



## Yaşam Döngüsü Analizi ve Döngüsel Ekonomi Yaklaşımları ile Sürdürülebilir Biyoatık Yönetimi

Süreyya Altın<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak, Türkiye

E-Posta: sureyya.altin@beun.edu.tr

**Gönderim 05.06.2024; Kabul 16.07.2024**

**Özet:** Birleşmiş Milletler, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmak için atık yönetiminin çevresel, sosyal ve ekonomik göstergeleri dikkate alan, yaşam döngüsü analizi (YDA) ve döngüsel ekonomi (DE) yaklaşımlarına göre planlanmasını önermektedir. YDA, atık yönetim alternatiflerinin olası çevresel etkilerini karşılaştırmak için kullanılabilir. Kentsel biyoatıkların miktarı ve biyolojik bozunabilirliği nedeniyle yönetimi özel önem taşımaktadır. Bu nedenle, bir çok çalışmada farklı biyoatık yönetim süreçlerinin potansiyel çevresel etkilerini değerlendirmek ve sürdürülebilir biyoatık yönetimine karar vermek için YDA yöntemi kullanılmıştır. Bir atık yönetim sistemi, çevresel olduğu kadar ekonomik olarak da sürdürülebilir olmalıdır. Atık yönetim faaliyetlerinin ekonomik sürdürülebilirliği gelir/gider dengesinin sağlanmasını gerektirir. Biyoatık yönetim sistemlerinin en önemli gelir kaynağı, proses ürünlerinin pazarlanması ve çevresel teşviklerdir. DE yaklaşımı ise, ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliği sağlayan madde döngüsünü esas alır. Bu çalışmada DE ve YDA kavramları değerlendirme kriterleri ile birlikte tanımlanmış ve daha önce yapılan çalışmalar ışığında, biyoatık yönetimde kullanılan dönüşüm süreçlerinin YDA ve DE yaklaşımlarına göre ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliği ortaya konmuştur. Sonuç olarak, kentsel biyoatık yönetim planlaması YDA ve DE yaklaşımlarına göre yapıldığında doğal kaynaklar korunur ve çevresel emisyon etkisi azalır. İlave olarak, ekonomik değeri olan toprak iyileştirici bir ürün veya karbon nötr bir proste enerji elde edilebilir. Ayrıca madde döngüsü en az çevresel etki ile kapatılır.

**Anahtar Kelimeler:** Döngüsel ekonomi, kentsel biyoatık yönetimi, yaşam döngüsü analizi,

## Sustainable Biowaste Management by Life Cycle Analysis and Circular Economy Approaches

**Received 05.06.2024; Accepted 16.07.2024**

**Abstract:** The United Nations recommends that waste management should be planned according to life cycle analysis (LCA) and circular economy (CE) approaches that take into account environmental, social and economic indicators in order to achieve sustainable development goals. LCA can be used to compare the possible environmental impacts of waste management alternatives. Municipal biowaste management is of particular importance due to its quantity and biodegradability. For this reason, the LCA method has been used in many studies to evaluate the potential environmental impacts of some alternative biowaste management scenario and to decide on sustainable biowaste management. A waste management system must be sustainable economically as well as environmentally. Economic sustainability of an waste management system is evaluated by benefit/cost analysis. Mainly income sources of biowaste management systems are marketing of process products and environmental incentives, as emphasized in many studies. The circular economy (CE) approach targets the cycle of matter that provides economic and environmental sustainability. In this study, the concepts of CE and LCA and their evaluation criteria are explained. In light of previous studies, the economic and environmental feasibility of the conversion processes used in biowaste management have been reveal regarding to LCA and CE approaches. As a result, when municipal biowaste management planning is done according to LCA and CE approaches, natural resources protect and the environmental emission impact reduces. Additionally, economically value soil-improving product or energy produced by carbon-neutral process, is obtained. Thus, the material cycle is closed with minimal environmental impact.

**Key Words:** Biowaste management, life cycle analysis, circular economy

## GİRİŞ

Artan nüfus ve tüketim alışkanlıkları nedeniyle, son yıllarda kentsel katı atıkların miktarı endişe verici bir boyuta ulaşmıştır. Küresel olarak her yıl yaklaşık 7-9 milyar ton atık üretildiği ve bunun 1.3 milyar tonunu kentsel katı atıkların oluşturduğu rapor edilmiştir <sup>[1,2]</sup>. Küresel yıllık atık üretiminin, nüfus artışı ve kentleşme yoluyla 2050 yılına kadar iki katına çıkacağı tahmin edilmektedir <sup>[3]</sup>. Avrupa Birliği, sürdürülebilir atık yönetimi ve döngüsel ekonomiyi teşvik etme, atıkları azaltma, iklim değişikliğini

\*İlgili E-posta / Corresponding E-mail: sureyya.altin@beun.edu.tr (ORCID: 0000-0002-6853-8873)

sınırlama, kaynak verimliliğini ve güvenliğini artırma hedefleriyle bir dizi strateji ve direktif yürürlüğe koymuştur. Bu stratejiler arasında, Birleşmiş Milletler (BM) genel kurulu tarafından 2015 yılında tanımlanan, 2030 sürdürülebilir kalkınma gündemindeki kalkınma amaçları ile doğrudan ilgili, Avrupa Yeşil Anlaşması, Döngüsel Ekonomi ve Atık Sonu stratejileri de bulunmaktadır <sup>[4-8]</sup>. Avrupa Yeşil Anlaşması'nın merkezinde yer alan; 2050 yılına kadar iklim nötr olma hedefine ulaşmak için sera gazı emisyonları (GHG'ler) önemli ölçüde azaltılmalı ve sürdürülebilir ekonomik modeller desteklenmelidir. Yeşil Mutabakat'ın temel taşlarından biri, geri dönüşümü artırarak, atık oluşumunu ve hammaddelerin çıkarılmasını indirgemeyi, böylece doğal kaynakların sürdürülebilir ve etkin kullanımını teşvik etmeyi amaçlayan döngüsel ekonomi (DE) stratejisidir <sup>[9]</sup>.

BM kalkınma hedeflerine ulaşmak için dikkate alınması önerilen, DE ve YDA yaklaşımları atık yönetiminin çevresel, ekonomik ve sosyal fayda çerçevesinde planlanmasını sağlar. İçerdiği atık türlerine göre yönetilmesi gereken kentsel katı atıkların büyük bir yüzdesini biyoatıklar oluşturmaktadır <sup>[1]</sup>.

Biyoatıklar iyi yönetilmezse kontrolsüz biyolojik parçalanma sonucunda, küresel ısınmaya neden olan metan ve karbondioksit gazlarının oluşumuna neden olur <sup>[10]</sup>. Son yıllarda, sürdürülebilir atık yönetim yaklaşımları, atıkların ekonomik ve çevresel madde döngüsünün tamamlanmasını sağlayacak şekilde uygun süreçlerde hammadde olarak kullanılmasını öngörmektedir. Doğal kaynakların korunmasını, atık materyalin çevresel etkisinin en aza indirgenmesini ve maksimum sosyo-ekonomik fayda sağlanmasını içeren sürdürülebilir biyoatık yönetim planlamasında YDA ve DE yaklaşımları esas alınır.

DE kavramı; mevcut doğrusal "al-yap-at" ekonomisini, döngüsel bir ekonomiye dönüştürerek madde döngülerini daraltmayı, yavaşlatmayı ve kapatmayı hedefler <sup>[11]</sup>. Böylece, ekonomik büyümedeki doğal kaynak kullanımı da indirgenebilir <sup>[12-14]</sup>. Biyoatıkların dönüşüm proseslerinde hammadde olarak kullanılması da bu kapsamda değerlendirilebilir <sup>[10]</sup>. Biyoatıkların proseslenmesi ile elde edilen ürün veya enerjinin kullanılması ekonomik faydanın yanı sıra, doğal kaynakların korunması, karbon ayak izinin azaltılması, atıkların çevresel etkilerinin minimize edilerek madde döngüsünün doğaya geri dönüşle tamamlanmasını sağlar. Biyoatık yönetim süreçlerinin ekonomik sürdürülebilirliği döngüsel ekonomi ile değerlendirilirken, sosyal ve çevresel sürdürülebilirliği ise YDA ile ortaya konulabilir <sup>[15]</sup>.

Biyobozunurluk özelliği, biyolojik döngünün kapatılmasında önemli bir avantajdır, çünkü biyolojik olarak parçalanabilen malzemeler, örneğin biyoatıklar, ekosistemi tehdit etmeden (plastik veya elektronik atık gibi diğer atık malzeme türlerinin aksine) doğaya iade edilebilir <sup>[12,16]</sup>. Anaerobik bozundurma (AD) ve kompostlama, biyoatıktan yenilenebilir enerji ve biyogübre geri kazanımı için uygun biyolojik süreçler olarak kabul edilmektedir <sup>[17,18]</sup>.

Son yıllarda yaşanan küresel sağlık sorunları ve çatışmalar ülkelerin hammadde ve enerji kaynaklarının güvenliğine verdiği önemi artırmıştır. Enerji ve gaz kıtlığı yaşanan zamanlarda yenilenebilir ve bağımsız bir enerji kaynağı olarak bölgesel üretilen biyogaz hayati önemi taşır <sup>[11]</sup>. Özellikle yakıt ve gübre temininde ortaya çıkan nakliye sıkıntıları ve ekonomik zorluklar ülkeleri alternatif çözümler aramaya yöneltmiştir <sup>[15]</sup>. Biyoatıklar bu amaca hizmet edebilecek önemli bir kaynak olarak dikkat çekmektedir.

İdeal bir biyoatık yönetiminde, ayrı toplama faaliyeti gerçekleştirildikten sonra atık, dönüşüm prosesinde işlem görmelidir. Dönüşüm prosesi, yerel imkân ve ihtiyaçlar, çevresel etki hedefleri dikkate alınarak seçilir. Dönüşüm prosesinin sürdürülebilir olması hammaddenin özellikleri ve ürünün kalitesi kadar, elde edilen ürünün pazarlanabilmesine de bağlıdır.

Kentsel biyoatıkların yönetiminden beklenen faydanın sağlanması, sürdürülebilir olmasına bağlıdır. Aksi halde boşa giden yatırımlar veya pazarlanamayan ürünün bertaraf zorlukları ile karşı karşıya kalınabilir. Bu nedenle, kentsel biyoatıkların dönüşümü için önerilen proseslerin (AD ve kompostlama) ekonomik ve çevresel değerlendirilmesini içeren bilimsel çalışmalar yapılması, uygulamaların başarısını artırmak için önemlidir. Bu çalışma kapsamında, döngüsel ekonomi ve yaşam döngüsü analizi kavramları tanımlanarak, biyoatık yönetiminde kullanılan dönüşüm proseslerinin ekonomik ve çevresel etki performansı ve uygulanabilirliği önceki çalışmalara göre ortaya konmuştur. Böylece, sürdürülebilir biyoatık yönetim süreçlerini bütünsel olarak değerlendirmeye ve yorumlamaya yardımcı olacak kapsamlı bir bilgi birikimi sağlanması amaçlanmıştır.

## YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ

ISO 14040 ve ISO 14044'de yer alan tanıma göre YDA; bir ürünü, faaliyeti veya hizmeti, ham maddelerin elde edilmesinden işleme, üretim, dağıtım, kullanım, olası yeniden kullanım/geri dönüşüm ve nihai atık yönetimine kadar yaşam döngüsünün tüm aşamalarında çevresel yük açısından değerlendirmek için kullanılan araçtır <sup>[19,20]</sup>. Çevresel yük; doğal kaynakların tükenmesi, enerji kullanımı, hava emisyonları, toprağa ve suya verilen kirlilikler gibi çevre üzerindeki her türlü etkiyi ifade eder. Hedef ve kapsamın belirlenmesi, envanter analizi, etki değerlendirmesi ve yorum aşamalarından oluşan YDA yöntemi <sup>[19,21]</sup> sayesinde bir faaliyetin çevresel etki kategorilerindeki potansiyeli hakkında nicel ve genel bilgi elde edilerek, sürdürülebilirliği ile ilgili bir yaklaşım yapılması mümkün olur <sup>[20,22]</sup>.

Bir ürün, faaliyet veya hizmetin çevresel değerlendirmesi birçok etki faktörünü içerdiğinden, yaşam döngüsü etkilerini modellemek için kolay ve anlaşılabilir araçlara ihtiyaç duyulur <sup>[23]</sup>. Bu amaçla belirli çevresel etki kategorilerini esas alan bilgisayar tabanlı YDA yazılımları geliştirilmiştir. Bu yazılımlarla değerlendirilecek etki kategorileri ürün veya faaliyetin türüne göre kullanıcı tarafından seçilebilir. Birçok araştırmacı tarafından alternatif atık yönetim sistemlerinin çevresel performansını değerlendirmek amacıyla yapılan çalışmalarda, farklı yazılımlar (Sigma Pro, OpenLCA, EASEWASTE gibi), veri kütüphaneleri (Ecoinvent, GaBi, ELCD gibi) ve etki kategorisi değerlendirme yöntemleri (IMPACTWORLD +, TRACI, ReCiPe gibi) kullanılmıştır <sup>[24-28]</sup>. Tablo 1'de ReCiPe2016 değerlendirme yönteminde yer alan etki kategorileri ve birimleri verilmiştir.

**Tablo 1.** ReCiPe2016+ değerlendirme metodunda yer alan etki kategorileri ve birimleri <sup>[29]</sup>.

Midpoint Etki kategorisi	Midpoint kategori indikatörü	Birim
İklim değişikliği	Küresel ısınma	kgCO <sub>2</sub> -eşd. (özellikle biyojenik karbon)
İnce partikül madde oluşumu	Partikül madde oluşum potansiyeli	kg PM <sub>2.5</sub> -eşd
Fosil tükenmesi/fosil kaynak kıtlığı	Fosil yakıt potansiyeli	kg yağ-eşd
Tatlısu tüketimi/su kullanımı	Su tüketim potansiyeli	m <sup>3</sup>
Tatlısu ekotoksitesitesi	Tatlısu ekotoksitesite potansiyeli	1.4 diklorobenzen (DB)-eşd.
Tatlısu ötrifikasyonu	Tatlı su ötrifikasyon potansiyeli	kg P-eşd.
İnsan toksisitesi,kanser	İnsan toksisite potansiyeli,kanser	1.4 DB-eşd.
İnsan toksisitesi,kanser olmayan	İnsan toksisite potansiyeli,kanser olmayan	1.4 DB-eşd.
İyonlaştırıcı radyasyon	İyonlaştırıcı radyasyon potansiyeli	kBq Co-60-eşd.
Alan kullanımı	Tarım arazisi işgal potansiyeli	m <sup>2</sup> xyıl yıllık ekilebilir arazi eşd.
Deniz ekotoksitesitesi	Deniz ekotoksitesite potansiyeli	1.4 DB-eşd.
Deniz ötrifikasyonu	Deniz ötrifikasyon potansiyeli	kg N-eşd.
Metal tükenmesi ve mineral kıtlığı	Fazla cevher potansiyeli	kg Cu eşd.
Fotokimyasal ozon oluşumu ekosistemler	Fotokimyasal ozon oluşum potansiyeli;ekosistemler	kg NOx-eşd.
Fotokimyasal ozon oluşumu;insan sağlığı	Fotokimyasal ozon oluşum potansiyeli;insan sağlığı	kg NOx-eşd.
Ozon tabakasının incelməsi	Ozon tabakasının incelməsi	kgCFC-11 eşd
Karasal ekotoksitesite	Karasal ekotoksitesite potansiyeli	kg 1.4-DB-eşd
Karasal asidifikasyon	Karasal asidifikasyon potansiyeli	kgSO <sub>2eq</sub>

YDA yazılımları ile etki değerlendirmesinin bir çok avantajı olmakla birlikte, elde edilen sonuçların doğruluğunu artırmak ve uzmanlar tarafından kullanımının tercih edilmesini sağlamak için aşağıda sıralanan eksikliklerin <sup>[30]</sup> giderilmesi önemlidir. Bu eksiklikler şu şekilde sıralanabilir;

- Yaşam döngüsü yaklaşımı kullanılmasının önemine dair farkındalık eksikliği
- Girdi verilerini elde etmenin zorluğu ve verilerin YDA programına doğru bir şekilde girilmesi ile ilgili bilgi eksikliği
- YDA etki değerlendirme yönteminin tam olarak anlaşılabilmesi
- Özel uygulamalar için uygun modelleme türünün belirlenmesindeki zorluklar
- Doğruluk derecesi yüksek ve özgün verilerin elde edilmesindeki belirsizlikler
- Elde edilen verilerin seçilen YDA modelinde nasıl kullanılacağı konusundaki bilgi eksikliği

- Sonuçların yorumlanmasındaki kavrayış eksikliği nedeniyle doğru yaklaşımlar yapılmasındaki zorluklar
- Ekonomik analiz yapılırken oldukça önemli farklılıklara yol açabilen, mevzuat değişiklikleri, araç depolama kapasiteleri ve öngörülemeyen pazarlar gibi değişken etkilerinin değerlendirilmesindeki belirsizlikler.
- Sosyal (rahatsızlık veya gürültü gibi) etkilerin değerlendirilememesi.

Bununla birlikte güncel Avrupa birliği politikaları, atık yönetim faaliyetlerinin planlanmasında YDA yaklaşımının kullanılması üzerinde önemle durmaktadır <sup>[23]</sup>. Böylece, atığın oluşumundan bertarafına kadar yaşam döngüsünün çevresel etki potansiyeli belirlenebilir <sup>[19]</sup>. Bu kapsamda, atıkları hammadde olarak kullanan dönüştürme teknolojilerinin uygulanması, atıkların çevresel etkilerini en aza indirmek, doğal döngüye dahil olmasını sağlamak ve aynı zamanda ekonomik fayda elde etmek amacıyla öncelik kazanmıştır. Atık yönetim alternatiflerinin YDA yöntemi ile çevresel etkileri karşılaştırılırken yerel şartlara uygun senaryo ve verilerin esas alınması önemlidir <sup>[19,21]</sup>. Analizi yapılan atık yönetim stratejisinin teknik, sosyo-ekonomik ve çevresel açıdan uygun tasarlanması ve uluslararası çevre mevzuatları ile uyumlu olması YDA sonuçlarının doğruluğunu artırır <sup>[31]</sup>. Bu durumda, YDA metodu kullanılarak yerel yönetimlere çevresel açıdan sürdürülebilir entegre atık yönetim çözümleri üretilebilir <sup>[32,28]</sup>. Sonuçta, depolamaya giden atık miktarı ve çevresel etkiler azaltılırken, atıktan ürün ve enerji kazanımını en üst düzeye çıkarılabilir.

### **Kentsel Biyoatıkların Yönetiminde Yaşam Döngüsü Analizi**

Son yıllarda birçok çalışmada YDA yazılımları kullanılarak biyoatık yönetim süreçlerinin çevresel etkileri ve madde döngüsü açısından durum tespiti yapılmış ve çevresel hassasiyetler çerçevesinde sürdürülebilir biyoatık yönetim stratejileri sunulmuştur <sup>[33,34]</sup>.

Biyoatık yönetiminin atık oluşumundan sonraki ilk adımı kaynağında ayırma işlemidir. Biyolojik dönüşüm proseslerinin enerji ve madde kazanım performansı, giriş hammaddesinin kalitesiyle değişir <sup>[35]</sup>. Biyoatıkların kaynağında ayrılması, sonraki prosesleme adımı için istenilen özellikte hammadde sağlayarak prostesten kaliteli ürün veya enerji kazanımını desteklerken, kaynak tüketimini ve emisyon oluşumunu engeller. Kaynağında ayırmanın YDA küresel ısınma ve kaynak koruma etki kategorilerinde çevresel faydayı destekleyen katkı oluşturduğunu göstermiştir <sup>[25]</sup>. Ayrı toplanılan biyoatıklar için çoğunlukla kompostlama veya anaerobik bozundurma prosesleri dikkate alınır. Kompostlama, merkezi ve evde kompostlama olarak iki şekilde yapılabilir.

Evde kompost üretildiği yerde kullanıldığında, toplama ve taşıma ihtiyacı olmayacağından küresel ısınmaya katkısı çok düşüktür <sup>[34,36]</sup>. Bu yüzden, evde kompostlama teşvik edilerek, atık taşıma sırasında oluşan emisyon etkisinin hafifletilmesi önerilmiştir <sup>[36]</sup>. Pinto-Diaz ve diğ. (2018) tarafından yapılan çalışmaya göre; elde edilen kompostun gübre yerine kullanılması, ötrifikasyon ve küresel ısınma gibi çevresel etki kategorileri üzerinde net bir pozitif etkiye sahiptir. Evde kompostun metal içerme ihtimalinin yasal sınırların çok altında olması, toprak kirlenme veya insan toksisite potansiyelini de risk sınırının altında tutar. Evde kompost uygulaması kentsel biyoatıkların yaşam döngüsünün kapanması için iyi bir alternatif olarak değerlendirilebilir <sup>[33]</sup>. Evde kompost uygulamasının en önemli çevresel risk faktörleri; kompost kutularının üretimi ve temini sırasında ortaya çıkan çevresel etki ve kompost kutularının optimum işletim koşullarında çalıştırılmaması durumunda meydana gelen kısmi anaerobik bozunma sonucu oluşması muhtemel sera gazı emisyonudur. Evde kompost uygulaması çevresel açıdan avantajlı gibi görünse de elde edilen ürünün kalitesi veya kullanımı yeterli olmadığında kalan malzemenin transferi ek maliyet ve çevresel sorunlar ortaya çıkarabilir. Bu belirsizlik, evde kompostlama sürecinin YDA performansını olumsuz yönde etkileyebilir <sup>[34]</sup>.

Merkezi kompostlamanın yaşam döngüsü analizine göre, oluşan sera gazı emisyonunun %45'i proses için enerji tüketiminden kaynaklanmaktadır. Sonrasında ise toplama ve taşıma faaliyeti gelmektedir. Küçük bir yerleşim yeri için yapılan YDA'de merkezi kompostlamanın insan toksisite potansiyeline sahip fosil yakıt kaynakları tüketim etkisinin, evde kompostlama uygulamasından dört kat fazla olduğu tespit edilmiştir <sup>[34]</sup>. Bununla birlikte, merkezi kompostlama uygulama belirsizliklerine daha az duyarlı olduğundan tutarlılığı daha yüksektir. Evde kompostun ise uygulama zorluklarına rağmen avantajları vazgeçilemeyecek kadar dikkat çekicidir. Bu nedenle, özellikle müstakil veya yerleşim yerinden uzakta kalan evlerin bir kompost kutusu kullanması teşvik edilmelidir.

Kompostlama prosesinin, AD prosesi ile karşılaştırıldığı bir YDA çalışmasında, amonyak emisyonu, partikül madde oluşumu ve karasal asitlenme kategorilerinde etki faktörünün AD prosesine

göre daha yüksek olduğu belirtilmektedir. Bunun nedeni, atık içindeki azotun büyük bir kısmının kompostlaştırma işlemi sırasında amonyağa dönüşmesi olarak açıklanmıştır. Bununla birlikte, karbon/azot oranı 20/40 olması sağlandığında kompostlama prosesi hızlı bir şekilde gerçekleşir, böylece zararlı emisyon ve koku problemi azaltılabilir <sup>[36]</sup>.

Bir YDA çalışmasına göre, biyoatık yönetiminde AD prosesi kullanıldığında ihtiyaç duyulan enerji proses içinde üretilen metan gazı ile sağlanacağından, fosil yakıtların kullanıldığı bir dış güç kaynağına ihtiyaç duyulmaz, böylece yenilenemeyen enerji kaynaklarının korunması sağlanır <sup>[28]</sup>. Biyogaz üretimini içeren bir atık yönetim senaryosu oluşabilecek emisyonlar açısından en iyi seçenek olabilir <sup>[37]</sup>. YDA sonuçları, biyoatıkların depolanmasının, atıkların taşınmasında kullanılan yakıt nedeniyle oluşabilecek kaynak tüketimi ve küresel ısınma riski nedeniyle yüksek çevresel etki potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir <sup>[28,37]</sup>.

En iyi atık yönetim senaryosunun seçiminde, YDA ile belirlenen çevresel etki faktörlerinin sonuçları önemli olmakla birlikte, özellikle gelişmekte olan ülkelerde halkın iklim değişikliği konusundaki hassasiyet eksikliği ve/veya idari yönetim tarafından atık yönetimine ayrılacak ekonomik fon eksikliği seçilen atık yönetiminin sürdürülebilir olmasında oldukça etkilidir. Bu nedenle kentsel atıkların yönetiminde farklı senaryolar için yapılan YDA çalışmalarında, çevresel etki değerlendirmesinde en verimli senaryo değil, ülke şartlarında en uygulanabilir kombinasyon seçilmelidir. Bir atık yönetim senaryosunun başarısı çevresel sürdürülebilirliğinin yanı sıra, ekonomik olarak uygulanabilir ve sosyal olarak kabul edilebilir olmasına bağlıdır <sup>[38]</sup>. Halihazırda kullanılan YDA araçları genellikle faaliyetlerin çevresel etkisi üzerinde yoğunlaştığından, yapılan çalışmaların önerdiği uygulamalar sosyal ve ekonomik sürdürülebilirlik sağlamayabilir <sup>[39]</sup>.

## KENTSEL BİYOATIKLARIN YÖNETİMİNDE EKONOMİK GÖSTERGELER

### Fayda/Maliyet Analizi

Son yıllarda, biyoatıkların olası çevresel etkileri ve ekonomik potansiyeli nedeniyle yönetim sürecinin planlanması ve yürütülmesi üzerinde önemle durulmaktadır. Bir biyoatık yönetim sürecinden beklenen fayda, ancak ekonomik olarak sürdürülebilir olmasıyla sağlanabilir. Bu nedenle, biyoatık yönetim alternatiflerinin fayda/maliyet analizi (FMA) detaylı bir şekilde yapılmalıdır. FMA'nin sınırları; atığın toplanması, toplanılan atığın proseslenmesi, oluşan ürünlerin pazarlanması, olası yan ürünlerin veya atıkların çevresel politikalar dikkate alınarak yönetilmesini kapsamalıdır. Böylece, yönetim adımlarının, yönetimin bütünü içindeki fayda/maliyet katkısı belirlenebilir.

Bir biyoatık yönetiminin sürdürülebilirliği yerel yönetim ve bölgede yaşayanlar tarafından sosyo-ekonomik olarak desteklenmesine bağlıdır. Bu nedenle biyoatık yönetimi planlanırken, yerel şartlara uygun alternatif atık yönetim senaryoları hazırlanarak FMA yapılır. Kentsel biyoatık yönetiminin planlamasında dikkate alınan FMA faktörleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir <sup>[40]</sup>;

#### Maliyetler

- 2- Finansal veriler; faiz oranı, enflasyon oranı
- 3- Altyapı maliyetleri; yer temini, inşaat maliyeti, kanalizasyon ve su temini yapıları vb
- 4- Ekipman maliyeti; sistemin çalışması için gerekli tüm ekipmanların temin maliyetleri
- 5- İşletme ve Bakım maliyeti; Ekipmanların periyodik bakımları, personel giderleri, elektrik-su, yakıt bedeli, hizmet alımı vb.

#### Fayda

- 1- Ürün satışından elde edilen gelir
- 2- Ulusal ve uluslararası organizasyon teşvikleri
- 3- Faaliyetin özelliğine bağlı olarak sağlanan indirimler (yönetimin politikalarına göre teşvik edilen bir faaliyet yapılırken vergi indirimi, elektrik-su bedeli indirimi vb)

Kentsel biyoatık yönetiminde, her bir adım için farklı fayda ve maliyetler sözkonusudur. Biyoatıkların yerinde ayrılarak toplanması, sürdürülebilir biyoatık yönetiminin ilk adımı ve ön şartıdır. Bu adım, halkın eğitim giderleri, konteynır ve toplama aracı temini, yakıt ihtiyacı, işçi maaşları gibi maliyetleri içermektedir. Biyoatıkların taşınması ve toplanması; yerinde bozunma, koku ve sızıntı problemleri oluşturmayacak sıklıkta planlanır. Diğer yandan oluşan biyoatıklar, atık üreticisi tarafından yerinde prosesleme alternatiflerin biri kullanılarak değerlendiriliyorsa toplama ve taşıma maliyeti sıfırlanır.

Kentsel biyoatığın ayrılması, toplanması, proseslenmesi ile ilgili ekonomik yükü en aza indirgeyen çözüm önerisi, atığın olduğu yerde proseslenmesi ve oluşan ürünün kullanılmasıdır. Ancak, yerinde geri dönüşüm sistemleri uygulamaya geçirilmeden önce, sosyal ve ekonomik uygulanabilirliği üzerinde detaylı bir çalışma yapılmalıdır. Biyoatıkların tamamının yerinde dönüşüm sistemleri ile yönetilmesi pratikte mümkün değildir. Bununla birlikte, özellikle taşıma ve toplamanın maliyetli olduğu mesafelerde uygulanabilirse biyoatık yönetimine önemli ekonomik katkı yapılabilir.

Biyoatığın proseslenmesinden elde edilen ürünler, yönetim süreci için en önemli gelir kaynağıdır. Bu yüzden uygun standartlarda, pazar değeri yüksek ürün elde edilmelidir. Dönüştürme proseslerinin işleyişi sırasında oluşan bazı yan ürünlerin yasal mevzuata uygun olarak yönetilmesi ise önemli bir maliyet oluşturabilir <sup>[41]</sup>.

Bir faaliyetin yaşam döngüsü maliyet (LCC) analizini yapmak için literatürde 15-20 yıllık bir işletim süresinin tercih edilmesi önerilmektedir <sup>[41,42]</sup>. Yaşam döngüsü maliyet analizi, tüm proje süresini kapsayan (şimdiki ve gelecekteki) maliyetlerin belirlenmesini içerir. Gelecekteki maliyetlerin en az hata ile belirlenebilmesi için, çalışmanın yapıldığı ülkenin ekonomik projeksiyonu dikkate alınarak, para değerinde gerçekleşebilecek değişimler için ön görülebilen dönüşümler de yapılmalıdır.

Kentsel biyoatıkların ayırma/toplama faaliyetinden bertarafına kadar tüm adımlarının merkezi yönetim tarafından yapıldığı bir sistem ile yerinde geri dönüşüm yapılan bir sistemin yaşam döngüsü maliyet analizinin (LCCA) karşılaştırıldığı bir çalışmanın sonuçlarına göre; yerinde geri dönüşüm sistemi ile merkezi sistemin maliyeti altı yıl içerisinde ekonomik olarak eşitlenebileceği, sistemin 20 yıl boyunca sürekliliği sağlandığında maliyetlerin yaklaşık 407.911 \$ azalacağı tahmin edilmiştir. Çalışmanın sonucunda, apartman sitelerinde oluşan gıda atıklarının yerinde geri dönüşüm sistemi ile yönetilmesinin, hem yerel yönetimler, hem de bölge sakinleri açısından daha ekonomik olduğu, hatta konut sakinlerinin geri dönüşüm yan ürünlerinden ilave bir fayda sağlayabileceği öngörülmüştür <sup>[40]</sup>.

Biyoatıkların yönetiminde kompost prosesinin tesisinin finansal sürdürülebilirliği gelirlerin giderleri karşılaması ile mümkündür. Tesisin gelirleri, prosesleme yöntemi ve teknolojisi, tesis kapasitesi, ürün kalitesi, pazarlama stratejileri, ekonomik teşvik ve destekler gibi tesisle ilgili birçok faktörden etkilenir. Kompostlama prosesi için fayda-maliyet analizi yapılırken öncelikle, ilk yatırım maliyetleri (ör. arazi edinimi, binalar, makineler), işletme ve bakım maliyetleri (ör. kamu hizmetleri, insan gücü, yakıt maliyeti) ve yasal olarak elde edilebilecek katkı (ör. Çevresel teşvikler, atık kabul katkıları, pazar desteği vb) ile ilgili veriler kapsamlı olarak toplanır. Kompostlama tesisi maliyet/fayda analizi için gerekli veri ihtiyacı Avrupa Birliği'nde (AB) belediye atık yönetim maliyetleri tarafından önerilen envanter veri listelerinden de belirlenebilir <sup>[43]</sup>.

Küçük, orta ve büyük ölçekli kompostlama tesislerinin fayda-maliyet analizi ile sürdürülebilirliğinin araştırıldığı bir çalışmanın sonuçlarına göre <sup>[44]</sup>; küçük ölçekli kompostlama tesisleri BM iklim değişikliği çerçeve sözleşmesi (UNFCCC) tarafından belirlenen sera gazı azaltma potansiyelini karşılayamadığından çevresel teşvik ödemesi alamaz. Bu yüzden önemli bir teşvik geliri ulaşamamış olur. Ulusal karbon kredileri ve atık kabul bedeli gibi mali girdiler önemli olmakla birlikte, bir kompost tesisinin ana gelir kaynağı kompostlama sonucu elde edilen kompost ürününün satılması ile elde edilen gelir olmalıdır. Kompost gübresinin ilgili pazarda satışı, ürün kalitesi ve fiyatının tutarlı olması ile sağlanabilir. Atık girişi ve ürün kalitesinin kolaylıkla kontrol edilebildiği orta ve büyüğe yakın ölçekli tesislerin FMA sonucu finansal olarak sürdürülebilirliğinin küçük ölçekli tesislere oranla daha yüksek olduğu belirlenmiştir <sup>[44]</sup>.

Biyoatıktan yüksek enerjili biyogaz elde etmek için depolama gazı toplama veya anaerobik bozundurma teknolojileri kullanılabilir. İki alternatif yöntemin, enerji üretim maliyeti, net mevcut değer, geri dönüşüm ve geri ödeme oranları kullanılarak ekonomik sürdürülebilirliğinin değerlendirildiği bir çalışmada <sup>[45]</sup> her iki teknolojinin de pozitif net değere sahip ve ekonomik olarak sürdürülebilir nitelikte olduğu belirlenmiştir. Yapılan ekonomik analiz sonucuna göre AD kullanılarak enerji üretiminin net pozitif değeri (834,12 M\$), depolama alanlarından enerji üretiminin (439,26 M\$) yaklaşık iki katıdır. Elektrik üretim maliyeti ise AD için 0,681-0,0306 \$/KWh, depolama için ise 0,2411-0,0350 \$/KWh olarak belirlenmiştir <sup>[45]</sup>. AD enerji üretiminin net pozitif değerinin yüksek olması ekonomik açıdan tercih edilebilirliğini artırabilir.

Gıda ve biyobozunabilir atıkların yönetim alternatiflerinden kompostlama ve AD'nin fayda/maliyet analizi, bir karar verme yöntemi olan Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ile karşılaştırılmış ve kompostlama içeren alternatifin maliyet oranı düşük, AD içeren alternatifin ise fayda oranı yüksek

bulunmuştur. Bu nedenle biyoatıkların yönetiminde iyi bir planlama ile her iki yönetime de yer verilmesi önerilmiştir <sup>[46]</sup>.

## ATIK YÖNETİMİNDE DÖNGÜSEL EKONOMİ

Döngüsel ekonomi, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmak için mevcut kaynakların ekonomik en yüksek verimle döngüsel olarak kullanımını önermektedir. Bu yaklaşım, alışılmış doğrusal “al-yap-at” modeli yerine sistemdeki materyalin, atık oluşumunu azaltacak, kaynak kullanımını minimize edecek ve ekonomik fayda sağlayacak bir döngü içerisinde sürekli pozitif değerle kullanımını destekleyen yenileyici bir modeldir. Lineer modelden döngüsel modele geçişte anahtar role sahip olan atık yönetiminin, biyoatıkların ürün elde etmek için dönüştürülmesini ve teknolojik malzemelerin geri kazanılmasını içeren bir stratejisi içermesi hayati önem taşımaktadır <sup>[47]</sup>. Bununla birlikte, DE modelini destekleyen atık yönetimi uygulamalarının oluşturulmasında etkili olan, atık yeniden kullanımını teknolojileri halen net olarak tanımlanamamıştır <sup>[48]</sup>. Ayrıca, ekonomik, sosyo-kültürel ve kurumsal faktörler de atık yönetiminde DE stratejilerinin geliştirilmesini zorlaştırmaktadır <sup>[49]</sup>.

Avrupa 2020 stratejisi kapsamında yer alan kaynak verimliliği, akıllı, sürdürülebilir ve kapsayıcı büyüme hedefi için DE modeline geçiş vazgeçilmez bir unsurdur <sup>[47]</sup>. Avrupa komisyonu üye ülkelere önemli ekonomik fayda getiren ve kaynak verimliliği geliştiren DE sistemlerinin uygulanmasını içeren aktiviteleri maddi olarak da desteklemektedir <sup>[50]</sup>. Atık yönetim faaliyetleri de döngüsel ekonomi yaklaşımı ile planlanması gereken aktiviteler arasındadır. Döngüsel ekonomi yaklaşımını benimseyen kentsel atık yönetiminde, atığın içerdiği tüm bileşenlere yaşam döngüsü analizine göre çevresel etkisi en düşük yönetim süreci uygulanarak, en fazla ekonomik fayda sağlanması amaçlanır. Tercih edilen yönetim süreci aynı mantık çerçevesinde sürekli izlenmeli ve geliştirilmelidir. DE yaklaşımına göre planlanan atık yönetim faaliyetinin uygulanabilmesi için, yerel yönetim ve halk sorumlu oldukları eylemler konusunda eğitilmeli, ikna ve teşvik edilmelidir. Ayrıca, bu tür aktiviteler ulusal ve uluslararası fonlardan alınacak teşviklerle de desteklenmelidir.

Ulusal ölçekli döngüsel ekonomi hedeflerine ulaşılmasında, kentsel atık yönetim sürecinin başarısı kilit rol oynar. Son yıllarda Avrupa birliği, komisyon ve çerçeve programları kapsamında kentsel atıkların döngüsel ekonomi yaklaşımlarına uygun yönetilmesi ile ilgili dökümanlar yayımlayarak uygulama hakkında bilgilendirme yapmakta ve önerilerde bulunmaktadır <sup>[50]</sup>.

- Avrupa sıfır atık programına göre; kentsel atıklardaki plastiklerin yeniden kullanımı ve geri dönüşümünü artırarak düzenli depolamaya gitmesini engellemek, metal, cam, kâğıt, karton ve biyolojik olarak parçalanabilen atıklar ile ilgili tüketici davranışını istenilen şekilde değiştirmek, yüksek kaliteli ikincil hammaddeler ve geri dönüştürülmüş malzemeler için pazarların gelişimini desteklemek ve tüm faaliyetlerin döngüsel ekonomiye dönüşümünü sağlamak için hesaplama yöntemini netleştirmek üzere harekete geçilmelidir <sup>[51]</sup>. AB döngüsel ekonomi eylem planında, kentsel atıkların döngüsel ekonomi yaklaşımıyla yönetilmesi ve döngünün kapatılması ile ilgili bir eylem planı da yer almaktadır <sup>[52]</sup>.
- Döngüsel ekonomi izleme çerçevesi planında sunulan, ürün ve faaliyetlerin yaşam döngüsünün her aşamasını ve rekabet gücünü tanımlayan 10 DE göstergesinden biri de kentsel atıkların döngüsel ekonomi yaklaşımı ile ilgilidir. Bu kapsamda biyoatıklar için “gıda atığı üretimi” ve “dönüştürülen biyoatık” olmak üzere iki farklı DE indikatörü tanımlanmıştır. Birinci tanım; “Gıdaların üretimi, dağıtımı ve tüketimi sırasında oluşan atık miktarı”, diğeri ise “kompostlanmış veya metanize edilmiş belediye atığının toplam nüfusa oranı” olarak ifade edilmiştir <sup>[53]</sup>.
- Daha temiz ve rekabetçi bir Avrupa için yeni bir döngüsel ekonomi eylem planı <sup>[54]</sup>; Bu plan dâhilinde Avrupa birliği içerisindeki tüm uluslararası ve ulusal çabalara rağmen atık azaltma hedeflerine ulaşılamadığına dikkat çekilmekte ve sürdürülebilir atık yönetimine odaklanılması gerektiği vurgulanmaktadır <sup>[50]</sup>.

Avrupa komisyonu, üye ülkelerin döngüsel ekonomi uygulama planlarını (yol haritası) ulusal seviyede yapmalarını önerir. Döngüsel ekonomi politikalarına uygun atık yönetim planlaması yapılırken ülkenin sosyo-ekonomik durumu, halkın farkındalığı, davranış alışkanlıkları ve eğilimleri dikkate alınmalıdır.

Avrupa komisyonu, üye ülkelerden belirlenen DE indikatörlerini dikkate alan atık yönetim yol haritası planlamasını ve bunu uluslararası platformda paylaşmasını ister. Bu yol haritası yasaların değiştirilmesi, atık yönetim sisteminin geliştirilmesi, yiyecek atıklarının önlenmesi ve bölge sakinlerinin döngüsel ekonomi uygulamalarının önemi ve benimsenmesi hakkında eğitilmesini içerebilir.

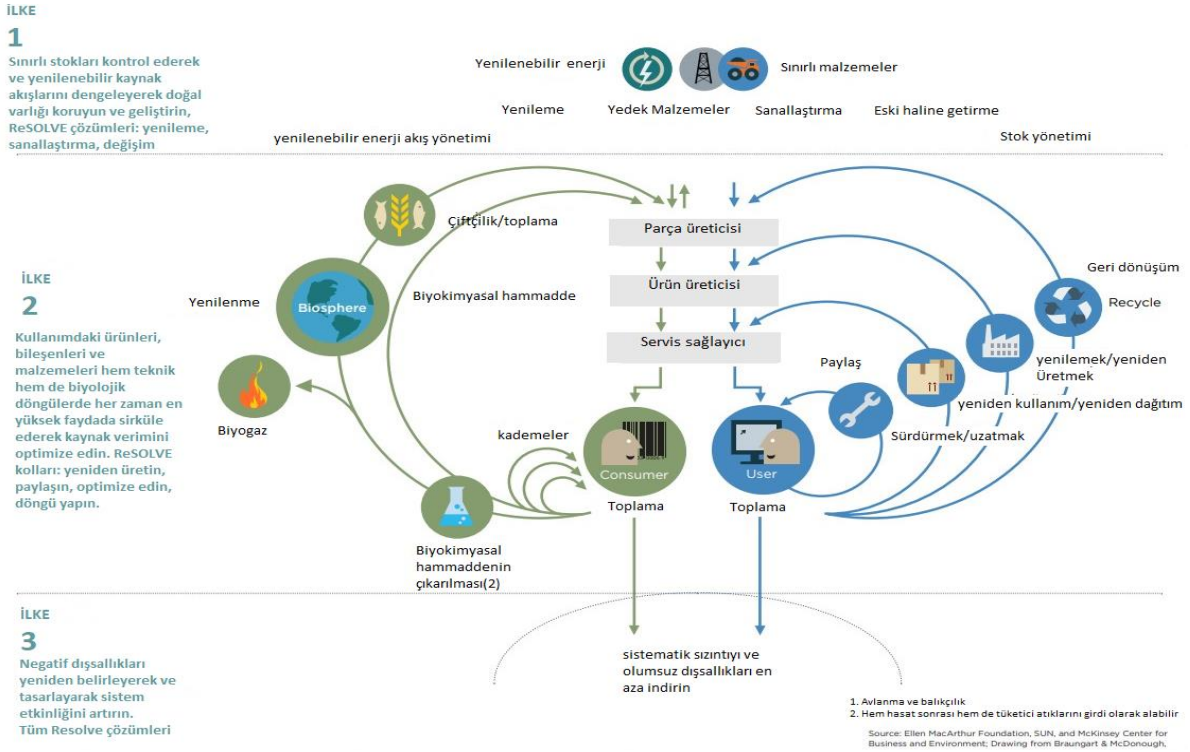
Diğer üye ülkeler için rehber olması açısından Almanya, Finlandiya ve Polonya gibi atık yönetiminde DE planlarını geliştiren ve uyarlayan ülkelerin planları Avrupa döngüsel ekonomi paydaşları platformunun web sitesinde bulunmakta ve kullanılabilir [55]. Ulusal ekonomilerde DE varsayımlarının gerçekleşmesi, atık yönetim sistemlerini de tanımlayan bir model yaklaşımı ile mümkün olabilir [50].

Avrupa üye ülkeleri, DE yol haritasını planlarken genellikle The Ellen MacArthur Vakfı [56] tarafından geliştirilen ve 6 başlık (Yeniden Oluştur, Paylaş, Optimize Et, Döngüye Al, Sanallaştır ve Değiştir) altında çözüm önerileri içeren DE çerçevesini dikkate alır [50]. Bu öneriler atıklarla ilgili giderek daha kısıtlayıcı yasal mevzuatın uygulanmasını, atık üretimini azaltılmayı ve atıklardan değerli hammaddelerin mümkün olduğunca kazanılmasını, atıkların hem şimdiki ve gelecek nesillere, hem de çevreye olabilecek zararlı etkilerinin azaltılması amaçlar [51]. ReSOLVE (Regenerate, Share, Optimize, Loop, Virtualize, and Exchange) olarak isimlendirilen bu taslak; birincisi yenilenebilir ham materyallere vurgu yapan biyolojik, diğeri ise yenilenemeyen hammaddeye odaklanan teknik iki döngünün varlığını esas alarak geliştirilmiştir (Tablo 2.). Her iki döngünün esas prensibi; ilgili bileşen, materyal ve ürünlerin daima en faydalı olacak şekilde sirküle edilerek kaynak verimliliğinin optimize edilmesidir (Şekil 1.).

Tablo 2. ReSOLVE çerçevesini esas alan belediye atık yönetimi için önerilen DE aktiviteleri [56]

No	DE alanı	Tanım	Örnekler
1	Yeniden oluştur	Enerji,ısı veya proses buharı kazanımı	Kentsel atıkların enerji geri kazanımı ile termal dönüşümüne yönelik tesisler
		Ekosistemlerin geri kazanılması, muhafaza edilmesi ve restorasyonu	Atık depolama alanlarının iyileştirilmesi
		Geri kazanılan biyolojik kaynakların biyosferde tutulması	Gübreleme amacıyla seçilen belediye atık fraksiyonunun (örneğin kentsel yeşilliklerden) kullanılması
2	Paylaş	Ürünleri ortak kullanıcılarla paylaşmak	Dairelerde veya evlerdeki ortak alanların ortak barınma paylaşımı Kıyafet paylaşımı örneğin tişört, kot pantolon vb. kıyafetlerin kiralanması veya paylaşılması.
		Ürün döngü hızını düşük tutarak ürünlerin yeniden kullanılması ve ürünlerden maksimum düzeyde faydalanılması	Ücretsiz bağış veya başka bir ürün/hizmetle takas (kıyafet takası, oyuncak takası) kullanılmış malların ve ikinci el ürünlerin satışı/yeniden satışı
3	Optimize Et	Ürün/teknoloji performansının ve verimliliğinin artırılması	Atık geri kazanım ve bertaraf süreçlerinde mümkün olan en optimum çözümlerin uygulanması
		Atıkların uzaklaştırılması	Tüm atık akışlarının kapsamlı yönetimi
4	Döngüye Al	Bileşenleri ve malzemeleri kapalı tutmak	Yeniden kullanım noktalarının oluşturulması onarım noktaları gıda bankaları oluşturmak Eko-tasarım
		Ürünleri veya bileşenleri yeniden üretmek ve son çare olarak malzemeleri geri dönüştürmek	Onarım noktaları Eko-tasarım
		Atık akışından ham materyallerin geri kazanımı ve geri dönüşümü	Geri dönüşüm/geri kazanım teknolojilerinin kolay uygulanması amacıyla biyolojik olarak parçalanabilen belediye atıkları da dâhil olmak üzere kaynağında seçici toplamanın verimliliğinin artırılması
5	Sanallaştır	Sanal yardımcı programların alınması ve kullanılması	Üretilen atık miktarını azaltmak için günlük yaşamda sanal çözümlerin tanıtılması (gazete, kitap, çalar saat, müzik, çevrimiçi alışveriş vb.)
6	Değiştir	Eski malzemelerin yeni gelişmiş malzemelerle değiştirilmesi	Ev aletlerinin ve eşyalarının (buzdolabı, bulaşık makinesi, dondurucu gibi) daha yüksek enerji sınıfına sahip ürünlerle değiştirilmesi





Şekil 1. Döngüsel ekonominin ana hatları [56]

### Kentsel Biyoatıkların Yönetimi ile İlgili Yapılan Döngüsel Ekonomi Çalışmaları

AD (biyogaz) teknolojisi, biyoatıktan yüksek enerji potansiyeline sahip biyogaz üretme yeteneği ile yenilenebilir enerji kaynağı olarak kabul edilen karbon nötr bir prostestir [27]. AD proses artığı olarak yüksek oranda su ve besi maddesi içeren bir materyal oluşur. Proseslenen hammaddenin doğasına ve prosesinin bozundurma (kararlı son ürünlerin oluşumu) yeteneğine göre bu materyalin katı kısmı toprak şartlandırıcı veya gübre olarak kullanılabilirken, sıvı kısmı da gübreleme sıvısı veya sıvı gübre olarak kullanım potansiyeline sahiptir [57]. AD prosesi ve ürünleri ile ilgili bu alternatif yaklaşımlar onu atık yönetim tercihlerinde üst sıralara taşımakta [58] ve döngüsel ekonominin uygulanması için iyi bir araç olduğunu düşündürmektedir [57,59].

AD prosesinin DE analizi yapılırken, proses yan ürününün araziye uygulanmasındaki kısıtlamalar veya atık olarak artılma ihtiyacı dikkate alınarak döngüsel ekonomi kavramı içerisinde çözümler üretilmelidir. Döngüsel ekonomi stratejisine göre hazırlanan AD proses yan ürünü yönetimi, besin değerinden maksimum faydalanmayı, ayrılan suyun yeniden kullanımını ve proste enerji dönüşüm veriminin artmasını sağlayarak [60], AD prosesinin evsel biyoatıkların yönetiminde kullanım potansiyelini artırabilir [61]. AD proses sonu ürün yönetiminde yeryüzüne dönüş alternatifleri (back to earth alternatives; BEA) kullanılması DE kapsamında tamamlayıcı bir yaklaşım olabilir [62]. BEA; atıkların uygun şekilde işlendikten sonra hammadde olarak kullanılmak üzere topraktan çıkarılmadan önceki mobil olmayan hallerine geri döndürülmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Bu durumda malzeme döngüleri istenilen etkinlikte kapatılabilir [63].

YDA ve DE doğrultusuna incelendiğinde, AD prosesiyle kentsel biyoatıktan enerji üretim sürecinin potansiyel performansı ile ilgili bazı sonuçlara varmak mümkündür. Proste üretilen biyogazın bir kısmı reaktörü ısıtmakta kullanıldığından, fosil yakıt kaynaklı elektrik ve ısı enerjisi tüketiminde tasarruf sağlanır, bu uygulama prosesin yaşam döngüsü değerlendirmesinde küresel ısınma potansiyeline etkisini azaltır. 30 000 ton/yıl kapasiteye sahip, 20 yıl ömür öngörülen bir AD prosesinin yaşam döngüsü maliyeti (life cycle cost; LCC) değerlendirmesinde 5 yıl amortisman süresi sonrasında bir çok işletim konfigürasyonlarında kârlı olduğu belirlenmiştir [64]. Yine de AD prosesinin yan ürünü olan atıksuyun DE'ye uygun yönetilmesi ile ilgili bilgi ve uygulama eksikliği önemli bir sorundur. Bununla birlikte, BEA ve döngüsel ekonomi konsepti dikkate alınarak, önerilen bazı yaklaşımlar da bulunmaktadır. Örneğin; AD prosesinin bir piroliz prosesi ile entegrasyonu ile bozundurma yan ürününün pirolizi sonucu enerji üretilmesiyle tüm materyallerden tam olarak faydalanabilir. Diğer bir seçenek ise sözkonusu yan ürünün tarım arazisinde kullanımının mümkün olmadığında, katı atık depolama

sahalarında örtü malzemesi içine karıştırılarak kullanımıdır. Ancak, bu durumda örtü malzemesine karıştırılan AD yan ürününün, katı atık depolama süreci (bozunma sonucu emisyon oluşumu veya sızıntı suyu kalitesi) üzerindeki olası etkisi henüz kesin olarak bilinmemektedir.

## **SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER**

Sürdürülebilir kentsel atık yönetimi, atıkların çevresel etki ve ekonomik fayda potansiyelinden dolayı, ulusal ve küresel boyutta stratejik öneme sahiptir. Atık yönetim süreçleri yaşam döngüsü ve döngüsel ekonomi yaklaşımlarına göre planlanarak uygulandığında, atığın çevresel etki potansiyeli azalır, mevcut ekonomik değerinden en üst düzeyde yararlanılır ve madde döngüsü dünyaya dönüş ile kapanabilir. Güngeçtikçe artan kentsel atıkların büyük bir kısmını biyobozunabilir atıklar oluşturmaktadır. Bu nedenle, sürdürülebilir biyoatık yönetimi entegre atık yönetiminin en önemli bileşenidir. İdeal bir biyoatık yönetiminde, atıklar kaynağında ayrı biriktirilerek toplanmalı ve en kısa sürede proseslenmelidir. Böylece, son yıllarda sıfır atık kavramı kapsamında da önerildiği gibi biyoatıklar depolama alanlarına gitmez, bu durumda depolama alanlarının kullanım ömrü uzar, ayrıca sızıntı suyu oluşumu ve kontrolsüz gaz çıkışı tehlikesi azalır. Ayrı toplanmış biyoatıklar, kompost tesislerinde gübre üretiminde veya anaerobik bozundurma proseslerinde metan üretiminde hammadde olarak kullanılabilir. Elde edilen ürünlerin satışından sağlanan gelir ise atık yönetiminin işletme giderleri için katkı sağlar. Ayrıca, bu ürünlerin gübre ve enerji pazarında yer alması, endüstriyel gübre üretimi veya fosil yakıt ile enerji üretimi süreçleride hammadde kullanımı ve emisyon oluşumunu indirger.

Biyoatık yönetim süreci; atığın toplanması, taşınması, proseslenmesi, ürünün kullanılması ve madde döngüsünün sonlanması içerir. Yönetim süreci, YDA ve DE yaklaşımları dikkate alınarak çevresel ve ekonomik açıdan değerlendirildiğinde, hem kompostlama, hem de AD dönüşüm prosesinin iyi bir planlama ile uygulanabilir olduğu sonucuna varılmıştır. YDA ve DE değerlendirme verilerinin gerçeği yansıtması için biyoatık yönetiminin, güncel sosyo-ekonomik, coğrafik ve yasal koşullara göre planlanması gerekir.

Önceki birçok çalışmaya göre, biyoatık yönetiminde kompostlama prosesinin kullanımı YDA yöntemi ile değerlendirildiğinde, yerinde kompostlama faaliyeti atığın madde döngüsü için en ideal alternative olarak dikkat çekmektedir. Merkezi kompostlama tesislerinin kullanımı ise doğal kaynakların tükenmesi, küresel ısınma potansiyeli, insan toksisite potansiyeli gibi çevresel etki kategorileri açısından depolamaya göre daha az etkiye sahiptir. Çevresel etkinin en fazla olduğu senaryo, kentsel biyoatıkların depolanması olarak belirtilmektedir. AD prosesi dikkate alındığında ise yenilenebilir enerji üretimi sözkonusu olduğundan, birçok çevresel etki kategorisinde olumlu veriler ortaya konmuştur.

Önerilen bir atık yönetim süreci, çevresel sürdürülebilirliğinin yanı sıra, ekonomik olarak uygulanabilir ve sosyal olarak kabul edilebilir olmalıdır. Finansal uygulanabilirlik, atığın oluşumundan, ürünün eldesi ve kullanılmasına kadar tüm faaliyetleri içeren fayda/maliyet analizi (FMA) ile değerlendirilebilir. Bazı çalışmalarda, atık girişi ve ürün kalitesinin kontrol edilebildiği orta ve büyüğe yakın ölçekli tesislerin FMA sonucunda finansal sürdürülebilirliğinin küçük ölçekli tesislere oranla daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, kompostlama ve AD prosesi karşılaştırıldığında, kompostlamanın maliyet oranı düşük, AD prosesinin ise fayda oranı yüksek bulunmuş ve biyoatıkların yönetiminde AD ve kompostlama prosesinin birlikte kullanılması önerilmiştir.

YDA ve DE yaklaşımlarını dikkate alan bir atık yönetim süreci, atığın yaşam döngüsünün kaynak tasarrufu ve çevre koruma bilincine uygun olarak kapatılabilmesini sağlayan, ekonomik bir yol haritası sunmalıdır. Avrupa birliği ülkeleri bu amaçla The Ellen MacArthur Vakfı tarafından önerilen ReSOLVE yaklaşımını benimsemektedir.

DE göstergelerine göre, biyoatık yönetiminde dönüşüm prosesi olarak AD kullanılmasını tavsiye eden çalışmalar bulunmaktadır. Ancak, AD prosesinin beklenen çevresel ve ekonomik faydayı sağlayabilmesi için, yüksek su ve besi maddesi içeren proses yan ürününün pirolizlenerek madde döngüsünün tamamlanması önemlidir.

Sonuç olarak, kentsel biyoatık yönetim planlaması YDA ve DE yaklaşımlarına göre yapıldığında doğal kaynaklar korunur ve çevresel emisyon etkisi azalır. İlave olarak, ekonomik değeri olan toprak iyileştirici bir ürün veya karbon nötr bir proseste enerji elde edilebilir. Ayrıca madde döngüsü en az çevresel etki ile kapatılır.

## **KAYNAKLAR**

- [1] Chen, D. M. C, Bodirsky, B. L., Krueger, T., Mishra, A. and Popp A., 2020, The World's Growing Municipal Solid Waste: Trends and Impacts, *Environ Chem Lett.* Vol. 15, 074021.
- [2] Zambrano-Monserrate, M. A, Ruano, M. A., Ormeno-Candelario, V., 2021, Determinants Of Municipal Solid Waste: A Global Analysis by Countries' Income Level, *Environ. Sci. Pollut. Res.* Vol. 28, 62421, 30.
- [3] Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., Van Woerden, F., 2018. What a Waste 2.0. A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050, Urban Development. © Washington, DC: World Bank. web sayfası: <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/d3f9d45e-115f-559b-b14f-28552410e90a>, erişim tarihi:27.06.2024
- [4] European Commission, A Sustainable Bioeconomy for Europe: Strengthening the Connection Between Economy, Society and the Environment: Updated Bioeconomy Strategy, 2018, web sayfası: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/edace3e3-e189-11e8-b690-01aa75ed71a1/>, erişim tarihi: 27.06.2024
- [5] European Commission, A European Green Deal, 2019, web sayfası: [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en), erişim tarihi: 27.06. 2024
- [6] European Commission, A New Circular Economy Action Plan, 2020, web sayfası: <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0098>, erişim tarihi: 27.06.2024.
- [7] European Parliament, Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on Waste and Repealing Certain Directives, Bruxelles, web sayfası: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32008L0098>, erişim tarihi: 27.06.2024.
- [8] United Nations, Sustainable Development Goals, 2015, web sayfası: <https://www.undp.org/sustainable-development-goals>, erişim tarihi: 27.06.2024.
- [9] Le Pera, A., Sellaro, M., Bencivenni, E., D'Amico, F., 2022, Environmental Sustainability of an Integrate Anaerobic Digestion-Composting Treatment of Food Waste: Analysis of an Italian Plant in the Circular Bioeconomy Strategy, *Waste Manag.*, Vol. 139, 341-351.
- [10] Saravanan, A., Karishma, S., Senthil, K. P., Gayathri, Rangasamy, 2023, A Review on Regeneration of Biowaste into Bio-Products and Bioenergy: Life Cycle Assessment and Circular Economy, *Fuel* Vol. 338, 127221.
- [11] Crome, C., Graf-Drasch, V., Hawlitschek, F., Zinsbacher, D., 2023, Circular Economy is Key! Designing a Digital Artifact to Foster Smarter Household Biowaste Sorting, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 423, 138613.
- [12] Bocken, N. M. P., Pauw, I., Bakker, C., Van der Grinten, B., 2016, Product Design and Business Model Strategies for a Circular Economy, *J. Ind. Product. Eng.*, Vol., 33 (5), 308-320.
- [13] Ghisellini, P., Cialani, C., Ulgiati, S., 2016, A Review on Circular Economy: The Expected Transition to a Balanced Interplay of Environmental and Economic Systems, *J. Clean. Prod.*, Vol. 114, 11-32.
- [14] Zeiss, R., Ixmeier, A., Recker, J., Kranz, J., 2021, Mobilising Information Systems Scholarship for a Circular Economy: Review, Synthesis, and Directions for Future Research, *Inf. Syst. J.*, Vol. 31 (1), 148-183.
- [15] Cucina, M., 2023, Integrating Anaerobic Digestion and Composting to Boost Energy and Metarial Recovery from Organic Wastes in the Circular Economy Framework in Europe: A Review, *Bioresource Technology Reports*, Vol. 24, 101642.
- [16] Geisendorf, S., Pietrulla, F., 2017, The Circular Economy and Circular Economic Concepts-A Literature Analysis and Redefinition, *Thunderbird Int. Bus. Rev.*, Vol. 60(5), 771-782.
- [17] Awasthi, M. K., Sarsaiya, S., Wainaina, S., Rajendran, K., et al., 2019, A Critical Review of Organic Manure Biorefinery Models Toward Sustainable Circular Bioeconomy: Technological Challenges, Advancements, Innovations, and Future Perspectives, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, Vol. 111, 115-131.
- [18] Singh, R., Paritosh, K., Pareek, N., Vivekanand, V., 2022, Integrated System of Anaerobic Digestion and Pyrolysis for Valorization of Agricultural and Food Waste towards Circular Bioeconomy: Review, *Bioresour. Technol.*, Vol.360, 127596.
- [19] Khandelwal, H., Thalla, A.K., Kumar, S., Kumar, R., 2019, Life Cycle Assessment of Municipal Solid Waste Management Options for India, *Bioresource Technology*, Vol. 288, 121515.

- [20]Rajaeifar, M.A., Tabatabaei, M., Ghanavati, H., Khoshnevisan, B., Rafiee, S., 2015, Comparative Life Cycle Assessment of Different Municipal Solid Waste Management Scenarios in Iran, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 51, 886-898.
- [21] Edwards, J., Othman, M., Crossin, E., Burn, S., 2018, Life Cycle Assessment to Compare the Environmental Impact of Seven Contemporary Food Waste Management Systems, *Bioresource Technology*, Vol. 248, Part A, 156-173.
- [22]Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Schmidt, W.T., Suh, S., Weidema, B.P. and Pennington, D.W., 2004, Life cycle assessment. Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis and applications. Elsevier, Science Direct, *Environment International* 30(5), pp. 701-720.
- [23]Bhander, G., Christensen, T.H., Hauschild, M. Z., 2010, EASEWASTE-Life Cycle Modeling Capabilities for Waste Management Technologies, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol.15 (4), 403-416.
- [24]Demichelis, F., Tommasi, T. Deorsola, F. A., Marchisio, D., Mancini, G. and Fino, D., 2022, Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing of Advanced Anaerobic Digestion of Organic Fraction Municipal Solid Waste, *Chemosphere*, Vol. 289, 133058.
- [25]Fernandez-Nava, Y., Río, Jd., Rodríguez-Iglesias J., Castrillon L., Maranon E., 2014, Life Cycle Assessment of Different Municipal Solid Waste Management Options: A Case Study of Asturias (Spain). *Journal of Cleaner Production*, Vol. 81, 178-189.
- [26]Yay, A. S. E., 2015, Application of Life Cycle Assessment (LCA) for Municipal Solid Waste Management: A Case Study of Sakarya, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 94, 284-293.
- [27]Wang, J., Okopi, S. I., Ma, H., Wang, M., Chen, R., Tian, W., Xu, F., 2021, Life Cycle Assessment of the Integration of Anaerobic Digestion and Pyrolysis for Treatment of Municipal Solid Waste, *Bioresource Technology*, Vol. 338, 125486.
- [28]Feo, G.D., Ferrara, C., Iuliano, C., Grosso, A., 2016, LCA of the Collection, Transportation, Treatment and Disposal of Source Separated Municipal Waste: A Southern Italy Case Study, *Sustainability*, Vol. 8, 1084.
- [29] Petri, E., Heigl, E. M., Fasolini, A., Zeilerbauer, L., Giovannucci, M., Küçükağa, Y., Torri, C., Basile, F., Soavi F., 2024, Conversion of biodigestate into activated carbon for electrochemical application: Process performance and life cycle assessment, *Carbon*, Vol.226,119221.
- [30] Emery A., Davies A., Griffith A., Williams K., 2007, Environmental and Economic Modelling: A Case Study of Municipal Solid Waste Management Scenarios in Wales, *Resources Conservation and Recycling*, Vol. 49, 244-263.
- [31]Laurent, A. Bakas, I. Clavreul, J. Bernstad, A. Niero, Gentil E., Hauschild, M. Z. and Christensen, T. H., 2014, Review of LCA studies of solid waste management systems—Part I: Lessons learned and perspectives. *Waste Manag*, 34, 573-588.
- [32]Blengini, G.A., Fantoni, M., Busto, M., Genon, G. and Zanetti, C., 2012, Participatory Approach, Acceptability and Transparency of Waste Management LCAs: Case Studies of Torino and Cuneo, *Waste Manag.*, Vol. 32, 1712-1721.
- [33]Pinto-Diaz, L., Gunkel-Grillon, P., Roth, E., 2018, Life Cycle Analysis for the Treatment of Organic Matter from Municipal Solid Waste: A Case Study of France, *Conference Paper in WIT Transactions on Ecology and the Environment*, Jun 2018, Naples, Italy.
- [34]Lu, H.R., Qu, X., Hanandeh, A.E., 2020, Towards a Better Environment-The Municipal Organic Waste Management in Brisbane: Environmental Life Cycle and Cost Perspective, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 258, 120756.
- [35]Montejo, C., Tonini, D., Márquez, M. D. C., & Astrup, T. F., 2013, Mechanical–Biological Treatment: Performance and Potentials. An LCA of 8 MBT Plants Including Waste Characterization, *Journal of Environmental Management*, Vol.128, 661-673.
- [36]Richard, E. N., Hilonga, A., Machunda, R.L. and Njau, K.N., 2021, Life Cycle Analysis of Potential Municipal Solid Wastes Management Scenarios in Tanzania: The Case of Arusha City, *Sustainable Environment Research*, Vol. 31(1) 2-13.
- [37]Cherubini, F., Bargigli, S., Ulgiati, S., 2009, Life Cycle Assessment (LCA) of Waste Management Strategies: Landfilling, Sorting Plant and Incineration, *Energy*, Vol. 34, 2116-2123.
- [38]Nilsson-Djerf, J., McDougall, F., 2000, Social Factors in Sustainable Waste Management, *Warmer Bull.*, Vol. 73, 18-20.

- [39] Morrissey, A. J., Browne, J., 2004, Waste Management Models and Their Application to Sustainable Waste Management, *Waste Manage.*, Vol. 24, 297-308.
- [40] Lee, K. H., Oh, J., Chu, K. H., Kwon, S. H. and Yoo, S. S., 2017, Comparison and Evaluation of Large-Scale and On-Site Recycling Systems for Food Waste via Life Cycle Cost Analysis, *Sustainability*, Vol. 9, 2186.
- [41] Nguyen, D.D., Yeop, J.S., Choi, J., Kim, S., Chang, S.W., Jeon, B.H., Guo, W. and Ngo, H.H., 2017, A New Approach for Concurrently Improving Performance of South Korean Food Waste Valorization and Renewable Energy Recovery Via Dry Anaerobic Digestion Under Mesophilic and Thermophilic Conditions, *Waste Manag.*, Vol. 66, 161-168.
- [42] Hogg D., 2002, Costs for municipal waste management in the EU, *Eunomia Research and Consulting*, European Commission, Brussels.
- [43] Haaren R., 2009, Large scale aerobic composting of source-separated organic wastes: a comparative study of environmental impacts, costs, and contextual effects. *Foundation of Engineering and Applied Science, Earth and Environmental Engineering*. Columbia University, New York.
- [44] Pandyaswargo, A.H., Gamaralalage, P.J.D., 2014, Financial Sustainability of Modern Composting: The Economically Optimal Scale for Municipal Waste Composting Plant in Developing Asia, *Int. J. Recycl. Waste Agricult.*, Vol. 3(66), 1-14.
- [45] Ayodele, T.R., Ogunjuyigbe, A.S.O., Alao, M.A., 2018, Economic and Environmental Assessment of Electricity Generation Using Biogas from Organic Fraction of Municipal Solid Waste for The City of Ibadan, *Nigeria Journal of Cleaner Production*, Vol. 203, 718-735.
- [46] Babalola, M.A., 2020, A Benefit–Cost Analysis of Food and Biodegradable Waste Treatment Alternatives: The Case of Oita City, *Japan, Sustainability*, Vol. 12, 1916.
- [47] Stahel W.R., 2016, The Circular Economy, *Nature*, Vol. 531, 435-438.
- [48] Zhang, A., Venkatesh, V., Liu, Y., Wan, M., Qu, T. and Huisingh, D., 2019. Barriers to Smart Waste Management for A Circular Economy in China, *J. Clean. Prod.*, Vol. 240, 118198.
- [49] Salmenperä, H., Pitkänen K., Kautto, P., Saikku, L., 2021, Critical Factors for Enhancing The Circular Economy in Waste Management, *J. Clean. Prod.*, Vol. 280, 124339.
- [50] European Commission. *Europe 2020-A Strategy for Smart, Sustainable and Inclusive Growth*; (COM no. 2020, 2010); Commission of European Communities: Brussels, Belgium, 2010.
- [51] European Commission. Commission of European Communities. *Communication No. 398*, 2014. *Towards a Circular Economy: A Zero Waste Programme for Europe*; COM no. 398; European Commission: Brussels, Belgium, 2014.
- [52] European Commission. Commission of European Communities. *Communication No. 614*, 2015. *Closing the Loop-An EU Action Plan for the Circular Economy*; COM no. 614; European Commission: Brussels, Belgium, 2015.
- [53] European Commission. Commission of European Communities. *Communication No. 29*, 2018. *Monitoring Framework for the Circular Economy*; COM no. 29; European Commission: Brussels, Belgium, 2018.
- [54] European Commission. Commission of European Communities. *Communication No. 98*, 2020. *A New Circular Economy Action Plan for a Cleaner and More Competitive Europe*; COM no. 98; European Commission: Brussels, Belgium, 2020.
- [55] 8. European Circular Economy Stakeholders Platform, Web Sayfası: [Circular.economy.europa.eu/platform](https://circular.economy.europa.eu/platform), erişim tarihi: 17.06.2024.
- [56] Ellen MacArthur Foundation, *Growth within: A circular economy vision for a competitive Europe*, 2015, web sayfası: [www.ellenmacarthurfoundation.org/growth-within-a-circular-economy-vision-for-a-competitive-europe](https://www.ellenmacarthurfoundation.org/growth-within-a-circular-economy-vision-for-a-competitive-europe), erişim tarihi: 29.06.2024.
- [57] Nizami, A., Rehan, M., Waqas, M., Naqvi, M., Ouda, O., Shahzad K., Miandad R, Khan M.Z., Syamsiro M., Ismail I.M.I. and Pant D., 2017, Waste Biorefineries: Enabling Circular Economies in Developing Countries, *Bioresour. Technol.*, Vol. 241, 1101-1117.
- [58] *The Role of Waste-to-Energy in the Circular Economy*; Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, European Commission: Brussels, Belgium, 2017.
- [59] Fagerström, A., Seadi, A., Rasi, T., Briseid, S., 2018, *The Role of Anaerobic Digestion and Biogas in the Circular Economy*, IEA Bioenergy Task 37, Edited by: Jerry D. Murphy, MaREI Centre, University College Cork, Ireland.

- [60] Monlau, F., Francavilla, M., Sambusiti, C., Antoniou, N., Solhy, A., Libutti A., Zabaniotou A., Barakat A. and Monteleone M., 2016, Toward a Functional Integration of Anaerobic Digestion and Pyrolysis or a Sustainable Resource Management, Comparison Between Solid-Digestate and Its Derived Pyrochar as Soil Amendment, *Appl. Energy.*, Vol.169, 652-662.
- [61] Ellen MacArthur Foundation, 2013, Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition, Web sayfası: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>, erişim tarihi: 27.06.2024.
- [62] Wellinger, A., Murphy, J.D., Baxter, D., 2013, *The Biogas Handbook: Science, Production and Applications*, Woodhead Publishing limited, New Delhi.
- [63] Cossu, R., 2016, Back to Earth Sites: From “Nasty and Unsightly” Landfilling to Final Sink and Geological Repository, Editorial, *Waste Management*, Vol. 55, 1-2.
- [64] Li, Y., Han, Y., Zhang, Y., Luo, W., Li, G., 2020, Anaerobic Digestion of Different Agricultural Wastes: a Techno-Economic assessment, *Bioresour. Technol.*, Vol. 315, 123836.