

## BİYOĞAZ TESİSLERİNDE VERİMLİLİĞİ ARTIRMAYA YÖNELİK BİR ANALİZ: BİYOĞAZ TESİSİ SENARYOLARI<sup>1</sup>

### AN ANALYSIS FOR INCREASING EFFICIENCY IN BIOGAS PLANTS: BIOGAS PLANT SCENARIOS

Leyla BAŞTAN TÖKE  
KTO Karatay Üniversitesi  
İİSBF  
Enerji Yönetimi  
leyla.toke@karatay.edu.tr  
ORCID: 0000-0002-2377-0249

Fatma Didem TUNÇEZ  
KTO Karatay Üniversitesi  
İİSBF  
Enerji Yönetimi  
didem.tuncez@karatay.edu.tr  
ORCID: 0000-0003-2841-6780

#### ÖZ

#### ABSTRACT

**Geliş Tarihi:**  
04.01.2024

**Kabul Tarihi:**  
28.03.2024

**Yayın Tarihi:**  
25.06.2024

**Anahtar Kelimeler**  
Sürdürülebilir  
Kalkınma,  
Yenilenebilir Enerji,  
Atık Yönetimi,  
Biyogaz

**Keywords**  
Sustainable  
Development,  
Renewable Energy,  
Waste Management,  
Biogas

Sürdürülebilir kalkınma; ekonomik, sosyal ve çevresel boyutların bütüncül olarak ele alınmasını vurgulayan bir yaklaşımdır. Günümüzde ekonomik büyümenin sürdürülebilmesine, çevrenin korunmasına, fosil kaynak kullanımının azaltılmasına, yerli ve yenilenebilir enerji kaynak kullanımının artırılmasına ve enerji ihtiyacının karşılanmasında bağımlılığın azaltılmasına yönelik çalışmalara odaklanan toplumlar; sürdürülebilir geleceğe yönelik olarak çözüm arayışına girmişlerdir.

Bu çalışmada geri dönüştürülebilir malzeme kullanımı ile çevreyi koruma ve ekonomiyi güçlendirme amaçlarına uygun eylemler gündeme getirilmiştir. Çalışmada atıkların oranlarında yapılan değişiklik ile daha düşük maliyetle biyogaz üretiminin yapılabileceğini göstermek amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda 160 ton atık kullanımının yapılabileceği 4 senaryo oluşturulmuştur. Senaryolarda C/N oranları, katı madde miktarları, biyogaz içerikleri ve birim fiyatları farklılık gösteren sekiz tür atık ele alınmıştır. Atıklar, biyogaz üretimi için kullanılan hammaddeler arasından seçilmiştir. Biyogaz alt ısı değeri 5.160 kcal/m<sup>3</sup>, tesis elektrikli güç verimi %40, organik katı gübre verimi %90, elektrik birim satış tutarı 0,54 TL/kWh, organik katı gübre birim satış tutarı 400 TL/ton değerleri üzerinden yapılan hesaplamaların sonuçları sunulmuştur.

Sustainable development is an approach that emphasizes the integration of economic, social and environmental dimensions. Nowadays, societies focusing on sustainable economic growth, conservation of the environment, reduction of the use of fossil resources, increased use of domestic and renewable energy sources, and reduced dependence on meeting energy needs have embarked on a search for solutions for a sustainable future. In this study, the use of recyclable materials and measures to protect the environment and strengthen the economy have been outlined. The study aims to demonstrate that biogas production can be achieved at a lower cost by changing the ratio of waste. Four scenarios have been developed for the recovery of 160 tons of waste. The scenarios covered eight types of waste, with variations in C/N ratios, solid quantities, biogas content and unit prices. Wastes were selected from the raw materials used for the production of biogas. Biogas subheat value is 5.160 kcal/m<sup>3</sup>, plant electric power efficiency is 40%, organic solid fertilizer yield is 90%, electricity unit sales volume is 0.54 TL/kWh, organic solids unit sales value is 400 TL/tonne.

**DOI:** <https://doi.org/10.30783/nevsosbilen.1414565>

**Atf/Cite as:** Baştan Töke, L., & Tunçez, F. D. (2024). Biyogaz tesislerinde verimliliği artırmaya yönelik bir analiz: Biyogaz tesisi senaryoları. *Neşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi SBE Dergisi*, 14(2), 465-481.

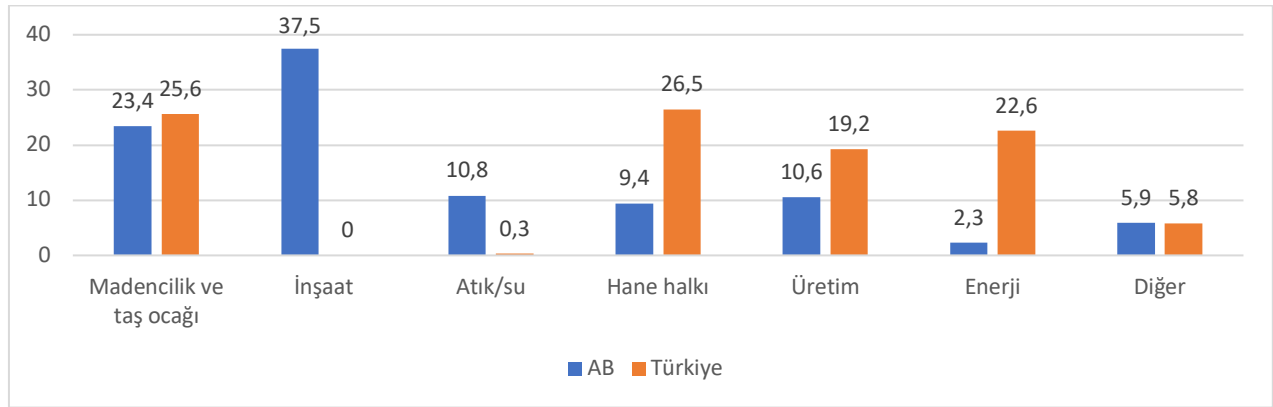
<sup>1</sup> Bu çalışma "Kapasiteleri Aynı Biyogaz Tesislerinin Farklı Atık Miktar ve Türlerine Göre Verimliliğinin Analizi" adlı tez çalışmasından üretilmiştir. Yüksek lisans tezi Fatma Didem TUNÇEZ danışmanlığında, Leyla BAŞTAN TÖKE tarafından yazılmıştır

## Giriş

İçinde bulunulan süreçte nüfusun hızlı bir şekilde artması, toplumların taleplerinin artmasına ve çeşitlenmesine sebep olmaktadır. Bunun yanında endüstri ve bilimde yaşanan gelişmeler de tüketimin hem boyutlarının hem de çeşitlerinin değişimine ortam hazırlamakta ve enerjiye olan bağımlılığı da artırmaktadır (Tanç ve Ekinler, 2022:1877). Buna karşılık hızla artan nüfus ve endüstriyel alanda yaşanan gelişmeler, atmosferde sera gazlarının (GHG) birikmesine ve bu birikimden kaynaklı olarak iklim değişikliğine de yol açmaktadır (Obaideen vd., 2022:1). Bu sebeple sürdürülebilir çözümler üretmeye odaklanan toplumlar, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine yönelik olarak temiz enerji üretimi, çevrenin korunması ve refah seviyesinin artırılmasına yönelik çözüm arayışına girmişlerdir.

Bu çalışmada sürdürülebilir kalkınma hedefleri için çevresel ve ekonomik problemleri önleyebilmek için geliştirilen yeni yaklaşımlar üzerinde durulmuştur. Sürdürülebilir kalkınma kavramı hakkında bilgi verilerek enerji kaynakları, enerji yönetimi ve bu yaklaşımın bileşenleri olan enerji verimliliği ve enerji tasarrufu kavramlarına değinilmiştir. Ardından, yeni ekonomik yaklaşımlar hakkında bilgi verilmesi amacıyla atıkların ekonomiye kazandırılmasına odaklanan kavramlara yer verilmiştir.

Atıkların ekonomiye kazandırılmasına verilen önemin artmasıyla ülkeler tarafından üretilen atıkların hangi sektörden kaynaklandığının da bilinmesi gerekmektedir. Grafik 1'de AB ve Türkiye'de üretilen atıkların sektörlere göre dağılımı gösterilmektedir:



Not. Eurostat web sayfasından elde edilmiştir.

**Grafik 1.** 2020 Yılı Atık Üretimi Payı

Atık üretim verileri incelendiğinde Türkiye'nin atık üretiminde en fazla payı %26,5 oranla hane halkının aldığı görülmektedir. İkinci sırada %25,6 pay ile madencilik ve taş ocağı, üçüncü sırada ise %22,6 ile enerji sektörü yer almaktadır. Bu veriler ile AB (Avrupa Birliği) verileri karşılaştırıldığında AB'de toplam atığın en fazla inşaatlarda üretildiği ve %37,5 paya sahip olduğu bilinmektedir. Buna karşılık toplam atığın %2,3 ile en az enerjiden kaynaklandığı görülmektedir. Ülkelerde yürütülen faaliyet kollarında farklı miktarlarda atık çıktığından dolayı küresel hedefler çerçevesinde her ülkenin ulusal bazda önlemlerini alarak faaliyetlerini yürütmesi gerekmektedir. Bu sebeple Türkiye, özellikle hane halkı tarafından açığa çıkan atık miktarını azaltmaya odaklanmalıdır.

Çalışmanın son bölümünde enerji üretmek, pişirme ve ısınma ihtiyaçlarının karşılanması için kullanılabilen, metan (CH<sub>4</sub>), karbondioksit (CO<sub>2</sub>), ve daha az oranda diğer gazlardan oluşan biyogaz (IEA,2020) üzerine bir analiz sunulmuştur. Atık yönetimine önemli katkısı olan ve temiz enerji kaynağı olarak nitelendirilen biyogaz hakkında genel hususlar ele alınmıştır. Kurulumu planlanan veya halihazırda faaliyetlerini yürüten biyogaz tesislerinde atıkların oranlarında yapılacak değişikliklerle verimliliğin yükseltilebileceğini göstermeye yönelik hesaplamalar sunulmuştur. Oluşturulan dört senaryo aracılığıyla yapılan analiz ile daha az maliyetle daha fazla biyogaz enerjisinin elde edileceğinin ve hem ekolojik hem de ekonomik kazanımlara aynı anda ulaşabileceğinin gösterilmesi hedeflenmiştir. Elde edilen analiz sonuçları ile akademik literatüre katkı sağlanmasının yanında teorik değerlerin gerçek hayatta kullanılmasının mümkün olduğunu göstermek planlanmıştır.

## Sürdürülebilir Kalkınma Yaklaşımında Enerjinin Yeri

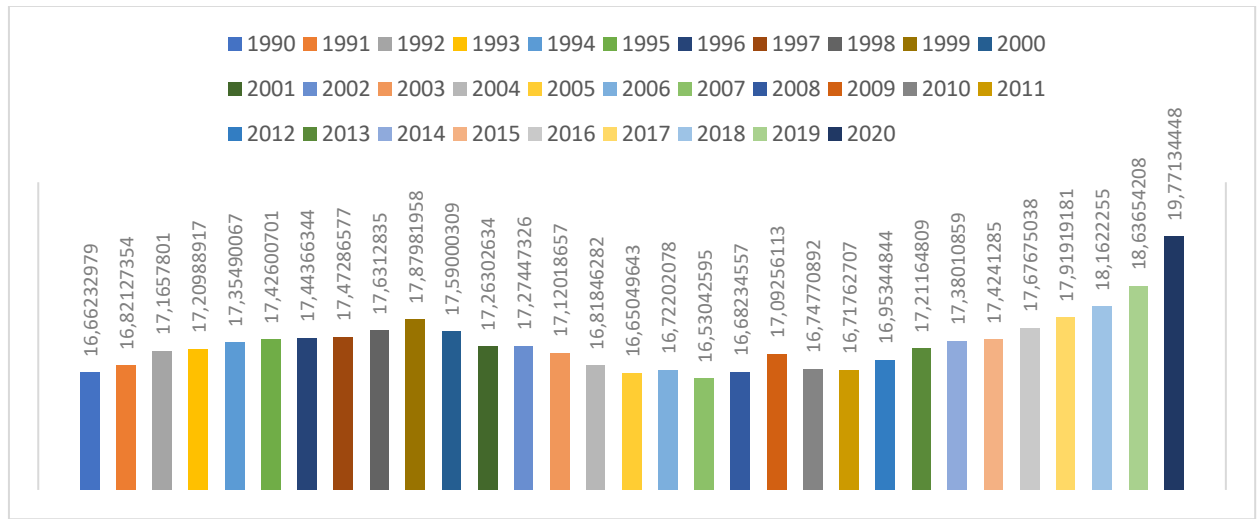
Kişi başına düşen enerji tüketimi, ülkelerin refah düzeylerinin karşılaştırılmasında önemli göstergeler arasında kabul edilmektedir. Enerji, üretim girdisi olmasının yanında uluslararası ilişkilerin de temelini oluşturan ve hem ekonomiyi hem de siyaseti şekillendiren önemli stratejik bir unsurdur (Rosha vd., 2021:21319).

Büyüme sürecinde ülkelerin refah seviyesini yükseltebilmesi için hem ekolojik dengenin korunması hem de enerji verimliliğinin yükseltilmesi, enerjinin kesintisiz, güvenilir bir şekilde ve ihtiyaç duyulan miktarda karşılanması gerekmektedir (Bozkurt, 2008:2). Bu sebeple ekonomik yaklaşımlar ve enerji politikaları, çevreyi maruz kaldığı yükten kurtarmaya yönelik olarak geliştirilmelidir. Geliştirilen enerji politikalarının çevresel, ekonomik ve sosyal faydaları aynı anda içermesi gerekmektedir (Antonio da Silva Gonçaves ve Mil-Homens dos Santos, 2019:4).

Enerji kaynakları, kullanım şekline ve dönüştürülebilirliğine göre iki kategoriye ayrılmaktadır. Bu gruplandırmada kullanım şekli açısından enerji kaynakları; yenilenemeyen enerji kaynakları ve yenilenebilir enerji kaynakları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Yenilenemeyen enerji kaynakları; fosil (kömür, petrol, doğalgaz vb.) veya çekirdek (uranyum, toryum vb.) ve kullanım ömrü kısıtlı olan kaynaklardır. Yenilenebilir enerji kaynakları; halihazırda var olan, kullanıldığı zaman yenilenemeyen enerji kaynaklarına göre doğayı tahribata uğratmayan veya çok daha az seviyede tahribata sebebiyet veren ve kendini yenileyen kaynaklar olan hidrolik, güneş, rüzgâr vb. enerji kaynaklarıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları yerel ve sürdürülebilir kaynaklardır (Lüle, 2018:3).

Dönüştürülebilirlik açısından enerji kaynakları; birincil ve ikincil enerji kaynakları olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır. Birincil enerji, doğada bulunduğu şekliyle kullanılan ve herhangi bir şekilde değişmemiş enerjidir. Birincil enerji kaynakları kömür, petrol, doğalgaz, nükleer, biyokütle, hidrolik, güneş enerjisi vb. iken ikincil enerji kaynakları; birincil enerji kaynaklarının dönüştürülmesi sonucunda elde edilen elektrik, benzin, ikincil kömür, motorin, mazot, kok kömürü, havagazı (LPG)'dir (Koç ve Kaya, 2015:37).

Günümüzde enerji ihtiyacının büyük kısmı yenilenemeyen (fosil) enerji kaynakları grubunda olan kömür, petrol ve doğalgazdan karşılanmaktadır. Küresel enerji üretiminin %81'i bu kaynaklardan karşılanmakta olup spesifik olarak incelendiğinde doğal gaz %21,6, kömür %28,1 ve petrol %31,7 oranında kullanılmaktadır (Kumar & Kumar, 2024:1). Fakat bu kaynaklara erişimin coğrafi sebeplerden dolayı kolay olmaması enerji ürünlerinin maliyetini yükseltirken, krizler ve ekolojik tehditler de tetiklenmektedir (Kavak, 2005:7). Enerji ihtiyacını yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılayamayıp dış kaynaklara bağımlılığı yüksek ülkelerde kalkınmanın gücü olan ekonomik büyüme de olumsuz etkilenmektedir. Enerji ihtiyacını karşılarken maliyetlerin yükselmemesi gerektiği bilincine sahip olan toplumlar, artan enerji ihtiyacını karşılamak ve yaşanabilecek kesintilerin önüne geçmek için kaynaklarını çeşitlendirerek yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmektedirler. Dünya genelinde yenilenebilir enerji tüketiminin payı Grafik 2'de gösterilmektedir:



Not: Şekil The World Bank Data web sayfasından elde edilen verilerle oluşturulmuştur.

**Grafik 2.** Yenilenebilir Enerji Tüketimi (toplam nihai enerji tüketiminin %'si)

Şekil 2’de yer alan veriler incelendiğinde özellikle 2011 yılından itibaren yenilenebilir enerji tüketiminin arttığı görülmektedir. Yenilenebilir enerji kullanım payının artması, toplumların artan enerji ihtiyacının karşılanmasında çeşitlendirmeye giderek ekolojik, ekonomik ve sosyal çıkarlarını bütüncül bir bakış açısı içinde gözettiklerini göstermektedir.

Kısıtlı olan enerji kaynaklarının kendisini kısa dönemde yenileyememesi veya yenilenmemesine ek olarak küresel ısınma sebebiyle ortaya çıkan çevresel sorunlar bütün toplumların ortak problemi haline gelmiştir. Bu sebeple ulusal ve küresel boyutta enerji politikalarının üretilmesi ve benimsenmesi gerekmektedir. Sürdürülebilir nitelikteki enerji politikaları, ihtiyaç duyulan enerjinin daha uygun maliyet ile elde edildiği ve çevreye zarar vermeme yaklaşımının göz önünde bulundurularak oluşturulan uygulamalardır (Bayraç, 2010:245). Enerji politikalarında söz sahibi konumda olabilmek için dışa bağımlılık mümkün olduğu kadar azaltılmalı, enerji kaynak çeşitliliği ve verimliliği artırılmalıdır (Baş, 2018:27). Mevcut kaynaklardan ne kadar faydalandığını gösteren verimliliğin yükseltilmesi ve etkinliğin sağlanması için kaynaklar etkili kullanılmalıdır. Aynı orandaki kaynaklardan daha fazla ürün ve hizmet ortaya çıkarılırsa ya da ürün ve hizmetler daha az kaynak ile elde edilirse verimliliğe ulaşılabileceğinden dolayı girdilerin etkili bir şekilde kullanılması gerekmektedir (İleri, 2014:10; Top, 2002:31-33).

Sürdürülebilir enerji politikalarında ihtiyaç duyulan enerjinin beklenen kalitede ve minimum maliyet ile ihtiyaç duyulan yerde ve zamanda karşılanması için “enerji yönetimi” olarak adlandırılan sisteme ihtiyaç duyulmaktadır (Petrecca, 2014:1). Enerji yönetimi yaklaşımına göre enerji kullanımını düzenlemek, enerjide verimliliği sağlamak ve enerji tüketiminde enerji performansını iyileştirmek için enerji yönetimi sisteminin kurulması gerekmektedir. Enerji yönetimi sistemi, halihazırda olan yönetim sistemleriyle uyumlu hale getirilebilecek bir sistemdir ve bütün sektörler için de uygulanabilir niteliktedir (Tachmitzaki vd., 2019:2). Enerji yönetim sistemi, enerji verimliliği ve enerji tasarrufunu kapsayan bir yaklaşımdır.

Enerji verimliliği; enerji israfını engelleyen, atıkların yeniden kullanılarak değerlendirilmesini sağlayan, teknolojik gelişmeler sayesinde üretim seviyesini azaltmadan enerjiye olan talebi azaltan, verimliliği yüksek enerji kaynaklarının kullanımını yaygınlaştıran, enerji geri kazanımını ve etkinliğin yükseltilmesini sağlayan sistemlerden oluşmaktadır (Yıldız vd., 2018:17). Enerji verimliliği, enerji kaynaklarının üretimden tüketime kadar her aşamada yüksek fayda ile kullanılmasını hedefleyen bir yaklaşım olarak enerji tasarrufunu da kapsamaktadır. “Enerjinin ve enerji kaynaklarının verimli bir şekilde kullanılması için enerji tüketicileri tarafından alınan önlemler neticesinde belli orandaki üretim ve hizmetin gerçekleştirilebilmesi için tüketime kadar bütün aşamalarda harcanan enerji oranında sağlanacak azalma” enerji tasarrufu olarak tanımlanmaktadır (Kavak, 2005:8-9). Enerji tasarrufu için yeşil uygulamalar zorunlu hale gelmiştir. Enerjinin rasyonel yönetimi sayesinde üretimde enerji tüketimi ve çevresel tahribat azaltılarak kârlılık ve katma değer artırılmaktadır (Tachmitzaki vd., 2019:13).

### **Yenilenebilir Enerji Kaynağı Olarak Atıkların Değerlendirilmesi**

Atık Yönetimi Yönetmeliği’ne göre atık, “atığı üretici konumunda olan ya da üreten kişiler tarafından çevreye salınan veya bırakılmak zorunda kalınan madde ve materyaller” olarak tanımlanmaktadır (Resmî Gazete, 2015). Endüstriyel faaliyetlerin hızlanması ve nüfusun hızla artmasına paralel olarak çevrenin doğal düzeninin bozulmasını ivmelendiren bir unsur olan ve “atık” olarak tanımlanan maddelerin miktarı da hızla artmaktadır. TÜİK verilerine göre 2020 yılında Türkiye’de 104,8 milyon ton atık açığa çıkmıştır. Bu miktar 2018 yılına göre %10,5 oranında atık miktarında artış olduğunu göstermektedir (TÜİK, 2021). Ortaya çıkan bu atıkların çevreye verdiği zararı minimuma indirmek için yeni yaklaşımlara odaklanılması gerekmektedir. Atıkların çevreye verdiği zararların önüne geçilmesi veya verilen zararın minimum seviyeye düşürülebilmesi için multi disiplinler bir yaklaşım olan “atık yönetimi” yaklaşımından destek alınmalıdır (Çetinkaya, 2019:4).

Atık yönetimi, “atığın oluşmasının önüne geçilmesi, kaynağında azaltılması, yeniden kullanımı, atıkların özelliklerine ve türlerine göre ayrıştırılması, biriktirilmesi, geçici süreliğine depolanması, taşınması, ara depolanması, geri dönüşümü, geri kazanımı, enerji olarak kazanılması, bertaraf edilmesi, bertaraf işleminin ardından izlenmesi, kontrol edilmesi ve denetlenmesi” faaliyetlerini kapsayan atık önleme yaklaşımıdır (Resmî Gazete, 2015). Şekil 3’te atık yönetimi hiyerarşisi gösterilmektedir:



Not. Sıfır Atık Kitabı'ndan elde edilmiştir.

**Kaynak:** <https://sifiratik.gov.tr>

**Şekil 1.** Atık Yönetimi Hiyerarşisi

Şekil 1’de yer verilen atık yönetimi hiyerarşisine göre ilk olarak atıkların sürdürülebilir kullanımının sağlanması hedeflenerek atıkların ortaya çıkmasının önlenmesi gerekmektedir. Oluşumu engellenemeyen atığın azaltılması, azaltılması mümkün değilse tekrar kullanımı, tekrar kullanılmayan atığın geri dönüşümü ya da kazanımı ve enerji olarak kazanımı hedeflenirken bu aşamalarda atıklar değerlendirilemezse son seçenek olarak bertaraf edilmektedir (Aydın ve Deniz, 2018:439).

Atık yönetiminin elemanlarının her birini verimlilik ve faaliyet bakımından incelenmesi “entegre atık yönetim sistemi” olarak adlandırılmaktadır. Bu sistemin temel amacı, sistemde oluşan atıkların ortadan kaldırılması esnasında hem ekolojik hem de ekonomik açıdan ortaya çıkacak negatif etkileri minimize etmektir (Bozkurt, 2012:14-14).

Atık yönetimi sisteminin bütün boyutlarını kapsayan ve her aşamada yüksek verimliliğin sağlanmasını hedefleyen entegre atık yönetimi sisteminin hedeflerine ulaşması için atıkların hammadde olarak değerlendirilebileceği yaklaşımına odaklanan döngüsel ekonomi gibi yaklaşımların da önemi artmıştır. Döngüsel ekonomi, kullanılan kaynak, ürün ve malzemenin ekonomide uzun süre tutularak açığa çıkan atık miktarının en az seviyeye indirgenmesine, açığa çıkan atıkların ise kaynak olarak yeniden değerlendirilmesi gerektiğini savunan ekonomik bir yaklaşımdır (Önder, 2018:199). Döngüsel ekonomi yaklaşımına göre çevre merkezdedir ve sınırsız büyüme mümkün değildir. Dolayısıyla atıkların açığa çıkmasının önlenmesi, ekosistemin korunması, piyasa şartlarının iyileştirilmesi ve ekonomik büyümenin sürdürülebilmesi için bu yaklaşımın toplumun her tabakası tarafından benimsenmesi gerekmektedir. Döngüsel ekonominin hedeflerine ulaşabilmesi için bu yaklaşım kapsamında olan endüstriyel simbiyoz ve sıfır atık yaklaşımları da desteklenmelidir.

Endüstriyel simbiyoz, “coğrafi olarak birbirine yakın olup birbirinden farklı faaliyet kollarındaki işletmelerin enerji, yan ürün, malzeme, su ve üretim süreci atıklarının değişime uğratılarak yeniden kullanılması” olarak tanımlanmaktadır (Demircioğlu ve Ever, 2020:463). Endüstriyel simbiyoz kavramının öncülerinden olan Chertow tarafından atık ya da malzeme paylaşımının yapıma şekilleri beş başlık altında toplanmıştır:

- Atık üzerinden tek yönlü olarak ömrü tamamlanan malzemelerin geri dönüştürülmesiyle veya yeniden kazanılmasıyla, geleneksel yöntemler ile enerji ve su akışı olmadan sadece kimyasal alışveriş olarak,
- Firmalar veya birbirine yakın organizasyonların malzeme alışverişi yapmasıyla,
- Eko-endüstriyel park içinde bulunan firmaların malzeme, enerji, su değiş tokuşunun yanında ek taşıma ve pazarlama faaliyetlerinin paylaşımı ile,
- Yerleşik durumda olmayan yerel firmalar arasında 2-3 km çapındaki firmalar tarafından yapılan paylaşım ile,
- Ülkeler arası ölçekte geniş ve sanal bir ortamda firmaların birbirine bağlanmasıyla endüstriyel simbiyoz gerçekleştirilebilmektedir (Özkan vd., 2018:87).

Sıfır atık, “üretim, tüketim, hizmet süreçlerinde atıkların ortaya çıkmasının önlenmesi, önlemenin mümkün olmadığı durumlarda en az seviyeye indirilmesi, atıkların tekrar kullanılmasına odaklanması, bu aşamaların ardından yine de oluşan atıkların ise kaynağında ayrı toplanarak, geri dönüşüm veya geri kazanımı ile bertaraf edilecek atıkların azaltılarak çevrenin, insanların ve kaynakların korunmasını hedefleyen bir yaklaşımdır” (Resmî Gazete, 2019). Kaynakların hayat döngüsünü yeniden oluşturmayı hedefleyen sıfır atık yaklaşımı, atıkların çöp sahası ve yakma tesislerine gönderilmemesini (Song vd., 2015:199), üretim girdileri olan insan gücü, hammadde ve enerjinin etkin kullanılmasını, atıkların geri kazanılması gerektiğini savunmaktadır (Mayaoğlu Akın, 2021:16).

### ***Atıkların Değerlendirilmesinde Alternatif Yaklaşım Olarak Biyogaz***

Günümüzde tarım ve hayvancılık sektörü büyümekte ve hem hayvansal atıklarda hem de şehirleşmenin getirdiği evsel atıklarda artış yaşanmaktadır. Bu atıkların enerjiye dönüştürülerek değerlendirilmesi ise biyogaz teknolojisi ile mümkün olmaktadır. Biyogaz ile ülkelerin enerji dengesinin de iyileştirilmesine katkı sağlanması beklenmektedir (Al Seadi vd., 2008:11).

Organik maddelerin çürütülmesiyle elde edilen biyogaz, asıl olarak metan (CH<sub>4</sub>), karbondioksit (CO<sub>2</sub>) ve eser miktarda hidrojen sülfid (H<sub>2</sub>S), nitrojen oksit (NOX), amonyak (NH<sub>3</sub>) ve diğer uçucu bileşenlerden oluşan bir gazdır (Belay vd., 2021:2). Biyogaz üretimi için oksijensiz ortama ihtiyaç duyulmaktadır (İlkılıç ve Deviren, 2011:144). Üretimde dikkat edilmesi gereken ısı değeri ise metan oranına bağlı olarak şekillenmektedir (Deviren vd., 2017:82-84).

- Biyogaz; hidroliz, asit oluşumu ve metan oluşumu olmak üzere üç aşamanın ardından elde edilmektedir: Biyogazın elde edilmesi sürecinde ilk olarak hidroliz aşamasında karmaşık yapıdaki organik moleküller, mikroorganizmalar tarafından salgılanan enzimler aracılığıyla daha küçük yapıya dönüştürülmektedir. Bu aşamada karbohidratlar; pentoz, glikozlar ve heksoz, asitler; hidrojen, proteinler polipeptid ve aminoasit haline getirilmektedir.
- Hidroliz aşamasından sonra hidrojen ve karbondioksit gazı açığa çıkmakta ve biyogazın elde edilmesi için kullanılan atıklar suda çözünebilir hale gelmektedir. Asit oluşturma aşamasında, birinci aşamada çözünür şekle gelmiş maddeler asit üreten bakteriler tarafından karbon miktarı yüksek olan uçucu yağ asitler haline getirilmektedir. Bu aşamada karbohidratlar hidrojene, karbondioksit ve etanole dönüşmektedir. Yağ asitleri ise hidrojene ve asetata dönüşmektedir. Amino asitler ise süksinik asit ve hidrojen haline dönüştürülmektedir.
- Üçüncü aşamada ise asit oluşturma aşamasından sonra açığa çıkan asetik asitin parçalanmasıyla karbondioksit ve hidrojen senteziyle metan gazı elde edilmektedir (Özbaşer ve Erdem, 2013:117-118; İlkılıç ve Deviren, 2011:145; Deviren vd., 2017:81).

Yenilenebilir enerji kaynağı olarak biyogazın sağladığı avantajlar şu şekildedir:

- Biyogaz üretiminin ardından kalan yan ürünler gübre olarak değerlendirilebilmektedir.
- Hayvan gübrelerinin neden olduğu salgın hastalıkların oluşumu önlenerek insan sağlığı korunmaktadır.
- Hayvan gübrelerinin sebep olduğu kötü koku oluşumu ortadan kaldırılmaktadır.
- Atıkların geri kazanımı sağlanmaktadır.
- Biyogaz üretiminin ardından hayvan gübresinden çıkma ihtimali olan tohumların çimlenme sorunu önlenmektedir (Yılmaz vd., 2017:223).

Ekonomik olarak üretim maliyetlerini minimuma indirme ve sınırları olmayan bir dünyada rekabet eden toplumların varlıklarına devam edebilmeleri için üretimin en yüksek maliyetine sahip girdilerinden biri olarak kabul edilen enerjinin uygun fiyat ile kolay yoldan ulaşılabilir olması rekabet edilebilirlik açısından gerekli bir unsurdur.

İhtiyaç duyulan enerjinin karşılanması yanında karşılanma şekli de önemli bir yere sahiptir. Enerji talebinin karşılanması için ağırlıklı olarak fosil kaynakların kullanılması hava, su, toprak kirliliği, iklim değişikliği ve doğal kaynak tüketimi sorunlarına yol açmasının yanı sıra hem sağlık hem de sosyal açıdan örtük maliyetler oluşturmaktadır. Bu negatif etkilerin ortadan kaldırılması için enerjide dışa bağımlılığın azaltılmasına yönelik olarak enerji kaynaklarında çeşitliliğin sağlanması ve yenilenebilir enerji kaynak kullanım oranının artırılması gerekmektedir. Bu açıdan biyogaz, yerli ve yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak ülkelerin enerjide dış ülkelere

bağımlılıklarının azaltılmasına, çevrenin korunmasına ve ekonomik kalkınmanın sürdürülmesine destek olmaktadır.

## Yöntem ve Bulgular

Biyogaz üretiminde bitkisel, hayvansal ve endüstriyel atıklar kaynak olarak kullanılmaktadır (Gülen ve Çeşmeli, 2012:66; Şenol vd., 2017:84-88; Çallı, 2012:15; Koca, 2007:33; Atelge vd., 2020:1082). Üretim için kullanılacak atıklar Tablo 1’de gösterilmektedir:

**Tablo 1.** Biyogaz Üretiminde Kullanılan Atıklar

Organik atıklar		
Hayvansal	Bitkisel	Endüstriyel
Hayvan gübreleri büyükbaş hayvancılık, küçükbaş hayvancılık, tavukçuluk vb.	Yemek atıkları	Zirai atıklar
Hayvancılıktan elde edilen atıklar	Bahçe atıkları	Orman endüstri atıkları Deri ve tekstil endüstri atıkları Kağıt endüstri atıkları Gıda endüstrisi atıkları Şeker endüstri atıkları Evsel katı atıklar

Not. SoleaEnerji web sayfasında yer alan bilgiler ile oluşturulmuştur.

**Kaynak:** <http://www.soleaenerji.com/>

Bu çalışmada Tablo 1’de yer alan atıkların listesinden hareketle; tesislerde büyükbaş hayvan dışkı, küçükbaş hayvan dışkı, pazaryeri bitkisel atıkları, market muhtelif gıda atıkları, buğday samanı, arpa samanı, şeker pancarı yaprakları mısır slaj atıkları ve şeker fabrikası şilempesi olmak üzere 8 farklı atığın farklı oranda kullanıldığı varsayılarak hesaplamalar yapılmıştır. Biyogaz tesislerinde maliyetleri azaltırken üretim potansiyellerinin yükseltilebileceğinin gösterilmesinin hedeflenerek oluşturulan senaryolarda günlük atık miktarları ton değerleri üzerinden analize dahil edilmiştir. Hesaplamalarda tesisin yıl boyunca kesintisiz olarak sürekli çalıştığı varsayılmıştır. Biyogazın alt ısıl değeri 5.160 kcal/m<sup>3</sup>, tesisin elektriksel güç veriminin %40, organik katı gübre veriminin %90, elektrik birim satış tutarının 0,54 TL/kWh, organik katı gübre birim satış tutarının 400 TL/ton olduğu varsayılarak hesaplamalar yapılmıştır.

Çalışmada ele alınan atıkların C/N oranları, katı madde miktarları, biyogaz içerikleri ve birim fiyatları farklılık göstermektedir. Oluşturulan dört senaryoda da kullanılan atık miktarı 160-ton olarak belirlenmiş ve atıkların kullanım oranlarında değişikliğe gidilmiştir. Senaryolarda kullanılan atıklara ait özellikler Tablo 2’de gösterilmektedir:

**Tablo 2.** Kullanılan Atıkların C/N Oranı, Katı Madde Miktarı, Biyogaz İçerikleri ve Birim Fiyatları

	Büyükbaş hayvan dışkıları	Yumurta tavukçuluğu dışkıları	Pazaryeri bitkisel atıkları	Market muhtelif gıda atıkları	Buğday samanı	Arpa samanı	Şeker pancarı yaprakları mısır slaj atıkları	Şeker fabrikası şilempesi
C/N Oranı	18	10	25	25	75	70	23	12
Katı madde miktarı	15%	20%	15%	40%	40%	35%	23%	80%
Atığın biyogaz içeriği	30	100	57	120	188	168	147	400
Atık birim fiyatları (TL/ton)	10	10	10	10	300	250	10	500

Not. Tablo yazar tarafından oluşturulmuştur.

Çalışmada kullanılan atıklar bundan sonraki tablolarda harf ile anılacaktır. Atıkların harflendirilmiş hali aşağıda gösterilmektedir:

- Büyükbaş hayvan dışkısı-Atık BHD
- Yumurta tavukçuluğu dışkıları-Atık YTD
- Pazar yeri bitkisel atıkları-Atık PYBA
- Market muhtelif gıda atıkları-Atık MMGA
- Buğday samanı-Atık BS
- Arpa samanı-Atık AS
- Şeker pancarı mısır slaj atıkları-Atık ŞPMSA
- Şeker fabrikası şilempesi-Atık ŞFŞ

Senaryolarda değerlendirilen atıkların oranlarında yapılan değişiklikler Tablo 3'te gösterilmektedir:

**Tablo 3.** Senaryolara Göre Atık Payları

	Senaryo 1	Senaryo 2	Senaryo 3	Senaryo 4
Atık BHD	100	90	80	85
Atık YTD	20	25	20	10
Atık PYBA	10	5	10	15
Atık MMGA	10	10	5	30
Atık BS	5	10	10	5
Atık AS	5	5	10	5
Atık ŞPMSA	5	5	20	5
Atık ŞFŞ	5	10	5	5

Not: Tablo yazar tarafından oluşturulmuştur.

Yapılan hesaplamalarda kullanılan formüller şöyledir:



"C/N Katsayısı = C/N oranı × Kullanılacak Günlük Atık Miktarı" (1)

"Karışım C/N Oranı =  $\frac{C/N \text{ Katsayısı}}{\text{Günlük Kullanılan Atık Miktarı}}$ " (2)

"Saatlik Elde Edilecek Biyogaz Miktarı (m<sup>3</sup>) =  $\left(\frac{\text{Atığın Biyogaz İçeriği} \times \text{Günlük Kullanılacak Atık Miktarı}}{\text{Günlük Çalışma}}\right)$ " (3)

"Biyogazın yıllık enerji değeri (TEP) =  $\frac{(\text{Saatlik Elde Edilecek Biyogaz Miktarı} \times \text{Günlük Çalışma} \times \text{Yıllık Çalışma} \times \text{Biyogaz Alt Isıl Değeri})}{10.000.000}$ " (4)

"Tesis Ait Isıl Kapasite (Kcal/Saat) = Saatlik Elde Edilecek Biyogaz Miktarı × Biyogaz Alt Isıl Değeri" (5)

"Tesisin Toplam Gücü (MW) = (Tesis Ait Isıl Kapasite × 4,186)/(3.600 × 1.000)" (6)

"Tesisin Elektriksel Gücü(MWe) = Tesisin Toplam Gücü × Tesis Elektriksel Verimi" (7)

"Yıllık Elde Edilecek Elektrik Enerjisi Miktarı(kWsaat) = Tesisin Elektriksel Gücü × Günlük Çalışma × Yıllık Çalışma × 1.000" (8)

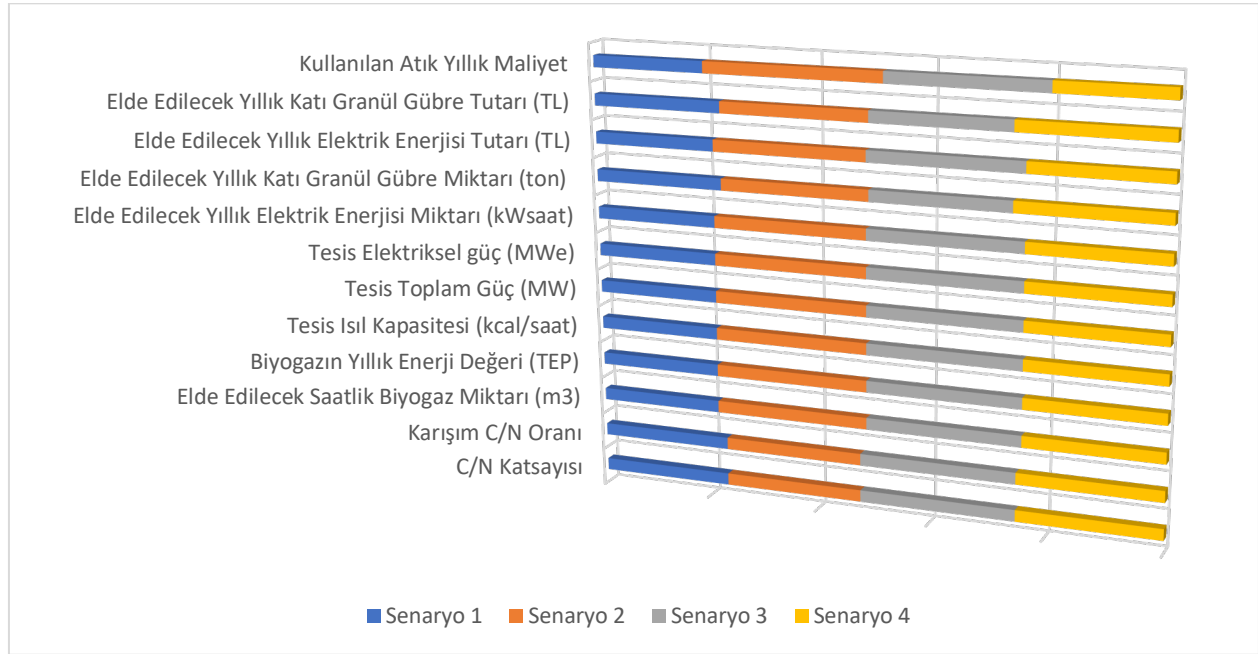
"Yıllık Elde Edilecek Katı Granül Gübre Miktarı = Katı Madde Miktarı × Günlük Kullanılan Atık Miktarı × Yıllık Çalışma × Organik Katı Gübre Verimi" (9)

"Yıllık Elde Edilecek Elektrik Enerjisi Tutarı = Yıllık Elde Edilecek Elektrik Enerjisi Miktarı × Elektriğin Birim Satış Tutarı" (10)

"Yıllık Elde Edilecek Katı Granül Gübre Tutarı = Elde Edilecek Yıllık Katı Granül Gübre Miktarı × Organik Katı Gübre Birim Satış Tutarı" (11)

"Kullanılan Atıkların Yıllık Maliyeti = Günlük Kullanılacak Atık Miktarı × Atıkların Birim Fiyatı × Yıllık Çalışma" (12)

Dört senaryo üzerinden 8 çeşit atık ile yapılan hesaplamalarla elde edilen sonuçlar Grafik 3'te gösterilmektedir:



Not: Grafik yazar tarafından oluşturulmuştur.

**Grafik 3.** Senaryolarda Kullanılan Atıklara Ait Sonuçlar

Grafikte gösterilen sonuçlar değerlendirildiğinde; C/N Katsayısı; 1. senaryoda 3.400, 2. senaryoda 3.580, 3. senaryoda 3.985 ve 4. senaryoda 3.655'tir. Karışım C/N oranı hesaplandığında 1. senaryoda 21,25, 2. senaryoda

22,38, 3. senaryoda 24,91 ve 4. senaryoda 22,84 değeri elde edilmiştir. Elde Edilecek Saatlik Biyogaz Miktarı (m<sup>3</sup>); 1. senaryoda 470, 2. senaryoda 589, 3. senaryoda 586 ve 4. senaryoda 522 değerine sahiptir. Biyogazın Yıllık Enerji Değeri (TEP); 1. senaryoda 2.125 TEP, 2. senaryoda 2.663 TEP, 3. senaryoda 2.650 TEP, 4. senaryoda 2.358 TEP değerine sahiptir. Tesis Isıl Kapasitesi (kcal/saat); 1. senaryoda 2.426.275 (kcal/saat), 2. senaryoda 3.040.100 (kcal/saat), 3. senaryoda 3.025.050 (kcal/saat) ve 4. senaryoda 2.691.800 (kcal/saat) değerine sahiptir. Tesis Toplam Güç (MW); 1. senaryoda 2,821 MW, 2. senaryoda 3,535 MW, 3. senaryoda 3,517 MW ve 4. senaryoda 3,130 MW değerine sahiptir. Tesis Elektriksel güç (MWe); 1. senaryoda 1,128 MWe, 2. senaryoda 1,414 MWe, 3. senaryoda 1,407 MWe ve 4. senaryoda 1,252 MWe değerine sahiptir. Elde Edilecek Yıllık Elektrik Enerjisi Miktarı (kWsaat) 1. senaryoda 9.885.550 kWsaat, 2. senaryoda 12.386.502 kWsaat, 3. senaryoda 12.325.183 kWsaat ve 4. senaryoda 10.967.398 kWsaattir. Yıllık Katı Granül Gübre Miktarı (ton); 1. senaryoda 10.972 ton, 2. senaryoda 12.532 ton, 3. senaryoda 11.695 ton, 4. senaryoda 12.450 ton elde edilmiştir. Yıllık Elektrik Enerjisi Tutarı (TL); 1. senaryoda 5.338.197 TL, 2. senaryoda 6.688.711 TL, 3. senaryoda 6.655.599 TL, 4. senaryoda 5.922.395 TL değerinde elde edilmiştir. 1. senaryoda 4.388.760 TL, 2. senaryoda 5.012.910, 3. senaryoda 4.677.840, 4. senaryoda 4.980.060 TL tutarında yıllık katı granül gübre elde edilmiştir. Kullanılan atıkların yıllık maliyeti 1. senaryoda 2.445.500 TL, 2. senaryoda 3.869.000 TL, 3. senaryoda 3.412.750 TL, 4. senaryoda 2.445.500 TL'dir.

Elde edilen sonuçlarda C/N katsayısının, elde edilecek saatlik biyogaz miktarının, biyogazın yıllık enerji değerinin, tesis ısıl kapasitesinin, tesisin toplam gücünün, elde edilecek yıllık elektrik enerjisi miktarının, yıllık elde edilecek katı granül gübre miktarının, yıllık elektrik enerjisi tutarının, elde edilecek yıllık katı granül gübre miktarının ve kullanılan atıkların yıllık maliyetinin en fazla 2. senaryodan elde edildiği görülmektedir.

Senaryolarda kullanılan diğer analizler 13, 14, 15 ve 16 numaralı formüller ile hesaplanmaktadır:

"Üretimde Kullanılan Atıkların Toplam Atık Kullanımındaki Payı =

$$\frac{\text{Günlük Kullanılan Atık Miktarı}}{\text{Toplamda Kullanılan Günlük Atık Miktarı}} \quad (13)$$

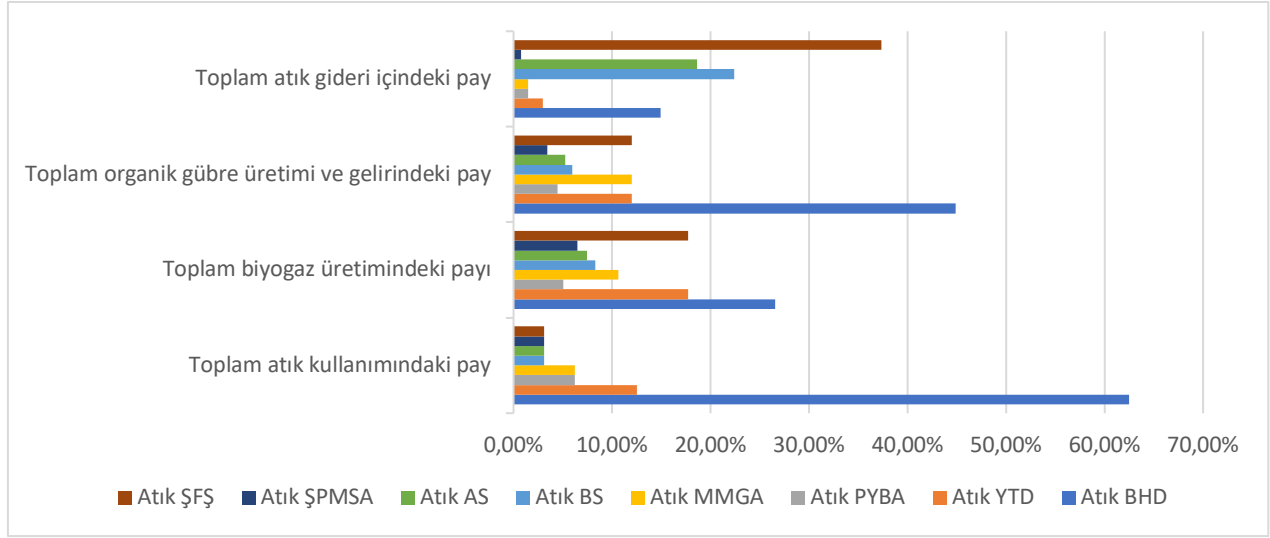
$$\text{"Kullanılan Atığın Toplam Biyogaz Üretimindeki Payı} = \frac{\text{Saatlik Elde Edilecek Biyogaz Miktarı}}{\text{Toplam Elde Edilecek Saatlik Biyogaz Miktarı}} \quad (14)$$

$$\text{"Toplam Organik Gübre Üretimi ve Gelirindeki Payı} = \frac{\text{Yıllık Elde Edilecek Katı Granül Gübre Miktarı}}{\text{Toplam Elde Edilecek Yıllık Katı Granül Gübre Miktarı}} \quad (15)$$

$$\text{"Atıkların Toplam Atık Gideri İçindeki Payı} = \frac{\text{Kullanılan Atığın Yıllık Maliyeti}}{\text{Toplam Kullanılan Atığın Yıllık Maliyeti}} \quad (16)$$

Tablo 4, 5, 6, 7'de oluşturulan her senaryoya göre atıkların toplam atık kullanımındaki payı, toplam biyogaz üretimindeki payı, toplam organik gübre üretimi ve gelirindeki payı, kullanılan atıkların toplam atık gideri içindeki payı gösterilmektedir.

Grafik 4'te birinci senaryo için oluşturulan atıkların oranları gösterilmektedir:

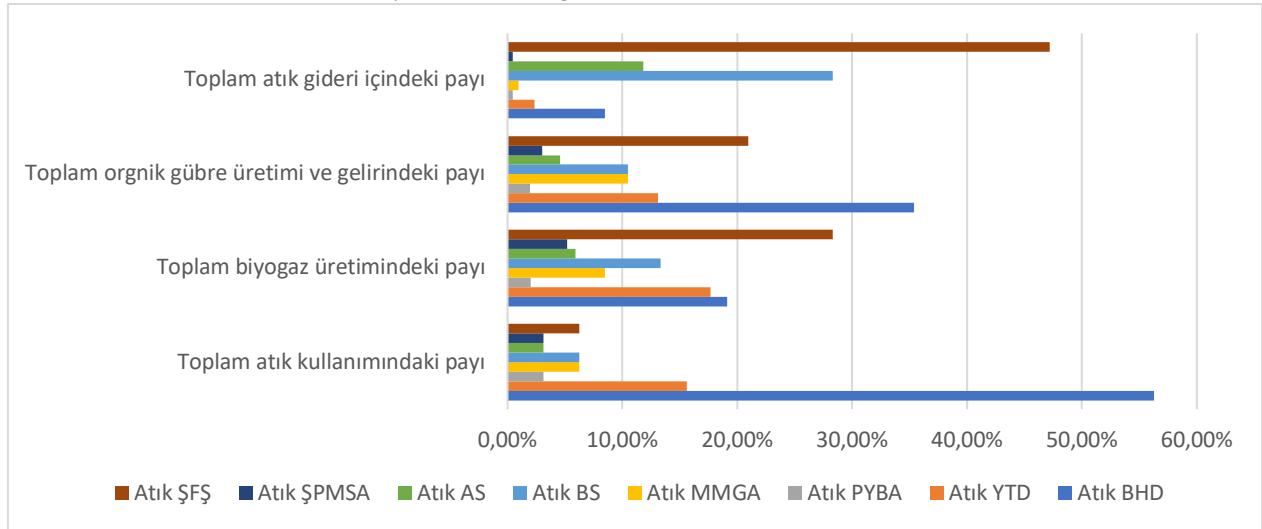


Not: Grafik yazar tarafından oluşturulmuştur.

**Grafik 4.** Senaryo 1'e Göre Atık Payları

Grafikte yer alan birinci senaryoda en az oranda buğday samanı (BS), arpa samanı (AS), şeker pancarı mısır slaj atıkları (ŞPMSA) ve şeker fabrikası şilempesi (ŞFŞ) atıklarının kullanıldığı, en fazla oranda ise büyükbaş hayvan dışkısı (BHD) atığının kullanıldığı görülmektedir. Buna karşılık toplam atık gideri içindeki en fazla payı şeker fabrikası şilempesi (ŞFŞ) atığı almıştır.

Çalışmada oluşturulan ikinci senaryo Grafik 5'te gösterilmektedir:

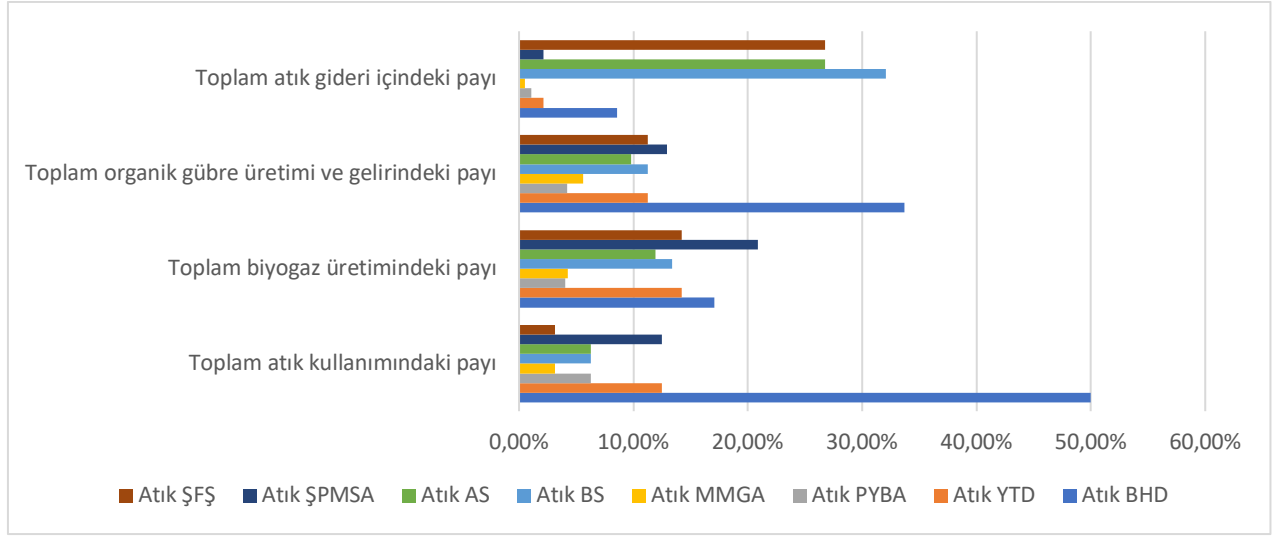


Not: Grafik yazar tarafından oluşturulmuştur.

**Grafik 5.** Senaryo 2'ye Göre Atık Payları

Grafik 5'te yer alan ikinci senaryoda en az oranda arpa samanı (AS) ve şeker pancarı mısır slaj atığı (ŞPMSA) kullanılırken, en fazla oranda büyükbaş hayvan dışkısı (BHD) atığı kullanılmıştır. Toplam biyogaz üretimi ve atık gideri içindeki en fazla paya ise şeker fabrikası şilempesi (ŞFŞ) atığı sahiptir.

Grafik 6'da üçüncü senaryo için kullanılan 8 atığın oranları gösterilmektedir:

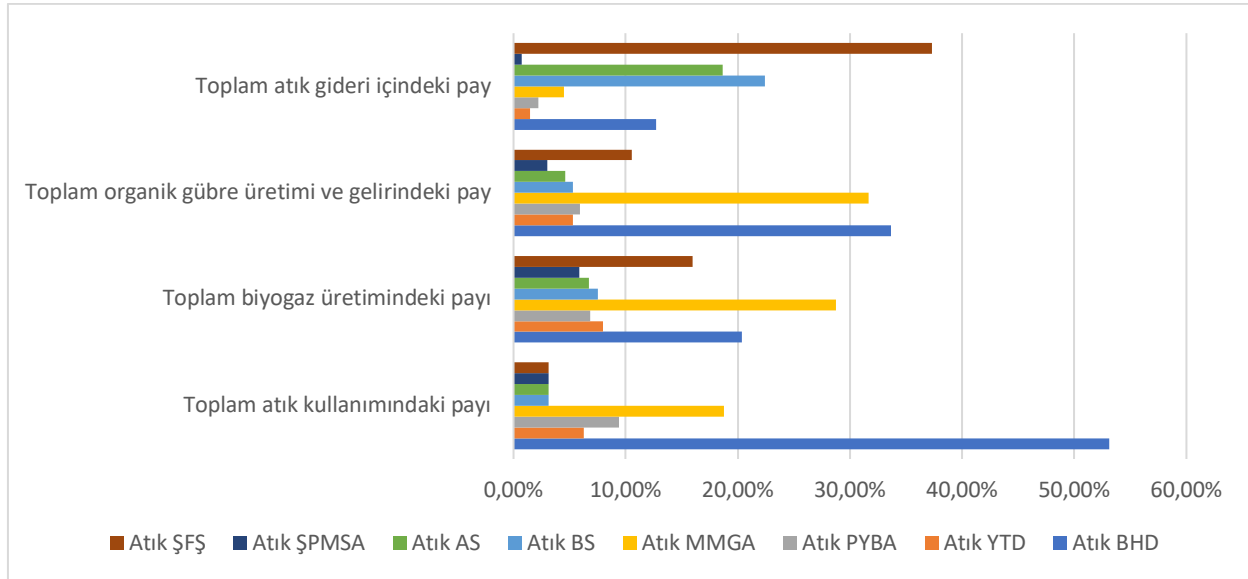


Not: Grafik yazar tarafından oluşturulmuştur.

**Grafik 6.** Senaryo 3'e Göre Atık Payları

Üçüncü senaryoda en az oranda market muhtelif gıda atıkları (MMGA) ve şeker fabrikası şilempesi (ŞFŞ) atığı kullanılırken en fazla büyükbaş hayvan dışkısı (BHD) atığı kullanılmıştır. Toplam biyogaz üretimi içindeki paya şeker pancarı mısır slaj atığı (ŞPMSA) sahiptir. Buna karşılık toplam atık gideri içindeki en fazla paya buğday samanı (BS) atığı sahiptir.

Grafik 7'de dördüncü senaryo için atıkların kullanım durumları gösterilmektedir:



Not: Grafik yazar tarafından oluşturulmuştur.

**Grafik 7.** Senaryo 4'e Göre Atık Payları

Dördüncü senaryoda en fazla büyükbaş hayvan dışkısı (BHD) atığı kullanılırken en az oranda buğday samanı (BS), arpa samanı (AS), şeker pancarı mısır slaj atığı (ŞPMSA) ve şeker fabrikası şilempesi (ŞFŞ) kullanılmıştır. Toplam atık gideri içindeki paya en fazla sahip olan atık, şeker fabrikası şilempesi (ŞFŞ)'dir. Toplam biyogaz üretiminde en fazla paya sahip olan atık ise market muhtelif gıda atığı (MMGA)'dır.

## Sonuç

Bu çalışmada biyogaz tesislerinden elde edilebilecek verimlilik, oluşturulan senaryolar aracılığıyla analiz edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla tesislerin kapasitelerinde değişikliğe gidilmemiştir. Senaryolar ile analizlerin yapılması sayesinde kurulması planlanan tesislerin hedeflerine yönelik olarak en uygun miktarda atık miktarı ve atık türü ile çalışılmasını destekleyecek raporlar sunulmuştur.

Bir biyogaz tesisinde en yüksek verim ile çalışılmasını sağlamaya yönelik olarak oluşturulan dört senaryo üzerinden yapılan hesaplamaların sonuçları karşılaştırıldığında C/N katsayısının, karışım C/N oranının, elde edilecek saatlik biyogaz miktarının, biyogazın yıllık enerji değerinin, tesis ısı kapasitesinin, tesisin toplam gücünün, tesisin elektriksel gücünün, elde edilecek yıllık elektrik enerjisi miktarının, elde edilecek yıllık katı granül gübre miktarının, elde edilecek yıllık elektrik enerjisi tutarının, elde edilecek yıllık katı granül gübre tutarının en fazla 2. senaryoda olduğu görülmektedir. Buna karşılık en az C/N katsayısının, karışım C/N oranının, elde edilecek saatlik biyogaz miktarının, biyogazın yıllık enerji değerinin, tesis ısı kapasitesinin, tesisin toplam gücünün, tesisin elektriksel gücünün, elde edilecek yıllık elektrik enerjisi miktarının, elde edilecek yıllık katı granül gübre miktarının, elde edilecek yıllık elektrik enerjisi tutarının 1. senaryoda olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre 1. ve 2. senaryo karşılaştırıldığında 2. senaryoda yumurta tavukçuluğu dışkısının, şeker fabrikası şilempesinin 1. senaryoya göre daha fazla kullanıldığı görülürken 1. senaryoda büyükbaş hayvan dışkısının, pazar yeri bitkisel atıklarının 2. senaryoya göre daha fazla kullanıldığı görülmektedir. Genel olarak kıyaslandığında bütün senaryolarda en fazla büyükbaş hayvan dışkısı kullanılmıştır. En az kullanılan atıklar incelendiğinde 1. senaryoda en az oranda şeker fabrikası şilempesi, şeker pancarı yaprakları, arpa samanı, buğday samanı kullanılmıştır ve toplam atık gideri içindeki payı en fazla olan atık şeker fabrikası şilempesidir. Senaryo 2'de toplam atık kullanımındaki payı en az olan atıklar pazar yeri bitkisel atıkları ve arpa samanıdır. Toplam atık gideri içindeki payı en fazla olan atık 1. senaryoda olduğu gibi şeker fabrikası şilempesidir. 3. senaryoda toplam atık kullanımındaki payı en az olan atıklar market muhtelif gıda atıkları ve şeker fabrikası şilempesi iken toplam atık gideri içindeki payı en fazla olan atık buğday samanı iken en az olan market muhtelif gıda atıklarıdır. Senaryo 4'te toplam atık kullanımındaki payı en az olan atıklar buğday samanı, arpa samanı, şeker pancarı yaprakları ve şeker fabrikası şilempesi iken toplam atık gideri içindeki payı en fazla olan atık şeker fabrikası şilempesidir.

Atık birim fiyatı en yüksek olan şeker fabrikası şilempesi, en fazla 2. senaryoda kullanılmış olsa dahi en fazla verimin yine 2. senaryodan elde edilmesi, atık miktarlarının dağılımının hedeflere göre yapılması durumunda elde edilecek faydanın da yüksek olacağını göstermektedir.

Hali hazırda var olan veya kurulması planlanan tesisler için yol haritası olabilecek nitelikteki bu analiz, bir biyogaz tesisinde daha az maliyet ile daha fazla verime ulaşılabileceğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar ile enerji üretimi için optimal atık miktarı ve türü ile faaliyetlerin yürütülmesi sayesinde verimlilik, tasarruf, kalkınma, yeşil ekonomi, sıfır atık, endüstriyel simbiyoz yaklaşımlarına bütünsel fayda sağlanarak enerji ve kalkınma arasındaki dengenin kurulmasına katkı sağlanabileceği sonucuna ulaşılmaktadır.

## Kaynakça

- Al Seadi T., Rutz D., Prassl H., Köttner M., Finsterwalder T., Volk S., & Janssen R. (2008). *Biogas Handbook*, University of Southern Denmark Esbjerg, Denmark.
- Antonio da Silva Gonçalves V., & Mil-Homens dos Santos, FJ. (2019). Energy management system iso 50001:2011 and energy management for sustainable development. *Energy Policy*, 133(2019), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.07.004>
- Atelge, M. R., David, K., Kumar, G., Eskicioglu, C., Nguyen, D.D., Chang, S. W., Atabani, A.E., Al-Muhtaseb, A. H., & Unalan, S. (2020). Biogas production from organic waste: recent progress and perspectives. *Waste and Biomass Valorization*, 11(2020), 1019–1040. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-00546-0>
- Aydın, M., & Deniz, K. (2018). Atık yönetiminde vergi politikasının rolü: Türkiye değerlendirmesi. *Yönetim Bilimleri Dergisi*, 15(30), 435-461. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/comuybd/issue/36994/534515>

- Baş, K., (2018). *Türkiye’de sürdürülebilir enerji ve kooperatiflerin rolü*. [Yüksek Lisans tezi]. Trakya Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Bayraç, H. (2010). Enerji kullanımının küresel ısınmaya etkisi ve önleyici politikalar. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 11(2): 229-259. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ogusbd/issue/10998/131623>
- Belay, J. B., Habtu, N. G., Ancha, V. R. & Hussien, A. S. (2021). Alkaline hydrogen peroxide pretreatment of cladodes of cactus (*Opuntia ficus-indica*) for biogas production. *Heliyon* 7(2021), 1-7, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08002>
- Bozkurt, A.U., (2008). *Yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji verimliliği açısından değerlendirilmesi*. [Yüksek Lisans Tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Bozkurt, S., (2012). *Evsel nitelikli katı atıkların geri dönüşüm olasılıkları ve bertaraf yöntemlerinin araştırılması*. [Çevre Mühendisliği A.B.D. Doktora Tezi]. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Çallı, B. (2012). *Atıklardan Biyogaz Üretimi*. Türkiye Kimya Derneği-Genç Kimyacılar Platformu. <https://docplayer.biz.tr/7017926-Atıklardan-biyogaz-uretimi.html>
- Çetinkaya, M., S., (2019). *Sıfır atık yaklaşımının geri kazanılabilir atık kâğıt miktarı ve kalitesine etkisi: akdeniz bölgesi ve ege bölgesi pilot örnek* [Yüksek Lisans Tezi]. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Demircioğlu, E. N., & Ever, D. (2020). Döngüsel ekonomiye geçişte endüstriyel simbiyozun maliyetler üzerine etkisi. *Ç.Ü. Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 29(3), 461-473. <https://doi.org/10.35379/cusosbil.778908>
- Deviren, H., İlkılıç, C., & Aydın, S. (2017). Biyogaz üretiminde kullanılabilen materyaller ve biyogazın kullanım alanları. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 7(2), 79-88. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/buyasambid/issue/33195/339987>
- Eurostat, (2020). *Waste Generation by Economic Activities and Households, 2020*. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste\\_statistics#Total\\_waste\\_generation](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics#Total_waste_generation)
- Gülen, J., & Çeşmeli, Ç. (2012). Biyogaz hakkında genel bilgi ve yan ürünlerin kullanım alanları, *EÜFBED-Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(1), 65-84.
- İleri, H., (2014). Verimlilik, verimlilik ile ilgili kavramlar ve işletmeler açısından verimliliğin önemi. *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Meslek Yüksekokulu Dergisi*, 1(2), 820-844.
- İlkılıç, C., & Deviren, H. (2011, Mayıs 16-18). *Biyogazın üretimi ve üretimi etkileyen faktörler*. 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ.
- Kavak, K. (2005). *Dünya’da ve Türkiye’de enerji verimliliği ve türk sanayisinde enerji verimliliğinin incelenmesi* [Uzmanlık tezi]. Devlet Planlama Teşkilatı 2689 Nolu Yayını, Ankara.
- Koca, A. (2007). Yenilenebilir bir enerji kaynağı: biyogaz. *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, 5(3), 32-35.
- Koç, E., & Kaya, K., (2015). Enerji kaynakları-yenilenebilir enerji durumu. *Mühendis ve Makine Dergisi*, 56(668), 36-47. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/muhendismakina/issue/54338/736171>
- Kumar, R. & Kumar, A., (2024). Recent advances of biogas reforming for hydrogen production: Methods, purification, utility and techno-economics analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, xxx(xxxx)xxx, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.143>
- Lüle, F., (2018). Adıyaman ilinin enerji kaynakları potansiyeli. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi (Journal of Agricultural Machinery Science)*, 14(1), 1-5. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tarmak/issue/42371/510157>
- Mayaoğlu Akın, C., (2021). *Sıfır atık kapsamında endüstriyel simbiyoz ve atık borsası uygulamalarının incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Ege Üniversitesi.

- Obaideen, K., Abdelkareem, M.A., Wilberforce, T., Elsaid, K., Sayed, E.A., Maghrabie, H.M., Olabi, A.G. (2022). Biogas role in achievement of the sustainable development goals: evaluation, challenges, and guidelines. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 131(2022) 104207 journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jtice](http://www.elsevier.com/locate/jtice)
- Önder, H., (2018). Sürdürülebilir kalkınma anlayışında yeni bir kavram: döngüsel ekonomi. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, (57), 196-204. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/dpusbe/issue/38899/416907>
- Özbaşer, T., & Erdem, E. (2013). Biyogaz üretimi ve kullanımı. *Lalaban Hayvancılık Araştırma Enstitüsü Dergisi*, 53(2), 115-124. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/lahaed/issue/39457/465326>
- Özkan, A., Günkaya, Z., Özdemir, A., & Banar, M. (2018). Sanayide temiz üretim ve döngüsel ekonomiye geçişte endüstriyel simbiyoz yaklaşımı: bir değerlendirme. *Anadolu University Journal of Science and Technology B-Theoretical Sciences*, 6(1), 84-97. <https://doi.org/10.20290/aubtdb.332377>
- Petrecca, G. (2014). *Energy conversion and management principles and applications*. (3. Baskı). Switzerland: Springer International Publishing.
- Resmî Gazete, (2015). *Atık Yönetimi Yönetmeliği*. Sayı:29314
- Resmî Gazete, (2019). *Sıfır Atık Yönetmeliği*. Sayı:30829
- Rosha, P., Rosha, A. K., Ibrahim, H., & Kumar. S., (2021). Recent advances in biogas upgrading to value added products: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(41), 21318-21337. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.246>
- Sıfır Atık by evreka, (2018). *Entegre atık yönetimi hiyerarşisi nedir*. <https://sifiratik.co/2018/10/17/entegre-atik-yonetimi-hiyerarşisi-nedir>
- Solea Enerji, (2024). *Biyogaz için uygun hammaddeler*. <http://www.soleaenerji.com/>
- Song, Q., Li, J., & Zeng, X. (2015). Minimizing the increasing solid waste through zero waste strategy. *Journal Of Cleaner Production*, 104(2015), 199-210. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.027>
- Şenol, H., Elibol, E. A., Açikel, Ü. & Şenol, M. (2017). Türkiye’de biyogaz üretimi için başlıca biyokütle kaynakları. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 6(2), 81-92.
- Tachmitzaki, E.V., Didaskalou, E. A., & Georgakellos, D. A. (2019). Energy management practices’ determinants in greek enterprises. *Sustainability* 2020, 12(133). doi:10.3390/su12010133
- Tanç, A., & Ekinler, F. (2022). Sürdürülebilirlik raporları kapsamında işletmelerin sera gazı salımı: bist sürdürülebilirlik endeksinde bir araştırma. *Neşebir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi SBE Dergisi*, 12(3), 1876-1886. doi: 10.30783/nevsosbilen.1064985
- The World Bank, (2024). *The World Bank Data*. <https://data.worldbank.org/region/world?view=chart>
- Top, A., (2002). Verimlilik ve üretkenlik üzerine düşünceler. *Öneri Dergisi*, 5(17), 31- 34. doi: 10.14783/maruoneri.683345
- Tüik, (2021). *Atık İstatistikleri, 2020*. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Atik-Istatistikleri-2020-37198>
- World Energy Outlook Special Report (2020). *Outlook for biogas and biomethane*.
- Yıldız, A., Akgül, S., & Güvercin, S. (2018). Enerji verimliliği ve sanayideki uygulamaları. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 7(1), 16-22. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/duzceitbd/issue/37903/362117>
- Yılmaz, A., Ünvar, S., Koca, T., & Koçer, A. (2017) Türkiye’de biyogaz üretimi ve biyogaz üretimi istatistik bilgileri. *Technological Applied Sciences*, (2017), 12(4): 218-232. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/nwsatecapsci/issue/31523/339927>

## EXTENDED SUMMARY

Sustainable development and environmental awareness are becoming more and more dependent on consistent, secure, local, and eco-friendly energy sources. Increasing welfare is one of the most crucial aspects of implementing socioeconomic policies in this process, as it serves as the fundamental building block for addressing the requirements of coming generations. Energy is one of the most expensive production inputs that a country has to be able to access cheaply and easily in order to remain competitive.

In addition to ensuring that the energy demand is met, there are other factors to consider. Toxic gases are released when fossil fuels are used to meet energy needs, having a detrimental impact on the environment and society. Societies must concentrate on new, domestic, renewable resources to supply their energy needs in order to eliminate harmful repercussions. The amount of energy consumed rises annually, particularly in developing nations. However, a shortage of resources to supply energy demand has resulted in foreign dependency in many emerging nations. Because of this, diversifying one's energy sources and utilizing more renewable energy sources is now essential.

Utilizing animal manure as a renewable energy source allows for the generation of biogas, which helps meet energy demand without harming the environment. Greenhouse gas emissions are avoided, economic benefits are realized, and waste is decreased through the utilization of biogas production and waste which is regarded as "garbage" as a byproduct and an energy source.

In order to guarantee the most efficient operation of the facilities, calculations were conducted and scenarios were used to assess the efficiency status of biogas plants. Analyses were conducted with the facility's capacity held constant for this reason. Reports were given to the facilities that were supposed to be installed in order to make sure that they functioned with the best quantity and kind of trash, thanks to the analyses that were done using scenarios.

The investigation's findings are as follows:

- A biogas facility's intended installation's total power is determined by its thermal capacity.
- The facility's power increases as its thermal capacity does.
- Since daily and annual operation are consistent, the facility's electrical power determines the annual amount of electrical energy to be collected.
- The anticipated annual electrical energy output will rise in tandem with the increase in electrical power.
- As a byproduct of the biogas production process, soil-beneficial solid granular fertilizer is produced. The quantity of solid matter, the amount of trash to be utilized each day, the number of days to be worked each year, and the yield of organic solid fertilizer all affect how much solid granular fertilizer must be obtained annually.
- The amount of solid granular fertilizer fluctuates based on the amount of solid material and the amount of waste to be utilized daily, as the number of working days in a year and the yield of organic solid fertilizer are constant.
- The annual quantity of energy to be gained is contingent upon the annual quantity of energy to be obtained.
- The amount of solid granular fertilizer to be obtained annually is determined by the amount of organic solid fertilizer sold in units and the amount of solid granular fertilizer to be obtained annually.
- The amount of waste to be utilized each day, the waste's unit price, and the number of days to be worked each year all affect the waste's annual cost.
- The annual cost rises with increased trash utilization and higher unit pricing.

The sugar industrial mill with the highest unit price is not employed in the fifth scenario in this study's developed scenarios, which results in the lowest cost. Because the sugar plant mill is used to its maximum capacity in this scenario, the second scenario results in the highest cost. It is evident that the fifth scenario has the highest annual electrical energy requirements, annual solid granular fertilizer requirements, facility total power, and facility electrical power requirements. This demonstrates that a biogas plant can get greater efficiency at a reduced expense. This study concludes that by conducting activities with the ideal quantity and kind of waste for energy production, it can help establish the balance between energy and development by offering



comprehensive benefits to efficiency, savings, development, green economy, zero waste, and industrial symbiosis approaches. The study is intended to serve as a resource for the facilities that are planned to be installed.

Based on the study's findings, it is believed that employing various waste kinds as energy sources in biogas plants can lower greenhouse gas emissions—a issue that affects all nations—and promote environmentally sound practices. To maximize the anticipated return from these facilities, rigorous waste type selection is required while also supporting environmental policies. It follows that selecting the waste to be used in biogas facilities in a way that maximizes benefits will have an impact on both energy production and sustainability. For this reason, annual expenditures should be taken into account in addition to striving for high waste efficiency. However, it should be noted that the efficiency attained by biogas facilities is contingent upon the waste's composition and the features of the reactors employed. Reactor details are not provided since calculations were done under the premise that the facilities had the same attributes in every scenario that was developed for this study.

This study provides a roadmap for the facilities to carry out their operations over the long term without incurring additional expenditures by highlighting the necessity of thorough research in the waste selection process for biogas facilities. The analysis highlights the benefits of combining wastes that best meet the facility's objectives. These benefits include lower costs, less waste released into the environment, prevention of environmental pollution, decreased reliance on imported energy, and increased facility efficiency, all of which support the ongoing trend of sustainable development. Furthermore, financial help is required to boost biogas output in the utilization of renewable energy sources.