



**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

HAVA KİRLİLİĞİNİN KONTROLÜNDE BİYOLOJİK PROSESLER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Basir Ahmad HAMİDY

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

HAZİRAN 2024

**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

HAVA KİRLİLİĞİNİN KONTROLÜNDE BİYOLOJİK PROSESLER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Basir Ahmad HAMİDY

(20278033031)

ORCID: 0000-0003-2783-7727

**Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Çevre Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı**

Danışman: Prof. Dr. Deniz UÇAR

ORCID: 0000-0002-0536-6250

HAZİRAN 2024

BTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 20278033031 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Basir Ahmad HAMİDY, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "HAVA KİRLİLİĞİNİN KONTROLÜNDE BİYOLOJİK PROSESLER" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Deniz UÇAR**
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Mahmut Kemal KORUCU**
Bursa Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ozan Kadir BEKMEZCİ
Bitlis Eren Üniversitesi

Teslim Tarihi : 2024
Savunma Tarihi : 25/06/2024



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin aboneliği olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Basir Ahmad HAMİDY

İmzası:





Aileme ve sevdiklerime,

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde değerli bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, engin bilgilerini benimle paylaşan, kendisine ne zaman danışsam bana zaman ayırıp destek olan araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, samimiyetini benden esirgemeyen aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam; Prof. Dr. Deniz UÇAR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın en değerli varlıkları, onların sayesinde, dürüstlük, hoşgörü ve empati gibi değerleri öğrendiğim annem ve babam'a ne kadar minnettarlığımı ifade etmek istersem kelimeler yetmez. Onlar benim için sadece anne ve baba değil, aynı zamanda en büyük öğretmenlerim ve destekçilerimdir. Onlar gibi harika birer ebeveynlere sahip olduğum için şanslıyım kendilerine çok teşekkür ederim. Lisans döneminde beni maddi ve manevi olarak her konuda destekleyen, yardımcı olan büyük ablam Nasiba HAMİDY ve bana hep güvenen ablam Samira HAMİDY'e çok teşekkür ederim. Yüksek lisans aşamasında, gurbete her adımda bana rehberlik edip maddi ve manevi desteğini esirgemeyen kardeşim Nasir Ahmad HAMİDY'e çok teşekkür ederim.

Bursa'da yüksek lisans aşamasında tanıştığım ve samimiyet kurduğum laboratuvar odasına uğradığımda her sorduğum soruda bana yardımcı olan Yakup ÇAKMAK'a, hep güler yüzlü olan derslerimle ilgili sorduğum soruları cevaplamaktan hiçbir zaman esirgenmeyen ve yardımcı olan Tuba ARİDİL'e ve sınıf arkadaşım Görkem MACİT'e, lise döneminden beri tanıştığım ve yüksek lisansta da aynı üniversitede denk geldiğim ve tez aşamasında birbirimize yardımcı olduğumuz arkadaşım Farhad AİMAQ'a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak da biz uluslararası öğrenciler olarak bu ülkenin eğitim imkanlarından yararlanabildiğimiz için Türkiye devletinin ve Türkiye halkının misafirperverliğinden dolayı sonsuz sevgi, saygı ve minnettarlığımı sunarım.

Haziran 2024

Basir Ahmad HAMİDY
(Çevre Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	x
SEMBOLLER	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xiv
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Arka Planı ve Bağlamı	1
1.2 Araştırmanın Amacı ve Gerekçesi	2
1.3 Araştırma Soruları ve Hipotezler	2
1.4 Çalışmanın Önemi.....	3
1.5 Tezin Organizasyonu.....	4
2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI	5
2.1 Hava Kirliliği.....	5
2.2 Hava Kirlleticilerinin Kaynakları ve Türleri	5
2.3 Hava Kirliliğinin İnsan Sağlığına ve Çevreye Etkileri.....	8
2.4 Hava Kirliliğinde Tarihten Örnekler	9
2.5 Hava Kirliliğine Sebep Olan Faktörler.....	11
2.5.1 Antropojenik kaynaklar.....	11
2.5.2 Doğal kaynaklar	12
2.5.3 Kentleşme ve arazi kullanımı değişiklikleri:	12
2.5.4 Kirleticiler	12
2.5.5 İkincil Kirleticiler.....	18
2.6 Hava Kirliliğinin Önlenebilmesi için Uygulanan Prosesler.....	20
2.6.1 Fiziksel süreçler	21
2.6.2 Kimyasal süreçler.....	22
2.6.3 Biyolojik süreçler.....	22
2.7 Hava Kirliliği Kontrolünde Mevcut Yöntemler	23
2.8 Hava Kirliliği Kontrolünde Biyolojik Süreçler ve Mekanizmaları	24
2.8.1 Kirliliğin doğrudan biyolojik yollar ile artıtımı	26
2.8.2 Kirliliğin su ortamına aktarımı ve bu suyun biyolojik yollar ile artıtımı ...	39
2.8.3 Kirleticilerin mikrobiyal parçalanması	42
2.8.4 Biyoremediasyon teknikleri	43
2.8.5 Hava kalitesinin iyileştirilmesinde mikroorganizmaların rolü.....	45
2.8.6 Hava kirliliğinin azaltılmasında bitki bazlı yaklaşımlar	46
2.8.7 Fitoremediasyon stratejileri.....	49
3. GEREÇ VE YÖNTEM.....	52
3.1 Literatür Seçim Kriterleri	52

3.2 Veri Toplama ve Analizi	53
3.3 Bulguların Sentezi	53
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	54
4.1 Sonuçlar.....	54
4.2 Öneriler.....	56
KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ.....	69



KISALTMALAR

CFC	: Kloroflorokarbonlar
EPA	: Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı
ESP	: Elektrostatik Çökelticiler
FGD	: Kükürt Giderme sistemleri
KOAH	: Kronik Obstrüktif Akciğer Hastalığı
MIT	: Massachusetts Teknoloji Enstitüsü
PM	: Partikül Madde
PAH	: Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar
SCR	: Seçici Katalitik İndirgeme
VOC	: Uçucu Organik Bileşikler

SEMBOLLER

CO₂	: Karbon Dioksit
CO	: Karbon Monoksit
SO₂	: Kükürt Dioksit
CH₄	: Metan
NO_x	: Nitrojen Oksitler
N₂O	: Nitröz Oksit



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : Kirli topraklarda bulunması muhtemel ağır metaller ve antropojenik kaynaklar (Zincircioğlu, 2013).	7
Çizelge 2.2 : Bazı ağır metallerin insan sağlığına etkileri ve toksisite düzeyleri (Aksoy, 2012).	9
Çizelge 2.3 : Biyofiltre, biyodamlatmalı filtre ve biyoyıkayıcı sistemlerinin kıyaslanması (Shareefdeen ve diğ., 2005).	29
Çizelge 2.4 : Fitoremediasyon tekniklerinin farklı kirletici ve ortamlarda kullanım alanları (Aybar ve diğ., 2015).	48

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 : Hava kirliliği.	5
Şekil 2.2 : Ağır metal toksisitesinin insan sağlığına etkileri.	8
Şekil 2.3 : Damlatmalı filtreler.	26
Şekil 2.4 : Biyofiltrasyon prosesleri.	27
Şekil 2.5 : Biyo-yıkayıcılar.	28
Şekil 2.6 : Aktif çamur prosesi.	30
Şekil 2.7 : Fitoremediasyon.	31
Şekil 2.8 : Algal temizleyiciler.	32
Şekil 2.9 : Mikrobiyal yakıt hücreleri çalışma prensibi.	33
Şekil 2.10 : Kompostlama.	35
Şekil 2.11 : Mantar miselyum filtrasyonu.	36
Şekil 2.12 : Biyoremediasyon sürecinde kullanılan mikroorganizma türleri.	44
Şekil 2.13 : Fitoremediasyon tiplerinin şematik gösterimi.	47

HAVA KİRLİLİĞİNİN KONTROLÜNDE BİYOLOJİK PROSESLER

ÖZET

Hava kirliliği, halk sağlığı ve çevre üzerinde zararlı etkileri olan acil bir küresel sorundur. Hava kirliliği kontrolüne yönelik geleneksel yöntemler genellikle mekanik ve kimyasal süreçleri içerir ancak bunların etkililik ve sürdürülebilirlik açısından sınırlamaları vardır. Son yıllarda, biyolojik süreçlerin hava kirliliği kontrolünde uygulanabilir çözümler olarak araştırılmasına ilgi artmaktadır. Bu çalışma, biyolojik süreçlerin hava kirliliğini azaltmadaki rolünü araştırmayı, mekanizmalarını, etkinliklerini ve potansiyel uygulamalarını incelemeyi amaçlamaktadır. Bu tezde kullanılan araştırma metodolojisi, biyolojik süreçler ve hava kirliliği kontrolü ile ilgili mevcut literatürün, bilimsel çalışmaların ve vaka analizlerinin kapsamlı bir incelemesini içermektedir. Mikrobiyal bozunma, fitoremediasyon ve ekolojik etkileşimler dahil olmak üzere çeşitli biyolojik mekanizmalar ayrıntılı olarak incelenmektedir. Analiz, farklı çevresel bağlamlarda biyolojik yaklaşımların fizibilitesini ve etkinliğini değerlendirmek için hem teorik çerçeveleri hem de ampirik kanıtları kapsamaktadır. Bu tezin bulguları, hava kirliliğinin kontrolünde biyolojik süreçlerin önemli potansiyelini vurgulamaktadır. Mikrobiyal bozunma, hidrokarbonlar ve uçucu organik bileşikler gibi kirleticilerin parçalanmasında umut vaat etmektedir. Kirletici maddeleri absorbe etmek ve metabolize etmek için bitkilerin kullanımını içeren fitoremediasyonun kentsel ortamlardaki hava kalitesini iyileştirmede etkili olduğu kanıtlanmıştır. Ayrıca ekosistemlerin restorasyonu ve biyolojik çeşitliliğin korunması, doğal süreçler yoluyla hava kalitesinin artırılmasında önemli rol oynamaktadır. İleriye dönük olarak, biyolojik süreçleri ana akım hava kirliliği kontrol stratejilerine entegre etmek çok önemlidir. Biyolojik yaklaşımların daha geniş ölçekte uygulanmasını kolaylaştırmak için araştırmacılar, politika yapıcılar ve paydaşlar arasındaki işbirliği gereklidir. Genetiği değiştirilmiş organizmaların geliştirilmesi ve hedeflenen kirleticilerin uzaklaştırılması için mikrobiyal toplulukların geliştirilmesi de dahil olmak üzere biyolojik süreçlerin optimizasyonunu keşfetmek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. Ek olarak, hava kirliliği kontrolüne yönelik biyolojik çözümleri destekleyen sürdürülebilir uygulamaların benimsenmesini teşvik etmek için halkın bilinçlendirilmesi ve eğitim girişimleri oldukça önem arz etmektedir.

Anahtar kelimeler: Biyolojik süreçler, Halk sağlığı, Hava kirliliği.

BIOLOGICAL PROCESSES IN THE CONTROL OF AIR POLLUTION

SUMMARY

Air pollution is an urgent global problem with harmful effects on public health and the environment. Traditional methods for air pollution control often involve mechanical and chemical processes, but these have limitations in terms of effectiveness and sustainability. In recent years, there has been increasing interest in investigating biological processes as feasible solutions in air pollution control. This study aims to investigate the role of biological processes in reducing air pollution, examining their mechanisms, effectiveness and potential applications. The research methodology used in this thesis includes a comprehensive review of existing literature, scientific studies and case studies regarding biological processes and air pollution control. Various biological mechanisms, including microbial degradation, phytoremediation, and ecological interactions, are examined in detail. The analysis covers both theoretical frameworks and empirical evidence to evaluate the feasibility and effectiveness of biological approaches in different environmental contexts. The findings of this thesis highlight the significant potential of biological processes in controlling air pollution. Microbial degradation shows promise in breaking down pollutants such as hydrocarbons and volatile organic compounds. Phytoremediation, which involves the use of plants to absorb and metabolize pollutants, has proven effective in improving air quality in urban environments. Additionally, restoration of ecosystems and preservation of biodiversity play an important role in improving air quality through natural processes. Going forward, it is crucial to integrate biological processes into mainstream air pollution control strategies. Collaboration between researchers, policymakers, and stakeholders is necessary to facilitate broader application of biological approaches. Further research is needed to explore the optimization of biological processes, including the development of genetically modified organisms and the enhancement of microbial communities for the removal of targeted pollutants. Additionally, public awareness and education initiatives are essential to encourage the adoption of sustainable practices that support biological solutions for air pollution control.

Keywords: Biological processes, Public health, Air pollution.

1. GİRİŞ

Hava kirliliği, insan sağlığı ve ekolojik refah üzerinde derin etkileri olan yaygın bir çevresel sorundur. Sanayileşme ve kentleşme hızlandıkça çeşitli kirleticilerin atmosfere salınması da hızlanmaktadır. Bu antropojenik aktivitenin sonuçları, hava kalitesinin bozulmasında açıkça görülmekte ve bu da çeşitli sağlık sorunlarına ve ekolojik bozulmalara neden olmaktadır. Geleneksel hava kirliliği kontrolü yöntemleri bu endişeleri azaltmada büyük ilerleme kaydetmiştir, ancak bunlar genellikle enerji yoğun süreçler içerir ve istenmeyen yan ürünler üretebilir (Menteşe, 2017).

Bu zorluklara yanıt olarak, hava kirliliği kontrolüne yönelik alternatif, sürdürülebilir yaklaşımların araştırılmasına yönelik artan bir ilgi vardır. Bunların arasında biyolojik süreçler, canlı organizmaların kirleticileri dönüştürme ve azaltma konusundaki doğal yeteneklerinden yararlanan umut verici bir yol olarak ortaya çıkmaktadır. Geleneksel yöntemlerin aksine, biyolojik süreçler doğayla uyum içinde çalışma potansiyeline sahip olup, hava kirliliğinin çok yönlü boyutlarına yönelik düşük etkili, çevre dostu bir çözüm sunmaktadır (İbadullayeva ve diğ., 2019).

1.1 Çalışmanın Arka Planı ve Bağlamı

Partikül madde, uçucu organik bileşikler ve nitrojen oksitler de dahil olmak üzere artan hava kirletici seviyeleri, solunum yolu hastalıkları, kardiyovasküler problemler ve ekosistemler üzerindeki olumsuz etkiler gibi sayısız sağlık sorunuyla ilişkilendirilmiştir. Geleneksel hava kirliliği kontrolü yöntemleri bir dereceye kadar etkili olsa da çoğu zaman yüksek enerji tüketimi ve ikincil kirleticilerin oluşması gibi dezavantajlara sahiptir. Bu bağlamda biyolojik süreçlerin entegrasyonu, sürdürülebilir ve çevre dostu hava kirliliği kontrolü için umut verici bir yol olarak ortaya çıkmaktadır (Zencirci ve Işıklı, 2017).

Hava kirleticilerinin uzaklaştırılması ve dönüştürülmesinde yer alan temel biyolojik mekanizmaları anlamak, hedefe yönelik ve etkili stratejiler geliştirmek için çok önemlidir. Mikroorganizmalar, bitkiler ve diğer biyolojik varlıklar, biyobozunma,

fitoremediasyon ve biyofiltrasyon gibi işlemler yoluyla hava kirliliğinin azaltılmasında önemli bir rol oynama potansiyelini göstermiştir. Bu süreçlerin derinlemesine araştırılması, potansiyellerinin tam olarak kullanılması ve daha temiz ve sağlıklı bir atmosfere katkıda bulunulması açısından önemlidir (Esen, 2019).

1.2 Araştırmanın Amacı ve Gereçesi

Bu araştırmanın temel amacı biyolojik süreçlerin hava kirliliği kontrolündeki rolünü araştırmak ve analiz etmektir. Bu çalışma, mikrobiyal aktivitenin, bitki etkileşimlerinin ve diğer biyolojik olayların karmaşık mekanizmalarını derinlemesine inceleyerek, hava kirletici düzeylerini etkili bir şekilde azaltmak için kullanılabilir yeni yaklaşımları tanımlamayı amaçlamaktadır. Biyolojik süreçlere odaklanmanın ardındaki mantık, bunların doğal sürdürülebilirliği, düşük çevresel etkisi ve kentsel alanlar ve endüstriyel tesisler de dahil olmak üzere çeşitli ortamlara entegrasyon potansiyelidir.

Bu çalışmada, yenilikçi ve çevre dostu stratejilerin geliştirilmesi için bir temel sunarak, hava kirliliği kontrolü alanına değerli bilgilerle katkıda bulunmak amaçlanmaktadır. Bu çalışma ilgili biyolojik dinamikleri anlayarak, yalnızca hava kirliliğini azaltmakla kalmayıp aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliği de destekleyen verimli teknolojilerin tasarlanması ve uygulanmasında yardımcı olabilir.

1.3 Araştırma Soruları ve Hipotezler

Bu araştırmaya rehberlik etmek için birkaç temel araştırma sorusu ele alınacaktır:

Hava kirleticilerinin uzaklaştırılması ve dönüştürülmesinde yer alan temel biyolojik süreçler nelerdir?

Bu biyolojik süreçler, gelişmiş hava kirliliği kontrolü için nasıl optimize edilebilir?

Biyolojik süreçleri mevcut hava kirliliği kontrol stratejilerine entegre etmenin potansiyel uygulamaları ve sınırlamaları nelerdir?

Hipotezler:

- Mikrobiyal bozunma ve fitoremediasyon gibi biyolojik süreçler, belirli hava kirleticilerinin uzaklaştırılmasında önemli bir rol oynamaktadır.

- Çevresel koşulların ve mikrobiyal konsorsiyumun optimize edilmesi, hava kirliliği kontrolünde biyolojik süreçlerin verimliliğini artırabilir.
- Biyolojik süreçlerin entegrasyonu, farklı ortamlardaki potansiyel uygulamalarla hava kirliliği kontrolüne yönelik sürdürülebilir ve etkili bir yaklaşım ortaya koyacaktır.

1.4 Çalışmanın Önemi

Hava kirliliği ve bunun insan sağlığı ve çevre üzerindeki zararlı etkileri konusunda artan küresel endişeler, yenilikçi ve sürdürülebilir çözümleri gerektirmektedir. Antropojenik faaliyetler atmosfere çok sayıda kirletici madde salmaya devam ettikçe, geleneksel hava kirliliği kontrol yöntemleri yetersiz kalmaktadır. Bu bağlamda, biyolojik süreçlerin araştırılması ve kullanılması, hava kirliliğinin azaltılması ve daha sağlıklı ve sürdürülebilir bir geleceğin teşvik edilmesi için umut verici bir yol olarak ortaya çıkmaktadır (Seven ve diğ., 2018).

Bu tezin önemi, hava kirliliği kontrolünün bir aracı olarak biyolojik süreçlerin araştırılması ve anlaşılmasında yatmaktadır. Geleneksel yöntemler sıklıkla mekanik ve kimyasal müdahaleleri içerse de, doğanın kendi mekanizmalarının gücünden yararlanmak, kirlilik sorunlarına çözüm bulmada bir paradigma değişikliği sunmaktadır. Biyolojik süreçler, canlı organizmaların kirleticileri metabolize etme, parçalama ve ayırma konusundaki doğal yeteneğini güçlendirerek daha çevre dostu ve uygun maliyetli bir alternatif sunar (Altıkat ve diğ., 2011).

Ayrıca, bu çalışmanın önemi halk sağlığı üzerindeki potansiyel etkisine kadar uzanmaktadır. Hava kirliliği, solunum hastalıkları, kardiyovasküler problemler ve hatta nörolojik bozukluklar dahil olmak üzere sayısız sağlık sorunuyla ilişkilendirilmiştir (Bayram ve Dikensoy, 2006).

Çevre ve sağlık hususlarına ek olarak, bu çalışmanın önemi, daha geniş bir sürdürülebilir kalkınma alanına olan katkısında yatmaktadır. Dünya çevresel hedeflere ulaşmaya ve ekolojik ayak izini azaltmaya çabalarken, biyolojik süreçlerin hava kirliliği kontrol önlemlerine dahil edilmesi, çevre dostu uygulamalar ve biyolojik çeşitliliğin korunması ilkeleriyle uyumludur. Dolayısıyla bu çalışma, insan faaliyetleri ile doğal çevre arasında uyumlu bir arada yaşamayı teşvik eden politika ve uygulamaları şekillendirme potansiyeline sahiptir (Ağacan, 2014).

Sonuç olarak, “Hava Kirliliği Kontrolünde Biyolojik Süreçler” hakkındaki bu tez, hava kirliliğinin yarattığı acil zorlukların ele alınmasında büyük önem taşımaktadır. Biyolojik çözümlerin henüz keşfedilmemiş potansiyeline ışık tutarak, hava kirliliği kontrolü ortamını yeniden şekillendirebilecek sürdürülebilir, doğaya dayalı stratejilerin geliştirilmesine yönelik yollar açmaktadır. Bu araştırmanın bulguları yalnızca akademik alana katkıda bulunmakla kalmayıp aynı zamanda politika ve uygulamaları etkileme ve böylece gelecek nesiller için daha temiz, daha sağlıklı ve daha sürdürülebilir bir gezegen oluşturma vaadini de taşıyabilir (Biçer, 2022).

1.5 Tezin Organizasyonu

Tez, araştırma konusunun kapsamlı bir şekilde incelenmesini kolaylaştırmak için farklı bölümler halinde düzenlenmiştir: Bölüm 1: Giriş, Bölüm 2: Literatür Taraması, Bölüm 3: Gereç ve Yöntem, Bölüm 4: Sonuç ve Öneriler

Bu organizasyon yapısı, okuyucuların arka plan ve bağlamdan çalışmanın nihai sonuçlarına ve sonuçlarına kadar araştırma yolculuğunu takip etmelerine olanak tanıyan mantıksal bir bilgi akışı sağlar.

2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

2.1 Hava Kirliliği

Hava kirliliği, soluduğumuz havada insan sağlığına, çevreye ve iklime olumsuz etkileri olabilecek zararlı veya aŐı miktarda maddenin bulunmasını ifade eder (Şekil 2.1). Hava kirleticiler olarak bilinen bu maddeler doğal veya insan yapımı olabilir ve genellikle gazlar, partikül maddeler, uçucu organik bileşikler (VOC'ler) ve toksik kimyasallar dahil olmak uzere çeşitli türlere ayrılır. Hava kirliliği endüstriyel faaliyetler, ulaşım, tarım, enerji üretimi gibi çeşitli kaynaklardan ve orman yangınları ve volkanik patlamalar gibi doğal olaylardan kaynaklanabilir (Zencirci ve IŞıklı, 2017).



Şekil 2.1 : Hava kirliliği (Akpınar ve diğ., 2019).

2.2 Hava Kirleticilerinin Kaynakları ve Türleri

Hava kirliliği, zararlı maddelerin Dünya atmosferine girmesi, doğal bileŐimini bozması, canlı organizmalar ve ekosistemler için tehdit oluŐturması olarak tanımlanabilir. Hava kirleticileri olarak bilinen bu maddeler, her biri kendine has

özelliklere ve potansiyel çevresel ve sağlık sonuçlarına sahip çok çeşitli parçacık ve gazları kapsar.

Hava kirliliğinin bileşimi oldukça çeşitlidir; hem doğrudan atmosfere yayılan birincil kirleticileri hem de havadaki kimyasal reaksiyonlar yoluyla oluşan ikincil kirleticileri kapsar. Birincil kirleticiler arasında partikül madde (PM), nitrojen oksitler (NO_x), kükürt dioksit (SO₂), karbon monoksit (CO), uçucu organik bileşikler (VOC'ler) ve ağır metaller bulunur. Ozon (O₃) ve ince parçacıklı madde gibi ikincil kirleticiler, öncü kirleticileri içeren karmaşık atmosferik reaksiyonlar yoluyla ortaya çıkar (Özdemir, 2008).

Hava kirliliğinin kaynaklarını anlamak, etkili kontrol ve azaltma stratejileri için çok önemlidir. Ağırlıklı olarak insan faaliyetleriyle ilişkili antropojenik kaynaklar arasında endüstriyel süreçler, araç emisyonları, enerji üretimi ve tarımsal uygulamalar yer almaktadır. Kontrol edilemeyen yangınlar, volkanik patlamalar ve biyojenik emisyonlar gibi doğal kaynaklar da hava kirliliğine daha az oranda katkıda bulunur (Morcalı ve Akan, 2017).

Partikül madde (PM), toz, kir, is ve duman gibi havada asılı kalan küçük parçacıklardan oluşur. PM araç emisyonlarından, endüstriyel proseslerden, inşaat faaliyetlerinden ve tarımsal uygulamalardan kaynaklanabilir. Bu parçacıklar akciğerlerin derinliklerine nüfuz edebilir ve solunum sorunlarına, kalp-damar hastalıklarına ve diğer sağlık sorunlarına neden olabilir.

Nitrojen Oksitler (NO_x), öncelikle araç motorları, enerji santralleri ve endüstriyel tesisler gibi yanma süreçlerinden üretilen yüksek derecede reaktif gazlardan oluşan bir gruptur. NO_x, yer seviyesinde ozon ve partikül madde oluşumuna katkıda bulunarak solunum problemlerine yol açar ve duman oluşumuna neden olur.

Kükürt Dioksit (SO₂), endüstriyel proseslerde ve enerji santrallerinde kömür ve petrol gibi kükürt içeren fosil yakıtların yakılmasıyla üretilen renksiz bir gazdır. SO₂ atmosferdeki diğer bileşiklerle reaksiyona girerek sülfürik asit oluşturabilir, asit yağmurlarına, solunum sorunlarına ve bitki örtüsü ile ekosistemlerin zarar görmesine neden olabilir.

Karbon Monoksit (CO), benzin, doğalgaz ve odun gibi karbon içeren yakıtların eksik yanması sonucu oluşan renksiz, kokusuz bir gazdır. CO kanın oksijen taşıma

kabiliyetine müdahale ederek yüksek konsantrasyonlarda baş ağrılarına, baş dönmesine ve hatta ölüme yol açabilir.

Uçucu Organik Bileşikler (VOC'ler); araç emisyonları, endüstriyel işlemler ve boyalar, solventler ve temizleyiciler gibi ev ürünleri dahil olmak üzere çeşitli kaynaklardan havaya buharlaşan bir grup organik kimyasaldır. VOC'ler yer seviyesinde ozon oluşumuna katkıda bulunur ve solunum yolu tahrişine, baş ağrılarına ve diğer sağlık sorunlarına neden olabilir.

Kurşun, cıva ve kadmiyum gibi ağır metaller endüstriyel faaliyetlerden, madencilik faaliyetlerinden ve fosil yakıtların yanmasından havaya salınan zehirli kirleticilerdir. Bu metaller çevrede ve organizmalarda birikerek insanlar ve yaban hayatı için ciddi sağlık riskleri oluşturabilir (Karasoy ve Demirtaş, 2018; Alkaya, 2023). Kirli topraklarda bulunması muhtemel ağır metaller ve antropojenik kaynakları Çizelge 2.1' de verilmiştir (Zincircioğlu, 2013).

Çizelge 2.1 : Kirli topraklarda bulunması muhtemel ağır metaller ve antropojenik kaynaklar (Zincircioğlu, 2013).

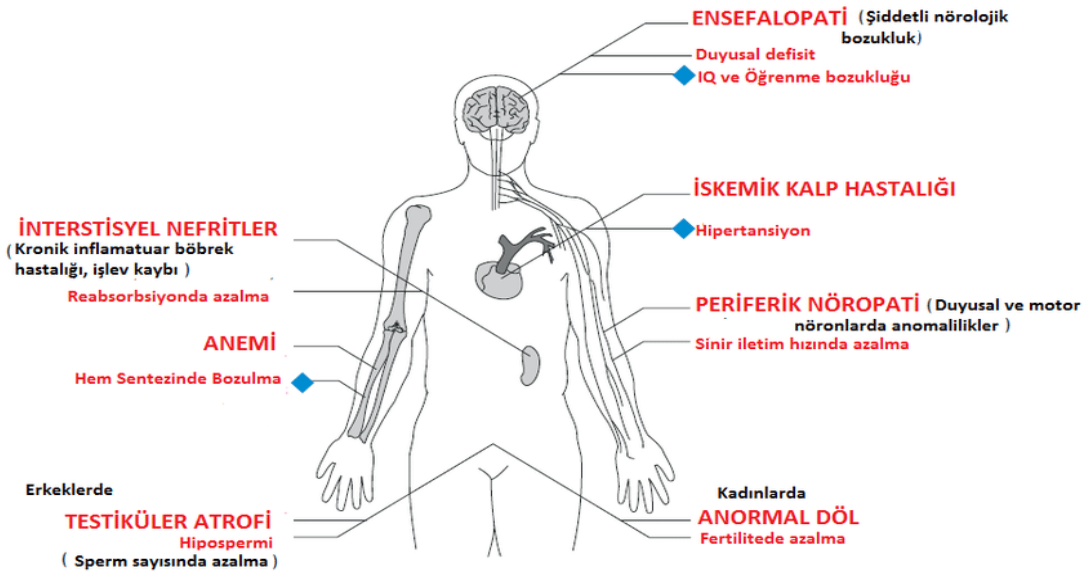
Antropojenik Kaynaklar	Ağır Metal Türleri
<u>Birincil Kaynaklar</u>	
Gübreler (fosfatlı)	Kadmiyum, Kurşun, Arsenik
Kireç	Kurşun, Arsenik
Pestisitler	Kurşun, Arsenik, Cıva
Atık çamur	Kadmiyum, Kurşun, Arsenik
Sulama	Kadmiyum, Kurşun, Selenyum
Gübre	Arsenik, Selenyum
<u>İkincil Kaynaklar</u>	
Otomobiller	Kurşun
Maden sahaları	Kadmiyum, Cıva, Arsenik
Boya	Kadmiyum, Kurşun
Çöp döküm alanları	Kadmiyum, Kurşun, Arsenik
Fosil yakıtlar	Kurşun, Arsenik, Selenyum
Aerosoller	Kadmiyum, Kurşun, Arsenik

Hava kirliliğinin etkileri geniş kapsamlıdır ve çevresel, ekolojik ve insan sağlığı boyutlarına kadar uzanır. Çevresel sonuçlar arasında hava kalitesinin bozulması, asit yağmuru oluşumu ve ekosistemlerin zarar görmesi yer alır. Ekolojik olarak hava

kirliliği toprak ve suyun kirlenmesine yol açarak flora ve faunayı etkileyebilir. İnsan sağlığı, tümü hava kirleticilerine uzun süre maruz kalmayla bağlantılı olan solunum yolu hastalıkları, kardiyovasküler sorunlar ve enfeksiyonlara karşı artan duyarlılık nedeniyle önemli ölçüde tehlikeye atılmaktadır (Bayram ve ark., 2006).

2.3 Hava Kirliliğinin İnsan Sağlığına ve Çevreye Etkileri

Partikül madde (PM), nitrojen oksitler (NO_x), kükürt dioksit (SO₂) ve uçucu organik bileşikler (VOC'ler) gibi hava kirleticilerinin solunması astım, kronik obstrüktif akciğer hastalığı (KOAH), bronşit ve solunum yolu enfeksiyonları gibi solunum sorunlarına yol açabilir. Hava kirliliğine maruz kalma, kalp krizi, felç ve hipertansiyon dahil olmak üzere kardiyovasküler hastalık riskinin artmasıyla ilişkilidir. İnce partikül madde ve nitrojen dioksit özellikle kardiyovasküler problemlerle bağlantılıdır. Benzen, formaldehit ve polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH'lar) gibi bazı hava kirleticiler kanserojen olarak sınıflandırılır ve akciğer kanseri dahil çeşitli kanser türlerinin gelişimiyle bağlantılıdır. Araştırmalar, hava kirliliğine maruz kalmanın özellikle çocuklarda ve yaşlı yetişkinlerde nörolojik bozukluklara, bilişsel gerilemeye ve gelişimsel sorunlara katkıda bulunabileceğini göstermektedir. Hava kirliliği, düşük doğum ağırlığı, erken doğum ve fetüslerdeki gelişimsel anormallikler dahil olmak üzere üreme sağlığını ve hamilelik sonuçlarını etkileyebilir (Menteşe, 2017; Altıntaş, 2020). Şekil 2.2'de bazı ağır metallerin insan sağlığına etkileri ve toksisite düzeyleri, ağır metal toksisitesinin insan sağlığına etkileri Çizelge 2.2' de verilmiştir.



Şekil 2.2 : Ağır metal toksisitesinin insan sağlığına etkileri (Özbolet ve Tuli, 2016).

Çizelge 2.2 : Bazı ağır metallerin insan sağlığına etkileri ve toksisite düzeyleri (Aksoy, 2012).

Ağır metal	Etkileri	Toksisite düzeyi
Pb	Polinöropati, ensefalit, anemi, hipertansiyon, kanser etkisi	Yüksek derece toksik
Hg	Nörolojik bulgular, guatr, taşikardi, düzensiz nabız, unutkanlık, sabırsızlık	Yüksek derece toksik
Cd	Yüksek tansiyon, akciğer kanseri, kemik erimesi, kansızlık	Orta derecetoksik
As	Böbrek-karaciğer ve görme bozuklukarı, kanser etkisi	Yüksek derece Toksik
Li	Nörolojik bulgular, kas zayıflıkları	Hafif derece Toksik
Cu	Karın ağrısı, kusma, kansızlık, solunum sıkıntısı	Yüksek derece Toksik
Co	Çok nadir görülen etki söz konusudur	Hafif derece toksik
Cr	Deri sorunları, ülser, kanser, solunum sistemi problemleri	Yüksek derece toksik

Karbon dioksit (CO₂), metan (CH₄) ve nitroz oksit (N₂O) gibi belirli hava kirleticiler, ısıyı atmosferde hapsederek ve Dünyanın enerji dengesini değiştirerek küresel ısınmaya ve iklim değişikliğine neden olur. Hava kirliliği bitki örtüsüne zarar vererek, toprağı ve su kütlelerini asitlendirerek, besin zincirlerini bozarak ve habitat kaybına neden olarak ekosistemlere ve biyolojik çeşitliliğe zarar verebilir. Kükürt dioksit ve nitrojen oksitler atmosferdeki su buharıyla reaksiyona girerek sülfürik asit ve nitrik asit oluşturarak asit yağmurlarına neden olabilir. Asit yağmuru ormanlara, toprağa, tatlı su ekosistemlerine, binalara ve altyapıya zarar verebilir. Kloroflorokarbonlar (CFC'ler) ve halonlar gibi bazı hava kirleticiler, Dünya'nın stratosferindeki ozon tabakasının tükenmesine katkıda bulunur ve bu tabaka, Dünya'daki yaşamı zararlı ultraviyole (UV) radyasyondan korur (Kayıkçıoğlu, 2008).

2.4 Hava Kirliliğinde Tarihten Örnekler

Hava kirliliğini azaltmaya yönelik stratejilerin gelişimini anlamak için çevre koruma söylemini şekillendiren tarihsel örnekleri incelemek zorunludur. Bu bölüm,

toplumların hava kirliliği sorunlarıyla boğuştuğu önemli anları ve örnekleri ele almakta ve zaman içinde farkındalığın, teknolojik tepkilerin ve politika girişimlerinin ilerlemesine dikkat çekmektedir.

- Sanayi Devrimi ve Londra'nın Dumanı (1952):

Hava kirliliğinin en eski ve en kötü bilinen olaylarından biri, Sanayi Devrimi sırasında 20. yüzyılın ortalarına kadar uzanmaktadır. 1952'de Londra'nın Büyük Kirli Havası, endüstriyel emisyonlar ve yerli kömür yakılmasının birleşiminin şehri saran kalın bir duman tabakasıyla sonuçlandığı ufuk açıcı bir olay olarak öne çıkmaktadır. Olay, yaygın sağlık sorunlarına yol açmış ve kontrolsüz hava kirliliğinin ciddi sonuçlarının anlaşılmasında bir paradigma değişikliğini tetiklemiştir. Birleşik Krallık'ta kirli hava olayını takip eden 1956 tarihli Temiz Hava Yasası, önemli bir yasal düzenlemeye işaret ederek küresel çapta daha sonraki hava kalitesi düzenlemelerine zemin hazırlamıştır (Drinker, 1958; Polivka, 2018).

- Los Angeles Duman Krizi (1940-1950):

20. yüzyılın ortalarında Los Angeles'taki hızlı kentleşme ve otomobil patlaması, kötü şöhretli sis krizine yol açmıştır. Araç emisyonları ve atmosferik koşulların birleşimiyle daha da kötüleşen yüksek ozon ve diğer kirletici seviyeleri, şehrin üzerinde gözle görülür bir sis oluşturmuştur. Bu kriz, bilimsel araştırmaları ve sıkı emisyon kontrollerinin uygulanmasını teşvik ederek 1970 yılında ABD Çevre Koruma Ajansı'nın (EPA) kurulmasına katkıda bulunmuştur. Los Angeles deneyiminden öğrenilen dersler, Amerika Birleşik Devletleri'nde daha sonraki hava kalitesi yönetimi politikalarının şekillendirilmesinde çok önemli hale gelmiştir (Stern ve Professor, 1982).

- Cuyahoga Nehri Yangını ve Çevre Koruma Ajansının Doğuşu (1969):

1969'da Ohio'da meydana gelen Cuyahoga Nehri yangını, doğrudan hava kirliliğiyle ilgili olmasa da, endüstriyel faaliyetlerin neden olduğu yaygın çevresel bozulmanın altını çizmiştir. Olay, hava ve su kirliliğine ilişkin artan endişelerle birlikte, 1970 yılında ABD Çevre Koruma Ajansı'nın (EPA) kurulmasıyla doruğa ulaşmıştır. EPA, hava kirliliği de dahil olmak üzere çeşitli çevresel sorunları ele alma çabalarını koordine etmede ve hava kalitesi kontrolü için ulusal standartlar oluşturmada önemli bir rol oynamıştır (Cronin, 2019).

- Aşk Kanalı ve Tehlikeli Atık Mevzuatı (1970'ler):

1970'lerde yaşanan Aşk Kanalı çevre felaketi, hava kirleticiler de dahil olmak üzere atıkların uygunsuz şekilde bertaraf edilmesinin tehlikelerine ışık tutmuştur. Olay, Amerika Birleşik Devletleri'nde hem hava hem de su kalitesini etkileyen kirleticilerle ilgili daha geniş bir konuyu ele alan Kaynak Koruma ve Geri Kazanım Yasası (RCRA) gibi tehlikeli atık mevzuatının yürürlüğe girmesine yol açmıştır. Bu yasal tepki, çevresel zorlukların birbiriyle bağlantılı olduğunu ve kapsamlı düzenleyici çerçevelere olan ihtiyacın altını çizmiştir (Lowen ve diğ., 1997).

2.5 Hava Kirliliğine Sebep Olan Faktörler

Hava kirliliği, çeşitli faktörlerden etkilenen çok yönlü bir çevresel sorundur. Bu nedensel unsurların inceliklerini anlamak, hava kirliliği kontrolüne yönelik etkili stratejilerin formüle edilmesi açısından çok önemlidir. Bu bölümde, antropojenik faaliyetlerden doğal olaylara kadar, hava kirliliğinin oluşmasına ve şiddetlenmesine katkıda bulunan çeşitli faktörler ele alınmaktadır.

2.5.1 Antropojenik kaynaklar

- Endüstriyel Emisyonlar:

Hava kirliliğine en çok katkıda bulunanlardan biri endüstriyel faaliyetlerdir. Üretim süreçlerinden, enerji üretiminden ve kimyasal üretimden kaynaklanan emisyonlar, atmosfere çok sayıda kirletici madde salar. Özellikle fosil yakıtların yanması büyük miktarlarda karbondioksit (CO₂), kükürt dioksit (SO₂), nitrojen oksitler (NO_x) ve partikül madde açığa çıkararak hava kalitesinin bozulmasına önemli ölçüde katkıda bulunur (Fernández-Camacho ve diğ., 2012).

- Taşımacılık Emisyonları:

Araç trafiğindeki hızlı artış, özellikle kentsel alanlarda hava kirliliğinin önemli bir kaynağıdır. İçten yanmalı motorlar nitrojen dioksit (NO₂), karbon monoksit (CO), uçucu organik bileşikler (VOC'ler) ve ince partikül madde (PM_{2,5}) gibi kirletici maddeler yayar. Otomobillerde benzin ve dizel yakıtların yanması, hava kalitesinin bozulmasına önemli bir antropojenik katkıyı temsil etmektedir (Friedrich ve diğ., 2006).

- Tarımsal Uygulamalar:

Bazı tarımsal faaliyetler, gübrelerden ve hayvancılıktan amonyak (NH₃), enterik fermantasyondan metan (CH₄) ve toprak yönetimi uygulamalarından nitroz oksit (N₂O) salınımı yoluyla hava kirliliğine katkıda bulunur. Bu tarımsal emisyonlar sadece hava kalitesini etkilemekle kalmamakta, aynı zamanda ozon (O₃) gibi ikincil kirleticilerin oluşumuna da katkıda bulunmaktadır (Morgan ve diğ., 2015).

2.5.2 Doğal kaynaklar

- Volkanik Aktivite:

Volkanik patlamalar atmosfere büyük miktarlarda gaz ve partikül madde salarak bölgesel ve bazen de küresel ölçekte hava kalitesini etkiler. Volkanik emisyonlar doğal olaylar olmasına rağmen hava kirliliğine önemli ölçüde katkıda bulunabilir ve hava kalitesinde geçici bozulmalara yol açabilir (Marra ve diğ., 2014).

- Orman Yangınları:

Hem doğal hem de insan kaynaklı orman yangınları büyük miktarda partikül madde, karbondioksit ve diğer kirleticileri yayar. Bu yangınlar yalnızca hava kalitesini düşürmekle kalmamakta, aynı zamanda küresel karbon döngüsüne de katkıda bulunarak iklim düzenlerini etkilemektedir (Heil, 2007).

2.5.3 Kentleşme ve arazi kullanımı değişiklikleri:

- Kentsel Isı Adası Etkisi:

Kentsel alanlar genişledikçe kentsel ısı adası etkisine yol açıyor; burada artan ısı ve değişen atmosferik koşullar, havayı kirleten maddelerin oluşumunu yoğunlaştırabiliyor. Kentsel ortamlardaki değişen mikro iklimler, kirleticilerin dağılımını ve dönüşümünü etkileyerek hava kalitesi sorunlarını şiddetlendirebilir (Mokarram ve diğ., 2023).

2.5.4 Kirleticiler

Hava kirliliği, her biri farklı kimyasal özelliklere ve kaynaklara sahip olan çeşitli kirleticilerin varlığıyla karakterize edilir. Bu kirleticileri anlamak, bunların kontrolünü amaçlayan biyolojik süreçlerin inceliklerini anlamak açısından çok önemlidir. Bu bölümde, hem birincil hem de ikincil kirleticileri ve bunların kaynaklarını kapsayan, hava kirliliğine katkıda bulunan başlıca kirletici sınıfları incelenmektedir.

- Birincil Kirleticiler

Partikül Madde (PM), çeşitli kaynakları ve hava kalitesi ve insan sağlığı üzerindeki etkileri ile önemli bir birincil kirletici olarak öne çıkmaktadır. PM, boyut ve bileşimleri değişen, havada asılı duran küçük parçacıklar veya sıvı damlacıkları ifade eder. İki temel kategori olan PM_{2.5} ve PM₁₀, sırasıyla 2,5 mikrometre veya daha küçük ve 10 mikrometre veya daha küçük çaplı parçacıkları temsil eder.

Partikül madde bir dizi antropojenik ve doğal kaynaktan kaynaklanır. Endüstriyel işlemler ve enerji üretimi sırasında kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtların yakılması PM emisyonlarına önemli ölçüde katkıda bulunur. Ek olarak, dizel ve benzinli motorlardan kaynaklananlar da dahil olmak üzere araç emisyonları, atmosfere partikül madde salmaktadır. Endüstriyel faaliyetler, inşaat ve çeşitli yanma süreçleri ayrıca partikül madde oluşumuna katkıda bulunur.

PM_{2.5} ve PM₁₀, boyutları ve sağlık üzerindeki olası etkileri nedeniyle özellikle endişe vericidir. Bu ince parçacıklar solunum sistemine nüfuz edebilir, akciğerlere ulaşabilir ve hatta kan dolaşımına bile girebilir. Boyutu daha küçük olan PM_{2.5}, solunum yollarının daha derinlerine nüfuz edebildiğinden daha büyük bir risk oluşturmaktadır. Yüksek PM seviyelerine uzun süreli maruz kalma, solunum ve kardiyovasküler hastalıklar dahil olmak üzere çeşitli sağlık sorunlarının yanı sıra erken ölüm riskinin artmasıyla ilişkilidir.

Havada yüksek düzeyde partikül madde varlığı, hava kalitesinin ve görünürlüğün azalmasına neden olur. İnce parçacıklar güneş ışığını dağıtarak puslu koşullara ve görüş mesafesinin azalmasına neden olabilir. Ayrıca PM atmosferdeki diğer kirleticilerle reaksiyona girerek yer seviyesindeki ozon gibi ikincil kirleticilerin oluşumuna neden olabilir.

(Burger ve diğ., 2020) çalışması, hava kalitesi bağlamında partikül maddeyi anlamının önemini altını çizmektedir. Araştırmaları muhtemelen parçacıklı maddenin spesifik kaynaklarını, özelliklerini ve etkilerini araştırmakta ve hedeflenen hava kirliliği kontrol stratejilerinin geliştirilmesi için değerli bilgiler sağlamaktadır. Bu araştırma, PM ile ilgili zorluklara ilişkin incelikli bir bakış açısı sunmakta ve potansiyel çözümlere bilgi sağlamaktadır.

PM_{2.5} ve PM₁₀'u kapsayan partikül madde, yaygın kaynakları olan ve hem hava kalitesi hem de halk sağlığı üzerinde olumsuz etkileri olan kritik bir birincil kirletici olarak

ortaya çıkmaktadır. Etkili hava kirliliği kontrol önlemleri, partikül maddenin çeşitli kökenlerini ele almalı ve bunun çevre ve insan refahı üzerindeki etkisini azaltmak için kapsamlı stratejilere olan ihtiyacı vurgulamalıdır (Burger ve diğ., 2020).

- Azot Oksitler (NO_x)

Azot Oksitler (NO_x), esas olarak nitrojen monoksit (NO) ve nitrojen dioksitten (NO₂) oluşan önemli bir gaz ailesini oluşturur ve hava kirliliğinde önemli bir rol oynar. Bu kirleticiler, öncelikle araçlarda ve endüstriyel tesislerde meydana gelen yanma işlemlerinin bir sonucudur.

Azot oksitler, en yaygın olanları nitrojen monoksit (NO) ve nitrojen dioksit (NO₂) olmak üzere bir grup reaktif gazı kapsar. NO renksiz bir gazdır, NO₂ ise belirgin, keskin bir kokuya sahip kırmızımsı kahverengi bir gazdır. Atmosferdeki NO_x'in bileşimi ve konsantrasyonu, yanma türü, yakıt özellikleri ve çevre koşulları dahil olmak üzere çeşitli faktörlerden etkilenir.

Yanma süreçleri, özellikle araç trafiği ve endüstriyel faaliyetlerle ilgili olanlar, NO_x emisyonlarına önemli katkılarda bulunur. Taşımacılık sektöründe, otomobil ve kamyonlardaki içten yanmalı motorlar, yakıtın yanması sonucu nitrojen oksit açığa çıkarır. Benzer şekilde, enerji santralleri ve üretim birimleri gibi fosil yakıt kullanan endüstriyel tesisler de NO_x emisyonlarına önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır.

Nitrojen oksitler, sağlık ve çevresel etkileri iyi belgelenmiş ikincil bir kirletici olan yer seviyesindeki ozonun oluşumunda çok önemli bir rol oynar. Güneş ışığının varlığında NO_x, fotokimyasal reaksiyonlar yoluyla ozon oluşturmak üzere uçucu organik bileşiklerle (VOC'ler) reaksiyona girer. Yer seviyesindeki ozon dumanının önemli bir bileşenidir ve özellikle savunmasız popülasyonlarda solunum sorunlarına neden olabilir.

Yüksek seviyelerde nitrojen oksitlere maruz kalmanın insan sağlığı üzerinde olumsuz etkileri olabilir. Hem NO hem de NO₂ solunum sistemini tahriş edebilir, bronşit ve astımın alevlenmesi gibi durumlara yol açabilir. Uzun süreli maruz kalma aynı zamanda kardiyovasküler hastalıkların gelişmesine de katkıda bulunabilir. Ayrıca nitrojen oksitlerin, asit yağmuru oluşumu ve ekosistemlerin zarar görmesi dahil olmak üzere çevre üzerinde zararlı etkileri olabilir.

Li'nin (2019) çalışması, nitrojen oksitlerin spesifik dinamiklerini, kaynaklarını, dönüşüm mekanizmalarını ve hava kalitesi üzerindeki etkilerini araştırmaktadır. Bu

araştırma, NO_x emisyonlarının anlaşılmasındaki en son gelişmeler ve bunların hem insan sağlığı hem de çevre üzerindeki etkileri hakkında değerli bilgiler sağlayabilir.

- Kükürt Dioksit (SO₂)

Kükürt Dioksit (SO₂), esas olarak kömür ve petrol gibi kükürt içeren fosil yakıtların yanmasından kaynaklanan önemli bir birincil kirleticidir. Endüstriyel faaliyetler, enerji santralleri ve spesifik taşıma süreçleri, SO₂ emisyonlarının ana kaynaklarını oluşturur.

Kükürt içeren fosil yakıtlar yandığında kükürt dioksit üretilir. Endüstriyel tesislerde ve enerji santrallerinde yaygın olarak kullanılan kömür ve petrol, önemli kükürt kaynaklarıdır. Özellikle kükürt içeren yakıtlarla çalışan araçları içeren belirli taşımacılık faaliyetleri, SO₂'nin atmosfere salınmasına neden olur.

Endüstriyel tesisler ve enerji santralleri, fosil yakıtlara bağımlı olmaları nedeniyle kükürt dioksit emisyonlarına önemli katkılarda bulunmaktadır. Bu ortamlardaki yanma süreçleri kükürt dioksit açığa çıkararak bu kirleticinin atmosferdeki genel yükünü artırır. Kükürt içeren hammaddelerin endüstrilerde çıkarılması ve işlenmesi de SO₂ emisyonlarında rol oynamaktadır.

Özellikle kükürt içeren yakıtların yakılmasını içeren özel taşıma faaliyetleri, kükürt dioksidin salınmasına katkıda bulunur. Genel ulaşım emisyonları çeşitli olsa da, nakliye ve ağır karayolu taşımacılığı gibi belirli sektörler kayda değer miktarlarda SO₂ salımına neden olabilir.

Kükürt dioksit atmosfere salındığında kimyasal dönüşümlere uğrayabilir. Diğer atmosferik bileşenlerle reaksiyona girerek sülfat aerosollerinin oluşumuna yol açar. Bu aerosoller partikül madde oluşumuna katkıda bulunabilir ve hava kalitesi ve solunum sağlığı üzerinde olumsuz etkileri olabilir.

Dahası, kükürt dioksit asit yağmuru oluşumunun önemli bir öncüsüdür. SO₂, su buharı ve diğer atmosferik bileşenlerle reaksiyona girdiğinde, asit yağmuru olarak depolanmadan önce uzun mesafelere taşınabilen sülfürik asit (H₂SO₄) oluşturur. Asit yağmurunun ekosistemler, toprak kalitesi ve su kütleleri üzerinde zararlı etkileri vardır; sudaki yaşamı ve bitki örtüsünü etkiler.

Chiang ve Gao'nun (2022) çalışması kükürt dioksit emisyonları, kaynakları ve çevresel etkilerine ilişkin çağdaş anlayışa odaklanmaktadır. Bu araştırma, potansiyel olarak

izleme, modelleme ve kontrol önlemlerindeki ilerlemeler de dahil olmak üzere, SO₂ çalışmasındaki son gelişmelere dair içgörü sağlamaktadır.

- Karbon Monoksit (CO)

Karbon Monoksit (CO), öncelikle karbon içeren yakıtların eksik yanması sonucu oluşan, önemli bir birincil kirletici olarak ortaya çıkan renksiz ve kokusuz bir gazdır. Yaygın CO kaynakları arasında araç emisyonları, endüstriyel işlemler ve konut ısıtması yer alır.

Karbon monoksit, karbon içeren yakıtların tamamen yanmadığı bir süreç olan eksik yanmanın bir yan ürünüdür. Benzin, dizel, doğalgaz veya odun gibi yakıtların yanması sırasında yeterli oksijen bulunmadığında eksik yanma meydana gelir. Sonuç, daha eksiksiz yanma yan ürünü olan karbondioksit yerine karbon monoksit üretimidir.

Araç Emisyonları: Araçlardaki içten yanmalı motorlar, özellikle de benzin veya dizelle çalışan araçlar, egzoz gazlarının bir parçası olarak karbon monoksit yayar. Trafik yoğun olduğu kentsel alanlarda araç emisyonları ortamdaki CO seviyelerine önemli ölçüde katkıda bulunur.

Endüstriyel Süreçler: Fosil yakıtların yakılmasını içeren bazı endüstriyel faaliyetler havaya karbon monoksit salabilir. Fabrikalar, enerji santralleri ve çeşitli üretim süreçleri endüstriyel CO emisyonlarına katkıda bulunur.

Konut Isıtma: Odun sobası, gazlı ısıtıcılar veya şömineler gibi konut ortamlarında ısıtma için karbon içeren yakıtların kullanılması, karbon monoksit üretimine yol açabilir. Uygun şekilde havalandırılmayan veya arızalı ısıtma sistemleri iç mekandaki CO düzeylerini artırabilir.

Karbon monoksit, kanın oksijen taşıma kapasitesine müdahale etme özelliği nedeniyle ciddi sağlık riskleri oluşturur. CO, solunduğunda kandaki hemoglobine oksijenden daha güçlü bir şekilde bağlanarak karboksihemoglobin oluşturur. Bu, kan dolaşımında taşınabilen oksijen miktarını azaltarak hayati organ ve dokularda oksijen yoksunluğuna yol açar.

Wei ve ark. (2012) muhtemelen karbon monoksit ile ilgili spesifik bulguları derinlemesine inceleyerek potansiyel kaynakları, maruz kalma düzeylerini ve ilgili sağlık etkilerini araştırmaktadır. Bu araştırma, CO kirliliğinin nüansları hakkında

değerli bilgiler sağlayabilir ve bunun kontrolü ve hafifletilmesine yönelik stratejilerin geliştirilmesine katkıda bulunabilir.

Karbon monoksit maruziyetini azaltmak için çeşitli önleyici tedbirler ve kontrol stratejileri gereklidir. Bunlar arasında yanma cihazlarının uygun bakımı, kapalı alanlarda yeterli havalandırma, araç egzoz sistemlerinin düzenli denetimi ve CO zehirlenmesinin tehlikelerine ilişkin kamuoyunu bilinçlendirme kampanyaları yer almaktadır.

Karbon içeren yakıtların eksik yanmasından kaynaklanan karbon monoksit, önemli sağlık riskleri oluşturmaktadır. Kaynaklarını anlamak ve etkili kontrol önlemlerini uygulamak, halk sağlığını korumak ve bu renksiz ancak tehlikeli gazla ilgili hava kalitesiyle ilgili endişeleri gidermek için çok önemlidir (Menteşe ve Çotuker, 2021).

- Uçucu Organik Bileşikler (VOC'ler)

Uçucu Organik Bileşikler (VOC'ler), havaya kolayca buharlaşma yetenekleriyle karakterize edilen çeşitli organik kimyasallar grubunu oluşturur. Bu bileşiklerin endüstriyel işlemlerden ve araç egzozundan belirli tüketici ürünlerinin kullanımına kadar değişen kaynakları vardır. VOC'ler yer seviyesinde ozon oluşumunda önemli bir rol oynar ve doğrudan sağlık etkilerine sahip olabilir.

Geniş Kimyasallar Aralığı: VOC'ler hidrokarbonlar, aldehytlar, ketonlar ve eterler dahil olmak üzere geniş bir organik kimyasal yelpazesini kapsar. Uçuculukları, sıvı veya katı halden havaya geçmelerine olanak tanıyarak atmosferdeki dağılımlarına katkıda bulunur.

Endüstriyel Süreçler: İmalat, boyama ve kimyasal üretim gibi çeşitli endüstriyel faaliyetler havaya VOC salar. Solvent bazlı boyalar, yapıştırıcılar ve kaplamalar endüstriyel ortamlarda yaygın VOC emisyon kaynaklarıdır.

Araç Egzozu: Özellikle içten yanmalı motorlu araçlarda fosil yakıtların yanması, egzoz gazlarının bir parçası olarak VOC emisyonuna yol açar. Benzin buharları ve yakıtın eksik yanması bu bileşiklerin salınmasına katkıda bulunur.

Tüketici Ürünleri: Temizlik maddeleri, kişisel bakım ürünleri ve oda spreyleri gibi ev eşyaları gibi belirli tüketici ürünlerinin kullanımı, VOC'lerin iç ortamlara salınmasına neden olabilir. Halılar ve mobilyalar da dahil olmak üzere inşaat malzemeleri de zamanla VOC yayabilir.

VOC'ler, fotokimyasal reaksiyonlar yoluyla yer seviyesinde ozon oluşumunda önemli bir rol oynar. VOC'ler güneş ışığının varlığında nitrojen oksitlerle (NO_x) reaksiyona girdiğinde ozon üretilir. Yer seviyesindeki ozon, stratosferde faydalı olmasına rağmen, solunum sağlığı üzerinde olumsuz etkilere sahip olabilir ve daha düşük rakımlarda mevcut olduğunda duman oluşumuna neden olabilir (Tsai, 2019).

Yüksek konsantrasyonlarda VOC'lere maruz kalmanın sağlık üzerinde doğrudan etkileri olabilir. Kısa süreli maruz kalma baş ağrısı, göz ve boğaz tahrişi ve mide bulantısı gibi semptomlara yol açabilir. Benzen ve formaldehit gibi belirli VOC'lere uzun süreli maruz kalma, karaciğer, böbrekler ve merkezi sinir sistemi hasarı da dahil olmak üzere daha ciddi sağlık riskleriyle ilişkilidir. Ek olarak, bazı VOC'ler solunum rahatsızlıklarının ve alerjilerin gelişmesine neden olabilir (Al-Mudhaf ve diğ., 2019).

Al-Mudhaf ve ark. (2019) VOC'lerle ilgili spesifik bulguları derinlemesine inceleyerek potansiyel olarak bunların kaynaklarını, ortam seviyelerini ve ilgili sağlık ve çevresel etkilerini araştırmaktadır. Bu araştırma, VOC kirliliğinin dinamikleri hakkında değerli bilgiler sağlamakta ve emisyonlarını düzenleme ve kontrol etmeye yönelik devam eden çabalara katkıda bulunmaktadır.

Uçucu Organik Bileşikler, çeşitli kaynaklara sahip ve hava kalitesi ve halk sağlığı üzerinde önemli etkileri olan karmaşık bir kirletici sınıfını temsil etmektedir. VOC emisyonlarını anlamak ve ele almak, bunların hem çevre hem de insan refahı üzerindeki etkilerini azaltmak açısından kritik öneme sahiptir.

2.5.5 İkincil Kirleticiler

- Ozon (O_3)

Ozon (O_3), stratosferde önemli olmasına rağmen yer seviyesinde kirletici haline gelen eşsiz bir atmosferik bileşendir. Yer seviyesinde ozon, nitrojen oksitler (NO_x) ve uçucu organik bileşikler (VOC'ler) gibi öncül kirleticileri içeren fotokimyasal reaksiyonlar yoluyla oluşturulur. Bu ikincil kirletici, sağlık riskleri oluşturur ve dumanın oluşmasına oldukça önem arz eder. Yer seviyesinde ozonun oluşumu çeşitli atmosferik koşullardan etkilenen karmaşık bir süreçtir.

Stratosferik Ozon: Ozon doğal olarak stratosferde oluşur ve Dünya'yı zararlı ultraviyole (UV) radyasyondan korumada önemli bir rol oynayan ozon tabakasını

oluşturur. Bu bağlamda ozon, Dünya atmosferinin dengesinin korunması açısından faydalı ve gereklidir.

Yer Seviyesinde Ozon: Ancak yer seviyesinde ozon farklı özelliklere sahip bir kirletici haline gelir. Yer seviyesindeki ozon doğrudan havaya yayılmaz, ancak insan faaliyetlerinden salınan öncül kirleticileri içeren kimyasal reaksiyonların bir sonucu olarak oluşur.

Fotokimyasal Reaksiyonlar: Yer seviyesindeki ozon, öncelikle güneş ışığının yönlendirdiği fotokimyasal reaksiyonlar yoluyla oluşur. Bu, güneş ışığının varlığında öncül kirleticilerin (azot oksitler (NO_x) ve uçucu organik bileşiklerin (VOC'ler)) etkileşimini içerir.

Öncü olarak NO_x ve VOC'ler: Azot oksitler (NO_x), araç emisyonları ve endüstriyel faaliyetler gibi yanma süreçlerinden salınır. VOC'ler endüstriyel işlemler, araç egzozu ve belirli tüketici ürünleri dahil olmak üzere çeşitli kaynaklardan gelir. NO_x ve VOC'ler güneş ışığının varlığında reaksiyona girdiğinde, ikincil kirletici olarak yer seviyesinde ozon üretilir.

Sağlık Riskleri: Yer seviyesindeki ozon, özellikle solunum sistemi için sağlık riskleri oluşturur. Astım ve diğer akciğer hastalıkları gibi solunum rahatsızlıklarına neden olabilir veya bunları şiddetlendirebilir. Uzun süreli maruz kalma akciğer fonksiyonlarının azalmasına ve diğer solunum problemlerine yol açabilir.

Duman Oluşumu: Yer seviyesindeki ozon dumanın önemli bir bileşenidir ve oluşumuna katkıda bulunur. Puslu bir görünüm ve zayıf görünürlük ile karakterize edilen sis, hava kalitesine zararlıdır ve geniş kapsamlı çevre ve sağlık etkilerine sahip olabilir.

Atmosfer Koşulları: Yer seviyesindeki ozonun oluşumu, atmosferik koşullardan etkilenen karmaşık bir süreçtir. Sıcaklık, güneş ışığı yoğunluğu, rüzgar düzeni ve diğer kirleticilerin varlığı gibi faktörler ozon oluşumunun hızını ve kapsamını etkileyebilir (Wei ve diğ., 2022).

Zhang ve diğ (2023) yer seviyesinde ozon oluşumunun spesifik dinamiklerini ve potansiyel olarak öncül kirleticiler ile atmosferik koşullar arasındaki karmaşık etkileşimleri araştırmaktadır. Bu araştırma, yer seviyesindeki ozonun anlaşılmasındaki en son gelişmeler ve bunun hava kalitesi ve halk sağlığı üzerindeki etkileri hakkında değerli bilgiler sağlayabilir (Zhang ve diğ., 2023).

NO_x ve VOC'leri içeren fotokimyasal reaksiyonlar yoluyla oluşan yer seviyesindeki ozon, sağlık riskleri ve duman oluşumuna neden olan önemli bir hava kirleticisini temsil etmektedir. Oluşumunu yöneten karmaşık süreçleri anlamak, hava kalitesi ve insan sağlığı üzerindeki etkisini azaltmaya yönelik etkili stratejiler geliştirmek için önemlidir (Wei ve diğ., 2022).

2.6 Hava Kirliliğinin Önlenebilmesi için Uygulanan Prosesler

Hava kirliliğinin yarattığı zorlukların ele alınması, kirleticilerin atmosfere emisyonunu önlemek, azaltmak veya ortadan kaldırmak için tasarlanmış çeşitli süreçleri içeren kapsamlı bir yaklaşımı gerektirir. Bu bölümde, kirletici oluşumundan emisyon kontrolüne kadar farklı aşamalarda uygulanan ve hava kirliliğinin önlenmesine yönelik genel hedefe katkıda bulunan bir dizi süreç incelenmektedir. Bu süreçleri anlamak, potansiyel sinerjiyi değerlendirmek ve biyolojik yöntemlerin mevcut stratejilere entegrasyonunu sağlamak için çok önemlidir.

Endüstriyel süreçlerdeki teknolojik gelişmeler, emisyonların kaynağında azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Daha temiz ve daha verimli teknolojilerin uygulanması, kirleticilerin havaya salınmasını en aza indirebilir. Buna düşük emisyonlu yanma teknolojilerinin benimsenmesi, gelişmiş üretim uygulamaları ve alternatif malzemelerin kullanımı da dahildir.

Güneş, rüzgar ve hidroelektrik gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş, konvansiyonel enerji üretimiyle bağlantılı hava kirliliğinin önlenmesinde temel bir stratejidir. Fosil yakıt bazlı enerji üretiminin daha temiz alternatiflerle değiştirilmesiyle kükürt dioksit, nitrojen oksitler ve partikül madde gibi kirleticilerin emisyonları önemli ölçüde azaltılabilir.

Fosil yakıtların yakılmasını içeren endüstriyel proseslerde, emisyonlardan kükürt dioksitin (SO₂) uzaklaştırılması için baca gazı kükürt giderme sistemleri kullanılmaktadır. Bu teknoloji, kükürt bileşiklerinin atmosferik birikimini azaltarak asit yağmuru oluşumunu ve bunun çevresel sonuçlarını hafifletir.

Enerji santralleri ve endüstriyel tesislerden kaynaklanan nitrojen oksit (NO_x) emisyonlarını kontrol etmek için seçici katalitik indirgeme ve seçici katalitik olmayan indirgeme teknolojileri uygulanmaktadır. Bu işlemler, NO_x'i kimyasal olarak daha az

zararlı maddelere dönüştürmek için reaktiflerin enjeksiyonunu içerir ve böylece hava kalitesinin iyileştirilmesine katkıda bulunur.

Dünya çapındaki hükümetler, atmosferdeki belirli kirleticilerin konsantrasyonunu sınırlamak için hava kalitesi standartları oluşturulmaktadır. Hava kalitesinin sürekli izlenmesi, bu standartlara uygunluğun değerlendirilmesine yardımcı olur ve düzenleyici karar alma süreçleri için gerekli verileri sağlar. Sıkı standartlar, endüstrileri daha temiz uygulamaları benimsemeye teşvik eder.

Taşımacılık sektörünün önemli katkısı göz önüne alındığında, araçlar için emisyon standartlarının uygulanması hava kirliliğinin önlenmesinde çok önemli bir husustur. Yakıt kalitesi, araç emisyonları ve periyodik denetimlerle ilgili düzenlemeler, araç faaliyetlerinin çevresel etkisinin azaltılmasına katkıda bulunur.

Hava kirliliğinin kaynakları ve etkileri konusunda kamuoyunun bilinçlendirilmesi, bireysel ve kolektif davranışları etkileyen önleyici bir tedbirdir. Çevre eğitimi kampanyaları, topluluk katılımı ve savunuculuk çabaları, sorumluluk duygusunu teşvik eder ve sürdürülebilir uygulamaları teşvik ederek kirliliğin önlenmesine katkıda bulunur (Cheremisinoff, 2002; Kennes & Veiga, 2013; Maduna & Tomašić, 2018; Xie ve diğ., 2018).

Hava kirliliğinin kontrolü ve azaltılması fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçleri kapsayan çok yönlü bir yaklaşımı içermektedir. Bu bölüm, kirleticilerin ilk oluşumundan atmosferdeki dağılımlarına kadar çeşitli aşamalarda hava kirliliğini gidermek için kullanılan çeşitli yöntemleri incelemektedir. Bu süreçleri anlamak, daha geniş hava kirliliği kontrolü bağlamında biyolojik yöntemlerin potansiyel sinerjilerini ve benzersiz katkılarını kavramanın ayrılmaz bir parçasıdır.

2.6.1 Fiziksel süreçler

Fiziksel prosesler, endüstriyel emisyonlardan ve ortam havasından partikül maddenin (PM) mekanik olarak uzaklaştırılmasını içerir. Elektrostatik çökticiler ve kumaş filtreler gibi çeşitli filtreleme teknolojileri, partikülleri boyut ve yüke göre yakalar ve ayırır. Bu yöntemler, özellikle endüstriyel ortamlarda PM konsantrasyonunu azaltmada etkilidir (Piketh and Burger, 2020).

Kirleticilerin dağılımını kontrol etmek fiziksel süreçlerin çok önemli bir yönüdür. Kirleticilerin atmosfere salınmasını ve yayılmasını yönetmek için yığın yüksekliği

optimizasyonu ve dağılım modellemesi gibi teknikler kullanılır. Bu yöntemler, emisyonların çevredeki hava kalitesi üzerindeki etkisini en aza indirmeyi amaçlamaktadır (Neshuku, 2012).

2.6.2 Kimyasal süreçler

Kimyasal prosesler, gaz halindeki kirleticileri endüstriyel emisyonlardan uzaklaştırmak için yıkayıcıların ve emme kulelerinin kullanımını içerir. Örneğin, baca gazı kükürt giderme (FGD) sistemleri, kükürt dioksiti (SO₂) yakalamak ve atmosfere salınmasını önlemek için kimyasal reaksiyonlardan yararlanır. Bu yöntemler asit yağmuru oluşumunun azaltılmasına katkıda bulunur (McIlvaine, 2012).

Otomotiv sektöründe katalitik konvertörler kimyasal hava kirliliği kontrolünde önemli bir rol oynamaktadır. Katalitik konvertörler, nitrojen oksitler (NO_x), karbon monoksit (CO) ve uçucu organik bileşikler (VOC'ler) gibi zararlı kirleticileri daha az zararlı maddelere dönüştüren kimyasal reaksiyonları kolaylaştırarak daha temiz araç emisyonlarına katkıda bulunur (Thummadetsak ve diğ., 1999).

2.6.3 Biyolojik süreçler

Biyolojik süreçler, hava kirliliği kontrolüne benzersiz ve çevre dostu bir yaklaşım sunar. Biyoremediasyon, kirleticileri metabolize etmek veya parçalamak için mikroorganizmaların kullanımını içerirken fitoremediasyon, kirleticileri absorbe etmek, biriktirmek veya dönüştürmek için bitkileri kullanır. Bu işlemler, uçucu organik bileşikler (VOC'ler) ve ağır metaller dahil olmak üzere çeşitli kirleticilerin azaltılması konusunda umut vericidir (Lee ve diğ., 2020).

Bakteriler ve mantarlar gibi mikroorganizmalar, havadaki bazı kirleticilerin parçalanmasında rol oynayabilir. Bu mikroorganizmalar, kirleticilerin daha az zararlı veya inert maddelere parçalanmasını kolaylaştıran enzimlere sahiptir. Mikrobiyal bozulma potansiyelinin araştırılması, hava kirliliği kontrolü için sürdürülebilir bir yol sunar (Wei ve diğ., 2017).

Çoğu durumda, fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçlerin bir kombinasyonunun, hava kirliliği kontrolü için en etkili strateji olduğu kanıtlanmıştır. Entegre yaklaşımlar, hava kirliliği sorunlarının karmaşık doğasını kabul ederek, kapsamlı ve sürdürülebilir çözümlere ulaşmak için her yöntemin güçlü yönlerinden yararlanır (Chowdhury ve diğ., 2015).

2.7 Hava Kirliliği Kontrolünde Mevcut Yöntemler

Düzenleyici Önlemler:

Hükümetler ve düzenleyici kurumlar endüstrilerin, araçların ve diğer kaynakların atmosfere salabileceği kirletici maddelerin miktarını sınırlayan emisyon standartları oluşturur. Bu standartlara uyum, izinler, denetimler ve para cezaları yoluyla sağlanır.

İmar yasaları ve arazi kullanım düzenlemeleri, kirlilik yayan tesislerin yoğun nüfuslu alanlara veya çevreye duyarlı bölgelere yerleştirilmesini önlemeye yardımcı olarak hava kirleticilerine maruz kalmayı azaltır (Wu ve Gao, 2021).

Teknolojik Çözümler:

Elektrostatik çöktürücüler (ESP'ler), kumaş filtreler (torba filtreleri) ve siklon ayırıcılar gibi teknolojiler, endüstriyel egzoz gazlarından ve enerji santralleri ve diğer kaynaklardan kaynaklanan emisyonlardan partikül maddeyi (PM) yakalamak ve çıkarmak için kullanılır.

Baca Gazı Kükürt Giderme (FGD) sistemleri, kömür yakıtlı enerji santralleri ve endüstriyel kazanlar tarafından üretilen baca gazlarından kükürt dioksiti (SO_2) uzaklaştırır. Yöntemler arasında ıslak gaz temizleyiciler, kuru gaz temizleyiciler ve sprey kuru gaz temizleyiciler bulunur.

Seçici Katalitik İndirgeme (SCR) sistemleri, amonyak veya üre ile kimyasal reaksiyon yoluyla nitrojen oksitleri (NO_x) nitrojene (N_2) ve su buharına dönüştürmek için katalizörler kullanır. SCR teknolojisi enerji santrallerinde, endüstriyel kazanlarda ve dizel motorlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Katalitik konvertörler, termal oksitleyiciler ve adsorpsiyon sistemleri gibi teknikler, endüstriyel işlemlerden, araç egzozundan ve diğer kaynaklardan kaynaklanan Uçucu Organik Bileşik (VOC) emisyonlarını kontrol etmek için kullanılır.

Katalitik konvertörlerin, yakıt enjeksiyon sistemlerinin ve hibrit ve elektrikli araçların kullanımı da dahil olmak üzere otomotiv teknolojisindeki ilerlemeler, araçlardan karbon monoksit (CO), nitrojen oksitler (NO_x) ve partikül madde (PM) gibi kirleticilerin emisyonlarının azaltılmasına yardımcı olur.

Fosil yakıtlardan doğal gaz, biyodizel, etanol ve hidrojen gibi daha temiz alternatiflere geçiş, ulaşım, sanayi ve enerji üretiminden kaynaklanan hava kirleticilerin ve sera

gazlarının emisyonlarını azaltabilir (Myeong ve Shahzad, 2021; Rawat ve Kumar, 2023).

Yeşil Altyapı ve Doğaya Dayalı Çözümler:

Kentsel alanlarda ağaç dikmek ve yeşil alanlar oluşturmak, hava kirleticilerinin absorbe edilmesine, kentsel ısı adası etkisinin azaltılmasına ve hava kalitesinin ve halk sağlığının iyileştirilmesine yardımcı olabilir.

Bazı bitki türleri, fotosentez, terleme ve fitoekstraksiyon gibi işlemler yoluyla havadan, topraktan ve sudan kirletici maddeleri emebilir ve metabolize edebilir. Kentsel ve endüstriyel ortamlarda hava kirliliğini azaltmak için fitoremediasyon teknikleri kullanılmaktadır (Anderson ve Gough, 2020).

2.8 Hava Kirliliği Kontrolünde Biyolojik Süreçler ve Mekanizmaları

Biyolojik süreçler, hava kirliliğiyle mücadelede doğanın gücünden yararlanan umut verici çözümler sunmaktadır. Mikroorganizmalardan, bitkilerden ve ekolojik etkileşimlerden yararlanan biyolojik yöntemler, hava kalitesini iyileştirmek ve zararlı emisyonları azaltmak için sürdürülebilir ve uygun maliyetli araçlar sağlar.

Mikroorganizmalar hava kirleticilerinin parçalanmasında ve dönüşümünde önemli bir rol oynamaktadır. Bakteriler, mantarlar ve diğer mikrobiyal türler, uçucu organik bileşikler (VOC'ler), nitrojen oksitler (NO_x) ve kükürt dioksit (SO₂) dahil olmak üzere organik ve inorganik kirleticileri parçalamalarına olanak tanıyan özel metabolik yollara sahiptir. Biyobozunma, biyofiltrasyon ve biyodönüşüm gibi işlemler yoluyla mikroorganizmalar kirleticileri zararsız yan ürünlere metabolize ederek bunları atmosferden etkili bir şekilde uzaklaştırır (Mohamed ve Awad, 2022).

Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (EPA) gibi kurumlarda ve dünya çapındaki akademik araştırma merkezlerinde bilim adamlarının yürüttüğü araştırmalar, mikrobiyal biyolojik iyileştirme'nin hava kirliliği seviyelerini azaltmadaki etkinliğini göstermiştir. Çalışmalar biyofiltrelerin, mikrobiyal konsorsiyumların ve genetiği değiştirilmiş mikroorganizmaların endüstriyel emisyonlardan, kentsel havadan ve iç ortamlardan kirleticilerin uzaklaştırılmasındaki potansiyelini vurgulamıştır (Buente ve diğ., 2010).

Çevredeki kirleticileri uzaklaştırmak, parçalamak veya tecrit etmek için bitkilerin kullanılması anlamına gelen fitoremediasyon, hava kirliliği kontrolüne yönelik bir başka güçlü biyolojik yaklaşımı temsil eder. Bitkiler, karbondioksit (CO₂), ozon (O₃), partikül madde (PM) ve uçucu organik bileşikler (VOC'ler) dahil olmak üzere çok çeşitli hava kirleticilerini absorbe etmelerini ve metabolize etmelerini sağlayan benzersiz fizyolojik mekanizmalara sahiptir (Hamutoğlu ve diğ., 2012).

Dünya Tarımsal Ormancılık Merkezi ve Uluslararası Fitoteknoloji Topluluğu gibi kurumlardaki araştırmacılar, ağaçlar, çalılar ve otlar da dahil olmak üzere çeşitli bitki türlerinin kentsel ve endüstriyel ortamlardaki hava kirliliğini azaltma potansiyelini araştırmışlardır. Fitovolatilizasyon, fitoekstraksiyon ve fitodegradasyon gibi süreçler aracılığıyla bitkiler, kirleticileri havadan, topraktan ve sudan etkin bir şekilde uzaklaştırır, hava kalitesini iyileştirir ve ekosistemin dayanıklılığını artırır (Nzui, 2014; X. Yang, 2020).

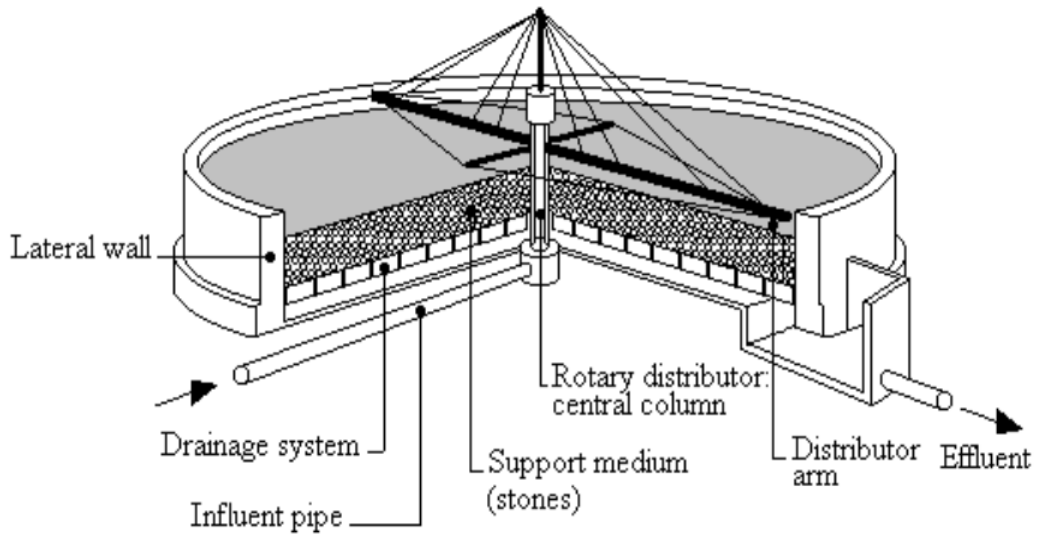
Biyolojik Süreçlerin Mekanizmaları:

Hava kirliliği kontrolündeki biyolojik süreçlerin başarısı, mikrobiyal bozunma ve fitoremediasyonun altında yatan mekanizmaların derinlemesine anlaşılmasına bağlıdır. Mikrobiyal topluluklar kirleticilerle enzimatik reaksiyonlar, metabolik yollar ve hücre sinyal mekanizmaları yoluyla etkileşime girerek kirleticilerin dönüşümüne ve mineralizasyonuna yol açar. Benzer şekilde bitkiler, hava kirleticilerini absorbe etmek ve detoksifiye etmek için stoma alımı, yaprak yüzeyi adsorpsiyonu ve kök sızıntısı dahil olmak üzere çeşitli fizyolojik ve biyokimyasal süreçleri kullanır (Aybar ve diğ., 2015).

Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (MIT) ve Max Planck Bitki Islahı Araştırma Enstitüsü gibi önde gelen üniversiteler ve araştırma kurumlarındaki bilim insanları tarafından yürütülen son teknoloji araştırmalar, hava kirliliği kontrolündeki biyolojik süreçlerin karmaşık mekanizmalarını çözmeye devam etmektedir. Genomik, proteomik ve metabolomikteki ilerlemeler, kirletici toleransının genetik temeline ve bitki-mikrop etkileşimlerinin evrimine ışık tutarak yeni biyoteknolojik çözümlerin geliştirilmesinin önünü açmıştır (Andreae, 1959; Cooke, 2002; Molina ve Molina, 2004; ve diğ., 2015).

2.8.1 Kirliliğin doğrudan biyolojik yollar ile arıtımı

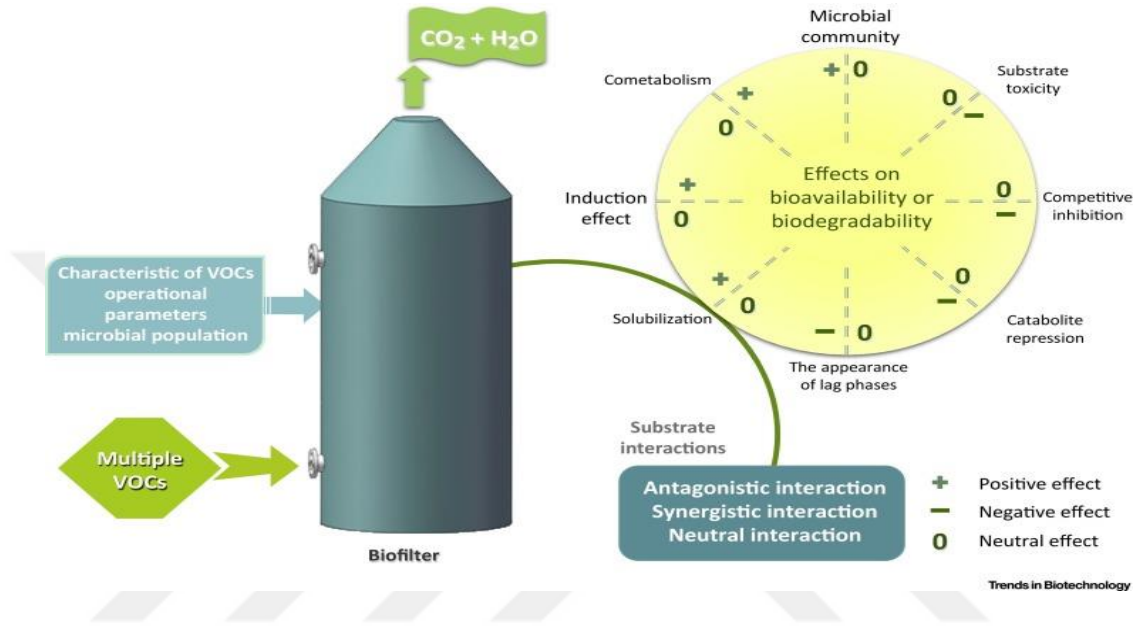
Damlatmalı filtreler, biyolojik atık su arıtımına çok yönlü bir yaklaşımı temsil ederken aynı zamanda hava kirliliği kontrolü için etkili bir çözüm olarak da hizmet eder. Kirli hava, operasyonel döngüleri sırasında mikroorganizmaların, özellikle de bakterilerin kirleticilere yapıştığı ve bunların ayrışmasını katalize ettiği özel bir ortamdan geçer. Bu filtreler, kirlilik endişelerinin azaltılmasında önemli bir rol oynadıkları atık su arıtma tesislerinde vazgeçilmez bir kullanım alanı bulmaktadır. Üstelik uygulamaları, organik kirleticileri hedef alacak şekilde özel olarak tasarlandıkları çeşitli endüstriyel ortamlara kadar uzanır. Bu filtreler, yüksek kurulum maliyetleri, geniş alan gereksinimi, düzenli bakım ihtiyacı, yüksek enerji tüketimi ve koku sorunları gibi dezavantajlarla hava kirliliğini azaltmada sınırlı etkilidir. Sonuç olarak, Damlatmalı filtreler çeşitli endüstriyel ortamlardaki kirlilik seviyelerinin azaltılmasında önemli bir araç olarak ortaya çıkmakta ve böylece daha sürdürülebilir ve çevreye duyarlı bir endüstriyel ortamı teşvik etmektedir (Küçükçongar & Sevil, 2020; Barbusiński ve diğ., 2020).



Şekil 2.3 : Damlatmalı filtreler (Dubey and Kashyap, 2022).

Biyofiltreler, kirli hava akımlarında bulunan kirleticileri yakalamak ve parçalamak için canlı organizmalardan yararlanmak üzere tasarlanmış filtreleme sistemleridir. Kirli havanın mikroorganizmalarla dolu bir ortamdan geçmesi prensibiyle çalışan bu organizmalar, besin kaynağı olarak kirleticileri metabolize eder. Endüstriyel ortamlarda yaygın olarak kullanılan biyofiltreler, uçucu organik bileşiklerini (VOC'ler) ve havadaki diğer kirleticilerin bir spektrumunu etkili bir şekilde hedef alır ve böylece

kirliliği azaltma çabalarında çok önemli bir rol oynar. Biyofiltreler, ancak çevresel koşullara (sıcaklık, nem, pH) duyarlılık gösteren, düzenli besin maddesi takviyesi ve bakım gerektiren, ayrıca yüksek kurulum maliyetleri ve olası kokular gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Biyolojik süreçleri güçlendirme kapasiteleri sayesinde biyofiltreler, endüstriyel emisyonların arıtılması ve çevre kalitesinin artırılması için etkili ve sürdürülebilir bir çözümü temsil eder (Sheoran ve diğ., 2022).



Şekil 2.4 : Biyofiltrasyon prosesleri (Yang ve diğ., 2018).

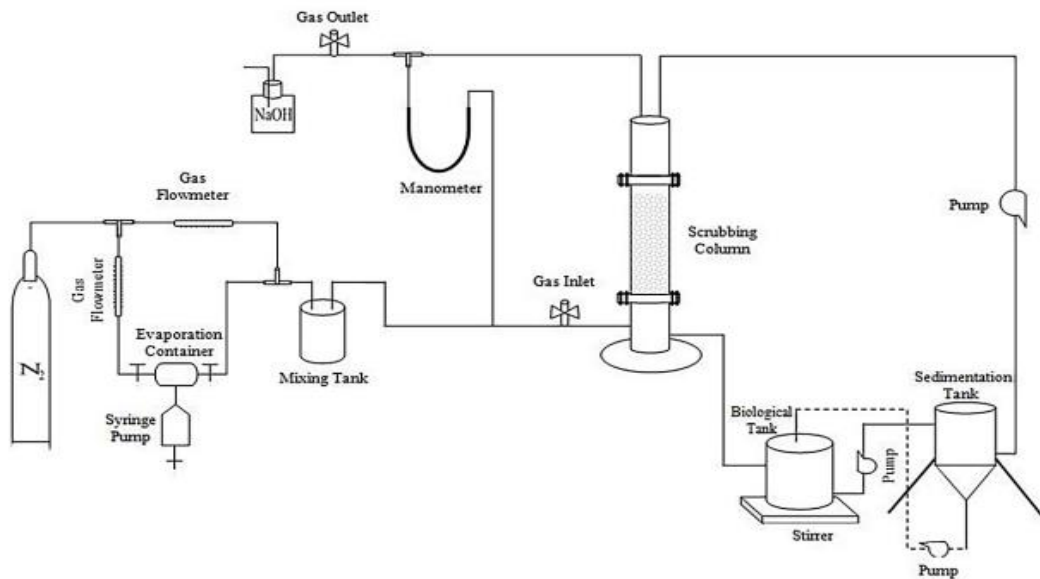
Damlatmalı filtreler ve biyofiltrelerin arasındaki fark:

Damlatmalı filtreler ve biyofiltreler, hava kirliliğini azaltmak için kullanılan farklı biyolojik filtrasyon yöntemleridir. Damlatmalı filtreler, genellikle büyük bir tank veya kule içerisinde çeşitli medya (taş, plastik, seramik gibi) ile doldurulmuş sistemlerdir. Kirliliği su veya hava, bu medya üzerinden damlatılarak geçirilir ve medya üzerinde oluşan biyofilmdeki mikroorganizmalar sayesinde kirleticiler biyolojik olarak parçalanır. Bu yöntem genellikle atık su arıtımında kullanılır, ancak hava kirliliği kontrolünde de etkilidir. Yüksek kirletici yüklerini işleyebilme kapasitesi ve sürekli besin kaynağı sağlaması avantajları arasındadır. Ancak, biyofilm kalınlaştıkça tıkanma riski artar ve sistem geniş alan gerektirebilir.

Biyofiltreler, organik bir medya (kompost, ahşap yongaları, turba gibi) içeren sistemlerdir. Kirliliği hava bu medya içinden geçirilir ve medya üzerindeki mikroorganizmalar tarafından kirleticiler biyolojik olarak parçalanır ve arıtılır. Özellikle endüstriyel tesislerde ve atık gazların arıtımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Biyofiltreler düşük enerji tüketimi ve yüksek verimlilik sunar. Ancak

medyanın düzenli olarak değiştirilmesi gerekmekte ve yüksek nem gereksinimi nedeniyle kuruma veya çamurlaşma sorunları ortaya çıkabilir. Bu yöntem, kullanım alanlarına ve sistem gereksinimlerine bağlı olarak tercih edilir ve hava kirliliği kontrolünde etkin çözümler sunmaktadır. damlatmalı filtreler daha çok su arıtımında kullanılırken, biyofiltreler hava kirliliği kontrolünde tercih edilir. Her iki sistem de biyolojik süreçlere dayalı olup, etkinlikleri ve bakım gereksinimleri açısından farklılık göstermektedir (Kara, 2007).

Biyo-yıkayıcılar, endüstriyel emisyonlardan kaynaklanan kirleticileri etkili bir şekilde ortadan kaldırmak için başta bakteriler olmak üzere biyolojik ajanlar kullanır. Operasyon sırasında kirli hava, mevcut kirleticileri aktif olarak emen ve metabolize eden mikroorganizmalar içeren sıvı bir çözelti yoluyla yönlendirilir. Bu süreç, biyolojik temizleyicilerin kükürt bileşikleri, amonyak ve diğer çeşitli kirleticilerle yüklü emisyonların arıtılmasında özellikle etkili olmasını sağlar. Biyo-yıkayıcılar, işlem sonunda biyolojik çamur veya atık su gibi yan ürünler üretebilir ve bu yan ürünlerin uygun şekilde yönetilmesi gerekmektedir. Bu sistem, yüksek konsantrasyonlu ve çeşitli kirleticilerde sınırlı performans gösterebilir. Mikroorganizmaların verimli çalışabilmesi için düzenli bakım ve optimal koşullar sağlanmalıdır. Sonuç olarak, biyo-yıkayıcılar, genellikle kimyasal ve fiziksel arıtma yöntemlerine kıyasla daha düşük enerji tüketimi avantajına sahiptir. (Shihab ve diğ., 2022) (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 : Biyo-yıkayıcılar (Shihab ve diğ., 2022).

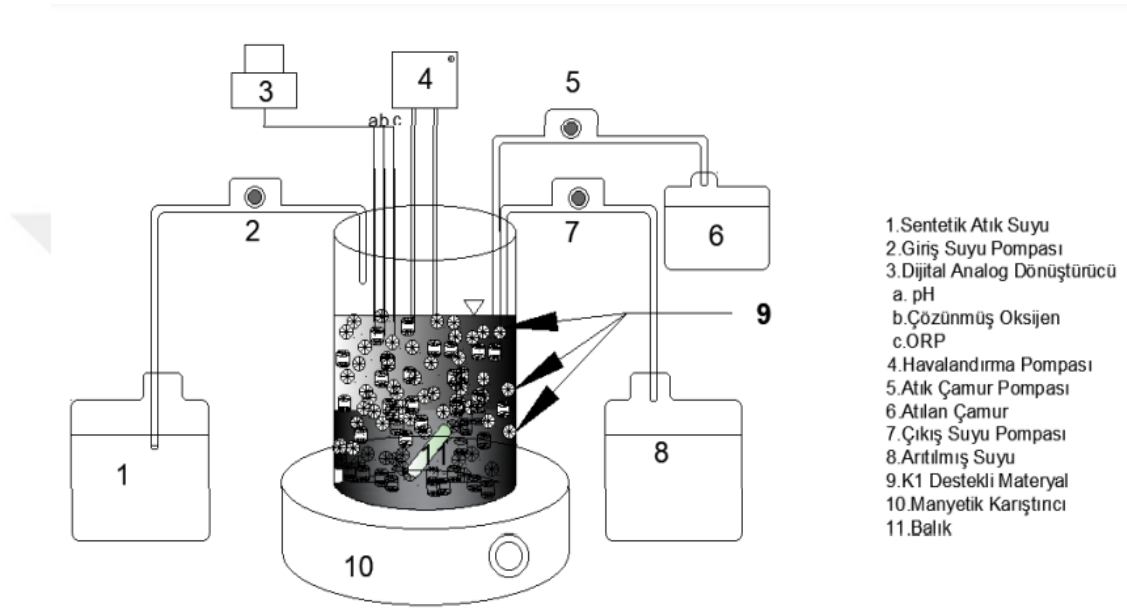
Biyodamlatmalı filtre, biyofiltre ve biyoyıkayıcı sistemlerinin tasarım, proses kontrolü ve işletme maliyeti gibi konularda özet bir karşılaştırılması Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3 : Biyofiltre, biyodamlatmalı filtre ve biyoyıkayıcı sistemlerinin kıyaslanması (Shareefdeen ve diğ., 2005).

	Biyofiltreler	Biyodamlatmalı Filtre	Biyoyıkayıcılar
Reaktör tasarımı	Tek Reaktör	Tek Reaktör	Çift Reaktör
Yatırım ve İşletim Maaliyeti	Düşük	Yüksek	Yüksek
Taşıyıcı	Organik veya Sentetik	Sentetik	Taşıyıcı yoktur
Alan	Yüksek alan gereksinimi	Sıkıştırılmış ekipman	Küçük hacimli ekipman
Hareketli Faz	Gaz	Sıvı	Sıvı
Proses Kontrolü	Sınırlı proses kontrolü	Sınırlı proses kontrolü	İyi proses kontrolü
Gaz Debisi	100-150 m ³ /m ² .saat	-	3000-4000 m ³ /m ² .saat
İşletim	Kolay işleme alma	İşleme alma zorluğu	İşleme alma zorluğu
İşletim Kararlılığı	Hava akımının kanallanması yaygındır	Suyun kanallanması yaygındır	Yüksek işletim kararlılığı
Basınç Düşüşü	Orta-Yüksek aralığı	Orta-Yüksek aralığı	Düşük
Hedef Bileşik Konsantrasyonu	<1 g/m ³	< 0,5 g/m ³	< 5 g/m ³
Bileşiklerin Henry Katsayısı	< 1	< 0,1	< 0,01
Nütrient	Nütrient eklenmez	Nütrientler kontrol edilebilir ve eklenebilir	Nütrientler kontrol edilebilir ve eklenebilir
Biyokütle	Sabit Biyokütle	Sabit Biyokütle	Askıda Biyokütle
Tıkanma	Tıkanma problemi vardır	Tıkanma problemi vardır	Tıkanma problemi yoktur
Aşırı Çamur	Probleme yol açmaz	Aşırı çamurun uzaklaştırılması gerekmektedir	Aşırı çamurun uzaklaştırılması gerekmektedir

Aktif Çamur Prosesi, öncelikle atık su arıtımında kullanılan, aynı zamanda hava kirliliği kontrolüne de uyarlanabilen çok yönlü bir biyolojik yöntemi temsil eder. Bu süreçte, kirli hava, su ve aktif çamurdan oluşan bir karışıma dahil edilir ve burada mikroorganizmalar, mevcut organik kirliticileri parçalamak için çalışır. Bu yöntem,

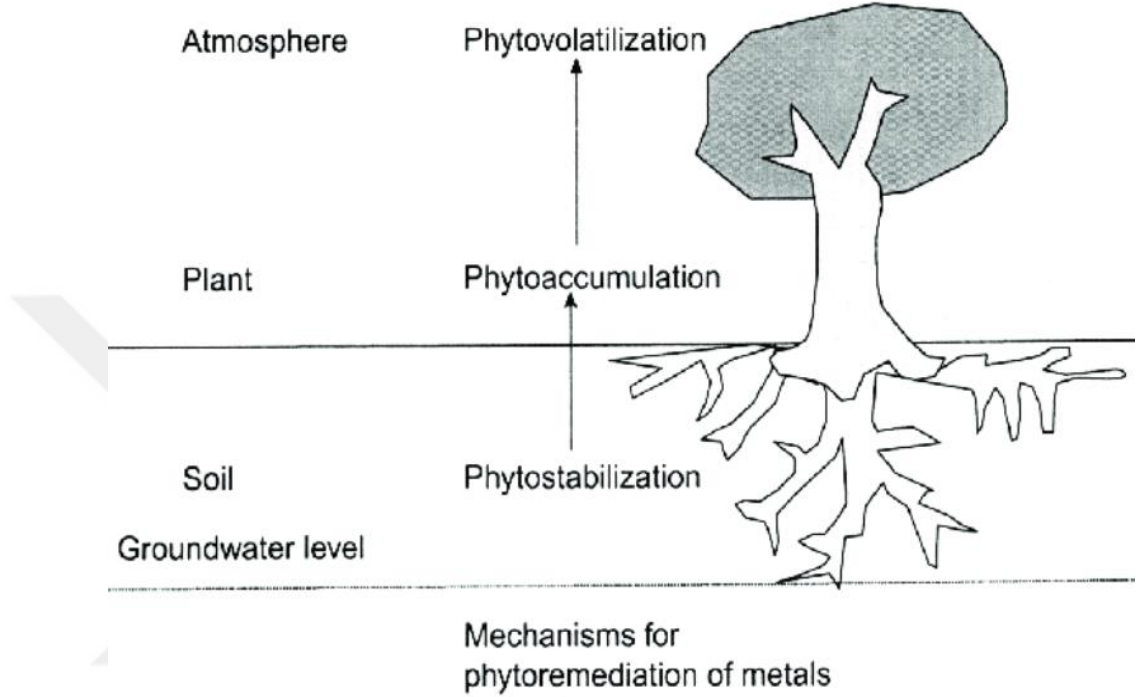
organik emisyonların etkili bir şekilde arıtılması gereken çeşitli endüstriyel işlemlerde ve kanalizasyon arıtma tesislerinde uygulama alanı bulmaktadır. Aktif çamur prosesi, yaygın kullanımına rağmen yüksek işletme karmaşıklığı, enerji yoğunluğu, çamur yönetimi maliyetleri, kimyasal kullanımı ve iklim koşullarına hassasiyet gibi önemli dezavantajlarla karşı karşıyadır. Bu mekanizma, mikroorganizmaların yeteneklerinden yararlanarak hava kirliliğini azaltmak ve çevre kalitesini korumak için sürdürülebilir bir çözüm sunar (Mohamad, 2023; Yaparadne ve diğ., 2022) (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 : Aktif çamur prosesi (Mohamad, 2023).

Fitoremediasyon, bitkilerin hem havada hem de toprakta bulunan kirleticileri absorbe etme ve azaltma konusundaki yeteneklerini kullanan karmaşık bir iyileştirme tekniğidir. Bu karmaşık süreç, seçilmiş bitki türlerinin kirleticileri kökleri aracılığıyla absorbe etme, ardından bunları dokularında metabolize etme veya depolama konusundaki yeteneği sebeplidir. Fitoremediasyonun etkinliği çok yönlülüğü ve geniş uygulanabilirliğinde bulunmaktadır. Özellikle bazı bitkiler, uçucu organik bileşikler (VOC'ler), ağır metaller ve partikül maddeler de dahil olmak üzere havadaki çok çeşitli kirleticileri absorbe etme konusunda dikkate değer bir kapasite göstermektedir. Bu doğal mekanizma sayesinde fitoremediasyon, geniş bir yelpazedeki çevresel kirleticileri ele alabilen, iyileştirme çabaları için güçlü bir araç olarak ortaya çıkmaktadır. Fitoremediasyonun etkinliği, kirliliğin azaltılmasına yönelik sürdürülebilir ve çevre dostu bir yaklaşımı temsil etmektedir. Bitkilerin doğal yeteneklerinden yararlanan bu yöntem, bazen ek çevresel riskler oluşturabilen

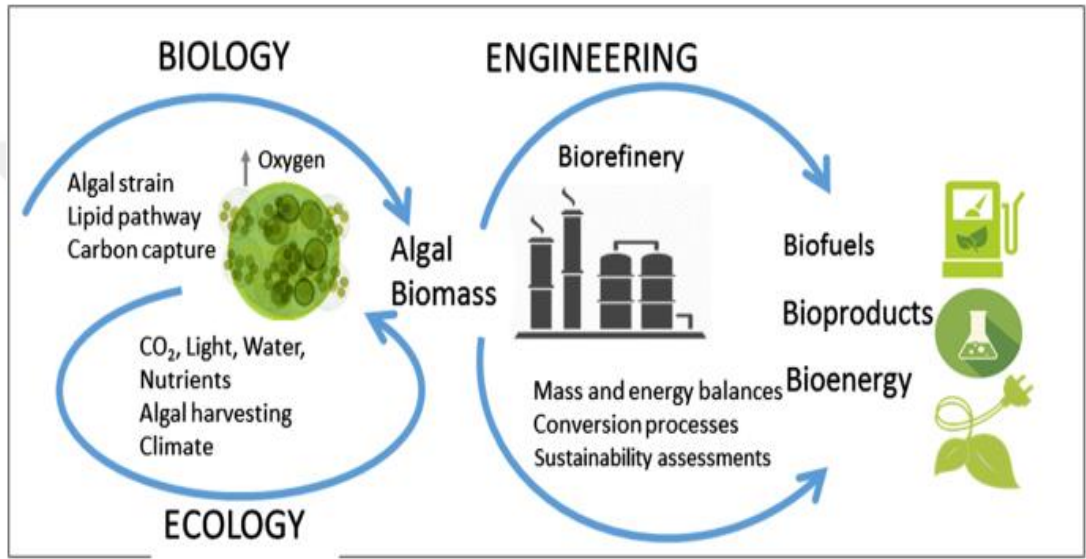
kimyasalların veya mekanik süreçlerin kullanımını içerebilen geleneksel iyileştirme tekniklerine olan bağımlılığı en aza indirir. Fitoremediasyon, bitki biyolojisinin doğal süreçlerinden yararlanarak çevre kalitesini artırma ve kirliliğin olumsuz etkilerini azaltma aracı olarak umut vaat etmektedir (Lee ve diğ., 2020; Teiri ve diğ., 2021) (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 : Fitoremediasyon (Teiri ve diğ., 2021).

Algal temizleyiciler (Şekil 2.8), endüstriyel kaynaklardan yayılan kirleticileri yakalama ve metabolize etme konusunda alglerin doğal yeteneklerinden yararlanmak için tasarlanmış yenilikçi bir teknolojiyi temsil eder. Bu temizleyicilerin çalışma mekanizması, kirli havanın alglerle zenginleştirilmiş bir ortama yönlendirilmesini içerir. Bu kontrollü ortamda algler, havada bulunan diğer kirleticilerin yanı sıra karbon dioksiti (CO₂) aktif olarak emer ve aynı zamanda fotosentezin bir yan ürünü olarak oksijeni serbest bırakır. Alg temizleyicilerin çok yönlülüğü, çeşitli endüstriyel ortamlarda uygulanabilirliğiyle vurgulanmaktadır. Bu yıkayıcılar, çeşitli endüstriyel proseslerden ve enerji santrallerinden kaynaklanan emisyonların azaltılmasında çok önemli faydalar sağlar. Alg temizleyiciler, proaktif bir müdahale görevi görerek, zararlı kirleticilerin atmosfere salınmasının azaltılmasına yardımcı olur ve böylece daha geniş çaplı kirlilik azaltma çabalarına katkıda bulunur. Algal temizleyiciler, sera gazı emisyonlarını azaltmaya yönelik küresel çabalarla uyumlu olarak karbon

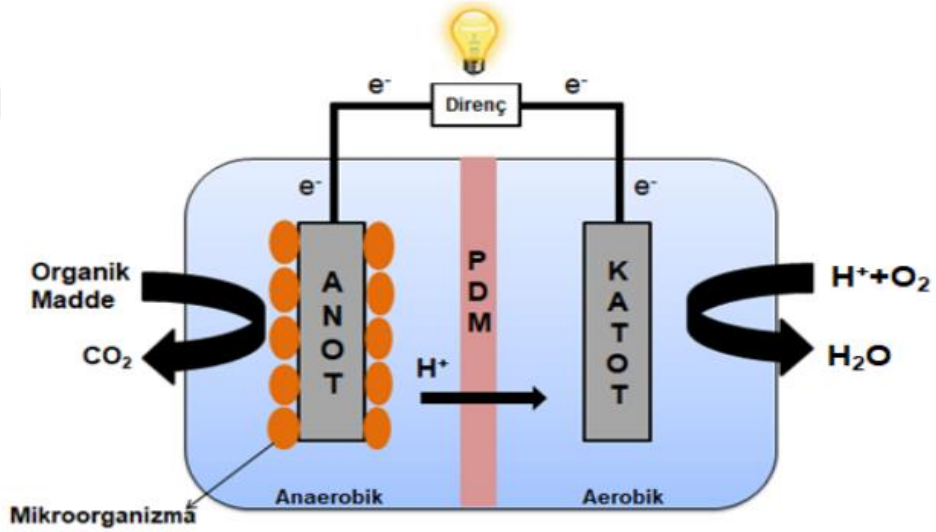
yakalama girişimlerinde önemli bir rolü bulunmaktadır. Bu yıkayıcılar, CO₂'nin algler tarafından emilmesi yoluyla karbon tutumuna aktif olarak katılarak karbonu atmosferden etkili bir şekilde uzaklaştırır ve iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini dengelemeye yardımcı olur. Bu temizleyiciler, alglerin doğal süreçlerinden yararlanarak endüstriyel emisyonlara proaktif ve çevre dostu bir çözüm sunarak endüstriyel faaliyetler ile çevre yönetimi arasında uyumlu bir denge sağlar, böylece çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunur (Suresh ve Benor, 2020; Adepoju ve diğ., 2024).



Şekil 2.8 : Algal temizleyiciler (Adepoju ve diğ., 2024).

Yapay sulak alanlar, doğal sulak alan ekosistemlerini taklit eder ve atık suyun arıtılması ve hem hava hem de su kaynaklarından kirleticilerin ortadan kaldırılması için etkili araçlar olarak hizmet eder. Bu sistemlerde, kirli hava veya su, mikroorganizmaların ve bitkilerin bir kombinasyonunun mevcut kirleticileri ayrıştırmak ve absorbe etmek için işbirliği yaptığı bir sulak alan bitki örtüsü ağı aracılığıyla yönlendirilir. Yapay sulak alanlar, hava kalitesini iyileştirme ve çeşitli çevresel faydalar sağlama potansiyeline sahip olsa da, bakım ve yönetim gibi çeşitli sınırlamalar nedeniyle pratik uygulamada bazı zorluklarla karşılaşmaktadır. Yapay sulak alanlar, yağmur suyu akışı ve endüstriyel atık sular da dahil olmak üzere çeşitli atık su türlerinin arıtılmasında geniş uygulama alanı bulmaktadır. Su kalitesini artırarak ve kirletici yükleri azaltarak, inşa edilmiş sulak alanlar, çeşitli ekosistemlerde çevre sağlığının ve sürdürülebilirliğin desteklenmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Son ve Kim, 2020; Nan ve diğ., 2023).

Mikrobiyal Yakıt Hücreleri (MFC'ler), atık su veya havayı arıtırken aynı zamanda elektrik üretmek için mikroorganizmaların metabolik aktivitesinden yararlanır. Operasyon sırasında mikroorganizmalar elektrotun yakınındaki organik maddeyi tüketerek elektrik enerjisi olarak kullanılabilir elektronlar üretirler. Bu yenilikçi teknoloji, sensörlere, uzak cihazlara ve atık su arıtma sistemlerine güç sağlamada uygulama alanı bulmakta ve kirlilik kontrolüne sürdürülebilir ve merkezi olmayan bir yaklaşım sunmaktadır. Mikrobiyal Yakıt Hücreleri, düşük güç yoğunluğu, yüksek kurulum ve işletme maliyetleri, mikrobiyal etkinlik ve stabilite değişkenliği, biyofilm oluşumu, ölçeklenebilirlik sorunları ve sınırlı substrat çeşitliliği nedeniyle büyük ölçekli enerji üretimi ve ticari uygulamalarda sınırlamalarla karşılaşmaktadır; ancak, araştırma ve geliştirme çalışmaları bu dezavantajların üstesinden gelme potansiyeline sahiptir. Ayrıca, enerji üretimini kirliliğin azaltılmasıyla entegre eden Mikrobiyal Yakıt Hücreleri, daha sürdürülebilir bir geleceğe doğru ilerlerken çevresel zorlukların üstesinden gelmek için umut verici bir yol sunmaktadır (Vinayak ve diğ., 2021; Rajesh ve Kumawat, 2023).



Şekil 2.9 : Mikrobiyal yakıt hücreleri çalışma prensibi (Dege ve Daniş, 2020).

Kompostlama, organik atıkların ayrıştırılmasının doğal bir sürecini temsil ederken, salt atık azaltmanın ötesinde çok sayıda fayda sunan, sürdürülebilir atık yönetimi uygulamalarının temel taşı olarak durmaktadır. Özünde kompostlama, organik maddenin mikroorganizmalar tarafından kontrollü bir şekilde ayrışmasını içerir ve bu da toprağı zenginleştirmek ve bitki büyümesini desteklemek için kullanılabilir besin açısından zengin kompostun oluşturulmasına yardımcı olur. Kompostlamanın

başlıca avantajlarından biri, organik atıkların ayrışmasıyla ilişkili çevresel etkiyi hafifletme yeteneğinde bulunmaktadır. Güçlü bir sera gazı olan metanın salınımına neden olan çöp depolama veya yakma gibi geleneksel bertaraf yöntemlerinden farklı olarak kompostlama, organik maddenin stabil kompost haline dönüştürülmesini kolaylaştırır, böylece uçucu bileşiklerin ve sera gazlarının atmosfere emisyonunu en aza indirir. Organik atıkları çöp sahalarından ve çöp yakma tesislerinden uzaklaştırarak kompostlaştırma, atık yönetimi uygulamalarının karbon ayak izini azaltırken iklim değişikliğinin azaltılmasına da yardımcı olur. Ayrıca kompostlaştırma, organik atıkların ayrışmasıyla ilişkili kokuları ve kirleticileri azaltarak ek çevresel faydalar sunar. Mikroorganizmaların aktif katılımı sayesinde kompostlama işlemleri karmaşık organik bileşikleri parçalayarak kötü kokuları etkili bir şekilde nötralize eder ve zararlı maddelerin çevreye salınmasını en aza indirir. Koku ve kirletici maddelerdeki bu azalma, yalnızca yerel hava kalitesini iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda atık yönetim tesislerinin ve çevresindeki alanların genel estetiğini de geliştirir.

Kompostlama, tarım, peyzaj ve belediye katı atık yönlendirme programları da dahil olmak üzere çeşitli sektörlerde geniş uygulama alanı bulmaktadır. Tarımda kompost, toprak verimliliğini zenginleştiren, toprak yapısını iyileştiren ve su tutma kapasitesini artıran değerli bir toprak iyileştirme işlevi görür. Çiftçiler, kompostu tarımsal uygulamalara dahil ederek kimyasal gübrelere ve böcek ilaçlarına olan bağımlılıklarını azaltabilir, sürdürülebilir ve çevre dostu tarım yöntemlerini teşvik edebilir. Benzer şekilde peyzaj ve bahçecilikte kompost, doğal bir toprak düzenleyici görevi görür, sağlıklı bitki büyümesini teşvik eder ve bahçelerin, parkların ve yeşil alanların canlılığını artırır. Kompostla zenginleştirilmiş topraklar, gelişmiş besin döngüsü, artan mikrobiyal aktivite ve toprak erozyonuna karşı gelişmiş direnç sergileyerek kentsel peyzajların ve ekosistem sağlığının uzun vadeli sürdürülebilirliğine katkıda bulunur. Ayrıca kompostlama, atık depolama sahalarına ve çöp yakma tesislerine gönderilen atık hacmini azaltmayı amaçlayan belediye katı atık yönlendirme programlarında önemli bir rol oynamaktadır. Belediyeler, topluluk düzeyinde kompostlama girişimlerini uygulayarak organik atık akışlarını etkili bir şekilde yönetebilir, değerli kaynakları atık akışından uzaklaştırabilir ve atık yönetimine döngüsel ekonomi yaklaşımını teşvik edebilir. En son kompostlama teknolojileri ve uygulamalarıyla donatılmış kompostlama tesisleri, yerel kullanıma yönelik yüksek kaliteli kompost

üretirken, organik atıkların verimli bir şekilde işlenmesini de kolaylaştırmaktadır. Kompostlaştırma, atık azaltmanın ötesinde çok sayıda fayda sunan, organik atık yönetimine sürdürülebilir ve çevreye duyarlı bir yaklaşım olarak durmaktadır. Kompostlama, ayrışma ve mikrobiyal aktivite gibi doğal süreçlerden yararlanarak organik atıkları değerli bir kaynağa dönüştürür, toprağı zenginleştirir, bitki büyümesini artırır ve çevresel etkiyi azaltır. Bu mekanizma, organik malzemelerin doğal biyolojik süreçlerle ayrışması ve olgunlaşması zaman gerektirir. Kontrolsüz uygulamalar kötü kokuların oluşmasına ve çevresel sıkıntılara yol açabilir. Topluluklar ve endüstriler sürdürülebilirliğe ve kaynak verimliliğine giderek daha fazla öncelik verdikçe kompostlaştırma, bütünsel atık yönetimi stratejilerinin bir bileşeni olarak ortaya çıkmaktadır (Ayılara ve diğ., 2020; Preble ve diğ., 2020) (Şekil 2.10).



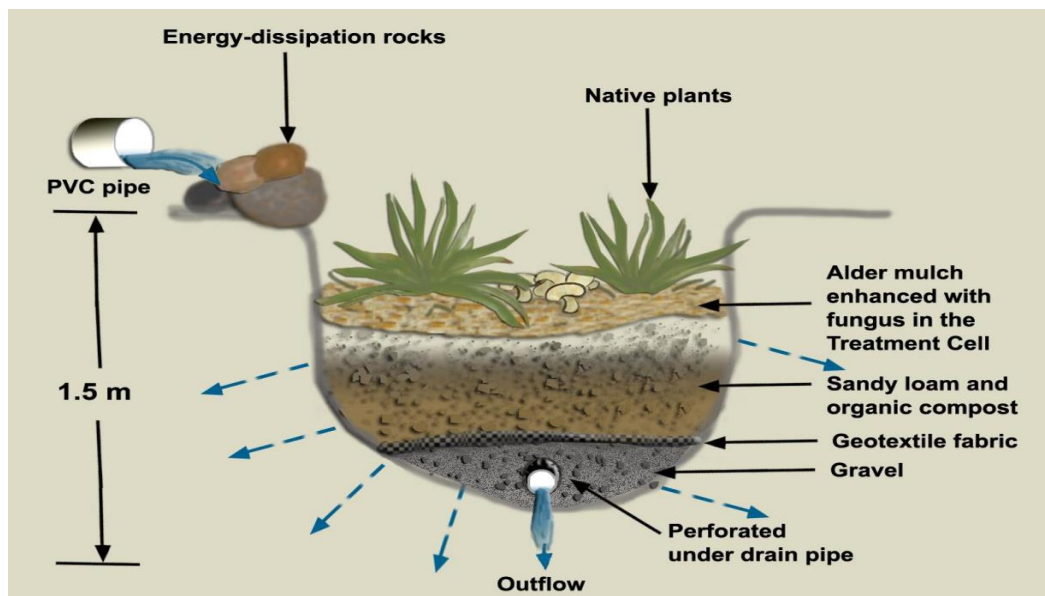
Şekil 2.10 : Kompostlama (Waqas ve diğ., 2023).

Kompostlama sırasında organik madde yapısındaki karbon, karbondioksit olarak ortama salınmaktadır. Her ne kadar karbondioksit bir sera gazı olsa da aynı organik maddedeki karbonun metan gazı olarak ortama salınması durumunda sera gazı etkisi daha fazla olan bir gaz atmosfere salınabilmektedir. Kompostlamanın hava kirliliğine dolaylı katkısı budur.

Mantar miselyum filtrelemesi, belirli mantarların, özellikle de miselyumun, hem hava hem de toprak ortamlarındaki kirliticileri etkili bir şekilde filtrelemek için yeteneklerinden yararlanan öncü bir yaklaşımı temsil eder. İplik benzeri hif ağından oluşan mantarların bitkisel kısmı olan miselyum, doğal filtreler şeklinde yeteneklere sahiptir ve karmaşık ağ yapıları sayesinde içindeki enzimatik süreçlerle çeşitli

kirleticileri absorbe eder ve parçalar. Bu yenilikçi teknoloji, iç mekan hava temizleme, toprak iyileştirme ve sürdürülebilir yapı malzemeleri üretimi de dahil olmak üzere çok sayıda çevresel soruna yönelik yeni ortaya çıkan bir çözüm olarak görülmektedir. İç mekan hava temizleme bağlamında mantar miselyum filtreleme sistemleri, geleneksel hava temizleyicilere zararsız ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir alternatif sunar. Miselyumun ağı, doğal bir filtre görevi görerek, uçucu organik bileşikler (VOC'ler), partikül madde ve alerjenler de dahil olmak üzere havadaki kirleticileri yakalayıp bozar. Miselyum, enzimatik işlemler yoluyla kirletici maddeleri zararsız yan ürünlere ayırır, böylece iç mekan hava kalitesini iyileştirir ve bina sakinleri için daha sağlıklı bir yaşam ortamı sağlar.

Temel olarak, mantar miselyum filtrasyonu, karmaşık çevresel zorlukların üstesinden gelmek için doğal süreçleri ve sürdürülebilir uygulamaları entegre eden, çevre yönetimine bütünsel bir yaklaşımı bünyesinde barındırır. Mantar miselyum filtrelemesi, biyolojik temelli bir yöntem olarak diğer filtreleme süreçlerinden farklılık gösterir, ancak yavaş filtrasyon süreci ve çevresel koşullara duyarlılığı gibi dezavantajlar dikkatli yönetim gerektirir. Mantarların kirleticileri filtreleme ve ekosistemleri yenileme konusundaki doğal yeteneklerinden yararlanan bu yenilikçi teknoloji, toplum, çevre koruma ve sürdürülebilirlik ilkelerini benimsedikçe, insanlık ile doğal dünya arasında daha yeşil, daha sağlıklı ve daha uyumlu bir ilişkinin şekillenmesinde önemli bir rolü bulunmaktadır (Yadav ve diğ., 2021; Marycz ve diğ., 2022) (Şekil 2.11).



Şekil 2.11 : Mantar miselyum filtrasyonu (Thomas ve diğ., 2009).

Wei ve ark. (2017) tarafından yapılan çalışma, hem insani hem de doğal faktörlerin neden olduğu, insan sağlığı ve ekosistemler üzerinde zararlı etkilere yol açan acil hava kirliliği sorununu ele almaktadır. Özellikle Çin ve Hindistan gibi hızla gelişen ülkelerde son birkaç on yılda yoğunlaşan partikül madde, ozon, kükürt dioksit, nitrojen oksitler ve uçucu organik bileşikler gibi başlıca hava kirleticilerini vurgulamaktadır. Politikalar, düzenlemeler ve teknolojiler aracılığıyla gösterilen çabalara rağmen hava kirliliği önemli bir sorun olmaya devam etmektedir. Çalışma, nispeten keşfedilmemiş bir alan olan hava kirleticilerin biyolojik olarak giderilmesi için bitki yapraklarından ve bunlarla ilişkili mikroplardan yararlanma potansiyeline odaklanmaktadır. Bitki yaprakları, kirleticileri adsorbe etme veya absorbe etme kapasitesine sahip geniş bir yüzey alanına sahipken, yaprakların üzerinde ve içinde yaşayan mikroplar, kirleticileri biyolojik olarak parçalayabilir veya daha az zararlı formlara dönüştürebilir. Çalışma, hava kirliliğini azaltmak için filoremediasyon olarak bilinen etkili yaprak bazlı iyileştirme teknolojileri geliştirmek amacıyla, bu sürecin altında yatan moleküler mekanizmaları anlamak için omics teknolojilerinden yararlanan daha fazla araştırmaya duyulan ihtiyacı vurgulamaktadır.

Leson ve Winer (1991) tarafından yapılan çalışma, çıkış gazlarındaki uçucu organik bileşikleri (VOC'ler) ve inorganik hava toksinlerini azaltmak için kullanılan çağdaş bir hava kirliliği kontrolü (APC) teknolojisi olarak biyofiltrasyona odaklanmıştır. Almanya ve Hollanda'da başarıyla uygulanan biyofiltrasyon, çeşitli endüstriyel ve kamu sektörü kaynaklarından gelen koku ve emisyonların kontrol edilmesinde yüksek verimlilik sergilemiş ve birçok yaygın hava kirletici madde için yüzde 90'ın üzerinde kontrol verimliliği elde etmiştir. Diğer APC teknolojileriyle karşılaştırıldığında daha düşük işletme maliyetleriyle biyofiltrasyon, özellikle düşük konsantrasyonlarda kolayca biyolojik olarak parçalanabilen kirleticiler içeren çıkış gazları için önemli ekonomik avantajlar sunar. Ayrıca biyofiltrasyon, düşük enerji gereksinimleri ve kirleticilerin çapraz medya transferinin önlenmesi gibi çevresel faydalar da sunar. Bu çalışma, biyofiltrelerin tarihsel gelişimi, mevcut durumu, bilimsel ilkeleri, mühendislik yönleri ve geniş bir yelpazedeki emisyon kaynaklarına uygulanabilirliği hakkında genel bir bakış sunmaktadır.

Malhautier ve diğ. (2005) tarafından yapılan çalışma, kirli havadaki uçucu organik bileşikler (VOC'ler) ve biyofiltrasyonun bir çözüm olarak etkinliği konusunda artan endişeyi ele almaktadır. Geleneksel olarak kokulu bileşiklerin giderilmesi için

kullanılan biyofiltrasyon, temel parametreleri kontrol edecek şekilde iyileştirilmiş ve uygulaması VOC giderimini kapsayacak şekilde genişletilmiştir. Mikroorganizmaların çeşitli bileşikleri parçalama yeteneğine dayanan bu yöntem hem ekonomik açıdan uygun hem de çevresel açıdan sağlıklıdır. Bir biyofiltrede gaz, mikroorganizmaların kirletici maddeleri biyokütleyle veya metabolik son ürünlere ayırdığı, paketlenmiş gözenekli bir malzemedir. Süreç, kirletici maddelerin su fazına veya destek ortamına transferini ve zararsız formlara biyolojik dönüşümü içerir. Biyofiltrelerdeki karmaşık ekosistem nedeniyle mikrobiyal ekolojiyi anlamak, bunların yönetimini ve verimliliğini optimize etmek için çok önemlidir.

Jorio ve diğ. (1998) tarafından yapılan çalışma, 8 ay boyunca bir pilot ünite kullanılarak uçucu organik bileşiklerin (VOC'ler) kirli hava akışlarından uzaklaştırılmasında hava biyofiltrasyonunun etkinliğini değerlendirmiştir. Ticari olarak şartlandırılmış turba ile paketlenmiş ve dört mikroorganizma türüyle aşılacak biyofiltre, toluen, ksilen veya bunların karışımlarıyla kirlenmiş havayı etkili bir şekilde arıtmıştır. Etkileyici maksimum eliminasyon kapasitelerine ulaşılmıştır: toluen için $165 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$, ksilen için $66 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ ve toluen-ksilen karışımı için $115 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$, mevcut literatürdeki değerleri aşmaktadır. Ksilen izomerlerinin bozunması reaktivite sırasına göre meydana gelmiştir: m-ksilen, p-ksilen, o-ksilen. Ksilenin varlığı tolüenin biyolojik bozunmasını engellemiştir. Mikrobiyal popülasyon analizi, aromatik halka bozunmasını destekleyen suşları ortaya çıkarmıştır. Biyofiltre performansı ortam sıcaklığı ve basınç düşüşüyle ilişkilidir. Matematiksel bir model, deneysel sonuçların teorik olarak anlaşılmasına yardımcı olarak difüzyon ve reaksiyon rejimlerini açıklamaktadır.

Lee ve diğ. (2021) tarafından yapılan çalışma, DSÖ sınırlarını aşan, çeşitli insan hastalıklarına yol açan ve sağlık bakım maliyetlerini artıran küresel hava kirliliği sorununu vurgulamaktadır. Bitkiler, kirleticileri biriktirme, immobilizasyon, buharlaşma ve bozunma gibi çeşitli biyolojik mekanizmalar yoluyla uzaklaştırma yetenekleri nedeniyle umut verici bir çözüm sunmaktadır. Bu çevre dostu ve uygun maliyetli yöntem, mühendislik temelli iyileştirme tekniklerine tamamlayıcı veya alternatif bir yaklaşım olarak hizmet vermektedir. Farklı bitki türleri, morfolojilerine, büyüme koşullarına ve ilgili mikrobiyal topluluklara bağlı olarak iç ve dış hava kirleticilerini giderme konusunda farklı kapasiteler sergiler. Optimum bitki seçimi ve büyüme koşulları, iyileştirme kapasitesini önemli ölçüde artırabilirken, tamamlayıcı

tedaviler veya diğer yöntemlerle entegrasyon, fitoremediasyon sürecini daha da optimize edebilir.

2.8.2 Kirliliğin su ortamına aktarımı ve bu suyun biyolojik yollar ile arıtımı

Hava kirleticileri çeşitli yollarla su ortamları üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Partikül madde, polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH'lar), ağır metaller ve bakteriler gibi kirleticiler atmosferden su kütlelerine aktarılarak bunların kalitesini etkileyebilir ve su ekosistemleri ve insan sağlığı için risk oluşturabilir (Manisalidis ve diğ., 2020).

Hava kirleticilerinin su ortamlarına transferi, atmosferik birikim, hava-su değişimi ve yeniden sürüklenme gibi işlemlerle gerçekleşebilir. Atmosferik birikim, kirleticilerin havadan su yüzeylerine doğrudan yerleşmesini içerir ve bu da su ekosistemlerinin kirlenmesine yol açar. Bu süreç, su kütlelerinde ağır metallerin ve organik kirleticilerin birikmesine katkıda bulunarak su kalitesini ve içindeki organizmaları etkileyebilir (Luo ve diğ., 2018; He ve diğ., 2020).

Ek olarak, hava-su değişimi, su ortamlarındaki kalıcı organik kirleticilerin (KOK'lar) kaderinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Bu süreç, kirleticilerin hava ve su fazları arasında transferini, bunların su kütlelerindeki dağılımını ve biyoyararlılığını etkilemeyi içerir. Örneğin, havada, suda ve toprakta her yerde bulunan bileşikler olan PAH'lar, su yüzeylerinden atmosfere buharlaşarak çevresel kaderlerine ve suda yaşayan organizmalar üzerindeki potansiyel etkilerine katkıda bulunabilir (Dachs ve diğ., 1999; Radu ve diğ., 2017).

Ayrıca, havadaki kültürlenebilir bakteriyel aerosollerin varlığı, kanalizasyon bakterilerinin kıyıdaki kentsel alanlarda sudan havaya transferine yol açabilir ve bu da kirli kıyı sularındaki rekreasyonel faaliyetler sırasında dışkı koliformlarıyla inhalasyon temasının artmasına neden olabilir. Bu, kirleticilerin hava ve su ortamları arasında aktarılacak hem çevre hem de halk sağlığını etkileme potansiyelini vurgulamaktadır (Amaraneni ve diğ., 2004; Palmiste ve diğ., 2020).

Hava kirleticilerinin su ortamlarına taşınmasına yanıt olarak çeşitli iyileştirme stratejileri araştırılmıştır. Örneğin, su sümbülü ve su marulu gibi su bitkilerinin fitoremediasyon prosesleri yoluyla ağır metallerin su ortamlarından uzaklaştırılması için kullanımı araştırılmış olup, bu bitkilerin verimli bir şekilde metabolize etme ve kirleticileri su kütlelerinden uzaklaştırma yetenekleri ortaya konmuştur. Ek olarak,

fitoplankton alımı ve kalıcı organik kirleticilerin hava-su değişiminin birleşimi, hava ve su kirliliğinin birbirine bağlı doğasını vurgulayarak, bu kirleticilerin su ortamlarındaki kaderini etkileyen ilgili bir süreç olarak tanımlanmıştır (Abdullahi ve Ibrahim, 2017).

Sonuç olarak, hava kirleticilerinin su ortamlarına taşınmasının su kalitesi, su ekosistemleri ve insan sağlığı üzerinde önemli etkileri vardır. Bu aktarımın mekanizmalarını ve etkilerini anlamak, su kütlelerinin kirliliğini azaltmak ve çevre ve halk sağlığını korumak için etkili stratejiler geliştirmek açısından çok önemlidir (Qarani, 2020; Jyothylakshmi ve diğ., 2021).

Hava kirleticilerinin su ortamlarına transferi ve ardından biyolojik süreçlerle arıtılması, çevre iyileştirmede önemli bir ilgi alanı oluşturmaktadır. Uçucu organik bileşikler (VOC'ler), polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH'lar) ve ağır metaller dahil olmak üzere hava kirleticileri, atmosferik biriktirme, hava-su değişimi ve yeniden sürüklenme işlemleri yoluyla su kütlelerine taşınabilir. Bu kirleticiler su ortamına girdikten sonra su ekosistemleri ve insan sağlığı için risk oluşturabilir. Buna karşılık, kirli suyun iyileştirilmesi için, mikroorganizmaların ve bitkilerin kirletici maddeleri parçalama ve ortadan kaldırmaya yönelik doğal yeteneklerinden yararlanılarak çeşitli biyolojik arıtma yaklaşımları araştırılmıştır (Tran ve diğ., 2020).

Fitoremediasyon ve biyofiltrasyon gibi biyolojik arıtma yöntemleri, hava kirleticilerinin su ortamlarına transferini ele alma konusunda ümit verici olmuştur. Kirletici maddeleri uzaklaştırmak, parçalamak veya içermek için bitkilerin kullanımını içeren fitoremediasyonun, organik bileşikler ve ağır metallerle kirlenmiş suyun arıtılmasındaki etkinliği araştırılmıştır. Yeşil duvarlar ve saksı bitkileri gibi bitki bazlı sistemlerin kullanımı, havadaki kirleticileri giderme ve iç mekan hava kalitesini iyileştirme potansiyelini, aynı zamanda su kalitesine de etki ettiğini göstermiştir (Pettit ve diğ., 2018). Ek olarak, hava kirleticilerin fitoremediasyonunu geliştirmek için fonksiyonel yeşil duvar substratlarının geliştirilmesi araştırılmış olup, su kirliliğine yönelik sürdürülebilir ve düşük maliyetli bir yaklaşım sunulmaktadır (Pettit ve diğ., 2018).

Ayrıca, gelişmiş kirletici giderme sistemlerinde mikroorganizmaların ve bitkilerin kombinasyonu incelenmiş olup, bu biyolojik bileşenlerin su ortamlarındaki dirençli kirleticilerin parçalanmasında sinerjistik etkileri vurgulanmıştır (González-Martín ve

diğ., 2021). Bu yaklaşım, kirleticilerin bozunmasını ve uzaklaştırılmasını arttırmak için rizosferdeki mikroorganizmalar ve bitki kökleri arasındaki etkileşimlerden yararlanır ve hava kirleticilerinin su kütlelerine transferini ele alan biyolojik arıtma potansiyelini ortaya koyar.

Fitoremediasyona ek olarak, biyofiltrasyon teknolojileri de hava kirleticilerin taşınmasından kaynaklanan kirli suyu arıtma kapasiteleri açısından araştırılmıştır. Kirletici maddeleri gidermek için bitki-mikrop etkileşimlerinden yararlanan botanik biyofiltrelerin, uçucu organik bileşikler ve parçacık maddelerle kirlenmiş suyun arıtılmasındaki etkinlikleri açısından test edilmiştir (Pettit ve diğ., 2018). Bu sistemler, hava kirleticilerin taşınmasından kaynaklanan su kirliliğini ele almak için potansiyel olarak ölçeklenebilir ve sürdürülebilir bir çözüm sunar.

Genel olarak, hava kirleticilerin su ortamlarına transferi ve ardından biyolojik süreçler yoluyla arıtılması, çevresel iyileştirme için kritik bir alanı temsil etmektedir. Fitoremediasyon, biyofiltrasyon ve mikroorganizmalarla bitki kombinasyonunun kullanılması, hava kirletici transferinin su kalitesi üzerindeki etkilerini hafifletmek ve su ekosistemlerinin ve insan sağlığının korunmasına katkıda bulunmak için biyolojik arıtmanın potansiyelini göstermektedir (Torpy ve diğ., 2018; Meng ve diğ., 2022).

Biyolojik arıtma yöntemleri, hava kirliliğinin ve bunun su ortamları üzerindeki etkisinin azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu yöntemler, kirleticileri havadan uzaklaştırmak ve ardından kirlenmiş suyu arıtmak için biyolojik süreçlerden yararlanan bir dizi yenilikçi yaklaşımı kapsar. Aşağıdaki referanslar, hava kirliliğini ve bunun su ortamları üzerindeki etkilerini ele almaya yönelik biyolojik arıtma yöntemlerinin çeşitli uygulamalarına ilişkin değerli bilgiler sunmaktadır (Khalid, 2021).

Leson ve Winer (1991) biyofiltrasyonu, biyolojik olarak parçalanabilen uçucu organik bileşikler (VOC'ler) veya inorganik hava toksikleri içeren atık gazları arıtmak için biyolojik olarak aktif malzemeleri kullanan nispeten yeni bir hava kirliliği kontrol teknolojisi olarak tartışmaktadır. Bu yöntem, kirletici maddelerin biyolojik olarak parçalanmasını içerdiğinden, kirletici maddelerin su ortamlarına aktarımını ele alma potansiyeline sahiptir ve böylece hava kirletici madde aktarımından kaynaklanan su kirliliği riskini azaltır (Leson ve Winer, 1991).

Ayrıca Malhautier ve diğ. (2005), biyolojik arıtma sistemlerinin yönetimini optimize etmek için biyofiltrelerin mikrobiyal ekolojisinin anlaşılmasının önemini vurgulamaktadır. Mikroorganizmalar ile kirleticilerin biyolojik parçalanması arasındaki etkileşimleri araştıran bu araştırma, hava kirleticilerin su kalitesi üzerindeki etkisini azaltabilecek etkili biyolojik arıtma yöntemlerinin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır (Malhautier ve diğ., 2005).

Lee ve diğ. (2021) tarafından tartışıldığı üzere Fitoremediasyon, iç ve dış hava kalitesini iyileştirmeye yönelik sürdürülebilir bir stratejiyi temsil etmektedir. Bu biyolojik arıtma yöntemi, kirleticileri uzaklaştırmak, ayrıştırmak veya kontrol altına almak için bitkilerden faydalanarak hava kirliliğine yönelik uygun maliyetli ve çevre dostu bir yaklaşım sunar. Fitoremediasyonun, hava kirleticilerinin su ortamları üzerindeki etkisini hafifletme potansiyeli önemlidir çünkü su kütlelerine aktarılabilecek kirleticilerin azaltılmasına katkıda bulunabilir (Lee ve diğ., 2021).

Ayrıca Tripathy ve diğ. (2021), sürdürülebilir kirliliğin azaltılması için potansiyel bir aday olarak alglerin mevcut ve gelecekteki beklentilerini vurgulamaktadır. Yosun bazlı biyolojik arıtma yöntemleri, kirleticilerin havadan uzaklaştırılmasında umut vericidir ve su ortamlarını olumlu yönde etkileme potansiyeline sahiptir. Alglerin biyolojik arıtma süreçlerinde kullanılması, hava kirliliği ve bunun su kalitesi üzerindeki potansiyel etkisine yönelik sürdürülebilir ve çevre dostu bir yaklaşım sunmaktadır (Tripathy ve diğ., 2021).

Biyolojik arıtma yöntemleri, hava kirliliğinin ve bunun su ortamları üzerindeki potansiyel etkisinin ele alınmasında hayati bir rol oynamaktadır. Biyofiltrasyon, fitoremediasyon ve alg bazlı arıtma yöntemlerinin çeşitli uygulamaları, biyolojik süreçlerin hava kirleticilerinin su kütlelerine transferini azaltma, çevresel iyileştirmeye ve su kalitesinin korunmasına katkıda bulunma potansiyelini göstermektedir (Ravichandran ve diğ., 2018).

2.8.3 Kirleticilerin mikrobiyal parçalanması

Mikrobiyal bozunma, mikroorganizmalar tarafından üretilen enzimler tarafından düzenlenen karmaşık bir biyokimyasal süreçtir. Bu enzimler, organik ve inorganik kirleticilerin daha basit, daha az zararlı bileşiklere parçalanmasını katalize eder. Mikroplar kirleticileri karbon, enerji ve besin kaynağı olarak kullanır, böylece onların mikrobiyal biyokütleyle dönüşmesini ve asimilasyonunu kolaylaştırır.

Bakteriler, mantarlar ve arkeler dikkat çekici bir metabolik çeşitlilik sergileyerek hidrokarbonlar, pestisitler, ağır metaller ve endüstriyel kimyasallar da dahil olmak üzere çok çeşitli kirleticileri parçalamalarına olanak tanır. Her mikrobiyal tür, belirli kirletici sınıflarına göre uyarlanmış benzersiz enzimatik makinelere sahiptir ve bu, çeşitli çevresel ortamlara milyonlarca yıllık evrimsel adaptasyonu yansıtır.

Mikrobiyal bozunmanın çok yönlülüğü, çevresel iyileştirme ve biyolojik iyileştirmede çeşitli uygulamalara katkıda bulunmuştur. Dikkate değer bir örnek, *Pseudomonas* ve *Alcanivorax* gibi hidrokarbonu parçalayan bakterilerin ham petrol bileşenlerinin zararsız yan ürünlere parçalanmasında önemli rol oynadığı petrol sızıntılarının temizlenmesidir (Yakimov ve diğ., 2007).

Tarımsal ortamlarda mikrobiyal bozunma, belirli bakterilerin, mantarların ve virüslerin pestisit aktivitelerinden yararlanarak kimyasal pestisitlere sürdürülebilir alternatifler sunar. *Bacillus thuringiensis* ve diğer mikrobiyal ajanlardan türetilen biyopestisitler, çevresel etkiyi en aza indiren ve biyolojik çeşitliliği koruyan çevre dostu alternatifler olarak ilgi görmeye başlamıştır.

Potansiyeline rağmen mikrobiyal bozunma, yaygın uygulamasını engelleyen çeşitli zorluklarla karşı karşıyadır. Substrat mevcudiyeti, çevresel koşullar ve mikrobiyal rekabet gibi faktörler, bozunma işlemlerinin verimliliğini ve etkinliğini etkileyebilir. Dahası, dirençli kirleticilerin ve antimikrobiyal direncin ortaya çıkışı, mikrobiyal iyileştirme stratejileri için devam eden zorluklara yol açmaktadır (Benjamin ve diğ., 2019).

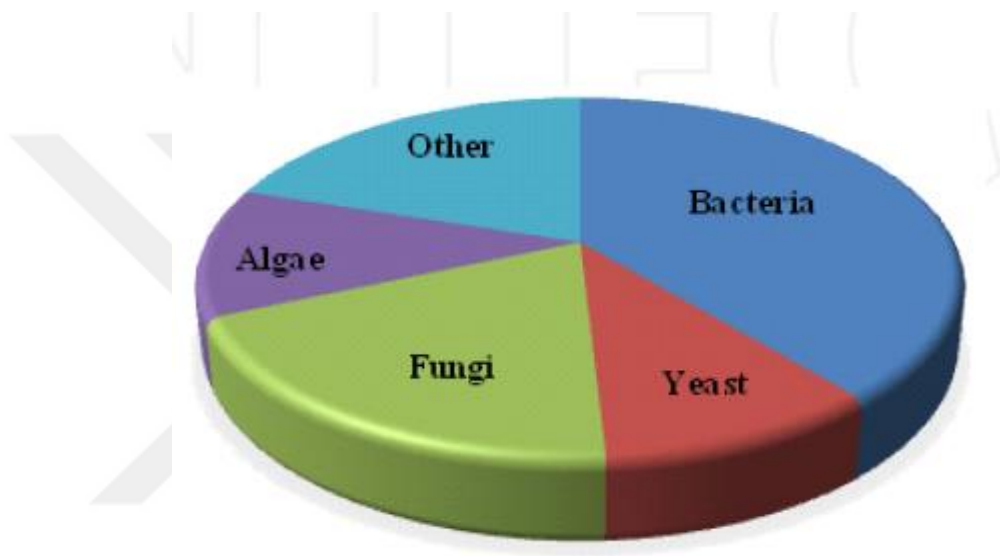
2.8.4 Biyoremediasyon teknikleri

Biyoloji ve iyileştirmeyi birleştiren bir terim olan biyoremediasyon, kirletici maddeleri parçalamak veya nötralize etmek için doğal süreçleri ve organizmaları kullanarak çevre kirliliğini azaltmaya yönelik umut verici bir yaklaşımdır. Kirlilik ve bunun ekosistemler ile insan sağlığı üzerindeki zararlı etkilerine ilişkin artan endişeler nedeniyle, biyolojik iyileştirme teknikleri, sürdürülebilir ve çevre dostu çözümler olarak büyük ilgi görmüştür.

Biyoremediasyon teknikleri, çeşitli kirlilik türlerini ele almak için uygun maliyetli, çevresel açıdan sürdürülebilir çözümler sunmaktadır. Mikroorganizmaların ve bitkilerin doğal yeteneklerinden yararlanarak biyolojik iyileştirme, kirlenmiş ortamları eski haline getirme ve ekosistemleri ve insan sağlığını koruma potansiyeline sahiptir.

Devam eden araştırmalar ve teknolojik gelişmeler, biyolojik iyileştirme stratejilerinin verimliliğini ve uygulanabilirliğini daha da artıracak ve daha temiz ve sağlıklı bir gezegenin önünü açacaktır.

Mikrobiyal biyoremediasyon, kirletici maddeleri parçalamak veya daha az zararlı maddelere dönüştürmek için bakteri, mantar ve algler gibi mikroorganizmaların metabolik aktivitelerine dayanır (şekil 2.12). Mikroplar, hidrokarbonlar, pestisitler, ağır metaller ve endüstriyel kimyasallar gibi karmaşık kirleticileri parçalayabilen enzimlere sahiptir. Toprakta suya, havaya kadar çok çeşitli ortamlarda gelişebilirler.



şekil 2.12 : Biyoremediasyon sürecinde kullanılan mikroorganizma türleri (Luciene ve diğ., 2015).

Çalışmalar, kontamine alanların temizlenmesinde mikrobiyal biyoremediasyonun etkinliğini göstermiştir. Örneğin, Pseudomonas ve Bacillus türleri gibi bakterilerin petrolü parçalama yetenekleri, deniz ortamlarındaki petrol sızıntılarını iyileştirmek için kullanılmaktadır (Das ve Chandran, 2011). Ayrıca beyaz çürükçül mantarlar gibi mantar türleri, poliklorlu bifeniller (PCB'ler) gibi kalıcı organik kirleticileri parçalamak için kullanılmıştır (Matsubara ve diğ., 2006).

Fitoremediasyon, kirleticileri topraktan, sudan veya havadan uzaklaştırmak, parçalamak veya hareketsiz hale getirmek için bitkilerin kullanılmasını içerir. Bitkiler kirleticileri kökleri aracılığıyla alır ve bunları metabolize edilebilecekleri veya tutulabilecekleri sürgünlerine veya yapraklarına taşır. Bu işlem, bitki köklerinin ve ilgili mikroorganizmaların enzimatik aktivitesi ile kolaylaştırılır.

Hiperakümülatörler olarak bilinen bazı bitki türleri, arsenik, kadmiyum ve kurşun gibi ağır metalleri yüksek konsantrasyonlarda toksik etkilere maruz kalmadan dokularında biriktirme yeteneğine sahiptir. Araştırmacılar, özellikle madencilik veya endüstriyel faaliyetlerden kaynaklanan ağır metallerle kirlenmiş alanlarda, fitoremediasyon amacıyla çeşitli hiperakümülatör türleri tanımlamış ve kullanmıştır (Rascio ve Navari-Izzo, 2011).

Biyo-büyütme, biyolojik bozunma yeteneklerini arttırmak için belirli mikrobiyal türlerin veya genetiği değiştirilmiş organizmaların kirlenmiş ortamlara sokulmasını içerir. Bu mikrobiyal aşılama ajanları, mevcut çevresel koşullar altında hedef kirleticileri verimli bir şekilde metabolize etme yetenekleri nedeniyle seçilir.

Biyolojik büyüme, kirlenmiş alanların, özellikle inatçı kirleticilerin veya sınırlı yerli mikrobiyal popülasyonların bulunduğu alanların iyileştirilmesini hızlandırma konusunda umut vaat ediyor. Bununla birlikte, mikrobiyal rekabet, olumsuz koşullar altında hayatta kalma ve genetiği değiştirilmiş organizmalara (GDO'lar) ilişkin düzenleyici kaygılar gibi zorlukların yaygın uygulama için ele alınması gerekmektedir (Saravanan ve diğ., 2022).

2.8.5 Hava kalitesinin iyileştirilmesinde mikroorganizmaların rolü

Hava kirliliğine karşı devam eden savaşta, bilim adamları ve çevreciler giderek doğanın en küçük sakinlerine, yani mikroorganizmalara yönelmektedir. Bakteriler, mantarlar ve arkeler de dahil olmak üzere bu mikroskobik organizmalar, zararlı kirleticileri azaltmanın ve hava kalitesini artırma gibi yeteneklere sahiptir (Xie ve diğ., 2018; Chakravorty ve diğ., 2022).

Mikroorganizmalar, organik ve inorganik bileşikler daha basit formlara ayırma konusunda usta, doğanın mükemmel geri dönüştürücüleridir. Hava kalitesinin iyileştirilmesi bağlamında, bazı mikrobiyal türler, uçucu organik bileşikler (VOC'ler), nitrojen oksitler (NO_x), kükürt dioksit (SO₂) ve partikül madde (PM) dahil olmak üzere havadaki kirleticileri metabolize etmede uzmanlaşmıştır.

Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) ve Massachusetts Amherst Üniversitesi Çevresel Mikrobiyoloji Laboratuvarı gibi önde gelen kurumlar tarafından yürütülen araştırmalar, mikrobiyal biyolojik iyileştiricinin hava kirliliği seviyelerini azaltmadaki etkinliğini göstermiştir. Mikrobiyal biyofiltrelerin, biyofilmlerin ve biyolojik büyüme tekniklerinin, kirleticileri endüstriyel emisyonlardan, iç mekan

ortamlarından ve şehir havasından etkili bir şekilde uzaklaştırdığı gösterilmiştir (Asikainen ve Werle, 2007; Schneider, 2010).

Mikrobiyal bozunmanın temelinde biyokimyasal yolların, enzimatik reaksiyonların ve ekolojik etkileşimler yatmaktadır. Mikroorganizmalar, kirleticilerin daha az toksik veya inert maddelere parçalanmasını katalize eden enzimler üretir; bu süreç biyolojik bozunma olarak bilinir. Mikroorganizmalar, oksidasyon, indirgeme, hidroliz ve fermantasyon gibi mekanizmalar yoluyla kirleticileri, doğal çevreye asimile edilebilecek zararsız yan ürünlere dönüştürür (Akpör ve diğ., 2014).

Kaliforniya Üniversitesi, Berkeley ve Lawrence Berkeley Ulusal Laboratuvarı gibi kurumlardaki bilim insanları tarafından mikrobiyal ekoloji ve çevresel mikrobiyoloji alanında yürütülen son teknoloji araştırmalar, mikrobiyal dönüşüm süreçlerinin inceliklerini açığa çıkarmaya devam etmektedir. Genomik dizileme, metagenomik ve transkriptomikte ilerlemeler, hava kirliliği kontrolündeki mikrobiyal toplulukların çeşitliliğine, bolluğuna ve işlevsel potansiyeline ışık tutmuştur (Lawrence, 2008).

Mikrobiyal ekolojinin en dikkat çekici yönlerinden biri eşsiz çeşitliliğidir. Mikroorganizmalar, okyanusların derinliklerinden atmosferin yükseklerine kadar Dünya üzerindeki hemen hemen her ekosistemde yaşamaktadır. Araştırmacılar, bu mikrobiyal çeşitliliği keşfederek ve bunlardan yararlanarak, hava kalitesini artırma ve kirliliği azaltma potansiyeline sahip yeni türleri ve metabolik yolları tanımlayabilirler.

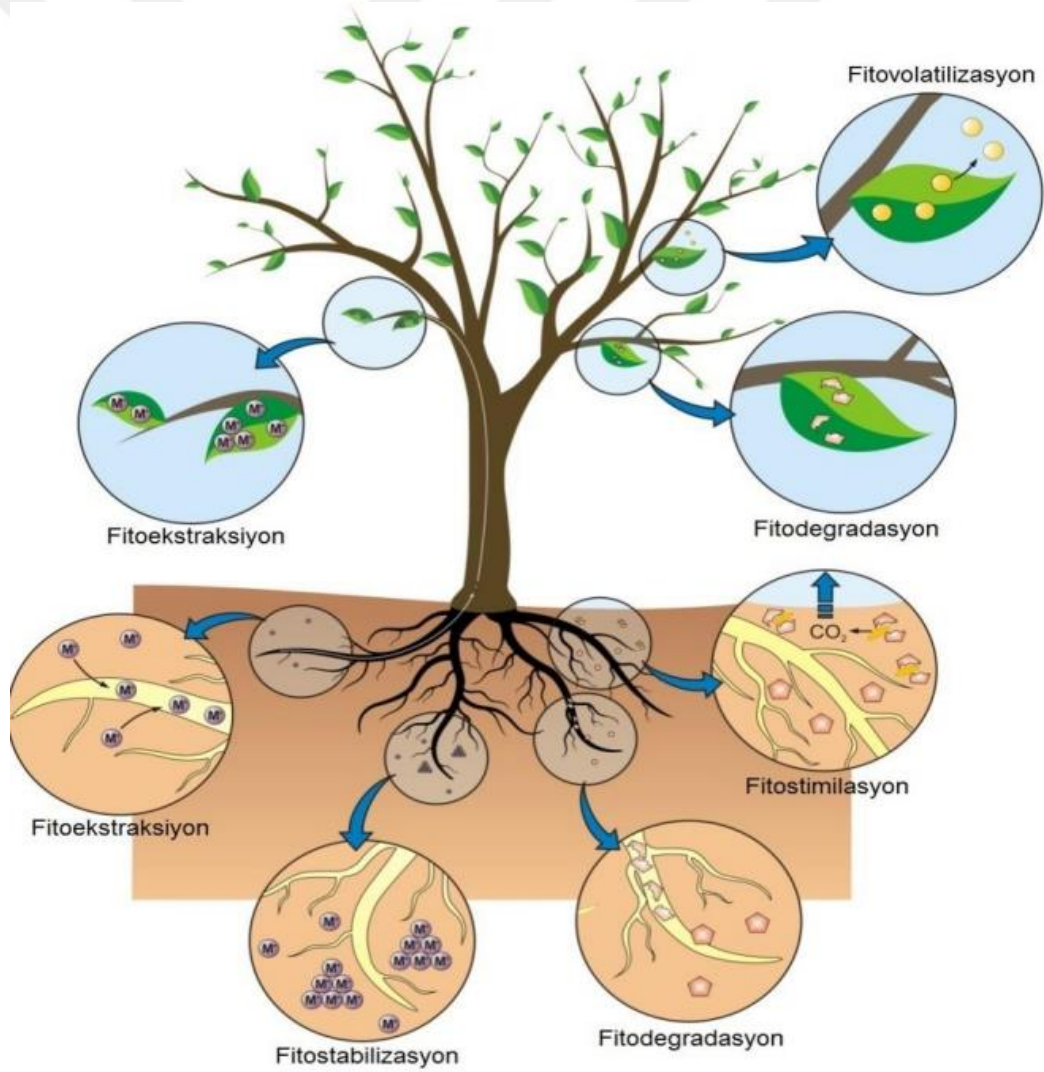
Washington Üniversitesi ve Ortak Genom Enstitüsü gibi kurumlarda mikrobiyal ekolojistler ve biyoteknoloji uzmanları tarafından yürütülen araştırmalar, kentsel hava, sanayi bölgeleri ve kirlenmiş topraklar dahil olmak üzere kirli ortamlarda benzersiz mikrobiyal toplulukların varlığını ortaya çıkarmıştır. Bilim insanları, bu mikrobiyal türleri izole edip karakterize ederek, belirli kirleticileri hedef alan ve mikrobiyal performansı optimize eden özel biyolojik iyileştirme stratejileri geliştirebilirler (Gref ve diğ., 2017).

2.8.6 Hava kirliliğinin azaltılmasında bitki bazlı yaklaşımlar

Fitoremediasyon olarak da bilinen fitofiltrasyon, havadaki kirleticileri atmosferden uzaklaştırmak için bitkilerin doğal filtreleme yeteneklerinden yararlanır. Bitki yaprakları ve gövdeleri filtre görevi görerek partikül maddeleri, uçucu organik bileşikleri (VOC'ler) ve havada bulunan diğer kirleticileri yakalar. Fitofiltrasyon süreci

özellikle araç emisyonları, endüstriyel faaliyetler ve kentsel gelişim nedeniyle kirlilik seviyelerinin genellikle yüksek olduğu kentsel ortamlarda etkilidir.

Araştırmalar, belirli bitki türlerinin, kirletici maddelerin yakalanmasını ve tutulmasını artıran yoğun bitki örtüsü ve özel yaprak yapılarıyla üstün fitofiltrasyon yetenekleri sergilediğini gösteriyor. Londra çınar (*Platanus × acerifolia*), Japon iğ (*Euonymus japonicus*) ve İngiliz sarmaşık (*Hedera helix*) gibi ağaçların partikül maddeyi etkili bir şekilde uzaklaştırdığı ve azot dioksit (NO_2) ve kükürt dioksit (SO_2) gibi havadaki gaz halindeki kirleticileri emdiği gösterilmiştir (Nowak ve diğ., 2013). Farklı fitoremediasyon tipleri vardır (Şekil 2.13) Fitoremediasyon tekniklerinin farklı kirletici ve ortamlarda kullanım alanları Çizelge 2.3’ de verilmiştir (Aybar ve diğ., 2015).



Şekil 2.13 : Fitoremediasyon tiplerinin şematik gösterimi (Aybar ve diğ., 2015).

Çizelge 2.4 : Fitoremediasyon tekniklerinin farklı kirletici ve ortamlarda kullanım alanları (Aybar ve diğ., 2015).

Mekanizma	Ortam	Süreç Hedefi	Kirleticiler	Bitkiler
Fitoekstraksiyon	Toprak, sedimet ve çamur	Kirletici alma ve uzaklaştırma	Metaller, metalloidler ve radyonükeidler	Hindistan hardalı, alyssum, ay çiçeği, hibrit kavaklar
Rizofiltrasyon	Yüzey ve yer altı suyu	Kirletici alma ve uzaklaştırma	Metaller, radyonükleidlerle	Ay çiçeği, Hindistan hardalı, su sümbülü
Fitostabilizasyon	Toprak, sediment ve çamur	Kirletici etkisizleştirme	As, Cd, Cr, Cu, Hs, Pb, Zn	Hindistan hardalı, Hibrit kavaklar, çimler
Rizodegradasyon	Toprak, yer altı suyu	Kirletici giderme	Organik bileşikler	Kırmızı dut, çimler
Rizodegradasyon	Toprak, sediment ve çamur, yer altı suyu, yüzey suyu	Kirletici giderme	Organik bileşikler, Klorinat çözücüler, Herbisitler, fenoller	Alg, Hibrit kavaklar, siyah söğüt, servi
Rizodegradasyon	Toprak, sediment ve çamur, yer altı suyu	Kirleticiyi buharlaştırma	Klorinat çözücüler, Bazı inorganikler (Se, Hg, As)	Kavaklar, yonca, Hindistan hardalı

Bitkiler, atmosferik karbondioksitin (CO₂) emildiği ve bitki biyokütlesinde ve toprak organik maddesinde depolandığı süreç olan karbon tutumunda çok önemli bir rol oynar. Fotosentez yoluyla bitkiler CO₂'yi organik karbon bileşiklerine dönüştürür ve yan ürün olarak oksijeni (O₂) açığa çıkarır. Ağaçlar, çalılar, çimenler ve diğer bitki örtüsü karbon yutucu görevi görerek sera gazı emisyonlarını dengelemekte ve iklim değişikliğini hafifletmektedir.

Ağaç dikmeyi ve doğal ekosistemleri onarmayı içeren ağaçlandırma ve yeniden ağaçlandırma çabaları, karbon tutumunun artırılması ve hava kirliliğiyle mücadelede temel stratejilerdir. Ormanlık alanlar ve yeşil alanlar, gelişmiş hava kalitesi, gelişmiş biyolojik çeşitlilik ve ekosistemin iklim değişikliğine ve aşırı hava olaylarına karşı dayanıklılığı dahil olmak üzere çok sayıda fayda sağlar.

Kentsel yeşillendirme girişimleri, hava kirliliğinin ve kentsel ısı adalarının olumsuz etkilerini azaltmak için bitki örtüsünün kentsel peyzajlara entegrasyonunu teşvik etmektedir. Yeşil çatılar, dikey bahçeler, yol kenarındaki bitkilendirmeler ve kent parkları, hava kalitesini artıran, ısı stresini azaltan ve genel olarak kentsel yaşanabilirliği artıran yeşil altyapı unsurları olarak hizmet vermektedir.

Çalışmalar kentsel yeşil alanların hava kirlenici konsantrasyonlarının azalmasına, ortam sıcaklıklarının azalmasına ve insan refahının ve yaşam kalitesinin artmasına katkıda bulunduğunu göstermiştir. Şehirler, bitki örtüsünü artırarak ve kentsel alanlardaki biyolojik çeşitliliği teşvik ederek, hem bölge sakinleri hem de ekosistemler için daha sağlıklı ve daha sürdürülebilir ortamlar yaratabilir (Dadvand ve diğ., 2015).

2.8.7 Fitoremediasyon stratejileri

Fitoremediasyon, çevredeki kirlenici maddeleri uzaklaştırmak, detoksifiye etmek veya hareketsiz hale getirmek için bitkilerin kullanılmasını içerir. Bitkiler, kökleri vasıtasıyla topraktaki kirlenicileri absorbe ederken, gövdeleri ve yaprakları ile havadaki partikül maddeleri tutar ve metabolik süreçlerle zararsız bileşiklere dönüştürür. Ayrıca, transpirasyon yoluyla absorbe edilen suyu ve içerdikleri kirlenicileri atmosfere geri vererek hava kalitesinin iyileştirilmesine katkıda bulunur. Bu mekanizmalar, fitoremediasyonun hava kalitesini artırma ve insan sağlığını koruma potansiyelini göstermektedir. Bu mekanizmalar arasında fitoekstraksiyon, rizofiltrasyon, fitostabilizasyon, fitovolatilizasyon ve rizodegradasyon yer alır.

Bitkisel ekstraksiyon, bitki dokularında kirlenici maddelerin alımını ve birikmesini içerir; bunlar daha sonra hasat edilebilir ve bölgeden uzaklaştırılabilir. Rizofiltrasyon, kirlenici maddeleri su ve topraktan uzaklaştırmak için bitki köklerinin filtreleme kapasitesini kullanır. Fitostabilizasyon, toprak matrisi içindeki kirlenici maddelerin hareketsizleştirilmesini, hareketliliklerinin ve biyoyararlılıklarının azaltılmasını içerir. Fitovolatilizasyon, kirlenici maddelerin bitki terlemesi yoluyla atmosfere salınmasını ifade ederken, rizodegradasyon, kirlenicilerin bitki kökü sızıntıları tarafından kolaylaştırılan mikrobiyal bozunmasını içerir (Rascio ve Navari-Izzo, 2011).

Fitoremediasyon Uygulamaları:

Fitoremediasyon, ağır metaller, organik kirleniciler, besinler ve radyoaktif elementler de dahil olmak üzere çeşitli kirlenici türlerini iyileştirmek için başarıyla uygulanmıştır. Hiperakümülatörler olarak bilinen belirli bitki türleri, belirli kirlenici maddelere karşı

olağanüstü tolerans ve biriktirme kapasiteleri sergiler ve bu da onları bitki ıslahı amaçları için ideal adaylar haline getirir.

Örneğin *Brassica juncea* (Hint hardalı) ve *Alyssum spp.* gibi hiperakümülatör bitkiler. kadmiyum, kurşun ve arsenik gibi ağır metallerle kirlenmiş toprakların iyileştirilmesinde kullanılmıştır. Bu bitkiler dokularında yüksek konsantrasyonlarda metal biriktirir ve bunlar daha sonra güvenli bir şekilde toplanıp imha edilebilir. Su ortamlarında, su sümbülü (*Eichhornia crassipes*) gibi yüzen su bitkileri, kirlenmiş su kütlelerinden kirleticilerin rizofiltrasyon yoluyla uzaklaştırılması için kullanılmıştır.

Fitoremediasyon, çevre dostu bir temizleme stratejisi olarak büyük umut vaat etse de, etkinliği, bitki türlerinin seçimi, saha koşulları, kirletici konsantrasyonları ve iyileştirme hedefleri gibi çeşitli faktörlerden etkilenebilir. Özellikle büyük ölçekli veya yüksek oranda kirlenmiş alanlar için iyileştirmenin yavaş temposu, uzun vadeli izleme ve yönetim çabaları gerektirebilir.

Fitoakümülyasyon olarak bilinen kirletici maddelerin besin zincirine bitki aracılı transfer potansiyeli, insan sağlığı ve ekolojik riskler konusunda endişelere yol açmaktadır. Fitoremediasyon projelerinin güvenliğini ve etkinliğini sağlamak için uygun risk değerlendirmesi ve yönetim stratejileri gereklidir (Glick, 2010; Rascio ve Navari-Izzo, 2011; Grobelak, 2016).

Fitoremediasyon Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları:

Fitoremediasyon yöntemi ile kirleticilerin ıslahı yeni bir teknoloji olmakla birlikte birçok avantajı ve dezavantajı bulunmaktadır. Çevresel ıslah adı altında diğer ıslah yöntemleriyle kıyaslandığında bu etmenler daha da anlaşılır hale gelecektir.

Fitoremediasyonun Avantajları;

- Diğer ıslah teknolojilerine göre daha ekonomiktir,
- Sahayı tekrar istila etmede yeni bir bitki topluluğuna gerek duyulmaz,
- Atık dökümü için ekstra bir sahaya ihtiyaç duyulmaz,
- Diğer metotlarla kıyaslandığında halk tarafından da kabul gören estetik bir görünüm meydana gelir ve memnun edicidir,
- Yerinde ıslah özelliği ile kirlenmiş alanın başka bir yere taşınmasına gerek kalmadan kirleticilerin yayılması engellenmiş olur,

- Tek tip kirleticinin dışında birçok kirleticiyle aynı anda mücadele edilerek alanın ıslahı sağlanabilir.

Fitoremediasyonun Dezavantajları;

- Başarıya ulaşma hızı alanda kullanılacak bitkilerin, alanın edafik ve biyotik faktörlerine uyum sağlamasıyla birlikte bitkinin kirleticiye olan direncine bağlıdır,
- Yapraklarda biriken kirleticiler sonbaharda yaprak dökümüyle beraber tekrar toprağa karışabilir,
- Yakacak odun olarak kullanılan bitkilerin dokularında kirletici birikmiş olabilir,
- Diğer ıslah metotlarıyla kıyaslandığında ıslah zamanı daha uzun sürebilir,
- Kirleticilerin çözünerek yıkanma sonucu toprağa karışma ihtimali artabilir (Aybar ve diğerleri, 2015).

3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1 Literatür Seçim Kriterleri

Bu tez kapsamında, hava kirliliğinin biyolojik proseslerle kontrolüne dair toplam 100'den fazla yayın incelenmiştir. Bu yayınlar, hava kirliliğinin biyolojik yollarla giderimi üzerine odaklanmış olup, 47'si bu spesifik alanda derinlemesine değerlendirilmiştir. İlgili literatür, PubMed, Google Akademik ve Web of Science gibi saygın akademik veri tabanlarında kapsamlı aramalar yapılarak belirlenmiştir. Arama terimleri arasında "hava kirliliği", "biyolojik prosesler", "fitoremediasyon", "biyofiltrasyon", "uçucu organik bileşikler (VOC)" ve "inorganik hava toksikleri" bulunmaktadır. Çalışmalar, 1959 ile 2024 yılları arasında yayınlanan çalışmalar dikkate alınarak geniş bir tarama yapılmıştır. İngilizce yazılmış ve hava kirliliği, müdahale yöntemleri ve yönetim çerçevelerine odaklanan yayınlar dahil edilmiştir. Bu literatür taramasının amacı, hava kirliliği kontrolünde biyolojik proseslerin kullanımına dair mevcut bilgi birikimini derinlemesine incelemek ve bu alandaki bilimsel eğilimleri, boşlukları ve çelişkileri ortaya koymaktır. Biyolojik proseslerin hava kirliliği kontrolünde kullanımı, son yıllarda artan bir ilgi görmektedir. Mikroorganizmalar aracılığıyla kirleticilerin biyodegradasyonu, biyofiltrasyon ve biyoremediasyon gibi tekniklerin geliştirilmesi, hava kalitesinin iyileştirilmesine yönelik yenilikçi yaklaşımlar arasında yer almaktadır. Bu süreçlerde kullanılan biyoteknolojiler, hem çevresel hem de ekonomik açıdan sürdürülebilir çözümler sunmaktadır. Hava kirliliği kontrolünde kullanılan biyolojik süreçlerin etkinliği, uygulama alanları, avantajlar ve dezavantajlar açısından değerlendirilmiş ve bu bulgular, mevcut literatürdeki eğilimler, boşluklar ve çelişkiler ışığında yorumlanmıştır. Bu kapsamda, elde edilen veriler ve analizler, hava kirliliğinin biyolojik yollarla giderimine yönelik mevcut bilgiyi derinleştirirken, gelecekteki araştırmalara da ışık tutacak niteliktedir.

3.2 Veri Toplama ve Analizi

İlk araştırma, araştırma hedefleriyle ilgisine göre taranan geniş miktarda literatür ortaya çıkarmıştır. Her yayının incelemeye dahil edilmeye uygunluğunu değerlendirmek için özetler ve başlıklar gözden geçirilmiştir. Dahil edilme kriterlerini karşılayan tam metinli makaleler detaylı analiz için seçilmiştir. Veri çıkarma, hava kirliliği ve biyolojik prosesler ile ilgili temel temaları, kavramları, vaka çalışmalarını ve en iyi uygulamaları belirlemeye odaklanılmış ve bilgiler sistematik olarak toplanmıştır.

3.3 Bulguların Sentezi

Seçilen literatürden elde edilen bulgular, hava kirliliği yönetiminde ortak eğilimleri, zorlukları ve önerileri belirlemek için sentezlenmiştir. Veriler, hava kirliliği müdahale protokolleri ve yönetim süreçleri ile hava kirliliğinde biyolojik prosesler dahil olmak üzere tematik alanlara göre kategorize edilmiştir. Bu alandaki mevcut bilgi durumuna kapsamlı bir genel bakış sağlamak amacıyla önemli görüşler ve öneriler özetlenmiştir. Önemli noktaları göstermek ve incelemenin anlaşılabilirliğini artırmak için ilgili vaka çalışmaları, örnekler ve en iyi uygulamalardan alıntı yapılmıştır.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1 Sonuçlar

- Hava kirliliğiyle mücadele için sürdürülebilir çözümler arayışı, çevresel iyileştirme ve hava kalitesinin iyileştirilmesi için umut verici yollar olarak biyolojik süreçlerin araştırılmasına yol açmıştır. Bu çalışma, hava kirliliğinin kontrolünde biyolojik süreçlerin kapsamlı bir incelemesini ve karşılaştırmalı analizini üstlenmiş, saygın veri tabanlarından ve arama motorlarından elde edilen literatür verilerinden bilgiler elde etmiştir.
- Biyoremediasyon, mikroorganizmaların kullanımıyla kirleticilerin çevreden uzaklaştırılması veya detoksifiye edilmesi sürecidir. Bu yöntem, petrol türevleri, ağır metaller ve pestisitler gibi çeşitli kirleticilere karşı etkinlik göstermektedir. Mikroorganizmalar, kirleticileri biyokimyasal süreçler aracılığıyla daha az zararlı bileşiklere dönüştürerek çevresel kirliliği azaltır ve hava kalitesini iyileştirir. Bu biyolojik süreçler, kirleticilerin metabolik yollarla ayrıştırılmasını ve çevresel zararın en aza indirilmesini sağlamakta olup, sürdürülebilir ve ekolojik açıdan kabul edilebilir bir çözüm sunmaktadır.
- Fitoremediasyon, bitkilerin kökleri, gövdeleri ve yaprakları aracılığıyla kirleticilerin alınması, parçalanması ve stabilize edilmesi sürecidir. Bu biyolojik arıtım yöntemi, bitkilerin hava kirleticilerini doğrudan absorbe edebilme ve metabolik yollarla detoksifiye edebilme yeteneklerine dayanır. Özellikle uçucu organik bileşikler (VOC'ler) ve bazı ağır metaller için fitoremediasyon, çevresel kirleticilerin azaltılmasında oldukça etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bitkilerin biyokimyasal mekanizmaları sayesinde, kirleticilerin çevreden uzaklaştırılması ve çevresel dengenin yeniden sağlanması hedeflenir, bu da sürdürülebilir ve ekolojik açıdan uygun bir çözüm sunar.
- Mikrobiyal bozunma, mikroorganizmaların kirleticileri biyolojik yollarla parçalayarak hava kalitesini artıran önemli bir biyolojik süreçtir. Bu yöntemde,

mikroorganizmalar organik kirleticileri enerji ve besin kaynağı olarak kullanır. Böylece karbon dioksit, su ve daha az zararlı bileşiklere dönüştürür. Mikrobiyal bozunma, kirleticilerin mikrobiyal enzimler aracılığıyla biyokimyasal reaksiyonlar sonucu mineralizasyon veya detoksifikasyon süreçlerine tabi tutulmasını içerir. Bu yöntem, özellikle endüstriyel atık gazların arıtımında yaygın olarak kullanılmakta olup, hava kalitesinin iyileştirilmesinde ve çevresel kirleticilerin azaltılmasında etkili bir çözüm sunmaktadır.

- Mikroorganizmalar, biyoremediasyon ve mikrobiyal bozunma süreçlerinde kullanılarak, çeşitli organik ve inorganik kirleticileri parçalama ve dönüştürme kapasitesine sahiptir. Örneğin, petrol türevleri, pestisitler ve ağır metaller gibi toksik bileşikler, mikroorganizmalar tarafından biyokimyasal süreçler aracılığıyla daha az zararlı formlara dönüştürülebilir. Bu biyokimyasal mekanizmalar, hava kalitesinin iyileştirilmesinde ve çevresel zararın azaltılmasında önemli rol oynamaktadır. Ayrıca, mikrobiyal biyoteknolojilerin geliştirilmesi ve uygulanması, endüstriyel atık gazların ve diğer kirleticilerin arıtımında geniş bir potansiyele sahiptir, böylece sürdürülebilir çevre yönetimine önemli katkılar sağlamaktadır.
- Algal temizleyiciler, hava kirliliğini azaltmada etkili biyolojik araçlar olarak öne çıkmaktadır. Algler, fotosentez yoluyla karbondioksiti (CO₂) emerken, oksijen üretimi ve kirleticilerin biyolojik süreçlerle parçalanması gibi ek faydalar sağlar. Bu biyolojik sistemler, özellikle endüstriyel emisyonların arıtılması ve sera gazlarının azaltılması konusunda önemli bir rol oynamaktadır.
- Biyofiltreler, kirli hava akımlarında bulunan kirleticileri yakalayıp parçalayan canlı organizmalardan oluşan filtreleme sistemleridir. Bu sistemler, mikroorganizmaların kirleticileri metabolize ederek besin kaynağı olarak kullanması prensibine dayanır. Özellikle endüstriyel ortamlarda yaygın olarak kullanılan biyofiltreler, uçucu organik bileşikler (VOC'ler) ve diğer kirleticilerin çeşitli türlerini etkili bir şekilde azaltabilir. Bu özellikleriyle biyofiltreler, endüstriyel emisyonların arıtılması ve çevre kalitesinin iyileştirilmesinde önemli bir rol oynar. Biyolojik süreçlerin güçlendirilmesi kapasiteleri sayesinde, biyofiltreler sürdürülebilir ve etkili bir çözüm sunar.

- İnceleme sonucunda, biyolojik süreçlerin çok çeşitli hava kirleticilerini azaltmak için çeşitli ve etkili stratejiler sunduğu ortaya çıkmıştır. Biyoremediasyondan fitoremediasyona, mikrobiyal bozunmadan biyofiltrasyona kadar bu biyolojik mekanizmalar, kirleticilerin giderilmesinde, hava kalitesinin artırılmasında ve ekolojik dengenin yeniden sağlanmasında oldukça önem arz etmektedir.
- Bu araştırma, kapsamlı hava kirliliği kontrol stratejilerinin ayrılmaz bileşenleri olarak biyolojik süreçlerin gücünden yararlanmanın önemini altını çizmektedir. Mikroorganizmaların ve bitkilerin doğal yeteneklerinden yararlanarak daha temiz havaya, daha sağlıklı ortamlara ve gelecek nesiller için sürdürülebilir geleceklere giden bir yol açılabilir.
- Çevre yönetiminin ve halk sağlığının zorluklarıyla mücadele ederken, doğayı önemsemeye ve hava kirliliğiyle mücadelede biyolojik süreçlerin dönüştürücü potansiyelini ortaya çıkarmaya devam edilmelidir. Birlikte, işbirlikçi araştırmalar, yenilikçi teknolojiler ve bilinçli politikalar aracılığıyla, temiz havanın sadece bir rüya değil aynı zamanda temel bir insan hakkı olduğu bir dünyaya doğru çaba gösterilmelidir.
- Bu çalışma, bilimsel araştırmanın daimi olmasının ve daha yeşil, daha sağlıklı bir gezegene yönelik kalıcı arayışın bir kanıtıdır.

4.2 Öneriler

- Mikrobiyal yakıt hücreleri, alg bazlı biyolojik iyileştirme ve genetik mühendisliği yaklaşımları gibi tezde kapsamlı bir şekilde ele alınmayan yeni ortaya çıkan biyolojik süreçler ve teknolojiler keşfedilmelidir.
- Farklı biyolojik süreçler arasındaki potansiyel sinerjileri ve bunların kapsamlı hava kirliliği kontrol stratejilerine entegrasyonu araştırılmalıdır.
- Kentsel alanlar, sanayi bölgeleri ve tarım bölgeleri de dahil olmak üzere çeşitli çevresel ortamlarda biyolojik süreçlerin pratik fizibilitesini ve ölçeklenebilirliğini değerlendirmek için saha çalışmaları ve pilot projeler yürütülmelidir.

- Hava kirliliği kontrolüne yönelik biyolojik çözümleri uygulamak ve değerlendirmek için endüstri ortakları, devlet kurumları ve çevre kuruluşlarıyla işbirliği yapılmalıdır.
- Farklı bölgelerdeki hava kalitesi yönetimini düzenleyen politika ortamını ve düzenleyici çerçeveleri analiz ederek biyolojik süreçleri çevre politikaları ve düzenlemelerine entegre etme fırsatları belirlenmelidir.
- Biyolojik süreçlerin benimsenmesini teşvik eden ve hava kirliliği kontrolünde sürdürülebilir uygulamaları teşvik eden politika müdahalelerini savunulmalıdır.
- Hava kirliliği kontrolündeki biyolojik süreçlerin rolü hakkında farkındalığı artırmak ve bireyleri hava kalitesini iyileştirmek için harekete geçme konusunda güçlendirmek için yerel topluluklar, okullar ve sivil kuruluşlarla iletişim kurulmalıdır.
- Araştırma bulgularını yaymak ve çevresel sürdürülebilirlik ve halk sağlığı konularında diyalogu teşvik etmek için çalıştaylar, seminerler ve sosyal yardım etkinlikleri düzenlenmelidir.
- Çevre bilimi, mikrobiyoloji, ekoloji ve mühendislik dahil olmak üzere farklı alanlardan araştırmacılar, uygulayıcılar ve paydaşlarla disiplinlerarası işbirliklerini ve bilgi alışverişi platformları teşvik edilmelidir.
- Hava kirliliği kontrolünde biyolojik süreçlerin uygulanmasından elde edilen içgörülerini, en iyi uygulamaları ve öğrenilen dersleri paylaşmak için uluslararası konferanslara, çalıştaylara ve araştırma ağlarına katılmalıdır.
- Hava kirliliği kontrolünde biyolojik süreçlerin zaman içindeki etkinliğini ve ekolojik etkilerini izlemek için uzun vadeli izleme programları oluşturulmalıdır.
- Biyolojik çözümlerin benimsenmesiyle ilişkili hava kalitesi iyileştirmelerini, ekosistem dayanıklılığını ve halk sağlığı sonuçlarını değerlendirmek için kapsamlı izleme ve değerlendirme uygulanmalıdır.
- Biyo-ilhamlı malzemeler, nanoteknoloji ve uzaktan algılama teknikleri gibi biyolojik süreçlerde teknolojik yenilikleri ilerletmeyi amaçlayan araştırma ve geliştirme girişimleri desteklenmelidir.

- Hava kirliliği izleme ve yönetimini geliştirmek için biyolojik süreçleri yapay zeka, büyük veri analitiği ve uzaktan algılama gibi diğer yenilikçi teknolojilerle birleştiren disiplinler arası yaklaşımlar keşfedilmelidir.
- Küresel ölçekte hava kirliliğini ele alma konusunda işbirliğini ve kolektif eylemi teşvik etmek için uluslararası araştırma konsorsiyumlarına, ortak projelere ve kapasite geliştirme girişimlerine katılınabilir.
- Sürekli öğrenme, mesleki gelişim ve ilgili konferanslara, çalıştaylara ve eğitim programlarına katılım yoluyla hava kirliliği kontrolüne yönelik biyolojik süreçler alanındaki en son gelişmeler, trendler ve atılımlar takip edilmelidir.
- Hava kalitesinin iyileştirilmesine, çevresel sürdürülebilirliğe ve halk sağlığının korunmasına öncelik veren kanıta dayalı politika ve düzenlemeler savunulmalıdır.
- Kirlilik kontrolü için etkili mimari tasarım ve bölgesel planlama önemlidir, çünkü doğru planlama ile çevresel etkiler minimize edilebilir ve sürdürülebilir çözümler sağlanabilir.
- Hava kirliliğinin kontrol edilmesinde biyolojik süreçlerin önemi konusunda farkındalığı artırmak ve çevresel yönetim ve sorumluluk kültürünü geliştirmek için politika yapıcılar, paydaşlar ve halkla iletişim kurulmalıdır.
- Hava kirliliği, insan yaşamının yanı sıra tüm ekosistemleri etkileyen önemli bir faktördür. Bu nedenle, konuyla ilgili yapılan çalışmalar sürekli olarak güncellenmeli ve çeşitlendirilmelidir. Zamanla değişen hava kirliliği bileşenlerini anlamak için sürekli izleme ve değerlendirme gereklidir. Özellikle değişimin hızlı olduğu bölgelerde, verilerin geçerliliğini sürdürebilmek için düzenli aralıklarla çalışmaların tekrarlanması önemlidir. Bu yaklaşım, hava kirliliği ile mücadelede etkili stratejiler geliştirmek için temel bir bilimsel yaklaşımdır.
- Bu önerilerin uygulanması, bu çalışmanın etkisini ve alaka düzeyini artırabilir; hızla değişen bir dünyada hava kalitesi sorunlarına yönelik bilgi, politika geliştirme ve pratik çözümlerin ilerlemesine katkıda bulunabilir.

KAYNAKLAR

- Abdullahi, U. A., & Ibrahim, S.** (2017). An assessment of pollution in aquatic environment using bioindicators: a review. *Bayero Journal of Pure and Applied Sciences*, 10(2), 64–68.
- Adepoju, A. O., Omotoso, I. O., & Tiamiyu, O. G.** (2024). Air pollution: Prevention and control strategies. In *Environmental Pollution and Public Health* (pp. 49–62). Elsevier.
- Ağacan, İ.** (2014). *Çevre Kirliliği Sorunları İle Mücadelelerde Türkiye’de Uygulanan Çevre Vergileri ve Çevre Vergisi Bilinci*. (Yüksek Lisans tezi). Sakarya Üniversitesi (Turkey).
- Akpınar, Ö. Ü. A., Büyük, F., & Palut, S.** (2019). Kentsel yeşil alanlar, hava kirliliği, insan sağlığı ve fiziksel aktivite arasındaki ilişkinin incelenmesi. 2. *Uluslararası Tarım, Çevre ve Sağlık Kongresi, 18-19 Ekim, Aydın*.
- Akpor, O. B., Othinoi, D. A., Olaolu, D. T., & Aderiye, B. I.** (2014). Pollutants in wastewater effluents: impacts and remediation processes. *International Journal of Environmental Research and Earth Science*, 3(3), 50–59.
- Aksoy, Ö.** (2012). *Sulu çözeltilerden bazı boyarmaddelerin ve bakır metalinin uzaklaştırılmasında yeni bir adsorplayıcı olarak nar posasının değerlendirilmesi*. Fen Bilimleri Enstitüsü, (Yüksek Lisans Tezi), Diyarbakır, Türkiye.
- Al-Mudhaf, H. F., Al-Khulaifi, N. M., Abu-Shady, A. I., & Selim, M. I.** (2019). A new method for simultaneous analysis of semi-volatile organic compounds in outdoor/indoor air of large office buildings. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(6), 2667–2682. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1828-2>
- Alkaya, A.** (2023). Hava Kirliliği Açısından OECD Üye Ülkelerinin Çok Boyutlu Ölçekleme Analiziyle Değerlendirilmesi. *Third Sector Social Economic Review*, 58(4), 2911–2932.
- Altıkat, A., Torun, F. E., & Bayram, T. T.** (2011). Küresel kirlilik: Dünya, Avrupa Birliği ve Türkiye’de hava kirliliği örneği. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 27(2), 134–149.
- Altıntaş, S.** (2020). *Ergene havzasında hava kirliliğinin sağlık etkilerinin araştırılması*. (Yüksek Lisans tezi). Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi.
- Amaraneni, S. R., Singh, S., & Joshi, P. K.** (2004). Mapping the spatial distribution of air and water pollutants in Kolleru Lake, India using geographical information systems (GIS). *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 15(6), 584–607.

- Anderson, V., & Gough, W. A.** (2020). *Evaluating the potential of nature-based solutions to reduce ozone, nitrogen dioxide, and carbon dioxide through a multi-type green infrastructure study in Ontario, Canada. City and Environment Interactions*. 6, 100043.
- Andreae, U.** (1959). Position as regards investigations in monozygotic twin calves at the Max Planck Institute for Cattle Breeding and Feeding, Mariensee/Trenthorst to January 1959. *Position as Regards Investigations in Monozygotic Twin Calves at the Max Planck Institute for Cattle Breeding and Feeding, Mariensee/Trenthorst to January 1959*.
- Asikainen, C. A., & Werle, S. F.** (2007). Accretion of ferromanganese nodules that form pavement in Second Connecticut Lake, New Hampshire. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(45), 17579–17581.
- Aybar, M., Bilgin, A., & Sağlam, B.** (2015). Fitoremediasyon yöntemi ile topraktaki ağır metallerin giderimi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 1(1–2), 59–65.
- Ayilara, M. S., Olanrewaju, O. S., Babalola, O. O., & Odeyemi, O.** (2020). Waste management through composting: Challenges and potentials. *Sustainability*, 12(11), 4456.
- Barbusiński, K., Urbaniec, K., Kasperczyk, D., & Thomas, M.** (2020). Biofilters versus bioscrubbers and biotrickling filters: State-of-the-art biological air treatment. In *From biofiltration to promising options in gaseous fluxes biotreatment* (pp. 29–51). Elsevier.
- Bayram, H., & Dikensoy, Ö.** (2006). Hava kirliliği ve solunum sağlığına etkileri. *Tüberküloz ve Toraks Dergisi*, 54(1), 80–89.
- Bayram, H., Dörtbudak, Z., Fişekçi, F. E., Kargın, M., & Bülbül, B.** (2006). Hava kirliliğinin insan sağlığına etkileri, dünyada, ülkemizde ve bölgemizde hava kirliliği sorunu” paneli ardından. *Dicle Tıp Dergisi*, 33(2), 105–112.
- Benjamin, S. R., Lima, F. De, Florean, E. O. P. T., & Guedes, M. I. F.** (2019). Current trends in nanotechnology for bioremediation. *International Journal of Environment and Pollution*, 66(1–3), 19–40.
- Biçer, N. Ç.** (2022). Çocuklar İçin Sürdürülebilir Gelecek. *Dünya Senin Ellerinde*, 147.
- Buente Jr, D. T., Gerard, W. E., & Visser, J. F.** (2010). Limited oversight: The role of the Federal courts vis-à-vis the Environmental Protection Agency in air pollution control under the Clean Air Act. *Duke Env'tl. L. & Pol'y F.*, 21, 309.
- Burger, R. P., Language, B., Piketh, S. J., & Burger, R. P.** (2020). *Characterisation of respirable indoor particulate matter in South African low-income settlements B Language orcid.org/0000-0002-9942-7930 Characterisation of respirable indoor particulate matter in South African low-income settlements*. North-West University (South Africa).
- Chakravorty, A., Raghavan, V., Grace, A. N., Kim, S. Y., & Van Le, Q.** (2022).

Plants and microorganisms for phytoremediation of air. In *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering* (pp. 109–131). Elsevier.

- Cheremisinoff, N. P.** (2002). Handbook of Air Pollution Prevention and Control. In *Handbook of Air Pollution Prevention and Control*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-7499-7.x5000-7>
- Chiang, P. C., & Gao, X.** (2022). Air Pollution Control and Design. In *Air Pollution Control and Design*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-7488-3>
- Chowdhury, A. K., Debsarkar, A., & Chakrabarty, S.** (2015). Novel Methods for Assessing Urban Air Quality: Combined Air and Noise Pollution Approach. *Journal of Atmospheric Pollution*, 3(1), 1–8.
- Cooke, P.** (2002). Biotechnology clusters as regional, sectoral innovation systems. *International Regional Science Review*, 25(1), 8–37.
- Cronin, J.** (2019). The Cuyahoga fire at fifty: a false history obscures the real water crisis that never ceased. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 9(3), 340–351. <https://doi.org/10.1007/s13412-019-00550-3>
- Dachs, J., Eisenreich, S. J., Baker, J. E., Ko, F.-C., & Jeremiason, J. D.** (1999). Coupling of phytoplankton uptake and air– water exchange of persistent organic pollutants. *Environmental Science & Technology*, 33(20), 3653–3660.
- Dadvand, P., Nieuwenhuijsen, M. J., Esnaola, M., Fornes, J., Basagaña, X., Alvarez-Pedrerol, M., Rivas, I., López-Vicente, M., De Castro Pascual, M., & Su, J.** (2015). Green spaces and cognitive development in primary schoolchildren. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(26), 7937–7942.
- Das, N., & Chandran, P.** (2011). Microbial degradation of petroleum hydrocarbon contaminants: an overview. *Biotechnology Research International*.
- Drinker, P.** (1958). Air Pollution and the Public Health: Excerpts from the Harben Lectures given before the Royal Institute of Public Health and Hygiene, London, Eng., May, 1957. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 19(3), 218–224. <https://doi.org/10.1080/00028895809343579>
- Esen, M.** (2019). *Toprak yıkama yöntemiyle Cd ve Pb ile kirlenmiş tarımsal toprakların iyileştirilmesi*. (Yüksek Lisans tezi). Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Fernández-Camacho, R., Rodríguez, S., de la Rosa, J., Sánchez de la Campa, A. M., Alastuey, A., Querol, X., González-Castanedo, Y., Garcia-Orellana, I., & Nava, S.** (2012). Ultrafine particle and fine trace metal (As, Cd, Cu, Pb and Zn) pollution episodes induced by industrial emissions in Huelva, SW Spain. *Atmospheric Environment*, 61, 507–517. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.08.003>
- Friedrich, R., & Al, F. et.** (2006). Temporal and Spatial Resolution of Greenhouse Gas Emissions in Europe. *Workshop on “Temporal and Spatial Resolution of Greenhouse Gas Emissions in Europe,”* 49(Generic), 6119.

- Glick, B. R.** (2010). Using soil bacteria to facilitate phytoremediation. *Biotechnology Advances*, 28(3), 367–374.
- González-Martín, J., Kraakman, N. J. R., Pérez, C., Lebrero, R., & Muñoz, R.** (2021). A state-of-the-art review on indoor air pollution and strategies for indoor air pollution control. *Chemosphere*, 262, 128376.
- Gref, A., Merid, S. K., Gruzieva, O., Ballereau, S., Becker, A., Bellander, T., Bergström, A., Bossé, Y., Bottai, M., & Chan-Yeung, M.** (2017). Genome-wide interaction analysis of air pollution exposure and childhood asthma with functional follow-up. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 195(10), 1373–1383.
- Grobelak, A.** (2016). Organic soil amendments in the phytoremediation process. *Phytoremediation: Management of Environmental Contaminants, Volume 4*, 21–39.
- Hamutoğlu, R., Dinçsoy, A. B., Cansaran-Duman, D., & Aras, S.** (2012). Biyosorpsiyon , adsorpsiyon ve fitoremediasyon yöntemleri ve uygulamaları. *Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi*, 69(4), 235–253.
- He, G., Pan, Y., & Tanaka, T.** (2020). The short-term impacts of COVID-19 lockdown on urban air pollution in China. *Nature Sustainability*, 3(12), 1005–1011.
- Heil, A.** (2007). *Indonesian forest and peat fires: emissions, air quality, and human health*. University of Hamburg Hamburg.
- İbadullayeva, J., Jumaniyazova, K., Azimzadeh, S., CANIGÜR, S., & Ferhan, E.** (2019). Çevre kirliliğinin insan sağlığı üzerindeki etkileri. *Türk Tıp Öğrencileri Araştırma Dergisi*, 1(3), 52–58.
- Jorio, H., Kiared, K., Brzezinski, R., Leroux, A., Viel, G., & Heitz, M.** (1998). Treatment of air polluted with high concentrations of toluene and xylene in a pilot-scale biofilter. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental AND Clean Technology*, 73(3), 183–196.
- Jyothylakshmi, K., Abraham, K. M., Nandakumar, S., & Kumar, M. G. S.** (2021). Aquatic insects, a tool for monitoring the health of riverine ecosystem, a case study of Killiyar, Thiruvananthapuram, Kerala, India. *Sustainability, Agri, Food and Environmental Research*, 9(4), 581–598.
- Kara, H.** (2007). Havada Bulunan Hidrojen Sülfür (H₂S) Ve Amonyak (NH₃) Kirliliğinin Biyolojik Olarak Giderimi. *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı (Yüksek Lisans Tezi)*, 34–40.
- Karasoy, A., & Demirtaş, G.** (2018). Sağlık harcamalarının belirleyicileri üzerine bir uygulama: çevre kirliliği ve yönetişimin etkilerinin incelenmesi. *İnsan ve Toplum Bilimleri Araştırmaları Dergisi*, 7(3), 1917–1939.
- Kayıkçıoğlu, H. H.** (2008). Toprak mikroorganizmaları tarafından üretilen küresel gazlar. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 45(1), 49–55.
- Kennes, C., & Veiga, M. C.** (2013). Introduction to Air Pollution. *Air Pollution Prevention and Control: Bioreactors and Bioenergy*, 1–18.

<https://doi.org/10.1002/9781118523360.ch1>

- Khalid, K. M.** (2021). Correlation between Air Quality and Wastewater Pollution. In *Environmental Sustainability-Preparing for Tomorrow*. IntechOpen.
- Küçükçongar, S., & Sevil, A.** (2020). Atıksu Arıtma Tesisinde Çözünmüş Organik Azotun Biyolojik Parçalanabilirliğinin İncelenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 32(2), 303–312.
- Lawrence, E. O.** (2008). Berkeley National Laboratory. *How Silica Aerogels Are Made*, in <Http://Eande.Lbl.Gov/ECS/Aerogels/Saprep.Htm>, 8168(510), 1–51.
- Lee, B. X. Y., Hadibarata, T., & Yuniarto, A.** (2020). Phytoremediation Mechanisms in Air Pollution Control: a Review. *Water, Air, and Soil Pollution*, 231(8), 437. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04813-6>
- Lee, H., Jun, Z., & Zahra, Z.** (2021). Phytoremediation: the sustainable strategy for improving indoor and outdoor air quality. *Environments*, 8(11), 118.
- Leson, G., & Winer, A. M.** (1991). Biofiltration: an innovative air pollution control technology for VOC emissions. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 41(8), 1045–1054.
- Li, J.** (2019). *Anthropogenic and natural nitrogen oxides emissions over the United States: Comprehensive evaluations and implications for surface ozone prediction*. (Doctoral Thesis). Georgia Institute of Technology.
- Lowen, R. S., Colten, C. E., & Skinner, P. N.** (1997). The Road to Love Canal: Managing Industrial Waste before EPA. In *Technology and Culture* (Vol. 38, Issue 1). University of Texas Press. <https://doi.org/10.2307/3106811>
- Luciene, C. M., Rezende, H. C., Coelho, L. M., De Sousa, P. A., Melo, D. F., & Coelho, N. M.** (2015). Bioremediation of Polluted Waters Using Microorganisms. *Advances in Bioremediation of Wastewater and Polluted Soil*, 10(10.5772), 60770.
- Luo, Y., Qiao, L., Wang, H., Lan, S., Shen, Y., Lin, Y., & Nan, C.** (2018). Bismuth Oxysulfide and Its Polymer Nanocomposites for Efficient Purification. *Materials*, 11(3), 447.
- Maduna, K., & Tomašić, V.** (2018). Air pollution engineering. *Environmental Engineering: Basic Principles*, 2(12), 195–240. <https://doi.org/10.1515/9783110468038-007>
- Malhautier, L., Khammar, N., Bayle, S., & Fanlo, J.-L.** (2005). Biofiltration of volatile organic compounds. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 68, 16–22.
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E.** (2020). Environmental and health impacts of air pollution: a review. *Frontiers in Public Health*, 8, 505570.
- Marra, F., Sottili, G., Gaeta, M., Giaccio, B., Jicha, B., Masotta, M., Palladino, D. M., & Deocampo, D. M.** (2014). Major explosive activity in the Monti Sabatini Volcanic District (central Italy) over the 800-390ka interval: Geochronological-geochemical overview and tephrostratigraphic

- implications. *Quaternary Science Reviews*, 94, 74–101. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.04.010>
- Marycz, M., Brillowska-Dąbrowska, A., Muñoz, R., & Gębicki, J. (2022).** A state of the art review on the use of fungi in biofiltration to remove volatile hydrophobic pollutants. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 21(1), 225–246.
- Matsubara, M., Lynch, J. M., & De Leij, F. (2006).** A simple screening procedure for selecting fungi with potential for use in the bioremediation of contaminated land. *Enzyme and Microbial Technology*, 39(7), 1365–1372.
- Mcllvaine, R. (2012).** Adsorption and absorption: air-pollution control applications are poised to demand about \$12.6 billion of adsorbent and absorbent products in 2012. *Chemical Engineering*, 119(5), 20–23.
- Meng, Y., Liu, L., & Ran, Q. (2022).** Does environmentally biased technological progress reduce air pollution emissions? empirical analysis based on spatial model and PSTR model. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 996349.
- Menteşe, S. (2017).** Çevresel Sürdürülebilirlik Açısından Toprak, Su Ve Hava Kirliliği:Teorik Bir İnceleme. *Journal of International Social Research*, 10(53), 381–389. <https://doi.org/10.17719/jisr.20175334127>
- Menteşe, S., & Çotuker, O. (2021).** Partikül Madde, Karbon Monoksit Ve Karbondioksit Seviyelerinin İç Ve Dış Ortamlarda Değişimi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 9(3), 723–734.
- Mohamad, J. (2023).** *Gelişmiş sabit biyofilm aktif çamur prosesi ile karbon, azot ve fosfor gideriminin araştırılması.* (Master's thesis). Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Mohamed, E. F., & Awad, G. (2022).** Biological processes for air pollution control. In *Hybrid and Combined Processes for Air Pollution Control: Methodologies, Mechanisms and Effect of Key Parameters* (pp. 153–166). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88449-5.00002-4>
- Mokarram, M., Taripanah, F., & Pham, T. M. (2023).** Investigating the effect of surface urban heat island on the trend of temperature changes. *Advances in Space Research*, 72(8), 3150–3169. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.06.048>
- Molina, L. T., & Molina, M. J. (2004).** Improving air quality in megacities: Mexico City case study. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1023(1), 142–158.
- Morcalı, M. H., & Akan, D. S. (2017).** Kahramanmaraş hava kirliliği kaynaklarının izlenmesi ve belirlenmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(2), 105–115.
- Morgan, M. I., Hine, D. W., Bhullar, N., & Loi, N. M. (2015).** Landholder adoption of low emission agricultural practices: A profiling approach. *Journal of Environmental Psychology*, 41, 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2014.11.004>
- Myeong, S., & Shahzad, K. (2021).** Integrating data-based strategies and advanced

technologies with efficient air pollution management in smart cities. *Sustainability* (Switzerland), 13(13), 7168. <https://doi.org/10.3390/su13137168>

- Nan, X., Lavrnić, S., Mancuso, G., & Toscano, A.** (2023). Effects of design and operational conditions on the performance of constructed wetlands for agricultural pollution control—critical review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(7), 434.
- Neshuku, M. N.** (2012). *Comparison of the performance of two atmospheric dispersion models (AERMOD and ADMS) for open pit mining sources of air pollution*. University of Pretoria (South Africa).
- Nowak, D. J., Hirabayashi, S., Bodine, A., & Hoehn, R.** (2013). Modeled PM_{2.5} removal by trees in ten U.S. cities and associated health effects. *Environmental Pollution*, 178, 395–402. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.03.050>
- Nzui, C. K.** (2014). Information and communication technology and knowledge management at world agroforestry center (ICRAF) in Kenya. *Doctoral Dissertation, University of Nairobi, November*.
- Özbolat, G., & Tuli, A.** (2016). Ağır Metal Toksikitesinin İnsan Sağlığına Etkileri. *Arşiv Kaynak Tarama Dergisi*, 25(23783), 502–521. <https://doi.org/10.17827/aktd.253562>
- Özdemir, F.** (2008). *Türkiye genelinde kükürt dioksit ve partiküler madde kirlilik dağılımlarının analizi* (p. 146). Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Palmiste, Ü., Kurnitski, J., & Voll, H.** (2020). Design criteria for outdoor air intakes and exhaust air outlets located on an external wall. *E3S Web of Conferences*, 172, 9008.
- Pettit, T., Irga, P. J., & Torpy, F. R.** (2018). Towards practical indoor air phytoremediation: a review. *Chemosphere*, 208, 960–974.
- Polivka, B. J.** (2018). The Great London Smog of 1952. *American Journal of Nursing*, 118(4), 57–61. <https://doi.org/10.1097/01.NAJ.0000532078.72372.c3>
- Preble, C. V., Chen, S. S., Hotchi, T., Sohn, M. D., Maddalena, R. L., Russell, M. L., Brown, N. J., Scown, C. D., & Kirchstetter, T. W.** (2020). Air pollutant emission rates for dry anaerobic digestion and composting of organic municipal solid waste. *Environmental Science & Technology*, 54(24), 16097–16107.
- Qarani, A. S.** (2020). Potential impact of COVID-19 pandemic lockdown on environmental parameters. *Recycling and Sustainable Development*, 13(1), 49–61.
- Radu, V. M., Ionescu, P., Diacu, E., & Ivanov, A. A.** (2017). *Removal of Heavy Metals from Aquatic Environments Using Water Hyacinth and Water Lettuce*. *Rev. Chim.*, 68, 2765–2767.
- Rajesh, S., & Kumawat, A. S.** (2023). Opportunities for microbial fuel cells to utilize post-harvest agricultural residues. *Ionics*, 29(11), 4417–4435.
- Rascio, N., & Navari-Izzo, F.** (2011). Heavy metal hyperaccumulating plants: how and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant*

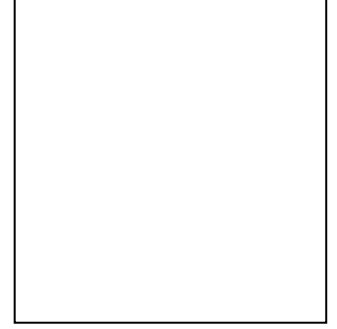
Science, 180(2), 169–181.

- Ravichandran, P., Balaji, K., & Karthik, C.** (2018). Biodegradability studies on pulp and paper mill wastewater: a review. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 6(4), 1956–1965.
- Rawat, K. S., & Kumar, R.** (2023). Insight into the novel low cost green air pollution monitoring and control systems: A technological solution from concept to market. *Journal of Cleaner Production*, 427, 139218.
- Saravanan, A., Kumar, P. S., Srinivasan, S., Jeevanantham, S., Kamalesh, R., & Karishma, S.** (2022). Sustainable strategy on microbial fuel cell to treat the wastewater for the production of green energy. *Chemosphere*, 290, 133295.
- Schneider, T.** (2010). NASA Engineering Design Challenges: Environmental Control and Life Support Systems. Water Filtration Challenge. EG-2008-09-134-MSFC. *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*.
- Seven, T., Can, B., Darende, B. N., & Ocak, S.** (2018). Hava ve Toprakta Ağır Metal Kirliliği Heavy Metals Pollution in Air and Soil. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi, Sayı, 1(2)*, 91–103.
- Shareefdeen, Z., & Singh, A.** (2005). Biotechnology for odor and air pollution control. In *Biotechnology for Odor and Air Pollution Control*. Springer Berlin Heidelberg, Newyork. <https://doi.org/10.1007/b138434>
- Sheoran, K., Siwal, S. S., Kapoor, D., Singh, N., Saini, A. K., Alsanie, W. F., & Thakur, V. K.** (2022). Air pollutants removal using biofiltration technique: a challenge at the frontiers of sustainable environment. *ACS Engineering Au*, 2(5), 378–396.
- Shihab, M. S., Mhemid, R. K. S., Saeed, L. I., Ismail, H. H., & Alp, K.** (2022). Reducing volatile organic compound emissions using biotrickling filters and bioscrubber systems. *Journal of Ecological Engineering*, 23(10).
- Son, G. Y., & Kim, J. G.** (2020). Assessing removal effects on particulate matters using artificial wetland modules. *Journal of Wetlands Research*, 22(1), 24–30.
- Stern, A. C., & Professor, E.** (1982). History of air pollution legislation in the United States. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 32(1), 44–61.
- Suresh, A., & Benor, S.** (2020). Microalgae-based biomass production for control of air pollutants. In *From biofiltration to promising options in gaseous fluxes biotreatment* (pp. 345–372). Elsevier.
- Teiri, H., Hajizadeh, Y., & Azhdarpoor, A.** (2021). A review of different phytoremediation methods and critical factors for purification of common indoor air pollutants: an approach with sensitive analysis. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 1–19.
- Thomas, S. A., Aston, L. M., Woodruff, D. L., & Cullinan, V. I.** (2009). Field demonstration of mycoremediation for removal of fecal coliform bacteria and nutrients in the Dungeness watershed, Washington. Final Report. *Pacific Northwest National Laboratory. PNWD-4054-1*.

- Thummadetsak, T., Wuttimongkolchai, A., Tunyapisetsak, S., & Kimura, T.** (1999). Effect of gasoline compositions and properties on tailpipe emissions of currently existing vehicles in Thailand. In *SAE Technical Papers*. SAE Technical Paper. <https://doi.org/10.4271/1999-01-3570>
- Torpy, F. R., Pettit, T., & Irga, P.** (2018). Applied horticultural biotechnology for the mitigation of indoor air pollution. *Journal of People, Plants, and Environment*.
- Tran, V. Van, Park, D., & Lee, Y.-C.** (2020). Indoor air pollution, related human diseases, and recent trends in the control and improvement of indoor air quality. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(8), 2927.
- Tripathy, A., More, R. D., Gupta, S., Samuel, J., Singh, J., & Prasad, R.** (2021). Present and future prospect of algae: A potential candidate for sustainable pollution mitigation. *The Open Biotechnology Journal*, *15*(1).
- Tsai, W. T.** (2019). An overview of health hazards of volatile organic compounds regulated as indoor air pollutants. *Reviews on Environmental Health*, *34*(1), 81–89. <https://doi.org/10.1515/reveh-2018-0046>
- Vinayak, V., Khan, M. J., Varjani, S., Saratale, G. D., Saratale, R. G., & Bhatia, S. K.** (2021). Microbial fuel cells for remediation of environmental pollutants and value addition: special focus on coupling diatom microbial fuel cells with photocatalytic and photoelectric fuel cells. *Journal of Biotechnology*, *338*, 5–19.
- Waqas, M., Hashim, S., Wannasingha Humphries, U., Ahmad, S., Noor, R., Shoaib, M., Naseem, A., Hlaing, P. T., & Lin, H. A.** (2023). *Composting Processes for Agricultural Waste Management: A Comprehensive Review, Processes*, *11*(3), 731.
- Weber, B., Wu, D., Tamm, A., Ruckteschler, N., Rodríguez-Caballero, E., Steinkamp, J., Meusel, H., Elbert, W., Behrendt, T., & Sörgel, M.** (2015). Biological soil crusts accelerate the nitrogen cycle through large NO and HONO emissions in drylands. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *112*(50), 15384–15389.
- Wei, J., Li, Z., Li, K., Dickerson, R. R., Pinker, R. T., Wang, J., Liu, X., Sun, L., Xue, W., & Cribb, M.** (2022). Full-coverage mapping and spatiotemporal variations of ground-level ozone (O₃) pollution from 2013 to 2020 across China. *Remote Sensing of Environment*, *270*, 112775. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112775>
- Wei, W., Zhang, W., Hu, D., Ou, L., Tong, Y., Shen, G., Shen, H., & Wang, X.** (2012). Emissions of carbon monoxide and carbon dioxide from uncompressed and pelletized biomass fuel burning in typical household stoves in China. *Atmospheric Environment*, *56*, 136–142. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.03.060>
- Wei, X., Lyu, S., Yu, Y., Wang, Z., Liu, H., Pan, D., & Chen, J.** (2017). Phylloremediation of air pollutants: Exploiting the potential of plant leaves and leaf-associated microbes. *Frontiers in Plant Science*, *8*, 270745. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01318>

- Wei, X., XiangYing, W., Lyu ShiHeng, L. S., Yu Ying, Y. Y., Wang ZongHua, W. Z., Liu Hong, L. H., Pan DongMing, P. D., & Chen JianJun, C. J.** (2017). Phylloremediation of air pollutants: exploiting the potential of plant leaves and leaf-associated microbes. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1318.
- Wu, X., & Gao, M.** (2021). Effects of different environmental regulations and their heterogeneity on air pollution control in China. *Journal of Regulatory Economics*, 60(2–3), 140–166. <https://doi.org/10.1007/s11149-021-09436-1>
- Xie, Y., Zhao, L., Xue, J., Gao, H. O., Li, H., Jiang, R., Qiu, X., & Zhang, S.** (2018). Methods for defining the scopes and priorities for joint prevention and control of air pollution regions based on data-mining technologies. *Journal of Cleaner Production*, 185, 912–921. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.101>
- Xie, Z., Li, Y., Lu, R., Li, W., Fan, C., Liu, P., Wang, J., & Wang, W.** (2018). Characteristics of total airborne microbes at various air quality levels. *Journal of Aerosol Science*, 116, 57–65.
- Yadav, P., Rai, S. N., Mishra, V., & Singh, M. P.** (2021). Mycoremediation of environmental pollutants: A review with special emphasis on mushrooms. *Environmental Sustainability*, 1–14.
- Yakimov, M. M., Timmis, K. N., & Golyshin, P. N.** (2007). Obligate oil-degrading marine bacteria. *Current Opinion in Biotechnology*, 18(3), 257–266.
- Yang, C., Qian, H., Li, X., Cheng, Y., He, H., Zeng, G., & Xi, J.** (2018). Simultaneous removal of multicomponent VOCs in biofilters. *Trends in Biotechnology*, 36(7), 673–685.
- Yang, X.** (2020). “16th International Phytotechnology Conference. Phytotechnologies for Food Safety and Environmental Health” Changsha, China, September 23–27, 2019. *International Journal of Phytoremediation*, 22(9), 896–899.
- Yapatne, S., Doherty, Z. E., Magdaleno, A. L., Matula, E. E., MacRae, J. D., Garcia-Segura, S., & Apul, O. G.** (2022). Effect of air nanobubbles on oxygen transfer, oxygen uptake, and diversity of aerobic microbial consortium in activated sludge reactors. *Bioresource Technology*, 351, 127090.
- Zencirci, S. A., & Işıklı, B.** (2017). Hava kirliliği. *ESTÜDAM Halk Sağlığı Dergisi*, 2(2), 24–36.
- Zhang, L., Wang, L., Liu, B., Tang, G., Liu, B., Li, X., Sun, Y., Li, M., Chen, X., Wang, Y., & Hu, B.** (2023). Contrasting effects of clean air actions on surface ozone concentrations in different regions over Beijing from May to September 2013–2020. *Science of the Total Environment*, 903, 166182. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166182>
- Zincircioğlu, N.** (2013). Manisa-Akhisar Yöresinde Bulunan Kimi Tarım Arazilerinin Ağır Metal İçeriklerinin Araştırılması. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 50(3), 333–339.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Basir Ahmad HAMİDY

Doğum Tarihi ve Yeri :

E-posta :

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2018, Rabia Balkhy University, Civil Engineering, Civil

DİĞER ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Hamidy, B. A.** (2024). Hava Kirliliğinin Kontrolünde Biyolojik Prosesler. *Akdeniz 11th International Conference On Applied Sciences - February 23 - 25, 2024 Mersin ISBN NO. 978-625-6830-86-8, 28.*