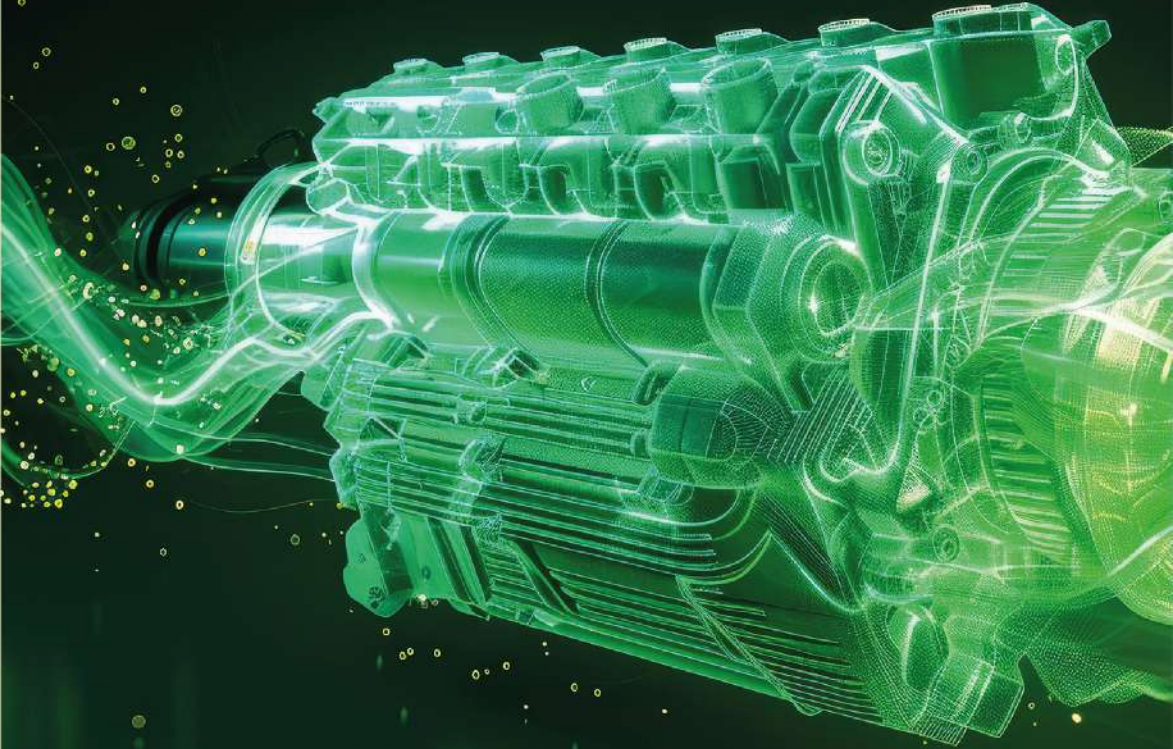


Yeşil Kimya ve Plastik Yakıtlar: İçten Yanmalı Motorlarda Etki, Verimlilik ve Optimizasyon

Editör: Sedat Şen



Yeşil Kimya ve Plastik Yakıtlar: İçten Yanmalı Motorlarda Etki, Verimlilik ve Optimizasyon

Editör:

Sedat Şen



Published by

Özgür Yayın-Dağıtım Co. Ltd.

Certificate Number: 45503

📍 15 Temmuz Mah. 148136. Sk. No: 9 Şhitkamil/Gaziantep

☎ +90.850 260 09 97

📞 +90.532 289 82 15

🌐 www.ozgurayinlari.com

✉ info@ozgurayinlari.com

Yeşil Kimya ve Plastik Yakıtlar:

İçten Yanmalı Motorlarda Etki, Verimlilik ve Optimizasyon

Editor: Sedat Şen

Language: Turkish

Publication Date: 2025

Cover design by Mehmet Çakır

Cover design and image licensed under CC BY-NC 4.0

Print and digital versions typeset by Çizgi Medya Co. Ltd.

ISBN (PDF): 978-625-5646-69-9

DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub817>



This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0). To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>. This license allows for copying any part of the work for personal use, not commercial use, providing author attribution is clearly stated.

Suggested citation:

Şen, S. (ed) (2025). *Yeşil Kimya ve Plastik Yakıtlar: İçten Yanmalı Motorlarda Etki, Verimlilik ve Optimizasyon*.

Özgür Publications. DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub817>. License: CC-BY-NC 4.0

The full text of this book has been peer-reviewed to ensure high academic standards. For full review policies, see <https://www.ozgurayinlari.com/>



Ön Söz

Bu kitap, yeşil kimya prensipleriyle atık plastikten üretilen yakıtların içten yanmalı motorlarda (İYM) mühendislik uygulamalarını, performansını ve çevresel etkilerini incelemektedir. Plastik yakıtların piroliz ve katalitik süreçlerle üretimi, İYM'lerdeki yanma verimliliği ve optimizasyon stratejileri detaylı bir şekilde ele alınmaktadır. Emisyonlar (PM2.5, NOx) ve su kirliliği gibi çevresel etkiler, mühendislik çözümleriyle (düşük emisyonlu katalizörler, atık yönetimi) değerlendirilmektedir. Ayrıca, plastik yakıtların spor ve iş güvenliği üzerindeki etkileri, biyofiziksel analizlerle genç sporcular ve çalışanlar özelinde incelenerek çevre dostu yakıt teknolojileri önerilmektedir. Mühendislik, çevre bilimi ve sürdürülebilir enerji entegrasyonu ile, kitap plastik yakıtların geleceğini şekillendirmeyi hedeflemektedir.

İçindekiler

Ön Söz

iii

Bölüm 1

Enerji ve Ulaşımında Yeni Yakıt Arayışları: İçten Yanmalı Motorlarda Polietilen Türevli Yakıtların Testleri ve Optimizasyonu 1

Sedat Şen

Bölüm 2

Yeşil Dönüşüm Sürecinde Atık Plastik Yakıtlarının Rolü ve Potansiyeli 15

Yakup Budak

Sedat Şen

Bölüm 3

Laboratuvar Güvenliği: Plastik Yakıt Araştırmalarında Organik Kimya Uygulamaları 33

Mustafa Ceylan

Bölüm 4

Plastik Yakıtların Çevresel ve Sağlık Etkileri: Spor ve İş Güvenliği için Optimizasyon Çözümleri 63

Fatih Yaşar

Necip Zeki Budak

Bölüm 5

Yüzme Eğitimi ve Antrenörlüğü için Ekolojik Havuz Sistemleri: Genç Sporcular için Mikroplastik ve Kimyasal Risklere Sürdürülebilir Çözümler 85

Necip Zeki Budak

Recep Bozdemir

Yakup Budak

Enerji ve Ulaşım da Yeni Yakıt Arayışları: İçten Yanmalı Motorlarda Polietilen Türevli Yakıtların Testleri ve Optimizasyonu

Sedat Şen¹

Özet

Yirmi birinci yüzyılın karşı karşıya olduğu en önemli iki küresel sorun, sürdürülebilir enerji kaynaklarına duyulan artan ihtiyaç ile giderek derinleşen atık yönetimi krizidir. Fosil yakıt kullanımına olan yüksek bağımlılık, başta iklim değişikliği ve çevresel bozulmalar olmak üzere çeşitli ekolojik sorunlara yol açmaktadır. Eş zamanlı olarak, özellikle tek kullanımlık plastiklerin yaygınlaşmasıyla birlikte, dünya genelinde devasa boyutlara ulaşan plastik atık yığınları, ekosistemler için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Bu iki sorunun kesişim noktasında, yeşil kimya ve döngüsel ekonomi prensipleriyle uyumlu, yenilikçi çözümler ortaya çıkmaktadır. Atık plastiklerin kimyasal geri dönüşüm yöntemleriyle sıvı yakıtlara dönüştürülmesi, bu çözümlerin en umut verici olanlarından biridir. Bu bölümde, polietilen atıklarından piroliz yöntemiyle elde edilen sıvı yakıtların içten yanmalı motorlarda kullanımı kapsamlı bir şekilde incelenmektedir. Polietilen türevli yakıtların fizikokimyasal özellikleri, motor performansı ve emisyon karakteristikleri üzerindeki etkileri güncel literatür ışığında analiz edilmiş ve bu yakıtların kullanımını daha verimli ve çevre dostu hale getirmek için uygulanan optimizasyon çalışmalarından bahsedilmiştir. Çalışmalar bu yakıtların ısı değerlerine bağlı olarak, motorun özgül yakıt tüketimi ile fren efektif verimi üzerinde olumlu ya da olumsuz değişimler gözlemlenebileceğini, özellikle is emisyonlarını azaltma potansiyeline sahip olduğunu diğer zararlı emisyonların ise polietilen türüne göre farklılıklar oluşturabileceğini göstermektedir. Bu yakıtların kullanımı ile oluşabilecek dezavantajları ortadan kaldırmak ve motorun verimli, ekonomik ve çevre dostu çalışmasını sağlamak için motor parametrelerinin optimize edilmesi büyük önem taşımaktadır. Optimizasyon çalışmaları ile yakıt tüketimi minimuma indirilirken efektif verim maksimuma, kirlenici emisyonlar ise minimuma indirilebilmektedir.

1 Dr., Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri, Makine, Tokat, 60200, Türkiye, sedat.sen@gop.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-7575-6927>

1. Giriş

Plastikler petrokimyasallardan elde edilen ve diğer kimyasallar ile birleştirilen monomerlerin polimerizasyonu ile geliştirilen sentetik malzemelerdir. Dünyada yıllık plastik üretimi 359 milyon tonun üzerindedir [1]. Üretilen bu miktarın 218 milyon tonu atık haline gelmekte iken sadece %15 kadarı geri dönüştürülebilmekte yaklaşık % 40 kadarı çeşitli yollar ile çevreye karışmaktadır [2]. Bu devasa atık miktarı, okyanuslar, toprak ve hava için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Piroliz yöntemi, mekanik geri dönüşüme uygun olmayan veya kontamine olmuş plastik atıkların değerlendirilmesinde özellikle etkilidir. Geleneksel geri dönüşüm yöntemlerine kıyasla piroliz, plastik atıkların kimyasal yapısını tamamen değiştirerek yüksek değerli ürünlere dönüştürebilmesi, daha az ön işlem gerektirmesi ve çeşitli plastik türlerini işleyebilmesi açısından önemli avantajlar sunmaktadır [3].

Polietilen (PE), dünya plastik üretiminin büyük bir bölümünü oluşturan en yaygın polimer türüdür ve bu nedenle atık akışında önemli bir yer tutar. PE atıklarının termokimyasal bir süreç olan piroliz yoluyla sıvı hidrokarbonlara dönüştürülmesi hem atık yönetimine katkı sağlayan hem de konvansiyonel dizel yakıtı alternatif olabilecek bir yakıt kaynağı yaratan bir stratejidir. Elde edilen bu pirolitik yağ, içten yanmalı motorlarda (İYM), özellikle de sıkıştırma ile ateşlemeli (dizel) motorlarda kullanıma potansiyeline sahiptir [4]. Plastik atıklar, yüksek oranda karbon ve hidrojen içeriği nedeniyle piroliz yoluyla sıvı yakıt üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Polietilen bazlı yakıtlar, atık plastiğin geri dönüşümü ve enerji sürdürülebilirliği açısından önemli bir potansiyele sahiptir [5]. İYM'lerde yapılan testler, bu yakıtların termal verimlilik ve emisyon azaltımı açısından avantajlar sunabildiğini göstermektedir. Ayrıca çalışmalarda optimizasyon yapılarak giriş parametrelerini optimize etmek motor performansı maksimuma çıkarırken tüm emisyonları minimize etme noktasında faydalı model olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu bölümün amacı, polietilen atıklarından piroliz yöntemiyle elde edilen sıvı yakıtların (PE-türevli yakıt) içten yanmalı motorlardaki kullanımını kapsamlı bir şekilde incelemektir. Bu bağlamda, PE-türevli yakıtların temel özellikleri, motor performansı ve emisyon karakteristikleri üzerindeki etkileri güncel literatür ışığında analiz edilecek ve bu yakıtların kullanımını daha verimli ve çevre dostu hale getirmek için uygulanan optimizasyon çalışmaları ile detaylandırılacaktır.

2. Polietilen Atıklarından Pirolitik Yakıt Üretimi ve Yakıt Özellikleri

2.1. Piroliz Yöntemi ve Proses Parametreleri

Atık plastiklerden yakıt üretimi için en yaygın kullanılan termokimyasal yöntem pirolizdir. Piroliz, oksijensiz veya oksijençe fakir bir ortamda, yüksek sıcaklıklar (genellikle 400-600°C) uygulanarak polimer zincirlerinin termal olarak parçalanması sürecidir [6,7]. Polietilenin pirolizi sonucunda üç ana ürün fraksiyonu elde edilir: sıvı (pirolitik yağ), gaz ve katı (karbon siyahı veya char). Sıvı ürün, benzin ve dizel yakıt aralığındaki hidrokarbonların karmaşık bir karışımıdır ve bu bölümün odak noktasını oluşturur. Piroliz prosesinin verimliliği ve elde edilen ürünlerin özellikleri, sıcaklık, ısıtma hızı, reaktör tipi ve katalizör kullanımı gibi çeşitli parametrelere bağlıdır. Düşük sıcaklıklarda (350-450°C) gerçekleştirilen piroliz, daha yüksek oranda sıvı ürün oluşumunu teşvik ederken, yüksek sıcaklıklar (>500°C) gaz ürün verimini artırır [8]. Katalitik piroliz, zeolitler, alümina veya silika-alümina gibi katalizörlerin kullanımıyla gerçekleştirilir ve daha yüksek kalitede sıvı ürün elde edilmesini sağlar [9].

2.2. PE-Türevli Yakıtların Fizikokimyasal Özellikleri ve Kimyasal Kompozisyonu

PE-türevli pirolitik yağın bir motorda yakıt olarak kullanılabilirliği, fizikokimyasal özelliklerine doğrudan bağlıdır. Bu özellikler, standart dizel yakıt ile karşılaştırıldığında önemli farklılıklar gösterebilir [3,4]. PE-türevli yakıtların yoğunluğu (780-820 kg/m³) standart dizel yakıtı (820-845 kg/m³) göre daha düşüktür, bu da birim hacimde daha az enerji içeriği anlamına gelmektedir. Son yıllarda yapılan detaylı kimyasal analizler, PE-türevli yakıtların kompozisyonunu daha iyi anlamamızı sağlamıştır. (PE) temelde karbon (C) ve hidrojenden (H) oluşan bir polimerdir. PE, polietilen ve polipropilen (PP) gibi poliolefinler arasında yer almaktadır. Chen ve arkadaşları (2024), çalışmalarında kullandıkları PE'nin elemen içeriğini %80.3 Karbon (C), %12.82 Hidrojen (H), %6.88 Oksijen (O) olarak belirtmişlerdir [10]. Bu içerikler, yakıtın yanma özelliklerini doğrudan etkilemektedir. PE-türevli yakıtın en belirgin avantajları yüksek ısı değeri ve düşük kükürt içeriğidir. Ancak, standart dizele göre genellikle daha düşük olan setan sayısı ve viskozitesi, yine motorun yanma süreci ve emisyonları üzerinde doğrudan etkili olan parametrelerdendir [2,11].

Tablo 1: Standart Dizel Yakıt ve Tipik PE Türevli Piroлитik Yakıtların Bazı Özelliklerinin Karşılaştırılması [12].

	Standart Dizel (EN590)	HDPE	LDPE
Yoğunluk (kg/m³)	0,8-0,9	0,8-0,9	0,7-0,8
Setan Sayısı	46-52	31,05	-
Alt Isıl Değer (MJ/kg)	43	40,5	39,5

3. İçten Yanmalı Motorlarda Performans Yanma ve Emisyon Testleri

PE-türevli yakıtların dizel motorlardaki etkisini değerlendirmek için yapılan çalışmalar genellikle bu yakıtların saf dizel ile farklı oranlarda karıştırılması üzerine yoğunlaşmıştır. Bu bölümde motor performansı parametrelerinden fren özgül yakıt tüketimi ve fren efektif verim üzerinde durulmuştur.

3.1. Motor Performansı

Fren Özgül Yakıt Tüketimi (FÖYT): Motor performansı genellikle fren efektif verimi ve fren özgül yakıt tüketimi ile ölçülebilmektedir. Literatürdeki çalışmalar, PE-türevli yakıt karışımlarının kullanımının motor performansı üzerinde değişken etkileri olduğunu göstermektedir.

Daha düşük bir özgül yakıt tüketimi değeri, motorun yakıtı daha verimli kullandığını göstermektedir. Birçok çalışma, PE-türevli yakıt karışımlarının özgül yakıt tüketiminin saf dizel yakıtına göre bir miktar arttığını rapor etmektedir. Bu duruma, yakıt karışımlarının daha düşük alt ısıl değerlerinin sebep olduğu düşünülmektedir. Daha düşük ısıl değere sahip olan test yakıtları ile yapılan çalışmalarda aynı efektif güce ulaşmak için yanma odasına daha fazla yakıt enjekte edilmek zorundadır.

Kumar ve arkadaşları (2013), yüksek yoğunluklu polietilen plastiklerden piroliz ile alternatif yakıt elde etmişlerdir. Elde ettikleri yakıtı farklı oranlarda dizel yakıtı ile karıştırarak değişken yüklere sahip 4 zamanlı direk enjeksiyonlu dizel motorda test etmişlerdir. Yakıt karışımlarındaki PE türevli yakıt konsantrasyonu arttıkça özgül yakıt tüketiminin arttığını bildirmişlerdir. Bu durum, PE türevli yakıtın dizelden daha düşük kalorifik değere sahip olmasından kaynaklanmaktadır, bu da motorun daha fazla yakıt tüketmesine neden olmaktadır [13]. Bir başka çalışmada Muthukumar ve Kasiraman (2024), düşük yoğunluklu polietilenden piroliz sonucu elde ettikleri yakıtın test edilen tüm yakıt karışımları arasında en yüksek FÖYT

değerine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu durumun nedeni olarak ise PE türevli yakıtın yine dizel yakıtla kıyasla düşük kalorifik değeri olduğunu belirtmişlerdir. Bu durum, yakıtın buharlaşmasını ve atomizasyonunu geciktirerek daha kötü bir yanmaya ve dolayısıyla daha fazla yakıt tüketimine yol açmaktadır [14].

Fren Efektif Verim (FEV): FEV, yakıtın kimyasal enerjisinin ne kadarının faydalı işe dönüştürüldüğünün bir ölçüsüdür. PE-türevli yakıtların ısı değerinin dizel yakıtına yakın olması nedeniyle, FEV değerleri genellikle saf dizelinkinden düşük olmakla birlikte yakın seviyelerdedir.

Panda ve arkadaşları (2016), Farklı karışım oranlarının motor performansına etkisi incelendiğinde, P10 (10% PE-türevli yakıt + 90%dizel) karışımının optimum performans sunduğu görülmektedir. Tam yük koşullarında yapılan testlerde, P10 karışımı ile fren ısı veriminde (BTE) sadece %0.2'lik bir düşüş gözlemlenirken, P20 ve P30 karışımlarında sırasıyla % 0.7 ve % 1.4'lük düşüşler kaydedilmiştir. Bu durum, düşük oranlı karışımların motor performansını önemli ölçüde etkilemeden kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca, orta yüklerde (50-75%) P10 karışımı, daha iyi atomizasyon sayesinde saf dizel yakıtla kıyasla %1-2 daha yüksek BTE değerleri sergileyebilmektedir [15]. Bir başka çalışmada Mani ve arkadaşları (2011), tek silindirli bir dizel motorda yaptıkları çalışmalarında tam yükte, PE türevli dizel yakıt karışımları ve saf PE türevli yakıtın fren termal verimliliğinin saf dizel yakıtından düşük olduğunu bildirmişlerdir. Tam yükte dizel yakıtı için %28 olan fren efektif verim, %100 PE türevli yakıt için %27.4'e düşerken %1.9'luk bir azalma gözlemlemişlerdir. Bu düşüşün, PE türevli yakıt karışımlarının toplam ısı salınımlarının dizel yakıtından daha az olması ve yine tam yükte daha yüksek egzoz gazı sıcaklıkları oluşumundan kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir [16].

3.2. Yanma Karakteristikleri

Silindir içindeki yanma sürecini etkileyen en önemli unsurlardan biri, silindir içi gaz basıncıdır. Silindir içi gaz basıncı yakıtın miktarı, setan sayısı, ısı değeri, viskozitesi, yoğunluğu, motorun yük durumu ve çalışma devri, ateşleme gecikmesi süresi ve yakıtın atomizasyon kalitesi gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Dizel motorlarda maksimum silindir basıncı ise, ani yanma sürecinin şiddeti, yanmış yakıt oranı ve yanma hızı gibi parametrelerden etkilenir. Tutuşma gecikmesi süresi, karışım oluşumunu doğrudan etkileyen yakıtın fizikokimyasal özelliklerinden etkilenmektedir. Özellikle setan sayısı, yoğunluk ve viskozite, tutuşma gecikmesi süresi üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. PE türevli yakıtlar, düşük setan sayısı ve yüksek hidrokarbon

içeriği nedeniyle tutuşma gecikmesi süresini artırmaktadır. Bu durum, silindir içinde daha fazla yakıtın birikmesine ve ardından hızlı yanmaya neden olmaktadır. Pumpuang ve arkadaşları (2024), Polietilen (PE) türlerinden, Yüksek Yoğunluklu Polietilenden elde edilen piroliz yakıtının dizel motorlarındaki yanma karakteristikleri incelenmiştir. HDPE ile çalışmada, dizel yakıtına kıyasla düşük setan indeksi nedeniyle tüm motor yükleri için dizel yakıtından daha düşük ısı salınımları ve silindir içi basınçları elde ettiklerini bildirmişlerdir [17]. Alrazen ve arkadaşları (2023), çalışmalarında düşük yoğunluklu polietilen karışımlarının saf dizel yakıtıya kıyasla dizel yakıtıya kıyasla daha düşük silindir içi basınçlar ve düşük yüklerde daha düşük ısı salınımları meydana getirdiğini bildirmişlerdir [18].

3.3. Emisyon Karakteristikleri

PE türevi yakıtların dizel motorlarındaki NO_x emisyonları üzerindeki etkileri, kullanılan plastik türüne ve motor çalışma koşullarına bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Genel olarak yapılan birçok çalışmada, dizel yakıtıya kıyasla daha yüksek NO_x emisyonları gözlemlenmiştir. Bunun temel nedeni, yakıtın düşük setan sayısının tutuşma gecikmesi periyodunu uzatmasıdır. Uzayan tutuşma gecikmesi, silindir içinde daha fazla yakıt-hava karışımının birikmesine ve ardından ani ve hızlı bir yanmaya neden olur. Bu durum, silindir içi sıcaklık ve basıncın hızla yükselmesine yol açar ki bu da termal NO_x oluşumu için ideal koşulları oluşturmaktadır.

Düşük yoğunluklu polietilen atıklarından elde edilen pirolitik yağ ile motorun çalıştırılması, dizele kıyasla en yüksek is emisyonuna yol açmaktadır. Bu durum, PE türevli yakıtın daha yüksek viskozitesi ve daha düşük uçuculuğu nedeniyle silindir içindeki karışım kalitesinin düşmesine ve yakıt tüketiminin artmasına bağlanmaktadır, bu da is oluşumunu artırmaktadır. Bununla birlikte, PE-türevli yakıt ile dizel yakıtın belirli oranlarda harmanlandığı bazı çalışmalarda farklı sonuçlar da elde edilmiştir. Örneğin, %70 dizel ve %30 PE-türevli yakıt içeren bir karışım kullanıldığında, saf dizele kıyasla daha düşük is emisyonu gözlemlenmiştir. Bu durum, karışım oranlarının ve yakıt özelliklerinin is emisyonları üzerindeki çok boyutlu ve karmaşık etkileşimini göstermektedir [19].

PE türevi yakıtlar, dizel yakıtla kıyaslandığında genellikle daha yüksek HC emisyonlarına neden olur; bu durum, yakıtın yüksek viskozitesi ve yetersiz atomizasyonundan kaynaklanan zayıf hava-yakıt karışımından ileri gelmektedir. Hem Yüksek Yoğunluklu Polietilen piroliz yağı karışımlarında hem de Düşük Yoğunluklu Polietilen piroliz yağı kullanımında, yakıt karışım oranı arttıkça HC ve CO emisyonları yükselme eğilimindedir. Ancak bazı

çalışmalarda CO emisyonları dizele nazaran PE türevli yakıtlarda daha düşük seyredebilir karışım oranı arttıkça, daha yüksek uçuculuk ve daha düşük viskozite nedeniyle ve de yakıt atomizasyonu ve buharlaşmasının artması CO emisyonunun azalmasına sebep olabilmektedir [1].

Chaitanya ve arkadaşları (2022) tarafından yapılan çalışmada, P10 ve P20 karışımları için CO emisyonlarında %5-10 azalma gözlemlenirken, P30 karışımı için düşük yüklerde %3-5 artış rapor edilmiştir. Araştırmacılar, yüksek karışım oranlarında ve düşük yüklerde yanma verimliliğinin düşebileceğini ve bunun emisyon değerlerini olumsuz etkileyebileceğini belirtmişlerdir [20]. Tablo 2. de polietilenden elde edilen yakıtların dizel yakıtına kıyasla performans, yanma ve emisyon karakteristikleri belirtilmiştir.

Tablo2. Polietilenden Elde Edilen Yakıtların Dizel Yakıtına Kıyasla Performans, Yanma ve Emisyon Karakteristikleri

Referanslar	Motor Tipi	Motor Performansı		Yanma Karakteristikleri		Emisyon				
		FEV	FÖYT	Silindir İçi Gaz Basıncı	Isı Açığa Çıkış Oranı	İs	NO _x	CO	HC	
21	4 zamanlı, Tek silindirli, su soğutmalı, doğal emişli, 3,7 kW 1500 dev/dak	↓	↑	—	—	↑	↑	↑	↑	HDPE
22	4 zamanlı, Tek silindirli, su soğutmalı, doğal emişli, 3,7 kW 1500 dev/dak	↓	—	↑	↑	↑	↑	↑	↑	HDPE
23	4 zamanlı, 1 silindirli, su soğutmalı, doğal emişli, 4,4 kW	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓	HDPE
24	4 zamanlı, Tek silindirli, su soğutmalı, doğal emişli, 3,7 kW 3000 dev/dak	↓	↑	↓	—	—	↓	↑	↑	LDPE
25	4 zamanlı, 4 silindirli, DI, su soğutmalı, doğal emişli, 68 kW 1500 rpm	↓	↓	↓	—	—	↓	↑	↑	LDPE
26	4 zamanlı, Tek silindirli, su soğutmalı, doğal emişli, 3,7 kW 3000 dev/dak	↓	↑	↓	—	↑	↓	↑	↑	LDPE

4. Optimizasyon Çalışmaları

İçten yanmalı motorlarda optimizasyon yapılması, motorun verimliliğini artırmak, yakıt tüketimini azaltmak ve zararlı emisyonları minimuma indirmek için gereklidir. Optimizasyon sayesinde hem performans hem de çevreye olan olumsuz etkiler aynı anda iyileştirilebilir. Doğru optimizasyon, motorun ömrünü uzatır ve yasal emisyon sınırlarına uyumu kolaylaştırır. Sonuç olarak, optimizasyon hem ekonomik hem de çevresel açıdan büyük avantajlar sağlamaktadır.

Deneysel çalışmalarda, daha çok sıkıştırma oranı, enjektör basıncı, motor yükü, karışım oranı gibi parametrelerin etkisi, çeşitli optimizasyon teknikleriyle analiz edilmektedir. Bu teknikler sayesinde, farklı parametrelerin motor performansı ve emisyonlar üzerindeki etkisi nicel olarak belirlenebilmekte ve ideal çalışma şartları elde edilebilmektedir.

Polietilen türevi yakıtlarda yapılan çalışmalarda optimizasyon çalışmaları oldukça sınırlıdır. Kumar ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada, yüksek yoğunluklu polietilenden elde edilen piroliz yağı yüzdesinin, Al_2O_3 nanopartikül (NP) konsantrasyonunun, sıkıştırma oranının (SO) ve enjeksiyon zamanlamasının dizel motorlarda yanma, performans ve emisyon üzerindeki etkilerinin optimizasyonu amacıyla optimizasyon çalışması yapılmıştır. Dencyler; %0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında plastik piroliz yağı; 0, 25, 50, 75 ve 100 ppm Al_2O_3 ilavesi; 16, 17, 18, 19 ve 20 sıkıştırma oranı ile 17°, 19°, 21°, 23° ve 25° enjeksiyon avansları kullanılarak %80 motor yükü altında gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon çalışması sonucunda, 18,06 sıkıştırma oranı, %16,56 PPY, 53,53 ppm Al_2O_3 ve 20,95° enjeksiyon avansı, optimum çalışma koşulları olarak belirlenmiştir. Bu optimum koşullar altında, FEV, ısı açığa çıkış oranı, silindir içi gaz basıncı, FÖYT, karbon monoksit (CO), azot oksit (NO_x) ve hidrokarbon (HC) emisyonu gibi yanıtların R^2 değerlerinin %95'in üzerinde olduğu bildirilmiştir. Ayrıca, optimizasyon sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılması sonucunda, elde edilen motor performans ve emisyon değerlerinin %5'ten daha düşük hata ile tahmin edilebildiği ve optimizasyon çalışmasının etkili bir yöntem olduğu ifade edilmiştir [27]. Bir diğer çalışmada Jena ve arkadaşları (2024) düşük yoğunluklu polietilenden elde ettikleri PE türevi yakıtı hacimce %10, %20, %30 ve %40'lık saf dizel yakıtı ile karıştırmışlar farklı motor yüklerinde, sıkıştırma oranlarında ve motor yüklerinde test etmişlerdir. RSM optimizasyonu sonrası %40 WPO karışımlı PE türevi yakıtın tam yükte (12 kg) ve 15,4 sıkıştırma oranındaki optimum parametreler olduğunu bildirmişlerdir. PE türevi bu yakıtın optimum koşullarda dizel yakıtın yerine ikame olarak kullanılabileceğini bildirmişlerdir [28].

5. Uzun Dönemli Motor Dayanıklılığı Ve Ekonomik Analiz

5.1. PE-Türevli Yakıtların Motor Bileşenleri Üzerindeki Uzun Dönemli Etkileri

PE türevli yakıtların motor bileşenleri üzerindeki uzun dönemli etkileri, bu yakıtların pratik uygulamaları için kritik bir faktördür. Mevcut araştırmalar, PE-türevli yakıtların motor performansı ve emisyonları üzerindeki etkilerini incelerken, motor bileşenlerinin uzun dönemli aşınma ve dayanıklılığına dair bulgular bulunmamaktadır. Sonraki çalışılması gereken konuların başında bu yakıtların içten yanmalı motorlarda uzun dönemli etkileri olmalıdır.

5.2. Ekonomik Fizibilite ve Yaşam Döngüsü Analizi

PE türevli yakıtların ticari uygulanabilirliği, ekonomik fizibilite ve çevresel sürdürülebilirlik açısından kapsamlı bir değerlendirmeyi gerektirir. Yakıt üretim maliyetleri; atık toplama ve taşıma, piroliz tesisi kurulum ve işletme giderleri, yakıt iyileştirme ve dağıtım süreçlerini kapsayan bütünleşik bir ekonomik yapıyı içermektedir. Ekonomik analizler, PE-türevli yakıt üretiminin, özellikle atık bertaraf teşviklerinin bulunduğu ve petrol fiyatlarının yüksek seyrettiği bölgelerde ekonomik açıdan uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, ekonomik fizibilite; atık toplama altyapısının gelişmişliği, yerel düzenleyici çerçeve ve fosil yakıt fiyatlarındaki dalgalanmalar gibi bölgesel faktörlere önemli ölçüde bağlıdır. Yaşam Döngüsü Analizi perspektifinden değerlendirildiğinde, PE-türevli yakıtların çevresel etki profili, geleneksel yakıtlara kıyasla daha olumlu sonuçlar ortaya koymaktadır. Çalışmalar genel olarak, PE atıklarından yakıt üretiminin, atıkların depolanması veya doğrudan yakılması gibi alternatif bertaraf yöntemlerine kıyasla sera gazı emisyonlarında önemli oranda azalma sağladığını göstermektedir [29].

Ekonomik fizibilite analizinde, PE-türevli yakıt üretiminin maliyet-fayda karşılaştırması önemlidir. Bu ekonomik göstergeler, özellikle atık yönetimi politikalarının sıklaştığı ve fosil yakıt fiyatlarının yükseldiği günümüz koşullarında, PE-türevli yakıt üretiminin ekonomik açıdan cazip bir yatırım olabileceğini göstermektedir.

6. Endüstriyel Uygulamalar ve Gelecek Perspektifleri

6.1. Laboratuvar Endüstriyel Ölçeğe Geçiş: Zorluklar ve Fırsatlar

PE-türevli yakıtların laboratuvar ölçeğinden endüstriyel ölçeğe geçişi, çeşitli teknik, ekonomik ve düzenleyici zorlukları beraberinde getirmektedir.

Ancak, dünya genelinde artan plastik atık sorunu ve sürdürülebilir yakıt arayışı, bu alanda önemli fırsatlar da sunmaktadır.

Teknik Zorluklar: Endüstriyel ölçekte en büyük teknik zorluklar arasında, atık plastiğin heterojen yapısı, kirletici maddelerin varlığı ve sürekli işlem gerektiren büyük ölçekli piroliz reaktörlerinin tasarımı yer almaktadır.

Ekonomik ve Düzenleyici Faktörler: Endüstriyel uygulamanın ekonomik fizibilitesi, atık toplama ve işleme maliyetleri, enerji fiyatlarına bağlıdır. Birçok ülkede, plastik atıkların kimyasal geri dönüşümünü teşvik eden düzenlemeler ve finansal destekler uygulanmaya başlanmıştır. Ölçek büyütme sürecinde karşılaşılan teknik zorlukların başında, atık plastiklerin heterojen yapısı ve içerdikleri katkı maddeleri gelmektedir [30]. Özellikle klorlu bileşikler, metal katkılar ve boya pigmentleri, piroliz sürecini olumsuz etkileyebilir ve ekipman korozyonuna neden olabilir. Bu sorunun çözümü için gelişmiş ön işleme teknolojileri geliştirilmelidir. Polietilen atıklardan elde edilen yakıtların içten yanmalı motorlarda kullanılması, günümüzde karmaşık mühendislik problemlerinin multidisipliner bakış açısıyla ele alınmasının önemli bir örneğidir; zira bu alan, kimya, makine, çevre ve enerji mühendisliği disiplinlerinin kesişiminde yer almaktadır.

6.2. Gelecek Araştırma Yönelimleri ve Potansiyel Uygulama Alanları

PE-türevli yakıtların gelecekteki gelişimi hem teknolojik ilerlemeler hem de pazar dinamikleri tarafından şekillendirilecektir. Araştırmacılar ve endüstri paydaşları, aşağıdaki alanlara odaklanmaktadır:

İleri Katalizör Teknolojileri: Daha düşük sıcaklıklarda çalışan, seçiciliği yüksek ve uzun ömürlü katalizörler, piroliz sürecinin enerji verimliliğini artırabilir ve daha yüksek kalitede yakıt üretimini sağlayabilir.

Karışık Plastik Atıkların İşlenmesi: Gelecekteki araştırmalar, PE ile birlikte PP, PS ve diğer plastik türlerini etkili bir şekilde işleyebilen ve yüksek kaliteli yakıt üretebilen sistemlerin geliştirilmesine odaklanmaktadır.

Endüstri 4.0 teknolojilerinin piroliz tesislerine entegrasyonu, proses optimizasyonu, kalite kontrolü ve bakım planlaması açısından önemli avantajlar sağlayabileceği düşünülmektedir. Katalizör geliştirme çalışmalarında, son yıllarda özellikle hibrit katalizör sistemleri üzerinde durulmaktadır. Hibrit yakıt sistemleri konusunda ise, PE türevli yakıtların biyodizel veya etanol, metanol, izobütanol gibi yenilenebilir yakıtlarla karıştırılması üzerine çalışmalar artış göstermiştir. Bu karışımlar, PE türevli

yakıtların oksijen içeriğini artırarak yanma verimliliğini iyileştirmekte ve emisyonların azalmasına yardımcı olabilmektedir.

7. Sonuç

Polietilen atıklarından elde edilen pirolitik yakıtlar, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltma ve plastik atık sorununa çözüm bulma potansiyeli taşıyan, değerli bir alternatif enerji kaynağıdır. Bu yakıtlar, dizele benzer ısı değerleri ve dizel yakıtı ile karşılaştırılabilir yakıt özellikleri sebebiyle dizel yakıtına alternatif olma potansiyelini taşımaktadır. Polietilen kaynaklı yakıtların sürdürülebilir enerji geçişindeki rolü hem atık yönetimi hem de alternatif yakıt üretimi açısından giderek önem kazanmaktadır. Bu yakıtlar, özellikle gelişmekte olan ülkelerde, artan plastik atık sorununa çözüm sunarken, enerji güvenliğine de katkı sağlama potansiyeline sahiptir. Polietilen kaynaklı yakıtların sürdürülebilir enerji geçişindeki rolü hem atık yönetimi hem de alternatif yakıt üretimi açısından giderek önem kazanmaktadır. Bu yakıtlar, özellikle gelişmekte olan ülkelerde, artan plastik atık sorununa çözüm sunarken, enerji güvenliğine de katkı sağlama potansiyeline sahiptir. Bu sebeple PE türevli yakıtlarla ilgili içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanımı ile ilgili gerekli yasal düzenlemeler yapılmalı ve kullanımı teşvik edilmeli ve kamu-özel sektör iş birliklerinin desteklenmesi önemlidir. Sonuç olarak, PE-türevli yakıtlar hem atık yönetimi hem de sürdürülebilir enerji üretimi açısından umut verici bir çözüm sunmaktadır. Optimizasyon stratejilerinin etkin uygulanması ve teknolojik ilerlemelerle, bu yakıtlar, içten yanmalı motorlarda daha temiz ve verimli bir alternatif olarak konumlanabilir. Bu alandaki araştırma ve geliştirme çalışmaları, döngüsel ekonomi ve sürdürülebilir ulaşım hedeflerine ulaşmada önemli bir rol oynayacaktır. Çevresel sürdürülebilirlik ve enerji güvenliği açısından kritik bir dönemeçte bulunduğumuz bu dönemde, PE türevli yakıtlar gibi yenilikçi çözümler hem plastik kirliliğiyle mücadelede hem de fosil yakıtlara alternatif oluşturmada çift yönlü fayda sağlama potansiyeline sahiptir. Gelecekte, bu teknolojilerin daha da geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması, küresel ısınma ve atık yönetimi gibi çağımızın en büyük çevresel sorunlarına karşı etkili bir yanıt oluşturabilir.

Teşekkür

Bu bölümün hazırlanmasındaki akademik gelişime sunduğu değerli katkılar için danışman hocam Prof. Dr. Mustafa Bahattin Çelik'e içten teşekkür ederim.

Kaynaklar

1. Pilapitiya, P. N. T., & Ratnayake, A. S. (2024). The world of plastic waste: A review. *Cleaner Materials*, 11, Article 100220. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2023.100220>
2. Ragossnig, A. M., & Agamuthu, P. (2021). Plastic waste: Challenges and opportunities. *Waste Management & Research*, 39(5), 629–630. <https://doi.org/10.1177/0734242X211013021>
3. Şen, S., & Çelik, M. B. (2024). Modeling the effect of plastic oil obtained from XLPE cable waste on diesel engine performance and emission parameters with the response surface method. *Science, Technology, Energy, Transition*, 79, Article 58. <https://doi.org/10.2516/stet/2024059>
4. Rahman, M. H., Bhoi, P., & Menezes, P. (2023). Pyrolysis of waste plastics into fuels and chemicals: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 188, Article 113799. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113799>
5. Al-Salem, S. M., Antelava, A., Constantinou, A., Manos, G., & Dutta, A. (2017). A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW). *Journal of Environmental Management*, 197, 177–198. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.084>
6. Sharuddin, S. D. A., Abnisa, F., Wan Daud, W. M. A., & Aroua, M. K. (2017). Energy recovery from pyrolysis of plastic waste: Study on non-recycled plastics (NRP) data as the real measure of plastic waste. *Energy Conversion and Management*, 148, 925–934. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.046>
7. Kunwar, B., Cheng, H. N., Chandrashekar, S. R., & Sharma, B. K. (2016). Plastics to fuel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 421–428. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.015>
8. Yaqoob, H., Ali, H. M., Sajjad, U., & Hamid, K. (2024). Investigating the potential of plastic pyrolysis oil-diesel blends in diesel engine: Performance, emissions, thermodynamics and sustainability analysis. *Results in Engineering*, 24, Article 103336. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103336>
9. Mani, M., Subash, C., & Nagarajan, G. (2009). Performance, emission and combustion characteristics of a DI diesel engine using waste plastic oil. *Applied Thermal Engineering*, 29(13), 2738–2744. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.01.007>
10. Chen, Z., Erwin, B. J., & Che, L. (2024). Recycling the polyethylene into fuels via an olefin-intermediate tandem catalysis over Fe₂O₃/USY catalysts. *Journal of the Energy Institute*, 116, Article 101748. <https://doi.org/10.1016/j.joci.2023.101748>
11. Faisal, F., Rasul, M. G., Jahirul, M. I., & Chowdhury, A. A. (2023). Waste plastics pyrolytic oil as a source of diesel fuel: A recent review on diesel engine performance, emissions, and combustion characteristics. *Science*

- of the *Total Environment*, 886, Article 163756. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163756>
12. Jahirul, M. I., Rasul, M. G., Schaller, D., Khan, M. M. K., Hasan, M. M., & Hazrat, M. A. (2022). Transport fuel from waste plastics pyrolysis – A review on technologies, challenges and opportunities. *Energy Conversion and Management*, 258, Article 115451. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115451>
 13. Kumar, S., Prakash, R., Murugan, S., & Singh, R. K. (2013). Performance and emission analysis of blends of waste plastic oil obtained by catalytic pyrolysis of waste HDPE with diesel in a CI engine. *Energy Conversion and Management*, 74, 323–331. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.05.028>
 14. Muthukumar, K., & Kasiraman, G. (2024). Utilization of fuel energy from single-use low-density polyethylene plastic waste on CI engine with hydrogen enrichment – An experimental study. *Energy*, 289, Article 129926. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129926>
 15. Panda, A. K., Murugan, S., & Singh, R. K. (2016). Performance and emission characteristics of diesel fuel produced from waste plastic oil obtained by catalytic pyrolysis of waste polypropylene. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38(4), 577–585. <https://doi.org/10.1080/15567036.2013.800924>
 16. Mani, M., Nagarajan, G., & Sampath, S. (2011). Characterisation and effect of using waste plastic oil and diesel fuel blends in compression ignition engine. *Energy*, 36(1), 212–219. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.10.049>
 17. Pumpuang, A., Klinkaew, N., Wathakit, K., Sukhom, A., & Sukjit, E. (2024). The influence of plastic pyrolysis oil on fuel lubricity and diesel engine performance. *RSC Advances*, 14(14), 10070–10087. <https://doi.org/10.1039/D4RA00856D>
 18. Alrazen, H. A., Aminossadati, S. M., Mahmood, H. A., Hasan, M. M., Abdulkreem-Alsultan, G., & Konarova, M. (2023). Theoretical investigation of combustion and emissions of CI engines fueled by various blends of depolymerized low-density polythene and diesel with co-solvent additives. *Energy*, 282, Article 128754. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128754>
 19. Rajasekaran, S., Damodharan, D., Gopal, K., Kumar, B. R., & De Pours, M. V. (2020). Collective influence of 1-decanol addition, injection pressure and EGR on diesel engine characteristics fueled with diesel/LDPE oil blends. *Fuel*, 277, Article 118166. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118166>
 20. Chaitanya, A. V. K., & Mohanty, D. K. (2022). Experimental investigation on combustion, performance, and emission characteristics of a CRDI engine with 1-pentanol blended waste plastic oil with EGR. *Energy*, 256, Article 124606. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124606>

21. Kaimal, V. K., & Vijayabalan, P. (2016). A study on synthesis of energy fuel from waste plastic and assessment of its potential as an alternative fuel for diesel engines. *Waste Management*, 51, 91–96. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.022>
22. Kaimal, V. K., & Vijayabalan, P. (2016). An investigation on the effects of using DEE additive in a DI diesel engine fuelled with waste plastic oil. *Fuel*, 180, 90–96. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.04.030>
23. Karisathan, S. N., & Ramachandran, B. A. (2016). Experimental investigation on thermocatalytic pyrolysis of HDPE plastic waste and the effects of its liquid yield over the performance, emission, and combustion characteristics of CI engine. *Energy & Fuels*, 30(7), 5379–5390. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b00507>
24. Singh, T. S., Verma, T. N., & Singh, H. N. (2020). A lab scale waste to energy conversion study for pyrolysis of plastic with and without catalyst: Engine emissions testing study. *Fuel*, 277, Article 118176. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118176>
25. Kalargaris, I., Tian, G., & Gu, S. (2017). Experimental evaluation of a diesel engine fuelled by pyrolysis oils produced from low-density polyethylene and ethylene–vinyl acetate plastics. *Fuel Processing Technology*, 161, 125–131. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.03.014>
26. Singh, T. S., Rajak, U., Dasore, A., Muthukumar, M., & Verma, T. N. (2021). Performance and ecological parameters of a diesel engine fueled with diesel and plastic pyrolyzed oil (PPO) at variable working parameters. *Environmental Technology & Innovation*, 22, Article 101491. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101491>
27. Kumar, A., Pali, H. S., & Kumar, M. (2024). Effective utilization of waste plastic derived fuel in CI engine using multi-objective optimization through RSM. *Fuel*, 355, Article 129448. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129448>
28. Jena, S. P., Mahapatra, S., & Acharya, S. K. (2021). Optimization of performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with Karanja biodiesel using Grey-Taguchi method. *Materials Today: Proceedings*, 41, 180–185. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.077>
29. Kumar, S., & Singh, R. K. (2011). Recovery of hydrocarbon liquid from waste high density polyethylene by thermal pyrolysis. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 28(4), 659–667. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322011000400012>
30. Tumu, K., Vorst, K., & Curtzwiler, G. (2023). Global plastic waste recycling and extended producer responsibility laws. *Journal of Environmental Management*, 348, Article 119242. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119242>

Yeşil Dönüşüm Sürecinde Atık Plastik Yakıtlarının Rolü ve Potansiyeli

Yakup Budak¹

Sedat Şen²

Özet

Bu çalışma, yeşil dönüşüm sürecinde atık plastik yakıtlarının rolünü ve potansiyelini incelemektedir. Dünya genelinde yıllık 300 milyon tonu aşan plastik üretimi ve bunun sonucunda oluşan atık plastik sorunu, çevresel açıdan ciddi tehditler oluşturmaktadır. Atık plastiklerin enerji kaynağı olarak değerlendirilmesi, hem atık yönetimi hem de yenilenebilir enerji üretimi açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Bu bölümde, atık plastiklerin yakıtı dönüştürülmesinde kullanılan piroliz, gazlaştırma ve depolimerizasyon gibi temel yöntemler detaylı olarak incelenmektedir. Piroliz yöntemi ile atık plastiklerin % 99'a varan oranlarda yakıtı dönüştürülebildiği ve bu yakıtların içten yanmalı motorlarda kullanılabildiği gösterilmiştir. Yeşil dönüşüm kapsamında, atık plastik yakıtlarının döngüsel ekonomiye katkısı, karbon emisyonlarının azaltılmasındaki rolü ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine uyumu değerlendirilmiştir. Türkiye'de Sıfır Atık Projesi kapsamında atık plastiklerin değerlendirilmesi ve enerji geri kazanımı çalışmaları, ülkenin yeşil dönüşüm stratejisinin önemli bir parçasını oluşturmaktadır. Bununla birlikte, atık plastik yakıtlarının yaygınlaşmasının önünde teknolojik, ekonomik ve yasal engeller bulunmaktadır. Bu çalışma, atık plastik yakıtlarının yeşil dönüşümdeki rolünü artırmak için teknolojik inovasyonlar, politika önerileri ve araştırma yönleri sunmaktadır.

- 1 Prof. Dr., Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Tokat, 60200, Türkiye, ybudak74@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7108-5548>
- 2 Dr. Öğr. Gör., Tokat Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri, Makine, Tokat, 60200, Türkiye, sedat.sen@gop.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-7575-6927>

1. Giriş

Plastik malzemeler, günlük yaşamımızın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiş olup, ambalajlamadan inşaata, otomotivden elektronik sektörüne kadar birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Dünya genelinde yıllık plastik üretim ve kullanımı devamlı artmaktadır [1]. Plastik üretimindeki bu hızlı artış, beraberinde ciddi bir atık sorununu da getirmektedir. Plastik atıkların doğada parçalanma süreleri yüzlerce yılı bulabilmekte ve bu atıklar denizlerde, toprakta ve hava ortamında ciddi kirlilik oluşturmaktadır [1, 2].

Yeşil dönüşüm, sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda ekonomik büyümeyi çevresel sürdürülebilirlikle birleştiren bir yaklaşımı ifade etmektedir. Bu kapsamda, atık yönetimi ve yenilenebilir enerji üretimi, yeşil dönüşümün temel bileşenleri arasında yer almaktadır. Atık plastiklerin yakıt olarak değerlendirilmesi, hem atık yönetimi sorununa çözüm getirmekte hem de yenilenebilir enerji üretimine katkı sağlamaktadır [3].

Atıktan enerji (waste-to-energy) teknolojileri, atık plastiklerin değerli enerji kaynaklarına dönüştürülmesini sağlayarak, fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılmasına ve karbon emisyonlarının düşürülmesine katkıda bulunmaktadır. Piroliz, gazlaştırma ve depolimerizasyon gibi termokimyasal dönüşüm yöntemleri, atık plastiklerin yakıt ve kimyasal hammaddelere dönüştürülmesinde kullanılan başlıca teknolojilerdir [4].

Plastik atıklar, çevrede uzun süre kalıcılık göstererek su ekosistemlerinde toksisiteye ve biyolojik birikime yol açmaktadır. Bu durum, hem çevre sağlığını hem de insan mikrobiyomunu olumsuz etkileyebilmektedir. Plastik atıkların azaltılması için yeşil kimya ve döngüsel ekonomi yaklaşımları kapsamında sürdürülebilir ambalaj tasarımı, geri dönüşüm ve yeniden kullanım gibi stratejiler önerilmekte; ancak maliyet, performans ve standart eksikliği gibi çeşitli zorluklar bu alanda devam etmektedir. Plastik atıkların yönetimi ve çevresel etkilerinin azaltılması için bütüncül ve yenilikçi çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır [5].

Bu bölümde, yeşil dönüşüm sürecinde atık plastik yakıtlarının rolü ve potansiyeli, üretim yöntemleri, çevresel ve ekonomik etkileri, karşılaşılan zorluklar ve gelecek perspektifleri kapsamlı bir şekilde ele alınacaktır.

1.1. Plastik Atık Sorunu

Plastik atık sorunu, günümüzün en önemli çevresel sorunlarından biri haline gelmiştir. Dünya genelinde üretilen plastiklerin yaklaşık % 40'ı tek kullanımlık ürünlerden oluşmakta ve bu ürünler kullanıldıktan kısa bir süre sonra atığa dönüşmektedir. Türkiye'de yıllık plastik atık miktarı yaklaşık 3,5

milyon ton olarak tahmin edilmektedir ve bu atıkların sadece % 10-15'i geri dönüştürülmektedir [6].

Plastik atıkların yönetiminde karşılaşılan zorluklar arasında, atıkların toplanması, ayrıştırılması ve işlenmesindeki lojistik ve ekonomik engeller yer almaktadır. Ayrıca, plastik atıkların heterojen yapısı ve farklı plastik türlerinin birbirine karışması, geri dönüşüm süreçlerini zorlaştırmaktadır [7].

Dünya genelinde, plastik atıkların yaklaşık % 79'u çöp sahalarına gönderilmekte veya doğaya atılmakta, % 12'si yakılmakta ve sadece % 9'u geri dönüştürülmektedir. Bu durum, hem değerli kaynakların israfına hem de ciddi çevresel sorunlara yol açmaktadır [8].

1.1.1. Plastik Atıkların Çevresel Etkileri

Plastik atıklar, doğada parçalanmadan uzun yıllar kalabilmekte ve ekosistemler üzerinde ciddi olumsuz etkilere neden olmaktadır. Denizlerde biriken plastik atıklar, deniz canlılarının bu atıkları besin sanarak tüketmelerine ve boğulmalarına yol açabilmektedir. Ayrıca, plastik atıkların parçalanmasıyla oluşan mikropplastikler, besin zincirine girerek insan sağlığı üzerinde de potansiyel riskler oluşturmaktadır [9].

Plastik üretimi ve atık yönetimi süreçleri, önemli miktarda sera gazı emisyonuna neden olmaktadır. Plastik üretiminde kullanılan fosil yakıtlar, küresel ısınmaya katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, plastik atıkların yakılması sonucunda, dioksin ve furan gibi toksik gazlar açığa çıkabilmektedir [10].

Toprak kirliliği açısından değerlendirildiğinde, plastik atıklar toprağın yapısını bozmakta, su tutma kapasitesini azaltmakta ve topraktaki mikroorganizmaların yaşamını olumsuz etkilemektedir. Bu durum, tarımsal verimliliği düşürmekte ve gıda güvenliğini tehdit etmektedir [11].

1.1.1.1. Mikropplastiklerin Ekosistem Üzerindeki Etkileri

Mikropplastikler, boyutları 5 mm'den küçük olan plastik parçacıklardır ve çevrede yaygın olarak bulunmaktadır. Bu parçacıklar, büyük plastik atıkların zamanla parçalanmasıyla oluşabileceği gibi, kozmetik ürünleri, sentetik tekstil ürünleri ve endüstriyel uygulamalar gibi kaynaklardan da doğrudan çevreye salınabilmektedir [12].

Deniz ekosistemlerinde, mikropplastikler planktonlar tarafından besin sanılarak tüketilmekte ve besin zinciri yoluyla daha büyük organizmalara aktarılmaktadır. Bu durum, deniz canlılarının sindirim sistemlerinde tıkanıklıklara, beslenme bozukluklarına ve toksik etkilere neden olabilmektedir [13].

Karasal ekosistemlerde ise, mikroplastikler toprak yapısını değiştirmekte, topraktaki mikroorganizmaların aktivitesini etkilemekte ve bitkilerin büyümesini engelleyebilmektedir. Ayrıca, mikroplastikler üzerinde biriken kirleticiler, toprak ve su kaynaklarının kirlenmesine neden olmaktadır [14].

İnsan sağlığı açısından, mikroplastiklerin besin zinciri yoluyla insanlara ulaşması ve solunum yoluyla vücuda alınması endişe vericidir. Yapılan araştırmalar, mikroplastiklerin insan kanında, akciğerlerinde ve sindirim sisteminde bulunabildiğini göstermektedir. Bu parçacıkların insan sağlığı üzerindeki uzun vadeli etkileri halen araştırılmaktadır [14].

2. Atık Plastik Yakıtlarının Üretim Yöntemleri

Atık plastiklerin yakıtla dönüştürülmesinde kullanılan başlıca yöntemler arasında piroliz, gazlaştırma ve depolimerizasyon yer almaktadır. Bu yöntemler, atık plastiklerin kimyasal yapısını değiştirerek, sıvı yakıtlar, gaz yakıtlar veya kimyasal hammaddeler elde edilmesini sağlamaktadır [15].

Piroliz, atık plastiklerin oksijensiz ortamda yüksek sıcaklıklarda (400-800°C) ısıtılarak, daha küçük moleküllere parçalanması işlemidir. Bu işlem sonucunda, sıvı yakıtlar (benzin, dizel, fuel oil benzeri), gaz yakıtlar ve char (katı kalıntı) elde edilmektedir. Piroliz yöntemi, farklı plastik türlerinin karışık olarak işlenebilmesine olanak sağlaması açısından avantajlıdır [16].

Gazlaştırma, atık plastiklerin yüksek sıcaklıklarda ve kontrollü bir ortamda işlenerek sentez gazı adı verilen bir gaz karışımı üretme işlemidir. Bu gaz, enerji üretiminde doğrudan kullanılabilir ya da özel kimyasal süreçlerle sıvı yakıtlara dönüştürülebilir.

Depolimerizasyon, plastiklerin monomerlerine veya diğer değerli kimyasallara geri dönüştürülmesi işlemidir. Bu yöntem, özellikle PET, PS ve PMMA gibi belirli plastik türleri için uygundur. Depolimerizasyon, kimyasal (solvoliz, hidroliz) veya biyolojik (enzimatik) yöntemlerle gerçekleştirilebilir [18].

2.1. Piroliz ve Gazlaştırma

Piroliz, atık plastiklerin yakıtla dönüştürülmesinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntemde, elde edilen ürünlerin dağılımı; plastik türüne, sıcaklık, basınç ve katalizör kullanımı gibi işlem parametrelerine bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir [19]. Polietilen (PE), polipropilen (PP) ve polistiren (PS) gibi poliolefinler, piroliz işlemi için en uygun plastik türleri olup, yüksek verimle sıvı yakıtlara dönüştürülebilmektedir. Buna karşılık, polietilen tereftalat (PET) ve polivinil klorür (PVC) gibi oksijen

ve klor içeren plastikler, piroliz sırasında korozif gazlar oluşturmakta ve bu nedenle ek arıtma işlemlerine ihtiyaç duyulmaktadır [20].

Piroliz işlemi, genellikle kesikli (batch) veya sürekli (continuous) reaktörlerde gerçekleştirilmektedir. Kesikli reaktörler küçük ölçekli uygulamalar için uygunken, sürekli reaktörler endüstriyel ölçekte üretim için tercih edilmektedir. Ayrıca, akışkan yatak, döner fırın ve mikrodalga destekli piroliz gibi farklı reaktör tasarımları da kullanılabilir [21].

Gazlaştırma işlemi ise pirolize göre daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilmekte ve daha fazla gaz ürün elde edilmesini sağlamaktadır. Gazlaştırma genellikle sabit yatak, akışkan yatak veya entegre gazlaştırıcılarda uygulanmakta olup, elde edilen sentez gazı elektrik üretimi, ısınma veya sıvı yakıt sentezi gibi çeşitli amaçlarla değerlendirilebilmektedir [22].

2.1.1. Enerji Verimliliği ve Emisyonlar

Atık plastiklerin piroliz ve gazlaştırma yöntemleriyle işlenmesi, enerji verimliliği ve emisyonlar açısından geleneksel atık yönetimi uygulamalarına kıyasla çeşitli avantajlar sunar. Piroliz işlemiyle, atık plastiklerin enerji içeriğinin yaklaşık %70-90'ı geri kazanılabilmektedir; bu oran, kullanılan plastik türüne, işlem parametrelerine ve reaktör tasarımına göre değişiklik gösterebilir [23]. Piroliz sırasında reaktörün ısıtılması için harici enerjiye ihtiyaç duyulsa da, elde edilen gaz ürünlerin bir bölümü bu enerji gereksinimini karşılayabilmekte ve ayrıca işlemin ekzotermik aşamaları da enerji dengesine katkı sağlamaktadır. Enerji verimliliğini daha da artırmak amacıyla, atık ısı geri kazanımı, proses entegrasyonu ve katalizör kullanımı gibi çeşitli stratejiler uygulanabilir [24].

Emisyonlar açısından bakıldığında, piroliz ve gazlaştırma işlemleri, atık plastiklerin doğrudan yakılmasına göre daha düşük seviyede hava kirletici emisyonları üretir. Özellikle kapalı sistemlerde gerçekleştirilen piroliz, dioksin ve furan gibi toksik bileşiklerin oluşumunu önemli ölçüde azaltır. Ancak, PVC gibi klor içeren plastiklerin işlenmesi sırasında ortaya çıkan HCl gazının uygun şekilde nötralize edilmesi gerekir [25].

Karbon emisyonları yönünden değerlendirildiğinde ise, piroliz ve gazlaştırma yöntemleriyle işlenen atık plastikler, çöp sahalarına gönderilen plastiklere kıyasla daha düşük sera gazı salımına yol açar. Ayrıca, bu işlemler sonucunda elde edilen yakıtların fosil yakıtların yerine kullanılması, toplam karbon emisyonlarının azaltılmasına katkı sunar [26].

3. Yeşil Dönüşümde Atık Plastik Yakıtlarının Rolü

Yeşil dönüşüm, sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda ekonomik büyümeyi çevresel sürdürülebilirlikle birleştiren bir yaklaşımı ifade etmektedir. Bu kapsamda, atık plastik yakıtları, yeşil dönüşümün temel bileşenleri olan döngüsel ekonomi, karbon emisyonlarının azaltılması ve yenilenebilir enerji üretimi açısından önemli katkılar sağlayabilir [27].

Atık plastiklerin yakıtla dönüştürülmesi, plastik atıkların değerli ürünlere dönüştürülerek ekonomiye kazandırılmasını sağlamaktadır. Bu yaklaşım, “atık” kavramını “kaynak” olarak yeniden tanımlayarak, döngüsel ekonomi modelinin uygulanmasına katkıda bulunur [28].

Türkiye’de 2017 yılında başlatılan “Sıfır Atık Projesi”, plastik kirliliğinin azaltılması, geri dönüşüm altyapısının geliştirilmesi ve atıkların ekonomik değere dönüştürülmesi hedefleri doğrultusunda önemli adımlar atmıştır. Bu proje kapsamında, atık plastiklerin yakıt olarak değerlendirilmesi de alternatif yöntemler arasında yer alır [1, 29].

Atık plastik yakıtlarının kullanımı, fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılmasına ve enerji güvenliğinin artırılmasına katkıda bulunmaktadır. Özellikle, petrol ithalatına bağımlı ülkeler için, atık plastiklerden yakıt üretimi, yerli enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi açısından stratejik öneme sahiptir [30].

3.1. Döngüsel Ekonomi ve Sürdürülebilirlik

Döngüsel ekonomi, doğrusal “al-kullan-at” ekonomik modelinin yerine, kaynakların mümkün olduğunca uzun süre ekonomide tutulduğu ve atık oluşumunun minimize edildiği bir ekonomik modeli ifade etmektedir. Bu model, ürünlerin, malzemelerin ve kaynakların değerinin korunduğu ve atıkların azaltıldığı bir sistem oluşturmayı hedefler [31].

Atık plastik yakıtları, döngüsel ekonomi modelinin uygulanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Plastik atıkların yakıtla dönüştürülmesi, bu atıkların değerli enerji kaynaklarına dönüştürülerek ekonomiye kazandırılmasını sağlamaktadır. Bu yaklaşım, hem atık yönetimi sorununa çözüm getirmekte hem de yenilenebilir enerji üretimine katkı sağlayabilir [32].

Sürdürülebilir kalkınma hedefleri açısından, atık plastik yakıtları, “Sorumlu Üretim ve Tüketim” (SDG 12), “Erişilebilir ve Temiz Enerji” (SDG 7) ve “İklim Eylemi” (SDG 13) gibi hedeflere katkıda bulunmaktadır. Atık plastiklerin yakıtla dönüştürülmesi, kaynakların verimli kullanımını,

yenilenebilir enerji üretimini ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasını destekleyebilir [33].

Türkiye'nin döngüsel ekonomi stratejisi kapsamında, atık plastiklerin değerlendirilmesi ve enerji geri kazanımı çalışmaları, önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yürütülen projeler, atık plastiklerin ekonomik değere dönüştürülmesini ve çevresel etkilerin azaltılmasını hedefler [34].

4. Zorluklar ve Fırsatlar

Atık plastik yakıtlarının yaygınlaşmasının önünde teknolojik, ekonomik ve yasal engeller bulunmaktadır. Bu zorlukların aşılması ve fırsatların değerlendirilmesi, atık plastik yakıtlarının yeşil dönüşümdeki rolünün artırılması açısından önem taşır [35].

4.1. Teknolojik ve Ekonomik Engeller

Atık plastik yakıtlarının üretimi ve kullanımında karşılaşılan teknolojik zorluklar arasında, plastik atıkların heterojen yapısı, kirlilik ve kontaminasyon sorunları, proses kontrolü ve ürün kalitesi gibi faktörler yer almaktadır. Farklı plastik türlerinin karışık olarak işlenmesi, ürün kalitesini olumsuz etkileyebilmekte ve ek arıtma işlemleri gerektirebilir [36].

Ekonomik açıdan, atık plastik yakıtlarının üretim maliyetleri, geleneksel fosil yakıtlara göre daha yüksek olabilir. Bu durum, özellikle petrol fiyatlarının düşük olduğu dönemlerde, atık plastik yakıtlarının rekabet gücünü azaltabilir. Ayrıca, atık plastiklerin toplanması, taşınması ve ön işleme tabi tutulması gibi lojistik maliyetler de önemli bir faktördür [37].

Altyapı eksikliği ve teknolojik olgunluk seviyesi, atık plastik yakıtlarının yaygınlaşmasını engelleyen diğer faktörlerdir. Özellikle, büyük ölçekli ve sürekli çalışan tesislerin kurulması, yüksek yatırım maliyetleri gerektirir. Ayrıca, teknolojik risklerin ve belirsizliklerin yüksek olması, yatırımcıların bu alanda çekimser kalmasına neden olabilir [38].

Bununla birlikte, atık plastik yakıtlarının üretimi ve kullanımı, teknolojik inovasyonlar, ölçek ekonomisi ve politika destekleri sayesinde, ekonomik açıdan daha rekabetçi hale gelebilir. Özellikle, karbon fiyatlandırma mekanizmaları, atık bertaraf vergilerinin artırılması ve yenilenebilir enerji teşvikleri gibi politika araçları, atık plastik yakıtlarının ekonomik fizibilitesini iyileştirebilir [39].

5. Gelecek Perspektifleri ve Öneriler

Atık plastik yakıtlarının yeşil dönüşümdeki rolünün artırılması için, teknolojik inovasyonlar, politika destekleri ve araştırma-geliştirme çalışmaları büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, gelecek perspektifleri ve öneriler aşağıda sunulmaktadır [40].

5.1. Teknolojik İnovasyonlar

Atık plastik yakıtlarının üretim teknolojilerinin geliştirilmesi, enerji verimliliğinin artırılması ve ürün kalitesinin iyileştirilmesi için, araştırma-geliştirme çalışmalarına ağırlık verilmelidir. Özellikle, katalizör teknolojileri, reaktör tasarımları ve proses optimizasyonu konularında inovasyonlar, atık plastik yakıtlarının üretim verimini ve kalitesini artırabilir [41].

Sanayi ve teknolojiye ilerlemeler ile nüfus ve toplum ihtiyaçlarının değişimi, küresel enerji talebini hızla artırır. Bugün enerji ihtiyacının çoğu, petrol, doğal gaz ve kömür gibi fosil yakıtlardan sağlanabilir. Ancak, artan talebi karşılamak için kullanılan bu kaynakların rezervleri giderek tükenmektedir. Dijital teknolojilerin atık plastik yakıtı üretim süreçlerine entegrasyonu, proses kontrolünün iyileştirilmesine ve enerji verimliliğinin artırılmasına katkıda bulunabilir. Sensör teknolojileri, veri analitiği ve makine öğrenmesi algoritmaları, üretim süreçlerinin optimize edilmesini ve ürün kalitesinin iyileştirilmesini sağlayabilir [42].

Atık plastik yakıtlarının kullanım teknolojilerinin geliştirilmesi de önem taşımaktadır. İçten yanmalı motorların atık plastik yakıtlarına uyumlu hale getirilmesi, yakıt enjeksiyon sistemlerinin optimizasyonu ve emisyon kontrol teknolojilerinin geliştirilmesi, atık plastik yakıtlarının performansını ve çevresel etkilerini iyileştirebilir [43].

5.2. Politika Önerileri

Atık plastik yakıtlarının yaygınlaşması için, destekleyici politika çerçevelerinin oluşturulması gerekmektedir. Bu kapsamda, atık yönetimi mevzuatının atık plastiklerin yakıt olarak değerlendirilmesini teşvik edecek şekilde düzenlenmesi, atık hiyerarşisinde enerji geri kazanımının konumunun netleştirilmesi ve atık-son (end-of-waste) kriterlerinin belirlenmesi önem taşır [44].

Ekonomik teşvik mekanizmalarının geliştirilmesi, atık plastik yakıtlarının rekabet gücünün artırılmasına katkıda bulunabilir. Karbon fiyatlandırma mekanizmaları, atık bertaraf vergilerinin artırılması, yenilenebilir enerji teşvikleri ve vergi indirimleri gibi politika araçları, atık plastik yakıtlarının ekonomik fizibilitesini iyileştirebilir [45].

Araştırma-geliştirme ve inovasyon desteklerinin artırılması, atık plastik yakıtı teknolojilerinin geliştirilmesine ve yaygınlaştırılmasına katkıda bulunabilir. Üniversite-sanayi işbirliğinin teşvik edilmesi, pilot projelerin desteklenmesi ve teknoloji transfer mekanizmalarının geliştirilmesi, inovasyon ekosisteminin güçlendirilmesini sağlayabilir.

5.3. Araştırma Yöntemleri

Atık plastik yakıtlarının yeşil dönüşümdeki rolünün artırılması için gelecekteki araştırmaların çeşitli teknik ve teknolojik alanlara odaklanması gerekmektedir. Heterojen plastik atıkların işlenmesi ve ürün kalitesi optimizasyonu, bu alandaki temel zorluklardan biridir. Atık plastik akışlarının genellikle farklı polimer türlerinin (PE, PP, PS, PET, PVC vb.) karışımından oluşması, piroliz ve gazlaştırma süreçlerinde ürün dağılımı ve kalite açısından önemli sorunlar yaratmaktadır. Farklı polimerlerin termal bozunma sıcaklıkları ve mekanizmaları değişiklik gösterdiğinden, gelişmiş ön işleme tekniklerinin geliştirilmesi gereklidir. Spektroskopik yöntemlerle plastik türlerinin hızlı ve doğru bir şekilde tanımlanması ve ayrıştırılması, kimyasal ön işleme ve mekanik-kimyasal hibrit ayrıştırma sistemleri bu kapsamda değerlendirilebilir. Ayrıca, heterojen plastik karışımlarının doğrudan işlenmesi için proses koşullarının optimizasyonu, çok aşamalı piroliz sistemleri ve kademeli sıcaklık profilleri gibi yaklaşımlar, daha homojen ve yüksek kaliteli ürünler elde edilmesini sağlayabilir.

Katalizör teknolojileri, plastik atıkların pirolizi ve gazlaştırılmasında reaksiyon sıcaklığını düşürmek, seçiciliği artırmak ve ürün kalitesini iyileştirmek açısından kritik öneme sahiptir. Nano-yapılı katalizörler, yüksek yüzey alanı sayesinde gelişmiş katalitik aktivite sunarken, bi-fonksiyonel ve hiyerarşik katalizörler çoklu reaksiyon adımlarını destekleyerek ürün verimini ve kalitesini artırabilir. Katalizör deaktivasyonunun önlenmesi için metal-destek etkileşiminin optimizasyonu, promotörlerin eklenmesi ve yüzey modifikasyonu gibi stratejiler önem taşımaktadır. Ayrıca, çevre dostu katalizör sentez yöntemleri ve katalizörlerin etkin geri kazanımı için yeni tekniklerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Atık plastiklerden elde edilen sıvı yakıtların içten yanmalı motorlarda etkin kullanımı için yakıt formülasyonu, katkı maddeleri, ileri yanma stratejileri ve egzoz gazı arıtma sistemleri gibi alanlarda araştırmalar yapılmalıdır. Yakıtların fizikokimyasal özelliklerinin iyileştirilmesi, motor performansı ve emisyonların azaltılması açısından önemlidir. Ayrıca, motor bileşenleri üzerindeki uzun dönemli etkilerin incelenmesi ve potansiyel sorunların önlenmesi için çözümler geliştirilmelidir.

Enerji verimliliği ve ekonomik fizibilitenin artırılması amacıyla entegre sistemler ve proses yoğunlaştırma teknikleri de araştırma gündeminde yer almalıdır. Hibrit termokimyasal dönüşüm sistemleri, mikrodalga ve ultrasonik destekli prosesler, atık ısı geri kazanımı ve modüler, ölçeklenebilir üretim sistemleri bu kapsamda değerlendirilebilir. Bu yaklaşımlar, merkezi olmayan atık yönetimi ve lojistik maliyetlerin azaltılması açısından da avantaj sağlayabilir.

Atık plastik yakıtlarının üretim süreçlerinin ve ürün kalitesinin izlenmesi, kontrolü ve optimizasyonu için ileri analitik teknikler ve dijital teknolojilerden yararlanılması gerekmektedir. Gerçek zamanlı analitik tekniklerin entegrasyonu, yapay zeka ve makine öğrenmesi algoritmalarının kullanımı, dijital ikiz teknolojisi ve IoT tabanlı izleme sistemleri, proses verimliliğini ve ürün kalitesini artırmada önemli rol oynayacaktır.

Son olarak, biyoplastikler ve biyobozunur plastiklerin atık-enerji dönüşümü süreçlerindeki davranışlarının anlaşılması ve uygun yönetim stratejilerinin geliştirilmesi de önem taşımaktadır. Bu malzemelerin termal dönüşüm davranışları, ürün dağılımı ve kalitesi, özel proses koşulları ve katalizör gereksinimleri ile biyokütle ile birlikte işlenmesi gibi konular, sürdürülebilir atık yönetimi ve enerji üretimi açısından yeni araştırma alanları sunmaktadır. Tüm bu alanlarda disiplinler arası işbirliği, açık inovasyon ve kamu-özel sektör ortaklıkları, atık plastik yakıtlarının üretim verimi, kalitesi ve çevresel sürdürülebilirliğinin artırılması için kritik öneme sahiptir.

6. Sonuç

Bu bölümde, yeşil dönüşüm sürecinde atık plastik yakıtlarının rolü ve potansiyeli kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Dünya genelinde yıllık 300 milyon tonu aşan plastik üretimi ve bunun neden olduğu atık sorunu, çevresel açıdan ciddi tehditler oluşturmaktadır. Plastik atıkların doğada parçalanma süreleri yüzlerce yılı bulabilmekte, denizlerde, toprakta ve havada kirlilik yaratmaktadır. Bu bağlamda, atık plastiklerin yakıtla dönüştürülmesi, hem atık yönetimi sorununa çözüm getirmekte hem de yenilenebilir enerji üretimine katkı sağlamaktadır.

Atık plastiklerin yakıtla dönüştürülmesinde kullanılan başlıca termokimyasal dönüşüm yöntemleri piroliz, gazlaştırma ve depolimerizasyondur. Piroliz, atık plastiklerin oksijensiz ortamda yüksek sıcaklıklarda (400-800°C) ısıtılarak daha küçük moleküllere parçalanması işlemidir. Bu işlem sonucunda, benzin, dizel ve fuel oil benzeri sıvı yakıtlar, gaz yakıtlar ve katı kalıntı (char) elde edilmektedir. Piroliz yöntemi, farklı plastik türlerinin karışık olarak işlenebilmesine olanak sağlaması açısından büyük avantaj

sunmaktadır. Özellikle polietilen (PE), polipropilen (PP) ve polistiren (PS) gibi poliolefinler, piroliz işlemi için en uygun plastik türleridir ve yüksek verimle sıvı yakıtlara dönüştürülebilmektedir.

Gazlaştırma ise, atık plastiklerin kısmi oksidasyonu ile sentez gazı (CO ve H₂ karışımı) üretilmesi işlemidir. Bu işlem, genellikle 800-1200°C sıcaklıklarda ve kontrollü miktarda oksijen veya buhar varlığında gerçekleştirilmektedir. Elde edilen sentez gazı, doğrudan yakıt olarak kullanılabileceği gibi, Fischer-Tropsch sentezi ile sıvı yakıtlara da dönüştürülebilmektedir. Depolimerizasyon, plastiklerin monomerlerine veya diğer değerli kimyasallara geri dönüştürülmesi işlemidir ve özellikle PET, PS ve PMMA gibi belirli plastik türleri için uygundur.

Atık plastik yakıtları, döngüsel ekonomi modelinin uygulanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Döngüsel ekonomi, doğrusal “al-kullan-at” ekonomik modelinin yerine, kaynakların mümkün olduğunca uzun süre ekonomide tutulduğu ve atık oluşumunun minimize edildiği bir ekonomik modeli ifade etmektedir. Plastik atıkların yakıtla dönüştürülmesi, bu atıkların değerli enerji kaynaklarına dönüştürülerek ekonomiye kazandırılmasını sağlamaktadır. Bu yaklaşım, “atık” kavramını “kaynak” olarak yeniden tanımlayarak, döngüsel ekonomi anlayışını güçlendirmektedir.

Karbon emisyonları açısından değerlendirildiğinde, atık plastiklerin pirolizi ve gazlaştırılması, plastiklerin çöp sahalarına gönderilmesine göre daha düşük sera gazı emisyonlarına neden olmaktadır. Ayrıca, elde edilen yakıtların fosil yakıtların yerine kullanılması, net karbon emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunmaktadır. Emisyonlar açısından, piroliz ve gazlaştırma işlemleri, atık plastiklerin doğrudan yakılmasına göre daha düşük hava kirletici emisyonları oluşturmaktadır. Özellikle, kapalı sistemlerde gerçekleştirilen piroliz işlemi, dioksin ve furan gibi toksik bileşiklerin oluşumunu minimize etmektedir.

Türkiye’de 2017 yılında başlatılan “Sıfır Atık Projesi”, plastik kirliliğinin azaltılması, geri dönüşüm altyapısının geliştirilmesi ve atıkların ekonomik değere dönüştürülmesi hedefleri doğrultusunda önemli adımlar atmıştır. Bu proje kapsamında, atık plastiklerin yakıt olarak değerlendirilmesi de alternatif yöntemler arasında yer almaktadır. Türkiye’nin döngüsel ekonomi stratejisi kapsamında, atık plastiklerin değerlendirilmesi ve enerji geri kazanımı çalışmaları, önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yürütülen projeler, atık plastiklerin ekonomik değere dönüştürülmesini ve çevresel etkilerin azaltılmasını hedeflemektedir.

Bununla birlikte, atık plastik yakıtlarının yaygınlaşmasının önünde teknolojik, ekonomik ve yasal engeller bulunmaktadır. Teknolojik zorluklar arasında, plastik atıkların heterojen yapısı, kirlilik ve kontaminasyon sorunları, proses kontrolü ve ürün kalitesi gibi faktörler yer almaktadır. Farklı plastik türlerinin karışık olarak işlenmesi, ürün kalitesini olumsuz etkileyebilmekte ve ek arıtma işlemleri gerektirebilmektedir. Ekonomik açıdan, atık plastik yakıtlarının üretim maliyetleri, geleneksel fosil yakıtlara göre daha yüksek olabilmektedir. Bu durum, özellikle petrol fiyatlarının düşük olduğu dönemlerde, atık plastik yakıtlarının rekabet gücünü azaltmaktadır. Ayrıca, atık plastiklerin toplanması, taşınması ve ön işleme tabi tutulması gibi lojistik maliyetler de önemli bir faktördür.

Bu zorlukların aşılması ve fırsatların değerlendirilmesi için, teknolojik inovasyonlar, politika destekleri ve araştırma-geliştirme çalışmaları büyük önem taşımaktadır. Atık plastik yakıtlarının üretim teknolojilerinin geliştirilmesi, enerji verimliliğinin artırılması ve ürün kalitesinin iyileştirilmesi için, araştırma-geliştirme çalışmalarına ağırlık verilmelidir. Özellikle, katalizör teknolojileri, reaktör tasarımları ve proses optimizasyonu konularında inovasyonlar, atık plastik yakıtlarının üretim verimini ve kalitesini artırabilmektedir.

Katalizör teknolojileri alanında, nano-yapılı katalizörler, bi-fonksiyonel ve hiyerarşik katalizörler, katalizör deaktivasyonunun önlenmesi ve yeşil katalizör sentezi gibi konularda araştırmalar yoğunlaştırılmalıdır. Nano-boyutlu katalizör partikülleri, yüksek yüzey alanı/hacim oranı sayesinde gelişmiş katalitik aktivite sunmaktadır. Mezogözenekli silika, grafen oksit destekli metal nanopartiküller ve metal-organik çerçeve yapıları gibi nano-yapılı katalizörler, plastik atıkların daha düşük sıcaklıklarda ve daha yüksek seçicilikle dönüştürülmesini sağlayabilir.

Dijital teknolojilerin entegrasyonu da atık plastik yakıtı üretim süreçlerinin optimize edilmesinde önemli rol oynayabilir. Yapay zeka ve makine öğrenmesi algoritmaları, büyük veri analizi, proses optimizasyonu ve karar destek sistemleri için kullanılabilir. Bu teknolojiler, atık plastik yakıtı üretim süreçlerinin verimini artırabilir ve ürün kalitesini iyileştirebilir. Ayrıca, piroliz ve gazlaştırma reaktörlerinin ve sistemlerinin dijital ikizleri, sanal ortamda proses simülasyonu, optimizasyonu ve arıza tespiti için kullanılabilir.

Politika destekleri açısından, atık yönetimi mevzuatının atık plastiklerin yakıt olarak değerlendirilmesini teşvik edecek şekilde düzenlenmesi, atık hiyerarşisinde enerji geri kazanımının konumunun netleştirilmesi ve atık-son kriterlerinin belirlenmesi önem taşımaktadır. Ekonomik teşvik mekanizmalarının geliştirilmesi, atık plastik yakıtlarının rekabet

gücünün artırılmasına katkıda bulunabilmektedir. Karbon fiyatlandırma mekanizmaları, atık bertaraf vergilerinin artırılması, yenilenebilir enerji teşvikleri ve vergi indirimleri gibi politika araçları, atık plastik yakıtlarının ekonomik fizibilitesini iyileştirebilmektedir.

Araştırma-geliştirme çalışmalarının yoğunlaştırılması gereken alanlar arasında, atık plastiklerin heterojen yapısının üretim süreçleri ve ürün kalitesi üzerindeki etkilerinin incelenmesi, katalizör teknolojilerinin geliştirilmesi, atık plastik yakıtlarının içten yanmalı motorlarda kullanımının optimizasyonu, yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmaları, sosyo-ekonomik etkilerin analizi ve biyoplastiklerin atık-enerji dönüşümü süreçlerindeki davranışlarının incelenmesi yer almaktadır.

İçten yanmalı motorlarda atık plastik yakıtlarının optimizasyonu için, yakıt formülasyonu ve katkı maddeleri, ileri yanma stratejileri, egzoz gazı arıtma sistemleri ve motor dayanıklılığı konularında araştırmalar yapılmalıdır. Atık plastiklerden elde edilen sıvı yakıtlar, genellikle geniş bir hidrokarbon dağılımına sahiptir ve konvansiyonel yakıtlara göre farklı fizikokimyasal özellikler gösterebilir. Bu yakıtların viskozite, yoğunluk, setan/oktan sayısı, buhar basıncı ve soğuk akış özellikleri gibi parametrelerinin iyileştirilmesi için katkı maddeleri ve yakıt formülasyonları geliştirilmelidir.

Sonuç olarak, atık plastik yakıtları, yeşil dönüşüm sürecinde önemli bir rol oynamakta ve sürdürülebilir bir gelecek için değerli bir kaynak sunmaktadır. Bu potansiyelin tam olarak değerlendirilmesi, teknoloji, politika ve toplum boyutlarında bütüncül bir yaklaşımı gerektirmektedir. Atık plastiklerin yakıtla dönüştürülmesi, hem atık yönetimi sorununa çözüm getirmekte hem de yenilenebilir enerji üretimine katkı sağlayarak, yeşil dönüşüm hedeflerine ulaşılmasına yardımcı olmaktadır. Gelecekte, atık plastik yakıtlarının yeşil dönüşümdeki rolünün daha da artması beklenmektedir.

Kaynaklar

- [1] Budak, Y., & Keçeci, M. (2024). Sıfır atık ile yeşil dönüşüm: Türkiye'nin geleceği için çevre dostu kozmetik ve temizlik ürünleri. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 13(3), 145–155.
- [2] Plastics Europe. (2023). Plastics - the facts 2022: An analysis of European plastics production, demand and waste data. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2022/>
- [3] Aktürk Bozdemir, E., & Budak, Y. (2025). Nano-biyokimya ve yapay zekâ ile çevresel dönüşüm: Yenilikçi çözümler ve sürdürülebilir uygulamalar. *Mühendislik Alanında Multidisipliner Araştırma ve Değerlendirmeler*, 25.
- [4] King, S., & Locock, K. E. S. (2022). A circular economy framework for plastics: A semi-systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 364, 132503. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132503>
- [5] Budak, Y., & Aktürk Bozdemir, E. (2025). Temizlik ve güzelliğin gizli maliyeti: Mikrobiyomun sağlığını ve gezegenimizi nasıl etkilediği ve yeşil kimya ve döngüsel ekonomi ile çözümler. *Türk Bilim ve Sağlık Dergisi*, 6(2), 116–132. <https://doi.org/10.51972/tfsd.1674940>
- [6] Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2023). Sıfır Atık Projesi. <https://sifiratik.gov.tr/>
- [7] Yakışık, H. (2023). Plastik atıklar ve sürdürülebilirlik: Türkiye'de plastik atık yönetimi. *Giresun Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 9(2), 36–55. <https://doi.org/10.46849/guiibd.1403473>
- [8] Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, 24–58.
- [9] Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782.
- [10] Law, K. L. (2017). Plastics in the marine environment. *Annual Review of Marine Science*, 9, 205–229.
- [11] Verma, R., Vinoda, K. S., Papireddy, M., & Gowda, A. N. S. (2016). Toxic pollutants from plastic waste: A review. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 701–708.
- [12] Frias, J. P. G. L., & Nash, R. (2019). Microplastics: Finding a consensus on the definition. *Marine Pollution Bulletin*, 138, 145–147.
- [13] Rochman, C. M., Tahir, A., Williams, S. L., Baxa, D. V., Lam, R., Miller, J. T., Teh, F. C., Werorilangi, S., & Teh, S. J. (2015). Anthropogenic debris in seafood: Plastic debris and fibers from textiles in fish and bivalves sold for human consumption. *Scientific Reports*, 5, 14340.
- [14] de Souza Machado, A. A., Lau, C. W., Till, J., Kloas, W., Lehmann, A., Becker, R., & Rillig, M. C. (2018). Impacts of microplastics on the soil

- biophysical environment. *Environmental Science & Technology*, 52(17), 9656–9665. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02212>
- [15] Leslie, H. A., van Velzen, M. J. M., Brandsma, S. H., Vethaak, A. D., Garcia-Vallejo, J. J., & Lamoree, M. H. (2022). Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environment International*, 163, 107199.
- [16] Miandad, R., Barakat, M. A., Aburiazaiza, A. S., Rehan, M., & Nizami, A. S. (2016). Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 102, 822–836.
- [17] Çepeliogullar, Ö., & Pütün, A. E. (2013). Thermal and kinetic behaviors of biomass and plastic wastes in co-pyrolysis. *Energy Conversion and Management*, 75, 263–270.
- [18] Rahimi, A., & García, J. M. (2017). Chemical recycling of waste plastics for new materials production. *Nature Reviews Chemistry*, 1(6), 0046.
- [19] R., & Eroğlu, A. (2021). Malatya ilindeki atık plastiklerin dizel motor yakıtı olarak değerlendirilmesi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11(1), 563–574. <https://doi.org/10.21597/jist.798105>
- [20] Kunwar, B., Cheng, H. N., Chandrashekar, S. R., & Sharma, B. K. (2016). Plastics to fuel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 421–428.
- [21] Sharuddin, S. D. A., Abnisa, F., Daud, W. M. A. W., & Aroua, M. K. (2016). A review on pyrolysis of plastic wastes. *Energy Conversion and Management*, 115, 308–326.
- [22] Arena, U. (2012). Process and technological aspects of municipal solid waste gasification: A review. *Waste Management*, 32(4), 625–639.
- [23] Abnisa, F., & Daud, W. M. A. W. (2014). A review on co-pyrolysis of biomass: An optional technique to obtain a high-grade pyrolysis oil. *Energy Conversion and Management*, 87, 71–85.
- [24] Lopez, G., Artetxe, M., Amutio, M., Bilbao, J., & Olazar, M. (2017). Thermochemical routes for the valorization of waste polyolefinic plastics to produce fuels and chemicals: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 346–368.
- [25] Veksha, A., Giannis, A., & Chang, V. W. C. (2017). Conversion of non-condensable pyrolysis gases from plastic wastes to carbon nanotubes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 124, 16–24.
- [26] Nizami, A. S., Rehan, M., Ouda, O. K. M., Shahzad, K., Sadeq, Y., Iqbal, T., & Ismail, I. M. I. (2015). An argument for developing waste-to-energy technologies in Saudi Arabia. *Chemical Engineering Transactions*, 45, 337–342.
- [27] Avrupa Komisyonu. (2020). Avrupa Yeşil Mutabakatı. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

- [28] Ellen MacArthur Foundation. (2021). The new plastics economy: Rethinking the future of plastics – Five years of progress. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications>
- [29] T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2021). Türkiye Çevre Ajansı Kurulmasına Dair Kanun. Resmî Gazete, 30 Aralık 2020, Sayı: 31350.
- [30] Uluslararası Enerji Ajansı (IEA). (2022). World energy outlook 2022. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- [31] Doğan, S., & Aytaç, A. (Eds.). (2022). Yeşil dönüşüm ve döngüsel ekonomi. Çanakkale: Paradigma Akademi.
- [32] Reike, D., Vermeulen, W. J. V., & Witjes, S. (2018). The circular economy: New or refurbished as CE 3.0? Exploring controversies in the conceptualization of the circular economy through a focus on history and resource value retention options. *Resources, Conservation and Recycling*, 135, 246–264.
- [33] Birleşmiş Milletler. (2015). Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>
- [34] T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2022). Türkiye Çevre Ajansı Stratejik Planı 2022-2026. <https://www.tuca.gov.tr/>
- [35] Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: Challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2115–2126.
- [36] Hernández, I., & Nolasco, J. (2025). Plastic recycling for liquid fuel production and its use in thermal engines. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 26(5), 61–81. <https://doi.org/10.12912/27197050/202778>
- [37] Hasan, M. M., Rasul, M. G., Jahirul, M. I., & Sattar, M. A. (2024). An Aspen Plus process simulation model for exploring the feasibility and profitability of the pyrolysis process for plastic waste management. *Journal of Environmental Management*, 355, 120557. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120557>
- [38] Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768.
- [39] OECD. (2022). Global plastics outlook: Economic drivers, environmental impacts and policy options. OECD Publishing, Paris.
- [40] Aydın, M., & Engin, G. (2023). Temiz üretim, yeşil mutabakat ve sürdürülebilir atık yönetimi. Türkiye Bilimler Akademisi. <https://doi.org/10.53478/TUBA.978-625-8352-57-3>
- [41] Yıldız, A., Akgül, S., & Güvercin, S. (2017). Sanayide enerji verimliliği ve uygulamaları. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 2147–3455.

- [42] Demirkıran, A. (2019). Enerji sorunlarına nanoteknolojinin faydaları. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 8(2), 29–75.
- [43] Mani, M., Subash, C., & Nagarajan, G. (2009). Performance, emission and combustion characteristics of a DI diesel engine using waste plastic oil. *Applied Thermal Engineering*, 29(13), 2738–2744.
- [44] Bilgili, M. Y. (2020). Katı atık yönetiminde kullanılan bazı kavramlar ve açıklamaları. *Avrasya Terim Dergisi*, 8(2), 88–97.
- [45] OECD. (2021). *Effective carbon rates 2021: Pricing carbon emissions through taxes and emissions trading*. OECD Publishing, Paris.

Laboratuvar Güvenliği: Plastik Yakıt Araştırmalarında Organik Kimya Uygulamaları

Mustafa Ceylan¹

Özet

Bu çalışma, plastik atıkların yakıt ve değerli kimyasallara dönüştürülmesi süreçlerinde laboratuvar ortamında karşılaşılan güvenlik risklerini ve organik kimya perspektifinden alınması gereken önlemleri kapsamlı biçimde incelemektedir. Plastik atıkların piroliz, katalitik parçalanma ve gazlaştırma gibi termokimyasal dönüşüm yöntemleriyle yakıtı dönüştürülmesi süreçleri, yüksek sıcaklık, basınç ve reaktif kimyasalların kullanımı nedeniyle çeşitli güvenlik riskleri içermektedir. Araştırmada, laboratuvar ortamında plastik yakıt dönüşüm süreçlerinde ortaya çıkan toksik gazlar, yanma ve patlama riski taşıyan kimyasallar, termal ve mekanik tehlikeler detaylı olarak ele alınmıştır. Organik kimya perspektifinden, plastik polimerlerin yapısal özellikleri, termal parçalanma mekanizmaları ve bu süreçlerde oluşan ara ürünlerin tehlike potansiyelleri incelenmiştir. Çalışmada ayrıca, risk değerlendirme metodolojileri, mühendislik kontrolleri, kişisel koruyucu ekipmanlar ve acil durum prosedürleri gibi güvenlik yönetimi stratejileri tartışılmıştır. Laboratuvar güvenliğinin yasal çerçevesi, ulusal ve uluslararası standartlar ışığında değerlendirilmiş, Türkiye'deki mevcut uygulamalar ve eksiklikler ortaya konmuştur. Sonuç olarak, plastik yakıt araştırmalarının sürdürülebilir ve güvenli biçimde yürütülebilmesi için bütünsel bir güvenlik yaklaşımının benimsenmesi, düzenli risk değerlendirmelerinin yapılması ve laboratuvar personelinin kapsamlı eğitimi önerilmektedir. Bu çalışma, plastik atıkların yönetiminde yenilikçi çözümler geliştiren araştırmacılar için güvenlik odaklı bir rehber niteliği taşımaktadır.

1 Prof.Dr.,Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, mustafac.ceylan@gop.edu.tr, 0000-0002-9184-4385

1. Giriş

1.1. Plastik Atık Sorunu ve Yakıt Dönüştürme Çalışmalarının Önemi

Dünya genelinde plastik atık miktarı hızla artmakta ve bu durum ciddi çevresel sorunlara yol açmaktadır. Plastik atıklar, kimyasal yapıları nedeniyle doğada kolayca çözünmez ve hem makro hem mikro boyutlarda tüm ekosistemi kirletir. Petrokimyasallardan üretilen plastikler, yaygın kullanımları ve düşük geri dönüşüm oranlarıyla en önemli kirleticilerden biridir. [1]. Plastik atıkların doğada parçalanması yüzlerce yıl sürebilmekte, bu süreçte mikrop plastikler oluşmakta ve gıda zincirine dâhil olmaktadır [2]. Bu nedenle, plastik atıkların etkin yönetimi ve değerli ürünlere dönüştürülmesi kritik önem taşımaktadır.

Plastik atıkların yakıtı dönüştürülmesi, atık yönetimi ve enerji üretimi açısından sürdürülebilir bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Piroliz, katalitik parçalanma ve gazlaştırma gibi termokimyasal dönüşüm yöntemleri, plastik atıkların içerdii karbon ve hidrojen bakımından zengin yapıyı, sıvı yakıtlara, gaz ürünlere ve değerli kimyasallara dönüştürebilmektedir [3]. Bu yöntemler, mekanik geri dönüşümün uygun olmadığı karışık ve kontamine plastik atıklar için alternatif çözüm sunmaktadır.

1.2. Laboratuvar Güvenliğinin Plastik Yakıt Araştırmalarındaki Kritik Rolü

Plastik yakıt dönüşüm süreçleri, laboratuvar ortamında yüksek sıcaklık, basınç ve reaktif kimyasalların kullanımını gerektirmektedir. Bu koşullar, araştırmacılar için çeşitli sağlık ve güvenlik riskleri oluşturmaktadır. Kimya laboratuvarlarında meydana gelen kazaların büyük çoğunluğu tehlikeli kimyasalların kullanımı ve termokimyasal işlemlerden kaynaklanmaktadır [4]. Bu nedenle, plastik yakıt araştırmalarında laboratuvar güvenliği, bilimsel ilerlemenin sürdürülebilirliği ve araştırmacıların sağlığı açısından hayati önem taşımaktadır.

Organik kimya, plastik polimerlerin yapısını, kimyasal davranışlarını ve termal parçalanma mekanizmalarını anlamamıza olanak sağlayarak, laboratuvar güvenliği için temel bir perspektif sunmaktadır. Polimerlerin ısı parçalanması sırasında oluşan ara ürünlerin tanımlanması, potansiyel tehlikelerin öngörülmesi ve uygun güvenlik önlemlerinin alınması için organik kimya bilgisi önemlidir [5].

Bu çalışma, plastik yakıt araştırmalarında organik kimya perspektifinden laboratuvar güvenliğini kapsamlı biçimde ele almaktadır. Çalışmada,

plastik türlerinin termal parçalanma mekanizmaları, laboratuvar ortamında karşılaşılan kimyasal, fiziksel ve biyolojik tehlikeler, risk değerlendirme metodolojileri ve güvenlik yönetimi stratejileri incelenmektedir. Ayrıca, Türkiye'deki ve dünyadaki laboratuvar güvenliği standartları, yasal düzenlemeler ve örnek vaka analizleri sunulmaktadır.

2. Plastik Yakıt Dönüşüm Süreçlerinin Temel Prensipleri

2.1. Plastiklerin Kimyasal Yapısı ve Termal Davranışları

Plastikler, esas olarak karbon ve hidrojen atomlarından oluşan, yüksek molekül ağırlıklı polimerlerdir ve endüstride en yaygın olarak kullanılan türler arasında polietilen (PE), polipropilen (PP), polistiren (PS), polietilen tereftalat (PET) ve polivinil klorür (PVC) yer almaktadır. Her bir plastik türü, kendine özgü kimyasal yapısı ve termal özellikleriyle farklılık gösterir; bu farklılıklar, güvenlik açısından da çeşitli risk profillerinin ortaya çıkmasına neden olur. Örneğin, polietilen doğrusal bir hidrokarbon zincirine sahipken, polipropilen zincirinde her ikinci karbon atomuna bağlı metil grupları bulunur. Polistirenin yapısında ana zincire bağlı benzen halkaları yer alırken, PET polimeri aromatik halka ve ester bağları içerir; PVC ise yapısında klor atomları barındırır. Bu yapısal çeşitlilik, plastiklerin termal bozunma sıcaklıklarını, bozunma mekanizmalarını ve oluşan ürünleri doğrudan etkiler.

Plastiklerin termal bozunması genel olarak üç temel mekanizma ile gerçekleşir: rastgele zincir kopması, zincir ucu kopması ve yan grup eliminasyonu. Rastgele zincir kopması, özellikle PE ve PP gibi polimerlerde zincirin rastgele noktalarından kırılmasıyla daha küçük moleküllerin oluşmasına yol açar. Zincir ucu kopması ise polimerin uç kısımlarından başlayarak monomer birimlerinin ayrılması şeklinde gerçekleşir ve bu mekanizma polistirenin termal bozunmasında baskındır. Yan grup eliminasyonu ise PVC gibi yan gruplar içeren polimerlerde, bu grupların ayrılmasıyla meydana gelir. Tüm bu mekanizmalar, plastiklerin termal davranışlarını ve çevresel etkilerini belirleyen temel faktörlerdir [6,7,8].

2.2. Piroliz Süreci ve Güvenlik Faktörleri

Piroliz, organik maddelerin oksijensiz bir ortamda ısı olarak parçalanması süreci olup, plastik atıkların pirolizi genellikle 400-600°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilir. Bu işlem sonucunda pirolitik yağ olarak adlandırılan sıvı yakıt, gaz ürünler ve katı kalıntı elde edilir. Piroliz süreci, laboratuvar koşullarında yüksek sıcaklık ve basınç gerektirmesi ile birlikte yanıcı ve patlayıcı ürünlerin oluşumu nedeniyle önemli güvenlik riskleri taşır.

Plastik pirolizinde güvenliği etkileyen başlıca faktörler arasında sıcaklık kontrolü, oksijen kontrolü, basınç yönetimi ve toksik emisyonların kontrolü bulunmaktadır. Sıcaklık kontrolünün sağlanamaması ani sıcaklık artışlarına ve kontrolsüz reaksiyonlara, dolayısıyla tehlikeli basınç yükselmelerine yol açabilir. Sisteme oksijen sızması, yanma reaksiyonlarının başlamasına ve patlama riskinin artmasına neden olurken, özellikle kapalı sistemlerde gaz ürünlerin birikmesi tehlikeli düzeyde basınç artışlarına sebep olabilir. Ayrıca, piroliz sırasında çeşitli toksik gazlar ve buharlar açığa çıkabileceğinden, bu emisyonların etkin bir şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir. Tüm bu faktörler, plastik pirolizi uygulamalarında güvenliğin sağlanması açısından kritik öneme sahiptir [9,10].

2.3. Katalitik Dönüşüm Yöntemleri ve Kimyasal Etkileşimler

Katalitik dönüşüm, plastik pirolizinde reaksiyon sıcaklığını düşürmek, ürün seçiciliğini artırmak ve daha değerli kimyasal ürünler elde etmek amacıyla çeşitli katalizörlerin kullanıldığı süreçleri ifade eder. Bu amaçla en yaygın olarak zeolitler (örneğin ZSM-5 ve Y-zeoliti), metal oksitler (Al_2O_3 , Fe_2O_3), akışkan katalitik parçalama (FCC) katalizörleri ve destekli metal katalizörler tercih edilmektedir.

Katalitik süreçler, reaktif ara ürünlerin oluşumu, katalizörün rejenerasyonu sırasında karbon birikimi ve metal tuzlarının korozyif etkileri gibi ek güvenlik risklerini de beraberinde getirir. Özellikle asidik karaktere sahip katalizörler, korozyif özellikleri nedeniyle cilt ve solunum yolu tahrişine yol açabilir. Metal içeren katalizörler ise bazı koşullarda pirofosforik özellik gösterebilir ve hava ile temas ettiklerinde kendiliğinden tutuşma riski oluşturabilir. Bu nedenle, katalitik plastik dönüşüm süreçlerinde hem kimyasal hem de fiziksel güvenlik önlemlerinin titizlikle uygulanması gerekmektedir [11,12].

2.4. Gazlaştırma ve Hidrojenasyon Süreçleri

Gazlaştırma, plastik atıkların yüksek sıcaklıkta (800-1000°C) kısmi oksidasyonu ile sentez gazı (CO ve H_2) elde edilmesini sağlayan bir termokimyasal dönüşüm yöntemidir. Hidrojenasyon ise, plastiklerin hidrojen atmosferinde parçalanarak daha değerli hidrokarbon ürünlerine dönüştürülmesini içermektedir.

Bu iki süreç, pirolize kıyasla daha yüksek sıcaklık ve basınç gereksinimleri, hidrojen gibi son derece yanıcı gazların kullanımı ve karbon monoksit gibi toksik gazların oluşumu nedeniyle önemli ölçüde artan güvenlik riskleri taşıır [13]. Özellikle hidrojen kullanılan işlemlerde, gaz sızıntılarının önlenmesi ve patlama riskine karşı uygun güvenlik ekipmanlarının kullanılması kritik öneme

sahiptir. Ayrıca, karbon monoksit gibi toksik gazların kontrolü ve ortamdan uzaklaştırılması da süreç güvenliği açısından dikkatle yönetilmelidir.

3. Laboratuvar Ortamında Karşılaşılan Kimyasal Tehlikeler

3.1. Plastik Türlerine Göre Piroliz Ürünleri ve Toksikolojik Etkileri

Farklı plastik türlerinin pirolizi sonucunda ortaya çıkan kimyasal bileşikler ve bunların toksikolojik özellikleri, süreç güvenliği açısından kritik öneme sahiptir. Polietilenin (PE) pirolizi sırasında çoğunlukla C₅-C₂₀ aralığında alifatik hidrokarbonlar, n-parafinler, α -olefinler ve dallı alkanlar oluşur; bu buharlar solunum yolu irritasyonu ve merkezi sinir sistemi depresyonu gibi etkilere yol açabilir, yüksek konsantrasyonlarda ise hipoksi ve asfiksi riski taşır.

Polipropilenin (PP) pirolizinde ise dallı olefinler, 2,4-dimetil-1-hepten gibi metil-süstitüe alkenler ve düşük oranda aromatik bileşikler oluşur; bu ürünler PE piroliz ürünlerine benzer toksikolojik etkilere sahip olmakla birlikte, daha yüksek reaktiviteye sahip olefinlerin oranı daha fazladır.

Polistirenin (PS) pirolizinde ise baskın olarak stiren monomeri, toluen, etilbenzen ve α -metilstiren gibi aromatik bileşikler meydana gelir; özellikle stiren, Uluslararası Kanseri Araştırma Ajansı tarafından Grup 2A olarak sınıflandırılmış olup, uzun süreli maruziyette karaciğer, böbrek ve merkezi sinir sistemi hasarına neden olabilmektedir.

Polietilen tereftalatın (PET) pirolizinde benzoik asit, tereftalik asit, benzen, toluen ve vinil benzoat gibi aromatik ve oksijenli bileşikler oluşur; bu maddeler solunum yolu ve göz irritasyonu, merkezi sinir sistemi etkileri ve uzun süreli maruziyette karaciğer ile böbrek hasarı riski taşır.

Polivinil klorürün (PVC) pirolizi ise en riskli süreçlerden biridir; düşük sıcaklıklarda hidrojen klorür (HCl) gazı açığa çıkarken, daha yüksek sıcaklıklarda klorlu aromatik bileşikler oluşur. HCl gazı şiddetli solunum yolu ve göz irritasyonuna yol açarken, klorlu aromatikler biyobirikime ve kalıcı toksik etkilere neden olabilmektedir. Tüm bu ürünlerin oluşumu ve potansiyel sağlık etkileri, plastik pirolizi sırasında alınacak güvenlik önlemlerinin belirlenmesinde temel rol oynamaktadır [15-17].

3.2. Toksik Gazlar ve Buharlar

Plastik pirolizi sırasında açığa çıkan başlıca toksik gazlar ve bunların sağlık üzerindeki etkileri, süreç güvenliği açısından büyük önem taşır. Karbon monoksit (CO), tüm plastik piroliz işlemlerinde farklı oranlarda

oluşabilen, hemoglobine oksijenden çok daha yüksek afiniteyle bağlanarak karboksihemoglobin oluşturur ve oksijen taşınmasını engeller; 50 ppm üzerindeki konsantrasyonlarda baş ağrısı, baş dönmesi ve bilinç kaybı gibi ciddi semptomlara yol açabilir.

Hidrojen klorür (HCl), özellikle PVC pirolizinde yüksek miktarda ortaya çıkar ve şiddetli solunum yolu irritanıdır; 35 ppm üzerindeki seviyelerde akciğer ödemi riski oluşturur ve aynı zamanda laboratuvar ekipmanlarında korozyona neden olabilir.

Hidrojen siyanür (HCN), azot içeren plastiklerin (örneğin poliamid, poliüretan, akrilonitril butadien stiren) pirolizinde oluşabilir ve 50 ppm üzerindeki konsantrasyonlarda hızla ölümcül etki gösterebilir.

Formaldehit ve asetaldehit gibi düşük molekül ağırlıklı aldehitler, çeşitli plastiklerin oksidatif parçalanması sırasında oluşur; formaldehit, Grup 1 kanserojen olarak sınıflandırılmış olup, düşük konsantrasyonlarda dahi göz ve solunum yolu irritasyonuna neden olur.

Benzen ve türevleri ise aromatik içerikli plastiklerin pirolizinde ortaya çıkar; benzen, Grup 1 kanserojen olarak kabul edilir ve uzun süreli maruziyet lösemi riskini artırır. Bu gazların oluşumu ve potansiyel sağlık etkileri, plastik pirolizi sırasında etkin havalandırma, gaz izleme ve kişisel koruyucu ekipman kullanımının gerekliliğini ortaya koymaktadır [18,19].

3.3. Yanıcı ve Patlayıcı Maddeler

Plastik pirolizi sırasında oluşan yanıcı ve patlayıcı ürünler, laboratuvar güvenliği açısından ciddi riskler oluşturur. Metan, etan, propan ve bütan gibi hafif alifatik hidrokarbonlar, düşük parlama noktalarına ve geniş patlama limitlerine sahip olmaları nedeniyle yüksek tehlike potansiyeli taşır; örneğin, metanın havadaki patlama limitleri % 5-15 arasında değişmektedir.

Hidrojen ise PE, PP ve PS pirolizinde oluşabilen, son derece yanıcı bir gazdır ve havada % 4-75 aralığında çok geniş bir patlama limitine sahiptir; düşük tutuşma enerjisi nedeniyle statik elektrik de dahil olmak üzere en küçük bir kıvılcım bile tutuşmasına yol açabilir.

Benzen, toluen ve ksilen gibi aromatik hidrokarbonlar da yanıcı olup, buharları hava ile patlayıcı karışımlar oluşturabilir; benzenin parlama noktası -11°C, toluenin ise 4°C'dir.

Stiren ise PS pirolizinde yüksek oranda oluşan bir bileşiktir ve parlama noktası 31°C'dir; ısı, kıvılcım ve açık alevden uzak tutulması gerekir. Ayrıca, stiren peroksit oluşturma eğilimi gösterdiğinden, bu durum ek bir patlama riski yaratır. Tüm bu özellikler, plastik pirolizi sırasında oluşan ürünlerin

dikkatli bir şekilde yönetilmesini ve uygun güvenlik önlemlerinin alınmasını zorunlu kılar [19-21].

3.4. Korozi ve Tahriş Edici Kimyasallar

Plastik piroliz süreçlerinde ortaya çıkan korozi ve tahriş edici kimyasallar, hem ekipman güvenliği hem de insan sağlığı açısından önemli riskler oluşturur. PVC pirolizinde oluşan hidrojen klorür (HCl), metal ekipmanlarda ciddi korozyona yol açarken, aynı zamanda cilt, göz ve solunum yollarında şiddetli tahrişe neden olabilir.

Organik asitler, özellikle asetik asit ve formik asit gibi karboksilik asitler, oksijenli plastiklerin pirolizinde oluşabilir ve düşük konsantrasyonlarda dahi mukoza zarlarında irritasyona sebep olabilir.

Fenol ve türevleri ise özellikle polistiren ve epoksi reçinelerin pirolizinde ortaya çıkar; fenol, güçlü cilt korozyonuna yol açabilen ve deriden hızla emilebilen bir bileşiktir. Bu kimyasalların varlığı, piroliz süreçlerinde uygun malzeme seçimi, kişisel koruyucu ekipman kullanımı ve etkin havalandırma sistemlerinin gerekliliğini ortaya koymaktadır [22,23].

4. Fiziksel Tehlikeler

4.1. Yüksek Sıcaklık ve Basınç Riskleri

Plastik piroliz deneyleri genellikle 400-600°C sıcaklık aralığında gerçekleştirildiğinden, termal yanık riski oldukça yüksektir. Kapalı reaktör sistemlerinde piroliz sırasında gaz ürünlerin birikmesiyle basınç artışı meydana gelebilir; basınç tahliye sistemlerinin yetersiz veya hiç bulunmaması durumunda ise reaktör patlaması riski ortaya çıkar. Özellikle yüksek basınçlı hidrojenasyon reaktörlerinde bu risk daha da belirgindir.

Türkiye’de üniversite laboratuvarlarında meydana gelen kazaların birçoğu yüksek sıcaklık kaynaklı yanıklardan, ikinci olarak da basınç kaynaklı patlamalardan kaynaklandığı rapor edilmiştir. Bu veriler, plastik piroliz ve benzeri termokimyasal süreçlerde sıcaklık ve basınç kontrolünün, güvenliğin sağlanmasında kritik rol oynadığını göstermektedir [24,25].

4.2. Elektrik Güvenliği

Laboratuvar ortamlarında kullanılan piroliz cihazları, yüksek güç tüketimi, ısıtma elemanları ve karmaşık kontrol sistemleri nedeniyle elektrik kaynaklı çeşitli riskler barındırır. Özellikle yanıcı ve patlayıcı gazların bulunduğu ortamlarda bu riskler daha da kritik hale gelir.

Kısa devreler ve aşırı yüklenme, topraklama eksiklikleri, statik elektrik birikimi ve deşarjı ile nem veya koroziif gazların elektrik sistemleri üzerindeki olumsuz etkileri, başlıca elektriksels tehlikeler arasında yer alır. Yanıcı gazların bulunduğu laboratuvarlarda, patlama riskini en aza indirmek için ATEX (Atmosphères Explosibles) sertifikalı ekipmanların kullanılması büyük önem taşır. Bu tür ortamlarda, elektrikli cihazların düzenli bakımı, uygun topraklama ve statik elektrikten korunma önlemleri alınması, güvenliğin sağlanması temel gerekliliklerdendir [26].

4.3. Mekanik Tehlikeler

Piroliz ekipmanlarının tasarımı ve kullanımı sırasında çeşitli mekanik tehlikeler ortaya çıkabilir. Döner parçalar, keskin yüzeyler ve kenarlar, yüksek basınçlı hortum veya bağlantıların kopması ile ağır ekipmanların taşınması sırasında oluşabilecek ergonomik riskler, başlıca mekanik tehlikeler arasında yer alır.

Bu tür risklerin etkin bir şekilde yönetilebilmesi için, ekipmanların düzenli bakımı, koruyucu muhafazaların kullanılması ve güvenli çalışma prosedürlerinin oluşturulup uygulanması gereklidir. Ayrıca, personelin uygun kişisel koruyucu donanım kullanması ve ekipmanların doğru şekilde taşınması da mekanik yaralanmaların önlenmesinde önemli rol oynar [27].

5. Biyolojik Tehlikeler ve Atık Yönetimi

5.1. Mikrobiyal Kontaminasyon Riskleri

Laboratuvara getirilen plastik atıklar, sıklıkla gıda artıkları, toprak veya diğer organik maddelerle kontamine olmuş olabilir ve bu durum özellikle ön işlem aşamasında mikrobiyal kontaminasyon riskini artırır. Kontamine plastiklerden kaynaklanabilecek biyolojik tehlikeler arasında bakteriyel ve fungal patojenler, endotoksinler ve mikotoksinler ile alerjik reaksiyonlara yol açabilecek biyolojik ajanlar bulunur.

Bu tür mikrobiyal risklerin en aza indirilmesi için, plastik numunelerin laboratuvara alınmadan önce uygun şekilde temizlenmesi, gerekirse sterilizasyon yöntemlerinin uygulanması ve kişisel hijyen kurallarına titizlikle uyulması gerekmektedir. Ayrıca, çalışma alanlarının düzenli olarak dezenfekte edilmesi ve koruyucu ekipman kullanımı da biyolojik tehlikelerin kontrolünde önemli rol oynar [28,29].

5.2. Atık Sınıflandırma ve Bertaraf

Plastik yakıt araştırmalarında oluşan atıklar, kimyasal kompozisyonları ve toksikolojik özellikleri nedeniyle tehlikeli atık sınıflandırmasına tabi olabilir ve spesifik bertaraf metodolojileri gerektirir. Atık yönetimi stratejisinde dikkate alınması gereken temel atık kategorileri şu şekilde sınıflandırılabilir:

Katı Atıklar:

Piroliz prosesi sonucunda oluşan karbonize kalıntılar, yapılarında adsorbe edilmiş toksik bileşikler ve ağır metaller içerebilir

Deactive olmuş katalizörler, özellikle metal içerikli olanlar, çevresel kontaminasyon potansiyeli taşır.

Organik ve inorganik kirleticilerle kontamine olmuş filtrasyon materyalleri olabilir.

Termal ve kimyasal strese maruz kalmış laboratuvar ekipmanları.

Sıvı Atıklar:

Karakterizasyon veya saflaştırma işlemlerine tabi tutulmamış pirolitik sıvı ürünler, polisiklik aromatik hidrokarbonlar ve heterosiklik bileşikler içerebilir

Kondensasyon sistemlerinde biriken, yüksek konsantrasyonda organik bileşikler içeren sıvıları.

Ekipman dekontaminasyonunda kullanılan solventler ve temizleme çözeltileri.

Kromatografik ve spektroskopik analizlerden kaynaklanan organik çözücüler ve reaktifleri.

Gaz Fazı Atıklar:

Emisyon kontrol sistemlerinin tutma verimliliğini aşan uçucu organik bileşikler ve inorganik gazlar.

Analitik enstrümantasyondan salınan kalibrasyon ve taşıyıcı gazlar.

Bu atıkların yönetiminde, atığın fizikokimyasal karakterizasyonu temelinde uygun bertaraf metodolojileri seçilmelidir. Piroliz kalıntıları, özellikle halojenli plastiklerden elde edilenler, yüksek klor içeriği nedeniyle dioksin ve furan oluşturma potansiyeli taşıdığından, tehlikeli atık olarak değerlendirilmelidir.

Bilimsel literatürde önerilen atık bertaraf metodolojileri arasında şunlar bulunmaktadır:

Termal oksidasyon: Kontrollü koşullarda ($>850^{\circ}\text{C}$) organik bileşiklerin tam mineralizasyonu.

İleri fizikokimyasal arıtma teknikleri: Nötralizasyon, kimyasal presipitasyon, koagölasyon-flokölasyon ve membran filtrasyonu.

Stabilizasyon/solidifikasyon: Toksik bileşenlerin mobilizasyonunu azaltan kimyasal ve fiziksel immobilizasyon teknikleri.

Katalitik hidrojenasyon veya hidrodehalogenasyon: Halojenli bileşiklerin daha az toksik formlara dönüştürölmesi.

Bu atık yönetim stratejilerinin uygulanması, hem ekotoksikolojik risklerin minimizasyonu hem de araştırma faaliyetlerinin sürdürölabilirliği açısından kritik öneme sahiptir [30-32].

5.3. Çevresel Etki ve Sürdürölabilir Laboratuvar Uygulamaları

Plastik yakıt araştırmalarının çevresel etkilerini minimize etmek için, sürdürölabilir laboratuvar uygulamalarının benimsenmesi önemlidir. Bu yaklaşımlar şunları içerebilir:

Yeşil Kimya İlkelerinin Uygulanması:

Daha güvenli çözücülerin ve reaktiflerin seçilmesi

Reaksiyon veriminin artırılması ve atık miktarının azaltılması

Enerji verimli süreçlerin tasarlanması

İşlem sayısının minimize edilmesi

Atık Azaltma Stratejileri:

Mikro-ölçekli deneyler tasarlama

Reaktif ve çözücülerin geri kazanımı ve yeniden kullanımı

Kapalı döngü sistemlerin kullanımı

Atık ayrıştırma ve uygun etiketleme

Emisyon Kontrol Teknolojileri:

Etkili havalandırma sistemleri

Scrubber ve filtrasyon sistemleri

Emisyon izleme ve raporlama

Sürdürölabilir laboratuvar uygulamaları, hem çevresel etkileri azaltmakta hem de laboratuvar güvenliğini artırmaktadır. Örneğin, daha düşük

toksositeye sahip çözücülerin kullanımı, çalışanların maruz kalacağı tehlikeleri de azaltmaktadır [33].

6. Güvenlik Yönetimi ve Risk Değerlendirme

6.1. Sistematik Risk Değerlendirme Metodolojileri

Plastik yakıt araştırmalarında güvenlik yönetiminin temelini, sistematik risk değerlendirmesi oluştırmaktadır. Risk değerlendirmesi, potansiyel tehlikelerin tanımlanması, risklerin analizi ve kontrol önlemlerinin belirlenmesini içeren yapılandırılmış bir süreçtir [34, 35].

Tehlike Tanımlama Yöntemleri:

Kontrol Listeleri: Önceden hazırlanmış kapsamlı listeler kullanılarak potansiyel tehlikelerin belirlenmesi.

What-If Analizi: “Eğer bu olursa ne olur?” sorusuna dayalı sistematik bir beyin fırtınası yaklaşımı.

Tehlike ve İşletilebilirlik Çalışması (HAZOP): İşlem parametrelerindeki sapmaların potansiyel sonuçlarının değerlendirilmesi.

Hata Modu ve Etki Analizi (FMEA): Ekipman ve süreç bileşenlerinin olası hata modlarının belirlenmesi ve etkilerinin değerlendirilmesi.

Risk Analizi ve Değerlendirme: Risk seviyesi genellikle şu formülle belirlenir: Risk = Olasılık $\times$ Şiddet

Olasılık, tehlikenin gerçekleşme ihtimalini, şiddet ise gerçekleştiğinde yaratacağı zararın büyüklüğünü ifade eder. Risk matrisleri kullanılarak, riskler düşük, orta, yüksek ve kritik olarak sınıflandırılabilir.

Kontrol Önlemlerinin Hiyerarşisi:

Eliminasyon: Tehlikenin tamamen ortadan kaldırılması

İkame: Daha az tehlikeli bir süreç veya malzeme kullanımı.

Mühendislik Kontrolleri: Fiziksel bariyerler, havalandırma sistemleri, otomatik kontrol sistemleri.

İdari Kontroller: Güvenli çalışma prosedürleri, eğitim, rotasyon.

Kişisel Koruyucu Ekipmanlar: Son savunma hattı olarak uygun KKE kullanımı.

6.2. Laboratuvar Güvenlik Kùltürü Oluştırma

Güvenlik kùltürü, bir organizasyondaki güvenlikle ilgili ortak değerler, inançlar ve davranışlar bütünüdür. Güçlü bir laboratuvar güvenlik kùltürü, kazaların önlenmesinde kritik öneme sahiptir. Akademik araştırma ortamlarında güvenlik kùltürünün geliştirilmesi, hem çalışanların sağlığını korumakta hem de araştırma verimliliğini artırmaktadır.

Güvenlik Kùltürü Geliştirme Stratejileri:

Laboratuvar ortamları, çalışanların çeşitli kimyasal, biyolojik ve fiziksel risklerle karşı karşıya olduğu, iş sağlığı ve güvenliği açısından hassas alanlardır. Bu nedenle, güvenli bir çalışma ortamı sağlamak için yalnızca teknik önlemler almak yeterli değildir; aynı zamanda çalışanlarda güçlü bir iş sağlığı ve güvenliği kùltürü oluştırmak da gereklidir. Güvenlik kùltürü, çalışanların iş kazalarını önleme, riskleri tanıma ve güvenli davranışları benimseme konusundaki tutum ve alışkanlıklarını kapsar [37].

İş kazalarının ve meslek hastalıklarının önlenmesinde en önemli faktörlerden biri insan unsurudur. Çalışanların bilgi eksikliği, ilgisizlik veya güvenlik önlemlerine uyumsuzluğu, kazaların yaşanmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle, iş sağlığı ve güvenliği eğitimlerinin yalnızca bilgi vermekle kalmayıp, çalışanların davranışlarına da yansımaları sağlanmalıdır. Güvenli çalışma kùltürünün yerleşmesi, hem çalışanların sağlığını korur hem de iş verimliliğini artırır.

Laboratuvarlarda güvenlik kùltürünün oluşturulması için, risklerin kaynağında ortadan kaldırılması, toplu ve kişisel koruyucu önlemlerin alınması, güvenlik ekipmanlarının etkin kullanımı ve düzenli eğitimlerin verilmesi gereklidir. Ayrıca, laboratuvar kurallarının ve güvenlik talimatlarının görünür şekilde asılması, çalışanların bu kurallara uyması için teşvik edici bir ortam yaratır. Yönetimin güvenliğe verdiği önem, çalışanların güvenlik konusundaki tutumlarını da olumlu yönde etkiler.

Laboratuvarlarda iş sağlığı ve güvenliği kùltürünün oluşturulması, sadece yasal bir zorunluluk değil, aynı zamanda çalışanların sağlığını ve işletmenin sürdürülebilirliğini koruyan temel bir unsurdur. Güçlü bir güvenlik kùltürü, çalışanların güvenli davranışları benimsemesini sağlar ve iş kazalarının önlenmesine önemli katkı sunar.

6.3. Laboratuvar Tasarımı ve Mühendislik Kontrolleri

Plastik pirolizi gibi kimyasal dönüşüm süreçlerini içeren araştırmalarda, güvenlik altyapısının temelini laboratuvarın fiziksel tasarımı ve mühendislik kontrolleri oluştırur. Bu unsurlar, tehlikeleri kaynağında ortadan kaldırmak

veya izole etmek suretiyle proaktif bir koruma sağlar ve güvenli bir çalışma kültürünün fiziksel temelini atar. Amerikan Kimya Mühendisleri Enstitüsü'nün (AIChE) Kimyasal Proses Güvenliği Merkezi (CCPS) tarafından geliştirilen kılavuzlar, bu tür prosesler için risk tabanlı bir yaklaşımın önemini vurgulamaktadır [36].

Laboratuvar Tasarım İlkeleri

Güvenli bir laboratuvarın temelini oluşturan tasarım prensipleri, risklerin mekansal olarak yönetilmesini hedefler:

Çalışma Alanlarının Ayrılması: Yüksek tehlike potansiyeli taşıyan piroliz reaktörleri gibi ünitelerin bulunduğu alanlar, ofis ve analiz alanları gibi düşük riskli bölgelerden fiziksel olarak ayrılmalıdır. ABD'de bu konuda temel standart olan NFPA 45, laboratuvarların tehlike seviyelerine göre bölümlendirilmesini ve yangına dayanıklı yapılarla ayrılmasını şart koşar.

Acil Çıkışlar ve Tahliye Yolları: Acil durumlarda personelin hızlı ve güvenli bir şekilde tahliyesini sağlamak için çıkış yolları, ABD İş Sağlığı ve Güvenliği İdaresi'nin (OSHA), CFR standardında belirtilen tasarım ve yapı gerekliliklerine uygun olmalıdır. Bu yollar her zaman açık, engelsiz ve net bir şekilde işaretlenmelidir.

Malzeme Uyumluluğu: Laboratuvar yüzeyleri, tezgahlar ve zemin kaplamaları, piroliz işlemi sırasında ortaya çıkabilecek aşındırıcı veya çözücü kimyasallara karşı yüksek direnç göstermelidir. Bu, dökülme durumunda kolay temizlik ve uzun vadeli yapısal bütünlük sağlar.

Kimyasal Depolama: Kimyasalların güvenli depolanması, kazaları önlemede kritik bir adımdır. OSHA'nın Laboratuvar Standardı, her laboratuvarın, kimyasalların uyumluluklarına göre ayrılmasını ve güvenli bir şekilde saklanmasını detaylandıran bir Kimyasal Hijyen Planı'na sahip olmasını zorunlu kılar.

Mühendislik Kontrolleri

Mühendislik kontrolleri, tehlikeli maddelere maruziyeti en aza indirmek için tasarlanmış fiziksel sistemlerdir:

Havalandırma Sistemleri: Etkili havalandırma, hem genel ortam havasını temizler hem de tehlikeli buharları kaynağında yakalar. Çeker ocaklar için Avrupa standardı olan EN 14175, bu sistemlerin performans ve güvenlik kriterlerini belirler

Otomasyon ve Uzaktan Kontrol: Yüksek basınç ve sıcaklık gibi tehlikeli parametreler içeren piroliz süreçlerinin otomasyonu, operatörün tehlikeli

bölgede bulunma zorunluluğunu ortadan kaldırarak riski önemli ölçüde düşürür.

Güvenlik Duşları ve Göz Yıkama İstasyonları: Kimyasal sıçramalarına karşı acil müdahale için kritik olan bu ekipmanların yerleşimi ve performansı önemlidir.

Gaz Algılama Sistemleri: Piroлиз sonucu ortaya çıkabilecek yanıcı ve toksik gazları sürekli izleyen, sesli ve görsel alarmlarla donatılmış sabit gaz dedektörlerinin kurulumu hayati önem taşır.

Basınç Tahliye Sistemleri: Kimyasal reaktörlerde aşırı basınç birikmesini önlemek, katastrofik arızaları engellemenin anahtarıdır.

Bu mühendislik kontrollerinin sürdürülebilir etkinliği, düzenli denetim, test ve bakım programlarına bağlıdır. Türkiye’deki yerel mevzuatlar da, özellikle havalandırma sistemlerinin periyodik olarak yetkili kurumlarca kontrol edilip belgelendirilmesini gerektirmektedir [36-40].

7. Kişisel Koruyucu Donanımlar (KKD) ve Acil Durum Prosedürleri

7.1. Plastik Yakıt Araştırmalarına Özel KKD Gereksinimleri

Kişisel koruyucu donanım (KKD), mühendislik ve idari kontrollerin yetersiz kaldığı durumlarda, çalışanları tehlikelerden korumak için kullanılan son savunma hattıdır. Plastik yakıt araştırmalarında kullanılması gereken KKD’ler şunlardır [41]:

Göz ve Yüz Koruması:

Kimyasal Koruyucu Gözlükler: Sıçramalara karşı koruma sağlayan, yan siperleri bulunan gözlükler.

Yüz Siperleri: Özellikle reaktör açma, numune alma gibi işlemlerde tam yüz koruması için.

Tam Yüz Maskeleri: Hem göz hem solunum koruması gerektiren durumlar için.

Solunum Koruması:

Yarım Yüz Maskeler: Toz ve düşük toksisite gazları için P2/P3 filtreleri ile.

Tam Yüz Maskeler: Daha yüksek koruma gerektiren durumlar için.

Temiz Hava Beslemeli Sistemler: Yüksek konsantrasyonda toksik gazların bulunduğu ortamlar için.

Kaçış Maskeleri: Acil durumlarda kısa süreli koruma için.

El ve Kol Koruması:

Kimyasal Dirençli Eldivenler: Nitril, bütül veya viton eldivenler (kullanılan kimyasallara göre seçilmeli).

Isıya Dayanıklı Eldivenler: Yüksek sıcaklık işlemleri için.

Uzun Kollu Laboratuvar Önlükleri: Kolların korunması için.

Vücut Koruması:

Laboratuvar Önlükleri: %100 pamuk veya alev geciktirici malzemeden.

Kimyasal Koruyucu Önlükler: Sıçrama riski yüksek işlemler için.

Tam Vücut Koruyucu Giysiler: Yüksek riskli işlemler ve acil durum müdahaleleri için.

Ayak Koruması:

Kapalı, Kimyasal Dirençli Ayakkabılar: Tercihen çelik burunlu.

Ayakkabı Kılıfları: Yüksek kontaminasyon riski olan alanlarda.

KKD seçiminde, plastik pirolizi sırasında oluşan spesifik kimyasalların özelliklerine dikkat edilmelidir. Örneğin, aromatik hidrokarbonlara karşı koruma için viton eldivenler tercih edilmelidir [41,42].

7.2. Acil Durum Planlaması ve Müdahale

Plastik yakıt araştırma laboratuvarlarında, potansiyel acil durumlar için kapsamlı planlar geliştirilmeli ve uygulanmalıdır [43-46].

Acil Durum Planı Bileşenleri:

Risk Değerlendirmesi: Potansiyel acil durumların belirlenmesi

Sorumluluklar ve Organizasyon: Acil durum ekibi, tahliye sorumluları, ilk yardım ekibi.

İletişim Prosedürleri: Acil durum bildirim zinciri, dış kurumlarla iletişim.

Tahliye Planları: Çıkış yolları, toplanma noktaları, engelli personel için özel düzenlemeler.

Acil Durum Ekipmanları: Yangın söndürücüler, ilk yardım malzemeleri, acil duş ve göz yıkama istasyonları, dökülme kitleri.

Eğitim ve Tatbikatlar: Düzenli eğitimler ve acil durum senaryolarının uygulamalı provaları.

Kimyasal Döküntü ve Sızıntılara Müdahale: Plastik piroliz ürünlerinin dökülmesi durumunda uygulanacak adımlar:

Alanı boşaltın ve havalandırmayı artırın.

Uygun KKE giyin (kimyasal dirençli eldiven, önlük, solunum koruması).

Yayılmayı önleyin (emici bariyerlerle çevreleme).

Uygun emici malzemelerle döküntüyü toplayın (organik emiciler).

Kontamine atıkları tehlikeli atık olarak etiketleyin ve bertaraf edin.

Alanı uygun çözücülerle temizleyin.

Yangın ve Patlama Durumları: Plastik piroliz ortamlarında yangın müdahalesi için öneriler:

Küçük yangınlar için uygun sınıf yangın söndürücü kullanın (B sınıfı: yanıcı sıvılar için).

Büyük yangınlarda alanı tahliye edin ve profesyonel yardım çağırın.

Mümkünse, güvenli bir şekilde ısı kaynaklarını ve yanıcı malzemeleri uzaklaştırın.

Piroliz ekipmanlarına bağlı gaz hatlarını kapatın.

Yangın söndürme çalışmalarını koordine edin ve yeniden alevlenme olasılığına karşı tetikte olun.

İlk Yardım Prosedürleri: Yaygın kimyasal maruziyetleri için ilk yardım:

Göz Teması: En az 15 dakika boyunca temiz suyla yıkayın, kontakt lensleri hemen çıkarın.

Cilt Teması: Kontamine giysileri çıkarın, etkilenen bölgeyi en az 15 dakika suyla yıkayın.

Soluma: Temiz havaya çıkarın, gerekirse oksijen verin, suni solunum uygulayın.

Yutma: Kusturmaya çalışmayın, ağız suyla çalkalayın, bol su içirin.

Tüm vakalarda tıbbi yardım alınmalı ve maruz kalan kimyasalın güvenlik bilgi formu (SDS) sağlık personeline iletilmelidir.

8. Yasal Düzenlemeler ve Standartlar

8.1. Türkiye’deki Laboratuvar Güvenliği Mevzuatı

Türkiye’de laboratuvar güvenliğini düzenleyen başlıca yasal çerçeve şunları içermektedir [47,48]:

6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu (2012): İşyerlerinde iş sağlığı ve güvenliğinin sağlanması ve mevcut sağlık ve güvenlik şartlarının iyileştirilmesi için temel çerçeveyi oluşturur.

Kimyasal Maddelerle Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Hakkında Yönetmelik (12.08.2013): Kimyasal maddelerle çalışılan işyerlerinde, çalışanların sağlık ve güvenliğini korumak için alınması gereken önlemleri belirler.

Kanserojen veya Mutajen Maddelerle Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Hakkında Yönetmelik (06.08.2013): Kanserojen veya mutajen maddelerle çalışılan işyerlerinde özel koruyucu önlemleri tanımlar.

Tehlikeli Kimyasalların Yönetimi Yönetmeliği (11.12.2013): Tehlikeli kimyasalların envanteri, depolanması, etiketlenmesi ve güvenli kullanımı ile ilgili gereklilikleri belirler.

Atık Yönetimi Yönetmeliği (02.04.2015): Laboratuvar atıklarının sınıflandırılması, toplanması, taşınması ve bertaraf edilmesi ile ilgili kuralları düzenler.

Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik (19.12.2007, son değişiklik 2020): Laboratuvarlar dahil binaların yangın güvenliği gerekliliklerini belirler.

Üniversite ve araştırma laboratuvarları için spesifik olarak, Türkiye’de üniversiteler için “Üniversite Laboratuvarlarında Güvenlik Kılavuzu” yayınlanmıştır ve bu kılavuz, iyi uygulama örneklerini ve minimum güvenlik gerekliliklerini içermektedir.

8.2. Uluslararası Standartlar ve Kılavuzlar

Plastik yakıt araştırmalarında laboratuvar güvenliği için uluslararası standartlar ve kılavuzlar şunları içerir [49,50]:

ISO 45001:2018: İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemleri standardı.

OECD Laboratory Safety Guidance (2022): Kimya laboratuvarlarında güvenli çalışma ilkeleri.

NFPA 45: Kimyasal laboratuvarların yangın koruması için standart.

NFPA 30: Yanıcı ve parlayıcı sıvılar kodu.

American Chemical Society (ACS) - Safety Guidelines for Chemical Laboratories (2020): Kapsamlı laboratuvar güvenliği rehberi.

Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals (GHS): Kimyasalların sınıflandırılması ve etiketlenmesi için küresel sistem.

Bu standartlar ve kılavuzlar, laboratuvar tasarımı, risk değerlendirmesi, güvenli çalışma prosedürleri, acil durum planlaması ve eğitim gereklilikleri için detaylı bilgiler sunmaktadır.

9. Vaka Analizleri ve Örnek Uygulamalar

9.1. Laboratuvar Kazaları ve Alınan Dersler

Plastik yakıt araştırmalarında meydana gelen kazaların sistematik analizi, benzer olayların önlenmesi için değerli bilgiler sağlamaktadır. Bu analizler, teknik arızalar, prosedürel eksiklikler ve güvenlik kültürü zayıflıkları gibi kök nedenleri ortaya çıkararak, gelecekteki araştırmaların daha güvenli yürütülmesine katkıda bulunur [51].

Piroliz reaktörlerinde meydana gelen patlamalar genellikle basınç tahliye sistemlerinin tıkanması ve reaktörde biriken gazların basıncının artması sonucu olmaktadır. Bu tür kazalardan alınan dersler arasında, basınç tahliye sistemlerinin düzenli kontrolü ve temizliğinin kritik önemi, reaktör sistemlerinde yedekli güvenlik sistemlerinin bulundurulması ve yüksek riskli deneylerde uzaktan izleme ve kontrol sistemlerinin kullanılması yer almaktadır.

Laboratuvarlarda meydana gelen kimyasal yangınlar, çoğunlukla piroliz ürünlerinin analizi sırasında uçucu hidrokarbonların ısıtıcı gibi tutuşma kaynakları yakınında birikmesi ve tutuşması sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu tür olaylardan çıkarılan dersler, yanıcı sıvıların işlendiği alanlarda potansiyel tutuşma kaynaklarının kontrolü ve izolasyonunun önemi, yeterli havalandırmanın uçucu organik bileşiklerin birikmesini önlemedeki rolü ve uygun yangın söndürme ekipmanlarının kolay erişilebilir olmasının hayat kurtarıcı etkisi olarak özetlenebilir.

Toksik gaz maruziyetleri, özellikle klorlu plastiklerin pirolizi sırasında meydana gelen hidrojen klorür (HCl) gibi asidik gaz sızıntıları, laboratuvar personelinin sağlığını tehdit eden önemli risklerdendir. Bu tür olaylardan alınan dersler, halojenli polimerlerin pirolizinde özel önlemlerin alınması gerektiği (ön işlem, asit giderici ekleme gibi), gaz dedektörleri ve alarm sistemlerinin erken uyarı sağlamadaki önemi ve spesifik gazlara yönelik

solunum koruyucu ekipmanların bulundurulmasının gerekliliği olarak özetlenebilir.

9.2. İyi Uygulama Örnekleri

Plastik yakıt araştırmalarında güvenlik kültürünü başarıyla uygulayan kurumlar, proaktif yaklaşımlar ve sistematik güvenlik yönetimi ile öne çıkmaktadır. Bu kurumların ortak özellikleri arasında, her deney öncesi detaylı risk değerlendirmesi ve çalışma izni sistemi uygulamaları, yüksek riskli işlemlerin yapıldığı laboratuvarların ayrı binalarda konumlandırılması ve uzaktan izleme sistemleriyle donatılması, düzenli güvenlik tatbikatları ve ekipman kontrolleri, ve standardize edilmiş işletim prosedürleri ile kapsamlı dokümantasyon bulunmaktadır.

Başarılı güvenlik yönetimi uygulayan kurumlar genellikle ISO 45001 gibi uluslararası standartlara dayalı iş sağlığı ve güvenliği yönetim sistemleri kullanmakta, güvenlik performans göstergeleri belirleyerek düzenli değerlendirmeler yapmakta ve “ramak kala” olayların raporlanması ve analizi için teşvik sistemleri geliştirmektedir. Ayrıca, laboratuvar tasarımında en son güvenlik teknolojilerinin kullanımına önem vermektedirler.

İleri düzey araştırma merkezlerinde uygulanan güvenlik yaklaşımları arasında, risklerin minimize edilmesi için küçük ölçekli deneysel tasarım kullanılması, tam otomatik kontrol ve veri toplama sistemlerinin implementasyonu, katalizör ve reaksiyon koşullarının optimize edilmesi ile daha güvenli süreçlerin geliştirilmesi ve açık erişimli güvenlik veritabanı ve bilgi paylaşımı platformlarının oluşturulması yer almaktadır.

Bu iyi uygulama örnekleri, plastik yakıt araştırmalarında güvenlik kültürünün nasıl etkili bir şekilde uygulanabileceğini göstermekte ve diğer araştırma kurumları için model teşkil etmektedir. Güvenliğin bir öncelik olarak ele alınması, proaktif risk yönetimi, düzenli eğitim ve değerlendirme, ve bilgi paylaşımı, başarılı güvenlik programlarının ortak özellikleridir.

Plastik yakıt araştırmalarında laboratuvar güvenliğinin geliştirilmesi, sürdürülebilir atık yönetimi ve yeşil kimya ilkelerinin benimsenmesiyle doğrudan ilişkilidir; bu bağlamda, yapay zeka destekli risk değerlendirme sistemleri, nano-biyokimya uygulamaları ve döngüsel ekonomi yaklaşımları, hem iş sağlığı ve güvenliğinin yeniden şekillendirilmesinde hem de çevresel sürdürülebilirliğin sağlanmasında önemli rol oynamaktadır [51-54]

10. Sonuç ve Öneriler

Plastik atıkların yakıtı dönüştürülmesi, sürdürülebilir atık yönetimi ve alternatif enerji kaynakları geliştirme açısından büyük potansiyel taşıyan bir araştırma alanıdır. Ancak, bu araştırmaların laboratuvar ortamında güvenli bir şekilde yürütülmesi, hem bilimsel ilerlemenin sürdürülebilirliği hem de araştırmacıların sağlığı açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, plastik yakıt araştırmalarında laboratuvar güvenliğinin çeşitli boyutları, organik kimya perspektifinden kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

Plastik polimerlerin kimyasal yapısı ve termal davranışlarının anlaşılması, piroliz, katalitik dönüşüm ve gazlaştırma gibi termokimyasal süreçlerde ortaya çıkabilecek tehlikelerin öngörülmesi ve yönetilmesi için temel oluşturmaktadır. Farklı plastik türlerinin (PE, PP, PS, PET, PVC) pirolizi sonucunda oluşan ürünlerin kimyasal kompozisyonu ve toksikolojik özellikleri, alınması gereken güvenlik önlemlerini doğrudan etkilemektedir. Özellikle, PVC gibi halojenli plastiklerin pirolizi sırasında oluşan hidrojen klorür gibi koroziif gazlar ve PS pirolizinde ortaya çıkan stiren gibi potansiyel kanserojenler, özel dikkat gerektirmektedir.

Laboratuvar ortamında karşılaşılan kimyasal tehlikeler, toksik gazlar ve buharlar, yanıcı ve patlayıcı maddeler ile koroziif ve tahriş edici kimyasallar olarak sınıflandırılabilir. Bu tehlikelerin etkin bir şekilde yönetilmesi, uygun mühendislik kontrolleri, idari önlemler ve kişisel koruyucu ekipmanların kullanımını içeren çok katmanlı bir güvenlik yaklaşımını gerektirmektedir. Özellikle, etkili havalandırma sistemleri, gaz dedektörleri, basınç tahliye sistemleri ve otomatik yangın söndürme ekipmanları gibi mühendislik kontrolleri, tehlikelerin kaynağında kontrol edilmesinde kritik rol oynamaktadır.

Fiziksel tehlikeler arasında yer alan yüksek sıcaklık ve basınç riskleri, elektrik güvenliği ve mekanik tehlikeler, plastik piroliz ekipmanlarının tasarımı ve kullanımı sırasında dikkatle ele alınması gereken faktörlerdir. Bu risklerin yönetimi, ekipmanların düzenli bakımı, güvenlik sistemlerinin periyodik testleri ve personelin uygun eğitimi ile mümkündür.

Biyolojik tehlikeler ve atık yönetimi, plastik yakıt araştırmalarında genellikle göz ardı edilen ancak önemli güvenlik boyutlarıdır. Plastik atıkların mikrobiyal kontaminasyonu ve piroliz sonucunda oluşan atıkların uygun şekilde sınıflandırılması ve bertarafı, hem laboratuvar güvenliği hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemlidir.

Güvenlik yönetimi ve risk değerlendirmesi, laboratuvar güvenliğinin temelini oluşturmaktadır. Sistematik risk değerlendirme metodolojileri,

potansiyel tehlikelerin tanımlanması, risklerin analizi ve kontrol önlemlerinin belirlenmesini içeren yapılandırılmış bir süreçtir. Güçlü bir laboratuvar güvenlik kültürünün oluşturulması, liderlik taahhüdü, katılımcı yaklaşım, şeffaf iletişim, sürekli eğitim ve olumlu pekiştirme gibi stratejileri gerektirmektedir.

Laboratuvar tasarımı ve mühendislik kontrolleri, güvenlik altyapısının fiziksel temelini oluşturmaktadır. Çalışma alanlarının ayrılması, acil çıkışlar ve tahliye yolları, malzeme uyumluluğu ve kimyasal depolama gibi tasarım ilkeleri, güvenli bir laboratuvar ortamının oluşturulmasında kritik öneme sahiptir. Havalandırma sistemleri, otomasyon ve uzaktan kontrol, güvenlik duşları ve göz yıkama istasyonları, gaz algılama sistemleri ve basınç tahliye sistemleri gibi mühendislik kontrolleri, tehlikelerin kaynağında kontrol edilmesini sağlamaktadır.

Kişisel koruyucu ekipmanlar ve acil durum prosedürleri, mühendislik ve idari kontrollerin yetersiz kaldığı durumlarda, çalışanları tehlikelerden korumak için kullanılan son savunma hattıdır. Plastik yakıt araştırmalarına özel KKE gereksinimleri, göz ve yüz koruması, solunum koruması, el ve kol koruması, vücut koruması ve ayak koruması gibi unsurları içermektedir. Acil durum planlaması ve müdahale, potansiyel acil durumlar için kapsamlı planların geliştirilmesi ve uygulanmasını gerektirmektedir.

Yasal düzenlemeler ve standartlar, laboratuvar güvenliğinin yasal çerçevesini oluşturmaktadır. Türkiye'deki laboratuvar güvenliği mevzuatı, 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu ve ilgili yönetmelikler ile düzenlenmektedir. Uluslararası standartlar ve kılavuzlar ise, laboratuvar tasarımı, risk değerlendirmesi, güvenli çalışma prosedürleri, acil durum planlaması ve eğitim gereklilikleri için detaylı bilgiler sunmaktadır.

Vaka analizleri ve örnek uygulamalar, laboratuvar kazalarından alınan dersleri ve başarılı güvenlik uygulamalarını içermektedir. Piroлиз reaktörlerinde meydana gelen patlamalar, kimyasal yangınlar ve toksik gaz maruziyetleri gibi kazalardan alınan dersler, benzer olayların önlenmesi için değerli bilgiler sağlamaktadır. Entegre güvenlik yönetim sistemleri, akran güvenlik denetimleri, sanal gerçeklik tabanlı güvenlik eğitimleri ve otomasyon ve uzaktan izleme sistemleri gibi başarılı güvenlik uygulamaları, laboratuvar güvenliğinin sadece teknik önlemlerle değil, aynı zamanda organizasyonel ve kültürel faktörlerle de şekillendiğini göstermektedir.

Bu çalışmanın bulguları, plastik yakıt araştırmalarında laboratuvar güvenliğinin çok boyutlu ve disiplinler arası bir yaklaşım gerektirdiğini ortaya koymaktadır. Organik kimya perspektifi, plastik polimerlerin

yapısını, kimyasal davranışlarını ve termal parçalanma mekanizmalarını anlamamıza olanak sağlayarak, laboratuvar güvenliği için temel bir bakış açısı sunmaktadır. Ancak, güvenlik yönetiminin etkinliği, teknik bilginin yanı sıra, güçlü bir güvenlik kültürü, etkili iletişim ve sürekli iyileştirme taahhüdü gibi organizasyonel faktörlere de bağlıdır.

Gelecekteki araştırmalar, plastik yakıt dönüşüm süreçlerinde güvenliği artırmak için yeni teknolojilerin ve yaklaşımların geliştirilmesine odaklanmalıdır. Özellikle, daha güvenli katalizörlerin ve reaksiyon koşullarının tasarlanması, proses yoğunlaştırma ve minyatürleştirme stratejileri, uzaktan izleme ve kontrol sistemlerinin geliştirilmesi ve yapay zeka destekli risk değerlendirme araçları, gelecek vadeden araştırma alanları arasında yer almaktadır.

Sonuç olarak, plastik yakıt araştırmalarında laboratuvar güvenliği, sürdürülebilir ve yenilikçi çözümler geliştirirken, araştırmacıların sağlığını ve çevreyi korumak için vazgeçilmez bir unsurdur. Bu çalışmada sunulan kapsamlı güvenlik yaklaşımı, plastik atıkların değerli ürünlere dönüştürülmesi süreçlerinin güvenli, verimli ve sürdürülebilir bir şekilde yürütülmesine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

11. Pratik Öneriler ve Yol Haritası

Plastik yakıt araştırmalarında güvenliği artırmak için araştırmacılara, laboratuvar yöneticilerine ve kurumlara yönelik pratik öneriler ve bir yol haritası aşağda sunulmuştur:

Araştırmacılar İçin Öneriler:

1. Her deney öncesinde kapsamlı bir risk değerlendirmesi yapın.
2. Kullanılan tüm kimyasalların güvenlik bilgi formlarını (SDS) okuyun ve anlayın.
3. Plastik türüne ve reaksiyon koşullarına göre oluşabilecek ürünleri ve bunların tehlikelerini önceden belirleyin.
4. Deneyleri mümkün olan en küçük ölçekte başlatın ve kademeli olarak ölçek büyütün.
5. Tüm güvenlik ekipmanlarının yerini ve kullanımını öğrenin.
6. Acil durum prosedürlerini düzenli olarak gözden geçirin ve tatbikatlara katılın.
7. “Ramak kala” olayları dahil tüm güvenlik endişelerini raporlayın.

8. Güvenli çalışma uygulamalarını meslektaşlarınızla paylaşın ve mentorluk yapın.

Laboratuvar Yöneticileri İçin Öneriler:

1. Kapsamlı bir laboratuvar güvenlik yönetim sistemi geliştirin ve uygulayın.
2. Düzenli risk değerlendirmeleri yapın ve kontrol önlemlerinin etkinliğini izleyin.
3. Tüm personel için düzenli ve uygulamalı güvenlik eğitimleri organize edin.
4. Güvenlik performansını ölçün ve iyileştirmeler için geri bildirim mekanizmaları oluşturun.
5. Güvenlik ekipmanlarının ve mühendislik kontrollerinin düzenli bakımını sağlayın.
6. Kimyasal envanter yönetimi ve atık bertaraf süreçlerini optimize edin.
7. Açık iletişim kanalları oluşturun ve güvenlik endişelerinin ifade edilmesini teşvik edin.
8. İyi uygulamaları belgelendirin ve standart işletim prosedürlerini güncel tutun.

Kurumlar İçin Öneriler:

1. Güvenliği stratejik bir öncelik olarak benimseyin ve gerekli kaynakları ayırın.
2. Laboratuvar tasarım ve yenileme projelerinde güvenlik faktörlerini ön planda tutun.
3. Kurum genelinde güvenlik kültürünü destekleyin ve olumlu davranışları ödüllendirin.
4. Diğer kurumlarla bilgi ve deneyim paylaşımı için işbirlikleri geliştirin.
5. Ulusal ve uluslararası güvenlik standartları ve kılavuzlarını takip edin.
6. Sigorta ve risk transfer stratejileri geliştirin.
7. Güvenlik konularında danışmanlık ve dış değerlendirme hizmetleri alın.
8. Güvenlik araştırmalarını ve yenilikçi güvenlik çözümlerini destekleyin.

Yol Haritası:

1. Kısa Vadeli Hedefler (0-6 ay):

Mevcut durumun değerlendirilmesi ve öncelikli risklerin belirlenmesi.

Acil güvenlik eksikliklerinin giderilmesi.

Temel güvenlik eğitimlerinin tamamlanması.

Acil durum prosedürlerinin güncellenmesi.

2. Orta Vadeli Hedefler (6-18 ay):

Kapsamlı güvenlik yönetim sisteminin geliştirilmesi ve uygulanması.

Mühendislik kontrollerinin iyileştirilmesi ve modernizasyonu.

İleri düzey güvenlik eğitim programlarının uygulanması.

Performans göstergelerinin belirlenmesi ve izlenmesi.

3. Uzun Vadeli Hedefler (18-36 ay):

Sürdürülebilir bir güvenlik kültürünün yerleştirilmesi.

İnovasyon ve sürekli iyileştirme mekanizmalarının oluşturulması.

Sektör lideri olarak güvenlik standartlarının belirlenmesi.

Bütünleşik sürdürülebilirlik ve güvenlik yaklaşımının benimsenmesi.

Bu yol haritası, plastik yakıt araştırmalarında laboratuvar güvenliğinin sistematik ve sürekli olarak geliştirilmesine yönelik bir çerçeve sunmaktadır.

Kaynakça

- [1] Yakışık, H. (2023). Plastik atıklar ve sürdürülebilirlik: Türkiye’de plastik atık yönetimi. Giresun Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 9(2), 36-55. <https://doi.org/10.46849/guiibd.1403473>
- [2] Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782.
- [3] Nanda, S., & Berruti, F. (2020). Thermochemical conversion of plastic waste to fuels: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 123-148. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01094-7>
- [4] Mordoğan, D., & Şahin, E. (2021). Bir üniversitede bulunan laboratuvarlarda kullanılan kimyasal maddelere maruziyet riskinin değerlendirilmesi. *Journal of Medical Sciences*, 2(1), 30-40. <https://doi.org/10.46629/JMS.2021.33>
- [5] Ak, M., Soğancı, T., Gümüşay, O., & Çukurluoğlu, S. (2017). Yeşil kimya ile iletken polimer sentezi ve elektrokromik özellikleri. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(6), 753-758.
- [6] Budak, Y., & Keçeci, M. (2024). Sıfır atık ile yeşil dönüşüm: Türkiye’nin geleceği için çevre dostu kozmetik ve temizlik ürünleri. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 13(3), 145–155.
- [7] Martins, M., Duque, J., Soares, K., & Orlando, M. (2021). Thermal Analysis of Recycled Plastics. *Composites Science and Technology*. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3627-1_10
- [8] Ruscher, C., Rottler, J., Boott, C., MacLachlan, M., & Mukherji, D. (2019). Elasticity and thermal transport of commodity plastics. *Physical Review Materials*. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.3.125604>
- [9] Han, W., Han, D., & Chen, H. (2023). Pyrolysis of Waste Tires: A Review. *Polymers*, 15. <https://doi.org/10.3390/polym15071604>
- [10] Uddin, M. N., Techato, K., Taweekun, J., Rahman, M. M., Rasul, M. G., Mahlia, T. M. I., & Ashrafur, S. M. (2018). Biyokütle piroliz teknolojilerindeki son gelişmelere genel bir bakış. *Energies*, 11(11), 3115. <https://doi.org/10.3390/en11113115>
- [11] Huang, J., Veksha, A., Chan, W., Giannis, A., & Lisak, G. (2022). Chemical recycling of plastic waste for sustainable material management: A prospective review on catalysts and processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111866>
- [12] Barnard, E., Arias, J., & Thielemans, W. (2021). Chemolytic depolymerisation of PET: a review. *Green Chemistry*, 23, 3765-3789. <https://doi.org/10.1039/D1GC00887K>

- [13] Rahman, M., Bhoi, P., & Menezes, P. (2023). Pyrolysis of waste plastics into fuels and chemicals: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113799>
- [14] Peng, Y., Wang, Y., Ke, L., Dai, L., Wu, Q., Cobb, K., Zeng, Y., Zou, R., Liu, Y., & Ruan, R. (2022). A review on catalytic pyrolysis of plastic wastes to high-value products. *Energy Conversion and Management*. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115243>
- [15] Gebre, S. H., Sendeku, M. G., & Bahri, M. (2021). Recent trends in the pyrolysis of non-degradable waste plastics. *ChemistryOpen*. <https://doi.org/10.1002/open.202100184>
- [16] Shah, H. H., Amin, M., Iqbal, A., Nadcem, I., Kalin, M., Soomar, A. M., & Galal, A. M. (2023). A review on gasification and pyrolysis of waste plastics. *Frontiers in Chemistry*, 10, 960894. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.960894>
- [17] Kayhan, E., & Demirer, A. (2016). Polimer işleme sektörlerindeki meslek hastalıkları, kazalar ve iş güvenliği. *SAÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 20(3), 497-507. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.40070>
- [18] Das, S. (2020). Toxic gases. In H. Ketha & U. Garg (Eds.), *Toxicology cases for the clinical and forensic laboratory* (pp. 387-396). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815846-3.00020-X>
- [19] Mevlevioğlu, U., Kadirgan, M. N., & Alev Çiftçiöğlu, G. (2019). Kimya Endüstrilerinde Patlama ve Yangınların Önlenmesi ve İlgili Vaka Çalışmaları. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 31(1), 36-46. <https://doi.org/10.7240/jcps.457561>
- [20] Sorgulu, F., Öztürk, M., Javani, N., & Dinçer, İ. (2022). Hidrojen ve Doğal Gaz Karışımının Evsel Cihazlarda Kullanımının DeneySEL ve Teorik Olarak İncelenmesi. *Cihannüma Teknoloji Fen Ve Mühendislik Bilimleri Akademi Dergisi*, 1(1), 23-38. <https://doi.org/10.55205/joctensa.11202244>
- [21] Öner, A. (2009). Yanıcı/parlayıcı sıvı depolanan binalarda yangın güvenliği ve söndürme sistemleri. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 14(1).
- [22] Yavuz, ř. (2020). Organik kimya laboratuvarında kullanılan kimyasalların iş sağlığı ve güvenliği açısından zararlarının incelenmesi. *İş Sağlığı ve Güvenliği Akademi Dergisi*, 3(3), 221-229. <https://doi.org/10.38213/ohsacademy.793954>
- [23] İlbasmış Tamer, S., & Erdoğan Orhan, İ. (2024). Kimyasal silahlara ve biyoteröre karşı tedavide kullanılan uygulamalar. *Ankara Eczacılık Fakültesi Dergisi*, 48(2), 672-695. <https://doi.org/10.33483/jfpau.1363452>

- [24] Teke, H., & Çetin, D. (2024). Fen bilimleri eğitiminde laboratuvar güvenliğiyle ilgili araştırmaların incelenmesi. *Buca Eğitim Fakültesi Dergisi*, (62), 2883-2903.
- [25] Karabulut, M. (2016). Üniversitelerin kimya laboratuvarlarında çalışanların İSG risklerinin tespiti ve kimyasal maruziyetinin çözüm önerileri [Yüksek lisans tezi]. T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü.
- [26] Parlak Biçer, Z. Ö. (Ed.). (2024). Laboratuvar ve atölyelerde iş sağlığı ve güvenliği. Akademisyen Kitabevi. <https://doi.org/10.37609/akya.3354>
- [27] Kürkçü, E. A., Biçer, Ş., Sarıöz Ağca, İ., & Tayfur, D. (n.d.). Kimyasalların güvenli depolanması rehberi. T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, İş Sağlığı ve Güvenliği Araştırma ve Geliştirme Enstitüsü Başkanlığı.
- [28] Taylan Özkan, A., Cansaran Duman, D., & Derici, K. (Eds.). (2019). Laboratuvar çalışanları için temel biyogüvenlik kuralları. Hipokrat Yayınevi.
- [29] Adar, E., & İlhan, F. (2018). Çevre Laboratuvarlarından Kaynaklanan Tehlikeli Atıkların Yönetimi. *Sakarya University Journal of Science*, 22(2), 322-332. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.321697>
- [30] Ergin, M., Erdoğan, S., & Erel, Ö. (2017). Biyokimya ve mikrobiyoloji laboratuvar personelinin tıbbi atık yönetimi konusundaki farkındalığı. *Türk Hijyen Ve Dencysel Biyoloji Dergisi*, 74(2), 129-138.
- [31] Ertaş, H., & Güden, M. A. (2019). Hastanelerde tıbbi atık yönetimi. *Sosyal Araştırmalar ve Yönetim Dergisi*, (1), 53-67. <https://doi.org/10.35375/sayod.541876>
- [32] Eze, W. U., Umunakwe, R., Obasi, H. C., Ugbaja, M. I., Uche, C. C., & Madufor, I. C. (2021). Plastics waste management: A review of pyrolysis technology. *Clean Technologies and Recycling*, 1(1), 50-69. <https://doi.org/10.3934/ctr.2021003>
- [33] Garcia-Garcia, G., Martín-Lara, M. Á., Calero, M., & Blázquez, G. (2024). Environmental impact of different scenarios for the pyrolysis of contaminated mixed plastic waste. *Green Chemistry*, 26(7), 3853-3862. <https://doi.org/10.1039/D3GC04396G>
- [34] National Research Council. (2011). Prudent practices in the laboratory: Handling and management of chemical hazards: Updated version. National Academies Press.
- [35] Pasman, H. J., & Rogers, W. J. (2022). Risk assessment methods for process safety, process security and resilience in the chemical process industry: A thorough literature review. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 75, 104329. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950423024000329>

- [36] National Research Council. (2011). Prudent practices in the laboratory: Handling and management of chemical hazards. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/12654>
- [37] Gürkan, E. H. (2018). Sürdürülebilir laboratuvar güvenliği kültürü. Celal Bayar Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5(4), 224-230.
- [38] Occupational Safety and Health Administration. (n.d.). Means of egress.
- [39] American National Standards Institute. (2020). ANSI/ISEA Z358.1-2014 (R2020): American national standard for emergency eyewash and shower equipment.
- [40] American National Standards Institute. (2022). ANSI/ASSP Z9.5-2022: Laboratory ventilation.
- [41] T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı. (n.d.). Kişisel koruyucu donanımlar. https://kkdportal.csgb.gov.tr/media/kkd_kitabi
- [42] Eren, K. B., & Palaz, S. (2022). Kişisel Koruyucu Donanım Kullanımını Etkileyen Faktörlerin İmalat Çalışanları Açısından Araştırılması: Kesitsel Bir Çalışma. Sosyal Güvenlik Dergisi, 12(1), 167-186. <https://doi.org/10.32331/sgd.1135417>
- [43] Esin, M. T., & Yılmaz, F. (2023). Sağlık kurumları için afet ve acil durum planlama rehberi (G. İpek, Ed.). İstanbul Valiliği İstanbul Proje Koordinasyon Birimi.
- [44] American Chemical Society. (1995). Kimyasal sızıntı müdahale rehberi.
- [45] TÜYAK Yangın ve Teknolojileri Dergisi. (n.d.). TÜYAK Yangın ve Teknolojileri Dergisi. Teknik Dergiler Yayıncılık ve Organizasyon Ltd. Şti.
- [46] Murat, B., & Yılmaz, K. (2021). Depolarda iş sağlığı ve güvenliği bakımından risk faktörleri. International Symposium of Scientific Research and Innovative Studies (s. 411). Çanakkale, Türkiye.
- [47] Koşucu, F., Utlu, Z., & Eren, Ö. (2017). Laboratuvar çalışanlarının iş sağlığı ve güvenliği kültürü algısı. Sosyal Bilimler Dergisi, (15), 596-615. <https://doi.org/10.16990/SOBIDER.3801>
- [48] Canel, M., & Canel, E. (2016). Laboratuvar güvenliği. Gazi Kitabevi.
- [49] American Chemical Society. (2016). Guidelines for chemical laboratory safety in academic institutions.
- [50] International Organization for Standardization. (2025, January 22). ISO: The International Organization for Standardization. <https://www.iso.org>
- [51] Türkiye İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü. (2020). Laboratuvar kazaları analiz raporu. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı.
- [52] Aktürk-Bozdemir, E., & Budak, Y. (2025). Doğal boyalarla sürdürülebilir gelecek: Yapay zeka, biyokimya ve yeşil dönüşümle iş sağlığı ve güvenliğinin yeniden şekillendirilmesi. İş Sağlığı ve Güvenliğinin Sosyal Politika

- İncelemeleri içinde (s. 5-28). Özgür Yayınları. <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub791.c3341>
- [53] Aktürk-Bozdemir, E., & Budak, Y. (2025). Nano-biyokimya ve yapay zeka ile çevresel dönüşüm: Yenilikçi çözümler ve sürdürülebilir uygulamalar. Mühendislik Alanında Multidisipliner Araştırma ve Değerlendirmeler içinde (s. 3-3). Özgür Yayınları. <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub776.c3229>
- [54] Budak, Y., & Bozdemir, E. A. (2021). The hidden cost of cleanliness and beauty: How the microbiome impacts our health and the planet and solutions through green chemistry and the circular economy. *Turkish Journal of Science and Health*, 2(6), 116–132.

Plastik Yakıtların Çevresel ve Sağlık Etkileri: Spor ve İş Güvenliği için Optimizasyon Çözümleri

Fatih Yaşar¹

Necip Zeki Budak²

Özet

Bu çalışma, plastik atıklardan elde edilen yakıtların çevresel ve sağlık etkilerini inceleyerek, spor tesisleri ve endüstriyel ortamlarda güvenli kullanım için optimizasyon çözümleri sunmaktadır. Piroliz, gazlaştırma ve depolimerizasyon gibi termokimyasal süreçlerle üretilen plastik yakıtlar, atık yönetimi ve alternatif enerji kaynağı olarak önem kazanmaktadır. Ancak, bu yakıtların üretimi ve kullanımı sırasında ortaya çıkan dioksinler, furanlar, ağır metaller ve partikül maddeler, hem çevre hem de insan sağlığı için ciddi riskler oluşturmaktadır. Çalışmada, spor tesislerinde havalandırma sistemleri, emisyon kontrol teknolojileri ve hibrit enerji çözümleri; endüstriyel ortamlarda ise kişisel koruyucu ekipman, maruz kalma sınırları ve otomasyon sistemleri gibi optimizasyon çözümleri detaylandırılmıştır. Ayrıca, biyoplastiklerden elde edilen yakıtlar, yüksek verimli katalitik dönüşüm ve döngüsel ekonomi yaklaşımları gibi sürdürülebilir alternatifler değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, plastik yakıtların güvenli ve sürdürülebilir kullanımı için teknolojik yeniliklerin takibi, yasal düzenlemelere uyum ve farkındalık artırıcı politikaların uygulanması önerilmektedir.

1. Giriş

Plastik atıkların yakıt olarak kullanılması, küresel atık yönetimi ve enerji üretiminde yenilikçi bir yaklaşım olarak giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Dünya genelinde yıllık 450 milyon tondan fazla plastik üretilmekte ve bunun yaklaşık % 75'i atık olarak çevreye karışmaktadır [1].

1 Dr., Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, fatih.yasar@gmail.com, 0000-0001-6005-2257

2 Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, necipzekibudak@gmail.com, 0009-0002-3286-8448

Bu durum, hem çevre kirliliği hem de kaynak israfı açısından ciddi sorunlar yaratmaktadır. Plastik atıkların yakıt olarak değerlendirilmesi, atık hacmini azaltma ve fosil yakıtlara bağımlılığı hafifletme potansiyeline sahiptir.

Plastik yakıtlar, piroliz, gazlaştırma ve depolimerizasyon gibi termokimyasal süreçlerle üretilmektedir. Bu yakıtlar, konvansiyonel fosil yakıtlara benzer enerji değerleri sunmakla birlikte, üretim ve kullanım süreçlerinde çeşitli çevresel ve sağlık riskleri barındırmaktadır [2]. Özellikle toksik emisyonlar, ağır metaller ve kimyasal kalıntılar, hem ekosistemlere hem de insan sağlığına zarar verebilmektedir.

Bu bölüm, plastik yakıtların çevresel ve sağlık etkilerini detaylı bir şekilde inceleyerek, spor tesisleri ve endüstriyel iş ortamları gibi hassas alanlarda bu riskleri en aza indirmek için optimize edilmiş çözümler sunmayı amaçlamaktadır. Çalışma, plastik yakıtların türleri ve üretim süreçleri, çevresel etkileri, sağlık riskleri, spor tesisleri ve iş güvenliği için optimizasyon çözümleri, sürdürülebilir alternatifler ve yasal düzenlemeler olmak üzere altı ana başlık altında yapılandırılmıştır.

2. Plastik Yakıtların Türleri ve Üretim Süreçleri

Plastik yakıtlar, atık plastiklerin termokimyasal veya kimyasal süreçlerle enerji kaynağına dönüştürülmesiyle üretilir. Başlıca üretim yöntemleri şunlardır:

2.1. Piroliz

Piroliz, organik polimerlerin (örneğin plastik atıkların) yüksek sıcaklıklarda (genellikle 300-900°C) termal ayrışma yoluyla sıvı yağ, char (katı kalıntı) ve gazlara dönüştürüldüğü bir geri dönüşüm tekniğidir. Plastik atıklar için optimum sıcaklık genellikle 500-550°C civarındadır [3]. Piroliz işlemi sonucunda elde edilen sıvı yakıt, dizel motorlarda doğrudan veya konvansiyonel dizel ile karıştırılarak kullanılabilir.

Plastiğin piroliz işlemiyle sıvı yağa dönüştürülmesi, petrolün plastik üretimindeki ana kaynak olması ve yüksek kalorili değer sunması nedeniyle büyük bir potansiyel taşımaktadır. Piroliz sürecinde sıcaklık, reaktör tipi, oturma süresi, basınç, katalizörler, akışkanlama gazı türü ve akış hızı gibi temel parametreler, nihai ürünler olan sıvı yağ, gaz ve char'ın kalitesini ve verimini doğrudan etkiler. Ancak, piroliz yağları dizel benzeri özelliklere sahip olsa da, genellikle fazla aromatik bileşik ve ağır metaller içerir, bu da yanma verimliliğini düşürebilir ve toksik emisyon riskini artırabilir. Sıvı yağ üretimini optimize etmek için bu parametrelerin dikkatle kontrol

edilmesi ve kimyasal bileşim farklılıklarının emisyon profiline etkilerinin değerlendirilmesi gerekmektedir [4].

2.2. Gazlaştırma

Gazlaştırma, plastik atıkların 800-1200°C sıcaklıklarda kısmi oksidasyona tabi tutularak sentetik gaz (syngas) elde edildiği bir süreçtir. Syngas, ağırlıklı olarak hidrojen (H_2), karbon monoksit (CO) ve metan (CH_4) içerir ve enerji üretiminde veya kimyasal sentezde kullanılabilir [5]. Gazlaştırma, pirolize göre daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştiği için, toksik bileşiklerin parçalanma oranı daha yüksektir.

2.3. Depolimerizasyon

Depolimerizasyon, plastiklerin kimyasal olarak monomerlerine ayrıştırılmasıyla yüksek kaliteli hidrokarbonlar üretilen bir süreçtir. Bu yöntem, daha temiz yakıtlar sunar, ancak enerji yoğun bir süreçtir [6]. Özellikle PET gibi kondenzasyon polimerleri için etkili olan bu yöntem, hidroliz, metanoliz veya glikoliz reaksiyonları ile gerçekleştirilebilir.

2.4. Hidrojenasyon

Hidrojenasyon, plastik atıkların hidrojen varlığında kimyasal olarak parçalanarak daha düşük aromatik içerikli yakıtlar üretildiği bir süreçtir. Bu yöntem, yanma sırasında toksik emisyonları azaltabilir [7]. Hidrojenasyon, özellikle poliolefinler (PE, PP) için etkili olup, yüksek basınç ve sıcaklık koşullarında gerçekleştirilir.

3. Çevresel Etkiler

Plastik yakıtların üretimi ve kullanımı, çevresel etkiler açısından hem avantajlar hem de riskler barındırır:

3.1. Hava Kirliliği

Plastik yakıtların yanması sırasında dioksinler, furanlar, poliaromatik hidrokarbonlar (PAH), karbon monoksit (CO), azot oksitler (NO_x) ve partikül maddeler salınabilir. Açıkta yakma, bu emisyonları artırarak hava kalitesini ciddi şekilde bozar [8]. Örneğin, dioksin emisyonları, uygun filtreleme sistemleri olmadan çevreye yayıldığında biyolojik birikim yoluyla ekosistemlere zarar verebilir.

Yapılan araştırmalar, plastik yakıtların yanması sonucu oluşan partikül madde emisyonlarının, konvansiyonel dizel yakıtlara göre daha yüksek

olabileceğini göstermektedir [9]. Bu durum, özellikle kentsel alanlarda hava kalitesini olumsuz etkileyebilir.

3.2. Sera Gazı Emisyonları

Plastik yakıtlar, fosil yakıtlara kıyasla atık yönetiminde avantaj sağlasa da, yanma süreçleri karbondioksit (CO_2) ve metan gibi sera gazları üretir. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) çalışmaları, pirolizden elde edilen yakıtların karbon ayak izinin, fosil dizel ile benzer olabileceğini göstermektedir [10].

Plastik atık geri dönüşümünün sera gazı (GHG) emisyonları, temiz/tek tip plastiğin geri dönüşümü, karışık/kirlenmiş plastiğin geri dönüşümü ve plastik atıkların endüstriyel süreçlerde yakıt olarak kullanımı olmak üzere üç yönetim alternatifi üzerinden değerlendirilmiştir. Kaynağında ayrılmış plastikler, malzeme geri kazanım tesisinde (MRF) granüle edilerek yeni ürünlerde işlenmemiş plastiğin, düşük dayanımlı ürünlerde ahşabın veya enerji üretiminde kömür/yakıt yağının yerini alır. GHG muhasebesi, yukarı akış (enerji, yakıt, malzeme temini), doğrudan (MRF’de yakıt yanması) ve aşağı akış (ikame edilen malzemelerin üretiminde kaçınılan emisyonlar) emisyonlarını kapsar. İncelenen verilere göre, temiz plastiğin işlenmemiş plastik yerine kullanılması en fazla GHG tasarrufu sağlar; bu mümkün değilse, enerji geri kazanımı tercih edilmelidir, ancak ahşap ikamesi küresel ısınma açısından tasarruf sağlamaz [11].

3.3. Su ve Toprak Kirliliği

Piroliz ve gazlaştırma süreçlerinde oluşan atık sular ve katı kalıntılar (char, kül), ağır metaller (Pb, Cr, As) ve toksik kimyasallar içerebilir. Bu atıkların uygun şekilde bertaraf edilmemesi, su kaynaklarını ve toprağı kirlletebilir. Piroliz atık sularında toksik organik bileşik bulunabilir.

Pekin’deki 17 kampüsten toplanan 162 toz örneği, plastik spor sahaları ve sentetik çimlerden salınan tozun çevresel ve sağlık risklerini değerlendirmek için tamamlayıcı analitik tekniklerle incelenmiştir. Yığın analizi, Zn, Pb, Cu, Sb, Cd ve Cr seviyelerinin arka plan değerlerini aştığını göstererek ciddi antropojenik kirlenmeye işaret etmiştir; özellikle plastik basketbol sahaları ve pistlerde Pb ve Cr, sentetik çimlerde ise Zn ve Sb daha yüksek bulunmuştur. Çok elementli tek partikül indüktif olarak eşleştirilmiş plazma uçuş zamanlı kütle spektrometrisi (spICP-TOF-MS), tozda Fe, Al, Si, Ti ve Pb içeren partiküller tespit etmiş, toksik Pb partiküllerinin % 92’sinin çok elementli olduğu belirlenmiştir. Pb ve Cr arasındaki güçlü korelasyon, inorganik pigmentlerin ortak kaynak olduğunu düşündürmektedir. Pb, Sb,

As ve Cr, özellikle alım yoluyla yüksek sağlık riski oluştururken, çocuklar için risklerin yetişkinlere göre 3-5 kat daha yüksek olduğu tahmin edilmiştir. Tozun ter ve mide suyu sızıntısında tespit edilen toksik Cr(VI) ve As(III) türleri, bu metal(loid)lerin insan sağlığı için ciddi bir tehdit oluşturduğunu ortaya koymaktadır [12].

3.4. Pozitif Etkiler

Plastik yakıtlar, çöp sahalarına giden atık miktarını büyük oranında azaltabilir ve döngüsel ekonomi prensiplerine katkıda bulunur. Pirolizden elde edilen yağ, fosil dizel yerine kullanılarak enerji üretiminde alternatif bir kaynak sağlar [3].

Ayrıca, plastik atıkların denizlere ve okyanuslara karışmasının önlenmesi, deniz ekosistemlerinin korunmasına yardımcı olabilir. Günümüzde denizlerdeki plastik kirliliği, deniz canlıları için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır [13].

4. Sağlık Etkileri

Plastik yakıtların üretimi ve kullanımı, özellikle işçiler ve sporcular için çeşitli sağlık riskleri taşır:

4.1. Solunum Sistemi Etkileri

Geri dönüşüm endüstrisinde kullanılan kimyasallar, çeşitli sağlık riskleri taşır. Plastik geri dönüşümünde sıkça kullanılan toluen ve ksilen gibi çözücüler, göz, burun ve boğaz tahrişine yol açabilir, uzun süreli maruziyette ise merkezi sinir sistemi ve organlara zarar verebilir. PVC geri dönüşümünde kullanılan hidroklorik asit (HCl), cilt, göz ve solunum yollarında tahrişe, ciddi durumlarda solunum sıkıntısına neden olabilir. Sodyum hidroksit (NaOH), cilt, göz ve solunum yolunda yanıklara, yutulması veya solunması halinde iç organ hasarına yol açabilir. Yapıştırıcı sökücülerdeki uçucu organik bileşikler (VOC'ler), özellikle çocuklarda solunum problemleri ve akciğer fonksiyon kaybıyla ilişkilendirilir. Ayrıca, bazı antioksidan ve stabilizatörlerdeki birincil aromatik ve heterosiklik aminler kanserojen veya mutajenik özellikler gösterebilir [13].

4.2. Kanserojen Etkiler

Toksik atık sahalarının yakınında yaşayan topluluklarda kanser riskini değerlendiren 1980-2006 yılları arasındaki hakemli 19 çalışma, metodolojik sınırlamalar nedeniyle kesin bir sonuca ulaşamamıştır. Çoğunlukla ekolojik olan bu çalışmalar, hidrojeolojik veya hava yolu modellemesini nadiren

kullanmış, atık sahalarındaki kirletici ölçümleri veya deneklerin evlerindeki su kaynaklarının kontaminasyon durumunu çoğunlukla değerlendirmemiştir. Çalışmalar genellikle bilinen kanser kümelerine yanıt olarak yapılmamış, rakip risk faktörleri ve çoklu karşılaştırmaların yönetimi konusunda tutarsızlık göstermiştir. Düşük maruz kalma seviyeleri, uzun süreli ölçüm eksikliği, karmaşık modelleme zorlukları ve bireysel risk faktörlerinin (sigara, diyet, sosyoekonomik durum vb.) yetersiz karakterizasyonu, bu çalışmaların toksik atık sahalarının kanser riskini artırıp artırmadığını belirlemede sınırlı fayda sağladığını göstermektedir; ancak hipotez oluşturmada katkı sunmaktadırlar [14].

4.3. Nörolojik Etkiler

Plastikler, ekonomik avantajlarına rağmen, özellikle Bisfenol A (BPA) içeren polikarbonat plastikler (PCP) ve epoksi reçineler aracılığıyla nörolojik hastalıklara yol açarak ciddi sağlık tehditleri oluşturur; BPA, yiyecek ve içecek kaplarından sızarak bilişsel bozukluklar, davranışsal değişiklikler ve nörodejeneratif hastalıkları tetikleyebilir, özellikle mikotoksinlerle (MT'ler) kirlenmiş PCP'lerde bu risk artar, çünkü MT'ler besin zincirine girerek nörotoksositeye neden olur. BPA'nın endokrin bozucu etkileri, özellikle çocuklarda beyin gelişimini olumsuz etkileyerek öğrenme güçlüğü ve dikkat eksikliği gibi sorunlara katkıda bulunurken, nörolojik hastalıkların diğer sebepleri arasında genetik yatkınlık, çevresel toksinler (pestisitler, ağır metaller), enfeksiyonlar ve yaşam tarzı faktörleri (diyet, stres) yer alır. Bu riskleri azaltmak için BPA maruziyetini sınırlamak adına çevresel ve biyolojik izleme yapılmalı, hükümetler PCP kullanımını düzenleyen standartlar oluşturmali ve nörolojik sağlık üzerindeki etkileri araştıran çalışmalar için fon sağlanmalıdır [15].

4.4. Endokrin Sistem Bozuklukları

Plastik yakıtlardan salınan ftalatlar ve bisfenol A gibi kimyasallar, hormon sistemini bozarak üreme sağlığı sorunlarına ve metabolik hastalıklara yol açabilir. Bu kimyasallar, östrojen benzeri etkilere sahip olup, erkeklerde sperm kalitesinin düşmesine, kadınlarda ise menstrüasyon düzensizliklerine neden olabilir [16].

4.5. Spor Tesislerinde Riskler

Spor endüstrisinde kullanılan plastik atıkların geri dönüşümü, özellikle atık yönetimi ve sürdürülebilirlik açısından önemli bir odak noktasıdır; ancak, geri dönüştürülmüş şişeler ve çeşitli plastik ürünlerden üretilen ekipman, tekstil, ayakkabı ve yapay çim gibi spor altyapılarında mikroplastik

ve nanoplastik salınımı ciddi çevresel ve sağlık riskleri oluşturur. Mikroplastikler ve nanoplastikler, drenaj sistemleri yoluyla nehirlerden okyanuslara ulaşarak besin zincirini etkiler, plankton ve balıklar aracılığıyla ekosisteme zarar verir ve insan sağlığı için tehdit oluşturur. Geri dönüşüm süreçleri bu plastikleri işlese de, mikroplastik ve nanoplastiklerin ayrı ayrı ele alınması gerekmektedir. Spor Mühendisleri, sedimentasyon ve filtrasyon gibi yöntemlerle bu partiküllerin çevreye yayılmasını önlemek, flora ve faunayı korumak ve oyuncuların performansını sürdürülebilir bir çevrede desteklemek için etkili geri dönüşüm mekanizmaları geliştirmelidir. Bu çalışma, spor altyapısından mikroplastiklerin toplanması ve çevre dostu bir atık yönetimi sistemi kurularak besin zincirinin korunması için gerekli stratejileri ortaya koymaktadır [17].

5. Spor Tesislerinde Plastik Yakıt Kullanımı ve Optimizasyon Çözümleri

Spor tesisleri, özellikle kapalı yüzme havuzları, buz pistleri ve ısıtmalı spor salonları gibi yüksek enerji tüketimi olan alanlarda plastik yakıtları enerji kaynağı olarak kullanabilir. Ancak, sporcuların sağlığını korumak için aşağıdaki optimizasyon çözümleri uygulanmalıdır:

5.1. Havalandırma Sistemleri

Spor tesislerinde havalandırma sistemleri, sporcuların yoğun fiziksel aktiviteleri sırasında ortaya çıkan yüksek ısı ve nem emisyonları ile değişken doluluk oranlarının oluşturduğu yük nedeniyle büyük önem taşır. Kapalı spor alanlarında iç mekan hava kalitesini korumak ve kullanıcıların sağlık ile konforunu desteklemek amacıyla talep kontrollü havalandırma sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Termo-fizyolojik konfor modelleri, sporcuların yüksek ve değişken aktivite seviyelerine sahip ortamlarda termal konforu değerlendirmede etkili olurken, dinamik termal his modeli, bu tür dinamik koşullarda daha güvenilir sonuçlar sağlar. Talep kontrollü havalandırma sistemleri, enerji verimliliği ve iç hava kalitesini iyileştirme gibi avantajlar sunarken, operasyonel zorluklar gibi dezavantajları da beraberinde getirir. Gelişmiş Spor salonlarda iç mekan iklimlendirme ve enerji performansını optimize etmede yazılımlar yapılmaktadır. Bu çalışmalar, spor tesislerinde havalandırma sistemlerinin tasarımı ve yönetimi için kullanıcı odaklı, sürdürülebilir ve sağlıklı iç mekan ortamları oluşturmayı amaçlar [18,19].

5.2. Emisyon Kontrol Teknolojileri

Nanoplastiklerin çevresel etkileri ve tehlikeleri göz önüne alındığında, emisyon kontrol teknolojileri büyük önem taşımaktadır. Mevcut literatür, nanoplastiklerin kaynakları ve kaderleri üzerine odaklanırken, bu küçük parçacıkların sucul ortamlara salınımını azaltmaya yönelik spesifik emisyon kontrol teknolojileri henüz gelişiminin erken aşamalarında. Bununla birlikte, daha büyük plastik parçacıkların nanofragmentasyonunu önlemek ve ürünlerden nanoplastik salınımını minimize etmek için yenilikçi yaklaşımlar geliştirilmesi gerekmektedir. Özellikle, atık su arıtma tesislerinde nanoplastiklerin tutulması ve nehir sistemlerinde tortulaşmanın optimize edilmesi gibi stratejiler, nanoplastiklerin çevresel yayılımını kontrol altına almada kritik rol oynayabilir. Ayrıca, nanoplastiklerin yüksek yüzey alanı nedeniyle toksik kimyasalları adsorbe etme potansiyeli, bu tür ortak kirleticilerin emisyon kontrolünde entegre yaklaşımların benimsenmesini zorunlu kılmaktadır [20].

5.3. Kentsel Spor Tesislerinde Sürdürülebilirlik ve İç Mekan Hava Kalitesi Optimizasyonu

Son yıllarda kentsel alanlarda spor tesislerine olan talep artışı, bu yapıların yalnızca enerji performansına değil, aynı zamanda kullanıcılar için sağlıklı ve konforlu iç mekan ortamlarına odaklanmayı gerektirmiştir. Bu bağlamda, Avustralya'nın Victoria eyaletinin ılıman ikliminde yer alan bir su sporları merkezindeki doğal ve hibrit (egzoz fanları destekli) havalandırmalı spor salonunun termal ve havalandırma performansı incelenmiştir. Çalışma, hava sıcaklığı katmanlaşması, termal konfor, CO₂ seviyeleri, termal görüntüler ve izleyici gaz havalandırma ölçümlerine dayanmaktadır. CFD simülasyonları, optimize edilmiş iklimlendirme stratejilerinin geliştirilmesine destek olmuştur. Yaz sonu döneminde aşırı ısınma kaynaklı termal rahatsızlık gözlemlenmiş, bu nedenle soğutucu akışkanlı iklimlendirme kullanmadan ve iç hava kalitesinden ödün vermeden enerji verimli stratejiler önerilmiştir. Ayrıca, iç mekan hava kirliliğinin zamansal ve uzamsal heterojenliğini ele almak için geleneksel ölçüm yöntemlerinin yetersiz kaldığı, bu nedenle daha ileri izleme teknolojileri ve düzenlemelere ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir. Hibrit enerji çözümleri, zemin güvenliği ve hava kalitesi izleme yaklaşımlarını birleştirerek, doğal havalandırmalı spor tesislerinin sürdürülebilirliğini ve konforunu artırmaya yönelik bütüncül bir anlayış sunmaktadır [19,21].

6. İş Güvenliği için Optimizasyon Çözümleri

Plastik yakıt üretim tesislerinde ve endüstriyel ortamlarda çalışanların sağlığını korumak için aşağıdaki çözümler uygulanabilir:

6.1. Kişisel Koruyucu Ekipman (KKE) Stratejileri

Plastik yakıt üretim tesislerinde çalışanlar için KKE seçimi, maruz kalınan spesifik kimyasal ajanların toksikolojik profiline göre özelleştirilmelidir. Solunum koruma sistemleri, özellikle N95 veya FFP3 standardındaki partiküllü respiratörler, 0.3 mikron çapındaki partikülleri %99.97 oranında filtreleme kapasitesine sahiptir ve uçucu organik bileşiklere (VOC) karşı koruma sağlar. Bununla birlikte, piroliz süreçlerinde açığa çıkan kompleks kimyasal karışımlar için, pozitif basınçlı hava beslemeli respiratörler veya bağımsız solunum aparatları tercih edilmelidir [23].

Dermal maruziyet riskine karşı, kimyasal penetrasyon direnci ASTM F739 standardına göre test edilmiş Tip 3 veya Tip 4 kimyasal koruyucu giysiler kullanılmalıdır. Bu giysiler, polietilen tereftalat (PET) veya politetrafloroetilen (PTFE) laminasyonlu kumaşlardan üretilmekte olup, aromatik hidrokarbonlara karşı 480 dakikaya kadar koruma sağlayabilmektedir. Ayrıca, nitril veya bütül kauçuk eldivenler, EN 374-3 standardına göre Sınıf 6 (>480 dakika) kimyasal penetrasyon direnci göstermelidir [24].

6.2. Maruz Kalma Sınırları ve Mühendislik Kontrolleri

Plastik yakıt emisyonlarına maruz kalma limitlerinin belirlenmesinde, OSHA'nın İzin Verilen Maruz Kalma Sınırları (PEL'ler) ve ACGIH'nin Eşik Limit Değerleri (TLV'ler) gibi uluslararası standartlar referans alınmalıdır; örneğin, benzen için 8 saatlik zaman ağırlıklı ortalama (TWA) maruz kalma limiti 1 ppm olarak belirlenmiştir. Ancak, OSHA'nın PEL'lerinin çoğu 1970'lerden beri güncellenmemiş olup, teknolojik ve bilimsel gelişmeler ışığında yetersiz kalmaktadır. Kompleks kimyasal karışımların kümülatif ve sinerjistik toksisite potansiyeli nedeniyle daha konservatif limitler benimsenmeli, Cal/OSHA PEL'leri, NIOSH REL'leri ve ACGIH TLV'leri gibi alternatif standartlar dikkate alınmalıdır. Maruz kalma kontrolünde hiyerarşik bir yaklaşım izlenmeli; öncelikle kapalı sistem prosesler, negatif basınçlı havalandırma ve lokal egzoz havalandırma (LEV) gibi mühendislik kontrolleri uygulanmalıdır. LEV sistemleri, ACGIH'nin "Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice" kılavuzuna uygun tasarlanmalı, minimum 0.5-1.0 m/s yakalama hızı sağlanarak emisyon kaynağında kontaminantlar etkili bir şekilde kontrol edilmelidir. İşverenler, OSHA Tehlike İletişim Standardı'na uygun olarak güvenlik veri levhalarına tüm ilgili maruz kalma sınırlarını eklemeli ve işyeri güvenliğini artırmak için bu kontrolleri entegre etmelidir [25,26].

6.3. Biyolojik İzleme ve Sağlık Sürveyansı

Plastik yakıt üretim tesislerinde çalışanların maruz kaldığı kimyasal maddelere yönelik sağlık sürveyansı, kapsamlı bir biyolojik izleme programı ile desteklenmelidir. 1996-2019 yılları arasında HSE veritabanında toplanan 950.000'den fazla biyolojik izleme sonucuna dayanan analizler, benzen, kurşun, cıva ve heksametilen diizosiyanat (HDI) gibi kimyasallara maruziyet eğilimlerini ortaya koymaktadır. Örneğin, benzen maruziyeti için idrarda S-fenilmerkaptirik asit (SPMA) seviyeleri, 1996'da 133,7 $\mu\text{mol/mol}$ kreatinininden 2019'da 1,7 $\mu\text{mol/mol}$ kreatinine düşmüştür, bu da düzenleyici müdahalelerin ve endüstriyel uygulamaların maruziyeti azalttığını göstermektedir. Benzer şekilde, kurşun için kan konsantrasyonları 53 $\mu\text{g/dl}$ 'den 24 $\mu\text{g/dl}$ 'ye, cıva için idrar seviyeleri ise 13,7 $\mu\text{mol/mol}$ kreatinininden 2,1 $\mu\text{mol/mol}$ kreatinine gerilemiştir. Ancak, HDI maruziyetinde 2005-2010'da 0,7 $\mu\text{mol HDA/mol}$ kreatinine düşen seviyeler, 2016-2019'da 1,0 $\mu\text{mol HDA/mol}$ kreatinine yükselmiştir, bu da sürekli müdahale ihtiyacını vurgular. Sağlık sürveyansı için, benzen maruziyetini değerlendirmek amacıyla idrarda S-PMA ve trans,trans-mukonik asit (t,t-MA) analizleri son 24 saatlik maruziyeti izlemek için kullanılmalı, kronik maruziyet için ise tam kan sayımı ve kromozomal aberasyon analizleri yapılmalıdır. Solunum sistemi etkilerini değerlendirmek için periyodik spirometri testleri (FEV1, FVC, FEV1/FVC oranı) ve difüzyon kapasitesi ölçümleri (DLCO) uygulanmalı, akciğer parankimindeki değişiklikler ise yüksek çözünürlüklü bilgisayarlı tomografi (HRCT) ile tespit edilmelidir. Atık ve geri dönüşüm sektörlerinde artan maruziyet riskleri, bu tesislerdeki çalışanlar için düzenli biyolojik izleme ve sağlık sürveyansının kritik olduğunu göstermektedir [27].

6.4. Entegre Eğitim ve Yeterlilik Sistemleri

Plastik sektöründe iş sağlığı ve güvenliği (İSG) farkındalığını artırmak ve iş kazalarını önlemek amacıyla entegre eğitim ve yeterlilik sistemlerinin geliştirilmesi kritik önemdedir. Sosyal Güvenlik Kurumu'nun 2014 verilerine göre, Kauçuk ve Plastik Ürünlerin İmalatı sektöründe 6.895 sigortalı çalışanın iş kazası geçirdiği belirtilmiştir; bu kapsamda, İç Anadolu ve Marmara Bölgesi'nde 11 işletmede 721 çalışana uygulanan anketle, iş kazalarının başlıca nedeninin çalışan dikkatsizliği ve sıkışma-kesilme olduğu tespit edilmiştir. İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü'nün 2016-2018 yılları arasında yürüttüğü İSGAP projesi, plastik sektörü dahil çeşitli sektörlerde risk envanteri oluşturma, iş hijyeni ölçümleri, sağlık taramaları ve kişisel koruyucu donanım (KKD) incelemeleriyle İSG koşullarını iyileştirmeyi hedeflemiştir. Proje, İzmir ve Kocaeli'deki plastik sektörü işletmelerinde

risk değerlendirmeleri ve kontrol listeleri oluşturarak, ergonomik riskler, kimyasal maruziyet, gürültü ve ısı stresi gibi faktörlere yönelik farkındalık eğitimleri düzenlemiştir. Bu eğitimler, çalışanların ve İSG profesyonellerinin yeterliliklerini artırarak, sektöre özgü önleyici planların uygulanmasını ve iş kazalarının erken tespitini sağlamıştır. Entegre eğitim sistemleri, makine kullanımıyla ilgili risklerin azaltılması için saha gözlemleri ve sektöre özgü rehberler geliştirerek, plastik işleme tekniklerinde (termoform, levha ekstrüzyon, şişirme ve enjeksiyon kalıplama) güvenli çalışma uygulamalarını güçlendirmiştir [28,29].

6.5. İleri Otomasyon ve Dijital İkiz Teknolojileri

Endüstri 4.0'ın sunduğu ileri otomasyon ve dijital ikiz teknolojileri, plastik yakıt üretim tesislerinde iş güvenliği, sürdürülebilirlik ve üretim verimliliğini optimize etmede kritik bir rol oynamaktadır. Nesnelerin İnterneti (IoT), bulut teknolojileri, büyük veri, yapay zeka, sanal gerçeklik ve 3 boyutlu yazıcı teknolojileri gibi Endüstri 4.0 bileşenleri, üretim süreçlerini geleneksel yapıdan akıllı fabrikalara dönüştürerek sinerjik bir etki yaratmıştır. Dijital ikiz teknolojisi, fiziksel üretim sistemlerinin sanal kopyalarını oluşturarak proses optimizasyonu, risk değerlendirmesi ve emisyon profillerinin öngörülmesi için güçlü bir araç sunar; bu, özellikle anormal durumların tespitinde ve potansiyel tehlikelere karşı proaktif müdahalelerde makine öğrenimi algoritmalarıyla desteklenmektedir. Yorumlayıcı yapısal modelleme ve MICMAC analizi, Endüstri 4.0'ın üretim verimliliği ve iş modeli inovasyonu gibi ekonomik sürdürülebilirlik işlevlerinin, enerji sürdürülebilirliği, zararlı emisyon azaltımı ve sosyal refah gibi sosyo-çevresel faydaları tetiklediğini göstermektedir. Plastik yakıt üretim tesislerinde IoT sensörleri, çevresel koşulları ve proses parametrelerini gerçek zamanlı izleyerek veri odaklı karar alma süreçlerini güçlendirirken, dijital ikizler farklı operasyonel senaryoların simülasyonunu yaparak maruz kalma potansiyelini azaltır ve iş güvenliğini artırır. Bu teknolojiler, Endüstri 4.0 paydaşlarının sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için daha etkili, çeşit ve adil bir şekilde işbirliği yapmasını sağlayarak, plastik sektöründe hem çevresel hem de mesleki risklerin azaltılmasına katkı sunar [30,31].

6.6. Döngüsel Atık Yönetimi ve Toksisite Azaltma

Plastik yakıt üretim süreçlerinde döngüsel atık yönetimi ve toksisite azaltma, çevresel sürdürülebilirlik ve insan sağlığı için kritik öneme sahiptir. Piroliz sürecinde ortaya çıkan char, yüksek karbon içeriği ve gözenekli yapısı sayesinde, fiziksel veya kimyasal aktivasyonla materyal olarak kullanılabilir; bu, endüstriyel atık suların arıtımı veya gaz fazı kirleticilerin adsorpsiyonunda

etkili bir çözüm sunar. Buda organik kirleticilerin giderimini sağlayarak çevresel kirliliği azaltır. Yapılan çalışmalarda, plastik atıkların 20. yüzyıldan itibaren yaygınlaşmasıyla insan, hayvan ve çevre sağlığına zarar verdiğini vurgulamış; bu zararları azaltmak için geri dönüşüm ve atık yönetiminin önemini belirtmiştir. Türkiye Atık Bankaları modeli, kentsel katı atık yönetiminde geri dönüşüm, döngüsel ekonomi ve sıfır atık hedeflerini desteklemek için ekonomik teşviklerle toplumsal katılımı artırmayı hedefler. Bu model, 2022 atık verilerine dayalı senaryolarla ekonomik faydalarını göstermiş ve mevcut belediye temelli sıfır atık projelerine göre yapısal üstünlükler sunmuştur. Plastik yakıt üretiminde bu tür entegre döngüsel ekonomi yaklaşımları, atıkların yeniden kullanımını teşvik ederek toksik emisyonları ve çevresel zararı azaltırken, sürdürülebilir üretim süreçlerini destekler [32, 33].

7. Sürdürülebilir Alternatifler ve Gelecek Perspektifi

Plastik yakıtların çevresel ve sağlık etkilerini minimize etmek için, sürdürülebilir alternatifler ve ileri teknolojik çözümler geliştirilmektedir. Bu bölümde, gelecek vadeden yaklaşımlar ve teknolojik inovasyonlar detaylandırılmıştır.

7.1. Katalitik Sistemlerde Nanoteknolojik İnovasyonlar

Plastik atıkların pirolizi için geliştirilen yeni nesil katalizörler, reaksiyon kinetiğini optimize ederek, daha düşük sıcaklıklarda ve daha seçici dönüşüm sağlayabilmektedir. Mezogözenekli alüminosilikat (MCM-41, SBA-15) bazlı katalizörler, kontrollü gözenek boyutu dağılımı (2-10 nm) ve yüksek spesifik yüzey alanı ($>700 \text{ m}^2/\text{g}$) sayesinde, poliolefinlerin (PE, PP) seçici olarak dallı alifatik hidrokarbonlara dönüşümünü sağlayabilir. Bu katalizörler, aromatik bileşik oluşumunu % 25-30 oranında azaltarak, daha temiz yanma profili sunan yakıtlar üretilmesine olanak tanır [47].

Nanoteknolojik yaklaşımlar, katalizör performansını daha da iyileştirebilir. Örneğin, grafen oksit destekli Ni-Mo bimetalik nanopartiküller, sinerjistik katalitik etki göstererek, C-C bağlarının seçici olarak kırılmasını ve hidrojenasyon reaksiyonlarını destekler. Bu katalizörler, konvansiyonel katalizörlere göre % 40 daha düşük aktivasyon enerjisi ve % 60 daha yüksek dönüşüm oranı sağlayabilir [48].

7.2. Biyoplastik Bazlı Yakıt Sistemleri ve Karbon Nötrlük

Biyoplastik bazlı yakıt sistemleri, fosil yakıtlara alternatif olarak geliştirilen ve karbon nötrlük hedeflerine katkı sağlayan yenilikçi çözümlerdir. Bu

sistemler, yenilenebilir biyokütle kaynaklarından üretilen biyoplastiklerin yakıt olarak kullanılmasını veya yakıt sistemlerinde biyoplastik bileşenlerin entegrasyonunu içerir.

Biyoplastikler, mısır nişastası, şeker kamışı veya selüloz gibi biyolojik kaynaklardan üretilir ve geleneksel plastiklere kıyasla daha düşük karbon ayak izine sahiptir. Yaşam döngüleri boyunca, bitkiler büyürken atmosferden CO₂ absorbe eder, bu da yakıt olarak kullanıldıklarında salınan karbonu dengeleyebilir.

Güncel araştırmalar, biyoplastiklerin piroliz veya gazlaştırma yoluyla biyoyakıtlara dönüştürülebileceğini göstermektedir. Ayrıca, biyoplastik kompozitler yakıt hücrelerinde membran olarak kullanılabilen ve hidrojen ekonomisine geçişi desteklemektedir.

Karbon nötrlük açısından, biyoplastik bazlı yakıt sistemleri iki temel avantaj sunar: yenilenebilir kaynaklardan üretilmeleri ve biyobozunur olmaları. Bu özellikler, enerji üretiminin çevresel etkilerini azaltırken, atık yönetimi sorunlarını da hafifletir.

Ancak, geniş ölçekli uygulamalar için verimlilik, maliyet ve arazi kullanımı gibi zorlukların aşılması gerekmektedir. Sürdürülebilir tarım uygulamaları ve gelişmiş biyorafineri teknolojileri, bu sistemlerin karbon nötrlük hedeflerine katkısını maksimize etmek için kritik öneme sahiptir [36,37].

7.3. Döngüsel Ekonomi ve Endüstriyel Simbiyoz Modelleri

Plastik yakıt üretimi, daha geniş bir döngüsel ekonomi ekosistemi içerisinde konumlandırılmalıdır. Endüstriyel simbiyoz modelleri, farklı endüstriyel proseslerin atık ve yan ürünlerinin, diğer prosesler için hammadde veya enerji kaynağı olarak kullanılmasını sağlar. Örneğin, plastik piroliz tesislerinde üretilen char, çimento üretiminde alternatif yakıt olarak veya toprak iyileştirici olarak kullanılabilir. Ayrıca, piroliz sürecinde açığa çıkan sentetik gaz, kombine ısı ve güç sistemlerinde enerji üretimi için kullanılabilir [38].

Döngüsel ekonomi modellerinin ekonomik ve çevresel etkilerini değerlendirmek için, Malzeme Akış Analizi ve Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi metodolojileri entegre edilmelidir. Bu yaklaşım, plastik atık akışlarının izlenmesini ve farklı değerlendirme senaryolarının karşılaştırılmasını sağlar [39].

7.4. Entegre Yenilenebilir Enerji Sistemleri

Plastik yakıt üretim tesislerinin enerji ihtiyacını karşılamak ve karbon ayak izini azaltmak için, yenilenebilir enerji sistemleri entegre edilmelidir. Fotovoltaik sistemler, rüzgar türbinleri ve biyokütle bazlı enerji sistemleri, tesisin elektrik ihtiyacını karşılayabilir. Ayrıca, konsantre güneş enerjisi sistemleri, piroliz reaktörleri için gerekli olan yüksek sıcaklık ısı enerjisini sağlayabilir [40].

Yeşil hidrojen teknolojisi, plastik yakıt üretiminde önemli bir rol oynayabilir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektroliz yoluyla üretilen hidrojen, plastik atıkların hidrojenasyon süreçlerinde kullanılarak, daha temiz yakıtlar üretilmesini sağlayabilir [41].

7.5. Akıllı Enerji Yönetim Sistemleri ve Verimlilik Optimizasyonu

Enerji verimliliği, plastik yakıt üretiminin sürdürülebilirliğini artırmak için kritik bir faktördür. Akıllı enerji yönetim sistemleri, proses parametrelerini ve enerji tüketimini gerçek zamanlı olarak izleyerek, optimizasyon fırsatlarını belirleyebilir. Makine öğrenimi algoritmaları, enerji tüketim modellerini analiz ederek, enerji tasarrufu potansiyelini tahmin edebilir ve operasyonel parametreleri optimize edebilir [42].

Isı entegrasyonu ve atık ısı geri kazanımı, enerji verimliliğini artırmak için etkili stratejilerdir. Pinch analizi metodolojisi, proses ısı akışlarını optimize etmek ve atık ısı geri kazanım potansiyelini belirlemek için kullanılabilir [43].

8. Yasal Düzenlemeler ve Standartlar

Plastik yakıtların üretimi, dağıtımı ve kullanımı, çevresel ve sağlık risklerini kontrol altına almak için kapsamlı yasal düzenlemeler ve standartlar gerektirmektedir. Bu bölümde, ulusal ve uluslararası düzenlemeler ve uyum stratejileri detaylandırılmıştır.

8.1. Emisyon Kontrol Mevzuatı ve Uyum Stratejileri

Avrupa Birliği'nin Hava Kalitesi Direktifi (2008/50/EC), ambient hava kalitesi standartlarını belirleyerek, PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, SO₂ ve benzen gibi kirleticiler için limit değerler tanımlamaktadır. Ayrıca, Endüstriyel Emisyonlar Direktifi (2010/75/EU), Mevcut En İyi Teknikler (BAT) prensibine dayalı olarak, endüstriyel tesisler için emisyon limit değerlerini belirlemektedir. Bu direktifler, plastik yakıt üretim ve kullanım tesislerinin emisyon kontrolü için yasal çerçeveyi oluşturmaktadır [44].

Amerika Birleşik Devletleri'nde, Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından yönetilen Ulusal Ambient Hava Kalitesi Standartları (NAAQS) ve Tehlikeli Hava Kirleticileri (HAP) düzenlemeleri, plastik yakıt tesislerinin emisyon kontrolü için yasal gereklilikleri belirlemektedir [44].

8.2. Atık Yönetimi Mevzuatı ve Döngüsel Ekonomi Entegrasyonu

Plastik atıkların yönetimi ve döngüsel ekonomi prensiplerinin entegrasyonu, çevresel sürdürülebilirlik ve kaynak verimliliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Avrupa Birliği'nin atık yönetimi hiyerarşisi, önleme, yeniden kullanım, geri dönüşüm, geri kazanım ve bertarafı önceliklendirerek sürdürülebilir bir çerçeve sunarken, ambalaj atıkları ve tek kullanımlık plastikler için özel düzenlemeler, atık azaltımı ve etkili yönetimini teşvik etmektedir. Türkiye'de ise atık yönetimi ve ambalaj atıklarının kontrolüne ilişkin mevzuatlar, plastik atıkların toplanması, taşınması, geri kazanımı ve bertarafı için yasal standartlar belirlemektedir. Doğrusal ekonomi modelinin kaynakları atığa dönüştürmesi ve çevresel sorunları artırması, döngüsel ekonomi yaklaşımını zorunlu hale getirmiştir. Bu model, atık oluşumunu en aza indirerek ve kaynak kullanımını optimize ederek ekonomik, sosyal ve çevresel sorunlara kısa ve uzun vadeli çözümler sunar. Mekânsal planlamanın döngüsel ekonomi ilkelerine uygun şekilde tasarlanması, ülke genelinden yerel düzeylere kadar koordineli bir sistem oluşturarak geri dönüşüm ve geri kazanım oranlarını artırır. Bu entegre yaklaşım, çevresel etkileri azaltırken, atık yönetiminde uluslararası standartlarla uyumlu bir yapı geliştirilmesine katkı sağlar [45].

8.3. İş Sağlığı ve Güvenliği Mevzuatı ile Ürün Kalite Standartları ve Sertifikasyon Sistemleri

İş sağlığı ve güvenliği ile ürün kalite standartları, plastik yakıt üretim sektöründe kritik öneme sahiptir. Uluslararası Çalışma Örgütü'nün (ILO) C155 ve C170 sözleşmeleri, kimyasal maddelerle çalışan işçilerin korunmasına yönelik temel prensipleri belirlerken, ISO 45001 standardı iş sağlığı ve güvenliği yönetim sistemleri için küresel gereklilikleri tanımlamaktadır.

ISO 45001, iş kazalarının önlenmesi ve güvenli çalışma ortamlarının sağlanması için tasarlanmış olup, coğrafi, politik, ekonomik ve sosyal sınırları aşan uluslararası bir standarttır. Bu standart, plastik yakıt üretim tesislerinde proaktif risk önleme ve İSG performansının sürekli iyileştirilmesi yoluyla organizasyonel dayanıklılığın artmasını sağlar.

Türkiye'de 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu, plastik yakıt üretim tesislerinde çalışanların korunması için yasal çerçeveyi oluşturmaktadır.

Bu kanun kapsamında, işverenler risk değerlendirmesi yapmak, çalışanları bilgilendirmek ve eğitmek, koruma ve önleme bilincini yerleştirmekle yükümlüdür.

Ürün kalitesi açısından, ASTM D7544 standardı piroliz sıvıları için fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlerken, Avrupa Standardizasyon Komitesi'nin (CEN) EN 15940 standardı parafinik dizel yakıtlar için kalite gerekliliklerini tanımlamaktadır. Bu standartlar, plastik atıklardan elde edilen yakıtların güvenli ve verimli kullanımını sağlamak için kritik öneme sahiptir.

Plastik sektöründe iş sağlığı ve güvenliği açısından en büyük tehlikelerden biri, çalışma ortamındaki kimyasal buharının ve sıcak işlem gören plastik hammadde buharının solunmasıdır. Bu riskleri ortadan kaldırmak için çalışma ortamının havalandırmasının güçlü olması ve çalışanların uygun kişisel koruyucu donanımları kullanması gerekmektedir.

9. Sonuç

Plastik yakıtlar, atık yönetimi ve enerji üretimi alanında önemli bir potansiyel sunmakla birlikte, çevresel ve sağlık etkileri kapsamlı bir değerlendirme ve optimizasyon gerektirmektedir. Bu çalışmada incelenen bulgular ve önerilen çözümler, plastik yakıtların sürdürülebilir bir şekilde kullanılması için bütünsel bir yaklaşım sunmaktadır.

Plastik atıkların yakıtla dönüştürülmesi, atık yönetimi hiyerarşisinde geri kazanım basamağında yer almakta ve çöp sahalarına gömülmesine kıyasla daha avantajlı bir alternatif sunmaktadır. Piroliz, gazlaştırma ve hidrojenasyon gibi termokimyasal dönüşüm teknolojileri, plastik atıkları yüksek enerji değerine sahip yakıtlara dönüştürebilmektedir. Bununla birlikte, bu süreçlerde açığa çıkan emisyonlar, özellikle poliaromatik hidrokarbonlar (PAH), dioksinler, furanlar ve ağır metaller, ciddi çevresel ve sağlık riskleri oluşturabilmektedir.

Spor tesislerinde ve endüstriyel ortamlarda plastik yakıtların kullanımı, enerji maliyetlerini düşürebilir ve atık yönetimine katkıda bulunabilir. Ancak, bu tesislerde çalışanların ve kullanıcıların sağlığını korumak için kapsamlı önlemler alınmalıdır. İleri emisyon kontrol teknolojileri, katalitik konvertörler, elektrostatik presipitörler ve aktif karbon filtreleri gibi sistemler, zararlı bileşiklerin salınımını % 40-60 oranında azaltabilmektedir.

Biyoplastik bazlı yakıt sistemleri, yenilenebilir kaynaklardan üretilmeleri ve karbon nötrlük hedeflerine katkıda bulunmaları nedeniyle, geleneksel plastik yakıtlara sürdürülebilir bir alternatif sunmaktadır. Ayrıca, döngüsel ekonomi modelleri ve endüstriyel simbiyoz yaklaşımları, plastik atıkların

değer zincirinde daha etkin kullanımını sağlayarak, çevresel etkileri minimize edebilmektedir.

İş sağlığı ve güvenliği açısından, kişisel koruyucu ekipman kullanımı, maruz kalma sınırlarının belirlenmesi, biyolojik izleme ve sağlık sürveyansı, entegre eğitim ve yeterlilik sistemleri ile ileri otomasyon teknolojileri, çalışanların sağlığını korumak için kritik öneme sahiptir. Özellikle ISO 45001 standardı ve ulusal iş sağlığı ve güvenliği mevzuatı, güvenli çalışma ortamlarının sağlanması için yasal çerçeveyi oluşturmaktadır.

Sonuç olarak, plastik yakıtların güvenli ve sürdürülebilir kullanımı için teknolojik yeniliklerin takibi, yasal düzenlemelere uyum ve farkındalık artırıcı politikaların uygulanması gerekmektedir. Bu entegre yaklaşım, plastik atıkların değerlendirilmesi ve enerji üretimi süreçlerinde çevresel ve sağlık risklerini minimize ederken, ekonomik ve sosyal faydaları maksimize edebilecektir.

Kaynakça

- [1] Ritchie, H., & Roser, M. (2018). Plastic pollution. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>
- [2] Kunwar, B., Cheng, H. N., Chandrashekar, S. R., & Sharma, B. K. (2016). Plastics to fuel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 421-428. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.015>
- [3] Miandad, R., Barakat, M. A., Aburizaiza, A. S., Rehan, M., & Nizami, A. S. (2016). Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 102, 822-838. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.06.022>
- [4] Sharuddin, S. D. A., Abnisa, F., Daud, W. M. A. W., & Aroua, M. K. (2016). A review on the pyrolysis of plastic wastes. *Energy Conversion and Management*, 115, 308-326. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.037>
- [5] Erkiaga, A., Lopez, G., Amutio, M., Bilbao, J., & Olazar, M. (2013). Syn-gas from the steam gasification of polyethylene in a conical spouted bed reactor. *Fuel*, 109, 461-469. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.022>
- [6] Khopade, K. V., Chikkali, S. H., & Barsu, N. (2023). Metal-catalyzed plastic depolymerization. *Cell Reports Physical Science*, 4(5), Article 101341. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2023.101341>
- [7] Williams, P. T. (2020). Hydrogen and carbon nanotubes from pyrolysis-catalysis of waste plastics: A review. *Waste and Biomass Valorization*, 12(1), 1-28. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01054-w>
- [8] Cook, C. R., & Halden, R. U. (2020). Ecological and health issues of plastic waste. In *Plastic waste and recycling* (pp. 51-71). Academic Press.
- [9] Verma, R., Vinoda, K. S., Papireddy, M., & Gowda, A. N. S. (2016). Toxic pollutants from plastic waste - A review. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 701-708. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.069>
- [10] Shen, M., Huang, W., Chen, M., Song, B., Zeng, G., & Zhang, Y. (2020). (Micro)plastic crisis: Unignorable contribution to global greenhouse gas emissions and climate change. *Journal of Cleaner Production*, 254, Article 120138. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120138>
- [11] Astrup, T., Fruergaard, T., & Christensen, T. H. (2009). Recycling of plastic: Accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management & Research*, 27(8), 763-772. <https://doi.org/10.1177/0734242X09345868>
- [12] Tian, X., Yang, Q., Zhao, Y., Wang, Q., & Wang, Y. (2024). Comprehensive multidimensional analysis of metalloid-containing dust from plastic sports facilities: Potential sources and health risks. *Environmental Science & Technology*, 58(50), 22456-22467. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c05847>

- [13] Roni, M. R., & Afridi, M. A. (2023). Incorporating health impacts into the circular economy: A comprehensive assessment of worker and consumer safety in the plastic production and recycling industries. *Engineering Proceedings*, 56(1), 250. <https://doi.org/10.3390/ASEC2023-15395>
- [14] Russi, M. B., Borak, J. B., & Cullen, M. R. (2008). An examination of cancer epidemiology studies among populations living close to toxic waste sites. *Environmental Health*, 7, Article 32. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-7-32>
- [15] Anwar, Z., Anjum, F., & Ghayas, S. (2021). Polycarbonate plastics and neurological disorders: From exposure to preventive interventions. In M. S. H. Akash & K. Rehman (Eds.), *Environmental pollutants and neurological disorders. Emerging pollutants and associated treatment technologies*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66376-6_8
- [16] Bergman, Å., Heindel, J. J., Jobling, S., Kidd, K. A., & Zoeller, R. T. (2013). State of the science of endocrine disrupting chemicals 2012: An assessment of the state of the science of endocrine disruptors prepared by a group of experts for the United Nations Environment Programme and World Health Organization. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/state-of-the-science-of-endocrine-disrupting-chemicals>
- [17] Prasanth, V. V., & Nallavan, G. (2022, March). A review on plastic recycling and micro-plastic waste management in the sports industry and infrastructure. Paper presented at the International Conference on Sustainable Environmental Management (ICSEM – 2022), Alagappa Institute of Management, Alagappa University, Karaikudi, Tamil Nadu, India.
- [18] Szulc, J., Bamyra, M., Ryngajłło, M., Pielech-Przybylska, K., & Gutrowska, B. (2023). Indicators of chemical and microbiological pollution of air in sports centers. *Molecules*, 28(8), Article 3560. <https://doi.org/10.3390/molecules28083560>
- [19] Rajagopalan, P., & Luther, M. B. (2013). Thermal and ventilation performance of a naturally ventilated sports hall within an aquatic centre. *Energy and Buildings*, 58, 111–122. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.022>
- [20] Koelmans, A. A., Besseling, E., & Shim, W. J. (2015). Nanoplastics in the aquatic environment. Critical review. In M. Bergmann, L. Gutow, & M. Klages (Eds.), *Marine anthropogenic litter*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-319-16510-3_12
- [21] Kumar, P., Skouloudis, A. N., Bell, M., Viana, M., Carotta, M. C., Biskos, G., & Morawska, L. (2016). Real-time sensors for indoor air monitoring and challenges ahead in deploying them to urban buildings. *Science of the Total Environment*, 560–561, 150–159. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.032>

- [22] Ghosh, C., Biswas, M., & Ghosh, G. (2025). Occupational health hazards and use of personal protective equipment (PPE) among plastic recycling workers in Bangladesh. *Scholars Journal of Applied Medical Sciences*, 13(3), Article 00X. <https://doi.org/10.36347/sjams.2025.v13i03.00X>
- [23] Occupational Safety and Health Administration. (2016). OSHA technical manual: Personal protective equipment. United States Department of Labor.
- [24] International Labour Organization. (2019). Safety and health at the heart of the future of work: Building on 100 years of experience. International Labour Organization.
- [25] Occupational Safety and Health Administration. (2017). Permissible exposure limits – Annotated tables—United States Department of Labor. <https://www.osha.gov/annotated-pels>
- [26] International Organization for Standardization. (2018). ISO 45001:2018 Occupational health and safety management systems — Requirements with guidance for use. ISO.
- [27] Morton, J., Sams, C., Leese, E., Garner, F., Iqbal, S., & Jones, K. (2022). Biological monitoring: Evidence for reductions in occupational exposure and risk. *Frontiers in Toxicology*, 4, Article 836567. <https://doi.org/10.3389/ftox.2022.836567>
- [28] Özen, T. (2016). Plastik ambalaj ürün imalatında iş kazalarının irdelenmesi [İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi]. T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, Ankara.
- [29] T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü İş Sağlığı ve Güvenliği Araştırma ve Geliştirme Enstitüsü Başkanlığı (İSGÜM). (2018). Plastik ürünleri imalatı sektöründe iş sağlığı ve güvenliği rehberi (Revizyon: 2024). İş Sağlığı ve Güvenliği Araştırma Projesi (İSGAP). Ankara: T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı.
- [30] Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119869. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869>
- [31] Kumaş, E., & Erol, S. (2021). Endüstri 4.0'da anahtar teknoloji olarak dijital ikizler. *Politeknik Dergisi*, 24(2), 691-701.
- [32] Kayan, A., & Küçük, A. (2020). Plastik kirliliğin çevresel zararları ve çözüm önerileri. *Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 22(2), 403-427.
- [33] Bilgili, M. Y. (2025). Geri dönüşüm, döngüsel ekonomi ve sıfır atık odaklı bir model önerisi: Türkiye atık bankaları. *Çevre Şehir ve İklim Dergisi*, 7, 106-144.

- [34] Kunwar, B., Cheng, H. N., Chandrashekaran, S. R., & Sharma, B. K. (2016). Plastics to fuel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 421-428. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.015>
- [35] Serrano, D. P., Aguado, J., & Escola, J. M. (2012). Developing advanced catalysts for converting polyolefinic waste plastics into fuels and chemicals. *ACS Catalysis*, 2(9), 1924-1941. <https://doi.org/10.1021/cs3003403>
- [36] Babu, R. P., O'Connor, K., & Seeram, R. (2013). Current progress on bio-based polymers and their future trends. *Progress in Biomaterials*, 2, Article 8. <https://doi.org/10.1186/2194-0517-2-8>
- [37] Sogancioglu, M., Yel, E., & Ahmetli, G. (2017). Pyrolysis of waste high-density polyethylene (HDPE) and low-density polyethylene (LDPE) plastics and production of epoxy composites with their pyrolysis chars. *Journal of Cleaner Production*, 165, 369-381.
- [38] Ellen MacArthur Foundation. (2016). The new plastics economy: Rethinking the future of plastics. <https://ellenmacarthurfoundation.org/the-new-plastics-economy-rethinking-the-future-of-plastics>
- [39] World Economic Forum. (2016). The new plastics economy: Rethinking the future of plastics. <https://www.weforum.org/reports/the-new-plastics-economy-rethinking-the-future-of-plastics>
- [40] International Renewable Energy Agency. (2020). Global renewables outlook: Energy transformation 2050. IRENA.
- [41] Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2023). Türkiye ulusal enerji planı (2023-2035). T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı.
- [42] International Energy Agency. (2022). Energy efficiency 2022. IEA. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2022>
- [43] Scheuer, C., Keoleian, G. A., & Reppe, P. (2003). Life cycle energy and environmental performance of a new university building: Modeling challenges and design implications. *Energy and Buildings*, 35(10), 1049-1064. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(03\)00066-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(03)00066-5)
- [44] European Parliament and Council. (2008). Directive 2008/50/EC of the European Parliament and the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. *Official Journal of the European Union*, L 152. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32008L0050>
- [45] Aydemir, D. S. (2025). Türkiye’de döngüsel ekonomi için çok ölçekli plan stratejileri. *Çevre İklim ve Sürdürülebilirlik*, 26(1).

Yüzme Eğitimi ve Antrenörlüğü için Ekolojik Havuz Sistemleri: Genç Sporcular için Mikroplastik ve Kimyasal Risklere Sürdürülebilir Çözümler 8

Necip Zeki Budak¹

Recep Bozdemir²

Yakup Budak³

Özet

Yüzme havuzları, sporcuların performans geliştirme süreçlerinde vazgeçilmez tesisler olmasına rağmen, içerdikleri mikroplastik ve kimyasal kirleticiler sporcu sağlığı için ciddi tehditler oluşturmaktadır. Bu çalışma, sentetik mayolar, kozmetik ürünler ve havuz ekipmanlarından kaynaklanan mikroplastiklerin solunum, cilt ve endokrin sistemi üzerindeki olumsuz etkilerini incelemektedir. Ayrıca, klor bazlı dezenfektanların oluşturduğu trihalometanlar ve kloraminler gibi dezenfeksiyon yan ürünlerinin sağlık risklerini değerlendirmektedir. Geleneksel havuz temizleme yöntemlerinin sınırlılıklarını ele alan çalışma, biyolojik filtrasyon sistemleri, ozon ve UV dezenfeksiyon teknolojileri ve yeşil kimya uygulamaları gibi sürdürülebilir çözümler sunmaktadır. Vaka çalışmaları ve ekonomik analizler, yeşil çözümlerin başlangıçta daha yüksek yatırım gerektirmesine rağmen, uzun vadede sağlık, çevre ve ekonomik avantajlar sağladığını göstermektedir. Çalışma, mikroplastik standartları, dezenfeksiyon yan ürünleri limitleri ve yeşil teknoloji teşvikleri gibi politika önerileriyle sonuçlanmaktadır. Sonuç olarak, sporcuların sağlığını korurken çevresel sürdürülebilirliği sağlamak için bütüncül bir yaklaşım önerilmektedir.

- 1 Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Spor Bilimleri Fakültesi, Tokat, 60200, Türkiye, necipzekibudak@gmail.com <https://orcid.org/0009-0002-3286-8448>
- 2 Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Spor Bilimleri Fakültesi, Tokat, 60200, Türkiye, recep.bozdemir@gop.edu.tr, <https://orcid.org/0009-0002-3286-8448>
- 3 Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Tokat, 60200, Türkiye, ybudak74@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7108-5548>

1. Giriş

Yüzme havuzları, sporcuların performans geliştirme ve rehabilitasyon süreçlerinde kritik öneme sahip tesislerdir. Ancak son yıllarda yapılan araştırmalar, havuz sularında bulunan mikroplastikler ve kimyasal dezenfektanların sporcu sağlığı üzerinde ciddi olumsuz etkilere neden olabileceğini ortaya koymuştur [1,2]. Bu bölüm, yüzme havuzlarındaki mikroplastik ve kimyasal kirliliğin kaynaklarını, sağlık etkilerini ve sürdürülebilir çözüm önerilerini kapsamlı şekilde incelemektedir.

Dünya genelinde her yıl yaklaşık 8 milyon ton plastik atık okyanuslara karışmakta ve bu atıkların parçalanmasıyla oluşan mikroplastikler (<5 mm) su kaynaklarında yaygın kirleticiler haline gelmektedir [3]. Yüzme havuzları da bu kirlilikten etkilenmektedir. Havuzlarda kullanılan sentetik mayolar, havuz ekipmanları ve kozmetik ürünler mikroplastik kirliliğinin başlıca kaynaklarıdır [4]. Ayrıca, havuz suyunun dezenfeksiyonu için kullanılan klor gibi kimyasallar, organik maddelerle reaksiyona girerek trihalometanlar (THM) ve haloasetik asitler (HAA) gibi potansiyel zararlı dezenfeksiyon yan ürünlerini (DYÜ) oluşturmaktadır [5,6].

Bu bölümün amacı, yüzme havuzlarındaki mikroplastik ve kimyasal kirliliğin sporcu sağlığı üzerindeki etkilerini incelemek ve bu sorunlara yönelik sürdürülebilir, çevre dostu çözümler sunmaktır. Ayrıca, geleneksel havuz bakım yöntemlerinin sınırlılıklarını tartışarak, biyolojik filtrasyon sistemleri, ozon dezenfeksiyonu ve UV filtrasyon teknolojileri gibi yenilikçi yeşil çözümlerin etkinliğini değerlendirmektedir.

2. Metodoloji

Bu çalışmada sunulan bilgiler, konuyla ilgili bilimsel makaleler, teknik raporlar ve uluslararası standartların sistematik incelemesine dayanmaktadır. Literatür taraması için Web of Science, Scopus ve PubMed veri tabanları kullanılmış, “mikroplastik”, “yüzme havuzu”, “dezenfeksiyon yan ürünleri”, “sporcu sağlığı”, “yeşil kimya” ve “sürdürülebilir havuz yönetimi” anahtar kelimeleriyle aramalar gerçekleştirilmiştir. Toplam 90 makale incelenmiş ve bu bölümün hazırlanmasında kaynak olarak kullanılmıştır.

Ayrıca, farklı ülkelerdeki yüzme havuzu standartları ve düzenlemeleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş, özellikle Avrupa Birliği, Amerika Birleşik Devletleri ve Dünya Sağlık Örgütü’nün belirlediği kriterler dikkate alınmıştır. Yeşil çözümlerin etkinliğini değerlendirmek için laboratuvar çalışmaları ve saha uygulamalarından elde edilen veriler kullanılmıştır. Bu metodoloji, uluslararası bir perspektif sağlayarak, bulguların küresel geçerliliğini artırmaktadır.

3. Yüzme Havuzlarında Mikroplastik Kirliliği

3.1. Mikroplastiklerin Kaynakları ve Özellikleri

Mikroplastikler, boyutları 5 mm'den küçük olan plastik parçacıklardır ve birincil ve ikincil mikroplastikler olarak sınıflandırılırlar [7]. Birincil mikroplastikler, kozmetik ürünlerde (peeling ürünleri, diş macunları) ve sentetik tekstil ürünlerinde doğrudan kullanılmak üzere üretilirken, ikincil mikroplastikler daha büyük plastik ürünlerin parçalanmasıyla oluşur [8].

Yüzme havuzlarındaki mikroplastik kirliliğinin başlıca kaynakları şunlardır [4, 9-12]:

- 1. Sentetik Giysiler ve Tekstil Ürünleri:** Naylon, polyester ve spandex gibi sentetik malzemelerden üretilen mayolar, her yıkamada yaklaşık 700.000 mikroplastik fiber salmaktadır. Deniz ve havuzlarda yapılan çalışmalarda birçok mikroplastik fiber tespit edilmiştir.
- 2. Havuz Ekipmanları:** Şnorkel, palet, yüzme tahtası gibi plastik ekipmanlar zamanla aşınarak mikroplastik parçacıklar oluşturmaktadır.
- 3. Kozmetik Ürünler:** Güneş kremleri, şampuanlar ve vücut losyonları gibi kişisel bakım ürünleri mikroplastik içerebilmektedir. Bu ürünlerin havuz suyuna karışması, mikroplastik konsantrasyonunu artırmaktadır.
- 4. Havuz Bakım Ürünleri:** Bazı havuz temizlik ürünleri ve filtrasyon sistemlerinde kullanılan malzemeler de mikroplastik kaynağı olabilmektedir.



Şekil 1. Yüzme Havuzlarında Mikroplastik Kaynakları İnfografiği

3.2. Mikroplastiklerin Sporcu Sağlığı Üzerindeki Etkileri

Mikroplastiklerin insan sağlığı üzerindeki etkileri halen araştırılmakta olan bir konudur, ancak son çalışmalar endişe verici bulgular ortaya koymaktadır. Sporcular için özellikle önemli olan sağlık etkileri şunlardır:

1. **Solunum Sistemi Etkileri:** Havuz suyundan buharlaşan mikroplastikler solunabilmekte ve akciğerlerde birikebilmektedir. Yüksek yoğunluklu antrenman sırasında artan solunum hızı, sporcuların daha fazla mikroplastik soluma riskini artırmaktadır [13]. Vasse ve arkadaşları (2024), profesyonel yüzücülerde mikroplastik maruziyeti ile astım ve bronşit semptomları arasında anlamlı bir ilişki bulmuşlardır [14].
2. **Cilt Sorunları:** Mikroplastikler, cilt bariyerini geçerek lokal inflamasyona ve alerjik reaksiyonlara neden olabilmektedir. Özellikle uzun süre suda kalan yüzücülerde dermatit vakalarının artışı gözlemlenmiştir [15].
3. **Endokrin Sistem Bozuklukları:** Mikroplastiklere eklenen bisfenol A (BPA) ve ftalatlar gibi katkı maddeleri endokrin bozucu etki gösterebilmektedir. Bu durum, sporcuların hormonal dengesini etkileyerek performans düşüşüne ve uzun vadede üreme sağlığı sorunlarına yol açabilmektedir [16,17].
4. **Bağışıklık Sistemi Etkileri:** Mikroplastiklerin bağışıklık sistemini baskılayıcı etkileri olduğu düşünülmektedir. Bu durum, yoğun antrenman programları nedeniyle zaten bağışıklık sistemi baskılanmış olan elit sporcular için ek risk oluşturmaktadır [18].
5. **Gastrointestinal Etkiler:** Yüzme sırasında yanlışlıkla yutulan havuz suyu ile mikroplastikler sindirim sistemine girebilmekte ve gastrointestinal inflamasyona neden olabilmektedir [19].

4. Yüzme Havuzlarında Kimyasal Riskler

4.1. Dezenfeksiyon Yan Ürünleri ve Oluşum Mekanizmaları

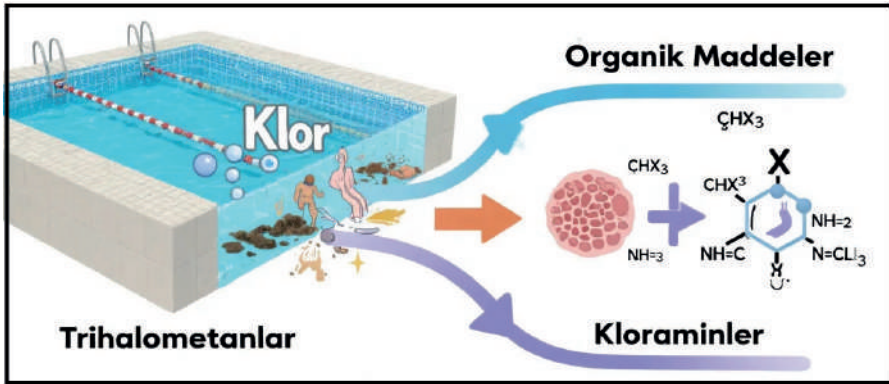
Yüzme havuzlarında su kalitesini korumak ve patojenleri kontrol etmek için kullanılan dezenfektanlar, organik maddelerle reaksiyona girerek çeşitli dezenfeksiyon yan ürünleri (DYÜ) oluşturmaktadır. Bu yan ürünlerin başlıcaları şunlardır [20-24]:

1. **Trihalometanlar (THM):** Kloroform, bromodiklorometan, dibromoklorometan ve bromoform gibi THM'ler, klorun ter, idrar, saç ve cilt hücreleri gibi organik maddelerle reaksiyonu sonucu

oluşmaktadır. Havuz suyunda ortalama THM konsantrasyonu 20-130 $\mu\text{g/L}$ arasında değişmektedir.

2. **Haloasetik Asitler (HAA):** Monokloroasetik asit, dikloroasetik asit ve trikloroasetik asit gibi HAA'lar, klorun organik maddelerle reaksiyonu sonucu oluşan diğer önemli DYÜ'lerdir.
3. **Kloraminler:** İnorganik kloraminler (monokloramin, dikloramin ve trikloramin) ve organik kloraminler, klorun azot içeren bileşiklerle reaksiyonu sonucu oluşmaktadır. Özellikle trikloramin (azot triklorür), havuz ortamında karakteristik "klor kokusu"na neden olan ve göz ile solunum yolu irritasyonuna yol açan bir bileşiktir.

DYÜ oluşumunu etkileyen faktörler arasında dezenfektan türü ve konsantrasyonu, pH, sıcaklık, organik madde yükü ve havuz kullanım yoğunluğu bulunmaktadır. Özellikle yüksek sıcaklık ve düşük pH koşulları, DYÜ oluşumunu hızlandırmaktadır.



Şekil 2. Dezenfeksiyon Yan Ürünlerinin Oluşum Şeması

Bu bilimsel diyagram, yüzme havuzlarında dezenfeksiyon yan ürünlerinin oluşum mekanizmasını göstermektedir.

4.2. Kimyasal Dezenfektanların Sporcu Sağlığı Üzerindeki Etkileri

Yüzme havuzlarında kullanılan kimyasal dezenfektanlar ve bunların yan ürünleri, sporcu sağlığı üzerinde çeşitli olumsuz etkilere neden olabilmektedir [25-28]:

1. **Solunum Sistemi Sorunları:** Kloraminler, özellikle trikloramin, havuz ortamında buharlaşarak "havuz astımı" olarak bilinen duruma

yol açabilmektedir. Profesyonel yüzücülerde astım prevalansının genel popülasyona göre 2-6 kat daha yüksek olduğu bildirilmiştir.

2. **Göz ve Cilt İrritasyonu:** Klor ve kloraminler, göz ve cilt irritasyonuna neden olmaktadır. Profesyonel yüzücülerde konjonktivit ve dermatit vakaları sıklıkla görülmektedir.
3. **Genotoksikite ve Kanser Riski:** THM'ler ve HAA'lar gibi bazı DYÜ'lerin genotoksik ve karsinojenik potansiyele sahip olduğu bilinmektedir. Uzun süreli maruziyet, DNA hasarına ve kanser riskinin artmasına neden olabilmektedir.
4. **Üreme Sistemi Etkileri:** Bazı DYÜ'lerin endokrin bozucu etkileri olduğu ve üreme sistemi üzerinde olumsuz etkilere neden olabileceği düşünülmektedir.
5. **Oksidatif Stres:** Klor ve DYÜ'ler, vücutta oksidatif strese neden olabilmektedir. Yüksek yoğunluklu antrenman yapan sporcularda zaten artmış olan oksidatif stres, bu kimyasalların etkisiyle daha da şiddetlenebilmektedir.

4.3. Geleneksel Havuz Temizleme Yöntemlerinin Sınırlılıkları

Yüzme havuzlarında yaygın olarak kullanılan geleneksel temizleme ve dezenfeksiyon yöntemleri, mikroplastik ve kimyasal kirliliği kontrol etmede çeşitli sınırlılıklara sahiptir [29-32]:

1. **Klor Bazlı Dezenfeksiyon:** En yaygın kullanılan yöntem olmasına rağmen, klor bazlı dezenfeksiyon, DYÜ oluşumuna neden olmakta ve mikroplastikleri etkili bir şekilde uzaklaştıramamaktadır. Ayrıca, klor kullanımı, havuz suyunun pH dengesini bozabilmekte ve ek kimyasal kullanımını gerektirmektedir.
2. **Kum Filtreleri:** Geleneksel kum filtreleri, 20-100 μm boyutundaki partikülleri tutabilmekte, ancak daha küçük mikroplastikleri (1-20 μm) geçirmektedir. Gomiero ve arkadaşları (2018), standart kum filtrelerinin mikroplastiklerin sadece %25-30'unu tutabildiğini göstermiştir [30].
3. **Kimyasal Flokulasyon:** Alüminyum sülfat gibi kimyasal flokülantlar, mikroplastiklerin çökmesini sağlayabilmekte, ancak bu kimyasalların kendileri de çevresel sorunlara neden olabilmektedir.
4. **Bakım Maliyetleri:** Geleneksel yöntemler, yüksek kimyasal tüketimi nedeniyle maliyetlidir ve sürekli bakım gerektirmektedir.

5. **Çevresel Etkiler:** Klor ve diğer kimyasalların kullanımı, havuz suyunun boşaltılması sırasında çevresel kirliliğe neden olabilmektedir.

Geleneksel Havuz Sistemleri	Yeşil Havuz Sistemleri
 Dezenfeksiyon Yöntemi	 Yeşil
 Filtrasyon	 Çevresel Etki
 Çevresel Etk	 Maliyet
 Sağlık Etkileri	 Bakım

Şekil 3. Geleneksel ve Yeşil Havuz Sistemleri Karşılaştırma Tablosu

Bu karşılaştırma tablosu, geleneksel havuz sistemleri ile yeşil havuz sistemleri arasındaki temel farkları göstermektedir.

5. Yeşil Çözümler ve Sürdürülebilir Havuz Yönetimi

5.1. Biyolojik Filtrasyon Sistemleri

Biyolojik filtrasyon sistemleri, yüzme havuzlarında mikroplastik ve kimyasal kirliliği azaltmak için doğal mikroorganizmalar ve ekolojik süreçlerden yararlanan çevre dostu çözümler sunar. Bu sistemler, klor gibi geleneksel kimyasal arıtma yöntemlerine sürdürülebilir bir alternatif oluşturarak, sporcu sağlığını ve çevresel sürdürülebilirliği destekler.

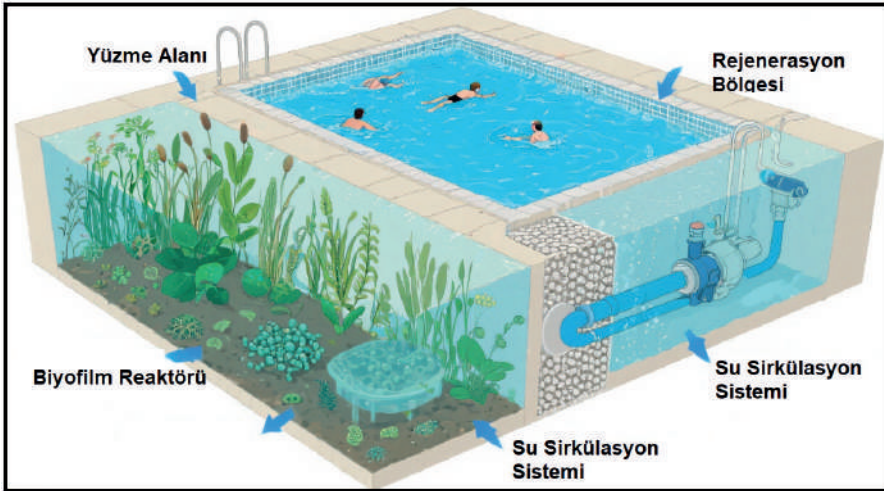
Biyofilm teknolojisi, biyolojik filtrasyonun temel bir uygulamasıdır. Bu sistemlerde, özel tasarlanmış yüzeylerde büyüyen mikroorganizma toplulukları, sudaki kirleticileri metabolize ederek parçalar. Araştırmalar, iyi tasarlanmış biyofilm reaktörlerinin mikroplastiklerin %85-95'ini tutabildiğini göstermektedir [34].

Bitki bazlı filtrasyon (fitofiltrasyon), su bitkileri, algler ve makrofitler aracılığıyla havuz suyundaki mikroplastikleri, ağır metalleri ve fazla besin maddelerini absorbe ederek su kalitesini iyileştirir. Su mercimeği, nilüfer ve saz gibi bitkiler, havuz suyunun arıtılmasında yüksek etkinlik gösterir.

Araştırmalar, bitki bazlı filtrasyon sistemlerinin sucul ortamlarda mikroplastik konsantrasyonunu % 60-75 oranında azalttığını ortaya koymuştur [36].

Enzim bazlı sistemler, biyolojik filtrasyonun yenilikçi bir yaklaşımıdır. PETaz, lipaz ve kutinaz gibi enzimler, polietilen tereftalat (PET), polietilen (PE) ve polipropilen (PP) gibi mikroplastik türlerini biyolojik olarak parçalayabilir. Bu enzimler, havuz suyuna doğrudan eklenebilir veya immobilize edilerek filtrasyon sistemlerinde kullanılabilir [36].

Biyolojik havuzlar veya doğal yüzme havuzları, biyolojik filtrasyonun en kapsamlı uygulamasıdır. Bu havuzlar, kimyasal dezenfektanlara ihtiyaç duymadan su kalitesini korumak için doğal ekosistemler olarak tasarlanır. Tipik bir biyolojik havuz, yüzme bölgesi ve rejenerasyon bölgesi olmak üzere iki kısımdan oluşur. Araştırmalar, biyolojik havuzların patojen kontrolünde ve su kalitesinin korunmasında etkili olduğunu göstermiştir [37].



Şekil 4. Biyolojik Havuz Filtrasyon Sistemi Kesit Diyagramı

Bu teknik diyagram, biyolojik havuz filtrasyon sisteminin kesitini ve çalışma prensibini göstermektedir.

5.2. Ozon ve UV Dezenfeksiyon Teknolojileri

Ozon ve ultraviyole (UV) dezenfeksiyon sistemleri, yüzme havuzlarında klor gibi geleneksel kimyasal dezenfektanlara alternatif olarak kullanılan çevre dostu yöntemlerdir. Bu teknolojiler, trihalometanlar ve kloraminler gibi dezenfeksiyon yan ürünlerinin oluşumunu azaltarak sporcu sağlığını korur.

Ozon Dezenfeksiyonu: Ozon (O_3), güçlü bir oksidan olarak patojenleri hızlı ve etkili bir şekilde inaktive eder. Klorla karşılaştırıldığında, ozonun dezenfeksiyon hızı önemli ölçüde yüksektir ve DYÜ oluşumunu % 70-90 oranında azaltabilir [38]. Ozon, organik maddelerle reaksiyona girerek THM'ler gibi zararlı yan ürünlerin oluşumunu engeller, böylece sporcuların solunum yolu irritasyonu ve cilt tahrişi gibi sağlık risklerini azaltır [39].

UV Dezenfeksiyonu: UV-C ışınları (200-280 nm), mikroorganizmaların DNA'sına zarar vererek patojenleri etkisiz hale getirir. Bu yöntem, kimyasal dezenfektan kullanımını %50-80 oranında azaltabilir ve kloraminler gibi solunum yolu tahrişine neden olan bileşikler parçalanabilir [38].

Kombine Sistemler: Ozon ve UV teknolojilerinin birlikte kullanımı, dezenfeksiyon etkinliğini artırır ve kimyasal kullanımını minimuma indirir. Ozon/UV kombinasyonları, ileri oksidasyon prosesleri (AOP) olarak bilinir ve organik kirleticilerin parçalanmasında yüksek etkinlik gösterir [34].

5.3. Yeşil Kimya Uygulamaları

Yeşil kimya prensipleri, yüzme havuzlarında kullanılan kimyasalların çevresel etkilerini azaltarak hem sporcu sağlığını korur hem de sürdürülebilir havuz yönetimi sağlar.

Biyobozunur Flokulantlar: Nişasta, kitosan ve aljinat gibi doğal polimer bazlı biyobozunur flokulantlar, çevre dostu çözümler sunar. Araştırmalar, kitosan bazlı flokulantların sucul ortamlarda mikropplastik partikülleri % 60-75 oranında uzaklaştırabildiğini göstermektedir [40].

Enzim Bazlı Temizleyiciler: Lipaz, proteaz ve amilaz gibi enzimler içeren temizlik ürünleri, havuz kenarlarında biriken organik kirleri biyolojik olarak parçalar. Bu ürünler, klor bazlı temizleyicilere olan ihtiyacı azaltarak DYÜ oluşumunu engeller [41].

Doğal pH Dengeleyiciler: Sodyum bikarbonat ve sitrik asit gibi doğal bileşikler, havuz suyunun pH dengesini korumak için etkili alternatiflerdir. Bu bileşikler, kimyasal atık üretimini azaltır ve havuz suyunun sporcular için güvenli bir aralıkta (pH 7.2-7.8) kalmasını sağlar [38].

Mikropplastik İçermeyen Havuz Ekipmanları: Biyobazlı ve biyobozunur malzemelerden üretilen havuz ekipmanları, mikropplastik salınımını kaynağında azaltır. Araştırmalar, biyobozunur polimerlerin geleneksel plastiklere kıyasla çevresel kirliliği % 80'e kadar azalttığını göstermektedir [34].

5.4. Sürdürülebilir Havuz Tasarımı ve İşletimi

Sürdürülebilir havuz tasarımı ve işletimi, enerji verimliliği, su tasarrufu ve kimyasal kullanımının azaltılmasını hedefleyerek hem çevresel ayak izini küçültür hem de sporcu sağlığını korur.

Enerji Verimli Sistemler: Değişken hızlı pompalar, ısı pompaları ve güneş enerjisi sistemleri, havuz işletiminde enerji tüketimini önemli ölçüde azaltır. Araştırmalar, değişken hızlı pompaların enerji kullanımını % 30-50 oranında düşürebildiğini göstermektedir [41].

Su Tasarrufu Teknolojileri: Geri yıkama suyunun geri kazanımı, yağmur suyu hasadı ve buharlaşma önleyici örtüler, havuzlarda su tüketimini %20-40 oranında azaltabilir [42].

Akıllı Havuz Yönetim Sistemleri: Sensörler ve otomatik dozaj sistemleri, havuz suyunun kimyasal bileşimini gerçek zamanlı olarak izleyerek kimyasal kullanımını optimize eder. Araştırmalar, akıllı yönetim sistemlerinin kimyasal tüketimini % 25-40 oranında düşürebildiğini göstermektedir [43,44].

Eğitim ve Bilinçlendirme: Havuz kullanıcılarının ve personelin hijyen konusunda eğitimi, antropojenik kirleticilerin havuz suyuna karışmasını azaltır. Eğitim programları, yüzücülerin mikroplastik ve kimyasal kirlilik kaynaklarını azaltmak için bilinçli davranışlar sergilemesini teşvik eder [45].

6. Vaka Çalışmaları ve Başarı Örnekleri

6.1. İspanya Costa Brava Sürdürülebilir Havuz Projesi

Costa Brava bölgesinde gerçekleştirilen araştırma, su ve enerji açısından daha sürdürülebilir bir yüzme havuzu modeli geliştirmeyi amaçlamıştır. Buharlaşma önleyici örtülerin kullanımı su kaybını % 35 oranında azaltırken, değişken hızlı pompalar enerji tüketimini % 40 düşürmüştür. Proje kapsamında uygulanan bitki bazlı filtrasyon sistemi, havuz suyundaki mikroplastik konsantrasyonunu % 65 oranında azaltmış ve THM seviyelerini WHO'nun önerdiği 100 µg/L sınırının altına çekmiştir. Havuz kullanıcılarının % 80'i su kalitesinde iyileşme bildirmiştir [46].

6.2. Algarve Üniversitesi Sürdürülebilir Yüzme Havuzu Projesi

Algarve Üniversitesi, Saint-Gobain Weber Portugal ve Cristal Construções konsorsiyumuyla yürütülen projeler kapsamında, düşük çevresel ayak izi ve yüksek enerji verimliliğine sahip sürdürülebilir yüzme havuzu konseptleri geliştirilmiştir. Bu projelerde geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımı,

CO₂ emisyonlarının azaltılması, su kayıplarının minimize edilmesi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu hedeflenmiştir [47].

Ayrıca, enerji ve su tüketimini en aza indirirken kullanıcı konforunu koruyan açık hava ısıtma yüzme havuzları tasarlanmıştır. Bu kapsamda güneş enerjisi, fotovoltaiik paneller, ters yerden ısıtma ve faz değişim malzemeli eşanjörler gibi yenilikçi sistemler entegre edilmiştir. Tüm sistemler, yenilenebilir enerji kullanımını optimize eden akıllı kontrol modülüyle yönetilmektedir [48].

7. Ekonomik Analiz ve Maliyet-Fayda Değerlendirmesi

Yeşil çözümlerin yüzme havuzlarında uygulanması, başlangıçta yüksek yatırım maliyetleri gerektirse de, uzun vadede önemli ekonomik avantajlar sunmaktadır.

Başlangıç Yatırım Maliyetleri: Biyolojik filtrasyon sistemleri, ozon jeneratörleri ve UV dezenfeksiyon sistemleri, geleneksel klor bazlı sistemlere kıyasla % 30-50 daha yüksek başlangıç maliyetine sahiptir [49]. Ancak, bu sistemlerin uzun vadeli faydaları, başlangıç maliyetlerini dengelemektedir.

İşletme Verimliliği ve Ekonomik Tasarruf: Yeşil teknolojiler sayesinde kimyasal kullanımı % 40-80, enerji tüketimi % 30-50 ve su tüketimi % 20-40 oranında azalmaktadır. Bu verimlilik artışı, ilk yatırım maliyetlerini 3-5 yıl gibi kısa bir sürede amorti edebilmektedir.

Sporcu Sağlığı ve Azalan Sağlık Giderleri: Yeşil çözümler, havuz suyundaki zararlı kimyasallara ve mikroplastiklere maruziyeti azaltarak sporcu sağlığını korur ve uzun vadede sağlık harcamalarının azalmasına katkı sağlar.

Çevresel Sürdürülebilirlik ve Ekosistem Koruma: Kimyasal kullanımının ve atık suyun çevreye olan olumsuz etkilerinin azaltılması, ekosistem hizmetlerinin korunmasını destekler. Çevresel maliyet-fayda analizleri, bu çözümlerin ekosistem sağlığını iyileştirerek uzun vadeli ekonomik faydalar yarattığını doğrulamaktadır [50,51].

8. Politika Önerileri ve Düzenleyici Çerçeve

Yüzme havuzlarında mikroplastik ve kimyasal kirliliğin etkin yönetimi için bütüncül bir politika ve düzenleyici çerçeve gereklidir:

1. Havuz suları için mikroplastik ve DYÜ konsantrasyon limitlerinin bilimsel temellere dayalı olarak belirlenmesi ve düzenli denetlenmesi

2. Biyolojik filtrasyon ve gelişmiş arıtma sistemleri gibi çevre dostu teknolojilerin benimsenmesini teşvik eden finansal destek mekanizmaları
3. Sürdürülebilir havuz yönetimi prensipleri üzerine odaklanan zorunlu eğitim ve sertifikasyon programları
4. Mikroplastik salan tüketici ürünlerinin ve ekipmanların kullanımına yönelik kısıtlamalar

9. Sonuç ve Gelecek Perspektifleri

Yüzme havuzlarındaki mikroplastik ve kimyasal riskler, sporcu sağlığı için önemli tehditler oluşturmaktadır. Geleneksel havuz temizleme ve dezenfeksiyon yöntemleri, bu riskleri yeterince azaltamamakta ve kendileri de çeşitli sağlık ve çevresel sorunlara neden olabilmektedir.

Biyolojik filtrasyon sistemleri, ozon ve UV dezenfeksiyon teknolojileri, yeşil kimya uygulamaları ve sürdürülebilir havuz tasarımı gibi yeşil çözümler, mikroplastik ve kimyasal riskleri azaltmak için umut verici alternatifler sunmaktadır. Bu çözümler, sporcu sağlığını korurken çevresel etkileri de minimuma indirmektedir.

Gelecekte, nanoteknoloji, biyomimetik membranlar ve yapay zeka destekli havuz yönetim sistemleri gibi yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesi, yüzme havuzlarının sürdürülebilirliğini daha da artırabilecektir. Ayrıca, mikroplastiklerin biyolojik olarak parçalanmasını sağlayan yeni enzim ve mikroorganizmaların keşfi, havuz suyundaki mikroplastik kirliliğinin kontrolünde önemli ilerlemeler sağlayabilecektir.

Sonuç olarak, yüzme havuzlarında temiz bir gelecek için, bilimsel araştırmaların, teknolojik yeniliklerin, politika düzenlemelerinin ve eğitim çalışmalarının entegre bir şekilde yürütülmesi gerekmektedir. Bu bütüncül yaklaşım, sporcuların sağlığını korurken çevresel sürdürülebilirliği de sağlayacaktır.

Kaynaklar

- [1] World Health Organization. (2006). *Guidelines for safe recreational water environments: Volume 2, Swimming pools and similar environments*. Geneva: WHO Press. <https://www.who.int/publications/i/item/9241546808>
- [2] Dris, R., Gasperi, J., Mirande, C., Mandin, C., Guerrouache, M., Langlois, V., & Tassin, B. (2017). A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. *Environmental Pollution*, 221, 453-458. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.013>
- [3] Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., & Law, K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768-771. <https://doi.org/10.1126/science.1260352>
- [4] Wang, C., Zhao, J., & Xing, B. (2021). Environmental source, fate, and toxicity of microplastics. *Journal of Hazardous Materials*, 407, 124357. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124357>
- [5] Richardson, S. D., Plewa, M. J., Wagner, E. D., Schoeny, R., & DeMarini, D. M. (2007). Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: A review and roadmap for research. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 636(1-3), 178-242. <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2007.09.001>
- [6] Chowdhury, S., Alhooshani, K., & Karanfil, T. (2014). Disinfection by-products in swimming pools: Occurrences, implications, and future needs. *Water Research*, 53, 68-109. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.050>
- [7] Frias, J. P. G. L., & Nash, R. (2019). Microplastics: Finding a consensus on the definition. *Marine Pollution Bulletin*, 138, 145-147. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.022>
- [8] Boucher, J., & Friot, D. (2017). Primary microplastics in the oceans: A global evaluation of sources. IUCN, Global Marine and Polar Programme. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2017.01.en>
- [9] De Falco, F., Gullo, M. P., Gentile, G., et al. (2018). Evaluation of microplastic release caused by textile washing processes of synthetic fabrics. *Environmental Pollution*, 236, 916-925. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.10.057>
- [10] Kandasubramanian, B., & Issac, M. (2021). Mikroplastiklerin su ve sucul sistemlerdeki etkisi. *Çevre Bilimi ve Kirlilik Araştırmaları Uluslararası*, 28, 19544-19562. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13184-2>
- [11] Napper, I. E., Bakir, A., Rowland, S. J., et al. (2015). Characterisation, quantity, and sorptive properties of microplastics extracted from cosmetics. *Marine Pollution Bulletin*, 99(1-2), 178-185. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.07.029>

- [12] Mintenig, S. M., Int-Veen, I., Löder, M. G. J., et al. (2017). Identification of microplastics in effluents of wastewater treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging. *Water Research*, 108, 365-372. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.015>
- [13] Prata, J. C., da Costa, J. P., Lopes, I., et al. (2020). Environmental exposure to microplastics: An overview of possible human health effects. *Science of The Total Environment*, 702, 134455. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134455>
- [14] Vasse, G. F., & Melgert, B. N. (2024). Microplastic and plastic pollution: impact on respiratory disease and health. *European Respiratory Review*, 33(172), 230226. <https://doi.org/10.1183/16000617.0226-2023>
- [15] Han, W., Cui, J., Sun, G., Miao, X., Zhang, P., & Li, N. (2024). Nano boyutlu mikroplastiklere maruz kalma, GSDMD'nin mitokondriyal lokalizasyonunu tetikleyerek cilt hücrelerinin yaşlanmasına neden olur. *Environmental Pollution*, 123874. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123874>
- [16] Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., et al. (2020). A detailed review study on the potential effects of microplastics and additives of concern on human health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(4), 1212. <https://doi.org/10.3390/ijerph17041212>
- [17] Hwang, J., Choi, D., Han, S., et al. (2020). Potential toxicity of polystyrene microplastic particles. *Scientific Reports*, 10(1), 7391. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64464-9>
- [18] Wright, S. L., & Kelly, F. J. (2017). Plastic and human health: A micro issue? *Environmental Science & Technology*, 51(12), 6634-6647. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00423>
- [19] Vethaak, A. D., & Legler, J. (2021). Microplastics and human health. *Science*, 371(6530), 672-674. <https://doi.org/10.1126/science.abc5041>
- [20] Richardson, S. D., DeMarini, D. M., Kogevinas, M., et al. (2010). What's in the pool? A comprehensive identification of disinfection by-products and assessment of mutagenicity of chlorinated and brominated swimming pool water. *Environmental Health Perspectives*, 118(11), 1523-1530. <https://doi.org/10.1289/ehp.1001965>
- [21] Carter, R. A. A., & Joll, C. A. (2017). Occurrence and formation of disinfection by-products in the swimming pool environment: A critical review. *Journal of Environmental Sciences*, 58, 19-50. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.06.013>
- [22] Manasfi, T., Coulomb, B., & Boudenne, J. L. (2017). Occurrence, origin, and toxicity of disinfection byproducts in chlorinated swimming pools: An overview. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 220(3), 591-603. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2017.01.005>

- [23] Jmaiff Blackstock, L. K., Wang, W., Vemula, S., Jaeger, B. T., & Li, X.-F. (2017). Sweetened swimming pools and hot tubs. *Environmental Science & Technology Letters*, 4(4), 149-153. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.7b00043>
- [24] Hansen, K. M. S., Willach, S., Antoniou, M. G., et al. (2012). Effect of pH on the formation of disinfection byproducts in swimming pool water – Is less THM better? *Water Research*, 46(19), 6399-6409. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.09.013>
- [25] Bougault, V., Turmel, J., Levesque, B., & Boulet, L. P. (2009). The respiratory health of swimmers. *Sports Medicine*, 39(4), 295-312. <https://doi.org/10.2165/00007256-200939040-00003>
- [26] Nickmilder, M., & Bernard, A. (2007). Ecological association between childhood asthma and availability of indoor chlorinated swimming pools in Europe. *Occupational and Environmental Medicine*, 64(1), 37-46. <https://doi.org/10.1136/oem.2005.025452>
- [27] Font-Ribera, L., Villanueva, C. M., Gràcia-Lavedan, E., et al. (2014). Indoor swimming pool attendance and respiratory and dermal health in schoolchildren-HITEA Catalonia. *Respiratory Medicine*, 108(7), 1056-1059. <https://doi.org/10.1016/j.rmed.2014.04.018>
- [28] Villanueva, C. M., Cantor, K. P., Grimalt, J. O., et al. (2007). Bladder cancer and exposure to water disinfection by-products through ingestion, bathing, showering, and swimming in pools. *American Journal of Epidemiology*, 165(2), 148-156. <https://doi.org/10.1093/aje/kwj364>
- [29] Zwiener, C., Richardson, S. D., De Marini, D. M., et al. (2007). Drowning in disinfection byproducts? Assessing swimming pool water. *Environmental Science & Technology*, 41(2), 363-372. <https://doi.org/10.1021/es062367v>
- [30] Gomiero, A., Strafella, P., Pellini, G., et al. (2018). Comparative effects of ingested PVC micro particles with and without adsorbed benzo(a)pyrene vs. spiked sediments on the cellular and subcellular processes of the benthic organism *Hediste diversicolor*. *Frontiers in Marine Science*, 5, 99. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00099>
- [31] Ma, B., Xue, W., Hu, C., et al. (2019). Characteristics of microplastic removal via coagulation and ultrafiltration during drinking water treatment. *Chemical Engineering Journal*, 359, 159-167. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.11.155>
- [32] Keuten, M. G. A., Peters, M. C. F. M., Daanen, H. A. M., et al. (2014). Quantification of continual anthropogenic pollutants released in swimming pools. *Water Research*, 53, 259-270. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.01.027>

- [33] Osman, A. I., Hosny, M., Eltaweil, A. S., et al. (2023). Microplastic sources, formation, toxicity, and remediation: a review. *Environmental Chemistry Letters*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01593-3>
- [34] Tang, Y., Liu, Y., Chen, Y., et al. (2021). A review: Research progress on microplastic pollutants in aquatic environments. *Science of The Total Environment*, 766, 142572. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142572>
- [35] Chandrakanthan, K., Fraser, M. P., & Herckes, P. (2024). Sucul ortamlarda mikroplastiklerin başlıca kaynağı olarak rekreasyonel aktiviteler. *Su Kirliliği. Nanoplastikler*, 3, 20. <http://dx.doi.org/10.20517/wecn.2024.40>
- [36] Science of The Total Environment. (2021). A review: Research progress on microplastic pollutants in aquatic environments. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142572>
- [37] Ecological Engineering. (2022). Biyolojik havuzların patojen kontrolü ve su kalitesinin korunmasındaki etkisini inceleyen çalışma. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106661>
- [38] Keuten, M. G. A., Peters, M. C. F. M., Daanen, H. A. M., et al. (2014). Quantification of continual anthropogenic pollutants released in swimming pools. *Water Research*, 53, 259-270. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.01.027>
- [39] Jmaiff Blackstock, L. K., Wang, W., Vemula, S., et al. (2017). Sweetened swimming pools and hot tubs. *Environmental Science & Technology Letters*, 4(4), 149-153. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.7b00043>
- [40] Girish, N., Parashar, N., & Hait, S. (2023). Coagulative removal of microplastics from aqueous matrices: Recent progress and future perspectives. *Science of The Total Environment*, 899, 165723. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165723>
- [41] Chandra, P., Enespa, Singh, R., et al. (2020). Mikrobiyal lipazlar ve endüstriyel uygulamaları: kapsamlı bir inceleme. *Microbial Cell Factories*, 19, 169. <https://doi.org/10.1186/s12934-020-01428-8>
- [42] Delgado Marín, J. P., Vera García, F., & García Cascales, J. R. (2019). Use predictive control to improve the energy efficiency in indoor swimming pools using solar thermal energy. *Solar Energy*, 179, 380-390. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.004>
- [43] Simoes, G., Dionisio, C., Gloria, A., Sebastião, P., & Souto, N. (2019). Smart system for monitoring and controlling swimming pools. In *2019 IEEE WF-IoT* (pp. 829-832). <https://doi.org/10.1109/WF-IoT.2019.8767240>
- [44] Sangeetha, A., Santhana R., Kumar, G., Golden, J., Ganesh, R., & Robinson, Y. (2023). Smart swimming pool management system

- (SSPMS) using IoT. In *2023 IEEE ICIDCA* (pp. 840-846). <https://doi.org/10.1109/ICIDCA56705.2023.10099729>
- [45] Krsmanović, S., & Radović, L. (2018). Importance of hygiene behavior of pool facility users. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 1243-1250.
- [46] Gomez-Guillen, J.-J., Arimany-Serrat, N., Tapias Baqué, D., & Giménez, D. (2024). Water and energy sustainability of swimming pools: A case model on the Costa Brava, Catalonia. *Water*, 16(8), 1158. <https://doi.org/10.3390/w16081158>
- [47] Oliveira, M., Braga, A., Inverno, A., Santos, C., Silva, E., Carmo, F., Silva, L., Moreira da Silva, M., Cabral, P., Sequeira, P., & Lança, R. (2018). Spools: Sustainable pools are the main developments of the project. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 217, 821-832. <https://doi.org/10.2495/SDP180691>
- [48] Oliveira, M. J., Inverno, A., Farinha, F., Monteiro, J., Cabrita, C., Segura, M., do Carmo, F., Venturinha, A., & Matias, G. (2022). ECOPOOL++: Sürdürülebilir bir ısıtmalı açık yüzme havuzu geliştirmek. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 38, 389-395. <https://doi.org/10.14311/APP.2022.38.0389>
- [49] Eken, T., & Aksu, İ. (2024). Yeşil yıldızlı otellerin yeşil maliyetlerinin ürün yaşam seyri maliyetleme açısından değerlendirilmesi. *Alanya Akademik Bakış*, 8(1), 130-144.
- [50] Budak, Y., & Keçeci, M. (2024). Sıfır atık ile yeşil dönüşüm: Türkiye'nin geleceği için çevre dostu kozmetik ve temizlik ürünleri. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 13(3), 145-155.
- [51] Aktürk Bozdemir, E., & Budak, Y. (2025). Nano-biyokimya ve yapay zekâ ile çevresel dönüşüm: Yenilikçi çözümler ve sürdürülebilir uygulamalar. *Mühendislik Alanında Multidisipliner Araştırma ve Değerlendirmeler*, 25.

Yeşil Kimya ve Plastik Yakıtlar: İçten Yanmalı Motorlarda Etki, Verimlilik ve Optimizasyon

Editör:
Sedat Şen