

Makale İncelemesi

Akıllı Atık Yönetimi için Yapay Zeka ve IoT: Zorluklar, Fırsatlar ve Gelecek Yönelimleri

Sameh Fuqaha ^{1,*} ve Nursetiawan ²

¹ İnşaat Mühendisliği Yüksek Lisansı, Lisansüstü Çalışmalar, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Yogyakarta 55183, Endonezya; e-posta : sameh.h.psc24@mail.umy.ac.id

² İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Yogyakarta 55183, Endonezya; e-posta : nursetiawan@umy.ac.id

* Sorumlu Yazar : Sameh Fuqaha

Özet: Endonezya'nın atık yönetim sistemi, hızlı kentleşme, verimsiz atık toplama ve düşük geri dönüşüm oranları nedeniyle önemli zorluklarla karşı karşıyadır. Ülkenin açık çöplük ve arazi doldurmaya olan bağımlılığı çevresel bozulmayı, kirliliği ve sera gazı emisyonlarını daha da kötüleştirmiştir. Bu çalışma, akıllı toplama, otomatik ayırma, gerçek zamanlı izleme ve tahmine dayalı analitik yoluyla atık yönetimini modernize etmede Yapay Zeka (AI) ve Nesnelerin İnterneti'nin (IoT) dönüştürücü potansiyelini araştırmaktadır. Yapay zeka destekli atık sınıflandırması geri dönüşüm verimliliğini artırırken, IoT özellikli akıllı kutular toplama rotalarını optimize ederek işletme maliyetlerini ve çöp sahasına bağımlılığı azaltmaktadır. Bununla birlikte, yüksek uygulama maliyetleri, dijital altyapı sınırlamaları, veri erişilebilirliği sorunları ve gizlilik endişeleri nedeniyle yaygın olarak benimsenmesi engellenmektedir. Bu engellerin aşılması, yapay zeka odaklı altyapıya, standartlaştırılmış veri toplamaya ve etik ve sürdürülebilir uygulama sağlayan düzenleyici çerçevelere yatırım yapılmasını gerektirmektedir. Hükümetler, teknoloji firmaları ve araştırma kurumları arasındaki işbirliğine dayalı ortaklıklar, YZ tabanlı atık yönetimini ölçeklendirmek için kritik öneme sahiptir. Pilot programlar ve fizibilite çalışmaları, bu teknolojilerin etkinliğini doğrulayacak ve büyük ölçekli benimsemeyi teşvik edecektir. Doğru politikalar ve yatırımlarla, YZ ve IoT Endonezya'nın atık yönetiminde devrim yaratabilir, çevresel etkiyi azaltabilir, döngüsel ekonomi girişimlerini teşvik edebilir ve kentsel gelişimde uzun vadeli sürdürülebilirlik sağlayabilir.

Anahtar Kelimeler: Yapay Zeka; Endonezya; Nesnelerin İnterneti (IoT); Sürdürülebilir Atık Yönetimi; Atık Yönetimi.

Alındı: Mart, 15th 2025

Revize edilmiştir: 30 Mart

2025 Kabul Edildi: 4 Nisan

2025 Yayınlandı: 7 Nisan

2025 Curr. Ver.: 7 Nisan

2025



Telif hakkı: © 2025 yazarlar tarafından. Creative Commons Attribution (CC BY SA) lisansının hüküm ve koşulları altında olası açık erişim yayını için gönderilmiştir (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

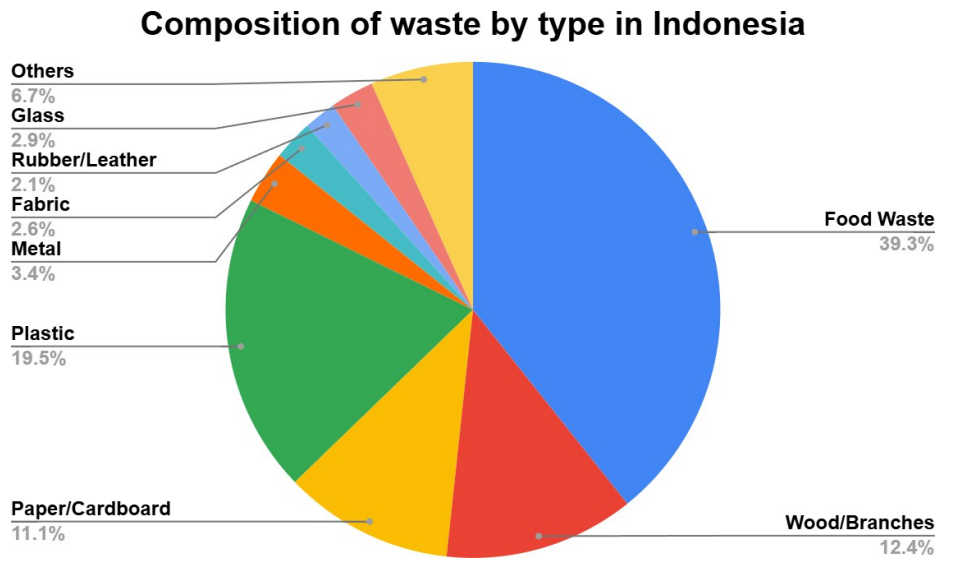
1. Giriş

Dünyanın en kalabalık dördüncü ülkesi olan Endonezya'nın tahmini nüfusu 2024 yılında 283,4 milyon[1]. Ülke ekonomisi pan-demik sonrası dönemde dayanıklılık göstermiş ve 2024'ün ikinci çeyreğinde %5,05'lik bir büyüme oranı yakalamıştır. Ancak bu hızlı ekonomik büyüme ve nüfus artışı atık üretimini önemli ölçüde artırarak 2023 yılında günlük 175.000 tonu aşmıştır[2]. Devam eden altyapı gelişimine rağmen, ülkenin atık yönetim sistemleri artan atık krizini ele almakta yetersiz kalmaktadır. Açık çöplük (%57) ve düzenli depolama (%15) gibi geleneksel atık bertaraf yöntemleri kentsel alanlarda baskın olmaya devam etmektedir[3], [4]. 2008 tarihli 18 sayılı Kanun, tüm düzenli depolama sahalarının sıhhi tesislere dönüştürülmesini zorunlu kılmasına rağmen, uyum birkaç şehirle sınırlı kalmıştır. Etkin olmayan atık yönetimi uygulamaları ciddi sosyal, çevresel ve halk sağlığı sorunları yaratmaktadır[5]. Açık çöplükler, özellikle karbondioksit (CO₂) ve metan (CH₄) olmak üzere sera gazı emisyonlarının önemli bir kaynağıdır, küresel ısınmayı şiddetlendirir ve iklim değişikliği etkilerini yoğunlaştırır[6].

Küresel olarak atık üretimi endişe verici bir boyuta ulaşmıştır. Bir Dünya Bankası raporu, yılda yaklaşık 2,01 milyar ton atık üretildiğini tahmin etmekte ve 2050 yılına kadar bu rakamın yılda 3,40 milyara çıkacağını öngörmektedir[7]. Sadece Endonezya 2023 yılında yaklaşık 68,5 milyon ton atık üretmiştir ve bu rakam artmaya devam etmektedir[2].

Endonezya'da kişi başına düşen atık üretimi günde tahmini 0,68 kg'dır [7]. Şekil 1'de gösterildiği gibi, ulusal atığın bileşimi ağırlıklı olarak gıda atığı (%39,82), ardından plastik (%19,19), ağaç ve dallar (%11,77) ve kağıt ve kartonlar (%10,86) olup, evsel kaynaklar toplam atığın %60 ila %70'ine katkıda bulunurken, pazarlar yaklaşık %20 ila %25'ini oluşturmaktadır. Yapay Zeka (YZ), atık yönetiminde giderek daha hayati bir rol oynamakta, temel operasyonel zorlukları ele almakta ve veri odaklı çözümler yoluyla verimliliği artırmaktadır [8]-[11]. Atık yönetimindeki yapay zeka odaklı yenilikler, atık toplama, kaynak kullanımı ve çevresel sürdürülebilirliğin optimize edilmesine katkıda bulunan sofistike veri analizi, örüntü algılama ve otomatik karar verme süreçlerini kapsamaktadır [12], [13].

Yapay zeka tabanlı atık yönetimindeki ilerlemeler arasında akıllı toplama stratejileri, gelişmiş ayırma mekanizmaları ve daha iyi planlama için tahmine dayalı analitik yer almaktadır [14]. Yapay zeka destekli atık toplama sistemleri, rota optimizasyonunu ve planlamayı kolaylaştırarak verimsizlikleri etkili bir şekilde azaltmakta ve işletme maliyetlerini düşürmektedir[15]. Ayrıca, yapay zeka ile entegre akıllı kutular ve gerçek zamanlı atık izleme teknolojileri, verimli atık ayrıştırmasını kolaylaştırmakta, sonuçta kaynak geri kazanımını iyileştirmekte ve sürdürülebilir atık yönetimi uygulamalarına katkıda bulunmaktadır[16].



Şekil 1. Endonezya'da türlerine göre atık bileşimi[17].

Atık ayıklama alanı, emek yoğun manuel yöntemlerden yapay zeka ile geliştirilmiş görüntü tanıma ve yapay görme teknolojilerine geçiş yaparak önemli ilerlemeler kaydetmiştir [18], [19]. Bu yenilikler ayıklama doğruluğunu önemli ölçüde artırarak geri dönüştürülebilir malzemelerin geri dönüştürülemeyenlerden etkin bir şekilde ayrılmasını sağlamış ve böylece geri dönüşüm oranlarını artırmıştır [20]-[22]. Ayrıca, robotik ve otomasyon, malzeme tanımlama süreçlerini iyileştirerek ve geri kazanılan malzemelerdeki kontaminasyonu azaltarak atık geri dönüşüm verimliliğini artırmıştır[23].

Teknolojideki kayda değer gelişmelerden biri de atık izleme sistemlerinin iyileştirilmesidir. Atık yönetiminde Nesnelerin İnterneti'nin (IoT) kullanılması, gerçek zamanlı izlemeyi mümkün kılarak daha iyi veri analizine ve kaynak tahsisine ilişkin bilinçli karar vermeye olanak sağlamıştır [24]. Atık yönetimi operasyonları, tahmine dayalı analitikten yararlanarak tahmin doğruluğunu artırabilir ve verimliliği artırmak için toplama programlarını düzene sokabilir[25]-[28]. Ancak, bu yeniliklere rağmen, çeşitli engeller hala yaygın uygulamayı sınırlamaktadır. Veri güvenilirliği, gizlilik endişeleri, yüksek benimsenme maliyetleri ve etik hususlar gibi konular önemli zorluklar teşkil etmektedir[29]. Bu zorlukların üstesinden gelmek, etkili çözümler oluşturmak için birden fazla taraf arasında işbirliğini gerektirmektedir[30].

YZ ve IoT'nin atık yönetimine entegre edilmesi, geleneksel uygulamaları modifiye ederek daha verimli, sürdürülebilir ve çevreye duyarlı hale getirmek için umut verici bir fırsat sunmaktadır [31]-[33]. YZ ve IoT'nin atık yönetim sistemlerini iyileştirmedeki büyük potansiyeline rağmen, bu sektördeki uygulamalarına ilişkin mevcut bilgileri birleştiren kapsamlı çalışmalar hala eksiktir. Birçok çalışma YZ ve IoT teknolojilerini araştırmıştır

Ancak çok azı bunların atık yönetimi verimliliği, sürdürülebilirliği ve ölçeklenebilirliği üzerindeki birleşik etkisini incelemiştir. Atık yönetimi küresel bir endişe kaynağı olmaya devam ettiğinden, yapay zeka ve IoT'nin operasyonları nasıl optimize edebileceği, çevresel etkileri nasıl azaltabileceği ve mevcut zorlukların üstesinden nasıl gelebileceği sistematik bir inceleme ile değerlendirilmelidir. Bu çalışma, bu teknolojilerin, faydalarının ve atık yönetimindeki zorluklarının yapılandırılmış bir şekilde anlaşılmasını sağlayarak bu bilgi boşluğunu doldurmayı amaçlamaktadır.

Tablo 1'de gösterildiği gibi, çeşitli literatür incelemeleri atık yönetiminde YZ ve IoT uygulamalarını araştırmıştır. Örneğin, [34] YZ güdümlü atık yönetimine odaklanmış, ancak finansal ve düzenleyici engeller gibi pratik uygulama zorlukları hakkında ayrıntılı bir tartışma yapılmamıştır. Benzer şekilde, [35] atık toplama ve geri dönüşümde YZ ve IoT'yi incelemiş, ancak gelişmekte olan ülkelerin kendine özgü zorluklarını göz ardı ederek öncelikle kentsel ortamları ele almıştır. [36] tarafından yapılan diğer bir inceleme, akıllı şehir atık yönetimine ilişkin içgörüler sağlamış, ancak YZ'nin benimsenmesinin etik ve sosyal sonuçlarını analiz etmemiştir.

Tablo 1. Önceki inceleme çalışmalarının özeti ve sınırlamaları.

Ref.	İncelemenin odak noktası	Tespit edilen eksiklikler
[34]	Akıllı atık yönetiminde yapay zeka uygulamaları	Pratik uygulama zorlukları ve ölçeklenebilirlik üzerine sınırlı tartışma
[35]	Atık toplama, ayrıştırma ve geri dönüşüm için yapay zeka ve IoT	Ağırlıklı olarak kentsel alanlara odaklanılmış, gelişmekte olan ülkelere bakış açısı eksik
[36]	Akıllı şehir atık yönetimi için yapay zeka ve IoT sistem mimarisi	Etik kaygıların ve sosyal sonuçların analizinden yoksun

Önceki çalışmalardan farklı olarak bu inceleme, yapay zeka odaklı kritik atık yönetimi araştırma boşluklarını ele alarak daha geniş bir perspektif sunmaktadır. Finansal, etik ve düzenleyici engeller de dahil olmak üzere temel benimsenme zorluklarını araştırmakta ve bunların işgücü dinamikleri ve veri gizliliği üzerindeki etkilerini incelemektedir. Ayrıca, gelişmekte olan ülkelerde, özellikle de Endonezya'da yapay zeka uygulamasına ilişkin özel zorlukları ve fırsatları vurgulamaktadır. Bu çalışma, bu sınırlamaları belirleyerek ve pratik çözümlere ilişkin içgörüler sunarak YZ odaklı atık yönetimi stratejilerinin daha bilinçli ve uygulanabilir bir şekilde anlaşılmasına katkıda bulunmaktadır.

Bu makalenin geri kalanı aşağıdaki şekilde yapılandırılmıştır: Bölüm 2, YZ'nin atık yönetimine entegrasyonunu incelemekte, temel teknolojileri ve bunların atık toplama, ayırma, geri dönüşüm ve izleme alanlarındaki özel uygulamalarını vurgulamaktadır. Bölüm 3, veri erişilebilirliği ve güvenilirliği, gizlilik endişeleri, finansal ve altyapı kısıtlamaları ve ahlaki ve etik çıkarımlar gibi konuları ele alarak YZ uygulamasının zorluklarını ve sınırlamalarını araştırmaktadır. Bölüm 4, politika gelişmelerine ve ortaya çıkan teknolojik yeniliklere odaklanarak YZ odaklı atık yönetimi için gelecekteki yönleri ve fırsatları tartışmaktadır. Son olarak, Bölüm 5, bu incelemenin bulgularına dayanan sonuç ve önerileri sunmaktadır.

2. Atık Yönetimi ve Yapay Zeka

Bu bölüm son teknoloji ürünü bir açıklama içermelidir. Bu birkaç şekilde açıklanabilir. İlk olarak, hem nesneler, hem yöntemler hem de sonuçları hakkında birkaç ilgili makaleyi tartışabilirsiniz. Buradan, araştırmanız ile önceki araştırmalar arasındaki boşlukları veya farklılıkları açıklayabilir ve vurgulayabilirsiniz. İkinci yol, teoriyi ilgili literatürle birleştirmek ve her teoriyi bir alt bölümde açıklamaktır.

Yapay zeka, atık yönetiminin verimliliğini artırmada giderek daha önemli hale geliyor. YZ'nin büyük miktarda veriyi işleme yeteneği, doğru içgörüler sağlar ve çeşitli süreçleri otomatikleştirerek daha etkili atık yönetimi uygulamalarına yol açar. YZ güdümlü stratejiler, atık toplamadan yönetim planlamasına kadar sektör içinde genişlemiştir[37], [38].

Son yıllarda, hükümetler ve kuruluşlar yenilikçi çözümlere yatırım yapmaya devam ettikçe, atık yönetiminde YZ'nin benimsenmesinde kayda değer bir artış olmuştur [39], [40]. Bu sektördeki küresel YZ pazarının, 2022'de 428,00 milyar ABD dolarından 2030'a kadar yaklaşık 2.025,12 milyar ABD dolarına yükseleceğini gösteren projeksiyonlarla önemli ölçüde büyümesi beklenmektedir[41]. Rastgele Ormanlar (RF), doğrusal regresyon, destek vektör makineleri (SVM'ler), karar ağaçları (DT'ler), K-En Yakın Komşular (KNN), Takviyeli Öğrenme (RL), yapay sinir ağları gibi çeşitli YZ teknikleri atık yönetimine dahil edilmiştir.

(YSA'lar) ve genetik algoritmalar (GA'lar). Aşağıdaki bölümlerde bu teknikler ve atık yönetimindeki uygulamaları incelenmektedir.

2.1. Atık Yönetiminde Yapay Zeka Teknikleri

Yapay zeka, atık yönetimi verimliliğinin artırılmasında giderek daha hayati bir rol oynuyor. Yapay zeka, büyük miktarda veriyi işleyerek doğru içgörüler sağlayabilir ve çeşitli işlemleri otomatikleştirerek atık yönetimini daha etkili hale getirebilir.

2.1.1. Rastgele Ormanlar (RF)

Son çalışmalar, özellikle karmaşık, çok boyutlu veri kümelerini yönetmek için Rastgele Ormanların (RF) atık sınıflandırmadaki başarısını vurgulamaktadır. Örneğin, araştırmalar RF'nin atık ayırma sistemlerinin doğruluğunu artırdığını ve geri dönüşüm akışlarında daha düşük kirlenme oranlarına yol açtığını göstermiştir[42]. Bu durum, RF'nin farklı atık türlerini belirli özelliklere göre doğru bir şekilde kategorize ederek malzeme geri kazanım tesislerinin operasyonel verimliliğini önemli ölçüde artırabileceğini ve bunun da ayrıştırmayı optimize ederek daha iyi kaynak geri kazanımı ve sürdürülebilirliğe katkıda bulunabileceğini göstermektedir.

2.1.2. Doğrusal Regresyon (LR)

Doğrusal Regresyon (LR), veri içindeki doğrusal ilişkilere dayanarak örüntüleri analiz eden ve sonuçları önceden tahmin eden bir denetimli öğrenme yöntemidir [43]. Katı atık yönetiminde (SWM), LR atıkla ilgili faktörlerin incelenmesinde önemlidir. Modeller, tek bir değişkene odaklanan basit doğrusal regresyon ve atık tahmini ve rota optimizasyonunun karmaşık karşılıklı bağımlılıklarını ele almak için çeşitli faktörleri içeren çoklu doğrusal regresyon (MLR) olarak kategorize edilebilir[44].

Doğrusal regresyon verimliliği, kullanım kolaylığı ve sonuçların basit bir şekilde yorumlanmasıyla bilinir. Bununla birlikte, doğrusal olmayan ilişkileri modellerken sınırlamalarla karşılaşır ve bu da karmaşık atık yönetimi senaryolarında doğruluğu azaltabilir [45], [46]. Buna rağmen LR, atık üretim tahminini, atık toplama rotası planlamasını ve arıtma ve bertaraf stratejilerinin optimizasyonunu iyileştirmek için uygulanmıştır [47], [48].

2.1.3. Destek Vektör Makinesi (SVM)

Destek Vektör Makinesi (DVM) atık tahmininde, çöp kutusu seviyelerinde atık tespitinde ve büyük veri kümelerini analiz etmek için otomatik sıralamada popüler bir seçim haline gelmiştir[49], [50]. Bu algoritmalar, çok boyutlu uzaylarda veri noktalarını ayıran hiper düzlemleri bularak parametrik olmayan sınıflandırıcılar olarak hizmet vermektedir. Sınıflandırmaya ek olarak, DVM'ler regresyon görevlerinde de mükemmeldir ve genellikle diğer algoritmalarından daha iyi performans gösterir[51].

DVM'ler verimlilikleri ve iyi ayrılmış verileri işleme yetenekleri ile bilinirken, çapraz doğrulama tekniklerine olan bağımlılıkları nedeniyle büyük veri kümelerinde zorlanabilirler [52]-[54]. Atık yönetiminde DVM'ler atık oluşumunu tahmin etmek, çöp kutusu seviyesinde atıkları tespit etmek ve atıkları sınıflandırmak gibi çeşitli görevler için kullanılmaktadır [55]-[59].

2.1.4. K-En Yakın Komşular (KNN)

K-En Yakın Komşular (KNN), özellikle fiziksel özelliklerine göre atık türlerinin belirlenmesinde atık sınıflandırması için oldukça etkilidir. Bir çalışma, kentsel ortamlarda geri dönüştürülebilir malzemelerin sınıflandırılmasında KNN'nin kullanımını göstermiş ve iyileştirilmiş ayıklama etkinliği ortaya koymuştur [60]. Bu, KNN'nin farklı atık türleri arasında kesin bir ayrım yaparak geri dönüşüm verimliliğini artırma potansiyelini vurgulamakta, böylece kirlenmeyi azaltmakta ve süreçteki geri kazanım oranlarını iyileştirmektedir.

2.1.5. Karar Ağacı (DT)

Karar ağaçları (DT), sınıflandırma ve regresyon görevlerine uygulanan popüler bir parametrik olmayan denetimli öğrenme tekniğidir [19]. Çeşitli olası sonuçları gösteren kök, karar ve yaprak düğümleri ile hiyerarşik olarak yapılandırılırlar. DT'ler sağlam, yorumlanabilir ve esnekler, bu da onları atık yönetimi uygulamaları için verimli kılar [61], [62]. Atık üretim tahminlerini iyileştirmek ve atık yönetim planlamasını optimize etmek için etkin bir şekilde kullanılmışlardır [63], [64].

2.1.6. Yapay Sinir Ağı (YSA)

Yapay sinir ağları (YSA) insan beynindeki sinir hücrelerinin işleyişini taklit etmek için tasarlanmıştır [65]. Giriş, gizli ve çıkış katmanlarından oluşan YSA'lar, doğrusal olmayan ilişkileri etkili bir şekilde simüle ederek büyük veri kümelerindeki karmaşık örüntülerin altında durma konusunda mükemmeldir.

Bu yetenek, atık üretimi tahmini, sıralama ve planlama da dahil olmak üzere çeşitli alanlarda artan popülerliklerine yol açmıştır[66]-[68]. Avantajlarına rağmen, YSA'lar aşırı uyum sağlamaya yatkındır, depolama için önemli ölçüde bellek gerektirir ve eğitim için önemli ölçüde zaman gerektirir [69]-[71]. YSA'lar atık üretimi, ayrıştırma ve yönetim planlamasını optimize etmek için başarıyla uygulanmıştır [72], [73].

2.1.7. Takviyeli Öğrenme (RL)

Takviyeli Öğrenme (RL), atık toplama rotalarını ve kaynak tahsisini optimize etmek için etkili bir araç olarak ortaya çıkmıştır. Bir çalışmada, atık toplama programlarını gerçek zamanlı verilere göre dinamik olarak ayarlamak için RL algoritmaları kullanılmış, bu da daha iyi operasyonel verimlilik ve maliyet tasarrufu sağlamıştır[74]. Bu yaklaşım, RL'nin atık üretim modellerindeki değişikliklere verimli bir şekilde yanıt veren ve daha sürdürülebilir atık yönetimi uygulamalarına yol açan uyarlanabilir sistemler geliştirme yeteneğini göstermektedir.

2.1.8. Genetik Algoritma (GA)

Genetik Algoritmalar (GA'lar), atık toplama rotası planlaması ve kaynak tahsisi gibi karmaşık problemler için en uygun çözümleri belirleyerek atık yönetimi verimliliğini artıran optimizasyon teknikleridir[75]. Evrimsel algoritmaların bir alt kümesi olan GA'lar, karmaşık optimizasyon problemlerini çözmek için seçim, çaprazlama ve mutasyon süreçlerini kullanır [76]. Bu algoritmalar, geniş arama uzaylarında optimum çözümleri belirlemek için güçlü araçlardır [77]. GA'lar güvenilir sonuçlar üretmek için oldukça etkili olmalarına rağmen, verimlilik için dikkatli tasarım gerektirirler ve daha basit problemler için uygun olmayabilirler[78]. Tablo 2'de atık yönetiminde kullanılan farklı YZ teknikleri karşılaştırılmakta, ana işlevleri, güçlü yönleri ve sınırlamaları özetlenmektedir. Bu özet, her bir yöntemin atık sınıflandırma, tahmin ve rota optimizasyonu gibi görevlere nasıl katkıda bulunduğunu göstermeye yardımcı olmaktadır. Atık yönetimi uzmanları, her bir yaklaşımın avantajlarını ve zorluklarını anlayarak, hangi YZ tekniklerinin kendi özel ihtiyaçlarına en uygun olduğu konusunda daha bilinçli kararlar verebilirler.

Tablo 2. Atık Yönetiminde Atık Yönetiminde Yapay Zeka Tekniklerinin Karşılaştırmalı Özeti.

YAPAY ZEKA Teknik	Ana Fonksiyon	Avantajlar	Sınırlamalar
RF	Atık sınıflandırma ve ayrıştırma	Yüksek doğruluk, büyük veri kümelerini işler	Hesaplama açısından yoğun
LR	Atık üretim tahmini, rota optimizasyonu	Yorumlaması kolay, doğrusal ilişkiler için verimli	Doğrusal olmayan senaryolarda düşük performans
SVM	Atık sınıflandırması, tahmini ve tespiti	Güçlü sınıflandırma yeteneği, küçük veri kümeleriyle iyi çalışır	Büyük veri kümeleri için yüksek hesaplama maliyeti
KNN	Atık sınıflandırma ve ayrıştırma	Küçük veri kümeleri için basit ve etkili	Büyük veri kümeleri için hesaplama açısından pahalı
DT	Atık üretimi tahmini, karar verme	Yorumlaması kolay, esnek	Aşırı uyuma eğilimli
ANN	Atık üretim tahmini, ayrıştırma ve planlama	Karmaşık desenleri yüksek doğrulukla işler	Büyük eğitim verileri ve hesaplama gücü gerektirir
RL	Rota optimizasyonu, uyarlanabilir çizelgeleme	Dinamik karar verme, uygun maliyetli	Kapsamlı eğitim verileri gerektirir
GA	Rota optimizasyonu, atık işleme verimliliği	Karmaşık optimizasyon problemleri için etkilidir	Dikkatli parametre ayarı gerektirir

2.2. Atık Toplamada Yapay Zeka

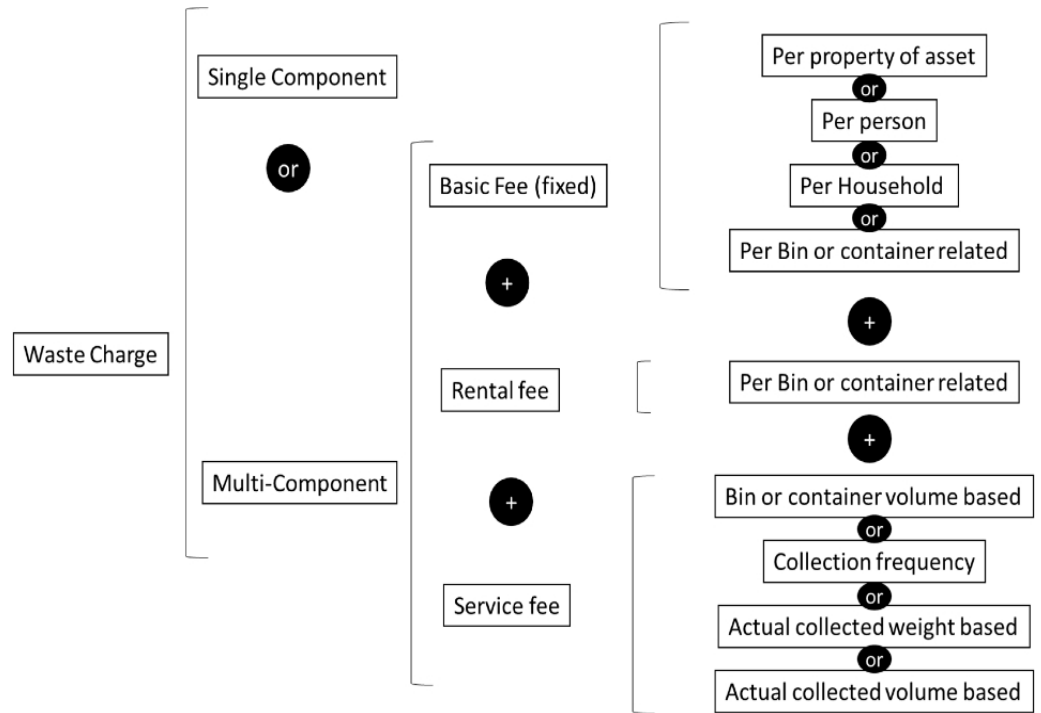
Yapay zeka, daha temiz ve sürdürülebilir bir çevreye katkıda bulunarak atık toplama verimliliğini artırmada giderek daha etkili hale gelmiştir [79]-[82]. Son teknolojik yenilikler, akıllı kutular, akıllı rota planlaması, dinamik zamanlama ve talebe dayalı tahmin modelleri gibi sistemleri dahil ederek geleneksel atık toplama uygulamalarını önemli ölçüde dönüştürmüştür [83].

Yapay zeka destekli çözümler, operasyonel verimliliği artırarak, maliyetleri düşürerek ve çevresel etkileri azaltarak atık toplamada devrim yaratmaktadır[84]. Bu teknolojiler şunları ele almaktadır

otomasyon, tahmine dayalı analitik ve veriye dayalı kararlar kullanarak ölçeklenebilirlik zorlukları [85]. Yapay zeka, kaynak yönetimini optimize ederek atık ayrıştırma, toplama ve geri dönüşümü geliştirir. Rota planlama ve atık sınıflandırma gibi görevlerin otomatikleştirilmesi, operasyonel verimliliği artırır ve ek kaynaklar olmadan daha büyük hacimlerde atığın işlenmesine olanak tanır[86]. Buna ek olarak, yapay zeka tabanlı tahmin modelleri, atık üretim eğilimlerinin tahmin edilmesine yardımcı olarak proaktif planlamayı ve daha verimli kaynak dağıtımını kolaylaştırır. Bu ileri görüşlü yaklaşım, atık yönetim sistemlerinin uyarlanabilir ve sürdürülebilir kalmasını sağlar.

2.2.1. Atığın Kadar Öde (PAYT) Programları

Atığın kadar öde (PAYT) sistemleri, kentsel katı atık akışlarının yönetiminde giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu sistemler, her bir kuruluş (örneğin haneler, işletmeler) tarafından üretilen atığı hesaba katmakta ve buna karşılık gelen ekonomik sorumluluğu tayin etmektedir[87]. "Kirlenen öder" çevreci ilkesini takip eden PAYT sistemleri Avrupa Birliği tarafından güçlü bir şekilde desteklenmektedir [88]. Şekil 2, yalnızca ağırlığa dayalı geleneksel atık ücreti modelini göstermektedir.



Şekil 2. Atık ücreti bileşenleri Olası atık ücreti bileşenleri ([89]'dan uyarlanmıştır).

Yapay zeka, her birim tarafından üretilen atığı izlemek için RFID etiketleri veya sensörleri entegre ederek PAYT sistemlerini geliştirebilir. Bu teknoloji, üretilen gerçek atık miktarına göre doğru faturalandırmaya olanak tanıyarak atık azaltımını ve geri dönüşümün artırılmasını teşvik eder.

2.2.2. Akıllı Çöp Kovası Sistemleri

Akıllı çöp kutusu sistemleri atık toplamayı optimize etmek için popülerlik kazanmıştır[90]. Bu sistemler, çöp kutusu doluluk seviyelerini gerçek zamanlı olarak izlemek için sensörler kullanır ve yapay zeka algoritmaları, toplama rotalarını ve programlarını optimize etmek için verileri analiz eder. Ultrasonik ve ağırlık sensörleri de dahil olmak üzere yeni gelişmeler, atık birikimi ölçümlerinin doğruluğunu artırmıştır[91]. IoT entegrasyonu, akıllı çöp kutularının atık yönetimi yetkilileriyle iletişim kurmasını sağlayarak gerçek zamanlı izleme ve proaktif bakım sağlar[92].

Makine Öğrenimi (ML), dolum seviyesi tahminlerinin doğruluğunu daha da artırarak toplama verimliliğini geliştirir[93]. Ancak bu teknolojinin Endonezya gibi bölgelerde uygulanması zorluklar içermektedir. Birçok kırsal ve yetersiz hizmet alan bölge, akıllı atık sistemlerini desteklemek için istikrarlı internet erişimi ve güvenilir elektrik gibi gerekli altyapıdan yoksundur. Ayrıca, yüksek ön maliyetler ve bu teknolojilere ilişkin sınırlı kamu bilinci, büyük ölçekli benimsemeyi engellemektedir. Bu zorlukların üstesinden gelmek, akıllı çöp kutusu sistemlerinin uzun vadeli başarısını sağlamak için altyapıya, kamu eğitimine ve hükümet ile özel sektörler arasındaki işbirliğine önemli yatırımlar yapılmasını gerektirecektir.

2.2.3. Talep Tahmini

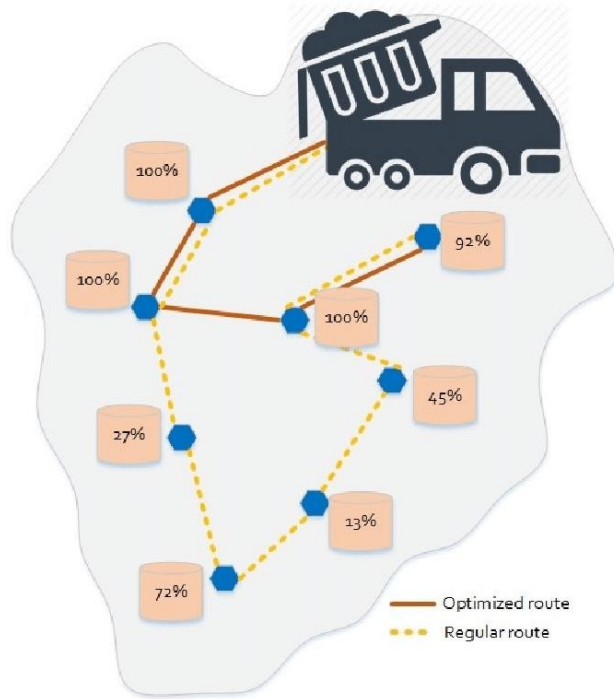
Yapay zeka tabanlı talep tahmin modelleri, farklı bölgelerdeki atık üretim oranlarını tahmin etmek için gereklidir [94], [95]. Son gelişmeler, çeşitli kaynaklardan gelen verileri birleştirmeye ve sofistike makine öğrenimi tekniklerini uygulamaya odaklanmaktadır[96]. Atık yönetimi şirketleri artık gerçek zamanlı atık üretim eğilimlerini izlemek için IoT sensörlerinden, sosyal medyadan ve çevrimiçi platformlardan gelen bilgileri kullanmaktadır[97].

Topluluk teknikleri ve derin öğrenme (DL) gibi makine öğrenimi yöntemleri, nüfus yoğunluğu ve geçmiş atık verileri gibi faktörleri dikkate alarak doğru tahminler üretmeye yardımcı olur[98]-[100]. Doğru tahminler daha iyi kaynak tahsisine, daha iyi operasyonel verimliliğe ve daha proaktif atık yönetimi stratejilerine olanak sağlar. Ancak başarılı bir uygulama için sağlam veri toplama sistemleri, güçlü kurumlar arası işbirliği ve IoT teknolojilerinin sorunsuz entegrasyonu gerekmektedir. Sınırlı internet bağlantısı veya güvenilir olmayan veri erişimi olan uzak bölgelerde gerçek zamanlı tahmin yapmak zor olabilir. Bu engellerin üstesinden gelmek, yapay zeka destekli atık tahmininden tam olarak yararlanmak için gereklidir.

2.2.4. Rota Optimizasyonu

Atık toplama rotalarının optimize edilmesi, seyahat süresini, yakıt tüketimini ve araç emisyonlarını en aza indirmek için kritik öneme sahiptir. Son teknolojik atılımlar, rota verimliliğini artıran yapay zeka destekli optimizasyon algoritmalarını ortaya çıkarmıştır[101]. Bu sistemler, mevcut operasyonel ihtiyaçlara göre rotaları dinamik olarak ayarlamak için GPS ve trafik koşulları gibi gerçek zamanlı verileri kullanır [102].

Derin öğrenme gibi gelişmiş teknikler, trafik modellerini tahmin etme ve rotaları gerçek zamanlı olarak optimize etme yeteneğini geliştirir[103]. Dinamik yeniden yönlendirme, toplama rotalarında anında ayarlamalar yapılmasına olanak tanıyarak operasyonel esnekliği ve değişen koşullara yanıt verebilirliği artırır[104]. Trafik sıkışıklığını ve atık üretim noktalarının dağılımını analiz ederek, yapay zeka güdümlü rota optimizasyonu seyahat süresini ve emisyonları azaltarak daha güvenli ve verimli atık toplamaya katkıda bulunur. Şekil 3'te atık kutusu durumuna göre gerçek zamanlı rota planlamasının bir örneği gösterilmektedir.



Şekil 3. Rota optimizasyonu ve planlama. Rota optimizasyonu ve planlaması. ([105]'den uyarlanmıştır).

2.2.5. Entegrasyon Sistemi

YZ teknolojilerinin atık toplama ve yönetim sistemlerine etkili bir şekilde dahil edilmesi, operasyonel aksaklıkları en aza indirirken performansı optimize etmek için stratejik planlama gerektirir [106], [107]. YZ çözümlerinin mevcut altyapı ile uyumlu olmasını sağlamak çok önemlidir.

sorunsuz bir geçiş için ve verimsizlikleri önlemek için. Ayrıca, yapay zeka tabanlı atık yönetimi doğru ve iyi yapılandırılmış verilere dayanır, bu da başarılı bir uygulama için veri tutarlılığı ve entegrasyonunu çok önemli hale getirir[108].

Atık yönetimi personeli için kapsamlı eğitim, sistem performansını artırır ve teknolojik yeniliği teşvik eder [109]. Kapsamlı bir maliyet-fayda analizi, gelişmiş operasyonel verimlilik ve maliyet dşüşşleri gibi uzun vadeli avantajları ortaya koyarak YZ yatırımlarının gerekçelendirilmesine yardımcı olabilir[110]. Ayrıca, YZ odaklı mlerin ölçeklenebilir ve uyarlanabilir kalmasını sağlamak, atık yönetimi ihtiyaçları geliştikçe hayati önem taşıyacaktır. Devlet kurumları, özel sektör atık yönetimi firmaları ve yerel topluluklar dahil olmak üzere çeşitli paydaşların katılımı, YZ'nin benimsenmesini daha geniş toplumsal hedeflerle uyumlu hale getirmeye yardımcı olur ve kapsayıcı karar vermeyi teşvik eder.

2.3. Atık Ayırıştırma Yapay Zeka

Doğru atık ayırıştırma, etkili atık yönetiminin temel bir yönüdür ve bertaraf ve geri dönüşüm için verimli malzeme kategorizasyonu sağlar [111]-[113]. Yapay zekanın ayıklama süreçlerine entegre edilmesi hız, hassasiyet ve operasyonel verimliliği önemli ölçüde artırmıştır [114], [115]. Aşağıdaki bölümler, yapay zeka destekli ayıklama sistemlerindeki önemli gelişmeleri incelemektedir.

2.3.1. Görüntü Tanıma ve Bilgisayarla Görme

Yapay zeka destekli görüntü tanıma ve bilgisayar görüşü, malzeme tanımlama ve sınıflandırmayı otomatikleştiren atık ayırmada devrim yaratmıştır [116], [117]. Bu teknolojiler, görüntüleri veya video çekimlerini analiz etmek için yapay zeka destekli algoritmalar kullanarak atık bileşiminin kesin olarak tanımlanmasını sağlar[118].

Bu alandaki son atılımlar arasında yüksek çözünürlüklü kameralar, sofistike görüntü işleme teknikleri ve gerçek zamanlı atık tespiti ve sınıflandırması sağlayan DL modelleri yer almaktadır[119]. Konvolüsyonel sinir ağları (CNN'ler) gibi gelişmiş DL mimarileri, karmaşık malzeme özelliklerini tanımlayarak ayıklama doğruluğunu artırmaktadır[120]. Buna ek olarak, konveyör tabanlı ayıklama mekanizmalarına entegre edilen yapay görme sistemleri sürekli ve hızlı atık işlemeye olanak tanıyarak manuel ayıklama ihtiyacını azaltır[121].

2.3.2. Otomatik Robotik Ayıklama Sistemleri

Robot teknolojisinin yapay zeka ile entegre edilmesi, verimliliği ve hassasiyeti önemli ölçüde artıran tam otomatik ayıklama sistemlerine yol açmıştır[122]. Bu robotik çözümler, atık malzemeleri doğru bir şekilde sınıflandırmak ve bileşimlerine göre ayırmak için yapay zeka destekli sensörlerden, yüksek çözünürlüklü kameralardan ve robotik kollardan yararlanmaktadır[123], [124].

Robotik atık ayıklama alanındaki son yenilikler, kavrama mekanizmalarını geliştirmeye, sensör doğruluğunu artırmaya ve yapay zeka algoritmalarını iyileştirmeye odaklanmıştır. Uyarlanabilir tutuculara ve dokunsal sensörlere sahip gelişmiş robotik kollar, farklı şekil, boyut ve dokulara sahip çeşitli malzemeleri manipüle edebilir[125]. YZ güdümlü robotik ayıklama sistemleri, değişen atık bileşimlerine uyum sağlayarak ayıklama performansını iyileştirmek için takviyeli öğrenme tekniklerini de kullanmaktadır. İşbirlikçi robotların (cobot) kullanılmaya başlanması, atık yönetim tesislerinde insan-makine işbirliğini sağlayarak ayıklama verimliliğini daha da artırmaktadır [126].

Bu avantajlara rağmen, iř yerinden edilme ve sosyal eşitlik kaygıları önemini korumaktadır[127], [128]. Atık yönetimi süreçlerinin artan otomasyonu, düşük gelirli çalışanları orantısız bir şekilde etkileyebilir, bu da işgücünün yerinden edilmesi ve çevresel adaletle ilgili etik kaygıları artırabilir[129]. Bu zorlukları azaltmak için, politika yapıcılar ve endüstri liderleri, otomasyonun faydalarını ekonomik ve sosyal hususlarla dengeleyen sorumlu YZ dağıtım stratejileri uygulamalıdır.

2.3.3. Otomatik Ayıklama Makineleri ve Sistemleri

Otomatik atık ayıklama teknolojileri, malzemeleri fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre sınıflandırmak için yapay zeka algoritmaları kullanmaktadır [130]. Bu sistemler, atıkları yüksek hassasiyetle analiz etmek ve sınıflandırmak için yakın kızılötesi (NIR) spektroskopisi, X-ışını floresanı (XRF) ve hiperspektral görüntüleme gibi gelişmiş algılama teknolojilerini entegre etmektedir [131], [132]. Yapay zeka algoritmaları, malzemeleri sınıflandırmak ve verimli bir şekilde uygun kategorilere doğru bir şekilde ayırmak için bu verileri işler.

Otomatik ayıklamadaki son gelişmeler, DL modellerinin ve sinir ağlarının dahil edilmesine yol açarak YZ sistemlerinin daha geniş bir malzeme yelpazesini daha yüksek doğrulukla işlemesini ve ayırt etmesini sağlamıştır [133]. İyi eğitilmiş YZ modelleri plastikler, metaller, cam, kağıt ve organik atıklar arasında ayırım yapabilir, bu da daha verimli ayıklama ve daha az kirlenme sağlar [134].

YZ güdümlü ayıklama çözümleri geri dönüşüm verimliliğini ve sürdürülebilirliği artırırken, karışık atık akışları, kirlenme ve ölçeklenebilirlik gibi zorluklar önemini korumaktadır[135]. Bu sorunların ele alınması, atık ayrıştırma YZ entegrasyonunu optimize etmek için araştırma, teknolojik ilerlemeler ve işgücü eğitimine daha fazla yatırım yapılmasını gerektirecektir.

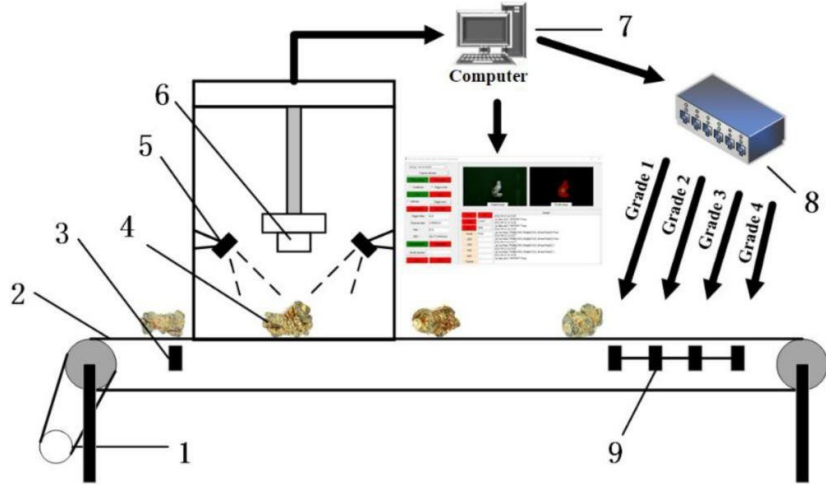
2.3.4. Sensör Tabanlı Ayıklama Sistemleri

Yapay zeka destekli sensör güdümlü ayıklama sistemleri, hassasiyeti ve operasyonel verimliliği önemli ölçüde artırarak atık sınıflandırmasında devrim yaratmıştır. Bu sistemler, renk, boyut ve malzeme yoğunluğu gibi fiziksel özellikleri analiz etmek için yakın kızılötesi (NIR), X-ışını iletimi ve optik sensörler gibi çeşitli sensörler kullanarak hassas atık sınıflandırması sağlamaktadır [136].

YZ algoritmaları bu sensörlerden gelen gerçek zamanlı verileri işleyerek plastiklerin, metallerin, kağıtların, camların ve diğer malzemelerin doğru ve verimli bir şekilde ayrıştırılmasını sağlar. Yapay zeka destekli ayıklama teknolojileri, ML sınıflandırma yöntemlerini sürekli olarak iyileştirerek doğruluğu artırmakta ve zaman içinde hataları en aza indirmektedir [137].

Yapay zeka, geri dönüşüm akışlarındaki kirliliği azaltarak ve malzeme geri kazanımını optimize ederek ayıklama verimliliğini artırır ve konveyör bantlar ve robot kollar dahil olmak üzere atık yönetimi ekipmanlarının performansını geliştirir [138], [139]. Sensör tabanlı ayıklamadaki son yenilikler, daha ayrıntılı malzeme analizi sağlamak için optik, kızılötesi ve elektromanyetik sensörler gibi çoklu algılama modalitelerini entegre ederek karmaşık atık ortamlarında bile yüksek ayıklama doğruluğu sağlar [140].

Yapay zeka odaklı ayıklama çözümlerinin sürekli gelişimi hız, hassasiyet ve uyarlanabilirliği geliştirmeye odaklanmaktadır. Modern atık ayıklama teknolojileri, gelişmiş sensörler, bilgisayar bilimi, robotik ve makine öğreniminin bir kombinasyonundan yararlanarak atık kirliliğinin azaltılmasında ve geri dönüşüm sonuçlarının iyileştirilmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır[141]. Bu yenilikler ilerledikçe, döngüsel ekonomi girişimlerine ve daha geniş kapsamlı sürdürülebilir atık yönetimi hedeflerine önemli ölçüde katkıda bulunacaklardır [142], [143]. Şekil 4, Panax notoginseng için gerçek zamanlı bir ayıklama robotu sistemini göstermekte ve sistemin temel bileşenlerini ortaya koymaktadır.



Şekil 4. Panax notoginseng gerçek zamanlı ayıklama robot sistemi ([144]'ten uyarlanmıştır). Not: 1-tahrik sistemi; 2-konveyör bant; 3-fotoelektrik sensör; 4-Panax notoginseng kökleri; 5-bar ışık kaynağı; 6-endüstriyel kamera; 7-bilgisayar; 8-düşük seviye kontrolör; 9-jet ağzı.

2.4. Atık Geri Dönüşümünde Yapay Zeka

Yapay zeka, atık işlemenin çeşitli aşamalarında verimliliği, hassasiyeti ve otomasyonu geliştirerek geri dönüşüm endüstrisini önemli ölçüde dönüştürmektedir [145]. Malzemelerin tanımlanması ve kategorize edilmesinden prosedürlerin optimize edilmesine ve kalite kontrolünün sağlanmasına kadar, yapay zeka odaklı yenilikler geri dönüşüm performansını artırmakta ve sürdürülebilirlik girişimlerine katkıda bulunmaktadır.

2.4.1. Akıllı Malzeme Tanımlama ve Ayıklama

Atık malzemelerin doğru tanımlanması ve uygun şekilde ayrıştırılması, etkili bir geri dönüşüm sistemi için kritik öneme sahiptir [146], [147]. Makine öğrenimi, bilgisayarla görme ve spektroskopik teknikler dahil olmak üzere gelişmiş yapay zeka teknolojileri, çeşitli atık türleri için yüksek hassasiyetli sınıflandırma sağlar. Bu alandaki kayda değer bir gelişme, yapay zekanın yüksek çözünürlüklü kameralarla birleştirilmesidir,

hiperspektral görüntüleme ve sofistike sensörler, karmaşık ve karışık atık akışlarının tespitini ve ayrılmasını önemli ölçüde iyileştirir.

DL modelleri, özellikle CNN'ler, görsel özellikleri analiz etmek ve farklı malzemeleri olağanüstü doğrulukla sınıflandırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır [148]-[150]. Yapay zeka tabanlı ayıklama tekniklerini entegre ederek, geri dönüşüm tesisleri süreçleri kolaylaştırabilir, malzeme saflığını artırabilir ve genel operasyonel etkinliği artırabilir[151].

2.4.2. Atık Optimizasyon Modelleri

Geri dönüşüm sürecini iyileştirmek, kaynak geri kazanımını iyileştirmek ve operasyonel maliyetleri en aza indirmek için her aşamayı optimize etmeyi gerektirir. Yapay zeka, tahmine dayalı analitik ve veriye dayalı karar verme süreçlerinden [152] yararlanmada ve ekipman performansı, enerji tüketimi ve malzeme hareketi gibi gerçek zamanlı operasyonel verileri sürekli olarak analiz etmede kilit öneme sahiptir. Yapay zeka sistemleri verimsizlikleri belirleyebilir ve temel parametreleri optimize edebilir. Bu modeller geçmiş ve canlı verilerden öğrenerek uyarlanabilir süreç optimizasyonu ve gelişmiş tahmin doğruluğu sağlar[153]. Sıcaklık, basınç ve işleme süresindeki ayarlamalar daha yüksek geri kazanım oranlarına, iyileştirilmiş malzeme kalitesine ve geri dönüşüm operasyonlarında daha fazla sürdürülebilirliğe katkıda bulunur.

2.5. Atık İzlemede Yapay Zeka

Yapay zeka, farklı geri dönüşüm ve atık yönetimi aşamalarında verimliliği, hassasiyeti ve otomasyonu önemli ölçüde artırarak atık izlemede giderek daha hayati hale gelmektedir [145]. Yapay zeka odaklı teknolojilerden yararlanarak atık izleme, akıllı malzeme sınıflandırması, gerçek zamanlı izleme ve gelişmiş karar verme süreçlerini içerecek şekilde gelişmiştir ve bunların tümü sürdürülebilirlik hedeflerine katkıda bulunmaktadır.

2.5.1. Tahmine Dayalı Analitik

Doğru malzeme sınıflandırması ve ayrıştırması, verimli atık izleme ve geri dönüşüm için esastır[146], [147]. Gelişmiş makine öğrenimi modelleri, görüntü tanıma ve spektral analiz dahil olmak üzere yapay zeka destekli çözümler, atık malzemelerin hassas bir şekilde tanımlanmasını ve kategorize edilmesini sağlar. Bu alandaki önemli bir gelişme, yapay zekanın yüksek çözünürlüklü görüntüleme, hiperspektral algılama ve son teknoloji sensörlerle entegrasyonunu içermekte ve karmaşık ve heterojen atık bileşimlerinin tespitini önemli ölçüde geliştirmektedir.

DL mimarileri, özellikle CNN'ler, görsel desenleri ana- liz etme ve materyalleri doğru bir şekilde kategorize etme konusunda dikkate değer bir yeterlilik göstermiştir [148]-[150]. Geri dönüşüm tesisleri, atık ayrıştırma sürecine yapay zeka destekli tahmine dayalı analitiği dahil ederek üretim hızlarını artırabilir, ayrıştırılan malzemelerin kalitesini iyileştirebilir ve genel operasyonel verimliliği artırabilir [151].

2.5.2. Gerçek Zamanlı Atık İzleme Sistemleri

Atık izleme verimliliğinin artırılması, operasyonel giderleri azaltırken kaynak geri kazanımını en üst düzeye çıkarmak için her bir süreç adımının optimize edilmesini içerir. Yapay zeka, bilinçli karar vermeyi desteklemek için tahmine dayalı modelleme ve veri analizini kullanarak bu çabanın ayrılmaz bir parçasıdır[152].

Yapay zeka destekli sistemler, verimsizlikleri tespit etmek ve düzeltici önlemler önermek için ekipman işlevselliği, enerji tüketim seviyeleri ve malzeme dağıtımı gibi gerçek zamanlı operasyonel ölçümleri sürekli olarak değerlendirir. Bu modeller, geçmiş ve canlı verileri kullanarak operasyonel süreçleri dinamik olarak iyileştirir, bu da uyarlanabilir optimizasyon ve gelişmiş tahmin doğruluğu ile sonuçlanır[153]. Sıcaklık, basınç ve üretim süresi gibi kritik parametrelerdeki ayarlamalar kaynak geri kazanım oranlarını artırır, malzeme kalitesini yükseltir ve sürdürülebilir atık yönetimi uygulamalarını teşvik eder.

2.5.3. Veri Odaklı Karar Verme (DDDM)

Yapay zeka odaklı analitik, atık izleme altyapısından toplanan geniş veri kümelerini işleyerek karar verme yeteneklerini önemli ölçüde geliştirmektedir[154]. Bu veri analizi, atık üretim eğilimleri, geri dönüşüm verimliliği ve maliyet faktörleri hakkında önemli içgörüler sağlayarak paydaşların iyi bilgilendirilmiş politikalar oluşturmaya, kaynakları stratejik olarak tahsis etmesine ve sağlam yatırım kararları almasına olanak tanır[155].

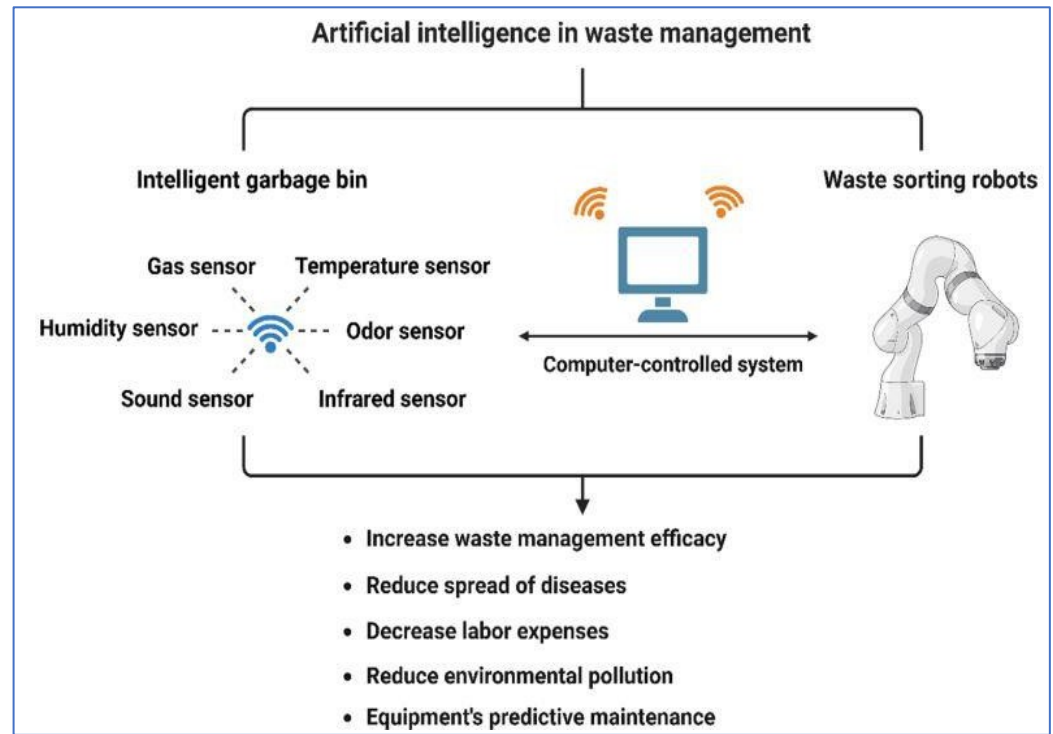
Yapay zeka, geleneksel yöntemlerle görülemeyen karmaşık kalıpları ve ortaya çıkan eğilimleri belirleyerek daha etkili ve sürdürülebilir atık yönetimi yaklaşımlarını teşvik etmektedir [156]. Veri merkezli karar verme sürecine doğru yaşanan bu değişim, atık yönetimi stratejilerini daha geniş çevresel hedeflerle uyumlu hale getirirken operasyonel verimliliği de artırmaktadır.

2.5.4. IoT ve Sensör Entegrasyonu

YZ'nin IoT ve sensör ağları ile entegre edilmesi, gerçek zamanlı veri toplama ve analizini kolaylaştırarak atık izlemeyi dönüştürmektedir. IoT özellikli sensörler dolum seviyeleri, sıcaklık dalgalanmaları ve hava kalitesi gibi atıkla ilgili faktörleri sürekli olarak takip ederek bu bilgileri YZ tabanlı değerlendirme ve yorumlama için merkezi platformlara iletmektedir [157], [158]. Bu sürekli veri akışı, ortaya çıkan atık yönetimi sorunlarına hızlı yanıt verilmesini sağlayarak genel sistem verimliliğini artırır [159]. YZ ve IoT'nin birleşimi, veri alışverişini daha da kolaylaştırarak farklı atık izleme şirketleri arasında sorunsuz iletişim sağlar.

bileşenleri ve operasyonel etkinliğin iyileştirilmesi[160].

Yapay zeka destekli atık izleme alanındaki son gelişmeler, sürdürülebilir atık yönetimi çözümlerini desteklemek için sensör doğruluğunu iyileştirmeye, tahmine dayalı analitik yeteneklerini genişletmeye ve IoT tabanlı otomasyondan yararlanmaya odaklanmaktadır[161]. Bu ilerlemelerin sağlanması, teknoloji geliştiricileri, araştırmacılar ve atık yönetimi kuruluşları arasında güçlü bir işbirliği gerektirmektedir [162]. Şekil 5'te katı atık yönetimine yönelik geleneksel bir kablosuz sensör ağı, kapsamlı ve hassas izlemeyi kolaylaştırmak için sıcaklık ve nem sensörlerini kullanmaktadır.



Şekil 5. Çöp kutusu ve atık robotik ayıklamada yapay zeka kullanımları [163].

Yapay zekanın atık yönetimine entegre edilmesi; verimliliği, doğruluğu ve otomasyonu artırarak atık ayırma, geri dönüşüm ve izleme süreçlerini önemli ölçüde geliştirmiştir. Görüntü tanıma, robotik ayıklama, tahmine dayalı analitik ve IoT tabanlı izleme gibi yapay zeka teknolojileri, malzeme sınıflandırmasını optimize etmiş, geri dönüşüm işlemlerini kolaylaştırmış ve gerçek zamanlı atık takibini mümkün kılmıştır. Bu gelişmeler, kirliliği azaltarak, kaynak geri kazanımını artırarak ve veriye dayalı karar vermeyi destekleyerek daha sürdürülebilir bir atık yönetim sistemine katkıda bulunmaktadır. Bununla birlikte, karışık atık akışlarının işlenmesi, ölçeklenebilirliğin sağlanması ve işgücünün yer değiştirmesinin ele alınması gibi zorluklar kritik önemini korumaktadır. Tablo 3, atık ayrıştırma, geri dönüşüm ve izlemede YZ uygulamalarının iyileştirilmesine yönelik temel önerileri kapsamlı bir şekilde özetlemektedir. Bu öneriler arasında karmaşık atık akışları için YZ algoritmalarının geliştirilmesi, gelişmiş algılama yöntemlerinin entegre edilmesi, YZ güdümlü spektroskopik tekniklere yatırım yapılması ve atık izleme sistemlerinin doğruluğunun artırılması yer almaktadır. Yeniden beceri kazandırma programları aracılığıyla işgücü yetersizliğinin ele alınması ve etik YZ dağıtımı için düzenleyici çerçevelerin sağlanması, teknolojik ilerlemeleri sosyal ve çevresel sorumluluklarla dengelemek için gereklidir.

Tablo 3. Atık Yönetiminde Atık Yönetiminde Yapay Zeka Uygulamalarının Geliştirilmesi için Önerilerin Özeti.

Alan	Tavsiyeler
Atık Ayırıştırma	- Karmaşık ve karışık atık akışlarını daha etkili bir şekilde ele almak için yapay zeka algoritmalarını geliştirin. - Ayıklama doğruluğunu artırmak için çoklu algılama modalitelerini (optik, kızılötesi, elektromanyetik) entegre edin. - Yeniden beceri kazandırma programları ve işe geçiş stratejileri aracılığıyla işgücünün yerinden edilmesi endişelerini ele alın. - Atık ayırıştırmada etik yapay zeka kullanımı için düzenleyici çerçevelerin oluşturulması.
Atık Geri Dönüşümü	- Karmaşık atık bileşimlerini daha iyi sınıflandırmak ve işlemek için uyarlanabilir yapay zeka modelleri geliştirin. - Malzeme ayrımını iyileştirmek ve kontaminasyonu azaltmak için yapay zeka destekli spektroskopik tekniklere (ör. hiperspektral görüntüleme) yatırım yapın. - Kaynak geri kazanımı ve geri dönüşüm verimliliğini artırmak için yapay zeka odaklı tahmine dayalı analitik uygulayın. - Ekonomik fizibiliteyi ve döngüsel ekonomi girişimleriyle uyumu sağlamak için politika yapımcılarla sektör işbirliğini teşvik etmek.
Atık İzleme	- Yapay zeka destekli atık izleme sistemlerinin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırın. - Sorunsuz birlikte çalışabilirlik sağlamak için yapay zeka ve IoT entegrasyon protokollerini standartlaştırın. - Uygun maliyetli yapay zeka odaklı atık izleme çözümlerine yatırımı artırın. - Atık yönetiminde veriye dayalı politika formülasyonunu desteklemek için yapay zekaya dayalı karar verme modellerini genişletmek.

3. Atık Yönetiminde Yapay Zekanın Karşılaştığı Zorluklar ve Sınırlamalar

YZ'nin atık yönetimindeki dönüştürücü potansiyeline rağmen, etkili bir şekilde uygulanmasını sağlamak için çeşitli zorlukların ele alınması gerekmektedir [164]-[167]. Bu zorluklar arasında veri güvenilirliği, gizlilik ve güvenlik riskleri, finansal kısıtlamalar ve altyapı sınırlamaları ile ilgili konular yer almaktadır. Tablo 4, YZ güdümlü atık yönetim sistemleri için temel engelleri ve potansiyel çözümleri özetlemektedir.

3.1. Verilerin Erişilebilirliği ve Güvenilirliği

Atık yönetimi için YZ kullanımındaki en büyük engellerden biri, mevcut verilerin tutarsızlığı ve düşük kalitesidir [168], [169]. YZ modelleri, kesin tahminler üretmek için kapsamlı ve çeşitli veri kümelerine bağlıdır; ancak atık yönetimi verileri genellikle eksiktir, dağınıktır veya standartizasyondan yoksundur [170], [171]. Ayrıca, paydaşlar arasında sorunsuz veri entegrasyonunun olmaması, etkili YZ destekli çözümlerin geliştirilmesini ve uygulanmasını zorlaştırmaktadır [172].

Yapay zekanın bu sektördeki başarısı için veri doğruluğu ve tutarlılığı çok önemlidir. Bu, veri toplama metodolojilerinin iyileştirilmesi, standartlaştırılmış veri formatlarının oluşturulması ve izleme ve gerçek zamanlı veri edinimini geliştirmek için IoT teknolojilerinin entegre edilmesiyle sağlanabilir.

3.2. Gizlilik Endişeleri

Atık yönetimindeki yapay zeka uygulamaları, atık bertaraf modelleri ve kullanıcıya özgü davranışlar dahil olmak üzere hassas bilgilerin işlenmesini içerir ve bu da gizlilik ve güvenlik endişelerini artırır [173], [174]. Bu verilerin korunması, kamu güveninin sürdürülmesi ve düzenleyici standartlara uygunluğun sağlanması için çok önemlidir [175].

Bu riskleri azaltmak için veri anonimleştirme ve şifreleme gibi gizliliği koruyan yöntemler giderek daha fazla benimsenmektedir. Ancak, veri sahipliğine ilişkin endişeler ve potansiyel siber tehditler daha sıkı güvenlik önlemlerine olan ihtiyacı vurgulamaktadır. Etkili çözümler arasında sağlam şifreleme protokollerinin, kontrollü erişim mekanizmalarının ve iyi tanımlanmış veri yönetim çerçevelerinin uygulanması yer almaktadır [176]. Ayrıca, yapay zeka odaklı atık yönetim sistemlerindeki IoT cihazları, yeterince korunmadığı takdirde operasyonları aksatabilecek siber güvenlik tehditlerine karşı hassas olmaya devam etmektedir.

3.3. Finansal ve Altyapı Gereksinimleri

Atık yönetiminde yapay zekanın kullanılması, özel yazılım, donanım ve destekleyici altyapı için önemli başlangıç yatırımları gerektirmektedir. Ana zorluklardan biri, maliyet etkinliğini ve önceden var olan atık yönetim sistemleriyle uyumluluğu sağlamaktır [177].

YZ çözümlerini daha erişilebilir kılmak için, mevcut altyapılarla sorunsuz bir şekilde entegre olan uygun maliyetli teknolojiler geliştirmeye yönelik artan bir ihtiyaç vardır. Bulut tabanlı ve uç bilişim çözümleri, YZ uygulamasına ölçeklenebilir bir yaklaşım sunarak hesaplama maliyetlerini düşürmekte ve işlem verimliliğini artırmaktadır[178], [179]. Ayrıca, Kuantum Yapay Zeka (QAI) gibi yeni gelişmeler, yüksek boyutlu karmaşıklıkların üstesinden gelerek proje yönetiminde devrim niteliğinde faydalar sağlamaktadır. Bununla birlikte, daha geniş çapta benimsenmesi için kübit kararlılığı ve altyapı maliyetleri gibi zorlukların çözülmesi gerekmektedir[180].

Bununla birlikte, bazı bölgeler, YZ ve IoT tabanlı atık yönetimi çözümlerinin geniş çapta benimsenmesini kısıtlayan güvenilir olmayan internet bağlantısı gibi yetersiz dijital altyapı ile mücadele etmektedir. Küçük ve orta ölçekli işletmeler (KOBİ'ler) için, donanım, yazılım ve altyapı dahil olmak üzere YZ destekli teknolojileri edinmenin mali yükü, yaygın benimsemenin önünde ek bir engel oluşturmaktadır[181].

Tablo 4. Atık yönetimde yapay zekanın zorluklarının ve sınırlamalarının özetlenmesi.

Zorluklar	Açıklama	Önemli Hususlar
Verilerin Erişilebilirliği ve Güvenilirliği	Yapay zeka büyük, yüksek kaliteli veri setleri gerektirir, ancak atık yönetimi verileri genellikle tutarsızdır, dağınıktır veya standardizasyondan yoksundur.	Veri toplamının iyileştirilmesi, formatların standartlaştırılması ve IoT teknolojilerinin dahil edilmesi veri güvenilirliğini artırabilir.
Gizlilik Endişeleri	Yapay zeka, atık üretme alışkanlıkları gibi hassas verilere dayanıyor ve bu da gizlilik ve güvenlik risklerini artırıyor.	Veri anonimleştirme, şifreleme ve güçlü yönetim politikaları uygulamak, ihlalleri önlemek ve uyumluluğu sağlamak için çok önemlidir.
Finansal ve Altyapı Gereksinimleri	Yapay zeka donanımı, yazılımı ve altyapısına yapılan yüksek ilk yatırımlar, özellikle KOBİ'ler için zorluk teşkil etmektedir.	Uygun maliyetli yapay zeka çözümleri geliştirmek, bulut ve uç bilişimden yararlanmak ve yaygın dijital altyapı sağlamak çok önemlidir.
Ahlaki ve Etik Çıkarımlar	Yapay zeka algoritmaları, karar verme süreçlerinde etik kaygılara yol açan önyargılara neden olabilir.	Etik yönergeler ve çerçeveler aracılığıyla algoritma şeffaflığı, adaleti ve kapsayıcılığının sağlanması önyargıları azaltabilir ve güveni artırabilir.

3.4. Ahlaki ve Etik Çıkarımlar

YZ'nin atık yönetimine entegre edilmesi, özellikle YZ algoritmalarına gömülü potansiyel önyargılarla ilgili önemli etik ve ahlaki kaygıları beraberinde getirmektedir[182]. YZ güdümlü sistemlerin adil, kapsayıcı ve eşitlikçi bir şekilde çalışmasını sağlamak, iyi tanımlanmış etik çerçevelerin ve kılavuzların geliştirilmesini gerektirir[183].

YZ modellerinin şeffaflığını ve yorumlanabilirliğini artırmak, paydaşların önyargıları tanımasına ve azaltmasına yardımcı olabilir, böylece karar verme süreçleri boyunca etik standartları koruyabilir. Sağlam etik ilkelerin oluşturulması, ayrımcılığı önler ve yapay zeka destekli atık yönetimi çözümlerinde şeffaflık sağlar.

Ardından, YZ ve IoT arasındaki sinerjiyi güçlendirmek, ML ve DL metodolojilerini iyileştirmek ve kilit paydaşlar arasında artan işbirliğini teşvik etmek için önemli fırsatlar mevcuttur [184], [185]. YZ güdümlü platformlar, güvenli veri paylaşım mekanizmaları sağlayabilir, gizlilik düzenlemelerine bağlı kalırken teknolojik gelişmeleri teşvik edebilir [186], [187]. Ayrıca, kapsamlı politikaların ve düzenleyici önlemlerin oluşturulması, özellikle veri güvenliği, gizlilik ve etik hesap verebilirlik ile ilgili olarak, YZ'nin atık yönetiminde sorumlu ve sürdürülebilir bir şekilde uygulanmasını kolaylaştırmak için çok önemli olacaktır [188].

4. Yapay Zeka ile Geliştirilmiş Atık Yönetimi için Gelecek Yönelimler ve Fırsatlar

Yapay zekanın atık yönetimine entegre edilmesi, verimliliği, sürdürülebilirliği ve kaynak kullanımını artırmak için önemli fırsatlar sunmaktadır. Yapay zeka gelişmeye devam ettikçe, Endonezya'nın atık yönetimi sektöründeki kalıcı zorlukları ele almak için yenilikçi yaklaşımlar ortaya çıkmaktadır.

Yapay zeka ve IoT'nin birleşimi, eksiklikleri gidererek ve atık toplama, işleme ve bertarafı optimize ederek dönüştürücü çözümler sunmaktadır [184], [185]. Sensörlü IoT özellikli akıllı kutular, atık bertaraf eğilimleri hakkında gerçek zamanlı veriler üretir ve bu veriler yapay zeka destekli

analitiği karar verme sürecini iyileştirebilir. Tahmine dayalı modeller, atık oluşum modellerinin tahmin edilmesine yardımcı olarak belediyelerin toplama programlarını iyileştirmesine, kaynak konumunu optimize etmesine ve çevresel etkiyi azaltırken operasyonel maliyetleri en aza indirmesine olanak tanır [189]. Ek olarak, makine öğrenimi odaklı otomasyon, malzemeleri doğru bir şekilde tanımlamak ve kategorize etmek için gelişmiş görüntü tanıma teknolojilerinden yararlanarak atık ayırmayı geliştirir, böylece geri dönüşüm verimliliğini artırır ve kirlenmeyi azaltır [190].

IoT aracılığıyla gerçek zamanlı izleme, önemli performans bilgileri sağlayarak atık yönetiminde daha fazla şeffaflık sağlar. Bu sayede devlet kurumları, politika yapımcılar ve yerel topluluklar sürdürülebilirlik alanındaki ilerlemeyi takip edebilir ve atık işleme verimliliğini artırabilir. Dolum seviyeleri hakkında veri ileten yapay zeka destekli akıllı kutular, toplama rotalarının optimize edilmesine, gereksiz alımların azaltılmasına ve ulaşımdan kaynaklanan emisyonların düşürülmesine yardımcı olur. Yapay zeka destekli mobil uygulamalar, toplama hatırlatıcıları göndererek ve teşvik dayalı programlar aracılığıyla geri dönüşüm girişimlerini teşvik ederek halkın katılımını desteklemektedir.

Makine öğrenimi ve DL, Hindistan'da atık yönetimi çözümlerinin geliştirilmesinde giderek daha önemli hale gelmektedir. Karar ağaçları ve destek vektör makineleri gibi sofistike makine öğrenimi algoritmaları atık sınıflandırma doğruluğunu artırarak geri dönüştürülebilir malzemelerdeki kirliliği azaltmış ve ayıklama süreçlerini iyileştirmiştir. CNN'ler ve tekrarlayan sinir ağları (RNN'ler) gibi DL teknikleri, görüntü tabanlı analiz yoluyla atık tanımlama ve sınıflandırmayı geliştirmektedir [191], [192]. Bu otomatik sistemler, atık işleme tesislerinde verimliliği artırırken el emeğine olan bağımlılığı azaltır. Ayrıca, makine öğrenimi tabanlı tahmin modelleri, gelecekteki eğilimleri tahmin etmek için geçmiş atık üretim verilerini analiz eder[193]. Bu, belediyelerin atık toplama stratejilerini optimize etmelerine, kaynakları etkin bir şekilde tahsis etmelerine ve operasyonel verimliliği artırmalarına olanak tanır. Atık akışlarının giderek daha karmaşık hale gelmesiyle birlikte, yapay zeka modellerinin tahminlerini uyarılma ve iyileştirme yeteneği, etkili atık yönetimi ve sürdürülebilirlik girişimlerinin sağlanmasında çok önemli olacaktır.

Paydaşlar arasındaki işbirliği, Endonezya'nın atık yönetimi sektöründeki yapay zeka benimseme zorluklarının üstesinden gelmek için hayati önem taşımaktadır. Veri tutarsızlıkları, sistem uyumsuzlukları ve teknolojik parçalanma, devlet kurumları, endüstriler ve araştırmacılar arasında sorunsuz bilgi alışverişini engellemektedir [186]. Buna ek olarak, veri gizliliği, siber güvenlik ve fikri mülkiyet haklarına ilişkin endişeler genellikle kritik bilgilerin paylaşılmasını engellemektedir[194]. YZ güdümlü platformlar, güvenli ve düzenlenmiş veri paylaşım çerçeveleri sağlayarak, işbirliğini teşvik ederek ve teknolojik ilerlemeleri hızlandırarak bu engelleri ortadan kaldıracaktır. Açık kaynaklı girişimler ve dijital bilgi paylaşım platformları, endüstri oyuncularının Endonezya'nın benzersiz atık yönetimi zorlukları için özelleştirilmiş YZ araçlarını birlikte geliştirmelerine olanak tanır [186]. Atık yönetimi firmaları, teknoloji geliştiricileri ve politika yapımcılar arasındaki ortaklıkların güçlendirilmesi, yerel altyapı ve sosyo-eko- nomik koşullara uyarlanmış YZ'nin benimsenmesini kolaylaştıracak, şeffaflığı teşvik edecek ve YZ odaklı atık yönetimi çözümlerine kamu güvenini artıracaktır[39].

Doğal dil işleme (NLP) gibi yapay zeka ile ilgili teknolojilerdeki gelişmeler, atıkla ilgili büyük hacimli verileri analiz etmek için yeni yetenekler sunmaktadır. Bu yenilikler atık üretim eğilimlerini, sürdürülebilirlik modellerini ve politika etkilerini belirleyerek karar alma süreçlerini desteklemektedir. Yapay zeka destekli robotlar da malzeme ayrıştırma hızı ve hassasiyeti artırarak atık ayrıştırma ve geri dönüşüm süreçlerini dönüştürmektedir[195]. Ayrıca, atık taşıma lojistiğini iyileştirmek, maliyetleri düşürmek ve çevresel zararı en aza indirmek için optimizasyon algoritmaları geliştirilmektedir.

Bu teknolojik gelişmelere rağmen, atık yönetiminde YZ'nin başarılı bir şekilde uygulanmasını sağlamak için etik, mevzuata uygunluk ve teknik fizibilite zorlukları ele alınmalıdır. Veri gizliliğinin korunması, YZ odaklı karar verme şeffaflığı ve otomatik sistem önyargılarının azaltılması temel kaygılardır. Politika yapımcılar, atık yönetiminde YZ uygulamalarını yöneten düzenlemeleri proaktif olarak geliştirmeli, veri güvenliği standartları oluşturmalı ve sistemin birlikte çalışabilirliğini artırmak için sektörler arası işbirliğini teşvik etmelidir[196].

Açık düzenleyici çerçevelerin ve endüstri standartlarının oluşturulması, YZ'nin atık yönetiminde sorumlu ve etik bir şekilde kullanılması için çok önemlidir. Politikalar, önyargılı karar verme veya bireysel hakların ihlali gibi istenmeyen riskleri önlemek için veri koruma, adalet, şeffaflık ve hesap verebilirlik gibi kritik konuları ele almalıdır. Endonezyalı politika yapımcılar, atık yönetim sistemleri arasında veri paylaşımı ve birlikte çalışabilirliği sağlarken yapay zekanın benimsenmesini teşvik eden düzenleyici kılavuzlar geliştirmelidir. Standartlaştırılmış çerçeveler, operasyonel verimliliği artıracak ve devlet kurumları, teknoloji geliştiricileri ve araştırmacılar dahil olmak üzere paydaş işbirliğini teşvik edecektir.

Ayrıca, YZ odaklı atık yönetimi girişimleri sürdürülebilirlik ve sosyal eşitlik hedefleriyle uyumlu olmalıdır [107]. Bu, YZ teknolojilerinin çevresel etkilerinin değerlendirilmesini ve YZ inovasyonlarının faydalarının atık yönetimi zorluklarından orantısız şekilde etkilenen yetersiz hizmet alan topluluklara ulaşmasını sağlamayı içerir. Sektör uzmanları, atık yönetimi işletmeleri ve toplum temsilcilerinin katılımı, politika yapıcılarının kamu ve çevre çıkarlarını korurken yeniliği teşvik eden dengeli düzenlemeler geliştirmelerine yardımcı olacaktır [58]. Sağlam bir düzenleyici çerçeve, yapay zeka entegrasyonunun Endonezya'nın daha geniş sürdürülebilirlik hedeflerini desteklemesini sağlayacak ve daha verimli, şeffaf ve adil bir atık yönetim sistemine yol açacaktır. Tablo 5, YZ'yi Endonezya'nın atık yönetimi sektörüne entegre etmek için gelecekteki başlıca yönleri özetlemektedir. Akıllı atık toplama, otomatik ayrıştırma, politika odaklı karar verme, veri paylaşımı, gelişmiş yapay zeka teknolojileri ve etik hususlardaki fırsatları vurgulamaktadır. Bu gelişmeler, sorumlu YZ dağıtımını sağlarken verimliliği, sürdürülebilirliği ve işbirliğini geliştirmeyi amaçlamaktadır.

Tablo 5. Endonezya'da Endonezya'da Yapay Zeka Destekli Atık Yönetimi için Gelecekteki Temel Yönelimler.

Odak Alan	Geleceğin Temel Yönelimleri
Akıllı Atık Toplama	- Atık toplama programlarını optimize etmek ve maliyetleri azaltmak için yapay zeka destekli tahmin modellerini kullanın. - Atık seviyelerini takip etmek ve toplama rotalarını optimize etmek için IoT özellikli akıllı kutular uygulayın. - Gereksiz atık taşımacılığını en aza indirerek emisyonları azaltın.
Otomatik Atık Ayrıştırma	- Doğru atık sınıflandırması için yapay zeka destekli görüntü tanıma geliştirin. - Sıralama verimliliğini artırmak için DL modellerini, örneğin CNN'leri kullanın. - Geri dönüşüm oranlarını artırmak için geri dönüştürülebilir malzemelerdeki kirliliği azaltın.
Yapay Zeka Odaklı Politika ve Karar Alma	- Atık eğilimlerini belirlemek ve sürdürülebilirlik politikalarını iyileştirmek için yapay zeka analitiğinden yararlanın. - Gerçek zamanlı izleme yoluyla atık yönetiminde şeffaflığın artırılması. - Kaynak tahsisi için yapay zeka tabanlı karar destek sistemleri uygulayın.
Veri Paylaşımı ve İşbirliği	- Paydaşlar arasında veri alışverişini kolaylaştırmak için güvenli yapay zeka platformları geliştirin. - Endonezya'nın atık yönetimi zorluklarına göre uyarlanmış açık kaynaklı yapay zeka araçlarının teşvik edilmesi. - Hükümet, sanayi ve teknoloji geliştiriciler arasındaki ortaklıkların güçlendirilmesi.
Gelişmiş Yapay Zeka Teknolojileri	- Atıkla ilgili politikaları ve eğilimleri analiz etmek için NLP uygulayın. - Daha hızlı ve daha verimli malzeme ayrıştırma için yapay zeka destekli robot teknolojilerini kullanın. - Yapay zeka tabanlı rota planlaması kullanarak atık taşıma lojistiğini optimize edin.
Etik ve Düzenleyici Hususlar	- Atık yönetiminde yapay zeka kullanımı için net yönergeler oluşturun. - Yapay zeka odaklı kararlarda veri gizliliği, şeffaflık ve hesap verebilirliği sağlayın. - Yapay zekanın benimsenmesini sürdürülebilirlik ve sosyal eşitlik hedefleriyle uyumlu hale getirin.

5. Sonuçlar ve Öneriler

Yapay zeka ve nesnelerin internetini atık yönetimine entegre etmek, verimliliği artırmak, kaynak kullanımını optimize etmek ve sürdürülebilirliği teşvik etmek için dönüştürücü bir fırsat sunmaktadır. Tahmine dayalı analitik, akıllı atık toplama ve otomatik ayrıştırma gibi yapay zeka odaklı çözümler, atık sınıflandırmasını önemli ölçüde iyileştirebilir, depolama sahasına bağımlılığı azaltabilir ve döngüsel ekonomi uygulamalarını ilerletebilir. Bu faydalara rağmen, veri erişilebilirliği, gizlilik endişeleri, finansal kısıtlamalar, altyapı sınırlamaları ve etik hususlar gibi zorluklar devam etmektedir.

Atık yönetiminde yapay zekanın potansiyelinden etkin bir şekilde yararlanmak için yapılandırılmış bir yaklaşım gereklidir. İlk olarak, veri erişilebilirliğinin iyileştirilmesi ve toplama yöntemlerinin standartlaştırılması, YZ'ye dayalı doğru karar vermenin sağlanması için kritik öneme sahiptir. Merkezi atık yönetimi veri tabanlarının oluşturulması ve sağlam veri gizliliği çerçevelerinin uygulanması, güvenlik ve kamu güveni endişelerini ele alırken tahmine dayalı modellemeyi ve gerçek zamanlı izlemeyi geliştirecektir. Ayrıca, atık toplama verimliliğini ve kaynak tahsisini optimize etmek için IoT destekli izleme araçları ve gerçek zamanlı atık izleme mekanizmaları gibi yapay zeka odaklı altyapıya yatırım yapılmasına öncelik verilmelidir. Hükümetler, teknoloji firmaları, atık yönetimi şirketleri ve araştırma kurumları arasındaki işbirliğine dayalı ortaklıklar, engellerin üstesinden gelmek ve YZ çözümlerinin ölçeklenebilirliğini sağlamak için gereklidir.

Daha geniş bir ölçekte, atık yönetimindeki yapay zeka uygulamaları, makine öğrenimi algoritmalarında, derin öğrenme tabanlı atık sınıflandırmasında ve robotik otomasyonda sürekli ilerlemeler gerektirmektedir. Bu yenilikler ayıklama doğruluğunu, geri dönüşüm verimliliğini ve maliyet etkinliğini daha da artırabilir. Pilot programların ve fizibilite çalışmalarının teşvik edilmesi, yapay zeka odaklı atık yönetimi stratejilerinin ampirik olarak doğrulanmasını sağlayacak ve büyük ölçekli uygulamalarını destekleyecektir. Teknolojinin ötesinde, etik ve sosyal hususlar da ele alınmalıdır. YZ'nin benimsenmesi, istihdamın yer değiştirmesi risklerini azaltırken profesyonel uzmanlığı geliştirmek için işgücü eğitim programlarına eşlik etmelidir. Ayrıca, hükümet politikaları, özellikle önemli atık yönetimi zorluklarıyla karşı karşıya olan topluluklar için eşitlikçi YZ faydaları sağlamalıdır.

Atık yönetiminde yapay zeka ve IoT entegrasyonunun faydalarını tam olarak gerçekleştirmek için kapsamlı, çok paydaşlı bir yaklaşım gereklidir. Düzenleyici çerçevelerin güçlendirilmesi, dijital altyapıya yatırım yapılması, kamu bilincinin artırılması ve sektörler arası işbirliğinin sağlanması uzun vadeli iyileştirmeler için temel olacaktır. Akıllı atık yönetimi yöntemlerinin benimsenmesiyle, küresel atık yönetimi sistemleri daha sürdürülebilir, verimli ve döngüsel ekonomi ilkeleriyle uyumlu hale gelerek yerel ve uluslararası paydaşlara fayda sağlayabilir.

Yazar Katkıları: Kavramsallaştırma: Sameh Fuqaha ve Nursetiawan; Metodoloji: Sameh Fuqaha; Yazılım: Sameh Fuqaha; Doğrulama: Sameh Fuqaha ve Nursetiawan; For- mal analiz: Sameh Fuqaha; Araştırma: Sameh Fuqaha; Kaynaklar: Sameh Fuqaha; Veri düzenleme: Sameh Fuqaha; Yazım- orijinal taslak hazırlama: Sameh Fuqaha; Yazma-görüntüleme ve düzenleme: Sameh Fuqaha ve Nursetiawan; Görselleştirme: Sameh Fuqaha; Süpervizyon: Nursetiawan; Proje yönetimi: Sameh Fuqaha; Finansman temini: Nursetiawan. Tüm yazarlar makalenin yayınlanan versiyonunu okumuş ve kabul etmiştir.

Finansman: Bu araştırma herhangi bir dış finansman almamıştır.

Veri Kullanılabilirlik Beyanı: Bu çalışmada yeni veri oluşturulmamış veya analiz edilmemiştir.

Teşekkür: Yazarlar, araştırma sürecinde alınan her türlü teknik ve idari desteğe teşekkür etmek istemektedir. Bu makaleyi hazırlamak için hiçbir yapay zeka aracı kullanılmamıştır.

Çıkar Çatışmaları: Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması beyan etmemektedir.

Referanslar

- [1] BPS - Statistics Indonesia, "Mid Year Population - Statistical Data - BPS - Statistics Indonesia," *BPS - Statistics Indonesia*, 2024. <https://www.bps.go.id/en/statistics-table/2/MTk3NSMy/mid-year-population--thousand-people-.html> (erişim tarihi 10 Mart 2025).
- [2] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, "SIPSN - Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional," *Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional*, 2023. <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/>
- [3] P. Damayanti, S. S. Moersidik ve J. T. Haryanto, "Sunter, Jakarta, Endonezya'da Atıktan Enerji Üretimi: Planlar ve Zorluklar," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 940, no. 1, p. 012033, Dec. 2021, doi: 10.1088/1755-1315/940/1/012033.
- [4] E. A. Wikurendra, A. Csonka, I. Nagy, ve G. Nurika, "Endonezya'da Kentleşme ve Döngüsel Ekonominin Atık Yönetimine Entegrasyonunun Faydaları: A Review," *Circular Economy and Sustainability*, vol. 4, no. 2. 2024. doi: 10.1007/s43615-024-00346-w.
- [5] F. Cucchiella, I. D'Adamo ve M. Gastaldi, "Sürdürülebilir atık yönetimi: Düzenli depolamaya alternatif olarak atıktan enerji tesisi," *Energy Convers. Manag.*, vol. 131, pp. 18-31, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2016.11.012.
- [6] R. Verma, K. S. Vinoda, M. Papireddy, ve A. N. S. Gowda, "Toxic Pollutants from Plastic Waste- A Review," *Procedia Environ. Sci.*, vol. 35, pp. 701-708, 2016, doi: 10.1016/j.proenv.2016.07.069.
- [7] S. Kaza, L. C. Yao, P. Bhada-Tata ve F. Van Woerden, *What a Waste 2.0: 2050'ye Kadar Katı Atık Yönetiminin Küresel Anlık Görünümü*. Washington, DC: Dünya Bankası, 2018. doi: 10.1596/978-1-4648-1329-0.
- [8] X. Chew, K. W. Khaw, A. Alnoor, M. Ferasso, H. Al Halbusi, ve Y. R. Muhsen, "Circular economy of medical waste: novel intelligent medical waste management framework based on extension linear Diophantine fuzzy FDOSM and neural network approach," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, no. 21, pp. 60473-60499, Apr. 2023, doi: 10.1007/s11356-023-26677-z.
- [9] E. Karbassiyazdi ve diğerleri, "PFAS giderimi için etkili bir makine öğrenimi yaklaşımı olarak XGBoost modeli: Malzeme özelliklerinin ve çalışma koşullarının etkileri," *Environ. Res.*, vol. 215, p. 114286, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.envres.2022.114286.
- [10] A. Maiurova ve diğerleri, "Promoting digital transformation in waste collection service and waste recycling in Moscow (Russia): İklim değişikliğinin çevre üzerindeki etkilerini azaltmak için döngüsel ekonomi paradigmasının uygulanması," *J. Clean. Prod.*, vol. 354, no. 131604, p. 131604, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131604.
- [11] N. Kumari, S. Pandey, A. K. Pandey, and M. Banerjee, "Role of Artificial Intelligence in Municipal Solid Waste Management," *Br. J. Multidiscip. Adv. Stud.*, vol. 4, no. 3, pp. 5-13, Mayıs 2023, doi: 10.37745/bjmas.2022.0180.
- [12] R. Aniza, W.-H. Chen, A. Pétrissans, A. T. Hoang, V. Ashokkumar ve M. Pétrissans, "Çevresel sürdürülebilirlik için biyolojik atık iyileştirme ve değerlendirme üzerine bir inceleme: Yapay zeka yaklaşımı," *Environ. Pollut.*, vol. 324, no. 121363, p. 121363, Mayıs 2023, doi: 10.1016/j.envpol.2023.121363.

- [13] X. Hu, Y. Zhou, S. Vanhullebusch, R. Mestdag, Z. Cui ve J. Li, "Akıllı bina yıkımı ve atık yönetimi çerçevesi ile image-to-BIM," *J. Build. Eng.*, cilt 49, no. 104058, s. 104058, Mayıs 2022, doi: 10.1016/j.jobte.2022.104058.
- [14] A. Di Vaio, R. Hassan, G. D'Amore ve A. Dello Strologo, "Gemilerde Sürdürülebilir Atık Yönetimi için Dijital Teknolojiler: Kruvaziyer Endüstrisinden En İyi Uygulamaların Analizi," *IEEE Trans. Eng. Manag.*, vol. 71, pp. 12715-12728, 2024, doi: 10.1109/TEM.2022.3197241.
- [15] K. H. Yu, Y. Zhang, D. Li, C. E. Montenegro-Marin ve P. M. Kumar, "Yapay zeka kullanarak azalt, yeniden kullan, geri dönüştür ve geri kazan temelli çevresel planlama," *Environ. Etki Değerlendirmesi. Rev.*, cilt 86, no. 106492, s. 106492, Ocak 2021, doi: 10.1016/j.eiar.2020.106492.
- [16] M. Ghahramani, M. Zhou, A. Molter ve F. Pilla, "Akıllı Atık Yönetimi için IoT Tabanlı Rota Önerisi System," *IEEE Internet Things J.*, vol. 9, no. 14, pp. 11883-11892, Jul. 2022, doi: 10.1109/JIOT.2021.3132126.
- [17] C. M. Annur, "Sampah Indonesia Bertambah pada 2022, Terbanyak dalam Empat Tahun," *Databoks.Katadata.co.id*, 2023. <https://databoks.katadata.co.id/lingkungan/statistik/7e4ba334b733220/sampah-indonesia-bertambah-pada-2022-terbanyak-dalam-empat-tahun>
- [18] H.-N. Guo, S.-B. Wu, Y.-J. Tian, J. Zhang, ve H.-T. Liu, "Organik katı atık arıtma ve geri dönüşüm süreçlerinin tahmini için makine öğrenimi yöntemlerinin uygulanması: Bir inceleme," *Bioresour. Technol.*, vol. 319, no. 124114, p. 124114, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.biortech.2020.124114.
- [19] M. Zhang ve J. Yan, "A data-driven method for optimizing the energy consumption of industrial robots," *J. Clean. Prod.*, vol. 285, no. 124862, p. 124862, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124862.
- [20] Z. Dong, J. Chen ve W. Lu, "İnşaat atığı bileşimlerini tanımak için bilgisayarla görme: Yeni bir sınır farkındalıklı transformatör (BAT) modeli," *J. Environ. Manage.*, vol. 305, no. 114405, p. 114405, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.114405.
- [21] S. Majchrowska ve diğerleri, "Deep learning-based waste detection in natural and urban environments," *Waste Manag.*, vol. 138, pp. 274-284, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.wasman.2021.12.001.
- [22] S. Sundaralingam ve N. Ramanathan, "Konutlarda Üretilen Katı Atıkları Ayrıştırmak için Derin Öğrenme Tabanlı Bir Yaklaşım Alanlar," *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 13, no. 2, pp. 10439-10446, Apr. 2023, doi: 10.48084/etasr.5716.
- [23] T.-W. Wu, H. Zhang, W. Peng, F. Lü ve P.-J. He, "Akıllı atık tanımlama ve geri dönüşüm için evrişimli sinir ağları uygulamaları: Bir inceleme," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 190, p. 106813, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.resconrec.2022.106813.
- [24] S. K. Khanal, A. Tarafdar ve S. You, "Artificial intelligence and machine learning for smart bioprocesses," *Bioresour. Technol.*, vol. 375, p. 128826, Mayıs 2023, doi: 10.1016/j.biortech.2023.128826.
- [25] F. Ghanbari, H. Kamalan ve A. Sarraf, "Yapay zeka modelleri topluluğuna dayalı katı atık üretiminin tahmin edilmesi under uncertainty analysis," *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 25, no. 2, pp. 920-930, Mar. 2023, doi: 10.1007/s10163-023-01589-9.
- [26] M. Rosecký, R. Šomplák, J. Slavík, J. Kalina, G. Bulková ve J. Bednář, "Predictive modelling as a tool for effective municipal waste management policy at different territorial levels," *J. Environ. Manage.*, vol. 291, no. 112584, p. 112584, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112584.
- [27] Sunayana, S. Kumar ve R. Kumar, "Doğrusal olmayan otoregresif (NAR) sinirsel yöntem kullanılarak kentsel katı atık üretiminin tahmini modeller," *Waste Manag.*, cilt 121, s. 206-214, Şubat 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2020.12.011.
- [28] S. Dodampegama, L. Hou, E. Asadi, G. Zhang ve S. Setunge, "İnşaat ve yıkım atıklarının ayrıştırılmasında devrim: Insights from artificial intelligence and robotic applications," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 202, p. 107375, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.resconrec.2023.107375.
- [29] P. Sharma ve U. Vaid, "Atık yönetimi uygulamalarında yapay zekanın gelişen rolü," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 889, no. 1, p. 012047, Kasım 2021, doi: 10.1088/1755-1315/889/1/012047.
- [30] T. D. T. Oyedotun ve S. Moonsammy, "Ulusal politikaların faydalanıcılarla ilişkilendirilmesi: Geospatial and statistical focus to waste and sanitation planning," *Environ. Challenges*, cilt 4, no. 100142, s. 100142, Ağustos 2021, doi: 10.1016/j.envc.2021.100142.
- [31] P. Delanoë, D. Tchente ve G. Colin, "CO2 emisyonlarını azaltmak için yapay zeka modellerinin etkin kazancının yöntemi ve değerlendirmeleri," *J. Environ. Manage.*, vol. 331, no. 117261, p. 117261, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.117261.
- [32] H. M. K. K. M. B. Herath ve M. Mittal, "Akıllı şehirlerde yapay zekanın benimsenmesi: Kapsamlı bir inceleme," *Int. J. Inf. Manag. Data Insights*, vol. 2, no. 1, p. 100076, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.jjimei.2022.100076.
- [33] T. A. Kurniawan ve diğerleri, "Çin'de Katı Atık Yönetiminin Dönüşümü: Sürdürülebilirliğe Doğru Digitalization-Based Circular Economy," *Sustainability*, vol. 14, no. 4, s. 2374, Şubat 2022, doi: 10.3390/su14042374.
- [34] I. Ihsanullah, G. Alam, A. Jamal ve F. Shaik, "Katı atık yönetiminde yapay zeka uygulamalarındaki son gelişmeler: A review," *Chemosphere*, vol. 309, p. 136631, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.136631.
- [35] S. Keerthana, B. Kiruthika, R. Lokeshvaran, B. Midhunchakkaravarthi ve G. Dhivysari, "A Review on Smart Waste Collection and Disposal System," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1969, no. 1, p. 012029, Jul. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1969/1/012029.
- [36] K. Ahmed, M. Kumar Dubey, A. Kumar ve S. Dubey, "Akıllı şehirlerde belediye atık yönetimi için yapay zeka ve IoT odaklı sistem mimarisi: Bir inceleme," *Meas. Sensors*, vol. 36, no. 101395, p. 101395, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.measen.2024.101395.
- [37] J. Chen, S. Huang, S. BalaMurugan, ve G. S. Tamizharasi, "Çevre için yapay zeka tabanlı e-atık yönetimi planlama," *Çevre. Etki Değerlendirmesi. Rev.*, vol. 87, no. 106498, p. 106498, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.eiar.2020.106498.
- [38] F. Lanzalonga, R. Marsegli, A. Irace ve P. Pietro Biancone, "Atık yönetiminde yapay zeka uygulaması: döngüsel ekonomi paradigması için veri odaklı yaklaşımların potansiyelini anlamak," *Manag. Decis.*, Şubat 2024, doi: 10.1108/MD-10-2023-1733.
- [39] M. Abdallah, M. Abu Talib, S. Feroz, Q. Nasir, H. Abdalla ve B. Mahfood, "Katı atık yönetiminde yapay zeka uygulamaları: A systematic research review," *Waste Manag.*, vol. 109, pp. 231-246, May 2020, doi: 10.1016/j.wasman.2020.04.057.
- [40] T. Yiğitcanlar ve diğerleri, "Yapay Zeka Teknolojileri ve İlgili Kentsel Planlama ve Kalkınma Kavramları: Avustralya'da Nasıl Algılanıyor ve Kullanılıyor?," *J. Open Innov. Technol. Mark. Complex.*, vol. 6, no. 4, s. 187, Aralık 2020, doi: 10.3390/joitmc6040187.

- [41] Fortune Business Insights, "Artificial Intelligence Market Size, Share & Forecast 2030," 2023. <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/artificial-intelligence-market-100114> (erişim tarihi 10 Mart 2025).
- [42] O. Adeleke, S. Akinlabi, T.-C. Jen ve I. Dunmade, "Mevsimsel değişimin belediye katı atıklarının fiziksel bileşimi üzerindeki etkisini araştırmak için bir makine öğrenimi yaklaşımı," *J. Reliab. Intell. Environ.*, vol. 9, no. 2, pp. 99-118, Jun. 2023, doi: 10.1007/s40860-021-00168-9.
- [43] L. Huang, T. Song ve T. Jiang, "IC'lerin dengesizlik verileri için gizli kusurları tanımlamak için doğrusal regresyon kombine KNN algoritması," *Microelectronics J.*, cilt 131, s. 105641, Ocak 2023, doi: 10.1016/j.mejo.2022.105641.
- [44] M. Abdulredha, R. Al Khaddar, D. Jordan, P. Kot, A. Abdulridha ve K. Hashim, "Büyük festivaller sırasında konaklama endüstrisi tarafından katı atık üretiminin tahmin edilmesi: A quantification model based on multiple regression," *Waste Manag.*, vol. 77, pp. 388-400, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.04.025.
- [45] S. Golbaz, R. Nabizadeh, and H. S. Sajadi, "Hastane katı atık üretiminin çoklu doğrusal regresyon ve yapay zeka kullanılarak tahmin edilmesine ilişkin karşılaştırmalı çalışma," *J. Environ. Heal. Sci. Eng.*, vol. 17, no. 1, pp. 41-51, Jun. 2019, doi: 10.1007/s40201-018-00324-z.
- [46] J. A. Ferreira, M. C. Figueiredo, ve J. A. Oliveira, "Household Packaging Waste Management," in *Computational Science and Its Applications - ICCSA 2017*, Cham: Springer International Publishing, 2017, s. 611-620. doi: 10.1007/978-3-319-62395-5_42.
- [47] E. Wikurendra, A. Syafuddin, N. Herdiani ve G. Nurika, "Forecast of Waste Generated and Waste Fleet using Linear Regression Model," *Polish J. Environ. Stud.*, vol. 32, no. 2, pp. 1867-1876, Mar. 2023, doi: 10.15244/pjoes/158779.
- [48] R. Gholami ve N. Fakhari, "Destek Vektör Makinesi: Principles, Parameters, and Applications," *Handbook of Neural Computation* içinde, Elsevier, 2017, s. 515-535. doi: 10.1016/B978-0-12-811318-9.00027-2.
- [49] J. K. Solano Meza, D. Orjuela Yepes, J. Rodrigo-Illari ve E. Cassiraga, "Karar ağaçları tabanlı makine öğrenimi, destek vektör makineleri ve yapay sinir ağlarının uygulanması yoluyla Kolombiya'nın Bogota şehri için kentsel atık üretiminin tahmini analizi," *Heliyon*, cilt. 5, no. 11, s. e02810, Kasım 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e02810.
- [50] T. Abunama, F. Othman, M. Ansari ve A. El-Shafie, "Bir MSW düzenli depolama sahası için girdi optimizasyon yöntemi destekli yapay zeka algoritmaları kullanılarak sızıntı suyu üretim oranı modellenmesi," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 26, no. 4, pp. 3368-3381, Feb. 2019, doi: 10.1007/s11356-018-3749-5.
- [51] F. G. Altın, İ. Budak, ve F. Özcan, "Çekirdek tabanlı DVM ve derin öğrenme yöntemleri kullanarak tıbbi atık miktarının tahmin edilmesi Türkiye'deki özel bir hastane için," *Sustain. Chem. Pharm.*, vol. 33, no. 101060, p. 101060, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.scp.2023.101060.
- [52] O. O. Ayeleru, L. I. Fajimi, B. O. Oboirien ve P. A. Olubambi, "Forecasting municipal solid waste quantity using artificial neural network and supported vector machine techniques: A case study of Johannesburg, South Africa," *J. Clean. Prod.*, vol. 289, no. 125671, p. 125671, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125671.
- [53] G.-W. Cha, H.-J. Moon ve Y.-C. Kim, "Küçük Veri Kümelerine ve Kategorik Değişkenlere Dayalı Yıkım Atıklarının Tahmini için Rastgele Orman ve Gradyan Arttırma Makinesi Modellerinin Karşılaştırılması," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 18, no. 16, p. 8530, Aug. 2021, doi: 10.3390/ijerph18168530.
- [54] M. Graus, P. Niemietz, M. T. Rahman, M. Hiller ve M. Pahlenkemper, "Machine learning approach to integrate waste management companies in micro grids," in *2018 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, May 2018, pp. 1-6. doi: 10.1109/EPE.2018.8396029.
- [55] A. Kumar, S. R. Samadder, N. Kumar ve C. Singh, "Estimation of generation rate of different types of plastic wastes and possible revenue recovery from informal recycling," *Waste Manag.*, vol. 79, pp. 781-790, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.08.045.
- [56] V. Sousa, I. Meireles, V. Oliveira ve C. Dias-Ferreira, "Prediction Performance of Separate Collection of Packaging Waste Yields Using Genetic Algorithm Optimized Support Vector Machines," *Waste and Biomass Valorization*, vol. 10, no. 12, pp. 3603-3612, Dec. 2019, doi: 10.1007/s12649-019-00656-3.
- [57] F. D'Morison, C. Bittencourt ve L. Ferraz, "Elektronik atık toplamada duvar entropisi pertürbasyonuna dayalı çöp kutusu seviyesi tespiti," in *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2013*, 2013, vol. 1. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://www.iaeng.org/publication/WCECS2013/WCECS2013_pp52-56.pdf
- [58] T. Singh ve R. V. S. Uppaluri, "Kentsel katı atık üretim oranının makine öğrenimi aracı tabanlı tahmini ve öngörüsü: Guwahati, Assam, Hindistan'da bir vaka çalışması," *Int. J. Environ. Sci. Technol. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 11, pp. 12207-12230, Nov. 2023, doi: 10.1007/s13762-022-04644-4.
- [59] M. Zarei, M. R. Bayati, M. Ebrahimi-Nik, A. Rohani ve B. Hejazi, "Çoklu doğrusal regresyon ve destek vektör makineleri kullanarak bir biyofiltrede biyogazdan hidrojen sülfür giderim verimliliğinin modellenmesi," *J. Clean. Prod.*, vol. 404, no. 136965, p. 136965, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136965.
- [60] L. Zhu, Z. Tian ve J. Du, "Kentsel katı atık yakma artıma kapasitesinin mekansal-zamansal fazlalık değerlendirmesi: Çin örneği," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 31, no. 7, pp. 9948-9963, Apr. 2023, doi: 10.1007/s11356-023-26989-0.
- [61] C. Srinilta ve S. Kanharattanachai, "Municipal Solid Waste Segregation with CNN," in *2019 5th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST)*, Jul. 2019, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICEAST.2019.8802522.
- [62] V. G. Costa ve C. E. Pedreira, "Recent advances in decision trees: an updated survey," *Artif. Intell. Rev.*, vol. 56, no. 5, pp. 4765- 4800, Jul. 2023, doi: 10.1007/s10462-022-10275-5.
- [63] A. Gulghane, R. L. Sharma, and P. Borkar, "A formal evaluation of KNN and decision tree algorithms for waste generation prediction in residential projects: a comparative approach," *Asian J. Civ. Eng.*, vol. 25, no. 1, pp. 265-280, Jan. 2024, doi: 10.1007/s42107-023-00772-5.
- [64] W. Lu, "Yasadışı inşaat atığı dökümünü tespit etmek için büyük veri analitiği: Bir Hong Kong çalışması," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 141, pp. 264-272, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.resconrec.2018.10.039.
- [65] M. A. Massoud, C. Abdallah, F. Merhbi, R. Khoury ve R. Ghanem, "Gelişmekte olan ülkelerdeki kontrolsüz atık bertaraf sahaları için bir önceliklendirme ve rehabilitasyon karar destek aracının geliştirilmesi ve uygulanması," *Integr. Environ. Assess. Manag.*, vol. 19, no. 2, pp. 436-445, Mar. 2023, doi: 10.1002/ieam.4665.

- [66] N. Kanwisher, M. Khosla ve K. Dobs, "Using artificial neural networks to ask 'why' questions of minds and brains," *Trends Neurosci.*, vol. 46, no. 3, pp. 240-254, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.tins.2022.12.008.
- [67] G. Coskuner, M. S. Jassim, M. Zontul, and S. Karateke, "Evsel, ticari ve inşaat atıklarının oluşumunu tahmin etmek için yapay zeka sinir ağı modellemesi uygulaması," *Waste Manag. Res. J. a Sustain. Circ. Econ.*, vol. 39, no. 3, pp. 499- 507, Mar. 2021, doi: 10.1177/0734242X20935181.
- [68] E. Puntarić, L. Pezo, Ž. Zgorelec, J. Gunjača, D. Kučić Grgić ve N. Voća, "Prediction of the Production of Separated Municipal Solid Waste by Artificial Neural Networks in Croatia and the European Union," *Sustainability*, vol. 14, no. 16, p. 10133, Aug. 2022, doi: 10.3390/su141610133.
- [69] C. Magazzino, M. Mele, N. Schneider ve S. A. Sarkodie, "Atık üretimi, refah ve atık sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyonları: Danimarka döngüsel ekonomiye giden yolda mı?", *Sci. Total Environ.*, vol. 755, p. 142510, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142510.
- [70] B. Ribic, L. Pezo, D. Sincic, B. Loncar ve N. Voca, "Predictive model for municipal waste generation using artificial neural networks-Case study City of Zagreb, Croatia," *Int. J. Energy Res.*, vol. 43, no. 11, pp. 5701-5713, Sep. 2019, doi: 10.1002/er.4632.
- [71] M. S. Jassim, G. Coskuner, N. Sultana ve S. M. Z. Hossain, "Forecasting domestic waste generation during successive COVID- 19 lockdowns by Bidirectional LSTM super learner neural network," *Appl. Soft Comput.*, vol. 133, p. 109908, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.asoc.2022.109908.
- [72] O. Adedeji ve Z. Wang, "Intelligent Waste Classification System Using Deep Learning Convolutional Neural Network," *Procedia Manuf.*, vol. 35, pp. 607-612, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.05.086.
- [73] U. Soni, A. Roy, A. Verma ve V. Jain, "Yapay zeka modelleri kullanarak kentsel katı atık üretiminin tahmin edilmesi-bir örnek study in India," *SN Appl. Sci.*, vol. 1, no. 2, p. 162, Feb. 2019, doi: 10.1007/s42452-018-0157-x.
- [74] D. O. Melinte, A.-M. Travediu, ve D. N. Dumitriu, "Gerçek Zamanlı Atık Tespiti için Derin Evrişimli Sinir Ağları Nesne Dedektörü Identification," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 20, p. 7301, Ekim 2020, doi: 10.3390/app10207301.
- [75] M. A. Mohammed ve diğerleri, "Yapay sinir ağı ve özellik füzyonu kullanarak otomatik atık ayırma ve geri dönüşüm sınıflandırması: akıllı şehirler için dijital özellikli bir döngüsel ekonomi vizyonu," *Multimed. Tools Appl.*, vol. 82, no. 25, pp. 39617-39632, Oct. 2023, doi: 10.1007/s11042-021-11537-0.
- [76] Y. Lu ve diğerleri, "Sürdürülebilir yeşil bina için atık yönetimi ve enerji tasarrufunun analitik hiyerarşi süreci ve yapay sinir ağı modeli ile değerlendirilmesi," *Chemosphere*, vol. 318, p. 137708, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.137708.
- [77] A. Singh, "Matematiksel model uygulamaları yoluyla katı atık yönetimi," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 151, p. 104503, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.resconrec.2019.104503.
- [78] M. S. Nafiz, S. S. Das, M. K. Morol, A. Al Juabir, ve D. Nandi, "ConvoWaste: An Automatic Waste Segregation Machine Using Deep Learning," in *2023 3rd International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST)*, Jan. 2023, vol. 2023- Janua, pp. 181-186. doi: 10.1109/ICREST57604.2023.10070078.
- [79] F. M. Assef, M. T. A. Steiner, ve E. P. de Lima, "A review of clustering techniques for waste management," *Heliyon*, vol. 8, no. 1, s. e08784, Ocak 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e08784.
- [80] M. M. Kaya ve diğerleri, "Designing a Smart Home Management System with Artificial Intelligence & Machine Learning," *ResearchGate*. 2021. doi: 10.13140/RG.2.2.33082.72641/1.
- [81] C. Martin-Rios, A. Hofmann ve N. Mackenzie, "Gıda Atık Yönetimi Teknolojisinde Sürdürülebilirlik Odaklı Yenilikler," *Sustainability*, cilt. 13, no. 1, s. 210, Aralık 2020, doi: 10.3390/su13010210.
- [82] E. J. Adwan, N. Mohamed, H. Bureshaid ve B. Mohamed, "A Mobile App Development for E-Waste Management in Bahrain (Athar)," *J. Comput. Theor. Appl.*, vol. 2, no. 2, pp. 164-181, Aug. 2024, doi: 10.62411/jcta.10930.
- [83] K. Gupta, A. K. Kar, ve M. P. Gupta, "Nesnelerin İnterneti ve Sürdürülebilirlik: A Literature Review," *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, vol. 699 AICT, 2024, pp. 35-45. doi: 10.1007/978-3-031-50204-0_4.
- [84] A. Xu, H. Chang, Y. Xu, R. Li, X. Li ve Y. Zhao, "Katı atıkla ilgili sorunları çözmek için yapay sinir ağlarının (YSA) uygulanması: A critical review," *Waste Manag.*, vol. 124, pp. 385-402, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2021.02.029.
- [85] A. A. Noman, U. H. Akter, T. H. Pranto, ve A. B. Haque, "Machine Learning and Artificial Intelligence in Circular Economy: Bibliyometrik Bir Analiz ve Sistemik Literatür Taraması," *Ann. Emerg. Technol. Comput.*, vol. 6, no. 2, pp. 13-40, Apr. 2022, doi: 10.33166/AETiC.2022.02.002.
- [86] Zamathula Queen Sikhakhane Nwokediegwu, Ejike David Ugwuanyi, Michael Ayorinde Dada, Michael Tega Majemite ve Alexander Obaigbena, "AI-Driven Waste Management Systems: ABD ve Afrika'daki Yeniliklerin Karşılaştırmalı İncelemesi," *Eng. Sci. Technol. J.*, vol. 5, no. 2, pp. 507-516, Feb. 2024, doi: 10.51594/estj.v5i2.828.
- [87] A. E. Maragkaki, G. Sabathianakis, G. Litas, A. Poda, C. Tsompanidis ve T. Manios, "Yunanistan'ın Katerini Belediyesinde biyolojik atıkların kaynağa ayrıştırılması, atığının kadar öde sistemleri ve otonom kompostlama ünitelerinin yaşam döngüsü değerlendirmesi," *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 25, no. 4, pp. 2498-2512, Jul. 2023, doi: 10.1007/s10163-023-01708-6.
- [88] G. Messina, A. Tomasi, G. Ivaldi ve F. Vidoli, "'Sahip olduğun kadar öde' mi yoksa 'attığın kadar öde' mi? Atık hizmetleri için alternatif finansman planlarının karşı olgusal bir değerlendirmesi," *J. Clean. Prod.*, cilt 412, s. 137363, Ağustos 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.137363.
- [89] B. Bilitewski, "From traditional to modern fee systems," *Waste Manag.*, vol. 28, no. 12, pp. 2760-2766, Dec. 2008, doi: 10.1016/j.wasman.2008.03.032.
- [90] A. Okubanjo, O. B. Olufemi, A. Okandeji, ve E. Daniel, "Smart Bin and IoT: A Sustainable Future for Waste Management System in Nigeria," *Gazi Univ. J. Sci.*, vol. 37, no. 1, pp. 222-235, Mar. 2024, doi: 10.35378/gujs.1254271.
- [91] S. Dubey, M. K. Singh, P. Singh ve S. Aggarwal, "Makine Öğrenimi ve IoT Yaklaşımı Kullanılarak Konut Toplumunun Atık Yönetimi," *2020 Uluslararası Gelişen Akıllı Hesaplama ve Bilişim Konferansı (ESCI)*, Mart 2020, s. 293-297. doi: 10.1109/ESCI48226.2020.9167526.
- [92] S. Dubey, P. Singh, P. Yadav ve K. K. Singh, "IoT ve Makine Öğrenimi Kullanarak Evsel Atık Yönetim Sistemi," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 167, pp. 1950-1959, 2020, doi: 10.1016/j.procs.2020.03.222.

- [93] J. C. B. F. Bijos, V. M. Zanta, J. Morató, L. M. Queiroz, ve K. P. S. R. Oliveira-Esquerre, "Latin Amerika ve Karayipler'de makine öğrenimi yoluyla kentsel katı atık yönetiminde döngüsellüğün iyileştirilmesi," *Sustain. Chem. Pharm.*, cilt 28, s. 100740, Eylül 2022, doi: 10.1016/j.scp.2022.100740.
- [94] M. Rodrigues, V. Miguéis, S. Freitas ve T. Machado, "Yiyecek içecek sektöründe kısa vadeli talep tahmini için makine öğrenimi modelleri hizmetleri: Gıda israfını azaltmak için bir çözüm," *J. Clean. Prod.*, cilt 435, s. 140265, Ocak 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.140265.
- [95] P. Oguz-Ekim, "Machine Learning Approaches for Municipal Solid Waste Generation Forecasting," *Environ. Eng. Sci.*, vol. 38, no. 6, pp. 489-499, Jun. 2021, doi: 10.1089/ees.2020.0232.
- [96] G.-W. Cha, S.-H. Choi, W.-H. Hong, ve C.-W. Park, "Yıkım-Atık Üretim Oranına İlişkin Bir Tahmin Modeli Geliştirilmesi Temel Bileşen Analizi," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 20, no. 4, s. 3159, Şubat 2023, doi: 10.3390/ijerph20043159.
- [97] M. H. Shahidzadeh, S. Shokouhyar, F. Javadi ve S. Shokoohyar, "Atık yönetimi için sosyal medya gücünü çözün: A multilayer deep learning approach," *J. Clean. Prod.*, cilt 377, s. 134350, Aralık 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134350.
- [98] G.-W. Cha, W.-H. Hong, ve Y.-C. Kim, "Yıkım Atığı Üretim Oranını Tahmin Etmek için Otomatik Kodlayıcı Kullanan Makine Öğrenimi Modelinin Performans İyileştirilmesi," *Sustainability*, vol. 15, no. 4, s. 3691, Şubat 2023, doi: 10.3390/su15043691.
- [99] G.-W. Cha, H. J. Moon ve Y.-C. Kim, "Bina atık üretim oranını tahmin etmek için hibrit bir makine öğrenme modeli yıkım projeleri," *J. Clean. Prod.*, vol. 375, p. 134096, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134096.
- [100] G.-W. Cha, S.-H. Choi, W.-H. Hong, ve C.-W. Park, "Yeniden Geliştirme Alanlarındaki Binaların Yıkım Atığı Üretim Oranının Tahmini için Makine Öğrenimi Modelinin Geliştirilmesi," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 20, no. 1, p. 107, Dec. 2022, doi: 10.3390/ijerph20010107.
- [101] P. Agrawal, G. Kaur, and S. S. Kolekar, "Investigation on biomedical waste management of hospitals using cohort intelligence algorithm," *Soft Comput. Lett.*, cilt 3, s. 100008, Aralık 2021, doi: 10.1016/j.socl.2020.100008.
- [102] S. Ahmad, Imran, F. Jamil, N. Iqbal ve D. Kim, "Verimli Atık Toplama için Atık Taşıyıcı Araçlar için Optimal Rota Önerisi: A Step Forward Towards Sustainable Cities," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 77875-77887, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2988173.
- [103] M. Ghoreishi ve A. Happonen, "Sürdürülebilir ürün tasarımı benimseyen döngüsel ekonomi için yapay zekanın kullanılmasına yönelik temel kolaylaştırıcılar: Three case studies," in *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2233, p. 050008. doi: 10.1063/5.0001339.
- [104] T. Anh Khoa ve diğerleri, "Üniversitede IoT Tabanlı Makine Öğrenimini Kullanan Atık Yönetim Sistemi," *Wirel. İletişim. Mob. Comput.*, vol. 2020, pp. 1-13, Feb. 2020, doi: 10.1155/2020/6138637.
- [105] M. Aazam, M. St-Hilaire, C.-H. Lung, and I. Lambadaris, "Cloud-based smart waste management for smart cities," in *2016 IEEE 21st International Workshop on Computer Aided Modelling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, Oct. 2016, pp. 188-193. doi: 10.1109/CAMAD.2016.7790356.
- [106] S. Selvakanmani, P. Rajeswari, B. V. Krishna ve J. Manikandan, "E-atık yönetimini optimize etme: için derin öğrenme sınıflandırıcıları etkili planlama," *J. Clean. Prod.*, vol. 443, p. 141021, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.141021.
- [107] L. Andeobu, S. Wibowo, and S. Grandhi, "Artificial intelligence applications for sustainable solid waste management practices in Avustralya: A systematic review," *Sci. Total Environ.*, vol. 834, p. 155389, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155389.
- [108] Z. Fan, Z. Yan ve S. Wen, "Sürdürülebilirlikte Derin Öğrenme ve Yapay Zeka: SKH'ler, Yenilenebilir Enerji ve Çevre Sağlığı Üzerine Bir İnceleme," *Sürdürülebilirlik*, cilt. 15, no. 18, s. 13493, Eylül 2023, doi: 10.3390/su151813493.
- [109] Mashudi, R. Sulistiowati, S. Handoyo, E. Mulyandari ve N. Hamzah, "Modern Dönemde Atık Yönetiminde Yenilikçi Stratejiler ve Teknolojiler Sürdürülebilir İlkelerin Entegrasyonu, Kaynak Verimliliği ve Çevresel Etki," *Int. J. Sci. Soc.*, vol. 5, no. 4, pp. 87-100, Eylül 2023, doi: 10.54783/ijssoc.v5i4.767.
- [110] P. Nie, K. C. Dahanayake ve N. Sumanarathna, "Exploring UAE's transition towards circular economy through construction and demolition waste management in the pre-construction stage-A case study approach," *Smart Sustain. Built Environ*, vol. 13, no. 2, pp. 246-266, Feb. 2024, doi: 10.1108/SASBE-06-2022-0115.
- [111] K. H. Abdulkareem ve diğerleri, "A manifold intelligent decision system for fusion and benchmarking of deep waste-sorting models," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 132, p. 107926, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.engappai.2024.107926.
- [112] C. J. Latha, K. Kalaiselvi, S. Ramanarayan, R. Srivel, S. Vani ve T. V. M. Sairam, "Dynamic convolutional neural network based <sc>e-atık</sc> yönetimi ve optimize edilmiş toplama planlaması," *Concurr. Comput. Pract. Exp.*, vol. 34, no. 17, Aug. 2022, doi: 10.1002/cpe.6941.
- [113] C. Lubongo ve P. Alexandridis, "Assessment of Performance and Challenges in Use of Commercial Automated Sorting Technology for Plastic Waste," *Recycling*, vol. 7, no. 2, p. 11, Feb. 2022, doi: 10.3390/recycling7020011.
- [114] R. Anitha, R. Maruthi, ve S. Sudha, "Plastik atıkların otomatik ayrıştırılması ve mikrobiyal bozunması: Atık yönetimi sorunlarına daha çevreci bir çözüm," *Glob. Transitions Proc.*, vol. 3, no. 1, pp. 100-103, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.gltp.2022.04.021.
- [115] P. Bründl, A. Scheck, H. G. Nguyen ve J. Franke, "Towards a circular economy for electrical products: Otomatik geri dönüşüm için sistematik bir literatür taraması ve araştırma gündemi," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 87, p. 102693, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.rcim.2023.102693.
- [116] S. K. Baduge ve diğerleri, "Bina ve inşaat 4.0 için yapay zeka ve akıllı görüş: Makine ve derin öğrenme yöntemleri ve uygulamaları," *Autom. Constr.*, cilt 141, s. 104440, Eylül 2022, doi: 10.1016/j.autcon.2022.104440.
- [117] S. Neelakandan et al., "Metaheuristics with Deep Transfer Learning Enabled Detection and classification model for industrial waste management," *Chemosphere*, vol. 308, p. 136046, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.136046.
- [118] J. Rajalakshmi, K. Sumangali, J. Jayanthi, and K. Muthulakshmi, "Artificial Intelligence with Earthworm Optimization Assisted Waste Management System for Smart Cities," *Glob. NEST J.*, vol. 25, no. 4, pp. 190-197, Jan. 2023, doi: 10.30955/gnj.004712.
- [119] V. Kakani, V. H. Nguyen, B. P. Kumar, H. Kim ve V. R. Pasupuleti, "A critical review on computer vision and artificial intelligence in food industry," *J. Agric. Food Res.*, cilt 2, s. 100033, Aralık 2020, doi: 10.1016/j.jafr.2020.100033.
- [120] W.-L. Mao, W.-C. Chen, C.-T. Wang, ve Y.-H. Lin, "Optimize edilmiş konvolüsyonel sinir ağı kullanarak geri dönüşüm atık sınıflandırması," *Kaynak. Conserv. Recycl.*, cilt. 164, s. 105132, Ocak 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105132.

- [121]M. Koskinopoulou, F. Raptopoulos, G. Papadopoulos, N. Mavrakis ve M. Maniadakis, "Robotik Atık Ayırma Teknolojisi: Toward a Vision-Based Categorization System for the Industrial Robotic Separation of Recyclable Waste," *IEEE Robot. Autom. Mag.*, vol. 28, no. 2, pp. 50-60, Jun. 2021, doi: 10.1109/MRA.2021.3066040.
- [122]A. K. Subramanian, D. Thayalan, A. I. Edwards, A. Almalki ve A. Venugopal, "Dental uygulamalarda biyomedikal atık yönetimi ve bunun önemli çevresel etkileri: Bir bakış açısı," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 24, p. 101807, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.eti.2021.101807.
- [123]X. Li, "SF EXPRESS Automated Robotic Sorting System Based on Machine Learning," in *Proceedings of the 2022 International Conference on Urban Planning and Regional Economy (UPRE 2022)*, 2022, vol. 654. doi: 10.2991/aebmr.k.220502.020.
- [124]A. Shreyas Madhav, R. Rajaraman, S. Harini, ve C. C. Kilioroor, "E-tasarım koleksiyonunu geliştirmek için yapay zeka uygulaması atık: A potential solution for household WEEE collection and segregation in India," *Waste Manag. Res. J. a Sustain. Circ. Econ.*, vol. 40, no. 7, pp. 1047-1053, Jul. 2022, doi: 10.1177/0734242X211052846.
- [125]Q. Li ve C. Yu, "A Review of the Flexible Robotic Arm," *Appl. Comput. Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 274-279, Aug. 2023, doi: 10.54254/2755-2721/8/20230165.
- [126]R. Sarc, A. Curtis, L. Kandlbauer, K. Khodier, K. E. Lorber, and R. Pomberger, "Digitalisation and intelligent robotics in value chain of circular economy oriented waste management - A review," *Waste Manag.*, vol. 95, pp. 476-492, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.wasman.2019.06.035.
- [127]T. Bag, "Socio-economic impacts of scientific-technological advancements," *Int. J. Multidiscip. Educ. Res.*, vol. 12, no. 8, pp. 70-99, 2023, [Online]. Available: [https://s3-ap-southeast-1.amazonaws.com/ijmer/pdf/volume12/volume12-issue8\(4\)/13.pdf](https://s3-ap-southeast-1.amazonaws.com/ijmer/pdf/volume12/volume12-issue8(4)/13.pdf)
- [128]R. Tiwari, "The Impact of AI and Machine Learning on Job Displacement and Employment Opportunities," *Int. J. Sci. Res. Eng. Manag.*, vol. 07, no. 01, Ocak 2023, doi: 10.55041/IJSREM17506.
- [129]A. Comminos, E. S. Muller, ve G. Mutung'u, "Sürdürülebilir İnsani Kalkınma için Yapay Zeka," 2019. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://www.giswatch.org/node/6206>
- [130]S. Ma, C. Zhou, C. Chi, Y. Liu ve G. Yang, "Estimating Physical Composition of Municipal Solid Waste in China by Applying Artificial Neural Network Method," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 54, no. 15, pp. 9609-9617, Aug. 2020, doi: 10.1021/acs.est.0c01802. [131]R. A. Ali, N. N. L. Nik Ibrahim, W. A. Wan Ab Karim Ghani, H. L. Lam ve N. S. Sani, "Belediye katı atık yönetimi için karar verme araçları olarak süreç ağı sentezi ve makine öğreniminin kullanılması," *Int. J. Environ. Sci. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 3, pp. 1985-1996, Mar. 2022, doi: 10.1007/s13762-021-03250-0.
- [132]B. Yan ve diğerleri, "Lazer kaynaklı parçalanma spektroskopisi ve makine ile artık atıkların hızlı tanımlanması ve karakterizasyonu learning," *Resour. Conserv. Recycl.*, cilt. 174, s. 105851, Kasım 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105851.
- [133]J. Frankowski, M. Zaborowicz, J. Dach, W. Czekala ve J. Przybył, "Pandemik Acil Durumlarda ve Diğer Doğal Afetlerde Biyolojik Atık Yönetimi. Çiçekçilik Atıklarından Biyoenerji Üretimine Belirlenmesi ve Derin Sinirsel Modelleme Yöntemleri Kullanılarak Metan Üretimine Modellenmesi," *Energies*, vol. 13, no. 11, p. 3014, Jun. 2020, doi: 10.3390/en1313014. [134]S. S. Mookkaiah, G. Thangavelu, R. Hebbar, N. Haldar ve H. Singh, "Design and development of smart Internet of Things-based solid waste management system using computer vision," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 29, no. 43, pp. 64871-64885, Eylül 2022, doi: 10.1007/s11356-022-20428-2.
- [135]B. S. Costa ve diğerleri, "Artificial Intelligence in Automated Sorting in Trash Recycling," *Anais do XV Encontro Nacional de Inteligência Artificial e Computacional (ENIAC 2018)*, Ekim 2018, s. 198-205. doi: 10.5753/eniac.2018.4416.
- [136]E. Konstantinidis, A. Dakhel, C. Beretta ve A. Erlandsson, "Amiloid-beta birikintilerinin insan iPSC'sinden türetilmiş astrositler," *Mol. Cell. Neurosci.*, vol. 125, p. 103839, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.mcn.2023.103839.
- [137]Y. Zhao ve J. Li, "Etkili Katı Atık Ayıklamada Sensör Tabanlı Teknolojiler: Başarılı Uygulamalar, Sensör Kombinasyonu ve Future Directions," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 56, no. 24, pp. 17531-17544, Dec. 2022, doi: 10.1021/acs.est.2c05874.
- [138]G. Maier, R. Gruna, T. Längle ve J. Beyerer, "Sensör Tabanlı Ayıklama Teknolojisi ve Araştırmalarında Son Durum Üzerine Bir İnceleme," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 6473-6493, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3350987.
- [139]K. O. Wadatar, "A Review on Internet of Things (IoT) Based Garbage Monitoring System," *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 9, no. VII, s. 3313-3317, Temmuz 2021, doi: 10.22214/ijraset.2021.36844.
- [140]A. A. Kutty ve G. M. Abdalla, "Gıda güvenliği ve sürdürülebilirlikle ilgili değerlendirmeler için araçlar ve teknikler: Veri ve gıda atığı yönetim sistemine odaklanma," *Uluslararası Endüstri Mühendisliği ve Operasyon Yönetimi Konferansı Bildirileri*, 2020, no. Ağustos. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://index.ieomsociety.org/index.cfm/article/view/ID/4572>
- [141]M. Anneken, M. Veerappa, M. F. Huber, C. Kühnert, F. Kronenwett, and G. Maier, "Explainable AI for sensor-based sorting sistemleri," *Tech. Mess.*, vol. 90, no. 3, 2023, doi: 10.1515/teme-2022-0097.
- [142]C. Hoffmann Sampaio ve diğerleri, "Konvansiyonel Jig, Havalı Jig ve Sensör Tabanlı Jig ile İnşaat ve Yıkım Atıklarının Geri Dönüşümü Ayıklama: A Comparison," *Minerals*, cilt. 11, no. 8, s. 904, Ağustos 2021, doi: 10.3390/min11080904.
- [143]D. Peukert, C. Xu ve P. Dowd, "Mineral İşlemede Sensör Tabanlı Ayıklama Üzerine Bir İnceleme: Sensörün Potansiyel Faydaları Fusion," *Minerals*, cilt. 12, no. 11, s. 1364, Ekim 2022, doi: 10.3390/min12111364.
- [144]F. Zhang, Y. Lin, Y. Zhu, L. Li, X. Cui ve Y. Gao, "Panax Notoginseng Taproots için Gerçek Zamanlı Sıralama Robot Sistemi Donanımı with an Improved Deeplabv3+ Model," *Agriculture*, vol. 12, no. 8, p. 1271, Aug. 2022, doi: 10.3390/agriculture12081271.
- [145]M. Erkinay Ozdemir, Z. Ali, B. Subeshan, and E. Asmatulu, "Applying machine learning approach in recycling," *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 23, no. 3, pp. 855-871, Mayıs 2021, doi: 10.1007/s10163-021-01182-y.
- [146]R. Chauhan, S. Shighra, H. Madkhali, L. Nguyen ve M. Prasad, "Geleceğin Verimli Atık Yönetimi: Öğrenme Tabanlı Bir Yaklaşım Akıllı Sistemler için Derin Sinir Ağları (LADS)," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 7, p. 4140, Mar. 2023, doi: 10.3390/app13074140. [147]C. S. Lee ve D.-W. Lim, "Ters Otomat Makinesi ile Sıvı Karton Geri Dönüşümü için CNN Tabanlı Denetim Modülü," *Sustainability*, vol. 14, no. 22, p. 14905, Nov. 2022, doi: 10.3390/su142214905.
- [148]J. Bobulski ve M. Kubanek, "Waste Classification System Using Image Processing and Convolutional Neural Networks," *Lecture Notes in Computer Science (Lecture Notes in Artificial Intelligence ve Lecture Notes in Bioinformatics alt serileri dahil)*, vol. 11507 LNCS, 2019, pp. 350-361. doi: 10.1007/978-3-030-20518-8_30.

- [149]D. Thanawala, A. Sarin ve P. Verma, "An Approach to Waste Segregation and Management Using Convolutional Neural Networks," in *Communications in Computer and Information Science*, vol. 1244 CCIS, 2020, pp. 139-150. doi: 10.1007/978-981-15-6634-9_14.
- [150]M. Toğaçar, B. Ergen ve Z. Cömert, "Konvolüsyonel sinir ağı modellerinde entegre özellik seçimi yöntemi ile AutoEncoder ağı kullanarak atık sınıflandırması," *Measurement*, vol. 153, p. 107459, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.measurement.2019.107459.
- [151]M. Al Duhayyim ve diğerleri, "IoT Destekli Teknolojiler için Geliştirilmiş Derin Öğrenme Modeli ile Yapay Ekosistem Tabanlı Optimizasyon Sustainable Waste Management," *Sustainability*, vol. 14, no. 18, p. 11704, Sep. 2022, doi: 10.3390/su141811704.
- [152]A. Chidepatil, P. Bindra, D. Kulkarni, M. Qazi, M. Kshirsagar ve K. Sankaran, "From Trash to Cash: How Blockchain and Multi-Sensor-Driven Artificial Intelligence Can Transform Circular Economy of Plastic Waste?," *Adm. Sci.*, vol. 10, no. 2, p. 23, Apr. 2020, doi: 10.3390/admsci10020023.
- [153]M. W. Rahman, R. Islam, A. Hasan, N. I. Bithi, M. M. Hasan, and M. M. Rahman, "Intelligent waste management system using deep learning with IoT," *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, vol. 34, no. 5, pp. 2072-2087, Mayıs 2022, doi: 10.1016/j.jksuci.2020.08.016.
- [154]A. Hosseinzadeh et al., "Application of artificial neural network and multiple linear regression in modeling nutrient recovery in vermicompost under different conditions," *Bioresour. Technol.*, vol. 303, no. 122926, p. 122926, Mayıs 2020, doi: 10.1016/j.biortech.2020.122926.
- [155]Imran, S. Ahmad ve D. H. Kim, "Quantum GIS Based Descriptive and Predictive Data Analysis for Effective Planning of Waste Management," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 46193-46205, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2979015.
- [156]V. T. Nguyen, Q. T. H. Ta ve P. K. T. Nguyen, "Alkali ile ön işlemden geçirilmiş atık-aktif çamur ile beslenen mikrobiyal elektroliz hücresi destekli anaerobik çürütmenin yapay zeka tabanlı modellenmesi ve optimizasyonu," *Biochem. Eng. J.*, vol. 187, p. 108670, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.bej.2022.108670.
- [157]K. Bernat, "Tüketici Sonrası Plastik Atık Yönetimi: From Collection and Sortation to Mechanical Recycling," *Energies*, vol. 16, no. 8, p. 3504, Apr. 2023, doi: 10.3390/en16083504.
- [158]K. Pardini, J. J. P. C. Rodrigues, S. A. Kozlov, N. Kumar ve V. Furtado, "IoT Tabanlı Katı Atık Yönetimi Çözümleri: A Anket," *J. Sens. Actuator Networks*, cilt. 8, no. 1, s. 5, Ocak 2019, doi: 10.3390/jsan8010005.
- [159]F. Alqahtani, Z. Al-Makhadmeh, A. Tolba ve W. Said, "Akıllı şehirler için nesnelerin interneti tabanlı kentsel atık yönetim sistemi using a Cuckoo Search Algorithm," *Cluster Comput.*, vol. 23, no. 3, pp. 1769-1780, Eylül 2020, doi: 10.1007/s10586-020-03126-x.
- [160]T. Bakhshi ve M. Ahmed, "IoT-Enabled Smart City Waste Management using Machine Learning Analytics," in *2018 2nd Uluslararası Enerji Tasarrufu ve Verimliliği Konferansı (ICECE)*, Ekim 2018, s. 66-71. doi: 10.1109/ECE.2018.8554985.
- [161]G. Desogus, E. Quaquero, G. Rubiu, G. Gatto ve C. Perra, "BIM ve IoT Sensörleri Entegrasyonu: A Framework for Consumption and Indoor Conditions Data Monitoring of Existing Buildings," *Sustainability*, vol. 13, no. 8, p. 4496, Apr. 2021, doi: 10.3390/su13084496.
- [162]A. Namoun, A. Tufail, M. Y. Khan, A. Alrehaili, T. A. Syed ve O. BenRhouma, "Makine Öğrenimi Yaklaşımları Kullanılarak Katı Atık Üretimi ve Bertarafı: A Survey of Solutions and Challenges," *Sustainability*, vol. 14, no. 20, p. 13578, Oct. 2022, doi: 10.3390/su142013578.
- [163]B. Fang ve diğerleri, "Akıllı şehirlerde atık yönetimi için yapay zeka: bir inceleme," *Environ. Chem. Lett.*, vol. 21, no. 4, pp. 1959-1989, Aug. 2023, doi: 10.1007/s10311-023-01604-3.
- [164]A. Aljawder ve W. Al-Karaghoul, "The adoption of technology management principles and artificial intelligence for a sustainable lean construction industry in the case of Bahrain," *J. Decis. Syst.*, vol. 33, no. 2, pp. 263-292, Apr. 2024, doi: 10.1080/12460125.2022.2075529.
- [165]T.-D. Bui ve M.-L. Tseng, "Belirsizlikler altında toplum 5.0'da sürdürülebilir katı atık yönetiminin önündeki engelleri anlamak: performansın yönlendirilmesinde sosyal ve teknik perspektiflerin bir yeniliği," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 29, no. 11, pp. 16265-16293, Mar. 2022, doi: 10.1007/s11356-021-16962-0.
- [166]S. Vyas ve diğerleri, "Kentsel katı atık yönetimine özel bir odaklanma ile in-silico yaklaşımlarla desteklenen katı atık yönetimi teknikleri: Araştırma eğilimleri ve zorluklar," *Sci. Total Environ.*, vol. 891, no. Issue3, s. 164344, Eylül 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.164344.
- [167]L. M. Joshi, R. K. Bharti ve R. Singh, "Kentsel Katı Atıkların Değerlendirilmesinde Nesnelerin İnterneti ve Makine Öğrenimi Tabanlı Yaklaşımlar Yönetimi: Trends, Challenges, and Future Directions," *Expert Syst.*, vol. 39, no. 5, Jun. 2022, doi: 10.1111/exsy.12865.
- [168]A. Mounadel, H. Ech-Cheikh, S. Lissane Elhaq, A. Rachid, M. Sadik, ve B. Abdellaoui, "Belediye katı atık yönetiminde yapay zeka tekniklerinin uygulanması: sistematik bir literatür taraması," *Environ. Technol. Rev.*, vol. 12, no. 1, pp. 316-336, Dec. 2023, doi: 10.1080/21622515.2023.2205027.
- [169]T.-H. Tsui, M. C. M. van Loosdrecht, Y. Dai ve Y. W. Tong, "Machine learning and circular bioeconomy: Building new resource efficiency from diverse waste streams," *Bioresour. Technol.*, vol. 369, p. 128445, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.biortech.2022.128445.
- [170]M. Z. Akkad, S. Haidar, and T. Bányai, "Enerji Verimliliği ve Enerji Tasarrufuna Odaklanan Siber-Fiziksel Atık Yönetim Sistemlerinin Sustainability," *Designs*, vol. 6, no. 2, 2022, doi: 10.3390/designs6020039.
- [171]G. Alam, I. Ihsanullah, M. Naushad, and M. Sillanpää, "Adsorpsiyon süreçlerinin optimizasyonu ve otomasyonu için su arıtımında yapay zeka uygulamaları: Son gelişmeler ve beklentiler," *Chem. Eng. J.*, vol. 427, p. 130011, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.cej.2021.130011.
- [172]J. Verma, "Büyük Veri Kullanan Derin Teknolojiler: Energy and Waste Management," in *Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri için Derin Öğrenme Teknolojileri*, 2023, pp. 21-39. doi: 10.1007/978-981-19-5723-9_2.
- [173]Sanny Edinov ve Rezki Fauzi, "Community Behavior in Artificial Intelligence-Based Waste Management," *Formosa J. Sustain. Res.*, vol. 2, no. 2, pp. 341-350, Feb. 2023, doi: 10.55927/fjsr.v2i2.2993.
- [174]J. Farjami, S. Dehyouri ve M. Mohamadi, "Destek Vektör Makinesi (DVM) tabanlı meyvelerin atık geri dönüşümünün değerlendirilmesi," *Cogent Environ. Sci.*, cilt 6, no. 1, Ocak 2020, doi: 10.1080/23311843.2020.1712146.

- [175]G. U. Fayomi ve diğerleri, "Akıllı Şehir için Akıllı Atık Yönetimi: Sanayileşme Üzerindeki Etkisi," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 655, no. 1, s. 012040, Şubat 2021, doi: 10.1088/1755-1315/655/1/012040.
- [176]S. O. Abioye ve diğerleri, "İnşaat sektöründe yapay zeka: Mevcut durum, fırsatlar ve gelecekteki zorluklar üzerine bir inceleme," *J. Build. Eng.*, cilt 44, s. 103299, Aralık 2021, doi: 10.1016/j.job.2021.103299.
- [177]A. Dimri, A. Nautiyal ve D. A. Vaish, "Hindistan'da Atık Kutusu ve Atık Geri Dönüşüm Sisteminin Ana Hatları ve Geliştirilmesi," *Int. J. Tech. Res. Sci.*, cilt Özel, no. Issue3, pp. 31-37, Oct. 2020, doi: 10.30780/specialissue-ICACCG2020/038.
- [178]N. Janbi, I. Katib, A. Albeshri ve R. Mehmood, "Daha Akıllı IoE için Hizmet Olarak Dağıtılmış Yapay Zeka (DAIaaS) ve 6G Environments," *Sensors*, cilt. 20, no. 20, s. 5796, Ekim 2020, doi: 10.3390/s20205796.
- [179]L. N. Thalluri ve diğerleri, "Edge Computing kullanan Yapay Zeka Destekli Akıllı Şehir IoT Sistemi," *2021 2. Uluslararası Akıllı Elektronik ve İletişim Konferansı (ICOSEC)*, Ekim 2021, s. 12-20. doi: 10.1109/ICOSEC51865.2021.9591732.
- [180]A. Aliyev, "Yapay Zeka ve Kuantum Çağı: Proje Yönetimi Uygulamalarını Dönüştürmek," *J. Futur. Artif. Intell. Technol.*, vol. 1, no. 4, pp. 348-370, Ocak 2025, doi: 10.62411/faith.3048-3719-59.
- [181]S. Phuyal, D. Bista ve R. Bista, "Akıllı Üretimin Zorlukları, Fırsatları ve Gelecek Yönelimleri: Son Teknoloji Bir İnceleme," *Sürdürülebilirlik. Futur.*, vol. 2, p. 100023, 2020, doi: 10.1016/j.sfr.2020.100023.
- [182]M. A. Al-Sharafi ve diğerleri, "Z kuşağının yapay zeka ürünlerini kullanımı ve bunun çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkisi: Kùltürler arası bir karşılaştırma," *Comput. Human Behav.*, vol. 143, p. 107708, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.chb.2023.107708.
- [183]A. B. Brendel, M. Mirbabaie, T.-B. Lembecke, ve L. Hofeditz, "Ethical Management of Artificial Intelligence," *Sustainability*, vol. 13, no. 4, s. 1974, Şubat 2021, doi: 10.3390/su13041974.
- [184]T. Baddegama, H. Ariyasena, S. Wijethunga, M. Bowaththa, D. Nawinna ve B. Attanayake, "IOT ve Makine Öğrenimi Kullanarak Kentsel Sri Lanka için Katı Atık Yönetim Sistemi," *2022 4. Uluslararası Bilgisayarda Gelişmeler Konferansı (ICAC)*, Aralık 2022, s. 222-227. doi: 10.1109/ICAC57685.2022.10025135.
- [185]G. K. İjmaru, L.-M. Ang, and K. P. Seng, "Swarm Intelligence Internet of Vehicles Approaches for Opportunistic Data Collection and Traffic Engineering in Smart City Waste Management," *Sensors*, vol. 23, no. 5, s. 2860, Mar. 2023, doi: 10.3390/s23052860.
- [186]S. Heikkilä, G. Malahat ve I. Deviatkin, "From waste to value: enhancing circular value creation in municipal solid waste management ecosystem through artificial intelligence-powered robots," in *Sustainable and Circular Management of Resources and Waste Towards a Green Deal*, Elsevier, 2023, pp. 415-428. doi: 10.1016/B978-0-323-95278-1.00014-0.
- [187]S. Sharma ve S. Shrestha, "Integrating HCI Principles in AI: A Review of Human-Centered Artificial Intelligence Applications ve Zorluklar," *J. Futur. Artif. Intell. Technol.*, vol. 1, no. 3, s. 309-317, Aralık 2024, doi: 10.62411/faith.3048-3719-47.
- [188]E. Singh, A. Kumar, R. Mishra ve S. Kumar, "COVID-19 pandemisi sırasında katı atık yönetimi: Geri kazanım teknikleri ve responses," *Chemosphere*, vol. 288, p. 132451, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.132451.
- [189]A. Martikkala, B. Mayanti, P. Helo, A. Lobov ve I. F. Ituarte, "Akıllı tekstil atık toplama sistemi - Dinamik rota optimizasyonu IoT ile," *J. Environ. Manage.*, vol. 335, p. 117548, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.117548.
- [190]S. Mousavi, A. Hosseinzadeh ve A. Golzary, "Akıllı atık toplamanın zorlukları, son gelişmeler ve fırsatlar: A review," *Sci. Total Environ.*, vol. 886, no. 163925, p. 163925, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.163925.
- [191]A. E. Ba Alawi, A. Y. A. Saeed, F. Almashhor, R. Al-Shathely ve A. N. Hassan, "Solid Waste Classification Using Deep Learning Techniques," *2021 Uluslararası İleri Teknoloji ve Mühendislik Kongresi (ICOTEN)*, Temmuz 2021, s. 1-5. doi: 10.1109/ICOTEN52080.2021.9493430.
- [192]J. Li ve J. Huang, "Çin'in güneş enerjisinin genişlemesi: Zorluklar ve politika seçenekleri," *Renew. Sürdürülebilir. Energy Rev.*, vol. 132, no. 110002, s. 110002, Ekim 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.110002.
- [193]M. T. Munir, B. Li ve M. Naqvi, "Temiz bir kaynak olarak makine öğrenimi ile kentsel katı atık yönetiminde (MSWM) devrim yaratmak: Fırsatlar, zorluklar ve çözümler," *Yakıt*, cilt. 348, no. 128548, s. 128548, Eylül 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2023.128548. [194]Y. Amirsoleymani, O. Abessi, and Y. E. Ghajari, "A spatial decision support system for municipal solid waste landfill sites (case study: The Mazandaran Province, Iran)," *Waste Manag. Res. J. a Sustain. Circ. Econ.*, vol. 40, no. 7, pp. 940-952, Jul. 2022, doi: 10.1177/0734242X211060610.
- [195]J. Akinode ve S. Oloruntoba, "Artificial Intelligence in the Transition to Circular Economy," *Am. J. Eng. Res.*, vol. 9, no. 6, pp. 185-190, 2020.
- [196]D. V. Yevle ve P. S. Mann, "Atık yönetimi için yapay zeka tabanlı sınıflandırma: Taksonomi, sınıflandırma ve amp; gelecek yönüne dayalı bir anket," *Comput. Sci. Rev.*, cilt 56, s. 100723, Mayıs 2025, doi: 10.1016/j.cosrev.2024.100723.