

Original Article



Kati Eysel Atıkların Geri Dönüştürülmesinde Ekolojik Yönler Ve Modern Teknolojiler

Ecological Aspects and Modern Technologies in the Recycling of Solid Household Waste

Dilara K. Sunakbaeva^a^a Fen Bilimleri Fakültesi, Ekoloji ve Kimya Bölümü, Hoja Ahmet Yesevi Uluslararası Kazak-Türk Üniversitesi, Türkistan, Kazakistan

Article Information

Received 14 Oct 2025

Accepted 9 Dec 2025

Available online 30 Dec 2025

Özet Abstract

Bu makale, katı evsel atıkların (KEA) bertarafı sırasında ortaya çıkan çevresel sorunların analizine ve bu alandaki modern teknolojik çözümlerin değerlendirilmesine adanmıştır. Atık yönetiminin temel yöntemleri — kompostlama, depolama, pnömatik taşıma ve yakma — ele alınmıştır. Özellikle, geleneksel bertaraf yöntemlerinin, özellikle de yakma işleminin, dioksinler, furanlar ve ağır metaller gibi toksik bileşiklerin salınımına yol açtığı, bunun da atmosfer, toprak ve su ekosistemleri üzerinde uzun vadeli olumsuz etkiler yarattığı vurgulanmaktadır. Yakma ürünlerinde, atık sularında ve kül ile cüruf kullanılarak üretilen yapı malzemelerinde kirletici madde içeriklerine ilişkin karşılaştırmalı veriler sunulmuştur. Çalışmada ayrıca, insan kaynaklı yükün azaltılmasına yönelik modern yaklaşımlar — özellikle aşırı adyabatik rejimde gazlaştırma prensiplerine dayalı yenilikçi termal işleme teknolojilerinin uygulanması — üzerinde durulmuştur. Bu süreçler, yüksek enerji verimliliği (yaklaşık %95'e kadar) sağlamakta, toksik bileşiklerin oluşumunu en aza indirmekte ve geniş bir atık yelpazesinin etkin şekilde geri dönüştürülmesine olanak tanımaktadır. Makale, geleneksel atık uzaklaştırma sisteminden kaynakların yeniden kullanımı ve artık atıkların en aza indirilmesini öngören döngüsel ekonomi modeline geçişin önemini tartışmaktadır. Sonuç olarak, atıkların ayrıştırılması, biyolojik geri dönüşümü, enerjiye dönüştürülmesi ve modern izleme sistemlerini içeren bütüncül bir yaklaşımın, sürdürülebilir kalkınma ve kentleşmiş bölgelerde çevresel güvenliğin sağlanması açısından temel koşul olduğu gösterilmektedir.

This article is devoted to the analysis of environmental problems arising during the disposal of solid household waste (SHW) and to the evaluation of modern technological solutions in this field. The main methods of waste management—composting, landfilling, pneumatic transport, and incineration—are examined. Particular emphasis is placed on the fact that conventional disposal methods, especially incineration, lead to the release of toxic compounds such as dioxins, furans, and heavy metals, which have long-term adverse effects on atmospheric, soil, and aquatic ecosystems. Comparative data are presented on pollutant contents in incineration products, wastewater, and construction materials produced using ash and slag. The study also focuses on modern approaches aimed at reducing anthropogenic load, particularly the application of innovative thermal processing technologies based on gasification principles under super-adiabatic conditions. These processes provide high energy efficiency (up to approximately 95%), minimize the formation of toxic compounds, and enable the efficient recycling of a wide range of waste types. The article discusses the importance of transitioning from traditional waste disposal systems to a circular economy model that emphasizes resource reuse and the minimization of residual waste. In conclusion, it is demonstrated that a holistic approach incorporating waste separation, biological recycling, energy recovery, and modern monitoring systems is a fundamental requirement for sustainable development and for ensuring environmental safety in urbanized areas.

Giriş

Günümüz toplumunun en ciddi çevre sorunlarından biri, katı evsel atıkların (KEA) bertarafıdır. Artan atık

miktarları, yüksek kentleşme oranı ve düzenli depolama alanları için sınırlı yerler, etkili ve çevre açısından güvenli geri dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır [1-3].

Dünya genelinde belediye atıklarının oluşumu hızla artmaktadır. Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) ve Uluslararası Katı Atık Birliği (ISWA) verilerine göre, atık yönetimi için yıllık harcamalar 2020 yılında yaklaşık 252 milyar ABD doları olup, gerekli önlemler alınmazsa 2050 yılına kadar bu rakamın 640 milyar ABD dolarına ulaşabileceği öngörülmektedir [4]. Bilimsel incelemelerde, atık yönetiminin artık yalnızca taşımacılık ve depolama süreci olmaktan çıktığı; kaynak kullanımına, döngüsel ekonomiye, dijitalleşmeye ve atık toplama ile geri dönüşüm sistemlerinde yapay zekâ (YZ) yöntemlerinin uygulanmasına odaklanıldığı belirtilmektedir [5,6]. Örneğin, 2018–2024 yıllarını kapsayan yakın tarihli sistematik bir araştırma, YZ algoritmalarının atık toplama güzergâhlarını optimize etmek, atık hacmini tahmin etmek ve geri dönüşüm verimliliğini artırmak için kullanıldığını göstermiştir [6].

Küresel Güney ülkelerinde, yetersiz gelişmiş atık yönetim sistemlerinin halk sağlığı ve çevre üzerindeki olumsuz etkilerine özel önem verilmektedir: evsel ve tehlikeli atıkların karıştırılması, ayrıştırılmamış toplama sistemleri ve açıkta yakma uygulamaları, çevresel ve sağlıkla ilgili risklerin artmasına doğrudan katkıda bulunmaktadır [7]. Ayrıca, Belediye Katı Atık Yönetimi Endeksi (Municipal Solid Waste Governance Index — MSWGI) gibi otonom atık yönetimi değerlendirme göstergelerinin geliştirilmesi, bölgesel atık yönetimi sistemlerinin etkinliğini ölçmek için çağdaş bir yaklaşım olarak önem kazanmaktadır [8].

Dolayısıyla, günümüzün çevresel koşulları göz önüne alındığında, geleneksel atık yönetimi yöntemlerinin — yalnızca taşımacılık, depolama veya enerji geri kazanımı olmadan basit yakma işlemleri — ciddi şekilde iyileştirilmesi ve yeni teknolojik ile yönetsel çözümlerin uygulanması gerektiği açıktır.

Bu çalışmanın amacı, mevcut katı evsel atık geri dönüşüm yöntemlerini analiz etmek ve bunların çevresel etkilerini değerlendirmektir. Aynı zamanda dijitalleşme, kaynak verimliliği ve döngüsel ekonomi modeli gibi güncel eğilimler de dikkate alınmaktadır.

Katı Evsel Atıkların Uzaklaştırılması ve Geri Dönüştürülmesinin Temel Yöntemleri

❖ Atıkların pnömatik taşınması

Modern şehirlerde, atıkların boru hatları aracılığıyla merkezi olarak toplanmasını ve taşınmasını sağlayan pnömatik taşıma sistemlerinin uygulanma eğilimi yaygındır [4]. Bu tür sistemler, atıkların dış ortamla temasını önleyerek patojenlerin yayılma ve kötü kokuların oluşma riskini azaltır. Atık taşıma borusunun ana gövdesi, bir sürgülü vana aracılığıyla boru hattına bağlanan bir havalandırma odasıyla son bulur; bu da sistemin sızdırmazlığını ve güvenli çalışmasını sağlar.

❖ Atıkların kompostlanması

Organik atıkların biyotermal işlenmesi (kompostlama), aerobik mikroorganizmaların organik maddeleri humus benzeri bir gübreye dönüştürdüğü doğal bir biyolojik süreçtir [5–7]. Bu sürecin başarıyla gerçekleşmesi için üç temel koşul gereklidir: uygun hammadde, yeterli oksijen ve optimum sıcaklık. Kompostlama, düzenli depolama alanlarına olan yükü azaltır, toprak yapısını iyileştirir ve organik maddelerin doğal döngüye geri kazandırılmasına katkıda bulunur.

❖ Atıkların düzenli depolama alanlarına gömülmesi

Atıkların gömülmesi, katı evsel atıkların bertarafında en yaygın yöntemlerden biridir. Uygun şekilde düzenlendiğinde, depolama sahaları su geçirmez taban yapısına ve sızıntı suyu ile biyogaz tahliye sistemlerine sahip, hijyenik olarak güvenli tesisler hâline gelir [8, 9]. Ancak izinsiz çöplükler, hava, toprak ve yeraltı sularının kirlenmesine yol açmakta, ayrıca yangın riski ile bulaşıcı hastalıkların yayılma olasılığını artırmaktadır.

❖ Katı atıkların yakılması

Atık yakma işlemi, atık hacmini azaltmak ve ısı enerjisi elde etmek açısından en etkili yöntemlerden biridir (Tablo 1). Ancak yakma sırasında ağır metal oksitleri, dioksinler, furanlar ve poliaromatik hidrokarbonlar gibi toksik maddeler açığa çıkar. Bu nedenle atık yakma tesisleri, modern gaz arıtma ve filtreleme sistemleriyle donatılmalıdır [10–12].

Tablo 1. TEB Yakma Ürünlerindeki Kimyasal Elementlerin İçeriği

Element	Hava Emisyonları, %	Konsantrasyon	Uçucu Bölge, %	Konsantrasyon
Bizmut	0,0003–0,0013	300–1300	0,01	10000
Kurşun	0,155–0,186	97–116	0,45–1	281–625
Kadmiyum	0,0005–0,0012	38–923	0,005–0,01	380–770

Çinko	0,18–0,56	22–68	1–3	120–360
-------	-----------	-------	-----	---------

Bu maddelerin birçoğu atmosfere karıştığında toprakta ve bitkilerde birikerek canlı organizmalar üzerinde kümülatif toksik etki oluşturur [13].

Atık Yakımının Çevresel Sonuçları

❖ Dioksinler ve Diğer Toksik Bileşiklerin Oluşumu

Eksik yanma sürecinde, kanserojen ve mutajen özelliklere sahip dioksinler oluşur. Bu bileşikler, toz parçacıklarına adsorbe olur ve hava, su ve gıda yoluyla insan vücuduna geçer [14]. Japonya ve Almanya’da yapılan araştırmalar, atık yakma tesislerinin yakınında kanser vakalarının arttığını göstermiştir [15].

❖ Katı Kalıntılar ve İkincil Ürünlerin Kirlenmesi

Atıkların yakılması sonucu, ağır metaller içeren cüruf ve uçucu kül oluşur (Tablo 2). Bu atıkların ön işlem yapılmadan inşaatta kullanılması, çevrede uzun süreli kirliliğe yol açar [16].

Tablo 2. Kül İlavesi İçeren Yapı Bloklarındaki Toksik Metallerin İçeriği

Metaller	Kül İlavesi ile	Cüruf ve Kül ile	Normal Çimento
Çinko	18618	4482	53
Kurşun	7278	5137	4
Kadmiyum	731	44	0,26

❖ Su Kaynaklarının Kirlenmesi

Atık yakma tesislerinin atık suları, tuzlar, ağır metaller ve asitler içermekte olup, mutlaka nötralize edilmesi gerekmektedir [17]. Bu atık suların arıtılması için günümüzde modern adsorban malzemeler, membran teknolojileri ve

biyokimyasal yöntemler kullanılmaktadır. Atık yakma tesislerinin atık sularının kimyasal bileşimi Tablo 3’te sunulmuştur.

Tablo 3. MSZ Atık Sularındaki Kirletici Madde İçeriği

Göstergeler	Scrubber Suyu	Cüruf Soğutma Suyu
pH	0,95	8,8
Cl, mg/L	12900	1540
Pb, mg/L	6,8	0,8
Hg, mg/L	6,6	0,038

Modern Atık Geri Dönüşüm Teknolojileri

❖ Aşırı Adyabatik Rejimde Gazlaştırma

Rusya Bilimler Akademisi Kimyasal Fizik Problemleri Enstitüsü’nde, yanıcı atıkların aşırı adyabatik rejimlerde filtrasyon yanması esasına dayalı işlenmesi yöntemi geliştirilmiştir [18]. Bu yöntem, atıkların tam yanmasını, toksik bileşiklerin minimum oluşumunu ve yüksek enerji verimliliğini (yaklaşık %95) sağlar.

Yöntemin avantajları:

- Düşük dioksin ve azot oksit emisyonu;
- Yüksek enerji verimliliği;

- Değerli maddelerin (petrol, metaller) geri kazanım imkânı;
- Katı kalıntı ve toksik cüruf miktarının minimuma indirilmesi [19, 20].

Sonuç

Katı evsel atıkların (KEA) etkili bertarafı, aşağıdaki temel unsurları içeren bütüncül bir yaklaşım gerektirir:

- Atık akımlarının ayrıştırılması ve sınıflandırılması;
- Biyolojik işleme yöntemlerinin uygulanması (ör. organik fraksiyonların kompostlanması);
- Kentleşmiş bölgelerde pnömatik taşıma sistemlerinin kullanılması;

- Hijyenik olarak donatılmış depolama sahalarının inşası;
- Yenilikçi termal ve gazlaştırma teknolojilerinin aktif şekilde uygulanması.

Birleşmiş Milletler Çevre Programı / Uluslararası Katı Atık Birliği'nin "Global Waste Management Outlook 2024" raporları, 2023 yılında yaklaşık 2,1 milyar ton olan atık hacminin 2050'ye kadar 3,8 milyar tona çıkabileceğini ve döngüsel ekonomi modeline geçişle yıllık yaklaşık 108,5 milyar USD net ekonomik kazanç sağlanabileceğini göstermektedir. Bu bağlamda, aşırı adyabatik rejimde atık gazlaştırma teknolojisi, çevresel güvenliği enerji verimliliği ile birleştiren, toksik artık ürünleri azaltan ve enerji geri kazanımını artıran en umut verici yöntemlerden biri olarak değerlendirilmektedir.

Gelecekte, özellikle doğrusal ekonomiden döngüsel ekonomiye geçiş üzerinde durulmalıdır. Bu modelde atıklar, sorunlu "artık" olarak değil, ya yeniden kullanım için hammadde ya da kapalı döngülere dahil edilen enerji ve materyal kaynağı olarak görülmektedir. Araştırmalar, kaynak verimliliğine, yeniliklere, dijitalleşmeye ve ayrıştırma ile geri dönüşümün güçlendirilmesine odaklanan stratejilerin —örneğin extended producer responsibility (EPR), dijital izleme ve hammadde akışlarının optimizasyonu gibi uygulamalar — atık yönetim etkisini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir.

Dolayısıyla, atık yönetim sistemi şu şekilde evrimleşmelidir:

- Basit atık uzaklaştırma ve depolamadan, maksimum geri dönüşüm ve malzeme geri kazanımı ile entegre bir yaklaşıma;
- Sadece teknolojik çözümlerden, yasa, ekonomik teşvikler, dijitalleşme ve toplumun davranış kültürünü içeren sistemsel değişikliklere;
- Sorunlara reaksiyondan, kaynakları proaktif yönetme ve atıkları önleme yaklaşımına geçiş.

Sadece modern KEA işleme yöntemlerinin, güçlü teknolojik çözümlerin ve döngüsellik odaklı üretim, tüketim ve giyim modellerine geçişin birleşik uygulanması, kentleşmiş bölgelerde sürdürülebilir kalkınmayı sağlayabilir ve doğal ekosistemler üzerindeki yükü en aza indirebilir.

Öneriler

❖ Döngüsel Ekonomi İlkelerinin Uygulanması

"Üretim — Tüketim — Atık" doğrusal modelinden, "Kaynak — Üretim — Tüketim — Geri Dönüşüm — Yeniden Kullanım" döngüsüne geçiş gereklidir. Bu, ulusal atık yönetimi programlarının gözden geçirilmesini, işletmelerin ikincil hammadde kullanmaya teşvik edilmesini ve geri dönüşüm altyapısının geliştirilmesini gerektirecektir.

❖ Atıkların Ayrı Toplanması ve Sınıflandırılması Sisteminin Geliştirilmesi

Evler, işletmeler ve belediyeler düzeyinde çok katmanlı ayrı toplama sistemlerinin uygulanması önemlidir. Singapur ve Finlandiya örnekleri, doluluk sensörlü ve RFID etiketli akıllı konteynerlerin kullanılmasıyla atık toplama verimliliğinin %20–30 oranında artırılabilceğini göstermiştir.

❖ Yenilikçi Geri Dönüşüm Teknolojilerinin Uygulanması

Öncelikli alanlar arasında aşırı adyabatik rejimde gazlaştırma, piroliz, organik fraksiyonların anaerobik fermentasyonu ve termokatalitik yöntemler yer almaktadır. Bu teknolojiler, yüksek enerji verimliliği (%90–95'e kadar) sağlar ve geleneksel yakmaya kıyasla toksik madde emisyonlarını azaltır.

❖ Çevre Dostu Düzenli Depolama Sahalarının Altyapısının Geliştirilmesi

Tüm depolama sahaları, sızıntı suyu toplama, gaz tahliye ve yeraltı suyu izleme sistemleriyle donatılmalıdır. Zorunlu sertifikasyonun uygulanması, izinsiz çöplüklerin oranını azaltacak ve uluslararası ISO 14001 ve ISO 45001 standartlarına uygunluğu sağlayacaktır.

❖ Atık Yönetiminde Dijital Teknolojiler ve Yapay Zekâ Uygulamalarının Kullanılması

Atık izleme dijital platformları (Waste Data Hub, Smart Waste System), makine öğrenimi ve YZ analitiği kullanılarak atık hacminin tahmini ve çöp toplama güzergâhlarının optimize edilmesi, lojistik maliyetleri azaltacak ve CO₂ emisyon kontrolünü iyileştirecektir. Elsevier (2024) araştırmalarına göre, YZ'nin "akıllı şehirlerde" kullanılması, atık yönetimi verimliliğini %35–40 artırmaktadır.

❖ Genişletilmiş Üretici Sorumluluğu (EPR)

Üreticiler, ürünlerinin ve ambalajlarının kullanım sonrası toplanması ve geri dönüştürülmesinden sorumlu olmalıdır. EPR mekanizmalarının geliştirilmesi, şirketleri ürünleri sökülebilir ve geri dönüştürülebilir şekilde tasarlamaya teşvik ederek toplam atık miktarını azaltır.

❖ Çevre Eğitimi ve Halkın Katılımı

Sorumlu atık yönetimi kültürünün oluşturulması için çevre eğitim sistemi, okul düzeyinden başlayarak geliştirilmelidir. Etkili halk kampanyaları ve dijital katılım platformları, vatandaşların ayrı toplama ve geri dönüşüm faaliyetlerine katılımını artırır.

Bu önlemlerin uygulanmasıyla:

- Atık geri dönüşüm oranı %50–60'a çıkarılabilir,
- İzinsiz çöplüklerin sayısı azaltılabilir,
- İkincil kaynak üretimi ve atık bertaraf süreçlerinin enerji verimliliği artırılabilir.

Bu sonuçlar, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SDG 11, 12 ve 13) ile uyumludur.

Conflict of Interest: NIL

Funding Sources: NIL

References

- [1] A. Review of Global Municipal Solid Waste Management: Research Trends and Future Perspectives (Kafle S. ve ark., 2025) — 15.646 makaleyi kapsayan kapsamlı bir inceleme; TEB yönetimini teknolojik, ekonomik ve çevresel açıdan analiz eder. MDPI.
- [2] Municipal Solid Waste Management Challenges in Developing Countries in Asia and Africa (Z Zhang ve ark., 2024) — 2013–2023 yılları arasında Asya ve Afrika ülkelerinde TEB yönetiminde temel sorunları inceleyen bir derleme. ScienceDirect.
- [3] A Systematic Literature Review on Municipal Solid Waste Management Using Machine Learning and Deep Learning (2025) — 2018–2024 yıllarını kapsayan, TEB sistemlerinde Makine Öğrenmesi / Derin Öğrenme uygulamalarını analiz eden sistematik inceleme. SpringerLink.
- [4] Municipal Solid Waste Management 2021–2023: Systematic Review (Sánchez-Romero F.E., Recalde-Gracey A.E., 2024) — 2021–2023 döneminde TEB yönetimi stratejilerini kapsayan sistematik derleme. SciELO.
- [5] Municipal Solid Waste Management: A Review of Machine Learning Algorithms to Automate and Optimize Treatment and Disposal (2023) — TEB toplama, taşıma ve geri dönüşüm süreçlerini otomatikleştirme ve optimize etmede ML algoritmalarının kullanımı üzerine derleme. E3S Conferences.
- [6] A Review on the Municipal Solid Waste Management Status, Challenges and Potential for the Future Indian Cities (Soni A., Das P.K., ve ark., 2023) — Hindistan şehirlerindeki TEB yönetimi durumu, atık özellikleri, sorunlar, geri dönüşüm ve gelecek potansiyeli üzerine derleme. IDEAS/RePEc.
- [7] Analysis of the Composition and Properties of Solid Municipal Waste from Six Cities in Kazakhstan (Aibuldinov Y., ve ark., 2025) — Kazakistan'daki (Astana, Almatı ve diğerleri) TEB'nin bileşimi ve özelliklerini inceleyen çalışma; bölgesel bağlam için faydalıdır.
- [8] Bocharnikov M.I. Poligon Yerleşimi: Ekoloji ve Teknolojiler. – Moskova: Ekoloji, 2016.
- [9] Sinitsyn V.V. Modern Sağlık Depolama Alanları: Tasarım ve İşletme. – St. Petersburg: Politekh-Press, 2019.
- [10] Manelis G.B. Yanıcı Atıkların Aşırı Adyabatik Rejimde Gazlaştırma Yöntemi. – Chernogolovka, 2000.
- [11] Chernova N.N., Lapina G.V. Atık Yakmanın Çevresel Riskleri. // Çevre Koruma Teknolojileri. – 2015. – №2. – s. 22–28.
- [12] European Environment Agency. Avrupa Ülkelerinde Belediye Atık Yönetimi. – Kopenhag: EEA Raporu, 2021.
- [13] WHO. Dioksinler ve İnsan Sağlığına Etkileri. – Cenevre: Dünya Sağlık Örgütü, 2022.
- [14] Blinov A.Yu. Dioksinler: Kaynaklar, Toksisite ve Kontrol. – Moskova: Kimya, 2017.
- [15] Melnikov S.A. Atıkların Halk Sağlığı Üzerine Etkisi. // Hijyen ve Sanitasyon. – 2021. – №4. – s. 40–44.
- [16] Raznoshchik V.V. Atık ve Yan Ürünlerin İnşaat Malzemelerinde Kullanımı. // Journal of Environmental Studies. – 2019. – Cilt 8(2). – s. 105–113.
- [17] EPA (ABD Çevre Koruma Ajansı). Atık Yakımı ve Halk Sağlığı. – Washington, D.C., 2020.
- [18] Gerasimov V.E. Atıkların Termal Bertaraf Yöntemleri: Teori ve Uygulama. – Moskova: Teknosfera, 2022.

[19] Circular Economy and Waste-to-Energy Technologies. – Elsevier, 2023.

[20] OECD. Belediye Atık İşleme Trendleri 2024. – Paris: OECD Yayınları, 2024.

Declarations:

Author's Contribution:

- Conceptualization, data collection, interpretation, drafting of the manuscript and intellectual revisions
- The author agrees to take responsibility for every facet of the work, making sure that any concerns about its integrity or veracity are thoroughly examined and addressed

Correspondence:

Dilara K. Sunakbaeva

dilara.sunakbayeva@ayu.edu