



Araştırma Makalesi – Research Article

Geliş Tarihi / Received: 09/09/2024

Kabul Tarihi / Accepted: 24/04/2025

Yayın Tarihi / Published: 30/11/2025

## **Tarımsal ve Hayvansal Atık Kaynaklı Biyogaz Enerjisi için Tekno-Ekonomik Analiz: Bilecik İli Örneği**

### **Techno-Economic Analysis of Biogas Energy from Agricultural and Animal Waste Sources: A Case Study of Bilecik Province**

Merve Göleç<sup>1\*</sup>, Samet Öztürk<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Bursa Teknik Üniversitesi/ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü/ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı/ Bursa, Türkiye/  
mervsvs@gmail.com/ <https://orcid.org/0000-0002-3583-1467>

<sup>2</sup> Bursa Teknik Üniversitesi/ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü/ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı/ Bursa, Türkiye,  
samet.ozturk@btu.edu.tr/ <https://orcid.org/0000-0002-5969-1534>

**Teşekkür:** Bu çalışma Merve Göleç'in Yüksek Lisans tezinden türetilmiştir.

**Etik Beyan:** Bu çalışmanın hazırlanma sürecinde bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan olunur.

**Yapay Zeka Etik Beyanı:** Yazar bu makalenin hazırlanma sürecinin hiç bir aşamasında yapay zekadan faydalanılmadığını; bu konuda tüm sorumluluğun kendisine(kendilerine) ait olduğunu beyan etmektedir.

**Çıkar Çatışması:** Çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

**Finansman:** Bu araştırmayı desteklemek için dış fon kullanılmamıştır.

**Lisans:** CC BY-NC 4.0

**Acknowledgements:** This study is derived from Merve Golec's Master's Thesis.

**Ethical Statement:** It is declared that scientific and ethical principles were followed during the preparation of this study and that all studies used are stated in the bibliography.

**Artificial Intelligence Ethical Statement:** The author declares that artificial intelligence was not utilized at any stage of the preparation process of this article and accepts full responsibility in this regard.

**Conflicts of Interest:** The author(s) has no conflict of interest to declare.

**Grant Support:** The author(s) acknowledge that they received no external funding to support this research.

**License:** CC BY-NC 4.0

## Tarımsal ve Hayvansal Atık Kaynaklı Biyogaz Enerjisi için Tekno-Ekonomik Analiz: Bilecik İli Örneği

### ÖZ

Günümüzde, dünya genelinde kullanılan enerji kaynaklarının büyük bir kısmı fosil yakıtlardan oluşmaktadır ve bu fosil kaynaklar gün geçtikçe tükenmektedir. Artan nüfus etkisiyle enerji talebi de aynı şekilde yükselmektedir. Ayrıca, fosil yakıtların kullanımı sırasında ortaya çıkan salınım çeşitli çevresel kirlilik sorunlarına neden olmaktadır. Bu sebeplerle, çevre dostu ve sürdürülebilir alternatif enerji kaynaklarına olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır. Buna yönelik olarak bu çalışmada, Bilecik ilinin hayvansal ve tarımsal atıklarıyla biyogaz enerjisi potansiyelinin belirlenmesi ve biyogaz tesislerinin tekno-ekonomik analizi yapılmıştır. Bilecik ilinde hali hazırda bir biyogaz tesisi bulunmamakta olup bu doğrultuda bilimsel çalışma eksikliği gözlenmektedir. Bu çalışma ile literatürdeki bu eksiklik giderilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, Bilecik iline ait hayvan sayıları ve tarımsal üretim verileri Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) aracılığıyla temin edilmiştir. Bu veriler kullanılarak, il sınırları içerisindeki büyükbaş hayvan ve yumurtacı tavuk atıkları ile fasulye, yeşil mercimek, nohut ve mısır hasıl atıklarından elde edilebilecek biyogaz potansiyeli ve bu potansiyele dayalı olarak gerçekleştirilebilecek elektrik üretimi hesaplanmıştır. Ayrıca, bu elektrik üretiminin sağlanabilmesi için gerekli olan enerji üretim tesislerinin kurulu güçleri hesaplanmıştır. Kurulu güce dayalı olarak maliyet analizi yapılmış ve tesis kurulumu için uygun ilçe belirlenmiştir. Elde edilen bulgulara göre, Bilecik ilindeki hayvansal ve tarımsal atıklardan elde edilebilecek biyogaz potansiyeli yıllık 4,5 milyon m<sup>3</sup> olup, bu biyogazdan yıllık 21,7 GWh elektrik enerjisi potansiyeli ve bu elektrik enerjisinin karşılık geldiği toplam kurulu güç 2,58 MW olarak hesaplanmıştır. Analiz sonuçları, şehirde kurulacak biyogaz tesisinin geri ödeme süresi 5,7 yıl olarak hesaplanmıştır.

**Anahtar Kelimeler-** *Bilecik, Hayvansal atık, Tarımsal atık, Biyogaz.*

### Öne Çıkanlar

- Bilecik ili genelindeki tarımsal ve hayvansal kaynaklı atıklardan biyogaz enerjisi teknik ve ekonomik açıdan irdelenmiştir.
- En fazla biyogaz potansiyeli büyükbaş hayvan atıklarından oluşmaktadır.
- Toplam biyogaz potansiyeli yıllık 4,5 milyon m<sup>3</sup> karşılık gelen elektrik enerjisi ise yıllık 21,7 GWh'tir.
- Tesis kurulumu için en uygun ilçe Merkez ilçesi olarak belirlenmiştir.
- Kurulacak biyogaz tesisinin geri ödeme süresi 5,7 yıldır.

## Techno-Economic Analysis of Biogas Energy from Agricultural and Animal Waste Sources: A Case Study of Bilecik Province

### ABSTRACT

Currently, a significant proportion of the energy resources utilized worldwide consists of fossil fuels, which are depleting steadily. The growing global population has also led to an increase in energy demand. Moreover, the use of fossil fuels results in emissions that contribute to various environmental pollution problems. For these reasons, interest in environmentally friendly and sustainable alternative energy sources is steadily growing. This study aims to determine the biogas energy potential from animal and agricultural waste in the Bilecik province of Türkiye and to perform a techno-economic analysis of biogas plants. Currently, there are no biogas facilities in Bilecik, and a lack of scientific studies on this topic has been observed. This research seeks to address this gap in the literature. To this end, data on livestock numbers and agricultural production in Bilecik were obtained from the Turkish Statistical Institute (TÜİK). Using this data, the potential biogas yield from cattle and laying hen waste, as well as soybean and corn silage residues within the province, was calculated, along with the corresponding electricity generation potential. Additionally, the required installed capacity for energy production facilities to harness this potential was determined. Based on the installed capacity, a cost analysis was conducted, and a suitable district for plant installation was identified. The findings revealed that the annual biogas potential from animal and agricultural waste in Bilecik is approximately 4.5 million m<sup>3</sup>. This biogas could generate an estimated 21.7 GWh of electricity

annually, corresponding to a total installed capacity of 2.58 MW. The analysis results indicate that the payback period for a biogas plant established in the region would be 5.7 years.

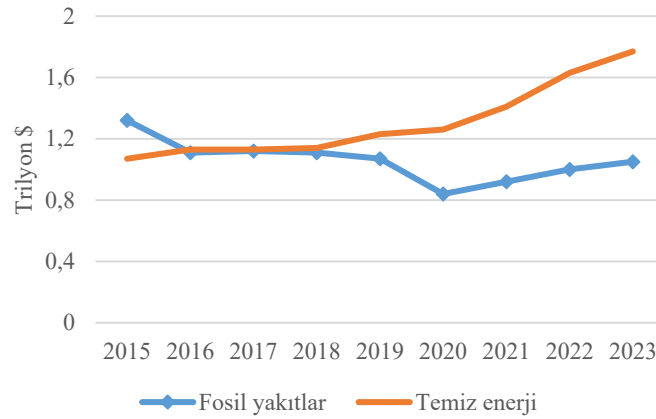
**Keywords-** *Bilecik, Animal waste, Agricultural residues, Biogas.*

### Highlights

- Biogas energy from agricultural and animal waste was analyzed in the technical and economic aspects for Bilecik city.
- The greatest biogas potential is from cattle waste.
- Total biogas potential is 4.5 milyon m<sup>3</sup> per year and corresponding electrical energy is 2.7 GWh per year.
- The most suitable town for biogas plant location is Central town.
- The payback period for a biogas plant is 5.7 years.

## I. GİRİŞ

Dünyada insan nüfusunun artması ve sanayide, üretimde ve teknolojiye meydana gelen gelişmeler nedeniyle enerji ihtiyacı giderek artmaktadır. Buna karşın, fosil kaynakların kullanımı nedeniyle hava, toprak, su kirliliği ve küresel ısınma gibi çevresel tehlikeler daha fazla etkisini hissettirmektedir. Bu tehlikeleri azaltmak adına temiz enerji kaynaklarına olan yönelim artmaktadır. Fosil kaynaklar kömür, doğal gaz ve petrol temelli olup, temiz enerji kaynakları rüzgar, güneş, hidroelektrik, biyogaz ve nükleer gibi kaynaklardır. Şekil 1’de dünyada 2015-2023 yılları arasında birincil enerji kaynaklarına yapılan yatırım miktarları gösterilmiştir [1]. Buna göre 2018 yılından itibaren dünyada temiz enerjiye olan yatırım fosil kaynakları geçmiş olup 2020 yılından itibaren aralarındaki fark giderek açılmaktadır [1].



Şekil 1. Dünyada 2015-2023 yılları arasında fosil ve temiz enerji kaynaklarına yapılan yatırım değerleri [1]

Biyogaz enerjisi, hayvansal ve bitkisel atıklar, kanalizasyon atıkları ve diğer organik atıkların havasız ortamda çeşitli mikroorganizmaların bu atıkları çürütmesiyle elde edilen gazdan elde edilir [2]. Biyogaz ile hem atıkların olumsuz çevresel etkilerinin azaltılması hem de enerji üretilmesi sebebiyle biyogaz enerjisi son senelerde yatırımı artan bir enerji kaynağıdır. Dünyada biyogaz elektrik santrali kurulu gücü 2009 yılında 8280 MW iken, 2023 yılında bu değer 21.385 MW a yükselmiştir [3]. Benzer şekilde, 2010 yılında Türkiye’de büyük bir kısım tarım harici belediyesel ve gıda sanayi atıklarından biyogaz eldesi ile işleyen tesislerden oluşan 36 tane biyogaz enerji santrali bulunurken, 2023 yılı itibarıyla 106 adet tarımsal kaynaklı biyogaz santrali bulunmaktadır [4, 5].

Biyogaz enerjisi ısı ve elektrik olarak kullanılabilir. Biyogaz enerjisinden gelişmiş ülkelerin önemli ölçüde faydalandıkları bilinmektedir. Örneğin, Amerika Birleşik Devletlerinde yaklaşık olarak 2300 biyogaz santrali bulunduğu tahmin edilmektedir. Bunların 520’si hayvan çiftliklerinde havasız çürütme, yaklaşık 1100 tanesi atık su artıma tesislerindeki atıkları havasız çürütme, 110 tanesi yemek atıklarının havasız çürütme ile ve 575 tanesi de deponi gazının kullanılması ile işletilmektedir [6]. Bu anlamda Türkiye’deki biyogaz tesisi sayısı nüfusa oranla karşılaştırıldığında çok az sayıda olduğu görülmektedir [7]. Bununla beraber Türkiye’de biyogaz alanında potansiyelin kullanılabilmesi için de çeşitli teşvikler sunulmuştur. Bunlara örnek olarak YEKDEM mekanizması sayesinde bir biyogaz tesisinden üretilen elektriğin alış fiyatı diğer santrallerden üretilen değerlere göre daha yüksek tutulmuştur [8]. Örneğin, biyometanizasyon yoluyla elektrik üreten tesislere verilen YEKDEM fiyatı, hidroelektrik, deniz üstü ve karasal rüzgar ve güneş enerji sistemlerinden daha fazladır [8]. Bu doğrultuda, bu alanda Türkiye’de yapılan biyogaz araştırmalarına katkıda bulunmak ve potansiyeli olan ancak daha önce çalışma yapılmamış bir coğrafi bölge üzerinde çalışma yapmak önemli bir husus durumuna gelmektedir. Bu

çalışmanın araştırma sorusu Bilecik ilinde tarımsal ve hayvansal atıklardan değerlendirilebilecek potansiyel ile biyogaz tesisi kurulabilir mi, kurulabilir ise hangi ilçede kurulmalıdır, şeklindedir. Bilecik ilinin bu makalede seçilmesinin ana nedeni tarımsal ve hayvansal atıkların değerlendirildiği bir tesisin hali hazırda bulunmadığının tespit edilmesi ve böyle bir çalışmanın literatüre ve bölgeye çevresel ve ekonomik faydasının olabileceği kanaatinin oluşmasıdır.

## II. LİTERATÜR ÖZETİ

Türkiye’de iller bazında hayvansal ve tarımsal atıklardan biyogaz potansiyelinin belirlenmesine yönelik olarak literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Karaca (2017) Hatay ilinin, Altıkat ve Çelik (2012) Iğdır ilinin, Yetiş vd. (2019) Bitlis ilinin, Çağlayan ve Koçer (2014) Muş ilinin, Ay ve Kaya (2020) Kahramanmaraş ilinin, Seyhan ve Badem (2018) Erzincan ilinin ve Kandemir ve Açıkkalp (2019) Bilecik ilinin sadece hayvansal atık kaynaklı biyogaz potansiyelini araştırmıştır [9-15]. Bunun yanında hem tarımsal hem hayvansal atık kaynaklı biyogaz potansiyelini araştıran çalışmalar da olmuştur. Aybek vd. (2015) Kahramanmaraş ilinin ve Akbulut ve Dikici (2004) Elazığ ilinin biyogaz potansiyelini hayvansal ve tarımsal atıkları değerlendirerek hesaplamıştır [16, 17]. Ayrıca kentsel atıkların da dahil edildiği çalışmalar da mevcuttur [18, 19]. Literatürdeki çalışmaların özetlendiği Tablo 1 çalışmaların kapsamını ve bulduğu önemli sonuçları listelemiştir.

**Tablo 1.** Türkiye illeri için biyogaz enerjisi potansiyeline yönelik literatürdeki çalışmalar

| Yayın başlığı                                                                                                                    | Yıl  | Kapsam                                                                    | Bulgular                                                                                                                                                                                                                          | Kaynak |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Elazığ İlının Biyogaz Potansiyeli ve Maliyet Analizi                                                                             | 2004 | Büyükbaş, küçükbaş, kanatlı hayvanlar ve tarla bitkileri                  | 43,2 milyon m <sup>3</sup> /yıl hayvan atıklarından, 267 bin m <sup>3</sup> tarla bitkileri atıklarından biyogaz                                                                                                                  | [17]   |
| Iğdır İlının Hayvansal Atık Kaynaklı Biyogaz Potansiyeli                                                                         | 2012 | Büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvanlar                                   | 21,44 milyon m <sup>3</sup> /yıl biyogaz                                                                                                                                                                                          | [10]   |
| Muş İlinde Hayvan Potansiyelinin Değerlendirilerek Biyogaz Üretiminin Araştırılması                                              | 2014 | Büyükbaş ve küçükbaş hayvanlar                                            | 79,94 milyon m <sup>3</sup> /yıl biyogaz                                                                                                                                                                                          | [12]   |
| Kahramanmaraş İlinde Bazı Tarımsal Atıkların Biyogaz Enerji Potansiyelinin Belirlenerek Sayısal Haritalarının Oluşturulması      | 2015 | Büyükbaş, küçükbaş, kanatlı hayvanlar ve tarla bitkileri                  | Hayvan atıklarından 2.077 TJ/yıl ve tarım atıklarından 100 TJ/yıl enerji                                                                                                                                                          | [16]   |
| Bursa İli Tarımsal Organik Atık Kaynaklı Biyogaz Potansiyeli ve Biyogazın Dizel Motorlarda Yakıt Olarak Kullanımının İncelenmesi | 2015 | Büyükbaş, küçükbaş, kanatlı hayvanlar, tarla bitkileri ve kentsel atıklar | Hayvan atıklarından 49,6 milyon m <sup>3</sup> /yıl biyogaz, atık su arıtma çamurundan ve kentsel atıklardan 1 milyon m <sup>3</sup> /yıl metan, tarımsal atıklardan 636,6 milyon m <sup>3</sup> /yıl biyogaz potansiyeli         | [19]   |
| Hatay İlının Hayvansal Gübre Kaynağından Üretilen Biyogaz Potansiyelinin Belirlenmesi                                            | 2017 | Süt sığırı ve yumurta tavuğu                                              | 15 milyon m <sup>3</sup> /yıl biyogaz                                                                                                                                                                                             | [9]    |
| Biyogaz Üretimi İçin Ankara’nın Başlıca Organik Atık Kaynakları                                                                  | 2017 | Büyükbaş, küçükbaş, kanatlı hayvanlar, tarla bitkileri ve kentsel atıklar | Hayvan atıklarından 99,8 milyon m <sup>3</sup> /yıl, atık su arıtma çamurundan 188,1 milyon m <sup>3</sup> /yıl, tarımsal atıklardan 13,9 milyon m <sup>3</sup> /yıl, mutfak atıklarından 58,5 milyon m <sup>3</sup> /yıl biyogaz | [18]   |
| Erzincan İlindeki Hayvansal Atıkların Biyogaz Potansiyelinin Araştırılması                                                       | 2018 | Büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvanlar                                   | 15 milyon m <sup>3</sup> /yıl biyogaz                                                                                                                                                                                             | [14]   |
| Bilecik İli Hayvansal Atıklarının Biyogaz Potansiyelinin İncelenmesi                                                             | 2019 | Büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvanlar                                   | 60 milyon m <sup>3</sup> /yıl biyogaz                                                                                                                                                                                             | [15]   |
| Hayvansal Atık Kaynaklı Biyogaz Potansiyeli: Bitlis Örneği                                                                       | 2019 | Büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvanlar                                   | 21,46 milyon m <sup>3</sup> /yıl biyogaz                                                                                                                                                                                          | [11]   |
| Kahramanmaraş İlının Hayvansal Atık Kaynaklı Biyogaz Potansiyeli                                                                 | 2020 | Büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvanlar                                   | Yaş hayvan atığı 1,69 milyon ton/yıl ve 70 milyon m <sup>3</sup> /yıl biyogaz, 326 GWh/yıl elektrik enerjisi                                                                                                                      | [13]   |

Bunların yanında ülkemizde tarımsal ve hayvansal atıkların biyogaz potansiyellerini inceleyen birçok laboratuvar ve pilot ölçekli çalışma da bulunmaktadır. Tufaner (2020) zeytin karasuyunun biyogaz üretim potansiyelini laboratuvar ölçekli olacak şekilde araştırmıştır [20]. Karagöz (2016) pilot ölçekli bir biyogaz sistemi ile büyükbaş hayvan atığı, peynir altı suyu ve tavuk atığında biyogaz üretimi gerçekleştirmiştir [21]. Uçar vd. (2021) pilot ölçek bir biyogaz reaktörü ile farklı parametrelerin biyogaz verimine etkisini araştırmıştır [22]. Ayrıca, sınırlı da olsa literatürde bir biyogaz tesisinin kuruluşu ile elde edilecek elektrik miktarını, yatırım bedellerini ve yatırıma elverişliliğini il bazında araştıran çalışmalar bulunmaktadır [23, 24].

Uluslararası literatürde de özellikle Avrupa’da biyogaz kullanımının yaygın olduğu ve sera gazı azaltım hedefleri doğrultusunda daha da yaygınlaştırılması beklenmektedir. Zupancic vd. (2022) bazı Avrupa ülkelerinin biyogaz alanındaki mevcut durumlarını ve hedeflerini göstermişlerdir [25]. Pavicic vd. (2022) ise Avrupa’daki biyogaz gelişiminin avantajları ve önündeki engelleri belirtmişlerdir [26]. Pablo-Romero vd. (2017) ise Avrupa’daki biyogaz enerjisi için uygulanan teşvik ve destek mekanizmalarını incelemiştir [27]. Türkiye’de de Paris İklim Anlaşması’na taraf olması nedeniyle sera gazı azaltım hedefleri bulunmakta olup bu doğrultuda gelecekteki biyogaz potansiyeli araştırılmıştır [28, 29].

Literatürdeki çalışmalara bakıldığında Bilecik ili için hem hayvansal hem tarımsal atıkların değerlendirildiği bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenlerden dolayı literatürde bir boşluk bulunmaktadır. Bu çalışma literatürdeki bu boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır.

### III. MATERİYAL VE YÖNTEM

#### A. Materyal

1. *Bilecik ili ve ilgili veriler:* Bilecik, Marmara Bölgesi’nin güneydoğu kesiminde yer alır ve Marmara, Karadeniz, İç Anadolu ile Ege bölgelerinin kesişim noktasındadır. Coğrafi olarak 39° ile 40° 31' kuzey enlemleri ile 29° 43' ve 30° 41' doğu boylamları arasında konumlanmıştır. Bilecik, 4307 km<sup>2</sup>’lik yüzölçümü ile Türkiye’nin küçük illeri arasında bulunur ve alan büyüklüğü açısından 65. sırada sıralanmıştır. İlin merkez ilçesi ise 841 km<sup>2</sup> genişliğindedir [30].

Bilecik ilinin arazisi, tepelik bölgeler, keskin ve derin vadiler ile erozyona uğramış düzlüklerden oluşmaktadır. İl, Kuzey Anadolu sıradağlarının, yani Karadeniz Dağları’nın başladığı, İç Anadolu platolarının kıyısının ve Marmara Bölgesi’nin akarsu vadileri ile kıyı ovalarının sonlandığı yerde yer almaktadır. Şekil 2’de Bilecik ilinin harita görünümü yer almaktadır.



Şekil 2. Bilecik İli Harita Görünümü [31]

Araştırma kapsamında, Bilecik ili ve ilçelerinde tarımsal ve hayvansal kaynaklı üretilebilecek biyogaz potansiyeli hesaplanmaya çalışılmıştır. Bu kapsamda Bilecik ili ve ilçelerine ait tarımsal üretim faaliyetlerini oluşturan bitkisel üretim miktarları ve hayvan varlıkları belirlenmiştir. Bu çerçevede TÜİK verileri kullanılmıştır [32].

2. *Bir biyogaz tesisinin bileşenleri:* Literatürde bir biyogaz tesisin bileşenleri genel olarak aşağıdaki şekilde belirtilmiştir [2].

*Atık hazırlama veya kabul birimi:* Elde edilen katı atıkların biyogaz tesisine eklenmeden biriktirildiği ve değişik hammaddelerin kuru madde oranına göre karışımının düzenlendiği ön depolama alanıdır.

*Reaktör:* İstenen kuru madde oranına getirilen hammaddenin biyogaz üretimi amacıyla bakteriler ve metanogenik arkeleri içeren anaerobik mikrobiyal komünite tarafından çürütüldüğü tanktır. Reaktörde karıştırma sisteminin yanında ısıtıcı sistemleri de bulunmaktadır çünkü bakteri ortamının verimli çalışması için optimum sıcaklıkta tutulması gerekir.

*Son depo:* Biyogaz üretimi sonrası geriye kalan hammaddenin katı ve/veya sıvı olarak saklandığı alandır.

*Kojenerasyon birimi:* Biyogazın saflaşarak elektrik ve ısı enerjisine döndüğü birimdir.

*Separatör:* Fermantör sonrası hammaddenin katı ve sıvı olarak ayrıldığı ekipmandır.

*Gaz boruları/vanaları ve bağlantı elemanları:* Biyogazın taşınması için kullanılan, genellikle paslanmaz çelikten yapılmış borular ve bağlantı elemanlarıdır.

*Isıtma sistemleri:* Fermantörün optimum biyogaz üretimi için belirli bir sıcaklıkta tutulmasını sağlayan sistemlerdir.

*Pompalar:* Hammaddenin farklı üniteler arasında taşınmasını sağlayan ekipmanlardır.

*Karıştırıcılar:* Hammaddenin fermantörde ve ön depolama alanında çökmesini önlemek için kullanılan cihazlardır.

## B. Yöntem

1. *Biyogaz ve enerji üretim potansiyeli hesabı:* Bu çalışmada uygulanan yöntem Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Bu çalışmada uygulanan yöntemin şeması

Tablo 2’de Bilecik ilindeki yıllara göre tüm hayvan ve tarımsal bitki miktarları verilmiştir. Tabloda 2017 yılından itibaren ilgili üretim verileri sağlanmış olup yedi yıllık bir üretim geçmişinin verilmiş olması üretim miktarlarındaki değişimin takip edilmesi için sunulmuştur. Potansiyel hesabı işlemlerinde ise 2023 yılı verileri ele alınarak hesaplamalar yapılmıştır.

Tablo 2. Bilecik ilinde yıllara göre hayvan ve tarımsal bitki miktarları

| Yıllar | Büyükbaş Hayvan Sayısı (Adet) | Küçükbaş Hayvan Sayısı (Adet) | Kümes Hayvan Sayısı (Adet) | Buğday, Kara Buğday (ton) | Mısır (ton) | Arpa (Diğer) (ton) | Çavdar (ton) | Fasulye, Nohut, Yeşil Mercimek (ton) | Şeker Pancarı (ton) | Mısır Hasıl (ton) | Mısır Silaj (ton) |
|--------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------|--------------------|--------------|--------------------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|
| 2017   | 35.775                        | 140.137                       | 4.427.961                  | 68.019                    | 44          | 20.566             | 1.949        | 1.597                                | 4.252               | 2.411             | 31.574            |
| 2018   | 40.685                        | 155.191                       | 4.347.329                  | 57.543                    | 43          | 15.935             | 1.681        | 1.472                                | 4.158               | 2.555             | 26.440            |
| 2019   | 40.953                        | 187.952                       | 4.648.732                  | 67.852                    | 39          | 19.436             | 1.866        | 1.210                                | 3.679               | 2.389             | 27.773            |
| 2020   | 39.018                        | 192.814                       | 5.737.363                  | 83.293                    | 26          | 17.678             | 1.680        | 1.116                                | 5.131               | 1.426             | 31.147            |
| 2021   | 38.557                        | 202.466                       | 6.220.895                  | 75.968                    | 28          | 16.851             | 1.718        | 1.198                                | 5.774               | 1.392             | 30.617            |
| 2022   | 37.169                        | 190.270                       | 8.510.094                  | 70.612                    | 778         | 15.074             | 1.518        | 1.355                                | 4.806               | 1.350             | 30.719            |
| 2023   | 36.053                        | 173.479                       | 8.139.890                  | 73.234                    | 719         | 13.187             | 751          | 1.463                                | 3.428               | 1.041             | 23.033            |

Biyogaz potansiyeli hesaplayabilmek için hayvanlar ve bitkiler için ayrı ayrı çeşitli kabuller yapılması gerekmektedir. Pratikte, küçükbaş hayvan atıklarının toplanamamasından dolayı biyogaz için kullanılamadığı bilinmektedir. Bunun yanında, etçi tavuk atıkları kalorifik değerlerinin yüksek olmasından dolayı genellikle yakma prosesine dahil edilmektedirler. Ayrıca, arpa, çavdar, buğday sapları ve şeker pancarı atıkları genellikle hayvan yemi olarak kullanılmakta olup mısır silajı ve mısır üretimi sonrası kalan artıklar hayvan yemi ve yakma işlemleri için daha çok tercih edilmektedirler. Bu nedenlerden dolayı bu çalışmada hayvan artıkları büyükbaş ve yumurtacı tavuk, bitki artıkları için ise mısır hasılı, fasulye, nohut ve yeşil mercimek biyogaz potansiyeli hesabı için dahil edilmiştir.

Hayvan atıkları için yapılan kabuller hayvan canlı ağırlıkları, hayvan atıklarının toplanabilirlik oranları, atık üretme oranları şeklindedir. Tablo 3'te hayvan atıkları için yapılan kabuller listelenmektedir.

**Tablo 3.** Hayvan atıkları için yapılan kabuller [13, 33]

| Hayvan türü     | Hayvan sayısı | Atık Toplanabilirlik Oranı (%) TO | Hayvan türüne göre Atık miktarı (ton/yıl) | Biyogaz potansiyeli (m <sup>3</sup> /ton atık) | Elektrik üretim potansiyeli (kWh/m <sup>3</sup> biyogaz) |
|-----------------|---------------|-----------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Büyükbaş        | 36.053        | 0,65                              | 5,47                                      | 33                                             | 4,7                                                      |
| Yumurtacı Tavuk | 271.806       | 0,5                               | 0,022                                     | 78                                             | 4,7                                                      |

Hayvan atıkları için yaş ağırlık bazında potansiyel belirlenmesinde Denklem 1 kullanılmıştır [26].

$$YAM = \sum HS \times HTGAM \times TO \quad (1)$$

*YAM*: Yaş atık miktarı (ton/yıl), *HS*: Hayvan sayısı (adet), *HTGAM*: Hayvan türüne göre atık miktarı (ton/yıl) ve *TO*: Toplanabilirlik oranını belirtmektedir.

Tarımsal bitkiler için yapılan kabuller Tablo 4'te gösterilmiştir.

**Tablo 4.** Bazı tarla ürünleri için atık katsayıları ve kullanılabilirlik oranları [16, 34, 35]

| Bitki türü                     | Atık katsayısı (ton atık/ton üretim) | Kullanılabilirlik oranı | Biyogaz potansiyeli (m <sup>3</sup> /ton atık) | Elektrik üretim potansiyeli (kWh/m <sup>3</sup> biyogaz) |
|--------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Fasulye, Nohut, Yeşil Mercimek | 0,76                                 | 0,6                     | 20                                             | 4,7                                                      |
| Mısır Hasıl                    | 2,249                                | 0,6                     | 20                                             | 4,7                                                      |

Bitkisel atıkların kullanılabilir miktarlarının hesaplanabilmesi için Denklem 2 kullanılmıştır.

$$TKAM = \sum \ddot{U}M \times AK \times KO \quad (2)$$

*TKAM*: Teorik kullanılabilir atık miktarı (ton), *ÜM*: Üretim miktarı (ton), *AK*: Atık katsayısı (ton atık/ton üretim) ve *KO*: Kullanılabilirlik oranı anlamlarına gelmektedir.

Biyogaz üretim miktarlarının hesaplanabilmesi için ise öncelikle miktarı belirlenen atıkların ton başına biyogaz üretim potansiyeliyle çarpılması gerekir. Böylelikle toplam biyogaz miktarı hesaplandıktan sonra 1 m<sup>3</sup> biyogazdan elde edilebilecek elektrik miktarı ile çarpılarak yıllık üretilebilecek elektrik miktarı hesaplanmış olur.

Biyogaz tesisleri üretim yaparken tesis içerisinde elektrik tüketimi gerçekleşmektedir. Harcanan bu elektrik enerjisi miktarı iç tüketim olarak da adlandırılmaktadır. İç tüketim miktarını hesaplamak için Denklem 3 kullanılarak hesaplanabilir.

$$Pe = Ee \times \text{İç Tüketim Oranı} \quad (3)$$

*Pe*: İç tüketim miktarı (kWh/yıl) ve *Ee*: Tesisten üretilen elektrik miktarı (kWh/yıl) anlamlarına gelmektedir. Tesiste üretilen elektrik enerjisinden, tesisin elektrik ihtiyacı için kullanılacak olan elektrik miktarı oranını %18 kabul ederek hesaplamalar yapılmıştır [36].

Tesiste üretilen net elektrik için ise Denklem 4 kullanılmıştır.

$$Eenet = Ee - Pe \quad (4)$$

*Eenet*: Tesisin net elektrik tüketimi (kWh/yıl) ve *Pe*: İç tüketim miktarı (kWh/yıl) anlamlarına gelmektedir.

**2. Tesis gücünün hesaplanması:** Biyogaz tesislerinde gaz üretiminde kullanılacak kojeneratör (CHP) ünitesinin gücünün doğru şekilde belirlenmesi kritik bir öneme sahiptir. CHP ünitelerinin kapasitesinin tesisin ihtiyacından küçük seçilmesi durumunda, üretilen biyogazın tamamı kullanılamazken, fazla büyük seçilmesi durumunda ise CHP üniteleri tam kapasite çalıştırılmaz, elektrik üretim verimliliği düşer ve birim enerji başına düşen tamir ve bakım maliyetleri artar. Bu sebeple, tesisin planlama aşamasında kojenerasyon sisteminin doğru boyutlandırılması büyük önem taşır. Bu boyutlandırmanın doğru yapılabilmesi için öncelikle atık kaynaklarının

özelliklerinin doğru belirlenmesi gerekir. Böylelikle, biyogaz tesislerinde yıllık üretilecek elektrik miktarı kullanılarak CHP ünitesinin kurulu gücü hesaplanabilir. Ancak, hesaplanan bu değere tam olarak uyan bir CHP ünitesi bulmak genellikle zordur. Bu nedenle, hesaplanan değerin biraz üzerinde bir ünite tercih edilebilir.

Biyogaz tesislerinde CHP ünitesinin kurulu gücü Denklem 5 kullanılarak hesaplanabilir. Burada net elektrik üretimi değil, brüt elektrik üretimi ( $E_e$ ) dikkate alınmaktadır.

$$KJ = \frac{E_e}{K\check{c}} \quad (5)$$

$KJ$ : Kojeneratörün (CHP) kurulu gücü (kWe),  $E_e$ : Tesiste üretilen elektrik miktarı (kWh/yıl),  $K\check{c}$ : Kojeneratör yıllık çalışma süresi (saat) anlamlarına gelmektedir. CHP ünitesinin yıllık çalışma süresi 8200 saat olarak kabul edilmiştir [37].

3. *Tesisin maliyet analizi*: Bilecik ilinde bir biyogaz tesisi için yatırım yapılacak tutar, tahmini yıllık nakit kazancı ve yatırımın geri dönüş süresi hesaplanmıştır. Buna yönelik olarak literatürden maliyetler ile ilgili bazı kabuller aşağıda listelenmiştir.

1. Maliyet analizindeki sabit tesis yatırımı ve finansal maliyetler için literatürde yapılmış olan 3,29 MW kapasiteli bir tesis için yapılan işlerin maliyeti baz alınmıştır [38]. Burada her bir tesisi için ilk yatırım maliyetlerinde MW başına düşen maliyete göre oranlama kullanılmıştır.
2. Üretilen elektrik enerjisinin satın alımı için EPİAŞ (Enerji Piyasaları İşletme A.Ş.) tarafından belirlenen piyasa fiyatı kullanılmış olup 2024 yılı sonundaki EPİAŞ'ta gerçekleşen ortalama piyasa satış fiyatları referans alınmıştır. Birim elektrik satış fiyatı 2024 yılı Ağustos ayında, biyometanizasyon tesisleri için 294,67 kuruş olarak alınmıştır [8].
3. Biyogaz tesislerinin ömrü 25 yıl olarak kabul edilmiştir [39].
4. Personel ve lojistik maliyetlerinin toplam tutarını belirlemek için, 2022 yılında kullanılan bedeller 2024 yılı kuruna çevrilerek hesaplanmıştır [38].
5. Tesiste çalışacak personel sayısı 19 olarak belirlenmiştir [38]. Atık nakliye gideri için ise günlük 15 tane 25 ton kapasiteli kamyonun üretilen hayvansal ve bitkisel atıkları biyogaz tesisine taşıyacakları kabul edilmiştir [38].
6. Ağustos 2024 tarihli Amerikan Doları (USD) kuru baz alınarak 1 USD, 33 TL olarak kabul edilmiştir [40].
7. Arsa fiyatlandırılması için sanayi imarlı arsa tipi kabul edilmiştir [39].

Yukarıda bahsedilen kabullerden yola çıkarak ilk yatırım ve işletme giderleri literatürdeki çalışmalardan faydalanarak hesaplanmıştır [38, 39]. Amortisman süresi içinse basit geri ödeme süresi hesabı yapılmıştır. Buna göre toplam ilk yatırım bedeli yıllık net gelire bölünerek amortisman süresi belirlenmiştir.

4. *Tesis kurulumu için ilçelerin belirlenmesi*: Tesisin optimum konumunun belirlenebilmesi için, literatürde yapılan güncel çalışmalardan faydalanılmıştır. Ercan ve Pınarbaşı (2024) biyogaz tesisleri için yer seçimi yapılırken dikkat edilmesi gereken kriterleri belirlemişlerdir [41]. Bu kriterler arasında biyogaz potansiyeli ve taşıma maliyetinin yanında zeminin taşıma kapasitesi ve arazinin konumu ve yer altı ve yer üstü sularına uzaklık gibi kriterler bulunmaktadır. Bu çalışmanın kapsamı mikro yerleştirmeden ziyade ilçe bazlı biyogaz tesisi kurulumunun belirlenmesi olduğundan biyogaz potansiyeli ve taşıma maliyeti kriterleri baz alınarak işlem yapılmıştır [42]. Bu doğrultuda, Bilecik ili sınırları içerisinde bulunan ilçelerin hayvan varlıkları tespit edilmiş olup ayrı olarak da Bilecik ilinde yetiştirilen bitkilerin toplam yıllık miktarları tespit edilmiştir [32]. İlçeler bazında 2023 yılına ait hayvan sayıları ve toplam bitkisel üretim miktarları Tablo 5'te görülmektedir.

**Tablo 5.** Bilecik ilçeler bazında 2023 yılına ait hayvan sayıları ve bitkisel üretim miktarları [32]

| İlçeler   | Büyükbaş Hayvan (adet) | Yumurtacı Tavuk (adet) | Nohut (ton) | Yeşil mercimek (ton) | Fasulye (ton) | Mısır hasılı (ton) |
|-----------|------------------------|------------------------|-------------|----------------------|---------------|--------------------|
| Merkez    | 7.906                  | 3.993                  | 11          | 0                    | 199           | 0                  |
| Bozüyük   | 6.085                  | 192.635                | 778         | 5                    | 129           | 116                |
| Gölpazarı | 3.105                  | 67.708                 | 6           | 0                    | 53            | 0                  |
| İnhisar   | 233                    | 171                    | 0           | 0                    | 0             | 0                  |
| Söğüt     | 3.631                  | 1.481                  | 99          | 6                    | 0             | 0                  |
| Pazaryeri | 4.407                  | 1.200                  | 17          | 0                    | 105           | 175                |
| Yenipazar | 3.180                  | 1.310                  | 7           | 0                    | 10            | 0                  |
| Osmaneli  | 7.506                  | 3.308                  | 9           | 1                    | 28            | 750                |
| TOPLAM    | 36.053                 | 271.806                | 927         | 12                   | 524           | 1041               |

#### IV. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bilecik ili için yapılan biyogaz enerjisi için tekno-ekonomik analiz çalışmasından elde edilen bulgular biyogaz potansiyeli, enerji ve kurulu güç hesabı, maliyet hesabı ve enerji santralleri için yer seçimi alt başlıklarında sunulmuştur.

##### A. Biyogaz ve enerji üretim potansiyeli ve kurulu güç hesabı

Bilecik ili için biyogaz potansiyelinin belirlenmesi amacıyla ilk olarak ilde yıllık oluşan hayvansal ve tarımsal atık miktarları saptanmıştır (Tablo 6). Buna göre hayvansal atık miktarında büyükbaş ve yumurtacı tavuk atıkları potansiyel oluştururken mısır hasıl ve soya fasulyesi atıkları tarımsal olarak potansiyel oluşturan kaynaklardır. Biyogaz üretiminde en fazla potansiyel büyükbaş hayvan atıklarından gelmekte olup 4,2 milyon m<sup>3</sup>/yıl kadardır. Yumurtacı tavuk atıklarından gelen potansiyel ise 233 bin m<sup>3</sup> kadar olup onu 28 bin m<sup>3</sup> ile mısır hasıl atıkları takip etmektedir. En az biyogaz potansiyeli oluşturan atıklar ise yaklaşık 13 bin m<sup>3</sup> biyogaz potansiyeli ile arpa ve fasulye-nohut-yeşil mercimek atık grubundan gelmektedir. Toplamda Bilecik ili için biyogaz potansiyeli 4,5 milyon m<sup>3</sup> ve elektrik üretimi karşılığı ise 21,2 GWh olarak hesaplanmıştır.

**Tablo 6.** Hesaplanan hayvansal ve tarımsal metan potansiyeli ve karşılık gelen elektrik üretim miktarı

| Atık türü                      | Hayvan sayısı (adet) / Bitki Miktarı (ton) | Atık Toplanabilirlik Oranı (%) / Atık katsayısı (ton atık/ton üretim) | Hayvan türüne göre Atık miktarı (ton/yıl) / Kullanılabilirlik oranı | Toplam atık miktarı (ton/gün) | Üretilen biyogaz (m <sup>3</sup> /yıl) | Üretilen elektrik (MWh/yıl) |
|--------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------|
| Büyükbaş                       | 36.053                                     | 0,65                                                                  | 5,47                                                                | 351,20                        | 4.230.153                              | 19.882                      |
| Yumurtacı tavuk                | 271.806                                    | 0,50                                                                  | 0,022                                                               | 19,36                         | 233.210                                | 1.096                       |
| Fasulye, Nohut, Yeşil Mercimek | 1463                                       | 0,76                                                                  | 0,6                                                                 | 1,83                          | 13.343                                 | 62                          |
| Mısır Hasıl                    | 1041                                       | 2,25                                                                  | 0,6                                                                 | 3,85                          | 28.094                                 | 132                         |
|                                |                                            |                                                                       | TOPLAM                                                              | 376,23                        | 4.504.800                              | 21.172                      |

Hesaplanan elektrik enerjisinden yola çıkarak tesis kurulu gücü hesabı yapılabilir. Buna göre 21,2 GWh elektrik üretimi tüm yıl boyunca yapılacağından yıllık çalışma süresinin 8200 saat olması kabulüyle kurulu güç miktarı Denklem 5 kullanılarak 2,58 MW olarak belirlenmiştir.

##### B. Maliyet analizi

Bu çalışmada Bilecik ilinde ortaya çıkan hayvansal ve tarımsal atıkların değerlendirileceği biyogaz santral veya santrallerinin tekno-ekonomik değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu kısımda da maliyet ve geri ödeme değerleri sunulmuştur. Tablo 7’de ilk yatırım, işletme ve toplam maliyetler gösterilmektedir. Buna göre sabit tesis yatırımı ilk yatırım giderleri arasında en yüksek miktarı 2,5 milyon USD ile oluşturmakta olup, onu 344 bin USD ile finansal giderleri ve 91 bin USD ile arsa bedeli takip etmektedir. İşletme giderlerinde atık nakliye giderleri yaklaşık 195 bin USD ve personel giderleri ise yaklaşık 116 bin USD olarak tespit edilmiştir. Tesisin 25 yıllık işletme ömrü boyunca giderleri toplamı 7,8 milyon USD olarak hesaplanmış olup ilk yatırım maliyeti ve işletme giderleri toplamı yaklaşık 10,7 milyon USD olarak hesap edilmiştir.

**Tablo 7.** Bilecik ilinde oluşacak hayvansal ve tarımsal atıkların değerlendirileceği biyogaz tesisi için maliyetler [38, 39].

|                            | Gider Kalemleri               | Maliyet (\$) |
|----------------------------|-------------------------------|--------------|
|                            | A. Arsa Bedeli                | 90.909       |
| İlk Yatırım Giderleri (\$) | B. Sabit Tesis Yatırımı       | 2.285.243    |
|                            | C. Finansal Giderler          | 314.155      |
|                            | Atık Nakliye Giderleri        | 195.441      |
| İşletme Giderleri (\$/yıl) | Personel Giderleri            | 115.800      |
|                            | İşletme Giderleri (25 yıllık) | 7.781.023    |
|                            | Toplam Yatırım Tutarı         | 10.471.331   |

Gelir kalemi olarak da elektrik üretiminden elde edilecek kazanç baz alınmıştır. Bu doğrultuda, elektrik alım fiyatı YEKDEM tarafından belirlenen 294,67 kuruş/kWh kabul edilerek yıllık elektrik gelirinin belirtilen

USD kuru üzerinden 1,89 milyon USD olduğu saptanmıştır. Sadece elektrik geliri üzerinden ilk yatırım maliyetini basit geri ödeme süresi hesabı yapıldığında yaklaşık 5,7 yılda işletmenin amorti edeceği görülmektedir.

### C. Tesis kurulumu için ilçelerin belirlenmesi

Bilecik ilinin ilçelerindeki hayvan ve bitkisel atıklardan elde edilebilecek biyogaz miktarları Tablo 8’de verilmiştir. Bu çalışmada tesisin konumu belirlenirken biyogaz potansiyeli ve atık kaynaklarına yakınlık kriterleri yer seçimi için temel alınan kriterler olarak ele alınmıştır [42]. Buna göre, Bilecik şehri özelinde şehrin Merkez ilçesi en büyük biyogaz potansiyeline sahip ilçe durumundadır. Aynı zamanda Merkez ilçesi tüm ilçelere yaklaşık 40 km mesafededir. Bu nedenlerden dolayı lojistik maliyetlerin minimize edilmesi düşünüldüğünde ve hayvan sayıları ve bitki artıkları miktarları göz önüne alındığında Merkez ilçesinde biyogaz tesisinin kurulmasının mantıklı olacağı düşünülmektedir.

**Tablo 8.** İlçe bazlı toplam biyogaz potansiyelleri

| İlçeler   | Büyükbaş Hayvan (m <sup>3</sup> /yıl) | Yumurtacı Tavuk (m <sup>3</sup> /yıl) | Fasulye, nohut, yeşil mercimek (m <sup>3</sup> /yıl) | Mısır hasılı (m <sup>3</sup> /yıl) | Biyogaz potansiyeli (m <sup>3</sup> /yıl) |
|-----------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------|
| Merkez    | 927.623                               | 3.426                                 | 1.915                                                | 0                                  | 932.964                                   |
| Bozüyük   | 713.962                               | 165.281                               | 8.317                                                | 3.131                              | 890.691                                   |
| Gölpazarı | 364.314                               | 58.093                                | 538                                                  | 0                                  | 422.946                                   |
| İnhisar   | 27.338                                | 147                                   | 0                                                    | 0                                  | 27.485                                    |
| Söğüt     | 426.031                               | 1.271                                 | 958                                                  | 0                                  | 428.259                                   |
| Pazaryeri | 517.080                               | 1.030                                 | 1.113                                                | 4.723                              | 523.945                                   |
| Yenipazar | 373.114                               | 1.124                                 | 155                                                  | 0                                  | 374.393                                   |
| Osmaneli  | 880.690                               | 2.838                                 | 347                                                  | 20.241                             | 904.116                                   |
| TOPLAM    | 927.623                               | 3.426                                 | 1.915                                                | 0                                  | 4.504.799                                 |

### D. Tartışma

Bu çalışmada Bilecik ilinde hayvansal ve tarımsal atıkların oluşturabileceği biyogaz potansiyeli ve ona karşılık gelen elektrik üretim tesisinin kapasitesi ve fizibilitesi araştırılmıştır. Literatürdeki çalışmalar genelde bu çalışmada yapılan gerçek hayat kabullerini göz ardı etmiş olup çoğunlukla tüm hayvan ve tarımsal atıkların biyogaz tesislerinde değerlendirilebileceği kabulüyle potansiyel hesabı yapmışlardır. Ulusal literatürde, bu çalışmaya benzeyen Hatay ili için yapılan çalışmada süt sığırları ve yumurta tavuğundan oluşan atıkların hesaba katıldığı çalışma bulunmaktadır [9]. Hatay ili için yapılan çalışmada yıllık 15 milyon m<sup>3</sup> biyogaz potansiyeli hesaplanmış olup karşılık gelen elektrik üretim miktarı ise 37,7 GWh/yıl olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada bulunan 4,5 milyon m<sup>3</sup> biyogazın karşılığı olarak hesaplanan 21,2 GWh/yıl elektrik üretim miktarı farklılaşmasının ana sebebi Hatay ili için yapılan çalışmada hayvan atıklarının biyogaz potansiyelinde ve elektrik üretim miktarı hesabındaki farklılıklardır. Bir başka çalışmada ise Amasya, Çorum, Samsun ve Tokat illerinde yine sadece büyükbaş ve kanatlı hayvan atıklarının kullanılabilen biyogaz tesisi potansiyeli araştırması yaklaşık 170 milyon m<sup>3</sup>/yıl biyogaz ve buna karşılık gelen 382,8 GWh/yıl elektrik üretimi hesabı yapılmıştır [43]. Bu çalışmalardan farklı hayvan türleri için yıllık oluşturacakları atık miktarı ve bu atıkların ton başına biyogaz potansiyelleri kaynaklara göre farklılık gösterdiği anlaşılmaktadır. Balıkesir ili için yapılan fizibilite çalışmasında ise 188 bin ton hayvan atıklarından elde edilen biyogaz ile 24 GWh/yıl elektrik üretimi öngörülmüş olup bu çalışmanın verileriyle örtüştüğü görülmektedir [38]. Bunun sebebinin ise atıkların toplanabilirlik oranı, biyogaza dönüşme ve biyogazın elektrik enerjisine dönüşüm katsayılarının aynı olmasından kaynaklanmaktadır. Uluslararası literatüre bakıldığında, Yunanistan’ın Batı Makedonya bölgesi için yapılan bir çalışmada sadece tarımsal atıkların biyogaz potansiyeli belirlenmiş olup 551.400 ton/yıl yaş atığın 216 GWh/yıl elektrik üretim karşılığı olduğu saptanmıştır [44]. Lao PDR ülkesi için yapılan bir çalışmada ülkede oluşan yıllık 12,5 milyon ton tarımsal atığın 55.001 GWh/yıl elektrik enerji potansiyeli taşıdığı belirtilmiştir [45]. Uluslararası literatürdeki sonuçların da yaklaşık olarak bu çalışmanın sonuçlarının örtüştüğü görülmekle beraber farklılıkların ise yaş atıkların taşıdığı biyogaz potansiyellerinin ve bunların elektrik üretimi karşılıklarının farklılaşmasından kaynaklandıkları anlaşılmaktadır.

### V. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada TÜİK verileri kullanılarak hayvansal ve tarımsal atık miktarları saptanmış ve daha sonra bunlardan elde edilebilecek biyogaz potansiyeli ve buna karşılık gelen elektrik üretim miktarı hesaplanmıştır. Bilecik ilinde yıllık yaklaşık 4,5 milyon m<sup>3</sup> biyogaz ve buna karşılık gelen 21,2 GWh kapasiteli bir elektrik enerjisi potansiyeli saptanmıştır. Kurulu güç olarak 2,58 MW toplam kapasite bulunurken bu kapasitenin atık yoğunlukları göz önüne alınarak 1 biyogaz tesisi oluşturabileceği düşünülmektedir. Bir biyogaz tesisinin 25 yıllık tesis ömrü boyunca ilk yatırım ve işletme maliyetleri toplamı 10,7 milyon USD olarak hesaplanmış olup yıllık

1,89 milyon USD elektrik üretim getirisi olması beklenmektedir. Yatırımın basit geri ödeme süresi ise 5,7 yıl olarak tahmin edilmiştir. Biyogaz tesislerinde oluşacak atık ısı ve gübrenin değerlendirilmesi ile bu geri ödeme süresinin kısaltılması da mümkün olacaktır. Ayrıca, yatırımın hızlı dönüşü için detaylı fizibilite çalışması yapıp geri dönüş süresini kısaltabilecek noktalar tespit edilebilir. Daha detaylı bir çalışmada da biyogaz tesisi için çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak en uygun yer seçimi araştırılması yapılabilir.

#### KAYNAKLAR

- [1] IEA (2023), *World Energy Outlook 2023*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>, Licence: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A)
- [2] Kaya, D., & Öztürk, H. H. (2012). *Biyogaz teknolojisi: üretim-kullanım-projeleme*. Umuttepe Yayınları.
- [3] Statista. <https://www.statista.com/statistics/1032922/biogas-capacity-globally/>. (22.08.2024).
- [4] Ekinci, K. (2011). Regional Distribution of Animal Manure and Biogas Potential in Turkey. *1st Turkish German Biogas Project Workshop*. Izmir.
- [5] BiyogazDer. (2022). *2022 Yılı Yekdem Biyogaz Listesi*. <https://biyogazder.org/biyogaz-tesisleri/>.
- [6] American Biogas Council. *Biogas Market Snapshot*. <https://americanbiogascouncil.org/biogas-market-snapshot/>, (22.08.2024).
- [7] Biyoenerji Dergisi. *Türkiye'nin 35 milyar TL'lik gıda atığı biyogaz potansiyeli mi?* <https://biyoenerjidergisi.com/turkiyenin-35-milyar-tlik-gida-atigi-biyogaz-potansiyeli-mi/> (22.08.2024).
- [8] EPİAŞ. *Duyurular*. <https://www.epias.com.tr/tum-duyurular>, (20.11.2024).
- [9] Karaca, C. (2017). Hatay ilinin hayvansal gübre kaynağından üretilebilir biyogaz potansiyelinin belirlenmesi. *Mustafa Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 22(1), 34-39.
- [10] Altıkat, S., & Çelik, A. (2012). Iğdır ilinin hayvansal atık kaynaklı biyogaz potansiyeli. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 2(1), 61-66.
- [11] Yetiş, A. D., Gazizil, L., Yetiş, R., & Çelikezen, B. (2019). Hayvansal atık kaynaklı biyogaz potansiyeli: Bitlis örneği. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 7(1), 74-78.
- [12] Çağlayan, G., & Koçer, N. (2014). Muş ilinde hayvan potansiyelinin değerlendirilerek biyogaz üretiminin araştırılması. *Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(1), 215-220.
- [13] Ay, Ö., & Kaya, A. (2020). Kahramanmaraş ilinin hayvansal atık kaynaklı biyogaz potansiyeli. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 10(4), 2822-2830.
- [14] Seyhan, A. K., & Badem, A. (2018). Erzincan ilindeki hayvansal atıkların biyogaz potansiyelinin araştırılması. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 6(1), 25-35.
- [15] Kandemir, S. Y., & Açikkalp, E. (2019). Bilecik İli Hayvansal Atıklarının Biyogaz Potansiyellerinin İncelenmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(1), 104-108.
- [16] Aybek, A., Üçok, S., Bilgili, M. E., & İspir, M. A. (2015). Kahramanmaraş ilinde bazı tarımsal atıkların biyogaz enerji potansiyelinin belirlenerek sayısal haritalarının oluşturulması. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 29(2).
- [17] Akbulut, A., & Dikici, A. (2004). Elazığ ilinin biyogaz potansiyeli ve maliyet analizi. *Fırat Üniversitesi Doğru Araştırmaları Dergisi*, 2(2), 36-41.
- [18] Şenol, H., Elibol, E. A., Açikel, Ü., & Şenol, M. (2017). Biyogaz üretimi için Ankara'nın başlıca organik atık kaynakları. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(2), 15-28.
- [19] Ulusoy, Y., Arslan, R., Ulukardeşler, A. H., Kaplan, C., Kul, B., & Arslan, R. (2015). Bursa ili tarımsal organik atık kaynaklı biyogaz potansiyeli ve biyogazın dizel motorlarda yakıt olarak kullanımının incelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 29(2).
- [20] Tufaner, F. (2020). Zeytin Karasuyunun Anaerobik Artılabilirliği ve Biyogaz Üretim Potansiyelinin Araştırılması. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(4), 1766-1778.
- [21] Karagöz, M. (2016). Hayvansal atıkların kofermentasyonu ile biyogaz üretimi. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Doktora Tezi.
- [22] Uçar, İ. R., Özer, Z., & Sarıbyık, O. Y. (2021). Biyogaz Üretiminde Atıkların Verim Üzerine Etkilerinin Araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi dergisi*, 36(3), 581-589.
- [23] Aktaş, T., Özer, B., Soyak, G., & Ertürk, M. C. (2015). Tekirdağ ili'nde hayvansal atık kaynaklı biyogazdan elektrik üretim potansiyelinin belirlenmesi. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 11(1), 69-74.
- [24] Özer, B. (2013). Biogas potential of animal wastes for electricity generation in ardahan city of Turkey. *Causes, Impacts and Solutions to Global Warming*, 697-707.
- [25] Zupančič, M., Možic, V., Može, M., Cimerman, F., & Golobič, I. (2022). Current status and review of waste-to-biogas conversion for selected European countries and worldwide. *Sustainability*, 14(3), 1823.
- [26] Pavičić, J., Novak Mavar, K., Brkić, V., & Simon, K. (2022). Biogas and biomethane production and usage: technology development, advantages and challenges in Europe. *Energies*, 15(8), 2940.
- [27] Pablo-Romero, M. D. P., Sánchez-Braza, A., Salvador-Ponce, J., & Sánchez-Labrador, N. (2017). An overview of feed-in tariffs, premiums and tenders to promote electricity from biogas in the EU-28. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 1366-1379.

- [28] Pence, I., Kumaş, K., Cesmeli, M. S., & Akyüz, A. (2024). Future prediction of biogas potential and CH<sub>4</sub> emission with boosting algorithms: the case of cattle, small ruminant, and poultry manure from Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(16), 24461-24479.
- [29] Şenol, H., Çolak, E., & Oda, V. (2024). Forecasting of biogas potential using artificial neural networks and time series models for Türkiye to 2035. *Energy*, 131949.
- [30] Bilecik Valiliği. *Coğrafi yapı*. <http://www.bilecik.gov.tr/cografi-yapi>, (22.08.2024)
- [31] T.C. Milli Savunma Bakanlığı Harita Genel Müdürlüğü. *İndirilebilir il haritaları*. <https://www.harita.gov.tr/urun/bilecik-mulk-idare-il-haritasi/441>, (22.08.2024).
- [32] TÜİK. *Tarım*. <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=Tarim-111>, (22.08.2024).
- [33] Başçetinçelik, A., Karaca, C., Öztürk, H. H., Kacıra, M., ve Ekinci, K. (2005). Agricultural biomass potential in Turkey. In *Proceedings of the 9th International Congress on Mechanization and Energy in Agriculture and 27th International Conference of CIGR Section IV: The Efficient Use of Electricity and Renewable Energy Sources in Agriculture* (pp. 27-29).
- [34] Kestioğlu, P. D. (2016). DAP Bölgesi Kırsal Alanda Biyogaz Üretimine Yönelik Sektör Raporu Hazırlanması Projesi, Nihai Rapor. *Doğu Anadolu Kalkınma Ajansı*.
- [35] Karabaş, H. (2019). Sakarya ilinin bitkisel biyokütle açısından atık miktarının ve enerji potansiyelinin araştırılması. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 2(1), 35-43.
- [36] DAKA (2022). Van Büyükşehir Belediyesi Erçek Biyogaz Enerji Üretim Santrali projesi fizibilite raporu.
- [37] DOĞAKA (2020). Kahramanmaraş ilinde biyogaz tesisleri kurulmasına yönelik fizibilite raporu.
- [38] GMKA (2022). Balıkesir ili biyogaz sektörü. Ön fizibilite raporu.
- [39] BEBKA (2015). Nilüfer Belediyesi organik atıklardan biyogaz üretim tesisi fizibilite çalışması.
- [40] Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası. *Döviz kurları*. <https://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/TR/TCMB+TR/Main+Menu/Istatistikler/Doviz+Kurlari>, (15.04.2024).
- [41] Ercan, Z., & Pınarbaşı, M. (2024). Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Biyogaz Enerji Santrali Kuruluş Yeri Seçimi: Ankara İli Polatlı İlçesi İçin Bir Örnek. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 10(2), 395-408.
- [42] Osmaniye Belediyesi. Osmaniye ilinde hayvansal biyogaz ve enerji potansiyelinin araştırılmasına yönelik fizibilite raporu. <https://www.dogaka.gov.tr/assets/upload/dosyalar/osmaniye-belediyesi-biyogaz-fizibilite-raporu.pdf>.
- [43] Seyitoglu, S. S., Avcioglu, E., & Haboglu, M. R. (2022). Determination of the biogas potential of animal waste and plant location optimisation: A case study. *International Journal of Energy Research*, 46(14), 20324-20338.
- [44] Lampropoulos, A., Varvoutis, G., Athanasiou, C., & Marnellos, G. E. (2025). Assessing the electricity potential from agricultural residues in Western Macedonia, Greece. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 214, 115530.
- [45] Vongvisith, B., Wudi, Z., Fang, Y., Kai, W., Ming, L., Xiyan, J., ... & Hong, Y. (2018). Agricultural waste resources and biogas energy potential in rural areas of Lao PDR. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 40(19), 2334-2341.