



POLİMER TEKNOLOJİSİNDE SÜRDÜRÜLEBİLİR KAYNAK KULLANIMI VE ATIK YÖNETİMİ

Mustafa BELTEN

Bilecik Seyh Edebali University, Graduate School Institute, Industrial Sustainability Department

Yasemin SAMAV

Bilecik Seyh Edebali University, Vocational School, Chemistry and Chemical Processing Technologies, 11230 Bilecik/Türkiye

Bilecik Seyh Edebali University, Graduate School Institute, Industrial Sustainability Department

ORCID: 0000-0001-8844-2513

ÖZET

Polimer teknolojisinde sürdürülebilir kaynak kullanımı ve atık yönetimi, çevresel etkilerin azaltılmasını hedefleyen strateji ve uygulamaların bütünüdür. Özellikle plastiklerin üretimi ve bertarafı süreçlerinde ortaya çıkan kirlilik, karbon emisyonları ve kaynak tüketimi, iklim değişikliği ve ekolojik tahribat gibi küresel sorunlara katkıda bulunmaktadır. Bu bağlamda, polimer endüstrisi, fosil kaynaklara olan bağımlılığı azaltmak, atık oluşumunu sınırlamak ve çevresel ayak izini küçültmek amacıyla biyobazlı polimerler ve yenilenebilir hammaddelerin kullanımına yönelmektedir. Bitki kökenli biyoplastiklerin geliştirilmesi, bu dönüşümün önemli bir örneğini oluştururken, geri dönüşüm teknolojilerindeki ilerlemeler de özellikle kimyasal geri dönüşüm yöntemleriyle malzemelerin tekrar kullanıma kazandırılmasını mümkün kılarak dairesel ekonomi anlayışını desteklemektedir. Yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) gibi araçlar, polimerlerin üretiminden bertarafına kadar olan süreçte çevresel etkilerin ölçülmesini sağlayarak sürdürülebilirlik odaklı karar alma süreçlerine katkıda bulunmaktadır. Bununla birlikte, ekonomik kısıtlamalar, teknolojik yetersizlikler ve yasal düzenlemelerdeki eksiklikler gibi faktörler, sürdürülebilir uygulamaların yaygınlaşmasının önünde önemli engeller teşkil etmektedir. Geleneksel üretim yöntemlerinin neden olduğu kirlilik ve biyolojik çeşitlilik kaybı, sektörler arası iş birliği ve politika yapıcıların etkin katılımını gerekli kılmaktadır. Etik değerlendirmelerin, paydaş katılımının ve toplumsal girişimlerin entegre edilmesi, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için bütüncül yaklaşımların geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilir kaynak kullanımı, atık yönetimi, polimer teknolojisi, geri dönüşüm, dögüsel ekonomi

SUSTAINABLE RESOURCE USE AND WASTE MANAGEMENT IN POLYMER TECHNOLOGY

ABSTRACT

Sustainable resource use and waste management in polymer technology refers to the entirety of strategies and practices aimed at reducing environmental impacts. Pollution, carbon emissions

and resource consumption, especially those occurring during the production and disposal processes of plastics, contribute to global problems such as climate change and ecological damage. In this context, the polymer industry is turning to the use of bio-based polymers and renewable raw materials in order to reduce dependency on fossil resources, limit waste generation and reduce the environmental footprint. While the development of plant-based bioplastics is an important example of this transformation, advances in recycling technologies support the circular economy concept by enabling the reuse of materials, especially through chemical recycling methods. Tools such as life cycle assessment (LCA) contribute to sustainability-oriented decision-making processes by ensuring that environmental impacts are measured from the production of polymers to their disposal. However, factors such as economic constraints, technological inadequacies and deficiencies in legal regulations constitute significant obstacles to the widespread adoption of sustainable practices. Pollution and biodiversity loss caused by traditional production methods require cross-sectoral collaboration and effective participation of policy makers. Integrating ethical considerations, stakeholder engagement and community initiatives necessitates the development of holistic approaches to achieve sustainability goals.

Keywords: Sustainable resource use, waste management, polymer technology, recycling, circular economy

GİRİŞ

Polimerler, modern yaşamın hemen her alanında yer bulan, kullanım çeşitliliği yüksek malzemelerdir. Otomotivden ambalaj sektörüne, inşaattan tekstile kadar geniş bir yelpazede değerlendirilen bu malzemeler, sağladıkları hafiflik, dayanıklılık ve düşük maliyet gibi avantajlar nedeniyle tercih edilmektedir. Ancak bu yaygın kullanım, beraberinde önemli çevresel sorunları da getirmiştir. Özellikle fosil yakıt bazlı polimerlerin üretimi sırasında ortaya çıkan karbon emisyonları ve bu malzemelerin doğada uzun süre çözünmeden kalmaları, ciddi ekolojik tehditler oluşturmaktadır. Bu durum, polimer teknolojisinde sürdürülebilirlik kavramını gündeme taşımış ve yenilikçi çözümlere olan ihtiyacı artırmıştır (Findik, 2025; Santos et al., 2024; Sathish et al., 2024; Skosana et al., 2024).

Sürdürülebilir kaynak kullanımı, sınırlı doğal kaynakların verimli şekilde değerlendirilmesi ve gelecek nesillere aktarılmasını hedefleyen bir yaklaşımdır. Polimer endüstrisi açısından bakıldığında bu, hem ham madde seçiminde yenilenebilir kaynaklara yönelmeyi hem de üretim süreçlerinde çevreye zarar vermeyen yöntemlerin benimsenmesini gerektirmektedir (Deng et al., 2024; Xu & Tang, 2024). Günümüzde biyobazlı polimerlerin geliştirilmesi, bu amaç

doğrultusunda atılan önemli adımlardan biridir. Mısır nişastası, şeker kamışı, selüloz gibi doğal kaynaklardan elde edilen biyopolimerler, karbon ayak izini azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır (Dutta & Sit, 2024; Sinha, 2024).

Bununla birlikte, sürdürülebilirliğin yalnızca kaynak teminiyle sınırlı kalmaması gerektiği açıktır. Kullanım ömrü sona eren polimerlerin atık yönetimi de sürecin ayrılmaz bir parçasıdır. Geleneksel atık bertaraf yöntemleri, çevresel yükü hafifletmekte yetersiz kalmakta; bu nedenle geri dönüşüm teknolojileri ön plana çıkmaktadır. Mekanik ve kimyasal geri dönüşüm gibi yöntemlerle polimer atıklar yeniden değerlendirilerek dögüsel ekonomiye katkı sağlanmakta, böylece hem kaynak tüketimi azaltılmakta hem de atık miktarı kontrol altına alınmaktadır.

Polimer teknolojisinde sürdürülebilir kaynak kullanımı ve atık yönetimi, sadece çevresel değil, aynı zamanda ekonomik ve sosyal boyutları da içeren çok yönlü bir dönüşümü zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA), çevresel etkilerin nicel olarak analiz edilmesini sağlayarak karar alma süreçlerini daha bilinçli hale getirmekte; aynı zamanda sürdürülebilir üretim ve tüketim modellerinin oluşturulmasına zemin hazırlamaktadır. Polimer endüstrisinin bu dönüşüme ayak uydurabilmesi hem çevresel yükün azaltılması hem de ekonomik sürdürülebilirliğin sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır (Cerchione et al., 2025; da Cruz et al., 2024; Tănase et al., 2024; J. Yadav et al., 2024).

1. POLİMER TEKNOLOJİSİNDE SÜRDÜRÜLEBİLİR KAYNAK KULLANIMI

1.1. Giriş ve Temel Kavramlar

Polimer teknolojisi, günümüz endüstriyel uygulamalarının temelini oluşturan ve malzeme bilimi, kimya mühendisliği ile çevre bilimlerini kesiştiren kritik bir alandır. Ancak geleneksel polimer üretim süreçleri, büyük ölçüde fosil yakıt kaynaklarına bağımlılık, yüksek enerji tüketimi ve atık yönetimindeki yetersizlikler nedeniyle sürdürülebilirlik açısından önemli sorunlar barındırmaktadır. Bu durum, doğal kaynakların hızla tükenmesine ve ekosistemler üzerinde geri dönüşü zor etkilerin oluşmasına yol açmaktadır.

Sürdürülebilir kaynak kullanımı, polimer endüstrisinde çevresel etkilerin azaltılması için çok yönlü bir yaklaşım gerektirir. Bu kapsamda, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen biyobazlı polimerler öne çıkan bir çözüm olarak görülmektedir. Nişasta, selüloz ve bitkisel yağlar gibi biyokütle kaynaklarından üretilen polimerler, karbon ayak izinin düşürülmesinde önemli bir rol oynar. Aynı zamanda, polimerlerin geri dönüşümü ve yeniden kullanımına yönelik geliştirilen mekanik ve kimyasal yöntemler, dögüsel ekonomi prensiplerinin benimsenmesiyle kaynak verimliliğini artırmaktadır (Beena Unni & Muringayil Joseph, 2024; Paraye & Sarviya, 2024; Sabet, 2024a).

Üretim süreçlerinde sürdürülebilirliği sağlamak için yeşil kimya uygulamaları da giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Düşük enerjili polimerizasyon teknikleri, toksik olmayan çözügenlerin kullanımı ve enzimatik kataliz gibi yöntemler, çevre dostu polimer sentezine olanak tanımaktadır. Bunun yanı sıra, biyolojik olarak parçalanabilen polimerlerin geliştirilmesi, özellikle tek kullanımlık plastiklerin neden olduğu kirliliğin azaltılmasında etkili bir strateji olarak karşımıza çıkmaktadır. PLA ve PHA gibi biyobozunur malzemeler, doğada çözünebilir özellikleri sayesinde uzun vadeli çevresel riskleri minimize etmektedir (Nizamuddin & Chen, 2024; Pinaeva & Noskov, 2024; Sabet, 2024b).

1.2. Yenilenebilir Kaynaklara Geçiş

Geleneksel polimer üretim süreçlerinin fosil yakıt tabanlı hammaddelere olan bağımlılığı, küresel ölçekte ciddi çevresel ve ekolojik sorunları beraberinde getirmektedir. Petrol türevli polimerlerin yaşam döngüsü analizleri, üretimden bertaraf aşamasına kadar olan süreçte önemli miktarda sera gazı emisyonu ve enerji tüketimi gerektirdiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, iklim değişikliği ve kaynakların sürdürülemez tüketimi bağlamında endüstriyel üretim modellerinin yeniden değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Yenilenebilir kaynaklara dayalı polimer teknolojileri, bu sorunlara çözüm sunabilecek alternatif yaklaşımlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Biyobazlı polimerler olarak adlandırılan bu malzemeler, fotosentetik süreçlerle karbon döngüsüne entegre olabilen bitkisel kaynaklardan elde edilmektedir. Selüloz, nişasta, lignin gibi doğal polimerlerin yanı sıra, şeker kamışından elde edilen etanolün polimerizasyonu ile üretilen polilaktik asit (PLA) gibi yapısal polimerler, endüstriyel uygulamalarda giderek daha fazla kullanım alanı bulmaktadır.

Biyokütle kaynaklı polimerlerin en önemli avantajı, karbon nötr veya karbon negatif özellik gösterebilmeleridir. Bitkilerin büyüme sürecinde atmosferden absorbe ettiği CO₂, polimerlerin yapı taşlarında depolanmakta ve böylece karbon ayak izi önemli ölçüde azaltılabilmektedir. Tarımsal yan ürünlerin ve organik atıkların polimer hammaddesi olarak değerlendirilmesi ise kaynak verimliliği açısından ek bir avantaj sağlamaktadır. Örneğin, mısır koçanı, buğday samanı ve pirinç kabuğu gibi lignoselülozik atıklar, düşük maliyetli ve sürdürülebilir polimer hammaddeleri olarak potansiyel taşımaktadır.

Biyobazlı polimerlerin performans özellikleri, petrokimyasal kökenli muadilleriyle karşılaştırıldığında bazı teknik zorlukları da beraberinde getirmektedir. Termal dayanım, mekanik mukavemet ve su geçirgenliği gibi parametrelerdeki sınırlamalar, bu malzemelerin endüstriyel uygulamalarda yaygınlaşmasını engelleyen faktörler olarak karşımıza çıkmaktadır.

Nanokompozit teknolojileri, kimyasal modifikasyonlar ve polimer alaşımları gibi yaklaşımlar, bu performans açıklarının giderilmesine yönelik aktif araştırma alanlarını oluşturmaktadır.

Biyopolimerlerin ekonomik fizibilitesi ve ölçeklenebilirliği de dikkatle ele alınması gereken konular arasındadır. Tarımsal üretimle doğrudan bağlantılı olmaları nedeniyle, gıda güvenliği ile olan ilişkileri ve arazi kullanımı üzerindeki potansiyel etkileri, sürdürülebilirlik değerlendirmelerinde dikkate alınması gereken kritik parametrelerdir. İkinci nesil biyokütle kaynaklarının kullanımı ve atık değerlendirme stratejileri, bu tür olumsuz etkilerin minimize edilmesine yardımcı olabilecek yaklaşımlar olarak görülmektedir (Raza et al., 2024; Sholokhova et al., 2024).

1.3. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA)

ISO 14040 ve 14044 standartları çerçevesinde polimer ürünlerinin çevresel etkilerini sistematik olarak analiz eden bir metodolojidir. Bu yaklaşım, hammadde temininden nihai bertarafa kadar tüm yaşam döngüsü boyunca enerji tüketimi, sera gazı emisyonları, su ayak izi ve toksisite gibi çoklu parametrelerin nicel olarak değerlendirilmesini sağlar. Özellikle biyobazlı ve petrokimyasal kökenli polimerlerin karşılaştırmalı analizleri, sürdürülebilir malzeme seçimleri için kritik veriler sunarken, proses optimizasyonu ve tedarik zinciri yönetimine yönelik stratejik kararları bilimsel temellere oturtmaktadır. LCA'nın dört temel aşaması; amaç ve kapsam tanımı, envanter analizi, etki değerlendirme-yorumlama ve polimer endüstrisinde çevresel performansın iyileştirilmesine yönelik kapsamlı bir çerçeve sunmaktadır.

Polimer teknolojilerinde LCA uygulamaları, döngüsel ekonomi hedeflerine ulaşmada giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu metodoloji sayesinde malzeme verimliliğinin artırılması, geri dönüşüm sistemlerinin optimize edilmesi ve alternatif hammadde kaynaklarının değerlendirilmesi mümkün hale gelmektedir. Ancak LCA sonuçlarının güvenilirliği, sistem sınırlarının doğru belirlenmesi, güncel envanter verilerinin kullanımı ve uygun etki değerlendirme yöntemlerinin seçimi gibi faktörlere bağlıdır. Bu nedenle polimer endüstrisinde sürdürülebilirlik çalışmalarının etkinliğini artırmak için LCA metodolojisinin sürekli iyileştirilmesi ve özellikle biyobozunur polimerler gibi yenilikçi malzemeler için özel değerlendirme kriterlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu yaklaşım, endüstrinin çevresel ayak izini azaltırken aynı zamanda ekonomik ve teknik fizibiliteyi de gözeten bütüncül çözümler sunmayı mümkün kılmaktadır (Akbarian-Saravi et al., 2025; Van Roijen & Miller, 2024).

1.4. Geri Dönüşüm Yaklaşımları ve Döngüsel Ekonomi

Polimer malzemelerin sürdürülebilir yönetimi, günümüzde mekanik ve kimyasal geri dönüşüm teknolojilerinin entegre kullanımını gerektiren çok boyutlu bir yaklaşımı zorunlu kılmaktadır. Mekanik geri dönüşümün sınırlamalarını aşmak amacıyla geliştirilen ileri dönüşüm (upcycling) teknikleri, özellikle karmaşık polimer karışımlarının ve kontamine atıkların değerlendirilmesinde yeni perspektifler sunmaktadır. Seçici çözündürme yöntemleri (CreaSolv prosesi gibi), piroliz ve gazifikasyon gibi termokimyasal süreçler, polimerik atıkları monomerlere veya petrokimyasal hammaddelere dönüştürerek malzeme döngüsünü tamamlayan yenilikçi çözümler olarak öne çıkmaktadır.

Döngüsel ekonomi paradigması, polimer endüstrisinde lineer üretim modelinden radikal bir kopuşu temsil etmektedir. Bu model, ürün tasarımından atık yönetimine kadar tüm değer zincirinde malzeme verimliliğini maksimize eden bütüncül bir sistem öngörmektedir. Özellikle genişletilmiş üretici sorumluluğu (EPR) prensibi ve endüstriyel simbiyoz uygulamaları, polimerik malzemelerin çoklu yaşam döngüleri boyunca değer korumasını sağlayarak kaynak tüketimini minimize etmeyi hedeflemektedir. Bu yaklaşım, sadece çevresel sürdürülebilirliği değil, aynı zamanda ekonomik dirençliliği de artıran strateji unsurudur (Adeoye et al., 2024; Liu et al., 2024).

1.5. Sürdürülebilir Polimer Üretim Yöntemleri

Bu yöntemler geleneksel proseslerin çevresel etkilerini minimize etmek amacıyla geliştirilen yenilikçi teknolojileri kapsamaktadır. Sürekli akışlı polimerizasyon reaktörleri, kesikli sistemlere kıyasla daha yüksek enerji verimliliği ve homojen ürün kalitesi sağlarken, çözücüsüz sentez yöntemleri organik çözücü kullanımını ortadan kaldırarak prosesin ekolojik ayak izini önemli ölçüde azaltmaktadır. Süperkritik akışkan teknolojileri ise özellikle karbondioksit gibi yeşil çözücülerin kullanımıyla hem reaksiyon koşullarının optimize edilmesine hem de ürün saflaştırma süreçlerinin basitleştirilmesine olanak tanımaktadır.

Bu ileri üretim teknikleri, proses intensifikasyonu prensipleri doğrultusunda kaynak verimliliğini artırmayı hedeflemektedir. Mikroreaktör teknolojileri, enzimatik katalizörlerin kullanımı ve mikrodalga destekli polimerizasyon gibi yöntemler, daha düşük sıcaklık ve basınç koşullarında yüksek verimlilikle çalışabilmekte, böylece enerji tüketimini ve sera gazı emisyonlarını azaltmaktadır. Bu teknolojik gelişmeler, polimer endüstrisinin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasında kritik bir rol oynarken, aynı zamanda üretim maliyetlerinin düşürülmesine de katkı sağlamaktadır (Adeoye et al., 2024; Farooq et al., 2025; Hessel et al., 2024).

1.6. Çevre Dostu Malzemelerin Geliştirilmesi

Polilaktik asit (PLA), polihidroksialkanoatlar (PHA) ve polibutilen süksinat (PBS) gibi biyobazlı polimerler, mikrobiyal aktivite sonucu doğal ortamlarda parçalanabilme kabiliyetleriyle geleneksel plastiklere alternatif oluşturmaktadır. Bu malzemelerin performans özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik olarak, nanokompozit teknolojileri ve polimer alaşım sistemleri üzerine yoğunlaşmaktadır.

Döngüsel ekonomi prensipleri doğrultusunda, malzeme tasarımında geri dönüşüm odaklı yaklaşımlar giderek önem kazanmaktadır. Monomateryal tasarımlar, kolay ayrışabilir çok katmanlı yapılar ve kimyasal geri dönüşüme uygun polimer formülasyonları, plastiklerin yaşam döngüsünü uzatan kritik stratejiler olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle depolimerizasyon tekniklerine uygun tasarlanmış polimerler, kapalı döngü geri dönüşüm sistemlerinin kurulmasına olanak tanıyarak kaynak verimliliğini artırmaktadır. Bu gelişmeler, polimer endüstrisinin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasında temel bir rol oynamaktadır (Acharjee et al., 2024; Kim et al., 2024).

2. POLİMER TEKNOLOJİSİNDE ATIK YÖNETİMİ VE ÇEVRESEL ETKİLER

2.1. Atık Yönetimi Yaklaşımlarına Genel Bakış

Polimer atık yönetimi, modern sürdürülebilirlik stratejilerinin temel bileşenlerinden birini oluşturmaktadır. Entegre atık yönetimi sistemleri, hiyerarşik bir yaklaşımla kaynakta azaltma, yeniden kullanım, mekanik ve kimyasal geri dönüşüm, enerji geri kazanımı ve nihai bertaraf aşamalarını kapsamlı olarak ele almaktadır. Özellikle akıllı ayırma teknolojileri ve otomatize edilmiş sınıflandırma sistemleri, polimer atıkların türlerine göre etkin şekilde ayrıştırılmasını sağlayarak geri dönüşüm verimliliğini artırmaktadır. Bu süreçler, geleneksel lineer ekonomi modelinden döngüsel ekonomiye geçişin kritik adımlarını oluşturmaktadır.

Atık polimerlerin kaynak olarak değerlendirilmesi, çevresel sürdürülebilirliğin yanı sıra önemli ekonomik fırsatlar da sunmaktadır. İleri dönüşüm (upcycling) teknikleri, düşük değerli polimer atıkların yüksek performanslı malzemelere dönüştürülmesine olanak tanıırken, kimyasal geri dönüşüm prosesleri karmaşık polimer karışımlarının orijinal monomerlerine kadar indirgenmesini mümkün kılmaktadır. Bu yaklaşımlar, ham madde bağımlılığını azaltarak endüstriyel üretimde kaynak güvenliğini artırmakta ve karbon ayak izinin minimize edilmesine katkı sağlamaktadır. Sürdürülebilir atık yönetimi politikaları, bu teknolojilerin yaygınlaştırılması için gerekli altyapı ve düzenlemelerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır (Bernat, 2023; Cheah et al., 2022; Chowdhury et al., 2025; Kumari et al., 2024).

2.2. Topluluk Tabanlı Girişimler

Topluluk tabanlı atık yönetim sistemleri, yerel ölçekte sürdürülebilir çözümler geliştirmede etkin bir model sunmaktadır. Endonezya'da uygulanan Atık Bankası gibi girişimler, katılımcıların geri dönüştürülebilir atıkları ekonomik değere dönüştürmesine olanak tanıyarak hem çevresel farkındalığı artırmakta hem de sosyoekonomik kalkınmaya katkı sağlamaktadır. Bu tür modeller, geleneksel merkezi atık yönetim sistemlerinin erişemediği bölgelerde özellikle etkilidir. Yerel halkın aktif katılımıyla işleyen sistemler, atık toplama oranlarını artırırken, toplumda çevre bilincinin yerleşmesine de katkıda bulunmaktadır. Ekonomik teşvik mekanizmalarıyla birleştirilen bu yaklaşımlar, sürdürülebilir atık yönetiminde başarılı sonuçlar vermektedir (Bernat, 2023; Datta et al., 2012; Spiteri & Nepal, 2006).

2.3. Kimyasal Geri Dönüşüm Teknolojileri

Kimyasal geri dönüşüm prosesleri, mekanik yöntemlerle işlenmesi zor olan karmaşık polimerik atıkların değerlendirilmesinde devrim niteliğinde çözümler sunmaktadır. Depolimerizasyon, solvoliz ve termokimyasal dönüşüm gibi ileri teknolojiler, PETRONAS ve Plastic Energy gibi endüstri liderlerinin geliştirdiği ticarileşmiş proseslerle, atık plastiklerin orijinal monomerlerine veya petrokimyasal hammaddelere dönüştürülmesini mümkün kılmaktadır. Bu yöntemler, malzeme döngüsünü tamamlarken aynı zamanda virjin plastik üretimine olan bağımlılığı azaltarak karbon ayak izinin minimize edilmesine katkı sağlamaktadır (Jenks, 2024; Konarova et al., 2024).

2.4. Atıktan Servete: Enerjiye Dönüşüm Yöntemleri

Termokimyasal dönüşüm teknolojileri, plastik atıkların enerji içeriğinden faydalanmak için geliştirilmiş sofistike çözümlerdir. Kontrollü piroliz ve gazlaştırma prosesleri, düşük kaliteli karışık plastik atıkların sentez gazı (syngas) veya sıvı hidrokarbon yakıtlara dönüştürülmesini sağlayarak hem enerji geri kazanımını hem de atık bertarafını aynı anda çözmektedir. Bu teknolojiler, geleneksel yakma yöntemlerine kıyasla daha düşük emisyon profili sunarken, dögüsel ekonomi prensiplerine uygun şekilde kaynak verimliliğini artırmaktadır.

2.5. Uluslararası İş birlikleri ve Politikalar

Küresel plastik kirliliği sorunu, uluslararası düzeyde koordineli politikalar ve çok paydaşlı iş birlikleri gerektirmektedir. Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) ve Avrupa Yeşil Mutabakatı gibi girişimler, gelişmekte olan ülkelerde sürdürülebilir atık yönetim altyapısının kurulmasına yönelik kapasite geliştirme programları yürütmektedir. Bu çerçevede, teknoloji transferi, finansman mekanizmaları ve politika uyumlaştırma çalışmaları, entegre atık yönetim

sistemlerinin küresel ölçekte yaygınlaşmasını hedeflemektedir (Lema, 2024; Min & Cho, 2024).

2.6. Çevresel Etkiler: Kirlilik, Asit Yağmuru, Okyanus Asitlenmesi

Polimerik malzemelerin yaşam döngüsü, ekosistemler üzerinde çok katmanlı etkilere yol açmaktadır. Mikro ve nanoplastiklerin sucul ve karasal ortamlarda birikmesi, besin zincirine katılarak biyolojik magnifikasyona neden olmaktadır. Fosil yakıt temelli üretim süreçlerinden kaynaklanan sülfür ve nitrojen oksit emisyonları ise asit yağmurlarına yol açarak toprak ve su kaynaklarının kimyasal dengesini bozmaktadır. Okyanus asitlenmesi, atmosferik CO₂'nin deniz suyunda çözünmesi sonucu kalsiyum karbonat bazlı organizmaların yaşamsal faaliyetlerini tehdit eden kritik bir çevre sorunudur (Ali et al., 2024; Nawaz et al., 2025).

2.7. Biyoçeşitlilik ve Sosyal Etkiler

Polimer üretiminin ekosistemler üzerindeki etkileri, habitat parçalanmasından türlerin yok oluşuna kadar uzanan geniş bir yelpazede kendini göstermektedir. Ham madde çıkarımı ve üretim tesislerinin yer seçimi, özellikle hassas ekosistemlerde geri dönüşü zor hasarlara yol açabilmektedir. Sosyal boyutta ise, polimer endüstrisinin yaşam döngüsü, çalışan sağlığı ve güvenliği, toplumsal refah ve çevresel adalet gibi multidisipliner konuları gündeme getirmektedir. Bu etkilerin minimize edilmesi için sosyal yaşam döngüsü değerlendirmesi (SLCA) gibi bütüncül yaklaşımların benimsenmesi gerekmektedir (R Velasquez et al., 2025; K. Yadav & Nikalje, 2024).

2.8. Vaka Çalışmaları ve Endüstriyel Uygulamalar

Sektördeki öncü uygulamalar, sürdürülebilir polimer teknolojilerinin teknik ve ekonomik fizibilitesini kanıtlamaktadır. Örneğin, havalimanı inşaat projelerinde uygulanan Çevresel Etki Değerlendirme (ÇED) süreçleri, polimerik malzemelerin yaşam döngüsü boyunca çevresel performansının optimize edilmesine yönelik kapsamlı bir çerçeve sunmaktadır. Endüstriyel simbiyoz projeleri ise bir tesisin atığını diğerinin hammaddesi olarak kullanarak kaynak verimliliğini artıran başarılı modeller oluşturmaktadır (Rosa et al., 2024; Rosen et al., 2024).

2.9. Karşılaşılan Zorluklar

Sürdürülebilir polimer teknolojilerinin yaygınlaşması önünde çeşitli sistemik engeller bulunmaktadır. Mevcut lineer ekonomi modelinin yerleşik altyapısı ve yatırımlar, döngüsel modele geçişi yavaşlatmaktadır. Ülkeler arasındaki mevzuat farklılıkları ve standart eksiklikleri, küresel ölçekte uyumlu politikaların geliştirilmesini zorlaştırmaktadır. Özellikle yüksek başlangıç maliyetleri ve uzun geri ödeme süreleri, yeşil teknolojilere geçişin önündeki en büyük engellerden birini oluşturmaktadır (Edo et al., 2025; Nasser et al., 2025).

2.10. Gelecek Perspektifleri ve Politika Önerileri

Polimer teknolojilerinin sürdürülebilir geleceği için çok boyutlu stratejiler geliştirilmesi gerekmektedir. Toplumun tüm kesimlerinde çevre okuryazarlığının artırılması, tüketici davranışlarının değişmesi için kritik öneme sahiptir. Biyobozunur ve biyobazlı polimer araştırmalarının desteklenmesi, malzeme bilimindeki yeniliklerin hızlandırılmasını sağlayacaktır. Sektörler arası iş birlikleri ve kamu-özel ortaklıkları, sürdürülebilir üretim tekniklerinin endüstriyel ölçekte benimsenmesini kolaylaştıracaktır. Vergi teşvikleri ve yeşil finansman mekanizmaları ise düşük karbonlu üretime geçişi ekonomik açıdan cazip hale getirecektir.

3.SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Polimer teknolojisinde sürdürülebilir kaynak kullanımı ve atık yönetimi, günümüzün en kritik çevresel ve ekonomik meseleleriyle doğrudan ilişkili bir dönüşüm sürecini ifade etmektedir. Polimer malzemelerin üretim, kullanım ve bertaraf süreçlerinin ekolojik denge üzerindeki etkileri, küresel ölçekte çevre bilincinin artması ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin benimsenmesiyle birlikte daha görünür ve öncelikli hale gelmiştir. Bu çalışma kapsamında ele alınan bulgular, sürdürülebilirliğin yalnızca teknik bir problem değil, aynı zamanda yapısal, yönetsel ve sosyoekonomik bir paradigma değişimini gerektirdiğini ortaya koymaktadır.

Yenilenebilir kaynakların polimer üretiminde kullanımı, geleneksel fosil kaynaklara dayalı sistemlerin çevresel maliyetlerini azaltmak amacıyla geliştirilen stratejik bir adımdır. Bitki bazlı hammaddelerden elde edilen biyobazlı polimerlerin, özellikle karbon ayak izini düşürme ve yenilenebilirlik ilkesine uyum sağlama açısından ciddi avantajlar sunduğu görülmektedir. Ancak bu polimerlerin üretim süreçleri hâlâ önemli teknik ve ekonomik zorluklar barındırmakta; performans özellikleri ve maliyet etkinlikleri, petrokimyasal türevleriyle rekabet etmeyi güçleştirmektedir. Bu durum, sürdürülebilir malzeme araştırmalarında hem çok disiplinli yaklaşımları hem de üretim ölçeklemesini içeren yenilikçi çözümleri gerekli kılmaktadır. Ayrıca, tarımsal kaynakların polimer hammaddesi olarak kullanılmasının gıda güvenliği, arazi kullanımı ve sosyal denge üzerindeki etkileri de bütüncül bir değerlendirme ihtiyacını ortaya koymaktadır.

Geri dönüşüm teknolojileri, sürdürülebilir polimer yönetiminin bir diğer temel yapı taşı oluşturmaktadır. Özellikle kimyasal geri dönüşüm yöntemlerinin gelişimi, mekanik geri dönüşümün sınırlamalarını aşmakta ve karmaşık polimer yapılarının orijinal yapıtaşlarına dönüştürülmesine olanak tanımaktadır. Bu sayede, malzeme döngüsünün kapatılması ve döngüsel ekonomi modelinin etkin bir şekilde uygulanması mümkün olmaktadır. Ancak, bu

süreçlerin yüksek enerji ihtiyacı, ekonomik fizibilite sorunları ve altyapı eksiklikleri gibi faktörler, kimyasal geri dönüşümün yaygınlaşmasını kısıtlamaktadır. Ayrıca, geri dönüşümün etkinliği, polimerlerin yaşam döngüsü boyunca tasarım aşamasında geri dönüştürülebilirliği göz önünde bulundurulmasına da bağlıdır. Bu noktada, ekotasarım ilkeleriyle şekillenen monomateryal çözümler ve depolimerizasyona uygun polimer formulasyonları, atık yönetimi ve kaynak verimliliği açısından büyük önem arz etmektedir.

Yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA), polimer teknolojilerinde sürdürülebilirlik performansının bilimsel ve karşılaştırmalı olarak ölçülebilmesini sağlayan kritik bir analiz aracıdır. LCA uygulamaları, yalnızca bir ürünün çevresel etkilerinin hesaplanmasına değil, aynı zamanda alternatif üretim yöntemleri, hammadde kaynakları ve geri dönüşüm senaryoları arasında optimal tercihler yapılmasına da imkân tanımaktadır. Ancak bu metodolojinin etkinliği, doğru veri setlerinin kullanılması, sistem sınırlarının net bir şekilde tanımlanması ve çoklu etki kategorilerinin bütüncül olarak değerlendirilmesiyle doğru orantılıdır. Bu çerçevede, LCA'nın yalnızca çevresel değil; sosyal ve ekonomik etki analizleriyle birlikte yürütülmesi, sürdürülebilirlik değerlendirmesinin daha kapsayıcı hale gelmesini sağlamaktadır.

Polimer atık yönetimi bağlamında değerlendirildiğinde, dögüsel ekonomi ilkelerinin pratikte uygulanabilirliğinin, yerel yönetim kapasiteleri, altyapı yeterliliği ve toplumun çevre bilinci düzeyiyle yakından ilişkili olduğu anlaşılmaktadır. Topluluk temelli girişimlerin, özellikle gelişmekte olan bölgelerde düşük maliyetli ve etkili çözümler sunduğu gözlemlenmektedir. Atık bankaları ve yerel geri dönüşüm ağları gibi modeller, sadece çevresel etkilerin azaltılmasına değil, aynı zamanda sosyal fayda üretimine de katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, bu tür uygulamaların başarısı, uzun vadeli stratejik planlamalar, finansal destek mekanizmaları ve politika yapıcılarının aktif katılımıyla doğrudan ilişkilidir.

Çevresel etkiler açısından bakıldığında, polimerlerin doğaya kontrolsüz salınımı, sadece kirlilik yaratmakla kalmamakta, aynı zamanda biyoçeşitliliği tehdit etmekte ve ekosistem hizmetlerini bozmaktadır. Mikroplastiklerin sucul ve karasal ortamlarda birikimi, besin zinciri boyunca toksik etkileşimlere yol açarken, asit yağmurları ve okyanus asitlenmesi gibi sorunlar, polimer üretiminin dolaylı çevresel etkilerini gözler önüne sermektedir. Bu etkiler, yalnızca teknik çözümlerle bertaraf edilemeyecek kadar çok katmanlıdır. Bu nedenle, sürdürülebilir polimer teknolojilerinin yaygınlaştırılması, aynı zamanda ekolojik restorasyon politikaları, çevresel etki azaltım planları ve iklim değişikliğine adaptasyon stratejileriyle birlikte ele alınmalıdır.

Polimer teknolojisinde sürdürülebilir dönüşüm süreci, çeşitli yapısal, düzenleyici ve ekonomik engellerle karşı karşıyadır. Lineer ekonomi modeline dayalı mevcut altyapının değiştirilmesi,

yeni teknolojilere yatırım yapılması ve sektörel uygulamaların uyumlaştırılması, ciddi maliyet ve zaman gereksinimleri doğurmaktadır. Özellikle küçük ve orta ölçekli işletmelerin, yüksek ilk yatırım gerektiren sürdürülebilir teknolojilere erişiminde yaşadığı güçlükler, sektör genelinde dönüşümün hızını yavaşlatmaktadır. Ayrıca ülkeler arası mevzuat farklılıkları, standart eksiklikleri ve politik tutarsızlıklar da sürdürülebilir çözümlerin uluslararası ölçekte yaygınlaşmasını sınırlandırmaktadır.

Geleceğe yönelik olarak, sürdürülebilir polimer teknolojilerinin yaygınlaştırılması için çok katmanlı, bütüncül ve sistem temelli politika yaklaşımlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kapsamda, sürdürülebilir malzeme araştırmalarının desteklenmesi, kamu-özel sektör işbirliklerinin güçlendirilmesi ve çevre dostu teknolojilerin ekonomik olarak cazip hale getirilmesi gerekmektedir. Eğitim ve farkındalık kampanyaları aracılığıyla tüketici davranışlarının değiştirilmesi, sürdürülebilir üretim ve tüketim döngülerinin oluşturulmasında etkili olacaktır. Ayrıca, yeşil finansman mekanizmalarının devreye alınması, karbon vergileri, teşvikler ve sürdürülebilirlik performansına dayalı kamu alımları gibi politika araçlarının sistematik bir şekilde uygulanması, dönüşüm sürecini destekleyecektir.

Sonuç olarak, polimer teknolojisinde sürdürülebilir kaynak kullanımı ve atık yönetimi, yalnızca çevresel riskleri azaltmayı değil, aynı zamanda ekonomik kalkınmayı, sosyal refahı ve gelecek kuşakların yaşam hakkını güvence altına almayı hedefleyen çok yönlü bir dönüşüm alanıdır. Bu dönüşümün başarıyla tamamlanması, bilimsel bilgi, teknolojik inovasyon, kamu politikaları ve toplumsal katılımın eşgüdüm içerisinde işlenmesini gerektirmektedir. Ancak bu bütüncül yaklaşım sayesinde, polimer teknolojisinin 21. yüzyılın çevresel ve sosyoekonomik beklentileriyle uyumlu hale gelmesi ve sürdürülebilir bir geleceğe katkı sunması mümkün olacaktır.

REFERANSLAR

- Acharjee, S. A., Gogoi, B., Bharali, P., Sorhie, V., & Alemtoshi, B. W. (2024). Recent trends in the development of Polyhydroxyalkanoates (PHAs) based biocomposites by blending with different bio-based polymers. *Journal of Polymer Research* 2024 31:4, 31(4), 1–30. <https://doi.org/10.1007/S10965-024-03947-Z>
- Adeoye, A. O., Yelwa, J. M., Imam, N., Quadri, R. O., Lawal, O. S., Malomo, D., Aasa, S. A., Onakpa, A. E., Dorgbaa, R. K., Omoniyi, B. P., Ahmad, N., & Garba, H. A. (2024). Pyrolysis of Plastic Wastes Towards Achieving a Circular Economy: An Advanced Chemistry and Technical Approach. *Energy, Environment, and Sustainability, Part F3228*, 215–259. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0437-8_11
- Akbarian-Saravi, N., Sowlati, T., Ahmad, H., Hewage, K., Sadiq, R., & Milani, A. S. (2025). Life cycle assessment of hemp-based biocomposites production for agricultural emission mitigation strategies: a case study. *Biocomposites and the Circular Economy*, 261–285. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-23718-8.00012-0>



- Ali, I., Tan, X., Peng, C., Naz, I., Zhang, Y., Hernández, A., Marcos, R., Pervez, R., Duan, Z., & Ruan, Y. (2024). Eco- and bio-corona-based microplastics and nanoplastics complexes in the environment: Modulations in the toxicological behavior of plastic particles and factors affecting. *Process Safety and Environmental Protection*, 187, 356–375. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2024.04.035>
- Beena Unni, A., & Muringayil Joseph, T. (2024). Enhancing Polymer Sustainability: Eco-Conscious Strategies. *Polymers* 2024, Vol. 16, Page 1769, 16(13), 1769. <https://doi.org/10.3390/POLYM16131769>
- Bernat, K. (2023). Post-Consumer Plastic Waste Management: From Collection and Sortation to Mechanical Recycling. *Energies* 2023, Vol. 16, Page 3504, 16(8), 3504. <https://doi.org/10.3390/EN16083504>
- Cerchione, R., Morelli, M., Passaro, R., & Quinto, I. (2025). A critical analysis of the integration of life cycle methods and quantitative methods for sustainability assessment. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 32(2), 1508–1544. <https://doi.org/10.1002/CSR.3010>
- Cheah, C. G., Chia, W. Y., Lai, S. F., Chew, K. W., Chia, S. R., & Show, P. L. (2022). Innovation designs of industry 4.0 based solid waste management: Machinery and digital circular economy. *Environmental Research*, 213, 113619. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2022.113619>
- Chowdhury, A. T., Chowdhury, M. E. H., Islam, Md. S. Bin, Newaz, M., Salam, A., Sayem, F., Hasan-Mia, M., Nashbat, M., Majid, M. E., Khandakar, A., Bin Abul Kashem, S., & Ashraf, A. (2025). Intelligent waste management: a comprehensive review of machine learning and deep learning applications in advanced recycling. *Harnessing Automation and Machine Learning for Resource Recovery and Value Creation*, 427–460. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-27374-2.00018-2>
- da Cruz, T. T., Las-Casas, B., Dias, I. K. R., & Arantes, V. (2024). Nanocelluloses as sustainable emerging technologies: State of the art and future challenges based on life cycle assessment. *Sustainable Materials and Technologies*, 41, e01010. <https://doi.org/10.1016/J.SUSMAT.2024.E01010>
- Datta, D., Chattopadhyay, R. N., & Guha, P. (2012). Community based mangrove management: A review on status and sustainability. *Journal of Environmental Management*, 107, 84–95. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2012.04.013>
- Deng, X., Song, M., Li, Z., Zhang, F., & Liu, Y. (2024). Environmental Resource Allocation Efficiency and Sustainable Development. *Environmental and Natural Resources Economics*, 67–95. https://doi.org/10.1007/978-981-99-9923-1_3
- Dutta, D., & Sit, N. (2024). A comprehensive review on types and properties of biopolymers as sustainable bio-based alternatives for packaging. *Food Biomacromolecules*, 1(2), 58–87. <https://doi.org/10.1002/FOB2.12019>
- Edo, G. I., Mafe, A. N., Ali, A. B. M., Akpoghelie, P. O., Yousif, E., Isoje, E. F., Igbuku, U. A., Zainulabdeen, K., Owhero, J. O., Essaghah, A. E. A., Umar, H., Ahmed, D. S., & Alamiery, A. A. (2025). Advancing Sustainable Food Packaging: the Role of Green Nanomaterials in Enhancing Barrier Properties. *Food Engineering Reviews* 2025, 1–35. <https://doi.org/10.1007/S12393-025-09407-8>
- Farooq, E., Osama, S. M., Abbas, S. H., & Aqeel, M. (2025). Biodegradable Polymers for Process Intensification in Chemical Engineering: Challenges and Innovations. *Mechanics Exploration and Material Innovation*, 2(1), 1–13. <https://doi.org/10.21776/UB.MEMI.2025.002.01.1>
- Findik, F. (2025). Polymeric materials and their applications. *Sustainable Engineering and Innovation*, 7(1), 15–40. <https://doi.org/10.37868/SEI.V7I1.ID388>
- Hessel, V., Mukherjee, S., Mitra, S., Goswami, A., Tran, N. N., Ferlin, F., Vaccaro, L., Galogahi, F. M., Nguyen, N. T., & Escribà-Gelonch, M. (2024). Sustainability of flow chemistry and microreaction technology. *Green Chemistry*, 26(18), 9503–9528. <https://doi.org/10.1039/D4GC01882F>
- Jenks, M. J. F. (2024). Chemical Recycling of Polypropylene. <https://doi.org/10.33540/2318>
- Kim, J., Yun, H., Won, S., Lee, D., Baek, S., Heo, G., Park, S., Jin, H. J., & Kwak, H. W. (2024). Comparative degradation behavior of polybutylene succinate (PBS), used PBS, and PBS/Polyhydroxyalkanoates (PHA) blend fibers in compost and marine–sediment interfaces. *Sustainable Materials and Technologies*, 41, e01065. <https://doi.org/10.1016/J.SUSMAT.2024.E01065>
- Konarova, M., Batalha, N., Fraga, G., Ahmed, M. H. M., Pratt, S., & Laycock, B. (2024). Integrating PET chemical recycling with pyrolysis of mixed plastic waste via pressureless alkaline