

Türkiye'nin Karbonsuzlaşma Politikaları Kapsamında Düzce İli Katı Atık Yönetiminin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

Kadriye Elif Maçın^{1,*}

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 34467, İstanbul.

Özet

Bu çalışma, Türkiye'nin 2053 yılı karbonsuzlaşma hedefi doğrultusunda Düzce'deki katı atık yönetiminin çevresel etkilerini değerlendirmektedir. Çalışmada, yaşam döngüsü değerlendirme yöntemi kullanılarak farklı elektrik karışımlarının etkileri karşılaştırılmıştır. Düzce'deki yıllık atık üretimi fonksiyonel birim olarak belirlenmiş ve ReCiPe-2016 metodu kullanılarak sekiz etki kategorisi ile yedi farklı senaryo analiz edilmiştir. Arka plan verileri, literatür kaynakları ve ecoinvent 3.7.1 veri tabanı kullanılarak oluşturulmuştur. Ayrıca, düzenli depolama tesisindeki (DDT) gaz toplama oranlarının değişimleri hassasiyet (duyarlılık) analizi yöntemiyle incelenmiştir. Sonuçlar, Türkiye'nin 2053 yılına yönelik karbonsuzlaşma hedeflerini gerçekleştirmesine rağmen, DDT'ye sıfır atık gönderme hedefine ulaşamamasının ilave çevresel yükler oluşturabileceğini göstermektedir. Özellikle geri dönüşüm oranlarının düşüklüğü, enerji geri kazanımının sınırlı olması ve biyolojik olarak parçalanabilir atıkların DDT'de uzun vadeli çevresel riskler yaratması öne çıkan bulgular arasındadır. Geri dönüşümle hammadde ikamesi, tüm senaryolarda çevresel kazanç sağlamaktadır ve özellikle son yıllarda gündeme gelen depozito sisteminin hızla uygulanması gerektiği vurgulanmaktadır. Karbonsuzlaşma politikasıyla uyum için, döngüsel ekonomi modelinin atık yönetiminde benimsenmesi kritiktir. Kamu-özel sektör iş birliğinin güçlendirilmesi ve lojistik süreçlerin optimizasyonu önemli stratejik adımlar arasında yer almaktadır. Ayrıca, ileride atık yönetiminde maliyet analizlerinin yapılması, karar vericilerin etkili politika önerileri geliştirmesine katkı sağlayacaktır.

Anahtar Sözcükler

Karbonsuzlaşma, Karbondan Uzaklaşma, Kentsel Katı Atık, Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi, Düzenli Depolama Tesisi, Çevresel Etki

Life Cycle Assessment of Solid Waste Management in Düzce Province within the Scope of Türkiye's Decarbonization Policies

Abstract

This study evaluates the environmental impacts of solid waste management in Düzce within the framework of Türkiye's 2053 carbon decarbonization target. Using the life cycle assessment, the effects of different electricity mixes were compared. The annual waste generation in Düzce was defined as the functional unit, and the ReCiPe-2016 method was employed to analyze eight impact categories across seven different scenarios. Background data were sourced from literature and the ecoinvent 3.7.1 database. Additionally, sensitivity analysis was conducted to assess variations in gas collection rates at landfill. The findings indicate that despite Türkiye's efforts to achieve carbon neutrality by 2053, failure to meet the zero-waste-to-landfill target could lead to additional environmental burdens. Key concerns include low recycling rates, insufficient energy recovery, and long-term environmental risks posed by biodegradable waste disposal. Raw material substitution by recycling provide environmental benefits across all scenarios, emphasizing the need for the swift implementation of the deposit system, which has gained prominence in recent years. Integrating a circular economy model into waste management is significant for ensuring compliance with decarbonization policies. Strengthening public-private partnerships and optimizing logistics processes are essential strategic measures. Furthermore, conducting cost analyses in waste management will support policymakers in developing effective policy recommendations.

Keywords

Decarbonization, Phasing-out Carbon, Municipal Solid Waste, Life Cycle Assessment, Landfill, Environmental Impacts

1. Giriş

Elektrik sisteminin karbonsuzlaştırılması, iklim değişikliğinin azaltılması açısından kritik bir rol oynamaktadır. Paris Anlaşması'nın 2°C iklim hedefine ulaşabilmek için, elektrik sektörü ve daha geniş anlamda enerji sektörünün sera gazı emisyonlarını yüzyılın ortasına kadar hızla ve neredeyse sıfıra indirmesi gerekmektedir (Skea, 2022). Net sıfır dünyaya geçiş, tüm sektörlerde köklü ve sistematik bir dönüşümü gerektirmektedir. Atık yönetim sektörü ise artan talepleri karşılayabilmek adına döngüsellliği önemli ölçüde artırmalı ve aynı zamanda sera gazı emisyonlarını azaltmalıdır. Döngüsel ekonomiye geçiş, sürdürülebilirlik hedefleri açısından büyük önem taşımaktadır.

Günümüzde, birçok sektöre özgü karbon giderme yol haritalarında, karbon azaltma, yeniden kullanım ve geri dönüşüm uygulamalarına yer verilmesi, bu konunun ne kadar ciddi şekilde ele alındığını göstermektedir. Dünyada doğal kaynakların tüketimi ve katı atık yönetimi (KAY) uygulamalarına ilişkin endişeler giderek artmaktadır. Malzeme tüketiminin 2060 yılına kadar iki katına çıkması ve atık üretiminin 2050 yılına kadar %70 oranında artması öngörülmektedir (Organisation for Economic Co-operation and Development, 2019). Kentsel KAY, dünya nüfusunun yarısından daha azının yeterli atık yönetimine erişebildiği kritik bir küresel sorundur. 2050 yılına kadar 3,4 milyar tona ulaşması öngörülen küresel kentsel katı atık üretimindeki artış, çevreyi tehdit etmekte ve sosyoekonomik kalkınmayı olumsuz yönde etkilemektedir (Kaza vd., 2018). Bu duruma karşılık olarak, dünya çapındaki belediyelerde sürdürülebilir atık yönetim sistemleri ve politikaları hayata geçirilmektedir. Ayrıca, şehirler iklim değişikliğine uyum sağlamak amacıyla dönüşüm sürecine girmektedir.

Atık yönetimi, kaynak tüketimi, iklim değişikliği gibi farklı kavramların birbiriyle ilişkisini kurabilmek ve atık yönetiminin çevresel etkilerini inceleyebilmek için kullanılan metotlardan biri yaşam döngüsü değerlendirmesidir (YDD). YDD, bir ürünün veya hizmetin yaşam döngüsü boyunca, yani hammadde alımından, bertarafına kadar geçen zamanda çevresel yükü ve faydalarını değerlendirmek için kullanılan bilgisayar tabanlı bir araçtır (Khandelwal vd., 2019a). YDD, atık yönetimi için kritik bir öneme sahiptir, çünkü atığın oluşumundan nihai bertarafına kadar çevresel etkilerin kapsamlı bir analizini sunmaktadır. Sera gazı emisyonları, kaynak tükenmesi, asidifikasyon ve ötrofikasyon gibi etkileri ölçen YDD, geri dönüşüm, yakma ve depolama gibi yöntemlerin karşılaştırılmasını sağlayarak karar vericilere en sürdürülebilir stratejileri belirlemede rehberlik etmektedir. Atık yönetimi teknolojilerinin veya senaryolarının zorluklarını belirlemek ve potansiyel çevresel etkilerini değerlendirmek için birçok YDD çalışması yürütülmüştür (Ionescu vd., 2013; Ferronato vd., 2020). Uluslararası literatürde, KAY için YDD çalışmalarına ilgi son yıllarda artarak devam etmektedir (Turner vd., 2016; Wang vd., 2020; Tian vd., 2025).

2006-2025 yılları arasında atık yönetim sistemleri üzerine yapılan çalışmalarda, gelişmiş ülkeler (Birleşik Krallık, İtalya, Portekiz) ve gelişmekte olan ülkeler (Brezilya, Hindistan, Türkiye) arasında farklılıklar gözlemlenmiştir (Tablo 1). Son 20 yılda Türkiye'de de kentsel ölçekte YDD çalışmalarına artan bir ilgi vardır. Güven vd. (2019)'ın İstanbul'da yaptığı çalışmada düzenli depolama tesisi (DDT) oranı %84 olarak belirlenirken, Banar vd. (2009)'ın Eskişehir'deki çalışmasında bu oran %93 olarak kaydedilmiştir. Ancak, Ankara (Özeler vd., 2006), Sakarya (Erses Yay, 2015), Aksaray (Çetinkaya vd., 2018), Bursa (Salihoğlu vd., 2019), Kayseri (Irbaş & Dadaşer-Celik, 2021) için DDT oranı %100 olarak raporlanmıştır. Khandelwal (2019b)'ın Hindistan'ın Nagpur şehrinde yaptığı çalışmada DDT oranı %83 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, Goulart Coelho ve Lange (2018)'nin Brezilya'nın Rio de Janeiro şehrinde gerçekleştirdiği çalışmada bu oran %98 olarak raporlanmıştır. Bu sonuçlar, Türkiye'deki çalışmalarla benzerlik göstermektedir. Birleşik Krallık'taki Nottingham (Wang vd., 2020) ve Cardiff (Turner vd., 2016) şehirlerinde yapılan çalışmalarda, DDT oranları sırasıyla %57,6 ve %54 olarak tespit edilmiştir. Slorach vd. (2020) ise sadece gıda atıkları için yaptığı çalışmada DDT oranını %34 bulmuştur. İtalya'da (Tunesi vd., 2016) yapılan çalışmada DDT oranı %26 olarak belirlenirken, Portekiz'de (Fernández-Braña vd., 2020) bu oran %62 olarak tespit edilmiştir. Literatürde bahsi geçen şehirler, farklı nüfus büyüklüklerine sahip olmalarına rağmen, bulundukları ülkenin gelişmişlik düzeyi ve genel atık yönetimi politikalarından etkilenmişlerdir. Modellerde, yıllık üretilen belediye atığı miktarı (Goulart Coelho & Lange, 2018), ton atık başına (Wang vd., 2020) ve ton gıda atığı başına (Güven vd., 2019) gibi farklı fonksiyonel birim seçimleri kullanılmıştır. Bu çeşitlilik, atık yönetimi çalışmalarında kullanılan metriklerin, araştırmanın amacına ve bağlamına göre değişiklik gösterebileceğini ortaya koymaktadır. Fonksiyonel birimde olduğu gibi, seçilen metodolojilerde de çeşitlilik gözlemlenmiştir. CML (Khandelwal vd., 2019b), IPCC 2006 (Turner vd., 2016), IPCC 2013 (Wang vd., 2020), ILCD (Tunesi vd., 2016), IMPACT 2002+ (Çetinkaya vd., 2018) ve ReCiPe (Güven vd., 2019) gibi YDD çalışmalarında genel kabul görmüş yöntemlerin yanı sıra, atık yönetimine özel olarak geliştirilmiş Integrated Waste Management Model for Municipalities (Irbaş & Dadaşer-Celik, 2021) gibi metodolojilere de rastlanmıştır. Çevresel etki kategorilerinde, küresel iklim değişikliği tüm çalışmalarda ele alınan ana kategori olmuştur. Bu kategoriyi ise sırasıyla asidifikasyon potansiyeli ve ötrofikasyon potansiyeli takip etmiştir. Elektrik karışımlarının (ve karbonsuzlaşma politikalarının) KAY üzerine etkisini incelemeye gelindiğinde, bu konuya odaklanan çalışmalar sayılıdır. Örneğin; Güven vd. (2019) tüm KAY yerine sadece gıda atıklarına odaklanarak çalışmalarını tamamlamıştır.

Türkiye'de her yıl 30,3 milyon ton atık üretilmektedir (Türkiye İstatistik Kurumu, 2023a). 2023 yılında belediye atıklarının %53,4'i düzenli depolama sahalarında bertaraf edilmiş, %11,7'si kontrolsüz depolama sahalarında bertaraf edilmiş ve %34,9'si atık tesislerinde (biyometanizasyon, kompostlaştırma, yakma ve mekanik biyolojik işlem dâhil) geri kazanılmıştır (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023a). 2053 yılına kadar hedef, atıkların yalnızca %30'unu DDT bertaraf etmek, kontrolsüz döküm alanlarını ortadan kaldırmak ve toplam geri kazanım oranını %70'e çıkarmaktır. Bunun yanı sıra Türkiye'nin enerji ihtiyacının %50'den fazlasını fosil kaynaklardan elde ettiği bilinmektedir (Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi, 2024). Atık sektörü, Türkiye'nin toplam sera gazı emisyonlarının %2,3'ünü oluşturarak 2023 yılında 14,1 MtCO₂ eşdeğerinde emisyonu neden olmuştur. Bu değerin içinde atık su arıtma emisyonları da dahildir. Türkiye'nin yenilenebilir enerji kapasitesini artırma hedefi ve 2053 yılı karbonsuzlaşma politikaları doğrultusunda, bu dönüşümün atık yönetimi üzerindeki etkilerini belirlemek büyük önem taşımaktadır. KAY'a ilişkin mevcut literatürün büyük bölümü mevcut elektrik karışımı üzerine odaklanmış olup, Türkiye'nin karbonsuzlaşma politikalarının KAY üzerindeki etkisine dair bir çalışmaya yapılan literatür araştırmalarında rastlanmamıştır.

Bu çalışmanın amacı, YDD perspektifini kullanarak Düzce'deki mevcut KAY sisteminin çevresel etkilerini analiz etmek ve farklı elektrik karışımları için ortaya çıkan değişimleri karşılaştırmaktır. Bugün hâlâ en yaygın şekilde kullanılan tesisler DDT'lerdir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023a) ve atık yönetim sistemindeki geçiş sürecinde DDT'lerin verimli şekilde işletilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, DDT süreçlerinde depo gazı toplama oranındaki değişim hassasiyet (duyarlılık) analizi yöntemiyle incelenmiş ve tartışılmıştır. Çalışmanın bulgularının, karar vericilere atık yönetimi politikalarını iyileştirme sürecinde rehberlik edeceği ve gelecekteki çalışmalara önemli bir referans noktası sunacağı öngörülmektedir.

Tablo 1: Literatürdeki ulusal ve uluslararası atık yönetimi yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmaları

Bölge/Çalışma*	Fonksiyonel Birim**	Metot	Etki Kategorileri***	Mevcut Atık Yönetimi****	Çalışmada gelecek döneme ilişkin elektrik projeksiyonu var mı?
Cardiff, Birleşik Krallık (Turner vd., 2016)	Yıllık BA üretimi	IPCC 2006	KIP	%54 DDT, %45,2 MGT, KOM ve AÇ.	Yok
Nottingham, Birleşik Krallık (Wang vd., 2020)	1 t BA	IPCC 2013	KIP	%7,3 DDT, %31,5 MGT %12,9 KOM ve %57,6 yakma.	Yok
Birleşik Krallık (Slorach vd., 2020)	1 t gıda atığı	ReCiPe	KIP, AP, KA, ÖP, İT, AKT, OTİ, FO, ÖD, ET (DS), ET (TS), ET (K), AK, İPM	%34 DDT, %10 KOM, %6 AÇ ve %50 yakma.	Var
La Paz, Bolivya (Ferronato vd., 2020)	Yıllık BA üretimi	CML	KIP, AP, ÖP, İT	BA karışık olarak toplanması çoğunlukla DDT'ye yönlendirilirken, 4/gün küçük bir kısmı KOM tesisine gitmektedir.	Yok
Rio de Janeiro, Brezilya (Goulart Coelho & Lange, 2018)	Yıllık BA üretimi	CML	KIP, AP, ÖP, İT, AKT, FO	%98,2 DDT, %0,4 MGT ve %1,4 KOM.	Var
31 şehir, Çin (Tian vd., 2025)	1000 t BA'nın organik bölümü	CML	KIP, AP, ÖP, ET (TS), ET (K)	%100 KOM	Yok
Nagpur, Hindistan (Khandelwal vd., 2019b)	1 t BA	CML	KIP, AP, ÖP, İT, AKT, FO	%83 DDT ve %17 KOM	Yok
Bologna, İtalya (Tunesi vd., 2016)	Yıllık toplanan BA	ILCD	KIP, AP, AKT	%26 DDT, %34 MGT, KOM ve AÇ, %38 enerji geri kazanımı ile yakma.	Yok
Orta büyüklükte şehir, Portekiz (Fernández-Braña vd., 2020)	Yıllık BA üretimi	IPCC 2013 ReCiPe	KIP, AP, ÖP, İT, AKT, ET (K) ET (TS), OTİ, İPM	%62 DDT, %12,7 MGT ve % 25 MBT	Yok
Ankara, Türkiye (Özeler vd., 2006)	Yıllık BA üretimi	Integrated Waste Management Model for Municipalities	KIP, AP, ÖP, İT	%100 DDT	Yok
Eskişehir, Türkiye (Banar vd., 2009)	1 t BA	CML	KIP, AP, ÖP, İT, AKT, FO	%93 DDT, %7 MGT	Yok
Sakarya, Türkiye (Erses Yay, 2015)	1 t BA	CML	KIP, AP, İT, AKT, ET (DS), ET (TS), ET (K), OTİ, FO	%100 DDT	Yok
Aksaray, Türkiye (Çetinkaya vd., 2018)	Yıllık BA üretimi	IMPACT 2002+	KIP, AP, ÖP, İT, AKT, FO	%100 DDT	Yok
Bursa, Türkiye (Salihoğlu vd., 2019)	1 t BA	ReCiPe	KIP, AP, ÖP, OTİ, AKT, ET	%100 DDT	Yok
İstanbul, Türkiye (Güven vd., 2019)	1 kg gıda atığı	ReCiPe	KIP, AP, İT, AKT, ET (DS), ET (TS), ET (K)	%84,2 DDT, %10,5 MBT, %5,3 KOM	Var
Kayseri, Türkiye (İrbaş & Dadaşer-Çelik, 2021)	Yıllık BA üretimi	Integrated Waste Management Model for Municipalities	KIP, AP, ÖP	%100 DDT	Yok

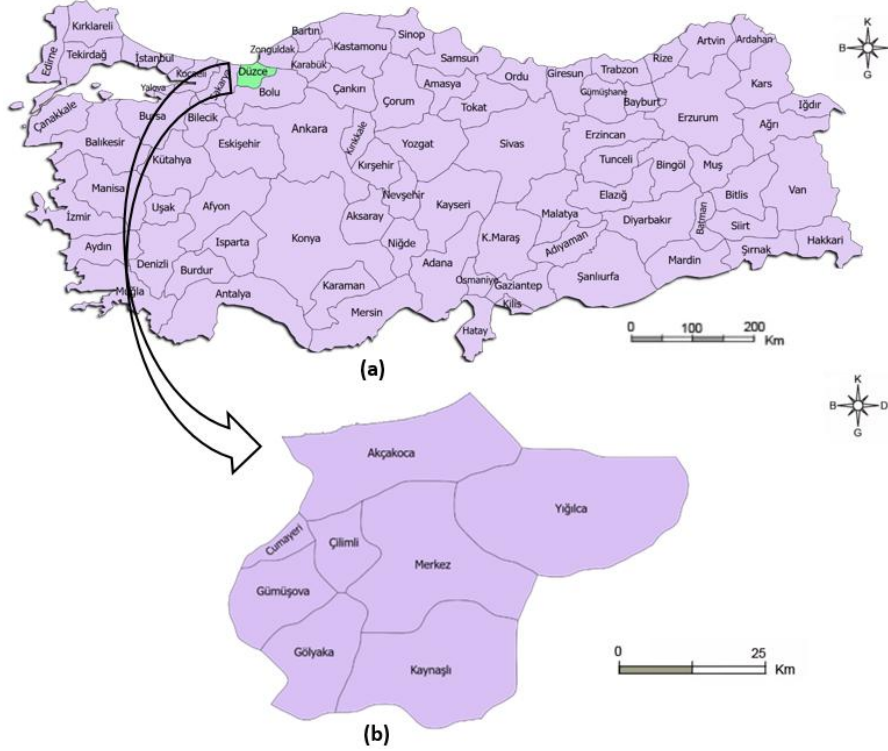
* Sütun, ülkelerin alfabetik sırasına göre düzenlenmiştir. ** BA: Belediye Atığı/kentsel atık, kg: kilogram, t: ton. *** Küresel Isınma Potansiyeli/İklim Değişikliği: KIP, Asitleme Potansiyeli: AP, Karasal Asitletme: KA, Ötrofikasyon Potansiyeli: ÖP, İnsan üzerinden toksisite: İT, Abiyotik kaynakların tükenmesi: AKT, Ozon Tabakasında İncelme: OTİ, Fotokimyasal Oksidasyon, FO, ÖD, Ekotoksisite (deniz suyu): ET (DS), Ekotoksisite (tatlı su): ET (TS), Ekotoksisite (karasal): ET (K), Arazi Kullanımı: AK, İnce partikül madde oluşumu: İPM. **** AÇ: Anaerobik çürütücü, DDT: Düzenli depolama tesisi, MBT: Mekanik ve biyolojik işlem, MGT: Maddesel geri dönüşüm tesisi, KOM: Kompostlaştırma.

2. Materyal ve Metot

2.1. Düzce İli Atık Yönetimi

Düzce, Türkiye'nin kuzeybatısında yer alan ve Karadeniz kıyısına uzanan bir ildir (Şekil 1). İl statüsünü 1999 yılında kazanmıştır. Düzce'nin merkez, Akçakoca, Cumayeri, Çilimli, Gölyaka, Gümüşova, Kaynaşlı ve Yığılca olmak üzere 8 ilçesi bulunmaktadır. Düzce ilinin alanı 2.492 km²'dir. Düzce'de imalat sanayisinin en fazla tesis ve istihdam sağlayan sektörleri tekstil, metal, gıda, orman, mobilya, kauçuk, otomotiv ve kimya ilaç sektörleridir (Düzce Ticaret Borsası, 2020).

Düzce ilinde bir adet DDT bulunmaktadır. Yoğun nüfuslu alanlarda sıklıkla 400 L ve 800 L kapasiteli konteynerler tercih edilmektedir. Karışık ve organik atıklar genellikle sıkıştırılmalı araçlarla toplanmaktadır. Mekanik ayırma tesisinden gelen biyobozunur atıklar (mutfak atıkları ve park-bahçe atıkları), biyometanizasyon tesisine alınarak fermentasyona tabi tutulmaktadır. Elde edilen biyogaz ise elektrik üretim tesisinde hem ısı hem de elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaktadır. Isı, biyometanizasyon tesisinde değerlendirilir, elektrik ise enterkonnekte sisteme verilmektedir. Sıvı fermente ürünün %50'si, geri dönüşüm sistemi ile biyobozunur atıkların fermentasyon işleminde kullanılmaktadır (Beşer-Karpuz, 2022). Biyometanizasyon tesisinde fermentasyon işlemi sırasında oluşan %20-25 oranındaki katı fermente ürün, ilgili mevzuatların gereksinimlerini karşıladığı takdirde tarımda veya park-bahçe uygulamalarında kullanılmakta, aksi halde "Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik" hükümlerine uygun olarak yönetilmektedir (T.C. Resmi Gazete, 2010). Yine mekanik ayırma tesisinde ayrılan ambalaj atıkları geri dönüşüm için maddesel geri kazanım tesisine (MGT) gönderilmektedir. Reddedilen atıklar DDT'ye gönderilmektedir.



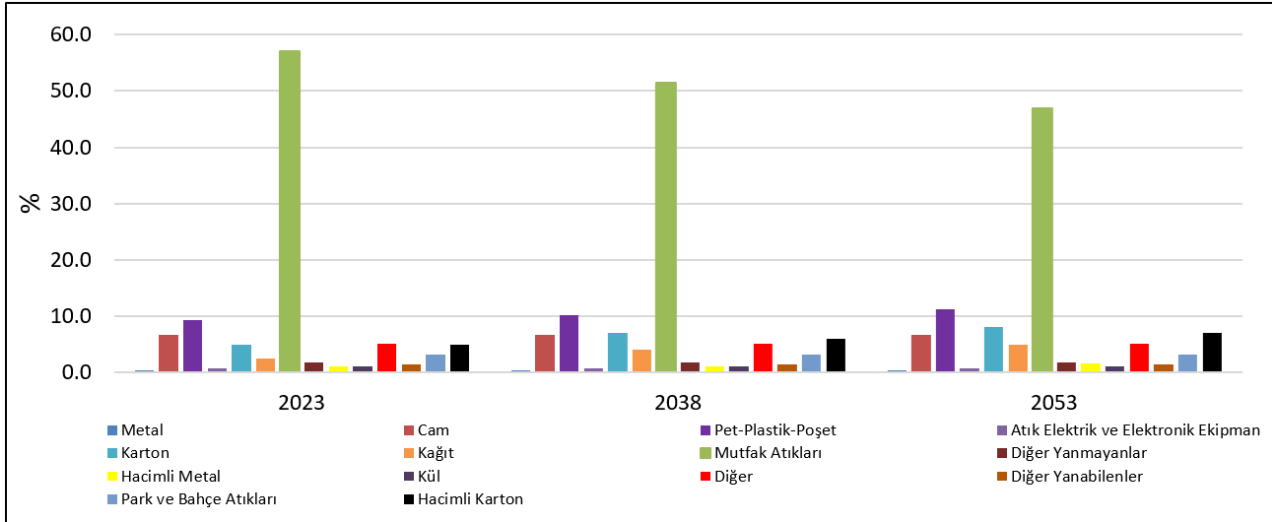
Şekil 1: a) Türkiye ve b) Düzce haritası

2.2. Düzce Nüfus ve Atık Miktarı Projeksiyonu

Katı atıkların miktarları ve özellikleri ülkelere göre değişebildiği gibi aynı ülke içinde bölgeden bölgeye değişebilmektedir (Demirarslan & Yalçın Çelik, 2018). Bu yüzden atık karakterizasyonu verileri, Düzce Belediyesi'nin gerçekleştirdiği saha çalışmalarına dayanan karakterizasyon çalışmasından elde edilmiştir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023b). Düzce'de yapılan atık karakterizasyon çalışmasında, mutfak atıklarının oranı %57, kağıt ve karton %7,5, metal atıklar %0,3 ve diğer atıkların oranı %5,1 olarak belirlenmiştir (Şekil 2).

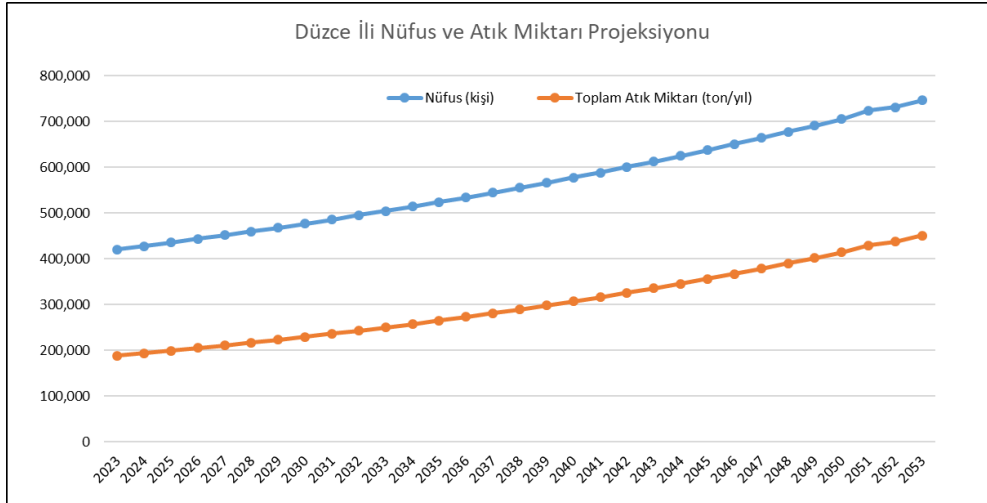
Karadeniz bölgesindeki Artvin ilinde gerçekleştirilen çalışmada, organik atıkların oranı %61, olarak saptanmıştır. Atık türleri arasında en büyük pay %10 ile kağıt atıklara ait olup, bunu sırasıyla %9 ile plastik atıklar, %2,3 ile metal atıklar ve %3,2 ile cam atıklar takip etmektedir (Demirarslan & Yalçın Çelik, 2018). Trabzon'da yapılan atık karakterizasyon çalışmasında, organik atıkların oranı %57,4, kağıt atıklarının %9,8 ve metal atıklarının %0,5 olduğu belirlenmiştir.

Gümüşhane'de ise organik atıkların oranı %29,8 farklı bir sonuç olarak dikkat çekmektedir (Nas & Bayram, 2008). Düzce ili verileri ise Karadeniz'deki diğer şehirlerle karşılaştırıldığında genel olarak tutarlılık göstermektedir. Bu bağlamda, karakterizasyon sonuçları (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023b) projeksiyon çalışmalarında kullanılmak üzere uygun görülmüştür.



Şekil 2: Düzce atık karakterizasyonu ve atık projeksiyonu (%)

Gelecekteki atık miktarı, Düzce ili Sıfır atık Planı'na uygun olarak projelendirilmiştir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2021). Kişi başına düşen atık miktarı, atık karakterizasyonu ve nüfus değişiklikleri gibi atık oluşumuna ilişkin çeşitli itici faktörler dikkate alınmıştır (Izquierdo-Horna vd., 2022). Düzce'nin tahmini nüfusunun kişi başına atık üretimiyle çarpılmasıyla tahmin edilmiştir (Şekil 3). Ayrıca, Düzce ve Türkiye'deki (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2017) atık karakterizasyon değişim eğrileri göz önünde bulundurularak atık karakterizasyon değişiklikleri dikkate alınmıştır (Şekil 2). Nüfus 2023 yılı için 421 bin kabul edilmiş, bu değer üzerinden yapılan projeksiyon ile 2038 ve 2053 için 555 bin ve 745 bin olarak hesaplanmıştır (Şekil 3). Belediye atıkları haricinde toplanan park- bahçe atıklarının da biyometanizasyon tesisine gönderildiği bilinmektedir. Böylelikle 2023 yılında üretilen toplam atık 223 bin ton-atık/yıl olarak bulunmuştur. Düzce'de 2023 yılında en çok üretilen atık bileşeni %57 ile mutfak atıkları olmuştur hesaplamalar sonucunda bu yüzdenin 2053 yılında %47'ye düşeceği ön görülmüştür (Şekil 2).



Şekil 3: Düzce nüfus ve atık projeksiyonu

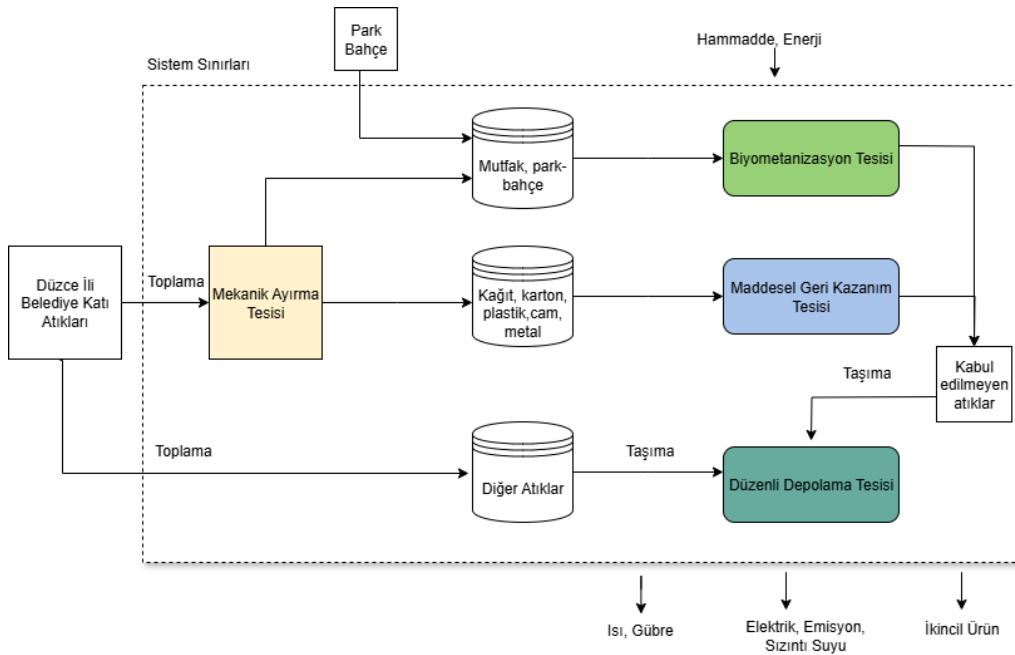
2.3. YDD Modeli

Atık yönetimi, YDD çalışmaları, malzeme geri dönüşümü ve enerji geri kazanımı sonucunda çok işlevlilikten etkilenmektedir. Sonuç odaklı (consequential) YDD envanteri "değişim odaklı", "etki odaklı" ve/veya "karara dayalı" modelleme ilkesine dayanmaktadır. Sistemde alınan bir kararın, hem analiz edilen sistemin arka plan sisteminde hem de diğer sistemlerde ekonominin diğer süreçleri ve sistemleri için doğurduğu sonuçları belirlemeyi amaçlar. Analiz edilen sistemi bu sonuçlar etrafında modeller (Bernstad Saraiva vd., 2018). Mevcut çalışmada, "elektrik karışımlarındaki" değişimin atık sistemi üzerindeki etkisi incelendiğinden, sonuç odaklı YDD uygun bir yaklaşım olarak benimsenmiştir. Ecoinvent v3.7.1 veri tabanından, "İkame, sonuç odaklı, uzun vadeli" veri setinden yararlanılmıştır (Ecoinvent, 2021).

Ecoinvent 2000'li yılların başında, İsviçre Federal Araştırma Enstitüleri ve İdaresi tarafından ülkedeki YDD çalışmalarını desteklemek amacıyla tutarlı bir yaşam döngüsü envanteri veri tabanının oluşturulması ve yönetilmesi için başlatılan bir çalışmanın ürünüdür. Ecoinvent, enerji tedariki, kimyasallar, plastikler ve plastik üretimi, metallerin üretimi ve işlenmesi, ulaşım ve mobilite, bertaraf, inşaat, tarım, elektronik, biyoyakıtlar, kağıt endüstrisi, geri dönüşüm süreçleri ve su verileri gibi ürünler veya hizmetler hakkında 11.500'den fazla envanter veri kümesi içermektedir (Gnansounou, 2017). Modelleme sırasında kullanılan envanterde hem birincil hem de ikincil veriler kullanılmıştır. Birincil veriler doğrudan çalışma alanına Düzce ile KAY sistemine ait verileri içerirken ikincil veriler, birincil kaynaklardan elde edilemeyen örneğin, MGT tesislerinde geri dönüştürülen malzemelerin (ikincil ürünlerin) hammadde ikame oranları (Fernández-Braña vd., 2020) gibi literatür kaynakları içermektedir. Benzer şekilde yukarıda bahsi geçen Ecoinvent veri tabanı da bu çalışma kapsamında ikincil veri sınıfına girmektedir.

Sistem sınırlarının coğrafi kapsamı, Düzce ili olarak tanımlanmıştır (Şekil 1). Bu bağlamda, Düzce ilindeki atıkların toplanması, taşınması, mekanik ayırma tesisi, biyometanizasyon tesisi, MGT ve DDT çalışmaları sistem sınırları içerisinde değerlendirilmiştir (Şekil 4). Bu çalışmanın fonksiyonel birimi, farklı senaryoların toplam çevresel etkilerini karşılaştırmayı mümkün kılmak amacıyla, Düzce ilinde yıllık olarak üretilen atık miktarı (ton/yıl) olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında, karışık KAY ile kaynağında ayrıştırılan bahçe atıkları incelenmiştir. Tıbbi atıklar, inşaat ve yıkıntı atıkları çalışma kapsamı dışında bırakılmıştır. YDD'de ISO 14040 ve 14044 standart yöntemleri izlenmiştir (International Organization for Standardization, 2006a; 2006b). Çalışmada, yukarı akış yükleri göz ardı edilerek sıfır yük varsayımı benimsenmiştir (International Organization for Standardization, 2006b). Etki değerlendirmesi ReCiPe-2016 orta nokta düzeyindeki (mid-point) karakterizasyon faktörleri metodu takip edilerek gerçekleştirilmiştir (Huijbregts vd., 2016). Sadece iklim değişikliği kategorisinde en güncel hesaplama metodu olan IPCC 2021 takip edilmiştir (Skea, 2022). İklim değişikliği, deniz suyu ötrofikasyonu, karasal ekotoksiste, karasal asidifikasyon, tatlısu ekotoksiste, insan üzerinde toksiste-kanserdışı, tatlısu ötrofikasyonu, ekotoksiste deniz suyu olmak üzere 8 etki kategorisinin sonuçları değerlendirilmiştir.

Katı atık yönetimi sistemiyle üretilen elektrik için, Türkiye elektrik şebeke karışımındaki üretilen eşdeğer miktarda elektriğin ikame edileceği varsayılmıştır. Analizde yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik karışımındaki potansiyel değişimleri ve bunların KAY sistemine etkileri ele alınmıştır. Değişimlere dair ayrıntılar senaryolar başlığında verilmiştir.



Şekil 4: Düzce ili belediye atıkları yaşam döngüsü değerlendirme sistemi sınırları

2.4. Senaryolar

Bu çalışmada, Düzce'deki mevcut tesisler YDD ile modellenerek KAY'ın çevresel etkileri analiz edilmiştir. Türkiye'nin karbonsuzlaşma politikasının sistem üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, atık miktarı ve karakterizasyonu dışında, yalnızca arka plan verileri (background data) değiştirilmiştir. Çünkü karbondan uzaklaşma senaryoları (Şekil 5) kendi içerisinde halihazırda bir belirsizlik içermektedir. Bu şekilde modeldeki belirsizlik miktarı azaltılmaya çalışılmıştır. Tablo 2'de gösterildiği üzere yedi senaryo tanımlanmıştır. Örneğin; Düzce mevcut atık yönetimi, normal senaryo elektrik karışımı Senaryo 1 olarak tanımlanırken, 2038 atık miktarı ve karakterizasyonu ve 1,5°C hedefi elektrik karışımı, Senaryo 4 olarak tanımlanmış ve 2053 atık miktarı ve karakterizasyonu ve 2 °C hedefi elektrik karışımı ise Senaryo 7 olarak tanımlanmıştır.

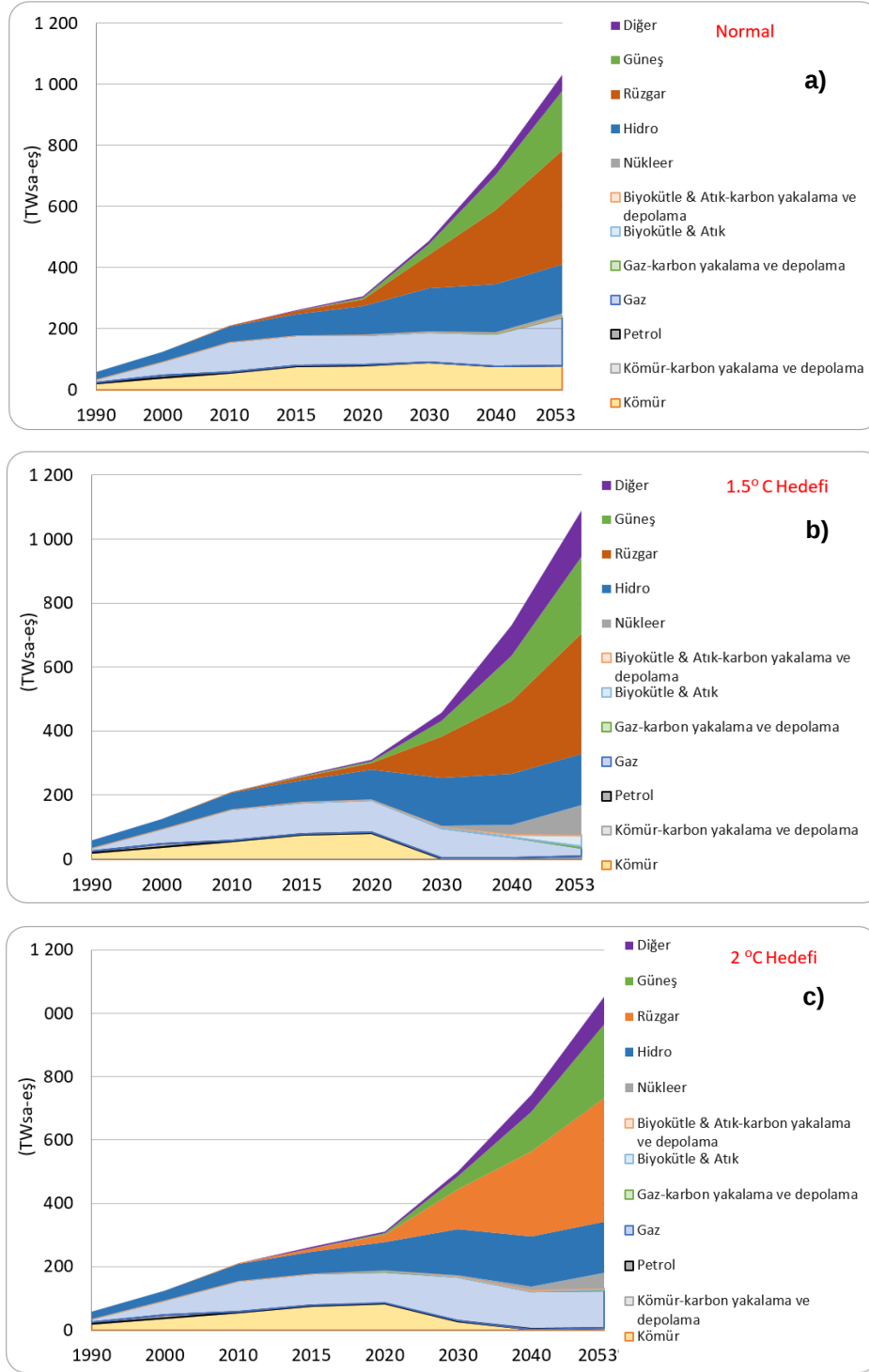
Senaryolarda elektrik karışımları önemli yer tutmaktadır. İklim değişikliğiyle uyum bağlamında, enerji politikası yapımcıları ekonomi odaklı planlardan sürdürülebilirlik odaklı planlara geçme ihtiyacıyla karşı karşıyadır. Bu durumun YDD çalışmasını ilgilendiren kısmı ise, elektrik emisyon faktörlerinin, elektrik şebekesindeki üretim karışımına bağlı olarak değişmesidir. Gelecekteki emisyon azaltma senaryoları için bir çok model bulunmaktadır. Bu çalışma için [Keramidas vd. \(2021\)](#) çalışmasının gelecek elektrik karışımı (Şekil 5), sonuçları kullanılarak emisyon faktörleri hesaplanmıştır.

Tablo 2: Düzce ili katı atık yönetim senaryoları

Yıl	Atık Miktarı ve Karakterizasyonu	Elektirik karışımı			Tesisler
2023	Mevcut Durum (S1)				
2038	İl sıfır atık planına göre artış (bkz. Şekil 2-3) (S2-S4-S6)	Normal (S1-S2-S3)	1,5°C Hedefi (S4-S5)	2°C Hedefi (S6-S7)	Mekanik ayırma tesisi, biyometanizasyon tesisi, MGT, DDT (S1-S2-S3- S4-S5-S6- S7)*
2053	İl sıfır atık planına göre artış (bkz. Şekil 2-3) (S3-S5-S7)				

*(S1-S2-S3- S4-S5-S6- S7): Senaryo 1-7 anlamına gelmektedir. Tabloda hangi senaryonun altında kısaltma varsa o senaryo için o elektrik karışımı veya atık miktarı/karakterizasyonu temsil edici olarak kullanılmıştır.

Bu model üç ana senaryo içermektedir. Bunlar; bu yüzyılın sonuna kadar küresel ortalama sıcaklık değişimini 1.5°C, 2°C'nin çok altında tutma yönündeki Paris Anlaşması hedefleriyle uyumlu yollarla karşılaştırmak ve normal senaryolarıdır (Şekil 5). Burada dikkat edilmesi gereken nokta normal senaryosunun da ciddi anlamda karbondan ve fosil kaynaklardan uzaklaşma hedefleri içermesidir ([Keramidas vd., 2021](#)). Türkiye'nin 2053 hedefleri arasında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını önemli ölçüde artırma ve enerji arzındaki paylarını yükseltme planları yer almaktadır. Türkiye'de toplam elektrik talebinin 2053 yılına kadar 1.000 TWsa üzerine çıkması öngörülmektedir ([Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi, 2024](#)). 2020'de %42,5 olan yenilenebilir enerji kaynaklarının payının, bu talebi karşılamak için 2053 yılında normal senaryoda %63,9'a çıkması beklenilmektedir ([Keramidas vd., 2021](#)). Özellikle güneş ve rüzgar enerjisinin, düşük karbonlu elektrik üretim sistemine geçişte önemli bir rol oynaması beklenilmektedir. Kömür ve doğalgazdan tamamen çıkmak çalışmadaki senaryolar arasında yoktur. 2053 yılında, 1.5°C ve 2°C senaryolarında kömür kullanımının %0,4'e kadar düşmesi beklenirken, bu oran normal senaryoda %10,5 olarak öngörülmektedir. 1.5°C ve 2°C senaryoları kendi aralarında karşılaştırıldığında, en büyük farklardan biri toplam enerji tüketim beklentisinin 2°C senaryosunda daha az olmasıdır. Enerji karışımına bakıldığında ise, 2°C senaryosu %36,1 rüzgar ve %17,2 güneş enerjisi içerirken, 1.5°C senaryosu %31,2 rüzgar ve %19,5 güneş enerjisi içermektedir. Normal senaryonun IPCC 2021 ile hesaplanan sonuçlarına göre elektrik şebekesi CO₂eş emisyon faktörünün 2023'te 0,45 kg CO₂eş/kWsa'ten 2038'te 0,31 kgCO₂eş/kWsa ve 2053'te 0,20 CO₂eq/kWsa'te düşeceği öngörülmektedir.



Şekil 5: Türkiye karbondan uzaklaşma enerji üretim senaryoları: a) normal, b) 1.5°C hedefi, c) 2°C hedefi

2.5. Hassasiyet (Duyarlılık) Analizi

Düzce’de kentsel atıkların çoğu DDT’ye gönderilmektedir. Literatürdeki daha önceki çalışmalar (Mboowa vd., 2017; Maalouf & El-Fadel, 2019) DDT’ye atılan atıkların, biyolojik olarak parçalanabilir atıklarının ayrışması nedeniyle metan emisyonu (iklim değişikliği), insan sağlığı zararları (depolama alanlarından kimyasallara, bakterilere maruz kalma), ekosistem zararları (depolama alanlarından atmosfere, suya ve toprağa sızıntı ve gaz emisyonu), beklenmeyen felaketler (depolama alanlarından gaz ve sızıntı göçünden kaynaklanan yangınlar ve patlamalar) gibi ciddi çevresel sonuçlara neden olabileceğini göstermektedir. Bu yüzden DDT’lerdeki depo gazı kontrolü oldukça önemlidir. Depo gazı toplama oranının yıllara bağlı nasıl değiştiğine dair veriler Türkiye’deki DTT’ler için bulunması kolay değildir. Salihoğlu vd. (2019) Bursa için yaptığı modelleme çalışmasında ortalama oranı %58 olarak bulmuştur.

DTT gazı toplama verimlilikleri yıllar içerisinde (günlük örtü ve nihai örtü gibi teknik değişikliklere ve işletmeye göre) %14 ile %99,6 arasında değişmekte olup, üst örtü için önerilen ortalama %70-75 civarındadır (Tonini vd., 2018). Bu nedenle, bu çalışmada hem orijinal senaryo hem de hassasiyet analizinde literatür verilerinden yararlanılmıştır (Spokas vd., 2006; Sullivan, 2010) (Tablo 3). Orijinal senaryoda, ilk 5 yıl içerisinde üretilen depo gazının %35'inin, 5-10 yıl arasında %60'ının, 10-40 yıl arasında %70'inin toplanabileceği kabul edilmiştir. Hassasiyet hesaplamalarında, Manfredi ve Christensen (2009)'nin çalışmalarında tespit edilen, geleneksel (biyoreaktör veya özel işlem içermeyen) depo gazı toplama oranlarının ortalaması kullanılmıştır. Bu senaryoda depo gazı toplanmasında %15'lik bir verim artışı kabul edilmiştir.

Tablo 3: Hassasiyet analizi- depo gazı toplama oranının değişmesi (%)

Zaman periyodu (yıl)	Toplanan depo gazı- orijinal senaryo (%)	Toplanan depo gazı-hassasiyet senaryosu (%)
5 (günlük örtü)	35	50
10 (ara tabaka)	60	75
40 (nihai-örtü)	70	85

2.6. Tesisler

2.6.1. Mekanik Ayırma Tesisi

Belediye tarafından toplanan karışık atıklar, mekanik ayırma tesisinde işleme alınarak, içerisindeki biyobozunur ve geri dönüşebilir atıklar ayrıştırılmaktadır. Atık taşıma araçları tarafından tesis içerisine boşaltılan atıklar, biyobozunur, bakiye ve geri dönüşebilir türlerine göre ayrılmaktadır. Ayrıştırılan geri dönüşebilir atıklar, karışık olarak preslenip depolanmaktadır. Mekanik ayırma tesisindeki bu süreçler, ekonomik olarak değerlendirilebilecek atıkların yeniden kazandırılmasına katkı sağlamaktadır. Tesisteki atık alımı önce, elekten geçmekte ve küçük boyutlu malzeme biyometanizasyon tesisine giderken, büyük boyutlu malzeme MGT'ye gitmektedir. Elekte dizel tüketimi 2,31 (L/ton-atık) olarak kabul edilmiştir (Grzesik & Malinowski, 2016).

2.6.2. Biyometanizasyon Tesisi

Biyometanizasyon tesisi tarafından üretilen ısının, tesisin kendisi tarafından belirli bir sıcaklığı korumak için kullanıldığı varsayılmıştır. Biyometanizasyon tesisinde üretilen biyogazın CH₄ ve CO₂ karışımından oluştuğu kabul edilmiştir. Biyogazdaki her bir gazın payı atığın bileşimi tarafından belirlenmektedir. Yağ açısından zengin malzemeler CH₄ payını artırırken, karbonhidrat açısından zengin malzemeler benzer CH₄ ve CO₂ paylarına sahip bir biyogaz üretmektedir. Anaerobik koşullar altında malzemelerin biyolojik olarak parçalanabilirliği genellikle metan potansiyeli kullanılarak ifade edilir (üretilen m³CH₄/tonUKM). Bu farklılığı göz önünde bulundurmak için her bir atık malzemeden üretilen biyogazın bileşimi Buswell denklemi ile hesaplanmıştır (Buswell & Boruff, 1932). Biyometanizasyon tesislerinde, kaçak biyogaz emisyonları, gaz motorları, borular, vanalar, biyogaz depolama, biyogaz yükseltme vb. kaynaklı sızıntılar nedeniyle yaygındır. Bu çalışmadaki modellemede sızıntı oranı %2 kabul edilmiştir (Tablo 4) (Scheutz & Fredenslund, 2019).

Tablo 4: Yaşam döngüsü değerlendirmesi envanter özeti

Biyometanizasyon	Değer	Kaynak
Sızan Gaz (%)	2	(Scheutz & Fredenslund, 2019)
Dizel tüketimi (L /ton atık)	1	(Lipasto, 2012)
Katı Faz- fermentasyon ürünü	%23	(Beşer-Karpuz, 2022)
Sızıntı Suyu		
Sızıntı Suyu Arıtımı (kWsa/kg KOI)	1,5	(Türkiye Su Enstitüsü, 2019)
Düzenli Depolama		
Elektrik tüketimi (kWsa/ton atık)	5	(Manfredi vd., 2009)
Dizel tüketimi (L/ton atık)	1	(Manfredi vd., 2009)
Hassasiyet- depo gazı toplama oranı (%)	50-85	(Manfredi & Christensen, 2009)
Atık Toplama-Taşıma		
Dizel tüketimi –toplama (L/ ton atık)	5,69	(Yaman, 2011)
Dizel tüketimi –taşıma (L/ton-km)	0,018	(Yaman, 2011; Sezer, 2019)
Geri Dönüşüm-İkame oranları (%)		(Fernández-Braña vd., 2020)
Karton	0,83	(Fernández-Braña vd., 2020)
Plastik	0,85	(Fernández-Braña vd., 2020)
Cam	1	(Fernández-Braña vd., 2020)
Demir Metaller	0,7	(Tagliaferri vd., 2016)
PET	0,81	(Tagliaferri vd., 2016)
MGT elektrik tüketimi (kWsa/ ton atık)	14,3	(Kurdoğlu, 2013).
Ayırma Tesisi elektrik tüketimi (kWsa/ ton atık)	8,97	(Yıldız-Geyhan vd., 2016)

2.6.3. Maddesel Geri Kazanım Tesisi (MGT)

İlçe belediyeleri coğrafi sınırları içinde üretilen atıkların toplanması ve il belediyeleri taşınması, geri dönüşümü ve nihai bertarafından sorumludur. Düzce'deki MGT karışık atıkları kabul etmektedir. Öte yandan geri dönüşüm genellikle ulusal pazarın ve başka aktörlerin (paydaşların) dâhil olduğu karmaşık bir sistemde gerçekleşmektedir. Ambalaj atıkları, kağıt/karton ve cam atıkları mekanik ayırma tesisi sonrası ek ayırma işlemleri için MGT'lere teslim edilmektedir. Reddedilen atıklar, DDT'ye gönderilmektedir. İkame edilen birincil malzemelerin miktarı, geri kazanılan geri dönüştürülebilir malzemelerin miktarına, geri dönüşümün verimliliğine ve ikame oranına bağlıdır. Geri dönüşüm verimliliği, geri dönüştürülen girdi malzemesinin kütlesi ile elde edilen ikincil malzemenin kütlesi arasındaki oranı temsil eder. Bu verimlilik, geri dönüşüm sırasında oluşan malzeme kayıplarını yansıtır. İkame oranı, geri dönüşüm sırasındaki kalite kayıpları göz önünde bulundurulduğunda birincil malzemenin ne kadarının ikincil bir malzemeyle ikame edildiğini temsil eder. MGT performansı için literatür değerleri (Pressley vd., 2015) kullanılmıştır. MGT tesislerindeki elektrik tüketimi Türkiye'de yürütülen önceki çalışmalardan alınmıştır (Yıldız-Geyhan vd., 2016). Hammadde kaynaklarının gerçek ikamesi, piyasa koşulları ve literatür kaynakları dikkate alınarak modellenmiştir (Fernández-Braña vd., 2020).

2.6.4. Düzenli Depolama Tesisi

Her atık kategorisi için depolama sahasındaki atık bozunma oranları De la Cruz ve Barlaz (2010)'dan alınmıştır. KAY sisteminin uzun vadeli etkileri 100 yıllık zaman dilimiyle sınırlandırılmıştır. Biyolojik olarak parçalanabilir atıkların DDT'de ayrışması yavaş bir işlemdir. Sonuç olarak, depo gazı ve sızıntı suyu oluşumu atık bertarafından sonra uzun bir zaman diliminde meydana gelir. Bozunma oranı, 100 yıl boyunca elde edilen maksimum CH₄ potansiyelinin yüzdesini belirler. Bu çalışmada, yağışlı iklim bölgesi için IPCC 2006 Yönergelerinde (Pipatti vd., 2006) önerilen varsayılan bozunma oranları kullanılmıştır. 100 yıllık zaman diliminde parçalanmayan biyogenik karbonun DDT'de depolanmaya devam ettiği varsayılmıştır. DDT'de depolanmaya devam eden biyogenik CO₂'nin eşdeğer kütlesi, atık malzemelerde bulunan biyogenik karbon kütlesinden ve depo gazına dönüştürülen biyogenik karbon kütlesinden hesaplanmıştır. Tüm depo gazı toplanmadığı için bir kısmı DDT sahasının üst örtüsünden geçmekte ve atmosfere salınmaktadır. Toplanmayan CO₂ doğrudan atmosfere salınırsa, toplanmayan CH₄ DDT'nin üst örtüsünde kısmen CO₂'ye oksitlenmektedir.

HELP (orijinal ismi: Hydrologic Evaluation of Landfill Performance) modeli, EPA tarafından DDT'deki gerçek sızıntı suyu miktarını bulmak için geliştirilmiştir (Schroeder vd., 1994). Sızıntı miktarı yağış, buharlaşma ve DDT katmanlarından etkilenir, gerçek miktarı bulmak için HELP modeli 100 yıllık süreç için çalıştırılmıştır. Model, Düzce'nin 100 yıllık yağış (mm/yıl), sıcaklık (C°) ve güneş radyasyonu (mj/m²) değerlerini kullanmıştır. Modeldeki DDT katmanı (profil yapısı) Atıkların Düzeltilmesi Depolanması Yönetmeliği gerekliliklerine uygun hale getirilmiştir. Toplanmayan sızıntı suyu miktarı, yüzey suyunun bir bitiş noktası olduğu varsayılarak modellenmiştir. Türkiye için atıksu arıtma tesisi enerji tüketimi-ortalama verisi 0,30 kWh/m³tür (Türkiye Su Enstitüsü, 2019) ve ortalama KOİ yaklaşık 0,45 kg/m³tür (450 mg/L). Buna dayanarak elektrik tüketiminin 1,5 kWh/kg KOİ olduğu bulunmuştur (Tablo 4).

3. Bulgular ve Tartışma

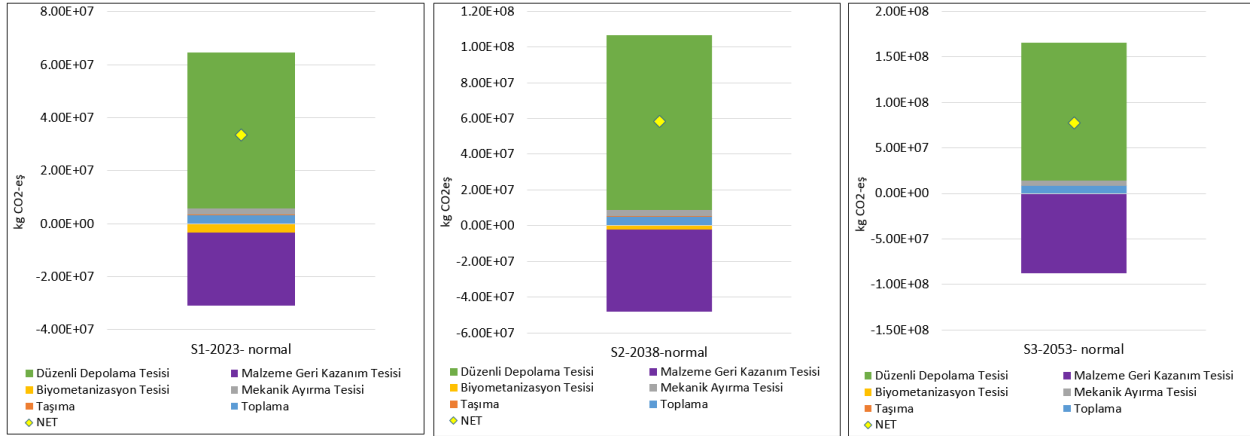
Bu bölümde, her bir atık prosesi ve tesisin sonuçlar üzerindeki etkisini görmek amacıyla iklim değişikliği karakterizasyon sonuçları paylaşılmıştır. Daha sonra, tüm etki kategorilerini karşılaştırmak için normalize edilmiş sonuçlar değerlendirilmiştir. Son olarak, hassasiyet analizi sonuçları sunulmuştur.

Normal elektrik karışımı iklim değişikliği YDD sonuçları (S1-S2-S3), karakterize sonuçları Şekil 6'da gösterilmiştir. Negatif bir değer, çevresel bir kazanç veya pozitif katkıyı gösterirken, pozitif bir değer, çevresel bir yükü veya negatif bir katkıyı göstermektedir.

3.1. İklim Değişikliği Kategorisi

İklim değişikliği için seçilen orta nokta karakterizasyon faktörü, kg CO₂-eş olarak ifade edilen, yaygın olarak kullanılan küresel ısınma potansiyelidir (KIP). Düzce'deki KAY sisteminin 2023'deki net küresel ısınma etkisi (normal elektrik karışımı için) (S1) 175 kg CO₂-eş/ton-atık ve net toplam: 33564 kg CO₂-eş/FB bulunmuştur (Şekil 6). Bu değerdeki en büyük negatif etkiye DDT sebep olmuştur. DDT içinde ise, günlük örtünden sızan depo gazı bu etkiye neden olmuştur. En büyük pozitif katkıyı (çevresel kazanımı) ise MGT'de hammaddeyi ikame eden ikincil ürünler sağlamıştır. Aynı senaryo 2038 ve 2053 yılı daha karbonsuz elektrik şebekesi sistemi için incelendiğinde net etki toplam etkinin sırasıyla (S2) 58374 kg CO₂-eş/FB ve (S3) 77469 kg CO₂-eş/FB olarak arttığı fakat atık başına emisyonların 2038 yılı için artarken 199 kg CO₂-eş/ton-atık, 2058 yılı için azaldığı 169 kg CO₂-eş/ton-atık görülmektedir (Şekil 6). Bu sonuçlar hem fonksiyonel birim hem de ton atık başına sonuçları beraber değerlendirmenin önemli olduğunu ortaya çıkarmaktadır. Hem 2038 hem de 2053 daha fazla atık üretildiği ve bu atıklar daha çok DDT'ye gönderildiğinden, net toplam emisyon değeri artmıştır. Fakat hem biyometanizasyon tesisi hem de DDT'de ikame edilen şebeke elektriği daha az fosil kaynak içerdiğinden ton atık başına değerler farklılık göstermiştir. Hammaddeyi ikame eden ikincil ürün miktarı artsa da DDT ve biyometanizasyondaki kayıp çok daha fazla olduğundan net emisyonlarda azalma görülmüştür.

Ayrıca, toplama ve mekanik ayırma tesisi emisyonları 2023'ten 2053'e artmakla beraber diğer tesislerin etkisi yanında etkileri ihmal edilebilir düzeyde az kalmıştır.



*FB: fonksiyonel birim

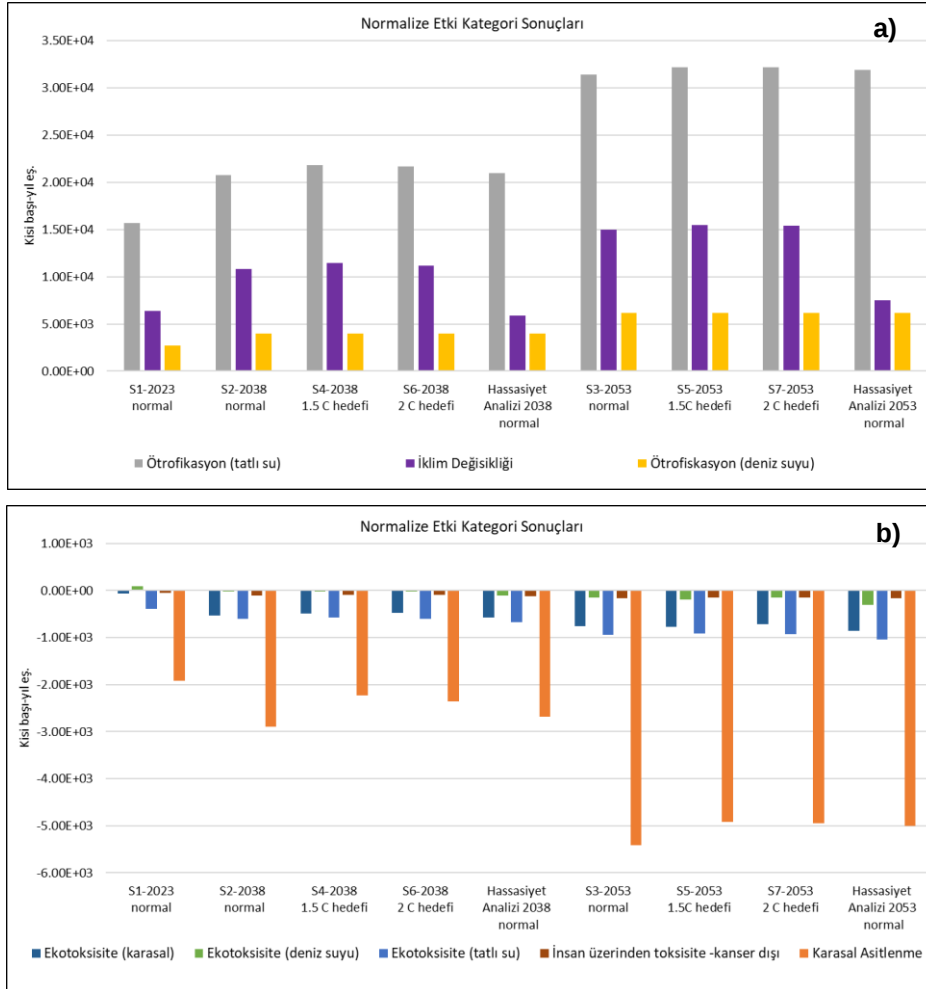
Şekil 6: Düzce belediye atıklarının Türkiye karbonsuzlaşma enerji üretim senaryolarına bağlı olarak iklim değişikliği etkisi kategorisi değişimi (kg CO₂-eş/FB)

Normal karbonsuzlaşma senaryosu için açıklanan bu durum, net emisyonların artış ve azalışı açısından 1.5°C (S4-S5), ve 2°C (S6-S7), senaryoları içinde benzer şekilde gözlemlenmiştir (Şekil 7). İklim değişikliği kapsamında değerlendirilen karbonsuzlaşma senaryolarının hiçbirisi net sıfır veya negatif emisyon seviyelerine ulaşamamıştır. DDT'de kaynaklanan potansiyel riskin çoğu, sızıntı suyu ve depolama gazından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, depo gazı kontrol edilmezse, yangınlara neden olabilmektedir. Bu yangınlar sırasında oluşan duman CO, H₂S, CH₄ gibi tehlikeli toksik gazlar ve dioksinler gibi kanserojen maddeler içerebilmektedir (Vaverková, 2019). İklim değişikliği kategorisinde en büyük yük, günlük örtü arasından sızan, toplanamayan depo gazından kaynaklanmaktadır. Diğer çevresel kategorilerde ise depo gazının ön plana çıkan büyük bir etkisi yoktur. Yıllara bağlı olarak DDT'te gönderilen atık miktarı arttığı ve aktif gaz üretimi devam ettiği için, depo gazının en az etkisi 2023 yılında görülürken en büyük etkisi 2053 yılında görülmektedir. Benzer sonuçlar Tonini vd. (2018) tarafından bulunmuştur. 1 ton atığın DDT'ye gönderilmesi durumunda oluşacak iklim değişikliği etkilerini karşılaştırdıklarında, en büyük yük depo gazından kaynaklanırken, bunu sahada kullanılan ekipmanların yakıt tüketimi takip etmiştir. Daha önce Turner vd. (2016)'da Birleşik Krallık'ta KAY için yaptığı çalışmada, iklim değişikliği kategorisi yükünün baskın kaynağının DDT ve MGT ile hammadde ikamesinin pozitif etkilerin temel nedeni olduğunu tespit etmiştir. Yine dünya genelinde yapılan YDD derleme çalışmasında da benzer şekilde en büyük çevresel yükün DDT'den geldiği tespit edilmiştir (Khandelwal vd., 2019a).

MGT daha ayrıntılı incelendiğinde, Düzce'deki geri dönüşüm sürecinde en fazla çevresel kazanç, sırasıyla PET, çelik, alüminyum, kağıt-karton ve cam süreçlerinden kaynaklanmaktadır. 1.5°C (S4-S5) senaryosunda, net çevresel kazançlar normal karbonsuzlaşma senaryosuna (S2-S3) kıyasla artmıştır. Bu artışın önemli nedenlerinden biri, MGT'de kullanılan elektriğin daha az fosil yakıt kaynaklı olmasıdır. Bu çalışmanın sonuçlarından farklı olarak Wang vd. (2020)'in Birleşik Krallık'ta yaptığı çalışmada iklim değişikliğinde en büyük kazancı metaller, ardından kağıdın geri dönüşüm sürecinde bulmuştur. Geri dönüştürülmüş kağıt miktarı, metal miktarından fazla olmasına rağmen, kağıt geri dönüşümünde kullanılan kimyasal ve fosil yakıt tüketimi bu sonuçlara neden olmuştur. Khandelwal vd. (2019b)'in Hindistan için yaptığı YDD çalışmasında, MGT sürecinde geri dönüşüm oranının %20 ile %100 arasında artmasına dayalı hassasiyet senaryosu incelenmiştir. Geri dönüşüm oranındaki değişiklik ile çevresel fayda arasında doğrusal ve ters orantılı bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Yani, MGT kullanım veya geri dönüşüm oranı arttıkça net çevresel yük azalmaktadır. Haupt vd. (2018), toplama oranı ile saflık arasında negatif bir korelasyon olduğunu belirlemiştir; yani, toplama oranı arttıkça saflık azalmaktadır. Aynı çalışmada, daha düşük saflığa ve daha uzun taşıma mesafelerine rağmen, yüksek toplama oranlarının kayda değer çevresel faydalar sağladığı ortaya konulmuştur. Düzce için MGT kapasitesi artırılırken, optimum toplama oranı belirlenmeli, kaynağında ayırım performansının artırılması için halk eğitilmeli ve Haupt vd. (2018) gibi çalışmaların sonuçları göz önünde bulundurulmalıdır. Kullanılan elektrik karışımına bakıldığında ise Ferronato vd. (2020) sonuçlarına benzer şekilde, elektrik kaynağı fosil yakıtlar veya yenilenebilir kaynaklar olsa da, MGT çevresel açıdan en kazançlı tesis olarak bulunmuştur. Bu kapsamda, MGT'nin daha verimli kullanılabilmesi için araştırma ve geliştirme çalışmalarının artırılması, geri dönüşüm altyapısının genişletilmesi, geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımını teşvik eden politikaların hayata geçirilmesi büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, kamu alımlarında geri dönüştürülmüş içerik kriterlerinin benimsenmesi, tüketicilerin atık yönetimi konusunda bilinçlendirilmesi ve DDT için depolama vergisi gibi önlemler, geri dönüşüm süreçlerinde karşılaşılan zorlukların aşılmasına önemli katkılar sağlayabileceği öngörülmektedir.

3.2. Diğer Etki Kategorileri

İklim değişikliği ve bu çalışmada hesaplanan diğer yedi etki kategorisini karşılaştırmak ve değerlendirmek amacıyla, sonuçlar normalize edilmiştir (Şekil 7). Elektrik karışımındaki değişiklikler yalnızca tüketilen enerjiyi değil, aynı zamanda atık yönetim tesislerinde elektrik üretimiyle ikame edilen enerjiyi ve malzeme geri dönüşümünden kaçınılan elektriği de etkileyecektir (Goulart Coelho & Lange, 2018). Bu bağlamda, elektrik karışımındaki değişiklikler en çok ötrofikasyon (tatlı su) etki kategorisini etkilemiştir. Tatlı su ötrofikasyon kategorisinde en büyük yük, biyometanizasyon tesisinden çıkan fermentasyon ürününün katı fazının toprak üstü uygulamaları ve sızıntılarından gelmektedir. Deniz suyu ötrofikasyon kategorisinde en büyük yük, sızıntı suyu arıtımından gelmektedir. ReCiPe; tatlı su ve deniz suyu etki kategorileri hesaplamalarında CARMEN ve EUTREND modellerini kullanılmaktadır. Bu çerçevede alıcı su bölmelerini sınırlayıcı besine göre ayıran bir anlayış benimsenmektedir. Tatlı su ortamlarında fosfor (P) sınırlayıcı faktör olarak kabul edilirken, deniz suyu ortamlarında ise azot (N) sınırlayıcı faktör kabul edilmektedir. Bu tanımlamalara bakıldığında, yüksek oranda fosfor (P) içeren katı faz fermentasyon ürününün tatlı su ötrofikasyon yüküne ve yüksek azot (N) içeren sızıntı suyunun deniz suyu ötrofikasyon yüküne neden olması oldukça mantıklıdır. AÇ'den elde edilen katı faz fermentasyon ürünü, toprak üstü uygulamalar için uygun olup kimyasal gübreyi ikame etme potansiyeline sahiptir. Bu özelliği sayesinde doğrudan doğal sulara sızarak tatlı su kategorisinde etkili olabilmektedir. Tatlı su ve deniz suyu ötrofikasyonu etki kategorilerinde, MGT özellikle karton geri dönüşümünden kaynaklanan çevresel kazançlar sağlasa da, AÇ ve DDT'den gelen yüklerin fazlalığı nedeniyle net etki çevresel yüklerle sonuçlanmaktadır. Düzce atık yönetiminin sonuçlarına göre MGT tüm etki kategorilerinde çevresel kazanç sağlamaktadır. Ayrıca, 2053 yılına gelindiğinde ise, tatlı su ve deniz suyu ötrofikasyonu kategorilerinde hâlâ çevresel kazanç sağlamaya devam etmektedir.



Şekil 7: Düzce belediye atıkları yönetimi- farklı etki kategorilerinin normalize edilmiş sonuçları: a) KIP, ÖP (TS), ÖP (DS), b) ET (K), ET (DS), ET (TS), İT, KA

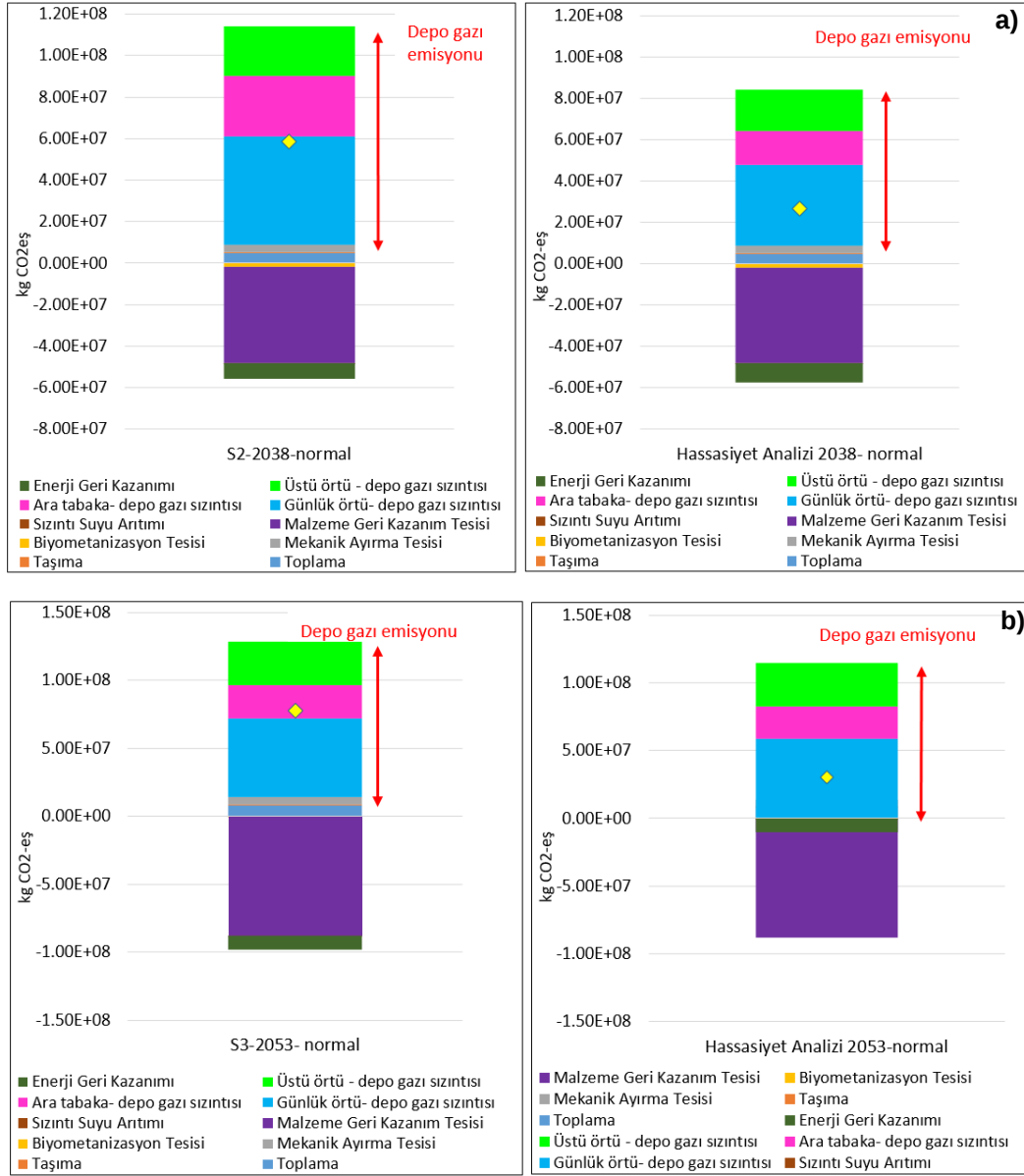
Net çevresel etkiler değerlendirildiğinde, iklim değişikliği, ötrofikasyon (tatlı su) ve ötrofikasyon (deniz suyu) olumsuz etkiler gösterirken; karasal asitlenme, asidifikasyon potansiyeli, ekotoksosite (tatlı su, deniz suyu ve karasal) ile insan üzerindeki toksosite (kansere dışı) kategorilerinde çevresel kazanımlar sağlanmaktadır. Karasal asitlenme kategorisinde, toplama, taşıma, biyometanizasyon tesisi ve DDT'den kayıplar olsa da, MGT'den gelen kazançlar net çevresel pozitif sonuçlara neden olmaktadır. Asidifikasyon potansiyeli, sülfür dioksit (SO₂), amonyak (NH₃) ve azot oksitler (NO_x) gibi asidik gazların atmosferdeki suyla etkileşime girerek asit yağmurlarına dönüşme potansiyeli olarak tanımlanabilmektedir. ReCiPe'de bu potansiyel GEOS-Chem modeliyle hesaplanmaktadır. Bu nedenle atık YDD çalışmalarında toplama-taşıma süreçlerinde yüksek asidifikasyon yüklerine rastlanmaktadır. Ayrıca [İrbaş ve Dadaşer-Celik \(2021\)](#)'te daha önce benzer şekilde geri dönüşümün, asidifikasyonun azaltılmasına katkıda bulunduğunu belirtmiştir. Benzer şekilde, [Ferronato vd. \(2020\)](#)'nın Bolivya üzerine yaptığı çalışmada, fosil yakıt yanmasının azaltılmasıyla elde edilen atıktan enerji geri kazanımının, asitlenme potansiyelinin önlenmesine önemli ölçüde katkıda bulunduğunu tespit edilmiştir.

Ekotoksosite (tatlı su) kategorisinde en büyük yük DDT sızıntı suyu arıtmasından ve kazanç MGT kağıt geri dönüşümünden gelmektedir. Ekotoksosite (deniz suyu) kategorisinde en büyük kazanç MGT kağıt geri dönüşümünden gelmektedir. İnsan üzerinden toksosite -kansere dışı ve Ekotoksosite (karasal) kategorilerinde de en büyük kazanç MGT kağıt ve PET geri dönüşümünden gelmektedir, en büyük yük ise taşımadan gelmektedir. Türkiye'nin gelecekteki elektrik karışımının yenilenebilir enerji kaynaklarına odaklı olması, kaçınılan elektrik tüketiminin sonuçlara olan etkisini azaltmaktadır. İklim değişikliğe etki kategorisinde olduğu gibi, diğer kategorilerde de elektrik sisteminde karbondan uzaklaşmanın, senaryoların net çevresel yük sıralamalarını önemli bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. TÜİK sonuçlarında da belirtildiği gibi Türkiye'de halen en yaygın kullanılan atık yönetim şekli DDT'dir ([Türkiye İstatistik Kurumu, 2023a](#)). Eğer Türkiye 2053 yılı karbonda uzaklaşma hedeflerine ulaşırken, DDT'ye sıfır atık gönderme hedefine ulaşamazsa (Şekil 6) bu durum atık sektöründe, beklenmeyen ekstra çevresel yüklere neden olabilecektir (Şekil 7).

3.3. Hassasiyet (Duyarlılık) Analizi

Senaryo sonuçları incelendiğinde DDT'nin ve özellikle DDT içerisinde depo gazı sızıntısının iklim değişikliği kategorisi sonuçları üzerinde etkili olduğu görülmüştür. 2038 ve 2053'te net küresel ısınma etkisi 199 kg CO₂-eş/ton-atık (net toplam: 58374 kg CO₂-eş/FB) ve 169 kg CO₂-eş/ton-atık (net toplam: 77469 kg CO₂-eş/FB) olan değerler depo gazı toplama oranının artmasıyla (Tablo 2) 92 kg CO₂-eş/ton-atık (net toplam: 26918 kg CO₂-eş/FB) ve 66 kg CO₂-eş/ton-atık (net toplam: 30401 kg CO₂-eş/FB) olarak azalmıştır (Şekil 8). Fakat depo gazının daha verimli toplanması durumunda hem 2038 hem 2053 yıllarında temel senaryo (S1) göre yani 2023'deki net küresel ısınma etkisi (normal elektrik karışımı için) ton atık başına emisyonlar daha düşük olmaktadır.

YDD sonuçları, daha önceki çalışmalarla uyumlu olarak, depolama gazının toplanıp enerjiye dönüştürülmesi durumunda bile, DDT alanlarının yüksek emisyon seviyelerine sahip olduğunu, en fazla çevresel yükün DDT'den geldiğini ve enerji geri kazanım verimliliğinin düşük olduğunu göstermektedir ([Güven vd., 2019](#)). DDT'nin en büyük yükü, günlük örtü arasından sızan ve toplanamayan depo gazından kaynaklanmaktadır (Şekil 8). Hassasiyet senaryosunda, depo gazı toplama verimi %15 arttığından, buna bağlı olarak depo gazından kaynaklanan emisyon yükü de azalmaktadır. Ancak 2038 ve 2053 yıllarında depo gazından elde edilen enerji kazanımları değerlendirildiğinde, 2038 yılında daha büyük çevresel kazanç sağlandığı görülmektedir. Bu durum, doğrudan elektrik üretimindeki karbonsuzlaşma süreci ve 2038 yılında daha fazla fosil yakıtın ikame edilmesiyle ilişkilidir. YDD sonuçları, yenilenebilir kaynaklara doğru geçişin net etkilerde (ve özellikle DDT'de) iklim değişikliği etkilerini hafifletmek için faydalı olmadığını göstermektedir. Çünkü mevcut atık sistemi korunurken, elektrik karışımı karbondan uzaklaşırsa, daha fazla atık DDT'ye giderken daha az fosil kaynak ikame edilmiş olacaktır. Hassasiyet analizi sonuçları depo gazı toplama veriminin artması durumunda atık başına düşen CO₂eş değerinin 2038 ve 2053 yıllarında azalacağını göstermektedir. Yani depo gazının daha verimli toplanması iklim değişikliği hedefi ile uyumlu hale gelmek için gereklidir. Fakat her durumda en büyük çevresel yük DDT'den gelmektedir. Bu da Türkiye'nin 2053 yılına kadar DDT'ye sıfır atık gönderme hedefinin ne kadar doğru olduğunu göstermektedir. Literatürde karbonsuzlaşmanın atık yönetimi üzerinde benzer sonuçlara neden olduğuna daha önce rastlanmıştır ([Slorach vd., 2020](#)).



Şekil 8: Düzce belediye atıkları yönetimi- hassasiyet analizi sonuçları- düzenli depolama gazı toplama oranının değişmesi (a) 2038 yılı (b) 2053 yılı (kg CO₂-eş/FB)

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmanın bulguları, Düzce'deki KAY sisteminin bazı önemli eksikliklerini ortaya koymaktadır. Geri dönüştürülen atık miktarının düşük olması, atıktan enerji üretiminin yetersizliği ve biyolojik olarak parçalanabilir atıkların depolanmasının uzun vadeli çevresel yükler oluşturması, sistemin sürdürülebilirlik açısından geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Tüm senaryolarda ve etki kategorilerinde, MGT en fazla çevresel kazanım olduğu tesislerdir. Bu yüzden MGT'den reddedilen atıkları azaltmak için MGT tesislerinin verimlerinin ve kaynağında atık ayrımının artması gereklidir. Tüm yıllar (2023- 2038-2053) için yapılan analizlerde en büyük çevresel yüke (fermentasyon ürününün azot yükü yüzünden) tatlı su ötrofikasyon sahipken en büyük çevresel kazanca (geri dönüşümle hammadde ikamesi dolayısıyla) karasal asitleşme sahiptir. Fosil yakıtların aşamalı olarak kaldırılması ve elektrik sisteminde karbondan uzaklaşılması sonuçları değiştirmemiştir. Mevcut atık yönetimi süreçlerinde karbonsuzlaşma hedeflerinin beklenen çevresel etkileri yaratmadığı tespit edilmiştir. Bulgular ışığında, aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

Enerji Geri Kazanımı: Düzce'de doğrudan enerji geri kazanımı sağlayan tesislerinin olmaması, sistemin çevresel etkilerini artırmaktadır. Yeni tesislerin kurulması ve bu tesislerin enerji verimliliğinin artırılması gelecek çalışmalarda değerlendirilmelidir.

Geri Dönüşüm ve Depozito Sistemi: Türkiye’de ve Düzce’de en yaygın kullanılan atık yönetim sistemi DDT olduğundan, geri dönüşüm oranlarının artırılması büyük önem taşımaktadır (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2022). Özellikle depozito sisteminin hayata geçirilmesiyle DDT’ye gönderilen atık miktarı azaltılarak çevresel kazanımlar artırılabilir. Bu süreçte halkın ve diğer paydaşların eğitilmesi önemlidir.

Döngüsel Ekonomi ve Karbonsuzlaşma: 2053 karbonsuzlaşma hedeflerine ulaşmak için atık sektörünün döngüsel ekonomi modelini benimsemesi gerekmektedir. Atıkların kaynaktan ayrıştırılması, biyolojik olarak parçalanabilir atıkların işlenmesi kritik adımlardır. Bu tür sistemlerin yaygınlaşması için DDT için depolama vergisi gibi araçlar dikkate alınması önemlidir.

Kamu-Özel Sektör İş Birliği: Atık yönetiminde sürdürülebilir çözümler geliştirmek için kamu-özel sektör iş birliği güçlendirilmelidir. Finansal mekanizmaların geliştirilmesi, yenilikçi atık yönetim modellerinin benimsenmesini destekleyecektir.

Atık Toplama ve Lojistik Optimizasyonu: Kaynaktan ayrıştırılan atıkların toplanması sırasında kullanılan araçların sera gazı emisyonlarını azaltmak için rota optimizasyonu ve alternatif yakıt kullanımının teşvik edilmesi önemlidir.

Maliyet Analizleri: Atık yönetim sistemlerinin yaşam döngüsü maliyetleri üzerine detaylı analizlerin yapılması, karar vericilere daha sağlıklı politika önerileri sunulmasını sağlayacaktır. Düzce’ye ait maliyet verilerinin toplanması durumunda ayrıntılı bir yaşam maliyet analiz çalışması yapılmalıdır.

Gelecek Çalışmalar: Türkiye’nin 2053 yılına kadar DDT’ye sıfır atık gönderme hedefi doğrultusunda daha kapsamlı değerlendirmelerin yapılması gerekmektedir. Bu çalışmadaki sonuçların en önemli nedenlerinden biri Düzce’de yakma tesisi gibi doğrudan enerji geri kazanımı yapan tesislerin bulunmamasıdır. Mevcut durumda biyometanizasyon ve DDT tesislerinde geri kazanım yapılsa da bu tesislerden yakma tesisleri vb. olduğu gibi yüksek oranda enerji geri kazanımı olmadığından, sistemin çevresel etkilerinde dolaylı değişimler gözlenmektedir. Bu çalışma, Düzce’nin mevcut tesisleri göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Yakma gibi yeni tesislerin kurulması durumunda ne gibi değişikliklerinin gözleneceği, gelecek çalışmalarda ele alınmalıdır. Özellikle bu çalışmadaki, elektrik karışımı halihazırda yakma tesisi ve yüksek kapasiteli biyometanizasyon tesisi bulunan İstanbul gibi metropol şehirlere uygulanırsa daha hassas sonuçlar alınması mümkündür.

Çalışmanın sonuçlarının, karar verici makamlar tarafından geliştirilerek atık politikaları ve bundan sonraki çalışmalar için bir referans noktası oluşturması beklenmektedir. Bu kapsamda önerilen stratejilerin uygulanması, sürdürülebilir çevresel yönetim hedeflerine ulaşılmasına katkı sağlayacaktır.

Kaynaklar

- Banar, M., Cokaygil, Z., & Ozkan, A. (2009). Life cycle assessment of solid waste management options for Eskisehir, Turkey. *Waste Management*, 29(1), 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.12.006>
- Bernstad Saraiva, A., Souza, R.G., Mahler, C.F., & Valle, R.A.B. (2018). Consequential lifecycle modelling of solid waste management systems – Reviewing choices and exploring their consequences. *Journal of Cleaner Production*, 202, 488–496. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.038>
- Beşer-Karpuz, A. (2022). *Düzce’de Çöp Sorunu Tarih Oldu*. 16 Kasım 2024’te <https://www.duzcedamla.com/video/18380392/duzcede-cop-sorunu-tarih-oldu> adresinden alındı.
- Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi. (2024). *Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi*. 27 Nisan 2025’te https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Turkiye_Long_Term_Climate_Strategy.pdf adresinden alındı.
- Buswell, A. M., & Boruff, C. S. (1932). The relation between the chemical composition of organic matter and the quality and quantity of gas produced during sludge digestion. *Sewage Works Journal*, 4(3), 454–460.
- Çetinkaya, A.Y., Bilgili, L., & Levent, K. S. (2018). Life cycle assessment and greenhouse gas emission evaluation from aksaray solid waste disposal facility. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 11, 549–558. <https://doi.org/10.1007/s11869-018-0559-3>
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2017). *Ulusal Atık Yönetimi ve Eylem Planı 2023*. 9 Eylül 2024’te https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/haberler/ulusal_at-k_yonet-m--eylem_plan--20180328154824.pdf adresinden alındı.
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2021). *Düzce İl Sıfır Atık Yönetim Sistemi Planı*. 10 Kasım 2024’te https://webdosya.csb.gov.tr/db/duzce/menu/il-sifir-atik-yonetim-sistemi-plani_20210402061151.pdf adresinden alındı.
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2022). *Zorunlu Depozito Yönetim Sistemi Uygulamalarına İlişkin Usul ve Esaslar*. 16 Kasım 2024’te <https://webdosya.csb.gov.tr/db/tuca/icerikler//kurum-mevzuati-11555-20230822110901.pdf> adresinden alındı.
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2023a). *İklim Değişikliği Azaltım Stratejisi ve Eylem Planı (2024-2030)*. 26 Nisan 2025’te <https://iklim.gov.tr/db/english/dokumanlar/2024-2030--8230-3126-20240328165629.pdf> adresinden alındı.
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2023b). *Düzce İli 2023 Yılı Çevre Durum Raporu*. 16 Kasım 2024’te https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/duzce_-cdr2023-20241108082014.pdf adresinden alındı.
- De la Cruz, F. B., & Barlaz, M. A. (2010). Estimation of waste component-specific landfill decay rates using laboratory-scale decomposition data. *Environmental Science & Technology*, 44(12), 4722–4728. <https://doi.org/10.1021/es100240r>
- Demirarslan, K. O., & Yalçın Çelik, B. (2018). Urban solid waste characterization in the east part of Black Sea region. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 4(2), 167–182. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2018.04.02.005>
- Düzce Ticaret Borsası. (2020). *Düzce Ticari Hayatı ve Üretim Durumu 2020*. 25 Nisan 2025’te <https://www.duzcetb.org.tr/Dosyalar/DUZCE-PANAROMASI-VE-EKONOMİK-GOSTERGELERİ-RAPORU.pdf> adresinden alındı
- Ecoinvent. (2021). *ecoinvent version 3.7.1*. 10 Kasım 2024’te <https://ecoinvent.org/sayfasından> alındı.
- Erses Yay, A. S. (2015). Application of life cycle assessment (LCA) for municipal solid waste management: a case study of Sakarya. *Journal of Cleaner Production*, 94, 284–293. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.089>

- Fernández-Braña, A., Feijoo, G., & Dias-Ferreira, C. (2020). Turning waste management into a carbon neutral activity: practical demonstration in a medium-sized European city. *Science of Total Environment*, 728, Article 138843. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138843>
- Ferronato, N., Gorritty Portillo, M. A., Guisbert Lizarazu, E.G., & Torretta, V. (2020). Application of a life cycle assessment for assessing municipal solid waste management systems in Bolivia in an international cooperative framework. *Waste Management & Research*, 38, 98–116. <https://doi.org/10.1177/0734242X20906250>
- Grzesik, K., & Malinowski, M. (2016). Life cycle assessment of refuse-derived fuel production from mixed municipal waste. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38(21), 3150–3157.
- Gnansounou, E. (2017). Fundamentals of life cycle assessment and specificity of Biorefineries. In G. Gnansounou & A. Pandey (Eds.), *Life-Cycle Assessment of Biorefineries* (pp. 41–75). Elsevier.
- Goulart Coelho, L.M., & Lange, L.C. (2018). Applying life cycle assessment to support environmentally sustainable waste management strategies in Brazil. *Resources, Conservation and Recycling*, 128, 438–450. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.09.026>
- Güven, H., Wang, Z., & Eriksson, O. (2019). Evaluation of future food waste management alternatives in Istanbul from the life cycle assessment perspective. *Journal of Cleaner Production*, 239, Article 117999. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117999>
- Haupt, M., Waser, E., Würmli, J.C., & Hellweg, S. (2018). Is there an environmentally optimal separate collection rate?. *Waste Management*, 77, 220–224. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.03.050>
- Ionescu, G., Rada, E.C., Ragazzi, M., Mărculescu, C., Badea, A., & Apostol, T., (2013). Integrated municipal solid waste scenario model using advanced pretreatment and waste to energy processes. *Energy Conversion and Management*, 76, 1083–1092. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.08.049>
- Irbaş, E., & Dadaser-Celik, F. (2021). Evsel katı atık yönetim senaryolarının yaşam döngüsü analizi: Melikgazi İlçesi (Kayseri) örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 7(2), 266–277. <https://doi.org/10.21324/dacd.824621>
- International Organization for Standardization. (2006a). ISO 14040:2006 – Çevre yönetimi – Yaşam döngüsü değerlendirme – İlkeler ve çerçeve. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- International Organization for Standardization. (2006b). ISO 14044:2006 – Çevre yönetimi – Yaşam döngüsü değerlendirme – Gereklilikler ve kılavuzlar. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/38498.html>
- Horna, L., Kahhat, R., & Vázquez-Rowe, I. (2022). Reviewing the influence of sociocultural, environmental and economic variables to forecast municipal solid waste (MSW) generation. *Sustainable Production and Consumption*, 33, 809–819.
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M. D. M., Hollander, A., Zijp, M., & van Zelm, R., (2016). *ReCiPe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization*. National Institute for Public Health and the Environment. <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2016-0104.pdf>
- Khandelwal, H., Dhar, H., Thalla, A. K., & Kumar, S. (2019a). Application of life cycle assessment in municipal solid waste management: A worldwide critical review. *Journal of Cleaner Production*, 209, 630–654.
- Khandelwal, H., Thalla, A.K., Kumar, S., & Kumar, R. (2019b). Life cycle assessment of municipal solid waste management options for India. *Bioresource Technology*, 288, Article 121515. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121515>
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *Urban Development Series. What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank, Washington, DC. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
- Keramidas, K., Fosse, F., Diaz-Vazquez, A., Schade, B., Tchong-Ming, S., Weitzel, M., Vandyck, T. & Wojtowicz, K. (2021). *Global energy and climate outlook 2020: A new normal beyond Covid-19*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/608429, JRC123203>
- Kurdoğlu, A.Ş. (2013). *Ambalaj atıkları yönetimi İstanbul, Kadıköy Örneği* [Yüksek lisans tezi, Marmara Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Lipasto, (2012). *Calculation system for transport exhaust emissions and energy use in Finland*. 6 Aralık 2024'te http://www.lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/muute/tyokoneete/diesel_a_te.htm adresinden alındı.
- Maalouf, A., & El-Fadel, M. (2019). Life cycle assessment for solid waste management in Lebanon: Economic implications of carbon credit. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 37(1_suppl), 14–26. <https://doi.org/10.1177/0734242X18815951>
- Manfredi, S., & Christensen, T. H. (2009). Environmental assessment of solid waste landfilling technologies by means of LCA-modeling. *Waste Management*, 29(1), 32–43. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.02.021>
- Manfredi, S., Tonini, D., Christensen, T. H., & Scharff, H. (2009). Landfilling of waste: accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 27(8), 825–836.
- Mboowa, D., Quereshe, S., Bhattacharjee, C., Tonny, K., & Dutta, S. (2017). Qualitative determination of energy potential and methane generation from municipal solid waste (MSW) in Dhanbad (India). *Energy*, 123, 386–391.
- Nas, S. S., & Bayram, A. (2008). Municipal solid waste characteristics and management in Gümüşhane, Turkey. *Waste Management*, 28(12), 2435–2442. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.039>
- Organisation for Economic Co-operation and Development (2019), *Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences*, OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>
- Özeler, D., Yetis, U., & Demirel, G.N. (2006). Life cycle assesment of municipal solid waste management methods: Ankara case study. *Environment International*, 32(3), 405–411. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.10.002>
- Pipatti, R., Svandal, P., Silva Alves, J. W., Gao, Q., López Cabrera, C., Mareckova, K., Oonk, H., Scheehle, E., Sharma, C., Smith, A., & Yamada, M. (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. Institute for Global Environmental Strategies. <https://www.ipcc.ch/report/2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>
- Pressley, P. N., Levis, J. W., Damgaard, A., Barlaz, M. A., & DeCarolis, J. F. (2015). Analysis of material recovery facilities for use in life-cycle assessment. *Waste Management*, 35, 307–317. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.012>
- Salihoğlu, G., Poroy, Z., & Salihoğlu, N. K. (2019). Life cycle assessment for municipal waste management: analysis for Bursa. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 25(6), 692–699. <https://doi.org/10.5505/pajes.2018.33603>

- Scheutz, C., Fredenslund, A. M. (2019). Total methane emission rates and losses from 23 biogas plants. *Waste Management*, 97, 38-46. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.07.029>
- Schroeder, P. R., Lloyd, C., Zappi, P., & Aziz, N. (1994). *HELP modeli: Düzenli depolama alanı performansının hidrolojik değerlendirmesi – Sürüm 3 için mühendislik dokümantasyonu* (NTIS PB 95-212700). ABD Çevre Koruma Ajansı (US EPA), Araştırma ve Geliştirme Ofisi. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=300038SW.TXT>
- Sezer, F.E. (2019). *İstanbul'un Avrupa yakasında oluşan katı atıkların demiryoluyla taşınması üzerine bir araştırma* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Skea, J., Shukla, P. R., Reisinger, A., Slade, R., Pathak, M., ... Winkler, H. (2022). Summary for Policymakers. In J. Skea, P. R. Shukla, A. Reisinger, R. Slade, M. Pathak & A. Al Khouradje (Eds.), *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_SummaryForPolicymakers.pdf
- Slorach, P. C., Jeswani, H. K., Cuéllar-Franca, R., & Azapagic, A. (2020). Assessing the economic and environmental sustainability of household food waste management in the UK: Current situation and future scenarios. *Science of the Total Environment*, 710, Article 135580. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135580>
- Spokas, K., Bogner, J., Chanton, J.P., Morcet, M., Aran, C., Moreau-Le Golvan, Y., & Hebe, I. (2006). Methane mass balance at three landfill sites: what is the efficiency of capture by gas collection systems? *Waste Management*, 26, 516–25.
- Sullivan, P. (2010). *Current MSW Industry Position and State-of-the-Practice on LFG Collection Efficiency, Methane Oxidation, and Carbon Sequestration in Landfills*. Solid Waste Industry for Climate Solutions (SWICS). https://www.scsengineers.com/wp-content/uploads/2015/03/Sullivan_LFG_Destruction_Efficiency_White_Paper.pdf
- Tagliaferri, C., Evangelisti, S., Clift, R., Lettieri, P., Chapman, C., & Taylor, R. (2016). Life cycle assessment of conventional and advanced two-stage energy-from-waste technologies for methane production. *Journal of Cleaner Production*, 129, 144–158.
- T.C. Resmi Gazete. (2010). *Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik* (Resmi Gazete Tarih: 26.03.2010, Sayı: 27533). <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2010/03/20100326-5.htm>
- Tian, P., Wu, Y., Shang, B., Qi, C., Xu, Z., Li, G., Luo, W., Zhang, W., & Li, Y. (2025). LCA as a decision support tool for the environmental improvement of organic fraction of municipal solid waste composting in China. *Journal of Cleaner Production*, 495, Article 145068. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145068>
- Tonini, D., Manfredi, S., Bakas, I., Kai-Sørensen Brogaard, L., & Damgaard, A. (2018). Life Cycle Assessment of Landfilling. In R. Cossu & R. Stegmann (Eds.), *Solid Waste Landfilling* (pp. 955–972). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407721-8.00046-2>
- Tunesi, S., Baroni, S., & Boarini, S. (2016). Waste flow analysis and life cycle assessment of integrated waste management systems as planning tools: Application to optimise the system of the City of Bologna. *Waste Management & Research*, 34, 933–946.
- Turner, D. A., Williams, I. D., & Kemp, S. (2016). Combined material flow analysis and life cycle assessment as a support tool for solid waste management decision making. *Journal of Cleaner Production*, 129, 234–248.
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2023a). *Atık İstatistikleri 2022*. 6 Aralık 2024'te <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Atik-Istatistikleri-2022-49570> adresinden alındı.
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2023b). *Sera Gazı Emisyon İstatistikleri 1990-2023*. 3 Mayıs 2025'te <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2023-53974> adresinden alındı.
- Türkiye Su Enstitüsü. (2019). *Büyükşehir Su ve Kanalizasyon İdareleri Arasında Mukayeseli Değerlendirme Çalışması*. 6 Aralık 2024'te <https://www.suen.gov.tr/Suen/catdt.asp?val=390> adresinden alındı.
- Vaverková, M. D. (2019). Landfill impacts on the Environment—Review. *Geosciences*, 9(10), Article 431. <https://doi.org/10.3390/geosciences9100431>
- Wang, D., He, J., Tang, Y.T., Higgitt, D., & Robinson, D. (2020). Life cycle assessment of municipal solid waste management in Nottingham, England: Past and future perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 251, Article 119636. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119636>
- Yaman, C. (2011). *İstanbul için evsel katı atıkların toplanması, taşınması, bertarafı ve genel kent temizliğine ilişkin maliyetler*. Halic Çevre. <https://www.haliccevre.com/images/sempozyum/47.pdf>
- Yıldız-Geyhan, E., Yılan-Çiftçi, G., Altun-Çiftçi, G. A., & Neşet Kadirgan, M. A. (2016). Environmental analysis of different packaging waste collection systems for Istanbul – Turkey case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 107, 27–37.