

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 kirletebilir. 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 ısıtılmalı 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 kullanılabilmekte ve hidrojen ekonomisine geçiş 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., Aburiazaiza, 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).

