

# Yapay Zekâ Destekli Geri Dönüşüm Sistemleri: İklim Değişikliğine Karşı Sürdürülebilir Çözümler

Hilal Saygılı Balcı<sup>1</sup>

Tevfik Erdem<sup>2</sup>

## Özet

*İklim değişikliği, dünya genelinde karşı karşıya olduğumuz en acil sorunlardan biridir. Artan sera gazı emisyonları, eriyen buzullar, yükselen deniz seviyeleri ve sıklaşan aşırı hava olayları, bu sorunun doğrudan sonuçları arasındadır. Bu zorluklarla başa çıkmak için sürdürülebilir ve yenilikçi çözümler üretmek gerekmektedir. Yapay zekâ (YZ) destekli geri dönüşüm sistemleri, çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayarak, iklim değişikliği ile mücadelede etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır. Geri dönüşüm, doğal kaynakların korunması ve enerji tasarrufu sağlanması açısından kritik bir öneme sahiptir; ancak geleneksel yöntemler istenilen verimliliği sağlayamamaktadır. YZ teknolojileri, atıkların doğru sınıflandırılması, ayrıştırılması ve işlenmesi süreçlerinde devrim niteliğinde yenilikler sunmaktadır. Bu çalışmada, YZ destekli geri dönüşüm sistemlerinin mevcut uygulamaları ve gelecekteki potansiyelleri incelenerek, bu teknolojilerin geri dönüşüm sektörüne olan katkıları ve olası geliştirme alanları değerlendirilmektedir. Bu sayede, çevresel sürdürülebilirliğe yönelik stratejilerin geliştirilmesine ve iklim değişikliği ile mücadelede yenilikçi yaklaşımların benimsenmesine yönelik öneriler sunulmaktadır.*

## GİRİŞ

İklim değişikliği, küresel bir sorun olarak tüm insanlığın karşı karşıya olduğu karmaşık ve çözümü acil bir sorun olarak ön plana çıkmaktadır. Artan sera gazı emisyonları, eriyen buzullar, yükselen deniz seviyeleri ve sıklaşan aşırı hava olayları, küresel ısınmanın doğrudan sonuçları arasında

- 1 Arş. Gör., Öğretim Elemanı, Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, ORCID: 0000-0002-2668-838X, hilal.saygili@hbv.edu.tr
- 2 Prof. Dr., Öğretim Üyesi, Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, ORCID: 0000-0001-7658-1735, tevfik.erdem@hbv.edu.tr

yer almaktadır. Bu zorluklarla başa çıkmak için sürdürülebilir ve yenilikçi çözümler geliştirmek kaçınılmaz hale gelmiştir. Bu bağlamda, Yapay Zekâ (YZ) destekli geri dönüşüm sistemleri, çevresel sürdürülebilirliğe önemli katkılar sağlayarak, iklim değişikliği ile mücadelede etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır. YZ ile gerçekleştirilebilecek dijital dönüşüm, geleneksel yöntemlerin yerini dijital teknolojilere bırakmasını sağlarken, sürdürülebilirlik açısından da önemli faydalar sunmaktadır.

YZ, iklim değişikliğiyle mücadelede ön plandadır çünkü araştırmacılara iklim değişikliğini anlamak ve mücadele etmek için gerekli hesaplama gücü ve doğru tahminler sunar. Makine öğrenimi algoritmaları ile insanların gözünden kaçabilecek eğilimler ve kalıplar belirlenebilir ve geniş veri kümeleri analiz edilebilir. YZ tarafından desteklenen iklim modelleri, aşırı hava olaylarını tahmin edebilir, kutuplardaki buzulların erimesini izleyebilir ve iklim risklerini azaltma konusunda bilgi sunabilir (Durai, Manoharan, & Ashtikar, 2024). Dijital teknolojilerin gelişimi ile iş süreçlerinde etkin kullanımı, kâğıt kullanımının azaltılması ve enerji tüketiminin düşürülmesi gibi avantajlar sağlamaktadır. YZ teknolojilerinin gelişmesi ile dijital dönüşümün sürdürülebilirliğe katkısı önemli ölçüde artmaktadır (Demirkaya, 2023). Bu nedenle, YZ, yalnızca iklim değişikliğine karşı mücadelede etkili bir araç olmakla kalmayıp, aynı zamanda sürdürülebilirlik çabalarını iş süreçlerinden çevresel yönetim stratejilerine kadar birçok alanda desteklemektedir. Bu entegrasyon hem bireylerin hem de kurumların daha bilinçli ve sorumlu kararlar almasına olanak tanıyarak, geleceği koruma yolunda önemli bir itici güç olmaktadır.

Geri dönüşüm, atık yönetiminin temel bileşenlerinden biri olup, doğal kaynakların korunması ve enerji tasarrufu sağlanması açısından kritik bir rol oynamaktadır. Ancak, geleneksel geri dönüşüm yöntemleri, karmaşık atık akışları ve düşük verimlilik nedeniyle istenilen sonuçları her zaman verememektedir. İşte bu noktada, YZ teknolojileri devreye girerek, geri dönüşüm süreçlerini daha verimli ve etkili hale getirmektedir. YZ, atıkların doğru sınıflandırılması, ayrıştırılması ve işlenmesi süreçlerinde devrim niteliğinde yenilikler sunmaktadır. Bu sebeplerle, iklim değişikliğiyle mücadeleye katkıda bulunmak amacıyla giderek daha fazla kullanılmaktadır.

Dünya genelinde yılda yaklaşık iki milyar ton atık üretilmektedir ve bu atığın yalnızca %19'u geri dönüştürülmektedir. Geri kalan büyük miktarda atık, çevreye zarar vererek doğal kaynakları tehdit etmektedir (World Bank, 2018, s. 5). Bu durum, geri dönüşüm süreçlerinde verimliliği artırabilecek yenilikçi teknolojilere olan ihtiyacı göstermektedir. YZ destekli sistemler, geri dönüşüm oranlarını artırarak, kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlar. Bu da küresel iklim sorununa sürdürülebilir bir çözüm sunabilir.

YZ, birçok alanda insan yaşamını kolaylaştırabilecek uygulamalar geliştirme potansiyeline sahip bir teknolojidir. Bu teknoloji, sürdürülebilirlikle ilgili pek çok alanda kullanılabilir. Büyük veri kümelerini analiz ederek çevresel sorunlar hakkında bilgi sağlayabilir, çevresel kirliliği izleyebilir, enerji tasarrufu yapabilir ve doğal kaynakları daha verimli kullanmamıza yardımcı olabilir (Cihan, 2023, s.27). Örneğin, akıllı şehirlerde YZ teknolojileri, trafik yönetimi, çevre izleme ve enerji yönetimi gibi alanlarda kullanılarak sürdürülebilirliği artırabilir. Bu teknoloji, trafik sıkışıklığını azaltarak ve çevresel kirliliği düşürerek enerji tüketimini azaltabilir. Ayrıca, YZ teknolojileri, su yönetimi, tarım ve gıda güvenliği gibi alanlarda da sürdürülebilirliği artırabilir. Tarım ve gıda güvenliği uygulamalarında YZ, verimliliği artırabilir, gıda arzını çoğaltabilir ve gıda israfını azaltabilir.

OECD'nin, "Global Plastics Outlook" başlıklı raporunda, dünya genelinde plastik atık üretiminin son yirmi yılda iki katına çıktığı ve bu atıkların büyük bir kısmının ya depolanmakta ya da yakılmakta olduğu belirtiliyor. Rapor, bu atıkların sadece %9'unun başarılı bir şekilde geri dönüştürüldüğünü vurgulamaktadır (OECD, 2022). Buradan da anlaşılacağı gibi geleneksel yöntemler, dünyadaki bu bitmez tükenmez atıkla mücadeleyle başa çıkamamaktadır. Bu yüzden ki, dünya genelinde birçok ülke, şehir ve şirket, YZ destekli geri dönüşüm sistemlerine yatırım yaparak, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşma yolunda önemli adımlar atmaktadır. Örneğin, Japonya, 2000'lerin başından itibaren geri dönüşüm süreçlerini iyileştirmek ve atık yönetimini iyileştirmek için gelişmiş otomasyon ve YZ çözümleri üretmeye başlamıştır. Avrupa Birliği, 2024 yılına kadar geri dönüşüm oranlarını %70'e çıkarmayı hedeflerken, Çin, atık yönetiminde YZ teknolojilerini kullanarak çevreye yönelik olumsuz etkileri azaltmayı planlamaktadır. ABD'de ise birçok eyalet ve şehir, akıllı geri dönüşüm sistemlerini hayata geçirerek, atık yönetimini daha sürdürülebilir kılmaktadır.

Bu çalışmada, YZ destekli geri dönüşüm sistemlerinin iklim değişikliği ile mücadelede sunduğu sürdürülebilir çözümler ayrıntılı bir şekilde incelenecektir. YZ teknolojilerinin geri dönüşüm bağlamında mevcut uygulamaları ile gelecekteki potansiyelleri ele alınarak, bu teknolojilerin farklı uygulama alanlarına sağladığı katkılar ve geliştirilmesi gereken tarafları değerlendirilecektir. Bu kapsamda, çevresel sürdürülebilirliği destekleyecek stratejilerin geliştirilmesine yönelik fırsatlar belirlenerek, iklim değişikliği ile mücadelede yenilikçi ve etkili yaklaşımların benimsenmesi için öneriler sunulacaktır. Bu analizler, YZ destekli geri dönüşüm sistemlerinin çevresel sürdürülebilirliğe katkısını artırmayı ve küresel iklim hedeflerine uzun vadede olumlu etkiler sağlamayı hedeflemektedir.

## İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE GERİ DÖNÜŞÜM

İklim değişikliği, atmosferdeki sera gazlarının birikimi sonucunda dünya genelinde sıcaklık artışları, yağış düzenlerindeki değişimler ve ekstrem hava olaylarının sıklığındaki artışla kendini gösteren küresel bir çevresel kriz olarak tanımlanır (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014, s. 5). Bu değişimlerin, ekosistemler ve insan sağlığı üzerinde yıkıcı etkileri olabileceği öngörülmektedir. İklim değişikliğinin etkilerini hafifletmek için geri dönüşüm önemli bir çözüm yolu olarak öne çıkmaktadır. Geri dönüşüm, atık materyallerin toplanıp işlenerek yeniden üretim sürecine dahil edilmesiyle kaynak tüketimini azaltır ve yeni üretim için gerekli enerji ihtiyacını düşürür (European Environment Agency (EEA), 2021, s. 15). Bu süreç sayesinde, geri dönüştürülmüş materyallerin kullanımıyla sera gazı emisyonları önemli ölçüde azaltılabilir.

İklim değişikliğinin artması, ekolojik denge ve insan refahı için eşi görülmemiş bir tehdit oluşturmaktadır. Küresel geri dönüşüm sektörü, karbon emisyonlarını azaltma ve kaynakların tükenmesini engelleme konusunda kritik bir rol oynayarak bu zorlukların hafifletilmesine yardımcı olmaktadır. Geri dönüşüm, ham madde çıkarma ihtiyacını azaltır, enerji tüketimini düşürür ve sera gazı emisyonlarını azaltır. Böylece, iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini sınırlandırmak için pratik bir çözüm sunar (EEA, 2021, s. 15). Bu nedenle, geri dönüşüm sektörü, çevresel sürdürülebilirliği teşvik etmenin yanı sıra, ekonomik kalkınmayı destekleyen döngüsel bir ekonomi modeline geçişte de önemli bir araçtır. Geri dönüşüm uygulamalarının yaygınlaştırılması, toplumların doğal kaynakları daha verimli kullanmasını sağlayarak hem çevresel hem de sosyal faydalar sunmaktadır.

Geri dönüşüm, doğal kaynakları korur ve materyal üretimiyle ilişkili karbon ayak izini azaltır. Örneğin; ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA), alüminyumun geri dönüştürülmesinin, boksit madeninden yeni alüminyum üretilmesi için gereken enerjinin %95'inden fazlasını tasarruf ettiğini vurgulamakta ve bu süreçte madencilik ve rafinasyon aşamalarında sera gazı emisyonlarının doğrudan azaltılmasına katkıda bulunduğunu belirtmektedir (EPA, 2024, s. 2-1, 2-2). Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) 2017 raporu da bu bulguyu destekleyerek, metal geri dönüşümünün sektör kaynaklı emisyonları 2050 yılına kadar %50'ye kadar azaltabileceğini belirtmektedir (IEA, 2017, s. 38). Geri dönüşüm yalnızca enerji tasarrufu sağlamakla kalmaz, endüstriyel faaliyetlerin çevresel etkisini de önemli derecede azaltabilir.

Kâğıt geri dönüşümü de kayda değer çevresel faydalar göstermektedir. Geri dönüştürülmüş kâğıt üretimi, ham selülozdan kâğıt üretmeye göre %40 daha az enerji tüketerek iklime etkisini daha da azaltmaktadır. Geri dönüşüm,

atık materyalleri değerli kaynaklara dntren döngüsel bir ekonomi yaratır, bu da sürdürülebilirliği teşvik eder. Dünya Bankası'nın 2019 raporu, geri dönüşüm sektörünün 2030 yılına kadar dünya çapında 15-20 milyon yeni i yaratma potansiyeline sahip olduğunu vurgulamakta ve gelişmekte olan ülkelerde ekonomik dayanıklılığı önemli ölçüde desteklediğini belirtmektedir (World Bank, 2019, s. 20). Kâğıt geri dönüşümü de çevresel etkileri azaltmanın yanısıra ekonomik fırsatlar sunarak sürdürülebilir kalkınmaya da katkıda bulunur. Bu tarz uygulamaların yaygınlaşması yeni i alanları oluşturur, yerel ekonomilere değer katar ve küresel ekonomiyi güçlendirir.

Kâğıt kullanımı her yıl artmakta olup, son 50 yılda dört katına ıkmitır. 2014 yılında, küresel kâğıt üretimi ilk kez yılda 400 milyon tona ulamitır. Bu kğıdın yarısından fazlası in, ABD ve Japonya'da tüketilirken, Avrupa'da ise yaklaşık dörtte biri tüketilmektedir. Afrika kıtası, dünya kâğıt kullanımının yalnızca %2'sini oluurmakta olup yılda sadece 8 milyon ton tüketmektedir. Kişi başına kâğıt tüketim verileri daha ayrıntılı bir tablo ortaya koymaktadır; küresel ortalama kişi başına yıllık 55 kg iken, Kuzey Amerika'da bu rakam dört katına çıkararak 215 kg'a ulaşmaktadır. Doğu Avrupa'da kişi başına tüketim in'le benzer seviyede olup 77 kg iken, Batı Avrupa ortalaması bunun neredeyse iki katı olarak 147 kg'dır (The State of the Global Paper Industry, 2018, s. 12-13). Kâğıt tüketimindeki bu dengesizlik, bölgesel ekonomik gelimilik düzeyleri, endüstriyel faaliyet yoğunluğu ve tüketim alışkanlıklarının bir yansımasıdır. Özellikle gelimi bölgelerdeki yüksek kâğıt tüketimi, çevresel sürdürülebilirlik açısından ciddi bir yük oluştururken, Afrika gibi düşük tüketim oranına sahip bölgelerde ise geri dönüşüm potansiyelinin daha az değerlendirildiği görülmektedir.

Küresel ekonomiye entegrasyon süreci, ülkelerin ekonomik gelişimlerine uyum sağlamaları ve artan kaynak talebine yanıt vermeleri için önemli bir zorunluluk haline gelmiştir. Günümüzde, YZ destekli geri dönüşüm sistemleri gibi yenilikçi teknolojiler, sürdürülebilir kalkınmayı desteklemek ve çevresel etkileri azaltmak amacıyla küresel ekonomik ağlara entegre edilmektedir. Küresel ekonomiye entegrasyon, ülkelerin çeşitli dönemlerde ekonomik gelişmelere ayak uydurmak ve sanayileen ülkelerin artan hammadde talebini karşılamak amacıyla bir gereklilik haline gelmiştir (Balcı, 2023, s. 128). Bu entegrasyon süreci, ülkelerin sermaye hareketleri, uluslararası ticaret ve emek hareketleri gibi yollarla dünya ekonomisine dahil olmalarını sağlarken, aynı zamanda ekonomik bağımlılıklar ve rekabet dengelerini de etkilemiştir.

Geri dönüşüm, sera gazı emisyonlarını azaltmak ve iklim değişikliğini hafifletmek için uygulanabilir ve etkili bir yol sunmaktadır. İklim krizine tam bir çözüm olmamakla birlikte, döngüsel ekonominin bir bileşeni olarak

sürdürülebilir kalkınma stratejilerinin vazgeçilmez bir parçasıdır. Etkili geri dönüşüm politikaları, iyileştirilmiş altyapı ve teknolojik yenilikler, mevcut engellerin üstesinden gelmek ve geri dönüşümün iklimsel faydalarını en üst düzeye çıkarmak için gereklidir. Ülkeler uluslararası iklim taahhütlerini yerine getirmeye çalışırken, gelişmiş geri dönüşüm sistemleri, atık azaltımı, kaynakların korunması ve düşük karbon salımlı bir geleceğin desteklenmesi açısından kritik öneme sahip olacaktır.

## **YAPAY ZEKÂNIN GERİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİNDEKİ ROLÜ**

Belli bir zekâya sahip makineler, bilgisayarlar, yazılımlar, programlar, robotlar meydana getirmek olarak tanımlanabilecek YZ, insanların kendi zihin yapılarını, çalışma şeklini, özelliklerini inceleyerek kendi zihin yapılarına benzer bir zihin ortaya çıkarma çabasıdır (Önder ve Saygılı, 2018, s. 635). Bu sürecin, insan zekâsına olabildiğince benzer şekilde, düşünebilen, konuşabilen, kavramları ve cümleleri anlamlandırabilen, problem çözüme yeteneğine sahip, bir bilgisayar, bilgisayar kontrolünde bir robot veya zekice tasarlanmış bir yazılım üretme şeklinde ortaya çıkabileceği söylenebilir. Bu bağlamda, YZ teknolojileri geri dönüşüm ve çevre koruma alanlarında da devrim yaratma potansiyeline sahiptir.

YZ, geri dönüşüm süreçlerinde çeşitli işlevleri yerine getirerek atık yönetiminden enerji tasarrufuna kadar geniş bir uygulama alanına hitap etmektedir. Örneğin, atık ayrıştırma ve sınıflandırma konusunda, YZ teknolojilerinden nesne tanıma ve görüntü işleme algoritmaları ile atık malzemeleri hızlı ve doğru bir şekilde ayrıştırılabilmektedir. Bu uygulamalar, geri dönüşüm tesislerinde atıkların daha saf bir şekilde ayrılmasını sağlayarak verimliliği artırır. Dünya Ekonomik Forumu'na göre, YZ destekli ayrıştırma teknolojileri geri dönüşüm verimliliğini %30'a kadar artırabilir, böylece daha fazla malzeme geri dönüştürülürken insan müdahalesine olan ihtiyaç azalır (World Economic Forum, 2021). Bu tür teknolojik yenilikler, geri dönüşüm süreçlerinin otomasyonunu teşvik ederek hem maliyetleri düşürmekte hem de operasyonel hız ve doğruluk sağlamaktadır. Ayrıca, YZ destekli sistemler, geri dönüşüm potansiyeli taşıyan materyalleri belirlemede büyük veri analitiği kullanarak daha fazla atığın yeniden kazanılmasına olanak tanır.

YZ'nın geri dönüşüm süreçlerinde bir diğer uygulama alanı ise malzeme izleme ve yönetimidir. YZ algoritmaları, sensör verileri ve büyük veri analitiği aracılığıyla, geri dönüştürülebilir materyallerin izlenmesini ve yönetilmesini sağlar. Bu sayede, geri dönüşüm akışındaki malzemelerin miktarı, türü ve saflığı gibi bilgiler daha hızlı ve doğru bir şekilde analiz edilerek geri

dönüşüm süreçleri daha iyi yönetilir (Chui, Henke ve Miremadi, 2019, s. 47). Böylece atık yönetimi sürecinde hata oranı azalırken, geri dönüşüm tesislerinin operasyonel maliyetleri de düşer.

YZ teknolojileri, enerji ve kaynak verimliliği açısından, geri dönüşüm süreçlerindeki enerji tüketimini en ideal noktaya getirerek daha az kaynakla daha fazla geri dönüşüm yapılmasını sağlar. YZ, geri dönüşüm tesislerinde enerji tüketim kalıplarını analiz eder ve enerji tasarrufu stratejileri geliştirilmesine yardımcı olur. Bu bağlamda, Uluslararası Enerji Ajansı, YZ destekli enerji yönetim sistemlerinin geri dönüşüm süreçlerinde enerji tasarrufunu %15'e kadar artırabileceğini öne sürmektedir (International Energy Agency, 2020, s. 42). YZ teknolojileri ile operasyonel maliyetler düşmekte, karbon ayak izi azalmaktadır. Böylece çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak daha da kolaylaşır.

YZ'nın geri dönüşüm süreçlerinde sağladığı verimlilik artışı ve maliyet avantajları, geri dönüşüm endüstrisinde önemli kazanımlar sağlar. YZ uygulamaları sayesinde ayrıştırma işlemleri daha az hata ve daha düşük maliyetlerle gerçekleştirilirken, daha fazla atık geri dönüştürülebilir hale gelir. Bu gelişmeler, atık yönetimi ve geri dönüşüm sektöründe maliyetlerin düşmesine ve geri dönüşüm süreçlerinin sürdürülebilirliğinin artmasına katkıda bulunur (Olawade vd., 2024, s. 245). Geri dönüşüm süreçlerinde YZ kullanımı, çevresel sürdürülebilirliğe katkı sunarken maliyet etkin bir dönüşüm sağlar, böylece hem çevresel hem de ekonomik açıdan olumlu bir etki yaratır.

YZ teknolojisinin geri dönüşüm sistemlerine katkısı büyük bir potansiyele sahiptir. Atık yönetimi süreçlerini daha verimli, akıllı ve sürdürülebilir hale getirmek için YZ teknolojilerinin benimsenmesi, çevresel sürdürülebilirlik çabalarına önemli bir destek sağlayacaktır. Ancak, bu teknolojinin kullanımıyla birlikte veri gizliliği, güvenlik ve etik konularının da göz önünde bulundurulması gerekmektedir (GEKADER, 2023). Bu nedenle, YZ'nın geri dönüşüm süreçlerindeki potansiyelini tam anlamıyla gerçekleştirebilmek için teknoloji kullanımını destekleyen güçlü bir düzenleyici çerçeve ve kamuoyu farkındalığı oluşturulmalıdır. Ayrıca, bu teknolojilerin sosyal ve ekonomik etkilerinin de dikkate alınması, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşma sürecinde kritik bir rol oynayacaktır.

## **YAPAY ZEKÂ DESTEKLİ GERİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİNDE KULLANILAN TEKNOLOJİLER**

YZ, geri dönüşüm süreçlerinin verimliliğini artırmak ve maliyetleri düşürmek amacıyla farklı teknolojilerle entegre edilmiştir. Atık yönetimi,

çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır. Artan atık miktarı ve doğal kaynakların tükenmesi, atık yönetiminde yenilikçi çözümler gerektirmektedir. Bu noktada YZ teknolojileri, atık yönetim süreçlerinde önemli bir rol oynayabilir. Akıllı atık yönetim çözümleri sağlamak için devlet kurumları, sistem entegratörleri, ağ operatörleri ve teknoloji sağlayıcıları, sensörlerle donatılmış ve internet üzerinden veri toplayan IoT (Internet of Things) prototipleri kullanarak bu teknolojileri entegre edebilirler (Cihan, 2023, s. 29). Aşağıda Görüntü İşleme Teknolojileri, Makine Öğrenimi Algoritmaları, Robotik ve Otomasyon ve Veri Analitiği gibi YZ destekli geri dönüşüm sistemlerinde öne çıkan başlıca teknolojiler ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

### **Görüntü İşleme Teknolojileri**

Görüntü işleme teknolojileri, atık ayrıştırma ve sınıflandırma süreçlerinde YZ'nın en önemli kullanım alanlarından biridir. Bu teknolojiler, atıkların fotoğraf veya video görüntülerini analiz ederek her bir malzemenin türünü otomatik olarak tanımlar. Böylece geri dönüşüm tesislerindeki atıklar hızlı bir şekilde ayrılır ve saflığı artırılır. Görüntü işleme sistemleri, nesne tanıma ve renk analizi gibi teknikleri kullanarak plastik, cam, metal ve kağıt gibi farklı atık türlerini tanımlayabilir. Bu teknolojiler sayesinde geri dönüşüm tesislerindeki verimlilik artarken, manuel ayrıştırma işlemlerinin yerini alarak insan hatasını minimuma indirir (World Economic Forum, 2021). Bu teknoloji, sektörde çalışanların sağlığına sunduğu katkının yanında verimlilik açısından sunduğu katkı ile de dikkat çeker.

### **Makine Öğrenimi Algoritmaları**

Makine öğrenimi, geri dönüşüm süreçlerinde daha doğru tahminler yaparak atıkların verimli bir şekilde yönetilmesini sağlar. Bu algoritmalar, büyük miktarda veriyi analiz ederek geri dönüşümde en iyi ayrıştırma stratejilerini belirler. Örneğin, geri dönüşüm tesislerinde makine öğrenimi modelleri, hangi atık türlerinin hangi malzemelerle karışma eğiliminde olduğunu veya hangi alanlarda geri dönüşüm verimliliğinin daha düşük olduğunu tespit edebilir. McKinsey & Company'ye göre, makine öğrenimi algoritmaları atık yönetim süreçlerinde karar verme yeteneklerini geliştirerek verimliliği %20 oranında artırabilir (McKinsey & Company, 2021, s. 3). Makine öğrenimi algoritması atık ayrıştırmada insan kaynaklı hataları ortadan kaldırarak verimliliği arttırmaktadır.



## Robotik ve Otomasyon

Robotik ve otomasyon teknolojileri, YZ ile entegre edilerek geri dönüşüm tesislerinde otomatik ayrıştırma ve taşıma işlemlerini gerçekleştirmektedir. YZ destekli robotlar, atıkların hızlı bir şekilde sınıflandırılmasını sağlayarak iş gücü maliyetlerini azaltır ve geri dönüşüm sürecinde daha yüksek verimlilik sağlar. Örneğin, bazı geri dönüşüm tesislerinde robotlar, bant üzerinden akan atıkları algılayarak uygun konteynerlere yönlendirebilir. Bu robotik sistemler, geri dönüşüm hızını ve doğruluğunu artırırken, manuel müdahaleye olan ihtiyacı azaltarak tesislerin operasyonel maliyetlerini düşürür (Chui, Henke ve Miremadi, 2019, s. 49). Bu tür yenilikçi teknolojiler, geri dönüşüm sektörünün daha sürdürülebilir bir yapıya dönüşmesine zemin hazırlar. Ayrıca, robotik sistemlerin ölçeklenebilir yapısı, geri dönüşüm tesislerinin artan atık miktarlarını daha etkili bir şekilde yönetmesine olanak tanır.

## Veri Analitiği

Veri analitiği, geri dönüşüm süreçlerinde verimliliği artıran önemli bir teknolojidir. Geri dönüşüm tesislerinde toplanan verilerin analizi, atık akışındaki eğilimleri anlamaya, kaynak israfını azaltmaya ve geri dönüşüm oranlarını en iyi hale getirmeye yardımcı olur. YZ ve büyük veri analitiği, tesislerin enerji tüketimini, atık miktarlarını ve geri dönüşüm performansını sürekli olarak izleyerek geri dönüşüm süreçlerinde enerji tasarrufu sağlar. Uluslararası Enerji Ajansı'na göre, veri analitiği ile yapılan enerji optimizasyonu, geri dönüşüm tesislerinde enerji maliyetlerini %15'e kadar azaltabilir (International Energy Agency, 2020, s. 43). Bu tür veri odaklı yaklaşımlar, geri dönüşüm süreçlerinde sadece enerji tasarrufu sağlamakla kalmaz, aynı zamanda operasyonların daha çevik ve proaktif bir şekilde yönetilmesine olanak tanır.

## DÜNYA GENELİNDE VE TÜRKİYE'DE UYGULAMALAR

YZ destekli geri dönüşüm uygulamalarının en sık görüldüğü ülkeler, genellikle teknolojik altyapıları güçlü ve çevre bilinci yüksek olan ülkelerdir. ABD, Almanya, Japonya, Singapur, İsveç, Güney Kore ve Kanada gibi ülkeler bu konuda önde gitmektedir. Bahsedilen ülkelerin özellikle büyük şehirlerinde akıllı geri dönüşüm sistemleri uygulanmaktadır.

### Dünya Geneline Örnekler (ABD, Almanya, Japonya)

YZ destekli geri dönüşüm teknolojileri dünya genelinde giderek yaygınlaşmakta ve çeşitli ülkelerde etkili uygulama örnekleri sunmaktadır. 2023 yılında birçok ülke ve eyalet, YZ destekli geri dönüşüm sistemlerini

uygulamış ve genişletmiştir. Örneğin, Kaliforniya'nın CalRecycle programı, %100 meyve ve sebze suyu kaplarını geri dönüşüm sistemine dahil ederek, ek olarak 223 milyon kap işlemeyi planlamaktadır (Wallace vd., 2023). Ayrıca, atık yönetiminde AI ve otomasyonun kullanımı dünya genelinde artmakta, akıllı geri dönüşüm altyapısına yapılan yatırımlar geri dönüşüm işlemlerini daha verimli ve sürdürülebilir hale getirmeyi amaçlamaktadır (SmartSort Technologies, 2024; Wallace vd., 2023). Bu örnekler, YZ destekli geri dönüşüm teknolojilerinin sadece çevresel sürdürülebilirliğe değil, aynı zamanda ekonomik faydalara da katkı sağladığını göstermektedir.

Giderek daha fazla ülke, bu teknolojileri kullanarak atık yönetim süreçlerini daha verimli hale getirmekte, doğal kaynakların korunmasına katkıda bulunmakta ve karbon ayak izini azaltmaktadır. Gelecekte, bu tür akıllı geri dönüşüm altyapılarının benimsenmesi, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılmasında önemli bir araç olacaktır. Amerika Birleşik Devletleri, Almanya ve Japonya'da hayata geçirilen YZ destekli geri dönüşüm sistemlerine ilişkin örnekler aşağıda incelenecektir.

### **Amerika Birleşik Devletleri**

ABD'nin ekonomik, siyasi, askeri ve yönetsel açıdan dünyanın en önemli ülkelerinden birisi olması ve yönetim bilimine teorik ve pratik açılardan büyük katkılarda bulunmasının yanında çağın en önemli iki olgusu YZ ve sürdürülebilirlik hususlarında da dikkate değer gelişim, yöntem ve çözümleri bünyesinde barındırmaktadır (Önder ve Balcı, 2022, s.307).. ABD, YZ destekli geri dönüşüm teknolojilerinde öncü ülkelerden biridir ve geri dönüşüm süreçlerinde robotik ve görüntü işleme teknolojilerini kapsamlı bir şekilde kullanmaktadır. ABD merkezli geri dönüşüm şirketi AMP Robotics, YZ destekli robotları ile atıkların ayrıştırılmasında yüksek hassasiyet ve hız sağlamakta, geri dönüşüm oranlarını artırmaktadır. Bu robotlar, görüntü işleme teknolojilerini kullanarak atıkların türünü ve malzeme yapısını algılar ve uygun geri dönüşüm işlemi için hızlı bir şekilde ayrıştırma yapar (AMP Robotics, 2020, s. 7). ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA), bu tür uygulamaların geri dönüşüm tesislerinde iş gücü maliyetlerini düşürdüğünü ve operasyonel verimliliği artırdığını belirtmektedir (EPA, 2024, s. 23). Bu yenilikler, ABD'nin geri dönüşüm süreçlerinde teknolojiyi etkin bir şekilde kullanarak sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada lider bir rol üstlendiğini göstermektedir.

### **Almanya**

Almanya, geri dönüşüm ve atık yönetiminde katı yasal düzenlemelerle dikkat çeken bir ülkedir ve bu süreçlerde YZ teknolojilerini etkin bir şekilde

kullanmaktadır. Almanya’da YZ destekli ayrıştırma makineleri, metal, plastik, cam ve kağıt gibi malzemeleri algılayıp otomatik olarak ayrıştırmak için görüntü işleme ve veri analitiği kullanmaktadır. TOMRA Sorting Solutions, Almanya’daki birçok geri dönüşüm tesisine YZ destekli çözümler sunmaktadır ve bu çözümler, materyal saflığını artırarak daha yüksek geri dönüşüm oranlarına ulaşılmasını sağlamaktadır (TOMRA, 2020). Almanya Federal Çevre Ajansı’na göre, bu teknolojiler sayesinde ülke genelinde atık yönetimi daha sürdürülebilir hale gelmiş ve döngüsel ekonomiye katkıda bulunulmuştur (Josh, 2024). Bu teknolojiler, Almanya’nın atık yönetiminde hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemli bir başarı elde ederek sürdürülebilirlik hedeflerini desteklediğini göstermektedir.

## Japonya

Japonya, geri dönüşümde YZ’nın kullanımı açısından ileri bir düzeye ulaşmış ve kaynakların sınırlı olduğu bu ülkede geri dönüşüm oranlarını yüksek seviyelere taşımıştır. Japonya’da şirketler, sürdürülebilirlik çabalarını artırmak amacıyla YZ’yi kullanarak gıda israfını azaltmaya yönelik çalışmalara başlamışlardır. Örneğin, Lawson market zinciri, ABD’li DataRobot şirketinin YZ teknolojisini kullanarak arz ve talebi dengelemeyi hedeflemekte ve gıda israfını 2018 seviyelerine göre 2030 yılına kadar %50 oranında azaltmayı planlamaktadır. NEC Corporation ise hava durumu, yılın zamanı ve alışveriş alışkanlıkları gibi çeşitli koşullara göre talebi tahmin eden YZ sistemleri geliştirmiş ve bu sistemlerle bazı büyük perakendecilerin ve gıda üreticilerinin maliyetlerini %15 ila %75 oranında düşürmeyi başarmıştır (Waste360, 2021). Bu örnekler, Japonya’nın YZ teknolojilerini yalnızca geri dönüşümde değil, aynı zamanda israfın önlenmesi ve kaynak verimliliğinin artırılması gibi sürdürülebilirlik hedeflerine yönelik geniş bir perspektifle kullandığını göstermektedir.

Japonya’da, Fujitsu ve Hitachi gibi teknoloji firmaları da geri dönüşüm tesislerinde YZ destekli ayrıştırma sistemleri geliştirerek atıkların türünü ve kalitesini hızlı bir şekilde belirleyebilmektedir. Fujitsu, Japonya’da geri dönüşüm süreçlerinde YZ ve blockchain teknolojilerini birleştirerek, sürdürülebilir tedarik zincirleri oluşturmayı hedeflemektedir. Bu teknolojiler, geri dönüştürülmüş malzemelerin kökenini izlemeye ve karbon ayak izini yönetmeye yardımcı olarak çevre dostu uygulamaların benimsenmesini teşvik etmektedir” (Fujitsu, 2022). Japonya Çevre Bakanlığı, YZ destekli geri dönüşümün ülkenin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasında önemli bir rol oynadığını vurgulamaktadır (Moshkal vd., 2024, s. 3/21). Bu gelişmeler, Japonya’nın ileri teknoloji kullanımını sürdürülebilirlik stratejilerine entegre ederek çevresel ve ekonomik faydaları bir araya getirdiğini göstermektedir.

YZ ve blockchain gibi yenilikçi teknolojilerin geri dönüşüm süreçlerine dahil edilmesi, Japonya'nın global sürdürülebilirlik çabalarında öncü bir rol üstlendiğinin bir kanıtıdır.

### **Türkiye'deki Uygulamalar (Belediyeler, Özel Sektör, Üniversiteler)**

Türkiye, geri dönüşüm ve atık yönetimi alanında YZ teknolojilerini giderek daha fazla kullanmaya başlayan ülkelerden biridir. Türkiye'de YZ destekli geri dönüşüm uygulamaları, özellikle belediyeler, özel sektör ve üniversiteler gibi farklı aktörler tarafından yürütülmektedir. Türkiye'de birçok belediye, atık yönetimini iyileştirmek ve geri dönüşüm süreçlerini iyileştirmek amacıyla YZ destekli çözümler kullanmaktadır. Özellikle büyükşehir belediyeleri, YZ destekli atık yönetim sistemlerini altyapılarına entegre ederek daha verimli bir atık toplama ve ayrıştırma süreci sağlamakta ve çevresel sürdürülebilirliği artırmaktadır.

İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) tarafından hazırlanan 2030 İstanbul Akıllı Şehir Stratejik Planı, İstanbul'un kaynaklarını verimli kullanarak yaşam kalitesini artırmayı ve sürdürülebilir bir şehir vizyonunu gerçekleştirmeyi amaçlayan kapsamlı bir stratejidir. Bu plan çerçevesinde, YZ, veri analitiği ve IoT gibi akıllı teknolojiler kullanılarak atık yönetimi, ulaşım, enerji, çevre ve güvenlik gibi alanlarda çeşitli projeler ve stratejik hedefler belirlenmiştir. Türkiye'de yerel yönetim seviyesinde hazırlanan ilk akıllı şehir stratejisi olan bu plan, İstanbul'un 2030 yılına kadar akıllı şehir hedeflerine ulaşmasını sağlamak amacıyla 180'e yakın proje planını içermektedir” (2030 İstanbul Akıllı Şehir Stratejik Planı, 2021). YZ destekli uygulamalar çeşitli sektörlerde her geçen gün kendisine daha fazla yer edinmeye başlamıştır. YZ sadece bir teknolojiden ibaret olmayıp, siyasetten ekonomiye hayatın her alanında süreçlere dahil olmaktadır. Teknolojik gelişmeler, YZ ve nesnelerin interneti (IoT) ile daha önce hayal dahi edilemeyen birçok şey başarılabilir olmuştur. YZ'nin karar vericiler tarafından yerel hizmet sunumuna etkilerinin de tartışılması gerekmektedir (Akyol ve Özkan, 2023, s. 121-122). Bu durum, YZ'nin yerel yönetimlerde hizmet sunumunu dönüştürme potansiyelini açıkça ortaya koymaktadır.

Prof. Dr. Hasan Mandal, Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon hedefi ve yeşil kalkınma politikası doğrultusunda YZ destekli çözümler geliştirilmesi gerektiğini ifade etmektedir. Bu amaçla, 2022 yılında düzenlenen “İklim Şurası” kapsamında iklim değişikliğiyle mücadele ve uyuma yönelik atılması gereken adımların belirlenmesi için Bilim ve Teknoloji Komisyonu'nun oluşturulduğunu belirtmektedir (TÜBİTAK, 2022). Mandal, YZ'nin iklim değişikliği ile mücadelede çığır açıcı çözümler sunabileceğini vurgulayarak,

otonom enerji yönetim sistemleri, insansız ve otonom tarım robotları, sera gazı emisyonlarının takibi, atık minimizasyonu ve enerji verimliliği gibi uygulamaların bu alandaki örnekler olduğunu ifade etmektedir. Bu yaklaşım, Türkiye'nin iklim değişikliğiyle mücadelede yenilikçi teknolojileri stratejik bir şekilde benimseyerek sürdürülebilir bir gelecek inşa etme kararlılığını göstermektedir.

Türkiye'de geri dönüşüm sektöründe faaliyet gösteren birçok özel şirket, YZ destekli çözümleri operasyonlarına entegre ederek verimliliği artırmayı hedeflemektedir. Örneğin, Türkiye'nin önde gelen geri dönüşüm firmalarından biri olan Kibar Holding'e bağlı olan Assan Alüminyum, atık yönetimi süreçlerinde YZ destekli görüntü işleme teknolojileri kullanmaktadır. Bu teknoloji, ayrıştırma sürecini hızlandırarak daha yüksek saflık oranlarına ulaşılmasını ve enerji tasarrufu sağlanmasını mümkün kılar (Assan Alüminyum, 2020, s. 18). Bu tür uygulamalar, Türkiye'deki geri dönüşüm sektörünün teknolojik dönüşümüne öncülük ederek hem çevresel sürdürülebilirliğe hem de ekonomik büyümeye katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

Türkiye'deki üniversiteler, geri dönüşümde YZ kullanımını araştırma ve geliştirme çalışmalarına dahil ederek önemli katkılarda bulunmaktadır. Sinop Üniversitesi'nin projesi, YZ destekli bir akıllı geri dönüşüm otomati geliştirerek atıkların ayrıştırılmasını ve geri dönüşümünü teşvik etmeyi amaçlarken, TÜBİTAK MAM'ın projesi, tekstil sanayisinde atıkların YZ destekli kontrol algoritmaları ile geri kazanımını hedefleyerek su, enerji ve kimyasal tüketiminde verimlilik sağlamayı amaçlamaktadır (Sinop Üniversitesi, 2022- TÜBİTAK MAM, 2023). İTÜ, 2872 sayılı Çevre Kanunu ve ilgili yönetmelikler doğrultusunda Atık Yönetimi Yönergesi'ni oluşturmuştur. Bu birim, tehlikeli atıkların bertarafını organize etmekte ve yılın belirli aylarında (Şubat, Mayıs, Ağustos, Kasım) bertaraf işlemlerini gerçekleştirmektedir (İTÜ Atık Yönetim Birimi, 2024). Ayazağa Yerleşkesi'nde gerçekleştirilen atık karakterizasyon çalışmaları kapsamında, kampüs dört ana gruba ayrılmıştır: akademik binalar, idari binalar, kafeteryalar (yemekhaneler dahil) ve yerleşim yerleri (yurt ve lojmanlar). Bu gruplardan seçilen binalarda bir hafta boyunca toplanan atıklar, 18 farklı bileşene göre sınıflandırılmıştır. Bu veriler, atık yönetim stratejilerinin geliştirilmesinde kullanılmaktadır (İTÜ Sürdürülebilirlik, 2024). Türkiye'deki üniversitelerin bu tür projeleri, geri dönüşüm süreçlerine yönelik yenilikçi yaklaşımlar geliştirerek sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlamaktadır. Araştırma ve uygulamaların akademik boyutta ilerlemesi, çevresel sorunlara çözüm üretme konusunda üniversitelerin önemli bir aktör olduğunu göstermektedir.

## **YAPAY ZEKÂ DESTEKLİ GERİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİNİN FAYDALARI VE ZORLUKLARI**

YZ destekli geri dönüşüm sistemleri, geri dönüşüm süreçlerinde verimliliği artırmak ve maliyetleri azaltmak için yenilikçi çözümler sunmaktadır. Ancak, bu sistemlerin uygulanması bazı zorluklarla karşılaşmaktadır.

### **Verimlilik Artışı ve İş Gücü Tasarrufu**

YZ destekli geri dönüşüm sistemleri, özellikle atık ayrıştırma süreçlerinde yüksek verimlilik sağlamaktadır. Görüntü işleme ve makine öğrenimi teknolojileri, geri dönüşüm tesislerinde ayrıştırma işlemlerini hızlandırarak daha fazla atığın daha kısa sürede işlenmesine olanak tanır. YZ destekli robotik sistemler, manuel iş gücüne olan ihtiyacı azaltarak iş gücü maliyetlerini düşürür ve insan hatasını minimuma indirir. Dünya Ekonomik Forumu'na göre, YZ destekli sistemler ayrıştırma işlemlerinde %30'a varan verimlilik artışı sağlayabilir (World Economic Forum, 2021). Bu gelişmeler, geri dönüşüm süreçlerinde daha temiz ve kaliteli geri dönüştürülmüş malzeme elde edilmesini sağlayarak hem ekonomik kazançları artırmakta hem de çevresel sürdürülebilirliğe önemli katkılar sunmaktadır.

### **Enerji ve Kaynak Tasarrufu**

YZ teknolojileri, geri dönüşüm süreçlerinde enerji tüketimini azaltarak daha az kaynakla daha fazla geri dönüşüm yapılmasını sağlar. YZ, geri dönüşüm tesislerinde enerji tüketim kalıplarını analiz ederek gereksiz enerji kullanımını azaltır ve enerji tasarrufu sağlar. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), YZ destekli enerji yönetim sistemlerinin geri dönüşüm süreçlerinde enerji tasarrufunu %15'e kadar artırabileceğini belirtmektedir (IEA, 2021, s. 18). Bu hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemli bir kazanç sağlamaktadır.

### **Daha Yüksek Malzeme Saflığı ve Geri Dönüşüm Oranları**

YZ destekli görüntü işleme ve ayrıştırma teknolojileri, geri dönüşüm tesislerinde malzeme saflığını artırarak daha yüksek geri dönüşüm oranlarına ulaşılmasını sağlar. Özellikle plastik, metal ve cam gibi malzemelerin saflığını artıran bu teknolojiler, daha kaliteli geri dönüştürülmüş malzemeler elde edilmesini mümkün kılar. TOMRA Sorting Solutions, YZ destekli ayrıştırma sistemlerinin malzeme saflığını artırarak geri dönüştürülebilir malzeme miktarını artırdığını belirtmektedir (TOMRA, 2020). Bu, geri dönüşüm sektörünün döngüsel ekonomi modeline daha güçlü bir şekilde katkıda bulunmasına yardımcı olur.

## Yüksek Kurulum Maliyetleri

YZ destekli geri dönüşüm sistemlerinin kurulumu, geri dönüşüm tesisleri için yüksek maliyetli olabilmektedir. YZ destekli ayrıştırma sistemlerinin satın alınması, kurulumu ve entegrasyonu başlangıçta büyük bir yatırım gerektirmektedir. Özellikle küçük ve orta ölçekli geri dönüşüm tesisleri için bu maliyetler, YZ teknolojilerine geçişi zorlaştırmaktadır. McKinsey & Company'ye göre, YZ sistemlerinin geri dönüşüm tesislerinde tam entegrasyonu için yüksek bir başlangıç maliyeti gerekmekte ve bu durum sektör genelinde bir engel teşkil etmektedir (McKinsey & Company, 2024, s. 7). Bununla birlikte, uzun vadede YZ sistemlerinin sağladığı verimlilik artışı, enerji tasarrufu ve iş gücü maliyetlerindeki azalma, bu başlangıç maliyetlerini telafi edebilir ve hatta önemli tasarruflar sağlayabilir. Bu durum, sektördeki oyuncuların YZ teknolojilerine yatırım yapmasını stratejik bir karar haline getirmektedir.

## Veri Kalitesi ve Algoritma Uyarılama Zorlukları

YZ sistemlerinin etkin çalışabilmesi için kaliteli veriye ihtiyaç vardır. Ancak, geri dönüşüm tesislerinde toplanan veriler çoğu zaman heterojen ve düzensiz olabilmektedir. YZ algoritmalarının doğru bir şekilde çalışabilmesi için bu verilerin önceden işlenmesi ve temizlenmesi gerekmektedir. Veri kalitesindeki eksiklikler, YZ sistemlerinin performansını olumsuz etkileyebilir. Ayrıca, her geri dönüşüm tesisinin kendine özgü iş akışı olduğundan, YZ algoritmalarının bu tesislere uyarlanması ek maliyetler ve zorluklar doğurur (Chui ve Miremadi, 2019, s. 52). Bu durum, veri standardizasyonu ve özelleştirilebilir YZ çözümlerinin geliştirilmesinin önemini ortaya koymaktadır. Veri kalitesinin artırılması ve YZ sistemlerinin esnek bir şekilde uyarlanabilmesi, geri dönüşüm tesislerinin bu teknolojilerden maksimum fayda sağlaması için kritik bir rol oynamaktadır.

## Teknik Destek ve Bakım İhtiyacı

YZ destekli sistemlerin etkin ve sürekli bir şekilde çalışabilmesi için teknik destek ve düzenli bakım gereklidir. Geri dönüşüm tesislerinde YZ sistemlerinin bakımının yapılması için gerekli uzmanlığa sahip personelin bulunması zor olabilir, bu da maliyetleri artırır ve sistemlerin performansını etkileyebilir. Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde, YZ destekli geri dönüşüm sistemleri için yeterli teknik destek sağlanamaması nedeniyle sistemler uzun vadede etkin bir şekilde kullanılamayabilir (Assan Alüminyum, 2020, s. 19). Bu durum, YZ destekli geri dönüşüm sistemlerinin sürdürülebilirliği için yerel uzmanlık kapasitesinin artırılmasının ve teknik destek altyapısının geliştirilmesinin önemini göstermektedir. Eğitim programları ve özel sektör-

devlet iş birlikleri, bu alandaki teknik açıkları kapatarak sistemlerin uzun vadede verimli bir şekilde çalışmasını destekleyebilir.

YZ destekli geri dönüşüm sistemleri, geri dönüşüm süreçlerinde verimliliği ve malzeme saflığını artırırken enerji ve kaynak tasarrufu sağlamaktadır. Ancak, bu sistemlerin yüksek kurulum maliyetleri, veri kalitesi sorunları ve teknik destek ihtiyacı gibi zorluklar, geri dönüşüm sektöründe YZ teknolojilerinin yaygınlaşmasını sınırlayan faktörlerdir. Bu zorlukların aşılması durumunda, YZ destekli geri dönüşüm sistemleri, çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada önemli bir rol oynayabilir.

## SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Küreselleşen dünyada tüketim hızla artmakta, bu da atık miktarının dünya genelinde artmasına neden olmaktadır. Artan atığa müdahale edilmemesi farklı çevresel sorunlara özellikle de iklim değişikliğine zemin hazırlamaktadır. İklim değişikliği, çevre ve ekonomi üzerinde ciddi etkiler ortaya koyan en büyük çevresel tehditlerden biri haline gelmiştir. Bu tehdide karşı, YZ teknolojileri, geri dönüşüm süreçlerinde verimliliği artırarak ve kaynak kullanımını en iyi hale getirerek iklim değişikliğini hafifletme noktasında sürdürülebilir bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. YZ destekli geri dönüşüm sistemleri, atıkların ayrıştırılması, malzemelerin doğru yönetimi, enerji tasarrufu ve karbon emisyonlarının azaltılması gibi birçok alanda çevresel sürdürülebilirliğe katkı sunmaktadır. Özellikle atık yönetimde YZ kullanımı, sürdürülebilir ekonomi modellerinin güçlendirilmesine ve doğal kaynakların korunmasına olanak tanımaktadır.

Dünya genelinde ABD, Almanya ve Japonya gibi ülkeler, geri dönüşüm süreçlerinde YZ teknolojilerini etkin bir şekilde kullanarak atık yönetimini çevre dostu hale getirmiştir. Örneğin, ABD'deki AMP Robotics, YZ destekli robotik ayrıştırma sistemleriyle atık yönetim süreçlerini hızlandırmakta ve saflığı yüksek geri dönüştürülmüş materyaller elde etmektedir. Almanya'da TOMRA Sorting Solutions, YZ destekli görüntü işleme teknolojileri ile geri dönüşüm süreçlerinde malzeme saflığını artırarak sürdürülebilir bir atık yönetimi sağlamaktadır. Japonya ise YZ destekli geri dönüşüm sistemleri sayesinde sınırlı kaynaklarını verimli kullanmakta ve karbon ayak izini düşürmektedir. Bu örnekler, gelişmiş ülkelerin YZ teknolojilerini çevresel sürdürülebilirlik adına nasıl etkili bir şekilde uyguladığını göstermektedir.

Türkiye'de de belediyeler, özel sektör ve üniversiteler, geri dönüşüm süreçlerinde YZ teknolojilerini kullanarak daha sürdürülebilir bir atık yönetimi sağlamaya yönelik adımlar atmaktadır. İstanbul Büyükşehir Belediyesi'nin akıllı atık yönetim sistemi ve Türkiye'nin önde gelen geri



dönüşüm şirketlerinin YZ destekli ayrıştırma sistemlerini benimsemesi, bu teknolojilerin çevresel ve ekonomik katkılarını artırmaktadır. Üniversitelerin de YZ destekli projelerle bu alanda araştırma ve geliştirme çalışmaları yürütmesi, YZ destekli geri dönüşüm sistemlerinin Türkiye genelinde yaygınlaşması için önemli bir adım oluşturmaktadır.

Ancak, bu sistemlerin uygulanmasında karşılaşılan yüksek kurulum maliyetleri, veri kalitesi sorunları ve teknik destek ihtiyacı gibi zorluklar, YZ destekli geri dönüşüm çözümlerinin yaygınlaşmasını sınırlamaktadır. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde, bu teknolojilere geçişin teşvik edilmesi ve uygulanabilirliği için devlet desteği gerekmektedir. Bu noktada, devletlerin geri dönüşüm süreçlerinde YZ teknolojilerinin kullanılmasını teşvik eden politika ve destek programları geliştirmesi büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, özel sektör ve üniversitelerin bu teknolojilere yönelik yatırımlarını artırması, YZ'nın geri dönüşüm süreçlerinde sürdürülebilir çözümler üretmesini sağlayacaktır.

Ayrıca geri dönüşüm ve çevre koruma gibi sürdürülebilirlik uygulamalarının etkili olabilmesi için toplumsal bilincin ve kolektif bilinç düzeyinin yüksek olması gerekir. Çünkü bireysel davranışı belirleyen ve etkileyen içinde yaşanan toplumdur (Erdem, 2020, s.48). YZ destekli geri dönüşüm sistemleri, bireylerin çevreyi koruma konusundaki farkındalığını artırarak kolektif bir bilinç oluşturulmasına katkı sağlar. Bu sistemler, geri dönüşüm süreçlerini daha verimli hale getirerek toplumun çevreye duyarlı davranışlar geliştirmesine zemin hazırlar ve bireyleri sürdürülebilirlik hedefine yönelik harekete geçirir. Bu bağlamda, çevresel sorunlarla mücadelede toplumsal bilincin YZ teknolojileri ile güçlendirilmesi, iklim değişikliği ile mücadelede önemli bir adımdır.

Sonuç olarak, YZ destekli geri dönüşüm sistemleri, iklim değişikliğine karşı sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır. Atık yönetimini optimize ederek çevresel etkileri azaltan, doğal kaynakları koruyan ve sürdürülebilir ekonomiyi destekleyen bu sistemler, gelecekte çevresel sürdürülebilirliği artırmada kilit bir rol oynayabilir. İklim değişikliği ile mücadelede YZ destekli çözümlerin benimsenmesi, yalnızca çevresel açıdan değil, aynı zamanda ekonomik olarak da önemli kazanımlar sağlayacaktır. YZ'nın geri dönüşüm süreçlerine entegre edilmesi, iklim değişikliği ile mücadelede sürdürülebilir bir yol sunmakta ve hem ülkemiz hem de dünya için çevre dostu bir gelecek vaat etmektedir.

## Kaynakça

- Akyol, İ. T., & Özkan, N. A. Ş. (2023). “Yapay Zekâ Uygulamalarının Yerel Hizmet Sunumuna Etkisi”. *Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi*, 18(1), 120-134. <https://doi.org/10.48145/gopsbad.1287364>
- AMP Robotics. (2020). AI-Powered Recycling Robots in the U.S. Market. AMP Robotics Report,
- Assan Alüminyum. (2020). Geri Dönüşümde Yapay Zekâ Destekli Çözümler. Assan Alüminyum Raporu.
- Balcı, İ. (2023). 1830-1840 Yılları Arasında Osmanlı Devleti'nin Küresel Ekonomiye Entegrasyonu. *SDE Akademi Dergisi*, 3(1), 103-130. DOI: 10.58375/sde.1200472.
- Chui, M., Henke, N., Miremadi, M. (2019). Most of AI's business uses will be in two areas. McKinsey Analytics,
- Cihan, P. (2023). “Artificial Intelligence and Sustainability.” *ICCAR All Sciences Proceedings. 1st International Conference on Contemporary Academic Research*. Erişim adresi: <https://as-proceeding.com/index.php/iccar/article/view/734/692>
- Demirkaya, Y. (29 Eylül 2023). “Yapay Zekâ ve Sürdürülebilirlik: Dijital Dönüşümün Çevre Dostu Yüzü”. *TRAI*. <https://turkiye.ai/yapay-zeka-ve-surdurulebilirlik-dijital-donumun-cevre-dostu-yuzu/>
- Durai, S., Manoharan, G., & Ashtikar, S. P. (2024). “Harnessing artificial intelligence: Pioneering sustainable solutions for a greener future”. *In AI in Finance for Sustainability*. IGI Global.s. 89-117.
- Environmental Protection Agency (EPA). (2024). *WARM management practices version 16*. U.S. Environmental Protection Agency.
- Environmental Paper Network. (2018). The state of the global paper industry: 2018. *Environmental Paper Network*. [https://environmentalpaper.org/wp-content/uploads/2018/04/StateOfTheGlobalPaperIndustry2018\\_FullReport-Final-1.pdf](https://environmentalpaper.org/wp-content/uploads/2018/04/StateOfTheGlobalPaperIndustry2018_FullReport-Final-1.pdf)
- European Environment Agency (EEA). (2021). “Plastics, the circular economy and Europe's environment”. *EEA Report No 18/2020*. Publications Office of the European Union.
- Erdem, T. (2020). *Sosyoloji Notları*, Lotus Yayın Grubu: Ankara.
- Fujitsu. (12 Temmuz 2022). Teijin and Fujitsu launch blockchain-based commercial platform to promote environmentally friendly use of recycled materials. Fujitsu Newsroom. <https://www.fujitsu.com/global/about/resources/news/press-releases/2022/0712-01.html>
- GEKADER. (2023). “Yapay Zeka ve Geri Dönüşüm: Çevresel Sürdürülebilirlik İçin Yenilikçi Yaklaşımlar.” *Türkiye Geri Kazanımcular Derneği*. Erişim adresi: <https://gekader.org.tr/yapay-zeka-ve-geri-donum/>.

- International Energy Agency (IEA). (2017). Digitalization and Energy. IEA Report, <https://www.ica.org/reports/digitalisation-and-energy>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report*.
- International Energy Agency (IEA). (2021). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*. Paris <https://www.ica.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>,
- İstanbul Büyükşehir Belediyesi. (2021). *2030 İstanbul Akıllı Şehir Stratejik Planı*. İstanbul Büyükşehir Belediyesi Yayınları.
- İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ). (2024). Atık Yönetimi Ölçümü ve Karakterizasyonu. <https://sustainability.itu.edu.tr/tr/surdurulebilir-kampus/atik-yonetimi/atik-yonetimi-olcumu-ve-karakterizasyonu>
- İTÜ. (2024). Atık Yönetim Birimi. <https://atikyonetimi.itu.edu.tr/>
- Linder, J. (2024). "AI in the Recycling Industry Statistics: 60% of Facilities Implement Technology". <https://wifitalents.com/statistic/ai-in-the-recycling-industry/>
- McKinsey & Company. (2021). Succeeding in the AI supply-chain revolution, <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/succeeding-in-the-ai-supply-chain-revolution>
- McKinsey & Company. (22 Şubat 2024). Beyond the hype: Capturing the potential of AI and gen AI in tech, media, and telecom. *McKinsey & Company*. <https://www.mckinsey.com/industries/technology-media-and-telecommunications/our-insights/beyond-the-hype-capturing-the-potential-of-ai-and-gen-ai-in-tmt>
- Moshkal, Madina, Yerlan Akhapov, and Atsushi Ogihara. (2024). "Sustainable Waste Management in Japan: Challenges, Achievements, and Future Prospects: A Review" *Sustainability*. 16:17. 7347.
- Nowakowski, P., Szwarc, K., Boryczka, U. (2020). "Combining an artificial intelligence algorithm and a novel vehicle for sustainable e-waste collection," *Science of The Total Environment*, 730. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138726>.
- OECD (2022), *Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060*, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/aa1edf33-en>.
- Olawade, D. B., Fapohunda, O., Wada, O. Z., Usman, S. O., Ige, A. O., Ajisafe, O., & Oladapo, B. I. (2024). Smart waste management: A paradigm shift enabled by artificial intelligence. *Waste Management Bulletin*, 2(2024), 244-263. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.05.001>
- Önder, M.; Saygılı, H. (2018), "Yapay Zekâ ve Kamu Yönetimine Yansımaları", *Türk İdare Dergisi*, 90:487, 629-668.

- Önder, M. ve Balcı, İ. (2022). “United States of America”. *The Palgrave Handbook of Comparative Public Administration*. Palgrave Macmillan: Singapore.
- Sinop Üniversitesi. (26 Ağustos 2022). Yapay Zekâ Tabanlı Akıllı Geri Dönüşüm Otomati Projesi TÜBİTAK tarafından desteklenecek. <https://sinop.edu.tr/yapay-zeka-tabanlı-akilli-geri-donusum-otomati-projesi-tubitak-tarafından-desteklenecek/>
- SmartSort Technologies. (2024). “The Future of Waste Management: How AI Recycling Bins are Revolutionizing Sustainability” <https://www.smart-sortai.com/the-future-of-waste-management-how-ai-recycling-bins-are-revolutionizing-sustainability/>
- TOMRA Sorting Solutions. (2020). Intelligent Sorting Solutions in Germany. TOMRA, <https://www.tomra.com/tr-tr/waste-metal-recycling/media-center/customer-stories/koppitz>
- TÜBİTAK. (2023, Eylül 28). Türkiye’nin yapay zekâ uygulamaları Cenevre’de konuşuldu. TÜBİTAK. <https://tubitak.gov.tr/tr/haber/turkiyenin-yapay-zeka-uygulamalari-cenevrede-konusuldu>
- TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi. (2023). Yapay Zeka Ekosistem Çağrısı: TÜBİTAK MAM’ın Liderliğindeki Projeler Tanıtıldı. <https://mam.tubitak.gov.tr/tr/haber/yapay-zeka-ekosistem-cagrisi-tubitak-mamin-liderligindeki-projeler-tanitildi>
- Wallace, J., Quinn, M. ve Rosengren, C. (2023). “By the numbers: Key 2023 waste and recycling trends”. . *WasteDive*. 22 Aralık 2023. <https://www.wastedive.com/news/2023-waste-recycling-news-by-the-numbers/703275/>
- Waste360. (10 Mayıs 2021). Japan uses artificial intelligence to fight food waste. *Waste360*. <https://www.waste360.com/food-waste/japan-uses-artificial-intelligence-to-fight-food-waste>
- World Bank. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington, DC: World Bank. Erişim adresi: <https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/>
- World Bank. (2019). *The Changing Nature Of Work*. International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank
- World Economic Forum. (2021). How AI can solve manufacturing’s waste problem. <https://www.weforum.org/stories/2021/04/how-ai-can-cut-waste-in-manufacturing/>
- Joshy, C. (18 Ocak 2024). “How to Contribute in Germany’s Recycling Practices and System?” *Urban Ground*. <https://blog.urbanground.de/germanys-recycling-practices-and-system/>