



Malzeme ve madde akış analizi ile illerin katı atık yönetiminin döngüsellüğünün incelenmesi: Düzce ili örneği

Assessment of waste management circularity in provinces by using material and substance flow analysis: A case study of Düzce province

Kadriye Elif Maçın^{1,*}

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul Türkiye

Öz

Bu çalışma, malzeme akış analizi (MAA) ile madde akış analizi (MDAA) kombinasyonunun illerde atık yönetimi ve döngüsellik değerlendirmesi için temel olarak nasıl kullanılabileceğini göstermeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda bir çerçeve sunulmuş ve Düzce ili katı atık yönetimi üzerine bir vaka çalışması gerçekleştirilmiştir. Döngüsellik hesabının yapılabilmesi için sunulan çerçevede belirtilen dört adım takip edilmelidir. Bunlar, (1) amaç ve kapsamın belirlenmesi; (2) MAA gibi kapsamlı bir çalışma için gerekli verilerin toplanması; (3) seçilen göstergeler aracılığıyla döngüsellüğün hesaplanması ve (4) sonuçların değerlendirilmesidir. Vaka çalışmasının sonuçlarına göre, ambalaj atıklarının döngüsellik oranı %44.5 olarak tespit edilmiştir. Buna karşılık, Düzce'deki biyometanizasyon tesisinin döngüsellik oranı azot için %13.2 fosfor için ise %4.4 olarak belirlenmiştir. Önerilen çerçeve değerlendirildiğinde, döngüsellüğün ötesine geçerek diğer hedef odaklı çalışmalara uygulanma potansiyeli taşımasına karşın özellikle ekonomik boyutlarda sınırlamalarının olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. MAA'nın belediye ölçeğinde kullanılması, atık yönetim kapasitesinin planlanmasını destekleyebilir ve bu sayede olası aşırı kapasitenin önlenmesini sağlayabilir.

Anahtar kelimeler: Döngüsellik, Katı atık yönetimi, Kütle dengesi, Malzeme akış analizi, Madde akış analizi.

1 Giriş

Dünya genelinde, doğal kaynakların tüketimi ve katı atık yönetimi (KAY) uygulamaları hakkında giderek artan bir endişe mevcuttur. Malzeme tüketiminin 2060 yılına kadar iki katına çıkması, atık üretiminin ise 2050 yılına kadar %70 oranında artması öngörülmektedir [1-2]. Dünya Bankası verilerine göre, dünyada evsel atık üretiminin 2050 yılında 3.4 milyar tona ulaşması beklenmektedir [3]. Şehirler bu atıkların oluşumunda ayrı bir önem taşımaktadır. Birleşmiş Milletler'e göre dünya nüfusunun %68'i 2050 yılına kadar şehirlerde yaşayacaktır [4]. Bu bağlamda, belediye katı atıklarının önlenmesi, yeniden kullanımı ve geri dönüştürülmesi, KAY politikasının öncelikleri arasında yer almaktadır.

Atık yönetimi ve geri dönüşüm faaliyetleri, kapsamlı ve entegre yaklaşımlar gerektiren karmaşık ve çok yönlü

Abstract

The study aims to show how the combination of material flow analysis (MFA) and substance flow analysis (SFA) can be used as a basis for circularity assessment in waste management systems. In this context, a framework has been presented and a case study focusing on solid waste management in Düzce province has been applied. According to the specified framework for circularity calculation, four specific steps must be followed. These are (1) defining the purpose and scope; (2) data collection for a comprehensive study like MFA; (3) calculating circularity with selected indicators; and (4) evaluating the results. The circularity of packaging waste is 44.5%, while the circularity of the biomethanization facility in Düzce was found 13.2% for nitrogen and 4.4% for phosphorus. Although the suggested framework can be applied to other studies beyond circularity, it has economic limitations. MFA results on a municipal scale can support waste management capacity planning and prevent overcapacity.

Keywords: Circularity, Solid waste management, Mass balance, Material flow analysis, Substance flow analysis.

mekanizmalardır [5]. Bu nedenle, KAY sorunları halen tam anlamıyla çözülememiştir [6]. KAY ile doğrudan bağlantılı olan döngüsel ekonomi kavramı, rekabetçi ve iklim açısından nötr bir ekonomi oluşturma hedefiyle ortaya çıkmış ve giderek önemi artmıştır. Döngüsel ekonomiye geçiş, etkin ölçüm ve izleme araçlarını gerektirmektedir. Bu ekonomiyi temsil etmek amacıyla oluşturulan gösterge sistemi, her düzeydeki sistemlere ve çeşitli sektörlerle uygulanabilir nitelikte olmalıdır. Döngüsel ekonomi ilkeleri giderek önem kazanmasına rağmen, mevcut çerçeveler, özellikle süreç düzeyinde döngüsellik değerlendirme konusunda sınırlı kalmaktadır. Mevcut modellerin çoğu, ürün düzeyindeki döngüsellik veya makro düzeydeki sistemlere odaklanmaktadır, ancak bireysel süreçlerin kaynak akışlarını ve çevresel etkilerini tam olarak yansıtamamaktadır. Bu eksiklik, etkili karar alma süreçlerini

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: macin@itu.edu.tr (K. E. Maçın)

Geliş / Received: 08.01.2025 Kabul / Accepted: 04.06.2025 Yayınlanma / Published: 15.07.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1615960

ve kaynakların verimli kullanımını engellemektedir. Son zamanlarda hem ülke seviyesinde UNI/TS 11820:2022 hem de uluslararası standart ISO 59020:2024 (Circular economy – Measuring and assessing circularity performance) [7] tarafından Malzeme Akış Analizi (MAA) ve Madde Akış Analizi (MDAA) döngüselliğin ölçülmesi için "tamamlayıcı bir yöntem" olarak kabul edilmiştir [8]. MAA ve MDAA, kütle dengesi ilkesine dayanmaktadır. Bu yöntemlerden elde edilen sonuçlar, atık yönetim sistemlerinin tasarımına yönelik kavramsal kararlar, atık yönetimi süreçlerinin iyileştirilmesi, maliyet-fayda optimizasyonları ve diğer çeşitli amaçlar için kullanılabilir [9]. Son dönemdeki çalışmalarda, MAA ve MDAA'nın, ambalaj sektörü [10], alüminyum [11] ve süt ürünleri gibi tarımsal gıda sistemlerinde [12] döngüselliği değerlendirme konusundaki rolleri tartışılmıştır. Bu gelişme, aynı zamanda MAA'nın artan bir ilgiyle benimsenmesine katkı sağlamıştır [8].

KAY gibi karmaşık sistemlerin çözülebilmesi için, atık akışlarının mevcut ve gelecekteki durumu ile özellikleri, ayrıca arka plan sistemindeki değişiklikler dikkate alınarak dikkatli bir planlama yapılmalıdır. Böylece, olası hatalı kararlardan kaçınılmakta ve genel olarak en iyi çevresel sonuçlar güvence altına alınabilmektedir. MAA, bir KAY sisteminin stok ve akışlarını anlamaya yardımcı olmakta ve çevresel değerlendirme için doğal bir başlangıç noktası sunmaktadır [13]. MAA, özellikle hedefe yönelik KAY stratejilerinde, atık akışının oluşumundan kullanım ömrünün sonuna kadar izlenmesinde giderek daha fazla kullanılmaktadır [9,14-15].

MAA, gizli akışları ve maliyetleri göz önünde bulundurarak, atık yönetim sisteminin unsurlarını ve süreçlerini derinlemesine anlamak için bir yöntem sunmakta ve KAY performansını iyileştirme fırsatlarını belirlemeye olanak tanımaktadır [14]. MAA, geri dönüşüm oranı [16] gibi toplu göstergelerin ölçülmesi, karbon, besin maddeleri ve ağır metaller gibi temel maddelerin akıbetinin izlenmesi [17-18] ve enerji dengelerinin yapılması için KAY'da yaygın olarak uygulanmıştır. Ayrıca, kâğıt [19], alüminyum [20] ve gıda atıkları [21] gibi atık malzemelerin döngüselliğini araştırmaya yönelik geniş bir literatür bulunmaktadır.

Türkiye'de her yıl 30.3 milyon ton atık üretilmektedir [22]. Bu atıkların %13.5'i hâlâ çöplüklere gönderilirken, %85.9'u atık işleme tesislerine ulaştırılmaktadır [22]. Ülkenin hedefi ise, 2035 yılına kadar atık geri kazanım oranını %60 seviyesine çıkarmaktır. Türkiye, 2053 yılına kadar tüm atıklarını düzenli depolama tesislerinden (DDT) uzaklaştırmayı hedeflemektedir. Ayrıca, iklim değişikliğine uyum kapsamında sürdürülebilir gıda sistemi uygulamaları geliştirmeyi planlamakta ve döngüsel ekonominin hedeflerini de içeren bir 'Döngüsel Ekonomi Eylem Planı' hazırlanmaktadır [23]. Türkiye'de, daha önce şehir ölçeğinde MAA [5] ya da daha küçük ölçeklerde (örneğin, bir üniversite kampüsü) MAA kullanılarak atık yönetiminin döngüselliğini ölçen çalışmalar gerçekleştirilmiştir [24-25]. Ancak, yazarın araştırmaları sırasında karşılaştığı kadarıyla, şehir ölçeğinde atık yönetimi ve döngüsellik arasındaki ilişkiyi ele alan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışma iki yönlü bir yenilik sunmaktadır. İlk olarak, küçük ve/veya orta ölçekli şehirlerin atık akışlarını tahmin etmeye olanak tanıyan bir

MAA/MDAA modeli geliştirilmiştir. İkincisi, atıkların ve temel maddelerin (örneğin, Azot-N ve Fosfor-P) ayrıntılı bir döngüsellik analizi sağlanmaktadır. Sunulan çerçevenin daha iyi anlaşılabilmesi için Düzce İli'nin KAY döngüselliğine yönelik bir vaka çalışması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu makale, atık yönetiminde karar almada kullanılan yaygın parametrelere ek olarak, döngüselliğin önemini MAA ve MDAA yardımıyla ortaya koymaktadır.

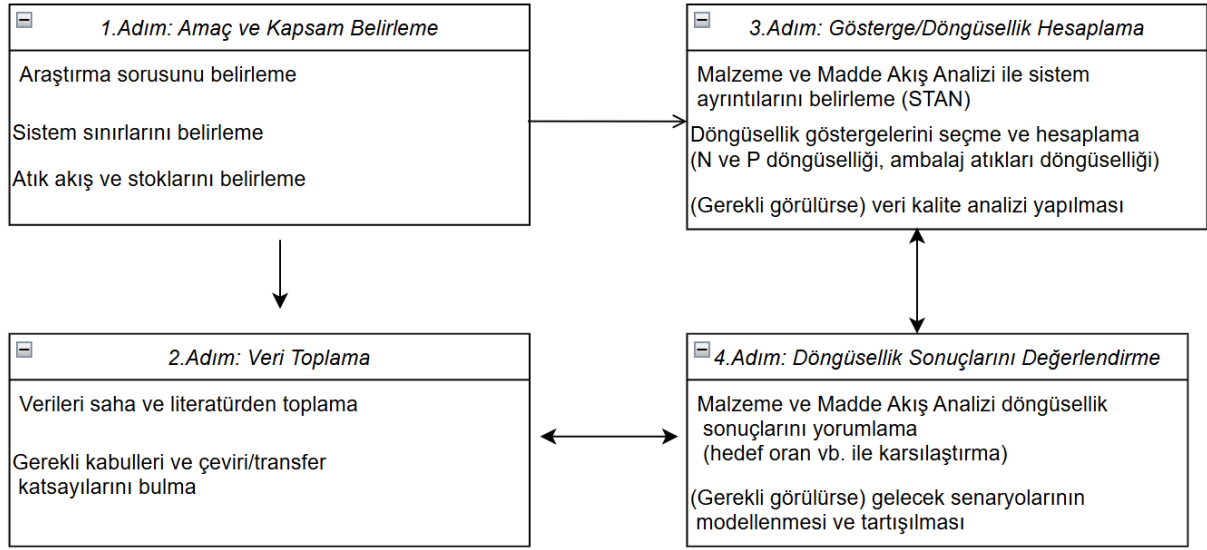
2 Materyal ve metod

2.1 Döngüsellik hesaplama çerçevesi

MAA, tanımlanmış mekansal ve zamansal sınırlar dahilinde, bir sistemdeki malzeme ve/veya maddelerin akışlarını ve stoklarını sistematik şekilde envanterini çıkarmak için kullanılan bir metodolojidir [26]. MAA ve MDAA, kütle korunumu yasasına dayanır; yani, girdilerin toplam miktarı, çıktılar ile stokların toplamına eşittir. Döngüsellik hesabı için bu çalışmada belirtilen çerçeveye göre dört belirli adım izlenmelidir. Bunlar (1) amaç ve kapsamın tanımlanması; (2) MAA gibi kapsamlı bir çalışma için veri toplama; (3) seçili göstergelerle döngüselliğin hesaplanması ve (4) sonuçların değerlendirilmesidir (Şekil 1). Birinci adım, amaç ve kapsam belirlenmeden önce mevcut KAY yapısının ayrıntılı bir şekilde incelenmesini içerir. Çalışmanın ilk adımı, kapsamın ve KAY mevzuatına uygunluğun doğrulanmasıyla tamamlanır ve mevcut KAY yapısının gözden geçirilmesini kapsar. Gerekli incelemelerin ardından, amaç, kapsam ve sistem sınırları tanımlanır. Ayrıca, MAA'da kullanılacak atık akışları ve stokları tasarlanır. İkinci adımda, veri toplama süreci detaylı şekilde yürütülür. Atık miktarının karakterizasyonu ve ildeki tesislere ait işletim verileri gibi kritik bilgiler, birincil ve ikincil veri kaynaklarından toplanır. Ayrıca, döngüsellik hesaplamalarında kullanılacak transfer/dönüşüm katsayıları, mümkünse doğrudan çalışma alanından, aksi takdirde literatür kaynaklarından elde edilir. Üçüncü adım, oluşturulan MAA modelinin ve döngüsellik göstergelerinin hesaplanması için temel bir rol oynar. Bu aşamada, kütleli akışların ve stokların takibini Sankey diyagramları aracılığıyla gerçekleştirmeye olanak tanıyan STAN gibi yazılımlar kullanılmaktadır. Gerekli olduğu durumlarda, birincil ve ikincil veriler incelenerek sonuçlar üzerindeki belirsizliği değerlendirmek için veri kalite analizi gerçekleştirilebilir. Dördüncü adımda, KAY senaryoları tanımlanır ve MAA modeli, bu senaryoları değerlendirerek döngüsellik hedeflerine ulaşmak için gerekli düzenlemeleri belirlemede kullanılır. Son aşamada, sonuçlar değerlendirilir. Eğer ihtiyaç duyulursa, KAY için gelecek senaryolar tasarlanır ve sistem döngüselliği üzerindeki etkilerini değerlendirmek için göstergeler yeniden hesaplanır.

2.2 Düzce ili mevcut katı atık yönetimi- döngüsellik vaka çalışması

MAA ve MDAA ile katı atık yönetiminin döngüselliğini hesaplama yöntemi çerçevesi (Şekil 1), birinci adımda belirtilen araştırma sorusunun tanımlanmasıyla başlar.



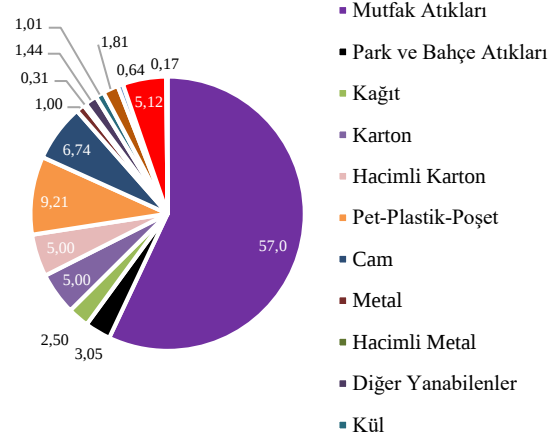
Şekil 1. MAA ve MDAA ile katı atık yönetiminin döngüsellik hesaplama çerçevesi

Bu vaka çalışmasında, Düzce ili katı atık yönetiminin azot, fosfor ve ambalaj atıklarının döngüsellik hesaplamak amacıyla MAA ve MDAA yöntemlerinin kullanılması kararlaştırılmıştır. Bu kapsamda, sistem sınırları 2023 yılında Düzce il sınırları içinde yer alan ilçelerde üretilen belediye atıkları olarak belirlenmiştir [27]. Atık karakterizasyonu (Şekil 2) için Düzce İli Çevre Durum Raporu'ndan [28], azot ve fosfor miktarlarının tespiti için ise diğer literatür kaynaklarından (Tablo 1) yararlanılmıştır [29]. Birinci adım kapsamında, DDT ve Düzce il sınırları içinde yer alan biyometanizasyon tesisinin fermantasyon çıkışı katı-faz ürünü sistemin stokları olarak kabul edilmiştir. MAA ve MDAA yöntemlerinin detayları, 2.1.2 ve 2.1.3 başlıklarında sunulmuştur.

Düzce ili Türkiye'de Batı Karadeniz bölgesinde bulunmaktadır. Düzce'nin doğusunda Bolu, batı ve kuzeydoğusunda, sırasıyla, Sakarya ve Zonguldak bulunmaktadır. Düzce merkez, Akçakoca, Cumayeri, Çilimli, Gölyaka, Gümüşova, Kaynaşlı ve Yığılca olmak üzere 8 ilçesi bulunmaktadır. Düzce ilinin alanı 2492 km²'dir. Düzce 1999 yılından bu yana il konumundadır.

1997 yılından 2008 yılının Temmuz ayına kadar, Düzce Merkez İlçe'de toplanan katı atıkların tamamı Çamköy'de vahşi depolama yöntemiyle bertaraf edilmiştir. Ancak, bu tarihten sonra İSKİ ve İBB, İSTAÇ yönetiminde gerçekleştirilen Rehabilitasyon Projesi kapsamında, bu alan tamamen kullanıma kapatılmıştır. ÇED olumlu raporunun alınması, olağan süreçten uzun sürdüğünden Cumayeri, Gölyaka, Gümüşova, Kaynaşlı, Yoncalık ve Yığılca İlçelerinde ise düzensiz depolama devam etmiştir [27]. 2014 yılı sonunda Yığılca'da yeni katı atık yönetim tesisi açılmıştır. Tesis 309.000 m²'lik bir arazi üzerine inşa edilmiştir. Türkiye'de 2035 yılına kadar toplanacak atıkların %60'ının geri dönüştürülmesi hedeflenmektedir. Bu doğrultuda, Düzce İli'nde 2020 yılından itibaren atıkların geri kazanım oranlarının aşamalı olarak artırılması ve 2035 yılında %60 geri kazanım oranına ulaşılması planlanmıştır.

Biyobozunur atıklar (mutfak atıkları ve park-bahçe atıkları), biyometanizasyon tesisine alınarak fermantasyon işlemine tabi tutulmakta ve elde edilen biyogazdan elektrik üretim tesisinde hem ısı hem de elektrik enerjisi elde edilmektedir. Isı biyometanizasyon tesisinde kullanılmakta, elektrik ise enterkonnekte sisteme verilmektedir.



Şekil 2. Düzce ili atık karakterizasyonu [28]

Sıvı fermente ürünün %50'si, geri dönüşüm sistemi aracılığıyla biyobozunur atıkların fermantasyon işleminde kullanılmaktadır [30]. Biyometanizasyon tesisinde fermantasyon sırasında oluşan %20-25 oranındaki katı fermente ürün, ilgili mevzuat gerekliliklerini karşıladığı takdirde tarımda veya park-bahçe uygulamalarında değerlendirilmektedir. Aksi durumda, 'Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik' [31] hükümlerine uygun şekilde yönetilmektedir. Düzce ili için ayrıca Atıktan Türetilmiş Yakıt Tesisi (ATY) planlanmakta olup, bu tesis mevcut olmadığı için sistem sınırlarına dâhil edilmemiştir.

Tablo 1. Atık malzemelerin fiziko-kimyasal özellikleri, kuru ağırlık [29].

Bileşen	N (mg/kg atık)	P (mg/kg atık)
Mutfak Atıkları	2336	284
Kağıt	12.8	0.5
Karton	47.8	2.3
Hacimli Karton	55.9	6.5
Plastik	14.7	4
Park ve Bahçe	442.5	58.4
Tehlikeli atıklar	555.9	37.6
Cam	0	0.8
Metal	0	6.9
Hacimli Metal	0	4.6
Kül	0	0
Diğer Yanmayanlar	0	0.8
AEEE*	2.7	0
Diğer	253.8	34.9
Diğer Yanabilenler	125	7

* AEEE: Atık Elektrik ve Elektronik Ekipman

2.2.1 Maddelerinin döngüsellüğünün hesaplanması-azot ve fosfor

Bu bölümde, MAA ve MDAA ile katı atık yönetiminin döngüsellüğü hesaplama yöntemi çerçevesinde (Şekil 1) belirtilen ikinci ve üçüncü adımlar uygulanmıştır.

MAA üç ana unsurdan oluşur: sistem, süreç ve akış [15,31]. Tanımlanmış bir sistemdeki süreçler içindeki ve arasındaki malzeme akışlarını gösteren MAA, bu çalışmada STAN 2.7 yazılımı kullanılarak uygulanmıştır [32]. Çıktı hesaplamaları ise kütle dönüştürme ilkesine dayanmıştır (Denklem 1).

Depolama sahası ve arazide kullanım süreçleri, sistemin stokları olarak kabul edilirken, sisteme giren ve çıkan malzemeler, sistemin dışındaki diğer süreçler için sırasıyla (I) ve (E) harfleriyle temsil edilmiştir. Şehirdeki atıklar, toplanma, taşınma ve bertaraf yöntemlerine göre; diğerleri, park-bahçe atıkları, ambalaj-cam atıkları ve mutfak atıkları olmak üzere kategorilere ayrılmıştır.

Şekil 2’de karakterizasyonu yapılan atıklar, MAA kapsamında dört grup altında sınıflandırılmıştır. DDT, atık yönetim sisteminde uzun vadeli stok olarak tanımlanmakta olup, bu modelde arazide/toprakta depolanan stokları ifade etmektedir. Bu çalışmanın amacı, farklı atık yönetim sistemlerinin katı atık akışları ve dönüşümleri üzerindeki etkilerini analiz etmek olduğundan, yakıt veya yardımcı malzemeler gibi diğer hiçbir ‘akış’ kütle dengesine dahil edilmemiştir.

$$\sum_{i=1}^{i=k} (\dot{m}_{giriş,i}) = \sum_{m=1}^{m=n} (\dot{m}_{çıkış,m} + \dot{m}_{stok,}) \quad (1)$$

Burada $\dot{m}_{giriş,i}$ bir işleme giren girdi akışlarını temsil ederken, $\dot{m}_{çıkış,m}$ atık miktarını temsil etmektedir. Tüm girdilerin, çıktılarının ve stokların kütle dengesine dayanan yaklaşım, malzemelere veya maddelere, örneğin ambalaj

atıkları gibi atık fraksiyonlarına veya P gibi kaynaklara uygulanmıştır.

MDAA, çeşitli bağlamlar ve ölçeklerde madde veya element akışlarını ve stoklarını ölçmek için kullanılan kapsamlı bir yöntemdir. Besin döngülerinin değerlendirilmesi ve modellenmesi açısından MDAA yöntemleri kritik öneme sahiptir [33]. Döngüsellüğünün hesaplanması için Denklem 2 kullanılmıştır.

$$N \text{ veya } P \text{ Döngüsellüğü (\%)} = \frac{(N \text{ veya } P \text{ alımı} + \text{Toprakta Depolanan})(\text{ton/yıl})}{\text{Atık İçindeki Toplam N veya P Miktarı (ton/yıl)}} \times 100 \quad (2)$$

Toprağa uygulanana yani biyometanizasyon tesisinde oluşan fermentasyon katı-faz ürününün akıbeti için litetatür kaynaklar [34-35] kullanılmıştır (Tablo 2).

Tablo 2. Araziye uygulanan katı faz fermentasyon ürününün N ve P'nin dağılımı (%) [34-35].

N -alımı	Sızıntı NO ₃	N ₂ O emisyonu	Toprakta depolanan N
52.93	41.36	0.96	4.74
P -alımı	Sızıntı P	Depolanan P	
19.28	56.23	24.48	

2.2.2 Geri dönüşüm atıklarının döngüsellüğünün hesaplanması

Ambalaj atıklarının döngüsellüğünün hesaplanmasında, Azot-N ve Fosfor-P döngüsellüğünde olduğu gibi, MAA ve MDAA ile katı atık yönetiminin döngüsellüğü hesaplama yöntemi çerçevesinde (Şekil 1) belirtilen ikinci ve üçüncü adımlar uygulanmıştır. Çerçevenin üçüncü aşamasında, durumu değerlendirmek için Denklem 3-4-5 kullanılmıştır.

Geri dönüşüm oranı, KAY raporlamalarında, hedef belirleme süreçlerinde ve izlemelerde yaygın olarak kullanılan popüler bir göstergedir. Bu nedenle hesaplamalara dahil edilmiştir (Denklem 4). Ancak tesislerin %100 verimle çalışması mümkün değildir (Tablo 3). Ayrıştırma oranı sayesinde, tesislerin ayırma verimliliği hesaplanabilir (Denklem 5). Ambalaj atıkları döngüsellüğü, geri dönüşüm sürecindeki kayıpları ve ikincil ürünlerin pazar ikame oranlarını (Tablo 4) dikkate alarak, hammaddeyi ikame eden ürünleri etkili bir şekilde hesaba katar. Bu yaklaşım, gerçek geri dönüşüm oranını daha doğru bir şekilde temsil etmektedir (Denklem 6).

$$\text{Geri dönüşüm oranı (\%)} * = \frac{\text{İkincil Ürün Üretiminde Kullanılan Miktar (ton/yıl)}}{\text{Geri Dönüşüm Tesisine Giren Atık Miktarı (ton/yıl)}} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{Ayrıştırma Oranı (\%)} * = \frac{\text{Geri Dönüşüm Tesisine Giren Atık Miktarı (ton/yıl)}}{\text{Üretilen Atık Miktarı } \left(\frac{\text{ton}}{\text{yıl}}\right) **} \times 100 \quad (4)$$

$$\text{Ambalaj Atıkları Döngüsellüğü (\%)} * = \frac{\text{İkincil Ürün Üretiminde Kullanılan Miktar (ton/yıl)}}{\text{Üretilen Atık Miktarı } \left(\frac{\text{ton}}{\text{yıl}}\right) **} \times 100 \quad (5)$$

*Ambalaj atıkları döngüselliği hesaplanırken “cam” bileşeni hesaplara dâhil edilmiştir

**Bu vaka çalışmasında üretilen tüm atıkların toplandığı kabul edilmiştir.

Tablo 3. Maddesel geri kazanım tesislerinin geri kazanım verimlilikleri (%) [36].

Bileşen	Cam	Al	Kağıt	Karton	Plastik
Aluminyum	0	97	0	0	0
Kağıt	0	0	77	0	0
Karton	0	0	0	54	0
Plastik	0	0	0	0	98
Cam	95	0	0	0	0

Tablo 4. Maddesel geri kazanım tesislerinin geri kazanım verimlilikleri (%) [36].

Pazar ikame faktörü	Değer	Kaynak
Plastik	0.85	[37].
Kağıt	0.85	[37].
Karton	1	[38].
Cam	0.83	[37].
Fe olmayan metal	0.85	[37].
Fe metal	0.7	[39].
Aluminyum	1	[37].

2.2.3 Veri kalite analizi

Veri kalite analizi sırasında, Weidema ve Wesnæs'in (1996) yöntemi ile JRC'nin (2011) veri sınıflandırma yöntemleri kullanılarak, öncelikle veri kalite seviyesi (VKS) Denklem 6'ya göre hesaplanmıştır [41-42].

$$VKS = \frac{G + E + Z + C + T + Xw * 4}{i + 4} \quad (6)$$

Denklem 6'da G güvenilirliği, E eksiksizliği (veya tamlığı), Z zamansal ilişkiyi, C coğrafi ilişkiyi ve T teknolojik ilişkiyi temsil eder. Xw, veri kalitesi göstergeleri arasındaki en yüksek sayısal değere karşılık gelen en düşük kalite seviyesini ifade eder. i ise, veri kalitesi göstergelerinin toplam sayısını belirtmektedir [41-42]. Denklem 6 kullanılarak VKS hesaplandıktan sonra, her bir verinin kalite sınıflandırması Tablo 5 baz alınarak yapılmıştır. VKS değeri 1.6'nın altında olduğunda veri yüksek kaliteye sahiptir. 1.6 ile 3 arasında ise orta kaliteye sahip kabul edilir. Değer 3 ile 4 arasında olduğunda, bu tahmini veri olarak değerlendirilir.

Tablo 5. Veri kalite seviyesi [42]

Genel veri kalitesi derecesi	Genel veri kalite sınıfı	Temsil edici renk
< 1.6	Yüksek kalite veri	
>1.6 - 3	Orta kalite veri	
>3-4	Tahmini veri	

3 Bulgular ve tartışma

Bu bölümde, materyal ve metot bölümündeki sıralamadan farklı bir yaklaşım izlenerek, öncelikle vaka çalışması bulguları sunulacak, ardından önerilen çerçevenin avantajları ve dezavantajları tartışılacaktır.

3.1 Vaka çalışması bulguları

Bu bölümde, Düzce için gerçekleştirilen MAA/MDAA çalışmasının sonuçlarının ayrıntıları (üçüncü adım) sunulacak ve ardından bu sonuçların değerlendirilmesi yapılacaktır (dördüncü adım).

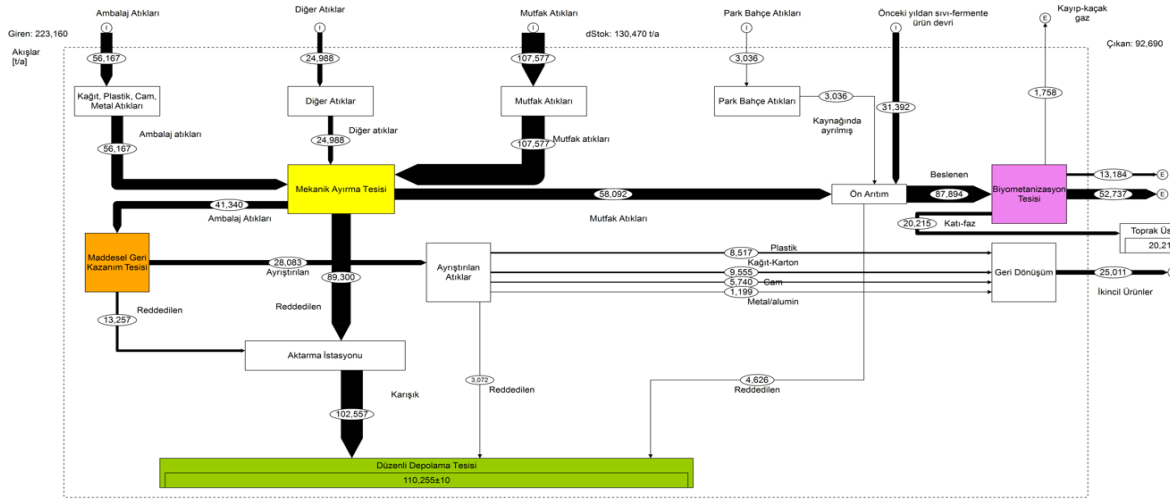
Ambalaj atıkları için geri dönüşüm oranı (%60.5) ve ayrıştırma oranı (%73.6) incelendiğinde, 2023 yılı itibarıyla, 2035 yılı için hedeflenen %60 geri kazanım oranının sağlandığı görülmektedir (Şekil 3). Ancak, ambalaj atıkları döngüselliği incelendiğinde (%44.5), 2023 yılı itibarıyla Düzce ambalaj atıklarının bu hedefin altında kaldığı görülmektedir. Bu durum, atık yönetiminde performans ölçümünde yalnızca tesislere giren atık miktarlarına bakılmasının (bkz. Denklem 1: $m_{(giriş,i)}$) yeterli olmadığını göstermektedir. Düzce'de bulunan maddesel geri kazanım tesisine ilişkin özel performans verileri bulunmadığından, hesaplamalar Tablo 3'e dayanarak gerçekleştirilmiştir. Bu da sonuçlarda bir belirsizlik yaratabilir. Tesise dair performans ve verim bilgileri elde edildiği takdirde, hesaplamaların yeniden yapılması faydalı olacaktır.

$$\text{Geri dönüşüm oranı (\%)} = \frac{25011(\text{ton/yıl})}{41430(\text{ton/yıl})} \times 100 = \%60.5$$

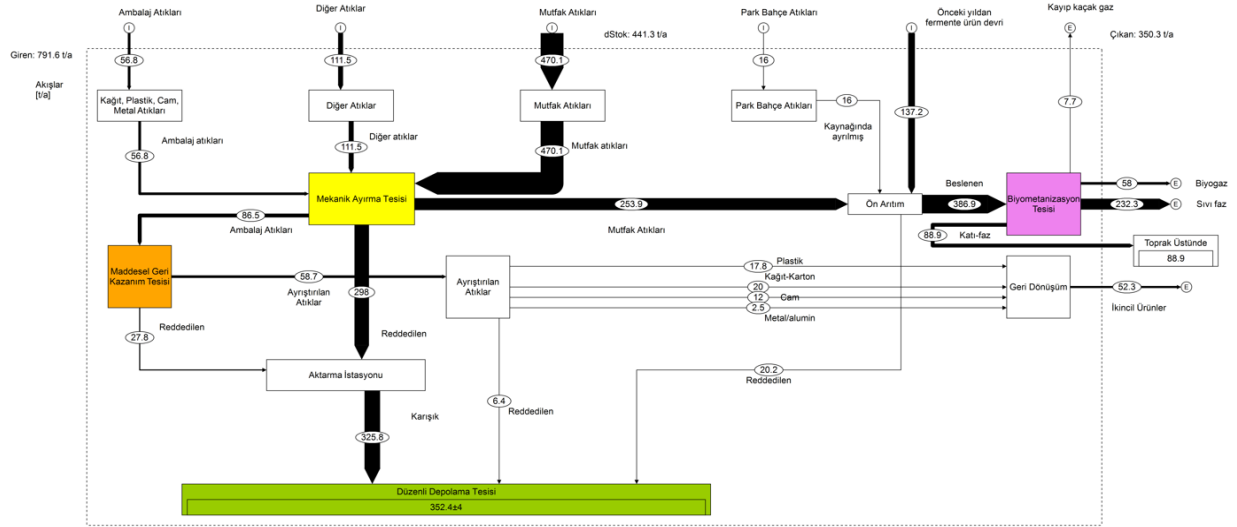
$$\text{Ayrıştırma Oranı (\%)} = \frac{41430(\text{ton/yıl})}{56167(\text{ton/yıl})} \times 100 = \%73.6$$

$$\text{Ambalaj Atıkları Döngüselliği (\%)} = \frac{25011(\text{ton/yıl})}{56167(\text{ton/yıl})} \times 100 = \%44.5$$

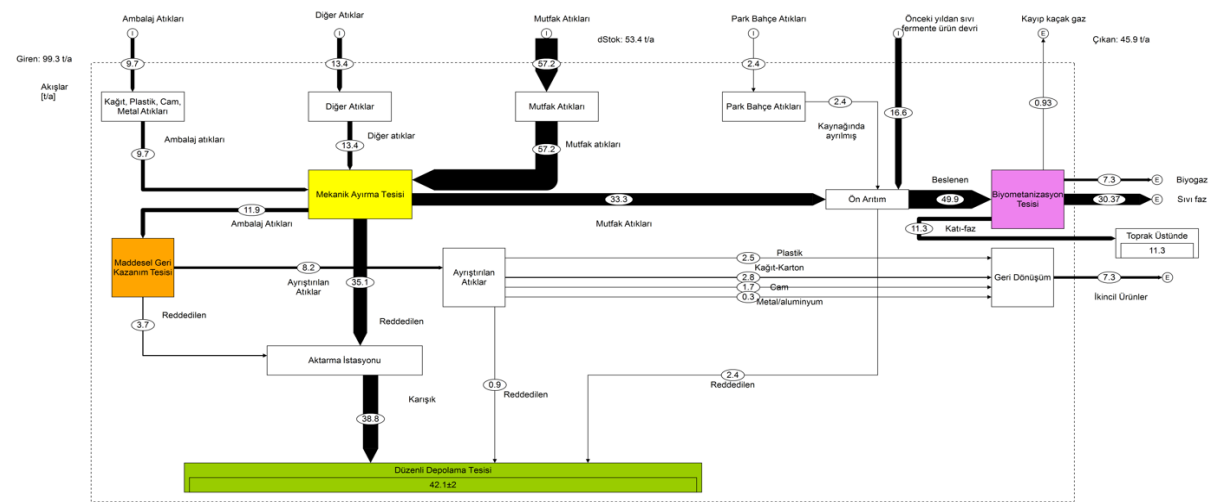
Geri dönüşüm süreçlerindeki teknolojik gelişmeler, verimliliği artırarak daha yüksek kalitede geri dönüştürülmüş malzemeler elde edilmesini sağlamaktadır. Ancak, ambalaj atık akışlarındaki kirlenme ve geri dönüştürülmüş ambalaj malzemeleri (ikincil ürünler) için pazarların mevcut olup olmaması gibi çeşitli zorlukların da ele alınması gerekmektedir. Vaka çalışmasında, döngüsellik hesaplamalarında maddesel geri kazanım tesis verimlilikleri (Tablo 3) ve ikincil ürün pazar ikame oranları (Tablo 4) dikkate alınarak bu sorunlar kısmen çözülmeye çalışılmıştır. Ayrıca, gerçek hayatta bu zorlukların üstesinden gelebilmek için çeşitli iyileştirmeler yapılması mümkündür.



Şekil 3. Düzce ili 2023 yılı katı atık yönetimi –malzeme akış analizi (ton/yıl)



Şekil 4. Düzce ili 2023 yılı katı atık yönetimi –madde akış analizi-azot (ton/yıl)



Şekil 5. Düzce ili 2023 yılı katı atık yönetimi –madde akış analizi-fosfor (ton/yıl)

Ambalaj geri dönüşüm süreçlerini iyileştirmek için araştırma ve geliştirme faaliyetleri, geri dönüşüm altyapısının genişletilmesi, geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımını teşvik eden politikaların uygulanması, kamu alımlarında geri dönüştürülmüş içerik kriterlerinin benimsenmesi ve tüketicilerin atık yönetimi konusunda bilinçlendirilmesi gibi adımlar, geri dönüşüm süreçlerindeki zorlukların üstesinden gelmeye katkı sağlayabilir.

$$\text{Düzce İli Atık Yönetim Sisteminin N Döngüsellığı (\%)} = \frac{(47.05 + 4.21)(\text{ton/yıl})}{791.6 (\text{ton/yıl})} \times 100 = \%6.5$$

$$\text{Biyometanizasyon Tesisinin N Döngüsellığı (\%)} = \frac{(47.05 + 4.21)(\text{ton/yıl})}{386.9 (\text{ton/yıl})} \times 100 = \%13.2$$

$$\text{Düzce İli Atık Yönetim Sisteminin P Döngüsellığı (\%)} = \frac{2.19 (\text{ton/yıl})}{99.3 (\text{ton/yıl})} \times 100 = \%2.2$$

$$\text{Biyometanizasyon Tesisinin P Döngüsellığı (\%)} = \frac{2.19 (\text{ton/yıl})}{49.9 (\text{ton/yıl})} \times 100 = \%4.4$$

Literatürde, evsel atıklara yönelik yapılan MAA çalışmalarında döngüsellik veya performans hesaplamalarına ilişkin Denklem 3, 4 ve 5'teki ayrımlara genellikle rastlanmadığı görülmektedir. Nottingham'da evsel atıklarla ilgili gerçekleştirilen MAA çalışmasına göre, 2017 yılında 37.717 ton ambalaj atığı üretilmiş ve bunun 16.067 tonu (%43'ü) geri dönüştürülmüştür [43]. Bu değer, Düzce'deki oran (%73) ile karşılaştırıldığında daha düşüktür; bunun nedeni, Nottingham'da atıkların önemli bir kısmının geri kazanıma gönderilmesidir. Avusturya'da 2020 yılı belediye katı atık verileri kullanılarak gerçekleştirilen MAA çalışmasına göre, cam atık miktarı 311.500 ton, kâğıt atık miktarı 615.400 ton ve plastik atık miktarı 299.000 ton olarak hesaplanmıştır. Ambalaj atıklarının geri dönüşüm oranları ayrı ayrı değerlendirilmiş ve plastik atıklar (%25) hariç, kâğıt (%80) ve cam (%82) döngüsellik oranları Düzce'nin döngüsellik oranından (%73) daha yüksek bulunmuştur [44]. Üç farklı ülkeden elde edilen sonuçlar, bölgelere özgü döngüsellüğün ve MAA çalışmalarının önemini açıkça ortaya koymaktadır. Türkiye'de, şehir ölçeğinde daha önce yalnızca Ankara için bir MAA çalışması gerçekleştirilmiştir [5]; ancak ambalaj atıkları döngüsellığı mevcut verilerle hesaplanamamıştır.

Düzce ilindeki katı atıklarda yıllık 791.6 ton azot ve 99.3 ton fosfor bulunduğu belirlenmiştir; biyometanizasyon tesisinin döngüsel dönüşüm oranları ise azot için %13.2, fosfor için %4.4 olarak hesaplanmıştır (Şekil 4-5). Azot (N) ve fosfor (P) döngüsellüğünün karmaşık yapısına daha önce değinilmiş ve bu durumun, bu besin maddelerinin çevriminde çeşitli faktörlerin etkili olduğu gerçeğiyle ilişkili olduğu vurgulanmıştır [23,40]. Atıkların biyometanizasyon tesisi, kompostlaştırma gibi yöntemlerle değerlendirilmesi

yerine DDT ve vahşi depolama yöntemlerine gönderilmesi, besin döngüsünü ciddi şekilde engellemektedir. Vaka çalışmasının sonuçlarında da görüldüğü üzere, toprak üstü uygulamalar yerine DDT'ye yönlendirmesi durumunda "N" ve "P" geri dönüşümü mümkün olmamaktadır. Buna benzer olarak, Türkiye'deki bir üniversite kampüsünde gıda atıklarının yönetimine ilişkin yapılan çalışmada, "N" ve "P" döngüsellüğünü sağlama açısından biyometanizasyon tesisinin, en verimli, DDT'nin ise en verimsiz yöntem olduğu tespit edilmiştir [24]. Sürdürülebilir KAY'a ulaşmak için, döngüyü kapatan kademeli geri dönüşüm ve geri kazanım süreçlerinin uygulanması gereklidir. Kademeli sistemlerin (cascading) tam potansiyelini ortaya çıkarmak, döngüsellik odaklı stratejilerin KAY üzerindeki etkilerini daha iyi anlamamıza katkı sağlayacaktır. [23].

Veri kalite analizi sonuçlarına göre (Tablo 6), vaka çalışmasında çoğunlukla orta kalitede veriler tercih edilmiştir. Atık miktarı ve karakterizasyonunda yüksek kaliteli birincil verilerin kullanılması bir avantaj olarak değerlendirilebilir. Ancak, N ve P döngüsellik hesaplarında kullanılan atığın fiziko-kimyasal özelliklerine dair ikincil verilere dayanılması ve bu verilerin orta kalitede olması bir dezavantajdır. Veri kalite analizi, çalışmada herhangi bir tahmini veri kullanılmadığını kanıtlayan önemli bir sonuç ortaya koymuştur. İleride çalışmanın yüksek kaliteli verilerle tekrarlanması önerilmektedir.

Tablo 6. Veri kalite analizi sonuçları

Veriler	Veri Kaynağı	Güvenilirlik (G)	Eksiksizlik (E)	Zamansal İlişki (Z)	Coğrafi İlişki (C)	Teknolojik İlişki (T)	Veri Kalite Skoru	Veri Kalite Sınıfı
Atık miktarı	birincil	1	1	1	1	1	1.0	Yüksek kalite
Atık karakterizasyon u	birincil	1	1	1	1	1	1.0	Yüksek kalite
Atık fiziko-kimyasal özellikleri	ikincil	1	1	3	3	2	2.4	Orta kalite
Maddesel geri kazanım tesislerinin geri kazanım verimlilikleri	ikincil	1	1	3	3	2	2.4	Orta kalite
Arazi uygulamaları-N-P	ikincil	1	1	3	3	2	2.4	Orta kalite
Biyometanizasyon tesisi-fermantasyon ürün oranları	birincil	2	2	1	1	1	1.6	Yüksek kalite

Bu çalışmanın amacı, Şekil 1'de sunulan metodolojiyi tanıtmak ve vaka çalışması üzerinden açıklamalar yapmak olduğu için gelecek senaryoları oluşturulmamıştır (bkz. dördüncü adım). Ancak, ATY tesisinin kurulması ve Düzce'de gelecekte öngörülen atıkların döngüsellüğünü etkileyebilecek diğer atık yönetim senaryoları, MAA kullanılarak modellenabilir. Örneğin, bu çalışma, Türkiye'nin 2053 yılına kadar %100 DDT'den uzaklaşma

hedefini kapsamamaktadır. Bunun için yakma tesisi gibi büyük ölçekli yatırımlar gereklidir. Bundan sonraki çalışmalar, bu tesislerin fizibilite, tekno-ekonomik analiz, döngüsellik ve yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) gibi bütüncül yaklaşımlara odaklanabilir. MAA'nın, YDD gibi bir çevresel değerlendirme yöntemi ile birleştirilmesi, alternatif atık yönetimi teknolojilerini ve senaryolarını karşılaştırmak ve daha sonra hem stratejik hem de operasyonel düzeylerde atık yönetimi kararlarını desteklemek için önemli bir yöntem olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, vaka çalışmasında üretilen ve toplanan atık miktarlarının eşit olduğu varsayılmıştır. Pakistan'ın Karaçi şehrinde gerçekleştirilen MAA çalışması, kayıt dışı atık toplama oranının %25 olduğunu ortaya koymuştur [45]. Türkiye'de bu denli yüksek oranlar geçerli olmasa da, sonuçlarda önemli hassasiyet yaratabileceği öngörülen bu durumun, daha ayrıntılı verilerin elde edilmesiyle daha detaylı analiz edilmesine imkan sağlayacağı bilinmektedir. Bu veriler ışığında, mevcut durumun döngüsellik hesaplarının yapılması ve istenirse gelecekteki farklı atık toplama oranı performanslarının değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

3.2 Çerçevenin tartışılması

MAA, atık yönetim sistemlerinin planlanması ve tasarlanması açısından kritik bir araçtır; çünkü atık girdilerini, ürünleri ve stokları birbiriyle ilişkilendirerek gerekli tesis kapasitelerini ve diğer akışları hesaplamayı mümkün kılar. Ayrıca, toplu akış yaklaşımları, bir atık yönetim sisteminde yapılan değişikliklerin çeşitli unsurlar üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde ortaya koyar. Bu kapsamda oluşturulan çerçeveye uygun olarak bir vaka çalışması gerçekleştirilmiş ve bu süreçte hem malzemelerin hem de maddelerin takip edilmesi gerektiği belirlenmiştir. Ancak, vaka çalışması sonuçlarına göre önerilen çerçevenin bazı avantajları ve dezavantajları tespit edilmiştir; bu bölümde ise söz konusu avantajlar ve dezavantajlar detaylı bir şekilde ele alınacaktır.

3.2.1 Avantajlar

İllerdeki atık akışlarını takip etmek için tek bir standart yöntem bulunmamaktadır. Bu sebeple, KAY sistemi için veri yapısı, sıfırdan geliştirilmiş bir çerçeve temel alınarak oluşturulmuştur. Bu çerçeve, şehirler ve yerel yönetimler için kurumsal bir veri yapısının temel çizgisini oluşturmayı hedeflemektedir. Çerçevenin ana amacı ise KAY'ın döngüsellik ölçmek ve analiz etmektir. Ancak diğer gösterge ve hedefler için de esneklik. Ayrıca sınırlar şehir ölçeği için çizilmiş olsa da farklı ölçekler için uygulanabilir. İyi bilinen ve genel kabul görmüş yöntemlere dayanan çerçevenin yapısı, yerel yönetimlerin KAY politikası, düzenlemeleri ve stratejisini birleştirmesine olanak tanıyarak döngüsellik hedefine ulaşılmasına katkıda bulunacaktır. Çerçevenin adımları takip edildiğinde, çalışmanın sonuçları hem malzeme hem de madde düzeyinde kütle dengesi yaklaşımının faydalarını ortaya koyacaktır. Bu kapsamda, girdiler, çıktılar ve stoklar dengelenecek; veri tutarlılığı sağlanacak; sonuçlar, bilinen belirsizliklerle yeniden üretilebilecek; ayrıca MAA, araştırmacılar ve dış paydaşlar için şeffaf ve açık bir bilgi paylaşım platformu sunacaktır.

3.2.2 Dezavantajlar

Birinci adımda amaç, kapsam ve sistem sınırlarının belirlenmesinin ardından, ikinci adımda veri toplama süreci oldukça zaman alıcıdır. Bu aşamada, yeterli verilerin temin edilebilmesi için uzman bir çalışma ekibinin oluşturulması gereklidir. Bu durum, hem zaman yönetimi hem de ekonomik kaynakların etkin bir şekilde planlanmasını zorunlu kılmaktadır. Hem ambalaj atıkları hem de azot ve fosfor döngüsellik hesaplarında kullanılan denklemler, MAA ve MDAA'nın doğası gereği yalnızca kütle dengesine dayanmaktadır. Bu durum, döngüsel ekonominin önemli bir unsuru olan finansal akışların bu çerçevede yer almadığını göstermektedir. Gelecek çalışmalarda, ekonomik akış parametreleri ile birlikte atık ithalat ve ihracatın etkilerinin de dikkate alınarak kapsamın genişletilmesi faydalı olacaktır.

4 Sonuçlar

Bu çalışma, şehir ölçeğinde KAY döngüsellik tespiti ederken karşılaşılabilecek zorlukları ele almak üzere bir MAA/MDAA çerçevesi önermektedir.

Çalışma kapsamında yürütülen vaka çalışması sonuçlarına göre Türkiye'de 2035 yılı için hedeflenen %60 geri kazanım oranı Düzce'de 2023 yılında sağlamaktadır. Ancak, döngüsellik oranının daha düşük (%44.5) olduğu tespit edilmiştir.

Düzce ilindeki katı atıkların içerdiği azot miktarı yıllık 791.6 ton, fosfor miktarı ise yıllık 99.3 ton olarak hesaplanmıştır. İl sınırlarında bulunan biyometanizasyon tesisinin döngüsellik oranı azot için %13.2, fosfor için ise %4.4 olarak belirlenmiştir.

Çerçeve, döngüsellik ötesinde farklı hedef odaklı çalışmalara uygulanma potansiyeli taşısa da, özellikle ekonomik boyutlar açısından bazı sınırlamalara sahiptir. Gelecekteki çalışmalar, yaşam döngüsü maliyet unsurlarını çerçeveye entegre etmeye odaklanarak bu sorunu ele alabilir.

Ayrıca, veri toplama süreçlerinin diğer KAY çalışmalarına kıyasla daha zaman alıcı olduğu göz ardı edilmemelidir. Gelecekteki vaka çalışmaları, bu metodolojiyi doğrulama ve geliştirme fırsatları sunabilir.

Bu çalışma, gelecekteki atık senaryolarında MAA/MDAA uygulamalarının genişletilmesine de katkı sağlamaktadır. Ayrıca, belediye ölçeğinde MAA'dan elde edilen sonuçlar, yönetim kapasitesinin planlanmasını destekleyerek aşırı kapasitenin önlenmesini sağlayabilmektedir.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 9

Kaynaklar

- [1] OECD, Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences, 2019.
- [2] European Commission, A New Circular Economy Action Plan for a Cleaner and More Competitive Europe, 2020.
- [3] S. Kaza, L. Yao, P. Bhada-Tata, F. Van Woerden, What a Waste 2.0 - A Global Snapshot of Solid Waste

- Management to 2050, Urban Development Series Knowledge Papers, World Bank, Washington, DC, 2018. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>.
- [4] Birleşmiş Milletler, 68% of the world population projected to live in urban areas by 2050. <https://www.un.org/development/desa/en/news/>. (Erişim Tarihi: 12.08.2024)
- [5] N. Aydın, Materials flow analysis as a tool to improve solid waste management: A case of Ankara. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 6(1), 90-97, 2020. <https://doi.org/10.21324/dacd.467179>
- [6] A. U. Zaman, Identification of key assessment indicators of the zero waste management systems. *Ecological Indicators*, 36, 682–693, 2014. [doi:10.1016/j.ecolind.2013.09.024](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.09.024)
- [7] ISO 59020:2024. Circular economy – Measuring and assessing circularity performance. Geneva: International Organization for Standardization, 2024.
- [8] C. Bux, J. Fellner, D. Seyhan, and V. Amicarelli, Measurement of fertilizer flows to advance circularity and resilience to climate change. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 50, 100971, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2024.100971>
- [9] N. Stanisavljevic, P. H. Brunner, Combination of material flow analysis and substance flow analysis: A powerful approach for decision support in waste management, *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 32(8), 733–744, 2014. <https://doi.org/10.1177/0734242X14543552>.
- [10] M. Lombardi, R. Rana, J. Fellner, Material flow analysis and sustainability of the Italian plastic packaging management, *Journal of Cleaner Production*, 287:125573, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125573>.
- [11] H. Buchner, D. Laner, H. Rechberger, J. Fellner, Material flow analysis as basis for efficient resource management – the case of aluminium flows in Austria. *Metallurgical Research & Technology*, 111:351–357, 2014. <https://doi.org/10.1051/metal/2014040>.
- [12] R. Rebollo-Leiva, L. Vásquez-Ibarra, E. Entrena-Barbero, M. Fernández, G. Feijoo, M.T. Moreira, S. González-García, Coupling material flow analysis and network DEA for the evaluation of eco-efficiency and circularity on dairy farms, *Sustainable Production and Consumption*, 31:805–817, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.03.02>.
- [13] M. Haupt, T. Kägi and S. Hellweg, Modular life cycle assessment of municipal solid waste management. *Waste Management*, 79, 815–827, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.03.035>
- [14] D. Wan, Y. T. Tang, G. Long, D. Higgitt, J. He, and D. Robinson, Future improvements on performance of an EU landfill directive driven municipal solid waste management for a city in England, *Waste Management*, 102, 452–463, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.009>
- [15] S. Kasavan, N. I. B. Mohd Ali, S. S. Bin Sharif Ali, N. A. B. Masarudin, ve S. B. Yusoff, Quantification of food waste in school canteens: A mass flow analysis, *Resources, Conservation & Recycling*, 164, 105176, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105176>.
- [16] D. A. Turner, D. I. Williams, and S. Kemp, 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, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.077>.
- [17] A. Allesch, P. H. Brunner Material Flow Analysis as a tool to improve waste management systems: The case of Austria, *Environmental Science & Technology*, 51(1):540–51, 2017. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04204>.
- [18] M. B. Jensen, J. Möller, C. Scheutz, Assessment of a combined dry anaerobic digestion and post-composting treatment facility for source-separated organic household waste, using material and substance flow analysis and life cycle inventory. *Waste Management*, 66:23–35, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.029>.
- [19] S. Van Ewijk, J. A. Stegemann, P. Ekins, Global life cycle paper flows, recycling metrics, and material efficiency. *Journal of Industrial Ecology*, 22:686–93, 2018. <https://doi.org/10.1111/jiec.12613>.
- [20] E. Seign'e-Itoiz, C. M. Gasol, J. Rieradevall, X. Gabarrell, Environmental consequences of recycling aluminum old scrap in a global market. *Resource Conservation Recycling*, 89:94–103, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.05.002>.
- [21] K. E. Maçın, Circular food waste management in Türkiye to stay within planetary boundaries. 4th International Conference on Sustainable, Circular Management and Environmental Engineering, İzmir, Türkiye, 9 Temmuz 2024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455801034>
- [22] Türkiye İstatistik Kurumu, Türkiye Atık istatistikleri. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Atik-Istatistikleri-2022-49570> (Erişim Tarihi: 6.10.2024)
- [23] T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. <https://dongusel.csb.gov.tr> (Erişim Tarihi: 4.10.2024)
- [24] K. E. Maçın, O. A. Arıkan, M. Altınbaş and A. Damgaard, Decarbonizing university campuses: A business model for food waste management at Istanbul Technical University (ITU) Ayazaga Campus, Turkey. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 43 (2), e14316, 2023. <https://doi.org/10.1002/ep.14316>
- [25] K. E. Maçın, O. A. Arıkan and A. Damgaard, An MFA–LCA framework for goal-oriented waste management studies: ‘Zero Waste to Landfill’ strategies for institutions. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 2024. <https://doi.org/10.1177/0734242X241287734>
- [26] P. H. Brunner and H. Rechberger, *Practical Handbook of Material Flow Analysis*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, USA. 2004.
- [27] Düzce İl Sıfır Atık Yönetim Sistemi Planı. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/duzce/menu/il-sifir-at>

- ik-yonetim-sistemi-plani_20210402061151.pdf (Erişim Tarihi: 17.09.2024)
- [28] Türkiye Cumhuriyeti Düzce Valiliği. Çevre, Şehircilik Ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü Düzce İli 2022 Yılı Çevre Durum Raporu <https://duzce.csb.gov.tr/> (Erişim Tarihi: 14.09.2024)
- [29] C. Riber, C. Petersen, T. H. Christensen, Chemical composition of material fractions in Danish household waste. *Waste Management*, 29, 1251-1257, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.09.013>
- [30] <https://www.duzcedamla.com/video/18380392/duzced-e-cop-sorunu-tarih-oldu> (Erişim Tarihi: 14.09.2024)
- [31] Resmi Gazete. Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik. Sayı: 27533, Adres: <http://mevzuat.basbakanlik.gov.tr>, (Erişim Tarihi: 14.09.2024)
- [32] O. Cencic, Nonlinear data reconciliation in material flow analysis with software STAN, *Sustainable Environment Research*, 26, 291–8, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2016.06.002>.
- [33] H. Fernandez-Mena, T. Nesme, S. Pellerin, Towards an Agro-Industrial Ecology: A review of nutrient flow modelling and assessment tools in agro-food systems at the local scale. *Science of The Total Environment*, 543, 467–479, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.032>
- [34] E.B. Gencsoy, The Effects of Different Amendments on the Compost. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2010.
- [35] S. Cobo, A. Dominguez-Ramos, A. Irabien, Trade-offs between nutrient circularity and environmental impacts in the management of organic waste. *Environmental Science & Technology*, 2018. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01590>
- [36] P. N. Pressley, J. W. Levis, A. Damgaard, M. A. Barlaz, J. F. DeCarolis, Analysis of material recovery facilities for use in life-cycle assessment. *Waste Management*, 35:307–317, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.012>
- [37] A. Fernández-Braña, G. Feijoo, ve C. Dias-Ferreir, Turning waste management into a carbon neutral activity: practical demonstration in a medium-sized European city. *Science of Total Environment*, 728, 138843, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138843>.
- [38] ELPCA. ELCD database 2.0. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/> (Erişim Tarihi: 26.08.2024)
- [39] C. Tagliaferri, S. Evangelisti, R. Clift, P. Lettieri, C. Chapman, R. Taylor, Life cycle assessment of conventional and advanced two-stage energy-from-waste technologies for methane production. *Journal of Cleaner Production*, 129, 144-158, 2016. DOI:10.1016/j.jclepro.2016.04.092.
- [40] Ellen MacArthur Foundation. Completing the Picture: How the Circular Economy Tackles Climate Change www.ellenmacarthurfoundation.org/publications (Erişim Tarihi: 16.12.2024)
- [41] B. P. Weidema and M. S. Wesnæs, Data quality management for life cycle inventories-an example of using data quality indicators. *Journal of Cleaner Production*, 4, 167–174, 1996. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(96\)00043-1](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(96)00043-1)
- [42] JRC, ILCD Handbook: Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European Context. 1sted. Ispra, Italy: European Commission, 2011. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-Recommendations-for-Life-Cycle-Impact-Assessment-in-the-European-context.pdf>
- [43] D. Wang, Y. T. Tang, G. Long, D. Higgitt, J. He, D. Robinson, Future improvements on performance of an EU landfill directive driven municipal solid waste management for a city in England. *Waste Management*, 102, 452–463, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.009>
- [44] A. M. Lipp, J. Lederer, The circular economy of packaging waste in Austria: An evaluation based on statistical entropy and material flow analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 217, 108193, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108193>
- [45] S. Aslam, F. Ali, A. Naseer, Z. Sheikh, Application of material flow analysis for the assessment of current municipal solid waste management in Karachi, Pakistan. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 40(2), 185–194, 2022. <https://doi.org/10.1177/0734242X211000427>

