

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 mikroplastikler, 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. Mikroplastiklerin Ekosistem Üzerindeki Etkileri

Mikroplastikler, 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, mikroplastikler 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 kirleticisi 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 yakıta 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 yakıta 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 yakıta 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 ileriye adımlar 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.

