşumu sözkonusudur. Çevresel sürdürülebilirlik için temiz ve güvenli suyun temini kadar oluşan atıksuların güvenli olarak arıtılması ve bertarafı çevresel konforun gerekliliklerindedir. Kentlerde oluşan atıksuların arıtıldığı tesislerin bazı

proseslerinde atık çamur üretilir. Bu üretim geleneksel atıksu arıtma tesislerinde çökebilir katıların çökeltilmesi ve biyolojik arıtma süreçlerinde biyokütle oluşumuna dayanmaktadır. İleri arıtma yapılan atıksu arıtma tesislerinde bazı ünitelerden atık çamur oluşmaktadır. Su arıtma ve evsel atıksu arıtma tesislerinde oluşan çamurların dışında endüstriyel atıksuların arıtımı sonrası, içeriğinde tehlikeli kimyasallar, ağır metaller barındıran endüstriyel atık çamur oluşumu sözkonusudur (Zhang *et al.*, 2017). Dolayısıyla atık çamurlar arıtma tesislerinin kaçınılmaz bir ürünüdür. Bu nedenle 1990'lı yılların ortasından itibaren çamur bertarafının en kritik çevresel konulardan biri olduğu bir gerçektir (Foladori *et al.*, 2010).

Çamur, arıtılan atık su hacminin yalnızca %1-2'sini temsil etmektedir. Ancak yönetimi son derece karmaşıktır ve maliyeti yüksektir. Bu maliyet genellikle atık su arıtma tesislerinin toplam işletme maliyetinin %25 ila %60'ı kapsar (Campbell, 2000; Perez-Elvira *et al.*, 2006; Spinosa *et al.*, 2011).

Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Gündemi 2030, 2030 yılına kadar kirliliğin azaltılmasını, atık depolamanın ortadan kaldırılmasını, tehlikeli kimyasalların ve malzemelerin salınımının en aza indirilmesini, arıtılmayan atıksu oranının yarıya indirilerek su kalitesinin iyileştirilmesini, dünya çapında önemli ölçüde artan geri dönüşüm ve güvenli yeniden kullanımın gerekliliğini Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi 6.3'te vurgulamıştır (United Nations, 2023). Bu hedefler kentler için sürdürülebilir atık yönetiminin gereklilikleridir. Arıtma çamurlarına uygulanan mevcut prosesler çamurun arıtılmasını ve bertarafını içermektedir. Çamur arıtma aşamalarında maddesel geri dönüşüm ve enerji kazanımı sözkonusudur. Ancak günümüzde temiz üretim teknolojilerine yönelmek sürdürülebilir çamur yönetimi için daha değerli bir yaklaşımdır. Küresel ölçekte, atıksulardan yılda 45 milyon kuru ton arıtma çamuru üretimi (Ferrentino *et al.*, 2023; Bagheri *et al.*, 2023) olduğu gerçeği atıkların en üst düzeyde geri dönüşümün ve geri kazanımın sağlanması ve temiz teknolojiler kullanılarak azatılması gerekliliğini öne çıkarmaktadır.

Bu çalışmada, evsel ve kentsel atıksu arıtma tesislerinden kaynaklanan günümüz arıtma çamurlarının özellikleri dikkate alınarak çamurun sürdürülebilir yönetiminde geri kazanım ve çamurun azaltılması ile ilgili yeni yaklaşımların incelenmesi amaçlanmıştır.

1. ARITMA ÇAMURLARI

1.1. Tanımı, Kaynakları

Aritma çamuru, sıvı ya da yarı katı formda, ham su ve/veya atık suyun arıtılması için uygulanan proseslerin türüne bağlı olarak ağırlıkça %0,25-12 katı madde içeren, geri kalan kısmı su olan bir atıktır (Gurjar and Tyagi, 2017).

Atıksu arıtma çamuru, Arıtma Çamuru Direktifinin A86/278/EEC sayılı 2 (a) maddesinde “Evsel veya kentsel atık suları arıtan tesislerden, evsel ve kentsel atıksulara benzer bileşime sahip atıksuları arıtan diğer kanalizasyon tesislerinden kalan çamur” olarak tanımlanmaktadır (Wurz *et al*, 2011).

Atıksu arıtma tesislerinde atıksu; mekanik, fiziksel, kimyasal veya biyolojik yöntemlere dayalı çeşitli prosesler kullanılarak arıtılır. Arıtma aşamalarına bağlı olarak üretilen çamurlar üç farklı kaynağa göre kategorize edilirler.

- Birincil çamur: Toplam katı madde içeriği %2-9 aralığında değişen genellikle birincil çökeltmede çökebilir katılardan oluşan çamurdur. Birincil aşamada flotasyon prosesi kullanılması durumunda oluşan çamur da bu kategoridedir (Foladori *et al.*, 2010; Gherghel *et al.*, 2019).
- İkincil çamur: Atık aktif çamur veya biyolojik çamur olarak da adlandırılmaktadır. İkincil çamurun toplam katı madde içeriği %0,5-1,5 aralığındadır. Aktif çamur veya biyofilm sistemleri gibi biyolojik prosesler; biyolojik olarak parçalanabilir madde üzerinde büyüyen mikroorganizmaları, endojen kalıntıları ve birincil çökeltmede (birincil çökelticinin mevcut olduğu durumda) giderilmeyen veya ham atık su ile biyolojik prosese giriş yapan inert katıları (birincil çökelticinin bulunmadığı durumda) içermektedir (Foladori *et al.*, 2010).
- Kimyasal çamur: Kireç, demir klorür, alüminyum sülfat ve kitosan gibi kimyasalların kimyasal çöktürme ünitelerinde kullanılmasıyla oluşmaktadır. Atıksu arıtma tesislerinde, kimyasal çamur kimyasal destekli birincil çökeltme prosesleri veya fosforun kimyasal çöktürülmesi işlemlerinden kaynaklanmaktadır. Bunlara ilaveten çamur arıtma hattında yoğunlaştırma ünitelerine kimyasal madde ilavesi sonucunda oluşur (Gherghel *et al.*, 2019).

1.2. Arıtma Çamuru Karakteristiği

Çamur uniform olmayan bileşime sahiptir (Husek *et al.*, 2022). Substrat olarak karakteristiği incelendiğinde; suyu alınmış kuru çamur, stabilizasyon proseslerine bağlı olarak, ortalama %50-70 organik madde ve %30-50 mineral bileşenler (%1-4 inorganik karbon dahil), %3,4-4,0 azot, %0,5-2,5 fosfor, mikro besinler de dahil olmak üzere önemli miktarda diğer besin maddeleri ve nispeten çok düşük miktarda lignin ve selüloz içermektedir (Fytily and Zabaniotou, 2008; Tyagi and Lo, 2013). Birincil ve ikincil çamurun karakteristikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Birincil ve İkincil Çamur Karakteristikleri (Fytily and Zabaniotou, 2008; Tyagi and Lo, 2013).

Parametre	Birincil Çamur	İkincil Çamur
Toplam Kuru Katı Madde (%TKM)	2,0-9,0	0,8-3,3
Uçucu Organik Katı Madde UKM (%TKM)	60-80	59-88
Azot (%TKM)	1,5-4,0	2,4-5,0
Fosfor (%TKM)	0,17-2,8	0,5-2,3
Potasyum (K ₂ O %TKM)	0-1	0,5-0,7
Selüloz (%TKM)	8,0-15,0	7,0-9,7
Silisyum (SiO ₂ %TKM)	15-20	Veri yok
Yağ ve gres (%TKM)	7,0-65	2-12
Protein (%TKM)	20-30	32-41
Demir (g/kg)	2,0-4,0	Veri yok
Alkalinite (mg/L CaCO ₃)	500-1500	580-1100
Organik asitler (mg/L asetat)	200-2000	1100-1700
Enerji içeriği (kJ/kg TKM)	2900-23000	19000-23000
pH	5,0-8,0	6,5-8,0

TKM: Toplam Katı Madde

Atıksu çamurunda bakteri, virüs ve protozoa gibi çeşitli patojenik canlı organizma türlerinin yanı sıra diğer parazitik helmintler mevcuttur (Fijalkowski *et al.*, 2017). Çamur tiplerine göre patojenler ve yoğunluk değerleri Tablo 2’de görülmektedir.

Tablo 2. Çamur Tiplerine Göre Patojen Organizmalar ve Yoğunlukları (Silva *et al.*, 2007)

Patojen	Çamur tipleri	Patojen yoğunluğu
Helmint yumurtaları	Birincil çamur	10^3-10^4 /kg TKM
	Çürümüş çamur	10^2-10^3 /kg TKM
	Kısmen susuzlaştırılmış çamur	10^1-10^3 /kg TKM
	Aerobik arıtmadan kısmen susuzlaştırılmış çamur	$10^2-7,5 \times 10^4$ /kg TKM
	Anaerobik çamur	$6,3 \times 10^3-1,5 \times 10^4$ /kg TKM
Protozoalar	Birincil çamur	$7,7 \times 10^4-3 \times 10^6$ /kg TKM
	Çürümüş çamur	$3 \times 10^6-4,1 \times 10^6$ /kg TKM
	Susuzlaştırılmış çamur	$7 \times 10^1-10^2$ /kg TKM
Bakteriler	Çamur	$10^1-8,8 \times 10^6$ /kg TKM
	Uzun havalandırma çamuru	10^8 /kg TKM
Virüsler	Birincil çamur	$3,8 \times 10^3-1,2 \times 10^5$ /L
	Çürümüş çamur	10^1-10^3 /L
	Biyolojik çamur	$10^1-8,8 \times 10^6$ /kg TKM

Diğer taraftan evsel/kentsel atıksu arıtma çamurlarında ağır metaller bulunmaktadır (Rulkens and Bien 2004; Fytli and Zabaniotou, 2008). Tablo 3 kuru çamurda mevcut tipik ağır metal değerlerini vermektedir.

Tablo 3. Atıksu Arıtma Çamurunda Tipik Ağır Metal İçerikleri (Fytli and Zabaniotou, 2008)

Ağır metal	Ortalama kuru çamur (mg/g)
Arsenic	10
Kadmiyum	10
Krom	500
Kobalt	30
Bakır	800
Demir	17000
Kurşun	500
Manganez	260
Civa	6
Molibden	4
Nikel	80
Selenyum	5
Kalay	14
Çinko	1700

Ayrıca mikroplastikler, nanopartiküller gibi kirleticilerle birlikte çeşitli organik kontaminantlar günümüz çamurlarının içeriğinde bulunan başlıca unsurlarıdır. Bunlar; polisiklik aromatik hidrokarbonlar, poliklorlu bifeniller,

adsorbe edilebilir organohalojenler, pestisitler, yüzey aktif maddeler, hormonlar (Husek *et al.*, 2022; Kacprzak *et al.*, 2017), per- ve polifloroalkil madde, dioksinler (Husek *et al.*, 2022) olarak çok çeşitlidirler. Organik kontaminatların çamurdaki varlığı ile ilgili Almanya’da farklı zamanlarda yapılan çalışmalara ait sonuçlar Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4. Kanalizasyon Çamurunda Organik Kontaminantların Ortalama Konsantrasyonları-Almanya (Dichtl *et al.*, 2007)

Kontaminatlar	Konsantrasyon (mg/kg kuru katı madde)	
	1988/89	1991/96
Adsorplanabilir organohalojenler	250-350	140-280
Poliklorlu bifeniller	<0,1	0,01-0,04
Polisiklik aromatik hidrokarbonlar	0,25-0,75	0,1-0,6
Di (2-etilhexil) ftalat	50-130	20-60
Nonilfenol	60-120	Veri yok
Poliklorlu dioksinler ve furanlar	<50*	15-45*

*ngTEQ/kg kuru katı madde TEQ: toksik ekivalent

Günümüz atıksu çamurlarında farmasotiklere de rastlanmaktadır (Fijalkowski *et al.*, 2017). İnsanların sıklıkla tükettiği çeşitli farmasotiklerin kanalizasyon çamurunda bulunan ortalama konsantrasyon değerleri Tablo 5’te görülmektedir.

Tablo 5. Farklı AB Ülkelerinde Çeşitli Farmasotiklerin Kanalizasyon Çamurundaki Konsantrasyonu (Fijalkowski *et al.*, 2017)

Farmasotik bileşikler	Ortalama değerler (ng/g)
Asesulfam potasyum	0,1-156,7
Asetil salisilik asit	0,6-563
Cloramfenol	0-7,6
Diklofenak	1,3-429,1
Ibuprofen	0,2-108,2
Ketoproen	0,3-8,6
Naproksen	0,2-9,0
Nitrofenol	0,2-22,2

2. ARITMA ÇAMURLARININ YÖNETİMİNDE MEVCUT UYGULAMALAR

Çamur yönetimi ile ilgili tarihsel süreçte Avrupa Birliği (AB) tarafından bir dizi yönetmelik onaylanmıştır. Arıtma çamurları ile ilgili olarak, 86/278/EEC sayılı Arıtma Çamuru Direktifi, arıtma çamurunun; toprağa, bitki

örtüsüne, hayvanlara ve insanlara zarar verebilecek herhangi bir etkiyi önleyecek şekilde tarımda kullanımını teşvik etmeyi amaçlamıştır. Aynı zamanda 1991 yılındaki Tehlikeli Atık Direktifi bu tür atıkların işlenmesine ilişkin kuralları belirlemiştir. Kentsel Atık Su Direktifi 91/271/EEC, 98/15/EC ile değiştirilip 2005 yılında yürürlüğe girerek ve atık sular için daha katı kalite standartları yürürlüğe koymuştur. Kentsel Atık Su Arıtma Direktifinin çamurla ilgili ana maddesi şu şekildedir:

Madde 14'te “atık su arıtımından kaynaklanan çamurlar uygun görüldüğü takdirde yeniden kullanılacaktır” ifadesi yer almaktadır.

Buna ek olarak, Madde 14 aynı zamanda “31 Aralık 1998 tarihine kadar çamurun gemilerden, boru hatlarından veya başka yollarla yüzey sularına boşaltılmasının aşamalı olarak durdurulmasını sağlama” zorunluluğu getirmektedir. Avrupa Birliği 1985 ile 2000 yılları arasında dioksinleri %90 oranında azaltma hedefi belirlenmiştir. 2000 yılında onaylanan ve 2005 yılında yürürlüğe giren yeni bir direktif, yakma sırasında yayılan dioksinleri sınırlamaktadır (Fytli and Zabaniotou, 2008).

Önceki yıllarda arıtma çamurlarının yönetimi ile ilgili alınan kararlarla, işlem gören stabilize edilmiş çamurların 2000 yılından sonra tarımsal alanlarda yaygın olarak kullanılacağı ve dolayısıyla çamur kirliliğinin azalacağı yönünde öngörüler mevcuttur. Bu öngörülerin nedeni; arıtma çamurunun, çamurdan elde edilen kompostun ve hatta çamur külünün bitkiler ve toprak kalitesini artıracak besin maddeleri içermesindedir. Ancak günümüz evsel atıksularının karakteristiğindeki değişiklikler, başka bir ifadeyle ekosisteme zarar verebilecek ve besin zincirine girebilecek farmasotikler, hormonlar gibi organik ve ağır metaller, nano partiküller gibi inorganik kirleticilerin varlığı çamurun uzun vadede tarımsal kullanımını engellemektedir (Fijalkowski et al., 2017; Husek *et al.*, 2022). En son AB, arıtma çamurunun kompostlaştırılması konusu ile ilgili 2019/1009 sayılı yönetmelikte, AB gübreleme ürünlerinde kanalizasyon çamurunun sınırlandırılması, 7/2022 tarihinden sonra arıtma çamurundan üretilen kompost ve çürütülmüş gübre içeren gübre ürünlerinin AB pazarında CE(Conformity European) işareti altında satılmasına izin verilmemesi kararı alınmıştır. AB düzeyinde inorganik kirleticiler (ağır metaller) için sınırlar belirlenmekte ve 86/278/EEC sayılı Konsey Direktifi tarafından kontrol edilmektedir. Ayrıca mevcut AB mevzuatına uygun olarak, Direktif 2008/98/EC'de biyolojik olarak parçalanabilen atıkların düzenli

depolanmasının azaltılması, malzeme kayıpları ve çevre korumasının artırılması nedeniyle kanalizasyon çamurunun düzenli depolama alanlarına verilmesinin kademeli olarak azaltılması istenmektedir. Direktif 2008/98/EC'de, atık depolama; atık miktarının azaltılamaması durumunda, malzeme veya enerji geri kazanımını desteklemek için atık hiyerarşisinde son çare olarak değerlendirilmektedir (Husek *et al.*, 2022). Dolayısıyla gün geçtikçe karakteristiği değişen arıtma çamurlarının yönetiminin hiyerarşik bir düzende gerçekleştirilmesi önemlidir. Atık yönetim hiyerarşisi dikkate alınarak arıtma çamurları için, Şekil 1'de görülen, öncelikli olarak temiz üretim yani çamurun önlenmesinin ardından azaltılması sağlandıktan sonra sırasıyla geri dönüşüm, arıtma ve bertaraf işlemleri gerçekleştirilmelidir. Atığın sürdürülebilir yönetimi için bu sıralama önemlidir.



Şekil 1. Arıtma çamuru için atık yönetim hiyerarşisi

Sürdürülebilirlik günümüzde sıkça kullanılan bir kavramdır. Etkin bir sürdürülebilirlik çevresel, ekonomik ve sosyal olmak üzere 3 temel unsurla gerçekleşir. Bu unsurlar çevresel-ekonomik, çevresel-sosyal, ekonomik-sosyal olarak sürekli birbirlerini etkiler ve belirli alanlarda kesişirler. Tüm alanların ortak kesişimi ile sürdürülebilir gelişim sağlanarak küresel hedefler doğrultusunda çevresel-ekonomik-sosyal uyumluluk gerçekleşir (Durdevic *et al.*, 2022).

Çevresel-ekonomik sürdürülebilirlik döngüsel ekonomik yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Bu strateji, çevrenin ve hammadde kaynaklarının korunmasını ve aynı zamanda geri kazanımın ekonomik katkılarına amaçlar.

Mevcut durumda çamura uygulanan işlemler genellikle çamur hattında gerçekleşmektedir. Öncelikli olarak organiklerin ve patojenlerin giderilmesini hedefleyen klasik işlemler aşağıda belirtildiği gibidir (Kacprzak et al., 2017; Vilakazi et al., 2023).

- Ön arıtma (eleme, öğütme)
- Birincil yoğunlaştırma (yerçekimi, yüzdürme, drenaj, bant, santrifüj)
- Sıvı çamur stabilizasyonu (anaerobik çürütme, aerobik çürütme, kireç ilavesi)
- İkincil yoğunlaştırma (yerçekimi, yüzdürme, drenaj, bant, santrifüj)
- Şartlandırma (elütrasyon, kimyasal, termal)
- Susuzlaştırma (plaka pres, bant pres, santrifüj, kurutma yatağı)
- Son arıtma (kompostlama, kurutma, yakma, ıslak oksidasyon, piroliz, dezenfeksiyon)
- Depolama (sıvı çamur, kuru çamur, kompost, kül)
- Ulaşım (karayolu, boru hattı, deniz)
- Nihai varış noktası (atık depolama, tarım/bahçecilik, orman, ıslah edilen arazi, arazi inşası, diğer kullanımlar)

Bu işlemler atık yönetim piramidinin arıtma ve bertaraf basamaklarını temsil etmekle birlikte arıtma yapılırken bazı proseslerde maddesel ve enerjisel olarak geri kazanım da gerçekleşmektedir. Maddesel geri kazanım; kompost üretimi, kuru maddenin inşaat malzemesi olarak kullanımı gibi katı maddenin tekrar döngüye alınması üzerinedir. Enerji olarak geri kazanım; karbonun anaerobik çürütme işlemi ile geri dönüşümü (Zhang et al., 2017) ve elde edilen biyogazın enerjiye dönüştürülmesi veya yakma işleminden enerji eldesidir (Fytli and Zabaniotou, 2008; Kacprzak et al., 2017).

3. ARITMA ÇAMURLARININ SÜRDÜRÜLEBİLİR YÖNETİMİNDE YENİ YAKLAŞIMLAR

Arıtma çamurunun geleneksel işlemlerle arıtılması ve bertarafı ile kaynak verimliliğine kısmen katkı sağlansa da çamur üretiminin sürekli artışı, çamurun tehlikeli maddeler içermesi gibi nedenler bertaraf yollarını

daraltmakta ve maliyetleri artırmaktadır (Bougrier *et al.*,2007; Foladori *et al.*, 2010).

Sürdürülebilir kalkınmayla uyumlu yaklaşım tarafından bakıldığında, çamurla ilgili iki amaç öne çıkmaktadır.

- Geri kazanım
- Üretilen çamur miktarının azaltılması

3.1. Geri Kazanım

Geri kazanım, sadece kaynak verimliliğini desteklemekle kalmayıp aynı zamanda kirliliğin önlenmesini sağlar. Geri kazanımın gerçekleştirilebileceği alanlardan biri evsel kaynaklı arıtma çamurlarıdır. Arıtma çamurlarından geri kazanılabilecek birçok unsur vardır.

3.1.1. Nutrient Geri Kazanımı

Çamurun doğrudan denize veya çöp depolama alanlarına atılması durumunda, fosfor ve azotun sızması ciddi ikincil kirlilik sorunlara yol açmaktadır (Bi *et al.*, 2014). Nutrientlerin alıcı ortamlara verilmesiyle doğal ortamlarda oluşturabileceği çevresel etkilerin azaltılmasına, kaynak kazanımı ve faydalı yeniden kullanım ile doğal kaynakların korunmasına katkı sağlamak için nutrientlerin geri kazanılması gerekmektedir. Nutrientler tarım için önemlidir ve modern tarım artan nüfusun gıda ihtiyacının karşılanması için azotlu ve fosforlu gübre kullanmaktadır.

Doğal olarak oluşan reaktif azotun %2'si yıldırımlardan %98'i biyolojik fiksasyondan gelir. Ancak azotun doğal fiksasyonu artan dünya nüfusunun gıda ve enerji talebini karşılamada yetersiz kalmaktadır (Sengupta *et al.*, 2015). Benzer durum fosfat için de geçerlidir. Fosfat kayaçları yenilenebilir bir doğal kaynak değildir. Bazı tahminler fosfat kayaçları rezervinin 50-100 yıl olduğunu (Atienza-Martinez *et al.*, 2014), bazı tahminler yeni kaynakların olabileceği öngörüsüyle 370 yıl (Cooper *et al.*, 2011) olduğunu ifade etmektedir. Fosfat kayaçlarından elde edilen fosforun yaklaşık %90'ı tarımda gübre olarak kullanılmaktadır (Cooper *et al.*, 2011).

Atıksu arıtma çamurları önemli bir nutrient kaynağıdır. İçerdiği besin elementlerinden dolayı toprağı iyileştirme kapasitesi olmasına rağmen arıtma çamurlarının ekosistemde risk oluşturabilecek kirleticiler barındırması tarımsal

alanlarda kullanımını kısıtlamaktadır. Ayrıca atık yakma ünitelerinde veya çimento fabrikalarında bertaraf edilen arıtma çamurlarındaki fosforun geri dönüşümü olmamaktadır yani fosfor döngüden çıkmaktadır. Yakma işlemi sonunda elde edilen çamur külündeki tehlikeli ve toksik bileşenlerden dolayı fosforun geri kazanılması gerekmektedir (Cengiz *et al.*, 2022). Çamurdan azot ve fosforun geri kazanımı, anaerobik çamur çürütme proseslerinde çamur fermantasyon sıvısından strüvit (magnezyum amonyum fosfat heksahidrat- $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) çöktürmesi yoluyla gerçekleştirilebilmektedir. Strüvit tarımda kullanılan yavaş salınımlı etkili bir gübredir (Gherghel *et al.*, 2019). Bu işlem asidik ortamda çamurun çözündürülmesi, fosfor bakımından yoğun sıvı fazın ayrılması ve sıvı fazdaki nutrientlerin strüvit formunda çöktürülmesi ve çökeltinin ayrılması aşamaları ile gerçekleşir (Kuşçu and Çelik, 2019). Strüvit oluşumunu sağlamak için Mg^{2+} ilavesine ihtiyaç vardır. Teorik olarak Mg: N: P'nin molar oranı 1:1:1 olmasına rağmen araştırmalar farklı Mg kaynağı kullanıldığında Mg:P oranının 1,6-2,7 olduğunu göstermiştir. Çürütülmüş çamur sıvılarından strüvit geri kazanılmasında akışkan yataklı reaktör, havayla karıştırılan reaktörler kullanılmıştır.

Strüvit geri kazanımına ilaveten, hidroksil kalsiyum fosfat kristalizasyonu ve demir fosfat çökeltisi oluşturularak azot ve fosforu geri kazanmak mümkündür.

Azot geri kazanımı iyon değişimi/adsorpsiyon işlemleriyle sağlanabilir. İlaveten biyoelektrokimyasal sistemler, azotu verimli ve etkili bir şekilde amonyak (NH_3) veya amonyum sülfat ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) olarak geri kazanan proseslerdir. Anaerobik çürütücüden amonyağın havayla sıyrılmasıyla azotun %70-92'sinin geri kazanıldığı kanıtlanmıştır. Membran ayırma ile azotun ortamda ikincil kirletici madde olmadan %99-100 oranında geri kazanımı gerçekleştirilmiştir (Shi *et al.*, 2018).

Çamur sıvısından amonyak ve fosfatın geri kazanım işlemleri elektrodializ ve ters ozmoz işlemlerinin kullanılmasıyla geliştirilebilir (Spinosa *et al.*, 2011). Arıtma çamurunun ısıl işleminden elde edilen küller, esas olarak yakılan malzemelerin hacmindeki önemli azalma (%70-90) nedeniyle çok daha yüksek miktarlarda fosfor içerir (Cieslik and Konieczka, 2017). Yakma sonrası oluşan çamur külünden fosfat geri kazanımı için ıslak kimyasal arıtma ve termokimyasal arıtma teknolojileri kullanılabilir. Islak kimyasal arıtma teknolojisi, sıvı faza güçlü asitler veya alkaliler

ekleyerek, aynı zamanda süpernatandan ağır metalleri ve patojenleri uzaklaştırarak, kanalizasyon çamuru ve arıtma çamuru külünden fosfatı serbest bırakabilir. Termokimyasal olarak döner fırında çamur külünden fosfatın geri kazanılabilmektedir (Gherghel *et al.*, 2019). Yüksek gradyanlı manyetik ayırma ve kristal formda yüzdürme gibi teknikler çamur külünden fosforun geri kazanılması için kullanılmıştır (Shi *et al.*, 2018).

3.1.2. Protein Geri Kazanımı

İçeriği yaklaşık %61 protein, %11 karbonhidrat, %1 lipit ve %27 diğer bileşenlerden oluşan arıtma çamuru sahip olduğu özellikler nedeniyle bir protein kaynağı olarak değerlendirilebilir. Bakteri hücrelerinin kuru ağırlığının %50'si proteindir. Proteinler hayvan yemlerinde bulunan ve enerji sağlayan bileşenlerdir (Gherghel *et al.*, 2019). Çamurda proteinlerin çözündürülmesi ultrases, mikrodalga gibi fiziksel; asidik ve alkali ortamlarda kimyasal, enzimatik yolla biyolojik ve termal yöntemlerle sağlanır (Xiao, 2020). Protein geri kazanımı; eleme, arıtma, filtreleme, protein çökeltme (protein çözüntüsünden), protein çökeltisinin kurutulması ve nihai protein ürününün geri kazanılması aşamalarıyla gerçekleşir. Proteinin geri kazanım süreçlerindeki başlıca problem çamurlarda ağır metallerin bulunmasıdır. Ağır metaller proteinlerle birlikte geri kazanılır. Özellikle amaç proteinleri hayvanlar için besin takviyesi olarak kullanmaksa bu durum sorun haline gelmektedir (Tyagi and Lo, 2013). Ancak çamurun protein üretiminde kullanılması bir seçenek olmaya devam etmektedir (Gherghel *et al.*, 2019).

3.1.3. Enzim Geri Kazanımı

Enzimler, kimyasal reaksiyonların hızını artıran biyolojik katalizörlerdir. Atıksu arıtma çamurlarının üç temel bileşeni karbonhidratlar, proteinler ve lipitler organik maddenin yaklaşık %80'ini temsil etmektedir. Bu nedenle, lipaz, dehidrojenaz, glikosidaz, peroksidaz ve aminopeptidaz gibi çeşitli enzimlerin geniş ticari önemleri göz önüne alındığında arıtma çamurlarından geri kazanılabilirliği önemlidir (Raheem *et al.*, 2018). Enzimler gıda, deterjan, ilaç, kimya, kozmetik endüstrileri gibi farklı sektörlerde kullanılmaktadır. Bu nedenle atıksu arıtma çamurlarından elde edilebilecek enzimler potansiyel olarak endüstriyel işlem süresini ve maliyetini azaltabilir. Enzim geri kazanımı farklı yöntemler izlenerek sağlanabilir. Tek başına veya kombinasyon halinde

çamurun fiziksel olarak parçalanması ve kimyasal özütleyici ilavesi yoluyla farklı ekstraksiyon yöntemleri kullanılarak enzim elde edilebilir. Sonikasyon işlemi, aktif çamur bozunması ve enzim salınımı için en uygun yöntem olarak tanımlanmaktadır. Yüze aktif maddeler, formaldehit, etilen diamin tetra asetik asit (EDTA) ve sodyum tripolifosfat (SPP) gibi katyon değiştiriciler, enzim ekstraksiyonunda kullanılan kimyasal özütleyicilerdir.

Bununla birlikte, pratikte, tam ölçekte amaç, muhtemelen çamura yüze aktif madde varlığında sonikasyon işlemi ile nispeten agresif bir ekstraksiyon yöntemi uygulamaktır (Liu and Smith, 2021). Nabarlatz *et al.*, 2012, çalışmalarında hidrolitik enzimlerden proteaz ve lipazı, iyonik olmayan bir deterjanla birlikte ultrasonik parçalama yoluyla aktif çamurdan ekstrakte etmişlerdir. Bir başka çalışmada, Yu *et al.*, 2009, 20 kHz ve 40 kHz'de ultrasonikasyonla ve EDTA kullanarak çamurdan enzim ekstraksiyonunda 20 kHz'deki ultrasonikasyonun, 40 kHz'e ve EDTA yöntemine göre daha fazla enzim türünü çıkarabildiği tespit etmişlerdir. Ancak çamurdan elde edilen enzimler henüz kullanılmamaktadır. Bu nedenle süreçlerin tekno-ekonomik değerlendirmesinin yanı sıra enzim geri kazanımını optimize etmek için bütünsel araştırmalara ihtiyaç vardır. (Raheem *et al.*, 2018). Çamurdan enzim ekstraksiyonunun sunduğu önemli fırsatlar ve avantajlar göz önüne alındığında, bundan sonraki adımların endüstriyel ölçekte bir prosesin öncüsü olarak pilot ölçekli bir proses oluşturmaaktır (Liu and Smith, 2021).

3.1.4. Biyoplastik Geri Kazanımı

Petrolde elde edilen sentetik plastiklerin çevrede kalarak önemli ekolojik sorunlar oluşturması günümüz dünyasının önemli çevre sorunlarından biridir. Bu nedenle petrol bazlı plastiklere alternatifler ürünlere ihtiyaç vardır. Böyle bir alternatif, biyolojik olarak parçalanabilir ve biyolojik olarak uyumlu olma avantajına sahip olan ve yaygın olarak biyoplastik olarak bilinen polihidroksialkanoattır (PHA) (Kumar *et al.*, 2018). Biyobozunurlukları nedeniyle PHA, ambalaj filmleri ve tek kullanımlık ürünler olarak kullanılır ve tıbbi alanda birçok uygulamaya sahiptir (Tyagi and Lo, 2013). Biyoplastikler, iki yöntemle üretilebilmektedir. Bunun bir yolu, PHA gibi bir enerji depolama bileşeni olarak mikroorganizmaların biyosentezidir. Diğer yol ise poli (p-fenilen) formik asit diol ester ve polilaktik asit gibi kimyasal oluşumlardandır. İlk yol, sonrakine göre daha çevre dostudur (Liu *et al.*, 2019). Bu nedenle

atıksu çamuru biyoplastik üretimi için hammadde olarak kullanılabilir (Tyagi and Lo, 2013). Atıksuyun biyolojik arıtımında, kolayca parçalanabilen substratların tercihen büyüme ve gelişme için kullanması yerine hızla PHA'a dönüştürülerek sürdürülebilir bir işlem gerçekleştirilebilir (Liu *et al.*, 2019). Doğada şeker ve lipitlerin bakteriyel fermantasyonu ile üretilen PHA'lar bakteriler tarafından üretilirler. Çamur PHA üretimi için kullanıldığında, atık malzemelerin biyolojik olarak parçalanabilen plastikler olarak geri kazanılması ve kullanılması, üretim maliyetlerinin düşürülmesini sağlar (Tyagi and Lo, 2013). Ayrıca karbon emisyonunun düşmesine katkı sağlar. Ekonomik değerlendirmeler, aktif çamurun PHA üretmek için kullanılması durumunda biyoplastik üretim maliyetinin %50'den fazla azaltılabileceğini göstermektedir (Liu *et al.*, 2019). Ancak teknik ve ekonomik olarak daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır (Gherghel *et al.*, 2019).

3.1.5. Ağır Metal Geri Kazanımı

Çinko, nikel, kadmiyum, kurşun, krom, bakır ve civa gibi çeşitli ağır metallerin varlığı canlı sağlığını ve alıcı ortamları olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenlerden dolayı arıtma çamurunun arazi uygulaması için kullanımı kısıtlanmaktadır. Çamurdaki ağır metal konsantrasyonu %0,5 ile %2 arasındadır. Ancak bazı durumlarda %6'ya kadar çıkabilmektedir. Bu nedenle ağır metallerin geri kazanımı ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Genel olarak metal içeren çamurlar, metal iyonlarını çıkarmak veya metalleri katı formda stabilize etmek için arıtılır (Tyagi and Lo, 2013). Çamurdan ağır metal geri kazanımı mikrodalga, ultrasonikasyon, piroliz, gazlaştırma prosesleriyle gerçekleştirilebilmektedir (Gherghel *et al.*, 2019).

3.1.6. Enerji Geri Kazanımı

Arıtma çamurlarından elde edilen en önemli enerji kaynağı anaerobik çürütücülerden elde edilen %50-70 metan, %30-50 karbondioksit ve diğer eser gazlardan oluşan biyogazdır. Anaerobik çürütücü çamurun stabilizasyonunda kullanılan geleneksel bir prosestir. Döngüsel ekonomi kavramı yaklaşımıyla biyogaz üretiminin iyileştirilmesi uygun bir çözümdür (Zhang *et al.*, 2017). Bu nedenle biyogaz üretimini arttırmak için ön arıtma yapılmaktadır. Mikrodalga ışınlama, ozonlama, ultrasonifikasyon, enzimatik işlem, alkali veya asit kullanımı, ıslak oksidasyon prosesleriyle çamurun ön işleme dezentegrasyonu

sağlanarak biyogaz üretimine katkı sağlanmaktadır. Çamurun dezentegrasyonu, dış kuvvetler vasıtasıyla çamurda flok yapısının bozulması ve hücre duvarının tahrip edilmesiyle hücre içi sıvıların açığa çıkarılmasıdır (Gherghel *et al.*, 2019).

Biyogazın dışında biyoyakıtlar gelecekte yenilenemeyen petrol yakıtlarının yerini alma potansiyeline sahip olduğundan, atık çamurun substrat olarak kullanılması son yıllarda ilgi görmeye başlamıştır. Hidrojen, çamurdan geri kazanılabilen biyoyakıtlardan biri olup, yüksek enerji verimi ve su nedeniyle temiz yanma sonucu sürdürülebilir bir alternatiftir. Bunu geri kazanmak ve ayrıca kanalizasyon çamurundan hidrojen açısından zengin yakıt gazı üretimini geliştirmek için kurutma, piroliz ve gazlaştırma gibi farklı termokimyasal işlemler araştırılmaktadır. Biyoyakıt üretimi ile ilgili araştırmalar; ıslak çamura kurutma yerine piroliz uygulandığında daha yüksek H₂ yüzdesine sahip gaz halindeki bir ürünün üretilebileceğini, hidrojenin karbon monoksitle birleşimi ile fosil yakıtlara alternatif olabilecek temiz bir sentez gazı oluşturulabileceğini göstermiştir. Ayrıca çamur pirolizinde ara sıcaklıklarda biyoyağlar gibi yan ürünlerin eldesi mümkün olmaktadır (Tyagi and Lo 2013).

Çamurdan geri kazanılabilen bir diğer ürün ise biyodizeldir. Biyodizel yağ asitleri metil esterleridir. Kanalizasyon çamuru lipit kaynağıdır (Tyagi ve Lo, 2013; Patino *et al.*, 2021). Çamur lipitleri; esas olarak kanalizasyonda emilen ve/veya doğrudan biriktirilen lipitlerden, hücre zarlarındaki fosfolipitlerden, mikrobiyal metabolitlerden ve parçalanmış hücrelerin ürünlerinden oluşmaktadır. Çamurdaki hücre lipitleri ditrigliseritleri, trigliseritleri, fosfolipitleri, monogliseritleri, steroller ve serbest yağ asitlerini içerir. Fosfolipidler, kuru ağırlığa dayalı olarak hücrelerin yaklaşık %24-25'i kadar bir yüzdeye sahiptir. Ayrıca yağ asitleri, steroller ve bazı alifatik bileşenler kuru çamurun bileşiminde %36,8'e kadar bulunabilmektedir. Bu nedenle bol miktarda yağ asidi ve trigliserit bileşenleri içeren kanalizasyon çamuru alkollerle reaksiyona girebilir ve yağ asidi metil esterleri oluşturabilir. Biyodizel üretiminde çamura sırasıyla i) kurutma, ultrasonifikasyon, ısı işlem veya alkali/asit hidrolizi gibi ön işlemler ii) lipit ekstraksiyonu iii) esterifikasyon/transesterifikasyon uygulanır. Çamurlardan biyodizel üretiminde, kullanılan asidik veya alkali katalizörler, solventler, uygulanan ön işlemler, biyodizel üretim veriminde etkilidir. Çeşitli araştırmalar arıtma

çamurundan biyodizel eldesinde çok düşük verimlerden %90 verime kadar geniş bir aralıkta sonuçlar elde edildiğini göstermektedir (Liu *et al.*, 2021).

3.2. Çamurun Azaltılması

İnsan kaynaklı atık üretilmesinden dolayı çamurun önlenmesi mümkün değildir. Bu nedenle üretilen çamur hacmini azaltmak daha gerçekçi ve uygulanabilir bir yaklaşımdır.

Çamur hacmi;

- Islak çamur hacminin azaltılması
- Çamurun kuru kütlelerinin azaltılması şeklinde iki yolla gerçekleştirilebilir.

Çamurun suyunun alınması, çamurdaki katı içeriğinin önemli ölçüde artırılmasını sağlar ve dolayısıyla bertaraf edilecek ıslak çamurun hacmini azaltır. Susuzlaştırma çamurun bertarafı öncesi uygulanan klasik bir işlemdir.

Çamurun kuru kütlelerinin azaltılması ise, katı içeriğinin ve hacminin azalmasına neden olan bir işlemdir. Bu strateji çamurun azaltılması için daha iyi bir seçimdir ve yeni yaklaşımları içerir. Biyolojik arıtma aşamasında çamurun kuru kütlelerinin anında azaltılmasına olanak tanıyan üstünlüğe sahiptir (Foladori *et al.*, 2010).

Çamurun kuru kütlelerinin azaltılması; mekanik, fiziksel, kimyasal, biyolojik ve termal olarak çeşitli tekniklerle sağlanabilmektedir (Zhang *et al.*, 2017). Çeşitli mekanizmalara dayanan bu yöntemlerle katıların çözündürülmesi ve çamurdaki bakteri hücrelerinin parçalanması gerçekleştirilmektedir. Burada amaç; atıksu arıtma ünitelerinde doğrudan yani kaynağında çamur üretiminin azaltılması, çamur işleme ünitelerindeki çamur kütlelerinin azaltılması ve aynı zamanda anaerobik çürütme işleminin öncesinde bir ön işlem olarak kullanılması ile anaerobik çürütme prosesinde biyogaz üretiminin artırılması veya bazı durumlarda susuzlaştırılabilirliğin iyileştirilmesi, bazı durumlarda atıksu işleme ünitelerinde denitrifikasyonu ve fosfor giderimini desteklemek için ek bir karbon kaynağı üretilmesidir.

Bu hedefler atıksu arıtma tesislerinde;

- Atıksu hattında-atıksu arıtma ünitelerinde

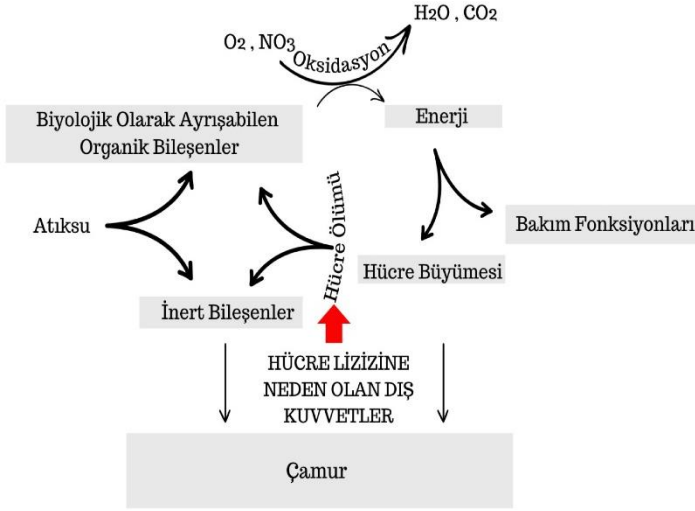
- Çamur hattında-çamur işleme ünitelerinde gerçekleştirilir (Perez-Elvira *et al.*, 2006; Foladori *et al.*, 2010).

Atıksu hattı ve çamur hattında çamurun kuru kütlelerinin azaltılmasına yönelik mekanizmalar aşağıdaki gibidir (Perez-Elvira *et al.*, 2006; Foladori *et al.*, 2010).

- Hücre lizizi-kriptik büyüme (atıksu hattı ve çamur hattı)
- Endojen metabolizma (atıksu hattı ve çamur hattı)
- Mikrobiyal parçalama (atıksu hattı ve çamur hattı)
- Enerji ayrımı (atıksu hattı)

3.2.1. Hücre Lizizi-Kriptik Büyüme

Bu strateji, aynı popülasyona ait canlı hücreler tarafından hücrelerin sindirimi sonucu ortama yayılan hücre içi bileşiklerin (karbonlu bileşikler ve besinler) yeniden kullanılmasına dayanmaktadır. Dış kuvvetler uygulandığında ve mikrobiyal hücreler parçalanmaya maruz kaldığında, substrat ve besinler serbest kalır ve organik yüklemeye katkısı olan yeni bir substrat üretilmiş olur. Serbest bırakılan bu substratın mikrobiyal metabolizmada tekrar kullanılması, karbonun bir kısmının solunum ürünü olarak serbest kalması gerçekleşir ve indirgenmiş biyokütle üretilir. Substrat üzerinde oluşan biyokütle büyümesi orijinal organik substrattaki büyümeden ayrılmadığı için kriptik “şifreli ya da gizli” büyüme olarak adlandırılır. Karbonlu maddenin bir kısmının solunum ürünü olarak dışarı atıldığı göz önüne alındığında, bu büyüme çamur üretiminde net bir azalmaya neden olur. Bu mekanizma hücre tahribatı ve biyodegradasyon aşamalarından oluşmaktadır. Sindirim-kriptik büyümenin; hız sınırlayıcı basamağı sindirim basamağıdır ve hücre tahribatı veriminin artması çamur üretiminin azalmasını sağlamaktadır. Hücre lizisini ve bunun sonucunda ortaya çıkan gizli büyümeyi sağlamak için uygulanan tekniklerle, hücre lizisinin yanı sıra çamur floklarının dağılması sözkonusu olup böylece hidroliz prosesi artar (Romero *et al.*, 2013; Wei *et al.*, 2003). Şekil 2 çamur üretim şemasında dış kuvvetlerin hücre ölümü ve lizizi üzerindeki etkisini göstermektedir.



Şekil 2. Çamur üretimi şemasında hücre ölümü ve lizisi üzerine dış kuvvetlerin etkisi (Foladori *et al.*, 2010'dan uyarlanmıştır)

Bu mekanizma atıksu hattı ve çamur hattında uygulanabilmektedir. Hücre lizisi-kriptik büyüme mekanizmasının gerçekleşmesi için uygulanan teknikler (Foladori *et al.*, 2010; Ødegaard, 2004; Wei *et al.*, 2003) şunlardır.

- Enzimatik hidroliz: Bu işlem ortama enzim ilave edilmesiyle gerçekleştirilir. Enzimler, aktif çamur gibi biyolojik olarak parçalanabilen maddelerin bozunma hızını artırmaktadır. Hidrolitik enzimler, polimerik maddeleri çok aşamalı süreçlerle parçalayabilir; bu süreçte bileşikler dirençli bir durumdan biyolojik olarak daha fazla parçalanabilen bir duruma dönüştürülebilir. Fazla çamurun bileşiminde yüksek miktarda protein, karbonhidrat ve lipit varlığı göz önüne alındığında, proteaz, lipaz, selülaz, emiselülaz ve amilaz gibi enzimlerin eklenmesi sözkonusudur.
- Mekanik arıtma: Mekanik arıtma ile bakteri hücresi tahribatı ve biyolojik flokların parçalanması sağlanarak çamurun çözünübilirliğini arttırmak amaçlanır. Genel olarak düşük enerjide sadece flok parçalanması gözlenirken, yüksek enerjide mikrobiyal hücrelerin tahribatı sağlanmaktadır. Karıştırılmalı bilyeli değirmenler, yüksek basınçlı homojenleştiriciler, yüksek basınçlı jet mekanik arıtmada kullanılan cihazlardır.

- Ultrasonikasyon: Ultrasonikasyon 20-40 kHz frekanslarda basınç dalgaları, sıvı fazda kavitasyon kabarcıklarının oluşmasına yol açar; bu kabarcıklar büyür ve sonrasında patlayarak lokalize yüksek enerji (yerel ısıtma ve yüksek basınç) açığa çıkarır, bu mikrobiyal hücrelerin parçalanmasına neden olmaktadır.
- Termal arıtma: Çamura termal arıtımının uygulanması (çamurun ısıtılması yoluyla) çamur topaklarının ayrışmasını, yüksek seviyede çözünürlük, hücre lizizi ve hücre içi bağlı suyun salınmasını sağlar.
- Kimyasal ve termokimyasal hidroliz: Kimyasal veya termokimyasal işlemler sodyum hidroksit gibi alkali veya sülfürik asit gibi asit reaktifler kullanılması ve sıcaklığın artırılması ile hücre lizizi-kriptik büyüme sürecini teşvik eden hücre kırılması meydana gelir. Basit ısıl işlemle karşılaştırıldığında termokimyasal arıtma, aynı sıcaklıkta uygulandığında çamurun çözündürülmesinde daha yüksek bir verimliliğe sahiptir.
- Ozon veya diğer oksidanlarla oksidasyon: Biyolojik bozunmayla birleştirilmiş oksidatif arıtma, çamurun azaltılmasında çok etkilidir. Bunun için ozon, hidrojen peroksit gibi çeşitli oksidanlar kullanılarak flok parçalanması ve hücrenin tahribatı sağlanmaktadır.
- Elektriksel arıtma: Çamura saniyede binlerce kez yüksek voltajlı (420 kV) elektrik darbeleri gönderen cihazlar vasıtasıyla hücre zarlarında ve hücre duvarlarında gözenek açıklıkları oluşur. Bu hücrelerin yırtılmasına ve parçalanmasına neden olmaktadır.

3.2.2. Endojen Metabolizma

Mikroorganizmalar metabolik faaliyetlerinde enerjilerinin bir kısmını yaşamsal fonksiyonlarını devam ettirmek için kullanırlar. Genel olarak hücre materyallerinin dönüşümü, aktif taşıma ve hareketlilik için kullanılan enerji bakım enerjisi olarak kabul edilir. Yaşamsal metabolizmanın önemi, bakımla ilişkili substrat tüketiminin yeni hücresele kütleyle sentezlenmemesinden dolayıdır (Liu and Tay, 2001). Endojen (içsel) metabolizma, net bir büyümenin mümkün olmadığı ancak hücrelerin canlı kalabilmek için enerji tükettiği bir durum olarak tanımlanmaktadır (Foladori *et al.*, 2010). Daha az biyokütle üretimini sağlanması, substratın son olarak karbondioksit ve suya dönüşmesi endojen metabolizmanın en önemli üstünlüğüdür. Endojen solunum genellikle

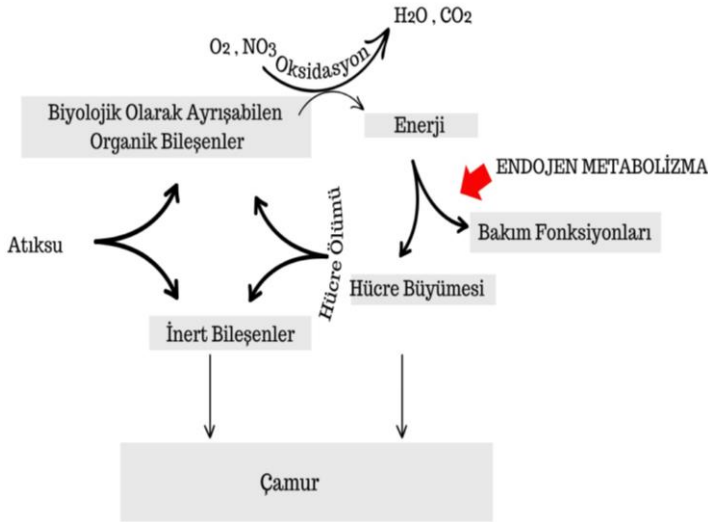
biyokütlenin kendi kendine sindirimi olarak da adlandırılır. Sürekli bir kültür büyümesinde, endojen metabolizmalar eş zamanlı olarak meydana gelebilir. Atık su arıtma proseslerinde mikrobiyal büyümenin ve substrat gideriminin kontrolü kadar endojen solunumun kontrolü de önemlidir (Liu and Tay, 2001). Büyüme dışı faaliyetlere, özellikle de bakım işlevlerine yönelik enerji gereksinimlerinin artırılmasıyla, biyokütlenin büyümesi için mevcut olan enerji miktarı azalması mümkündür. Hücresel sentez yerine bakım gereksinimleri için kullanılan enerjinin maksimuma çıkarılmasıyla çamur üretiminde önemli bir azalma sağlanabilir (Foladori *et al.*, 2010). Çamur üretim şemasında endojen metabolizmanın etkisi Şekil 3'te görülmektedir. Bu mekanizma atıksu ve çamur hattında oluşturulabilir.

Atıksu hattında aşağıdaki tekniklerle endojen metabolizma oluşmaktadır (Foladori *et al.*, 2010).

- Uzun havalandırılmalı prosesler: Aktif çamur sistemi, uzun havalandırma prosesleri gibi yeterince uzun bir çamur yaşında ve düşük F/M oranında çalıştığında, çamur yaşına bağlı olarak daha düşük biyokütle verimi nedeniyle aşırı çamur üretimi genellikle azalmaktadır.
- Membran biyoreaktörler: Bu proseste, daha yüksek çamur konsantrasyonu, daha düşük F/M oranı ve daha uzun çamur yaşı söz konusudur. Bu koşullar hücre büyümesini desteklemez ve enerji bakım gereksinimlerinin artmasına neden olur. Bu durum çamur üretimin azaltır.
- Granüler çamur: Atık suyu arıtan mikroorganizmaların kendi kendine hareketsiz hale getirilmesine dayanan bir sistemdir. Kompakt ve yoğun aerobik granüller, güçlü bir mikrobiyal yapı ve genel olarak iyi çökebilirlik özelliğindedir. Granüler çamurda gözlemlenen çamur verimi, aktif çamur sistemlerine göre daha düşük çamur üretir. Düşük çamur üretimi muhtemelen endojen metabolizma ve yüksek bakım gereksinimlerinden kaynaklanmaktadır. Granüllerin iç kısmında denitrifikasyon meydana gelir ve anabolizma için mevcut enerji çok düşüktür, bu da sınırlı bakteri büyümesine neden olur.

Çamur hattında aşağıda sıralanan klasik teknikler uygulanmaktadır (Foladori *et al.*, 2010).

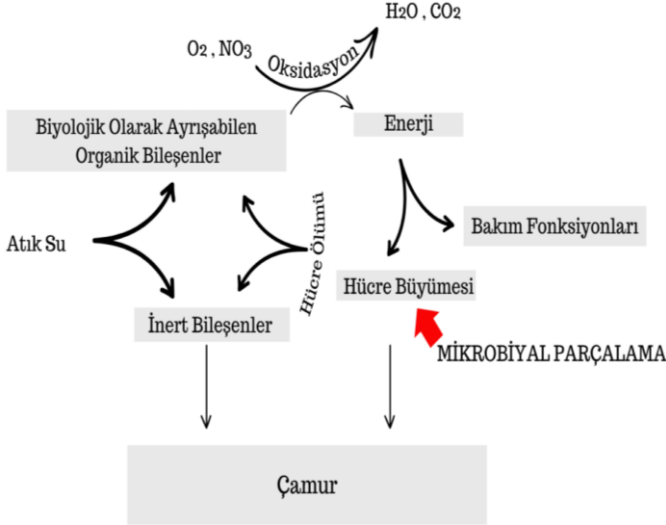
- Aerobik çürütme: Aktif çamur prosesinin bir uzantısı olarak düşünülen ve havalandırma yoluyla endojen metabolizmayı oluşturmak üzere uygulanan proses olup çamur azaltımı genellikle uzun sürelerde bile düşüktür.
- Anaerobik çürütme: Anaerobik sindirim mezofilik veya termofilik koşullar altında çamur azaltımı ve biyogaz üretimi için uygulanan bir prosestir.



Şekil 3. Çamur üretim şemasında endojen metabolizmanın etkisi (Foladori *et al.*, 2010'dan uyarlanmıştır)

3.2.3. Mikrobiyal Parçalama

Atık su arıtımında yer alan biyolojik süreçler, bakteriler ve avcılardan oluşan karmaşık bir ekosistemi temsil eder ve mikrobiyal parçalayıcılığın artırılmasıyla çamur üretimi azaltılabilir. Hem canlı hem de ölü bakteriler, protozoa ve metazoa gibi daha yüksek organizmalar için bir besin kaynağıdır. Bir organizma diğerini parçaladığında toplam biyokütle miktarı azalır ve besin zincirinin daha yüksek bir trofik düzeyine aktarım gerçekleşir. Bu şekilde biyokütlenin bir kısmı ve potansiyel enerji ısı olarak kaybolur ve boşaltım ürünleri, biyokütle büyümesinin azalmasına ve çamur üretiminin azalmasına neden olur (Foladori *et al.*, 2010; Wei *et al.*, 2003). Şekil 4 çamur üretim şemasında mikrobiyal parçalamanın etkisini göstermektedir.



Şekil 4. Çamur üretim şemasında mikrobiyal parçalamanın etkisi (Foladori *et al.*, 2010'dan uyarlanmıştır)

Bu mekanizma hem atıksu hem de çamur hattında gerçekleştirilebilir.

3.2.4. Enerji Ayrımı

Metabolizma, birbiriyle ilişkili katabolik ve anabolik reaksiyonları içeren biyokimyasal dönüşümlerin toplamıdır ve mikrobiyal kültürün davranışları, katabolizma ve anabolizma tarafından belirlenir (Liu and Tay, 2001). Katabolizma, organik bileşiklerin kompleks yapılarını parçalayan reaksiyon dizinidir ve serbest enerji üretilir. Anabolizma, molekülleri oluşturmak için serbest enerjinin kullanılmasını kapsar (Wei *et al.*, 2003). Mikroorganizmalar enerji elde etmek ve yeni hücreler üretmek için atık sudaki organik maddeleri karbon kaynağı olarak kullanırlar. Katabolik süreç organik maddeyi enerjiye ve metabolitlere dönüştürür. Bu enerji daha sonra yaşamsal gereksinimlerini karşılamak ve metabolitlerin yeni biyokütleyle dönüştürüldüğü anabolik süreci desteklemek için kullanılır (Foladori *et al.*, 2010). Adenozin trifosfat (ATP) bu süreçte önemli bir rol oynar. ATP sentezi, elektron taşıma sistemi aracılığıyla substrattan ayrılan yüksek enerjili elektronların O₂'ye aktarılması sırasında kademeli olarak gerçekleşir ve bu işlem oksidatif fosforilasyon olarak tanımlanır. Burada substrat elektron vericisi, O₂ elektron alıcısıdır. ATP'nin tekrar ADP + P'ye dönüşümü sırasında açığa çıkan enerji,

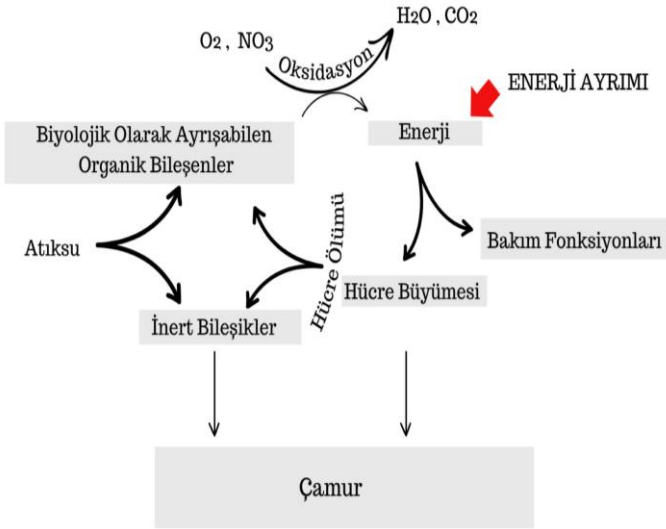
hücre anabolizmasında büyüme ve yaşamsal fonksiyonlar için kullanılır. Bununla birlikte, ağır metallerin varlığı, anormal sıcaklığın ve alternatif aerobik-anaerobik döngünün varlığı gibi bazı koşullar altında, solunumda meydana gelen değişim metabolik döngüyü bozarak katabolik faaliyette üretilen enerjinin anabolizmaya aktarımını kısıtlar. Bu durumda katabolizma anabolizmayla eşleşmemektedir ve organik substratın oksidasyonundan üretilen enerji ATP olarak depolanmak yerine ısı olarak kaybolmaktadır (Liu and Tay, 2001). Oksidatif fosforilasyonun ATP formunda maksimum teorik metabolik enerji miktarını üretmedeki yetersizlik, Russel ve Cook (1995) tarafından "ayrılma" olarak tanımlanmıştır. Dolayısıyla bu ayrılma, katabolizma ve anabolizma arasındaki enerji seviyesindeki farklılığı artırır ve anabolizma için mevcut enerjiyi sınırlandırır ve bu durum "enerji ayrımı" olarak ifade edilir (Foladori *et al.*, 2010). Enerji ayrımı tanımı, substrat tüketim oranının büyüme ve bakım için gerekenden daha yüksek olduğu şeklinde de ifade edilebilir. Sonuç olarak, enerji ayrışması koşulları altında gözlemlenen aktif çamurun büyüme verimi önemli ölçüde azalacaktır (Liu and Tay 2001). Bakteriler, büyümeye enerji harcamadan öncelikle bakım fonksiyonlarını yerine getirirler ve sonuç olarak yeni hücrelerin sentezi için daha az enerji kalır. Böylece biyokütle verimi azalarak çamur üretimi azalmış olur. Bu mekanizmanın amacı, atık sudan organik madde uzaklaştırma verimliliğini düşürmeden büyüme verimini azaltmak amacıyla anabolizmaya yönelik enerjinin bağlantısını kesmektir (Foladori *et al.*, 2010). Enerji ayrımı, katabolizmanın anabolizmadan ayrılmasını en üst düzeye çıkarmak için metabolik ayrıştırıcılar vasıtasıyla aşırı çamur üretimini azaltmada dikkate alınması gereken mekanizmalarından biri olarak görülmektedir (Liu and Tay 2001). Çamur üretim şemasında enerji ayrımının etkisi Şekil 5'te verilmiştir.

Enerji ayrımı, atıksu hattında aşağıdaki tekniklerle sağlanabilmektedir (Foladori *et al.*, 2010; Liu and Tay 2001).

- Kimyasal ayrıştırıcılar: Klorlanmış ve nitratlanmış fenoller veya 3,3',4',5-tetraklorosalisilanilid gibi kimyasal metabolik ayırıcılar kullanılmaktadır. Bu moleküller, hücre zarı boyunca konsantrasyon gradyanı ile orantılı bir taşıma hızı ile fosfolipid çift katmanı boyunca nispeten serbestçe yayılır. Membranın içine girdikten sonra fenolik

hidroksil, ATP üretimi için itici güç olan proton gradyanını dağıtır ve bu da anabolizma ve katabolizma arasında ayrışmaya neden olur.

- Yan akımlı anaerobik reaktör: Geri dönüş çamurunun bir kısmı ile beslenen bir anaerobik reaktörün (ortam sıcaklığında çalışan) aktif çamur prosesine entegrasyonu, önemli miktarda çamur azaltımını sağlamaktadır. Aerobik/anaerobik koşulların döngüsel değişimi katabolizma ve anabolizmayı birbirinden ayırır, bu da büyüme veriminde bir azalmaya neden olarak çamurun azaltılmasına neden olur.



Şekil 5. Çamur üretim şemasında enerji ayrımının etkisi (Foladori *et al.*, 2010'dan uyarlanmıştır)

Atık su arıtma tesislerinden kaynaklanan arıtma çamuru üretimi her geçen gün artacaktır ve bu konu dünya çapında büyüyen bir sorundur. Günümüzde evsel atıksuların niteliğinin değişmesi, spesifik kirleticilerin varlığı sözkonusudur. Bu kirleticilerin doğrudan çamura geçmesi çamur bertarafını sınırlandırmaktadır. Bu nedenle çevresel kalite standartları giderek daha sıkı hale gelmektedir. Çamurun geleneksel uygulamalar ile arıtılması sonrası elde edilen susuzlaştırılmış çamurun bertarafı önemli bir problemdir. Yeni mekanizmalar ve tekniklerle geri kazanım ve çamurun azaltılması sürdürülebilir çamur yönetimi için gereklidir. Bu yaklaşımlar gerek çevrenin ve hammadde kaynaklarının korunmasını gerekse ekonomiye katkı sağlanmasını beraberinde getirecektir. Geri kazanma özellikle kaynak verimliliği için son

derece önemlidir. Nutrientler, proteinler, enzimler, biyoplastikler, ağır metaller, enerji olarak biyoyakıt ve biyodizel geri kazanılabilecek unsurlardır. Ancak arıtma çamurlarının atıksu hattında veya çamur hattında azaltılması en uygun yaklaşımdır. Bunun için hücre lizizi, endojen metabolizma, mikrobiyal parçalama, enerji ayrımı mekanizmaları çeşitli teknikler kullanılarak gerçekleştirildiğinde çamurun sürdürülebilir yönetimine önemli katkı sağlanacaktır.

KAYNAKÇA

- Atienza-Martinez, M., Gea, G., Arauzo, J., Kersten, S. R.A., Kootstra., A.M.J. (2014). Phosphorus recovery from sewage sludge char ash, *Biomass and Bioenergy*, 65, 42-50.
- Ahmad, T., Ahmad, K., Alam, M. (2016). Sustainable management of water treatment sludge through 3'R'concept, *Journal of Cleaner Production*, 124, 1-13.
- Bagheri, M., Bauer, T, Burgman, L.E., Wetterlund, E. (2023). Fifty years of sewage sludge management research: Mapping researchers' motivations and concerns, *Journal of Environmental Management*, 325 (A),116412.
- Bi, W., Li, Y., Hu, Y. (2014). Recovery of phosphorus and nitrogen from alkaline hydrolysis supernatant of excess sludge by magnesium ammonium phosphate Bioresource Technology, 166, 1-8.
- Bougrier C., Battimelli A., Delgenes J.P., Carrere H. (2007). Combined ozone pretreatment and anaerobic digestion for the reduction of biological sludge production in wastewater treatment. *Ozone: Science & Engineering*, 29, 3, 201–206.
- Campbell, H.W. (2000). Sludge management – future issues and trends, *Water Science and Technology*, 41(8), 1–8.
- Cengiz, A.İ., Güven, H., Erşahin, M. E., Özgün, H., Öztürk, İ. (2022). Döngüsel Ekonomi Kapsamında Evsel Atıksu Arıtma Tesislerinde Fosfor Geri Kazanımı Uygulamalarına Genel Bir Bakış, *Çevre İklim ve Sürdürülebilirlik*, 23 (2), 117-131
- Cieslik, B., Konieczka, P. (2017). A review of phosphorus recovery methods at various steps of wastewater treatment and sewage sludge management. The concept of “no solid waste generation” and analytical methods, *Journal of Cleaner Production*, 142 (4), 1728-1740.
- Cooper, J., Lombardi, R., Boardman, D., Carliell-Marquet, C. (2011). The future distribution and production of global phosphate rock reserves, *Resources, Conservation and Recycling*, 57, 78-86, doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.09.009
- Cui, L., Shi, J., (2012). Urbanization and its environmental effects in Shanghai, China, *Urban Climate*, 2, 1-15,
- Dichtl, N., Rogge, S. Bauerfeld, K. (2007). Novel strategies in sewage sludge treatment, *Clean*, 35(5), 473 – 479.
- Ding, A., Zhang, R., Ngo, H.H., He, X., Ma, J., Nan, J., Li, G. (2021). Life cycle assessment of sewage sludge treatment and disposal based on nutrient and energy recovery: A review, *Science of the Total Environment*, 769, 144451.
- Durdevic, D., Zikovic, S., Blecich, P. (2022). Sustainable Sewage Sludge Management Technologies Selection Based on Techno-Economic-Environmental Criteria: Case Study of Croatia, *Energies*, 15, 3941.

- Ferrentino, R., Langone, M., Fiori, L., Andreottola, G. (2023). Full-Scale Sewage Sludge Reduction Technologies: A Review with a Focus on Energy Consumption, *Water*,15, 615.
- Fijalkowski, K., Rorat, A., Grobelak, A., Kacprzak, M.J., 2017. The presence of contaminations in sewage sludge – the current situation, *Journal of Environmental Management* 203, 1126–1136.
- Foladori, P., Andreottola, G., Ziglio, G. (2010). Sludge Reduction Technologies in Wastewater Treatment Plants, *IWA Publishing*, London, UK.
- Fytili, D., Zabaniotou. (2008). Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12,116–140.
- Gherghel, A., Teodosiu, C., De Gisi, S. (2019). A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy, *Journal of Cleaner Production*, 228, 244-263,
- Geng, H., Xu, Y., Zheng, L., Gong, H., Dai, L., Dai, X. (2020). An overview of removing heavy metals from sewage sludge: Achievements and perspectives, *Environmental Pollution*, 266(2), 115375.
- Gurjar, B.R., Tyagi, V.K. (2017). Sludge Management, Cilt 1, *CRC Press*, London, UK.
- He, C., Liu, Z., Wu, J., Pan, X., Fang, Z., Li, J., Bryan, B.A. (2021). Future global urban water scarcity and potential solutions, *Nature Communications*, 12: 4667.
- Husek, M., Mosko, J., Pohorely, M. (2022). Sewage sludge treatment methods and P-recovery possibilities: Current state-of-the-art, *Journal of Environmental Management*, 315,115090.
- Kacprzak, M., Neczaj E., Fijalkowski, K., Grobelak, A., Grosser, A., Worwag, M., Rorat, A., Brattebo, H., Almas, A., Singh, B.R. (2017). Sewage sludge disposal strategies for sustainable development, *Environmental Research*, 156, 39-46.
- Kumar, M., Ghosh, P., Khosla, K., Thakur, I. S. (2018). Recovery of polyhydroxyalkanoates from municipal secondary wastewater sludge, *Bioresource Technology*, 255, 111-115.
- Kuşçu, Ö.S., Çelik, V. E. (2019). Biyolojik atık çamurdaki azot ve fosforun darbeli elektrik alan tekniği ile geri kazanımı ve strüvit eldesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(6), 700-704
- Liu, Z., Smith, S.R. (2021). Enzyme Recovery from Biological Wastewater Treatment, *Waste and Biomass Valorization* 12, 4185–4211.
- Liu, F., Li, J., Zhang, X.X.L. (2019). Bioplastic production from wastewater sludge and application, *The 5th International Conference on Water Resource and Environment- IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 344 012071, IOP Publishing.

- Liu, X., Zhu, F., Zhang, R., Zhao, L., Qi, J. (2021). Recent progress on biodiesel production from municipal sewage sludge, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110260.
- Liu, Y., Tay, J.H. (2001). Strategy for minimization of excess sludge production from the activated sludge process, *Biotechnology Advances*, 19 (2), 97-107.
- Nabarlatz, D., Stüber, F., Font, J., Fortuny, A., Fabregat, A., Bengoa, C. (2012), Extraction and purification of hydrolytic enzymes from activated sludge *Resources, Conservation and Recycling* 59, 9-13.
- Ødegaard, H. (2004). Sludge minimization technologies – an overview, *Water Science and Technology*, 49 (10), 31–40,
- Patino, Y., Faba, L., Diaz, E., Ordonez, S. (2021). Biodiesel production from wastewater sludge using exchange resins as heterogeneous acid catalyst: Catalyst selection and sludge pre-treatments. *Journal of Water Process Engineering*, 44, 102335.
- Perez-Elvira, S.I., Nieto Diez, P., Fdz-Polanco, F. (2006). Sludge minimisation technologies, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 5, 375–398.
- Raheem, A., Sikarwar, V.S., He, J., Dastyar, W., Dionysiou, D.D., Wang, W., Zhao, M. (2018). Opportunities and challenges in sustainable treatment and resource reuse of sewage sludge: A Review, *Chemical Engineering Journal*, 337, 616-641.
- Romero, P., Coello, M.D., Quiroga, J.M., Aragon C.A. (2013). Overview of sewage sludge minimisation: techniques based on cell lysis-cryptic growth *Desalination and Water Treatment*, 51 (31-33), 5918-5933.
- Rulkens, W.H., Bien, J.D. (2004). Recovery of energy from sludge – comparison of the various options, *Water Science and Technology*, 50, 9, 213–221.
- Russel J.B., Cook, G.M. (1995). Energetics o bacterial roth: balance o anabolic and catabolic reactions, *Microbiololgy Reviews*, 59 (1), 48-62.
- Sengupta S., Nawaz, T., Beaudry, J., (2015). Nitrogen and Phosphorus Recovery from Wastewater, *Current Pollution Report*, 1, 155–166.
- Silva, S.M.C.P., Fernandes, F., Soccol, V.T., Morita. D.M. (2007). Main contaminants in sludge, *Sludge Treatment and Disposal*, Cilt 6, Editor: Andreoli, C.V., Sperling, M., Fernandes, F., IWA Publishing, London, UK, 31-40.
- Shi, S., Xu, Gg., Yu, H., Zhang, Z. (2018). Strategies of valorization of sludge from wastewater treatment, *Journal of Chemical Technology& Biotechnology*, 93,4,936-944.
- Spinosa, L., Ayol, A., Baudez, J.C, Canziani, R., Jenicek, P., Leonard, A., Rulkens, W., Xu, G., van Dijk, L. (2011). Sustainable and Innovative Solutions for Sewage Sludge Management, *Water*, 3, 702-717.

- Tyagi, V.K., Lo, S.L., (2013). Sludge: a waste or renewable source for energy and resources recovery?, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25,708-728.
- United Nations. Transforming our world: The 2030 Agenda for sustainable development, <https://www.un.org/sustainabledevelopment/development-agenda/>, Erişim tarihi: 01 Aralık 2023
- Xiao, K., Zhou, Y. (2020). Protein recovery from sludge: a review, *Journal of Cleaner Production*, 249, 119373.
- Vilakazi, S., Onyari, E., Nkwonta, O., Bwapwa, J.K. (2023). Reuse of domestic sewage sludge to achieve a zero waste strategy & improve concrete strength & durability- A review, *South African Journal of Chemical Engineering*, 43, 122-127.
- Wei, Y., Van Houtenb, R.T., Borgerb, A.R., Eikelboomb, D. H., Fana, Y. (2003). Minimization of excess sludge production for biological wastewater treatment, *Water Research* 37, 4453–4467.
- World Population Review, World city populations 2023, <https://worldpopulationreview.com/world-cities>, Erişim tarihi: 01 Aralık 2023
- Worldbank. World population prospects: 2022 Revision, <https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL>, Erişim tarihi: 01 Aralık 2023
- Wurz, A., Kuchta, K., Onay, T.T. (2011). Review on municipal sewage sludge management in Turkey and Europe, *International Journal of GlobalWarming*, 3, 1/2, 116-128.
- Yu, G., He, P., Shao, L., Zhu, Y. (2009). Enzyme extraction by ultrasound from sludge flocs, *Journal of Environmental Sciences* 21, 204–210.
- Zhang, Q., Hu, J., Lee, D.J., Chang, Y., Lee, Y.J. (2017). Sludge treatment: Current research trends, *Bioresource Technology*, 243, 1159-1172.

BÖLÜM 2

HAVACILIK VE UZAY MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA KULLANILAN KARBON BAZLI KOMPOZİT ATIKLARININ OLASI ÇEVRESEL ETKİLERİ VE GERİ DÖNÜŞÜMÜ

Doç. Dr. İbrahim Hakkı KARAKAŞ^{1*}
Dr. Öğr. Üyesi Zeynep KARCIOĞLU KARAKAŞ²

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10445639>

^{1*}Bayburt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 69100, Bayburt, Türkiye. (ihkarakas@bayburt.edu.tr). ORCID ID: 0000-0001-6876-7871.

²Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 25240, Erzurum, Türkiye. (zkarcioğlu@atauni.edu.tr). ORCID ID: 0000-0001-9778-5956.

GİRİŞ

Karbon elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemeler hava, kara ve deniz taşıtları, rüzgâr türbinleri, depolama tankları ve spor ekipmanları dâhil olmak üzere çok çeşitli endüstrilerde giderek daha fazla kullanım alanı bulmaktadır. Karbon elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelere yönelik sürekli artan talep, bu malzemelerin sahip olduğu yüksek özgül mukavemet, yüksek özgül sertlik, düşük yoğunluk, parça konsolidasyonu ve çok işlevsellik için entegrasyon kolaylığı ve tasarım özgürlüğü gibi üstünlük özelliklerinden kaynaklanmaktadır (Isa *et al.* 2022; Dong *et al.* 2018; Borjan *et al.* 2021).

Karbon elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin her geçen gün artan kullanım alanlarının artması ve çeşitli endüstri kolları tarafından daha fazla tercih edilir hale gelmesinin bir sonucu olarak üretim miktarları da artmaktadır. Bu üretimler sırasında kesme işleme şekillendirme vb. işlemler yapılmakta ve bu işlemler sırasında büyük miktarlarda atıklar oluşmaktadır. Karbon elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit atık oluşumunun yaklaşık %40 kadarının bu işlemler sonucu açığa çıktığı tahmin edilmektedir. Diğer taraftan, kullanım ömrünü tamamlamış karbon elyaf takviyeli kompozit ürünleri gibi atıklarda büyük bir çevresel tehdit oluşturmaktadır (Rademacker, 2018).

Karbon bazlı kompozitleri, havacılık ve uzay mühendisliği alanında her geçen gün daha yaygın kullanım alanı bulmaktadırlar. Dolayısıyla önümüzdeki süreçte karbon bazlı kompozitlerin üretim miktarlarının önemli derecede artacağı tahmin edilmektedir. Bu malzemelerin ekonomik ömürleri tükendiğinde bertaraf edilebilmelerini ya da geri dönüştürülebilmelerini mümkün kılacak sürdürülebilir ve çevre dostu yöntemler konusunda henüz kabul gören net bir yaklaşım bulunmamaktadır (Wong *et al.* 2017). Dolayısıyla bu malzemelerin gelecekte oluşturacağı olası çevresel problemler kaygıya neden olmaktadır. Günümüzde bu konuda henüz tam bir çözüm bulunmamakla beraber henüz laboratuvar ölçeğinde olan bazı deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Karbon fiber temelli polimer kompozitlerin olası olumsuz çevresel etkilerinin bu malzemelerin geri dönüşümü ve çevresel sürdürülebilirliği üzerine yapılacak bilimsel çalışmalarla daha olumlu bir yönde

gelişeceği tahmin edilmektedir. Bu problem burada bazı başlıklar altında kapsamlı bir şekilde ele alınmaktadır.

Havacılık endüstrisi ilk keşfedildikleri günden beri, karbon fiber takviyeli kompozitleri en yaygın kullanıldığı alandır. Öyle ki, karbon fiber takviyeli kompozitlerden imal edilmiş olan yaklaşık 6000-8000 ticari uçağın 2030 yılına kadar kullanım ömrünü tamamlayacağı tahmin edilmektedir (McConnell, 2010). Dolayısıyla yakın gelecekte oldukça büyük miktarlarda kompozit atığının oluşması kaçınılmazdır. Buna göre, bu atıklar için ekonomik olarak sürdürülebilir atık yönetimi ve geri dönüşüm tekniklerinin geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Dahası, işlenmemiş karbon elyafların üretimi, yaklaşık 198-595 MJ/kg enerji tüketen enerji yoğun bir süreçtir (Meng *et al.* 2018). Dolayısıyla, kullanılmış karbon elyafların geri kazanılması, hem bu malzemelerin olası olumsuz çevresel etkilerini önemli ölçüde azaltabilir hem de işlenmemiş karbon elyaflara olan talebi azaltarak bu malzemenin çevresel ayak izini azaltabilir. Yapılan bazı bilimsel çalışmalar, karbon elyaf takviyeli kompozitlerin kimyasal bir yöntemle geri dönüştürülmesi için 38,4 MJ/kg enerji tüketildiği rapor edilmiştir. Bu miktar işlenmemiş elyaf üretmek için gereken toplam enerjinin yaklaşık %10-30'una tekabül etmektedir (Morin *et al.* 2012).

Karbon elyaf takviyeli kompozit atıklarının geri dönüşümü genellikle kompozitin yapısında kullanılan polimer matrisin özellikleri tarafından belirlenir. Bu kompozitlerin üretiminde yüksek mekanik mukavemetleri, yüksek kimyasal ve termal dirençleri, boyutsal kararlılıkları ve dayanıklılıkları nedeniyle yaygın olarak termoset polimerler kullanılmaktadır (Mishnaevsky *et al.* 2017). Bununla birlikte, kürlenmiş termoset polimerlerin geri dönüşlü olmayan çapraz bağlı yapısı, bir kez kürlendikten sonra tekrar eritilememeleri ve dolayısıyla yeniden kalıplanamamaları bu malzemelerin yeniden işlenmesini imkânsız hale getirmektedir (Wang *et al.* 2018). Bu özellikleri ile termoset özellikli polimer matrislerin geri dönüşümü de oldukça zordur. Çapraz bağlı termoset polimerlerin kimyasal olarak bozunması, ancak atıkların güçlü kimyasallarla muamelesi veya yüksek sıcaklık reaksiyon koşulları altında gerçekleştirilebilir. Fakat bu işlemlerin geri kazanılan karbon fiberlere zarar verebilme olasılığı da yüksektir.

Günümüzde, karbon elyaf takviyeli kompozit atıklarının geri dönüşümü üzerine çalışan araştırmacılar, kompozit ürünlerin kullanım ömrü sonunda geri

dönüştürülerek yeniden kullanılabilir hale getirilmesini, geri dönüşüm ürünlerinin yeniden ürüne dönüştürülmesini ve ekonomik ömürlerinin sonunda tekrar geri dönüştürülmesini amaçlayan dögüsel bir ekonomik model oluşturulmasına odaklanmaktadır. Buna karşın, dögüsel ekonomi kapsamında gerçekleştirilen geri dönüşüm süreçleri, özellikle malzemenin fiziksel özellikleri kolay bir şekilde geri dönüştürülebilir olduğunda efektif bir yöntem olarak değerlendirilebilir. Genel olarak dögüsel ekonomi, yenilenebilir enerji kullanımını, toksik kimyasalların ortadan kaldırılmasını ve malzemelerin, ürünlerin, sistemlerin ve iş modellerinin daha iyi tasarlanması yoluyla atıkların ortadan kaldırılmasını amaçlamaktadır (Hazell, 2017).

Dahası, başta havacılık ve uzay mühendisliği endüstrisi olmak üzere üretim süreçlerinde yoğun bir şekilde kompozit kullanımı gereken tüm endüstriler için kompozit malzeme geliştiren ya da üreten üreticilerin karbon bazlı kompozitlerin olası çevresel etkilerini dikkate alarak daha çevre dostu teknolojilere yönelmeleri gerekmektedir. Bu malzemelerin genel çevresel kirlilik potansiyelini azaltabilecek geri dönüşüm yöntemlerinin geliştirilmesi ve üretimleri esnasında daha az enerji tüketen ve atık oluşturmayacak üretim prosesleri tasarlamaları gerekmektedir.

Bilindiği üzere, karbon bazlı kompozitler havacılık ve uzay mühendisliği uygulamalarında yaklaşık 1970'lerin başlarından beri çok çeşitli amaçlarla yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Dolayısıyla yakın gelecekte ekonomik ömrünü tamamlayan oldukça büyük miktarlardaki karbon temelli kompozit atığının ortaya çıkması kaçınılmazdır. Bu atıklar kimyasal ve mekanik açıdan oldukça kararlı ve biyolojik olarak bozunmayan yapıları ile uzun yıllar boyunca doğada kalabilir ve çevre açısından bir tehdit oluşturabilirler. Diğer taraftan yapılarında bulunan karbon lifler zor, uzun süren, enerji yoğun, yüksek maliyetli ve çevre dostu olmayan yöntemlerle üretilebilmektedir. Dolayısıyla bu malzemelerin geri kazanılarak tekrar üretime kazandırılmaları bu malzemelerin üretim maliyetlerine de oldukça önemli bir pozitif katkı sağlaması beklenmektedir. Son yıllarda, karbon bazlı kompozitlerin geri dönüştürülmesi için yeni yöntemler geliştirmek amacıyla çok sayıda çalışma yürütülmektedir. Bu çalışmalardan elde edilecek verilerle, muhtemelen daha verimli ve çevre dostu yeni geri dönüşüm süreçleri ortaya çıkacak ve karbon

bazlı kompozit atıklarının büyük bir bölümünün yeniden kullanılması mümkün olabilecektir.

Diğer taraftan havacılık ve uzay endüstrisi her birisi çok kararlı bir şekilde uygulanan çeşitli yönetmelik ve standartlara tabidir. Bu düzenlemelere kullanılan malzemelerin sürdürülebilirliği ve geri dönüştürülebilirliğini kapsayacak şekilde güncelleştirmeler yapılmalıdır. Böylece, karbon bazlı kompozit endüstrisinin olası olumsuz çevresel etkilerinin azaltılabilmesi için motivasyonu artacaktır.

Dahası havacılık ve uzay endüstrisinde kullanılmak üzere yeni malzemeler geliştirilmeye devam etmektedir. Bu yeni malzemeler geliştirilirken hem yüksek performans özellikleri korunmalı hem de ürünün ve süreçlerin daha düşük bir çevresel etkiye sahip olmaları sağlanmalıdır. Böylece ürün ve süreçler çevresel açıdan daha sürdürülebilir olacaktır. Buna biyo-bazlı kompozitleri, gelişmiş seramikler ve diğer yenilikçi malzemeler dâhildir. Buna göre, havacılık ve uzay endüstrisinin, yakın gelecekte yeni geliştirilecek daha çevre dostu ürünler ve geri dönüşüm uygulamaları sayesinde ortaya çıkan atık miktarını önemli derecede azaltması ve dolayısıyla daha küçük bir çevresel ayak izine sebep olması beklenmektedir.

Diğer taraftan çevre sorunları konusunda küresel farkındalık giderek artmaktadır. Çevresel konulardaki artan kaygı ve endişeler diğer tüm sektörlerde olduğu gibi havacılık ve uzay endüstrisini de daha sürdürülebilir uygulamaları benimsemeye zorlamaktadır. Diğer taraftan bu baskı hem kamu hem de diğer düzenleyici kurumları daha ciddi tedbirler almaya ve yeni ve daha sıkı standartlar getirmeye zorlamaktadır. Dolayısıyla yakın gelecekte olası tüm çevresel risklerin ortadan kaldırılmasına yönelik mevzuat düzenlemelerinin yapılması beklenmektedir.

Gelecekte, karbon bazlı kompozitlerin hafif, yüksek mukavemet ve yüksek korozyon direnci gibi önemli özellikleri ile havacılık ve uzay mühendisliği uygulamalarındaki artarak devam edecektir. Dolayısıyla bu malzemelerin olası olumsuz çevresel etkilerini azaltmak için yoğun bir şekilde araştırma geliştirme çalışmalar yapmak gerekmektedir. Bu çalışmalar sayesinde, bu malzemelerin havacılık ve uzay mühendisliğindeki geleceğinin çevresel açıdan daha sürdürülebilir olması muhtemeldir. Ancak, çevresel ayak izini daha da azaltmak için bu uygulamaları sürekli izlemeye ve geliştirmeye devam etmek gerekmektedir.

1. KARBON ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİTLER

1.1. Genel Özellikleri

Karbon fiber takviyeli polimerik kompozitler, otomobillerden hava araçlarına, teknelerden büyük yapıların bileşenlerine kadar birçok ürünün imalatında kullanılan bir kompozit malzeme sınıfıdır. Bu kompozitleri yapısı genellikle karbon liflerin özel tekniklerle dokunmasıyla elde edilen karbon elyaf kumaşları ve kumaş katmanları arasında bağlayıcı olarak kullanılan polimerik bir matristen oluşur. Matris, sıcaklıkla sertleşen bir polimerik malzeme olup ve karbon lifleri destekleyen kimyasal bileşenler içerir. Polimer matris olarak genellikle termoset karakterli sentetik reçineler kullanılsa da bazı durumlarda termoplastik karakterli polimerlerinde kullanılabildiği bilinmektedir. Bu malzemeler oda sıcaklığında sertleşme eğilimi gösterirler. Bu nedenle, soğuk ortamlarda muhafaza edilmeleri ve kullanılmadan hemen önce oda sıcaklığına getirilmeleri önerilir.

Karbon fiberler, her biri bir insan saç telinin yaklaşık onda biri kalınlıkta olan son derece ince liflerden oluşur. Her bir lif "filament" olarak adlandırılır. Yaklaşık olarak 50,000 filamentten oluşan lif demetleri makaralara sarılır ve daha sonra özel dokuma tezgâhlarında belirli desenlere göre dokunarak karbon fiber kumaşlara dönüştürülür. Kumaşların lif yönelimleri, son kompozitin mukavemetini belirleyen önemli bir faktördür. Karbon fiber kompozitleri, sadece liflerin doğrultusunda dayanıklıdır, bu nedenle farklı yönlere dayanıklılık sağlamak için karbon fiber kumaşlar farklı lif yönelimleri ile tasarlanır ve üretilir (El-Dessouky and Lawrence 2013). Karbon fiber takviyeli polimerik kompozit malzemeler, karbon fiber kumaşların katman katman üst üste getirilmesiyle oluşturulmaktadır. Burada kumaş katmanları arasındaki bağlayıcı olarak polimer matris kullanılır. Polimer matrisin fazlası vakumla çekilerek kalıplanan parça vakum altında iken polimer matrisin sertleşmesi için bir basınçlı reaktörde 120-150°C arasında değişen sıcaklıklarda ısıtılma tabii tutulur. İşlem sonunda oda sıcaklığına soğutulan kompozit kalıplardan ayrılır. Ürünler kalıplardan ayrıldıktan sonra in kesme, frezeleme, zımparalama ve cilalama ek işlemler uygulanabilir. Dahası bu parçalar yapıştırma, perçinleme, kaynak gibi ek işlemlerle birleştirilmesiyle gövde, kanat, kuyruk gibi çok daha büyük parçaların üretilebilmesi de mümkündür.

İlk zamanlar sadece havacılık ve uzay endüstrisi için kullanılan karbon fiber kompozitleri günümüzde otomobil, spor malzemeleri, tekneler, vb. birçok farklı alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Karbon fiber temelli kompozit malzemeler havacılık ve uzay endüstrisi için kritik öneme sahip malzemelerdir. Karbon fiber, diğer malzemelerden ayıran birçok önemli avantaja sahiptir, ancak en temel özelliği son derece hafif olmasına rağmen yüksek bir sertlik sunmasıdır. Karbon fiber, hava araçlarının üretiminde kullanılan en yaygın alternatifler olan alüminyum ve çelik gibi metallerle kıyaslandığında bu avantajlar açıkça görülmektedir. Örneğin, aynı parçanın karbon fiberden yapılmış bir parka aynı parçanın alüminyumdan yapılmış halinden yaklaşık %20-30 daha hafif çelikle yapılan bir parçadan %50'ye kadar daha hafif olabilmektedir. Dolayısıyla, havacılık ve uzay projelerinde, üreticiler karbon fiber tabanlı kompozitleri kullanarak hem ağırlığı azaltmayı hem de performansı artırmayı hedeflemektedirler. Bu sayede hava araçlarının yakıt tüketimi azaltılırken aynı zamanda performansın artması sağlanmaktadır.

Karbon fiber temelli kompozitler, hafiflik ve yüksek dayanıma ek olarak kolay işlenebilirlik, yüksek korozyon direnci, uzun ömürlülük, düşük termal genleşme, uzun süreli sıcaklık dayanımı ve yüksek yorulma dayanımı gibi önemli avantajlara sahiptir. Tüm bu özellikler karbon fiber temelli kompozitleri havacılık ve uzay mühendisliği uygulamaları için alternatifsiz bir malzemeye dönüştürmektedir. Fakat karbon fiber temelli kompozitlerin bu özellikleri onun doğada kendiliğinden bozunmasını neredeyse imkânsız hale getirmektedir. Dolayısıyla yakın gelecekte, devasa miktarlarda kompozit atığıyla başa çıkamamız gerektiği anlamına gelmektedir.

Bu atıkların çevresel bir tehdiye dönüşmemesi için mevcut karbon fiber kompozitlerin geri dönüştürülmesi için yeni ve etkili yöntemler geliştirilmesi gerekmektedir. Aynı zamanda kolay geri dönüştürülebilir veya tekrar işlenebilir kompozitlerin geliştirilmesi bu malzemelerin çevresel sürdürülebilirliği açısından kritik bir zorluktur.

1.2. Karbon Elyaf Bazlı Kompozitlerin Havacılık ve Uzay Mühendisliği Açısından Önemi

Karbon elyaf bazlı kompozitler, gelişmiş özelliklerinden dolayı havacılık ve uzay mühendisliği alanında büyük önem taşımaktadır. Karbon fiber kompozitlerin havacılık ve uzay mühendisliği uygulamalarında çok fazla tercih

edilmesinin başlıca sebebi bu malzemelerin sahip oldukları olağanüstü mukavemet-ağırlık oranlarıdır. Alüminyum veya çelik gibi geleneksel malzemelerle karşılaştırıldıklarında onlardan çok daha hafif olmalarına rağmen daha yüksek bir yapısal mukavemet sergilemektedirler. Karbon fiber kompozitlerin bu özelliği, tasarlanan araçların genel performanslarını arttırmak için ağırlığı azaltmanın birincil hedef olduğu havacılık ve uzay mühendisliği açısından oldukça önemlidir. Dahası bu performans artışı yakıt verimliliğini de beraberinde getirmektedir. Ayrıca, karbon fiber kompozitler ile üretilen uçak ya da uzay araçlarının yapısal bütünlüğünü korumayı da sağlayan mükemmel bir sertliğe sahiptirler. Bu sertlik, hava araçlarının yüksek basınç etkisi altında aerodinamik tasarımlarının korunması, esneme ve deformasyonun en aza indirilmesi için kritik bir öneme sahiptir.

Dahası karbon fiber kompozitlerin alternatifi olan metaller, zamanla paslanabilmekte veya korozyona uğrayabilmektedirler. Oysaki karbon fiber kompozitler korozyona karşı oldukça dirençlidir. Bu özellikleri ile bu malzemeler kullanıldıkları hava ya da uzay araçlarının uzun ömürlü olmalarını ve daha güvenli olmalarını sağlamaktadır. Benzer şekilde, karbon bazlı kompozitlerin alternatifi olabilecek alüminyum çelik vb. malzemelerle karşılaştırıldıklarında çok daha yüksek bir yorulma direncine sahiptirler. Bu özellikleri yapılarında herhangi bir deformasyon olmadan zorlu koşullar altında tekrarlanan stres ve gerilme döngülerine dayanabilmelerini mümkün kılar. Bir hava aracını oluşturan her bir bileşenin uçuş sırasında döngüsel olarak çeşitli yüklere maruz kalmaktadır. Dolayısıyla karbon bazlı kompozitlerin bu özellikleri de havacılık ve uzay mühendisliği uygulamalarında kritik bir öneme sahiptir.

Dahası karbon bazlı kompozitler mükemmel bir tasarım esnekliğine sahiptirler. Karbon fiber kompozitler yüksek hassasiyetle karmaşık şekillerde ve yapılarla üretilmektedir. İşlenebilirlikleri veya kalıplanabilirlikleri metallere kıyasla çok daha kolaydır. Böylece, aerodinamik açıdan daha verimli tasarımların yapılabilmesine olanak tanır. Dahası karbon bazlı kompozitlerle çok büyük ya da karmaşık parçaların bile tek parça halinde üretilibilmeleri mümkündür. Bu sayede bağlantı elemanlarına veya olası zayıf noktaları güçlendirmek için gerekli olan bağlantılara olan ihtiyacı azaltabilir ya da tamamen ortadan kaldırabilirler.

Karbon fiber bazlı kompozitlerle yapılan uçaklar ve uzay araçları çok daha hafif olmaktadır. Bu hafifleme sayesinde bu uçakları ya da hava araçlarını uçurabilmek için çok daha az yakıt gerekecektir. Böylece, yakıt tüketimindeki bu azalma hem operasyonel maliyetleri önemli oranda azaltacak hem de aynı zamanda bu yakıtların yanmasından kaynaklanan olası olumsuz çevresel etkileri de azaltacaktır. Dahası, bu hafifleme uçak veya diğer hava araçlarının faydalı yük kapasitesini de önemli ölçüde arttırabilme potansiyeline sahiptir. Çünkü karbon fiber esaslı kompozitleri kullanılarak güvenlikten ödün vermeden daha hafif hava araçları imal edilebilir ve bu sayede hava araçları daha fazla faydalı yük veya yolcu taşıyabilmektedirler.

Karbon fiber esaslı kompozitlerin bir diğer önemli üstünlüğü ise en zorlu koşullar altında bile termal stabilite sergileyebilmeleridir. Karbon fiber bazlı kompozitlerin oldukça iyi bir termal stabiliteye sahip oldukları bilinmektedir. Malzemelerin geniş bir sıcaklık aralığında termal olarak stabil davranmaları, ani ve sürekli sıcaklık değişimlerinin yaşandığı bir alan olan havacılık ve uzay mühendisliği uygulamalarında kullanımları için kritik bir özelliktir.

Dahası karbon elyaf bazlı kompozitleri elektromanyetik olarak yüksek bir geçirgenliğe sahiptir. Bu özellikleri sayesinde bu malzemeler radar veya diğer elektronik sistemlerin parazitsiz çalışmasını sağlayabilmektedirler. Karbon fiber bazlı kompozitlerin aşınma, yıpranma, korozyon gibi etkenlere karşı direnç sergilerken aynı zamanda genel dayanım açısından da oldukça yüksek performans sergilemektedirler. Bu özellikleri genellikle zorlu ve değişken çevre koşullarının hâkim olduğu havacılık ve uzay uygulamaları açısından oldukça önemlidir.

Havacılık ve uzay mühendisliğinde karbon fiber kompozitlerin kullanılması birçok açıdan önemli avantajlar sunmaktadır. Buna karşın, yüksek üretim maliyetleri, olası hasarların onarılmasındaki potansiyel zorluklar ve çoğu durumda özel üretim tekniklerine duyulan ihtiyaç gibi zorlukları da beraberinde getirmektedir. Bununla birlikte, yakın gelecekte malzeme bilimi ve üretim süreçlerindeki muhtemel ilerlemelere paralel olarak, bu malzemelerin daha erişilebilir ve uygun maliyetli hale gelmeleri beklenmektedir. Böylece bu malzemelerin havacılık ve uzay mühendisliği uygulamalarında en temel uçak bileşenlerinden en kompleks uzay aracı yapılarına kadar çok geniş bir uygulama alanında çok daha yoğun bir şekilde kullanılmaları beklenmektedir.

1.3. Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Atıklarının Çevresel Etkileri

Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin çevresel etkilerini karbon fiberlerin üretimi ve kullanım ömrünün sonunda oluşan atık olmak üzere iki başlık altında incelemek gerekmektedir. Karbon elyaflar, olağanüstü mukavemet/ağırlık oranları ve diğer arzu edilen özellikleri nedeniyle çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, üretimleri ve bertaraf edilmelerinin önemli çevresel etkileri olabilir. Karbon elyaf üretimi tipik olarak, poliakrilonitril (PAN) ya da zift gibi öncül malzemelerin yüksek sıcaklıklarda karbonlaştırılmasına dayanan enerji yoğun süreçlerle yapılmaktadır (Frank *et al.* 2012; Newcomb 2016). Karbon elyaf üretimi için kullanılan öncül maddeler petrol bazlı olup bu malzemelerin çıkarılması ve üretilmesi çevre ve çevre dengesi üzerinde bazı olumsuz etkilere sahip olabilir. Dahası, karbon elyaf üretimi için petrol bazlı öncüller kullanılmaktadır ve bilindiği gibi petrol sınırlı ve yenilenemeyen bir kaynaktır. Dolayısıyla bu kaynakların çıkarılması ve kullanılması, sınırlı olan rezervleri tüketebilir ve bu süreçte ekosistemlere zarar verebilir. Diğer taraftan, bu hammaddelerin karbon fibere dönüşmesi için gereken enerjinin üretimi için kullanılan fosil yakıtlar, iklim değişikliğine katkıda bulunan sera gazlarının önemli derecede salınımına neden olabilir.

Diğer taraftan karbon elyafların geri dönüşümü, malzeme kirliliği ve kullanım sırasında oluşan kontaminasyonlar gibi sorunlar nedeniyle zorlu süreçlerdir. Verimsiz geri dönüşüm süreçleri kaynak israfına ve daha yüksek enerji tüketimine yol açabilir. Sınırlı geri dönüşüm altyapısının bulunması, geri dönüştürülen karbon fiberlerin kalite açısından zayıf olmaları, geri dönüşüm süreçlerinin enerji yoğun olması ve yüksek maliyetler gibi faktörler geri dönüşümün endüstriler tarafından yaygın olarak benimsenmesini engellemektedir.

Karbon elyaf ürünler yaşam döngülerinin sonuna ulaştığında, düzenli depolama veya yakma gibi uygun olmayan bertaraf yöntemleri de çevresel açıdan önemli riskler oluşturabilir. Karbon elyaflar oldukça dayanıklıdır ve çevrede uzun süre bozunmadan kalabilirler ve dolayısıyla da ekosistemlere ve doğal yaşama zarar verebilirler. Dahası, karbon elyafların hammaddeden kompozite dönüşüncüye kadar ki süreçler hem üretimi hem de geri dönüşümü önemli miktarda enerji tüketimine neden olmaktadır. Yüksek enerji tüketimi,

özellikle enerji kaynağı olarak fosil yakıtlar kullanıldığında, olası çevresel zararların çok daha artması muhtemeldir.

Dahası geri dönüşüm süreçleri sonunda atık oluşması muhtemeledir. Karbon fiber esaslı kompozitlerin geri dönüşümü sırasında yine de bir miktar karbon elyaf atığı oluşabilir ve bu atığın işlenmesinin de bazı olumsuz çevresel sonuçları olabilir. Bu etkilerin azaltılması için etkili atık yönetimi stratejilerine ihtiyaç vardır.

Bu çevresel kaygıları gidermek için araştırmacılar ve endüstriler daha çevre dostu yöntemlerle karbon elyaf üretimi ve geri dönüşümü için yeni uygulamalar geliştirmeye ve bu sayede bu süreçleri daha sürdürülebilir hale getirmeye çalışmaktadır. Bu çalışmalar, daha verimli geri dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesini, enerji tüketiminin azaltılmasını ve alternatif öncül malzemelerin araştırılmasını içerir. Özetle, karbon elyaflar performans ve ağırlık azaltma açısından çok sayıda fayda sunarken, üretim ve geri dönüşümlerinin çevresel etkileri olabileceği göz ardı edilmemelidir. Bu nedenle, bu zararları hafifletmek ve karbon elyaf malzemelerin genel çevresel ayak izini azaltmak için sürdürülebilir çözümlerin araştırılmasına ve geliştirilmesine yönelik çalışmaların devam etmesi çok önemlidir.

2. KARBON ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT ATIKLARININ GERİ DÖNÜŞÜMÜ

Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin geri dönüşümü, bu malzemelerin benzersiz özellikleri nedeniyle çeşitli zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Karbon fiber esaslı kompozitler olağanüstü güç/ağırlık oranlarıyla bilinirler. Ancak bu özellik, geri dönüşüm süreçleri sırasında parçalanmalarını zorlaştırır. Diğer taraftan, karbon fiberleri bağlamak için kullanılan epoksi reçine, geri dönüştürülmesi ve yeniden şekillendirilmesi zor olan termoset esaslı plastiklerdir. Dolayısıyla epoxy reçineyi fiberlerden ayırmak zor bir işlemdir ve uzun ve karmaşık süreçler içermektedir.

Dahası, havacılık ve uzay mühendisliği alanında kullanılan bir kompozit parça, bileşenin ekonomik ömrü boyunca yakıt, yağ veya diğer hidrolik sıvılar gibi çeşitli kimyasal maddelere yoğun bir şekilde maruz kalabilmekte ve dolayısıyla da oldukça kirlenmektedirler. Kompozit yüzeyindeki bu kirlilikler geri dönüşüm sürecini çok daha karmaşık bir hale getirebilmektedir. Havacılık ve uzay endüstrisinde kullanılacak olan karbon fiber kompozitler çeşitli

yönetmeliklere ve standartlara tabidir. Dolayısıyla geri dönüştürülen malzemelerin tekrar havacılık ve uzay endüstrisinde kullanılabilmesi için bu standartları karşılaması gerekir. Fakat bugüne kadar yapılan çalışmalardan elde edilen veriler geri dönüştürülen karbon fiberlerin performans açısından henüz hiç işlem görmemiş karbon fiberlerin bir miktar gerisinde kaldıklarını göstermektedir. Bu nedenle de geri dönüştürülmüş fiberler bir hava aracı üretiminde birincil parçalardan daha ziyade ikincil parçaların üretimi için daha fazla tercih edilmektedir. Bu durum geri dönüşüm için motivasyonu olumsuz etkilerken aynı zamanda da geri dönüşüm sürecini daha karmaşık hale getirmektedir.

Günümüzde, karbon elyaf takviyeli kompozitlerin geri dönüşümü için mekanik geri dönüşüm, termal geri dönüşüm, çözücü (solvent) 98+7 destekli geri dönüşüm ve hibrit yöntemler gibi farklı yaklaşımlar benimsenmektedir.

Mekanik geri dönüşüm süreçlerinde, kompozit malzemeyi daha küçük parçalara ayırmak için öğütme, parçalama veya ezme gibi mekanik yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntem ile karbon liflerini geri kazanabilir olsa da bu işlemler esnasında liflerde büyük ölçüde zarar görmektedir. Bu nedenle bu yöntem geri kazanılan lifler tekrar bir kompozitin yapısında kullanıldıklarında elde edilen ürün kompozitin mekanik özellikleri hiç işlem görmemiş liflerle yapılan kompozitlerle karşılaştırıldığında daha zayıf olmaları güçlü bir olasılıktır. Termal geri dönüşüm süreçlerinde ise polimer matrisin sıcaklıkla bozundurularak liflerin ayrıştırılmasına dayanmaktadır. Bu yöntemler genellikle pirolitik yöntemler olarak da adlandırılmaktadır. Farklı reaktör sistemleri kullanılabilir. Karbon elyaf takviyeli kompozitleri pirolizi, atık kompozitlerin inert bir atmosferde yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmasına dayanmaktadır. Böylece, yüksek sıcaklığın etkisi ile polimer matrisin (reçine) parçalanmasını ve elyafların ayrıştırılmaktadır. Bu yöntem enerji yoğun olarak gerçekleşmekte olduğundan yüksek maliyetler ortaya çıkabilmektedir. Fakat bu yöntemle karbon elyaflar hasarsız ve yüksek bir kalite ile geri kazanabilmektedir.

Solvent bazlı geri dönüşüm yöntemleri ise polimerik matrisin bazı organik çözücülerin kullanılması seçimli olarak çözüldürülmesine dayanmaktadır. Bu yöntemde epoksi reçine çözünürken karbon fiberlerin sağlam kalması hedeflenmektedir. Ancak, çözücü ve reçinenin

ayrıştırılmasında karşılaşılan zorluklar ve ortaya çıkan olumsuz çevresel etkiler ortaya çıkmaktadır.

Açık bir şekilde görülmektedir ki, günümüzde karbon elyaf takviyeli kompozitlerin geri dönüşümü için uygulanan teknikler bazı avantajlar sunarken aynı zamanda önemli dezavantajlara da sahip olabilmektedirler. Makul ve kabul edilebilir bir geri dönüşüm tekniği oluşturmak için bazı teknikler birlikte veya ardışık olarak uygulanarak hibrit geri tasarlanmıştır.

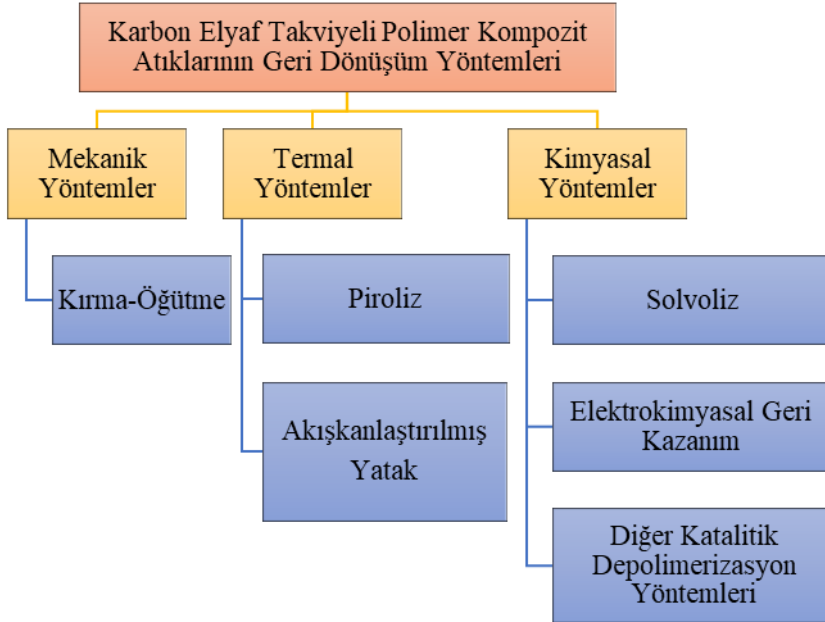
Hibrit geri dönüşüm süreçlerinde, mekanik, termal ve solvent destekli geri dönüşüm teknikleri gibi çeşitli yöntemlerin birleştirilmesi ile daha verimli çözümler oluşturulması hedeflenmektedir. Bu yaklaşım ile hem karbon fiberlerin hem de epoksi reçinenin geri kazanımı mümkün olabilir.

Atıkların geri dönüşümü kadar, yeni atıkların oluşmasının önlenmesi de çevresel sürdürülebilirlik açısından çok önemlidir. Havacılık ve uzay mühendisliği uygulamaları için yapılan tasarımlarda, seçilen malzemelerin geri dönüştürülebilir özelliklere sahip olması, atık oluşumunun azaltılmasına önemli bir katkı sağlayabilir. Bu amaçla polimerik matris seçilirken geri dönüştürülebilir reçinelerin seçilmesi, kompozitlerin kullanımı esnasında aşırı kirlenmelerinin önlenmesi ve geri dönüşüm sırasında ayırmayı kolaylaştıran yenilikçi bağlama tekniklerinin kullanılması gibi çözümler önerilmektedir. Ayrıca, geri dönüştürülmüş karbon elyaf kompozitler için çeşitli standartlarının geliştirilmesi, geri dönüşüm ürünlerinin standart bir malzeme kalitesine sahip olmalarını sağlayabilir. Dahası havacılık ve uzay endüstrisi için yapılan üretimlerde belirli oranlarda geri dönüşüm ürünlerinin kullanılması için düzenleyici destek ve teşviklerin sağlanmasının da atık oluşumunun azaltılmasında etkili olabileceği tahmin edilmektedir.

Ayrıca, havacılık ve uzay endüstrisi için yapılan üretimler esnasında önemli miktarlarda atık oluştuğu bilinmektedir. Kalıplama, işleme gibi işlemler esnasında ortaya çıkan bu atık malzemelerin belirli bir yerde depolanarak ve yeni bileşenlerin üretiminde yeniden kullanıldığı kapalı döngü sistemlerinin uygulanması ile atık üretiminin en aza indirilmesi ve dolayısıyla geri dönüşüm ihtiyacının azaltılması mümkündür.

Sonuç olarak karbon elyaf takviyeli kompozitlerin geri dönüşümü çok boyutlu olarak ele alınması gereken karmaşık bir sorundur. Ancak hızlı ve sürekli bir şekilde gelişmekte olan havacılık ve uzay endüstrisi için yeni malzemeler ve süreçler geliştirilmeye devam etmektedir. Bu araştırma ve

geliştirme çalışmalarının çevresel açıdan daha sürdürülebilir uygulamalar ortaya çıkarması beklenmektedir. Karbon elyaf takviyeli polimer kompozit atıklarının geri dönüşüm yöntemleri mekanik yöntemler, termal yöntemler ve kimyasal yöntemler olmak üzere üç ayrı başlık altında incelenmektedir (Zhang *et al.* 2020). Bu atıkların geri dönüşümü için uygulanan yöntemlerin sınıflandırılması Şekil 1’de verilmiştir.



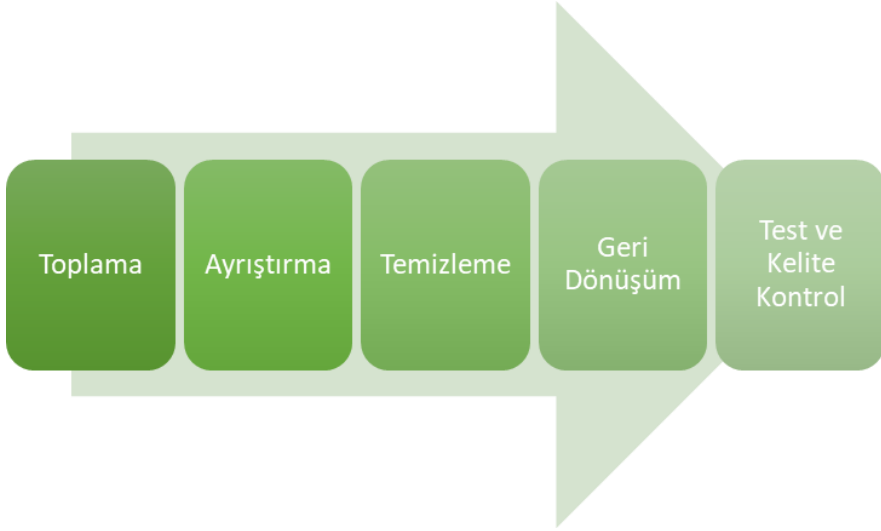
Şekil 1. Karbon Elyaf Takviyeli Polimer Kompozit Atıklarının Geri Dönüşüm Yöntemleri

2.1. Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Atıklarından Karbon Elyafların Mekanik Geri Kazanımı

Karbon elyaf takviyeli polimer kompozit atıklarından karbon elyafların mekanik geri kazanımı, bu değerli malzemenin uygulanacak çeşitli mekanik işlemler yoluyla atık olmaktan çıkarılarak tekrar kullanılabilir hale getirilmesini amaçlayan bir süreçtir. Herhangi bir amaçla üretilmiş ve kullanılmış olan karbon elyaf takviyeli kompozit atıklarından karbon elyafların mekanik geri kazanımında izlenen genel prosedür Şekil 2’de verilmiştir.

Karbon elyaf takviyeli polimerik kompozit atıklarından, karbon liflerin mekanik geri kazanımında süreç ilk olarak kullanılmış karbon elyafların veya

kompozit işleme esnasında ortaya çıkan atıkların toplanması ile başlamaktadır. Daha sonra toplanan malzemeler türlerine göre ayrıştırılır. Bu aşamada, karbon elyafların diğer kompozitin yapısında bulunması muhtemel diğer tüm malzemelerden ayrılması gerekir. Ayrıştırma işlemi, genellikle mekanik yöntemlerle yapılabilir olsa da bazı durumlarda kimyasal yöntemlerin kullanılmasını gerektirebilir.



Şekil 2. Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Atıklarından Karbon Elyafların Mekanik Geri Kazanımında Takip Edilen Genel Prosedür

Ayrıştırılan kompozit atıkları üzerlerine yapışmış halde bulunan safsızlıkların ve kullanımları süresince üzerlerinde birikmesi olası olan tüm kirliliklerin uzaklaştırılması amacıyla yıkama ve temizleme işlemine tabi tutulur. Bu işlem için genellikle çeşitli kimyasal çözücüler ve su kullanılırken bazı durumlarda sıcak su ya da ısıl işlem uygulanması gibi yöntemler de kullanılabilir. Temizlenen kompozit atıkları karbon lifleri ve polimerik matrisi birbirinden ayırmayı amaçlayan bir dizi mekanik işleme tabi tutulur. Bu işlemler sonrasında elde edilen karbon fiberler uygulanan mekanik işlemlerden ötürü genellikle yıpranmış ve kırılmış halde ve dolayısıyla da nispeten düşük kalitededirler.

Geri kazanılan karbon fiberler tekrar bir temizleme işlemine tabi tutulurlar. Temizlenen karbon elyaflar, yeni ürünler veya bileşenler üretmek için kullanılabilir. Bu süreçte karbon elyafların tekrar kullanılabilir özelliklerini

korumak önemlidir. Geri kazanılmış karbon elyafların kalitesini belirlemek için çeşitli test ve kontroller yapılır. Bu testlerden elde edilecek veriler, geri dönüştürülmüş karbon fiberler kullanılarak üretilen yeni ürünlerde güvenilirlik ve performansın sağlanmasına yardımcı olur. Karbon elyafların yüksek mukavemet ve hafiflik gibi özellikleri, geri kazanıldıktan sonra bile birçok uygulamada farklı amaçlarla kullanılabilmelerini sağlar.

Mekanik geri dönüşüm, karbon fiber takviyeli polimer kompozitleri ger dönüşümü için en yenilikçi yöntem olarak görülmektedir. Kompozit atık parçaları geri dönüşüm için hazırlık aşamaları olan toplama ve temizleme adımlarından sonra birden fazla adımda gerçekleştirilen öğütme işlemleri ile ortalama parçacık boyutlarının küçültülmesi sağlanır.

Kademeli olarak gerçekleştirilen öğütme işleminde, kompozitler ayrılır ve boyutları yaklaşık 50-100 mm boyutuna kadar düşürülünceye kadar öğütme yapılmaktadır. Daha sonra bu malzeme karbon liflerin geri kazanabilmek için parçacık boyutlarını daha ince boyutlara düşürmek için daha fazla öğütmeye tabi tutulmaktadır (Meng *et al.* 2018; Anane-Fenin and Akinlabi, 2017). Mekanik geri dönüşümden elde edilen geri dönüşüm ürünleri, tabaka kalıplama ile üretilen kompozitleri gibi kısa elyaf kullanımı gerektiren kompozitlerde dolgu maddesi olarak kullanılabilir. Ortaya çıkan ürünlerin olan kısa olan boyutları (en-boy oranı) nedeniyle, nispeten düşük bir piyasa değerine sahiptir.

Geri dönüşüm süresince kompozit atığın sertliği ve yüksek mukavemetinden dolayı öğütme sisteminde yıpranma olabilir. Dolayısıyla öğütme ekipmanında meydana gelebilecek olası hasar genellikle mekanik geri dönüşüm süreçlerinin operasyonel maliyetini artırır. Dolayısıyla geri dönüştürülen malzemelerin ekonomik açıdan tercih edilebilirliğinin azalması söz konusu olurken aynı zamanda bu problem bu yöntemi uygulanabilirlik açısından da tercih edilebilirlikten uzaklaştırmaktadır. Mekanik öğütme işlemi toksik bir süreç değildir ve işlem oda sıcaklığında gerçekleştirilebilir (Zhu *et al.* 2019). Bu yöntem iş güvenliği ve işçi sağlığı açısından başlıca risk geri dönüşüm sisteminden kaynaklanan tozdur. Polimer matris ve karbon fiber parçaları içeren bu tozun insan sağlığı açısından tehdit oluşturma potansiyeli vardır. Bu zararlı etkiler, partikül ve toz emiş özellikli iyi bir havalandırma

sistemine ek olarak uygun kişisel koruyucu ekipman kullanımı ile önemli ölçüde azaltılabilir.

2.2. Karbon Elyaf Takviyeli Polimerik Kompozitlerin Termal Yöntemlerle Geri Dönüşümü

Karbon elyaf takviyeli polimerik kompozitlerin termal yöntemlerle geri dönüşümü, bu malzemelerden kaynaklanan atıklarla ilgili artan endişeleri gidermek için yenilikçi bir yaklaşımdır. Karbon elyaf takviyeli polimer kompozitler, yüksek mukavemet-ağırlık oranları ve dayanıklılıkları nedeniyle havacılık, otomotiv ve spor ekipmanları dahil olmak üzere çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanım alanı bulmaktadır. Ancak, karbon fiberler ve termoplastik matris arasındaki güçlü bağlar nedeniyle bu malzemelerin geri dönüşümü zorlu bir süreçtir.

Karbon elyaf takviyeli polimerik kompozitleri için termal geri dönüşüm yöntemlerinde, polimerik matrisi parçalamak ve karbon elyafları geri kazanmak için genellikle yüksek sıcaklık ve akışkanlar kullanılmaktadır. Bu yöntemler piroliz ve akışkan yatak geri dönüşümü olmakla beraber bazı durumlarda bu sistemlerin modifiye edilmiş halleri de uygulanabilmektedir.

Termal geri dönüşüm yöntemleri piroliz ve akışkan yatak proseslerini içerir. Karbon elyaflar kompozitin en değerli parçasıdır. Bu yöntemlerle karbon elyafların nispeten mekanik geri dönüşüme göre daha az kalite ve özellik kaybıyla geri kazanılması mümkün olabilmektedir. Dolayısıyla bu yöntemlerle geri dönüştürülmüş ürünün değeri mekanik yöntemlerle üretilenden daha fazladır (Pickering, 2006). Buna ek olarak, termal geri dönüşüm yöntemleri, karbon elyaflar geri kazanılırken aynı zamanda reaksiyon enerjisinin yararlı bir şekilde kullanılmasını sağlayabilen kapalı döngü geri dönüşüm sürecinin tasarlanabilmesini sağlama potansiyeline sahiptirler. Piroliz işlemleri, malzemeyi oksijensiz bir atmosferde geri dönüştürür. Bu süreçlerde inert gaz atmosferi genellikle nitrojenle sağlanmaktadır. Oksijen olmadan, yanıcı malzeme daha düşük molekül ağırlıklı bileşenlere ayrılır ve kompozitin yüzeyinde bir kömür katmanı oluşturur. Reaksiyon ekzotermik olduğu için polimer matrisin bozunmasıyla oluşan hidrokarbon ürünleri prosese ısı eklemek için yakıt olarak kullanılabilir. Bununla birlikte, piroliz işlemleri kendi başlarına kompozit yüzeyinde kömür bıraktığından, karbon lifler tek bir işlem adımıyla serbest bırakılamaz, bu nedenle kömürü uzaklaştırmak ve lifleri daha

temiz bir şekilde geri kazanmak için bir oksidasyon adımı gerekmektedir (Pickering, 2006).

Karbon elyafların geri kazanılması hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemli avantajlar sunar. Bu malzemelerin geri dönüşümü, ham madde tüketimini azaltır, enerji tasarrufu sağlar ve atık miktarını azaltır. Farklı kaynaklardan gelen atıklarda genellikle kompozitlerin yapılarında kullanılan polimer matrislerde farklılıklar (termoplastik ya da termoset polimerler) göstermektedir. Bu nedenle, karbon elyafların mekanik geri kazanımı için süreçler tasarlanırken atığın özellikleri ve geri dönüşüm tesislerinin gereksinimlerine göre spesifik süreçler ya da teknolojilerin kullanılması gerekebilmektedir.

2.2.1. Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Atıklarından Karbon Elyafların Pirolitik Geri Kazanımı

Karbon elyaf takviyeli kompozit atıklarından karbon elyafların pirolitik geri kazanımı, ömrünü tamamlamış kompozit malzemelerden veya üretim atıklarından karbon elyafları geri dönüştürmeyi ve tekrar kullanmayı hedefleyen bir süreçtir. Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler farklı sektörlerde yaygın olarak kullanılan yüksek mukavemetli ve oldukça hafif malzemelerdir. Karbon elyaf takviyeli kompozit atıklarından karbon elyafların geri kazanılması, bu malzemelerin çevresel açıdan sürdürülebilirliğini desteklerken aynı zamanda da atık oluşumunu ve üretim maliyetlerini önemli ölçüde azaltabilir. Karbon elyaf takviyeli kompozit atıklarından karbon elyafların pirolitik geri kazanımında temel ilke ısıl işlemle karbon fiberlerin ve polimerik matrisin birbirinden ayrılmasıdır. Bu süreç atıkların toplanması, temizlenmesi, ısıl işlem ve ayırma süreçlerini kapsayan çok adımlı bir süreçtir. Pirolitik geri kazanımda uygulanan temel işlem basamakları Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Atıklarından Karbon Elyafların Piroliz İle Geri Kazanımında Takip Edilen Genel Prosedür

Şekilden de görüldüğü üzere sürecin ilk adımı karbon elyaf takviyeli kompozit atıkların toplanmasını ve geri dönüşüm için hazırlanmasını içerir. Bu atık malzemeler, kullanılmış eski kompozit parçalarından veya üretim kırıntılarında oluşabilmektedir. Atıklar tipik olarak polimerik matris ve karbon fiberler dışında farklı bileşenler veya kirleticiler de içerebilmektedir. Geri dönüşüm adımından önce bu kirliliklerin uzaklaştırılması için atıklar temizlenir ve ayrıştırılır.

Daha sonra temizlenen atıklar geri dönüşüm sürecine tabi tutulur. Geri kazanım sürecinin temeli Piroliz işlemidir. Piroliz, termoset kompozitin 400-1000°C arasında bir sıcaklığa kadar ısıtıldığı ve yüksek modüllü uzun karbon elyafların geri kazanılmasını sağlayan oksijensiz inert bir gaz atmosferinde gerçekleştirilen bir termal ayrıştırma işlemidir (Meng *et al.*, 2018; Zhu *et al.* 2019). Piroliz sırasında, ayrılmış ve yapısı bozulmuş reçine matrisi, gaz, yağ, katran ve kömüre dönüşerek elyaf takviyesinden uzaklaştırılır (Overcash *et al.* 2018; Gastelu *et al.* 2018). Genellikle, polyester reçineler tam dönüşüm için daha düşük bir sıcaklık gerektirirken, epoksi reçineler ayrışma için daha yüksek bir sıcaklık gerektirir. İşleme sıcaklığı için seçim kriterleri, takviye liflerinin önemli mekanik özellik kaybını önleyen reçinenin dönüşüm derecesine göre belirlenir.

Proseste kompozit atık bir piroliz fırınında tipik olarak 500-1000°C gibi yüksek sıcaklıklara ısıtılmaktadır. Isı, polimeri esaslı reçine matrisinin gazlara ve kömürlere dönüşmesine neden olurken ve karbon fiberleri büyük ölçüde bozulmadan geride bırakır. Piroliz sırasında, salınan gazlar (uçucu organik bileşikler gibi) toplanabilmesi halinde bir enerji kaynağı olarak veya diğer uygulamalar için kullanılabilir. Bu adım, böylece sürecin genel enerji verimliliğini artırılabilmesi mümkündür. Piroliz sürecinin sonunda, uçucu gazlar ayrışır ve geriye kömür ve karbon liflerden oluşan bir karışım kalır. Bu karışımdaki kömür ve karbon fiberlerin birbirinden ayrılması gerekir. Karbon liflerini kömürden ve diğer yan ürünlerden ayırabilmek için mekanik yöntemler veya hava sınıflandırıcıları gibi çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Geri kazanılan karbon elyaflar hala kalıntı düzeyinde de olsa reçine veya diğer yabancı maddeler içerebilmesi söz konusu olabilir. Bu durumda geri kazanılan karbon elyafların kullanım amacına göre gerekli özellikleri ve standartları karşıladığının kontrol edilmesi için temizlik ve kalite kontrol işlemleri uygulanır. Elyaf yüzeyinde kömür kalıntısı olmadan yüksek kaliteli karbon elyafları geri kazanmak için yeni bir süper ısıtılmalı buhar yönteminin (550°C'de) kullanılabilmesi de rapor edilmiştir (Kim *et al.* 2017).

Geride dönüştürülen karbon elyaflar temizlendikten sonra çeşitli formlarda yeniden işlenebilirler. Bu geri dönüştürülmüş karbon elyaflar daha sonra yeni kompozit malzemelerde kullanılarak işlenmemiş karbon elyaflara olan ihtiyacı önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir. Bu sayede, geri dönüşüm ürünleri kompozit malzemenin çevresel sürdürülebilirliğine katkı sağlamaktadırlar.

Son dönemlerde, özellikle havacılık ve otomotiv endüstrilerinde çevresel ayak izlerini azaltmaya ve maliyetleri düşürmeye yönelik çalışmalara büyük önem verilmektedir. Buna göre, pirolitik geri kazanım bu atıkların etkili bir şekilde geri dönüşümünü sağlayabilme ve böylece bu sektörlerdeki çevresel ayak izlerini azaltmaya ve maliyetleri düşürmeye önemli katkılar sunabilme potansiyeline sahiptir.

Pirolitik yöntemle kompozit atıklarından karbon elyafların geri kazanımı enerji yoğun bir süreç olsa da karbon elyafların geri dönüşümü ile beklenen çevresel faydalar dikkate alındığında genellikle geri kazanımlarıyla ilişkili enerji maliyetleri göz ardı edilebilmektedir. Dahası, bu sürecin teknik ve

ekonomik açıdan verimliliğinin artırılmasını ve dolayısıyla da süreci daha sürdürülebilir hale getirmeyi amaçlayan araştırma geliştirme çalışmaları devam etmektedir.

2.2.2. Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Atıklarından Karbon Elyafların Akışkan Yatak Geri Kazanımı

Akışkan yataklı geri dönüşümünde, tipik olarak 6-20 mm'ye kadar parçalandıktan sonra, kompozit atık, 10-25 kPa basınç altında 450-550°C arasında değişen bir sıcaklıktaki sıcak hava akımı ile akışkanlaştırılan bir silika kum yatağına beslenir (Meng *et al.* 2017; Overcash *et al.* 2018). Optimum reaksiyon sıcaklığı, matrisin türüne bağlı olarak termoset matrisin en yüksek düzeyde bozunurken karbon liflerin bozunmasının en az olduğu bir değerde optimize edilerek belirlenir. Hızlı ısıtmanın ardından, elyaflar matrisin termal ayrışması ve bozunması ile serbest hale gelir ve daha sonra ayrılır ve toplanır. Matrisin bozunması ile yan ürünler olarak açığa çıkan gazlar, yan ürünleri oksitlemek için yanmaya tabi tutulur. Geri dönüştürülmüş elyafların uzunluğu 5-10 mm aralığındadır ve işlenmemiş karbon elyafların gerilme mukavemetinin %10-75'i korunur (Zhu *et al.* 2019; Pickering *et al.* 2017).

Akışkan yatak prosesinin önemli bir avantajı, boyut küçültme dışındaki gerekli tüm işlem adımlarının tek bir işlem adımına dahil edilmesidir. Bu yöntemde, sisteme öğütülmüş kompozit hurdası beslenir ve sistemden karbon lifler halinde çıkar. Akışkan yatak geri dönüşümünün bir avantajı ise akışkan yatağın atık kontaminasyonuna ve kompozit haricindeki yabancı cisimlere karşı çok yüksek bir toleransa sahip olmasıdır (Turner, 2011). İmalat hurdasında, zaman zaman hurda parçaları içinde bulunan çok sayıda perçin, cıvata ve diğer bağlantı parçaları bulunabilmektedir. Akışkan yatak bu bağlantı parçalarını yatakta toplarken, bunların etrafındaki kompozitleri de geri dönüştürmektedir (Pickering, 2006). Bu özelliği ile bu süreç bu türden safsızlıkları içerme olasılığı daha yüksek olan yaşam döngüsünü tamamlamış kompozit atıkların işlenmesi için daha uygundur (Meng *et al.* 2018). Genel olarak, akışkan yataklı sistemlerde geri dönüştürülmüş karbon fiberlerin yeniden kullanımı, bu ürünlerin nispeten düşük çevresel ayak izi nedeniyle daha tercih edilebilir olarak değerlendirilmektedir (Meng *et al.* 2017). Bu proseste iş sağlığı ve güvenliği açısından başlıca riskler, kirletici gazların salınımı, organik

çözümlerinin kullanılmasının gerekli olması ve geri dönüşüm koşullarına bağlı olarak yüksek enerji kullanımınıdır.

2.3. Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Kimyasal Geri Dönüşümü

Karbon elyaf takviyeli polimer kompozitlerin kimyasal olarak geri dönüştürülmesi birkaç adımda gerçekleştirilen, uzun süreli ve karmaşık süreçler içermektedir. Mekanik geri kazanım süreçlerinde olduğu gibi, bu yöntemde de öncelikle atık malzemenin toplanması ve üzerindeki yağ, toz, koruyucu vb. kalıntıların temizlenmesi gerekmektedir. Daha sonra polimer matris depolimerize edilerek monomerlerine ayrıştırılır. Mekanik süreçlerden farklı olarak burada karbon fiberlerin yanında polimer matrisinde geri kazanılarak tekrar kullanılabilir hale getirilmesi süreçlerin temel hedeflerinden birisidir. Genel olarak, karbon elyaf takviyeli kompozit atıklarının kimyasal geri dönüştürülmesi süreçlerinde uygulanan temel işlem basamakları Şekil 4’de verilmiştir.

Karbon elyaf takviyeli kompozit atıklarının kimyasal geri kazanımında, süreç atık kompozitlerin toplanmasıyla başlar. Atıklar, genellikle kullanım ömrünü tamamlamış kompozitler olabileceği gibi henüz hiç kullanılmamış kompozit parçaların işlenmesi esnasında ortaya çıkan üretim atıklarından oluşmaktadır. Kimyasal geri kazanımın temeli kompozitin yapısında bulunan temel bileşenlerden olan ve karbonlifleri bir arada tutan polimerik matrisin kimyasal olarak bozundurulması monomerlerine ayrılmasına (depolimerizasyon) dayanmaktadır. Yapıştırıcı, koruyucu, parlaticı, boya, toz, yağ veya kaplama kalıntıları gibi kirlilik oluşturan maddeler geri dönüşüm sürecini olumsuz etkileyebileceği için bu maddelerin etkili bir şekilde temizlenmesi önem arz etmektedir. Daha sonra karbon fiberleri bağlayan polimer matrisini parçalamak için depolimerizasyon işlemi uygulanmaktadır. Yaygın kullanılan polimer matrisler epoksi reçineler ve termoplastik ya da termoset karakterli polimerik maddelerdir.



Şekil 4. Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Atıklarının Kimyasal Geri Dönüştürülmesi Süreçlerinde Uygulanan Temel İşlem Basamakları

Karbon elyaf takviyeli polimer kompozitler, polimerik bir matris içine gömülü karbon elyaflardan oluşur. Geri dönüşümdeki temel zorluk, birbirlerine çok güçlü bir şekilde bağlı olan bu iki bileşenin etkili bir şekilde ayrılması ve geri kazanılmasında yatmaktadır.

Kimyasal geri dönüşüm tipik olarak, polimerik matrisin kendisini oluşturan monomerlere veya daha küçük kimyasal bileşenlere ayrıldığı depolimerizasyon olarak bilinen bir süreci içermektedir. Bu işlemlerde, matris içindeki kimyasal bağların kırılması ve böylece polimer matrisin karbon liflerden ayrılması hedeflenmektedir. Polimerik matris depolimerize edildikten sonra, ortaya çıkan çözelti veya karışımdan karbon elyafların ayrıştırılması

mümkündür. Lifleri izole etmek için filtrasyon veya santrifüjleme gibi teknikler önerilmektedir. Kimyasal geri dönüşüm süreçlerinde temel hedef sadece karbon liflerin geri kazanılması değildir. Aynı zamanda polimerik matrisin de kazanılması ve tekrar kullanılabilir hale getirilmesi önem arz etmektedir. Gerçekleştirilen depolimerizasyon işleminden sonra geri kazanılan monomerler veya daha küçük kimyasal bileşikler yeni malzemeler üretmek için kullanılabilir potansiyeline sahiptirler. Bu sayede, yeni kompozitler üretmek için gereken işlenmemiş plastik hammaddeye olan gereksinim azalacaktır. Böylece yeni kompozitlerin üretiminde olası olumsuz çevresel etkiler minimize edilirken aynı zamanda üretim maliyetlerinin önemli derecede azaltılması mümkün olabilecektir.

Karbon elyaf takviyeli polimer kompozitlerin kimyasal geri dönüşümünün bazı zorlukları ve sınırlamaları vardır. Bu süreçler, genellikle enerji yoğun olabilirler ve geri kazanılan malzemelerin kalitesi henüz işlenmemiş yeni malzemelere göre daha düşük olabilir. Ayrıca süreç, uygulanan kimyasal işlemler ya da kullanılan kimyasal maddeler karbon elyafların zarar görmesine neden olabilir. Bu durumu önlemek için çözücülerin ve reaksiyon koşullarının dikkatli bir şekilde seçilmesi gerekmektedir. Buna karşın, bu yöntemler başarılı bir şekilde uygulandığında, kimyasal geri dönüşüm yöntemleriyle karbon elyaf takviyeli polimer kompozitlerin etkili bir geri dönüşümü mümkündür. Böylece depolama sahalarında biriktirilen kompozit atık miktarının azaltılması ve dolayısıyla da yeni hammaddelere olan talebin azaltılması sağlanabilir. Bu kompozitlerin üretimlerinden kaynaklanan karbon emisyonlarını azaltılması ve bunun bir sonucu olarak da önemli çevresel faydaların elde edilebilmesi olasıdır.

Diğer taraftan, karbon elyaf takviyeli polimer kompozitler için kimyasal geri dönüşüm teknolojilerinin ticarileştirilmesi üzerine yapılan çalışmaların büyük bir bölümü henüz laboratuvar ölçeğinde gerçekleştirilen çalışmalardan ibarettir. Bu süreçler için ölçek büyütme aktif bir araştırma ve geliştirme alanıdır. Hâlihazırda, birçok şirket ve araştırma kurumu bu süreçlerin verimliliğini ve maliyet etkinliğini artırmak için araştırma geliştirme çalışmalarını sürdürmektedirler.

Özetle, karbon elyaf takviyeli polimer kompozitlerin kimyasal geri dönüşümü, kompozit malzemelerin geri dönüşümündeki zorlukların üstesinden

gelmek için umut verici bir yaklaşımdır. Karbon elyaf takviyeli kompozitler için kimyasal geri dönüşüm süreçleri, polimerik matrisin temel bileşenleri olan monomerlerine kadar ayrıştırılmasını ve karbon liflerin yeniden kullanım için geri kazanılmasını kapsamaktadır. Dolayısıyla, kimyasal geri dönüşüm süreçleri bu malzemelerin üretimi, işlenmesi ve kullanım sonrasında oluşan atıklardan kaynaklanan olası zararlı çevresel etkileri önemli derecede azaltabilme potansiyeline sahiptir. Ancak devam eden araştırma ve geliştirme çalışmaları, bu süreçlerin daha geniş çapta ticari olarak benimsenmesi için optimize edilmesine odaklanmıştır.

Depolimerizasyondan sonraki diğer bir önemli işlem basamağı, sebest kalan karbon elyafların polimerik matrisin bozunması ile ortaya çıkan yan ürünlerden ayrılmasıdır. Bu işlem için uygulamaya özel yöntemler geliştirilebilmekle beraber yaygın olarak filtrasyon veya santrifüjleme gibi temel ayırma işlemleri uygulanmaktadır. Ayrıştırılan karbon elyaflar hala kalıntı polimer veya diğer kirleticileri içermektedir. Geri dönüştürülmüş karbon elyafların kalitesini artırmak için bu maddelerin de uzaklaştırılması gerekebilir. Dolayısıyla bu işlem için ek saflaştırma işlemleri gerekli olabilir.

Safsızlıkları gidermek için ek saflaştırma işlemi olarak genellikle çözücülerle yıkama veya ısı işlemi gibi yöntemler önerilmektedir. Diğer taraftan depolimerizasyon sonucunda polimer matrisin bozunmasıyla ortaya çıkan yan ürünler genellikle değerli malzemelerden oluşur. Bu malzemeler geri yeniden kullanım için geri kazanılabilir veya tüketilen enerjiyi geri kazanmak için yakıt olarak kullanılabilir. Örneğin, piroliz işlemi süresince sırasında ortaya çıkan gazlar yakıt veya kimyasal hammadde olarak kullanılabilir. Polimer matrisinin tekrar monomerlere veya başlangıç maddelerine dönüştürülebildiği durumlarda, bu maddeler geri kazanılabilir ve yeni polimer reçinelerinin üretimi için yeniden kullanılabilir. Geri kazanılmış ve temizlenmiş karbon elyaflar daha sonra yeni kompozit malzemeler üretmek için kullanılabilir gibi farklı amaçlar için de kullanılabilir. Bu geri dönüştürülmüş elyaflar yeni bir matrisle birleştirilerek kompozit malzeme üretiminde daha sürdürülebilir ve dögüsel bir yaklaşımın oluşturulması mümkün olabilir. Geri dönüşüm sürecinin her aşamasında, endüstri standartlarını karşıladıklarından emin olmak için karbon elyafların mekanik özelliklerini ve kalitesini izlemek ve korumak çok önemlidir.

Hâlihazırda kimyasal geri dönüşüm süreçlerini daha verimli, uygun maliyetli ve çevre dostu hale getirmeyi amaçlayan çok sayıda araştırma ve geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Gelecek yıllarda, bu çalışmalardan elde edilecek verilerle çok daha benimsenen daha tercih edilebilir yeni geri dönüşüm çözümlerinin de ortaya çıkması beklenmektedir.

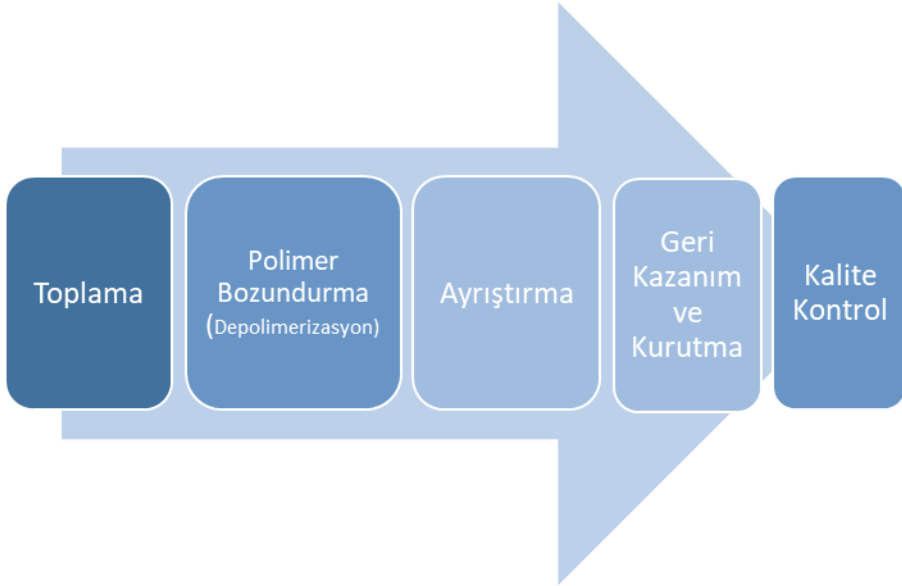
Geri dönüşüm süreçlerinin temel amaçları, atıkları en aza indirmek, kaynakları korumak ve kompozit malzeme üretiminin çevresel etkisini azaltmaktır. Buna göre, depolimerizasyon yönteminin ve spesifik geri dönüşüm sürecinin seçiminin, atığın yapısında bulunan polimer matrisinin türüne ve geri dönüştürülmüş karbon elyafların amaçlanan uygulama alanlarına bağlı olarak beklenen kalite düzeyine göre değişebileceği dikkate alınmalıdır.

2.3.1. Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Atıklarının Solvoliz Yöntemi ile Geri Dönüşümü

Solvoliz proseslerinde, termoset matrisi ayrıştırarak karbon lifleri matristen ayırmak için çözücüler veya ısıtılmış çözücülerin kullanıldığı bir geri dönüşüm yaklaşımıdır. Solvoliz süreçlerinde, çözücünün türü, sıcaklık ve basınç gibi operasyonel parametreler verim üzerinde oldukça etkili olabilmektedir. Dahası bu sistemlere bir katalizör eklenebilmekte ve bu sayede bir verim artışı sağlanabilmektedir. Bu nedenle bu parametrelerin farklı kombinasyonları ile birçok farklı geri dönüşüm tasarlayabilmek mümkündür (Meng *et al.* 2018).

Su, çevre dostu olması, kolay bulunması ve düşük maliyetli olması gibi üstünlükleri nedeniyle diğer çözücülere kıyasla yaygın olarak kullanılmaktadır. Dahası, etanol, aseton, metanol gibi yaygın kullanılan çözücüler ve bunların düşük kritik sıcaklık ve basınç altında su ile karışımlarının da solvoliz süreçlerinde çözücü olarak kullanılabilirliği incelenmiştir. Kimyasal geri dönüşüm süreci ile yüzeyinde kalıntı olmayan ve nispeten uzun liflere sahip geri dönüşüm ürünleri elde edilebilir. Bu nedenle, bu yaklaşımla mekanik özelliklerdeki küçük bir kayıplar ile yüksek kaliteli karbon fiberler elde edilebilmesi mümkündür. Piroliz ile karşılaştırıldığında, kimyasal işlem işleme için daha düşük bir sıcaklık kullanır ve daha temiz ve daha uzun geri dönüştürülmüş lifler üretir, ancak solvoliz, yüksek sıcaklık ve basınçlarda korozyona dayanabilecek pahalı ekipman gerektirir. Dahası, kullanılan

çözücüler çevre ve insan fizyolojisi üzerinde olumsuz etkilere neden olabilir (Liu *et al.* 2017). Tipik bir solvoliz sürecindeki işlem adımları Şekil 5’de sunulmuştur.



Şekil 5. Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Atıklarından Karbon Elyafların Solvoliz İle Geri Kazanımında Takip Edilen Genel Prosedür

Bu yöntemde de önce ilk olarak, karbon fiber kompozit malzeme toplanır. Atık hurdaya çıkarılmış havacılık parçaları, otomotiv bileşenleri veya rüzgâr türbini kanatları gibi çeşitli kompozit bileşenlerinden oluşabilmektedir. Solvent bazlı geri dönüşüm, karbon fiberleri bağlayan polimer matrisin depolimerizasyonu ile başlar. Bu yöntem, kompozit malzemenin polimer matrisi çözebilen bir çözücüyle etkili bir temasının sağlanmasıyla gerçekleştirilir. Çözücü seçimi son derece önemli bir parametredir ve kompozitin üretiminde kullanılan polimer matrisin türüne bağlı olarak belirlenmelidir. Polimer matris kendisini oluşturan monomerlerine ayrıştırıldıktan sonra karbon fiberler çözücüden ayrılır. Bu genellikle mekanik veya kimyasal yollarla yapılır. Ayırma işlemi filtreleme, kimyasal çöktürme, santrifüjleme ve diğer ayırma işlemleri ile yapılabilir. Geri kazanılan karbon lifleri daha sonra üzerlerinde kalan kalıntı çözücüyü uzaklaştırmak için kurutulur. Bu işlem, buharlaştırma şeklinde ya da geleneksel kurutma yöntemleriyle gerçekleştirilebilir. Geri dönüştürülmüş karbon elyafının

kalitesi, gerekli özellikleri ve performans standartlarını karşıladıklarından emin olmak için kalite kontrol testlerine tabi tutulur. Bu aşamada, geri dönüştürülmüş elyaflar belirli gereksinimleri karşılamak için ek işleme veya muameleye tabi tutulabilir. Geri kazanılan karbon elyaflar yapılan kalite kontrolleri sonucunda talep edilen kalite standartlarını karşıladığının belirlenmesi halinde, yeni kompozit malzemeler oluşturmak için yeniden kompozit üretiminde kullanılabilirler. Bu ürünlerin tekrar üretim sürecine dâhil olması, işlenmemiş karbon elyaflara olan talebin önemli ölçüde azaltılmasına yardımcı olur ve kompozit üretiminin sürdürülebilirliğine katkıda bulunur.

Solvent bazlı geri dönüşüm, değerli karbon elyafların nispeten yüksek kalitede geri kazanımına imkân sağlasa da, uygun çözücünün seçilmesi ve işlem sonunda kullanılmış çözücü atığının ortaya çıkması ve bu atığın da bertarafının gerekiyor olması, işlem sürelerinin uzun olması, özel teknik donanımlara ihtiyaç duyulması gibi bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Solvent bazlı geri dönüşüm tekniklerini daha verimli ve sürdürülebilir hale getirmek için süreci optimize etmek üzerine yapılan bilimsel çalışmalar devam etmektedir.

2.3.2. Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Atıklarının Elektrokimyasal Yöntemler ile Geri Dönüşümü

Elektrokimyasal geri dönüşümün yüksek voltajlı parçalama yöntemi, daha önce madencilikte değerli bileşenler elde etmek için kayaları parçalamak için kullanılan katı malzemeyi parçalamak için darbeli elektrik deşarjları kullanır (Leißner *et al.* 2018). Elektrotlar arasında yüksek voltajlı bir elektrik darbesi üretilir ve kaptaki malzemeler boyunca taşınır. Enerjinin %75-80'i atık malzemeler yerine işleme kabına verildiğinden, yüksek enerji tüketimi en büyük sınırlayıcı faktör olmuştur.

Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin geri dönüşümü için yüksek voltajlı parçalama yöntemi ile mekanik geri dönüşüm yönteminin verim ve maliyet açısından karşılaştırmalı bir şekilde incelendiği bir çalışma yapılmıştır (Mativenga *et al.* 2016). Araştırmacılar, yüksek voltajlı parçalama yöntemi ile daha uzun ve daha temiz elyaflar elde edildiğini rapor etmişlerdir. Fakat bu yöntemde tüketilen enerji miktarı, mekanik geri dönüşüm için tüketilen enerjiden 2,6 kat daha fazladır. Benzer içerikli başka çalışmalarda da yüksek

voltajlı parçalamanın kompozit bileşenlerini birbirinden ayırma üzerindeki olumlu etkisi doğrulanmıştır (Roux *et al.* 2015, Bru *et al.* 2018). Diğer taraftan, Leibner ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, mekanik parçalama ile mukayese edildiğinde yüksek voltajlı parçalama yönteminin daha pratik ve uygulanabilir olduğu vurgulanmış buna karşın büyük ölçekli uygulamalar için mekanik parçalama ile karşılaştırıldığında maliyet açısından rekabet edebilmesinin mümkün olmadığı rapor edilmiştir (Leibner *et al.* 2018).

Zhu ve arkadaşları (Zhu *et al.* 2019) tarafından yapılan bir çalışmada ise, elektrokatalitik bir geri dönüşüm süreci tasarlanmıştır. Buna göre, karbon fiber takviyeli kompozit atıkları elektrik akımları varlığında KOH katalizörü içeren bir NaCl elektrolit çözeltisine atılmıştır. Elektrokatalitik süreçte, epoksi reçinenin yapısındaki C-N bağları parçalanmış ve dolayısıyla matris bozunmuş ve karbon lifler serbest hale gelmiştir. İşlem ortam sıcaklığı ve basıncında herhangi bir toksik kimyasal kullanılmadan gerçekleştirilmiştir. İşlem sonunda, %100'e yakın reçine giderimi sağlanırken, geri kazanılan karbon fiberlerin ise özelliklerini ve mukavemetini büyük ölçüde korudukları rapor edilmiştir.

2.4. Karbon Bazlı kompozitlerin Geri Dönüşümünün Olası Çevresel Etkileri

Karbon bazlı kompozitlerin kimyasal geri dönüşümünün olası çevresel etkileri, geri dönüşüm sürecinin verimliliği, enerji tüketimi ve geri dönüştürülen malzemelerin genel yaşam döngüsünün değerlendirmesi de dâhil olmak üzere çeşitli faktörlere bağlı olarak olumlu ya da olumsuz etkilere sahip olabilir. Kimyasal geri dönüşüm süreçleri ile atık azaltımının sağlanması, doğal kaynakların korunması ve azaltılmış karbon emisyonlarının sağlanmasıdır.

Karbon bazlı kompozitlerin kimyasal geri dönüşümünün birincil ve temel faydalarından biri atıkların azaltılmasıdır. Bu süreç, kompozit malzemelerin düzenli depolama alanlarından ve yakılarak bertaraf edilmesine olan gereksinimi ortadan kaldırarak depolama ya da bertaraf süreçlerinden kaynaklanabilecek olası olumsuz çevresel etkileri önemli ölçüde azaltabilme potansiyeline sahiptir.

Ayrıca, kimyasal geri dönüşüm karbon liflerin ve polimerik matrisin geri kazanılmasını ve yeniden kullanılmasını mümkün kılar. Bu sayede, işlenmemiş malzemelere olan talebi azaltır ve bu durum da doğal kaynakların tüketimini azaltır ve dolayısıyla da hammaddelerin çıkarılması ya da işlenmesi

süreçlerinde ortaya çıkabilecek olası olumsuz çevresel etkilerin azalmasına neden olur.

Dahası, yeni kompozit malzemelerin üretiminde geri dönüştürülmüş karbon elyaf ve termoplastiklerin kullanılması, yeni malzeme üretimine kıyasla potansiyel olarak çok daha düşük karbon emisyonları sağlayabilir. Bunun nedeni, geri dönüşüm süreçlerinin yeni malzeme üretimine kıyasla genellikle daha az enerji gerektirmesi ve işlenmemiş malzeme üretimine göre daha az sera gazı yayması gibi etkenlere dayanmaktadır.

Kimyasal geri dönüşüm süreçlerinde, enerji yoğun süreçler içermeleri, yoğun kimyasal kullanımı gerektirmesi, kalite ve performans açısından işlenmemiş malzemeden daha düşük nitelikte ürün elde edilmesi, atıkların tesislere ulaştırılması ve çeşitli nakliye süreçlerinden kaynaklanan salınımlar gibi faktörler olası olumlu çevresel etkilerini sınırlayabilmektedir.

Kimyasal geri dönüşüm süreçlerinde, özellikle depolimerizasyon süreçleri ısıtma ve çeşitli kimyasal işlemler içerebilmektedir. Bu işlemler çoğunlukla enerji yoğun süreçlerdir ve dolayısıyla yüksek enerji tüketimi gerektirebilirler. Bu işlemler için gereken yüksek miktardaki enerji şayet fosil yakıtlardan sağlanıyorsa veya enerji kaynağı yenilenebilir ya da düşük karbonlu değilse, geri dönüşümden beklenen muhtemel çevresel faydaların bir kısmını dengeleyebilir. Dahası depolimerizasyon sürecinde kullanılan kimyasal maddeler ve çözücüler, uygun şekilde ve miktarlarda kullanılmadığında çeşitli çevresel riskler ortaya çıkabilir. Ayrıca, bu kimyasalların üretimi de çevre dostu olmayan süreçler içerebilir ve dolayısıyla kendi çevresel ayak izine de sahip olabilirler.

Ayrıca, geri dönüştürülmüş malzemelerin kalitesi her zaman işlenmemiş malzemelerinki ile aynı olmayabilir. Bu durum, özellikle havacılık ve otomotiv gibi yüksek performanslı malzemelerin gerekli olduğu sektörlerde geri dönüştürülmüş malzemelere olan ilgiyi azaltabilir. Geri dönüştürülmüş malzemeler gerekli performans standartlarını karşılamadığında kullanım alanlarının da sınırlı olması kaçınılmazdır. Dahası kompozit atıkların geri dönüşüm tesislerine taşınması ve geri dönüştürülmüş malzemelerin dağıtımı, özellikle geri dönüşüm tesisi atık kaynaklarından uzak olduğunda, nakliye süreçleri gerektirebilir. Bu durum enerji kullanımı ve fosil yakıt kaynaklı

emisyonlar açısından olumsuz çevresel etkilerin ortaya çıkmasına da neden olabilir.

Buna göre, kimyasal geri dönüşüm süreçlerinin verimliliğinin ve olası çevresel etkilerinin, kullanılan teknoloji ve yöntemlere bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik gösterebilir. Dolayısıyla bu süreçlerin olası olumsuz çevresel etkileri en aza indirmek için geri dönüşüm teknolojilerini sürekli bir iyileştirme ve geliştirme sürecine tabi tutulmaları gerekmektedir. Ayrıca, kimyasal geri dönüşüm süreçlerinin hâlihazırda uygulanmakta olan çevresel düzenlemelere ve güvenlik standartlarına uygun olmasını sağlamak, olumsuz çevresel etkilerden ve potansiyel sağlık tehlikelerinden kaçınmak için çok önemlidir.

Özetle, karbon bazlı kompozitlerin kimyasal geri dönüşümünün çevresel etkileri karmaşıktır ve çeşitli faktörlere bağlıdır. Verimli bir şekilde ve enerji tüketimi ile kimyasal kullanımını en aza indirmeye odaklanarak yapıldığında, kimyasal geri dönüşüm atık azaltma, kaynakların korunması ve karbon emisyonlarının azaltılması gibi önemli çevresel faydalar sağlayabilir. Bununla birlikte, enerji yoğunluğu, kimyasal kullanımı ve geri dönüştürülmüş malzemelerin kalitesiyle ilgili zorluklar da ortaya çıkabilir. Buna göre, geri dönüşüm süreçlerinin çevresel performansını iyileştirmek için araştırma ve geliştirme çalışmalarının devam ettirilmesi gerekmektedir.

2.5. Karbon Bazlı Kompozitler Geri Dönüşümünün Olası Ekonomik Faydaları

Karbon bazlı kompozitlerin kimyasal geri dönüşümünün üreticiler ve hem de tüm toplum açısından önemli ekonomik faydalar sağlama potansiyeline sahiptir. Geri dönüşüm, kompozitin yapısında bulunan karbon liflerin ve polimerik matris malzemelerinin geri kazanılmasını sağlayarak kaynak geri kazanımı sağlamak ve dolayısıyla yeni hammadde ihtiyacını azaltabilir ve dolayısıyla da üreticiler için maliyet tasarrufu sağlayabilmektedir.

Dahası, özellikle havacılık ve otomotiv gibi karbon bazlı kompozitlerin çok yoğun bir şekilde kullanıldığı endüstrilerde büyük miktarlarda kompozit atığı oluşumu söz konusudur. Bu atıkların depo alanlarında depolanması ya da yakma gibi bertaraf yöntemlerinin kullanılması gerekebilmektedir. Geri dönüşüm, kompozit atığını düzenli depolama alanlarında depolama ya da yakma işlemi gibi geleneksel atık yönetimi yöntemleriyle ilişkili bertaraf

maliyetlerinden kaçınmasına yardımcı olabilir. Bu maliyetler, özellikle havacılık ve otomotiv gibi önemli miktarda kompozit atık üreten endüstriler için önemli miktarlarda olabilir.

Üretim süreçlerinde geri dönüştürülmüş karbon elyaf ve termoplastiklerin kullanılması, işlenmemiş malzemelerin kullanılmasından daha uygun maliyetli olabilir. Bu durum özellikle yüksek performanslı malzemelerin gerekli olduğu sektörlerde geçerlidir, çünkü geri dönüştürülmüş malzemeler, genellikle işlenmemiş muadillerinden daha uygun fiyatlı olmasıdır. Dahası, kimyasal geri dönüşüm süreçleri enerji tüketse de işlenmemiş malzemelerin üretimine kıyasla net bir enerji tasarrufu sağlayabilir. Bu enerji verimliliği, üreticiler için daha düşük üretim maliyetleri sağlayabilir.

Karbon temelli kompozitlerin geri dönüşümünün olası ekonomik faydalarının operasyonların ölçeği, geri dönüşüm süreçlerinin verimliliği, geri dönüştürülmüş malzemeler için pazar talebi ve bölgesel düzenleyici ortamlar gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlikler gösterebileceği görülmektedir.

3.6. Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Atıkları İçin Geri Dönüşüm Süreçlerinin Geleceği

Karbon elyaf takviyeli kompozitler için geri dönüşüm süreçlerinin geleceği umut vaat etmektedir. Bu alanda hâlihazırda önemli miktarda araştırma geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. Fakat sürecin geleceğinin, yürütülen ya da muhtemel yeni çalışmalardan elde edilecek bilimsel veriler, teknolojik gelişim, sektör beklentileri ve genel eğilimler ile şekillenmesi beklenmektedir. Önümüzdeki yıllarda teknolojideki gelişmelere paralel olarak daha verimli ve çevre dostu depolimerizasyon yöntemlerinin geliştirilmesi beklenmektedir. Dolayısıyla geri dönüşüm teknolojilerinde sürekli bir iyileşme eğiliminin devam etmesi ve uzun yıllar boyunca bu süreçlerde sürekli bir yenilenmenin olması beklenmektedir. Bu yeniliklerin geri dönüşüm sürecini daha erişilebilir ve ekonomik olarak uygulanabilir hale getirmesi beklenmektedir.

Diğer taraftan, tüm Dünya üzerinde artan çevresel kirlilikler ve bu kirliliklerden kaynaklanan olumsuz çevresel etkilerin her geçen gün daha gözle görünür olmaya başladığı günümüzde, çevre bilincinin ve dolayısıyla duyarlılığının daha da artması beklenmektedir. Dolayısıyla, yakın gelecekte

diğer birçok alanda olduğu gibi kompozit teknolojisi alanında da sürdürülebilirlik kavramının en önemli öncelik haline gelmesi olasıdır. Bu nedenle, karbon elyaf takviyeli kompozitlerin oldukça yoğun bir şekilde kullanılmakta olduğu, rüzgar enerjisi, havacılık ve uzay teknolojileri ve otomotiv gibi endüstrilerin, atıkları en aza indirmek ve karbon ayak izlerini azaltmak için geri dönüşüm uygulamalarını giderek daha fazla benimsemeleri beklenmektedir. Bu sürece paralel olarak sürdürülebilir ürünlere yönelik tüketici tercihlerinin de artması beklenmektedir.

Malzemelerin azaltılması, atıkların ya da kullanılmış malzemelerin yeniden kullanılması veya geri dönüştürülmesini vurgulayan döngüsel ekonomi ilkelerinin, karbon fiber takviyeli kompozitlerin geri dönüşüm süreçlerinin endüstriler tarafından daha fazla benimsenmesinde de belirleyici olması beklenmektedir. Dolayısıyla gelecek dönemlerde, hükümetlerin, endüstrilerin ve tüketicilerin bu tür girişimleri daha fazla desteklemesi muhtemeldir. Diğer taraftan, karbon elyaf takviyeli kompozitlere olan talep sürekli artmaya devam etmektedir ve bu artışın uzun yıllar boyunca süreceği tahmin edilmektedir. Dolayısıyla karbon elyaf takviyeli kompozitlerin geri dönüşümü, işlenmemiş karbon elyaf üretimine uygun maliyetli bir alternatif oluşturması beklenmektedir. Dahası, geri dönüşüm yöntemlerine yönelik devam eden araştırmalar, geri dönüştürülmüş karbon elyafların malzeme özelliklerinin iyileştirilmesine ve bu sayede çeşitli uygulamalar için işlenmemiş elyaflarla daha rekabetçi hale gelmesine yol açması muhtemeldir.

Hâlihazırda, karbon takviyeli kompozitlerin geri dönüşüm ürünlerinde herhangi bir standardizasyonun olmaması da bu malzemelere olan talebi sınırlayan bir faktördür. Bu süreçte, kompozit atıklarının geri dönüşümünden elde edilen geri dönüşüm ürünlerinin standartlaştırılmasının ancak, ilgili endüstriler tarafından bu alandaki temel gereksinimlerin belirlenmesi ve standartların geliştirilmesi ve üreticiler, geri dönüşümcüler ve düzenleyici kurumlar gibi paydaşlar arasındaki koordinasyonun artması ile mümkün olabileceği değerlendirilmektedir.

Özelleştirilmiş Çözümler: Geri dönüşüm süreçlerinin daha uyarlanabilir hale gelmesi ve polimer matrisinin türüne, kompozit yapısına ve amaçlanan son kullanıma bağlı olarak özelleştirilmiş çözümlere izin vermesi beklenmektedir; bu da geri dönüşüm sürecinin verimliliğini ve kalitesini artırabilir. Günümüzde atık azaltma, hükümetler ve endüstriler açısından büyük ölçüde benimsenmiş

bir eğilimdir. Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin geri dönüşümünün, atıkların azaltılmasına ve malzemelerin çöp sahalarından uzaklaştırılmasına katkıda bulunması ve bu sayede küresel atık azaltma hedefleriyle de uyumlu hale gelecektir. Dahası bu atık azaltma eğiliminin endüstrileri geri dönüşüm süreçlerine daha fazla yatırım yapmaya zorlaması da olasıdır.

Özetle, karbon elyaf takviyeli kompozitler için geri dönüşüm süreçlerinin geleceği parlaktır. Teknolojik gelişmeler, sürdürülebilirlik eğilimleri, ekonomik teşvikler ve iş birliğine dayalı çabaların birleşimi, geri dönüşüm uygulamalarının endüstriler tarafından daha yaygın olarak benimsenmesini sağlayarak bu gelişmiş malzemelerin yönetimi için çevreye karşı daha sorumlu ve ekonomik olarak uygulanabilir çözümler ortaya çıkarması beklenmektedir. Geri dönüşüm süreçleri olgunlaştıkça, kompozit endüstrisinin sürdürülebilirlik çabalarının ayrılmaz bir parçası haline gelmesi kaçınılmazdır.

KAYNAKÇA

- Anane-Fenin, K., Akinlabi, E.T. (2017). Recycling of fibre reinforced composites: a review of current technologies. *DII-2017 conference on infrastructure development and investment strategies for africa: infrastructure and sustainable development impact of regulatory and institutional framework*. Livingstone, Zambia.
- Barnett, P.R.; Ghossein, H.K. (2021). A Review of Recent Developments in Composites Made of Recycled Carbon Fiber Textiles. *Textiles,1*, 433-465.
- Borjan, D., Knez, Ž., & Knez, M. (2021). Recycling of Carbon Fiber-Reinforced Composites-Difficulties and Future Perspectives. *Materials (Basel, Switzerland)*, 14 (15), 4191.
- Bru, K., Touzée, S., Auger, P., Dobrusky, S., Tierrie, J., Parvaz, D.B. (2018). Investigation of lab and pilot scale electric-pulse fragmentation systems for the recycling of ultra-high performance fibre-reinforced concrete. *Miner. Eng.* 128:187–94.
- Dong, C., Li, K., Jiang, Y., Arola, D., & Zhang, D. (2018). Evaluation of thermal expansion coefficient of carbon fiber reinforced composites using electronic speckle interferometry. *Optics express*, 26(1), 531-543.
- El-Dessouky, H. M., & Lawrence, C. A. (2013). Ultra-lightweight carbon fibre/thermoplastic composite material using spread tow technology. *Composites Part B: Engineering*, 50, 91-97.
- Frank, E., Hermanutz, F. and Buchmeiser, M.R. (2012), Carbon Fibers: Precursors, Manufacturing, and Properties. *Macromol. Mater. Eng.*, 297: 493-501.
- Gastelu, N., Lopez-Urionabarrenechea, A., Solar, J., Acha, E., Caballero, B.M., Lopez, F.A., (2018). Thermo-catalytic treatment of vapors in the recycling process of carbon fiber-poly (benzoxazine) composite waste by pyrolysis. *Catalysts*, 8, (11), 523.
- Giorgini L, Leonardi C, Mazzocchetti L, Zattini G, Cavazzoni M, Montanari I, (2016). Pyrolysis of fiberglass/polyester composites: recovery and characterization of obtained products. *FME Trans.* 44:405–14.
- Hazell, J., (2017) Getting it right from the start: developing a circular economy for novel materials. London, UK: Green Alliance.

- Isa, A, Nosbi, N., Che Ismail, M., Md, Akil, H, Wan Ali, WFF, Omar MF. A, 2022. Review on Recycling of Carbon Fibres: Methods to Reinforce and Expected Fibre Composite Degradations. *Materials (Basel)*. Jul 8;15(14):4991.
- Kim, K.W., Lee, H.M., An, J.H., Chung, DC., An. K.H., Kim, B.J., (2017), Recycling and characterization of carbon fibers from carbon fiber reinforced epoxy matrix composites by a novel super-heated-steam method. *J Environ Manag.*, 203: 872–9.
- Leißner, T., Hamann, D., Wuschke, L., Jackel, H.G., Peuker, U.A. (2018). High voltage fragmentation of composites from secondary raw materials – potential and limitations. *Waste Manag.* 74:123–34.
- Liu Y, Farnsworth M, Tiwari A. (2017). A review of optimisation techniques used in the composite recycling area: state-of-the-art and steps towards a research agenda. *J. Clean Prod.*, 140:1775–81.
- Mativenga, P.T., Shuaib, N.A., Howarth, J., Pestalozzi, F., Woidasky, J., (2016). High voltage fragmentation and mechanical recycling of glass fibre thermoset composite. *CIRP Annals.*, 65(1):45–8.
- McConnell, VP. (2010). Launching the carbon fibre recycling industry. *Reinforc Plast*;54(2):33–7.
- Meng F, McKechnie J, Turner TA, Pickering SJ. (2017). Energy and environmental assessment and reuse of fluidised bed recycled carbon fibres. *Compos Appl Sci Manuf*; 100:206–14.
- Meng F, Olivetti, E.A., Zhao, Y., Chang, J.C., Pickering, S.J., McKechnie J. (2018). Comparing life cycle energy and global warming potential of carbon fiber composite recycling technologies and waste management options. *ACS Sustainable Chem Eng.*;6(8):9854–65.
- Mishnaevsky, L., Branner, K., Petersen, H.N., Beauson, J., McGugan, M., Sørensen, B.F., (2017). Materials for wind turbine blades: an overview. *Materials*, 10 (11):1285.
- Morin, C., Loppinet-Serani, A., Cansell, F., & Aymonier, C. (2012). Near-and supercritical solvolysis of carbon fibre reinforced polymers (CFRPs) for recycling carbon fibers as a valuable resource: State of the art. *The journal of supercritical fluids*, 66, 232-240.

- Newcomb, B. A. (2016). Processing, structure, and properties of carbon fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 91, 262-282.
- Overcash, M., Twomey, J., Asmatulu, E., Vozzola, E., Griffing, E. (2018). Thermoset composite recycling – driving forces, development, and evolution of new opportunities. *J Compos Mater.*, 52(8):1033–43.
- Pickering S., Turner T., Meng, F., Morris, C., Heil, J., Wong, K., (2015). Developments in the fluidised bed process for fibre recovery from thermoset composites. In: Proceedings of 2nd annual composites and advanced materials expo. *Dallas, Texas USA; Conference, Conference.*
- Pickering, S. J. (2006). Recycling technologies for thermoset composite materials—current status. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 37(8), 1206-1215.
- Rademacker, Tim. (2018). Challenges in CFRP recycling. In: Breaking & sifting -Expert exchange on the end-of-life of wind turbines. *Germany: Federal Ministry for Economic Affairs and Energy*; p. 24–5.
- Roux, M., Eguémann. N., Dransfeld, C., Thiéebaud, F., Perreux, D., (2015), Thermoplastic carbon fibre-reinforced polymer recycling with electrodynamical fragmentation: from cradle to cradle. *J. Thermoplast. Compos. Mater.* 30 (3):381–403.
- Shuaib, N.A, Mativenga, P.T., (2016) Energy demand in mechanical recycling of glass fibre reinforced thermoset plastic composites. *J. Clean Prod.*;120:198–206.
- Turner, T. A., Pickering, S. J., & Warrior, N. A. (2011). Development of recycled carbon fibre moulding compounds—Preparation of waste composites. *Composites Part B: Engineering*, 42(3), 517-525.
- Wang. S., Xing, X., Zhang, X., Wang, X., Jing, X. (2018). Room-temperature fully recyclable carbon fibre reinforced phenolic composites through dynamic covalent boronic ester bonds. *J Mater Chem*, 6(23):10868–78.
- Wong, K., Rudd, C., Pickering, S., & Liu, X. (2017). Composites recycling solutions for the aviation industry. *Science China Technological Sciences*, 60, 1291-1300.
- Zhang, J., Chevali, V. S., Wang, H., & Wang, C. H. (2020). Current status of carbon fibre and carbon fibre composites recycling. *Composites Part B: Engineering*, 193, 108053.

Zhu, J.H., Chen, P., Su M., Pei, C, Xing F. (2019). Recycling of carbon fibre reinforced plastics by electrically driven heterogeneous catalytic degradation of epoxy resin. *Green Chem.*, 21 (7):1635–47.

BÖLÜM 3

PM_{2,5}'LAR VE PM_{2,5}'LARA BAĞLI AĞIR METALLERİN KONSANTRASYON VE KAREKTERİZASYONLARININ BELİRLENMESİNE YÖNELİK YENİLİKÇİ MÜHENDİSLİK YAKLAŞIMLARI

Dr. Öğr. Üyesi Cihan PALOLUOĞLU^{12*}

Prof. Dr. Hanefi BAYRAKTAR³

Doç. Dr. Serkan BAYAR⁴

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10445641>

^{1*}Bayburt Üniversitesi, Sanat ve Tasarım Fakültesi, İç Mimarlık ve Çevre Tasarım Bölümü, 69000, Bayburt, Türkiye

(Sorumlu Yazar: cpaloluoglu@bayburt.edu.tr; ORCID: 0000-0002-8635-8315)

²Bayburt Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı (BUMER), 69000, Bayburt, Türkiye.

³Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 25240, Erzurum, Türkiye (hanefib@atauni.edu.tr). ORCID ID: 0000-0002-4729-5593.

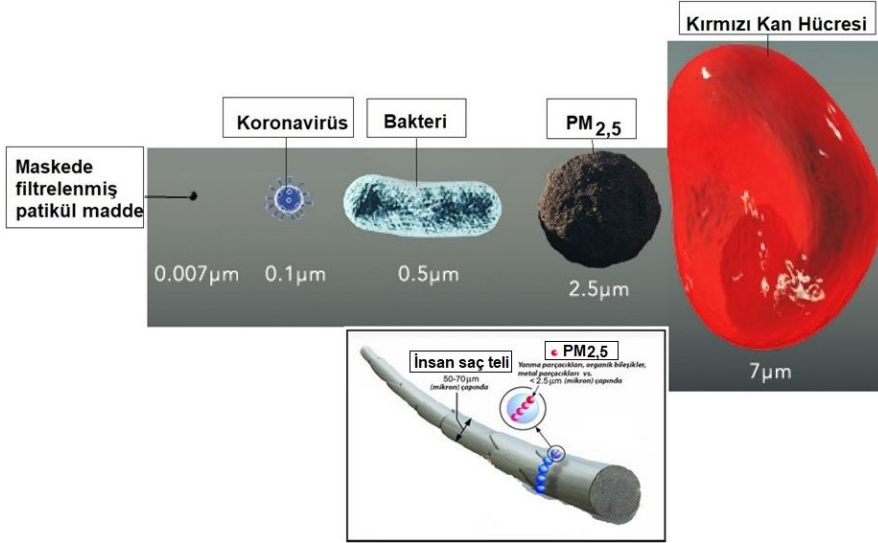
⁴Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 25240, Erzurum, Türkiye (sbayar@atauni.edu.tr). ORCID ID: 0000-0001-6713-2604.

GİRİŞ

İnce mod partikül maddeler (PM_{2,5}'lar) ve bunlara adsorblanarak bağlanan ağır metaller çağımızın güncel kirleticileri olup her geçen gün zararlı etkilerinden dolayı önemli bir endişe kaynağı olmaktadır. Aynı zamanda canlı ve cansızlar üzerinde ölümcül boyutlara varan ciddi tehditler oluşturmaktadırlar (Aneja *et al.* 2001; Zhao *et al.* 2006; Brook *et al.* 2010; Cao *et al.* 2012; Xie *et al.* 2016; Guo *et al.* 2017; Kim *et al.* 2019; Yu *et al.* 2023). Bu bölümde, PM_{2,5}'lar ve PM_{2,5}'lara bağlı ağır metal konsantrasyonlarının ve karakterizasyonun belirlenmesine yönelik yenilikçi mühendislik yaklaşımları ile, örnekleme ve analiz işlemleri arasındaki tüm çalışmaların doğru değerlendirmesinin önemi vurgulanarak, gelişmiş hassasiyet ve kesinlik sunan yeni teknolojiler sunulmaktadır. Ayrıca bu bölümde, PM_{2,5}'lar ve PM_{2,5}'lara bağlı ağır metal konsantrasyonlarının daha doğru belirlenmesi ve net karakterizasyon tanımları için örnekleme, laboratuvar çalışmaları ve analiz işlemlerinin geliştirilmesine de odaklanılmaktadır. Diğer taraftan ağır metallerin hem insan sağlığı hem de canlı/cansız çevre üzerindeki zararlı etkisinin farkında olan bu bölümde, yine yüksek toksik etkisi olan ağır metallerin belirlenmesi açısından örnekleme programı, laboratuvar çalışması ve analiz hassasiyeti ve verimliliğini artırmak için tasarlanmış en ileri yenilikçi mühendislik yaklaşımlarını da inceleyip raporlamaktadır. Böylece bu yeni mühendislik yaklaşımlarının çalışmaları ve pratik uygulamaları detaylandırılarak tartışılacaktır. Ayrıca farklı ortamlardan (kentsel, kırsal, yarı kentsel alanlar) alınan örneklere bu yenilikçi yaklaşımlar uygulanarak, güncel literatür çalışmalarına ek olarak nasıl yeni ve pratik yöntemler uygulanabileceği konusunda daha derin bir anlayışa sahip olma ufku da bilimsel olarak detaylandırılmaktadır. Aynı zamanda bu bölümde tartışılan mühendislik çözümleri sayesinde zamanında daha doğru veriler sunarak, bilinçli karar alma süreçlerine katkı sağlayıp, PM_{2,5} ile ilişkili ağır metal kirliliğini azaltmak için etkili stratejilerin de geliştirilmesine ve uygulanmasına destek verilmektedir. Bölüm, bu amaçlar doğrultusunda önce genel fiziksel ve kimyasal tanımlarını yaparak, ardından da örnekleme, laboratuvar çalışmaları ve analiz işlemleri detaylandırıp, çevre politikaları ve düzenlemeleri üzerindeki potansiyel etkisini okuyucunun kendi bilimsel dünyasına sunarak sona ermektedir. Bölümde öncelikli konu olarak PM'lerin canlılar üzerindeki zararlı etkileri ile cansız ekosistem üzerindeki etkileşimleri tartışılmaktadır. Bu sebeple hem PM

içeriğinin hem de PM kirliliğinin değerlendirilmesi için doğru ve yenilikçi ölçüm yöntemlerinin araştırılıp geliştirilmesi hayati bir önem taşımaktadır. Böylece, PM'lerin farklı boyutlarını, kaynaklarını, örneklenme yöntemlerini, laboratuvar çalışmalarını ve verilerin eldesinde analiz yöntemlerinin yenilikçi bir bakış açısı ile açıklanarak, bilim insanlarının çağımızın bu kritik sorununu izlemek ve kaynaktan gidermek için geliştirmekte oldukları son teknoloji ölçüm teknikleri de tartışılacaktır.

Partikül maddeler (PM'ler), atmosferde asılı duran çap boyutları 0,0002-100 µm aralığında değişen farklı fazlardaki parçacıklarıdır (katı, sıvı, gaz, vb.) (Seinfeld & Pandis 1998; Wilson & Suh 1997; Bayraktar 2006; Guo *et al.* 2017; Liu *et al.* 2017; Wang *et al.* 2019). Aynı zamanda PM'ler boyut ve içeriklerine göre sıralanırsa; 1-100 µm arasında olanlar Uçucu küller (genelde fosil içerikli katı yakıtın yanması sonucu oluşan gaz fazındaki yakıt içerikli küller), 1-10 µm arasında olanlar tozlar (gaz fazında olan askıda partikül küller), 1 µm'den küçük olanlar duman fazı (eksik yanma sonucu oluşan karbon içerikli yanıcı maddeler), 0,5 µm'den küçük olanlar islilik fazı (karbon içerikli farklı maddelerin tam yanması ile oluşan atmosferde yine karbon içerikli dağılan maddeler), 10-200 µm arasında olan sprey fazı (sıvı fazdaki moleküllerin sıkıştırılarak atomize faza geçerek oluşan sıvı tanecikler), 0,1-10 µm arasında olan sis fazı (buhar fazındaki moleküllerin farklı ısı değişimi ile yoğunlaşması sonucu meydana gelen oldukça ince moddaki sıvı parçacıklar) olarak sıralanmaktadır (Xie *et al.* 2016; Yang *et al.* 2017; Wang *et al.* 2019). Diğer taraftan aerodinamik çapları açısından da PM'ler beş kısımda tanımlanmaktadır. 25-40 µm arasında olan PM'lere TSP (toplam askıda partikül madde), 10 µm ve altında olan PM'lere PM₁₀, 10-2,5 µm arasında olan PM'lere PM_{10-2,5}, 2,5 µm ve altında olan PM'lere PM_{2,5}, 1 µm ve altında olan PM'lere ise PM₁ denilmektedir (Bayraktar 2006; Can 2016; Yang *et al.* 2017). Bu gruplar içerisinde ince mod PM_{2,5} ve ultra ince mod olan PM₁ insan sağlığına ve doğal ekolojik sistemlere en zararlı olan grubun başında olup, bu endişeler doğrultusunda PM_{2,5} ve bu boyuta bağlı olan ağır metaller detaylandırılmaktadır. Aynı zamanda boyut açısından daha fazla detaylandırmak için Şekil 1'de farklı partikül büyüklükteki görseller ile PM_{2,5}'lar karşılaştırılmaktadır.



Şekil 1. PM_{2,5} Farklı Boyuttaki Partiküller ve İnsan Saçı İle Karşılaştırılması

PM_{2,5} boyutlarının daha iyi kavranabilmesi için Şekil 1'deki insan saç teli örneği ile görsel olarak karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda Şekil 1'den de görüldüğü üzere insan saç teli açısından bakıldığında saç teli ortalama 60 µm olduğu kabul edilirse, PM_{2,5}'dan yaklaşık 24 kat daha büyük olduğu ve PM_{2,5}'ların ne kadar küçük / ince mod parçacıklar olduğu anlaşılmaktadır. Aynı zamanda, partikül büyüklüklerine göre sıralanan canlı ve cansız nesnelere karşılaştırıldığında ise bakteriden 5 kat, koronavirüs hücrelerinden 25 kat büyük olup, kırmızı kan hücresinden de yaklaşık 3 kat küçük olması yine PM_{2,5} boyutunun ne kadar küçük/ince parçacıklar olduğu bir kez daha anlaşılmış olur (Şekil 1).

PM'ler boyut, oluşum şekilleri ve kaynakları açısından büyük farklılık gösterebilir. Ayrıca PM oluşumları açısından kül, toz, kurum, organik madde, metaller ve atmosferik ikincil reaksiyonlarda meydana gelen ikincil aerosoller de bulunmaktadır. Aynı zamanda her bileşenin sağlık ve çevre açısından farklı etkileri de ayrıca incelenmesi gereken konular arasındadır. Böylece PM'lerin oluşum kaynaklarını tespit etmek, etkilerini kontrol altına almak ve kaynaktan azaltma stratejilerini geliştirmek oldukça önem arz etmektedir. Bu kaynaklar toz fırtınaları, rüzgârlar, okyanus esintileri ve volkanik patlamalar gibi doğal kaynaklardan oluşabileceği gibi, endüstriyel baca gazı emisyonları, egsoz emisyonları ve konut ısıtması gibi antropojenik kaynaklardan da

oluşabilmektedirler (Wu et al. 2012; Aneja et al. 2001; Chu et al. 2008; Li et al. 2016; Liu et al. 2017). Kaynakların kapsamlı bir şekilde anlaşılması, uygun mühendislik müdahalelerinin zamanında belirlenmesine de ayrıca yardımcı olmaktadır.

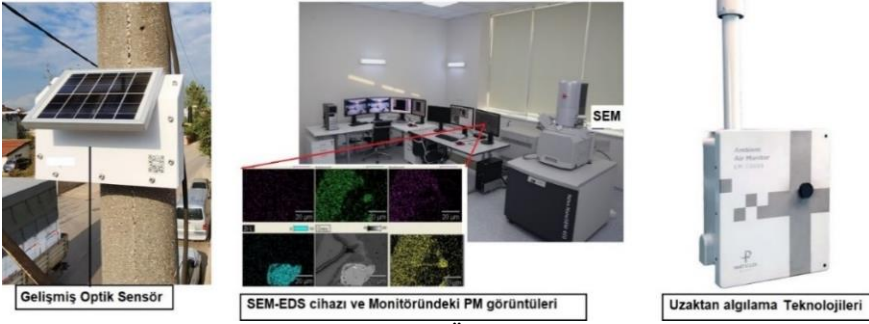
Diğer taraftan PM'ler, geleneksel ölçüm yöntemleri ve yenilikçi ölçüm teknikleri açısından detaylandırılabilir. Geleneksel ölçüm yöntemlerinde öncelikli olarak “Gravimetrik Ölçüm Yöntemi” gelmektedir. Gravimetrik bir çalışmada, partikül faz PM'lerin bir filtre üzerinde toplayarak filtrenin ilk ağırlığından örnekleme sonrası ağırlık farkının çıkarılmasına yönelik bir çalışmadır (Chang et al. 2001; Ramachandran et al.2000; Yanosky et al. 2002; Paloluoğlu 2023). Bu yöntemde net kütle konsantrasyonlarını (mg) tespit edilmesi, yöntemin olumlu yönünü gösterirken gerçek zamanlı verilerden yoksunluğu ve farklı partikül boyutları arasında ayırım yapamaması da olumsuz yönünü göstermektedir. Diğer geleneksel ölçüm yöntemlerinden olan “Beta Zayıflatma Monitörleri” yönteminde ise, kullanılan cihazlar beta radyasyonunun azalmasına dayalı olarak PM'lerin kütleli konsantrasyonlarını tespit etmektedir. Bu yöntemin sürekli ölçüm yapması olumlu yönünü oluştururken, farklı PM çap ve içerikleri arasında ayırım yapmasının zayıf olması da olumsuz yönünü ortaya koyabilmektedir. Ayrıca “Konik Elemanlı Salınlı Mikro Teraziler (TEOM)” yöntemi olan bir diğer geleneksel ölçüm yönteminde de PM'leri biriktiren dar çaplı bir filtrenin rezonans frekansını hesaplayarak, PM'lerin gerçek zamanlı kütle konsantrasyonlarının belirlenmesi mümkün olabilmektedir. Bu yöntemin de birçok avantajı olmasına rağmen sık sık kalibrasyona ihtiyaç duyulması sistemin olumsuz yönünü ortaya çıkarabilmektedir.

Diğer taraftan PM'lerin tespitinde kullanılan yenilikçi ölçüm yöntemleri incelenecek olursa;

- Gelişmiş Optik Sensörler: Nefelometreler ve partikül sayaçları gibi son teknoloji ürün optik sensörler olup, PM konsantrasyonu ve PM boyutu hesaplamalarında gerçek zamanlı datalar elde etmek için ışık dağılımı ve emme özellikleri kullanılmaktadır. Bu yenilikçi yöntem sayesinde, Optik teknolojideki son gelişmelerin doğruluğu ve hassasiyeti oldukça artmaktadır (Şekil 2).

SEM-EDS (Taramalı Elektron Mikroskobu-Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi): Ayrıntılı görüntüleme açısından PM karakterizasyonu belirlemede güçlü bir analiz cihazıdır. Tek tek PM'lerin kimyasal analizine ve görselleştirilmesine olanak sağlayan ve bunların bileşimlerine ve kaynaklarına ilişkin detaylı bilgiler sunan nano ölçekli bir ölçüm cihazıdır (Şekil 2).

- Uzaktan Algılama Teknolojileri: Işık farkındalığı, uzaklık belirleme (LIDAR) ve uydu tabanlı sensörler gibi araçları kullanan uzaktan algılama, PM'lerin dağılımını belirlemede ölçüm sağlayan analiz cihazıdır. Bu teknolojiler sayesinde PM'lerin izlenmesi ve uzun vadeli eğilimlerin incelenmesi sağlanmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. Yenilikçi Ölçüm Cihazları

PM'lerin kaynaklarını ve konsantrasyonlarını yenilikçi mühendislik yaklaşımları ile belirlemenin diğer yöntemlerinden biri olan "Hesaplamalı Modelleme Yöntemleri" de doğru sonuç katkısı ile pratik kullanım sağlamaktadır. Böylece gerçek zamanlı sensör verileriyle gelişmiş sayısal modeller birleştiğinde PM kirlilik kontrolü için gerçekçi karar almayı mümkün kılabilir. Diğer taraftan PM'lerin ortamdaki azaltma ve kontrol stratejileri farklı kaynaklardan salınan PM kirliliklerinin belirlenmesinde oldukça önemlidir. PM'ler için söylenebilecek bir diğer konu, insan sağlığı ve çevre refahı açısından önemli etkiler teşkil etmesidir (Wu et al. 2012; Guo et al. 2017). Bilim insanları geçmişten günümüze bu tarz sorunlara yönelik yenilikçi ölçüm yöntemleri ve mühendislik çözümleri geliştirmede oldukça farklı AR-GE çalışmaları yapmaktadırlar (Kılıç et al. 2008; Jones et al. 2010; Yang et al. 2017; Gidik et al. 2019). Teknolojideki sürekli ilerlemeler ve

disiplinler arası bir yaklaşımla, PM'lerin atmosferdeki etkileri daha iyi anlaşılabilir, kontrol edilebilir ve azaltma imkânları sunulabilmektedir. Ayrıca gelişmiş filtreleme sistemleri, emisyon kontrol teknolojileri ve partikül maddeye maruz kalmayı azaltmak için tasarlanmış kentsel planlama stratejileri gibi yenilikçi yaklaşımlar sayesinde, hava kalitesi kriterleri açısından insanların daha temiz dış ortam havasında yaşamalarına destek olunabileceği düşünülmektedir.

Diğer taraftan bu bölümün esas PM boyutu olan ince partikül $PM_{2.5}$ ve $PM_{2.5}$ 'lara bağlı ağır metaller hakkında bilmemiz gereken birtakım konuların iç dünyası araştırıldığı zaman; daha toksik, daha mutajenik ve daha kanserojenik bir döngü sarmalı ile karşılaşılacaktır. Bu açıdan bilim dünyasında özellikle Çevre Mühendisliği alanında, farklı bölgelerin hava kalitesiyle ilgili artan endişeler, $PM_{2.5}$ 'ların insan sağlığı, ekolojik çevre ve ekosistem üzerindeki etkisini kavramak ve zararlı etkilerini azaltmak için yenilikçi mühendislik yaklaşımlarını oldukça yoğun bir şekilde araştırılmasına yol açmaktadır.

Dış ve iç ortam havasında bulunan ince modlu partikül maddeler üzerine adsorblanmış ağır metaller, başta insan sağlığına, çevresel bozulmaya ve ekosistemdeki aksaklıkları arttıracak risklere katkıda bulunan güçlü faktörler olarak gün yüzüne çıkmaktadır (Aneja et al. 2001; Pillai et al. 2002; Zhao et al. 2006; Lee et al. 2006; Yu et al. 2023). Bu bölüm sayesinde, $PM_{2.5}$ 'lara bağlı ağır metallerin konsantrasyonunu ve karakterizasyonunu belirlemek için karmaşık yöntemler arasında öne çıkarak, analitik yeteneklerimizin sınırlarını zorlayan en ileri mühendislik yaklaşımlarına ışık tutacağına inanılmaktadır.

$PM_{2.5}$ 'lar her ortamda bulunabilen uzun süreler boyunca atmosferde kalma ve uzun mesafeler kat etme yeteneği bulunmaktadır. $PM_{2.5}$ 'ların karmaşık yapısını çözmeye çalışan bilim insanları için büyük zorluklar içermektedir. Bu partiküllerin ince mod fraksiyonuna tutunabilen ağır metaller (krom, civa, kadmiyum ve kurşun gibi) oldukça toksik, kanserojenik, endokrin bozucu ve kalıcılıkları nedeniyle endişe verici bir öneme sahiptirler (Greene & Morris, 2006; Fang & Zheng, 2014; Kim et al. 2019; Hu et al. 2012; Zhang et al. 2021; Fan et al. 2021; Yu et al. 2023). $PM_{2.5}$ 'lara bağlı bu ağır metallerin kaynaklarını, taşınım yollarını ve konsantrasyonları belirlenerek, etkili çevre politikalarına destek olması ve mühendislik çalışmalarının formüle edilmesi oldukça önemlidir. Bu zorluklara cevap olarak, $PM_{2.5}$ 'lara bağlı ağır metal konsantrasyonlarının kapsamlı değerlendirmesi için tasarlanmış analitik

teknikler ve mühendislik yaklaşımlarındaki gelişmelerde ele alınmaktadır. Ayrıca geleneksel yöntemlerin geçerli olmasına rağmen çoğu zaman güncel araştırmalarının gerektirdiği kesinlik ve hassasiyeti sağlanmasında da yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, bu alanda yenilik arayışı zorunlu hale gelmiş ve bu durum $PM_{2.5}$ ile ağır metal kirleticiler arasındaki karmaşık etkileşime ilişkin anlayışımızı yeniden tanımlamayı gerektiren yeni araç ve yaklaşımların geliştirilmesine sebep olmuştur.

Diğer taraftan ağır metaller santimetre küp başına beş gramdan fazla özgül ağırlığa sahip olan ve 20'den fazla atom numarası bulduran elementlerdir (Kul et al. 2021; Fan et al. 2021). Aynı zamanda ağır metaller ekosistem kirliliğine ve toksik etkilere sebep olan kirleticiler olarak da bilinmektedirler. Ayrıca yoğunluklarının yüksekliği ile alakalı olarak, en eser halleri bile zehirleyici olabilmektedir (Greene & Morris, 2006; Kim et al. 2019; Zhang et al. 2021; Yu et al. 2023). Dış ortamda yaklaşık yetmiş adet ağır metal elementi bilinmektedir. Fakat bunların içinde doğada en yaygın olanları Bakır, Kurşun, Arsenik, Civa, Çinko, Krom, Nikel, Kadmiyum, Mangan, Selenyum ve Molibden olarak sıralanmaktadır (Kul et al. 2021). Aynı zamanda bu ağır metaller dış ortamın tüm unsurlarından canlı metabolizmasına kadar etki etmektedir. Ayrıca ağır metaller atmosfere salındıktan sonra tekrar farklı mekanizmalar ile çökeliş toprak, bitki ve yer altı sularına geçerek buradan da canlılarda biyolojik birikimlerine kadar taşınabilmektedirler (Zhang et al. 2021).

Bu bölüm boyunca her biri $PM_{2.5}$ ve $PM_{2.5}$ 'lara bağlı ağır metallerin nicelik ve karakterizasyon verilerinin yenilikçi yaklaşımlar ile tesbit edilmesi amaçlanmaktadır. Bu tespitler için kullanılan malzeme, ekipman ve analitik cihazların yanı sıra karmaşık modelleme yaklaşımlarına kadar çok çeşitli ileri teknikler detaylandırılarak sunulmaktadır. Ayrıca bu bölümde bütünsel bir bakış açısı ile bilim insanlarını, çevre mühendislerini ve araştırmacıları $PM_{2.5}$ 'ların karmaşık ortamında gezdirerek ağır metallerin zararlarını azaltmak için hedeflenen yöntemleri geliştirmede gereken yenilikçi yaklaşımları güçlendirmeyi amaçlamaktadır.

1. ÖRNEKLEME TEKNİKLERİ

Geleneksel olarak yapılan hava örnekleme yöntemleri partiküllerin bilindik cihazlar ile örnekleme ve numunelerin taşıma esnasındaki kayıplar

nedeniyle, sıklıkla PM toplanmasında birtakım zorluklar çekilmektedir. Yüksek/düşük hacimli hava örnekleyiciler, pasif örnekleyiciler hatta gelişmiş elektrostatik çöktürücülerin kullanımı ile birlikte pasif ve aktif numune alma tekniklerindeki yenilikler her geçen gün kullanım pratikliği açısından tartışılmaktadır. Bu teknolojiler sayesinde, PM_{2.5}'lara bağlı ağır metal konsantrasyonlarının güvenilir bir şekilde hesaplanarak hızlı ve doğru dataların belirlenmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca ince mod partikül maddelerden olan PM_{2.5}'ların her yerde bulunması, uzun menzilli taşınımaları ile atmosferik olarak farklı sınırlara geçmesi ve farklı ortamlara sızma yetenekleri ile ilgili sağlık risklerinin izlenmesi ve azaltılması gerekmektedir. Hatta bu durum oldukça dikkat çekici ve endişe verici olması açısından da tesbit mekanizmalarının her zaman güncellenmesi gerekmektedir. Bu zorunluluğun bilincinde olan bilim insanları, PM_{2.5}'lara bağlı ağır metalleri örneklemek, laboratuvar ortamlarındaki çalışmaları belirlemek, analiz etmek ve kavramak için yorulmadan yeni yaklaşımlar aramaktadırlar (Bayraktar & Turalıoğlu, 2005; Yatin et al. 2000; Hueglin et al. 2005; Paloluoğlu & Bayraktar, 2022). Böylece bu bölümde aktif ve pasif örnekleme öncülük eden temel ilkeler ele alınmakta ve bunların yenilikçi yönlerinin derinlemesine bir analiz sistemi ile sunulmaya çalışılmaktadır.

PM_{2.5}'lara bağlı ağır metallerin konsantrasyonunun ve karakterizasyonunun belirlenmesi, hava kalitesinin değerlendirilmesi ve potansiyel sağlık ve çevre etkilerinin anlaşılması açısından oldukça önemlidir. Bilim insanları bunu başarmak için yeni metodlar geliştirerek hem aktif hem de pasif örnekleme yöntemlerini kullanabilmektedirler. Bu açıdan aktif örneklemede numune almak ve analiz yapmak için partikül fazda PM_{2.5}'lara bağlı ağır metalleri toplamak üzere yüksek ya da düşük hava emişi yapan cihazlardan faydalanılmaktadır (Şekil 3).

Diğer taraftan PM_{2.5}'lara bağlı ağır metaller konusunda en çok kullanılan aktif örnekleme yöntemi ise yüksek hacimli hava örnekleyicisi ile yapılan örneklemedir. Bu yöntemde atmosferik PM_{2.5}'lara bağlı ağır metallerin teflon, kuvars veya cam fiber gibi malzemelerden yapılmış filtrelerden tutulması için büyük ölçüde hava emişi yapan yüksek akışlı bir pompa kullanılması gerekmektedir (Paloluoğlu & Bayraktar, 2022).



Şekil 3. Yüksek ve Düşük Hacimli Hava Örnekleyicileri

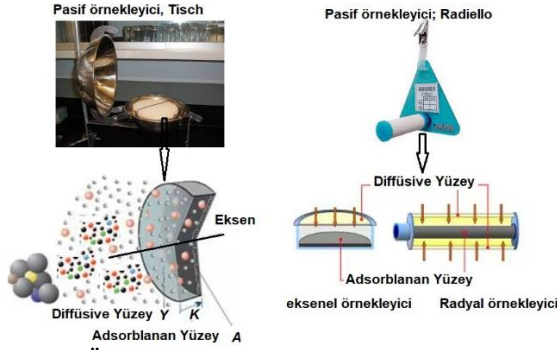
Bu yönteme alternatif olabilecek yenilikçi yaklaşımlar ise gelişmiş sensör teknolojilerinin ve otomasyonun aktif bir şekilde kullanımını içerebilir. Örneğin, gerçek zamanlı sensörlerin otomatik numune alma sistemleriyle entegre edilmesi, sürekli izleme ve veri toplamaya olanak tanımaktadır. Bu yaklaşım, $PM_{2.5}$ 'lara bağlı ağır metal konsantrasyonlarını belirlemede daha ayrıntılı bir zamansal çözünürlük sağlayarak, bilim insanlarının zaman içinde araştırması neticesinde $PM_{2.5}$ 'lara bağlı ağır metallerin oluşum kaynaklarını ve değişimlerini belirlemede yeni imkanlar tanınabileceğine inanılmaktadır. Aynı zamanda bu teknolojiler düşük maliyet ile temin edilebilen DiSC (difüzyon boyutu sınıflandırıcıları) veya LSP'ler (ışık saçan parçacık sensörler) ile çalışılmaktadır. Burada DiSC'lerin çalışma mantığı örnekleme noktasındaki dış ortam havası sensörden geçerek, sensör içinde yüklenen hava farklı biçim ve boyuttaki filtrelerden emiş yapıldıktan sonra parçacık yoğunluğunu toplam elektrik yükünden hesaplamaya dayanmaktadır (Şekil 2).

Ayrıca bir diğer yenilikçi yaklaşım olarak, minyatürleştirilmiş ve taşınabilir aktif örnekleyicilerin geliştirilmesi sayesinde dağıtım ve örnek toplamadaki esnekliği artırabilir. Bu yöntem ile de ağır metal konsantrasyonlarındaki değişikliklerin kentsel alanlarda yoğun izleme ağları oluşturmak için oldukça etkin kullanılabilceğine inanılmaktadır (Şekil 4).



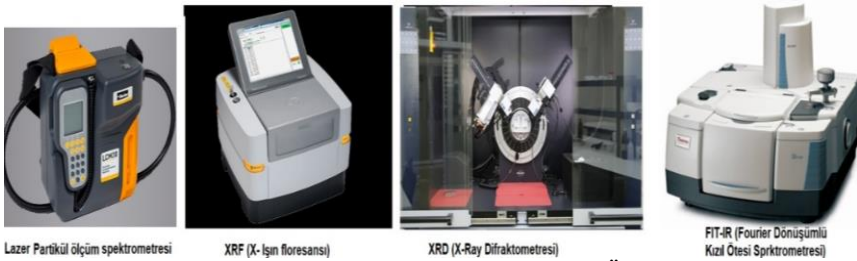
Şekil 4. Minyatürleştirilmiş Yenilikçi Aktif Örnekleyicisi

Diğer güncel örnekleme yöntemi olan pasif örneklemede ise, elektrik enerjisine ihtiyaç duymadan PM'leri toplama yüzeyine getirmek için havanın doğal difüzyon hareketinden faydalanılmaktadır (Hueglin et al. 2005). Pasif örnekleme yöntemleri genellikle uzun bir süre boyunca çalışır ve zaman içinde PM'lerin birikmesine izin verilir (Şekil 5). PM_{2.5}'lara bağlı ağır metallerin pasif numune alıcılar ile örnekleme yönteminde, metal adsorpsiyonu için yüksek tutuculuğa sahip malzemeler kullanılabilir. Bu yöntem alternatif olabilecek yenilikçi mühendislik yaklaşımı olarak da ağır metaller için geliştirilmiş yeni malzemelerin veya kaplamaların kullanımını içerebilir. Bu metal karakterizasyonunun doğruluğunu artırabilir ve havadaki diğer bileşenlerden kaynaklanan artı parazit kirlilik girdilerini de azaltabilir. Ayrıca başarılı olabilir ise, pasif örnekleme yöntemlerinin akıllı sensör ağlarına uyarlanması, izlemenin mekansal kapsamını ve net sonuç alma yönünü artırabilir. Bu yaklaşım, veri analitiği ve makine öğrenimi algoritmalarıyla birleştirildiğinde, ağır metallerin farklı açılardan (kirlilikleri, dağılımları, çökelmeleri, kaynakları, vb.) belirlenmesine yardımcı olarak, kütsel hedeflenen azaltma yöntemlerini de kolaylaştırabilir. Sonuç olarak, geleneksel aktif ve pasif örnekleme yöntemlerinin ileri sensör teknolojileri, otomasyon ve yeni malzemeler gibi yenilikçi mühendislik yaklaşımlarıyla birleştirilmesi, PM_{2.5}'lara bağlı ağır metallerin izlenmesinin doğruluğunu, verimliliğini ve kapsamını artıracığına inanılmaktadır. Bu entegre yaklaşım sayesinde bilinçli karar vermenin de önü açılmaktadır.



Şekil 5. Pasif Örnekleyiciler ve Havanın Difüzyon Akış Kesitleri

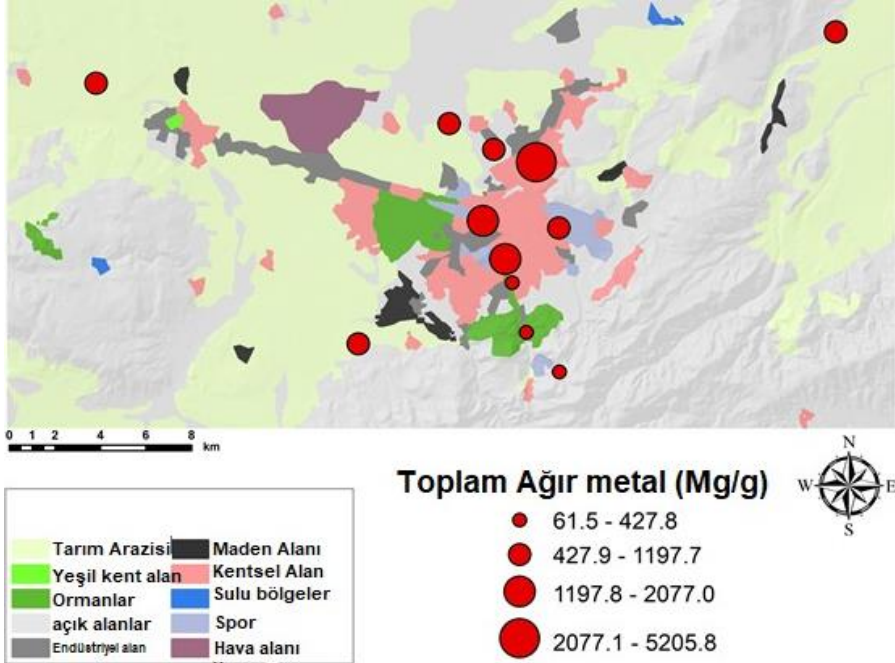
Bahsi geçen Sensör teknolojilerindeki son gelişmeler ise $PM_{2.5}$ 'lara bağlı ağır metal konsantrasyonları belirlemede gerçek zamanlı izleme becerilerini sunmaktadır. Bu aşamada LIBS (Lazer kaynaklı arıza spektroskopisi), XRF (X-ışını floresansını), XRD (X-Ray Difraktometresi) ve FIT-IR (Fourier Dönüşümlü Kıızıl Ötesi Spektrometresi) gibi kullanılan akıllı sensörler/analiz cihazları anlık veriler sağlayarak sürekli izleme, görüntüleme ve zamanında yanıt verme stratejileri sağlamaktadır (Şekil 6).



Şekil 6. Çok Amaçlı Kullanılan Farklı Yenilikçi Ölçüm Cihazları

Ayrıca güncel olarak kullanılan Uzaktan Algılama ve CBS Entegrasyon yöntemi ile ağır metal konsantrasyonu haritalamasının mekânsal ve alansal dağılımının çözünürlüğünün artmasını sağlamaktadır. Bu yaklaşım, $PM_{2.5}$ 'lara bağlı ağır metal konsantrasyonlarının en yoğun ve en düşük noktaların belirlenmesine ve belirli bölgeler üzerindeki etkisini değerlendirmesine olanak tanıyarak hedeflenen yenilikçi yaklaşım stratejilerini kolaylaştırabilmektedir. Diğer taraftan kentsel bir alanda yapılan $PM_{2.5}$ 'lara bağlı ağır metal konsantrasyonlarının belirlenerek, kentsel bölgenin konsantrasyon yoğunluğuna göre dağılım grafiği de çizilmiştir (Şekil 7). Burada kentsel

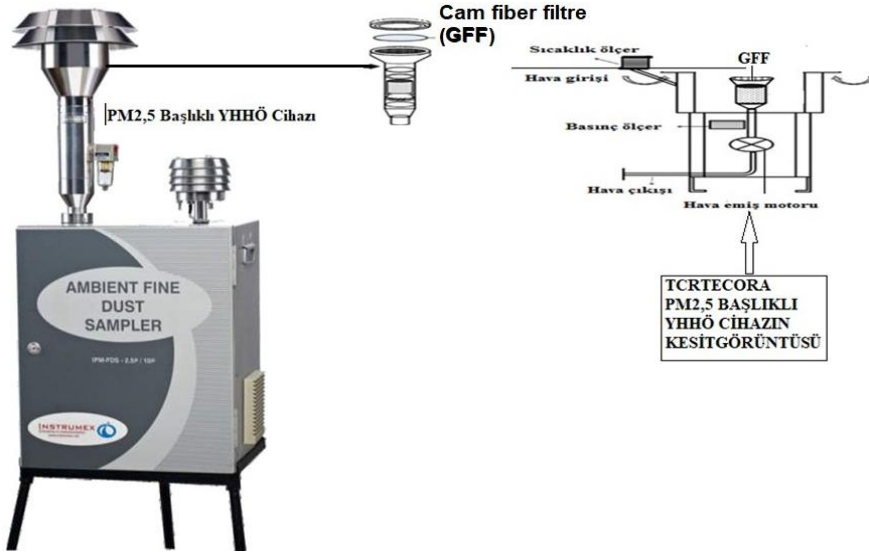
alanların daha yoğun, kırsal bölgelerin ise daha az miktarda $PM_{2.5}$ 'lara bağlı ağır metal konsantrasyonlarının olduğu görselleştirilmiştir. Böylece farklı model ya da cihazlar ile yenilikçi yaklaşımlar uygulandığı sürece artan iş yükünden, aşırı maliyetlerden ve de zamandan oldukça fayda sağlayacağına inanılmaktadır.



Şekil 7. $PM_{2.5}$ 'lara Bağlı Ağır Metal Konsantrasyonlarının Belirlendiği Bir Bölgede Alansal Dağılım Grafiği

Örneklemede bir diğer yenilikçi yaklaşım olarak; kentsel, yarı kentsel ya da kırsal alanda yapılacak aktif örneklemede, atmosferik partikül faz $PM_{2.5}$ ve $PM_{2.5}$ 'lara bağlı ağır metallerin konsantrasyon ve karakterizasyonlarını belirlemek için aktif örnekleycilerden olan TCR Tecora marka yüksek hacimli hava örnekleyci cihazının (YHHÖ) kullanılabilirliği (Şekil 8). Bu amaç ve YHHÖ cihazı ile yapılacak örnekleme işlemlerinde ilk önce yer seçimi yapılmalıdır. Örnekleme noktası trafikten uzak, endüstriyel faaliyetler açısından da dikkate alınarak kirlilik seviyelerindeki değişiklikleri rahatlıkla yakalayacak şekilde uygun bir örnekleme noktasının seçildiğinden emin olunmalıdır. Örnekleme çalışmalarında YHHÖ cihazları kullanarak atmosferik $PM_{2.5}$ ve $PM_{2.5}$ 'lara bağlı ağır metal örnekleri genelde günlük toplanabilir. Yani

günlük filtre değişimi ile uygun saat aralıklarında (örneğin saat 08:00 ile 20:00 arasında) filtre değişimi yapılabilir. Güncel aktif örnekleme çalışmasında örneklemede kullanılan ekipmanlar ise aşağıda sunulmaktadır (Şekil 8). Ayrıca, bu aktif örnekleyciler çapı 2,5 mikro metreden küçük olan partikülleri seçici olarak hava emişi sayesinde tutulabilmektedir. Diğer taraftan örnekleme yapılmış $PM_{2.5}$ numunelerinin kirlenmesini önlemek için uygun muhafaza kaplarına aktarılıp laboratuvar ortamına taşınması gerekmektedir. Ardından numunelerin son tartımları için dikkatlice hassas teraziye teker teker yerleştirilerek tartılıp bir sonraki basamak olan analize hazırlanır. Bu basamakta dış ortamdan gelebilecek kirleticilerin girmesini önlemek de oldukça önemlidir.

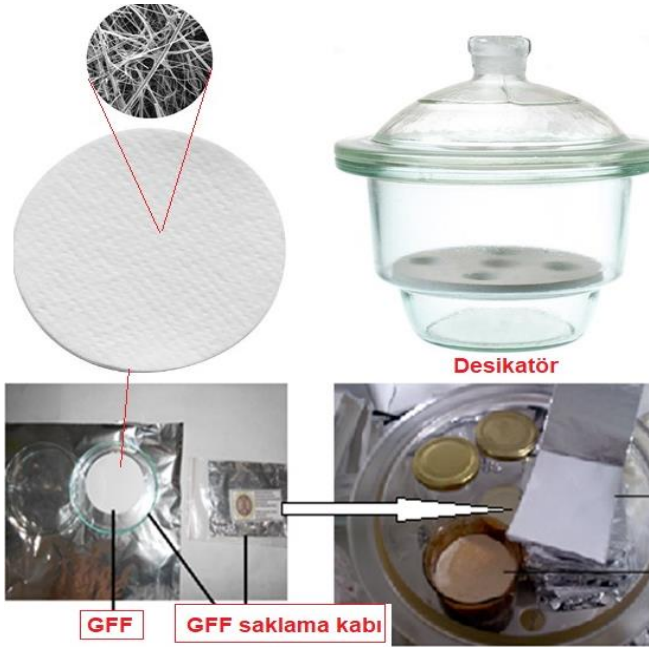


Şekil 8. $PM_{2.5}$ Başlıklı YHHÖ Cihazı, Filtresi ve Kesit Görüntüleri

Şekil 8 incelendiğinde $PM_{2.5}$ 'ların ve ağır metallerin atmosferik partikül faz derişimlerini belirlemek için kullanılan $PM_{2.5}$ başlıklı YHHÖ'si Thermo Andersen GPS 11 model olan TCRTecora marka bir cihazdır. YHHÖ'sinde, örneklemede kullanılacak filtrelerden biri olan 90 mm çapında, 1.6 μm gözenek çapında cam fiber filtre (GFF) cihazın üst bölümüne yerleştirilerek hava emişi ile $PM_{2.5}$ 'lara bağlı ağır metallerin üzerinde toplanması sağlanabilir. Bu cihaz günlük 50-500 m^3 arasında hava emişi yapabilmektedir (Paloluoğlu & Bayraktar, 2022; Paloluoğlu, 2023). Diğer taraftan $PM_{2.5}$ 'lara bağlı ağır

metallerin tutulmasında kullanılan GFF'ler örneklemeye başlanılmadan önce ortalama üç ya da dört saat kül fırınında 350-450 °C'de yakılmalıdır. Bu sayede filtre içinde bulunan tüm PM ve olabilecek ağır metallerin uzaklaştırılması sağlanır. Ayrıca kül fırınından çıkarılan GFF'ler nem ve diğer kirleticilerin bulaşmaması için desikatöre taşınmalıdır (Şekil 9).

Her bir GFF örnekleme çalışmalarından önce, virgülden sonra beş basamak hassasiyeti olan hassas terazide (Denver Instrument TB 215 gibi) ilk tartımları yapılmalıdır. Daha sonra örnekleme yapılmış kirli GFF'ler laboratuvar ortamına getirildiğinde son tartımları yapılmalıdır. Böylece son-ilk tartım ile gravimetrik yöntem uygulanır ve kütleli fark hesaplanmış olur (μg). Günlük hesaplan bu kütleli değerlerde yine günlük belirlenen hava hacmine bölünerek konsantrasyon hesapları yapılmış olur ($\mu\text{g m}^{-3}$). Ayrıca son tartımları yapılan GFF'ler karakterizasyon çalışmalarında kullanılıncaya kadar da yine desikatörde muhafaza edilmelidir (Şekil 9).



Şekil 9. Örnekleme Filtreleri (GFF) ve Desikatör

Örneklemede toplanan GFF'ler ağır metal konsantrasyon ve karakterizasyon işlemleri için önce ICP-MS'de ağır metal analiz işlemleri yapılır. Ardından da belirlenen ağır metallerin karakterizasyonlarını belirlemek

için de XRD ya da FIT-IR gibi cihazlarda çalışmalar gerçekleştirilir. Böylece bu yöntem örneklemeye destek verebilecek bir yenilikçi yaklaşım ile PM_{2.5}'lara bağlı ağır metallerin örneklemesine örnek olarak değerlendirilebilir.

2. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

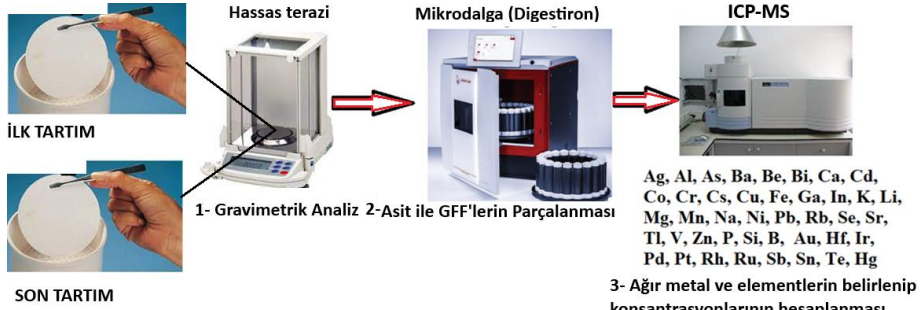
Örnekleme tamamlandıktan sonra tartımları hassas terazide hesaplanmış PM_{2.5}'lara bağlı ağır metallerin konsantrasyon değerlerinin belirlenmesinde bir takım laboratuvar çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Bu aşamadan sonra laboratuvar işlemleri için de yenilikçi bir yaklaşım sunulmaktadır. Örneklenen GFF'lerin ICP-MS cihazında konsantrasyon hesaplamalarının yapılabilmesi için bir takım ön çalışmalar yapılmalıdır. Katı faz olan GFF'ye adsorblanmış PM_{2.5} ve PM_{2.5}'lara bağlı ağır metal numuneleri mikrodalga da digestion (çözündürme; parçalama) işlemleri yapılmalı ya da ultrasonik banyo gibi ekstraktörler kullanılmalıdır. Ardından GFF'lerin parçalanması ve ağır metallerin açığa çıkması için asidik ortama (nitrik asit, vb.) elementler dikkatlice alınmalıdır. Daha sonra da ağır metal konsantrasyon tesbiti ve karakterizasyonu için gelişmiş analitik teknikleri kullanılmalıdır. Bunların başında da indüktif eşleşmiş plazma kütle spektrometrisi (ICP-MS) veya ICP-OES (ICP-optik emisyon spektrometrisi) gelmektedir (Şekil 10). Bu analiz cihazlarının hassasiyetleri ve net ölçümleri açısından ağır metal konsantrasyon hesaplamalarında oldukça yaygın olarak kullanılan kromatografik cihazlardır.

Yapılan tüm çalışmaların kalite kontrol açısından sertifikalı referans malzemelerinin, boş numunelerin ve geri kazanım analizlerin kullanımı da dâhil olmak üzere analitik süreç boyunca sıkı kalite kontrol önlemleri uygulanmalıdır. Sonuçların doğruluğunu ve güvenilirliğini sağlamak için de yöntem validasyonu gerçekleştirilmelidir. Sonuçları yorumlamak için istatistiksel veri analizi araçları kullanılmalıdır. Belirlenen ağır metal konsantrasyonlarının potansiyel çevre ve sağlık etkilerini değerlendirmek için bir risk değerlendirmesi yapılmalıdır. Bu sonuçların düzenleyici standartlar ve yönergelerle karşılaştırılmasını içeren birtakım çalışmalarda gerçekleştirilmelidir. Ayrıca elde edilen verilerin Çevresel Modelleme yöntemi de uygulanabilmektedir. Bu açıdan PM_{2.5}'lara bağlı ağır metallerin dağılımını ve taşınmasını simüle etmek için çevresel modelleme teknikleri entegre edilebilmektedir (Şekil 7).

Böylece kirlilik kaynakları ve yolları hakkında daha kapsamlı bir anlayış sağlanabilir. Aynı zamanda elde edilen verileri kapsamlı raporlama yöntemiyle de önemli laboratuvar gözlemleri ve mevcut sonuçları analiz sonrası geri kazanım hesaplamaları için saklanmalıdır. Aynı zamanda yenilikçi yöntemler ile yapılan örnekleme ve laboratuvar çalışmaları literatürde diğer bilim insanlarıyla da paylaşılarak daha iyi etkileşim kurmak için yenilikçi görselleştirme araçlarını ve etkileşimli platformları da kullanılmalıdır.

Diğer taraftan laboratuvar ortamının ve analiz cihazlarının çalışmalara hazırlanmasından önce, laboratuvarda bulunan tüm malzeme ve ekipmanlar oldukça üst düzey temiz tutulması ve laboratuvar giriş kapılarının sürekli kapalı tutulması gerekmektedir. Bu işlemlerin yapılmasındaki en önemli sebep, herhangi bir yolla gelebilecek PM kirlilik girdilerini azaltmaktır. Aynı zamanda GFF'lerin ilk ve son tartımlarında kullanılan hassas terazi cihazları her ölçüm sonrasında temizlenerek korunmalıdır (Şekil 10). Ayrıca ağır metal hesaplamalarında kullanılacak olan ICP-MS cihazının da bakım ve kalibrasyonları kullanıcı operatörünün yapması gerekmektedir. Diğer taraftan ağır metallerin karakterizasyonunda kullanılabilecek XRD, FIT-IR gibi cihazlarında bakımları ve temizliklerinin yetkili servis uzmanları tarafından yapılması gerekir.

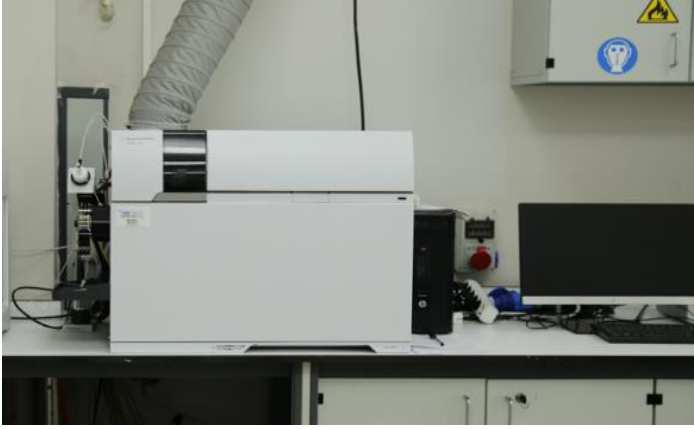
Laboratuvar çalışmalarının başlangıcında GFF'ler hassas terazide son tartımları yapılmalıdır (Şekil 10). Tüm tartımları yapılan GFF'lerin PM_{2,5} konsantrasyonları gravimetrik yöntemle belirlenebilir. Ayrıca kütleli değerler günlük geçen hava hacimlerine bölünerek mevsimsel ya da zamansal çalışılan PM_{2,5}'lerin konsantrasyonları ($\mu\text{g m}^{-3}$) hesaplanabilir. Daha sonra toplanan filtrelerden uygun sayıda seçilerek, karakterizasyon çalışmalarının yapılacağı XRD ve FIT-IR cihazlarında analizleninceye kadar desikatörde muhafaza edilmelidir. Böylece ağır metal hesaplamaları için filtreler önce mikrodalga fırınında çözümlenerek asit içerisine aktarılmalı gerçekleştirilir. Buradan alınan numunelerde ICP-MS cihazına bırakılarak konsantrasyon hesaplamalarına geçilmelidir (Şekil 10). Ayrıca ICP-MS ile analizlenen başlıca element ve ağır metallerin kaç tane ve neler olduğu tespit edilmelidir.



Şekil 10. Laboratuvar Ortamında Yapılan Gravimetrik Analiz ve Konsantrasyon (ICP-MS) Çalışmaları

4. ANALİZ İŞLEMLERİ

PM_{2.5} ve PM_{2.5}'lara bağlı ağır metallerin konsantrasyon ve karakterizasyonlarını belirlemede geleneksel ve yenilikçi yöntemler ile yapılan örnekleme ve laboratuvar çalışmalarının ardından elde edilen numunelerin konsantrasyon ve karakterizasyonlarını belirlemek için farklı yaklaşımlar ile farklı analiz cihazları kullanılabilir. Ağır metallerin konsantrasyonlarını belirlemede en yaygın olarak kullanılan ve enstrümental analiz yöntemlerine dayanan ICP-MS kromotografik cihazıdır. Bu yöntem sayesinde yüksek hassasiyet ve kesin veri sonuçları alınabilmektedir. Ayrıca çalışılan numune içerisindeki eser miktarda bulunabilecek element ve ağır metallerin tespitine de olanak sağlamaktadır. Aynı zamanda ICP-MS ile ağır metal ve diğer bulunabilecek elementler belirlenme yöntemi yenilikçi mühendislik yaklaşımlarına örnek olabilecek bir uygulama olarak da gösterilebilir. Genelde Agilent marka ICP-MS cihazları yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. ICP-MS, eser elementlerin analizi için sıkça kullanılan bir metottur. Ayrıca ICP-MS ile yapılan dedeksiyon sınırları öteki metotlar ile yapılamamaktadır. ICP-MS cihazı ppt-ppm aralığında doğrusallık elde edilerek çalışılabilir. Böylece analiz süresi açısından da diğer cihazlara göre üstünlük sağlamaktadır (Şekil 11).



Şekil 11. ICP-MS Analiz Cihazı

ICP-MS, çok sayıda sıvı ve katı fazlardaki elementlerin hassas ölçümleri ile hızlı biçimde ölçülmesine imkân sağlamaktadır. ICP-MS sistemi indüktif eşleşmiş plazma (ICP) ile kütle spektrometresi (MS) ünitelerinden oluşan bir cihazdır. Konsantrasyon hesaplamalarında kütle-yük oranı esas alınarak ölçüm yapılmaktadır. Aynı zamanda bu tarz cihazlarda genellikle Argon (Ar) gazı kullanılmaktadır. ICP-MS cihazının başlıca kullanım alanları ise, metalürji, jeoloji, çevre, kimya, tıp, petrokimya, hidrojeoloji, biyoloji ve gıda mühendisliği alanlarında oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca içme suyu, deniz suyu, toprak, çamur, atıksu, katı atıklar gibi çevre alanında; mermi atıkları, zehirler gibi silah sanayinde; kan, saç, idrar gibi gıda, klinik alanlarında bolca kullanılmaktadır. Aynı zamanda Periyodik tabloda yer alan birçok elementin analizi de yapılabilir.

Analiz işlemleri için hangi cihaz kullanılırsa kullanılsın eğer bilim insanları, araştırmacılar ya da ilgili mühendislerin, geleneksel numune alma ve analiz yöntemlerini yenilikçi mühendislik yaklaşımlarıyla birleştirebilirse, PM_{2.5}'lara bağlı ağır metal konsantrasyonlarına ilişkin kapsamlı bir anlayış kazanılabilir ve buda daha etkili kirlilik kontrol stratejilerine, çalışma verimliliğine, zamandan ve maliyetlerden daha fazla verim elde etmeyi sağlayabilmektedir. Hatta bilinçli bir çevre yönetimine de yol açabilmektedir. Analiz işlemlerinde konsantrasyon hesaplamaları istenilen birimde ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) yapıldıktan sonra ve laboratuvar ortamında PM_{2.5} ve ağır metal konsantrasyon çalışmalarının da tam manasıyla tamamlandıktan sonra

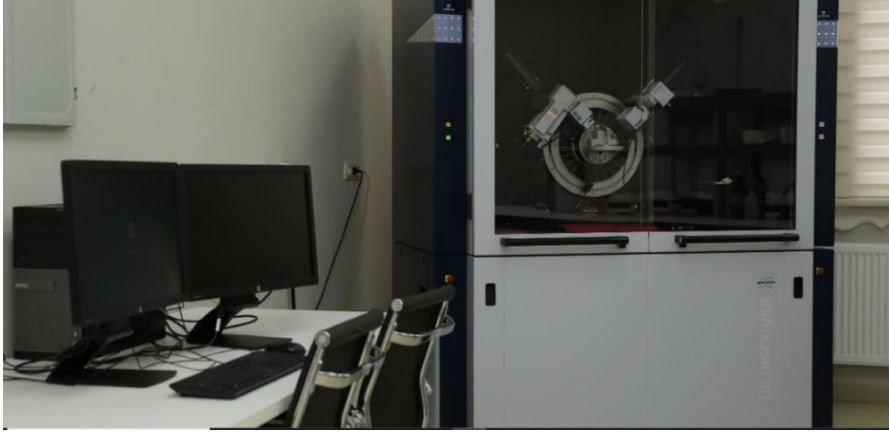
karakterizasyon çalışmaları için sırasıyla XRD ve FIT-IR analiz cihazlarına geçilerek kullanılmalıdır.

4. KARAKTERİZASYON İŞLEMLERİ

Karakterizasyon belirleme çalışmalarında ise X-ışını Floresansı (XRF) cihazı kullanılabilir. Prensip olarak XRF, elementlerin X-ışınları ile ışınlandığında yaydığı karakteristik X-ışınlarını ölçer. Uygulama açısından taşınabilir XRF analizörleri, PM_{2.5}'lara bağlı ağır metal içeriğinin yerinde analizi için kullanılabilir ve gerçek zamanlı veriler ve mekansal haritalama yöntemlerini sunabilmektedir. Bir diğer karakterizasyon belirlemede kullanılabilir yöntem iyon kromatografisidir (IC). Prensip olarak IC, iyonları yüklerine ve sabit faza olan ilgilerine göre ayırır ve uygulamada da IC genellikle PM_{2.5} ve birçok elementin suda çözünebilen iyonlarını analiz etmek için kullanılır. Ayrıca türleşme ve biyoyararlanım hakkında bilgi sağlar. Bir diğer yöntem olarak Lazer Kaynaklı Arıza Spektroskopisi (LIBS) kullanılabilir. LIBS, bir plazma oluşturmak için bir lazerin numune üzerine odaklanmasını içerir ve yayılan ışık, element bileşimini belirlemek için analiz edilir. Bu cihazın uygulama çalışmaları ise PM_{2.5}'lara bağlı ağır metallerin hızlı yerinde analizi için kullanılabilir. Diğer bir yöntem olarak da sinkrotron radyasyon teknikleri kullanılabilir. Senkrotron radyasyonunu kullanan X-ışını Absorbsiyon Spektroskopisi (XAS) gibi teknikler, ağır metallerin kimyasal özellikleri ve oksidasyon durumları hakkında ayrıntılı bilgi sağlayabilmektedir. Uygulama açısından Synchrotron radyasyon teknikleri yüksek çözünürlüklü analiz sunar ve PM_{2.5}'lara bağlı ağır metal davranışının derinlemesine çalışmaları için oldukça değerlidir. Özet olarak, gelişmiş analitik tekniklerinin, taşınabilir cihazların ve makine öğrenimi gibi yenilikçi yaklaşımların birleşimi, PM_{2.5}'lara bağlı ağır metal karakterizasyonunun bütünsel bir şekilde anlaşılmasına katkıda bulunabilir. Bu yöntemler, canlı ve cansız çevrenin korunması için hava kalitesinin izlenmesi ve yönetilmesine yönelik çevre mühendisliği çabalarında oldukça önem arz etmektedir.

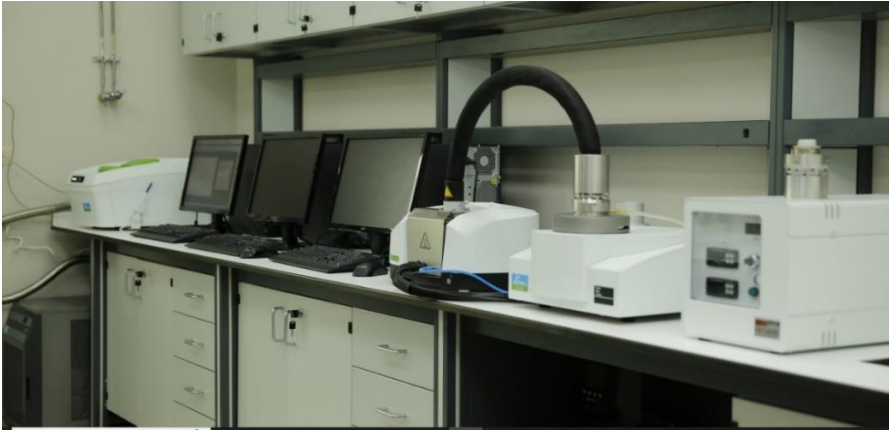
Diğer taraftan ağır metallerin karakterizasyonlarını belirlemede kullanılacak cihazların başında XRD (X-Ray Difraktometresi) gelmektedir. Bu yöntem kristal yapı ve simetriyi ortaya çıkarmada kullanılan bir metottur. X ışınlarının dalga boyu atomlar arasında mesafe aşamasında olduğu için faz

geçişleri, kristal yapısı, tanecik büyüklüğü, örgü parametreleri gibi birçok parametre incelenebilmektedir (Şekil 12).



Şekil 12. XRD Analiz Cihazı

XRD, görüntüleme analiz cihazı kristallerin yapısal özellikleri hakkında oldukça hassas bilgiler sağlamaktadır (Şekil 12). Bir diğer karakterizasyon yöntemi ise Fourier Transform İnfrared Spektroskopisi (FIT-IR), Kızılötesi ışığın etkileşimi neticesinde yapısı içerisindeki bağların titreşim hareketi ilkesine dayanmaktadır (Şekil 13). Aynı zamanda bu metot ile bir molekül ya da bileşik yapısında var olan kimyasal bağ gruplarının da karakteristik özelliklerini belirleyebilmektedir.



Şekil 13. FIT-IR Analiz Sistemi

Yenilikçi yaklaşım yöntemleri ile yapılan analiz işlemleri sonucunda nihai olarak $PM_{2.5}$ ve $PM_{2.5}$ 'lara bağlı ağır metal konsantrasyon ve karakterizasyon verileri ile, çalışmanın yapıldığı bölgede önce $PM_{2.5}$ 'ların varlığı ve kütsel miktarları hatta $1 m^3$ havadaki konsantrasyon verileri rahatlıkla hesaplanabilmektedir. Ayrıca $PM_{2.5}$ 'lara bağlı ağır metal konsantrasyonları ve ardından da tespit edilen bu ağır metallerin karakterizasyonlarında belirtilen yenilikçi yaklaşımları ile güvenilir bir şekilde tespit edilebilmektedir. Böylece araştırması yapılan bölgenin $PM_{2.5}$ ve $PM_{2.5}$ 'lara bağlı ağır metaller ile ilgili net çalışmalar gerçekleştirerek nihai doğru sonuçlara varılabilmektedir. Bu başarı sayesinde de hem bölge halkı bilinçlendirilecektir hem de literatüre farklı bir açıdan ışık tutularak rehberlik edilmiş olacaktır.

Sonuç olarak, $PM_{2.5}$ ve $PM_{2.5}$ 'lara bağlı ağır metal konsantrasyonunun belirlenmesiyle ilgili karmaşıklıkların ele alınması için yenilikçi yaklaşımlar vazgeçilmezdir. Bilim insanları, gelişmiş örnekleme tekniklerinden, sensör teknolojilerinden, uzaktan algılamadan, makine öğreniminden ve topluluk katılımından yararlanarak ince mod partiküllerden olan $PM_{2.5}$ ve $PM_{2.5}$ 'lara bağlı ağır metallerin çevresel etkisinin daha kapsamlı anlaşılmasına katkıda bulunabilir. Böylece, $PM_{2.5}$ ve $PM_{2.5}$ 'lara bağlı ağır metal konsantrasyonlarının belirlenmesi ve karakterizasyonlarına yönelik yenilikçi yaklaşımlar ile yapılan araştırmalar, aktif ve pasif örnekleme yöntemlerinin bir kombinasyonu yoluyla değerli bilgiler ortaya çıkarmaktadır. Potansiyel olarak tehlikeli ağır metallerin taşıyıcısı olan $PM_{2.5}$ 'lar, hava kalitesinin hassasiyetle anlaşılmasının ve izlenmesinin önemini çağımızın güncel koşullarında da vurgulamaktadır.

Yenilikçi yaklaşımlar yalnızca geleneksel numune alma yöntemleriyle ilgili zorlukları çözmekle kalmamalıdır. Aynı zamanda gelişmiş doğru ve verimli dataların eldesi için yeni yollar açmalıdır. Ayrıca aktif ve pasif numune alma tekniklerinin entegrasyonu ile $PM_{2.5}$ 'lara bağlı ağır metal dağılımının farklı zaman ölçekleri ve çevre koşulları üzerindeki dinamik doğasının kapsamlı bir şekilde bir anlık görüntüsünü yakalamamıza olanak sağlamalıdır.

Bulgularımızın dikkatli analizi sayesinde, yalnızca ağır metallerin konsantrasyonlarını ölçmekle kalmamalı, aynı zamanda bunların çeşitli özelliklerini de araştırarak potansiyel kaynaklara, taşıma mekanizmalarına ve çevresel etkilere de ışık tutmalıyız. Bu bilgi, ağır metal kirliliğinin insan sağlığı ve ekosistemler üzerindeki etkisini azaltmayı amaçlayan hedefli azaltma

stratejileri ve düzenleyici çerçeveler geliştirmek için oldukça önemlidir. Ayrıca çalışmamız çevre mühendisliğinde de sürekli inovasyon ihtiyacının altını çizmektedir. Aynı zamanda ortaya çıkan zorlukların üstesinden gelmek için teknolojinin ön saflarında kalmanın önemi vurgulanmaktadır. Çevresel farkındalığın arttığı bir çağa doğru ilerledikçe, ince modlu partikül maddenin hava kalitesi üzerindeki etkisini anlama ve azaltma konusundaki kararlılığımız her zamankinden daha önemli olacaktır. Aynı zamanda küresel zorluklar karşısında araştırmacılar, politika yapıcılar ve sektör paydaşları arasındaki iş birliği oldukça önemli bir hale gelmektedir. Disiplinler arası ortaklıkları teşvik ederek ve teknolojik gelişmeleri benimseyerek, gezegenimizi koruyan ve insanlara sağlıklı bir gelecek sağlayan sürdürülebilir çözümler için kolektif olarak çalışabiliriz. PM_{2.5}'lara bağlı ağır metal kirliliğinin karmaşıklığını ortaya çıkarma yolculuğu devam ediyor ve bölümümüz bu kritik çevre sorununun daha kapsamlı anlaşılmasına ve etkili yönetimine yönelik bir basamak görevi üstlenerek bilim dünyasına bu açıdan ışık tutabileceğine inanılmaktadır.

KAYNAKÇA

- Aneja, V. P., Agarwal, A., Roelle, P. A., Phillips, S. B., Tong, Q., Watkins, N., & Yablonsky, R. (2001). Measurements and analysis of criteria pollutants in New Delhi, India. *Environment International*, 27(1), 35–42.
- Bayraktar, H. (2006). Erzurum Kent Atmosferinde Partikül Madde Kompozisyonu. *Doktora tez, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı*, Erzurum, Türkiye.
- Bayraktar, H., & Turaliöglu, F. S. (2005). A Kriging-based approach for locating a sampling site—in the assessment of air quality. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment: Research Journal*, 19(4), 301–305.
- Brook, R. D., Rajagopalan, S., Pope, C. A., 3rd, Brook, J. R., Bhatnagar, A., Diez-Roux, A. V., Holguin, F., Hong, Y., Luepker, R. V., Mittleman, M. A., Peters, A., Siscovick, D., Smith, S. C., Jr, Whitsel, L., Kaufman, J. D., & American Heart Association Council on Epidemiology and Prevention, Council on the Kidney in Cardiovascular Disease, and Council on Nutrition, Physical Activity and Metabolism. (2010). Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association: An update to the scientific statement from the American heart association. *Circulation*, 121(21), 2331–2378.
- Can, E. (2019). Kütahya İli Genelinde Partikül Madde Kirletici Kaynaklarının Belirlenmesi (F. B. Enstitüsü & A. Üniversitesi, Eds.). *Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir*.
- Cao, J.-J., Shen, Z.-X., Chow, J. C., Watson, J. G., Lee, S.-C., Tie, X.-X., Ho, K.-F., Wang, G.-H., & Han, Y.-M. (2012b). Winter and summer PM_{2.5} chemical compositions in fourteen Chinese cities. *Journal of the Air & Waste Management Association (1995)*, 62(10), 1214–1226.
- Chang, L. T., Suh, H. H., Wolfson, J. M., Misra, K., Allen, G. A., Catalano, P. J., & Koutrakis, P. (2001). Laboratory and field evaluation of measurement methods for one-hour exposures to O₃, PM_{2.5}, and CO. *Journal of the Air & Waste Management Association (1995)*, 51(10), 1414–1422.

- Chu, P. C., Chen, Y., Lu, S., Li, Z., & Lu, Y. (2008). Particulate air pollution in Lanzhou China. *Environment International*, 34(5), 698–713.
- Fan, M.-Y., Zhang, Y.-L., Lin, Y.-C., Cao, F., Sun, Y., Qiu, Y., Xing, G., Dao, X., & Fu, P. (2021). Specific sources of health risks induced by metallic elements in PM_{2.5} during the wintertime in Beijing, China. *Atmospheric Environment (Oxford, England: 1994)*, 246(118112),118112.
- Fang, G.-C., & Zheng, Y.-C. (2014). Diurnal ambient air particles, metallic elements dry deposition, concentrations study during year of 2012–2013 at a traffic site. *Atmospheric Environment (Oxford, England: 1994)*, 88, 39–46.
- Gidik, B., Gul, V., & Sefali, A. (2019). Study of wild plant species of Brassicaceae family in Bayburt region of Turkey. *Pakistan Journal of Botany*, 51(2).
- Greene, N. A., & Morris, V. R. (2006). Assessment of public health risks associated with atmospheric exposure to PM_{2.5} in Washington, DC, USA. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 3(1), 86–97.
- Guo, J., Su, T., Li, Z., Miao, Y., Li, J., Liu, H., Xu, H., Cribb, M., & Zhai, P. (2017). Declining frequency of summertime local-scale precipitation over eastern China from 1970 to 2010 and its potential link to aerosols: Declining Local-Scale Rainfall in China. *Geophysical Research Letters*, 44(11), 5700–5708.
- Hu, X., Zhang, Y., Ding, Z., Wang, T., Lian, H., Sun, Y., & Wu, J. (2012). Bioaccessibility and health risk of arsenic and heavy metals (Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn and Mn) in TSP and PM_{2.5} in Nanjing, China. *Atmospheric Environment (Oxford, England: 1994)*, 57, 146–152.
- Hueglin, C., Gehrig, R., Baltensperger, U., Gysel, M., Monn, C., & Vonmont, H. (2005). Chemical characterisation of PM_{2.5}, PM₁₀ and coarse particles at urban, near-city and rural sites in Switzerland. *Atmospheric Environment (Oxford, England: 1994)*, 39(4), 637–651.
- Jones, A. M., Harrison, R. M., & Baker, J. (2010). The wind speed dependence of the concentrations of airborne particulate matter and NO_x. *Atmospheric Environment (Oxford, England: 1994)*, 44(13), 1682–1690.

- Kim, I., Lee, K., Lee, S., & Kim, S. D. (2019). Characteristics and health effects of PM_{2.5} emissions from various sources in Gwangju, South Korea. *The Science of the Total Environment*, 696(133890), 133890.
- Kılıç, E., Turalioğlu, F.S., & Bayraktar, H. (2008). Bayburt İli Hava Kalitesinin Değerlendirilmesi. *Hava Kirliliği ve Kontrolü Ulusal Sempozyumu*, 55–65.
- Kul, S., Gül, V., & Cengiz, İ. (2021). Toprak ve Bitkilerde Ağır Metal Kirliliğinin Araştırılması: Bayburt İli Örneği. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, 6(2), 195–203.
- Lee, C. S.-L., Li, X., Shi, W., Cheung, S. C.-N., & Thornton, I. (2006). Metal contamination in urban, suburban, and country park soils of Hong Kong: a study based on GIS and multivariate statistics. *The Science of the Total Environment*, 356(1–3), 45–61.
- Li, G., Fang, C., Wang, S., & Sun, S. (2016). The effect of economic growth, urbanization, and industrialization on fine particulate matter (PM_{2.5}) concentrations in China. *Environmental Science & Technology*, 50(21), 11452–11459.
- Liu, Y., Zhao, N., Vanos, J. K., & Cao, G. (2017). *Effects of synoptic weather on ground-level PM_{2.5} concentrations in the United States*.
- Paloluoğlu, C. (2023). Determination Of The Concentrations Of Atmospheric Fine Mode Particles Of Bayburt Province Babertı Campus And Relationship With Meteorological Parameters. *2nd International İzmir Congresses*, 50–65.
- Paloluoğlu, C., & Bayraktar, H. (2022). Determination of the gas/particle phase concentrations of PCBs in urban and rural atmosphere in Erzurum, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(10), 779.
- Pillai, P. S., Suresh Babu, S., & Krishna Moorthy, K. (2002). A study of PM, PM₁₀ and PM_{2.5} concentration at a tropical coastal station. *Atmospheric Research*, 61(2), 149–167.
- Ramachandran, G., Adgate, J. L., Hill, N., Sexton, K., Pratt, G. C., & Bock, D. (2000). Comparison of short-term variations (15-minute averages) in outdoor and indoor PM_{2.5} concentrations. *Journal of the Air & Waste Management Association (1995)*, 50(7), 1157–1166.
- Seinfeld, J. H. (1986). ES books: Atmospheric chemistry and physics of air pollution. *Environmental Science & Technology*, 20(9), 863.

- Wang, F., Wang, J., Han, M., Jia, C., & Zhou, Y. (2019). Heavy metal characteristics and health risk assessment of PM_{2.5} in students' dormitories in a university in Nanjing, China. *Building and Environment*, 160(106206), 106206.
- Wilson, W. E., & Suh, H. H. (1997). Fine particles and coarse particles: concentration relationships relevant to epidemiologic studies. *Journal of the Air & Waste Management Association* (1995), 47(12), 1238–1249.
- Wu, Y., Guo, J., Zhang, X., Tian, X., Zhang, J., Wang, Y., Duan, J., & Li, X. (2012). Synergy of satellite and ground based observations in estimation of particulate matter in eastern China. *The Science of the Total Environment*, 433, 20–30.
- Xie, Y., Dai, H., Dong, H., Hanaoka, T., & Masui, T. (2016). Economic impacts from PM_{2.5} pollution-related health effects in China: A provincial-level analysis. *Environmental Science & Technology*, 50(9), 4836–4843.
- Yang, Q., Yuan, Q., Li, T., Shen, H., & Zhang, L. (2017). The relationships between PM_{2.5} and meteorological factors in China: Seasonal and regional variations. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(12).
- Yatin, M., Tuncel, S., Aras, N. K., Olmez, I., Aygun, S., & Tuncel, G. (2000). Atmospheric trace elements in Ankara, Turkey: 1. factors affecting chemical composition of fine particles. *Atmospheric Environment (Oxford, England: 1994)*, 34(8), 1305–1318.
- Yanosky, J. D., Williams, P. L., & MacIntosh, D. L. (2002). A comparison of two direct-reading aerosol monitors with the federal reference method for PM_{2.5} in indoor air. *Atmospheric Environment (Oxford, England: 1994)*, 36(1), 107–113.
- Yu, P., Han, Y., Wang, M., Zhu, Z., Tong, Z., Shao, X., Peng, J., Hamid, Y., Yang, X., Deng, Y., & Huang, Y. (2023). Heavy metal content and health risk assessment of atmospheric particles in China: A meta-analysis. *The Science of the Total Environment*, 867(161556), 161556.
- Zhang, X., Eto, Y., & Aikawa, M. (2021). Risk assessment and management of PM_{2.5}-bound heavy metals in the urban area of Kitakyushu, Japan. *The Science of the Total Environment*, 795(148748), 148748.

Zhao, C., Tie, X., & Lin, Y. (2006). A possible positive feedback of reduction of precipitation and increase in aerosols over eastern central China. *Geophysical Research Letters*, 33(11).

BÖLÜM 4

ÇEVRE KAYNAKLARININ ETKİLİ KULLANIMI VE KAVRAMLAR

Prof. Dr. Beyhan KOCADAĞIŞTAN^{1*}
Doç. Dr. Fatma EKMEKYAPAR TORUN²

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10445645>

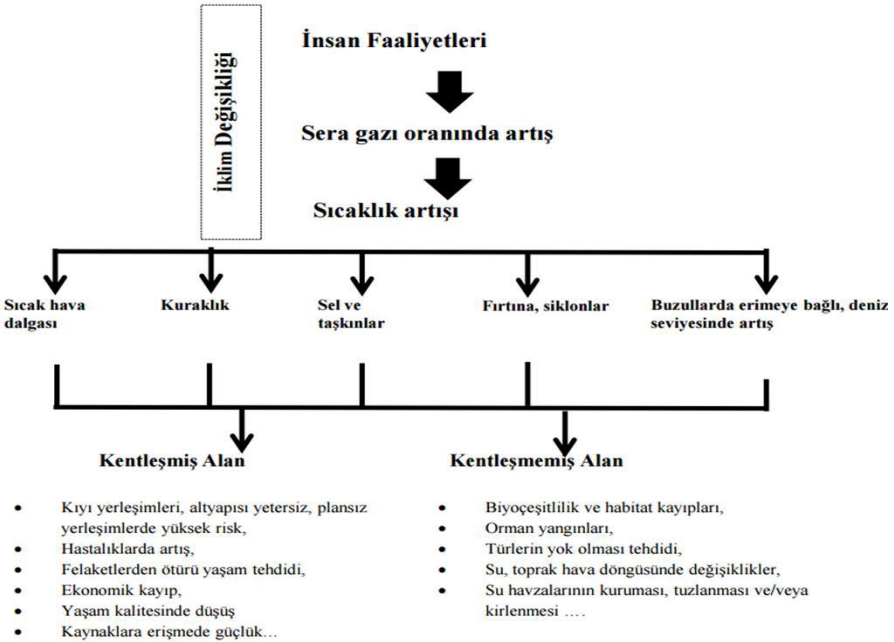
^{1*}Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 25240, Erzurum, Türkiye (bkocadagistan@atauni.edu.tr). ORCID ID: 0000-0001-5483-6119.

²Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 25240, Erzurum, Türkiye (fyapar@atauni.edu.tr). ORCID ID: 0000-0002-2289-176X.

GİRİŞ

Tüm Dünya’da 20. yüzyılda başlayan ve devam etmekte olan hızlı nüfus artışı ve beraberinde getirdiği olumsuzluklar doğal kaynakların azalmasına ve enerji açısından krizlere ve çevre kirliliğine yol açmaktadır. İnsan faaliyetleri kapsamında ısınma, endüstriyel, tarımsal, ulaşım ve yakıt amaçlı fosil yakıtları kullanılarak, atmosferdeki sera gazları emisyonları artmaktadır.

Ülkeler kendi güçleri çerçevesinde önlemler alarak bu olumsuzluklara engel olabilmekte ve azaltabilmektedirler. Bunların başında su ve enerji tasarrufu gelmekte böylelikle çevre kirliliği de azalmaktadır. Tüketim alışkanlıklarının eğitimle paralel olarak azaltılması, teknolojik ve sanayi, tarım alanında gelişmeler, sürdürülebilir çevre için gerekli olmuştur. Kirlilik parametrelerinin tespitinde bazı kavramlar literatüre girmiş ve hesaplamalarda kullanılmaktadır. Küresel ısınma ve iklim değişiklikleri sonucunda oluşan olumsuz etkiler dikkate alınarak tüm yönleriyle değerlendirilmelidir. Şekil 1’de bu değişimler verilmiştir (Türe, 2017).



Şekil 1. Küresel İklim Değişikliği ve Etkileri

1. EKOLOJİK AYAK İZİ KAVRAMI

Bir kirlilik belirleme parametrelerinden olan bu kavram bir toplumun bir çerçeve ölçüsünde taleplerini, bunların ekosistemdeki yerini ve karşılanabileceği tüm doğal kaynaklar ile olan ilişkilerini esas almaktadır.

Ekolojik ayak izi; genellikle kişi, şehir, bölge, birim ve toplum için hesaplanmaktadır. Ekolojik ayak izi kavramı içinde biyolojik kapasite de yer alırken, bir bölgeye ait doğal kaynakların kapasitesini vermektedir. Hesaplamalarda o yere ait tarım arazisi, su kaynakları, yeşil alan ve ormanın yüzölçümü vb. yakıt kullanımı sonucu oluşan karbondioksit emisyonları kullanılmaktadır. Biyolojik kapasite ve ekolojik ayak izi kavramları büyüklük olarak alan birimi cinsinden hesaplanmakta ve genellikle küresel hektar cinsinden (kha) ile ifade edilir (GFN, 2023). Bu ekolojik ayak izi kavramı kapsamında yenilenebilir kaynaklar kapasite olarak ele alınmaktadır. Enerji ihtiyacının karşılanabileceği kapasite ölçü birimi kabul edilmektedir.

Biyokapasite adı verilen ikinci bir parametre, ihtiyaca karşılık gerekli olanı üretmeye yönelik doğal kapasiteyi vermektedir. Emisyon faktörü (EF) ve biyokapasiteyi karşılaştırarak ekolojik dengeyi tanımlamak ve bir toplumun yaşam tarzının sürdürülebilirliğini analiz etmek ve doğal kaynakların tüketim ve üretim dengesini karşılayıp karşılamayacağı hakkında bilgi vermektedir (Borucke et al., 2013).

Ekolojik ayak izi hesaplanırken dikkate alınan birkaç değişken vardır. Ekolojik ayak izini hesaplamak için genellikle Tiezzi ve diğerleri tarafından oluşturulan Denklem 1’de verilen eşitlik kullanılır (Marchettini et al., 2007).

$$EF = \sum Ti/Yw \times EQFi \quad (1)$$

Burada T_i , o ülkede tüketilen her bir i ürününün yıllık ton miktarı, Y_w , her bir i ürününün yıllık dünya ortalama verimi ve EQF_i ise her bir i ürünün eşdeğerlik faktörüdür.

Bu denklem, bir ülkede kişiler tarafından kullanılan kaynakların, tüketilen malların miktarı ve bu malların dünyada üretilme miktar ve dağılımını vermektedir. Bu denklemde kullanılan eşdeğerlik faktörleri o yerin yerleşkesi ve yılına bağlı değişkenlik göstermektedir. Ekolojik ayak izi hesabında çeşitli arazi türleri ve birçok ürün türünü hesaba katan verim faktörleri ekolojik ayak izi hesaplamasında etkili olmaktadır (Tiezzi, 2003).

Genel hesaplama tekniklerinden bir diğeri tüketim ve nüfus istatistiklerini kullanmayı içerir. Her bir kişi tarafından kullanılan alan, kişi başına düşen yıllık tüketimin, tüketilen her bir ögenin ortalama yıllık üretkenliğine veya verimine bölünmesiyle hesaplanabilir. Kişi başına toplam ekolojik ayak izi, belirli bir zaman diliminde tüketilen her ürün için ayrılan tüm ekosistem alanlarının toplanmasıyla Denklem 2’de verilen eşitlik elde edilir (Galli 2007).

$$\text{Tüketim} = \text{Üretim} + \text{İthalat/İhracat} \quad (2)$$

Burada ekolojik ayak izi temel hesaplamalarında toplam tüketim elde edilerek oraya ait nüfusa bölerek, bölgesel veya ulusal verilerden yararlanılarak temel tüketim maddelerinin yıllık kişi başına tüketimi bulunmaktadır. Ön değerlendirmeler için örneğin ürün, enerji, gıda veya orman ürünleri, su kaynakları üretimi ve tüketimine ilişkin ulusal istatistik tablolarından yararlanılarak tüketimin değerlendirilebileceği hem üretim hem de ticaret rakamlarını verir. Hesaplama bir sonraki adımda her bir tüketim ögesinin üretimi için kişi başına ayrılan arazi alanını, hesaplanan ürünün ortalama yıllık tüketimini ortalama yıllık tüketimine bölerek tahmin etmek olup, Şekil 2’de ekolojik ayak izi bileşenleri verilmiştir (Zhao et al., 2005).

EKOLOJİK AYAK İZİ BİLEŞENLERİ



Tarım Alanı
İnsanın gıda ve lif tüketimi, hayvan besini, yağlı bitki ve kasıçık temin etmek için ürün yetiştirilmek amacıyla kullanılan toplam tarım alanını ifade eder.



Yapılaşmış Alan
Ulaşım, konut, endüstriyel yapı, hidroelektrik enerji rezervuarı gibi altyapı yapıları toplam bütünlüğünü ifade eder.



Orman
Kerecete ürünleri, kâğıt hamuru ve yakacak odun temini için gerekli olan toplam ormanı ifade eder.



Balıkçılık Sahaları
Tutulmuş deniz ve tatlı su türleri verileri baz alınarak, balık ve deniz mahsullerini desteklemek için gereken tahmini temel üretimden hesaplanır.



Karbon
Okyanuslar tarafından tutulan miktar dışında fosil yakıt kullanımıyla oluşan CO₂ emisyonlarının sekestrasyonu için gerekli olan toplam orman alanını ifade eder.



Otlatma Alanı
Et, süt, deri ve yün üretmek için yetiştirilen çiftlik hayvanlarının toplam otlama alanını ifade eder.

Şekil 2. Ekolojik Ayak İzi Bileşenleri

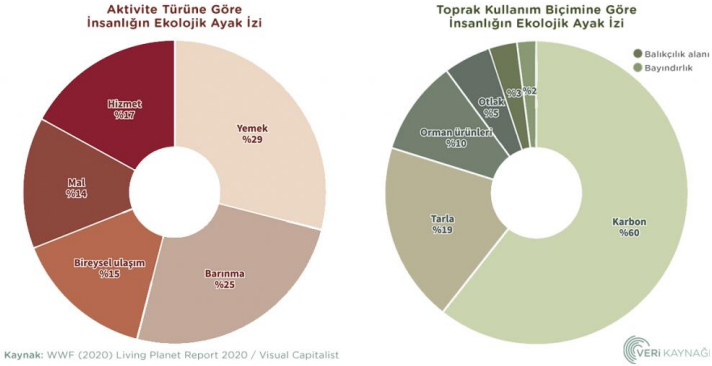
Ekolojik ayak izi hesaplamaları yapılarak kaynak tüketimi ve biyolojik kapasite kavramları değerlendirilerek Dünya da azalan doğal kaynaklar Şekil 3'te kapasite karşılaştırılmaları olarak verilmiştir. Kaynakların aşırı kullanımı ile enerji krizi vb. olumsuzluklar yaşanmaktadır (WWF, 2012).

1,56 DÜNYAMIZ VAR GİBİ YAŞIYORUZ:

AKTİVİTE TÜRÜNE VE TOPRAK KULLANIM BİÇİMİNE GÖRE İNSANLIĞIN EKOLOJİK AYAK İZİ

Ekolojik Ayak İzi Nedir?

Ekolojik ayak izi, insanlığın gereksinim duyduğu tüketim pratiklerinin biyosferde ne kadar yer ettiği ile ekosistemin kendini yenileme kapasitesinin karşılaştırılması ile ölçülür. 2020 yılında, tüm dünyada ortalama kişi başı ayak izi 2,6 küresel hektar iken dünyanın biyolojik kapasitesi 1,6 global hektar oldu. Böylece insanlık, dünyanın kapasitesini %56 oranla aştı.



Şekil 3. Ekolojik Ayak İzi Kaynak Kullanımı

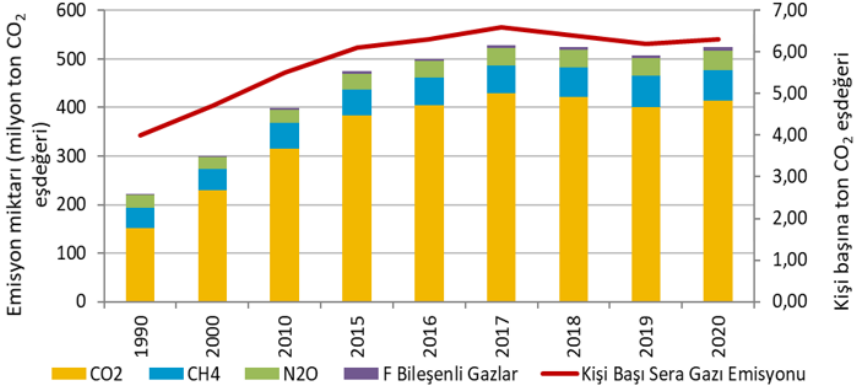
2. KARBON AYAK İZİ KAVRAMI

Karbon ayak izi kavramı çevre kirliliği hesaplamasında ve sonucunda belirlenen uygulamalar açısından çok önemlidir. Karbon ayak izi tanımında esas teşkil eden asıl ifade insan faaliyetleri sonucunda ortaya çıkan gazların oluşturduğu sera gazı emisyonlarının birim karbondioksit cinsinden miktarı olarak tanımlanmasıdır (WWF, 2020). Bu gazlar çevreye zararlı sonuçlar oluşturduğundan oldukça önemlidir. Bulunan değerler içinde dolaylı ve dolaysız olarak kullanılan her türlü faaliyet sonucu oluşan gazları ve hesaplamaları kapsamaktadır. (Sivri et al., 2015). Kirlilik parametreleri tespiti sürdürülebilir bir çevre için çok önemlidir. Ülkeler bu konuda birimler, komiteler kurarak organizasyonlar, çalıştaylar, toplantılar düzenleyerek önlemler ve yaptırımlarla bu parametrelere dikkat çekmişlerdir. Bu organizasyonlar en önemli olan ve hesaplamalarda kriterleri belirleyen bir organizasyon olan Birleşmiş Milletler ve bünyesinde kurulan Dünya Meteoroloji Örgütü ile ortak çerçevede teşkil edilen ve 1988 yılında insan kaynaklı kullanımlar sonucu oluşan kirlilik değerlerini ve risklerini

değerlendirmek üzere kurulan Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (Intergovernmental Panel on Climate Change), Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli'dir (IPCC). Bu örgüt tüm insan faaliyetleri sonucu oluşan çevresel sorunları, hızlı nüfus artışı, küresel ısınma ve iklim değişikliği sonucu oluşabilecek olumsuzlukları ve riskleri belirlemek için kurulmuştur. Bu kuruluş kapsamında karbon ayak izi hesaplama yöntemleri ve değerlendirme kriterleri oluşturulmuştur. Tüm hesaplamalarda kullanılan karbon ayak izi hesaplamaları içeriği birincil karbon ayak izi ve ikincil karbon ayak izi olmak üzere iki kısımdan oluşur. Birincil karbon ayak izi kavramı kapsamında kişilerin kullandıkları doğal kaynak ve fosil yakıtların ihtiyaçlar doğrultusunda kullanımı kapsamaktadır. İkincil karbon ayak izi ise, kişilerin kullandıkları ürünlerin imalatından kullanıma hazır hale gelinceye kadar tüm süreci kapsayan hesaplamalardır ve birlikte değerlendirilmektedir (WWF, 2012).

2.1. Sera Gazları

Atmosferde karbon ayak izi kavramı içinde hesaplanan sera gazları hem doğal olarak atmosferde belli konsantrasyonda bulunan, hem de insan faaliyetleri sonucu açığa çıkan Kyoto protokolünde olan atmosferdeki, kızıl ötesi radyasyonu soğurarak tekrar yayan gaz oluşumlarını kapsamaktadır. Bu gazlar; sera gazları konsantrasyonları hesaplamalarında kullanılan en büyük orana sahip olan karbon dioksit (CO₂), metan (CH₄), nitroz oksit (N₂O), hidroflorür karbonlar (HFCs), perfloro karbonlar (PFCs), sülfürhekza florid (SF₆) ve muhtelif gazlardır. Sera gazları milyon ton karbondioksit eşdeğeri olarak hesaplamalarda kullanılır (Kitzes et al., 2008; Albayrak et al., 2014). Türkiye'de TÜİK, Sera Gazı Emisyon İstatistikleri'nden alınan verilere göre 1990-2020 yıllarına ait verilerine göre sera gazı emisyon değerlerinin değişimleri Şekil 4'de ve yıllara göre değişimi Tablo 1'de gösterilmiştir (TÜİK, 2023). Grafik incelendiğinde CO₂ eşdeğeri olarak 1990 ve 2020 yılları arası toplam sera gazı emisyonu, yaklaşık 9 kat artış göstermiş ve bunun nedeninin hızlı nüfus artışı ve artan kaynak ihtiyacının olduğu belirlenmiştir. Türkiye'de 1990 yılı CO₂ değeri 151,5milyon ton CO₂ eşdeğeri iken bu değer 2016 da 401,2 ve 2020 de 413,4 milyon ton CO₂ eşdeğeri olduğu gözlenmiştir. Yıllara göre artış gösteren bu değer son yıllarda alınan tedbirler ve uygulamalarla bir miktar düştüğü belirlenmiştir (Üreden & Özden, 2018).

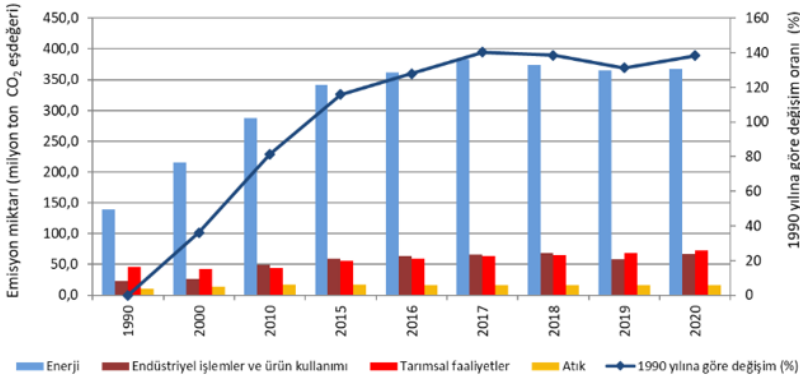


Şekil 4. Sera Gazı Emisyon İstatistikleri

Tablo 1. Sera Gazı Emisyonlarının Yıllara Göre Değişimi (Milyon Ton CO₂ Eşdeğeri)

	1990	2000	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020
CO₂	151,5	229,8	314,4	381,3	401,2	425,3	419,2	399,3	413,4
CH₄	42,4	43,6	51,3	51,3	53,9	54,2	57,6	60,3	64,0
N₂O	24,7	24,8	29,4	34,7	37,1	38,5	38,9	40,2	40,5
F Bileşenli Gazlar	0,6	0,7	3,5	4,8	6,3	8,2	5,2	6,2	6,0
Toplam	219,2	298,9	398,7	472,2	498,5	526,3	520,9	506,1	523,9

Sera gazları farklı kullanımlar sonucunda atmosfere salınmakta ve yapılan hesaplamalar ve değerlendirmeler sonucunda Türkiye de sektörlere göre dağılım incelendiğinde en büyük payı enerji için kullanımdan kaynaklandığı görülmektedir. Toplam sera gazı emisyonlarında CO₂ eşd. olarak en büyük oranı enerji için kullanılan kaynak emisyonları almaktadır. Ayrıca enerji, sanayi, tarım ve her türlü atık kaynaklı değerlerin sektörlere göre dağılımları Şekil 5'te gösterilmiştir (TÜİK, 2023).



Şekil 5. Sektörlere Göre Sera Gazı Dağılımları

2.2. Karbon Ayak İzi Hesaplama Yöntemi

Karbon ayak izi hesaplamalarında ortak hesaplama yöntemlerinden olan ve 2006 IPCC Kılavuzunda yer alan Tier yaklaşımları fosil yakıt kaynaklı emisyonların hesaplama yöntemlerini vermektedir. Tier 1, Tier 2, ve Tier 3 olarak adlandırılan bu yaklaşımlar kapsamında belirli katsayı, değer ve kriterler kabul edilerek hesaplamalar yapılmaktadır (IPCC, 2006).

Özellikle hesaplamalarda kullanılan Tier 1 metodunda yalnız bir hesaplama ile sera gazları hesaplanırken Tier 2 ve Tier 3 metodunda biraz daha kapsamlı esaslar ile uzmanlık gerektiren spesifik hesaplamalar yer almaktadır. Genel olarak karbon ayak izi hesaplamalarında Tier 1 ve diğer Tier yaklaşımlarına göre sınıflandırma yapılmaktadır.

Dünya da en çok açığa çıkan sera gazı emisyon kaynağı kabul edilen fosil yakıt kullanımına bağlı olan ve yakıt ve enerji elde etmek için kullanılan kaynaklar göze alındığında Tier 1 yöntemi kullanılmakta bu hesaplama yöntemi “yakıt tüketimini” baz alınmaktadır. Tier 1 yaklaşımı basit uygulanabilir bir yöntem olup, bu yöntemde genel kabuller yapılarak genel emisyon faktörleri, kullanılan yakıt çeşidi, yakıt miktarı ile hesaplamalar yapılmaktadır. Tier 1 yaklaşımı ile hesaplamada kullanılan denklem Denklem 3’de verilmiştir (IPCC, 2006).

$$\sum Emisyon = \sum Yakıtab \times EFab \quad (3)$$

Toplam emisyon miktarı, toplam yakıt cinsi ve miktarı ile kabul edilen emisyon faktörleri esas alınarak hesaplanmaktadır. Burada; Emisyon, emisyon

miktarını kilogram cinsinden (kg), Yakıt, enerji değeri cinsinden yakıt tüketimini ton joule cinsinden (Tj), EF, emisyon faktörünü, a, yakıt cinsini (fosil yakıt türü) ve b, sektör faaliyetini (ulaşım çeşidini) temsil etmektedir. Hesaplama:

- Faaliyet ve insan kaynaklı ihtiyaca yönelik kullanılan yakıt miktarı, yakıt çeşidi ve enerji cinsinden ton joule (Tj) olarak hesaplanır.
- Emisyon faktörü hesaplanan enerji cinsinden hesaplanan toplam yakıt tüketim değeri ile çarpılarak o gaza ait emisyon hesabı yapılır.
- Tüm yakıt türlerine göre hesaplanan her gazın emisyon değerleri hesaplanarak kapsam değerlerine göre toplanarak toplam emisyon miktarı bulunur. Hesaplamalarda kullanılan genel kapsamlar Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Karbon ayak izi emisyon kategori ve kapsamları

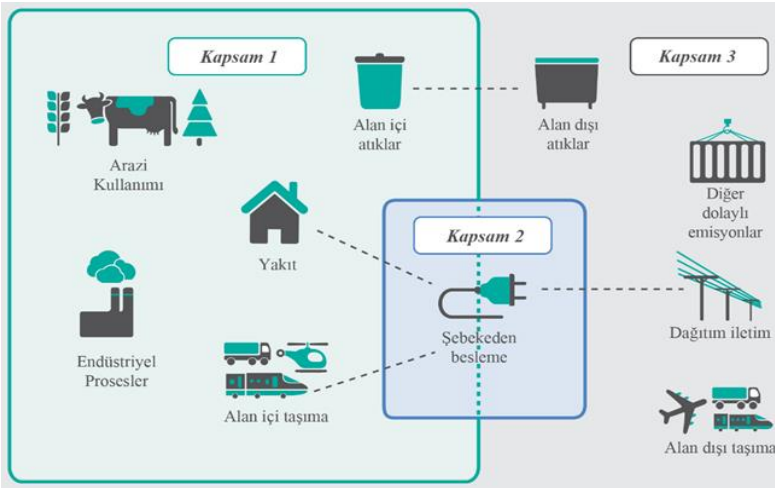
KATEGORİ	KAPSAM	YÖNTEM	SALINIM KAYNAĞI
Evsel Kullanımı	Kapsam 2	Tier 1	Elektrik-Mesken (t)
	Kapsam 1	Tier 2	Doğalgaz- Mesken (t)
	Kapsam 1	Tier 2	Kömür- Fuel Oil (t)
	Kapsam 1	Tier 2	Tüp gaz
	Kapsam 3	Tier 2	Atık (t)
Endüstriyel ve Ticari Kullanım	Kapsam 2	Tier 1	Elektrik- Endüstri-Ticari (t)
	Kapsam 1	Tier 2	Doğalgaz- Endüstri-Ticari (t)
Ulaşım	Kapsam 1	Tier 2	Ulaşım- Kara Taşıtları (t)
	Kapsam 3	Tier 2	Ulaşım- Uçuş (t)
	Kapsam 1	Tier 2	Ulaşım- Havaalanı (t)
	Kapsam 1	Tier 1	Ulaşım- Demir Yolu (t)
	Kapsam 1	Tier 2	Deniz Taşıtları (t)

Atmosfere insan kaynaklı faaliyetler sonucu salınan sera gazları içinde en büyük orana sahip gaz karbondioksittir (CO₂). Sanayi devrimi ile artan endüstriyel ve teknolojik gelişmeler ile yakıt tüketimi ve fosil kaynak kullanımı artmış ve buna paralel olarak kirlilik ve CO₂ emisyonunda büyük artış gözlenmiştir (IPCC, 1996). Hesaplamalarda CO₂ emisyonlarının hesabında her sektörün yakıt tüketim değerleri alınarak bunlara ait olan yakıt tüketim değerinin enerji içeriği bulunmakta ve kullanılmaktadır. Yakıt tüketim

değerleri IPCC Kılavuzunda kabul edilen ve hesaplamalarda kullanılmak üzere verilen dönüşüm faktörleri alınarak (net kalorifik değerler) ile çarpılarak, yakıt türüne ait enerji içeriği bulunur. Hesaplanan her bir yakıt cinsi ve enerji içeriği ayrı ayrı değerlendirilir. IPCC kılavuzunda sera gazı değerleri salınımlar üç farklı kapsamda değerlendirilir. Bu kapsamların açıklaması Tablo 3 ve Şekil 6'da verilmiştir (Fong and Doust, 2014).

Tablo 3. Sektörel Sera Gazı (GHG) Protokolüne Göre Sera Gazı Salınım Kapsam Tanımları

KAPSAM	TANIM
Kapsam 1	Doğrudan gaz salınımları
Kapsam 2	Tüketimi yapılan ancak hesap alanı dışında oluşan dolaylı salınımlar
Kapsam 3	Hesap alanı içinde aktivitelerin sonucu alan sınırları dışında diğer salınımlar (satın alınan, kullanılan tüm ürünler vb.)



Şekil 6. Sera Gazı Salınım Kapsamları Alan İçi ve Dışı

Kurumlara ait karbon ayak izi hesaplamalarında karbon ayak izi değeri kurumların faaliyetlerini gerçekleştirirken tükettikleri elektrik, ısıtmada ve her tür araçlarda kullanılan fosil yakıtlar, enerji için kullanılan yakıt kullanımı sonucu açığa çıkan sera gazı değerleri birleşik olarak iklim değişikliğine neden olan faktörlerdir. Kurumlar işletmelerdeki tüketim kaynaklı ve kullandıkları ürün ve hizmetler ile de emisyon oluşturmaktadırlar. Temel olarak

hesaplamalar farklı kategorilerde ayrı ayrı değerlendirilmektedir: Genel olarak karbon ayak izi hesaplaması Denklem 4 de verilmiştir. Emisyon bileşenleri içinde en fazla miktara sahip olduğu için karbondioksit konsantrasyonu temel alınarak hesaplamalar karbondioksit eşdeğeri cinsinden hesaplanmaktadır.

$$\text{Karbon Ayak İzi} = \text{Yakıt Tüketimi} \times \text{Emisyon Faktörü} \quad (4)$$

$$t\text{CO}_2 = (\text{kWh}) \times \text{kgCO}_2/\text{kWh}$$

$$\text{ton karbondioksit} = \text{kilovat saat} \times \text{kilogram karbondioksit/kilovatsaat}$$

3. EMİSYON DEĞERİ HESAPLAMALARI

3.1. Elektrik Tüketiminden Kaynaklanan Karbon Emisyon Miktarı

Hesaplamalarda kabul edilen veriler Türkiye’de TEİAŞ’a ait istatistiki verilerden alınmakta birim kullanılan elektrik miktarı başına emisyon miktarı (kWh elektrik tüketim başına karbon emisyonu) hesaplanmaktadır.

Denklem 5’te verilen model kullanılarak elektrik kaynaklı hesaplamalar yapılmaktadır (Sprangers, 2011).

$$Et_{CO_2/yıl} = (FV \frac{kWh}{yıl} \times EF \frac{kgCO_2}{kWh}) \times 10^{-3} \quad (5)$$

Burada; Et_{CO_2} , karbondioksit cinsinden emisyon değeri (ton), FV (Faaliyet Verisi), birim süre başına elektrik tüketim değeri (kWh/yıl), EF, TEİAŞ yıllık raporlarına göre kabul edilen Türkiye için 0,4603 kgCO₂/kWh olarak alınan emisyon faktörünü (kgCO₂/kWh) ifade etmektedir.

3.2. Doğalgaz Tüketiminden Kaynaklanan Karbon Emisyon Miktarı

$$Gt_{CO_2/yıl} = FV \times Y \times NKD \times EF \times OF \quad (6)$$

Burada; FV, faaliyet verisini (Nm³/yıl), Y, gaz yoğunluğunu (kg/ m³), EF, emisyon faktörünü (tCO₂/TJ), NKD, net kalorifik değeri [TJ/kt], OF, oksidasyon faktörünü temsil etmektedir.

3.3. Benzin Tüketiminden Kaynaklı Emisyon Hesaplamaları

Benzin kullanımına ait hesaplamalarda Denklem 7 kullanılmaktadır (Loyarte-López et al., 2020).

$$Yt_{CO_2} = BK \times Y \times NKD \times EF \times YF \times OF \quad (7)$$

Burada; Yt_{CO_2} , toplam benzin emisyonunu (ton CO₂), BK, yıllık benzin kullanımını miktarını (L/yıl), Y, sıvı yoğunluğunu (kg/L), EF, emisyon faktörünü (kg CO₂/TJ), YF, yükseltgenme faktörünü (%), OF, oksidasyon faktörünü (%), NKD, dönüşüm faktörünü (TJ/kt) temsil eder.

3.4. Atık Kaynaklı Emisyon Hesaplamaları

Atık kaynaklı emisyon hesabında Denklem 8 kullanılmıştır (Argun et al., 2019).

$$Kt_{CO_2} = BK \times EF \quad (8)$$

Burada; Kt_{CO_2} , toplam atık emisyonunu (ton CO₂/yıl), BK, yıllık atık miktarını (ton atık/yıl), EF, emisyon faktörünü (tCO₂/t atık) temsil eder.

3.5. Uçuşlardan Kaynaklı Emisyon Hesaplamaları

Uçuş verileri alınarak yapılan emisyon hesabında Denklem 9 kullanılmıştır (IPCC, 2006).

$$Ut_{CO_2} = BK \times EF \quad (9)$$

Burada; Ut_{CO_2} , toplam atık emisyonunu (ton CO₂/yıl), BK, toplam uçuş mesafesini (km/yıl), EF, emisyon faktörünü (kgCO₂/km) temsil eder.

Yakıt cinsine göre alınan net kalorifik değerleri Tablo 4.de verilmiştir (IPCC,2006., WRI, 2023).

Tablo 4. Yakıtların Kalorifik Değerleri

Yakıt Cinsi	Net Kalorifik Değerler (Tj/Kt)
Benzin	44,8
Dizel	43
LPG	47,3

Hesaplamalarda yakıt cinsine göre net kalorifik değerleri ve karbon emisyon değerleri kullanılmaktadır. Kullanılan faktörler Tablo 5’de gösterilmektedir (WRI, 2023).

Tablo 5. Yakıt Türlerine Göre Karbon Emisyon Faktörleri

Yakıt Cinsi	Karbon Emisyon Faktörleri (Tc/Tj)
Benzin	18,9
LPG	17,2
Dizel	20,2

Su Dünya için bu kadar önemli iken kirlilik parametreleri içinde yer alan bir diğer bileşen olan su ayak izi ekolojik ayak izi ve karbon ayak izi kadar önemli bir kirlilik parametresidir.

4. SU AYAK İZİ KAVRAMI

Su ayak izi; bir ürün veya hizmet üretimi için tüketilen hesaplanması gerekli tatlı su miktarıdır. Kullanılan bu su gerek doğrudan net kullanılan sarfiyatı gerekse her türlü aşamada kullanılan su miktarını kapsamaktadır.

Bu kavram ilk kez 2002 yılında Arjen Hoekstra tarafından belirlenmiş ve kullanılan su ve kullanılan suyun çeşidini baştan sona kadar (yeşil, mavi, gri), nerede kullanıldığını kirlenme miktarını çıkan atıksu cinsinden hesaplamayı esas almaktadır. Başka bir tanımlama ile su ayak izi, bir ürün, ya da hizmet sırasında kullanılan suyun her yönlü bileşimlerini vermektedir (Hoekstra, 2013). Genel olarak toplam su ayak mavi su ayak izi ve yeşil su ayak izinin toplanması ve gri su ayak izinin çıkarılması ile karşılanmaktadır.

Su ayak izi bileşenleri sırasıyla değerlendirildiğinde terimsel olarak;

- Mavi su ayak izi, bir ürün oluşturma ya da bir hizmet sırasında kullanılan tatlı su miktarıdır.

Mavi su ayak izi = Tüketilen su miktarıdır.

- Yeşil su ayak izi genellikle tarımsal hesaplamalarda kullanılan topraktan alınan yağmur suyu miktarıdır.

Yeşil su ayak izi = Açık alan x Yağış yüksekliği olarak hesaplanmaktadır.

- Gri su ayak izi ise deşarj standartlarına uygun verilere ulaşmak için kullanılan su miktarıdır.

Gri su ayak izi = kirletilmiş su miktarıdır.

Ortalama olarak %80 alındığında kullanılan suyun kanalizasyona ulaşan miktarı, yani atık su miktarı olarak alınmaktadır.

Su ayak izi bağlantılı diğer önemli bir terim sanal su olup, bir ülke veya bir bölge için alınan veya satılan dış ülkelerle bağlantılı alışveriş çerçevesinde ürün veya hizmet karşılığı kullanılan sudur. Şekil 7’de su ayak izi bileşenleri verilmektedir.



Şekil 7. Su Ayak İzi Bileşenleri

Tüm alınacak tedbirler ile ülke bakanlıkları ve birimleri ile çalışmalar yapılarak kirlilik parametreleri azaltılmaktadır. Dünya da iklim değişikliği ve küresel ısınma, hızlı nüfus artışı ve enerji kaynaklarının ve enerjinin kullanılmasında bilincin artırılması için alınacak önlemler aşağıda sıralanmıştır;

- Eğitimler düzenlenerek enerji kullanımında gerekli tedbirler ve bilinçlendirmeler verilmektedir.
- Tüm endüstriyel, kamu ve özel sektör, konutlar ve bürolar da incelemeler yapılmaktadır.
- Enerji verimliliği konusunda üniversiteler ve meslek odaları, profesyonel kontrol birimleriyle kontroller yapılmakta ve Bakanlıklar ve denetleyiciler eşliğinde kontrol edilmektedir.
- Ölçme, izleme ve değerlendirme ve denetim mekanizmaları kullanılmaktadır.
- Tanıtım, bilinçlendirme ve eğitimler düzenlenmektedir.
- Enerji verimliliği forum ve fuarları ile çalıştaylar düzenlenmektedir.
- Gerekli yenilikler için araştırmalar yapılmaktadır.

IPCC kapsamında değerlendirilen hesaplama yöntemleri ve önemi vurgulanan küresel ısınma ve sebebiyet veren tüm bileşenler beraber değerlendirilerek yeryüzü yaşamını tehdit eden bileşenlerin önemi her geçen gün artmaktadır. Bu bağlamda alınacak tedbirler, kısıtlamalar ve yaptırımlar ülkelerin kirlilik bileşenlerinin miktarlarını azaltmaya yardımcı olmaktadır. Alınması gereken tedbirlerin belirlenebilmesi için tüm birimler salınan emisyonların karbon ayak izini hesaplayarak bunları azaltmayı hedefleyen Kyoto protokolüne uymaktadırlar. Kurumsal karbon salınımının azaltılabilmesi için “ölçülen kontrol edilir” yaklaşımını benimseyerek hesaplamalar yapılmalı ve tedbirler alınmalıdır. Kirlilik profili oluşturulmasında karbon ve su ayak izi hesaplamaları yapılarak hedeflenen azaltma politikaları yürürlüğe girmelidir. Bu kapsamda tüm kurumlara ait ısınma, yakıt, ulaşım, aydınlatma (doğalgaz, kömür, likit petrol gazı motorin, benzin, elektrik, atık vb.) tüketim giderleri hesaplanarak karşılık emisyon değerleri hesaplanmalıdır. Alınan tedbir ve düzenlemelerde örneğin kurumlarda maksimum güneş ışığından ve ısısından yararlanmak için mevcut binalarda düzenlemeler ve yeni yapılacaklarda yön ve

durum olarak enerji verimliliğine uygun binalar planlanmalıdır. Elektrik tüketimi kaynaklı karbon emisyonu değerlerini azaltmaya yönelik aydınlatma teknolojilerine uygun alternatif aydınlatmalar özellikle LED, sensör vb. alternatif yeni teknolojiler güneş, rüzgâr, jeotermal, dalga enerji sistemleri kullanımına geçilmelidir. Ulaşım kaynaklı alınacak tedbirler olarak toplu taşıma, elektrikli araç ve bisiklet kullanımı yaygınlaştırılmalıdır. Ağaçlandırma çalışmalarının sürdürülmesidir. Binalarda enerji verimliliği çalışmaları yapılarak enerji ihtiyacı azaltılmalıdır. Dış yüzeylerinde yalıtım yapılması, su ayak izine yönelik tedbirlerde yağmur suyu toplama kanallarının yapılarak sulama vb. amaçlı kullanılması sağlanmalıdır. Tüm bu tedbirler ile kurum ve sosyal alanlarda enerji, zaman ve personel ihtiyacının azaltılması sağlanacaktır. Tüm dünya da gerekli eğitim ve bilgilendirmeler ile hem kişi hem de toplum bazında iyileştirmelere ve hedef değerlere ulaşılabilecektir.

KAYNAKÇA

- Türe, C. (2017). Bayındır İlçesi Kentsel Sera Gazı Salım (Karbon Ayak İzi) Envanteri ve Analizi Projesi, Bayındır Belediye Başkanlığı.
- GFN. (2023), Supply and Demand. Global Footprint Network, <https://data.footprintnetwork.org/#/exploreData>. Retrieved 16 July 2018.
- Borucke, M., Moore, D., Cranston, G., Gracey, K., Lazarus, E., Morales, J.C., & Wackernagel, M. (2013). Accounting for demand and supply of the biosphere's regenerative capacity: The National Footprint Accounts' underlying methodology and framework. *Ecological Indicators*, 24: 518-533. <https://www.doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.08.005>.
- Marchettini N., Niccolucci V., Pulselli F.P., & Tiezzi E. (2007). Environmental sustainability and the integration of different methods for its assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 14(4), 227-228.
- Tiezzi E. (2003). The End of Time. WIT Press, Southampton, UK, p. 200
- Galli, A., Kitzes, J., Wermer, P., Wackernagel, M., Niccolucci, V., & Tiezzi, E. (2007). An Exploration of the Mathematics behind the Ecological Footprint. *International Journal of Ecodynamics*, 2(4), 250–257.
- Zhao, S., Li, Z., & Li, W. (2005). A modified method of ecological footprint calculation and its application. *Ecological Modelling*, 185(1), 65-75.
- WWF. (2012), Ekolojik Ayak İzi Bileşenleri
- WWF. (2020). <https://www.verikaynagi.com/genel/yok-olusun-egisinde-156-dunyamiz-var-gibi-yasiyoruz/>
- Sivri, N., Sarıtürk, B., & Şeker, Z. (2015). Türkiye'deki geomatik mühendisleri arasında yaşam standartları ve karbon ayak izi arasındaki ilişkinin belirlenmesi, Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 25-28 Mart 2015, Ankara, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası.
- WWF. (2012). Türkiye'nin Ekolojik Ayak İzi Raporu
- Kitzes J., Galli A., RizkS.M., Reed A., & Wackernagel M. (2008). Guidebook to The National Footprint Accounts, Oakland, Global Footprint Network.
- Albayrak, B., Çok D., Barça G., & Özdemir S. O. (2014). Karbon Ayak İzi. Doğuş Üniversitesi İşletme ve Toplum Dersi Sunumu EM356. İstanbul

- Üreden, A. & Özden, S. (2018). Kurumsal Karbon Ayak İzi Nasıl Hesaplanır: Teorik Bir Çalışma. *Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi*, 4(2), 98-108.
- TÜİK. (2023). *Sera Gazı Emisyon İstatistikleri, 1990-2020*. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2021-49672>.
- IPCC. (2006). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). IPCC Guidelines for National Gas Inventories, 2(2). Intergovernmental Panel on Climate Change, Paris.
- IPCC. (1996). Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC), IPCC Guidelines For National Greenhouse Gas Inventories. 2(1). Intergovernmental Panel On Climate Change, United Nations.
- Fong, W. K., & Dost, M. (2014). Global protocol for community-scale greenhouse gas emission inventories.
- Sprangers, S. (2011). Calculating the carbon footprint of universities, Master's Thesis Economics & Informatics. p. 107.
- Loyarte-López, E., M. Barral, & J.C. Morla, Methodology for Carbon Footprint Calculation Towards Sustainable Innovation in Intangible Assets. *Sustainability*, 12(4), 2.
- Argun, M.E., R. Ergüç, & Sari, Y. (2019), Konya/Selçuklu ilçesi karbon ayak izinin belirlenmesi. *Selcuk University Journal of Engineering Science and Technology*, 7(2), 287-297.
- WRI. (2006). Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories. Greenhouse Gas Protocol, World Resources Institute.
- Hoekstra, A. Y. (2013), The water footprint of modern consumer society. Routledge, London. <https://doi.org/10.4324/9780203126585>.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2023). Enerji Verimliliği, <https://enerji.gov.tr/enerji-verimliliği>.

BÖLÜM 5

TOPRAK KİRLİLİĞİ VE KİRLENMİŞ SAHALARIN İYİLEŞTİRİLMESİNDE BİYOREMEDIASYON

Doç. Dr. Şahset İRDEMEZ¹

Doç. Dr. Sinan KUL^{2*}

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10445649>

¹Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 25240 Erzurum, Türkiye. (sirdemez@atauni.edu.tr). ORCID ID: 0000-0002-0205-4630.

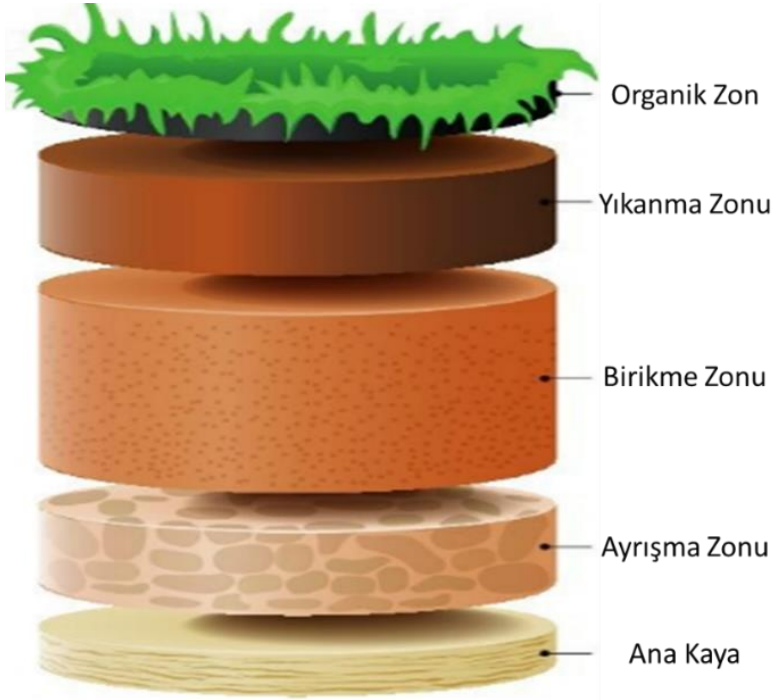
^{2*}Bayburt Üniversitesi, Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Acil Yardım ve Afet Yönetimi Bölümü, 69000 Bayburt, Türkiye. (sinankul@bayburt.edu.tr). ORCID ID: 0000-0002-7824-756X.

GİRİŞ

Toprak, yaşadığımız çevrenin en temel bileşenleri arasında yer almakta olup, tarım, kentleşme, endüstrileşme vb. insan faaliyetlerinin yanı sıra doğal süreçler nedeniyle çeşitli kirleticilere maruz kalmakta veya verimliliğini kaybetmeyle karşı karşıya kalmaktadır. Kirleticiler ve doğal süreçler, toprakta biyolojik çeşitliliği azaltıp tarımda verimliliği düşürürken aynı zamanda çevre ve içinde yaşamakta olan canlılar için olumsuz etkiler ortaya çıkmasına sebep olabilmektedir. Toprak oluşumunun uzun yıllar aldığı göz önüne alındığında, toprağı gerek korumak gerekse iyileştirmek için çeşitli önlemlerin alınması gerekmekte olup, bunu başarabilmek için toprak, toprak kirliliği ve toprak kirlilik türleri ve kaynakları hakkında temel bilgilerin bilinmesinin yanı sıra toprak temizleme ve iyileştirme stratejileri hakkında ayrıntılı bilgi sahibi olmak büyük bir zorunluluktur.

1. TOPRAK

Yeryüzünün en üst katmanını oluşturan toprak, ekolojik olarak yer yüzeyinde bitkilerin büyüdüğü, mineral, organik madde ve canlıların yer aldığı dinamik doğal kütle olarak tanımlanırken (Güler, 2013), jeolojik olarak ana materyal adı verilen kayaların gerek fiziksel gerekse kimyasal olarak ayrışması sonucu oluşan ve bünyesinde farklı canlı organizmaları barındıran, bitkiler için besin sağlayan birkaç milimetre ile birkaç metre arasında kalınlığı değişen bir örtü olarak tanımlanmakta olup, besin içeriğinin ve mikrobiyal faaliyetler organik zon olarak adlandırılan bu tabakada gerçekleşmektedir. Toprağın katmanları Şekil 1’de gösterilmektedir (Rona, 2017).



Şekil 1. Toprağın Katmanları

Toprak, uzun bir zaman diliminde ana kayanın çeşitli etkenlerle ayrışması, çeşitli canlıların ve bitkilerin bu yapı içine yerleşmesi ve zamanla meydana gelen yıkama ve birikme olayları sonucunda oluşmakta ve süreç sonunda besi maddeleri yönünde zenginleşerek yaşama elverişli bir hale gelmektedir (Ünal, 2011). Sağlıklı bir toprağın yapısında %45 mineral, %5 organik madde, %25 boşluk ve %25 su bulunmakta olup (Rona, 2017), değişik jeolojik oluşumlara bağlı olarak yapısı çeşitlenen toprak insan yoğunluğu ve aktivitelerinin yanı sıra iklim, erozyon vb. faktörlere bağlı olarak günümüzde hızla kirlenmekte veya özelliğini kaybedebilmektedir (Kul et al., 2021; Paloluoğlu & Bayraktar, 2019a, 2019b, 2022; Zincircioğlu, 2013).

1.1. Toprak Kirliliği ve Kirlilik Kaynakları

Toprak kirliliği; erozyon, yorulma, çoraklaşma vb. doğal süreçlerin yanı sıra çoğunlukla insan kaynaklı çeşitli katı, sıvı, gaz ve radyoaktif atıkların varlığı nedeniyle toprağın fiziksel, kimyasal ve diğer özelliklerinin bozulmasının bir sonucudur ve bu süreç sonunda insanların ve diğer canlıların

yaşamları olumsuz olarak etkilenmektedir. Kayaçların uzun bir süreç sonunda parçalanmasıyla oluşan toprak insan faaliyetleri sonucunda çok kısa sürede tahrip edilmektedir. Tarımsal faaliyetlerde kullanılan gübre ve zirai ilaçların yanı sıra endüstriyel atıklar, kentsel atıklar, madencilik atıkları vb. atıklar toprağı kirleten ana unsurlar arasında yer almakta olup en yaygın kirlilik kaynakları (1) tarımsal kirleticiler, (2) endüstriyel kirleticiler, (3) kentsel kirleticiler ve (4) madencilik faaliyetlerinden kaynaklanan kirleticiler olmak üzere 4 grup altında toplanmaktadır (Kızıloğlu Algan & Bilen, 2005).

1.1.1. Tarımsal kirleticiler

Toprak kirliliğinin başlıca tarımsal sebepleri arasında pestisitler ve zirai gübreler ön plana çıkmaktadır. Son yüzyılda Dünya nüfusunun hızla artmasıyla birlikte mevcut talepleri karşılayabilmek ve tarımda verimi arttırabilmek için bitkisel ürünlerin çeşitli hastalık etmenlerden korunması ve yüksek kalitede bol ürün elde edebilmek amacıyla çeşitli pestisitlerin ve gübrelerin kullanımı kaçınılmaz olmuş, dahası bu maddelerin kimi zaman dikkatsiz ve gelişigüzel kullanımı toprak üzerinde çeşitli olumsuz etkileri de beraberinde getirmiştir. Pestisitlerin bazıları toksikolojik olarak zarara neden olmazken, kanserojen olan bazı pestisitler özellikle merkezi sinir sistemini etkilemektedir. Pestisitler hem kullanım esnasında hem de toprağı karışarak toprağın yapısını bozmakta olup, kullanımı esnasında kullanıcıların kendilerini korumak için gerekli önlemleri alması gerekmektedir (Özdemir & Kökhan, 2023). Tarım alanlarında kullanılan pestisitler alıcı ortamlara ulaştıktan sonra alıcı ortamlarda yaşayan diğer canlılara ulaşmakta ve dönüşüme uğramaktadırlar ki bu döngü kullanılan pestisit kimyasal ve fiziksel özelliklerinin yanı sıra uygulama şekli, iklim, tarımsal koşullar vb. faktörlerden etkilenmektedir (Altıkat et al., 2009). 1 gr toprak, fiziksel ve kimyasal yapısını düzenleyen yaklaşık 1 milyon bakteri, 100000 maya hücresi, 50000 mantar parçacığı içerirken, verimli tarım topraklarınının 1 gr'ı 2,5 milyon bakteri, 400000 mantar, 50000 alg ve 30000 protozoa içermekte olup, her ne kadar tarımsal ilaç veya gübreler mikroorganizmalar tarafından parçalanarak zararsız formlara dönüştürebiliyor olsalar da, bazı durumlarda mikroorganizmaların doğaya yararlı faaliyetlerini engelleyerek topraktaki mevcut dengeyi bozmaktadırlar (Yıldırım, 2012). Bunun dışında bitkilerin, tarımsal ilaç kullanılan bir toprakta oluşabilecek pestisit kalıntılarını bünyelerine almasıyla gıda maddeleri insanların ve

hayvanların bünyelerine taşınabilmekte veya bu kalıntılar topraktan süzülme ve buharlaşma ile yeraltı sularına ve atmosfere karışarak çeşitli sorunlar ortaya çıkmasına sebep olabilmektedir.

1.1.2. Endüstriyel Atıklar

Endüstriyel gelişim ülkeler için çok önemli yer tutuyor olsa da üretimin çeşitliliğinin fazlalığı nedeniyle endüstriyel atıksular çok değişik ve farklı özellikte kimyasal maddeyi yapılarında barındırmaktadırlar. Hızla artan nüfusun ihtiyaç duyduğu ürün çeşitliliği ve miktarını karşılamak için tekstil, deri, ilaç, gıda işleme, petrokimya vb. çeşitli endüstrileri içeren üretim tesislerinden organik maddeler, amonyak, ağır metaller, hidrokarbonlar, mikro kirleticiler, fenoller vb. kirleticileri yapılarında bulundurabilmektedirler (Aydın Temel, 2017). Endüstriyel atıksuların bu içeriklerinin yanı sıra bahsi geçen endüstriyel kuruluşların atmosferin kirlenmesinde de önemli payları bulunmaktadır. Endüstrilerden kaynaklanıp atmosfere ulaşan çeşitli gazlar ve partikül maddelerde yağış, çökme vb. mekanizmalarla toprağa ulaşmakta, toprağın yapısını bozmakta, dahası bu bitkiler bu kirleticileri bünyelerine almakta ve insan ve hayvan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler oluşmasına sebep olmaktadır.

1.1.3. Kentsel Kirleticiler

Özellikle son yüzyılda meydana gelen hızlı nüfus artışına paralel olarak hızlı bir kentleşme sürecine girilmiş ve bunun sonucunda da konut, işyeri vb. çeşitli birimlerden kaynaklanan atık sular, katı atıklar, zehirli gazlar vb. atıkların artılmadan veya kontrolsüz bir şekilde alıcı ortamlara verilmesi nedeniyle çevre hızla kirlenmektedir. Çevreye önlem alınmadan veya arıtımı sağlanmadan bırakılan bu atıklar havayı, suyu ve toprağı kirletmekte ve sonuç olarak çevrede bulunan canlı varlıkların sağlıklarına zarar vermekte, cansız varlıkları tahrip etmektedir (Akten & Akten, 2008). Toplam atıksuların büyük bir kısmını oluşturan kentsel atıksular azot, fosfor vb. besi elementleri, deterjanlar, patojen mikroorganizmalar, ağır metaller, çeşitli ilaçların metabolik artıkları vb. kirleticileri yapılarında barındırabildiklerinden dolayı alıcı ortamlara ciddi ölçüde zararlar verebilmektedirler. Plastik, kâğıt, cam, organik atık vb. katı atıklar ve ısıtma işlemleri nedeniyle açığa çıkan zehirli gazlarda

gerek direkt olarak gerekse atmosferden yağışlarla birlikte toprağa ulaşmakta ve toprağın yapısını önemli ölçüde bozmaktadır (Ak & Top, 2018).

1.1.4. Madencilik Faaliyetleri

Ülkeler için en önemli ekonomik faaliyetler arasında yer alan madencilik faaliyetlerinin, hammadde temini ve ekonomik avantajları olsa da bu faaliyetler sonucunda hava, su ve toprak kirliliği, bitki örtüsünün tahrip edilmesi, flora ve faunaya verdiği zarar ile biyoçeşitliliğin azalması, arazinin bozulması, sağlık problemlerinin artması vb. birçok dezavantajı bünyesinde barındırmaktadır.

Çevresi sürekli olarak etkileşim halinde olan insanoğlu, özellikle son yüzyıllarda meydana gelen hızlı nüfus artışı ve sanayileşmenin de etkisiyle gerek çevresel kaynakların yapısının değişimine sebep olmakta, gerekse hızlı bir biçimde mevcut çevresel kaynakları tüketmeye devam etmektedir. Madencilik faaliyetleri önlem alınmadığında hava, su, toprak vb. fiziksel çevre unsurlarının kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu çevresel unsurlardan toprak üzerinde, madenciliğin olumsuz etkileri; toprağın yapısının değişmesi, bitki örtüsünün yok edilmesi, hayvan türlerinin bölgeyi terk etmesi vb. olarak sıralanmakta olup, madencilik faaliyetleri sonucu oluşan atıklar başta toprak olmak üzere önemli çevre sorunlarına sebep verebilmektedir. Madencilik faaliyetleri, çıkarılan maden çeşidine göre yüksek konsantrasyonlarda çeşitli ağır metal içerebilmekte olup, kontrolsüz bir şekilde doğaya salınan maden atıklarının yapısında; alüminyum (Al), arsenik (As), bakır (Cu), çinko (Zn), krom (Cr), kurşun (Pb), nikel (Ni) vb. ağır metaller sıklıkla bulunmaktadır. Toprağa karışan ağır metaller toprağın doğal yapısını bozmakta ve toprağın kalitesini büyük ölçüde etkilemektedir. Ağır metallerle kirlenmiş bir sahada hem toprağın kalitesi düşmekte hem de cansız çevre elemanları bu değişimden olumsuz olarak etkilenirken, canlı sağlığı için büyük bir tehdit ortaya çıkmaktadır (Menteşe & Böbrek, 2020).

2. Kirlenmiş Sahaların Biyolojik İyileştirilmesinde Kullanılan Uygulama ve Teknolojiler

Kirlenmiş sahaların iyileştirilmesinde biyolojik, fiziksel-kimyasal ve termal olmak üzere 3 temel kategoride çeşitli metotlar kullanılabilenekte olup, kirlenmiş bir sahanın temizlenmesinin her zaman sahaya özgü pek çok şart bulunduğu göz önüne alınarak ve temizleme sürecinin teknik bilgilerin her

zaman sahaya özel şartlar ve edinilen bilgilerle birlikte yeniden değerlendirilerek tasarlanması gerektiği unutulmaması gerekmekte olup, kirlenmiş sahaların iyileştirilmesinde kullanılan yöntemler genel olarak biyoremediasyon olarak adlandırılabilir (İmamoğlu & Erdoğan, 2017).

Biyoremediasyon, tehlikeli maddelerin zararsız bir yapıya indirgemek veya zararlarını azaltabilmek için mikroorganizmaların kullanıldığı uzun süreli arıtım prosesleridir. Doğal olarak meydana gelen bu süreçte mikroorganizmalar kirletici maddeleri indirgeyerek nihai ürün haline getirmekte olup süreç mikrobiyal büyümeye ve aktiviteye çevresel şartlar izin verdiği durumlarda etkilidir. Parçalanmayı sağlayan mikroorganizmaların kirleticilerle yakın ilişkide, yeterli popülasyonda ve doğru yerde olmaları gerekmektedir. Popülasyonun yeterli olmadığı durumlarda mikroorganizmaların metabolik aktivitelerinin ve büyümelerinin optimizasyonu için sıcaklık, başta azot ve fosfor olmak üzere nutrientlerin, oksijen, nitrat ve sülfat gibi elektron alıcılar ve pH gibi çevresel faktörlerin sağlanması gerekmektedir. Biyoremediasyon sürecinde kirleticilerin giderimi için yerinde (in-situ) ve alan dışında (ex-situ) olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır (Sönmez & Kılıç, 2021). Toprağın iyileştirilmesi için gereken zaman bu iki yönteme göre değişiklik gösteriyor olsa da alan dışında yapılan teknolojilerin yerinde uygulanan teknolojilere göre daha hızlı ve etkili olduğu bilinmektedir (Dindar et al., 2010).

Yerinde biyoremediasyon yönteminde atıklarla kirlenmiş sahaya besin aktarımı yapılarak toprağın kendi yapısındaki bakterilerin etkin duruma geçirilmesi sağlanmakta olup, kirletici konsantrasyonlarının düşük olduğu durumlarda bu yöntemin kullanılması önerilmektedir (Dindar et al., 2010). Yerinde biyoremediasyon kirletici maddelerin giderilmesi için alanda bulunan doğal mikroorganizma popülasyonları kullanılırken toprağın kazınıp taşınması gerekliliği olmadığından daha ekonomik ve cazip bir sistem olarak kullanılmasına rağmen, yerinde biyoremediasyon uygulamalarının diğer metotlara kıyasla daha fazla zaman ihtiyacı, çevresel şartlardaki kontrol edilemeyen değişiklikler, daha fazla enerji ve besi maddesi ihtiyacı, toprak derinliğinin süreci etkilemesi dolayısıyla derinlikle sınırlı olması vb. dezavantajları bulunmaktadır (Boopathy, 2000). Bu dezavantajların mevcut bulunduğu hallerde doğal mikroorganizmalar yerine genetik yollarla elde

edilen mikroorganizmalar kullanılmak zorunda kalılabilmektedir (Dindar et al., 2010).

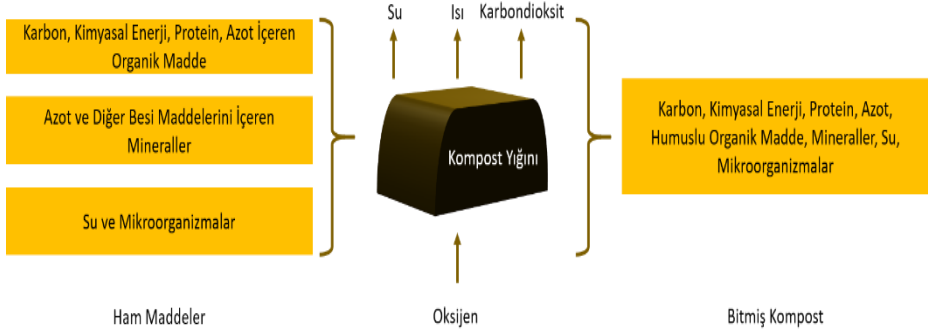
Alan dışında biyoremediasyon yönteminde toprağın doğal ortamından kazılarak alınması ve farklı bir alanda biyolojik giderim proseslerinin işletilmesi kastedilmektedir. Bu yöntemin kullanılmasında amaç mikrobiyolojik olarak parçalamayı kolaylaştırmaktır. Yerinde biyoremediasyon prosesleri ile kıyaslandığında daha hızlı ve geniş alanlara yayılmış olan kirleticiler için uygulanabilir bir yöntem olsa da daha pahalı bir yöntemdir (Dindar et al., 2010).

2.1. Kompostlaştırma

Kompostlaştırma prosesi, aerobik veya anaerobik şartlar altında organik kirleticilerin çeşitli mikroorganizmalar tarafından ekosistem için daha yararlı, zararsız ve stabil yan ürünlere ayrıştırılmasını içeren kontrollü bir biyolojik süreç olup, doğru bir şekilde yapılan bir kompostlaştırma işlemi sonunda organik bir atığın en kaliteli şekilde geri dönüştürülmüş şekli olan kompost elde edilmektedir (İlay et al., 2019; İmamoğlu & Erdoğan, 2017). Toprak için organik madde kaynağı olarak kullanılan kompost, toprağın yapısını olumlu olarak etkilerken, bitki gelişimini kolaylaştırmakta ve toprak erozyonunun oluşumunu engellemektedir (İlay et al., 2019). Özetle prosesin amaçları; (1) ayrışabilir organik maddelerin biyolojik olarak stabil maddelere dönüşümünü sağlamak, (2) patojen mikroorganizmalar, böcek larvaları vb. istenmeyen organizmaların yanı sıra yabancı otlar ve tohumlarını yok etmek, (3) azot, fosfor, potasyum vb. içeren maksimum besi maddesi içeriğine sahip olmak ve (4) bitkilerin gelişimini desteklemenin yanı sıra toprakta iyileştirici olarak kullanılacak sürdürülebilir bir ürün üretmek olarak sıralanabilmektedir (Ekinci et al., 2021).

Kompostlaştırma da kirlenmiş toprak kazılarak yerinden çıkartılmakta ve talaş, saman, gübre, bitki artıkları vb. hacim arttırıcı organik katkı maddeleriyle karıştırılarak prosese hazır hale getirilmektedir. Daha sonra kullanılacak proses türü dikkate alınarak zemin geçirimsizliği ve emisyon kontrolü sağlanan uygun alanlarda serilip çoğunlukla sahaya özgü mikroorganizmaların kullanılarak biyolojik olarak bozunması için nem oranı da ayarlanarak karıştırılmakta ve bozunma sırasında mikroorganizmaların ürettiği ısı ile ortam sıcaklığı yükselmektedir. Kompostlaştırma işleminden maksimum bozunma verimi elde

edebilmek için günlük karıştırma ve havalandırma yapılarak oksijen devamlılığının sağlanması ve nem içeriğinin gerekiyorsa sulama yapılarak takip edilmesi gerekmekte olup, kompostlaştırma prosesinin ana bileşenleri ve sisteme ait genel görünüm Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 2. Kompostlaştırma Prosesinin Ana Bileşenleri Ve Sisteme Ait Genel Görünüm

Şekil 2’de ana bileşenleri verilen bir kompostlaştırma prosesinde organik maddeler çeşitli mikroorganizmalar tarafından bozunarak karbondiyoksit ve su başta olmak üzere daha basit bileşiklere dönüşmekte olup, süreç boyunca meydana gelen metabolik faaliyetler sonucu ortam sıcaklığı yaklaşık 55°C’ye kadar ısınmakta olup prostesteki bozunum işlemi; glikoz, nişasta vb. gibi çabuk ayrışan organik maddelerin kuvvetli ısı çıkışıyla birlikte kısa sürede parçalanması (1. Faz), yağ reçine vb. zor ayrışan bileşiklerin nispeten uzun sürede parçalanması (2. Faz) ve mineralizasyon (3. Faz) olmak üzere 3 fazda gerçekleşmektedir (Ekinci et al., 2021).

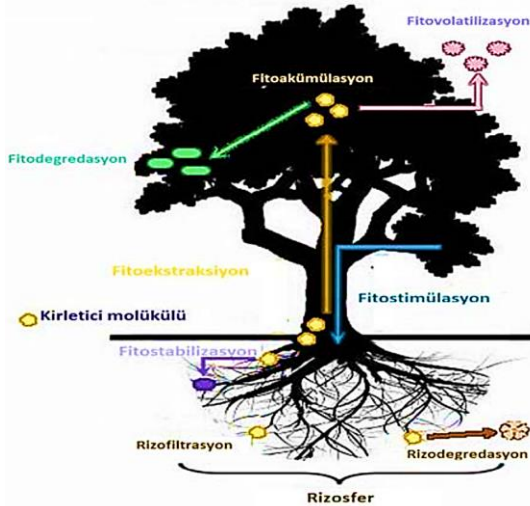
Kompostlaştırma prosesine etkisinin en fazla olduğu bilinen parametreler; sıcaklık, pH, C/N oranı, havalandırma ve karıştırma, nem ve partikül boyutu olarak sıralanabilmektedir. Kompostlaştırmaya etki eden en önemli faktörlerden birisi olan sıcaklık, organik maddelerin biyolojik ayrışmalarına büyük ölçüde katkı sağlamakta ve aynı zamanda patojen mikroorganizmaların yok edilmesini sağlamaktadır. Mikrobiyal aktivitenin yardımıyla sıcaklığın yaklaşık 55°C’ye yükselmesiyle prosesin verimi her ne kadar yükseliyor olsa da kompostun kendini çürütme özelliği nedeniyle ortam sıcaklığı 70°C’nin üzerine yükselebilmektedir ve 55°C’nin üzerine çıkan sıcaklıklarda mikroorganizmalarında canlılık özelliklerini yitirdiklerinden dolayı kompostlama işlemi durmakta ve mikroorganizma popülasyonu eski

haline gelene kadar tekrar başlamamaktadır. Bu durumlarda havalandırma oranını arttırarak veya karıştırma sıklığını arttırarak sıcaklık kontrolünün sağlanması gerekmektedir (Ekinci et al., 2021). Mikroorganizmaların enerji ihtiyaçlarını karşılamak ve büyümelerini sağlamak için karbon, protein sentezi için azot gerekliliği olduğundan dolayı bir kompostlaştırma ünitesinde önemli olan bir diğer faktör ise C/N oranı olup, başlangıçta bu oranın %20-30 olması istenmektedir. Eğer bu oran %30'u geçerse biyolojik aktivite yavaşlamakta ve daha fazla zamana ihtiyaç duyulmakta iken, %20'nin altına düşmesi durumunda amonyak açığa çıkmakta ve bu durum koku oluşumunun yanı sıra mikroorganizmalara zarar vermektedir. Her bir mikroorganizmanın belli bir pH aralığında aktivitelerini sürdürebilmektedir ve kompostlaştırma prosesinde başlangıç değeri ne olursa olsun süreç sonunda pH değeri 7,8-8,0 arasında stabil hale gelmektedir. Kompostlaştırma prosesinde bir diğer önemli etken nem miktarı olup, mikroorganizmaların metabolik faaliyetlerine devam edebilmeleri için neme ihtiyaçları bulunmaktadır. Nem miktarı kimyasal reaksiyonlar için uygun ortamın oluşması, mikroorganizma hareketini ve besin maddelerinin taşınmasını sağlamakta önemli bir yer tutmakta olup, nem miktarı süreç devam ederken sürekli azalacağından dolayı başlangıç nem miktarının %40'tan büyük olması istenmektedir. Başarılı bir kompostlaştırmanın ana unsurlarından bir diğeri de ortamdaki oksijen varlığıdır. Organik maddelerin bozunumu sürecinde aerobik mikroorganizmalar ihtiyaç duydukları enerjiyi sağlamak için karbonu okside etmektedirler ve bu işlem için ortamdaki oksijeni kullanmakta ve karbondioksit üretmektedirler. Oksijen konsantrasyonlarının %5'in altına düştüğü durumlarda aerobik mikroorganizmaların hayati fonksiyonları yavaşlamakta olduğu bilinmekte, ancak verimli bir kompostlaştırma süreci için bu oranın %10'dan büyük olması arzu edilmektedir. Kompostlaştırma prosesini etkileyen bir diğer faktör ise mikroorganizmalar olup, kompostlaştırma işlemi nemli ve havalandırılan organik maddelerin bulunduğu bir ortamda kendiliğinden çoğalan çeşitli mikroorganizmalar tarafından gerçekleştirilmektedir. Prosesin ilk aşamasında mezofilik bakterilerin yanı sıra bazı mantar türleri yağları, proteinleri ve karbonhidratları ayrıştırırlar ve 40-50°C'ye ulaştığında kompostlaştırmayı başlatan bu mikroorganizmaların hemen hemen tümü ölmekte ve bunların yerini 60-70°C sıcaklığa kadar dayanabilen ve ısı açığa çıkmasını sağlayan termofilik bakteriler almakta ve bu sıcaklıkta birkaç dirençli sporun dışında temel olarak bütün patojen

mikroorganizmalar kısa süre içinde ölmekte ve mevcut besin tükendiğinde termofilik bakteriler ısı üretmeyi durdurduklarından kompost soğumaya başlar. Son olarak soğuyan kompost içerisinde kalan besinle beslenen, çoğunlukla mantarlardan oluşan yeni bir grup organizma çoğalır (Ekinci et al., 2021).

2.2. Fitoremediasyon

Fitoremediasyon yöntemi ile bitkiler kullanılarak gerçekleştirilen biyoremediasyon uygulamaları kastedilmekte olup, son yıllarda ilgi çekmeye başlayan toprak ıslahını içeren bir teknolojidir. Yöntemde kirleticilerin giderilmesi ya da zararsız hale dönüştürülmesi için yeşil bitkiler kullanılmaktadır (Raskin et al., 1997). Bu yöntemde bitkiler kirleticileri parçalayabilmekte veya bünyelerine alarak stabilize edebilmektedirler. Metodun diğer biyoremediasyon yöntemleri ile karşılaştırıldığında oldukça düşük maliyet, estetik görünüm vb. avantajları bulunmakla birlikte, toprak yapısını değiştirmediklerinden çevresel açıdan dikkate değer bir tehlike oluşturmamaktadırlar. Fitoremediasyon metodunda hedef alınan kirleticiler ağır metaller ve organik kirleticiler olup, metot; Şekil 3’de görülebileceği üzere fitovolatilizasyon, fitoakümülyasyon, fitodegradasyon, fitoekstraksiyon, fitostimülyasyon, fitostabilizasyon, rizofiltrasyon ve rizodegradasyon olmak üzere çeşitli alt gruplara ayrılmaktadır (Bingül et al., 2019).

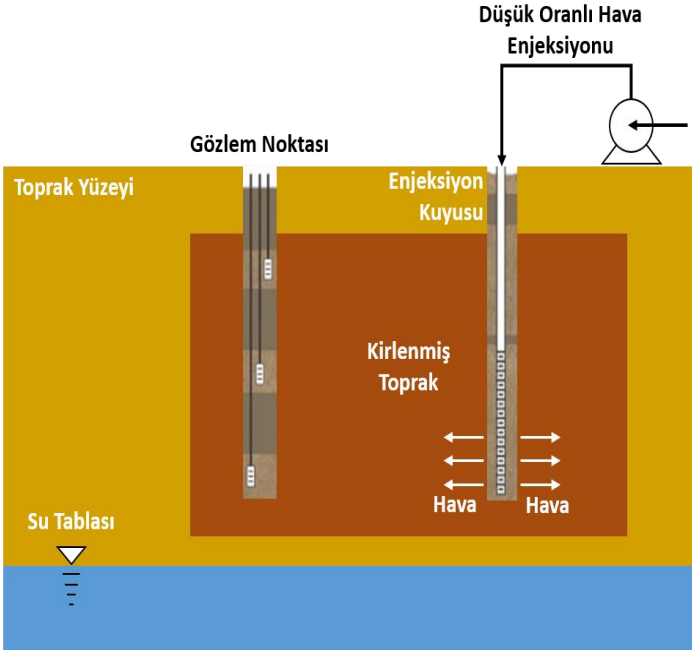


Şekil 3. Fitoremediasyon Mekanizmaları

Fitoremediasyon metodu, toprağın kazılarak taşınması süreçlerini kapsamadığından dolayı maliyeti düşüktür ve diğer teknolojilerin birçoğu toprakta mevcut biyolojik aktiviteyi tamamen yok etmekte ve toprağı bitkiler için elverişsiz hale getirmekte iken fitoremediasyon toprağın yapısını korumaktadır. Fitoremediasyon dezavantajları arasında; metodun bitki köklerinin derinliğine ve bitkinin kirleticiye toleransına bağımlı olması, diğer metotlar ile karşılaştırıldığında uzun süreli olması olarak sıralanabilmektedir.

2.3. Biyoventilasyon

Biyoventilasyon, toprağın kendi yapısında bulunan mikroorganizmalara doğrudan hava enjeksiyonu ile oksijen desteğı sağlayıp, kirleticilerin doğal yollarla biyolojik parçalanabilirliğini arttırmakta olan bir sistem olup, süreç içinde toprakta adsorplanmış yakıt kalıntıları parçalanmakta, gaz fazındaki uçucu organik bileşikler de hava ile topraktan yukarı doğru hareket ederlerken biyolojik olarak aktifleşmekte ve bozunmaktadırlar. Bu teknolojiye ait bir örnek Şekil 4’de gösterilmiştir (İmamoğlu & Erdoğan, 2017).

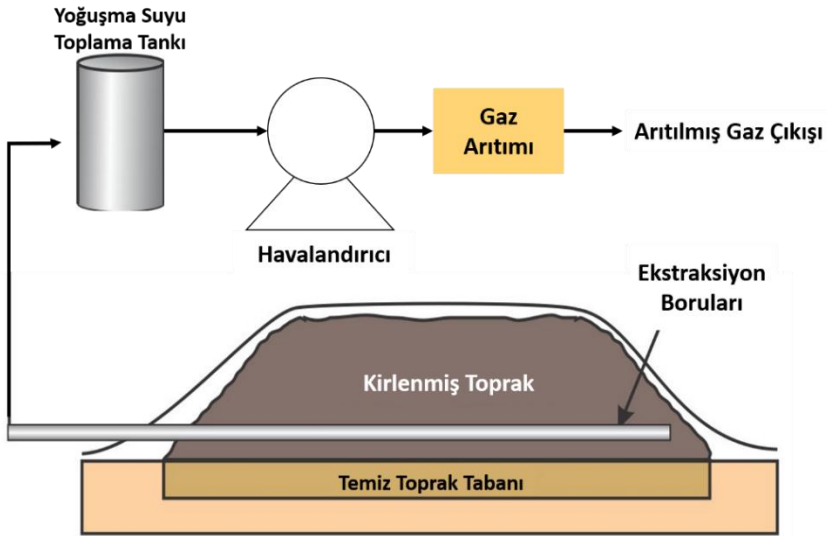


Şekil 4. Biyoventilasyon Proses Şeması

Biyovenilasyon; hidrokarbonlar, klor içermeyen çözücüler, bazı pestisit türleri, organik kimyasallar vb. kirleticilerle kirlenmiş saha veya toprakların temizlenmesinde kullanılabilen iken, inorganik kirleticileri bozunmasında etkisi sınırlı kalmaktadır. Bu noktada inorganik kirleticilerin değerliklerini değiştirerek adsorplanmalarını veya makro/mikroorganizmalar tarafından tutulmalarına yardımcı olmaktadır. Aerobik şartların sağlanamadığı ve hidrokarbonların parçalanmasını sağlayan mikroorganizmaların toprağın yapısında yeterli miktarlarda bulunmayışı metodun dezavantajları arasında sayılabilmektedir.

2.4. Toprak Biyoyığılıları

Biyohücreler olarak da isimlendirilen toprak biyoyığılıları, petrol atıkları ile kirlenmiş toprakların iyileştirilmesi için kullanılmaktadır. Bu metot kirlenmiş toprağın yığılılar halinde biriktirilmesini ve bu biyoyığılılarda mikrobiyal popülasyonların aerobik şartlar altında besi maddesi, mineral ve nem eklenerek uyarılmasını içermektedir. Biyoyığılıların tipik yükseklikleri 1-3 m aralığında olabilmekte olup, yığılılar boyunca yerleştirilen delikli borular aracılığıyla enjeksiyon yoluyla havalandırılmakta olup sistemin bir örneği Şekil 5’de gösterilmiştir (Verma, 2022).

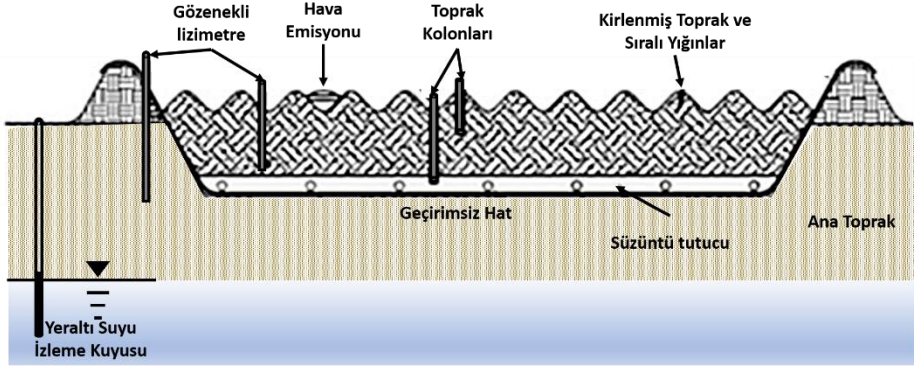


Şekil 5. Toprak Biyoyığılıları Proses Şeması

Şekil 5'te verilen toprak biyoyığını sisteminde mikroorganizmaların aktivitelerini arttırmak için yığınların içine hava verilirken, gerekirse ortama besi maddeleri ilave etmektedir. Yığınlardan yayılan gazlardan dolayı da uçucu kirletici maddelerin kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu yığınlar petrol ürünlerinin hemen hemen tüm türevlerinin biyolojik olarak parçalanarak konsantrasyonlarını azaltmada etkili bir rol oynarlarken, gazolin benzeri daha hafif ve uçucu petrol ürünlerini havalandırma esnasında buharlaşma ve mikrobiyal solunumla parçalanmaya uygun bir hale getirirler. Toprak karakteristiği, çevre yapısı, iklim şartları vb. sistemin etkinliği için çok önemlidir. Toprak tekstürü, toprağın geçirgenliği ve nem içeriğini etkilemekte olup, ince tanecikli topraklar kaba taneciklilerden daha az geçirgendir ve bu toprakların havalandırılması daha zor iken bu topraklar daha yüksek nem tutma kapasitesine sahiptirler. Toprak biyoyığınları için optimum drenaj koşullarının oluşturulduğu topraklarda çoğunlukla aerobik mikroorganizmalar aktif olup, bu yığınlarda aerobik bakterilerin faaliyetlerine devam edebilmeleri için belirli zaman aralıklarında karıştırılmaları ve sürülmeleri gerekmektedir. Bu sistemlerde biyoremediasyonun gerçekleşmesini etkileyen bir diğer faktör de sıcaklık olup, sıcaklık 10° C'nin altına indiğinde mikrobiyal aktivitenin de azaldığı bilinmektedir. Petrol ürünlerinin parçalanmasında etkin olan mikroorganizmaların ise aktiviteleri 45°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda azalmaktadır. Her ne kadar yüksek kirletici konsantrasyonları ve 2500 ppm'in üzerindeki ağır metal konsantrasyonlarında mikrobiyal aktivite etkilenip verimli çalışmıyor olsa da metodun kurulumu ve işletilmesi oldukça kolay olup, optimum şartlarda arıtım süreci 6 ay-2 yıl arasında değişmektedir (Dindar et al., 2010).

2.5. Arazide Islah

Arazide ıslah metodunda, kirlenmiş olan toprak yalıtımlı bir zemin yatağına dökülmekte ve havalandırmak için periyodik olarak karıştırılmakta veya sürülmektedir. Kirlenmiş ortam 50 cm kalınlığındaki katmanlar halinde doldurulmaya devam etmekte ve arzu edilen arıtım seviyelerine ulaşıldığında temizlenmiş katmanların tamamı yerine üst kısımları kaldırılmakta ve bunun yerine tekrar kirlenmiş toprak eklenip karıştırılmaktadır. Bu uygulama ile mikrobiyal kültürün toprağa aşılması sağlanmakta ve arıtım süreci kısalmakta olup, sistem Şekil 6'da gösterilmiştir (İmamoğlu & Erdoğan, 2017).



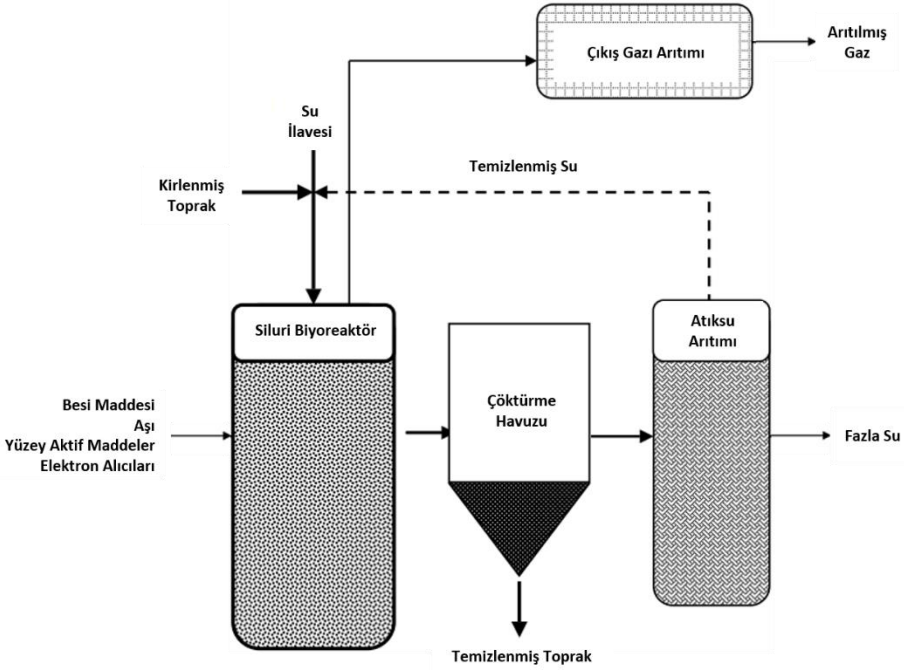
Şekil 6. Arazide Islah Proses Şeması

Şekil 6'da gösterilen arazide ıslah proseslerinde petrol hidrokarbonlarının biyoremediasyonu başarılı bir şekilde yürütülebilmekte olup, yüksek molekül ağırlıklı poliaromatik hidrokarbonların ve klorlu ve nitratlı bileşiklerin parçalanması oldukça zordur. Veri ve alan ihtiyacı yüksek yüksek olan proste kirleticilerin biyoremediasyonunu etkileyen sıcaklık, yağış vb. şartlar kontrol edilmemekte ve bu durumdan dolayı biyoremediasyon süresi artmaktadır. Uygulama sırasında nem, havalandırma, pH vb. toprak koşulların, kirleticilerin parçalanma oranlarını optimize etmek için sürekli kontrol edilmesi gerekmekte olup, sürecin yeraltı ve yüzey suları, hava veya besin zincirinde kirliliklere sebep olmasını önlemek amacıyla titiz bir biçimde yürütülmesi gerekmektedir (İmamoğlu & Erdoğan, 2017).

2.6. Siluri Faz Biyoreaktör

Siluri faz biyoreaktörler, kirlenmiş toprakların kontrollü bir şekilde arıtımı için kullanılan bir proses olup, bulunduğu yerden kazılarak alınan kirlenmiş toprak, öncelikle taş ve çakıllarından fiziksel olarak ön işleme ayrılmaktadır. Toprağın fiziksel yapısı ve alanda mevcut olan kirliliğin bozunma hızlarına bağlı olarak belirlenen bir kirlenici konsantrasyonuna ulaşabilmek için su ve katkı maddesi ilavesiyle bulamaç olarak adlandırılan sulu bir çamur elde edilmekte olup, bulamaç ağırlıkça %10-30 oranları arasında katı madde içermektedir (İmamoğlu & Erdoğan, 2017). Özetle, siluri faz biyoreaktör metodunda toprak kazılır, şartlandırılır ve şartlandırılan toprak biyoreaktörlere yüklenir. Siluri faz biyoreaktörlerde reaktör içindeki toprak,

optimum biyolojik arıtma şartlarında ve homojen süspansiyon sağlanacak bir karıştırmanın varlığında sulu süspansiyon içinde tutulmakta olup reaktörün akım şeması Şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 7. Tipik Bir Siluri Faz Biyoreaktör Görünümü

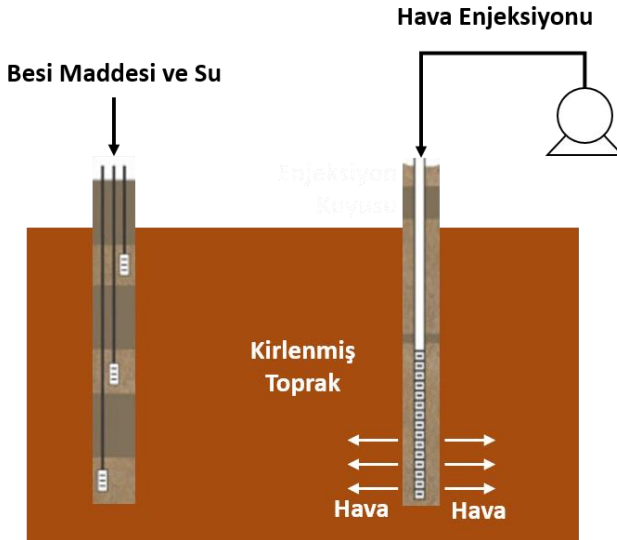
Bu biyoreaktörlerin çeşitli konfigürasyonları mevcut olup, tam ölçekli ve düşük maliyetli biyoreaktörler için 24 m × 15 m boyutlarında büyük lagünlerden faydalanılabilmektedir. Üretilen biyoreaktörlerin boyutları ise 3-25 m çapında ve 4,5-8 m yüksekliğinde projelendirilebilir, kapasiteleri 60-1000 m³ arasında değişebilmektedir. Biyoreaktörler genellikle karıştırma ekipmanları ve difüzörlerle donatılmış olup, yardımcı ekipmanlar arasında gaz arıtım ve emisyon kanalları, besin maddeleri ve bulamacın pH koşullandırması için çeşitli birimler kullanılabilmektedir. Siluri faz biyoreaktörler kesikli ve yarı sürekli olarak işletilebilmekte olup, sürekli sistemler prensipte mümkün olsa da yaygın kullanım alanı bulamamaktadırlar (Robles-González et al., 2008).

Geçirgenliği düşük heterojen topraklar, alanda yeraltı suyunun tutulumunun zor olduğu koşullarda veya hızlı arıtım arzu edildiğinde bu reaktörler tercih edilmekte olup, bu reaktörlerde öncelikle uçucu organik

bileşiklerin giderimi hedeflenmektedir. Adaptasyon sağlanabildiği sürece patlayıcı maddeler, petrol hidrokarbonları, solventler, ahşap koruyucular, pestisitler vb. giderimi için kullanılabilir bir teknolojidir. Sistemin kullanımının uygun olup olmadığının belirlenebilmesi için toprak karakterizasyonunun yapılmasının yanı sıra kirleticilerin biyolojik olarak parçalanma potansiyellerinin belirlenmesi gerekmektedir iken, arıtılabilirlik çalışmalarının da yapılması gerekmektedir (İmamoğlu & Erdoğan, 2017).

2.7. Geliştirilmiş Biyoremediasyon

Geliştirilmiş biyoremediasyon yöntemi ile, uygun koşullar altında mikroorganizmaların kirlenmiş sahalardaki organik kirleticileri yerinde giderimi amaçlanmaktadır. Bu yöntemde kirlenmiş bölgeye oksijen, besi maddesi ve nem sağlanırken, sıcaklık ve pH kontrolü ile uygun ortam koşulları oluşturulmaya çalışılmaktadır. Kirlenmiş yeraltı suyu bölgesine oksijen veya hidrojen peroksit ilavesi ile süreç işletilebilmekte olup, mikroorganizmaları daha aktif hale getirebilmek için melas, bitkisel yağ vb. ilavelerde söz konusu olabilmektedir. Geliştirilmiş biyoremediasyon yöntemine ait mekanizma Şekil 8'de gösterilmiştir (İmamoğlu & Erdoğan, 2017).



Şekil 8. Geliştirilmiş Biyoremediasyon Yöntemine Ait Mekanizma

Şekil 8’de basit mekanizması verilen geliştirilmiş biyoremediasyon yöntemi kirlenmiş sahaların ve yeraltı sularının temizlenmesi için kullanılabilen bir proses olup, geçirgenliği yüksek bölgeler bu metotla çok daha hızlı bir şekilde temizlenebilmektedir. Yakıtlar, petrol hidrokarbonları, BTEX, çözülebilir uçucu organik maddeleri pestisitler, organik maddeler vb. kirleticiler bu metotla giderilebilen maddeleri oluşturmakta iken, inorganik kirleticiler için uygulanmamakla birlikte bu maddelerin değerliklerini değiştirme maksadıyla kullanılabilir. Metodun etkin bir şekilde yürütülebilmesi için karbon kaynağı olarak kullanılacak kimyasalların eklenmesi gerekebilmekte olup, yoğun olarak pestisitlerle kirlenmiş sahalarda kullanımı uygun olmayıp, kalıcı organik kirleticiler ve poliklorlu bifenillerin gideriminde etkili bir metottur.

KAYNAKÇA

- Ak, M., & Top, İ. (2018). Artırılmış kentsel atıksuların tarımsal sulama amaçlı kullanımını. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(6), 1161-1168.
- Akten, M., & Akten, S. (2008). *Kentsel atıksu yönetimi ve atıksuların yeniden kazanımında yapay sulak alanların çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkileri* TMMOB 2. Su Politikaları Kongresi, Ankara.
- Altıkat, A., Turan, T., Ekmekyapar Torun, F., & Bingül, Z. (2009). Türkiye’de pestisit kullanımı ve çevreye olan etkileri. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 40(2), 87-92.
- Aydın Temel, F. (2017). Endüstriyel atıksuların arıtımında yapay sulak alanların kullanımı. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 8(1), 213-226.
- Bingül, Z., Ekmekyapar Torun, F., & Kul, S. (2019). Fitoremediasyon. In B. Gıdık & H. Serencam (Eds.), *Bitkilerin Ekonomik Önemine Genel Bir Bakış*. İksad Publications.
- Boopathy, R. (2000). Factors limiting bioremediation technologies. *Bioresource technology*, 74(1), 63-67.
- Dindar, E., Topaç Şağban, F. O., & Başkaya, H. S. (2010). Kirlenmiş toprakların biyoremediasyon ile Islahı. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 15(2).
- Ekinci, K., Tosun, İ., & Varol, N. (2021). *Kompost El Kitapçığı* (G. Beşirli, B. Albayrak, & İ. Sönmez, Eds.). Atatürk Bahçe Kültürleri Merkez Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü.
- Güler, Ç. (2013). *Büyük Çevre Sözlüğü*. Yazıt Yayıncılık.
- İlay, R., Erarslan, G., & Kavdır, Y. (2019). Pirina ve balık atıklarının birlikte kompostlanması ve toprak ıslahında kullanılması. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 34(2), 201-209.
- İmamoğlu, İ., & Erdoğan, S. (2017). *Kirlenmiş Saha Temizleme/İyileştirme Teknolojileri Kılavuzu*. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.
- Kızıloğlu Algan, F. T., & Bilen, S. (2005). Toprak kirlenmesi ve biyolojik çevre. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 36(1), 83-88.

- Kul, S., Gül, V., & Cengiz, İ. (2021). Toprak ve bitkilerde ağır metal kirliliğinin araştırılması: Bayburt ili örneği. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, 6(2), 195-203.
- Menteşe, S., & Böbrek, O. (2020). Madencilik faaliyetlerinin topraktaki ağır metallere (As, Cd, Co, Fe ve Ni) üzerine etkisi: Orhaneli ve Büyükorhan (Bursa) örneği. *Ege Coğrafya Dergisi*, 29(1), 45-56.
- Özdemir, M., & Kökhan, S. (2023). Analysis of occupational health and safety risks in beekeeping with FMEA method. *Sakarya University Journal of Science*, 27(4), 708-723.
- Paloluoğlu, C., & Bayraktar, H. (2019a). Atmosferik poliklorlu bifeniller (PCB'ler); örnekleme, ekstraksiyon ve analiz. *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(2), 205-224.
- Paloluoğlu, C., & Bayraktar, H. (2019b). Atmosferik polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH'lar); örnekleme, ekstraksiyon ve analiz. *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(2), 266-285.
- Paloluoğlu, C., & Bayraktar, H. (2022). Determination of the gas/particle phase concentrations of PCBs in urban and rural atmosphere in Erzurum, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(10), 779.
- Raskin, I., Smith, R. D., & Salt, D. E. (1997). Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment. *Current opinion in biotechnology*, 8(2), 221-226.
- Robles-González, I. V., Fava, F., & Poggi-Varaldo, H. M. (2008). A review on slurry bioreactors for bioremediation of soils and sediments. *Microbial Cell Factories*, 7, 1-16.
- Rona, E. (2017). *Sağlıklı Toprak ve Sağlıklı Bitkiler İçin Kompost Rehberi*. Miki Matbaacılık.
- Sönmez, O., & Kılıç, F. N. (2021). Toprakta ağır metal kirliliği ve giderim yöntemleri. *Turkish Journal of Agricultural Engineering Research*, 2(2), 493-507.
- Ünal, M. (2011). Toprak oluşumu ve ülkemizdeki çeşitleri. *Bilim ve Aklın Aydınlığında Eğitim*, 11(134), 12-18.
- Verma, A. (2022). Bioremediation Techniques for Soil Pollution: An Introduction. In K. Ferreira Mendes, R. Nogueira de Sousa, & K. Cabral Mielke (Eds.), *Biodegradation technology of organic and inorganic pollutants*. IntechOpen.

- Yıldırım, E. (2012). *Tarımsal Zararlılarla Mücadele Yöntemleri ve Kullanılan İlaçlar*. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Ofset Tesisi.
- Zincircioğlu, N. (2013). Investigation of the heavy metal contents of some agricultural lands in the region of Manisa-Akhisar. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 50(3), 333-339.

BÖLÜM 6

ATMOSFERİK ORGANOKLORLU PESTİSİTLERİN (OCP'LERİN) YENİLİKÇİ YÖNTEMLER İLE ANALİZLENMESİ

Dr. Öğr. Üyesi Cihan PALOLUOĞLU^{1*}

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10445651>

^{1*}Bayburt Üniversitesi, Sanat ve Tasarım Fakültesi, İç Mimarlık ve Çevre Tasarım Bölümü, Merkezi Araştırma Laboratuvarı, 69000, Bayburt, Türkiye. (cpaloluoglu@bayburt.edu.tr). ORCID ID: 0000-0002-8635-8315.

GİRİŞ

Pestisit grubu içerisinde toksik, kanserojenik, endokrin bozucu ve mutajenik etkisi daha fazla olan uçucu/yarı uçucu bileşiklerden olan organoklorlu pestisitler (OCP) iç ve dış ortam havasında bozunmaya karşı dirençli olduklarından, farklı yollardan insan vücuduna girerek biyolojik birikim ile çeşitli sağlık sorunlarına yol açabilmektedirler (Ali *et al.* 2014; Paloluoğlu *et al.* 2016; Rani *et al.* 2021; Ontiveros-Cuadras *et al.* 2019; Sari & Esen, 2022). OCP'ler kaynaktan salındıktan sonra atmosferde belli bir süre taşınarak tekrardan yeryüzüne dönmek için ya meteorolojik faktörlerin etkisi ile ya da yer çekimi etkisi ile ıslak, kuru ve toplam (Bulk) çökme ile çökelebilmektedirler (Sofuoğlu *et al.* 2004; Pozo *et al.* 2009; Estellano *et al.* 2017; Yu *et al.* 2019; Zhang *et al.* 2018; Qu *et al.* 2019). Bu çökme işlemi her ne kadar ıslak ya da kuru çökme yöntemi ile gerçekleşse de önemli olan çökdikleri ortamda canlı ve cansız çevreye vermiş oldukları tahribat ve zehir etkisidir.

OCP'ler ilk olarak kullanıldıkları tarihten (19. yüzyılın ortaları) yasaklandığı tarihe kadar (20. yüzyılın başlarına kadar) üretim ve kullanımı olan tüm OCP türlerinin sayılamayacak kadar zararlı etkileri çağımızda farklı çalışmalar altında sürekli araştırılmaktadır (Cindoruk *et al.* 2020; Chen *et al.* 2020; Ding *et al.* 2022). Aynı zamanda OCP'ler bu kadar zararlı kimyasallar olmasına rağmen, yasal ya da yasal olmayan yollardan halen daha kullanılmasının başlıca sebepleri arasında; etkili, ucuz, kolay uygulanabilen, yeteri kadar stabil olan, güvenilir, istenmeyen canlılara direk zehir etkisi yapması, çevrede kullanılabilir olması gelmektedir (Wu *et al.* 2020; Rani *et al.* 2021).

Ayrıca bu denli zarar etkisi olan bu bileşikler çağımızda oldukça dikkat çekip bilim insanları tarafından her geçen gün farklı bölge ve çalışma yöntemleri ile de farklı fazlardaki (katı, sıvı ve gaz) OCP'lerin atmosferik konsantrasyonlarını, çökme akıllarını, canlı ve cansızlar üzerindeki zararlı etkilerini yoğun bir şekilde araştırarak ulusal ya da uluslararası dergilerde literatüre bilgi akışı sağlamaktadırlar (He & Balasubramanian, 2009; Yu *et al.* 2019; Rani *et al.* 2021; Witczak *et al.* 2021; Sari & Esen, 2022). Bilim insanları kentsel ya da kırsal alanda çalışmalarını yaparken, ister aktif örnekleme ile isterse de pasif örnekleme yöntemi ile çalışsınlar daha doğru sonuçlara ulaşmak, daha hızlı ve verimli olabilmek için hepsinin uyması ve çalışması

gereken güncel üç ana başlık bulunmaktadır. Bu başlıklar çalışma sırasına göre; OCP'lerin örneklenmesi, laboratuvar ortamında ekstraksiyon deneylerinin yapılması ve elde edilen numunelerin analiz işlemlerinin gerçekleştirilmesidir (Esen, 2013; Cindoruk & Taşdemir, 2014; Paloluoğlu & Bayraktar, 2022; Kang *et al.* 2022). Bu konuyu biraz daha netleştirmek adına tekrardan vurgulanacak olursa; OCP'lerin konsantrasyonlarını, türlerini, hatta karakterizasyonlarını belirlemek için önce çalışılacak bölge netleştirilmelidir. Bölge kentsel, yarı kentsel ya da kırsal alanda bir nokta seçilebilir. Çalışma alanı netleştirildikten sonra hangi yöntem ile örnekleme yapılacak ise (aktif/pasif örnekleme) örnekleme noktasının konum seçimi yenilikçi yaklaşımlar ile tespit edilmelidir.

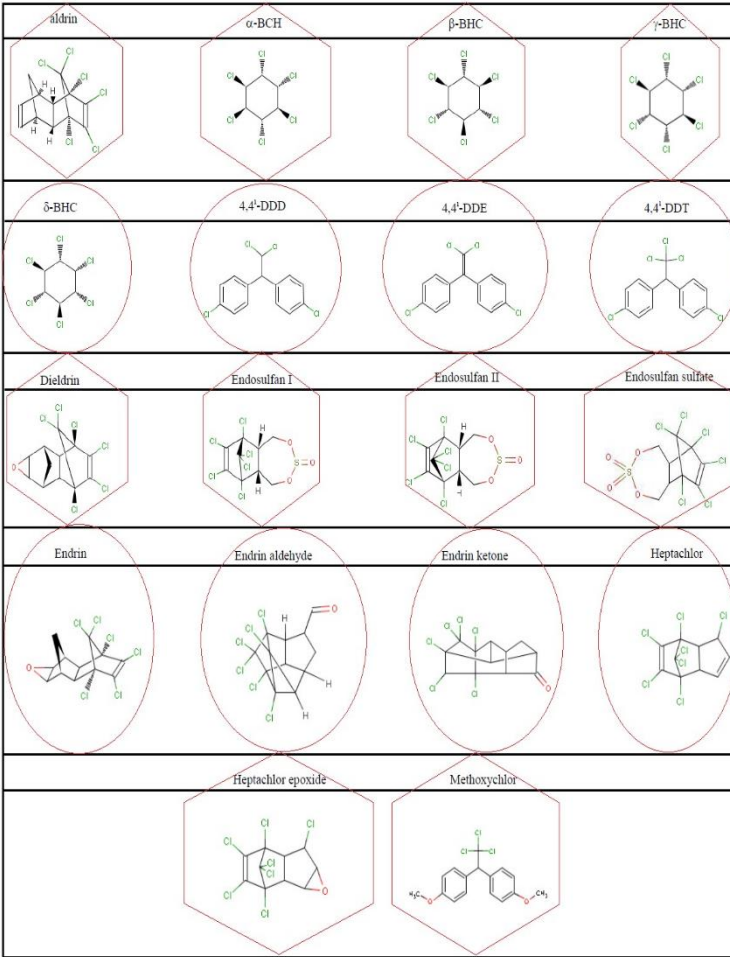
Çalışma OCP gibi organik kirlenici grubuna dahil olan bir araştırma olduğundan, belirlenen bu konum özellikle bölgesel kaynaklardan uzakta, hatta yola, trafiğe ve binalara uygun mesafe ve yerden uygun yükseklikteki platformların üzerinde uygulanmalıdır. Bu bölümün ilk detaylandıracağı konu, yapılan çalışmanın ilk ana basamağı olan *örnekleme* bölümüdür. Çalışmanın örnekleme noktası belirlenip, numune alma işlemleri çalışma konusuna göre uygun zaman ve sayıda tamamlandıktan sonra, günlük ya da haftalık yapılan örnekleme numuneleri (katı, sıvı, gaz formunda) laboratuvar ortamına taşınmalıdır. Taşınan numuneler uygun kaplarda bekletilmelidir. Örnekleme işlemleri tamamlanan OCP'lerin belirlenmesinde diğer ikinci ana başlık ise, örnekleme ile analiz arasında tüm deneysel basamakları içeren "*ekstraksiyon*" bölümüdür. Ekstraksiyon işlemlerinin ardından da yapılacak diğer üçüncü ana başlık ise, ekstraksiyon deneyleri neticesinde elde edilen numunelerdeki OCP'lerin belirlenmesine yönelik kromatografi cihazları ile (GC-MS) yapılan *analiz* kısmını oluşturmaktadır (Gioia *et al.* 2005; Guida *et al.* 2021; Garcia Solorio *et al.* 2022; Kalina *et al.* 2022).

Pestisitler tarımsal araştırmalarda elde edilen ürünlerin gelişimini ve verimliliğini artırmada, zararlı canlılarla mücadele için kullanılan antropojenik kimyasallardır (Rani *et al.* 2021; Sakin *et al.* 2023). Aynı zamanda tarımsal alanlarda tarım ürünlerine zarar verebilecek her tür canlı organizmaları engellemek, gelişimlerini kontrol altına almak veya bu organizmaların zararlarını azaltmak için kullanılan sentetiklerdir (Ding *et al.* 2022). Ayrıca pestisitler tek bir model ya da kimyasal olmayıp çağımızdaki virüs, bakteri, kimyasal madde ya da dezenfektan türü bileşikler de olabilir (Chen *et al.* 2017; Rani *et al.* 2021). Zararlı organizmalardan kasıt olarak, tüm tarımsal ürünlere

zarar verebilen, yabancı otlar, bitki patojenleri, böcekler, balıklar, kuşlar, memeliler ve mikro canlılar olabilmektedir (Chen *et al.* 2020; Ding *et al.* 2022). Bu durumda her ne kadar kullanımları fayda sağlasada nihayetinde kanserojenik ve toksik etkilerinden dolayı oldukça zararlı etkilerini, başta kullanıldıkları alanda gösterebilmektedirler (He & Balasubramanian, 2009; Witczak *et al.* 2021; Sari & Esen, 2022).

Diğer taraftan Pestisitler içerisinde en toksik olan grubların başında Organoklorlu Pestisitler gelmektedir. Bu denli toksik olan OCP'lerin kimyasal yapısı da C, H ve Cl elementlerinden oluşmaktadır (Jayaraj *et al.* 2016; Wang *et al.* 2022; Sakin *et al.* 2023). Güncel olarak bilinen ve kullanılan başlıca OCP türleri ise alpha-BHC, beta-BHC, Lindane, delta-BHC, Heptachlor, Aldrin, Heptachlorepoxyde Isomer B, γ -Chlordane, α -Chlordane, Endosulfan I (alpha), 4,4'-DDE, Dieldrin, Endrin, Endosulfan II (Beta Isomer), 4,4'-DDD, Endrin aldehyde, Endosulfan sulfate, 4,4'-DDT, Endrin Ketone, Methoxychlor şeklinde sıralanmaktadır (Şekil 1) (Guida *et al.* 2021; Garcia-Solorio *et al.* 2022). Ayrıca OCP'ler insan eli yapılmış kimyasal sentetikler olduğundan doğal kaynakları bulunmamaktadır. Aynı zamanda pestisit gurubu içerisinde en toksik olan grup özelliğinden dolayı en çok araştırma konusu olan bileşiklerdir (Jayaraj *et al.* 2016; Guida *et al.* 2021; Wang *et al.* 2022).

Tüm dünya ülkelerinde, OCP'lerin canlı ve cansızlar üzerindeki zararlı etkilerinden dolayı hem araştırılmaları hem de seviyelerinin belirlenmesinde örnekleme, ekstraksiyon ve analiz kısımları farklı yöntem ve metotlar adı altında dahi çalışılsa bile sürekli bu çalışmalara yenilikçi yaklaşımlar ile daha pratik bir şekilde getirilmeye uğraşmaktadır. Aynı zamanda bu gereksinimlerin yanında tüm bilim insanlarının uyması gereken ulusal ve uluslararası kurum ve kuruluşların (EPA, WHO, EN vb.) getirmiş oldukları kriterler de bulunmaktadır (Cindoruk & Taşdemir 2007; Esen 2013). Böylece tüm çalışmalar belirli standartlar ve metotlar dâhilinde gerçekleştirilmektedir. Aynı zamanda ister geleneksel yöntemlerle olsun isterse de yenilikçi yöntemler ile olsun OCP'lerin örnekleme, ekstraksiyon ve analiz basamaklarında kullanılacak olan makine/ekipman ve kromatografi cihazlarının hepsi literatürde kabul görmüş uygun akredite cihaz ve ekipman standartları arasından seçilmelidir (Luo *et al.* 2019; Paloluğlu, 2022b; Llanos *et al.* 2022).



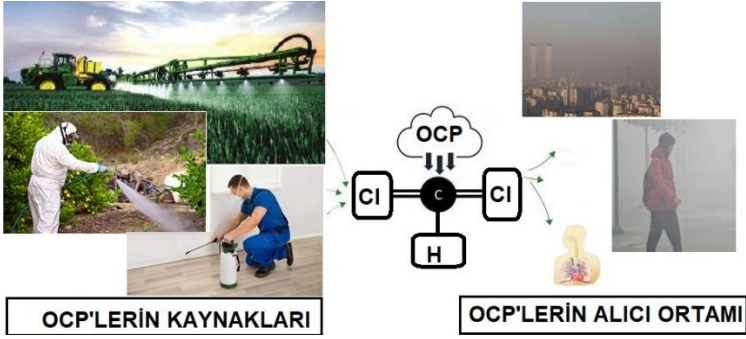
Şekil 1. OCP'lerin Fiziksel Görünümü ve Kimyasal Yapıları

Diğer taraftan OCP'ler ilk olarak kaynaklarından çıkıp salındıkları dış atmosfer ortamında çeşitli meteorolojik faktörler ile farklı bölgelere uzun ya da kısa menzilli olarak taşınabilmektedirler. Ardından da tekrar yeryüzüne ıslak ya da kuru çökme ile çökmeleri, buradan da farklı alıcı ortamlara (bitki, toprak, nehir, göl, yer altı suları vb.) taşınmalarını gerçekleştiren bir takım kısa ya da uzun vadeli olayların sirkülasyonu sürekli olarak devam etmektedir (Şekil 2) (Sauret *et al.* 2008; Cindoruk 2011; Qu *et al.* 2015; Zhang *et al.* 2018).

Buraya kadar anlatılan bölüm OCP'lerin doğal var oluş döngüsüdür. Bir de OCP'lerin kullanım döngüsü incelenecek olursa; özellikle tarımsal alanlarda OCP'ler ilk kullanılmaya başlandığında yüksek verimli ürünlerin eldesi,

tarımsal ürünlere zarar veren böcek, haşere gibi canlıların yok edilmesi amacı ile uzun yıllar üretilmiş ve kullanılmıştır (Navarro *et al.* 2019; Chen *et al.* 2020). Fakat bu ve benzeri durumlar ilk üretim tarihlerinde geçerli olup çağımızda ise ayrıca kullanım alanları oldukça artmış bulunmaktadır. Bu duruma örnek verilecek olursa klasik tarımsal üretim aktivitelerinde, sepet balık yetiştiriciliğinde, park bahçeler gibi belediyeçilik hizmetlerinde, ormanlık alanlarda, endüstriyel böcek yetiştiriciliğinde, gıda saklama işlemlerinde, bireysel ilaç olarak kullanımlarında, inşaat işlerinde, çiçekçi atölyeleri gibi birçok alanda kullanımları artmaktadır (Rani *et al.* 2021; Ding *et al.* 2022).

Diğer taraftan geçmiş tarihli ve güncel çağımızın farklı uygulamaları neticesinde atmosfere bol miktarda OCP salınımları gerçekleşmektedir (Sofuoğlu *et al.* 2004; Çalışkan *et al.* 2020; Güngörmüş *et al.* 2021). Böylece atmosferde de yarılanma ömürlerine göre belirli süreler taşındıktan sonra ister kendi ağırlıkları ile isterse yerçekimi etkisi ile isterse de meteorolojik faktörlerin etkisi ile olsun bir şekilde yeryüzüne tekrardan dönebilmektedirler (Zhang *et al.* 2018; Qu *et al.* 2019). Böylece yeniden farklı ortamlara, farklı alıcı yüzeylerine geçişlerini tamamlamaktadırlar. Daha sonra bu alıcı ortamlardan da farklı yollar ile (deri, ağız, solunum yolu gibi) tekrardan canlı bünyesine girmesi ve canlılarda da istenmeyen zararlı etkilerini göstermesi (akut etkileri irritasyondan sistemik emilime bağlı olarak) neticesinde ölümcül vakalar ile sonuçlanabilmektedir (Saleem *et al.* 2014; Estellano *et al.* 2017). OCP'lerin vücutta ilk belirtileri nezle, grip, soğuk algınlığı gibi hastalıklara benzetilebilir. Aynı zamanda oldukça vücutta toksik etki gösterebilirler (He & Balasubramanian, 2009; Witzak *et al.* 2021; Sari & Esen, 2022). Ayrıca tarımsal bölgelerde bulunan işçiler diğer organize sanayi bölgelerinde çalışanlara kıyasla daha fazla tehlike altındadırlar. Yoğun maruziyet gen bozuklukları, endokrin bozuklukları gibi sistemsel bozukluklar ve kanser hastalığı ile sonuçlanan ölümcül vakalar görülebilmektedir (Sari *et al.* 2020; Rani *et al.* 2021). Bu denli zararlı olan bu bileşiklerin en tabii yollardan belirlenip yeni yöntemler ile de analizlenmesi elzem bir durum haline gelmiş bulunmaktadır.



Şekil 2. OCP'lerin Oluşum ve Dağılım Mekanizması

Bu bölümde, farklı ortamlarda bulunan ve oldukça toksik olan OCP'lerin analizlenmesinde, diğer bilim insanlarının yaygın olarak kullandıkları yöntemlere ek olarak daha yenilikçi yaklaşımlar sunulmaktadır. Böylece çağımız bilim insanlarının yeniden araştırması gereken OCP kirliliklerinin ana basamaklarını oluşturan örnekleme, laboratuvar çalışmaları ve analiz işlemlerinin daha pratik uygulamalar, daha net sonuçlar ve daha faydalı kullanım metotları ile detaylandırılarak tartışılmaktadır.

1. ARAZİ ÇALIŞMALARI

OCP'lerin atmosferik konsantrasyonlarını, yani hacimdeki kütesel miktarlarını belirlemek için önce örnekleme çalışmaları yapılmalıdır. Bu sıralamaya göre örnekleme çalışmalarından bir sonraki basamak olan laboratuvar çalışmalarına kadar başlıca dikkat edilmesi gereken hususlar için birtakım yöntemler sunulacak olursa; ilk olarak örneklemenin kent ortamında mı, yarı kırsal bir alanda mı, yoksa kırsal bir noktada mı yapılacağına dair net bir karar alınması gerekir. Ardından da örnekleme çalışmasının yaz, kış, ilkbahar, sonbahar ayları gibi mevsimsel mi çalışılacağına karar verilmelidir. Daha sonra örnekleme noktasının tam yeri bazı spesifik konulara (yüksek bina, ağaç, yol, trafikten uzaklık) dikkat edilerek belirlenmelidir. Örnekleme noktasına karar verildikten sonra çalışma aktif örnekleme yöntemi ile mi yapılacak, yoksa pasif örnekleme yöntemi ile mi yapılacak diye karar verilmelidir. Aktif örneklemede ise düşük hacimli ya da yüksek hacimli hava örnekleycisi mi kullanılacağına karar verilmelidir. Diğer taraftan pasif örnekleme için de çalışmanın tepeşlerde, kaplarda ya da Tisch cihazları gibi akredite olmuş cihazlarla mı örnekleme yapılacağına karar verilmelidir. Buraya

kadar olan kısımda örnekleme noktası ve örnekleme yöntemi seçimi ile alakalı konular detaylandırılmaktadır. Bundan sonraki kısımda ise araştırma konusu olan OCP'lerin sayısı ve hangi fazlarda (katı faz, sıvı faz, gaz fazı) örnek toplanacağına dair kararların alınmasına dikkat çekilmektedir.

Örneklemede yöntem belirlendikten sonra, çalışma konusuna göre de OCP'lerin hangi fazlarda (gaz fazı veya partikül fazı) araştırılacağı da alınması gereken diğer önemli kararlar arasındadır. Örnekleme işlemlerinden sonra ikinci kısım olan laboratuvar çalışmalarına dair ekstraksiyon basamaklarına geçilmelidir. Burada hangi fazda numune toplanacak ise o fazın ekstraktörü seçilerek deneysel çalışmalara devam edilmelidir. Deneysel yöntemde tüm araştırılan farklı fazlar hekzan gibi organik sıvı çözücü içerisine aktarılarak analiz kısmına hazır hale getirilmelidir. Daha sonra çalışmanın üçüncü basamağı olan analiz kısmına geçilmelidir.

Burada, önceden uygun metodlar ile hazırlanmış olan kromatografi cihazına numuneler belirli standartlarda verilerek, konsantrasyon hesaplama işlemleri gerçekleştirilmelidir. Bu amaçla, genellikle Gaz Kromatografi-Kütle Spektrofotometre (GC-MS) cihazı kullanılmaktadır. Bu cihazla analiz işlemleri tamamlanarak elde edilen veriler kütle/hacim olacak şekilde belirlenmelidir. Konunun daha detaylı anlaşılması için OCP'lerin örnekleme, laboratuvar çalışmaları ve analiz kısımları daha fazla yenilikçi yaklaşımlar ile açıklanarak sunulmaktadır.

1.1. Numune Alma Programı

OCP'lerin atmosferik konsantrasyonlarını belirlemede ilk yapılan çalışma örnekleme programı olup, oldukça önem arz etmektedir. Örnekleme kısaca aranılan bileşiğin aktif ya da pasif yöntemler ile uygun ortamlarda (filtre, köpük, çelik malzeme, vb.) tutulmasıdır (Cindoruk & Taşdemir, 2014; Navarro *et al.* 2019; Paloluoğlu & Bayraktar, 2022). Aranılan bileşik tutulurken de öncelikli olarak örnekleme noktasının yeri ve uygunluğu netleştirilmelidir. Ardından da örnekleme yapılacak alana hangi günler ve günün hangi saatlerinde gidilmesi gerektiği belirlenmelidir. Aynı zamanda örnekleme noktasına nasıl gidileceği, uygun hangi periyotlarda numunelerin alınacağı ve örneklemede kullanılacak tüm malzeme / ekipmanın gününden önce hazırlanması gibi bir takım örnekleme programı çalışmalara başlamadan önce yapılmalıdır.

1.2. Numune Alma Ekipmanları ve Yöntemleri

Atmosferik OCP'lerin arazi şartlarında türleri ve seviyelerinin belirlenebilmesi için farklı örnekleme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden en verimli aktif ya da pasif örneklemedir (Esen 2013; Ding *et al.* 2022). Diğer yöntemler (Uzaktan algılayıcılar, otomatik analizörler ve biyoindikatörler) ise hem maliyet hem de uzmanlık gerektiren konular içerdiğinden bireysel bilimsel çalışmalarda oldukça az tercih edilmektedir. Bu bölümde hem maliyet hem de çalışma kolaylığı sağlayan iki örnekleme yöntemi ve bunlara günümüz şartlarında uygulanabilecek yenilikçi mühendislik yaklaşımları ile detaylandırılacaktır. Bu amaçlar doğrultusunda arazide yapılacak olan OCP konsantrasyonlarının belirlenmesine yönelik ilk örnekleme şekli olan pasif örnekleme yöntemleri anlatılacaktır. Pasif örnekleme yöntemi, elektrik enerjisi kullanılmadan çalıştırılabilen hassaslığı aktif örnekleme cihazları kadar olmayan çalışma konusuna göre tasarlanan düşük maliyetli kap, kutu, tepsi, malzeme yüzeyi gibi örnekleycilerden oluşan bir örnekleme yöntemidir (Şekil 3). Örnekleme cihazları numunesi alınacak bileşiğe göre tasarlanırsa da Uluslararası arenada akredite kabul görmüş Tisch marka örnekleyci cihazları da bulunmaktadır (Şekil 3) (Gioia *et al.* 2005; Wu *et al.* 2020; Garcia-Solorio *et al.* 2022). Pasif örnekleyciler aynı zamanda atmosferik çökeltme örnekleme için partikül ve çözünmüş faz kirleticileri tutabildiği gibi çeşitli gaz fazların örnekleme için kullanılan örnekleyciler de bulunmaktadır (Şekil 3).

Özellikle OCP'lerin örnekleme için gaz fazlarının tutulması için ya havanın difüzyon akışından faydalanılır ya da cihaz içerisine yerleştirilen membranların fiziksel yapılarından dolayı rahatlıkla gaz fazı tutulmasından yararlanılabilir. Bu ölçülerde en etken faktörler meteorolojik parametrelerdir. Özellikle OCP'lerin gaz fazı örnekleme için difüzyon (OCP'lerin gaz fazlarının yüksek konsantrasyonlu bölgeden cihazın açık ucundan girip, düşük konsantrasyonlu olan cihazın içindeki adsorblayıcı filtre, membran ya da PUF (poli ürean köpük) tipi örnekleyciler kullanıldığında örnekleme esnasında rüzgâr yönü ve hızının kuvvetli olması örnekleme verimliliği açısından oldukça önemli olacaktır (Cindoruk 2011; Qu *et al.* 2015).

Pasif örnekleme yönteminin en önemli avantajı çalışmalarda kolaylık sağlaması ve de maliyeti oldukça düşük özel tasarlanabilen cihazlar ile

çalışılabilir olmasıdır. Dezavantajlı olduğu kısım ise uzun süreli periyotlarda yani haftalık, aylık gibi zaman aralıklarının ortalama veri akışı vermesi bu yöntemin daha az kullanımına sebep olmaktadır.



Şekil 3. Geleneksel ve Yenilikçi Pasif Örnekleyiciler

Bu bölümde hem yenilikçi yöntemler ile hem de literatürde kabul görmüş güncel atmosferik OCP'lerin gaz fazlarını ölçmek için kullanılan Tisch örnekleyicileri hakkında bilgi verilecektir (Şekil 4). Tisch'ler hem iç ortam havasını hem de dış ortam havasını ölçebilen literatürde son zamanlarda sıklıkla çalışılan örnekleyicilerdir (Şekil 3) (Gioia *et al.* 2005; Can-Güven *et al.* 2019). Tisch cihazlarında OCP'leri tutucu filtreler olarak Poli Üretan Köpükler (PUF: kalınlık 1,35 cm, çap 14 cm, yüzey alan 365 cm²) kullanılmaktadır. Tisch'ler öncelikle örnekleme noktasında direk ya da pencere gibi bölgelere, L çubuk kısmından yüksekte montajı yapılır.

Dış ortam havası için içerisine açılır kapağı sayesinde PUF filtre yerleştirilir. İç ortam havasında ise direk orta kısma PUF yerleştirilebilir.

Böylece günlük ortalama 3-4 m³ hava emişi ile PUF'lara difüze olan hava akımları sayesinde iç ya da dış ortam atmosferik OCP'lerin gaz fazları PUF kısmında tutulabilmektedir. Tamamıyla havanın difüzyon etkisi ile gaz faz OCP'ler günlük ya da haftalık olarak tutulmaktadır (Mari *et al.* 2008; Cordoba-Gamboa *et al.* 2020). Örnekleme boyunca kirlenen PUF filtreleri ile temizleri yer değiştirilerek toplanan numunelik PUF'lar saklama kaplarına alınıp laboratuvara getirilir. Numuneler -18°C sıcaklıktaki buzdolaplarında laboratuvar çalışmalarına kadar muhafaza edilmelidir.

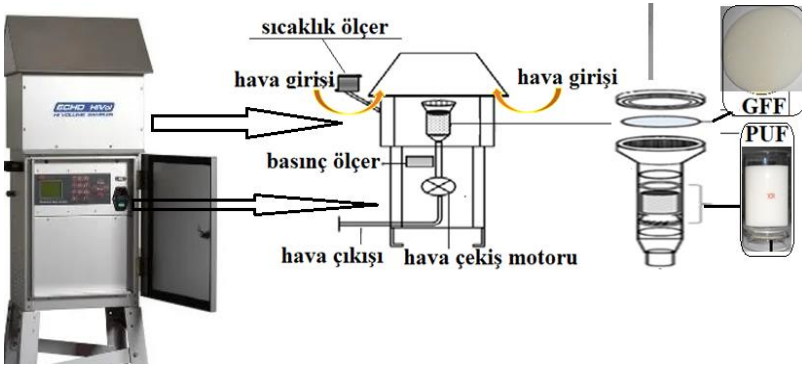
OCP'lerin atmosferik konsantrasyonlarını belirlemede güncel olarak kullanılan diğer bir örnekleme yöntemi ise aktif örneklemedir. Aktif örneklemede, elektrik enerjisi kullanan yüksek ya da düşük hacimli hava örnekleyicileri kullanılmaktadır (Paloluoğlu 2016; Paloluoğlu & Bayraktar, 2022). Bu cihazlara yerleştirilen filtre ve PUF'lardan atmosferik hava akımları geçmesi için belirli bir güçte hava vakumu yapan pompalar bulunmaktadır. Bu sayede yüksek vakumla çekilen hava, filtre ortamından geçerek OCP'lerin partikül fazları tutulmaktadır. Aynı zamanda filtreden alt bölmeye doğru emişi yapılan bu hava PUF ortamından da geçerek OCP'lerin gaz fazlarını yakalamaktadır. Cihazlar çalışırken hava emişi ne kadar fazla olursa örnekleme hassasiyeti de o kadar yüksek olmaktadır. OCP'lerin örneklemede yenilikçi yaklaşım yöntemi olarak yüksek hacimli hava örnekleyici cihazları tavsiye edilmektedir (Şekil 4).

Günlük çekilen hava hacmi ve çalışma süresi dijital gösterge panelinden kolaylıkla ayarlanması hem örnekleme doğruluğunu hem de sonuçların hassasiyetini doğrudan etkilemektedir. Diğer taraftan aktif örneklemede kullanılan yüksek hacimli hava örnekleyicileri günlük 50-500 m³ hava emişi yapabilirken, düşük hacimli hava örnekleyiciler ise yaklaşık 25-50 m³ hava emişi yapabilmektedirler. Bu bölümde, yenilikçi yaklaşımlar açısından en sık kullanılacak cihaz yüksek hacimli hava örnekleyicilerinden olan (YHHÖ: Hi-Vol) Thermo-Andersen, GPS 11 model olan TCR-Tecora marka ile düşük hacimli hava örnekleyicisi olan (DHHÖ: Low-Vol) TCR-Tecora partikül ölçer olan aktif örnekleyicisi cihazları anlatılarak detaylandırılacaktır. YHHÖ cihazı iki önemli kısımdan oluşmaktadır.

Birinci kısım hava emişi yapan pompa motoru ve ikinci kısım ise OCP'lerin tutulmasını sağlayan filtre ve köpük kısımlarıdır. Kullanılan motor günlük 500 m³'e kadar hava emişi yapan yüksek kapasiteli bir motordan

oluşmaktadır. Diğer kısımda ise özellikle OCP'lerin partikül fazını tutan cam fiber filtre (GFF) bölmesi yer alırken, onun hemen alt kısmında ise OCP'lerin gaz fazını tutan PUF kısmı bulunmaktadır (Paloluoğlu & Bayraktar, 2022). Örnekleme esnasında cihazın baca kısmı açılarak ikinci kısım aparatı yerinden sökülür. Üst kısım yaklaşık 10 cm çaplı ve vidalı kapaktan oluşmaktadır. Bu bölüme GFF yerleştirilir ve araya uygun silikon conta ile sıkıştırılır. Diğer gaz fazını tutacak bölmede yine aynı mantıkla açılır PUF köpük bir cam muhafaza içinde hazneye yerleştirilerek vidası sıkılıp yerine montajı yapılır. Cihaz istenilen süre ve hacimde çalışacak şekilde dijital panelden ayarlanıp start tuşu ile çalıştırılmaya başlanır.

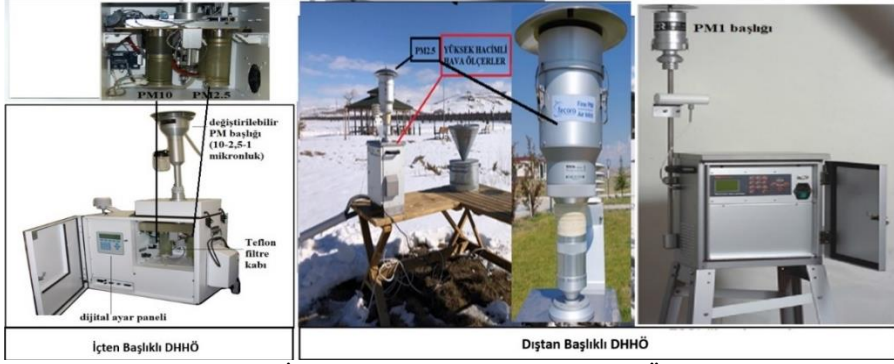
Cihaz ortalama 1 dakikalık ilk çalışma periyodunda sabit emişli hava hacmine kendini ayarlar. Ardından da çekilen hava cihazın üst kapağın yan aralıklarından girerek önce GFF'den geçer ardından da PUF'dan geçerek nihai olarak en son çıkış hortumu ile hava sirkülasyonu sağlanmış olur. Böylece OCP'lerin partikül fazları üst kısım olan GFF'de tutulmaktadır.



Şekil 4. YHHÖ ve GFF ile PUF Kesiti

Gaz fazları da GFF bölmesinin altında kalan PUF'da toplanmaktadır. YHHÖ'si çalışma süresini tamamladıktan sonra OCP açısından kirlenmiş GFF ve PUF'lar alınır ve yerlerine temiz GFF ve PUF'lar yerleştirilir. Alınan örneklenmiş GFF ve PUF'lar uygun koruyucu kaplara yerleştirilerek en kısa sürede laboratuvar ortamına taşınmalıdır. Burada da ekstraksiyon deneylerine kadar OCP'lerin uçucu bileşikleri olduğu düşünülerek soğuk buzdolabı (-18°C) ortamında bekletilmelidir. Ayrıca YHHÖ, GFF ve PUF kısımlarını ve kesitlerini Şekil 4'de detaylı bir şekilde görselleştirilmiştir.

Diğer taraftan, düşük hacimli hava örnekleyici (DHHÖ) cihazları ve çalışma mantığı incelenecek olursa; bu cihazlarda genellikle düşük hacimde hava emiş yaptıklarından farklı boyuttaki atmosferik toplam askıda katı maddelerin (TSP: PM₁₀, PM_{10-2,5}, PM_{2,5} ve PM₁) ve kalıcı organik kirleticilerin (KOK: OCP, PAH, PCB, vb.) tutulmasını sağlamaktadır. DHHÖ cihazlarının bünyesinde bulundurdukları PM₁₀ ve PM_{2,5} başlıkları sayesinde partikül boyutlarına göre ayrı ayrı boyutlardaki PM'ler tutulabilmektedir. Bazı DHHÖ cihazları iç bölmelerinde yer alan PM₁₀ ve PM_{2,5} başlıkları sayesinde 10 mikro metre ve 10 mikro metrenin altındaki partikül fazları yaklaşık 50 mm'lik teflon filtreleri üzerinde toplarken, bazı DHHÖ cihazları da dış kısımlarında bulunan PM₁₀ ve PM_{2,5} başlıkları sayesinde teflon filtrelerde PM'leri ve partikül faz OCP'ler tutulabilmektedir (Şekil 5). DHHÖ cihazlarının içten başlıklı olanları minimum 10 adet filtre oto sampler kısmına takıldığından örneklemede kirli filtreler ile yenileri 10 günlük zaman aralıklarında değiştirilebilmektedir. Ayrıca dıştan başlıklı olan DHHÖ cihazları ise YHHÖ'sinde olduğu gibi 24 saatte bir filtre değiştirilmelidir. Alınan kirlenmiş filtreler uygun taşıma kaplarında günlük ya da 10 günde bir olacak şekilde yine laboratuvar ortamına taşınarak buzdolabında muhafaza edilmelidir. Bu yüksek ve düşük hava örnekleyicileri için yenilikçi bir yaklaşımla partikül boyutlarına göre onlara adsorblanmış element, metal ve analizleri de başarılı bir şekilde yapılabilmektedir. Böylece 1 cihazda ve bir çalışmada farklı boyutlardaki partikül maddelere bağlanmış OCP, ağır metal ve benzeri bileşikler aynı anda çalışılabilir. Ağır metaller, yoğunlukları 5 g.cm⁻³'ten fazla olan metaller olup doğada en yaygın olanları Bakır, Kurşun, Arsenik, Civa, Çinko, Krom, Nikel, Kadmiyum, Mangan, Molibden ve Selenyum olan elementlerdir (Kul *et al.* 2023).



Şekil 5. İçten ve Dıştan PM Başlıklı DHHÖ'leri

Atmosferik OCP'lerin ister aktif, isterse de pasif örnekleme ile belirlenmesinde yenilikçi, pratik, verimliliği artıran ve hassasiyet açısından da yoğun bir şekilde çalışılmış YHHÖ veya DHHÖ'ler tercih edilmektedir. Bu açıdan bir çok dünya ülkesinin bilim insanları tarafından tercih edilen Thermo Andersen, GPS 11 model olan TCRTecora marka YHHÖ ve DHHÖ cihazlarından faydalanılmaktadır. Bu cihazlar pratikte çalışma süresini, ortam meteorolojik parametrelerini, tarih bilgilerini kaydedip kullanıcıya geriye dönük çalışmalarında kolaylıklar sağlamaktadır. Ayrıca kış mevsiminde cihazın donmadan çalışabilmesi için de ayrı bir tuşlama ile çalışan ısıtıcı paneli mevsimsel çalışmaların önünü de açmış bulunmaktadır. Bu ve benzeri örnekleyiciler kullanıcı ihtiyaçlarına göre yenilenip güncelleştirildikçe bilim insanlarının da hem çalışma azmini artıracaktır hem de kısa sürede bir çok fonksiyonel işleri tamamlama açısından başarı sağlanacaktır.

2. LABORATUAR ÇALIŞMALARI

Atmosferik OCP'lerin örnekleme işlemleri tamamlandıktan sonra, çalışmanın ikinci basamağı olan laboratuvar ortamında ekstraksiyon deneylerinin yapılmasına geçilmektedir. Ekstraksiyon basamakları başta hangi fazda OCP örnekleme yapılmış ise, yapılan bu fazdan organik çözücü ortamına (sıvı faz) aktarılma işlemleri gerçekleştirilmelidir. OCP'ler eğer atmosferik aktif ya da pasif örnekleme ile yapılmış ise OCP'lerin hem partikül hem de gaz fazları bu vesileyle toplanmış olur. Ekstraksiyon deneylerinde de

partikül olanlar katı-sıvı faz ekstraksiyon basamakları uygulanır. OCP'lerin gaz fazlarına ise gaz-sıvı faz ekstraksiyon basamakları uygulanır. Eğer OCP'lerin örneklemeinde özellikle çökeltme konsantrasyonu ya da akı hesaplamaları yapılmış ise toplanan örnek yağmur suyu ya da kar suyu olabilir. Bu durumda yağmur suyu ya da kar suyu örneklerine de sıvı-sıvı faz ekstraksiyon basamakları uygulanır (Gaga 2004; Cindoruk & Taşdemir, 2007).

Aynı zamanda OCP'lerin fazlar arası geçişleri netleştirildikten sonra Şekil 6'da da belirtildiği gibi her faz geçişleri için uygun ekstraktör cihazları kullanılmalıdır. Katı-sıvı faz için ultrasonik banyo ekstraktörü, sıvı-sıvı faz için vakum filtrasyonu ve ultrasonik banyo ekstraktörü, gaz-sıvı faz için de sokshlet ekstraktörü kullanılmaktadır. Her bir faz için ilk basamak ekstraktöre numunelerin yerleştirilmesi ve de her numune üzerine geri kazanım hesaplamaları yapılması için uygun OCP surrugate miks standartları katılması gerekmektedir (Sofuoğlu *et al.* 2004; Esen 2013). Daha sonra her bir faz geçişleri için hacim azaltma yöntemleri ile her bir numune hekzan çözücüsü ile zenginleştirilmelidir (Şekil 6).

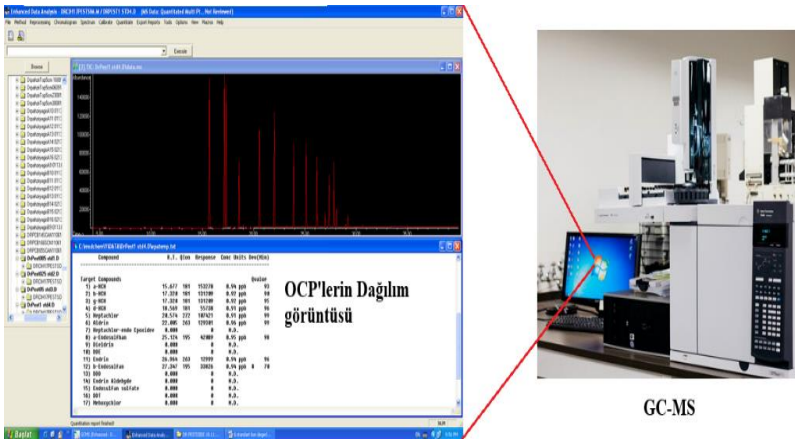
Bu basamakta tamamlandıktan sonra ekstraksiyon deneylerinin ikinci önemli kısmı olan numunelerin temizleme işlemlerinin yapıldığı "clean-up" basamaklarına geçilmelidir. Bu basamakta da hacmi azaltılmış numuneler direkt clean-up kolonundan geçirilerek fraksiyon ayırımı işlemleri yapılmaktadır (Cindoruk 2011; Jantunen *et al.* 2000). OCP numunelerinin clean-up işlemlerinden sonra, analizden önceki son basamak olan %99,99 saflıkta azot gazı altında üç tekrarlı olarak hacim azaltıp yine hekzan çözücüsü ile zenginleştirme işlemleri yapılmalıdır. Nihai olarak 2,5 mL'lik cam viallerin içine alınan numuneler GC-MS cihazında analiz işlemlerine tabi tutulmalıdır. Bu yöntemler ile anlatılan ekstraksiyonun bu uygulama şekli güncel olarak hem pratik hem de yenilikçi yöntemler ile geliştirilmiş metodlar uygulanmaktadır (Şekil 6).



Şekil 6. Farklı Fazlardaki Ekstraksiyonun Temel Basamakları

3. NUMUNELERİN ANALİZ İŞLEMLERİ

Atmosferik OCP'lerin örnekleme ve ekstraksiyon işlemleri tamamlandıktan sonra, konsantrasyon hesaplamaları için GC-MS cihazında analiz işlemlere başlanılmaktadır. Analize geçmeden önce GC-MS'de uygun metot ve fırın programları yapılır. Kalibrasyon eğrilerinde r^2 : 0,99 olacak şekilde grafikler seçilir. Daha sonra cihazın otomatik örnekleyici kısmına numuneler yerleştirilerek, belirlenen her bir OCP numunesi için geçerli sürelerde analiz işlemleri başlatılır (Şekil 7) (Odabaşı 1999; Taşdemir *et al.* 2014).



Şekil 7. GS-MS Analiz Cihazı

Diğer taraftan GC-MS cihazında analiz işlemlerine geçmeden önce Tablo 1'deki gibi gerekli malzeme ve ekipmanların istenilen ölçüde hazırlanması gerekmektedir. Özellikle kapiler kolon belirtilen boyutlarda seçilmelidir. Ayrıca fırın sıcaklık programı da deneme yanılma yöntemiyle elde edilen en iyi sıcaklık artış programları EPA Metod 8082A ve literatür çalışmalarından ya da kabul gören standart metotlardan faydalanılarak belirlenmelidir. Ayrıca taşıyıcı gaz olarak ultra saf helyum kullanılmalıdır (Tablo 1) (Tasdemir *et al.* 2014; Paloluoğlu, 2016; Sari *et al.* 2020).

Tablo 1. GC-MS Fırın Sıcaklığı ve Çalışma Parametreleri

Parametreler	Açıklamalar
GC kolonu	30 m x 250 µm x 0,25 µm nominal film kalınlık, %5 Phenyl Methyl Siloxane, HP 5MS, capillary Kolon
Liner	Deaktive edilmiş cam pamuklu Splitless cam liner (Agilent Tec.)
Taşıyıcı gaz	Ultra saf Helyum, %99,999, 1mL/dak
Enjeksiyon tipi	Splitless
Enjeksiyon portu sıcaklığı	280°C
Fırın sıcaklığı	25°C/dak ile 140°C'ye, 3°C/dak ile 260°C'ye, 8°C/dak ile 290°C'ye çıkış ve 6 dak 290°C'de bekletme
Enjeksiyon hacmi	1 µL
Kütle spektrometresi (MS)	Elektron impact, 70 eV
MS quadropol sıcaklığı	160°C
MS kaynak sıcaklığı	240°C

Ayrıca GC-MS'de analiz işlemlerine geçmeden öncede atmosferik OCP'ler için bezline hattına OCP türlerinin geliş zamanları, seçilen ana iyonlar, kalibrasyon çalışma aralıkları ve kalibrasyon eğrilerine ait regresyon katsayılarını belirleyecek bir çalışma gerçekleştirilmelidir (Tablo 2).

Tablo 2. GC-MS Kalibrasyon Parametreleri

OCP Bileşenleri	Geliş Zamanı (dak)	Maks. İyon	Lineer Aralık (ppb)	Regresyon Katsayısı (r^2)
Alpha-HCH	15,72	181	0,01-25	0,99998
Beta-HCH	17,37	181	0,01-25	0,99989
Gamma-HCH	17,37	181	0,01-25	0,99999
Delta-HCH	18,57	181	0,01-25	0,99989
Heptachlor	20,54	272	0,01-25	0,99989
Aldrin	21,97	263	0,01-25	0,99999
Heptachlor-endo Epoxidee	22,37	183	0,01-25	0,99999
Alpha-Endosulfan	25,22	195	0,01-25	0,99889
Dieldrin	26,30	246	0,01-25	0,99998
DDE	26,50	246	0,01-25	0,99999
Endrin	27,01	263	0,01-25	0,99989
Beta-Endosulfan	27,40	195	0,01-25	0,99989
DDD	29,45	235	0,01-25	0,99988
Endrin Aldehyde	31,98	345	0,01-25	0,99985
Endosulfan sulfat	34,36	308	0,01-25	0,99989
DDT	35,60	295	0,01-25	0,99999
Mehoxychlor	37,70	227	0,01-25	0,99999

Analiz işlemlerinin hassasiyeti için yukarıda da belirtilen tüm çalışmalar sırası ile kromatografik cihazına uygulandıktan sonra, GC-MS cihazında numuneler okutulmuş analiz işlemleri gerçekleştirilmelidir. Aynı zamanda analiz sonucunda elde edilen verilerin güvenliği açısından bir takım matematiksel işlemler yapılmalıdır.

Bunların başında da geri kazanım (recover) işlemleri gelmektedir (Cindoruk ve Taşdemir 2014). Buradaki amaç ise malzemedeki, insan elinden ya da cihazdan kaynaklı olabilecek OCP kirlilik girdilerini netleştirerek analiz sonucu bulunan konsantrasyon değerlerinden çıkartılarak net OCP miktarlarının tespit edilmesidir. Böylece yenilikçi bir yaklaşımla sonuçların daha doğru ve güvenilirliği sağlanmış olacaktır.

Kalıcı organik kirleticilerden olan OCP'ler kanserojenik ve toksik etkilerinden dolayı çağımızın önemli araştırma konuları arasında yer almaktadır. Literatürde yapılan birçok çalışma incelendiğinde yapılan çalışmaların farklı bölgelerde (Kentsel, yarı kentsel, kırsal, okyanus bölgesi, bitki örtüsü yüzeyi, vb.), farklı örnekleme yöntemleri ile (aktif, pasif, uzaktan algılayıcılar, biyoindikatörler, reseptörler, sensörlerli örnekleyciler, vb.), farklı elektrikli ya da elektriksiz cihazlar kullanılarak birçok basamaktan oluşan

çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Daha sonra sonuçların eldesi içinde eğer çalışma atmosferik ortam örnekleme ise pg.m^{-3} , su ortamı örnekleme ise pg.L^{-1} , toprak ortamı örnekleme ise de pg.g^{-1} gibi çok eser miktarlardaki birimlerde nihai konsantrasyon, çökelme konsantrasyonu, akı ($\text{pg m}^{-2} \text{gün}^{-1}$) olarak dalar elde edilmektedir. Sonuç olarak atmosferik OCP'lerin bu denli uzun, zahmetli ve maliyetli çalışmalarının ele alınan yenilikçi yaklaşımlar ile, birazda olsa güncel çağımızın teknolojik ekipmanlarından faydalandırılarak, kısa zamanlı, daha az zahmetli ve daha düşük maliyetli çalışmalar elde etmek için bu bölümde bir takım güncel yaklaşımlar ile destek verilmeye çalışılmıştır. Ayrıca bu bölümde, atmosferik OCP'lerin konsantrasyonlarının belirlenmesinde, çalışılması gereken örnekleme, ekstraksiyon ve analiz işlemlerinin tümünde örnekleme noktası seçiminde, ekstraksiyon basamaklarının pratikleştirilip özetlenmesinde ve hatta hangi analiz cihazının hangi parametrelerinin nasıl yapılıp nasıl daha kolaylaştırılmasına dair bilim insanlarına farklı açılardan rehberlik edip hem destek olması, hem de tespit edilecek OCP konsantrasyon verilerinin daha güvenilir, doğru ve net sonuçlar alması bakımından katkı sağlandığına inanılmaktadır.

KAYNAKÇA

- Ali, U., Syed, J. H., Malik, R. N., Katsoyiannis, A., Li, J., Zhang, G., & Jones, K. C. (2014). Organochlorine pesticides (OCPs) in South Asian region: a review. *The Science of the Total Environment*, 476–477, 705–717.
- Caliskan, B., Küçük, A., Tasdemir, Y., & Cindoruk, S. S. (2020). PAH levels in a furniture-manufacturing city atmosphere. *Chemosphere*, 240(124757), 124757.
- Can-Güven, E., Gedik, K., & Kurt-Karakuş, P. B. (2019). Polyurethane foam disk passive sampler derived air concentrations of persistent organic pollutants in an agricultural region with hot climate. *Atmospheric Pollution Research*, 10(6), 1913–1920.
- Chen, D., Grimsrud, T. K., Langseth, H., Barr, D. B., Bassig, B. A., Blair, A., Cantor, K. P., Gammon, M. D., Lan, Q., Rothman, N., & Engel, L. S. (2020). Prediagnostic serum concentrations of organochlorine pesticides and non-Hodgkin lymphoma: A nested case-control study in the Norwegian Janus Serum Bank Cohort. *Environmental Research*, 187(109515), 109515.
- Chen, L., Feng, Q., He, Q., Huang, Y., Zhang, Y., Jiang, G., Zhao, W., Gao, B., Lin, K., & Xu, Z. (2017). Sources, atmospheric transport and deposition mechanism of organochlorine pesticides in soils of the Tibetan Plateau. *The Science of the Total Environment*, 577, 405–412.
- Cindoruk, S. Sıddık. (2011). Atmospheric organochlorine pesticide (OCP) levels in a metropolitan city in Turkey. *Chemosphere*, 82(1), 78–87.
- Cindoruk, S. Sıddık, Sakin, A. E., & Tasdemir, Y. (2020). Levels of persistent organic pollutants in pine tree components and ambient air. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 256(113418), 113418.
- Córdoba Gamboa, L., Solano Diaz, K., Ruedert, C., & van Wendel de Joode, B. (2020). Passive monitoring techniques to evaluate environmental pesticide exposure: Results from the Infant's Environmental Health study (ISA). *Environmental Research*, 184(109243), 109243.
- Cindoruk, S. Sıddık, & Tasdemir, Y. (2007). Deposition of atmospheric particulate PCBs in suburban site of Turkey. *Atmospheric Research*, 85(3–4), 300–309.

- Cindoruk, S. Siddık, & Tasdemir, Y. (2014). The investigation of atmospheric deposition distribution of organochlorine pesticides (OCPs) in Turkey. *Atmospheric Environment (Oxford, England: 1994)*, 87, 207–217.
- Ding, Y., Huang, H., Chen, W., Zhang, Y., Chen, W., Xing, X., & Qi, S. (2022). Background levels of OCPs, PCBs, and PAHs in soils from the eastern Pamirs, China, an alpine region influenced by westerly atmospheric transport. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 115, 453–464.
- Esen, Fatma. (2013). Development of a passive sampling device using polyurethane foam (PUF) to measure polychlorinated biphenyls (PCBs) and organochlorine pesticides (OCPs) near landfills. *Environmental Forensics*, 14(1), 1–8.
- Estellano, V. H., Pozo, K., Příbylová, P., Klánová, J., Audy, O., & Focardi, S. (2017). Assessment of seasonal variations in persistent organic pollutants across the region of Tuscany using passive air samplers. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 222, 609–616.
- Gaga, E. O. (2004). Investigation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) Deposition in Ankara The Graduate School of Natural and Applied Sciences.
- García-Solorio, L., Muro, C., De La Rosa, I., Amador-Muñoz, O., & Ponce-Vélez, G. (2022). Organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in high mountain lakes, Mexico. *Environmental Science and Pollution Research International*, 29(32), 49291–49308.
- Gioia, R., Offenbergl, J. H., Gigliotti, C. L., Totten, L. A., Du, S., & Eisenreich, S. J. (2005). Atmospheric concentrations and deposition of organochlorine pesticides in the US Mid-Atlantic region. *Atmospheric Environment (Oxford, England: 1994)*, 39(12), 2309–2322.
- Guida, Y., Carvalho, G. O. de, Capella, R., Pozo, K., Lino, A. S., Azeredo, A., Carvalho, D. F. P., Braga, A. L. F., Torres, J. P. M., & Meire, R. O. (2021). Atmospheric occurrence of organochlorine pesticides and inhalation cancer risk in urban areas at southeast Brazil. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 271(116359), 116359.
- Gungormus, E., Sofuoglu, A., Celik, H., Gedik, K., Mulder, M. D., Lammel, G., Sofuoglu, S. C., Okten, E., Ugranli, T., Birgul, A., Jones, K. C., & Kurt-Karakus, P. B. (2021). Selected persistent

- organic pollutants in ambient air in Turkey: Regional sources and controlling factors. *Environmental Science & Technology*, 55(14), 9434–9443.
- He, J., & Balasubramanian, R. (2009). A study of gas/particle partitioning of SVOCs in the tropical atmosphere of Southeast Asia". *Atmospheric Environment*, 43, 4375–4383.
- Jantunen, L. M. M., Bidleman, T. F., Harner, T., & Parkhurst, W. J. (2000). Toxaphene, chlordane, and other organochlorine pesticides in Alabama air. *Environmental Science & Technology*, 34(24), 5097–5105.
- Jayaraj, R., Megha, P., & Sreedev, P. (2016). Organochlorine pesticides, their toxic effects on living organisms and their fate in the environment. *Interdisciplinary Toxicology*, 9(3–4), 90–100.
- Kul, S., Gül, V., & Cengiz, İ. (2021). Toprak ve Bitkilerde Ağır Metal Kirliliğinin Araştırılması: Bayburt İli Örneği. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, Year: 6, No: 2, 2021 (195–203).
- Kalina, J., White, K. B., Scheringer, M., Příbylová, P., Kukučka, P., Audy, O., Martiník, J., & Klánová, J. (2022). Comparability of semivolatile organic compound concentrations from co-located active and passive air monitoring networks in Europe. *Environmental Science. Processes & Impacts*, 24(6), 898–909.
- Kang, Y., Zhang, R., Yu, K., Han, M., Wang, Y., Huang, X., Wang, R., & Liu, F. (2022). First report of organochlorine pesticides (OCPs) in coral tissues and the surrounding air-seawater system from the South China Sea: Distribution, source, and environmental fate. *Chemosphere*, 286(Pt 2), 131711.
- Luo, Y., Yang, R., Li, Y., Wang, P., Zhu, Y., Yuan, G., Zhang, Q., & Jiang, G. (2019). Accumulation and fate processes of organochlorine pesticides (OCPs) in soil profiles in Mt. Shergyla, Tibetan Plateau: A comparison on different forest types. *Chemosphere*, 231, 571–578.
- Llanos, Y., Cortés, S., Martínez, A., Pozo, K., Příbylová, P., Klánová, J., & Jorquera, H. (2022). Local and regional sources of organochlorine pesticides in a rural zone in central Chile. *Atmospheric Pollution Research*, 13(5), 101411.
- Mari, M., Schuhmacher, M., Feliubadaló, J., & Domingo, J. L. (2008). Air concentrations of PCDD/Fs, PCBs and PCNs using active and passive air samplers. *Chemosphere*, 70(9), 1637–1643.

- Navarro, I., de la Torre, A., Sanz, P., Arjol, M. A., Fernández, J., & Martínez, M. A. (2019). Organochlorine pesticides air monitoring near a historical lindane production site in Spain. *The Science of the Total Environment*, 670, 1001–1007.
- Odabasi, M., Sofuoglu, A., Vardar, N., Tasdemir, Y., & Holsen, T. M. (1999). Measurement of dry deposition and airewater exchange of polycyclic aromatic hydrocarbons with the water surface sampler. *Environ. Sci. Technol.*, 33, 426-e434.
- Ontiveros-Cuadras, J. F., Ruiz-Fernández, A. C., Sanchez-Cabeza, J.-A., Sericano, J., Pérez-Bernal, L. H., Páez-Osuna, F., Dunbar, R. B., & Mucciarone, D. A. (2019). Recent history of persistent organic pollutants (PAHs, PCBs, PBDEs) in sediments from a large tropical lake. *Journal of Hazardous Materials*, 368, 264–273.
- Paloluoğlu, C. (2016). Determination of Concentrations of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Different Environments Using Various Sampling Methods in Erzurum. Atatürk Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi, Erzurum.
- Paloluoğlu, Cihan, & Bayraktar, H. (2022). Determination of the gas/particle phase concentrations of PCBs in urban and rural atmosphere in Erzurum, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(10), 779.
- Paloluoğlu, Cihan, Bayraktar, H., Aktan, M., Turalioglu, F. S., & Gaga, E. E. (2016). Atmospheric concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in an urban traffic site in Erzurum, Turkey. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment: Research Journal*, 30(4), 1223–1234.
- Pozo, K., Harner, T., Lee, S. C., Wania, F., Muir, D. C. G., & Jones, K. C. (2009). Seasonally resolved concentrations of persistent organic pollutants in the global atmosphere from the first year of the GAPS study. *Environmental Science & Technology*, 43(3), 796–803.
- Qu, C., Albanese, S., Lima, A., Hope, D., Pond, P., Fortelli, A., Romano, N., Cerino, P., Pizzolante, A., & De Vivo, B. (2019). The occurrence of OCPs, PCBs, and PAHs in the soil, air, and bulk deposition of the Naples metropolitan area, southern Italy: Implications for sources and environmental processes. *Environment International*, 124, 89–97.
- Qu, C., Xing, X., Albanese, S., Doherty, A., Huang, H., Lima, A., Qi, S., & De Vivo, B. (2015). Spatial and seasonal variations of atmospheric organochlorine pesticides along the plain-mountain transect in central China: Regional source vs. long-range transport

- and air–soil exchange. *Atmospheric Environment (Oxford, England: 1994)*, 122, 31–40.
- Rani, L., Thapa, K., Kanojia, N., Sharma, N., Singh, S., Grewal, A. S., Srivastav, A. L., & Kaushal, J. (2021). An extensive review on the consequences of chemical pesticides on human health and environment. *Journal of Cleaner Production*, 283(124657), 124657.
- Sakin, A. E., Mert, C., & Tasdemir, Y. (2023). PAHs, PCBs and OCPs in olive oil during the fruit ripening period of olive fruits. *Environmental Geochemistry and Health*, 45(5), 1739–1755.
- Saleem, U., Ejaz, S., Ashraf, M., Omer, M. O., Altaf, I., Batool, Z., Fatima, R., & Afzal, M. (2014). Mutagenic and cytotoxic potential of Endosulfan and Lambda-cyhalothrin - in vitro study describing individual and combined effects of pesticides. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 26(7), 1471–1479.
- Sari, M. F., & Esen, F. (2022). Atmospheric concentration, spatial variations, and source identification of persistent organic pollutants in urban and semi-urban areas using passive air samplers in Bursa, Turkey. *Environmental Science and Pollution Research International*, 29(21), 32082–32092.
- Sari, M. F., Esen, F., Cordova Del Aguila, D. A., & Kurt Karakuş, P. B. (2020). Passive sampler derived polychlorinated biphenyls (PCBs) in indoor and outdoor air in Bursa, Turkey: Levels and an assessment of human exposure via inhalation. *Atmospheric Pollution Research*, 11(6), 71–80.
- Sauret, N., Wortham, H., & Putaud, J. P. (2008). Mirabel Study of effects of environmental parameters on the gas/particle partitioning of current use pesticides in urban air *Atmos. Environ.*, 42, 544–553.
- Sofuoglu, Aysun, Cetin, E., Bozacioglu, S. S., Sener, G. D., & Odabasi, M. (2004). Short-term variation in ambient concentrations and gas/particle partitioning of organochlorine pesticides in Izmir, Turkey. *Atmospheric Environment (Oxford, England: 1994)*, 38(27), 4483–4493.
- Tasdemir, Y., Vardar, N., Odabasi, M., & Holsen, T. M. (2004). Concentrations and gas/particle partitioning of PCBs in Chicago. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 131(1), 35–44.

- Wang, D., Ma, H., Chen, Z., & Shi, G. (2022). Occurrences and possible sources of persistent organic pollutants (POPs) in ice-free area soils in East Antarctica. *Catena*, 212(106083), 106083.
- Witczak, A., Pohoryło, A., & Abdel-Gawad, H. (2021). Endocrine-disrupting organochlorine pesticides in human breast milk: Changes during lactation. *Nutrients*, 13(1), 229.
- Wu, X., Chen, A., Yuan, Z., Kang, H., & Xie, Z. (2020). Atmospheric organochlorine pesticides (OCPs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in the Antarctic marginal seas: Distribution, sources and transportation. *Chemosphere*, 258(127359), 127359.
- Wu, Z., Lin, T., Hu, L., Guo, T., & Guo, Z. (2020). Atmospheric legacy organochlorine pesticides and their recent exchange dynamics in the Northwest Pacific Ocean. *The Science of the Total Environment*, 727(138408), 138408.
- Yu, S. Y., Liu, W. J., Xu, Y. S., Zhao, Y. Z., Cai, C. Y., Liu, Y., Wang, X., Xiong, G. N., Tao, S., & Liu, W. X. (2019). Organochlorine pesticides in ambient air from the littoral cities of northern China: Spatial distribution, seasonal variation, source apportionment and cancer risk assessment. *The Science of the Total Environment*, 652, 163–176.
- Zhang, H., Watts, S., Philix, M. C., Snyder, S. A., & Ong, C. N. (2018). Occurrence and distribution of pesticides in precipitation as revealed by targeted screening through GC-MS/MS. *Chemosphere*, 211, 210–217.

BÖLÜM 7

GELECEĞİN MALZEMESİ KOMPOZİTLER

Doç. Dr. Fatma EKMEKYAPAR TORUN^{1*}

Prof. Dr. Beyhan KOCADAĞİSTAN²

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10445653>

^{1*} Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 25240, Erzurum, Türkiye. (fyapar@atauni.edu.tr). ORCID ID: 0000-0002-2289-176X.

¹ Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 25240, Erzurum, Türkiye. (bkocadagistan@atauni.edu.tr). ORCID ID: 0000-0001-5483-6119.

GİRİŞ

İnsanlar, çok eski zamanlardan beri kullandıkları malzemeleri güçlendirmeye çalışmış ve bu amaçla kırılğan malzemelerin içerisine hayvansal veya bitkisel kaynaklı lifler eklemiştir. Bilinen en eski kompozit malzemelerden biri olan kerpiç, çamur ve samanın karıştırılmasıyla elde edilen kırsal kesimlerde halen kullanılan bir yapı malzemesidir. Modern yaşantıya geçişle birlikte sağlamlığı ve dayanıklılığı nedeniyle tercih edilen yapı malzemesi beton ise en önemli kompozit malzeme örneklerindedir. Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle endüstriler hafif, dayanımı yüksek ve daha özellikli malzemelere ihtiyaç duymaktadırlar. Kompozitler, geleneksel ve özel üretim yöntemlerine uygunluğu nedeniyle tekstil, otomotiv, denizcilik, havacılık ve savunma sanayinde sıklıkla kullanılmaktadırlar. Kompozit malzemeleri üretmedeki amaç, rijitlik, tokluk, elektriksel ve ısı iletkenlik, ses yalıtımı, korozyona dayanım, ekonomiklik ve estetik görünüm gibi ihtiyaçları malzemeye kazandırabilmektir. Kompozit malzemelere kendini oluşturan bileşen malzemelerin özelliklerinden ayrı ihtiyaca ve isteğe göre yeni özellikler kazandırılabilir veya kompozitin özellikleri artırılıp azaltılabilir. Bu malzemelerin kullanıldığı üretimlerde parça sayısında azalma, düşük enerji ve iş gücü sarfiyatı sağlanmaktadır. Kompozit malzemeler, pek çok endüstriyel sektörde çevre yükü ve performans gibi çeşitli yönlerden de değerlendirilmekte ve çevre dostu malzemelerden üretilen kompozitlere ilgi giderek artmaktadır. Geri dönüşümü mümkün olan kompozit malzemeler sürdürülebilirlik açısından geleceğin malzemesi olarak görülmektedirler.

1. KOMPOZİT MALZEME

Hızla gelişen dünyada insan ihtiyaçları da giderek artmaktadır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte insanlar kullandıkları ana malzemelerin yerine ekonomik, mukavemetli, hafiflik gibi özellikleri bir arada bulunduran daha fonksiyonel malzemelere talep göstermektedirler. Doğada kısıtlı miktarda bulunan malzemelerin yanı sıra, beklentileri karşılayabilmek için birçok özelliği bir arada bulunduran malzemelerin önemi artmaktadır. Bu durum farklı malzeme tiplerini birleştirerek oluşturulan kompozit malzemelere olan ihtiyacı artırmaktadır.

İstenen amaç için tek başlarına uygun olmayan, birbirlerinin zayıf yönünü iyileştirerek üstün özellikler kazanmak amacıyla farklı iki veya daha

fazla malzemenin bir araya gelmesinden elde edilen malzemeye kompozit malzeme denir. İstenen özellikleri sağlayacak şekilde belirli şartlar ve oranlarda değişik fazların fiziksel olarak makro yapıda birleşmesiyle oluşan malzeme sistemidir. Çok fazlı olmaları sebebiyle, homojen olmalarına rağmen içyapıları makroskobik olarak incelendiğinde bileşenler seçilebilmekte ve mikroskobik inceleme sonucunda ise heterojen malzemeler oldukları görülmektedir. Cam elyaflı polyesterler, otomobil lastikleri, çelik çubuklu beton elemanlar, kerpiç, kontrplak, fiberglas, lamine ahşap, sinter malzemeler ve sert metal uçlar örnek olarak verilebilir.

Kompozit malzemeyi oluşturan bileşenler alایشım olmayıp aralarında atomik seviyede bir değişim söz konusu değildir. Dolayısıyla kimyasal olarak inert davranırlar. Ancak metal kompozitlerde düşük bir miktar çözünme gerçekleşebilmekte ve bileşenler arasında kompozit özellikleri etkileyebilen ara yüzey reaksiyonları görülebilmektedir.

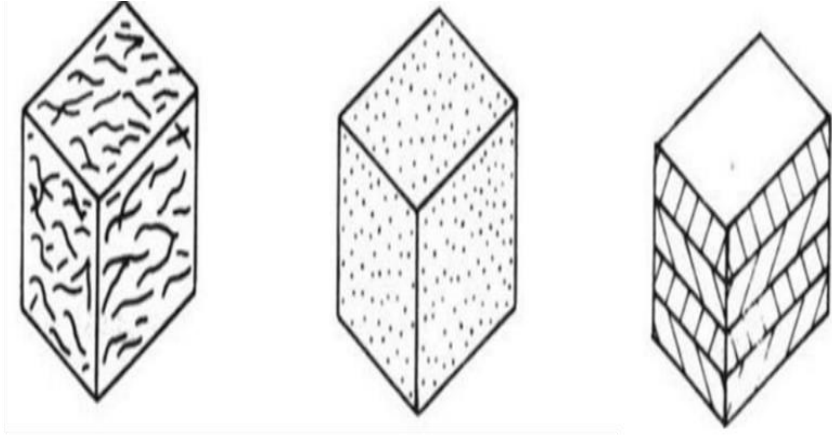
Kompozit malzemeler, kendini meydana getiren malzemelerden farklı özelliklere sahip yeni bir malzeme türünü belirtmektedir. En çok kullanılanları elyaf ile güçlendirilmiş plastik malzemelerdir. İlk sentetik plastik 1900'lerin başında geliştirilmiş ve 1930'ların sonunda bu malzemelerin özellikleri diğer malzemeler ile kıyaslanabilir düzeye ulaşmıştır. Kolay şekil alması, yoğunluğunun metallere göre düşük olması, yüzey kalitesinin üstünlüğü ve korozyona karşı dayanıklılığı plastiğin yükselmesindeki en önemli özelliklerdir. Ancak plastik malzemelerin sertlik ve dayanıklılık özelliklerinin düşük olması nedeniyle yeni çalışmalar yapılmış, 1950'lerde polimer esaslı kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Kompozitler, özellikle polimer kompozitler yüksek mukavemet, boyut ve termal kararlılık, sertlik, korozyona karşı dayanıklılık gibi özellikleriyle pek çok üstünlüklere sahiptirler. Ayrıca kompozit malzemeler, dayanıklılık ve sertlik açısından metallere karşılaştırılabilecek düzeyde oldukları gibi metallere göre çok daha hafiftirler.

2. KOMPOZİTLERİN SINIFLANDIRILMASI

Kompozit malzemelerin yapılarında sürekli bir ana faz (matris) ve onun içinde dağılmış pekiştirici bir faz (takviye) bulunur. Kompozitlerde takviye malzeme, sertlik, sağlamlık gibi yapısal özellikleri sağlarken, matris malzeme ise bir kalıp gibi yapıyı bütün halde tutar. Matris malzemesi aynı zamanda kompozitin fiziksel, kimyasal, ısıl özelliklerini ve mukavemetini belirler.

2.1. Takviye Bileşenine Göre Kompozitlerin Sınıflandırılması

Takviye bileşenin türüne ve düzenlenme şekline göre kompozit malzemeler lifli, taneli ve tabakalı kompozitler olarak üç gruba ayrılabilenekte olup, Şekil 1'de gösterilmiştir.



Lifli Kompozit Taneli Kompozit Tabakalı Kompozit
Şekil 1. Takviye Bileşenine Göre Kompozitlerin Sınıflandırılması

2.1.1. Lifli Kompozitler

En önemli kompozitler lifli olanlardır. Özellikle cam lifleri ile takviye edilmiş plastiklerden oluşan kompozitler oldukça geniş kullanım alanına sahiptirler. Lifler tek başlarına kullanılamazlar ancak sünek bir matris varlığında birçok malzeme yüksek mukavemetli ve hafif bir malzemeye dönüşürler. Matrisle lifler arasında zayıf fiziksel bağlar mevcuttur. Boyları çaplarına göre daha uzun olan liflerin toplam yüzey alanları büyük olup birbirlerine dolanarak kenetlenirler. Böylece oldukça büyük yükler aktarabilirler. Sünek bir matris içinde bulunan yüksek mukavemetli lifler kırılabilir hata mikroskobik düzeyde kalır ve matris tarafından önlenir. Kompozitlerde lifler kuvvet yönüne paralel, dik veya rastgele dağılmış halde bulunurlar.

2.1.2. Taneli Kompozitler

Makroskobik ya da mikroskobik boyutlarda takviye malzemelerinin partiküller halinde matris malzemesinin içerisine yerleştirilmesiyle oluşan kompozit malzemeler taneli kompozitler olarak isimlendirilir. Yapının mukavemetini kullandığı partiküllerin sertliği belirler. En yaygın olanı polimer matris içinde seramik ve metal parçacıkların bulunduğu tiptir. Yapıların içinde bulunan metal tanecikler malzemeye elektriksel ve ısı iletkenlik kazandırırken seramik tanecikler de sertlik ve yüksek sıcaklık dayanımı sağlarlar.

2.1.3. Tabakalı Kompozitler

Tabakalı kompozitler, farklı bileşenlerden oluşan plakaların üst üste gelecek şekilde birleştirilmesiyle elde edilir. En eski ve çok geniş kullanım alanına sahip kompozit yapı tipidir. Bu kompozitler, matris içinde gelişigüzel yönlendirilmiş lif takviyeli tabakalar ile yüksek mukavemet değerlerine sahiptirler. Metallerle göre daha hafif ve dayanımlı olmalarının yanında, ısıya ve neme karşı da dirençlidirler. Bu sebeple uçakların kuyruk ve kanat kısımlarının yüzey kaplamasında çokça tercih edilirler. Tabakalı kompozitlerin çoğu gelişmiş görünümlü ve düşük maliyetlidirler.

2.2. Matris Bileşenine Göre Kompozitlerin Sınıflandırılması

Matris bileşenine göre ise kompozitleri seramikler, metaller ve bunların alaşımları ile yaygın şekilde kullanılan polimerler olarak gruplandırabiliriz.

2.2.1. Polimer Kompozitler

Polimer kompozitler, seramik ve metal kompozitlere göre daha kompleks bir yapıya sahiptirler. Elastisite modülü ve kullanım sıcaklığı düşük olan polimer malzemeler günümüzde çok yaygın olarak kullanılmaktadırlar. En sık kullanılan matris malzemeleri epoksi reçine, polyamid ve polyester olarak karşımıza çıkmaktadır. Kolay şekil alabilen ve işlenebilen polimer kompozitler korozyona karşı dirençli olduklarından uzun süre kullanılabilirler. Genellikle petrokimya esaslı ürünler olan bu malzemeler termoset ve termoplastik olmak üzere ikiye ayrılırlar. Termosetler ısıtılarak şekillendirilirler ancak soğutulduklarında mikro yapıları bozulduğu için eski haline dönüşleri mümkün olmaz. Termoplastikler ise ısıtılarak yumuşatılır, şekillendirilir ve daha sonra

soğutulmuş sertleştirilirler. Bu süreçte malzemelerin mikro yapısında bir değişiklik olmaz. Havacılık alanında yaygın şekilde kullanılırlar.

2.2.2. Metal Kompozitler

Metal kompozit malzemelerin matris malzemeleri çeşitli metal ve metal alaşımlarından oluşurlar. Ana yapı içerisinde farklı geometriye sahip takviye faz bulunur. Metal kompozitlerin üretim yöntemlerinin düşük maliyetli olması bu malzemeye olan ilgiyi giderek artırmıştır. Seramiklerin elastiklik ve metallerin süneklik özelliğini birlikte bulunduran bu malzemeler daha çok uzay, havacılık, savunma ve otomotiv sanayisinde kullanılmaktadır. Metal kompozitlerin hafiflikleri, yüksek mukavemetleri, korozyona dirençli olmaları ve yüksek sıcaklık dayanımları teknolojiye kullanılmalarının nedenini ortaya çıkarmaktadır.

2.2.3. Seramik Kompozitler

Seramik kompozit malzemeler yüksek sıcaklıklara dayanıklı ve hafif olmaları sebebiyle oldukça kullanışlıdır. Sert ve kırılğan malzemeler olup düşük süneklik ve tokluk özellik gösterirler. Bu nedenle termal şoklara karşı hassasiyet göstermemesi için genellikle liflerle güçlendirilirler. Ancak yüksek sıcaklıklara karşı iyi dayanım gösterir ve yüksek elastiklik modülüne sahiptirler. Roket başlığı, uzay ve askeri araç ürünlerinin yanında son yıllarda insan vücudunda da kullanım alanı bulan ürünlerdir.

2.4. Kompozit Teknolojisinin Gelişimi

Geçmiş M.Ö. 4000 yıllarına dayanan, yapılışı ve özelliği bakımından bugüne göre farklı olan ve o zamanki ismiyle papirüs denilen kâğıt, kompozit malzemelerin günlük yaşamımızdaki örneklerinden biridir. Selüloz ve reçineden oluşan kâğıt, günümüzde yaşamımızın her alanında eşsiz bir kullanım aracı olarak insanlığın hizmetine sunulmuştur.

Kompozit malzemelerin bilinen en eski ve en geniş kullanım alanlarından biri de inşaat sektörüdür. Saman ile lif eklenerek güçlendirilmiş çamurdan yapılan kerpiç duvarlar ilk kompozit malzeme örneklerindedir. Bugün taş, kum, kireç, demir ve çimento ile oluşturulan beton en yaygın kullanılan yapı malzemesini oluşturmaktadır. Tabiatın doğal cam elyafı olarak

kabul edilen balmumu da bir çeşit lifli kompozit malzeme örneğidir. Eski zamanlarda yapı malzemesi olarak kullanılmıştır.

1930’larda cam elyafın bulunması modern kompozit üretiminin başlangıcı olmuştur. II. Dünya savaşında uçak ve gemi yapımında kullanılan cam elyaf, daha sonraları ticari olarak kullanım yeri bulmuştur. Bugün kompozitlerin en geniş kullanım alanı olan otomotiv endüstrisinde ilk kez 1953 yılında üretilen arabanın gövde ve iç kısımlarında kullanılmışlardır. Teknolojinin gelişmesiyle beraber uzay araştırmaları hızlanmış ve bu durum kompozitlerin daha hızlı gelişmesine neden olmuştur. Son 60 yıldır kompozitler, otomotiv, havacılık ve uzay endüstrilerinin yaygın şekilde kullandığı malzemeler haline gelmişlerdir.

2.5. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Günümüzde kompozit malzemelerin kullanım alanları çok geniş boyutlara ulaşmıştır. Kompozit malzemelerin başlıca kullanım alanları ve bu alanlarda sağlanan üstünlükler şu şekilde sıralanabilir.

- Şehircilik: Bu malzemeler çevre düzenleme, bina ve elektrik direklerinin yapımı gibi çeşitli şehircilik alanlarında kullanılmaktadırlar. Çok sayıda ürün kısa zamanda üretilip üreticinin montaj aşamasında tasarruf etmesini sağlamaktadırlar. Düşük maliyetle kullanıcıya hafiflik, yüksek mukavemet ve yalıtım imkânları vermektedirler.
- Ev Aletleri: Beyaz eşya parçaları, küçük ev aletleri, saç kurutma makinaları, televizyon üniteleri, sandalyeler, masalar ve aksesuar eşyaları gibi pek çok yerde kompozit malzemeler kullanılmaktadırlar. Elektriksel yalıtım, montaj kolaylığı, isteğe yönelik karışık parça üretimi ve hafiflik gibi kolaylıklar sağlarlar.
- Elektrik ve Elektronik Sanayi: Kompozitler malzemeler, elektriksel yalıtımı sağlamanın yanında çeşitli elektrik ve elektronik malzemelerin yapımında da kullanılmaktadır.
- Havacılık Sanayi: Kompozitler, planör, uçak, helikopter parçaları, insansız hava araçları ve uzay araçlarında atmosfer şartları altında yüksek dayanım göstermeleri ve hafif olmaları sebebiyle başarılı bir şekilde kullanılmaktadırlar.

- Otomotiv Sanayi: Araçlardaki karbon salınımını azaltmak ve yakıt maliyetlerini düşürmek amacıyla daha hafif araçlar üretebilmek otomotiv endüstrilerinin önceliği olmuştur. Dolayısıyla üreticiler kompozit malzeme kullanımına yönelmektedirler. Yine otobüs, kamyon, tır gibi ağır araçlarda da yükü hafifletmek amacıyla pek çok parça kompozit malzemelerden üretilmektedir.
- İş Makinaları: Ağır iş makinalarının kapaklarında ve diğer kısımlarında kompozitler kullanılarak üretim sürecinde kolaylık imkânı ve az sayıda parçanın olmasını sağlarlar.
- İnşaat Sektörü: Yapısal amaçla olduğu kadar estetik olarak da pek çok inşaatın yapımında kompozitler tercih edilmektedir. Nakliye ve montajda büyük kolaylık sağlanırken, izolasyon sorunları çözülmekte ve bakım masrafları azaltılmaktadır. Çatı sistemleri, cephe korumaları, tatil evleri, bina kaplama ürünleri, büfeler ve otobüs durakları gibi çok sayıda yapı uygulamasında kullanılmaktadırlar.
- Tarım Sektörü: Kompozit malzemelerden yapılan seralar, su boruları ve sulama kanalları; ışığın geçirgenliği, doğa koşullarına uyum, korozyona karşı direnç, montaj kolaylığı ve yatırım maliyetinin düşük olması gibi konularda üstünlükler sağlamaktadır.
- Raylı Sistemler: Kompozit malzemeler, trenlerin ve vagonların çeşitli kısımlarının üretiminde kullanılmaktadırlar. Bu sayede düşük ağırlıklı trenler daha yüksek hızlara ulaşarak enerji verimliliği sağlamış olmaktadır.
- Denizcilik Sanayisi: Bu sanayide yer alan feribotlar, petrol boruları, gemiler, yelkenliler, yatlar ve tekneler gibi suya dayanıklı olması gereken yapılarda kompozit malzemeler bulunmaktadır.
- Spor ve Eğlence: Hafif ve yüksek dayanımlı oldukları için spor malzemelerinin ve müzik aletlerinin üretiminde kompozit malzemelerden faydalanılmaktadır. Ayrıca çocuk parklarında ve süs havuzlarında darbeyi emme ve korozyon dayanımı gibi özellikleri nedeniyle tercih edilmektedirler.

2.6. Kompozit Malzemelerin Üstünlükleri

Kompozit malzemeler, birçok özelliği ile metal malzemelere yakın olmasına karşın gösterdiği bazı farklılıklar nedeniyle, son yıllarda daha fazla

önem kazanmışlardır. Kompozitlerin düşük yoğunluklu olmaları hafif yapılarda kullanımlarında büyük yarar kazandırmaktadır. Bunun yanında, lif takviyeli kompozit malzemelerin korozyona dayanımları, ısı, ses ve elektrik yalıtımı sağlamaları da ilgili kullanım alanları için bir üstünlük sağlamaktadır.

Kompozit malzemelerin sakıncalı yanlarını ortadan kaldırmaya yönelik teorik çalışmalar devam etmekte olup, bu çalışmaların olumlu sonuçlanması durumunda kompozit malzemeler metalik malzemelerin yerini alabileceklerdir.

Aşağıda bu malzemelerin üstün yanları kısaca ele alınmıştır.

- **Yüksek Mukavemet:** Kompozitlerin mukavemeti çoğu metal malzemeye göre çok daha yüksektir. Bunun yanında şekillendirilebilme özelliklerinden dolayı kompozitlere istenen yönde ve bölgede gerekli dayanım kazandırılabilir. Böylece malzemedeki tasarruf yapılarak, daha hafif ve ucuz ürünler elde edilebilmektedir.
- **Hafiflik:** Kompozit malzemelerin yoğunluğu genellikle 1,5-4,5 gr/cm³ arasında değişmektedir. Metallerle göre daha hafiftirler ve dolayısıyla yakıt tasarrufu sağlarlar. Bu nedenle özellikle ulaşım araçlarının yapımında tercih edilmektedirler.
- **Kolay Şekillendirilme:** Büyük ve karmaşık parçalar tek işlemlerle bir bütün halinde şekillendirilebilir. Bu durum tasarım esnekliği oluştururken malzeme ve işgücünden kazanç sağlamaktadır.
- **Elektriksel Özellikler:** Üstün elektriksel özellikleri olan kompozit ürünler uygun malzemelerin seçilmesiyle elde edilebilir. Kompozitler, enerji nakil hatlarında iyi bir iletken ve gerektiğinde de başka bir yapıda, iyi bir yalıtkan malzemesi olarak kullanılabilirler.
- **Korozyon Direnci:** Kompozitler, kimyasal olarak inert davranış gösterdikleri için atmosfer şartlarından, korozyondan ve çoğu kimyasal maddeden etkilenmezler. Bu özellikleri nedeniyle kompozit malzemeler kimyasal madde tankları, boru ve aspiratörler, tekne ve diğer deniz araçları yapımında güvenle kullanılmaktadır. Özellikle korozyona karşı dirençli olması, birçok endüstride kullanımında üstünlük sağlamaktadır.
- **Isıya ve Ateşe Dayanıklılığı:** Isı iletim katsayısı düşük malzemelerden oluşabilen kompozitlerin ısıya dayanıklılık özelliği, yüksek sıcaklık

altında kullanılabilmesine imkân vermektedir. Bazı özel katkı maddeleri ile kompozitlerin ısıya dayanımı istenilen düzeyde artırılabilir.

- Kalıcı Renklendirme: Kompozit malzemeye, şekillendirme anında matrise ilave edilen pigmentler sayesinde istenen renk verilebilir. Bu süreç ilave bir maliyet ve işgücü gerektirmez.
- Titreşim Sönümlendirme: Kompozit malzemelerin matris bileşenlerinin süneklik özellikleri nedeniyle doğal bir titreşim sönümleme ve absorblama özelliği vardır. Böylece çatlak yürümesi olayı en aza indirilmektedir.
- Yüzeyle Uygulanabilirlik: Kompozit malzemeler demir, ahşap ve beton yüzeyle mükemmel bir uyum ile kaplanabilmektedir. Bu sayede kaplanan yüzey çevresel şartlardan ve korozyondan korunabilmektedir.
- Yanmazlık Özelliği: Kompozit malzemelere matris bileşeninin alev dayanımı özelliğine göre yanmazlık özelliği kazandırılabilir.

2.7. Kompozit Malzemelerin Sakıncaları

Yaygın kullanılan kompozit malzemelerin olumsuz yanları şu şekilde sıralanabilir.

- Kompozit malzemeyi oluşturan matris ve takviye bileşenlerinin yüksek maliyetli olması son ürünün de yüksek maliyetli olmasına neden olabilmektedir.
- Kompozit malzemelerdeki hava zerrecikleri malzemenin yorulma özelliklerini olumsuz etkilemektedir.
- Kompozit malzemeler değişik doğrultularda değişik mekanik özellikler gösterirler.
- Aynı kompozit malzemedeki çekme, basma, kesme ve eğilme mukavemet değerleri farklılıklar gösterir.
- Kompozit malzemelerde hasar tespiti yapılması çok zordur.
- Kompozit malzemelerin delik delme, kesme türü operasyonları liflerde açılmaya neden olduğundan, bu tür malzemelerde hassas imalattan söz edilemez.
- Kompozitler kırılğan (gevrek) malzemeler oldukları için kolaylıkla zarar görürler, onarımları yeni problemler yaratabilir.

- Sıcak kurutma gerekmektedir.
- Malzemelerin sınırlı raf ömürleri vardır. Bazı tür kompozitlerin soğutularak saklanmaları gerekmektedir.
- Kompozitler onarılmadan önce çok iyi temizlenmeli ve kurutulmalıdır. Bazı kurutma teknikleri uzun zaman alabilmekte veya işlem çok zor olabilmektedir.
- Kompozit malzemelerin üretiminde karmaşık işlemler ve özel araçlar gerekli olabilmektedir. Bu da üretim sürecinin uzun zaman ve maliyet gerektirmesine neden olabilmektedir.
- Bazı kompozit malzemelerin geri dönüşümü sınırlı olduğundan, atık yönetimi ve çevresel etkiler dikkate alındığında zorlayıcı olabilmektedir.

Kompozit malzemeler, bazı sakıncalarına rağmen çelik ve alüminyum gibi metallere göre dayanıklılıklarının yanında hafif olmalarıyla daha kullanışlı olabilmektedirler. Bu özellikleri ile kompozitler, otomobil parçalarından deniz taşıtlarına, bina cephe kaplamalarından spor ekipmanlarına, tarım araçlarından banyo-mutfak yapılarına kadar birçok sanayi kolunda sorunları giderecek malzemelerdir.

2.8. Dünyada ve Türkiye’de Kompozit Malzeme

Son 30 yıl içerisinde kompozit sektörü ekonomik büyümeye ve temel sektörlerle daha fazla etki etmesi sebebiyle büyük bir gelişme göstermiştir. Uzun ömürlü ve çok geniş kullanım alanına sahip olan kompozit malzemeler, üstün özellikleri nedeniyle dünya genelinde hızla yaygınlaşmaktadır. ‘Geleceğin malzemesi’ olarak tanımlanan kompozitler, dünyada olduğu gibi ülkemizde de pek çok sektörü içine alarak büyümektedir.

Günümüzde kompozit malzeme pazarı dünya çapında 75 milyar Euro ve 11 milyon tonluk bir büyüklüğe erişmiş durumdadır. Türkiye’de ise 1,5 milyar Euro ve 280 bin tonluk bir hacme ulaşmış bulunmaktadır. Ülkemizde kompozit üretimi, Avrupa ve dünya büyüme oranından daha fazla bir büyüme göstermektedir.

Türkiye’de, Avrupa’da ve dünyada sektörlerin kompozit malzeme kullanım oranları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Sektör Bazında Kompozit Malzemelerin Kullanım Oranları (%)

Sektör	Dünya	Avrupa	Türkiye
Taşımacılık ve Otomotiv	28	30	24
Yapı ve İnşaat	19	20	21
Elektrik ve Elektronik	16	14	5
CTP Boru ve Altyapı	15	13,5	36
Tüketici Malları	8	3	3
Rüzgâr Enerjisi	7	12	7
Denizcilik	3	5	2
Savunma ve Havacılık	0,5	0,5	-
Diğer	3,5	2	2

Ülkelerdeki kompozit sektörü büyüklüğü, ülkenin ekonomik gelişimiyle paralellik göstermektedir. Ayrıca kompozit malzemelerin yüksek katma değere sahip olmaları ve ileri teknoloji üretim süreçleri gerektirmeleri, sektörün ülke ekonomileriyle olan bağlantısını daha iyi göstermektedir.

Kompozit malzeme kullanımına bakıldığında en çok kullanan ülke 2,7 milyon ton ile Kuzey Amerika olup dünya pazarındaki payı %35'dir. Geçtiğimiz 10 yıl boyunca kompozit malzeme kullanımı en hızlı artan ülke ise Çin olup kullanım miktarı ağırlıkça 1,8 milyon tondur.

2.9. Kompozit Malzemelerin Çevresel Etkileri

Çevre dostu olan kompozit malzemeler, çelik, alüminyum, demir, ağaç gibi malzemelerin kullanımına alternatif olarak geliştirilmişlerdir. Doğada bulunan malzemelerin kullanımlarını azaltmaya ve ekolojik yaşamı korumaya önemli katkılar vermektedirler. Sonsuz ömürlü ve uzun kullanım sürelerine sahip oldukları için doğal kaynakların korunmasını sağlamaktadırlar. Bu durum kompozit kullanımının yakın zamanda doyumluğa erişmeyeceğini göstermektedir.

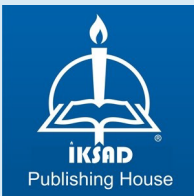
Kompozit malzemeyi oluşturan matris veya takviye bileşenden birinin veya her ikisinin de doğal kaynaklardan geldiği malzemeler biyokompozitler olarak adlandırılır. Doğal kaynakların tükenme ihtimali ve çöp depolama alanlarının hızlı artışı çevre dostu biyokompozitlerin endüstrilerdeki kullanımını artırmıştır. Doğal malzemelerden üretilen kompozit malzemelerin üretiminden son kullanımına kadar geçen zamanda karbon ayak izinde ve sera gazı salınımında önemli bir azalma meydana gelmiştir.

Çevre sorunlarının artması ve küresel ısınma, yönetimleri yeşil, doğa dostu malzemelerin kullanılması konusunda zorlamaktadır. Dolayısıyla, biyobozunur malzemelerin geliştirilmesi ve kullanılması yeniden gündeme gelmiştir. Keten ve kenevir gibi sürdürülebilir kaynaklardan elde edilen kompozit malzemeler doğal liflerden meydana gelmiş olup tamamen biyobozunurdurlar Geri dönüşümlerinin yapılabilmesi ve sentetik liflere göre karbon salınımlarının düşük olması nedeniyle sentetik liflerin yerine kullanılmaya başlanmıştır. Zehirli gaz ve sera gazı salınımının düşük olması, maliyetlerinin azlığı ve petrole olan bağımlılığı azaltma gibi önemli üstünlüklerinin yanında bu malzemeler düşük yoğunluklu ve yüksek mukavemetlidirler. Yenilenebilen ve kaynaklarının sürdürülebilir olması, birçok sektörde kullanılan petrol türevli malzemelere ve parçalara alternatif olmalarına imkân vermektedir. Ayrıca son yıllarda yapılan çalışmalar, iyi termal ve akustik yalıtım özellikleriyle biyokompozitlerin giderek daha cazip hale geldiğini göstermektedir.

Bunların yanında çevre dostu kompozitlerin nem tutmaları, ani sıcaklık değişimlerine ve UV ışınlarına dayanımlarının düşük olması gibi nedenlerden dolayı uygulama alanları kısıtlıdır.

KAYNAKÇA

- Avcı, A., Akdoğan Eker, A., BODUR, M.S., 2021, Yeşil Kompozit Malzemelerin Performans Özellikleri ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı, Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11(4), 3035-3054.
- Ilgaz, U.M., 1997, Basınçlı Döküm Yöntemiyle Üretilen Seramik Partikül Takviyeli Al-Si Esaslı Metal Matriksli Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi.
- İnkaya, S., 2012, Dünyada ve Türkiye’de Kompozit Sektörü, Mühendis ve Makine, 52(613), 30-34.
- Karaca Uğural, B., 2021, Gürültü Bariyeri için Çevre Dostu Alternatif: Doğal Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 32, 1006-1010.
- Kaya, A. İ., 2016, Kompozit Malzemeler ve Özellikleri, Putech & Composites, 38-45.
- Kısa, M., Özen, M., Değirmenci, D., Demircan, G., Dirilmiş, M., 2017, Çevresel Etkilere Maruz Kompozit Malzemelerin Aşınma Davranışı, Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 1, 54-59.



ISBN: 978-625-367-603-2