



resources

IMPACT
FACTOR
3.6

CITESCORE
7.2

Teknik Not

Döngüsel Etkinleştiricisi Atıklarının Yapay Zeka Ekonomisinin Olarak Belediye Ayırıştırılmasında

Henning Wilts, Beatriz Riesco Garcia, Rebeca Guerra Garlito, Laura Saralegui Gómez ve Elisabet González Prieto

Özel Sayı

Belediye ve Endüstriyel Atık Yönetimi

Düzenleyen

Dr. Eva Pongrácz ve Dr. Jenni Ylä-Mella



<https://doi.org/10.3390/resources10040028>



Döngüsel Ekonominin Etkinleştiricisi Olarak Belediye Atıklarının Ayırıştırılmasında Yapay Zeka

Henning Wilts ^{(1)*}, Beatriz Riesco Garcia ⁽²⁾, Rebeca Guerra Garlito ², Laura Saralegui Gómez ⁽³⁾
ve Elisabet González Prieto ³

- ¹ Wuppertal İklim, Çevre ve Enerji Enstitüsü gGmbH, 42103 Wuppertal, Almanya
² Guadalajara Akıllı Altyapı İnovasyon Merkezi, 19005 Guadalajara, İspanya; briesco@ci3.es (B.R.G.); rguerra@ci3.es (R.G.G.)
³ Ferrovial Services, 28050 Madrid ve 08038 Barselona, İspanya; laura.saralegui@ferrovial.com (L.S.G.); e.gonzalez@ferrovial.com (E.G.P.)
* Yazışmalar: henningwi@wupperinst.org

Özet: Kısa süre önce tamamlanan "Belediye atıkları için ZRR" araştırma projesi, manuel ayırıştırmanın yapay zekaya sahip bir robot (ZRR) tarafından ayırıştırma ile desteklenmesi veya değiştirilmesi yoluyla belediye atık ayırıştırma tesislerinin otomasyonunu test etmeyi ve değerlendirmeyi amaçlamıştır. Hedefler, mevcut geri dönüşüm oranlarını ve geri kazanılan malzemelerin saflığını artırmak; mevcut reddedilen akışlardan ek malzemeler toplamak; ve diğer şeylerin yanı sıra robotların bakımına odaklanabilecek işçilerin çalışma koşullarını iyileştirmektir. Projenin deneysel sonuçlarına dayanan bu makale, bildiğimiz kadarıyla hacimli kentsel katı atıkların (MSW) ayırıştırılması ve tam ölçekli bir atık arıtma tesisinde kurulum için ilk uygulama girişimi olan yapay zekaya dayalı robotik ayıklama sisteminin eğitim ve işletiminin ana sonuçlarını sunmaktadır. Araştırma projesinin temel soruları arasında (a) ayıklama sürecinin kalitesini değerlendirmek için test protokollerinin tasarımı ve (b) temel yapay zeka ve veri tabanının eğitiminin ilk altı ayındaki performans kalitesinin değerlendirilmesi yer almaktadır.

Anahtar Kelimeler: yapay zeka; döngüsel ekonomi; belediye katı atığı



Alıntı: Wilts, H.; Garcia, B.R.; Garlito, R.G.; Gómez, L.S.; Prieto, E.G. Döngüsel Ekonominin Etkinleştiricisi Olarak Belediye Atıklarının Ayırıştırılmasında Yapay Zeka. *Kaynaklar* **2021**, *10*, 28. <https://doi.org/10.3390/resources10040028>

Akademik Editörler: Eva Pongrácz ve Jenni Ylä-Mella

Alındı: 10 Ocak 2021
Kabul edildi: 18 Mart 2021
Yayınlanma tarihi: 29 Mart 2021

Yayıncının Notu: MDPI, yayınlanan haritalardaki yetki iddiaları ve kurumsal ilişkiler konusunda tarafsız kalmaktadır.



Telif hakkı: © 2021 yazarlar tarafından. Lisans sahibi MDPI, Basel, İsviçre. Bu makale Creative Commons Attribution (CC BY) lisansının hüküm ve koşulları altında dağıtılan açık erişimli bir makedir (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Giriş

Yapay zeka ve robotların ayırıştırma işleminde kullanılması, gelecekte geri dönüşüm ekonomisi anlamında atıklardan yüksek kaliteli ikincil hammadde üretimine önemli bir katkı sağlayabilir. Avrupa İnovasyon ve Teknoloji Enstitüsü (EIT) Climate-KIC tarafından finanse edilen bir pilot çalışma çerçevesinde, Ferrovial Services, NTU International ve Wuppertal Enstitüsü liderliğindeki bir Avrupa araştırma konsorsiyumu böyle bir yapay zeka çözümünü test etti ve değerlendirdi. Robot, Barselona yakınlarında mevcut bir belediye atık ayırıştırma tesisine kurulmuş ve gerçek belediye atıkları üzerinde test edilmiştir. Sonuçlar, ilgili malzeme akışlarının ayıklama kalitesi ve saflığının yanı sıra sosyo-ekonomik açıdan ilk tahminler açısından değerlendirilmiştir. Sonuçlar, dijital atık yönetiminin hem fırsatları hem de riskleri hakkında ilk sonuçların çıkarılmasına olanak sağlamıştır: evsel atık gibi heterojen atık akışları, robotik sistemler için hala önemli zorluklar teşkil etmekte, ancak aynı zamanda test aşamasında ayırma kalitesinin geliştirilmesi için etkileyici öğrenme eğrileri sunmaktadır. Genel olarak, teknolojik çözümlerin tek başına geri dönüşüm yönetimine sığırma yaptıramayacağı açıktır; ancak ürün tasarımından bertarafına kadar tüm değer zincirindeki dönüşümün giderek daha önemli bir parçası haline gelmektedir.

Mevcut doğrusal üretim ve tüketim modellerimizi, ürünlerin, bileşenlerin ve hammaddelerin değerinin ve kalitesinin kullanım aşamalarının sonunda en iyi şekilde korunduğu döngüsel bir sisteme dönüştürmek, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmanın yanı sıra gelecekteki endüstriyel rekabet gücünü sağlamak için giderek daha önemli bir zorluk olarak görülmektedir [1–3]. Bu çerçevede, Avrupa Komisyonu 2015 yılında Döngüsel Ekonomi

Bu karmaşık dönüşüm için kilit eylem alanlarını belirten Eylem Planı. Döngüsel ekonomi açıkça atık perspektifinin ötesine geçse de, endüstriyel süreçlere yeniden beslenebilecek yüksek kaliteli ikincil hammaddelerin geri kazanılması için atık yönetiminin de radikal bir şekilde iyileştirilmesi gerekecektir. Özellikle karşılaşılan zorluklardan biri, giderek sınırlarına ulaşan çeşitli belediye atığı türleri için ayrıştırma tesislerinin optimizasyonudur. Bu nedenle, atık ayrıştırma verimliliğinin yüksek bir seviyede olmasına rağmen durgunlaşması şaşırtıcı değildir. Mevcut Avrupa belediye atık ayırma tesisleri, torba açıcılar, tromeller, balistik ayırıcılar, optik ayırıcılar, mıknatıslar, girdap akımı ayırıcıları ve pnömatik toplama sistemleri gibi ekipmanlar sayesinde oldukça otomatiktir. Bununla birlikte, bazı ayıklama görevlerinin hala manuel olarak (elle toplama) gerçekleştirilmesi gerekmektedir; örneğin, geri kazanılan malzemenin kalite kontrolü ve uygun şekilde ayıklanmadığı takdirde yakılan veya bertaraf edilen önemli sayıda geri dönüştürülebilir madde içeren büyük boyutlu ve atık akışlarının manuel olarak ayıklanması. Her iki durumda da bunlar ergonomisi düşük çalışma ortamlarında (gürültü, atıklarla doğrudan temas, ağır nesnelerin kaldırılması ve taşınması) gerçekleştirilen görevlerdir ve vardiya sırasında performans düşer. Ayıklama tesislerinde malzeme geri kazanımının önündeki temel engeller arasında keskin nesneler ve kokular, düşük ergonomi ve verimlilik kayıpları yer almaktadır [4].

Bu çerçevede, atık yönetimde ve özellikle belediye atıklarının ayrıştırılmasında robotik gibi dijitalleşme teknolojilerinin kullanılması, döngüsel ekonomiye dönüşümde belirleyici bir sonraki adım olacaktır [5]. Belirlenen engellerin birçoğu bilgisayarla görme, makine öğrenimi ve robotik (optik tanıma ve akıllı değerlendirme algoritmalarına dayalı) yardımıyla ele alınabilir. Yapay zeka ve robotik teknolojisinin gelişi, belediye atık ayrıştırma tesislerinin tasarım ve işletiminde devrim yaratma potansiyeline sahiptir [6]. Bu, operasyonel verimliliğin artmasına ve dolayısıyla belediye atıklarının daha sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesine yol açabilir.

Bununla birlikte, mevcut literatürün ilk incelemesi, yapay zekanın atık ayrıştırmayı tam olarak nasıl geliştirdiğine dair açık bir ampirik veri eksikliği olduğunu göstermiştir. Mevcut literatürün çoğu ya tamamen kavramsal bir düzeyde kalmakta ve sadece belirli faaliyetlerin nasıl veya hangilerinin kullanılabileceğini açıklamakta ya da belirli robot kurulumlarının güçlü ve zayıf yönlerini değerlendirmeye olanak tanıyacak gerçek veriler sağlamamaktadır [7-11]. Örneğin Leif (2018), geri dönüşüm piyasalarıyla daha iyi bir uyum gibi robotik ayrıştırmanın beş potansiyel temel avantajını tanımlamakta, ancak pilot çalışmalara ve ekonomik doğrulamaya duyulan ihtiyacı da vurgulamaktadır [10]. Bu makale, farklı malzemeler için çeşitli veri noktalarına sahip şeffaf bir değerlendirme protokolüne dayalı veriler sağlayarak bu özel boşluğu ele almayı amaçlamaktadır.

Bu makalenin ve altında yatan araştırmanın yönlendirici araştırma sorusu, döngüsel ekonomi için yapay zekanın sıklıkla iddia edilen katkılarının ampirik olarak doğrulanması olmuştur. Böyle bir robotun ilk eğitim aşamasını gerçek yaşam koşulları altında değerlendirerek, robotların malzeme döngülerini kapatmada tam olarak nasıl kullanılabileceğine dair yeni bilgiler sağlamayı amaçlamaktadır.

2. Atık Ayrıştırmada Dijitalleşme Fırsatları

Atık ayırma tesisleri, bertaraf altyapısı ile birlikte, doğrudan üretime yönlendirilebilecek veya yerel veya küresel pazarda hammadde olarak satılabilecek az çok hassas bir şekilde ayrılmış malzeme fraksiyonlarını çıkararak ve nihai bertaraftan kaynaklanan atık miktarını azaltarak atık yönetiminin değer zincirinde filtre görevi görür. Bu nedenle, belediye atıklarının ayrıştırılması son yıllarda önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Genel olarak, atıkları ayrı ayrı malzeme akışlarına ayırmak için iki teknik yaklaşım vardır: manuel ayırma ve otomatik/mekanik ayırma. Çoğu durumda, ayrıştırma tesislerinde manuel ve otomatik ayrıştırma tekniklerinin bir kombinasyonu kullanılır, çünkü ayrıştırma sürecindeki bazı adımlar en iyi şekilde manuel olarak gerçekleştirilir. Diğer adımlar ise daha hedefe yönelik, daha güvenli ve uygun maliyetli otomasyondan faydalanır. Farklı atık akışlarını ayırmak için kullanılabilecek çeşitli teknolojiler vardır. Bunlar atık akışının türüne bağlıdır, örneğin atık eleme (trommel, disk veya salınlımlı elek), havalı ayırma (zikzak, döner ve çapraz akışlı sınıflandırıcılar veya emme başlığı), balistik ayırma, film tutucular, manyetik a y ı r m a ,

girdap akımı ayırma, sensör teknolojisi ve manuel ayıklama. Çoğu zaman bu teknolojiler bir arada kullanılır [11].

Robotik teknoloji, bazı atık akışlarının ayıklama performansında önemli bir artış vaat etmektedir ve insan müdahalesi olmadan ince ayıklamaya olanak sağlayabileceğinden, tehlikeli maddeler içeren atık akışlarında özellikle değerli olabilir. Tipik olarak, bir konveyör bandı atığı bir dizi sensörün (örneğin, görünür spektral aralıklı kameralar, spektroskopik yakın kızılötesi kameralar, 3D lazer tarayıcılar ve metal sensörleri) önünden geçirirken, robot kolları konveyör bandının üzerinde çalışır ve atık altından geçerken malzemeleri çıkarır. Robot teknolojisinin başlıca avantajlarından biri, tek bir atık türüne odaklanmak zorunda olmayıp farklı türleri aynı anda toplayabilmesi ve bunları ayrı konteynerlerde depolayabilmesidir. Ayırma için bir malzemenin fiziksel özelliklerine dayanmayan ayırma teknikleri, malzemenin tanımlanmasını gerektirir. Bu teknolojilerin doğruluğu ve hassasiyeti gelişmeye devam ettikçe, atık akışlarındaki farklı malzemeleri tanımlamak için yeni teknolojiler geliştirilmektedir. Örneğin, RFID etiketlerinin ambalajlarda kullanılması, ambalajların ayrı ayrı tanımlanmasını ve sınıflandırılmasını sağlamak için düşünülmüştür. Bu konsept, farklı plastik türlerinin hassas bir şekilde tasnif edilmesini sağlamak için RFID etiketlerinin tek tek ambalaj ürünlerine yerleştirilmesini ve bunların daha sonra toplama sırasında veya tasnif sisteminde okunabilmesini öngörmektedir [12].

Gundupalli ve diğerleri (2017), mekanik atık işleme sürecini tamamen otomatikleştirmek için mevcut farklı ticari çözümleri tanımlayan kapsamlı bir pazar analizi gerçekleştirmiştir [13]. Analiz edilen seçenekler arasında ZRR2 sistemi de bulunmaktadır: dünyanın yapay zekaya (AI) sahip ilk robot güdümlü atık ayırma cihazı olarak kabul edilen bir geri dönüşüm robotu. Bilgisayar görüşü ve derin öğrenme algoritmaları ile donatılmış bu robotlar, katı inşaat ve yıkım (C&D) atıklarından hassas bir şekilde seçilmiş atık fraksiyonlarını ayırmaktadır. Tek bir ZRR robot kolu, %98'e varan saflıkta dört farklı fraksiyonu işleme kapasitesine sahiptir. Bununla birlikte, ZRR robotu şimdiye kadar sadece inşaat ve yıkım atıkları için kullanıldı ve verimliliğini artırmak ve tipik inşaat malzemeleri için atık ayırma maliyetini azaltmak için özel olarak geliştirildi. Bu araştırma projesinin bir parçası olarak, ZRR robotu ilk kez belediyeye ait evsel atık akışlarını ayırmak için kullanılmıştır. Bu, teknolojinin kapsamının genişletilmesini gerektiren farklı ayırma koşulları, atık bileşimleri ve morfolojisi nedeniyle çok zorlu bir senaryodur. ZRR robotu özellikle aşağıdaki malzemeleri tanımlayabilmeli ve ayırabilmelidir: Metaller (demir ve demir dışı), ahşap, sert plastikler (karışık plastikler ve hortumlar ve borular), sert malzemeler (karışık malzemeler, beton, tuğla, kireç taşı, asfalt, vb.), karton ve plastik torbalar renklerine göre. Ayrıca teknoloji, kavrama sistemini yeni atık koşullarına da uyarlamalıdır. Bir belediye atık akışıyla çalışmak için robot bu projede yeni malzemeleri tanımak ve ayırmak üzere eğitilmelidir: tekstil, karton (OCC), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), polipropilen (PP), Tetra Pak ve baskı ve yeşil atıklar. Robot, belediye atıklarıyla ilgili uygulamasında, algılamayı engelleyebilecek daha zorlu koşullar altında da çalışır: daha yüksek taşıma hızları, atığın konveyör bandı üzerinde çok katmanlı dağılımı, toz, alkaliler ve organik atıkların varlığı.

3. Materyaller ve Yöntemler

Yukarıda belirtildiği gibi, bu çalışma bu tür robot sistemlerinin güçlü ve zayıf yönleri hakkında sistematik olarak kaydedilmiş ampirik veriler sağlamayı amaçlamaktadır. Kentsel katı atıkların daha iyi ayrıştırılmasını sağlayan bir unsur olarak yapay zekanın değerlendirilmesine yönelik ampirik bir temel geliştirmek amacıyla endüstriyel ölçekte bir pilot tesis kurulmuştur. Sistem, Barselona'da yılda ortalama 300.000 ton belediye atığı alan Ecorparc4 belediye atık ayrıştırma tesisinde kurulmuştur.

Aşağıda sistemin kurulumu ve temel özelliklerinin yanı sıra ayıklama doğruluğu ve verimliliğinin sistematik olarak değerlendirilmesine yönelik metodolojik yaklaşım açıklanmaktadır. Bu, standartlaştırılmış bir veri kayıt protokolünün geliştirilmesini gerektirmiştir.

3.1. Test Sisteminin Kurulumu

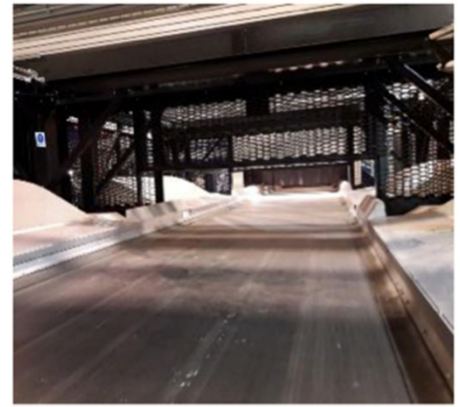
Proje kapsamındaki deneysel testler Finlandiya'dan ZenRobotics'in ZRR2 robot sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Robot, bir kamyon, bir metal dedektörü, yüksek çözünürlüklü bir RGB kamera, bir NIR sensörü (yakın kızılötesi spektrum), bir VIS sensörü (görsel ışık spektrumu) ve derin öğrenme tabanlı bir yazılım dahil olmak üzere çeşitli sensörlerle donatılmış (bir konveyör bandının üzerine yerleştirilmiş) iki robot kolundan oluşuyordu. Tesis içerisinde robot, hacimli atık konveyör bandının (bkz. Şekil 1) ve bu tesiste henüz geri dönüştürülmemiş bir atık akışının üzerine yerleştirilmiştir. Sistemin tamamı sekizden fazla farklı hazneye (robot kolu başına dört hazne) sahip bir platform üzerinde yer almaktadır ve robot girişine tek katmanlı bir akış sağlamak veya teknolojiyi diğer atık akışlarıyla test etme olasılığı gibi hususları dikkate almak için mevcut tesis ayırma sürecine entegre edilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 1. İspanya, Barselona'daki Ecorparc 4'te robot konuşlandırması: (a) Toplama kolunun önden görünümü; (b) toplama kolunun yandan görünümü; (c) ayırma bandı [14].

Projenin başında, literatür değerlendirmeleri ve uzman görüşmeleri temelinde bir değerlendirme metodolojisi ve somut test protokolleri geliştirilmiştir. Bu, robotun ayıklama kalitesinin değerlendirilmesini mümkün kılmalıdır. Bu bağlamda, girdi malzemeleri, süreç ve başlangıç malzemeleri için temel parametreler tanımlanmıştır. Ürün grupları PET şişeler, plastik filmler (LDPE), alüminyum, demir içeren metaller, PE kutular, büyük PE şişeler, kağıt/karton, PP, (işlenmemiş) ahşap, tekstil ürünleri, Tetra Pak ve bitkisel maddelerdir. Proje kapsamında, eğitim ve değerlendirme için her biri 250 kg'lık numuneler kullanılmıştır. Süreç parametreleri için, ayırma bandı hızı (m/s), seçilen malzemeler için hazne konumunun yapılandırılması, öncelik ayarları ve tutucu sistem ayarları kaydedilmiştir. Çıktı parametreleri, bir yandan kg/dak (toplama/dak) ve etkin toplama yüzdesi cinsinden robot verimine (iki kol için global) ve diğer yandan ayıklama verimliliğine bölünmüştür. Ön işleme sisteminin seçim verimliliği, ayıklama kalitesi/saflığı (ağırlık yüzdesi olarak hedef malzemelerdeki safsızlıklar ve ayıklanmamış artık atıklardaki hedef malzemelerin oluşumu), yanlış ayıklanmış ürünlerin rengi ve boyutu ve geri kazanım oranı (yüzde olarak girdi akışındaki her bir kg fraksiyon başına kg geri kazanım) açısından analiz edilmiştir. ZRR2 ile yapılan testler robotun eğitilmesiyle başlamış, ardından ayırma işlemi optimum besleme koşulları altında (yani optimum hız ve atık akışı miktarı) test edilmiştir. Son test, atık akışlarının akışının uygulamada gerekli olan miktara kadar sürekli olarak artırıldığı sürekli bir testten oluşuyordu.

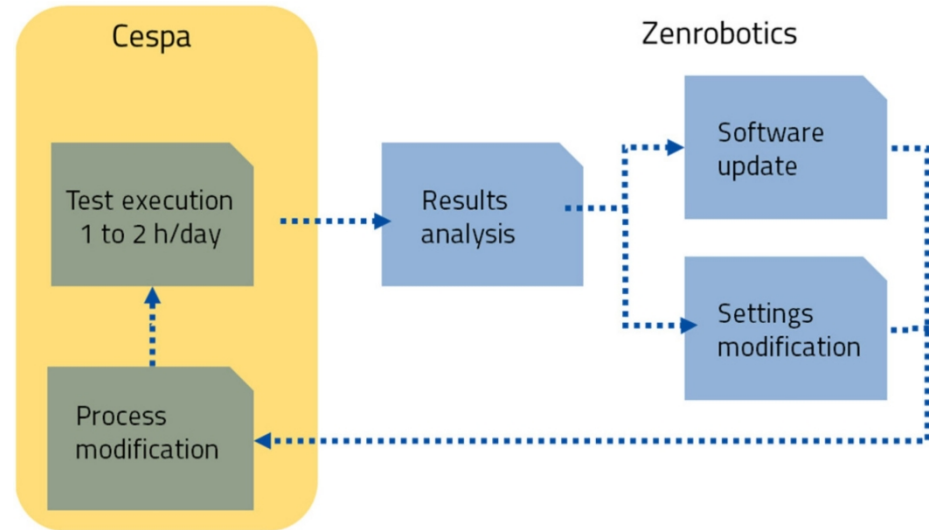
3.2. Robotun Eğitimi

İlk eğitim aşamasında robot, istenen atık ürünleri tanımak ve ayırmak üzere eğitilmiştir. Doğru besleme koşullarına ulaşıldığında, ZRR robotunun yapay zekasının 13 farklı malzemeyi veya atık akışını tanımlamak için eğitilmesi gerekiyordu: Demirli

metaller, demir dışı metaller, tekstil, karton, HDPE, LDPE, PP, ahşap, PET, kağıt, diğer karışık plastikler, Tetra Pak, baskı ve yeşil atıklar. Robot seçilen malzeme ile günde iki saat beslendi. Eğitim prosedürü 10 adıma bölünmüştür:

1. Farklı boyutlarda, şekillerde ve malzeme türlerinde 1000 üründen kaçınmak için yeni fraksiyondan örnekler toplayın.
2. İstihbarat Birimindeki yeni bölüme isim verin.
3. Numuneleri ayırma bandına manuel olarak besleyin.
4. ZRR sensör ünitesi yeni malzemeyi tarar.
5. ZRR beyin analiz verileri.
6. ZRR akıllı kavrayıcı nesneleri seçer.
7. Reddedilen nesneleri alın.
8. Bu nesneleri tekrar ayırma bandına besleyin.
9. ZRR sensör ünitesi bu nesneleri tekrar tarar.
10. ZRR yeni bir kesir öğrendi.

Atık akışının karmaşıklığına bağlı olarak, yukarıda açıklanan süreç, bu belirli malzeme akışı için istenen sonuçlar elde edilene kadar birkaç kez tekrarlanmıştır. Aşağıdaki Şekil 2, bu robot eğitiminin prosedürünü göstermektedir.



Şekil 2. Robot eğitim prosedürü [14].

3.3. Optimal Besleme Koşulları Altında Test

Optimum besleme koşulları altında yapılan sonraki testler, robota tüm nesnelerin tek bir katman halinde düzenlendiği ve üst üste binmediği tekilleştirilmiş bir tek katman sağlamaktan oluşuyordu, yani ideal besleme koşulları altında. Bu koşullar altında, geri dönüştürücünün eğitiminin ve veri tabanı kurulumunun ne ölçüde başarılı olduğunu ve referans saflığın ve ayıklanan fraksiyonların geri kazanım derecesinin nasıl tahmin edilebileceğini bulmak mümkün olmuştur.

$$\text{Saflık (\%)} = \frac{\text{Hedef malzeme miktarı}}{\text{Haznedeki ayıklanmış malzemenin toplam ağırlığı}} \quad (1)$$

$$\text{Geri kazanım (\%)} = \frac{\text{Toplanan hedef malzeme miktarı (hazne)}}{\text{Beslenen toplam hedef malzeme miktarı}} \quad (2)$$

Eğitimin ardından, robotun performansı Kasım 2018 ve Mart 2019 tarihleri arasında fraksiyon saflığı ve atık geri kazanımı açısından beş testte test edilmiştir. Bu beş testte iki farklı test yöntemi kullanılmıştır. Bir yandan, testler düşük bir besleme hızıyla (yaklaşık 1000 pikap/saat) gerçekleştirilmiş ve robota daha fazla zaman tanınmıştır.

ve diğer yandan düşük bir ayıklama oranıyla (test başına yalnızca 3 ila 6 materyalin ayıklanması).

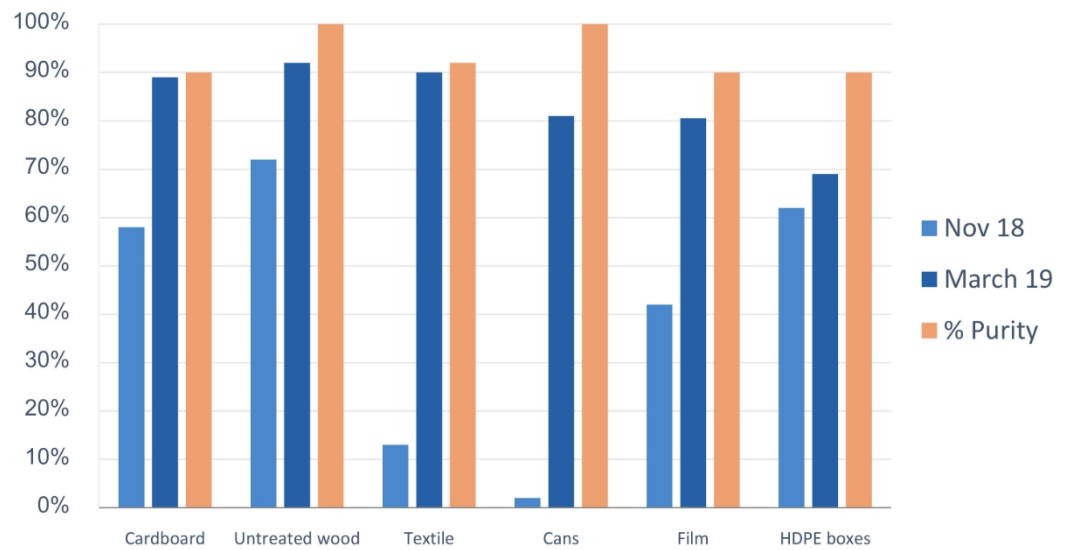
Bu ilk aşamada, robota 15-30 dakikalık bir süre boyunca atık akışından önceden sınıflandırılmış atıklar manuel olarak verilmiştir. Deneyin sonunda, atık ayrımlarının yanı sıra geri kazanılan tüm fraksiyonlar tartılmış, performans hesaplanmış ve gerekli ayarlamalar yapılmıştır. Operasyonel testlerde robot, gerçek proses koşulları altında daha uzun bir süre boyunca tasarlanan malzeme akışlarıyla beslenmiş veya beslenmiştir.

Tasarlanan testler, algılama verimliliği, toplama verimliliği, robot kullanılabilirliği ve fraksiyon saflığının yanı sıra temel işletim değişkenlerinin robotun performansı üzerindeki etkisini ölçerek robotun performansını değerlendirdi. İlk olarak, süreç parametreleri değiştirilerek robot testi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra sonuçlar analiz edildi ve ZenRobotics robot yazılımını derin öğrenme algoritmalarına dayalı olarak güncelledi. Testlerin amaçları aşağıdaki gibidir:

1. ZRR'yi ilgili kesirleri tanıması için eğitin.
2. İdeal koşullarda saflık ve geri kazanım oranını belirleyin.
3. Maksimum besleme oranını ve ilgili saflığı belirleyin.
4. Robotu büyük yığınları görmezden gelmesi için eğitin.
5. Operasyonel kriterleri karşılamak için robotun nasıl besleneceğini öğrenin.

4. Sonuçlar

Sunulan süreç kullanılarak, robot tanımlama eğitimi için 13 farklı malzeme için fraksiyon başına 500 ila 1000 parça toplandı ve ardından ayırma bandına manuel olarak beslendi. Yeterli performansa ulaşmak için birkaç yinleme gerekmiştir. Şekil 3, tekli testlerde gerçekleştirilen ana malzeme türleri için robot testinin sonuçlarını göstermektedir:



Şekil 3. Bağımsız test sonuçları [14].

Sistemik eğitim ve çalışma sonucunda robotun 13 malzemenin tamamını algılama kapasitesi artırılarak robotun algılama kapasitesi neredeyse iki katına çıkarılabilmektedir. Daha sonra sistemin kapasitesinin artırılması ve güncellenebilir, akıllı, kendi kendine öğrenen bir yazılım uygulanarak atık akışındaki yeni malzemeleri tespit edebilmesi planlanmaktadır.

Bir sonraki aşamada, üretim için istenen verim elde edilene kadar verim kademeli olarak artırıldı. Bazı durumlarda, malzemenin tek katmanlı olması artık garanti edilemiyor, nesneler üst üste binmeye, birbirine dokunmaya ve birbirini örtmeye başlıyordu. Bu koşullar altında, ZRR robotu nesneleri algılama ve taşıma konusunda giderek artan zorluklar gösterdi.

Şimdiye kadar yapılan testlerde 13 malzeme için ortalama %90 saflık elde edilmiştir. Şekil 4, malzemelerin genel sonuçlarını göstermektedir: alüminyum, folyo, yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), karton, tekstil ve ahşap.



Şekil 4. Alüminyum, film, HDPE, karton, tekstil ve ahşap için eğitim testi sonuçları [15].

5. Tartışma

Elde edilen sonuçlar, ayrıştırılmış atık fraksiyonlarının saflığı açısından umut vericidir, çünkü neredeyse tüm ayrıştırılmış malzemelerdeki saflık %100'e varan değerlerle orijinal beklentileri açıkça aşmıştır. Bununla birlikte, atık geri kazanımına ilişkin sonuçlar o kadar başarılı olmamıştır çünkü geri kazanımın sadece %13'ünün (tekstil) (veya alüminyum için daha da azının) elde edildiği belirli oranlar vardır. Bu sonuçlara yol açan zorluklar, inşaat ve yıkım atıklarına kıyasla belediye atıklarının farklı bileşimi ve morfolojisi ile ilgilidir, bu da daha düşük tespit ve dolayısıyla daha düşük ayırma performansı ile sonuçlanmaktadır.

Ayrıca, robotların kullanımına yönelik bazı zorluklar da tespit edilebilmiştir. Bir 20 Mb/20 Mb veri ağı ile optimize edilebilecek yüksek performanslı bir iletişim veri ağı gereklidir. Uzun atık parçaları (örneğin tekstil, folyo, kağıt ve karton) için kavrama sürecinde de zorluklar vardır. Atıkların dengesiz girişi de bir ölçüm sensörü ile çözülebilecek bir zorluktur. Son olarak, hız konveyörünü ayarlayarak ve robotik atık besleme sistemini yeniden tasarlayarak ortadan kaldırılması gereken, konveyör bandı üzerinde çok katmanlı ve homojen olmayan atık dağılımı sorunu vardır [4].

ZRR2 bugüne kadar test edilen 13 atık akışının tamamında ortalama %97 saflık elde etmiştir. Şekil 5 robot testlerinden elde edilen genel sonuçları ve bulguları göstermektedir. Buna ek olarak, robot ayıklama sonuçlarını iyileştirebilecek bazı önlemler belirlenmiştir, örneğin ayıklayıcının haftalık olarak güncellenmesi, tesisin mekanik modifikasyonu, yazılım kavrama stratejisinin iyileştirilmesi ve atık ayıklama sürecinin uyarlanması, örneğin parçalama işlemi sırasında atıkları desteklemek için bir makaralı şutun kurulması veya hacimli atık akışının bir kısmının (çoğunlukla kapalı torbalar) tesis girişine yönlendirilmesi, bu da robotun işlemesi gereken atık miktarını azaltır.

Bildiğimiz kadarıyla bu, karışık belediye atıkları için yapay zeka tabanlı bir robotik ayırma sisteminin kullanımına ilişkin ampirik veriler sunan ilk bilimsel yayındır; bu sonuçları doğrulamak için bir sonraki adım diğer robot sistemleriyle bir karşılaştırma yapmak olmalıdır. Daha ileri testler, atık bertaraf tesisinin proses parametrelerini optimize ederek, örneğin hız bandının, dağıtıcı bandın ve hazne düzenlemesinin ayarlanmasıyla, geri kazanım verimliliğinin nasıl artırılabilirliğini de araştırmalıdır. Robotun çalışması sırasında gözlemlenen ana zorluklar, belediye atıklarının farklı bileşimi ve morfolojisi ile ilişkiliydi.

inşaat ve yıkım atıklarıyla karşılaştırıldığında, daha düşük tespit ve ayırma verimliliği ile sonuçlanır.

	Recognition	Purity	Recovery
Results	> 95 %	[82-100%] Average 97%	[4-93%] Average 67%
Lessons Learned	- High number of items in the classifier increases efficiency - Periodic classifier updating	- What the robot attempts to pick, it picks it with high efficiency - Mistakes are due to: - Recognition errors - Grasping of other materials together with targeted one	- High gap between recognition and sorting attempt due to: - Waste distribution - Flow rates - Grasping difficulties with long shaped waste - Material jams in collection hoppers and conveyer
Actions	Weekly classifier updating	- Mechanical modification of the plant to avoid clogging in the conveyer and hoppers; damages in the robot; ... - A.I. software grasping strategy improvement for particular materials - Ecoparc4 waste sorting process adjustment to favour steady waste distribution	

Şekil 5. Robot testinden elde edilen genel sonuçlar ve çıkarılan dersler [15].

6. Sonuçlar

Bu makalede sunulan ampirik sonuçların analizine dayanarak, yapay zekanın atık ayrıştırma ve kentsel katı atıklardan hammadde geri kazanımı üzerindeki genel çevresel etkileri hakkında ilk sonuçlar çıkarılabilir. Gerçek bir atık işleme tesisinin çalışma koşullarına daha fazla uyarılma ve optimizasyonun başarılı olması halinde, önemli faydalar sağlanabileceğine dair önemli kanıtlar var gibi görünmektedir: ekolojik bir bakış açısıyla, düzenli depolama sahalarında biriken atık miktarını azaltır ve Barselona'daki özel test uygulamasında vurgulandığı gibi geri dönüştürülebilir atıkların geri kazanımını artırır. Genel olarak, atık yönetiminin artan dijitalleşmesini çeşitli şekillerde entegre etmeye ve bunu yalnızca malzeme geri kazanım kotaları perspektifinden değerlendirmemeye hala ihtiyaç vardır. Örneğin robotların artan kullanımının, düşük nitelik gerektiren işlerin kaybına yol açması muhtemeldir; bu da çalışanlar arasında açıkça belirsizliğe yol açacaktır; aynı zamanda kaza risklerinin azaltılmasına yönelik fırsatları vurgulamaktadır. Bununla birlikte, evsel atıkların bileşimine ilişkin verilerin ticari kullanımı, veri koruma ile akla gelebilecek çatışmalara yol açmaktadır. Dijitalleşme için gelecekteki sürdürülebilirlik gündeminin bir parçası olarak artan dijitalleşmenin sistemik etkileri üzerine daha fazla araştırma yapılması gerekecektir; burada geri dönüşüm konusu, dijitalleşmeyi hem gelecekteki rekabet gücü hem de belirlenen sürdürülebilirliğe ulaşmak için bir araç olarak kullanmak amacıyla hangi çerçeve koşulların, şartnamelerin ve teşviklerin gerekli olacağını tartışmak için bir örnek olarak kullanılabilir hedefler [16].

Yazar Katkıları: Tüm yazarlar kavramsallaştırma ve metodolojiye eşit derecede katkıda bulunmuştur. H.W. yazım sürecinden, R.G.G., E.G.P., B.R.G. ve L.S.G. gözden geçirme ve düzenlemeden sorumludur. Tüm yazarlar makalenin yayınlanan versiyonunu okumuş ve kabul etmiştir.

Finansman: Bu araştırma projesi EIT Climate-KIC tarafından finanse edilmiştir.

Kurumsal İnceleme Kurulu Beyanı: Geçerli değil.

Bilgilendirilmiş Onam Beyanı: Geçerli değil.

Çıkar Çatışmaları: Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması beyan etmemektedir.

Referanslar

1. Ellen MacArthur Vakfı. *Döngüsel Ekonomiye Doğru: Hızlandırılmış Geçiş için İş Dünyası Gerekçeleri*; Ellen MacArthur Vakfı: Cowes, Birleşik Krallık, 2015.
2. Kirchherr, J.; Reike, D.; Hekkert, M. Döngüsel ekonominin kavramsallaştırılması: 114 tanımın analizi. *Kaynak. Conserv. Recycl.* **2017**, *127*, 221-232. [CrossRef]
3. Malzeme Ekonomisi. *Döngüsel Ekonomi. İklim Azaltımı için Güçlü Bir Kuvvet. Müreffeh ve Düşük Karbonlu Sanayi için Dönüştürücü İnovasyon*; Material Economics Sverige AB: Stockholm, İsveç, 2018.
4. González, E. *Atık Ayrıştırırmaya Uygulanan Robotik, Yapay Zeka ve Görme: Belediye Atıkları için ZRR*; EIT Climate-KIC: Porto, Portekiz, 2019.
5. Wilts, C.H.; Berg, H. Dijital döngüler ve dijital hurdalar: Dijitalleşme döngüsel ekonomide kaynak verimliliğini nasıl artırır; ve nerede kaynaklara mal olma eğilimindedir. *J. Waste Recycl.* **2018**, *3*. Çevrimiçi olarak mevcuttur: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:wup4-opus-69785> (4 Ocak 2021 tarihinde erişilmiştir).
6. ISWA. *Daha Temiz, Daha Sağlıklı Bir Gezegen İçin Birlikte Çalışmak*; ISWA Yıllık Raporu 2017; ISWA: Washington, DC, ABD, 2017.
7. Osterloh, L. Döngüsel Ekonomiye Etkinleştirmek için Atıkların Ayrıştırılması, Brüksel, TOMRA Sorting Solutions. 2017. Çevrimiçi olarak mevcuttur: <https://cdn.nimbu.io/s/gcj6927/channelentries/metfhvs/files/20171024%2011u55%20Osterloh%20L%20-%20TOMRA.pdf?kynqkq> (4 Ocak 2021 tarihinde erişilmiştir).
8. Maitrot, A. Otomatik Atık Ayıklama için Makine Öğrenimi, ENSTA Bretagne & Veolia. 2017. Çevrimiçi olarak mevcuttur: https://www.ensta-bretagne.fr/jaulin/rapport_pfe_lei%20zhu.pdf (4 Ocak 2021 tarihinde erişilmiştir).
9. Tarbell, A.K.; Tchong, D.; Lewis, M.R.; Newell, T. *Geri Dönüştürülebilir Konteynerlerin Ayrıştırılmasına Makine Öğreniminin Uygulanması*; University of Illinois at Urbana-Champaign Urbana: Urbana, IL, ABD, 2010.
10. Leif, D.; Yapay Zeka için Gerçek Etkiler. *Kaynak Geri Dönüşüm Dergisi*. 2018. Çevrimiçi olarak mevcuttur: <https://resource-recycling.com/recycling/2018/01/02/real-impacts-artificial-intelligence/> (4 Ocak 2021 tarihinde erişilmiştir).
11. McKinnon, D.; Fazakerley, J.; Hultermans, R. *Atık Ayrıştırma Tesisleri-Atıklardan Değer Çıkarma*; ISWA: Viyana, Avusturya, 2017.
12. Abdoli, S. Belediye katı atık yönetim sisteminde RFID Uygulaması. *Int. J. Environ. Res.* **2009**, *3*, 447-454.
13. Gundupalli, S.P.; Hait, S.; Thakur, A. Geri dönüşüm için kaynağında ayrıştırılmış kentsel katı atıkların otomatik olarak ayrıştırılması üzerine bir inceleme. *Atık Yönetimi*. **2017**, *60*, 56-74. [CrossRef] [PubMed]
14. Wilts, C.H.; Azak, G. *Belediye Atıkları için ZRR*; Ayrıştırma Nitelikleri Raporu; EIT Climate-KIC: Wuppertal, Almanya, 2019.
15. Wilts, C.H.; Garcia, B.R.; Garlito, R.G.; Goómez, L.S.; Prieto, E.G.; Kwik, C.; Johannesen, K.; Künstliche Intelligenz in der Siedlungsabfallsortierung als Wegbereiter der Kreislaufwirtschaft. Müll & Abfall. 2020. Çevrimiçi olarak mevcuttur: <https://www.muellundabfall.de/ce/kuenstliche-intelligenz-in-der-siedlungsabfallsortierung-als-wegbereiter-der-kreislaufwirtschaft/detail.html> (4 Ocak 2021 tarihinde erişilmiştir).
16. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. *Umwelt in Die Algorithmen! Eckpunkte für Eine Umwelt- politische Digitalagenda des BMU*; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit: Berlin, Almanya, 2019.