İLKADIM KALKANCI ÖRNEĞİNDE KENTSEL KATI ATIK YÖNETİMİ SİSTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ

Yasin ASLAN[1*], Ayşe KULEYİN[2]

*[*1]İlkadım Belediyesi, İklim Değişikliği ve Sıfır Atık Müdürlüğü, Samsun, Türkiye- 0009-0008-7547-1655*
[2]Ondokuzmayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye- 0000-0001-6825-710X

*Sorumlu yazar e-mail: hi@yasinaslan.com.tr

ÖZET

Bu çalışma, Samsun ili İlkadım ilçesine bağlı Kalkancı bölgesinde kentsel katı atık yönetimi uygulamalarının çevresel performansını yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) ile incelemeyi amaçlamaktadır. Sistem sınırları her bir senaryo için farklı konteynerden toplama, taşıma, aktarma, geri dönüşüm, kompostlama ve düzenli depolama aşamalarını kapsamaktadır. Belediye envanter verileri, saha ölçümleri ve literatür varsayımlarından türetilmiş ve etki değerlendirmesinde OpenLCA 2.4.1. yazılımı kullanılmıştır. Çalışma kapsamında üç senaryo; (A) mevcut durum, (B) ikili toplama, (C) üçlü toplama düşünülmüştür. Senaryo C, 18 çevresel etki kategorisinin tamamında en düşük çevresel yükü sağlayarak en iyi performansı göstermektedir; Senaryo B ise hiçbir kategoride C'den daha iyi değildir. A'dan B'ye geçişte ortalama çevresel yükte yaklaşık %39, A'dan C'ye geçişte ise %47 oranında azalma sağlanmıştır. Özellikle iklim değişikliği göstergesinde, A'dan C'ye geçişte %63, partikül madde oluşumunda %53, ozon tabakasının incelmesinde %52 ve su kullanımında %45 oranında iyileşme elde edilmiştir. Bu kazanımların temel nedenleri arasında, organik atıkların düzenli depolamadan çıkarılıp kompostlanmasıyla metan salınımının önlenmesi, geri dönüşüm yoluyla hammadde ve enerji yoğun üretim süreçlerinden kaçınılması ve lojistik süreçlerin optimize edilerek fosil yakıt kaynaklı emisyonların azaltılması yer almaktadır. Sonuç olarak, su ve eko toksisite dahil tüm kategorilerde belirgin çevresel iyileşmeler sağlanmıştır; bu da atık yönetiminde organiklerin işlenmesi, geri dönüşüm ve lojistik optimizasyonunun çevresel etkileri azaltmada kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir. Bölge için kaynakta ayrı toplama temelli, geri dönüşüm ve organik atıkların biyolojik işlenmesini içeren kentsel katı atık yönetimi yapısına kademeli geçiş önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Katı Atık Yönetimi, Sera Gazı Emisyonları, Sürdürülebilir Atık Yönetimi, Yaşam Döngüsü Analizi.

COMPARATIVE LIFE CYCLE ANALYSIS OF URBAN SOLID WASTE MANAGEMENT SYSTEMS: THE CASE OF KALKANCI, ILKADIM

ABSTRACT

This study aims to examine the environmental performance of urban solid waste management practices in the Kalkancı district of İlkadım, Samsun, using the Life Cycle Assessment (LCA) approach. For each scenario, the system boundaries extend from household collection to transportation, transfer, recycling, composting, and final disposal (landfilling). The inventory data were derived from municipal records, field measurements, and literature-based assumptions, and the environmental impact assessment was conducted using the OpenLCA 2.4.1 software. The study defines three scenarios: (A) current situation, (B) dual collection, and (C) triple collection. Among these, Scenario C demonstrates the lowest environmental burden across all 18 impact categories, thus exhibiting the best overall performance, whereas Scenario B does not outperform Scenario C in any category. A transition from Scenario A to B results in an approximately 39% reduction in the average environmental load, while the transition from Scenario A to C achieves a 47% reduction. Notably, when moving from A to C, improvements of 63% in climate change, 53% in particulate matter formation, 52% in ozone layer depletion, and 45% in water use were achieved. These gains are primarily attributed to the prevention of methane emissions through diverting organic waste from landfilling to composting, the avoidance of resource- and energy-intensive production processes via recycling, and the reduction of fossil fuel–related emissions through optimized logistics operations.

As a result, significant environmental improvements were observed across all categories, including water use and ecotoxicity. These findings demonstrate that the treatment of organic waste, recycling activities, and the optimization of logistics processes play a critical role in reducing environmental impacts. Accordingly, a gradual transition toward a source-separated urban solid waste management structure, incorporating recycling and biological treatment of organic waste, is recommended for the region.

Keywords: Urban Solid Waste Management, Greenhouse Gas Emissions, Sustainable Waste Management, Life Cycle Assessment (LCA)

1. GİRİŞ

Kentsel katı atık yönetimi, şehirlerin sürdürülebilirliği ve çevre sağlığı açısından kritik bir öneme sahiptir. Hızlı nüfus artışı, değişen toplumsal yaşam koşulları, doğal olarak parçalanmayan ürünlerin geliştirilmesi ve kullanımı gibi faktörler atık üretiminin artmasına neden olmakta; bu da çözülmesi gereken ve bir yönetim sorunu olan kentsel katı atık sorununu ortaya çıkarmaktadır (Cossu, 2005). Bu noktada, Yaşam Döngüsü Analizi (YDA), atık yönetimi süreçlerinin çevresel etkilerini bütüncül ve bilimsel bir yaklaşımla değerlendirmek için uluslararası düzeyde kabul görmüş en önemli yöntemlerden biridir. YDA, atıkların oluşumundan nihai bertarafına kadar olan tüm aşamalarda enerji, su, hammadde kullanımı ve sera gazı emisyonları gibi çevresel etkileri nicel olarak ortaya koyar ve farklı senaryoların karşılaştırılmasına olanak tanır.

1.1.Çalışmanın Önemi ve Kapsamı

Türkiye'nin Karadeniz bölgesindeki belediyelerde uygulanan kentsel katı atık yönetimi modelleri, şehirlerin atık yönetimi ihtiyaçlarına yanıt verirken aynı zamanda Karadeniz üzerinde bir yük oluşturmaktadır. Bu çalışmada, Samsun ili İlkadım ilçesi Kalkancı bölgesinde (Kalkanca, Karasamsun ve Baruthane Mahalleleri) üretilen yıllık 8.203 ton kentsel katı atığın

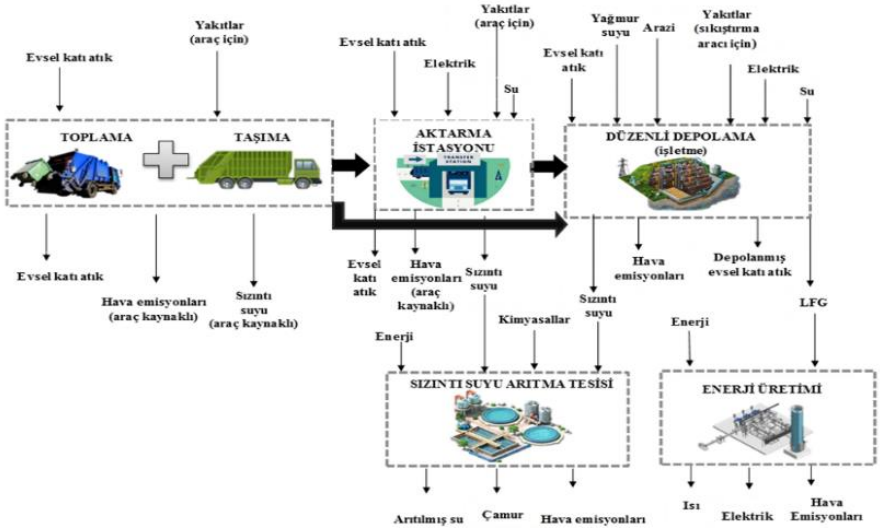
yönetimi için üç farklı atık yönetimi senaryosunun çevresel etkileri Yaşam Döngüsü Analizi (YDA) ile değerlendirilmiştir. Analizler, OpenLCA yazılımı ve Avrupa Komisyonu tarafından geliştirilen Çevresel Ayak İzi (EF) 3.0 yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacı, bölgeye özgü atık yönetimi stratejilerinin çevresel performansını karşılaştırmak ve sürdürülebilir atık yönetimi için bir temel sunmaktır.

1.2.Literatür Özeti

Türkiye ve Avrupa'da yapılan YDA tabanlı atık yönetimi çalışmaları, farklı senaryoların çevresel etkilerini çoklu etki kategorilerinde karşılaştırmakta ve karar vericilere yol göstermektedir. Özellikle EF 3.0 yöntemi, atık yönetimi sistemlerinin iklim değişikliği, asitleşme, ötrofikasyon, toksisite ve kaynak kullanımı gibi çok sayıda çevresel etki kategorisinde bütüncül değerlendirme imkanı sunmaktadır. Kentsel katı atık yönetiminin yaşam döngüsü analizi ile değerlendirilmesi ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar incelenmiştir. Bu çalışmalar, YDA'nin atık yönetiminde etkin bir yöntem olduğunu göstermektedir. Örneğin, Asase ve ark. (2009), Gana ve Kanada örneklerinde geri dönüşüm uygulamalarının çevresel etkileri azalttığını ortaya koymuştur. Türkiye'de yapılan benzer çalışmalar (Erses Yay, 2021; Irbaş & Dadaşer-Çelik, 2021), geri dönüşüm ve kompostlamanın emisyonları önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Banias ve arkadaşları, 2020 yılında, Yunanistan'ın Orta Makedonya bölgesinde evsel katı atık yönetimini YDA ile değerlendirerek dört senaryoyu karşılaştırmışlardır. Senaryo 0 enerji geri kazanımı olmadan düzenli depolama, Senaryo I enerji geri kazanımı ile düzenli depolama, Senaryo II geri dönüşüm/malzeme geri kazanımı, Senaryo III geri dönüşüm + yakma olarak değerlendirilmiştir. SimaPro kullanılarak küresel ısınma, asidifikasyon, ötrofikasyon ve insan toksisitesi gibi etki kategorilerinde hesaplamalar yapılmış; sonuçlara göre Senaryo II en düşük çevresel etkilere sahipken Senaryo 0 en yüksek yükü taşımakta, Senaryo I ise hâlâ önemli etkiler yaratmaktadır. Çalışma, entegre atık yönetimi tasarımında YDA'nin kritik bir araç olduğunu vurgulayarak atıkların kaynağında ayrıştırılması ve geri dönüşüm oranlarının artırılmasını önermektedir (Banias, vd., 2020).

1.3. Amaç ve Hedefler

Bu çalışmanın temel amacı, çalışma bölgesinde yürütülen mevcut atık yönetimi sisteminin çevresel etkilerini belirlemek, alternatif senaryolarla karşılaştırmak ve sürdürülebilir atık yönetimi için öneriler geliştirmektir.



Şekil 1. Katı atık yönetim sisteminin yaşam döngüsü (Salihoğlu vd., 2019)

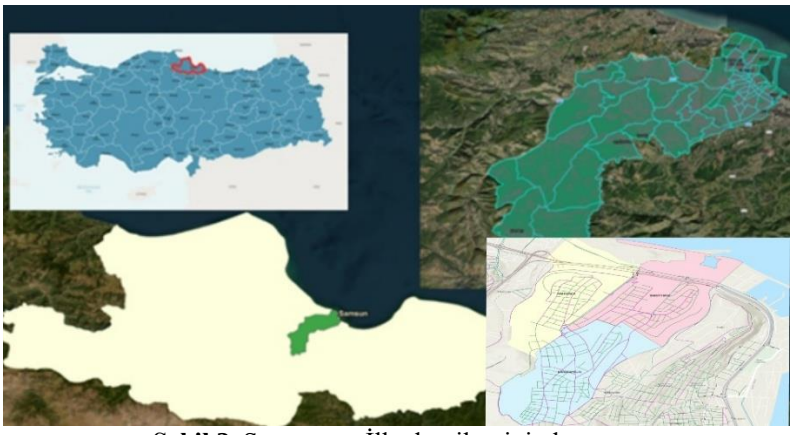
Bölgede uygulanan atık yönetimi ile alternatif iki senaryonun yaşam döngüsü analiziyle çevresel etkilerini karşılaştırmak, en sürdürülebilir atık yönetimi yaklaşımını belirlemek ve uygulamaya yönelik öneriler geliştirmektir. Örnek katı atık yönetim sisteminin yaşam döngüsü Şekil 1'de verilmiştir.

2. YÖNTEM

YDA, bir ürün veya hizmetin ham madde temininden nihai bertarafına kadar olan tüm aşamalardaki çevresel etkilerini sistematik olarak değerlendiren bir yöntemdir. Atık yönetiminde YDA, farklı bertaraf ve geri kazanım seçeneklerinin çevresel performansını karşılaştırmak için kullanılır.

2.1. Çalışma Alanı: İlkadım, Kalkancı Bölgesi

Bu çalışma, Şekil 2'de gösterilen, Kalkancı bölgesinde yürütülen atık yönetimi faaliyetlerini kapsamaktadır. Bölgenin 2024 yılı nüfusu 27.746 kişidir. Mevcut atık yönetimi süreçlerini ve önerilen yeni yöntemlerin çevresel etkilerini YDA metodolojisi ile değerlendirilmiştir. Atık toplama, taşıma, aktarma, geri dönüşüm ve bertaraf süreçlerinin her bir aşamasında oluşan çevresel etkiler nicel olarak analiz edilerek, bu süreçlerin sürdürülebilirlik açısından iyileştirilmesine yönelik öneriler geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu, YDA yöntemi kullanılarak yapılacak ve atık kaynağından düzenli depolama ve geri kazanıma kadar olan atık akışını kapsayacaktır.



Şekil 2. Samsun ve İlkadım ilçesinin konumu

Atıklar, belediye tarafından konvansiyonel çöp kamyonları ve vinçli sistem kamyonlar ile günlük olarak yapılmaktadır. Bölgede kaynağında ayrı toplama gerçekleştirilmemektedir. Atıkların büyük bir kısmı Aşağı Avdan Düzenli Depolama Tesisine gönderilmektedir.

Tablo 1. İlkadım İlçesi Atık Kompozisyonu 2017 Yılı

Atık Tipi	**% Yüzde**
Organik Atık	52,86
Kâğıt-Karton	7,86
Plastik	19,81
Cam	3,93
Metal	3,50
Diğer (Tekstil, elektronik)	12,04

Kalkancı bölgesinde üretilen atıkların miktarı ve kompozisyonu, etkili bir atık yönetimi stratejisi geliştirmek için kritik öneme sahiptir. Yapılan saha çalışmaları ve analizler sonucunda, bölgedeki atık üretimi ve karakterizasyonu Tablo 1'de verilmiştir. Günlük kişi başı kentsel katı atık üretim miktarı, 0,81 kg/kişi.gün ve yıllık toplam atık üretimi 8.203 ton seviyelerindedir. Üretilen atığın %100'ü mevcut durumda düzenli depolamaya yönlendirilmektedir.

2.2. Kullanılan Veriler ve Toplama Yöntemleri

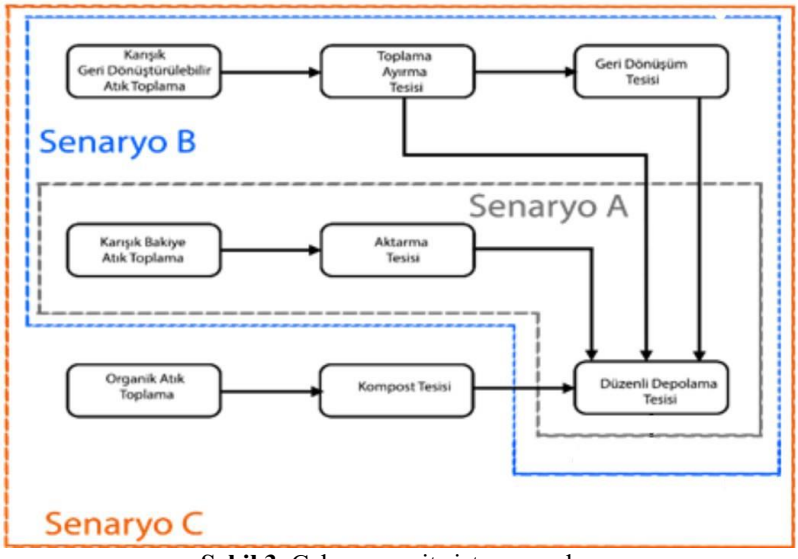
Çalışmada kullanılan birincil veriler, ilgili yerel yönetimlerin kayıtları, alınan ve ölçülen özgün saha verilerinden elde edilmiştir. Ayrıca ikincil veriler olan ulusal ve uluslararası literatürden alınan emisyon faktörleri ve arka plan verileriyle desteklenmiştir. Ölçüm ve gözlemler ve literatürden elde edilemeyen veriler ise ikincil veriler olarak uluslararası veri tabanlarından elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan senaryolara ait bazı veriler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Çalışmada kullanılan senaryolara ait veriler

	Senaryo A	**Senaryo B**	**Senaryo C**
Toplanan Atık (t)	8.203	8.203	8.203
Seyehat Faktörü	1	1,5	2
Toplama Mesafe (km)	42	30	30
Toplama Taşıma (ton.km)	393.744	354.369	472.492
Düzenli Depolama (t)	8.203,00	6.152,25	2.871,05
Aktama Mesafe (km)	18	18	18
Aktarma Taşıma (ton.km)	131.248	98.436	45.937

2.3. Sistem Sınırları ve Fonksiyonel Birim

Fonksiyonel birim olarak "Kalkancı bölgesinde üretilen 8.203 ton kentsel katı atığının yönetimi" seçilmiştir. Sistem sınırları atığın kaynağında oluşumundan nihai bertarafına kadar olan tüm aşamaları kapsamaktadır.



Şekil 3. Çalışmaya ait sistem sınırları

Toplama, taşıma, ayrıştırma, geri dönüşüm, kompostlama, düzenli depolama olarak belirlenmiştir. Çalışmada sosyal ve ekonomik etkiler kapsam dışı bırakılmıştır. Ayrıca, bazı veriler uluslararası veri tabanlarından alınmış olup, yerel koşullara %100 uyum sağlamayabilir. Çalışma, beşikten mezara yaklaşımı ile atık yönetimi süreçlerinin tüm aşamalarını ele alınmıştır

Çalışmaya ait sistem sınırları Şekil 3'de verilmiştir ve atıkların üretiminden önceki aşamaları kapsamamaktadır. Atık akışları ve geri dönüştürülen atıklar ele alınacaktır. Hangi süreçlerin analize dahil edileceğini ve hangilerinin hariç tutulacağı netleştirilmiştir.

2.4. Yaşam Döngüsü Analizinin Temelleri ve Standartları

Yaşam Döngüsü Analizi, ISO 14040 ve ISO14044 (ISO, 2006), standartlarına uygun olarak dört ana aşamada yürütülür ve aşamalar arasındaki ilişki Şekil 4'de görüldüğü gibidir: (1) Hedef ve kapsam tanımı, (2) Envanter analizi (LCI), (3) Etki değerlendirmesi (LCIA), (4) Yorumlama. Söz konusu standartlar, analizlerin şeffaf, tekrarlanabilir ve karşılaştırılabilir olmasını sağlar. Yaşam Döngüsü Analizinin, atık yönetimi sistemlerinin çevresel performansını nesnel olarak değerlendirmek ve farklı senaryoların avantajlarını ve dezavantajlarını ortaya koymak maksatlı en uygun yöntem olduğu değerlendirilmektedir. Bu kapsamda çalışma, ISO 14040 ve ISO 14044 standartlarına uygun olarak yürütülmüştür. Envanter analizinde OpenLCA 2.4.1 yazılımı ve Ecoinvent veri tabanı kullanılmıştır.



Şekil 4. Yaşam Döngüsü Değerlendirme Çerçevesi (ISO, 2006)

2.5 . Temel Süreçlerin Tanımlanması

Gerekli temel ve ürün/atık akışlarını veri tabanından seçmiş ve yenileri oluşturulmuştur. Yukarıda tanımlanan her bir temel süreç (A, B ve C) için OpenLCA'de yeni prosesler oluşturulmuştur. Her proses için girdileri ve çıktıları tanımlanmış ve miktarlarını girilmiştir. Her bir senaryo (A, B, C) için ayrı bir ürün sistemi oluşturulmuştur. Bu sistemler ile ilgili prosesler fonksiyonel birim temelinde birbirine bağlanmıştır. Bağlantıları yaparken akış yüzdelerinin doğruluğu kontrol edilmiştir.

2.6. Senaryoların Tanımlanması

Mevcut durum, optimize rota ikili toplama ve optimize rota üçlü toplama sisteminin etkilerini değerlendirilmek üzere senaryolar oluşturulmuştur. Üç farklı senaryo ile kapsamlı bir analiz yapılmıştır. Her bir durumun çevresel etkilerini net bir şekilde karşılaştırarak hangi sistemin daha verimli olduğu konusu aratılmıştır. Taşımadan kaynaklı optimizasyon ile Vinçli Hidrolik Sıkıştırmalı araçlarda yaklaşık %40 tasarruf sağlandığı görülmüştür. Bu kapsamda toplama prosesinde B ve C senaryolarında toplama mesafesi bu oranda azaltılmıştır. Kalkancı bölgesi için mevcut durum ye buna ek olarak iki temel atık yönetimi senaryosu önerilmiştir. Senaryo A, tüm atıkların (%100) düzenli depolama sahasına gönderildiği mevcut uygulamadır. Senaryo B'de, atıkların %25'i geri dönüştürülmekte, kalan %75'i ise düzenli depolama sahasına gönderilmektedir. Senaryo C, atıkların %25'i geri dönüştürülmekte, %40'ı kompostlanmakta, kalan %35'i ise düzenli depolama sahasına gönderilmektedir. Bu senaryoda, organik atıkların kaynağında ayrıştırılması ve kompostlanması için altyapı ve tesisler kurulmuştur. Her üç

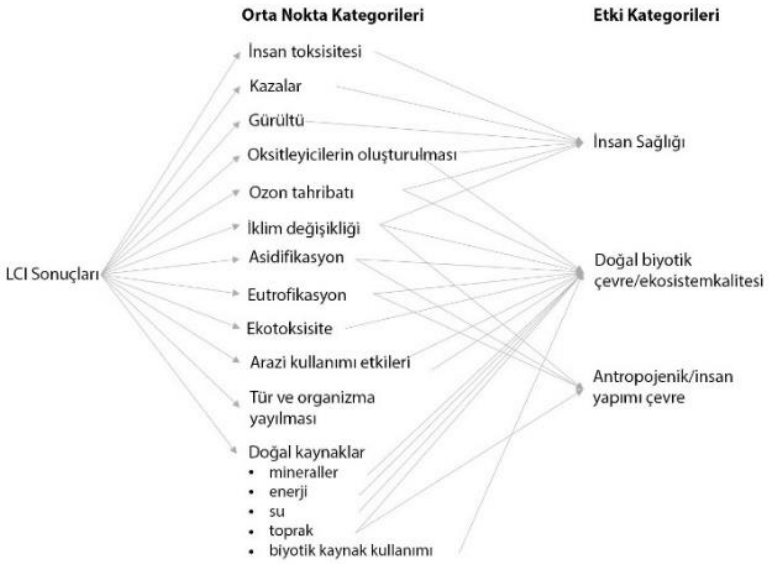
senaryoda da atık toplama, taşıma, işleme ve bertaraf süreçleri detaylı olarak modellenmiş ve YDA'ne dahil edilmiştir.

2.7. Yaşam Döngüsü Envanteri (YDE) ve Sistem Sınırları

YDE aşamasında, her bir senaryo için aşağıdaki veriler dikkate alınmıştır:
• Toplam atık miktarı ve bileşimi (organik, geri dönüştürülebilir, inert vb.),
• Toplama ve taşıma için kullanılan araçların yakıt tüketimi ve emisyonları,
• Geri dönüşüm ve kompostlama tesislerinin enerji ve su kullanımı,
• Düzenli depolama sahasında oluşan metan ve diğer sera gazı emisyonları,
• Bertaraf edilen atık miktarı ve bertaraf sonrası çevresel etkileri.

2.8. Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi (YDED)

Etki analizi sonuçları, Şekil 5'de gösterildiği üzere çalışmanın hedeflerine göre "orta nokta" veya "son nokta" yaklaşımıyla ilgili göstergeler kullanılarak hesaplanabilmektedir. YDED aşamasında, her bir senaryo için aşağıdaki temel çevresel etki kategorileri analiz edilmiştir: Küresel Isınma Potansiyeli (KIP) için sera gazı emisyonları (CO_2, CH_4, N_2O) ton CO_2 eşdeğeri cinsinden hesaplanmıştır. Enerji Tüketimi için toplam enerji girdisi (MJ veya kWh cinsinden) değerlendirilmiştir. Kaynak Tükenmesi için kullanılan hammadde ve doğal kaynak miktarı analiz edilmiştir. Asitlenme ve Ötrofikasyon Potansiyeli için atık yönetimi süreçlerinden kaynaklanan SO_2, NO_x ve diğer asidik gaz emisyonları dikkate alınmıştır.



Şekil 5. YDEA'den orta nokta ve son nokta (Jolliet vd., 2016)

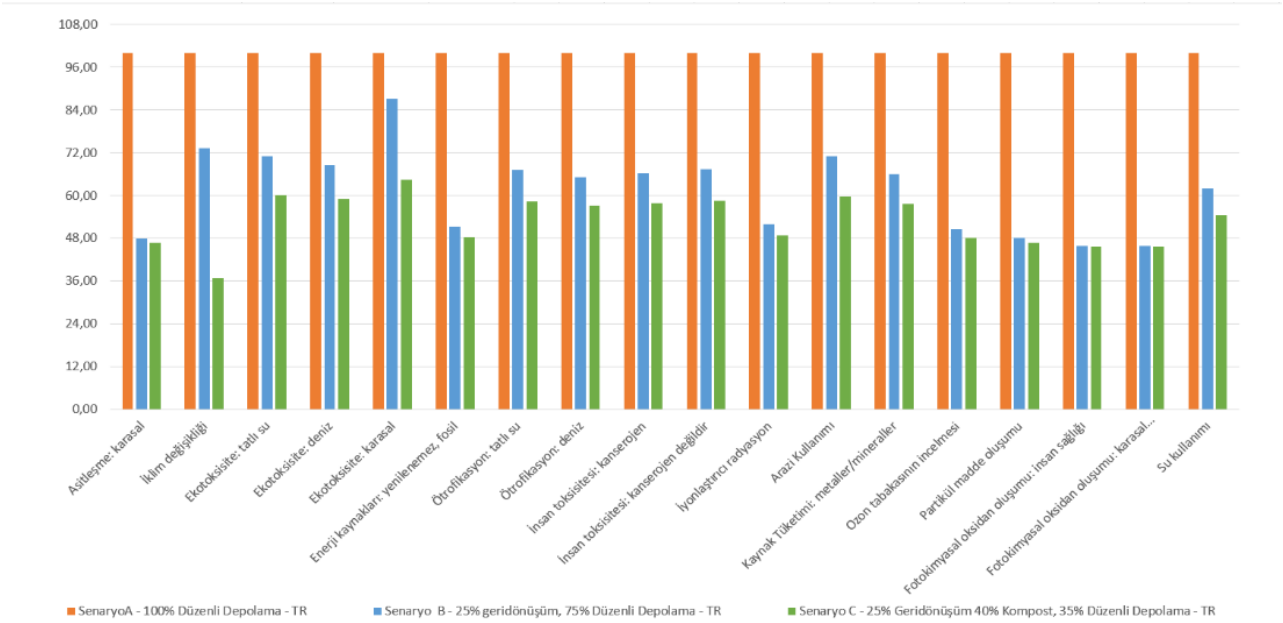
Su Tüketimi ve Kirliliği için özellikle kompostlama ve geri dönüşüm süreçlerinde oluşan su kullanımı ve atık su miktarı değerlendirilmiştir. Bu etki kategorileri, uluslararası kabul görmüş **EF v3.0** gibi metodoloji ile değerlendirilmiş, sonuçlar ilgili saha verileriyle uyumlu şekilde raporlanmıştır. EF 3.0, Avrupa Komisyonu tarafından geliştirilen ve ürünlerin / organizasyonların çevresel etkilerini çoklu kategorilerde değerlendiren bir yaşam döngüsü etki analizi (YDEA) metodudur. İklim değişikliği, asitleşme, ötrofikasyon, toksisite, arazi ve su kullanımı gibi çok sayıda etki kategorisini kapsar ve tekil skor (single score) ile toplam çevresel etkiyi özetleyebilir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

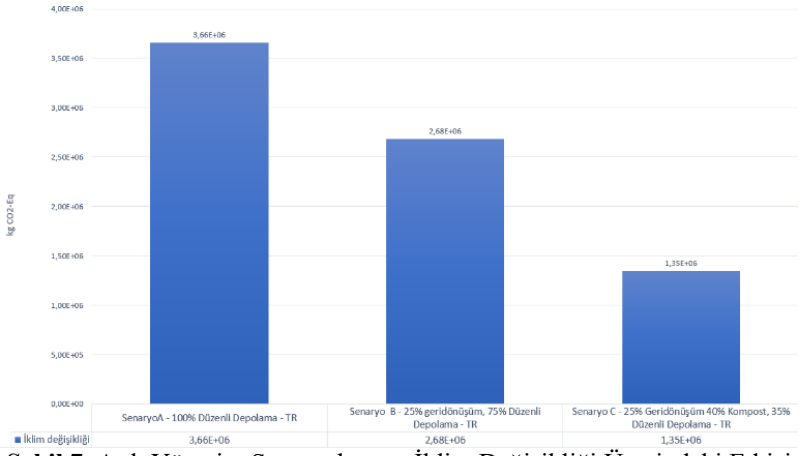
Çalışmamızda detayları yukarıda verilen 3 farklı senaryo değerlendirilmiştir: Bu kapsamda OpenLCA 2.4.1. programı ile yapılan analiz sonucunda elde edilen veriler çevresel etki kategorileri bağlamında Tablo 3'de verilmiştir. A senaryosuna göre normalize edilmiş değerler ise karşılaştırmalı olarak Şekil 6'da verilmiştir.

Tablo 3. OpenLCA ile Yapılan Yaşam Döngüsü Değerlendirme Çıktıları

Etki Kategorisi	Birim	Senaryo A	Senaryo B	Senaryo C
Asitlenme: karasal	kg SO_2-eşd.	1.073,75	515,1	502,34
İklim değişikliği	kg CO_2-eşd.	3,66E+06	2,68E+06	1,35E+06
Ekotoksisite: tatlı su	kg 1,4-DCB-eşd.	1.366,01	968,66	821,04
Ekotoksisite: deniz	kg 1,4-DCB-eşd.	1,88E+07	1,29E+07	1,11E+07
Ekotoksisite: karasal	kg 1,4-DCB-eşd.	9,62E+05	8,38E+05	6,21E+05
Enerji kaynakları: yenilenemez, fosil	kg petrol-eşd.	1,01E+05	5,15E+04	4,87E+04
Ötrofikasyon: tatlı su	kg P-eşd.	7,79	5,23	4,55
Ötrofikasyon: deniz	kg N-eşd.	0,873	0,569	0,499
İnsan toksisitesi: kanserojen	kg 1,4-DCB-eşd.	1,65E+10	1,09E+10	9,53E+09
İnsan toksisitesi: kanserojen olmayan	kg 1,4-DCB-eşd.	1,58E+07	1,07E+07	9,27E+06
İyonlaştırıcı radyasyon	kBq Co-60-eşd.	2,58E+04	1,34E+04	1,26E+04
Arazi kullanımı	m^2*a ürün eşd.	9,30E+03	6,60E+03	5,55E+03
Malzeme kaynakları: metaller/mineraller	kg Cu-eşd.	207	137	119
Ozon tabakasının incelmesi	kg CFC-11-eşd.	0,319	0,162	0,153
Partikül madde oluşumu	kg PM2.5-eşd.	492	237	231
Fotokimyasal oksidan oluşumu: insan sağlığı	kg NO_x-eşd.	2.110	967	963
Fotokimyasal oksidan oluşumu: ekosistemler	kg NO_x-eşd.	2.220	1.010	1.010
Su kullanımı	m^3	206	128	112



Şekil 6. Atık Yönetim Senaryolarının Çevresel Etki Kategorileri Açısından Karşılaştırılması



Şekil 7. Atık Yönetim Senaryolarının İklim Değişikliği Üzerindeki Etkisi

Atık yönetimi senaryolarının iklim değişikliği üzerine etkileri Şekil 7'de karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir.

3.1. Senaryo A: Mevcut Durumun YDA Sonuçları

Atıkların organik fraksiyonu anaerobik olarak bozunmakta ve önemli miktarda metan gazı (CH_4) açığa çıkmaktadır. Metan, CO_2'ye göre 25 kat daha yüksek küresel ısınma potansiyeline sahip olduğundan, bu senaryoda sera gazı emisyonları oldukça yüksektir. Ayrıca, düzenli depolama sahalarında sızıntı suyu oluşumu, toprak ve yeraltı suyu kirliliği riski de artmaktadır. Kaynak tüketimi açısından ise, geri dönüşüm ve kompostlama yapılmadığı için hammadde ve doğal kaynak kullanımı azaltılamamaktadır. 1 ton atık başına ortalama sera gazı emisyonu yaklaşık 0,45 ton CO_2 eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. Enerji tüketimi ise yalnızca toplama ve taşıma süreçlerinden kaynaklanmakta, geri kazanım olmadığı için enerji tasarrufu sağlanamamaktadır. Su tüketimi ve kirliliği açısından da sızıntı suyu oluşumu önemli bir çevresel risk oluşturmaktadır.

3.2. Senaryo B: Geliştirilmiş Geri Dönüşüm

Senaryo B'de, atıkların%25'i geri dönüştürülmekte, kalan %75'i ise düzenli depolama sahasına gönderilmektedir. Kaynağında ayrıştırma uygulamaları sayesinde, geri dönüştürülebilir atıklar sistematik olarak toplanmakta ve işlenmektedir. Geri dönüşüm sayesinde, hammadde kullanımında ve enerji tüketiminde önemli tasarruflar sağlanmaktadır. Bu senaryoda, düzenli depolama sahasına giden atık miktarı azaldığı için metan emisyonları da %25 oranında azalmaktadır. Geri dönüşüm süreçlerinde ise, enerji ve su kullanımı artmakla birlikte, toplam çevresel etki önemli ölçüde azalmaktadır. Çalışma verilerine göre, 1 ton atık başına sera gazı emisyonu yaklaşık 0,35 ton CO_2 eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. Enerji tüketimi ise, geri dönüşüm tesislerinin enerji ihtiyacı nedeniyle bir miktar artmakla birlikte, toplamda enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Su tüketimi ve kirliliği açısından, geri dönüşüm ve kompostlama süreçlerinde oluşan atık suyun uygun şekilde yönetilmesi gerekmektedir.

3.3. Senaryo C: Entegre Sistem

Senaryo C, en sürdürülebilir ve entegre atık yönetimi senaryosu olarak karşımıza çıkmaktadır. Atıkların %25'i geri dönüştürülmekte, %40'ı kompostlanmakta, kalan %35'i ise düzenli depolama sahasına gönderilmektedir. Organik atıkların kaynağında ayrıştırılması ve kompostlanması sayesinde, düzenli depolama sahasına giden biyobozunur atık miktarı önemli ölçüde azalmaktadır. Bu da metan emisyonlarının ciddi şekilde düşmesini sağlar. Kompostlama

ile elde edilen ürün, tarımda toprak iyileştirici olarak kullanılabilir ve kimyasal gübre ihtiyacını azaltır. 1 ton atık başına sera gazı emisyonu yaklaşık 0,16 ton CO_2 eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. Kaynak tüketimi ve su kullanımı açısından da bu senaryo en düşük çevresel etkiye sahip olduğu değerlendirilmektedir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Kalkancı bölgesi özelinde üç farklı atık yönetim senaryosunun yaşam döngüsü analizi ile karşılaştırmalı değerlendirmesi sunulmuştur. İlgili yerel yönetimden alınan ve ölçülen özgün saha verileriyle yapılan YDA sonuçları, mevcut uygulamanın çevresel açıdan sürdürülebilir olmadığını, geri dönüşüm ve kompostlama oranlarının artırılması ile çevresel etkilerin önemli ölçüde azaltıla bileceğini göstermektedir. Entegre atık yönetimi yaklaşımı hem sera gazı emisyonlarını hem de kaynak tüketimini minimize ederek, döngüsel ekonomi ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada en etkili strateji olarak öne çıkmaktadır. Kalkancı bölgesi örneği, Türkiye genelinde kentsel katı atık yönetimi politikalarının geliştirilmesi ve uygulanmasında yol gösterici olabilir. Entegre sistemler, emisyonların azaltılmasına, enerji verimliliğinin artmasına ve kaynakların daha etkin kullanılmasına katkı sağlamaktadır. Çalışma sonuçları, sürdürülebilir atık yönetimi süreçlerinin oluşturulmasında kullanılacaktır. Senaryo C en düşük çevresel etkiyi yaratmıştır. YDA analizinin bulguları ışığında, Kalkancı bölgesi ve benzer kentsel alanlar için; Kaynağında ayrıştırma ve üçlü toplama sistemlerinin yaygınlaştırılması, organik ve geri dönüştürülebilir atıkların evlerde ayrı toplanması, geri dönüşüm ve kompostlama verimliliğini artıracaktır. Geri dönüşüm ve kompostlama altyapısına yatırım ile modern tesislerin kurulması, atıkların işlenmesi ve ekonomik değerinin artırılması önem arz etmektedir. Enerji geri kazanımı ve düzenli depolama sahalarının modernizasyonu, metan gazının enerji üretiminde kullanılması, sera gazı emisyonlarını azaltırken, yenilenebilir enerji üretimini destekleyecektir.

5. KAYNAKÇA

Cossu, R. (2005). The sustainable landfilling concept. In R. Cossu & R. Stegmann (Eds.), Proceedings Sardinia 2005: Tenth International Waste Management and Landfill Symposium [CD-ROM]. CISA Publisher.

Asase, M., Yanful, E. K., Mensah, M., Stanford, J., & Amponsah, S. (2009). Comparison of municipal solid waste management systems in Canada and Ghana: A case study of the cities of London, Ontario, and Kumasi, Ghana. Waste Management, 29(10), 2779–2786. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.002

Erses Yay, A. S. (2021). Yaşam döngüsü analizinin ambalaj atıklarının yönetiminde kullanılması: Sakarya-Serdivan örneği. Journal of Cleaner Production, 94, 284-293. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.001

Irbaş, E., & Dadaşer-Çelik, F. (2021). Evsel katı atık yönetim senaryolarının yaşam döngüsü analizi: Melikgazi ilçesi (Kayseri) örneği. Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 7(2), 266-277. https://doi.org/10.21324/dacd.824621

Banias, G., Batsioula, M., Achillas, C., Patsios, S. I., Kontogiannopoulos, K. N., Bochtis, D., & Moussiopoulos, N. (2020). A Life Cycle Analysis Approach for the Evaluation of Municipal Solid Waste Management Practices: The Case Study of the Region of Central Macedonia, Greece. Sustainability, 12(19), 8221. https://doi.org/10.3390/su12198221

International Organization for Standardization. (2006). Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework (ISO 14040:2006). ISO.

Jolliet, O., Shanna S., Crettaz, P., Saadé-Sbeih, M., Jolliet, A. (2016). Environmental Life Cycle Assessment. CRC Press

Salihoğlu, G., Poroy, Z., & Salihoğlu, N. K. (2019). Kentsel atık yönetiminde yaşam döngüsü değerlendirmesi: Bursa analizi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *25*(6), 692–699. https://doi.org/10.5505/pajes.2018.33603