



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**NEVŞEHİR İLİ HAYVANSAL ATIK KAYNAKLI BİYOGAZ
POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI VE DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali Osman KARAÇAM

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Gamze SÖNMEZ

AKSARAY, 2025

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 222301401 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi Ali Osman KARAÇAM tarafından hazırlanan “**NEVŞEHİR İLİ HAYVANSAL ATIK KAYNAKLI BİYOGAZ POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI VE DEĞERLENDİRİLMESİ**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Gamze SÖNMEZ

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Özlem GÜLLÜ

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Doç. Dr. Sezen KÜÇÜKÇONGAR

Konya Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Tez Savunma Tarihi: 12/06/2025

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Fazliye KARABÖRK

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinallliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

Ali Osman KARAÇAM

TEŞEKKÜR

Bu günlere gelmemde maddi ve manevi her türlü katkıyı veren sevgili aileme, eğitim hayatım boyunca gelişimimde payı olan bütün değerli hocalarıma, yüksek lisans öğrenimim boyunca desteklerini benden esirgemeyen ve bana yol gösteren tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Gamze SÖNMEZ'e sonsuz teşekkür ve minnetlerimi sunarım.

Ali Osman KARAÇAM

AKSARAY, 2025

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR BİLGİSİ.....	2
2.1 Enerji ve Etkileri	2
2.2 Yenilenebilir Enerjinin Önemi	3
2.3 Dünya’da Enerji Kaynakları.....	4
2.4 Türkiye’de Enerji Kaynakları.....	6
2.5 Biyokütle Enerjisi	10
2.6 Biyogaz ve Özellikleri.....	12
2.7 Biyogaz Oluşumunun Aşamaları.....	14
2.7.1 Hidroliz	16
2.7.2 Asidojenez	16
2.7.3 Asetojenez.....	17
2.7.4 Metanojenez (Metan Oluşumu).....	17
2.8 Biyogaz Üretimini Etkileyen Faktörler	18
2.8.1 Sıcaklık	19
2.8.2 Hidrolik bekleme süresi (HBS)	20
2.8.3 pH	21
2.8.4 Karıştırma	21
2.8.5 Karbon/Azot (C/N) oranı	22
2.8.6 Toksisite.....	23
2.8.7 Organik madde yükleme oranı	24
2.8.8 Katı madde içeriği.....	24
2.8.9 Alkalinite ve uçucu asitler.....	25
2.9 Biyogaz Üretiminde Kullanılan Teknolojiler	25
2.9.1 Kesikli fermentasyon	25
2.9.2 Beslemeli fermentasyon	26
2.9.3 Sürekli fermentasyon	26
2.10 Biyogazın Kullanım Alanları	27
2.10.1 Biyogazın ısıtmada kullanımı.....	27
2.10.2 Biyogazın aydınlatmada kullanımı.....	27
2.10.3 Biyogazın motorlarda kullanımı.....	28
2.11 Biyogaz Üretiminde Kullanılan Atıklar	28
2.11.1 Bitkisel atıklar	29
2.11.2 Hayvansal atıklar	30
2.11.3 Kentsel katı atıklar	32
2.12 Biyogaz Teknolojisinin Avantajları	33
2.13 Biyogaz Teknolojisinin Dezavantajları	35
2.14 Biyogaz Üzerine Yapılan Çalışmalar	36
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	39
3.1 Çalışma Alanı	39
3.2 Nevşehir İli Hakkında Genel Bilgiler.....	39

3.2.1 Tarihçe	39
3.2.2 Coğrafi konumu	39
3.2.3 Jeolojik yapı.....	41
3.2.4 İklim ve bitki örtüsü	41
3.2.5 Kültür ve turizm	42
3.2.6 Sosyal ve ekonomik yapı	42
3.2.7 Elektrik tüketimi	44
3.2.8 Hayvan varlığı.....	44
3.3 Biyogaz Potansiyeli İçin Kullanılan Yöntem	47
3.4 Biyogaz Tesisi Kurulum Maliyeti İçin Kullanılan Yöntem	49
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	50
4.1 Acıgöl İlçesi Hayvansal Atıkların Biyogaz Potansiyelinin Araştırılması	50
4.2 Avanos İlçesi Hayvansal Atıkların Biyogaz Potansiyelinin Araştırılması	52
4.3 Derinkuyu İlçesi Hayvansal Atıkların Biyogaz Potansiyelinin Araştırılması	53
4.4 Gülşehir İlçesi Hayvansal Atıkların Biyogaz Potansiyelinin Araştırılması	53
4.5 Hacıbektaş İlçesi Hayvansal Atıkların Biyogaz Potansiyelinin Araştırılması	54
4.6 Kozaklı İlçesi Hayvansal Atıkların Biyogaz Potansiyelinin Araştırılması	55
4.7 Merkez İlçesi Hayvansal Atıkların Biyogaz Potansiyelinin Araştırılması	56
4.8 Ürgüp İlçesi Hayvansal Atıkların Biyogaz Potansiyelinin Araştırılması.....	56
4.9 Nevşehir İli Hayvansal Atıkların Biyogaz Potansiyelinin Değerlendirilmesi	57
4.10 Biyogaz Tesisi Kurulumu ve Maliyeti.....	58
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	61
KAYNAKLAR.....	63
ÖZGEÇMİŞ.....	70

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NEVŞEHİR İLİ HAYVANSAL ATIK KAYNAKLI BİYOGAZ POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Ali Osman KARAÇAM

**Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Gamze SÖNMEZ

ÖZET

Küresel nüfus artışı ve teknolojik gelişmelerin hız kazanmasıyla birlikte enerji talebinde yaşanan sürekli artış, alternatif enerji kaynaklarına yönelimi zorunlu kılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, konvansiyonel olmayan yapıları, enerji tasarrufu konusunda sağladıkları katkı ve çevre dostu özellikleriyle mevcut enerji üretim yöntemlerine doğrudan bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada, ülkemizin enerjiye olan ihtiyacının bir bölümünün biyogaz enerjisinden karşılanabileceği düşüncesinden yola çıkılarak Nevşehir ili ve ilçelerindeki hayvansal atıkların biyogaz potansiyeli araştırılmıştır. Bu doğrultuda Türkiye İstatistik Kurumu'ndan (TÜİK) temin edilen Nevşehir ili büyükbaş, küçükbaş ve kümes hayvanlarına ait veriler üzerinden, literatürden seçilen uygun bir metot ile gerekli hesaplamalar yapılmıştır. İlçeler bazında yapılan hesaplamalar sonucunda Nevşehir ilinin toplanabilir faydalı gübre miktarı 1.438.299,3 ton/yıl, toplam biyogaz potansiyeli 40.114.885 m³ CH₄/yıl ve toplam elektrik üretim potansiyelinin 140.402,0 MWh/yıl olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca çalışmanın devamında Nevşehir ilinin toplam elektrik üretim potansiyelinin ilçelere göre dağılımı ve ilçelerin coğrafi konumu göz önünde bulundurularak biyogaz tesisi kurulumu için uygun bir model belirlenmiştir. Bu modelde 5 adet biyogaz tesisinin kurulacağı yerler, tesislerin kurulu güçleri ile kurulum maliyetleri incelenmiş ve değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Nevşehir, Yenilenebilir Enerji, Hayvansal Atık, Biyogaz, Elektrik.

Haziran, 2025; 71 sayfa

M.Sc. THESIS

INVESTIGATION AND EVALUATION OF THE BIOGAS POTENTIAL FROM ANIMAL WASTE IN NEVŞEHİR PROVINCE

Ali Osman KARAÇAM

**Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Environmental Engineering**

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Gamze SÖNMEZ

ABSTRACT

With the acceleration of global population growth and technological advancements, the continuous increase in energy demand necessitates the transition toward alternative energy sources. Renewable energy resources are considered a direct alternative to conventional energy production methods due to their non-traditional nature, contributions to energy conservation, and environmentally friendly characteristics. This study is based on the premise that a portion of Turkey's energy needs could be met through biogas energy, and accordingly, it investigates the biogas potential derived from animal waste in the province of Nevşehir and its districts. Using data obtained from the Turkish Statistical Institute (TÜİK) on cattle, small ruminants, and poultry populations in Nevşehir, calculations were carried out employing an appropriate method selected from the literature. As a result of the district-level analyses, it was determined that the total amount of collectable usable manure in Nevşehir province is 1,438,299.3 tons/year, the total biogas potential is 40,114.885 m³ CH₄ /year, and the total electricity generation potential is 140,402.0 MWh/year. Furthermore, in the subsequent phase of the study, the distribution of the total electricity generation potential across the districts of Nevşehir was examined. Taking into account the geographical locations of the districts, a suitable model for the establishment of biogas plants was proposed. In this model, the locations of five proposed biogas plants, their installed capacities, and installation costs were analyzed and evaluated.

Keywords: Nevşehir, Renewable Energy, Animal Waste, Biogas, Electricity.

June, 2025; 71 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Ülkemizde kaynaklara göre elektrik enerjisi üretimi ve paylarının yıllara göre değişimi.	4
Şekil 2.2. Ülkemizde elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı.	7
Şekil 2.3. Ülkemizde kurulu gücün yıllar itibariyle gelişimi.	8
Şekil 2.4. Ülkemizdeki kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı.	9
Şekil 2.5. Biyokütleden enerji üretim yöntemleri.	11
Şekil 2.6. Biyogaz üretim aşamaları.	15
Şekil 2.7. Metanojenlerin büyüme hızlarının sıcaklık etkisiyle değişimi.	19
Şekil 3.1. Nevşehir ilinin coğrafi konumu ve il haritası.	40
Şekil 3.2. Nevşehir ilinin son beş yıla ait nüfus verileri.	43
Şekil 3.3. Nevşehir ilinin son beş yıla ait elektrik tüketimi.	44
Şekil 3.4. Nevşehir ilinin son beş yıla ait büyükbaş hayvan miktarı.	45
Şekil 3.5. Nevşehir ilinin son beş yıla ait küçükbaş hayvan miktarı.	45
Şekil 3.6. Nevşehir ilinin son beş yıla ait kanatlı hayvan miktarı.	46
Şekil 4.1. Nevşehir ilinin biyogaz potansiyelinin ilçelere göre dağılımı.	58

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	Dünyada birincil enerji kaynakları tüketimi.	5
Çizelge 2.2.	Ülkemizdeki elektrik santrallerinin kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre 2013 ve 2023 yılları arasındaki gelişimi.	8
Çizelge 2.3.	Ülkemizde kurulu güç kapasitesi en büyük biyogaz enerji santralleri. .	9
Çizelge 2.4.	Biyogaz ile diğer gazların özelliklerinin karşılaştırılması.	12
Çizelge 2.5.	Biyogazın bileşimi.	13
Çizelge 2.6.	Biyogazın teknik özellikleri.	13
Çizelge 2.7.	Organik maddelerin C/N oranları.	23
Çizelge 2.8.	Biyogaz üretiminde kullanılan bazı bitkisel atıklar ve hacimce metan oranları.	30
Çizelge 2.9.	Hayvansal kaynaklardan elde edilebilecek biyogaz verimleri.	32
Çizelge 2.10.	Türkiye geneli büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvan sayılarına göre atık miktarları ve enerji eşdeğerleri.	32
Çizelge 3.1.	Nevşehir'in ilçelerindeki hayvan türleri ve miktarları.	46
Çizelge 3.2.	Nevşehir ili biyogaz potansiyelinin hesaplanmasında kabul edilen değerler.	47
Çizelge 4.1.	Acıgöl ilçesi hayvansal atıklarının biyogaz ve elektrik üretim potansiyeli.	51
Çizelge 4.2.	Avanos ilçesi hayvansal atıklarının biyogaz ve elektrik üretim potansiyeli.	52
Çizelge 4.3.	Derinkuyu ilçesi hayvansal atıklarının biyogaz ve elektrik üretim potansiyeli.	53
Çizelge 4.4.	Gülşehir ilçesi hayvansal atıklarının biyogaz ve elektrik üretim potansiyeli.	54
Çizelge 4.5.	Hacıbektaş ilçesi hayvansal atıklarının biyogaz ve elektrik üretim potansiyeli.	55
Çizelge 4.6.	Kozaklı ilçesi hayvansal atıklarının biyogaz ve elektrik üretim potansiyeli.	55
Çizelge 4.7.	Merkez ilçesi hayvansal atıklarının biyogaz ve elektrik üretim potansiyeli.	56
Çizelge 4.8.	Ürgüp ilçesi hayvansal atıklarının biyogaz ve elektrik üretim potansiyeli.	57
Çizelge 4.9.	İlçelerin biyogaz ve elektrik enerjisi üretim potansiyeli.	58
Çizelge 4.10.	Nevşehir ilinde kurulması planlanan tesislerin kurulu gücü ve maliyeti.	60

SİMGELER VE KISALTMALAR

AD	Anaerobik Sindirim
BEPA	Biyokütle Enerji Potansiyeli Atlası
C	Karbon
C/N	Karbon Azot Oranı
CH₃COOH	Asetik Asit
CH₄	Metan
CO	Karbonmonoksit
CO₂	Karbondioksit
ETKB	T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
GWh	Gigawattsaat
H₂	Hidrojen
H₂S	Hidrojen Sülfür
Kcal	Kilokalori
kg	Kilogram
kJ	Kilojoule
kWh	Kilowattsaat
LPG	Likit Petrol Gazı
m³	Metreküp
MJ	Megajul
MTEP	Milyon Ton Eşdeğer Petrol
MW	Megawatt
MWh	Megawattsaat
MWm	Megavat Mekanik Güç
TA	Toplam Alkalinite
TEİAŞ	Türkiye Elektrik Üretim A.Ş.
TEP	Ton Eşdeğer Petrol
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
TWh	Terawattsaat
VFA	Uçucu Yağ Asitleri

1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmelerin hız kazanması, sanayileşmenin yaygınlaşması ve dünya nüfusunun sürekli artması, endüstriyel üretimden günlük yaşama kadar birçok alanda enerjiye olan talebi her geçen gün daha da artırmaktadır (Koç ve Kaya, 2015). Enerji ihtiyacını karşılayabilen kaynaklar üç başlıkta incelenmektedir. Bunlar, yenilenebilir enerji kaynakları, fosil ve nükleer enerji kaynaklarıdır (Karaca, 2015). Fosil yakıt kaynaklarının limitli oluşu ve çevreye olan etkileri, bilim insanlarını yenilenebilir enerji kaynaklarının daha verimli ve yaygın kullanımı ile birlikte diğer alternatif enerji kaynaklarının kullanımı konularında arayışlara itmektedir (Mata-Alvarez vd., 2000). Bu arayışta öne çıkan yenilenebilir enerji kaynakları ile çevre dostu üretim sağlanabilmektedir. Bu tür enerji kaynakları, CO₂ salınımını azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunur. Ayrıca, yerli ve hızlı yenilenebilir özellikleri sayesinde enerji ithalatını azaltır ve istihdam olanaklarını artırır (Aktaş vd., 2015). Yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahip olan biyokütle, sürdürülebilir kalkınma modellerinde çevresel ve enerjisel yönleriyle öne çıkmaktadır. Biyokütle enerjisinin içerisinde yer alan biyogaz organik atıkların kullanılması ile elde edilir ve bu amaçla kullanılan organik atıklarından biri de hayvansal atıklardır. Ülkemizde hayvancılık faaliyetinin yaygın olarak yapılması, hayvansal atıkların ülkemiz için potansiyel bir enerji kaynağı olduğunu göstermektedir (Çağlayan ve Koçer, 2014).

Bu çalışmada; ülkemizin enerji sektöründe dışarıya olan bağımlılığının önüne geçmek, enerji maliyetlerini düşürmek ve yerli alternatif kaynaklara yönelmek üzere devam eden akademik çalışmalardan ilham alınarak Nevşehir ili ile ilçelerinin hayvansal atıklarının biyogaz potansiyeli araştırılmıştır. Bu maksatla literatürde bu konuda yapılan hesaplamalar ile elde edilen veriler yardımıyla, Nevşehir ilinin biyogaz potansiyelinin ilçelere göre dağılımı, biyogazdan üretilecek elektrik enerjisinin Nevşehir ilinin hâlihazırda enerji tüketiminin ne kadarlık kısmını karşılayabileceği, hangi ilçelere biyogaz enerji santrali inşa edilebileceği ve bu enerji santrallerinin kurulu gücünün ne kadar olması gerektiği değerlendirilmiştir. Son olarak ileride Nevşehir ilinde bu alanda yatırım yapılması durumunda fikir vermesi açısından inşa edilebilecek biyogaz tesislerinin kurulum maliyetlerinin ne kadar olacağı hesaplanmıştır.

2. LİTERATÜR BİLGİSİ

2.1 Enerji ve Etkileri

Enerji tüketimi, ülkelerin gelişmişlik seviyelerinin bir göstergesi olmasının yanı sıra, bireylerin konforlu bir yaşam sürdürebilmeleri için vazgeçilmez bir unsurdur. Nüfusun artması ve teknolojik gelişmelerle birlikte tüketim düzeyinin yükselmesi, enerji konusunu yalnızca küresel değil, ülkemiz açısından da öncelikli bir sorun haline getirmiştir. Yüzyıllardır insanoğlunun kullandığı enerji kaynakları kömür, doğal gaz ve petrol gibi fosil yakıtlardır. Fosil yakıtların kullanımı sera gazı emisyonlarında artışa yol açmakta, bu durum buzulların erimesine ve buna bağlı olarak deniz seviyesinin yükselmesine neden olmaktadır. Deniz seviyesindeki bu artış kıyı bölgelerindeki kara parçalarının sular altında kalmasına, bu bölgelerde yaşayan canlıların besin kaynaklarına ulaşmakta güçlük çekmelerine ve çevresel değişimlere uyum sağlamakta zorlanmalarına yol açmaktadır. Sonuç olarak, birçok tür habitatlarını terk etmek zorunda kalmakta ya da yok olma tehlikesiyle karşı karşıya gelmektedir. Özellikle kutup ekosistemlerinde yaşayan canlı türleri için bu süreç, türlerin neslinin tükenmesi riskini beraberinde getirmektedir.

Bu tür etkilere paralel olarak 1970’lerde yaşanan petrol krizi, fosil yakıtların sınırlı rezervlere sahip olduğu gerçeğini ortaya çıkarmıştır. Artan enerji ihtiyacının karşılanabilmesi amacıyla hem dünyada hem de ülkemizde yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik arayışlar son yıllarda önemli ölçüde hız kazanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları, kullanıldıklarında tükenmeyen ve kısa sürede doğal süreçler yoluyla yeniden oluşabilen sürdürülebilir enerji kaynaklarıdır. Fosil yakıtların aksine, bu tür kaynaklar daha düşük çevresel tahribata yol açmakta ve sera gazı üretimini önemli ölçüde azaltmaktadır. Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynakları yerli ve her coğrafyada üretilebilen kaynaklar olmaları nedeniyle enerjide kaynak çeşitliliği sağlamanın yanı sıra enerji arz güvenliğine katkıda bulunmakta ve dışa bağımlılığı azaltmaktadır. Yenilenebilir enerji türleri genel olarak güneş, rüzgâr, su (hidrolik), jeotermal, biyokütle, dalga ve hidrojen enerjisi şeklinde kategorilere ayrılmaktadır (Ergişi, 2019).

Bu kaynaklar arasında özellikle güneş ve rüzgâr enerjisi öne çıkmaktadır. Ancak bu kaynakların verimi çevresel ve meteorolojik koşullara bağlı olmakla birlikte, biyogaz

çevresel değişkenlerden bağımsız olarak üretilmektedir (Bal, 2021). Bu nedenle organik içerikli atıklardan biyogaz üretimi alternatif bir enerji kaynağı olarak ön plana çıkmaktadır. Biyogaz üretiminde organik atıkların kullanılması, yalnızca enerji elde edilmesine katkı sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda etkin bir atık yönetimi süreci sunarak atıkların çevresel etkilerinin azaltılmasına da olanak tanımaktadır (Mao vd., 2015).

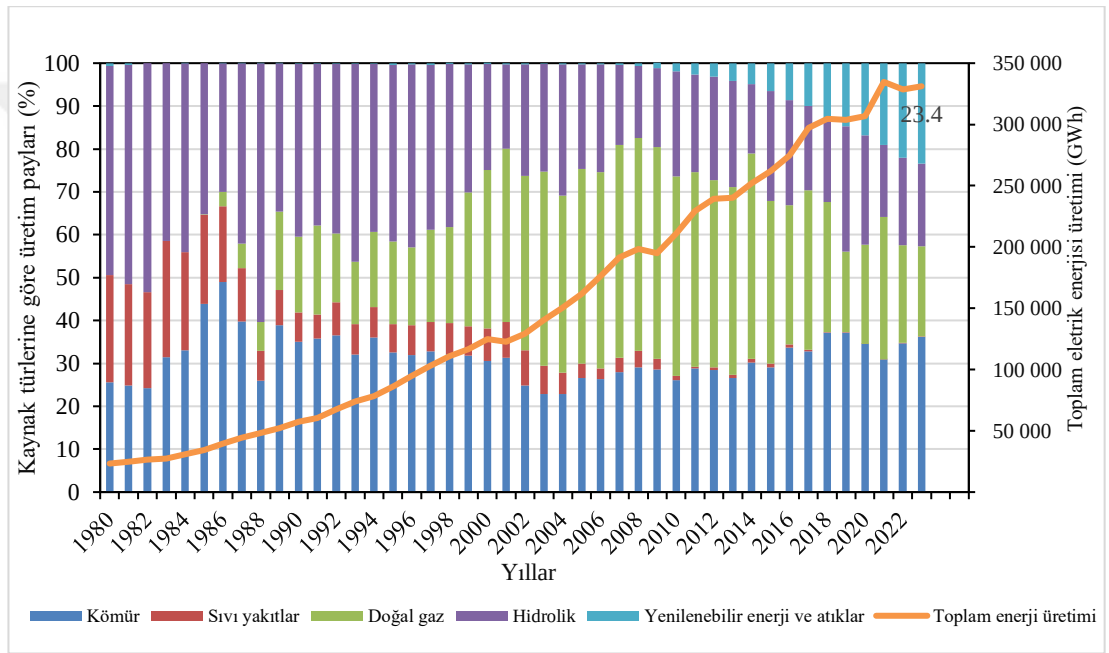
2.2 Yenilenebilir Enerjinin Önemi

Yenilenebilir enerji kaynakları, konvansiyonel olmayan yapıları ve çevre dostu özellikleriyle dikkat çekmektedir. Bu enerji teknolojileri, mevcut enerji üretim yöntemlerine doğrudan bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Yenilenebilir enerji kullanımı, enerji tasarrufunun artırılmasına olanak sağlamak ve fosil yakıtların yerine geçerek çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunmaktadır. Son yıllarda çevresel sorunların artış göstermesi, yenilenebilir enerji teknolojilerinin önemini daha da artırmış ve bu teknolojilerin çevre üzerindeki olumsuz etkilerin azaltılmasında kritik bir rol üstlenmesini sağlamıştır. Küresel nüfus artışıyla birlikte enerji talebinde yaşanan sürekli artış, alternatif enerji kaynaklarına yönelimi zorunlu kılmaktadır (Dey vd., 2022). Çevre koruma amacıyla yapılan uluslararası sözleşmeler, ülkeleri yenilenebilir enerji kullanımı konusunda teşvik etmektedir. Bu strateji, enerji kaynakları kısıtlı olan ülkeler açısından ihtiyaçların karşılanmasında verimli bir alternatiftir (Bal, 2021).

Ülkemizde yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretiminde kullanımı, 10 Mayıs 2005 tarihli ve 25819 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe giren 'Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretiminde Kullanımına İlişkin Kanun' ile yasal bir temele oturtulmuştur. Bu yasal düzenlemenin temel hedefleri arasında, yenilenebilir enerji kullanımını yaygınlaştırmak, sera gazı salımlarını azaltmak, atıkları değerlendirmek ve çevresel sürdürülebilirliği desteklemek yer almaktadır (URL-1).

Türkiye İstatistik Kurumu’ndan (TÜİK) elde edilen veriler doğrultusunda 1980-2023 arası Türkiye için enerji kaynaklarına göre elektrik enerjisi üretimi ve oranları Şekil 2.1’de verilmiştir. Şekil 2.1’de görüldüğü üzere yenilenebilir enerji kaynaklarında elde edilen enerji miktarının 1980’li yıllarda %0,6 veya daha az oranlarda iken özellikle

2010 itibariyle bu değerde dikkat çekici bir artışın başladığı ve 2023 yılı itibariyle yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin toplam elektrik enerji üretiminin %23,4'lük bir orana karşılık geldiği görülmektedir. Kanunun yürürlüğe girdiği 2005 yılında ülkemizin toplam elektrik üretimi 161,96 TWh iken bunun yalnızca 39,84 TWh'lik kısmı yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmıştır. 2025 yılı başına gelindiğinde ülkemizin toplam elektrik üretimi olan 348,9 TWh'e ulaşmış olup, bunun 160,1 TWh'i yenilenebilir enerji kaynakları ile üretilmektedir. Eldeki verilere bakıldığında yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretimi 20 yılda dört katına çıkmış olduğu görülmektedir (URL-2).



Şekil 2.1. Ülkemizde kaynaklara göre elektrik enerjisi üretimi ve paylarının yıllara göre değişimi.

2.3 Dünya'da Enerji Kaynakları

Küresel ölçekte enerji tüketimi, bölgesel farklılıklar olsa da ekonomik büyüme, teknolojik ilerleme ve nüfus artışı gibi etkenler doğrultusunda sürekli artış göstermektedir. Bu artışın önümüzdeki yıllarda da devam etmesi beklenmektedir (Çizelge 2.1). Yapılan projeksiyonlara göre 2010-2040 yılları arasında dünya genelinde birincil enerji tüketiminin %56 oranında artacağı öngörülmektedir. Ancak enerji talebindeki bu artış, tüm ülkelerde aynı düzeyde gerçekleşmeyecektir (Yılmaz, 2012).

Çizelge 2.1. Dünyada birincil enerji kaynakları tüketimi.

Kaynak Türü	1980		1990		2000		2011		2035	
	MTEP*	%	MTEP	%	MTEP	%	MTEP	%	MTEP	%
Petrol	3107	43	3230	37	3649	36,4	4130	31,5	5053	27
Kömür	1788	24,8	2331	25	2295	22,9	3776	28,8	5523	30
Doğal gaz	1235	17	1668	19	2088	20,8	2793	21,3	4380	23
Nükleer	186	2,6	526	6	675	6,7	669	5,1	1019	5
Hidrolik	148	2,1	184	2	225	2,3	301	2,3	460	2
Biyokütle	748	10,4	903	10	1045	10,4	1313	10	1741	9
Diğer	12	0,1	36	0,4	55	0,5	131	1	501	3
Toplam	7234	100	8779	100	10034	100	13113	100	18676	100

*Milyon ton eşdeğer petrol

Dünyadaki yükselen enerji talebinin, çevreyi kirletmeden ve sürdürülebilir bir şekilde karşılanabilmesi için biyokütle enerjisi belki de en önemli kaynaklardan biridir. Gübre ve atık su, binlerce yıldır enerji üretimi için kullanılmaktadır. Biyogazın kullanımına dair ilk kayıtlar yaklaşık 2000 yıl öncesine, Asya'ya dayanmaktadır. 1800'lü yıllarda Çin'de ve Hindistan'da, biyogazın su ısıtma maksatlı kullanıldığı bilinmektedir. Teknolojik gelişmelerle üretim artmış, I. Dünya Savaşı'ndan önce biyometan 1920'lerde gaz dağıtım şebekelerine dâhil edilmiştir. 1949'dan itibaren sıkıştırılmış biyogaz araç yakıtı olarak kullanılmaya başlanmıştır (Maghanaki vd., 2013).

Ancak, İkinci Dünya Savaşı sonrasında ucuz petrol biyogazı ekonomik olarak cazip kılmamış ve birçok biyogaz tesisi kapanmıştır. 1970'lerin başındaki petrol krizi sonrası, biyogaz tekrar popülerleşmiş ve ısıtma, elektrik üretimi ve kojenerasyon gibi alanlarda kullanım artmıştır. Son yıllarda teknolojik gelişmeler ve sera gazı emisyonlarını azaltma çabaları biyogaza olan ilgiyi artırmış ve biyogaz, enerji karışımında daha fazla yer edinmiştir (Maghanaki vd., 2013).

1990'lı yıllarda biyogazdan elektrik üretimi dünya genelinde yaklaşık 5.000 GWh civarındayken, 2000'li yıllarda bu miktarın 12.048 GWh seviyelerine çıktığı gözlemlenmektedir. Bu üretim miktarları ülkelere göre incelendiğinde; Amerika Birleşik Devletleri'nde 4.984 GWh, İngiltere'de 2.556 GWh, Almanya'da 1.683 GWh, İtalya'da 5.66 GWh ve Fransa'da 3.46 GWh olduğu belirlenmiştir. Biyogaz kullanımındaki artışın temel nedenlerinden biri, bu kaynaktan elde edilen elektrik enerjisinin üretildiği ülkelerde perakende satış fiyatlarına yakın seviyelerde satın alınması ve aynı zamanda organik atıkların işlenmesinin mevzuat kapsamında zorunlu hale gelmesidir (Yılmaz vd., 2017).

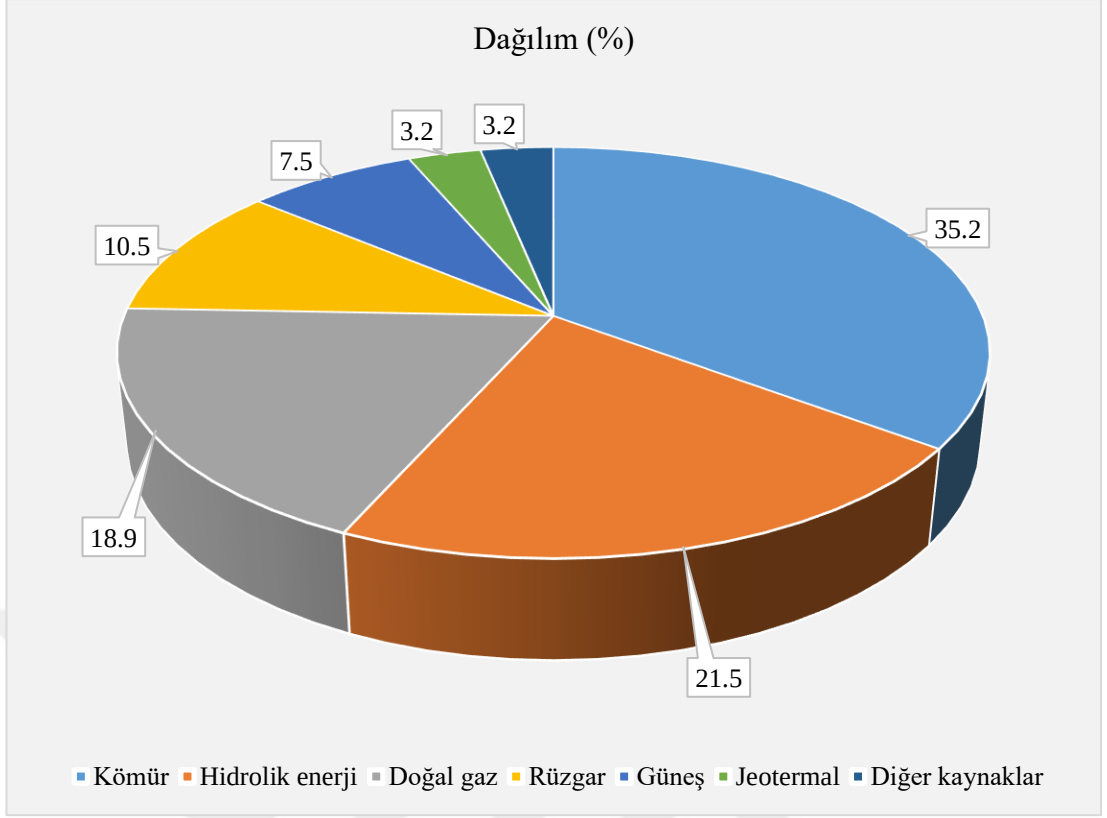
Biyogaz üretimi dünya genelinde yaygın olmakla birlikte, en büyük üreticiler Amerika Birleşik Devletleri, Almanya ve Birleşik Krallık'tır. ABD, 50 TWh'den fazla biyogaz üretimiyle en büyük pazara sahiptir. Almanya ve Birleşik Krallık ise önemli üreticiler olup, her iki ülkenin toplam üretimi ABD'nin altında kalmaktadır. Küresel biyogaz kapasitesinin 2025 yılına kadar 22.040 MW'a ulaşması beklenmektedir. 2001 ile 2011 yılları arasında biyogaz kapasitesi, dünya genelinde 2.388 MW'dan 8.377 MW'a yükselmiştir ve yıllık %13,4 oranında büyüme göstermiştir (Maghanaki vd., 2013).

Almanya, dünya biyogaz kapasitesinin %28,1'ine sahipken Amerika Birleşik Devletleri %19,7 ve Birleşik Krallık ise %15,5 paya sahiptir. Almanya'nın biyogaz sektörü, 2011'de ülkenin toplam yenilenebilir enerji kapasitesinin %3,7'sini oluşturmuştur. Ayrıca, Amerika Birleşik Devletleri'nin çöp sahalarındaki biyogaz kapasitesi, 2011'de toplam biyoyakıt üretiminin %15'ini, Birleşik Krallık'ta ise çöp sahalarındaki biyogaz 2011'de toplam biyoyakıt kapasitesinin %33,7'sini oluşturmuştur. 2025 yılına kadar küresel biyogaz kapasitesinin 22.000 MW'a ulaşması beklenmektedir. Avrupa'da 2006 yılında biyogazdan üretilen elektrik yıllık 17.272 GWh olup, bunun 7.338 GWh'i Almanya tarafından üretilmiştir (Maghanaki vd., 2013).

2.4 Türkiye’de Enerji Kaynakları

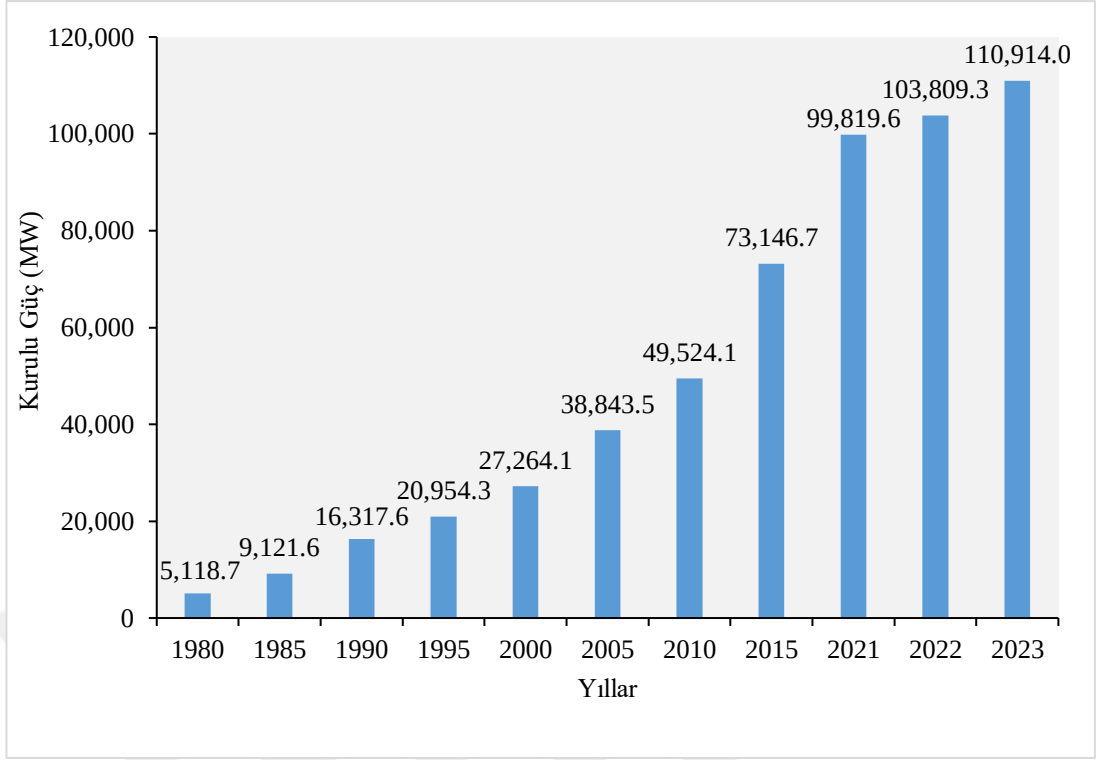
Enerji gereksiniminin önemli bir kısmını sınırlı ve dışa bağımlı fosil yakıtlarla karşılayan Türkiye açısından, yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyelinin araştırılması, enerji bağımlılığını azaltmak adına kritik bir öneme sahiptir.

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) tarafından yayımlanan verilere göre, Türkiye'nin 2024 yılı elektrik tüketimi, bir önceki yıla kıyasla %3,8 artış göstererek 347,9 TWh seviyesine ulaşmıştır. Aynı dönemde elektrik üretimi ise %5,4'lük bir artışla 348,9 TWh olarak gerçekleşmiştir. Üretim kaynaklarına bakıldığında; %35,2'si kömür, %18,9'u doğal gaz, %21,5'i hidroelektrik, %10,5'i rüzgâr, %7,5'i güneş, %3,2'si jeotermal enerji ve kalan %3,2'si ise diğer kaynaklardan sağlanmıştır. Söz konusu kaynakların oranları Şekil 2.2'de görsel olarak sunulmaktadır. Türkiye Ulusal Enerji Planı'nın sonuçları, elektrik talebinin 2025'te 380,2 TWh, 2030'da 455,3 TWh ve 2035'te 510,5 TWh'ye ulaşacağını göstermektedir (URL-3).



Şekil 2.2. Ülkemizde elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı.

Türkiye Elektrik Üretim A.Ş. (TEİAŞ) Elektrik Üretim-İletim İstatistikleri verilerine göre ülkemizde kurulu gücün 1980-2023 yılları arasındaki değişimi Şekil 2.3'te verilmiştir. Şekilde gösterildiği üzere, 2023 yılı itibarıyla ülkemiz 110.914 MW kurulu güce sahiptir. Bu gücün birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı ve 2013 yılına oranla değişim oranları ise Çizelge 2.2'de gösterilmiştir. 2023 yılı itibarıyla toplam kurulu gücün %44,94'ü termik, %28,82'si hidrolik, %1,52'si termal, %10,64'ü rüzgâr ve %14,08'si güneş enerjisinden sağlanmıştır. Özellikle yenilenebilir enerji kaynakları açısından değerlendirildiğinde 2013 ile 2023 yılları arasında rüzgâr ve güneş enerjisindeki artış dikkati çekmektedir. Bu durum son yıllarda yenilenebilir enerji konusundaki yapılan çalışmaların ve değerlendirmelerin bir sonucu olarak ifade edilebilir (URL-4).



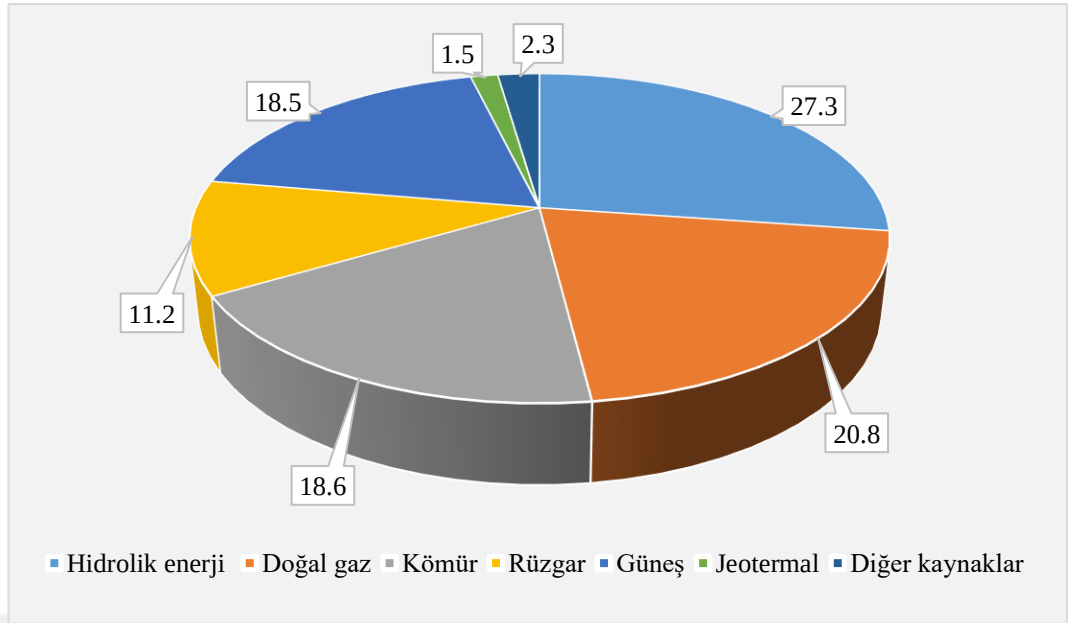
Şekil 2.3. Ülkemizde kurulu gücün yıllar itibarıyla gelişimi.

Çizelge 2.2. Ülkemizdeki elektrik santrallerinin kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre 2013 ve 2023 yılları arasındaki gelişimi.

	Termik Enerji (MW)	Hidrolik Enerji (MW)	Jeotermal Enerji (MW)	Rüzgâr Enerjisi (MW)	Güneş Enerjisi (MW)	Toplam
2013	38.648,0	22.289,0	310,8	2.759,7	0,0	64.007,5
%	60,38	34,82	0,49	4,31	-	100,00
2023	49.840,8	31.962,4	1.691,3	11.806,1	15.613,4	110.914,0
%	44,94	28,82	1,52	10,64	14,08	100,00

Mart 2025 sonu itibarıyla, Türkiye’deki enerji santrallerinin kurulu gücü 118.185 MW’a yükselmiştir. Kurulu gücümüzün Şekil 2.4’te gösterilen kaynaklara göre dağılımına bakıldığında; %27,3’ü hidrolik enerji, %20,8’i doğal gaz, %18,6’sı kömür, %11,2’si rüzgâr, %18,5’i güneş, %1,5’i jeotermal ve %2,3’ü ise diğer kaynaklar şeklindedir (URL-3).

Ayrıca Mart 2025 itibarıyla, ülkemizdeki elektrik üretim santrali sayısı ise lisanssız tesislerle birlikte 35.160 olarak kaydedilmiştir. Bunların arasında 768 hidroelektrik, 72 kömür, 376 rüzgâr, 66 jeotermal, 333 doğal gaz, 33.086 güneş ve 459 diğer kaynaklı santral bulunmaktadır (URL-3).



Şekil 2.4. Ülkemizdeki kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı.

Tarım ve hayvancılığın ülkemiz genelinde yaygın olması, biyogazı diğer enerji kaynakları içerisinde öne çıkarmaktadır. Bu bağlamda, biyogaz enerjisi hem yerli üretime dayalı olması hem de yenilenebilir nitelik taşıması nedeniyle öncelikli enerji kaynakları arasında yer almaktadır. Ülkemizde kurulu güç kapasitesi 0,12 MW ile 34 MW arasında değişen 104 biyogaz tesisi faaliyet göstermektedir. Kurulu güç bakımından en büyük ilk 10 biyogaz santrali Çizelge 2.3'te listelenmiştir (URL-5).

Çizelge 2.3. Ülkemizde kurulu güç kapasitesi en büyük biyogaz enerji santralleri.

Santral Adı	İl	Kurulu Güç
İBB Biyokütle Santrali	İstanbul	86 MW
Karaman BES	Karaman	40 MW
Avcıkoru Çöp Gazı Santrali	İstanbul	40 MW
Seymen Biyokütle Santrali	İstanbul	37 MW
Odayeri Çöp Gazı Santrali	İstanbul	34 MW
Çiğli Harmandalı BES	İzmir	32 MW
Kula Yenilenebilir Enerji Üretim Tesisi	Manisa	31 MW
Toros Tarım Samsun Santrali	Samsun	31 MW
Arıkçayırı Enerji Üretim Tesisi	Bolu	30 MW
Mutlulara Biyokütle Santrali	Balıkesir	30 MW

Türkiye genelinde hayvansal atık açısından değerlere bakıldığında ise 422.832.374 adet hayvandan 193.878.079 ton/yıl atık elde edilmekte ve hayvansal atıkların teorik enerji eşdeğeri 4.385.371 TEP/yıl olduğu bilinmektedir. Benzer şekilde bitkisel atık miktarının 62.206.754 ton/yıl olduğu ve bitkisel atıkların teorik enerji eşdeğerinin 25.384.268 TEP/yıl, belediye atıklarının teorik enerji eşdeğerinin 3.373.011 TEP/yıl ve orman varlığı artıkları enerji eşdeğerinin 859.899 TEP/yıl olduğu açıklanmıştır. Bu

bilgiler doğrultusunda atıkların toplam enerji eşdeğeri 34.002.549 TEP/yıl olarak hesaplanmıştır (URL-6).

2021 verilerine göre, Türkiye’de bulunan biyogaz, biyokütle, atık ısı ve pirolitik yağ enerji santrallerinin kurulu gücü toplamda 2.414 MW’a ulaşmıştır. Aynı yıl bu santraller 7.371.770.000 kWh elektrik üretmiş ve 187 adet santral kayıt altına alınmıştır (URL-7). Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından biyokütle enerji potansiyelinin tespiti amacıyla hazırlanan Biyokütle Enerjisi Potansiyel Atlası (BEPA) verilerine göre, toplanabilir artık ve atıklarımızın toplam ekonomik enerji eşdeğeri yılda yaklaşık 3,9 MTEP olarak öngörülmektedir (URL-8).

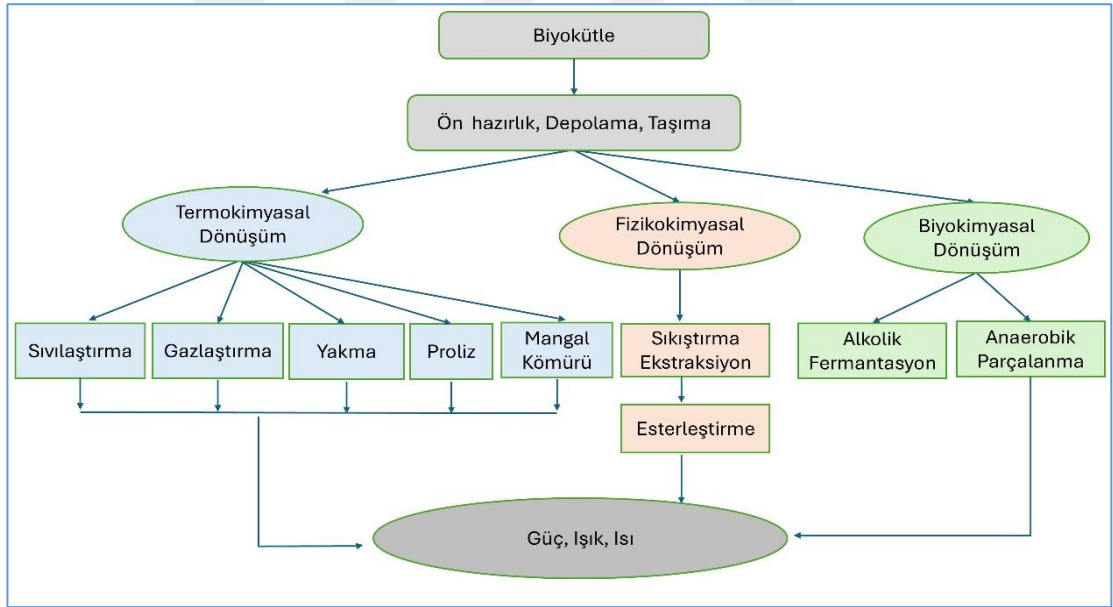
2.5 Biyokütle Enerjisi

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahip olan biyokütle, sürdürülebilir kalkınma modelleri kapsamında çevresel ve enerjiye ilişkin işlevleri bakımından büyük öneme sahiptir. Biyokütle enerjisi yalnızca sürdürülebilir kalkınmaya katkı sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda küresel ölçekte enerji güvenliğini desteklemekte ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yardımcı olmaktadır (Seyhan ve Badem, 2018). Biyokütle, yaşayan ya da yakın zamanda yaşamış canlılardan elde edilen fosilleşmemiş tüm biyolojik malzemenin genel adıdır (URL-9). 5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun’a göre biyokütle, ithal edilmemek koşuluyla; belediye atıkları (çöp gazı da dahil olmak üzere), bitkisel yağ atıkları, gıda ve yem değeri taşımayan tarımsal atıklar, endüstriyel odun dışındaki orman ürünleri ile atık lastiklerin işlenmesi sonucunda ortaya çıkan yan ürünler, ayrıca sanayi atık çamurları ve arıtma çamurları olarak tanımlanmaktadır. Bu kapsamda biyokütle, yenilenebilir enerji üretiminde çevre dostu ve sürdürülebilir bir kaynak olarak değerlendirilmektedir (URL-1).

Biyokütle kaynakları, odun ve odun atıkları, tarımsal ürünler ile atıkları, su bitkileri, algler, gıda işleme artıklarının yanı sıra belediyelerden kaynaklanan organik katı atıklardan oluşan organik maddeleri kapsamaktadır. Bu tür kaynaklardan elde edilen enerji biyokütle enerjisi olarak tanımlanır. Biyokütle enerjisi, ısı ve elektrik üretimi, biyoyakıt imalatı ve kimyasal hammaddelerin sağlanması gibi çeşitli kullanım alanlarına sahiptir (Ergişi, 2019). Geniş bulunabilirliği ve gelişmiş dönüşüm

teknolojileri sayesinde biyokütle, yakın gelecekte yerel enerji talebini karşılayabilme kapasitesi ve enerji arz güvenliğine katkısıyla ön plana çıkan başlıca enerji kaynaklarından biri olmaya adaydır (Seyhan ve Badem, 2018). Bununla birlikte biyokütle enerjisi, çevreyle uyumlu ve sürdürülebilir enerji üretimi ile etkin çevre yönetimini mümkün kılması, ekonomik ve sosyal kalkınmaya katkı sağlaması nedeniyle küresel ölçekte geniş bir uygulama alanı bulmuştur (Karayılmazlar vd., 2017).

Biyokütleden enerji üretiminde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar Şekil 2.5'te görüldüğü üzere termokimyasal, fizikokimyasal ve biyokimyasal süreçler olarak üç ana gruba ayrılmaktadır. Bu süreçler sonucunda katı, sıvı ve gaz formunda biyoyakıtlar elde edilmektedir (Özcan vd., 2011). Boyut küçültme yapılarak pelet ve biriket, transesterifikasyon yapılarak biyodizel, doğrudan yakma yapılarak elektrik ve ısı, gazlaştırma-piroliz-katalitik sıvılaştırma yapılarak sentez gazı ve sıvılar, fermantasyon yapılarak biyoetanol ve biyometanizasyon yöntemi ile biyogaz üretilir (URL-8).



Şekil 2.5. Biyokütleden enerji üretim yöntemleri.

Biyokütle, enerji üretimi ve kimyasal madde elde edilmesi amacıyla yukarıda belirtildiği gibi çeşitli faydalı ürünlere dönüştürülebilir. Hangi dönüşüm teknolojisinin uygulanacağına karar verilirken bazı temel faktörler göz önünde bulundurulmalıdır. Biyokütle için önemli faktörler arasında, içeriğindeki nem oranı (su miktarının yüzdesi), karbon/nitrojen (C/N) oranı ile kimyasal ve fiziksel özelliklerin bilinmesi yer

almaktadır. Ayrıca hedeflenen nihai ürünler, süreç maliyetleri ve çevresel etkilerde önemlidir (İlkılıç ve Deviren, 2011).

2.6 Biyogaz ve Özellikleri

Günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı bir tercih değil adeta bir zorunluluk hâline gelmiştir. Bu durumun temel nedeni fosil yakıtların yoğun şekilde tüketilmesinin sera gazı emisyonlarını artırarak küresel ısınmayı tetiklemesi ve buna bağlı olarak iklim değişikliği ile çeşitli çevresel sorunların ortaya çıkmasıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan biyogaz, hayvansal ve evsel atıkların işlenmesiyle elde edilen çevre dostu bir enerji türüdür. Özellikle hayvan gübresi, bitkisel atıklar ve evsel organik çöplerden biyogaz üretimi, son yıllarda üzerinde yoğun olarak durulan ve kapsamlı bilimsel araştırmalara konu olan alanlardan biri hâline gelmiştir (Yılmaz vd., 2017).

Biyogaz, organik maddelerin oksijensiz (anaerobik) koşullarda, çeşitli mikroorganizmalar tarafından biyometanlaştırma süreciyle üretilen gaz karışımıdır. Havadan yaklaşık % 20 daha hafif olan bu gaz; renksiz, kokusuz, parlak mavi alevle yanan ve yüksek ısı değere sahip bir enerji kaynağıdır. Biyogaz, biyokütlenin bakteriyel bozunması yoluyla doğal olarak oluşur. Yapılan araştırmalar, gaz bileşiminin kullanılan artık türü, ortam sıcaklığı, su içeriği ve asidite seviyesi gibi faktörlere bağlı olarak değiştiğini ortaya koymaktadır (Gülen ve Çeşmeli, 2012; Pehlivan, 2009; Şenol vd., 2017). Bununla birlikte, biyogaz doğal gazın yerine geçebilen ve LPG veya doğal gazla çalışan tüm cihazlarda küçük düzenlemeler yapılarak kolaylıkla kullanılabilen bir enerji kaynağıdır. Çizelge 2.4'te biyogaz ile bazı diğer gaz türlerine ait özellikler karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu çizelge, biyogazın yanıcı özellikler bakımından diğer gazlarla benzer nitelikler taşıdığını göstermektedir (Koca, 2007; Şenol vd., 2017).

Çizelge 2.4. Biyogaz ile diğer gazların özelliklerinin karşılaştırılması.

Yakıt	Isıl değeri (kJ/kg)	Yoğunluk	Hava-yakıt oranı (kg/kg)	Ateşleme sıcaklığı (°C)
Metan	50000	0,72 kg/Nm ³	17,2	650
Propan	46300	2,02 kg/Nm ³	15,6	470
Bütan	45600	2,70 kg/Nm ³	15,6	365
Benzin	43000	0,75 kg/l	14,8	220
LPG	46000	0,54 kg/l	15,5	400
Motorin	42500	0,85 kg/l	14,5	220
Doğal Gaz	57500	0,83 kg/Nm ³	17,0	600
Biyogaz (%60 CH ₄ , %40 CO ₂)	18000	1,2 kg/Nm ³	10,2	650

Elde edilecek biyogazın içeriği, üretim koşullarına ve kullanılan organik atığın türüne bağlı olarak değişiklik göstermekle birlikte, hacimsel olarak genellikle %40-70 CH₄, %30-60 CO₂, %0-3 hidrojen sülfür ve çok az miktarda azot ile hidrojen içerir (Çizelge 2.5) (Yılmaz vd., 2018). Bunlara ek olarak biyogazda eser miktarda karbon monoksit (CO), oksijen (O₂), aromatik bileşikler, halojenli bileşikler (örneğin klorürler ve florürler) ile silikon türevleri de bulunabilmektedir. Üretim süreci sonunda biyogaz, ayrıca enerji taşıma kapasitesini düşüren su buharı ile doymuş hâlde elde edilmektedir. Biyogazın bu çok bileşenli yapısı, enerji dönüşüm sistemlerinde kullanım öncesi arıtma ve saflaştırma işlemlerini gerektirebilmektedir (Deviren vd., 2017).

Çizelge 2.5. Biyogazın bileşimi.

Bileşenler	Hacimsel (%)
Metan (CH ₄)	40-70
Karbondioksit (CO ₂)	30-60
Hidrojen (H ₂)	5-10
Hidrojen sülfür (H ₂ S)	0,0005–0,0002
Azot (N ₂)	1-2
Su (H ₂ O)	0–1

Metan, biyogazın ısı değerini belirleyen temel bileşendir. 1 m³ biyogazın sağladığı enerji miktarı yaklaşık 4700–5700 kcal arasında değişmektedir. Bu enerji miktarı; 0,62 litre gaz yağına, 1,46 kg oduna, 0,43 kg bütan gazına, 12,3 kg tezeğe veya 4,70 kWh elektrik enerjisine denk gelmektedir. Ayrıca 1 m³ biyogazın enerji içeriği; 0,66 litre motorin, 0,75 litre benzin ya da 0,25 m³ propanın sağladığı enerjiyle eşdeğerdir. Biyogaz, sanayi ve endüstride kullanılan diğer gaz türleri gibi, kendine özgü bazı karakteristik özelliklere sahiptir (Çizelge 2.6) (Koçer vd., 2006; Yağlı ve Koç, 2019).

Çizelge 2.6. Biyogazın teknik özellikleri.

Özellik	Açıklama
Yanma	Yüksek derece
Kullanım Alanları	Elektrik Enerjisi, pişirme, ısıtma, soğutma, kurutma vb.
Yoğunluk	1,2 kg/m ³ (Havanın yoğunluğu 1.3kg/m ³)
Tutuşma Sıcaklığı	700°C
Tutuşabilir Sıcaklık	CO ₂ içerdiğinden düşüktür
Tutuşma Oranı	Hava-gaz karışımını 6/12 biyogaz
Yanma İçin Gerekli Hava	Teorik olarak 5,7 m ³ hava/m ³ biyogaz
Patlama	Pratik olarak %20–30 Biyogaz tek başına yanmaz, çok dikkatli bir şekilde depolanmalıdır. Hava ile teması veya gaz depolama kısmında sızma yoksa tehlikesi yoktur.
Rengi	Renksiz
Biyogazın Isıl Değeri	Ortalama 23000kj/m ³ (4700–6000kcal/m ³)
Kokusu	Metan kokusuzdur fakat diğer gazların içeriğinden dolayı sarımsak kokusuna benzer bir kokusu vardır.

Bölgesel düzeyde biyogaz üretim potansiyelinin incelenmesi ve bu potansiyelden elde edilebilecek enerji miktarının ortaya konması hem ulusal enerji politikaları hem de ekonomik sürdürülebilirlik açısından kritik bir rol oynamaktadır. Literatürde, dünya genelinde ve şehir bazında biyogaz potansiyelini değerlendiren pek çok çalışma yer almaktadır. Bu bağlamda, ülkemizde de yalnızca toplam biyogaz üretimi değil, aynı zamanda hayvan varlığı açısından yüksek potansiyele sahip illerin ayrı ayrı analiz edilmesi büyük önem taşımaktadır.

2.7 Biyogaz Oluşumunun Aşamaları

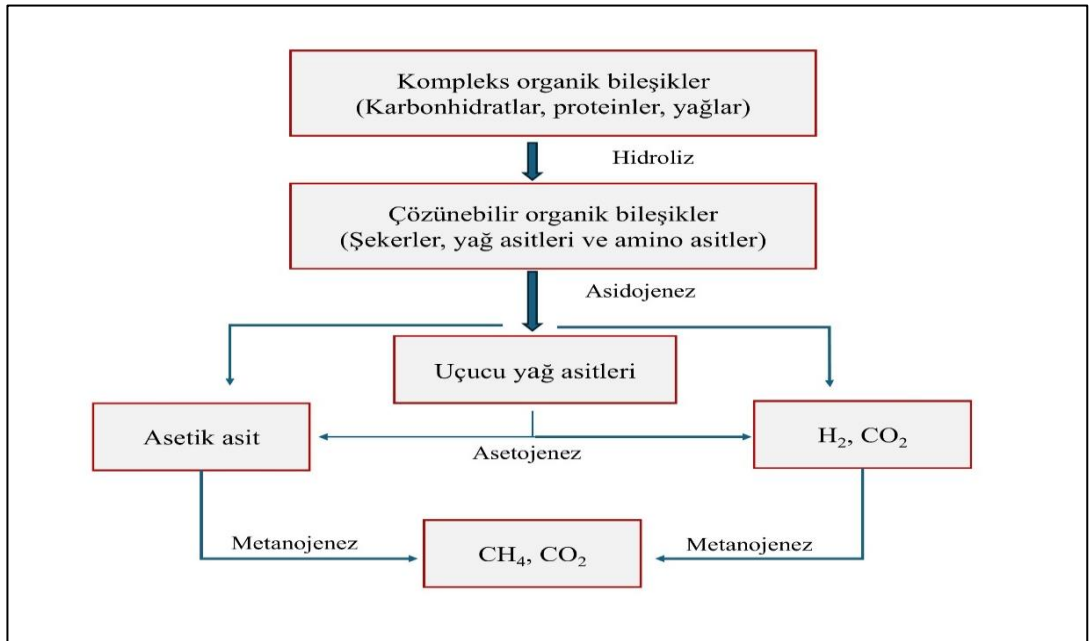
Anaerobik sindirim (AD) teknolojisi, yalnızca yenilenebilir enerji üretimi açısından değil, aynı zamanda atık yönetimi ve çevresel sürdürülebilirlik bakımından da önemli avantajlar sunmaktadır. Bu teknoloji başta tarımsal atıklar, kanalizasyon çamurları, atık su ve hayvansal sıvı atıklar olmak üzere ekonomik değeri olmayan biyokütle ve biyolojik atıkları işleyerek metan açısından zengin biyogaz elde edilmesini mümkün kılmaktadır (Kasinath vd., 2021). Anaerobik koşullarda parçalanması sürecinde, hem atık hacminde önemli bir azalma sağlanmakta hem de çürütücü sistemden elde edilen gübre, tarımda toprak düzenleyici olarak değerlendirilebilmektedir (Yılmaz, 2017).

Biyogaz üretiminde temel bileşen olan metan gazının oluşumu, metanojenik bakteriler tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu mikroorganizmaların besin kaynağını ise organik maddeler oluşturmaktadır. Organik maddenin temel kaynaklarını tarımsal ve hayvansal kökenli atıklar oluşturmaktadır. Bu doğrultuda; tarım atıkları, bahçe atıkları, evsel katı atıklar, gıda ve yemek artıklarının yanı sıra hayvansal gübreler, hayvan atıkları, sanayi ve belediye atık su arıtma tesislerinden elde edilen çamurlar, sebze-meyve işleme atıkları, gıda sanayi atıkları ile tekstil, kâğıt, deri, orman ve benzeri sektörlerden kaynaklanan bazı endüstriyel atıklar, biyogaz üretiminde değerlendirilebilecek organik madde kaynakları arasında yer almaktadır (Yağlı ve Koç, 2019).

Bu süreçte, organik maddeler mikrobiyal faaliyetler sonucu parçalanarak esas olarak metan (%50-75) ve karbondioksit (%25-50) içeren bir gaz karışımına dönüştürülmektedir. Kullanılan substratın niteliğine bağlı olarak, bu karışımda eser miktarda hidrojen sülfür (<%0,8) ve amonyak (<%1) da bulunabilmektedir. Anaerobik sindirim teknolojisi, döngüsel ekonomi ilkeleriyle uyumlu olup, atıkların yeniden

değer kazanarak kaynak haline getirilmesi paradigması çerçevesinde kritik bir işlev üstlenmektedir. Özellikle ekonomik değeri bulunmayan biyokütle ve biyolojik atıkların (örneğin tarımsal artıklar, arıtma çamurları, atık sular ve hayvansal gübreler) metan bakımından zengin biyogaza dönüştürülmesini mümkün kılmaktadır (Kasinath vd., 2021).

Organik maddelerin anaerobik sindirimi (AD), bakterilerin birlikte çalıştığı dört aşamalı bir süreçtir: hidroliz, asidojenez, asetojenez ve metanojenez (Şekil 2.6). Bu sürecin ilk aşaması olan hidrolizde, bakteriler tarafından salgılanan enzimler; karbonhidrat, yağ ve protein gibi büyük ve çözünmeyen maddeleri, mikroorganizmaların kolayca kullanabileceği küçük ve çözünür yapıtaşlarına (mono- ve oligomerler) ayırır. İkinci aşama olan asidojenezde, bu küçük yapıtaşları daha da parçalanarak asetat, karbondioksit (CO_2), hidrojen (H_2), uçucu yağ asitleri (VFA) ve alkollere dönüştürülür. Üçüncü aşama asetojenezde ise oluşan uçucu VFA'lar ve alkoller; hidrojen ve asetik aside parçalanır. Son aşama olan metanojenezde ise karbondioksit, hidrojen, format, metanol ve asetat gibi maddeler metan gazına dönüştürülür. Bu dönüşüm, üç ana biyolojik yol üzerinden gerçekleşir: asetoklastik (asetattan metan üretimi), hidrojenotrofik (hidrojen ve CO_2 den metan üretimi) ve metilotrofik (metanol gibi maddelerden metan üretimi) (Deublein ve Steinhauser, 2008; Kasinath vd., 2021)



Şekil 2.6. Biyogaz üretim aşamaları.

2.7.1 Hidroliz

Anaerobik sindirim sistemlerinde kullanılan organik biyokütle, genellikle mikroorganizmaların doğrudan erişemediği karmaşık polimerlerden oluşur. Bu nedenle, bu makromoleküllerin daha küçük bileşenlere ayrılması için hidroliz veya diğer ön işlemler gereklidir. Hidroliz, bu organik makromoleküllerin parçalanarak asidojenik bakteriler tarafından kullanılabilir hale gelmesini sağlayan kritik bir aşamadır (Abbassi, 2003; Şengür, 2024). Bu aşamada kimyasal bileşik su ile reaksiyona girer ve bu reaksiyon sırasında, su molekülünden bir hidrojen atomu (H) kopan molekülün bir parçasına, hidroksil grubu (OH) ise diğer parçasına bağlanır (Maghanaki vd., 2013). Selüloz, hemiselüloz ve lignin gibi kompleks karbonhidratlar, glikoz, pentoz ve heksoz gibi daha küçük monomerlerine; proteinler ise polipeptitler ve amino asitlere ayrılır. Yağ bileşenleri, süreç sonunda alkol, yağ asidi ve hidrojen gibi maddelere dönüşmektedir. Karbonhidratların hidrolizi genellikle birkaç saat içinde gerçekleşirken, protein ve yağların ayrışması ise birkaç gün sürebilmektedir. Lignoselüloz ve lignin gibi bileşikler için bu süreç oldukça yavaş ilerler ve bu bileşikler tamamen parçalanmaz (Deublein ve Steinhauser, 2008). Bu dönüşüm, organik maddenin mikrobiyal olarak daha kolay sindirilebilmesi için önemli bir adımdır (Maghanaki vd., 2013).

2.7.2 Asidojenez

Asit oluşturuıcı bakteriler, asidik koşullarda gelişen anaerobik mikroorganizmalardır ve büyüme ile çoğalma süreçleri için karbondioksit ile birlikte sınırlı düzeyde oksijene ihtiyaç duyarlar. Bu oksijen gereksinimlerini çözültide bağlı halde bulunan oksijeni kullanarak karşılarlar. Böylece oksijenin tüketilmesiyle birlikte metan oluşturuıcı bakterilerin faaliyet gösterebilmesi için gerekli olan anaerobik ortamı oluştururlar (Avcıoğlu vd., 2011).

Asidojenik bakteriler, anaerobik sindirim sürecinde önemli bir işlev görerek, hidroliz aşamasında ortaya çıkan monomerik bileşikleri hücre zarları aracılığıyla absorbe eder ve bunları başta uçucu yağ asitleri (VFA'lar) olmak üzere çeşitli ara ürünlere dönüştürür. VFA'lar; asetat, propiyonat ve bütirat gibi organik asitleri içermekte olup, bu bileşenler genellikle 75:15:10 ile 40:40:20 arasında değişen oranlarda gözlemlenmektedir. Ayrıca sistemde eser miktarda etanol ve laktat da

bulunabilmektedir. Oluşan bu ara ürünlerin özgül konsantrasyonları sindirim reaktörünün pH seviyesi başta olmak üzere çevresel ve operasyonel koşullarına bağlı olarak değişkenlik gösterebilir (Huang vd., 2015; Şengür, 2024). Bu aşamada reaktör içindeki hidrojen basıncının 4 ila 10 atmosferin üzerine çıkması, butirik ve propiyonik asit üretimini hızlandırarak ortam pH'ında belirgin bir düşüşe yol açabilir. Ancak süreç düzgün şekilde yönetilmezse, asit üretimi ile tüketimi arasındaki denge bozulur ve biriken asitler sistem üzerinde inhibitör etki oluşturarak süreci olumsuz yönde etkileyebilir (Bal, 2021).

2.7.3 Asetojenez

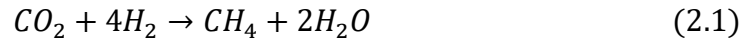
Bu aşamada organik asitler ve alkoller, asetojenik bakteriler tarafından hidrojene (H_2), karbondioksit (CO_2) ve asetik aside (CH_3COOH) dönüştürülür. Asetik asit üretimi için asetojenik bakterilerin oksijen ve karbona ihtiyaçları vardır. Bu gereksinimi karşılamak için çözümlerde çözülmüş halde bulunan oksijen ya da bağlı oksijen kaynaklarını kullanırlar. Bu süreç sonucunda ortamda metan üretiminden sorumlu mikroorganizmaların faaliyet gösterebilmesi için gerekli olan anaerobik (oksijensiz) koşullar sağlanmış olur (Maghanaki vd., 2013).

2.7.4 Metanojenez (Metan Oluşumu)

Anaerobik sindirim süreci metanogenez aşamasıyla son bulur. Bu aşamada anaerobik özellikte olan metanojenik bakteriler (metanojenler), asetik asit, karbondioksit (CO_2) ve hidrojeni; metan (CH_4 , %50–75), karbondioksit (CO_2 , %50–75) ve değişen miktarlarda azot, hidrojen sülfür ve diğer bazı bileşenlerden oluşan bir karışıma dönüştürür. Bu oluşan gaz karışımı “biyogaz” olarak adlandırılır (Maghanaki vd., 2013). Bu aşamadaki bakterilerin çoğalması, asit oluşumunun gerçekleştiği ikinci ve üçüncü aşamalarda bakterilere kıyasla daha uzun zaman alır. Bu nedenle fermentasyonun hızı ve kapsamı metanojenik bakterilerin metabolizmasına bağlıdır. Başka bir deyişle, metanojenik bakteriler önceki aşamalarda asit oluşturan bakterilerin ürettiği maddeleri dönüştürmek zorundadır. Bu sebeple, gaz üretiminin düzenli bir şekilde devam etmesi için her iki bakteri grubunun uyum içinde çalışabileceği ortam koşullarının sağlanması gerekir (Jameel vd., 2024).

Metanojen bakterilerin bir kısmı, karbondioksit (CO_2) ve hidrojen (H_2) gibi inorganik bileşenleri kullanarak metan (CH_4) ve su (H_2O) üretir. Bu süreçte açığa çıkan ara

ürünler asetojenez aşamasındaki bakteriler tarafından asetik aside dönüştürülebilir. Diğer bir grup metanojen bakteri ise doğrudan asetik asidi (CH_3COOH) parçalayarak metan (CH_4) ve karbondioksit (CO_2) üretir (Denklem 2.1 ve 2.2). Ancak bu iki yol arasında üretim miktarı açısından belirgin bir fark bulunmaktadır. Toplam metan üretiminin yaklaşık %70'i asetik asidin parçalanmasından, %30'u ise CO_2 ve H_2 'nin tepkimesinden elde edilmektedir. Bu veriler, metan gazının hem asetik asidin ayrışması hem de karbondioksit ile hidrojenin sentezi yoluyla oluştuğunu göstermektedir (Bal, 2021).



Bu sürecin başarısı doğrudan metan gazı üretimine bağlıdır. İdeal koşullarda, üretilen asidin anında metana dönüştürülmesi sağlanmalıdır. Ancak asidin metana dönüşüm hızı, asit üretim hızının gerisinde kalırsa ortamda asit birikimi olur. Bu durum ortamın pH seviyesinin düşmesine neden olur ve metanojenik bakteriler pH değişimlerine karşı oldukça hassas olduğundan metan üretimi durabilir (Jameel vd., 2024).

Metanojenik mikroorganizmaların oksijene karşı son derece hassas olduğunu gösteren bir çalışmada, *Methanococcus voltae* ve *Methanococcus vannielli* türlerine ait hücrelerin % 99'unun oksijene maruz kaldıktan sonraki on saat içinde öldüğü belirlenmiştir (Kiener ve Leisinger, 1983). Bu mikroorganizmalar yalnızca oksijensiz (anaerobik) ortamlarda yaşayabilen ve obligat anaerobik Archaea sınıfında yer alan canlılardır (Şengür, 2024).

2.8 Biyogaz Üretimini Etkileyen Faktörler

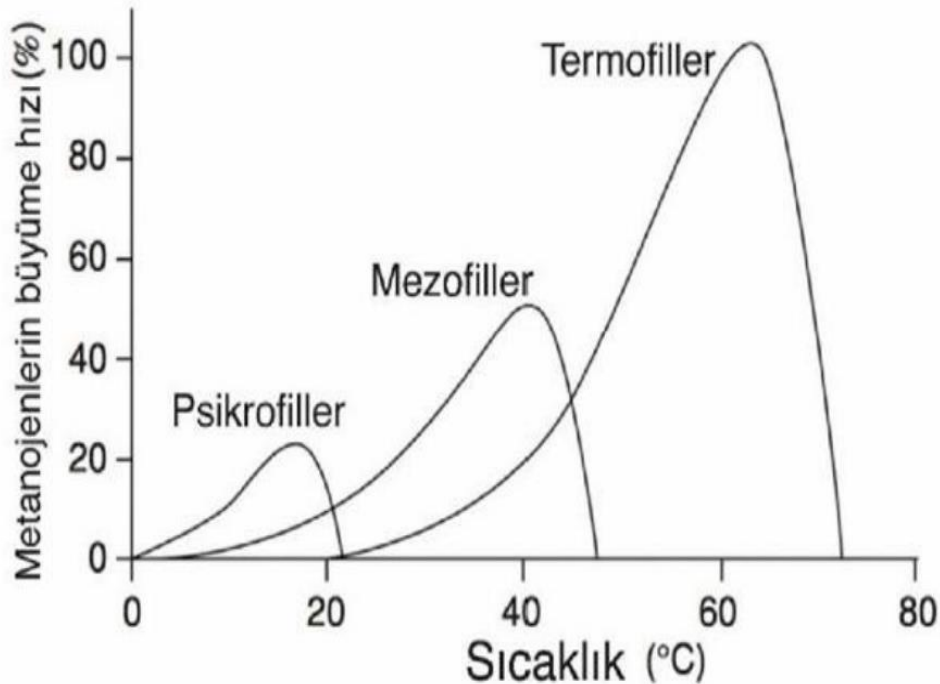
Biyogaz üretimi, karmaşık biyokimyasal reaksiyonlar içeren ve birçok değişkenden etkilenebilen bir süreçtir. Bu süreçte, organik maddelerin mikroorganizmalar tarafından anaerobik koşullarda parçalanarak metan ve karbondioksit gibi gazlara dönüştürülmektedir. Ancak oluşan biyogazın verimi ve kalitesi substratın türüne, ortamın sıcaklığına, pH, karbon/azot oranı (C/N), nem, toksik maddelerin varlığı, organik yükleme oranı ve hidrolik bekleme süresi gibi birçok kimyasal, fiziksel ve biyolojik faktörlere göre değişmektedir (Kasinath vd., 2021). Bu nedenle biyogaz

üretiminde maksimum verim elde edebilmek için bu parametrelerin dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi ve yapılacak çalışmalar ile optimize edilmesi önemlidir.

2.8.1 Sıcaklık

Sıcaklık seçimi ve kontrolü, anaerobik sindirim sürecinin geliştirilmesi için kritiktir. Biyogaz üretiminin kalitesi ve miktarı üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir (Teklehaimanot, 2018). Aynı zamanda sistemin hidrolik bekleme süresi ile reaktör hacmini de belirleyici rol oynamaktadır. Anaerobik sindirim prosesinde mezofilik ve termofilik koşullar için en çok uygulanan aralıklar sırasıyla 35–40°C ve 50–60°C civarındaki sıcaklıklardır (Coelho vd., 2011). Ancak, kış aylarında uygun ısıtma sistemlerinin uygulanmadığı ve sıcaklık 10 °C'nin altına düştüğü koşullarda, metanojenik bakterilerin aktivitesi durma noktasına gelir ve biyogaz üretimi tamamen kesilebilir (Yılmaz vd., 2018).

Anaerobik fermantasyon belirli sıcaklık aralıklarında etkili olan üç farklı sıcaklık bölgesi tanımlanabilir ve her bir bölgede farklı bakteri popülasyonları aktif rol oynar (Maghanaki vd., 2013; Yılmaz vd., 2018). Bu fermantasyon türleri sıcaklık aralığına göre sınıflandırılmakta ve ilgili bakteri türlerinin adlarıyla anılmaktadır (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Metanojenlerin büyüme hızlarının sıcaklık etkisiyle değişimi.

Psikofilik (Sakrofilik) Fermantasyon (3–20 °C): Sakrofiller, 25 °C'nin altındaki sıcaklıklarda aktif olan bakterilerdir ve bu ortamda gerçekleşen anaerobik fermantasyon türüdür. Düşük sıcaklıklarda etkin olan bu bakteriler, fermentörün ve dolayısıyla atıkların ısıtılmasını gerektirmez (Bal, 2021). Bu sıcaklık aralığında gerçekleşen sistemlerde organik maddelerin ayrışma hızı oldukça yavaştır ve ortalama bekleme süresi 100 ila 300 gündür (Yılmaz vd., 2018).

Mezofilik fermantasyon (20–40 °C): Anaerobik fermantasyonda en yaygın olarak uygulanan sıcaklık aralığıdır. Bu sıcaklık aralığında bekletme süresi genellikle 20 ila 40 gün arasında değişmektedir (Yılmaz vd., 2018). Metanojen mikroorganizmaların çoğu için ideal sıcaklık aralığı 37–42 °C arasındadır. Bu sıcaklık aralığında biyogaz üretim veriminin yüksek olması nedeniyle, biyogaz tesislerinde en sık tercih edilen fermantasyon yöntemi bu sıcaklık koşullarında gerçekleştirilmektedir.

Termofilik Fermantasyon (40–70 °C): Bu sıcaklık aralığında bekletme süresi daha kısadır. Termofilik çürütme süreçleri daha yüksek sıcaklıkta gerçekleştiği için patojenik mikroorganizmaların eliminasyonunda mezofilik çürütmeye kıyasla daha etkilidir. Ancak bu yüksek sıcaklık ortamının sağlanması enerji tüketimini artırarak işletme maliyetlerini yükseltmektedir (Şengür, 2024). Ayrıca termofilik çürütücüler, mezofilik çürütücülere göre daha düşük operasyonel stabiliteye sahiptir (Görmüş, 2018).

2.8.2 Hidrolik bekleme süresi (HBS)

Bir biyoreaktörde bulunan substratın (örneğin, gübre gibi organik madde içeren materyallerin) mikrobiyal faaliyetler sonucunda biyogaza dönüşebilmesi için reaktör içerisinde geçirdiği ortalama süre, hidrolik bekleme süresi (HBS) olarak ifade edilir (Öztürk, 2017). Bu kavram, substratın fermantatif bakterilerle temas süresini belirler ve ayrıca reaktörün kapasitesi ve günlük işlenen akış miktarı üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Bu nedenle HBS, optimize edilmesi gereken kritik bir işletme parametresi olarak değerlendirilmektedir (Şengür, 2024). HBS aşağıdaki denklem ile ifade edilir (Öztürk, 2017).

$$HBS = \frac{\text{Reaktör hacmi (m}^3\text{)}}{\text{Günlük debi (} \frac{\text{m}^3}{\text{gün}} \text{)}} \quad (2.3)$$

Reaktör içerisinde bulunan bazı organik maddeler zamanla tamamıyla biyokimyasal reaksiyonlara girerek parçalanır. Bu süreçte substratın büyük bir kısmı ayrıştıkça biyogaz üretim hızı da giderek azalmaya başlar. Uygun şekilde belirlenen hidrolik bekleme süresi boyunca organik maddelerin yaklaşık %70–80’inin biyokimyasal reaksiyonlara girerek bertaraf edildiği varsayılmaktadır. Biyogaz tesislerinde hidrolik bekleme süresi, işletme koşullarına ve özellikle sistemin sıcaklık derecesine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu süre, genellikle 20 ila 120 gün arasında değişen bir aralıkta tasarlanmaktadır (Gülen ve Çeşmeli, 2012; Öztürk, 2019).

2.8.3 pH

Anaerobik ortamda en iyi biyogaz üretimi için belirli bir pH aralığının korunması büyük önem taşımaktadır ve bu aralık genellikle 6,8 ile 7,2 arasında değişmektedir. Metanojenik bakteriler, pH 6,6’nın altına düştüğünde daha yavaş gelişim göstermektedir (Mosey ve Fernandes, 1989). Fermentasyon sisteminin pH değeri; üretilen yağ asitlerine, bikarbonat alkalinitesine ve karbondioksit seviyesine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. pH değeri 5’in altına düştüğünde, biyogaz üretim süreci önemli ölçüde olumsuz etkilenmektedir. (Yılmaz vd., 2018). Alkalinite, organik maddelerin parçalanmasıyla oluşan dalgalanmalara rağmen tutarlı bir pH seviyesinin korunmasına yardımcı olan bir tampon görevi görür. Yeterli alkalinite, mikrobiyal topluluğun en iyi şekilde işlev görmesini sağlar (Zhai vd., 2015). pH değeri 8’in üzerine çıktığında, proteinlerin parçalanması sonucu açığa çıkan amonyak, mikroorganizmalar üzerinde toksik etkiye yol açar. (Mutlu, 2003).

2.8.4 Karıştırma

Sisteme giren organik yükün bakterilerle homojen bir şekilde dağılımını sağlamak için karıştırma işleminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu işlem, katı maddelerin ve üstte biriken katıların eşit şekilde dağılmasını sağlamak ve oluşan gazın tahliyesini kolaylaştırmak açısından önemlidir. Aşırı hızlı ve sık yapılan karıştırma bakterilerin substrat ile etkili şekilde etkileşime girmesini engelleyerek süreç verimliliğini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu nedenle verimli ve hızlı bir çürütme süreci için karıştırma işleminin yavaş ve uygun aralıklarla gerçekleştirilmesi gerekmektedir (Özbaşer ve Erdem, 2013). Karıştırma sıklığı; reaktör tipi, karıştırıcı türü ve besleme materyalinin katı madde içeriğine bağlı olarak değişmekte olup, genellikle sürekli değil, aralıklı olarak uygulanmaktadır (Burton ve Turner, 2003). Karıştırma ve

çalkalama yalnızca bu avantajları sağlamakla kalmaz; aynı zamanda fermantör içerisindeki sıcaklık değişimini dengelemek, bakteri yoğunluğunu düzenlemek ve bakteri popülasyonu ile taze atığın karışımını sağlayarak reaksiyon hızını artırmak gibi ek faydalar da sunar (Yılmaz vd., 2018).

2.8.5 Karbon/Azot (C/N) oranı

Karbon, biyogaz üretiminde enerji kaynağı olarak; azot ise anaerobik bakterilerin büyümesi ve çoğalması için gereklidir. Karbonhidratlar başlıca karbon kaynağını, proteinler, nitrat ve amonyak ise azot kaynağını oluşturur (Görmüş, 2018; Özbaşer ve Erdem, 2013). Bu iki elementin oranı, reaktör içerisindeki kimyasal tepkimelerin kontrolü açısından oldukça önemlidir. Karbonun tüketim hızı, azota göre 30 ila 35 kat daha fazladır. Bu nedenle hammadde içeriğindeki karbon/azot oranı, anaerobik bakterilerin etkinliği ile fermantasyon hızı ve buna bağlı olarak metan gazı üretimi üzerinde doğrudan etkilidir (Scarlat vd., 2015).

C/N oranının artması durumunda ortamda bulunan azot, karbona göre daha hızlı tükenir. Bu durum, ortamda kullanılmamış karbonun birikmesine ve bunun sonucunda pH'ın düşerek ortamın asidik hale gelmesine yol açar. C/N oranının düşmesi durumunda ortamdaki fazla azot, amonyak (NH₃) formunda açığa çıkar ve bu da ortamın alkalileşmesine neden olur. Her iki durumda da optimal koşulların bozulması nedeniyle metan üretimi durma noktasına gelir. Özellikle karbon eksikliği anaerobik bakterilerin metabolik faaliyetlerini sürdürememelerine neden olur (Jameel vd., 2024).

Hayvan gübresinde bakterilerin hücresel gelişimi için temel azot kaynağı büyük ölçüde idrardır. Bu tür atıklarda C/N oranı genellikle 15:1 ile 30:1 arasında olup, biyogaz üretimi için uygun aralıkta bulunmaktadır. Dolayısıyla, hayvan gübresi kullanıldığında C/N oranının ayrıca ayarlanmasına gerek duyulmaz. Ancak diğer organik atıkların kullanımında bu denge dikkate alınmalıdır (Bal, 2021).

Biyogaz üretiminde kullanılacak atıkların C/N oranı uygun aralıkta olmalıdır; bu oran 10/1'den az, 23/1'den fazla olmamalıdır (Erhan, 2019). Hayvan gübreleri ile bazı tarımsal ve evsel atıkların kuru haldeki karbon (C), azot (N), C/N oranları, nem oranları ve bazı gübrelerin su ile seyreltilme oranları Çizelge 2.7'de sunulmuştur.

Çizelge 2.7. Organik maddelerin C/N oranları.

Gübre	C %Kuru	N %Kuru	C/N Oranı	Taze Gübredeki Nem Oranı (%)	Su ile Seyreltme
Sığır Gübresi	30	1,66	18	80-85	01:01
Koyun Gübresi	83,6	3,8	22	75-80	01:01
Kümes Hav. Güb.	87,5	6,55	14	70-80	01:03
Domuz Güb.	76	3,8	20	75-80	01:02
At Güb.	33,4	2,3	15	80-85	02:03
Kaz	54	2	27	70-80	02:03
Güvercin Güb.	50	2	25	70-80	01:03
İdrar	15	15	1	90-95	
Kan	36	12	3	90-95	
Balık Atığı	56	7	8	55-75	
Kesim hane Atığı	64	8	8	55-75	
Çiftlik Güb.	42	3	14	75-80	
Evsel ve Tarımsal Atıklar					
İnsan Dışkısı	48	6	8	50-70	03:07
İdrarlı İnsan Dışkısı	70	7	10	50-70	
Patates Kabuğu	37,5	1,5	25	50-60	
Mutfak Atığı	62,5	2,5	25	5-15	
Ekmek	50	2	25	50-60	
Gazete	40	0,05	800	5-15	
Taze çim	48	4	12	40-60	
Yulaf samanı	50,4	1,05	120	20-40	
Pirinç samanı	18	0,3	60	20-40	
Yapraklar	55	1	55	25-40	
Yer fıstığı Kabuğu	40	2	20	25-40	
Soya fasulyesi sapı	64	2	32	25-40	
Ağaç yaprakları	75	1,5	50	40-60	
Şeker kamışı	45	0,3	150	25-40	
Soya fasulyesi	17,5	3,5	5	25-40	
Pamuk tohumu	12,5	2,5	5	10-15	
Hardal	39	1,5	26	10-15	
Su sümbülü	30,4	1,9	16	85-90	

2.8.6 Toksisite

Biyogaz üretiminde, anaerobik sindirim sürecinin verimli bir şekilde sürdürülebilmesi için mikroorganizmaların metabolik ihtiyaçlarına uygun çevresel koşulların sağlanması büyük önem taşır. Ortama giren maddelerin kimyasal kirlilik yükü belirli bir eşiğin üzerine çıktığında, anaerobik mikroorganizmalar üzerinde toksik etki oluşturabilir ve bu durum bakteriyel aktivitenin durmasına, dolayısıyla biyogaz üretiminin kesintiye uğramasına neden olabilir (Jameel vd., 2024).

Anaerobik sindirim sürecinde toksisiteye neden olabilecek başlıca maddeler arasında sodyum, potasyum, kalsiyum, magnezyum, bakır, krom, nikel, amonyak, formaldehit, kloroform, sülfür, etil benzen, etilen diklorür, gazyağı (kerosen), alkali ve toprak alkali metaller, ağır metaller ve deterjanlar yer almaktadır (Gür, 2016). Özellikle demir (Fe), potasyum (K), magnezyum (Mg), kalsiyum (Ca) ve sodyum (Na) gibi bazı inorganik

elementler, yüksek konsantrasyonlarda metanojenik bakterilerin büyümesini inhibe ederek gaz üretimini yavaşlatmakta ya da tamamen durdurmaktadır. Ancak bu elementlerin düşük ve kontrollü miktarlarda bulunması mikrobiyal gelişimi teşvik ederek biyogaz verimliliğini artırabilmektedir (Jameel vd., 2024; Öztürk, 2019).

Bununla birlikte; antibiyotikler, aşırı azot içeren bileşikler, çinko (Zn), amonyak (NH_3), uçucu yağ asitleri (VFA) ve hidrojen sülfür (H_2S) gibi bazı girdiler anaerobik bakteriler üzerinde doğrudan toksik etki oluşturarak sindirim sürecini tamamen durdurabilir. Mikroorganizmalar için gerekli olan besin maddeleri belirli bir optimum aralıkta bulunmalıdır. Bu aralığın dışına çıkan konsantrasyonlar söz konusu maddelerin besleyici olmaktan çıkarak toksik hale gelmesine neden olur (Jameel vd., 2024).

2.8.7 Organik madde yükleme oranı

Biyometan üretim potansiyeli, kullanılan çürütücü sistemin tipi ile organik hammaddenin niteliği ve boyutuna bağlı olarak değişen organik yükleme hızı ile doğrudan ilişkilidir. Organik yükleme hızının artışı, metan üretim miktarında da artışa yol açmakla birlikte bu artışın belirli bir eşiğin üzerine çıkması sistem performansını olumsuz etkileyebilir. Yüksek organik yükleme hızı seviyelerinde, metanojenik bakterilerin ortamda biriken hidrojeni yeterli hızda tüketememesi nedeniyle, asit üreten bakteriler baskın hale gelir. Bu durum uçucu yağ asitlerinin (UYA) ortamda birikmesine, pH değerinin düşmesine ve nihayetinde sistemin asidifikasyon nedeniyle inhibe olmasına yol açar. Sistemdeki bu dengesizlik, metan üretiminin durmasına kadar varabilen ciddi verim kayıplarına neden olabilir (İlkılıç ve Deviren, 2011).

Mezofilik koşullarda organik yüklenme hızı, sığır gübresi için $2,5\text{--}3,5 \text{ kg UM/m}^3 \cdot \text{gün}$, besin maddeli organik atıklar için $5,0\text{--}7,0 \text{ kg UM/m}^3 \cdot \text{gün}$, domuz gübresi için ise $3,0\text{--}3,5 \text{ kg UM/m}^3 \cdot \text{gün}$ aralığında olmalıdır (Ziauddin ve Rajesh, 2015).

2.8.8 Katı madde içeriği

Biyogaz üretiminde kullanılan organik atıkların katı madde oranı, verim üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu oranın %7 ile %12 arasında olmaması durumunda, tank içinde parçalanma gerçekleşmez ve üretim verimi azalır (Yılmaz, 2019). Anaerobik fermantasyonda kullanılan hammaddeler genellikle yüksek katı madde içeriklerine

sahiptir. Bu nedenle fermentasyon öncesinde belirli oranda su ile seyreltilmeleri gerekmektedir. Bakterilerin organik maddeleri etkin şekilde kullanabilmesi için bu maddelerin su ile homojen şekilde karıştırılarak seyreltik bir çözelti haline getirilmesi ve ardından biyogaz sistemine beslenmesi gereklidir (Navina vd., 2024). Reaktör içinde bulunan bulamacın katı madde içeriği çok düşük olduğunda, katı maddeler çökerek sistemde birikim oluşturur; buna karşılık, katı madde oranı aşırı yüksek olursa, gaz çıkışı zorlaşır ve üretim verimliliği düşer. Bu nedenle, optimum katı madde dengesi sağlanması, hem sistem performansı hem de gaz üretiminin sürekliliği açısından büyük önem taşımaktadır (Ergişi, 2019).

2.8.9 Alkalinite ve uçucu asitler

Uçucu yağ asitlerinin (VFA) birikimi, sistemde pH değerinin düşmesine ve dolayısıyla asidifikasyona yol açmaktadır. Bu tür durumlarda alkalinite sistemde tamponlayıcı bir rol üstlenerek oluşan VFA'ları nötralize etmek suretiyle pH değişimlerini dengelemeye yardımcı olur. Bu nedenle, anaerobik sindirim süreçlerinde yüksek VFA üretiminin olumsuz etkilerini bertaraf edebilmek için toplam alkalinite (TA) düzeyinin 1,5 g CaCO_3/L 'nin üzerinde tutulması önerilmektedir. Alkaliniteye ek olarak, %40 oranında yağ ve %10 oranında karbonhidrat içeren organik atıkların birlikte sindirimi (ko-sindirim), sistemdeki asidifikasyon eğilimini dengeleyici bir strateji olarak önerilmektedir (Issah ve Kabera, 2021).

Yapılan çalışmalarda, anaerobik sindirim sistemlerinde sürecin kararlılığını izlemek amacıyla erken uyarı göstergeleri olarak VFA/TA oranı ve biyogaz üretim hızı ön plana çıkmaktadır. Bu bağlamda, ani pH düşüşlerinin sistemin geri dönüşünü zorlaştırması nedeniyle pH yerine VFA/TA oranının izlenmesi daha güvenilir bir gösterge olarak kabul edilmektedir. Dolayısıyla anaerobik çürütücülerin kararlılığının sürdürülebilmesi için VFA ve alkalinite düzeylerinin eş zamanlı olarak izlenmesi kritik öneme sahiptir (Issah ve Kabera, 2021).

2.9 Biyogaz Üretiminde Kullanılan Teknolojiler

2.9.1 Kesikli fermentasyon

Bu sistemde reaktör dönemsel olarak bir kez ham madde ile doldurulur ve organik maddelerin fermentasyonu bu haznede gerçekleştirilir. Fermentasyon süreci

tamamlandıktan sonra reaktörün içeriği tamamen boşaltılır. Bu yöntem, kuru madde oranı % 25'e kadar olan yoğun atık sular için uygundur. Özellikle selülozik bileşiklerin fermentasyonu için etkilidir ve fermentasyonun sona erdiği nokta, gaz üretiminin azalmaya başlamasıyla belirlenir. Hammadde bir defaya mahsus hazneye yüklendikten sonra ayrışma ve gaz üretimi tamamlandığında boşaltılan bu tür sistemler "Kesikli Sistemler" olarak adlandırılır (Jameel vd., 2024). Sistem sıcaklığına ve kullanılan organik maddeye bağlı olarak bekleme süresi değişmektedir (Öztürk, 2019). Kesikli fermentasyonun en önemli avantajı besleme miktarı konusunda sağladığı esnekliktir. Ancak sürekli fermentasyon sistemleriyle karşılaştırıldığında daha geniş bir alana ihtiyaç duymaktadır. Buna karşın, teknolojik açıdan daha sade bir yapıya sahip olması nedeniyle özellikle gelişmekte olan ülkelerde düşük maliyetli ve uygulanabilir bir seçenek olarak öne çıkmaktadır (Yapılcan, 2021).

2.9.2 Beslemeli fermentasyon

Burada fermentör başlangıçta belirli oranda organik madde ile doldurulmakta ve kesikli fermentasyonda olduğu gibi başlamaktadır. Zamanla ortamda besin elementlerinin azalmasıyla birlikte, substrat ve mikroorganizma belirli aralıklarla ve kontrollü bir şekilde reaktöre eklenir. Bu yöntem, yarı kesikli ya da yarı sürekli fermentasyon olarak adlandırılmaktadır. Sürecin tamamlanmasının ardından, üretim tankı tamamen boşaltılarak yeni malzeme ile yeniden doldurulması gerekmektedir. (Üstünsoy, 2024; Yapılcan, 2021). Bu yöntem genellikle sürekli atık üretimi olmayan, özellikle hayvancılık işletmeleri ve belirli dönemlerde atık oluşan sanayi tesislerinde tercih edilir (Jameel vd., 2024).

2.9.3 Sürekli fermentasyon

Ayrışma ve boşaltma işlemlerinin günlük olarak gerçekleştirildiği sistemlerdir. Bu tür sistemlerde, reaktöre her gün düzenli olarak hammadde beslemesi yapılır ve sisteme giren atık miktarına karşılık gelen, gazı alınmış çökelti sistemden uzaklaştırılır (Üçgül, 2019). Bu yöntemde kullanılan organik maddenin kuru madde oranı genellikle %5 ile %10 arasındadır. Sürekli sistemlerde belirli bir miktarda besleme ile günlük olarak sabit hacimde biyogaz üretimi sağlanabilir (Jameel vd., 2024). Kullanılan hammadde türüne bağlı olarak karıştırma işlemi uygulanarak, reaktör içerisinde tabakalaşma ve tıkanıklık oluşmasının önüne geçilir (Kaya ve Öztürk, 2012).

2.10 Biyogazın Kullanım Alanları

Biyogaz, yanıcı özellikteki diğer gazların kullanıldığı tüm alanlarda rahatlıkla değerlendirilebilmektedir. Biyogazın enerji amaçlı kullanılabilirliği, bileşiminde bulunan metan ve karbondioksit oranlarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Isıl değeri, metan oranına göre değişir ve yanma sonucu açığa çıkan enerjinin bir kısmı CO₂'nin ısı kapasitesine bağlı olarak kaybolur. Örneğin, %99 metan içeren biyogazın ısı değeri 37,3 MJ/m³ iken, %65 metan içeren biyogazın ısı değeri yaklaşık 24,0 MJ/m³'tür. Bu nedenle, biyogazın kullanım alanları metan oranına bağlı olarak değişmekte; konutlarda mutfak ve aydınlatma amaçlı, doğal gaz yerine ve ulaşımda yakıt olarak değerlendirilebilmektedir (Deviren vd., 2017).

2.10.1 Biyogazın ısıtmada kullanımı

Biyogaz, en verimli şekilde ısıtma sistemlerinde kullanılmaktadır. Yanabilirlik özelliğini bünyesindeki metan gazından alan biyogaz, hava ile yaklaşık 1/7 oranında karıştığında tam yanma sağlar. Isıtma amaçlı fırın, ocak, termosifon ve şofbenlerde kullanılabilir. Ayrıca, uygun basınç ayarıyla LPG sobalarında da kullanılabilir. İçeriğindeki hidrojen sülfür gazının yanmadan ortama yayılmasını önlemek için baca sistemi gereklidir. Bu nedenle daha güvenli bir ısınma için kalorifer sistemleri tercih edilir. Biyogazın ısıtma cihazlarında kullanımı diğer alanlarda kullanımlarına göre daha verimli ve yaygın bir seçenektir (Gülen ve Çeşmeli, 2012; Koçer ve Kurt, 2013).

2.10.2 Biyogazın aydınlatmada kullanımı

Biyogaz, doğrudan yakılarak veya elektrik enerjisine dönüştürülerek aydınlatmada kullanılabilir. Doğrudan kullanımda LPG ile çalışan lambalar tercih edilir. Bu sistemde amyant gömlek ve cam fanus, ışık şiddetini artırmak ve ısıyı geri yansıtarak alevin verimini yükseltmek amacıyla kullanılır (Gülen ve Çeşmeli, 2012; Koçer ve Kurt, 2013). Biyogazla çalışan lambaların verimi yalnızca %3'tür ve 60 Watt gücündeki bir lamba saatte yaklaşık 0,11–0,15 m³ biyogaz tüketir. Düşük verim nedeniyle biyogazın doğrudan yakılarak aydınlatmada kullanılması ekonomik değildir. 1 m³ biyogazdan elde edilen elektrikle 60 Watt'lık 25 adet lamba bir saat çalıştırılabilirken, doğrudan yakıldığında yalnızca 7 adet gaz lambası aynı sürede çalıştırılabilir (Deviren vd., 2017).

2.10.3 Biyogazın motorlarda kullanımı

Biyogaz, petrol türevleriyle çalışan tüm içten yanmalı motorlarda kullanılabilir ve birçok ülkede otobüsler ile diğer taşıma araçlarında dizel yakıtlara çevre dostu bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Biyogazla çalışan motorlar, dizel motorlara kıyasla daha düşük gürültü seviyesine sahiptir ve egzoz ile NO_x emisyonları da daha azdır (Deviren vd., 2017). Bununla birlikte dizel motorlarda biyogaz, %18–20 oranında motorinle karıştırılarak kullanılmalıdır. Biyogaz, benzinli motorlarda katkı maddesi gerekmeden doğrudan kullanılabilir; ayrıca metan gazı saflaştırılarak da kullanılabilir (Gülen ve Çeşmeli, 2012; Koçer ve Kurt, 2013). Biyogazın içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılmasındaki teknik avantajlar; yakıtın yüksek metan içeriği sayesinde tam yanma sağlaması, motor yağlayıcılarının kimyasal stabilitesini koruması ve vuruntuya neden olmamasıdır (Deviren vd., 2017).

2.11 Biyogaz Üretiminde Kullanılan Atıklar

Biyogaz, çeşitli biyokütle kaynaklarından elde edilebilen yenilenebilir bir enerji türüdür. Bu bağlamda, organik maddeler ile organik atıklardan üretilmesi biyogazı sürdürülebilir enerji üretiminde önemli bir alternatif haline getirmektedir (Şenol vd., 2017; Weiland, 2010). Türkiye, biyokütle ve organik atık kaynakları açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Organik atıklar toplam atıkların yaklaşık %65'ini oluşturur. Ayrıca, biyogaz potansiyelinin mevcut doğal gaz tüketiminin %88'ine denk geldiği tahmin edilmektedir (Cantekin, 2022). Bu nedenle, atıkların değerlendirilerek enerjiye dönüştürülmesi ve geri kazanımın önemli bir husustur. Biyogaz üretimi sonucu ortaya çıkan yan ürünler ise organik gübre olarak kullanılma potansiyeline sahip olup, hayvan gübresinden elde edilen organik atıkların anaerobik sindirimle oluşan gübre toprak verimini %10 oranında artırmaktadır (Şenol vd., 2017).

Organik atıklardan elde edilebilecek biyogaz miktarı, atıkların kimyasal yapısı, bakteriyel metabolizma için gerekli besin maddeleri içeriği, selüloz oranı, karbon/azot (C/N) oranı ve biyokimyasal parçalanma özellikleri gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Ayrıca tarımsal, toplumsal ve endüstriyel atıklar ile atık sular gibi çeşitli kaynaklar biyogaz üretim sistemlerinde besleme materyali olarak kullanılabilir. Bu organik atıkların bertaraf edilmesi çevre kirliliği açısından son derece önem kazanmaktadır (Deviren vd., 2017).

Biyogaz üretiminde birçok organik atık maddeler kullanılabilir. Bunlar bitkisel, hayvansal ve kentsel atıkları olarak sınıflandırılabilir.

2.11.1 Bitkisel atıklar

Bitkisel kalıntılar, tarımsal üretim süreçlerinden geriye kalan çeşitli bitkisel yan ürünleri ve hasat artıklarını kapsamaktadır. Bu kalıntılar arasında; bitki ve bitki parçaları, düşük kaliteli ya da bozulmuş ürünler, meyve ve sebze atıkları ile bozulmuş yem silajları yer almaktadır (Aksay, 2018). Bu atıkların bazı bileşenleri, anaerobik fermentasyon süreçlerinde değerlendirilebilmektedir. Özellikle taze bitki yaprakları, biyogaz üretimi açısından yüksek potansiyele sahip olup anaerobik fermentasyon için oldukça uygun materyaller arasında yer almaktadır. Ancak yeşil atıkların fermentasyon sürecine dâhil edilmeden önce belirli ön işlemlerden geçirilmesi gerekmektedir. Örneğin yeşil yaprakların küçük parçalara ayrılması önemlidir, zira uzun çimen parçaları gibi materyaller reaktör içerisinde sıvı fazın yüzeyinde birikerek sürecin etkinliğini olumsuz etkileyebilmektedir. Bu durum hem biyogaz üretim verimini düşürmekte hem de sistemde fiziksel tıkanmalara yol açabilmektedir. Tüm bu nedenlerle bitkisel atıkların kullanıldığı biyogaz tesislerinde proses kontrolü büyük önem arz etmekte olup, atık özelliklerine uygun ön işlem ve sistem yönetimi, verimli bir biyogaz üretimi için temel unsurlardır (Kaya ve Öztürk, 2012). Bu tür bitki artıkları, genellikle hayvan gübreleri ve diğer organik hammaddelerle birlikte yardımcı madde olarak anaerobik sindirim sürecinde kullanılmaktadır (Aksay, 2018).

Enerji üretiminde, orman ürünleri kapsamında ise enerji ormanları ve ağaç atıkları kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, tarım ürünlerinden elde edilen çeşitli bitkiler de enerji üretimi amacıyla değerlendirilmektedir (Karaosmanoğlu, 2006).

Enerji amaçlı kullanılan başlıca tarım bitkileri şunlardır:

- Yağlı tohum bitkileri: Ayçiçeği, kolza (kanola), soya, aspir, susam, yer fıstığı
- Karbonhidrat içeriği yüksek bitkiler: Patates, buğday, mısır, şeker pancarı, şeker kamışı
- Elyaf bitkileri: Keten, kenaf, kenevir, sorgum

Türkiye’de arpa, buğday, çeltik gibi çeşitli tarım ürünlerinden yıllık yaklaşık 65 milyon ton organik atık oluşmaktadır. Bu atıklar, anaerobik fermentasyonla metan

gazına dönüştürülerek ısınma, elektrik üretimi ve sanayi gibi alanlarda enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Süreç sonucunda ayrıca organik gübre de elde edilmektedir. Biyogazın yanmasıyla atmosfere salınan CO₂ miktarı, bitkilerin fotosentez sırasında atmosferden aldığı CO₂ ile dengede olduğundan, biyogaz çevre dostu ve sera gazı salımını azaltıcı bir enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır (Dursun vd., 2015). Farklı bitkisel atıklardan elde edilen biyogaz miktarları ve içerikleri şu şekildedir:

- 1 kg buğday veya arpa samanı: Ortalama 250 litre biyogaz, %60 oranında metan (CH₄) içerir.
- 1 kg mısır sapı ve atıkları: Yaklaşık 420 litre biyogaz, ortalama %59 CH₄ oranına sahiptir.
- 1 kg yer fıstığı kabuğu: Ortalama 365 litre biyogaz üretir.
- 1 ton mısır silajı: Yaklaşık 185 m³ biyogaz sağlar. Mısır silajı, kıyılmış mısır bitkisinden elde edilir. Küçük parçacıklar haline getirilen mısır bitkisi, artan yüzey alanı sayesinde biyogaz verimliliğini önemli ölçüde artırır. Mısır silajı, yüksek verim potansiyeli nedeniyle biyogaz üretiminde yaygın olarak tercih edilmektedir (Şenol vd. 2017).

Bunun yanı sıra biyogaz üretiminde kullanılan bazı bitkisel atıkların biyogaz verimi ve hacimce yüzde metan oranları Çizelge 2.8’de özetlenmiştir (Ergişi, 2019).

Çizelge 2.8. Biyogaz üretiminde kullanılan bazı bitkisel atıklar ve hacimce metan oranları.

Kaynak	Biyogaz Verimi (L/kg)	Metan Oranı (%)
Buğday Samanı	200-300	50-60
Çavdar Samanı	200-300	59
Arpa Samanı	290-310	59
Mısır Sapları ve Atıkları	380-460	59
Keten-Kenevir	360	59
Çimen	280-550	70
Sebze Artıkları	330-360	Değişken
Ziraat Atıklar	310-430	60-70
Yerfıstığı Kabuğu	365	-
Dökülmüş Ağaç Yaprakları	210-290	58
Algler	420-500	63
Atık su çamuru	310-800	65-80

2.11.2 Hayvansal atıklar

Anaerobik çürütme işleminde en çok kullanılan substrat hayvansal dışkı ve zirai atıklar olarak karşımıza çıkmaktadır. Hayvansal atıkların arıtılmadan doğrudan çevreye

bırakılması, özellikle metan gazı salınımı nedeniyle küresel ısınmayı hızlandırmakta; ayrıca yer altı ve yer üstü su kaynaklarının kirlenmesine ve hem insan hem de çevre üzerinde olumsuz etkilere yol açmaktadır (Tolay vd., 2008). Ülkemizde hayvan atıkları genel olarak tarım yapılan arazilerde gübre olarak kullanılmakta veya enerjiye dönüştürülmeden yok edilmektedir. Ancak atıklardan yararlanmanın en iyi yollarından biri biyogaz enerjisi üretimidir (Salihoğlu vd., 2019). Bu atıklar biyogaza dönüştürüldüğünde, zararlı maddelerden arındırılmakta ve ortaya çıkan yan ürünler daha yüksek kalitede gübre olarak değerlendirilmektedir (Akbulut ve Dikici, 2004).

Biyogaz teknolojisinin uygulanması sayesinde, geleneksel olarak yaklaşık bir yıl boyunca bekletilerek tarım arazilerine uygulanan hayvan gübresinin olgunlaşma süresi 15–20 güne kadar düşürülebilmektedir. Bu kısaltılmış süre, gübrenin bekletilmesi sırasında meydana gelen azot ve diğer bitki besin maddelerinin kaybını önemli ölçüde azaltmaktadır. Ayrıca, biyogaz üretim süreci sonucunda hem yenilenebilir enerji kaynağı olan metan gazı elde edilmekte hem de işlemde geçmiş olan organik materyal toprağa uygulanmak üzere gübre formuna dönüşmektedir. Bu durum, organik atıkların çevreye zarar vermeden yeniden tarım sistemine kazandırılmasını sağlamak ve dolayısıyla tarımsal üretkenliğin artırılmasına katkı sunmaktadır (Koçer vd., 2006).

Büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvan gübreleri yüksek biyogaz üretim potansiyeline sahiptir. Büyükbaş hayvanlar; yerli sığır, kültür sığı, melez sığır ve manda olmak üzere dört grupta sınıflandırılır. Küçükbaş hayvanlar ise merinos, yerli koyun, kıl keçisi ve tiftik keçisi olarak dört cinsten oluşur. Kanatlı hayvanlar ise yumurta tavuğu, et tavuğu, ördek, hindi ve kaz olmak üzere beş gruba ayrılmaktadır (Görmüş, 2018). Hayvancılık faaliyetleri sonucu elde edilen gübrenin miktarı ve kalitesi; hayvanın türü, beslenme rejimi, vücut ağırlığı ile çevresel iklim koşullarına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bu değişkenler, gübrenin biyogaz üretim potansiyelini ve tarımsal kullanım değerini doğrudan etkilemektedir (Deviren vd., 2017). Farklı cins hayvanlardan elde edilecek hayvansal atıklar için biyogaz verimi ve biyogaz içerisindeki ortalama metan oranları Çizelge 2.9’da gösterilmiştir (Gülen ve Arslan, 2005).

Çizelge 2.9. Hayvansal kaynaklardan elde edilebilecek biyogaz verimleri.

Kaynak	Biyogaz Verimi(L/kg)	Metan Oranı (%)
Sığır gübresi	90-310	65
Koyun gübresi	180-450	60
Kanatlı gübresi	310-620	60
Domuz gübresi	340-550	65-70

Ayrıca ülkemiz genelinde büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvan sayılarına göre atık miktarları ve bu sayılara karşılık gelen enerji eşdeğerleri Çizelge 2.10’da verilmiştir (URL-10).

Çizelge 2.10. Türkiye geneli büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvan sayılarına göre atık miktarları ve enerji eşdeğerleri (URL-10).

Hayvan Adı	Hayvan Sayısı (adet)	Atık Miktarı (ton)	Enerji Eşdeğeri (TEP/yıl)
At	108.076	591.716,1	3.167,8
Deve	1.708	17.455,8	140,2
Domuz	1.636	1.194,3	9,6
Eşek	133.953	366.696,3	1.177,9
Katır	30.837	135.066,1	578,5
Manda	178.397	1.302.298,1	9.760,6
Sığır (Kültür)	8.419.204	76.825.236,5	616.925,9
Sığır (Melez)	7.030.297	46.189.051,3	296.727,7
Sığır (Yerli)	1.593.005	8.721.702,4	46.691,6
Keçi (Kıl)	10.698.553	7.809.943,7	12.543,2
Keçi (Tiftik)	223.874	163.428,0	262,5
Koyun (Merinos)	2.681.679	2.936.438,5	7.074,1
Koyun (Yerli)	32.513.293	35.602.055,8	85.768,0
Et Tavuğu	229.506.689	6.196.680,6	1.549.449,0
Hindi	4.043.332	151.625,0	37.913,1
Kaz	1.080.190	50.552,9	12.640,5
Ördek	532.841	24.937,0	6.235,4
Yumurta Tavuğu	124.054.810	6.792.000,8	1.698.305,9

2.11.3 Kentsel katı atıklar

Günümüzde artan kentleşme ve değişen tüketim alışkanlıkları, etkin bir atık yönetim sistemini hem çevresel sürdürülebilirlik hem de kaynak verimliliği açısından zorunlu hale getirmektedir.

Bu bağlamda, kaynağında ayırma yöntemi anaerobik fermentasyon gibi biyolojik dönüşüm süreçlerinde kullanılmak üzere temiz, homojen ve yüksek kaliteli organik malzeme elde edilmesini sağlayan etkili bir yaklaşımdır. Kaynağında ayrılmış organik atık, ayrı olarak toplanan gıda atıkları, bahçe atıkları ve diğer benzer organik atıklar gibi evsel atıkların organik fraksiyonunu ifade eder. Aynı zamanda bu yöntem, organik maddelerin enerji veya gübre olarak değerlendirilmeden doğrudan çöp depolama sahalarına ya da atık yakma tesislerine yönlendirilmesini engelleyerek çevresel

etkilerin azaltılmasına katkı sunmaktadır. Ayrı olarak toplanan organik ev atıkları, genellikle gübre bazlı anaerobik fermentasyon tesislerinde hayvan gübresi ve bulamaçlarla birlikte sindirilir (Rutz vd., 2011).

Belediye atıksularının arıtımı sonucunda oluşan birincil ve ikincil çamurlarının işlenmesinde ise anaerobik sindirim teknolojisi dünya genelinde yaygın olarak kullanılan ve standartlaşmış bir yöntemdir. Bu teknoloji, binlerce atıksu arıtma tesisinde modern arıtma sistemlerinin temel bir bileşeni olarak kullanılmaktadır. Kanalizasyon çamuru, biyogaz üretimi açısından değerlendirildiğinde ise hayvansal atıklarla benzer düzeyde metan üretim potansiyeline sahiptir. Özellikle birincil çamur, atık aktif çamura kıyasla daha yüksek metan verimi sağlayabilmektedir. Metan üretim verimliliğini artırmak ve çamurdaki bakteri biyokütlesinin parçalanmasını kolaylaştırmak amacıyla çeşitli ön işlem teknikleri uygulanmaktadır. Bu teknikler sayesinde organik maddeler anaerobik bozunmaya daha elverişli hale getirilerek biyogaz üretimi optimize edilmektedir (Rulkens, 2008). Kanalizasyon çamurunun biyogaz üretiminde hammadde olarak kullanılmasındaki temel sınırlayıcı etken, içerdiği yüksek düzeyde kirletici maddelerdir. Bu çamur, kaynağı gereği hem biyolojik hem de kimyasal açıdan çeşitli kirleticiler barındırmaktadır. Bu durum, özellikle anaerobik sindirim süreci sonrasında elde edilen ve tarımsal amaçla gübre olarak kullanılabilen bulamacın kalitesini olumsuz etkileyebilmekte, çevresel ve halk sağlığı açısından riskler oluşturabilmektedir (Smith, 2009).

2.12 Biyogaz Teknolojisinin Avantajları

Küresel enerji arzı büyük ölçüde yenilenemeyen fosil yakıtlara dayanmaktadır. Bu kaynaklar, milyonlarca yıl süren doğal süreçler sonucu oluştuğu için hızla tükenmektedir. Bilimsel tahminlere göre ham petrol üretiminin zirve noktası ya çoktan aşılmış ya da yakın gelecekte aşılacaktır. Bu durum enerji arz güvenliğini tehdit etmektedir. Buna karşılık biyokütleden anaerobik sindirim yoluyla elde edilen biyogaz sürekli yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Biyogaz, yalnızca enerji dengesini iyileştirmekle kalmaz aynı zamanda doğal kaynakların korunmasına ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlar. Bu kapsamda biyogazın üretilmesi ve kullanılması doğrultusunda çeşitli avantajları mevcuttur (Khayal, 2019).

İlk olarak çevresel açıdan değerlendirildiğinde, biyogaz üretimi sera gazı emisyonlarını azaltmada önemli bir rol oynamaktadır. Linyit, taş kömürü, ham petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtların kullanımı milyonlarca yıl boyunca yeryüzü kabuğunda depolanmış olan karbonun karbondioksit (CO₂) olarak atmosfere salınmasına neden olmaktadır. Atmosferdeki CO₂ yoğunluğunun artması ise bu gazın bir sera gazı olması nedeniyle küresel ısınmaya yol açmaktadır. Biyogazın yanması da CO₂ salınımı gerçekleştirir; ancak fosil yakıtlardan farklı olarak biyogazdaki karbon kısa süre önce bitkilerin fotosentetik faaliyetleriyle atmosferden alınır. Bu nedenle biyogazın karbon döngüsü çok kısa bir zaman diliminde tamamlanmakta ve böylece karbon salımı dengelenmektedir (Khayal, 2019). Bu durum iklim değişikliği ile mücadelede etkili bir araç olarak değerlendirilmektedir (Koçer ve Kurt, 2013).

Biyogaz üretimini ve kullanımını çevre kirliliği hususunda değerlendirdiğimizde diğer önemli bir unsur ise hayvansal atıklardır. Bu atıklar uygun şekilde yönetilmediğinde çevresel açıdan ciddi riskler oluşturan başlıca organik atık türlerindendir. Bu tür atıklardaki yabancı bileşenler yeraltı sularını tehdit edebilmektedir (Şenol vd., 2017). Ayrıca anaerobik sindirim (AD) yoluyla biyogaz üretimi işlenmemiş hayvan gübresinin doğrudan gübre olarak kullanılmasından kaynaklanan metan (CH₄) ve diazot monoksit (N₂O) emisyonlarını da azaltmaktadır. Metan gazının sera gazı etkisi karbondioksit göre 23 kat, diazot monoksitin ise 296 kat daha fazladır. Bu bağlamda biyogaz enerji üretimi ve ulaşımda fosil yakıtların yerini aldığı anda CO₂, CH₄ ve N₂O emisyonlarının azalmasına katkı sağlayarak küresel ısınmanın etkilerini azaltır (Khayal, 2019). Ayrıca işlenmemiş hayvan gübresinin antibiyotik kalıntıları, hormonlar, ağır metaller ve patojen mikroorganizmalar içerebilmesi hem çevresel hem de halk sağlığı açısından tehdit oluşturmaktadır. Bu kapsamda hayvansal atıkların anaerobik sindirim yöntemiyle işlenmesi, patojen yükünün azaltılması, koku emisyonlarının kontrolü ve nitelikli organik gübre elde edilmesi gibi çevresel ve ekonomik açıdan önemli avantajlar sunmaktadır (Gebrezgabher vd., 2010; Seyhan ve Badem, 2018). Özellikle anaerobik sindirim sonucu oluşan gübre toprak verimini %10 artırmaktadır. Böylece organik gübre için biyogaz üretimi yapmak hem biyogaz üretiminden enerji elde etmek için faydalı hem de organik gübre elde edilmesi açısından avantajlıdır (Şenol vd., 2017). Böylece hem toprak sağlığı korunmakta hem de çevresel sürdürülebilirlik desteklenmektedir.

Biyogaz teknolojisinin önemli bir diğer avantajı ise ölçeklendirilebilir olmasıdır. Biyogaz, büyük ölçekli tesislerde üretilebilmektedir. Ancak bu tür tesislerin tasarım ve inşaat aşamalarında olduğu gibi işletme ve bakım süreçlerinde de uzman bilgiye ihtiyaç vardır. Bu alandaki bilgi eksikliği biyogaz tesisinde işletme problemlerine yol açabilir (Nevzorova ve Kutcherov, 2019). Biyogaz gibi enerji kaynağını diğer biyoyakıtlarla karşılaştırıldığında ise bazı avantajlara sahiptir. Bunlardan biri, anaerobik sindirim sürecinin en az miktarda proses suyuna ihtiyaç duymasındır. Bu özellik, küresel ölçekte öngörülen su kıtlıkları açısından önemli bir avantaj olarak öne çıkmaktadır (Khayal, 2019). Buna ek olarak çok yönlü bir enerji kaynağıdır, hem ısıtma hem de elektrik üretimi amacıyla kullanılabilir ve %95 CH₄ içeren biyogaz doğal gaz saatlerinde ufak bir değişiklik yaparak doğal gazın yerine kullanılabilme potansiyeline sahiptir (Şenol vd., 2017).

Toplumsal açıdan bakıldığında diğer önemli bir avantajı ise biyogaz tesislerinin binlerce kişiye istihdam olanağı sağlayarak önemli ölçüde iş imkânı yaratmasıdır. Özellikle biyogaz kullanımının hedeflendiği kırsal bölgelerde istihdam büyük bir avantaj olarak öne çıkar (Bagher vd., 2015). Ek olarak biyogaz üretiminde kullanılan hammaddenin yetiştirilmesi ve tesislerin işletilmesi çiftçiler için ekonomik açıdan cazip bir gelir kaynağı oluşturmaktadır. Ayrıca çiftçiler, enerji üreticisi ve atık yönetimi sağlayıcısı olarak yeni bir sosyal rol üstlenmektedir (Khayal, 2019).

Son olarak biyogaz üretimi hayvancılık faaliyetlerini teşvik ederek bu alandaki ekonomik hareketliliği artırmakta, aynı zamanda ülkenin enerji arz güvenliğini güçlendirerek dışa bağımlılığı azaltmaktadır. Bu yönüyle biyogaz teknolojileri, sürdürülebilir kalkınmanın önemli bileşenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir (Koçer ve Kurt, 2013).

2.13 Biyogaz Teknolojisinin Dezavantajları

Biyogaz üretiminin ve kullanımının avantajlarının yanı sıra bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Biyogaz arıtma ve sıkıştırma işlemlerinden sonra bile bazı safsızlıklar içermeye devam etmektedir. Eğer bu biyoyakıt otomobillerde kullanılırsa motorun metal parçalarında korozyona neden olabilir (Bagher vd., 2015). Bu durum bakım maliyetlerinin artmasına yol açar. Bu nedenle biyogaz otomobil yakıtı olarak kullanmaktan ziyade ocaklar, su ısıtıcıları ve lambalar gibi evsel uygulamalarda

kullanıma daha uygundur (Khayal, 2019). Diğer önemli bir husus ise soğuk ve kurak bölgeler için daha az uygun olmasıdır (Maghanaki vd., 2013). Yenilenebilir diğer enerji kaynaklarında olduğu gibi (örneğin güneş ve rüzgâr enerjisi) biyogaz üretimi de hava koşullarından etkilenmektedir. Atıkları sindiren bakterilerin verimli çalışabilmesi için gereken optimal sıcaklık yaklaşık 37 °C'dir. Soğuk iklimlerde sindirim tanklarının sürekli biyogaz üretimini sürdürebilmesi için ilave ısı enerjisine ihtiyaç duyulmaktadır (Khayal, 2019).

Mevcut biyogaz üretim sistemleri hâlâ yeterince verimli değildir. Süreci basitleştirecek ve daha ekonomik hâle getirecek yeni teknolojiler çok az sayıda geliştirilmiştir. Bu nedenle biyogazın büyük ölçekli endüstriyel üretimi enerji sektöründe yaygın bir yer edinememiştir. Küresel enerji sorunlarına çözüm potansiyeli taşımaya rağmen başlangıç yatırımı için istekli yatırımcı sayısı oldukça azdır. Bu durum biyogaz üretiminin merkezi olmayan, ev tipi sistemlerle yaygınlaştırılmasının daha uygun olabileceğini göstermektedir (Bagher vd., 2015).

Tüm bu dezavantajlara rağmen birçok ülke biyogazın günlük yaşamda kullanımını teşvik etmeye başlamıştır. Toplu taşıma sistemleri, verimli sıkıştırılmış doğal gaz teknolojisinin desteğiyle genişletilmiş ve geliştirilmektedir. Karşılaşılan sorunlara rağmen biyogazın gelecekteki kullanımı açısından umut verici bir tablo söz konusudur.

2.14 Biyogaz Üzerine Yapılan Çalışmalar

Mermerkaya (2023), yaptığı bir çalışmada Yozgat ilinin hayvansal atık kaynaklı biyogaz potansiyelini genel ve ilçeler ölçeğinde araştırmıştır. 2021 yılı TÜİK verileri kullanılarak yapılan bu çalışmada, ilçeler ölçeğinde yapılan hesaplamalarda Akdağmadeni (15,291 MWh/yıl), Merkez (14,778 MWh/yıl) ve Sorgun (12,939 MWh/yıl) ilçeleri en yüksek enerji potansiyeli olan ilçeler olarak öne çıkmıştır. Yozgat genelinde ise hayvansal atıklardan elde edilebilecek biyogazın enerji değeri 102,683 MWh/yıl olarak belirlenmiştir (Mermerkaya, 2023).

Düver (2023) ise yaptığı çalışmada, Kütahya ilinin hayvansal atık kaynaklı biyogaz potansiyeli genel ve ilçeler ölçeğinde araştırmıştır. 2022 yılı TÜİK verileri kullanılarak yapılan bu çalışmada ilin hayvansal atık kaynaklı biyogaz potansiyeli yıllık 36,6 milyon m³ olarak hesaplanmıştır. İlçeler ölçeğinde yapılan hesaplamalarda ise

Tavşanlı (8,5 milyon m³), Merkez (7,3 milyon m³) ve Simav (6,4 milyon m³) ilçeleri öne çıkmıştır. Kütahya ilinde hayvansal atıklardan elde edilebilecek biyogazdan üretilebilecek elektrik enerjisi ise 92,354 MWh/yıl olarak hesaplanmıştır (Düver, 2023).

Yapılcan (2021) hazırladığı yüksek lisans tez çalışmasında Aksaray ilindeki hayvan gübrelereinden elde edilebilecek biyogaz miktarını araştırmıştır. Genel ve ilçeler ölçeğinde yapılan çalışmada 2020 yılı TÜİK ve Tarım ve Orman Bakanlığından elde edilen veriler kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalarda Aksaray ilinin hayvan gübresi kaynaklı biyogaz üretim miktarının 102.092.700 m³/yıl ve buna bağlı olarak elektrik enerjisi potansiyelinin ise 479.835.690 kWh/yıl olduğu sonucuna varılmıştır (Yapılcan, 2021).

Benzer şekilde Konya ilinin bazı ilçeleri için yapılmış çalışmalarda mevcuttur. Çizmeci (2023), Konya ili Seydişehir ilçesinde bulunan 18931 adet büyükbaş hayvanın biyogaz potansiyelinin hesaplanmasının yanı sıra biyogaz tesisinin hangi bölgeye kurulabileceği araştırmıştır. Araştırma sonucuna göre çalışma bölgesine kurulum maliyeti 169.196.948 ₺ olan 2,11 MW/h kapasiteli biyogaz tesisinin kurulabileceği ve bu tesisin yıllık getirisinin 51.828.233,10 ₺ olacağı tahmin edilmektedir (Çizmeci, 2023).

Özçelik (2020), Konya ili Beyşehir ilçesinde bulunan hayvan gübrelereinin biyogaz potansiyeli araştırmıştır. Araştırma için TÜİK Beyşehir Damızlık Sığır Yetiştiricileri Birliği ve Beyşehir Tarım Kredi Kooperatifi'nden elde edilen 2019 yılı verileri kullanılmıştır. Araştırma sonucunda Beyşehir ilinde bulunan büyükbaş, küçükbaş ve kümes hayvanlarının gübrelereinden elde edilebilecek kuru madde miktarı 31.150 ton ve bunun enerji değeri 141.419 GJ olarak hesaplanmıştır (Özçelik, 2020).

Kayseri ilinde bulunan büyükbaş ve kanatlı hayvan atıklarının biyogaz potansiyeli ilçeler ölçeğinde araştırılmış olup, üç durum için kurulacak biyogaz tesisinin maliyet açısından değerlendirilmiş ve tesise hammadde taşımaktan kaynaklan CO₂ salınımı hesaplanmıştır. Araştırma sonucunda en fazla biyogaz potansiyelinin Kocasinan ilçesinde, en az biyogaz potansiyelinin ise Felahiye ilçesinde olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca üç durum için yapılan hesaplamalarda taşımacılık için en az CO₂ salınımının

3. Durumda gerçekleştiği, en az elektrik üretim maliyetinin ise 2. Durumda olduğu ortaya konmuştur (Nuralan Poyraz, 2020).

Kahramanmaraş ili hayvansal atıklarının biyogaz potansiyeli ve elektrik enerjisi üretimi beş farklı model kullanılarak araştırılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda biyogaz potansiyelinin 37,5 milyon m³ ile 137,2 milyon m³ aralığında değiştiği, elektrik enerjisi üretiminin 94,8 GWh ile 264,8 GWh aralığında değiştiği ve bu miktarın Kahramanmaraş'ın elektrik enerjisi ihtiyacının % 3,8 ile % 10,6 arasında karşılayabileceği ortaya konmuştur. Ayrıca biyogaz enerji santrali yatırım maliyetinin 334.216.478,8 TL olduğu ve bu maliyetin 4 yılda amorti edilebileceği hesaplanmıştır (Ay, 2020).

Tekirdağ İl Tarım ve Orman Müdürlüğü'nden alınan 2018 yılı büyükbaş ve küçükbaş hayvan sayısı verileri kullanılarak Tekirdağ ili büyükbaş ve küçükbaş hayvan atıklarının biyogaz potansiyeli biyogaz ve enerji potansiyeli araştırılmıştır. Tekirdağ ili büyükbaş ve küçükbaş hayvan atıklarının biyogaz potansiyelinin 23.355.210,89 m³/yıl ve toplam enerji potansiyelinin 12.046,81 TEP/yıl olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca kurulu gücü 4 MW, 2,8 MW, 2,5 MW ve 1,2 MW olan dört adet tesisin tasarımı gerçekleştirilmiş ve maliyet analizi yapılmıştır (ğl, 2019).

Tokat ilinin büyükbaş, küçükbaş ve kümes hayvanlarının biyogaz potansiyeli araştırılmıştır. Araştırma için Tokat ilinin 2018 yılı TÜİK 2018 yılı verileri kullanılmıştır. Araştırma sonucunda Tokat ilinin büyükbaş, küçükbaş ve kümes hayvanlarının biyogaz potansiyeli 49,2 milyon m³/yıl ve enerji miktarı 124.042 MWh olarak hesaplanmıştır (Konuk, 2019).

Amasya ili için ise Aksu (2019), tarafından yapılan çalışmada büyükbaş, küçükbaş ve kümes hayvanlarının biyogaz potansiyeli araştırılmıştır. Araştırma için Amasya ilinin 2018 yılı TÜİK 2018 yılı verileri kullanılmıştır. Araştırma sonucunda Amasya ilinin büyükbaş, küçükbaş ve kümes hayvanlarının biyogaz potansiyeli 35,9 milyon m³/yıl ve enerji miktarı 90.474.000 kWh olarak hesaplanmıştır (Aksu, 2019).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Çalışma Alanı

Bu çalışmada Nevşehir ili ve ilçelerindeki hayvansal kaynaklı atıklardan üretilebilecek biyogaz miktarı ve biyogazdan üretilebilecek elektrik enerjisi hesaplanmıştır. Bu kapsamda hesaplamalara kaynak teşkil etmesi maksadıyla gerekli tüm veriler TÜİK'in veri portalı olan Merkezi Dağıtım Sistemi'nden temin edilmiştir.

3.2 Nevşehir İli Hakkında Genel Bilgiler

3.2.1 Tarihçe

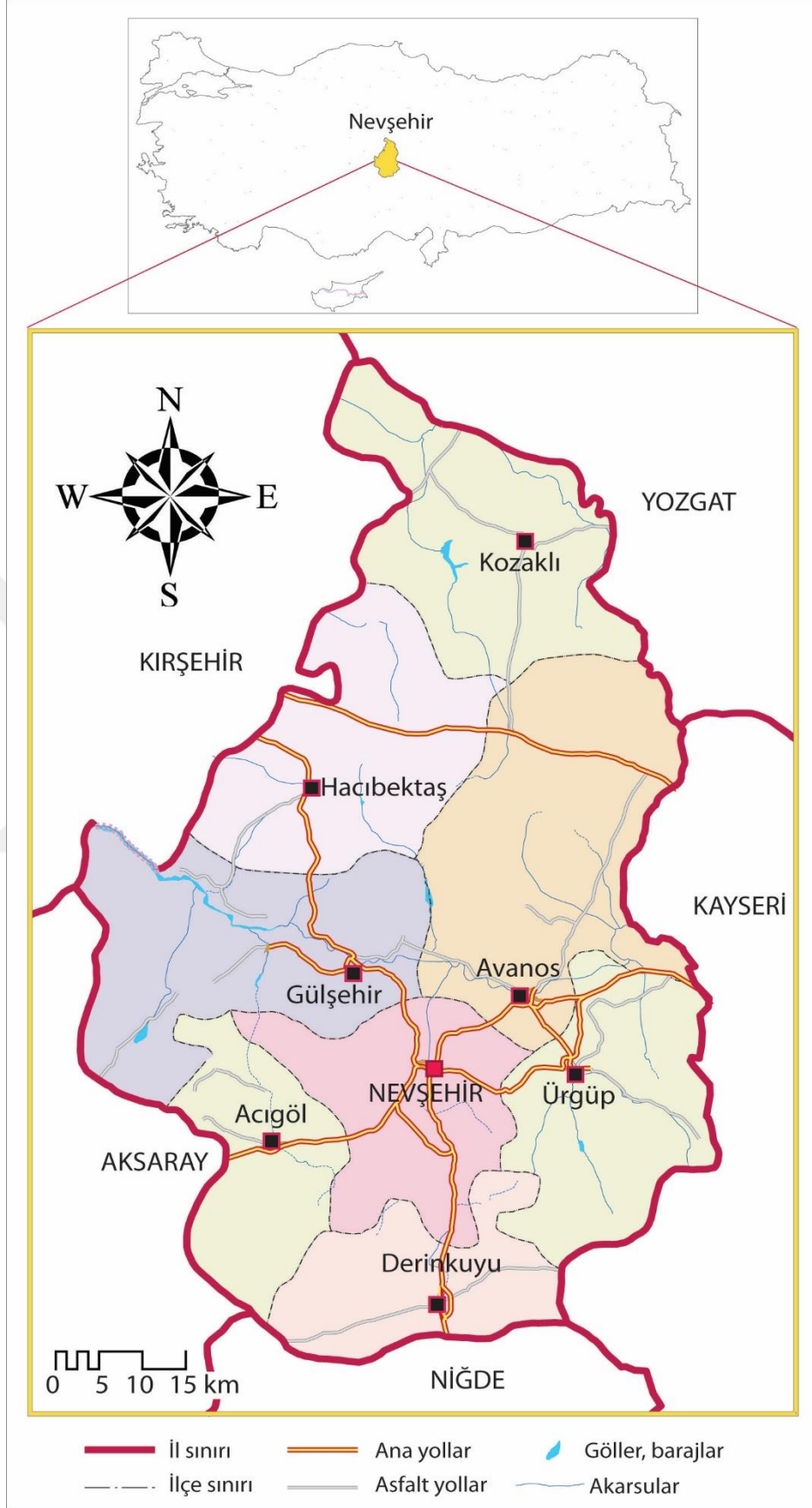
Nevşehir ilinin tarihi M.Ö. 7000 yıllarına dayanmaktadır. İl, “Güzel Atlar Ülkesi” anlamına gelen Kapadokya Bölgesi'nin merkezinde yer alır. Bölgeye sırası ile Hititler, Frigler, Asurlar, Persler, Romalılar, Selçuklular ve Osmanlılar egemen olmuşlardır.

Kapadokya Bölgesi M.S. 3. yüzyıldan itibaren Hristiyanlığın önemli merkezlerinden biri olmuştur. 1071 yılında gerçekleşen Malazgirt Savaşı'ndan sonra ise bölgede Türk köyleri kurulmaya başlamış, bölge 11. ve 12. yüzyıldan itibaren Selçuklu Devleti idaresine girmiş ve şehre “Muşkara” adı verilmiştir.

1725 tarihinde adı Nevşehir olarak değiştirilmiş olup, dönemin Osmanlı Sadrazamı olan Nevşehirli Damat İbrahim Paşa'nın girişimleriyle büyük bayındırlık hareketleri başlamıştır. İmaretler, camiler, medreseler ve çeşmeler inşa edilmiştir. Nevşehir ili 6429 Sayılı Kanun ile 20 Temmuz 1954 tarihinde İl statüsüne kavuşmuştur. Günümüzde Nevşehir ilinin; Acıgöl, Avanos, Derinkuyu, Gülşehir, Hacıbektaş, Kozaklı, Merkez ve Ürgüp olmak üzere 8 tane ilçesi bulunmaktadır (URL-11).

3.2.2 Coğrafi konumu

Nevşehir, İç Anadolu Bölgesi'nde 38° 12' ve 39° 20' kuzey enlemleri ile 34° 11' ve 35° 06' doğu boylamları arasında yer almaktadır. Konya Kapalı Havzası'nda kalan Derinkuyu ilçesi dışında bütünüyle Orta Kızılırmak Havzasına giren Nevşehir, konumu itibarıyla Türkiye'nin tam ortasında kalmaktadır. Kuzey doğusunda Yozgat, kuzey batısında Kırşehir, güneyinde Niğde, batısında Aksaray ve doğusunda Kayseri illeri ile çevrilidir. İlin yüzölçümü 5.392 km² olup, ülke topraklarımızın binde 7'sini kaplar (Şekil 3.1) (URL-12).



Şekil 3.1. Nevşehir ilinin coğrafi konumu ve il haritası (Harita genel komutanlığından değiştirilerek alınmıştır).

3.2.3 Jeolojik yapı

Nevşehir ili; Erciyes Dağı, Hasan Dağı ve Melendiz Dağı arasındaki volkanik bölgede yer alır. Bu volkanlarla birlikte diğer çok sayıdaki volkanik püskürmeler 10 milyon yıl önce başlamış ve günümüze kadar sürmüştür. Neojen gölleri altındaki yanardağlardan çıkan lavlar, platoda, göller ve akarsular üzerinde 100-150 metre kalınlığında farklı sertlikte tuf tabakasını oluşturmuştur. Volkan tüfleriyle lavlardan oluşan bu yapı Kızılırmak Vadisi'nin kuzeyinde de sürer. Tuf Vadisi'nin bazı kesimlerinde, alttaki temel yapı yüzeye çıkmış durumdadır.

Bu tabakanın bünyesinde tüften başka tüffit, ignimbirit tuf, lahar, volkan külü, kil, kumtaşı, marn, aglomera ve bazalt gibi jeolojik kayalar bulunmaktadır. Ana volkanlardan püsküren maddelerle şekillenen plato, şiddeti daha az küçük volkanların püskürmeleriyle sürekli değişime uğramıştır. Üst Pliosen'den başlayarak başta Kızılırmak olmak üzere akarsu ve göllerin bu tuf tabakasını aşındırmaları nedeniyle bölge bugünkü halini almıştır (URL-13).

İlin başlıca akarsuyunu il topraklarından geçen Kızılırmak Nehri oluşturur. Kızılırmak Vadisi'nin güney yamacına kurulmuş olan İl merkezinin rakımı 1.150 metre, İlin ortalama yükseltisi ise 1259 metredir. İlin genelinde engebeli bir yapı hâkimdir, bu nedenle İlde geniş ovalar bulunmamaktadır. Ancak Kızılırmak Nehri kıyısında dar düzlüklere rastlanmaktadır. İlin en önemli düzlüğü ise Konya Kapalı Havzası'nda yer alan Derinkuyu Ovasıdır (URL-12).

3.2.4 İklim ve bitki örtüsü

Karasal iklim kuşağına giren Nevşehir'in bitki örtüsü bozkırdır. İlde orman sayılabilecek bir ağaç topluluğu bulunmamaktadır. Yüzyıllarca süren insan faaliyetleri sonucu bölgede bulunan ormanlar yok olmuş, bu alanlar yerini bozkıra bırakmıştır. Yalnızca Doğala ve Topaç köyleri arasındaki dağlık kesimde seyrek meşe toplulukları bulunur.

Nevşehir yöresinde yazlar sıcak ve kurak, kışlar ise sert ve soğuk geçmektedir. İl, Kuzey ve Güney Anadolu Dağ sistemleri nedeniyle deniz etkisine kapalı Orta Anadolu Bölgesi'nde yer aldığından yağışlar azdır. Yağışlar daha çok İlkbahar ve Sonbahar

mevsimlerinde yaşanmaktadır. İklim özellikleri Kızılırmak Vadisi'nden uzaklaştıkça sertleşmektedir (URL-13).

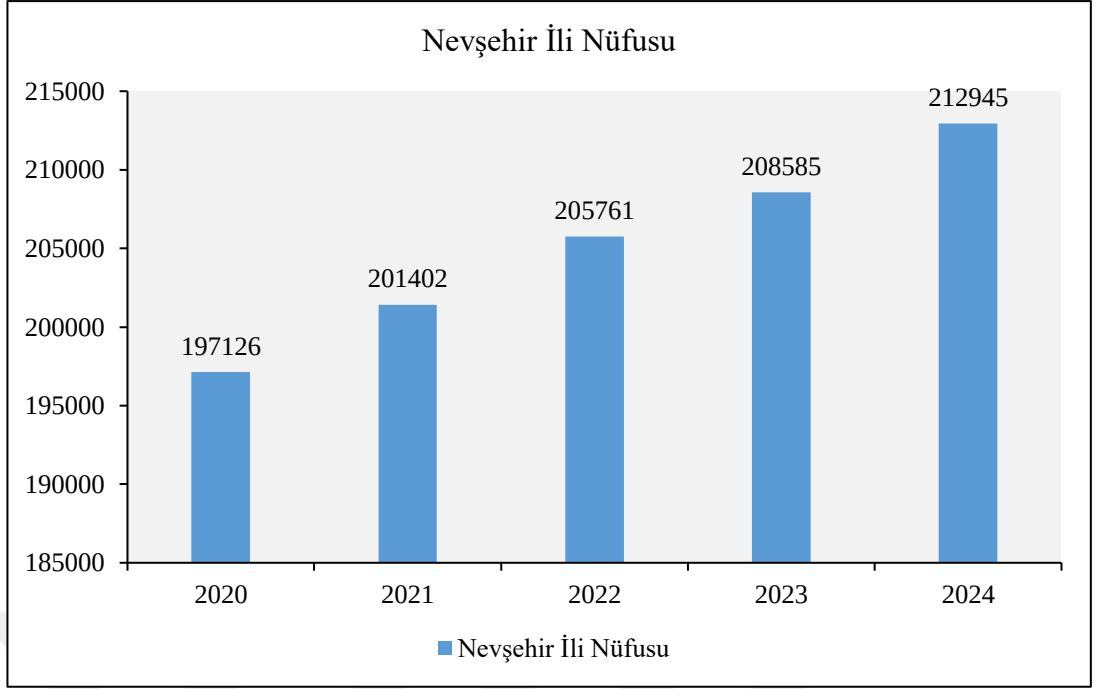
3.2.5 Kültür ve turizm

Nevşehir'in de içinde yer aldığı Kapadokya Bölgesi'nin sınırları Antik Dönemde; güneyde Kilikya, kuzeyde Karadeniz, doğuda Malatya-Elazığ, batıda ise Konya'ya kadar uzanmaktaydı. Günümüzde ise Kapadokya; Nevşehir, Niğde, Aksaray, Kayseri ve Kırşehir illerinin bir bölümünü içine alan bölgedir ancak Kapadokya ismi Nevşehir ile özdeşleşmiştir.

Tarihi süreçte bölgede egemen olan uygarlıkların bıraktığı zengin bir tarihi eser ve kültürel varlığa, hem de volkanik dağlarla çevrili olması nedeniyle oluşan eşsiz tabiat harikası güzelliklere ve coğrafi oluşumlara sahiptir. Ülkemizde tarihi eser bilincinin artması ve turizmin gelişmeye başlaması ile birlikte 1952 yılında Göreme Açık hava Müzesi daha sonra Zelve Ören Yeri, Kaymaklı ve Derinkuyu Yer Altı Şehirleri temizlenerek ziyarete açılmıştır. Ören yerlerinin ziyarete açılması ve ziyaretçi potansiyelinin artması, günümüze kadar gelebilmiş eserlerin korunmasını ve restorasyonunu gündeme getirmiştir. Bölgede bulunan kaya kiliselerinin onarımına Kültür Bakanlığı ve ICCROM (Uluslararası Kültürel Değerleri Koruma ve Düzenleme Çalışmaları Merkezi) uzmanlarınca 1976 yılında Tokalı Kilise'nin restorasyonu ile başlanmıştır. Göreme Vadisi, UNESCO tarafından 1985 yılında Dünya Kültür Mirasına dâhil edilerek bölgenin korunmasına yönelik faaliyetlerin başlamasına hız kazandırmıştır. Bu gelişmeler neticesinde Nevşehir ili Kültür ve Turizm Bakanlığı 2023 Stratejisi kapsamında "Marka Kültür Turizm Kenti" ilan edilmiştir. Nevşehir'de; 170'i arkeolojik sit alanı, 16'sı kentsel sit alanı, 35'i doğal sit alanı, 9'u karma sit alanı olmak üzere 230 sit alanı ve 1614 kültür varlığı mevcuttur (URL-12).

3.2.6 Sosyal ve ekonomik yapı

Nevşehir ilinin güncel TÜİK verilerine göre toplam nüfusu 212.945'dir. Nüfus son 5 yılda %8'lik bir artış göstermiştir. İlin son 5 yılına ait nüfus bilgileri Şekil 3.2'de verilmiştir (URL-2).



Şekil 3.2. Nevşehir ilinin son beş yıla ait nüfus verileri.

Nevşehir nüfus yoğunluğu itibariyle göç almayan, kırsal kesimden başka illere göç veren ancak tarım ve turizm sektöründe çalışmak amacıyla mevsimlik işçilerin yoğun olarak bulunduğu bir şehirdir. Uzun yıllar yerleşik bir nüfusa sahip olması nedeniyle homojen bir yapı gösterir (URL-12).

Nevşehir ilinin ekonomik faaliyetleri incelendiğinde tarım, turizm, sanayi ve madencilik alanlarında etkili olduğu gözlemlenmektedir. Tarım alanında çekirdeklik kabak, patates, üzüm ve yumurta üretimi ile öne çıkmasının yanı sıra bölgede jeotermal seracılık da yapılmaktadır.

Bölgede yer alan yeraltı şehirleri, kiliseler ve vadilerle birlikte geleneksel el sanatları ve balon turları Nevşehir'in turizm alanında öne çıkmasında etkili olmuştur. Ayrıca bölgede jeotermal kaynakların bulunması sağlık turizminin gelişmesine önemli katkıda bulunmaktadır.

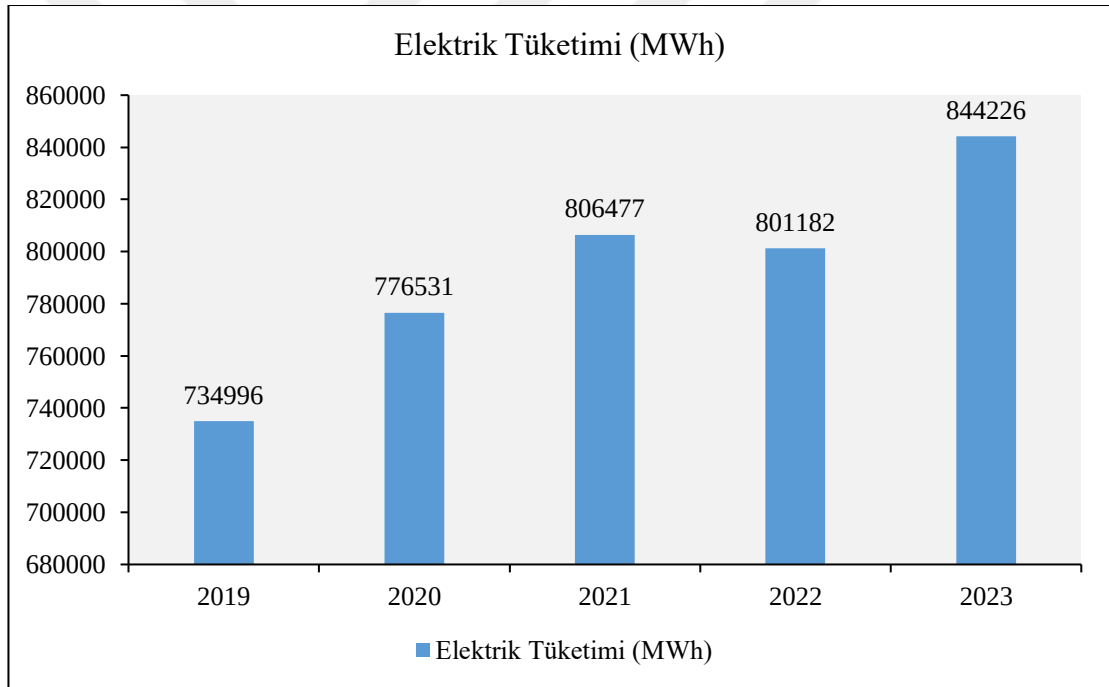
Nevşehir'de iki adet Organize Sanayi Bölgesi bulunmaktadır. Sanayi alanında gıda ve içecek sektörü ön plana çıkarken bununla birlikte inşaat, tekstil ve metal sanayi diğer önemli sektörlerdir.

Madencilik alanında ise başta inşaat olmak üzere pek çok sektörde kullanılan ve bölgede çokça rezervi bulunan ponza madeni öne çıkmaktadır (URL-14).

3.2.7 Elektrik tüketimi

Yapılan çalışmanın değerlendirilebilmesi ve enerjiye olan talebi gösterebilmesi açısından Nevşehir ilinin elektrik enerjisi tüketim verilerine ihtiyaç duyulmuştur. Bu nedenle Nevşehir ilinin son 5 yılına ait elektrik enerjisi tüketim miktarları TÜİK Merkezi Dağıtım Sistemi'nden temin edilen veriler Şekil 3.3'de gösterilmiştir.

Söz konusu veriler incelendiğinde 2022 yılı haricinde Nevşehir ilinin elektrik enerjisine olan talebi her geçen yıl artmış ve elektrik enerjisi tüketimi son beş yılda yaklaşık %15'lik bir artış göstererek 844.226 MWh ulaşmıştır (URL-2).

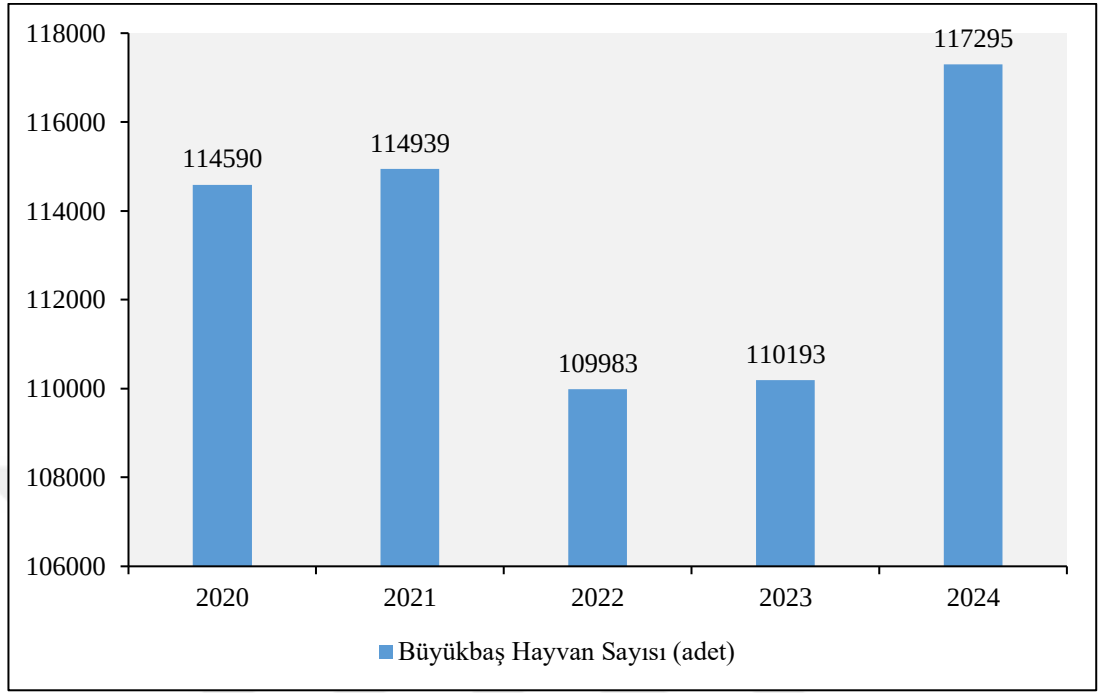


Şekil 3.3. Nevşehir ilinin son beş yıla ait elektrik tüketimi.

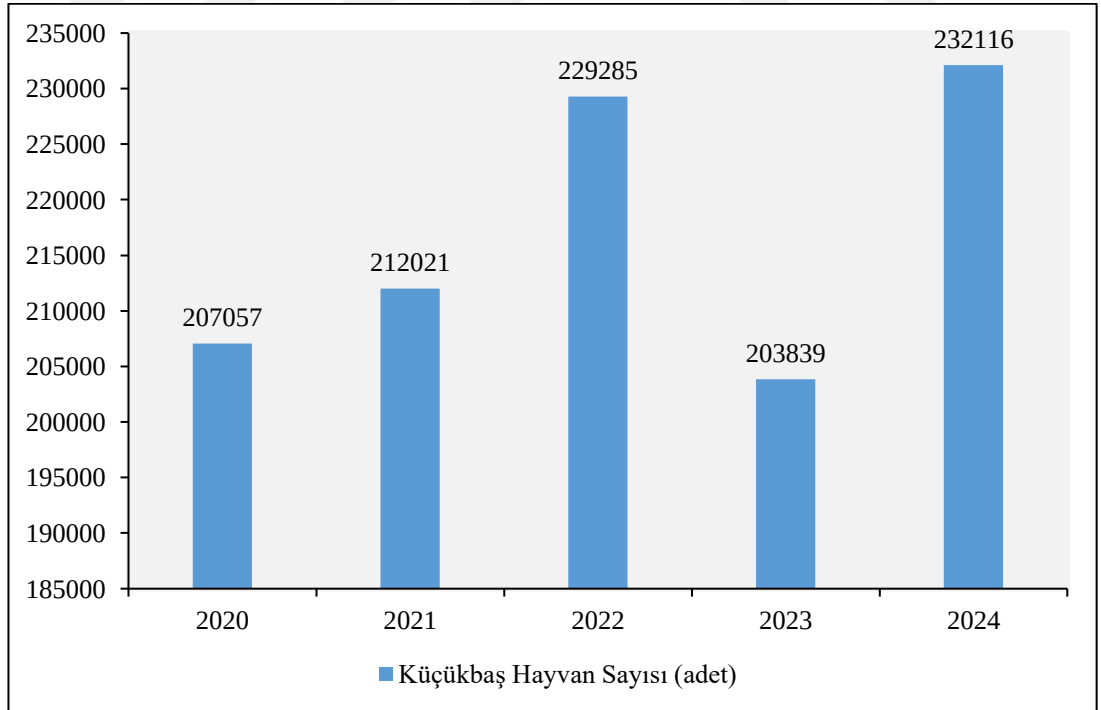
3.2.8 Hayvan varlığı

Çalışma kapsamında biyogaz üretimi için Nevşehir ilinde var olan büyükbaş, küçükbaş ve kümes hayvanlarının atıkları hammadde olarak kullanılacaktır. Bu nedenle ildeki hayvan varlığının ne durumda olduğunu göstermesi açısından son beş yıla ait ilgili veriler TÜİK Merkezi Dağıtım Sistemi'nden temin edilerek incelenmiştir. Büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvan sayılarında yıllara göre küçük çaplı dalgalanmalar yaşansa

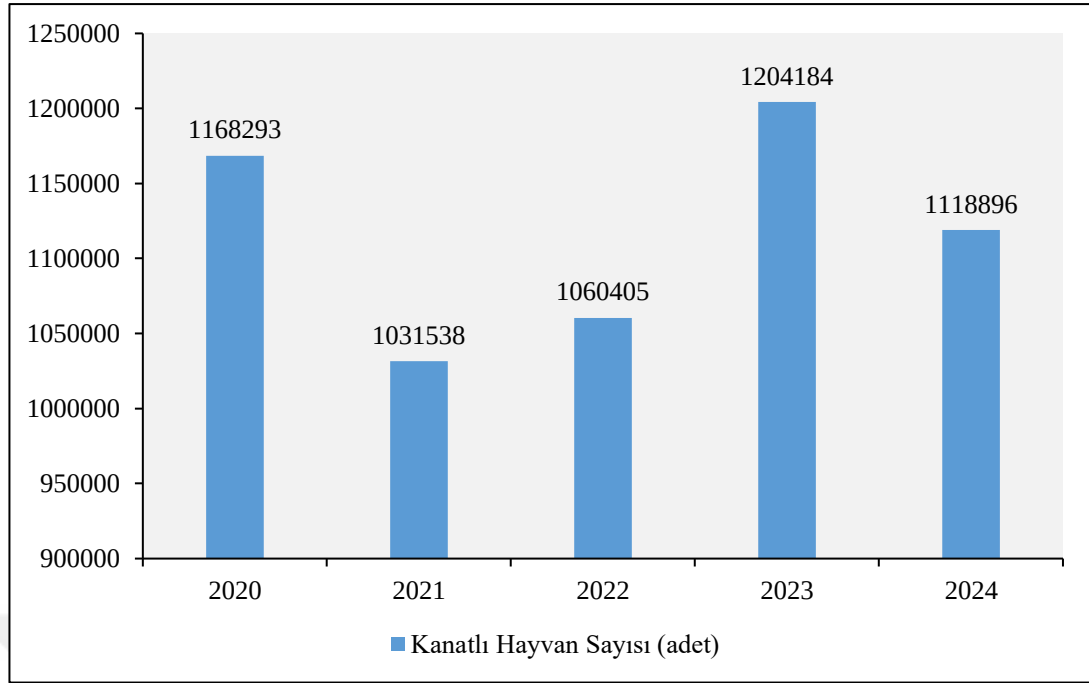
da mevcut durum hayvan varlığının korunmaya yönelik bir eğilim olduğunu göstermektedir. İlgili veriler Şekil 3.4, 3.5 ve 3.6’da gösterilmiştir (URL-2).



Şekil 3.4. Nevşehir ilinin son beş yıla ait büyükbaş hayvan miktarı.



Şekil 3.5. Nevşehir ilinin son beş yıla ait küçükbaş hayvan miktarı.



Şekil 3.6. Nevşehir ilinin son beş yıla ait kanatlı hayvan miktarı.

Yukarıdaki şekillerde gösterilen veriler Nevşehir ilindeki hayvan varlığını değerlendirmek için yeterli olsa da biyogaz potansiyelinin hesaplanması için büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvanları türlerine göre ayırmak gerekmektedir. Bunun nedeni her bir hayvan türünün ürettiği atık miktarının ve bununla beraber seçilen yöntemde yapılacak kabullerin farklı olmasıdır. Ayrıca bu ayırım yapılırken ilçeler ölçeğinde yapılması gerekmektedir. Sayılan nedenler göz önüne alınarak ilgili veriler TÜİK Merkezi Dağıtım Sistemi'nden temin edilmiş olup, Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Nevşehir'in ilçelerindeki hayvan türleri ve miktarları.

Hayvan Türü	Acıgöl	Avanos	Derinkuyu	Gülşehir	Hacıbektaş	Kozaklı	Merkez	Ürgüp
Süt Sığırı	9.343	13.410	13.420	14.184	6.600	4.705	10.711	3.320
Et Sığırı	1.610	3.422	687	898	3.217	1.365	1.794	787
Yerli Sığır	10	28	0	0	0	0	28	2
Buzağı	3.922	4.015	4.703	4.549	3.344	2.228	3.724	1.269
Koyun	17.983	57.400	23.159	48.291	26.377	22.718	11.469	13.961
Keçi	525	1.996	1.336	3.534	1.040	64	728	1.535
Et Tavuğu	0	38.295	0	0	0	37.353	0	0
Yumurta T.	10.835	551.800	13.600	163.270	9.850	274.295	3.961	6.500
Hindi	280	530	670	810	712	649	194	125
Ördek ve Kaz	349	380	488	1.875	830	838	334	73
Toplam	44.857	671.276	58.063	237.411	51.970	344.215	32.943	27.572

3.3 Biyogaz Potansiyeli İçin Kullanılan Yöntem

Nevşehir ilinde oluşan hayvansal atıkların tamamını toplamak mümkün değildir. Bu atıkların toplanması hayvanların kapalı mekânlarda bulunma süreleri ve burada toplayabilme imkânlarıyla doğru orantılıdır. Örneğin, kültür ve melez ırklardan olan et ve süt sığırları ahırlarda tutulurken yerli ırktan olan büyükbaş hayvanlar çayır ve meralara çıkarılmaktadır. Bu hususlar göz önüne alındığında hayvanların kapalı ortamda kalma süreleri ile biyogaz potansiyelinin hesaplanmasında kabul edilen değerler Çizelge 3.2’de verilmiştir (Yağlı ve Koç, 2019).

Çizelge 3.2. Nevşehir ili biyogaz potansiyelinin hesaplanmasında kabul edilen değerler.

Hayvan Türü	Hayvan Başına Ortalama Günlük Yaş Gübre Üretimi (M _{YG}) (kg/gün-hayvan)	Toplanabilir Faydalı Gübre Oranı (T) (%)	Yaş Gübredeki Katı Madde Oranı (KM) (%)	KM İçerisinde Uçucu Katı Madde Oranı (UKM) (%)	Metan Oranı (MO) (Nm ³ CH ₄ /kg-UKM)
Süt Sığırları	43	100	17,27	83,36	0,18
Et Sığırları	29	100	12,41	84,65	0,33
Yerli Sığır	29	50	17,27	83,36	0,33
Buzağı	2,48	100	3,71	44,23	0,33
Koyun	2,4	13	23	83,63	0,3
Keçi	2,05	13	23,17	73,06	0,3
Et Tavuğu	0,19	66	20	77,278	0,35
Yumurta T.	0,13	99	18,75	75	0,35
Hindi	0,38	68	19,36	75,83	0,35
Kaz-Ördek	0,33	68	17,27	61,28	0,35

Bu çalışma kapsamında kabulü yapılan bu değerler, aşağıda verilen ve ayrıntılı bir şekilde açıklaması yapılan denklemler kullanılarak Nevşehir ilinin biyogaz potansiyeli hesaplanmıştır. Biyogaz potansiyelini hesaplamak için öncelikle hayvanlar tarafından üretilebilecek yıllık gübre miktarını bulmak gerekmektedir. Bunun için (3.1) numaralı denklem kullanılmıştır.

$$M_{YYM} = M_{YG} * S * 365 \quad (3.1)$$

Burada; M_{YYM} hayvanlar tarafından bir yılda üretilebilecek toplam gübre miktarını (kg/yıl), M_{YG} bir hayvanın bir yılda üretebileceği gübre miktarını (kg/yıl-hayvan) ve S ise hayvan sayısı (adet) ifade etmektedir.

Hayvanlar tarafından bir yılda oluşabilecek toplam gübre miktarını (M_{YYM}) belirlendikten sonra sonra gübre miktarının ne kadarlık kısmının toplanabileceği (3.2) numaralı denklem ile hesaplanmıştır.

$$M_{YFYG} = M_{YYM} * T \quad (3.2)$$

Burada M_{YFYG} hayvanlar tarafından bir yılda üretilen gübrenin toplanabilir faydalı toplam yaş gübre miktarını (kg/yıl) ve T ise toplanabilir faydalı gübre oranını (%) ifade etmektedir. Bir sonraki aşamada ise toplam üretilen yıllık yaş gübre içerisindeki katı madde miktarı n (3.3)'de verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$M_{KM} = M_{YFYG} * KM \quad (3.3)$$

Burada M_{KM} hayvanlar tarafından bir yılda üretilen toplanabilir faydalı gübre içerisindeki toplam katı madde miktarını (kg/yıl) ve KM ise yaş gübredeki katı madde oranını ifade etmektedir. Katı madde miktarının ardından katı maddenin içerisinde yer alan uçucu katı madde miktarı denklem (3.4)'den yararlanılarak hesaplanmıştır.

$$M_{UKM} = M_{KM} * UKM \quad (3.4)$$

Burada M_{UKM} hayvanlar tarafından üretilen yaş gübre içerisindeki yıllık toplam uçucu katı madde miktarını (kg/yıl) ve UKM ise katı madde miktarı içerisindeki uçucu katı madde oranını (%) ifade etmektedir. Metan cinsinden biyogaz potansiyeli ise (3.5) numaralı denklem ile hesaplanmıştır.

$$M_{METAN} = M_{UKM} * MO \quad (3.5)$$

Burada M_{METAN} elde edilecek toplam metan miktarını ($m^3 CH_4/yıl$) ifade ederken, MO ise 1 kg uçucu katı maddeden üretilen metan miktarını ifade eder. % 60 metan içeriğine sahip biyogazın enerji değeri 22,7 MJ/Nm³ olduğundan metan gazının enerji değeri 36 MJ/Nm³ alınarak hesaplanmıştır.

Son olarak metan cinsinden elde edilen biyogazın bir kojenerasyon ünitesinde yakılması ile üretililecek elektrik enerjisi potansiyelini hesaplamak için (3.6) numaralı denklem kullanılmıştır.

$$E = M_{METAN} * \eta_e * W \quad (3.6)$$

Burada; E kojenerasyon ünitesinin elektrik üretim miktarını (MWh/yıl), η_e kojenerasyon ünitesinin verimini (%35 olarak kabul edilmiştir) ve W metan gazının kWh olarak enerji eşdeğeridir (10 kWh/m^3) (Yağlı ve Koç, 2019).

3.4 Biyogaz Tesisi Kurulum Maliyeti İçin Kullanılan Yöntem

Nevşehir ilinin biyogaz potansiyeli ilçeler ölçeğinde araştırıldıktan sonra genel bir değerlendirme yapılarak biyogaz tesislerinin kurulumu için uygun bölgeler seçilecektir. Öncelikle seçilen bölgelerdeki elektrik enerjisi potansiyeli ile birlikte kurulacak tesislerin 365 gün 22 saat çalışacağı varsayılarak kurulu güç potansiyeli belirlenecektir.

Kurulu güç belirlendikten sonra tesisin toplam maliyetini bulmak için öncelikle denklem (3.7) ile biyogaz tesisi birim fiyatı ve denklem (3.8) ile kojenerasyon ünitesinin birim fiyatı hesaplanmıştır.

Birim fiyatlar hesaplandıktan sonra yıllık toplam atık miktarı (TA) kurum maliyeti birim fiyatı (KM_{BT}) ile çarpılarak kurulum maliyeti, tesisin kurulu gücü (P_e) kojenerasyon ünitesi birim fiyatı (KM_{KJ}) ile çarpılır ve elde edilen iki değer toplanarak tesisin toplam kurulum maliyeti hesaplanır.

$$KM_{BT} = -46,482 * \ln(TA) * 620,22 \quad (3.7)$$

Burada KM_{BT} (€/ton-yıl) kurulum maliyeti birim fiyatı, TA (ton/yıl) ise toplam atık miktarıdır.

$$KM_{KJ} = 3790,4 * P_e^{-0,2} \quad (3.8)$$

Burada KM_{KJ} (€/kW) kojenerasyon ünitesinin birim fiyatı, P_e (kWe) kojenerasyon ünitesinin gücüdür (Üstünsoy, 2024).

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde Nevşehir ilinin hayvansal atıklarının biyogaz potansiyeli araştırılırken hayvan türlerine göre sınıflandırma yapılarak gerekli hesaplamalar yapılmıştır. İlçeler ölçeğinde yapılan bu araştırmada, örnek teşkil etmesi maksadıyla bir ilçe için yapılan çalışmanın açık hesabı gösterilmiş ve sonrasında diğer ilçelere ait hesaplama sonuçları çizelgeler halinde paylaşılmıştır.

4.1 Acıgöl İlçesi Hayvansal Atıkların Biyogaz Potansiyelinin Araştırılması

Hayvansal atıkların biyogaz potansiyeli araştırılırken izlenen adımları göstermek için Acıgöl ilçesi seçilmiştir. Acıgöl ilçesinde bulunan 9.343 adet (S) süt sığırları için hayvan başına ortalama günlük gübre miktarı (M_{YG}) 43 kg/gün-hayvan olarak kabul edilmiştir. Süt sığırlarının yıllık gübre miktarını (M_{YYM}) bulmak için verileri denklemde yerine yazacak olursak (4.1) numaralı denklemdeki sonuç bulunur.

$$M_{YYM} = 43 * 9.343 * 365 = 146.638.385 \text{ kg/yıl} \quad (4.1)$$

Süt sığırları için toplanabilir faydalı gübre oranı (T) %100 olarak kabul edildiğinden bu değer denklemde yerine yazıldığında yıllık toplanabilir faydalı gübre miktarı (M_{YFYG}) (4.2) numaralı denklem ile elde edilir.

$$M_{YFYG} = 146.638.385 * 1 = 146.638.385 \text{ kg/yıl} \quad (4.2)$$

Yaş gübre içerisindeki katı madde miktarı için (M_{KM}), 146.638.385 kg/yıl toplanabilir faydalı gübre miktarını (M_{YFYG}) ve %17,27 olan yaş gübredeki katı madde oranı (KM) denklemde yerine yazılacak olursa (4.3) numaralı denklemdeki sonuç elde edilir.

$$M_{KM} = 146.638.385 * 0,1727 = 25.324.445,1 \text{ kg/yıl} \quad (4.3)$$

Gübre içerisindeki katı maddede bulunan uçucu katı madde miktarını (M_{UKM}) bulmak için, 25.324.445,1 kg/yıl olan yaş gübre içerisindeki katı madde miktarı (M_{KM}) ve %83,36 olan katı madde içerisindeki uçucu katı madde oranı (UKM) denklemde yerine yazılacak olursa (4.4) numaralı denklemdeki sonuç bulunur.

$$M_{UKM} = 25.324.445,1 * 0,8336 = 21.110.457,4 \text{ kg/yıl} \quad (4.4)$$

Metan cinsinden biyogaz potansiyelini (M_{METAN}) bulmak için ise 21.110.457,4 kg/yıl olan gübre içerisindeki katı maddede bulunan uçucu katı madde miktarını (M_{UKM}) ve 1 kg uçucu katı maddeden üretilen 0,18 Nm³ CH₄/kg-UKM metan miktarı (MO) yerine yazılarak (4.5) numaralı denklemdeki sonuç elde edilir.

$$M_{METAN} = 21.110.457,4 * 0.18 = 3.799.882,3 \text{ CH}_4/\text{yıl} \quad (4.5)$$

3.799.882,3 m³ CH₄/yıl biyogazın (M_{METAN}), biyogaz tesisindeki %35 verimle (η_e) çalışan bir kojenerasyon ünitesinde yakılması sonucunda elde edilecek elektrik enerjisi (E) (4.6) numaralı denklemde hesaplanmıştır. Metan gazının enerji eşdeğeri (W) 10 kWh/m³ olarak kabul edilmiştir.

$$E = 3.799882,3 * 0,35 * 10 = 13.299.588,1 \text{ kwh/yıl} = 13.299,6 \text{ MWh/yıl} \quad (4.6)$$

Yapılan çalışmalara örnek teşkil etmesi amacıyla süt sığırları için yapılan yukarıdaki hesaplamalar ilçede bulunan diğer hayvan türleri için de yapılmış olup, elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Bu hesaplamalar yapılırken Çizelge 3.2’de yer alan veriler dikkate alınarak benzer hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

Acıgöl ilçesinin toplam büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvan sayıları dikkate alındığında; günlük oluşan toplam gübre miktarı 504,3 ton, yıllık oluşan toplam gübre miktarı 184.077,2 ton, toplanabilir faydalı gübre miktarı 169.946,3 ton, biyogaz potansiyeli 4.560.641 m³ CH₄/yıl ve elektrik enerjisi üretim potansiyeli 15.962,2 MWh/yıl olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.1. Acıgöl ilçesi hayvansal atıklarının biyogaz ve elektrik üretim potansiyeli.

Hayvan Türleri	Miktar (adet)	Toplam Gübre (ton/yıl)	Toplanabilir Faydalı Gübre Miktarı (ton/yıl)	Katı Madde Miktarı (ton/yıl)	Uçucu Katı Madde Miktarı (ton/yıl)	Metan Üretimi (m ³ CH ₄ /yıl)	Elektrik Üretimi (MWh/yıl)
Süt Sığırı	9.343	146.638,4	146.638,4	25.324,4	21.110,5	3.799.883	13.299,6
Et Sığırı	1.610	17.041,9	17.041,9	2.114,9	1.790,3	590.785	2.067,7
Yerli Sığır	10	105,9	52,9	9,1	7,6	2.514	8,8
Buzağı	3.922	3.550,2	3.550,2	131,7	58,3	19.225	67,3
Koyun	17.983	15.753,1	2.047,9	471,0	393,9	118.174	413,6
Keçi	525	392,8	51,1	11,8	8,6	2.593	9,1
Et Tavuğu	0	0	0	0	0	0	0
Yumurta T.	10.835	514,1	509	95,4	71,6	25.051	87,7
Hindi	280	38,8	26,4	5,1	3,9	1.357	4,7
Kaz ve Ördek	349	42,0	28,6	4,9	3,0	1.059	3,7
Toplam	44.857	184.077,2	169.946,3	28.168,5	23.447,6	4.560.641	15.962,2

4.2 Avanos İlçesi Hayvansal Atıkların Biyogaz Potansiyelinin Araştırılması

Avanos ilçesinde; 13.410 adet süt sığırı, 3.422 adet et sığırı, 28 adet yerli sığır, 4.015 adet buzağı, 57.400 adet koyun, 1.996 adet keçi, 38.295 adet et tavuğu, 551.800 adet yumurta tavuğu, 530 adet hindi ve 380 adet ördek ile kaz bulunmaktadır. Hayvan türlerine ait miktarlar, Çizelge 3.2’de yer alan veriler ve ilgili denklemler kullanılarak gerekli hesaplamalar yapılmıştır.

Hesaplamalar sonucunda Avanos ilçesinin; günlük oluşan toplam gübre miktarı 907,8 ton, yıllık oluşan toplam gübre miktarı 331.356,4 ton, toplanabilir faydalı gübre miktarı 284.960,2 ton, biyogaz potansiyeli 8.497.783 m³ CH₄/yıl ve elektrik enerjisi üretim potansiyeli 29.742,2 MWh/yıl olarak bulunmuştur. Hesaplama işlemlerine ait detaylı sonuçlar Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Avanos ilçesi hayvan sayısı en yüksek il olduğundan diğer ilçelere göre öne çıkmaktadır. Bununla birlikte Nevşehir ilinde biyogaz potansiyeli en yüksek ilçedir. Nevşehir ilinin toplam biyogaz potansiyelinin yaklaşık %21’lik kısmı Avanos ilçesine aittir. Bu veriler ışığında biyogaz tesisi kurmak için en uygun ilçenin Avanos olduğu görülmektedir. Avanos ilçesinde biyogaz tesisi kurulması yörede hayvancılık ile buna bağlı diğer sektörlerin gelişmesine etki edecektir. Bu gelişme Avanos ilçesinin hayvansal atık miktarını da arttıracığından biyogazdan üretilecek elektrik enerjisi miktarında artış yaşanacaktır.

Çizelge 4.2. Avanos ilçesi hayvansal atıklarının biyogaz ve elektrik üretim potansiyeli.

Hayvan Türleri	Miktar (adet)	Toplam Gübre (ton/yıl)	Toplanabilir Faydalı Gübre Miktarı (ton/yıl)	Katı Madde Miktarı (ton/yıl)	Uçucu Katı Madde Miktarı (ton/yıl)	Metan Üretimi (m ³ CH ₄ /yıl)	Elektrik Üretimi (MWh/yıl)
Süt Sığırı	13.410	210.470,0	210.470,0	36.348,2	30.299,8	5.453.969	19.088,9
Et Sığırı	3.422	36.221,9	36.221,9	4.495,1	3.805,1	1.255.693	4.394,9
Yerli Sığır	28	296,4	148,2	25,6	21,3	7.040	24,6
Buzağı	4.015	3.634,4	3.634,4	134,8	59,6	19.680	68,9
Koyun	57.400	50.282,4	6.536,7	1.503,4	1.257,3	377.199	1.320,2
Keçi	1.996	1.493,5	194,2	45,0	32,9	9.860	34,5
Et Tavuğu	38.295	2.655,8	1.752,8	350,6	270,9	94.817	331,9
Yumurta T.	551.800	26.182,9	25.921,1	4.860,2	3.645,2	1.275.803	4.465,3
Hindi	530	73,5	50,0	9,7	7,3	2.568	9,0
Kaz ve Ördek	380	45,8	31,1	5,4	3,3	1.153	4,0
Toplam	671.276	331.356,4	284.960,2	47.778,0	39.402,8	8.497.783	29.742,2

4.3 Derinkuyu İlçesi Hayvansal Atıkların Biyogaz Potansiyelinin Araştırılması

Derinkuyu ilçesinde; 13.420 adet süt sığırı, 687 adet et sığırı, 4.549 adet buzağı, 23.159 adet koyun, 1.336 adet keçi, 13.600 adet yumurta tavuğu, 670 adet hindi ve 488 adet ördek ile kaz bulunmaktadır. Hayvan türlerine ait miktarlar, Çizelge 3.2’de yer alan veriler ve ilgili denklemler kullanılarak gerekli hesaplamalar yapılmıştır.

Hesaplamalar sonucunda Derinkuyu ilçesinin; günlük oluşan toplam gübre miktarı 668,8 ton, yıllık oluşan toplam gübre miktarı 331.356,4 ton, toplanabilir faydalı gübre miktarı 244.100,5 ton, biyogaz potansiyeli 5.927.385 m³ CH₄/yıl ve elektrik enerjisi üretim potansiyeli 20.745,8 MWh/yıl olarak bulunmuştur. Hesaplama işlemlerine ait detaylı sonuçlar Çizelge 4.3’de gösterilmiştir.

Derinkuyu, biyogaz potansiyeli en yüksek üçüncü ilçedir. Nevşehir ilinin toplam biyogaz potansiyelinin yaklaşık %15’lik kısmı Derinkuyu ilçesine aittir.

Çizelge 4.3. Derinkuyu ilçesi hayvansal atıklarının biyogaz ve elektrik üretim potansiyeli.

Hayvan Türleri	Miktar (adet)	Toplam Gübre (ton/yıl)	Toplanabilir Faydalı Gübre Miktarı (ton/yıl)	Katı Madde Miktarı (ton/yıl)	Uçucu Katı Madde Miktarı (ton/yıl)	Metan Üretimi (m ³ CH ₄ /yıl)	Elektrik Üretimi (MWh/yıl)
Süt Sığırı	13.420	210.626,9	210.626,9	36.375,3	30.322,4	5.458.036	19.103,1
Et Sığırı	687	7.271,9	7.271,9	902,4	763,9	252.093	882,3
Yerli Sığır	0	0	0	0	0,0	0	0
Buzağı	4.549	4.117,8	4.117,8	152,8	67,6	22.298	78,0
Koyun	23.159	20.287,3	2.637,3	606,6	507,3	152.187	532,7
Keçi	1.336	999,7	130,0	30,1	22,0	6.600	23,1
Et Tavuğu	0	0	0	0	0	0	0
Yumurta T.	13.600	645,3	638,9	119,8	89,8	31.444	110,1
Hindi	670	92,9	63,2	12,2	9,3	3.247	11,4
Kaz ve Ördek	488	58,8	40,0	6,9	4,2	1.481	5,2
Toplam	57.909	244.100,5	225.525,9	38.206,1	31.786,5	5.927.385	20.745,8

4.4 Gülşehir İlçesi Hayvansal Atıkların Biyogaz Potansiyelinin Araştırılması

Gülşehir ilçesinde 14.184 adet süt sığırı, 898 adet et sığırı, 4.549 adet buzağı, 48.291 adet koyun, 3.534 adet keçi, 163.270 adet yumurta tavuğu, 810 adet hindi ve 1.875 adet ördek ile kaz bulunmaktadır. Hayvan türlerine ait miktarlar, Çizelge 3.2’de yer alan veriler ve ilgili denklemler kullanılarak gerekli hesaplamalar yapılmıştır.

Hesaplamalar sonucunda Gülşehir ilçesinin; günlük oluşan toplam gübre miktarı 792,5 ton, yıllık oluşan toplam gübre miktarı 289.273,5 ton, toplanabilir faydalı gübre

miktarı 249.983,8 ton, biyogaz potansiyeli 6.842.482 m³ CH₄/yıl ve elektrik enerjisi üretim potansiyeli 23.948,7 MWh/yıl olarak bulunmuştur. Hesaplama işlemlerine ait detaylı sonuçlar Çizelge 4.4’de gösterilmiştir.

Gülşehir, biyogaz potansiyeli en yüksek üçüncü ilçedir. Nevşehir ilinin toplam biyogaz potansiyelinin yaklaşık %17’lik kısmı Gülşehir ilçesine aittir. Bu durum, biyogaz tesisi kurmak için en uygun ikinci ilçenin Gülşehir ilçesi olduğunu göstermektedir. Gülşehir ilçesinde biyogaz tesisi kurulması yörede hayvancılık ile buna bağlı diğer sektörlerin gelişmesine etki edebilir. Bu gelişme Gülşehir ilçesinin hayvansal atık miktarını da arttıracığından biyogazdan üretilecek elektrik enerjisi miktarında artış yaşanacaktır.

Çizelge 4.4. Gülşehir ilçesi hayvansal atıklarının biyogaz ve elektrik üretim potansiyeli.

Hayvan Türleri	Miktar (adet)	Toplam Gübre (ton/yıl)	Toplanabilir Faydalı Gübre Miktarı (ton/yıl)	Katı Madde Miktarı (ton/yıl)	Uçucu Katı Madde Miktarı (ton/yıl)	Metan Üretimi (m ³ CH ₄ /yıl)	Elektrik Üretimi (MWh/yıl)
Süt Sığırtı	14.184	222.617,9	222.617,9	38.446,1	32.048,7	5.768.762	20.190,7
Et Sığırtı	898	9.505,3	9.505,3	1.179,6	998,5	329.519	1.153,3
Yerli Sığırtı	0	0	0	0	0	0	0
Buzağı	4.549	4.117,8	4.117,8	152,8	67,6	22.298	78,0
Koyun	48.291	42.302,9	5.499,4	1.264,9	1.057,8	317.340	1.110,7
Keçi	3.534	2.644,3	343,8	79,6	58,2	17.458	61,1
Et Tavuğı	0	0	0	0	0	0	0
Yumurta T.	163.270	7.747,2	7.669,7	1.438,1	1.078,6	377.493	1.321,2
Hindi	810	112,3	76,4	14,8	11,2	3.925	13,7
Kaz ve Ördek	1.875	225,8	153,6	26,5	16,3	5.688	19,9
Toplam	237.411	289.273,5	249.983,8	42.602,4	35.336,8	6.842.482	23.948,7

4.5 Hacıbektaş İlçesi Hayvansal Atıkların Biyogaz Potansiyelinin Araştırılması

Hacıbektaş ilçesinde 6.600 adet süt sığırtı, 3.217 adet et sığırtı, 3.344 adet buzağı, 26.377 adet koyun, 1.040 adet keçi, 9.850 adet yumurta tavuğı, 712 adet hindi ve 830 adet ördek ile kaz bulunmaktadır. Hayvan türlerine ait miktarlar, Çizelge 3.2’de yer alan veriler ve ilgili denklemler kullanılarak gerekli hesaplamalar yapılmıştır.

Hesaplamalar sonucunda Hacıbektaş ilçesinin; günlük oluşan toplam gübre miktarı 452,6 ton, yıllık oluşan toplam gübre miktarı 165.216,5 ton, toplanabilir faydalı gübre miktarı 144.369 ton, biyogaz potansiyeli 4.088.354 m³ CH₄/yıl ve elektrik enerjisi üretim potansiyeli 14.309,2 MWh/yıl olarak bulunmuştur. Hesaplama işlemlerine ait detaylı sonuçlar Çizelge 4.5’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. Hacıbektaş ilçesi hayvansal atıklarının biyogaz ve elektrik üretim potansiyeli.

Hayvan Türleri	Miktar (adet)	Toplam Gübre (ton/yıl)	Toplanabilir Faydalı Gübre Miktarı (ton/yıl)	Katı Madde Miktarı (ton/yıl)	Uçucu Katı Madde Miktarı (ton/yıl)	Metan Üretimi (m ³ CH ₄ /yıl)	Elektrik Üretimi (MWh/yıl)
Süt Sığırı	6.600	103.587,0	103.587	17.889,5	14.912,7	2.684.280	9.395,0
Et Sığırı	3.217	34.051,9	34.052	4.225,8	3.577,2	1.180.469	4.131,6
Yerli Sığır	0	0	0	0	0	0	0
Buzağı	3.344	3.027,0	3.027	112,3	49,7	16.391	57,4
Koyun	26.377	23.106,3	3.004	690,9	577,8	173.334	606,7
Keçi	1.040	778,2	101	23,4	17,1	5.137	18,0
Et Tavuğu	0	0	0	0	0	0	0
Yumurta T.	9.850	467,4	463	86,8	65,1	22.774	79,7
Hindi	712	98,8	67	13,0	9,9	3.450	12,1
Kaz ve Ördek	830	100,0	68	11,7	7,2	2.518	8,8
Toplam	51.970	165.216,5	144.369	23.053,4	19.216,5	4.088.354	14.309,2

4.6 Kozaklı İlçesi Hayvansal Atıkların Biyogaz Potansiyelinin Araştırılması

Kozaklı ilçesinde 4.705 adet süt sığırı, 1.365 adet et sığırı, 2.228 adet buzağı, 22.718 adet koyun, 64 adet keçi, 37.353 adet et tavuğu, 274.295 adet yumurta tavuğu, 649 adet hindi ve 838 adet ördek ile kaz bulunmaktadır. Hayvan türlerine ait miktarlar, Çizelge 3.2’de yer alan veriler ve ilgili denklemler ile hesaplamalar yapılmıştır.

Hesaplamalar sonucunda Kozaklı ilçesinin; günlük oluşan toplam gübre miktarı 345,4 ton, yıllık oluşan toplam gübre miktarı 126.055,8 ton, toplanabilir faydalı gübre miktarı 107.628,3 ton, biyogaz potansiyeli 3.307.339 m³ CH₄/yıl ve elektrik enerjisi üretim potansiyeli 11.575,7 MWh/yıl olarak bulunmuştur. Hesaplama işlemlerine ait detaylı sonuçlar Çizelge 4.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. Kozaklı ilçesi hayvansal atıklarının biyogaz ve elektrik üretim potansiyeli.

Hayvan Türleri	Miktar (adet)	Toplam Gübre (ton/yıl)	Toplanabilir Faydalı Gübre Miktarı (ton/yıl)	Katı Madde Miktarı (ton/yıl)	Uçucu Katı Madde Miktarı (ton/yıl)	Metan Üretimi (m ³ CH ₄ /yıl)	Elektrik Üretimi (MWh/yıl)
Süt Sığırı	4.705	73.845,0	73.845,0	12.753,0	10.630,9	1.913.566	6.697,5
Et Sığırı	1.365	14.448,5	14.448,5	1.793,1	1.517,8	500.883	1.753,1
Yerli Sığır	0	0	0	0	0	0	0
Buzağı	2.228	2.016,8	2.016,8	74,8	33,1	10.921	38,2
Koyun	22.718	19.901,0	2.587,1	595,0	497,6	149.289	522,5
Keçi	64	47,9	6,2	1,4	1,1	316	1,1
Et Tavuğu	37.353	2.590,4	1.709,7	341,9	264,2	92.485	323,7
Yumurta T.	274.295	13.015,3	12.885,1	2.416,0	1.812,0	634.191	2.219,7
Hindi	649	90,0	61,2	11,9	9,0	3.145	11,0
Kaz ve Ördek	838	100,9	68,6	11,9	7,3	2.542	8,9
Toplam	344.215	126.055,8	107.628,3	17.999	14.773	3.307.339	11.575,7

4.7 Merkez İlçesi Hayvansal Atıkların Biyogaz Potansiyelinin Araştırılması

Merkez ilçesinde 10.711 adet süt sığırı, 1.794 adet et sığırı, 28 adet yerli sığır, 3.724 adet buzağı, 11.469 adet koyun, 728 adet keçi, 3.961 adet yumurta tavuğu, 194 adet hindi ve 334 adet ördek ile kaz bulunmaktadır. Hayvan türlerine ait miktarlar, Çizelge 3.2’de yer alan veriler ve ilgili denklemler kullanılarak gerekli hesaplamalar yapılmıştır.

Hesaplamalar sonucunda Merkez ilçesinin; günlük oluşan toplam gübre miktarı 552,4 ton, yıllık oluşan toplam gübre miktarı 201.612,6 ton, toplanabilir faydalı gübre miktarı 192.226,4 ton, biyogaz potansiyeli 5.129.934 m³ CH₄/yıl ve elektrik enerjisi üretim potansiyeli 17.954,8 MWh/yıl olarak bulunmuştur. Hesaplama işlemlerine ait detaylı sonuçlar Çizelge 4.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7. Merkez ilçesi hayvansal atıklarının biyogaz ve elektrik üretim potansiyeli.

Hayvan Türleri	Miktar (adet)	Toplam Gübre (ton/yıl)	Toplanabilir Faydalı Gübre Miktarı (ton/yıl)	Katı Madde Miktarı (ton/yıl)	Uçucu Katı Madde Miktarı (ton/yıl)	Metan Üretimi (m ³ CH ₄ /yıl)	Elektrik Üretimi (MWh/yıl)
Süt Sığırı	10.711	168.109,1	168.109,1	29.032,4	24.201,4	4.356.261	15.246,9
Et Sığırı	1.794	18.989,5	18.989,5	2.356,6	1.994,9	658.303	2.304,1
Yerli Sığır	28	296,4	148,2	25,6	21,3	7.040	24,6
Buzağı	3.724	3.371,0	3.371,0	125,1	55,3	18.254	63,9
Koyun	11.469	10.046,8	1.306,1	300,4	251,2	75.368	263,8
Keçi	728	544,7	70,8	16,4	12,0	3.596	12,6
Et Tavuğu	0	0	0	0	0	0	0
Yumurta T.	3.961	187,9	186,1	34,9	26,2	9.158	32,1
Hindi	194	26,9	18,3	3,5	2,7	940	3,3
Kaz ve Ördek	334	40,2	27,4	4,7	2,9	1.013	3,5
Toplam	32.943	201.612,6	192.226,4	31.899,7	26.567,9	5.129.934	17.954,8

4.8 Ürgüp İlçesi Hayvansal Atıkların Biyogaz Potansiyelinin Araştırılması

Ürgüp ilçesinde 3.320 adet süt sığırı, 787 adet et sığırı, 2 adet yerli sığır, 1.269 adet buzağı, 13.961 adet koyun, 1.535 adet keçi, 6.500 adet yumurta tavuğu, 125 adet hindi ve 73 adet ördek ile kaz bulunmaktadır. Hayvan türlerine ait miktarlar, Çizelge 3.2’de yer alan veriler ve ilgili denklemler kullanılarak gerekli hesaplamalar yapılmıştır.

Hesaplamalar sonucunda Ürgüp ilçesinin; günlük oluşan toplam gübre miktarı 206,4 ton, yıllık oluşan toplam gübre miktarı 75.320,6 ton, toplanabilir faydalı gübre miktarı 63.659,4 ton, biyogaz potansiyeli 1.760.967 m³ CH₄/yıl ve elektrik enerjisi üretim

potansiyeli 6.163,4 MWh/yıl olarak bulunmuştur. Hesaplama işlemlerine ait detaylı sonuçlar Çizelge 4.8’de gösterilmiştir.

Ürgüp ilçesi en az hayvan sayısına sahip ilçedir. Bu durum Ürgüp ilçesinin Nevşehir ilinin biyogaz potansiyeli en düşük ilçesi olmasına neden olmuştur.

Çizelge 4.8. Ürgüp ilçesi hayvansal atıklarının biyogaz ve elektrik üretim potansiyeli.

Hayvan Türleri	Miktar (adet)	Toplam Gübre (ton/yıl)	Toplanabilir Faydalı Gübre Miktarı (ton/yıl)	Katı Madde Miktarı (ton/yıl)	Uçucu Katı Madde Miktarı (ton/yıl)	Metan Üretimi (m ³ CH ₄ /yıl)	Elektrik Üretimi (MWh/yıl)
Süt Sığırtı	3.320	52.107,4	52.107,4	8.998,9	7.501,5	1.350.274	4.726,0
Et Sığırtı	787	8.330,4	8.330,4	1.033,8	875,1	288.787	1.010,8
Yerli Sığırtı	2	21,2	10,6	1,8	1,5	503	1,8
Buzağı	1.269	1.148,7	1.148,7	42,6	18,8	6.220	21,8
Koyun	13.961	12.229,8	1.589,9	365,7	305,8	91.743	321,1
Keçi	1.535	1.148,6	149,3	34,6	25,3	7.583	26,5
Et Tavuğı	0	0	0	0	0	0	0
Yumurta T.	6.500	308,4	305,3	57,3	42,9	15.028	52,6
Hindi	125	17,3	11,8	2,3	1,7	606	2,1
Kaz ve Ördek	73	8,8	6,0	1,0	0,6	221	0,8
Toplam	27.572	75.320,6	63.659,4	10.538	8.773,4	1.760.967	6.163,4

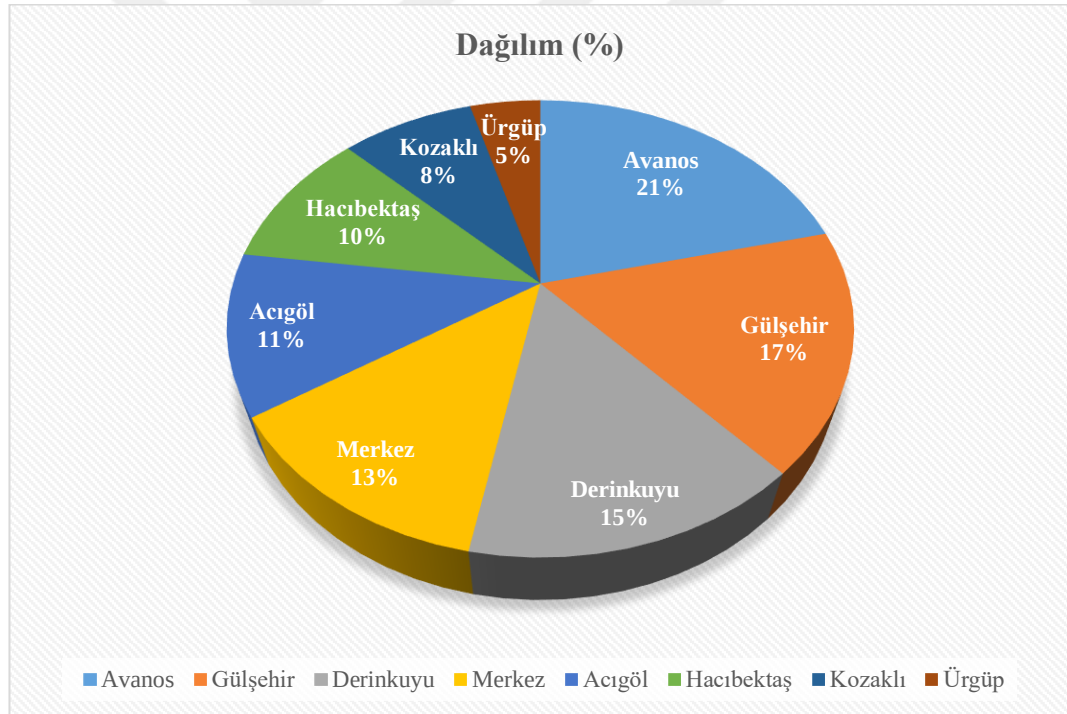
4.9 Nevşehir İli Hayvansal Atıkların Biyogaz Potansiyelinin Değerlendirilmesi

Nevşehir’in ilçeleri ölçeğinde ve hayvan türleri esas alınarak yapılan çalışma sonucunda ilçelerin toplam potansiyelleri karşılaştırıldığında sırasıyla Avanos ve Gülşehir ilçeleri öne çıkmaktadır. Avanos ilçesi 8.497.783 m³ CH₄/yıl biyogaz ve 29.742,2 MWh/yıl elektrik enerjisi potansiyeli ile Nevşehir ilinin toplam potansiyelinin %21’ini karşılamaktadır. Gülşehir ilçesi ise 6.842.482 m³ CH₄/yıl biyogaz ve 23.948,7 MWh/yıl ile Nevşehir ilinin toplam potansiyelinin %17’sini karşılamaktadır. Elde edilen veriler bu iki ilçede biyogaz tesisi kurmak için yeterli kaynak olduğunu göstermektedir. Diğer ilçeler incelendiğinde coğrafi konumları ve biyogaz potansiyelleri bakımından biyogaz tesisi kurmak için Acıgöl ve Merkez ilçeleri, Derinkuyu ve Ürgüp ilçeleri ile Kozaklı ve Hacıbektaş ilçelerinin eşleştirilmesi uygun olacaktır. Bu eşleşmeler sonucunda Acıgöl-Merkez ilçeleri için 9.690.575 m³ CH₄/yıl biyogaz ve 33.917 MWh/yıl elektrik enerjisi potansiyeli, Derinkuyu-Ürgüp ilçeleri için 7.688.352 m³ CH₄/yıl biyogaz ve 26.909,2 MWh/yıl elektrik enerjisi potansiyeli, Kozaklı-Hacıbektaş ilçeleri için 7.395.693 m³ CH₄/yıl biyogaz ve 29.530,5 MWh/yıl elektrik enerjisi potansiyeli verileri ortaya çıkmıştır. İlçelerin toplanabilir faydalı gübre miktarı, biyogaz potansiyeli ve elektrik enerjisi potansiyeli Çizelge 4.9’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.9. İlçelerin biyogaz ve elektrik enerjisi üretim potansiyeli.

İlçeler	Toplanabilir Faydalı Gübre Miktarı (ton/yıl)	Metan Üretimi (m ³ CH ₄ /yıl)	Elektrik Üretimi (MWh/yıl)
Acıgöl	169.946,3	4.560.641	15.962,2
Avanos	284.960,2	8.497.783	29.742,2
Derinkuyu	225.525,9	5.927.385	20.745,8
Gülşehir	249.983,8	6.842.482	23.948,7
Hacıbektaş	144.369,0	4.088.354	14.309,2
Kozaklı	107.628,3	3.307.339	11.575,7
Merkez	192.226,4	5.129.934	17.954,8
Ürgüp	63.659,4	1.760.967	6.163,4
Toplam	1.438.299,3	40.114.885	140.402

Nevşehir ilinin hayvansal atıklarının toplam biyogaz potansiyeli 40.114.885 m³ CH₄/yıl ve elektrik üretim potansiyeli ise 140.402 MWh/yıl olduğu tespit edilmiştir. Bu miktar, Nevşehir ilinin 2023 yılında tükettiği elektrik enerjisi miktarının %16,6'sına karşılık gelmektedir. Nevşehir'in toplam potansiyelinin ilçelere göre oransal olarak dağılımı ise Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Nevşehir ilinin biyogaz potansiyelinin ilçelere göre dağılımı.

4.10 Biyogaz Tesisi Kurulumu ve Maliyeti

İlçelerinin biyogaz potansiyelleri ortaya çıkarıldıktan sonra tesis kurulumu için örnek bir modele duyulmuştur. Bu arayışın nedeni her ilçeye düşük kapasiteli biyogaz tesisi kurmanın maliyetli bir yatırım olması ve bazı ilçelerde yeterli kaynağın

bulunmamasıdır. Bu nedenle ilçelerin coğrafi konumu ve elektrik üretim potansiyelleri göz önünde bulundurularak yapılan değerlendirme sonucunda Nevşehir iline 5 adet biyogaz tesisinin kurulabileceği örnek bir model tasarlanmıştır. Bu modelde tesislerin kurulacağı yerler; Acıgöl ve Merkez ilçeleri arasında uygun bir bölge, Derinkuyu ve Ürgüp ilçeleri arasında uygun bir bölge, Kozaklı ve Hacıbektaş ilçeleri arasında uygun bir bölge, Avanos ilçesinde uygun bir bölge ve Gülşehir ilçesinde uygun bir bölge olarak belirlenmiştir.

Biyogaz tesislerinin kurulu gücü, 365 gün 22 saat çalışacakları varsayılarak elektrik üretim potansiyelleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonucunda kurulu güçler; Acıgöl-Merkez Biyogaz Tesisi 4,2 MW, Avanos Biyogaz Tesisi 3,7 MW, Derinkuyu-Ürgüp Biyogaz Tesisi 3,4 MW, Kozaklı-Hacıbektaş Biyogaz Tesisi 3,2 MW ve Gülşehir Biyogaz Tesisi 3 MW olarak bulunmuştur.

Biyogaz tesisi kurulumu birim maliyeti; Acıgöl-Merkez Biyogaz Tesisi için 25,3 €/ton-atık, Avanos Biyogaz Tesisi için 37,2 €/ton-atık, Derinkuyu-Ürgüp Biyogaz Tesisi için 35,7 €/ton-atık, Kozaklı-Hacıbektaş Biyogaz Tesisi için 42,1 €/ton-atık ve Gülşehir Biyogaz Tesisi için 42,5 €/ton-atık olarak hesaplanmıştır.

Kojenerasyon ünitesi kurulumu birim maliyeti; Acıgöl-Merkez Biyogaz Tesisi için 714,6 €/kW, Avanos Biyogaz Tesisi için 732,9 €/kW, Derinkuyu-Ürgüp Biyogaz Tesisi için 745,4 €/kW, Kozaklı-Hacıbektaş Biyogaz Tesisi için 754,5 €/kW ve Gülşehir Biyogaz Tesisi için 764,3 €/kW olarak hesaplanmıştır.

Biyogaz tesisi kurulum maliyeti; Acıgöl-Merkez Biyogaz Tesisi için 9.162.969,3 €, Avanos Biyogaz Tesisi için 10.600.519,4 €, Derinkuyu-Ürgüp Biyogaz Tesisi için 10.323.915,2 €, Kozaklı-Hacıbektaş Biyogaz Tesisi için 10.609.086,3 € ve Gülşehir Biyogaz Tesisi için 10.624.311,5 € olarak hesaplanmıştır.

Kojenerasyon ünitesi kurulumu maliyeti; Acıgöl-Merkez Biyogaz Tesisi için 3.001.320 €, Avanos Biyogaz Tesisi için 2.711.730 €, Derinkuyu-Ürgüp Biyogaz Tesisi için 2.534.360 €, Kozaklı-Hacıbektaş Biyogaz Tesisi için 2.414.400 € ve Gülşehir Biyogaz Tesisi için 2.292.900 € olarak hesaplanmıştır.

Biyogaz tesisi toplam kurulum maliyeti; Acıgöl-Merkez Biyogaz Tesisi için 12.164.289 €, Avanos Biyogaz Tesisi için 13.312.249 €, Derinkuyu-Ürgüp Biyogaz

Tesisi için 12.858.275 €, Kozaklı-Hacıbektaş Biyogaz Tesisi için 13.023.486 € ve Gülşehir Biyogaz Tesisi için 12.917.212 € olarak hesaplanmıştır.

Hesaplama sonuçlarına ilişkin detaylı veriler Çizelge 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.10. Nevşehir ilinde kurulması planlanan tesislerin kurulu gücü ve maliyeti.

Tesisler	Kurulu Güç (MW)	Biyogaz Tesisi Birim Maliyeti (€/ton-atık)	Kojenerasyon Ünitesi Birim Maliyeti (€/kW)	Biyogaz Tesisi Kurulum Maliyeti (€)	Kojenerasyon Ünitesi Kurulum Maliyeti (€)	Toplam Kurulum Maliyeti (€)
Acıgöl-Merkez	4,2	25,3	714,6	9.162.969,3	3.001.320	12.164.289
Avanos	3,7	37,2	732,9	10.600.519,4	2.711.730	13.312.249
Derinkuyu-Ürgüp	3,4	35,7	745,4	10.323.915,2	2.534.360	12.858.275
Kozaklı-Hacıbektaş	3,2	42,1	754,5	10.609.086,3	2.414.400	13.023.486
Gülşehir	3,0	42,5	764,3	10.624.311,5	2.292.900	12.917.212

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Nevşehir ilinin hayvansal atık kaynaklı biyogaz potansiyelinin ve bu potansiyelin Nevşehir ilinin hâlihazırda tükettiği elektrik enerjisinin ne kadarlık kısmını karşılayabileceği araştırılmıştır. Yapılan hesaplamalar ile Nevşehir'in ilçelerinin hayvansal atık kaynaklı biyogaz potansiyeli, kurulması planlanan tesislerin kurulu güç kapasitesi ve kurulum maliyetleri ortaya çıkarılmıştır.

Nevşehir ilinde oluşan yıllık toplam hayvansal atık miktarının 1.617.013 ton, yıllık toplanabilir hayvansal atık miktarının 1.438.299 ton ve biyogaz potansiyelinin ise 40.114.885 m³ CH₄ olduğu hesaplanmıştır. Bu biyogaz miktarı ile yıllık 140.402 MWh elektrik üretilebileceği ve bu miktarın Nevşehir ilinin yıllık elektrik tüketiminin % 16,6'sını karşılayabileceği tespit edilmiştir.

İlçeler ölçeğinde yapılan hesaplamalarda Avanos ilçesi; yıllık hayvansal atık miktarı 331.365 ton, toplanabilir hayvansal atık miktarı 284.960 ton, biyogaz potansiyeli 8.497.783 m³ CH₄ ve elektrik üretim potansiyeli 29.742 MWh ile diğer ilçelere göre öne çıkmaktadır. Ürgüp ilçesi ise; yıllık hayvansal atık miktarı 75.321 ton, toplanabilir hayvansal atık miktarı 63.659 ton, biyogaz potansiyeli 1.760.967 m³ CH₄ ve elektrik üretim potansiyeli 6.163 MWh ile diğer ilçelerden geride kalmaktadır.

İlçelerin potansiyelleri ve coğrafi konumları dikkate alınarak 5 adet biyogaz tesisinin kurulabileceği düşünülmüştür. Bu tesisler ve kurulu güçlerinin sırasıyla; Acıgöl-Merkez Biyogaz Tesisi 4,2 MW, Avanos Biyogaz Tesisi 3,7 MW, Derinkuyu-Ürgüp Biyogaz Tesisi 3,4 MW, Kozaklı-Hacıbektaş Biyogaz Tesisi 3,2 ve Gülşehir Biyogaz Tesisi 3 MW olarak planlanmıştır.

Kurulum maliyetlerinin Acıgöl-Merkez Biyogaz Tesisi için 12.164.289 €, Avanos Biyogaz Tesisi için 13.312.249 €, Derinkuyu-Ürgüp Biyogaz Tesisi için 12.858.275 €, Kozaklı-Hacıbektaş Biyogaz Tesisi için 13.023.486 € ve Gülşehir Biyogaz Tesisi için 12.917.212 € olduğu görülmüştür.

Kurulması planlanan biyogaz tesisleri ve kurulum maliyeti ile ilgili yapılan hesaplamalar örnek bir model olup, optimum koşullar için kapsamlı bir fizibilite çalışması yapılması gerekmektedir. Bu fizibilite çalışması yapılırken Nevşehir ilinde bulunan hayvancılık işletmelerinin konumları ile hayvan sayıları net olarak bilinmekle

beraber hayvan sayısının yerelde dağılımı köy veya mahalle ölçeğinde yapılmalıdır. Dağılımın köy veya mahalle gibi daha küçük ölçekte yapılması hayvan yoğunluğunun daha net ve yorumlanabilir şekilde ortaya koyacağından tesis kurulumu için uygun bölge alternatifleri bulunabilecektir. Bu durum kurulması planlanan tesis veya tesislerin kurulum ve ulaşım maliyetlerinin düşürülmesine katkıda bulunacaktır. Ayrıca biyogaz tesisi için hammadde olan hayvansal atıklar, hayvancılık faaliyeti yapan gerçek ve tüzel kişiler için ek bir gelir kaynağı yaratacağından maddi bir destek sunacak olup, Nevşehir ilinde hayvancılık faaliyetlerinin ve hayvancılık sektörü ile ilişkili diğer sektörlerin gelişmesine katkıda bulunacaktır.



KAYNAKLAR

- Abbassi, B., 2003. Improvement of anaerobic sludge digestion by disintegration of activated sludge using vacuum process, *Water Quality Research Journal of Canada*, 38, 3, 515–526.
- Akbulut A. ve Dikici A., 2004. Elazığ ilinin biyogaz potansiyeli ve maliyet analizi, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi*, 2, 2, 36-41.
- Aksay, M. V., 2018. Farklı türden atıkların anaerobik kofermantasyon yöntemi ile biyogaz üretimi için optimum işletme şartlarının belirlenmesi, Yükseköğretim Kurumları Tarafından Destekli Bilimsel Araştırma Projesi, Proje No KBÜ-BAP-16/2-DR-082. Merkez-Karabük.
- Aksu, Y., 2019. Amasya ilindeki hayvansal atıkların biyogaz potansiyelinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Tokat Gazi Osman Paşa Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Tokat.
- Aktaş, T., Özer, B., Soyak, G. ve Ertürk M.C., 2015. Tekirdağ ilinde hayvansal atık kaynaklı biyogazdan elektrik üretim potansiyelinin belirlenmesi, *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 11, 1, 69-74.
- Avcıoğlu, A.O., Türker, U., Atasoy, Z.D., ve Koçtürk, D., 2011. Tarımsal kökenli yenilenebilir enerjiler – biyoyakıtlar, Birinci Basım, Nobel Yayıncılık, Ankara.
- Ay, Ö.F., 2020. Kahramanmaraş ilinin teorik biyogaz potansiyelinin farklı modellerle belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Bagher, A.M., Fatemeh, G., Saman, M., ve Leili, M., 2015. Advantages and disadvantages of biogas energy, *Bulletin of Advanced Scientific Research*, 1, 5, 132-135.
- Bal, B., 2021. Hayvansal atıklardan biyogaz eldesi ve Diyarbakır kapsamında potansiyelinin incelenmesi, Dicle Üniversitesi, Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Diyarbakır.
- Burton, C.H., ve Turner, C., 2003. Manure management: treatment strategies for sustainable agricultur, Second Edition, Silsoe Research Institute, Silsoe.
- Cantekin, E., 2022. Trakya bölgesinde biyogaz potansiyelinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Coelho, N.M., Kennedy, K.J., ve Droste, R.L., 2011. Effect of microwave athermal and thermal radiation in wastewater sludge properties, *Journal of Environmental Science and Engineering*, 5, 6.

- Çağlayan, G.H. ve Koçer, N.N., 2014. Muş İlinde hayvan potansiyelinin değerlendirilerek biyogaz üretiminin araştırılması, Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 2, 1, 215-220.
- Çizmeçi, M., 2023. Konya ili Seydişehir ilçesinde hayvansal atıklardan biyogaz üretim potansiyeli ve ekonomik önemi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Deublein, D., ve Steinhauser, A., 2008. Biogas from waste and renewable resources: an introduction. 978-3-527-31841-4, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany.
- Deviren, H., İlkılıç, C., ve Aydın, S., 2017. Biyogaz üretiminde kullanılabilen materyaller ve biyogazın kullanım alanları, Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi, 7, 2, 2, 79-89.
- Dey, S., Sreenivasulu, A., Veerendra, G.T.N., Rao, K.V., ve Babu, P.A., 2022. Renewable energy present status and future potentials in India: An overview, Innovation and Green Development, 1, 1, 100006.
- Dursun, B., Demir, C., Kocabey, S. ve Gönüloğlu, E., 2015. Trakya’da tarımda yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımı, Tarım Makinaları Bilimi Dergisi, 11, 1, 47-53.
- Düver, H.T., 2023. Kütahya ili hayvansal atık kaynaklı biyogaz potansiyelinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Tokat Gazi Osman Paşa Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Tokat.
- Ergişi, B., 2019. Türkiye’de hayvansal kaynaklı biyogaz potansiyelinin hesaplanması ve tesis yerinin çok kriterli karar verme yöntemleriyle belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.
- Erhan, M., 2019. Ağrı ili büyükbaş hayvan varlığı ve hayvansal atıklardan biyogaz ve elektrik üretiminin Ağrı ili ve ülke ekonomisine katkısı, Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 5, 2, 207-216.
- Gebrezgabher S.A., Meuwissen M.P.M., Prins.B.A.M. ve Lansink A.G.J.M.O., 2010. Economic analysis of an aerobic digestion – a case of green power biogas plant in The Netherland, NJAS -Wageningen Journal of Life Sciences, 57, 109-115.
- Görmüş, C., 2018. Türkiye’deki hayvan gübrelerinin biyogaz enerji potansiyelinin belirlenmesi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ.
- Gülen, J. ve Arslan, H., 2005. Biogas, Journal Of Engineering And Natural Sciences, 4, 9, 121-129.
- Gülen, J., ve Çeşmeli, Ç., 2012. Biyogaz hakkında genel bilgi ve yan ürünlerinin kullanım alanları, Erzincan University Journal of Science and Technology, 5, 1, 65-84.

- Gür, E., 2016. Anaerobic treatability and biogas production potential of pistachio processing wastewater with upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Huang, W., Wang, Z., Zhou, Y. ve Ng, W.J., 2015. The role of hydrogenotrophic methanogens in an acidogenic reactor, *Chemosphere*, 140, 40–46.
- Issah, A.A. ve Kabera, T., 2021. Impact of volatile fatty acids to alkalinity ratio and volatile solids on biogas production under thermophilic conditions, *Waste Management & Research*, 39, 6, 871-878.
- İlkılıç, C. ve Deviren, H., 2011. Biyogazın Oluşumu ve Biyogazı Saflaştırma Yöntemleri. 6th. International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ, Bildiriler Kitabı, 150-155.
- Jameel, M.K., Mustafa, M.A., Ahmed, H.S., Jassim Mohammed, A., Ghazy, H., Shakir, M.N., Lawas, A.M., Mohammed, S.K., İdan, A.M., Mahmoud, A.H., Sayadi, H. ve Kianfar, E., 2024. Biogas: Production, properties, applications, economic and challenges: A review, *Results in Chemistry*, 7, 101549.
- Karaca, C., 2015. Mapping of energy potential through annual crop residues in Turkey. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8, 2, 104-109.
- Karaosmanoğlu F., 2006. Türkiye biyoyakıt potansiyeli ve son gelismeler, Türkiye 10. Enerji Kongresi, İstanbul.
- Karayılmazlar, S., Saraçoğlu, N., Çabuk, Y., ve Kurt, R., 2011. Biyokütlenin Türkiye’de enerji üretiminde değerlendirilmesi, *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 13, 19, 63-75.
- Kasinath, A., Fudala-Ksiazek, S., Szopinska, M., Bylinski, H., Artichowicz, W., Remiszewska-Skwarek, A., ve Luczkiewicz, A., 2021. Biomass in biogas production: Pretreatment and codigestion, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111509.
- Kaya, D. ve Öztürk H., 2012. Biyogaz teknolojisi, Birinci Baskı, Umuttepe Yayınları, Kocaeli.
- Khayal, O.M.E.S., 2019. Advantages and limitations of biogas technologies, Preprint.
- Kiener, A. ve Leisinger, T., 1983. Oxygen sensitivity of methanogenic bacteria, *systematic and applied microbiology*, 4, 3, 305–312.
- Koca A., 2007. Yenilenebilir bir enerji kaynağı: Biyogaz, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırma Dergisi*, 5, 3, 32-35.
- Koç, E. ve Kaya, K., 2015. Enerji kaynakları-yenilenebilir enerji durumu, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 56, 688, 36-47.

- Koçer, N.N. ve Kurt, G., 2013. Malatya'da hayvancılık potansiyeli ve biyogaz üretimi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 17, 1, 1-8.
- Koçer, N.N., Öner, C. ve Sugözü, İ., 2006. Türkiye’de hayvancılık potansiyeli ve biyogaz üretimi, Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi, 4, 2, 17-20.
- Konuk, M., 2019. Tokat ilindeki hayvansal atıkların biyogaz potansiyelinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Tokat Gazi Osman Paşa Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Tokat.
- Maghanaki, M.M., Ghobadian, B., Najafi, G., ve Galogah, R.J., 2013. Potential of biogas production in Iran, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 28, 702-714.
- Mao, C., Feng, Y., Wang, X., ve Ren, G., 2015. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 45, 540-555.
- Mata-Alvarez, J., Macé, S. ve Llabres, P., 2000. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. Bioresource Technol, 74, 1, 3-16.
- Mermerkaya, E., 2023. Yozgat ili hayvansal atık kaynaklı biyogaz potansiyelinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Tokat Gazi Osman Paşa Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Tokat.
- Mosey, F.E. ve Fernandes, X.A., 1989. Patterns of hydrogen in biogas from the anaerobic digestion of milk sugars. Water Science and Technology, 21, 187-196.
- Mutlu, S. F., 2003. Biyogazın kırsal kesimde kullanımı ve tasarım temelleri, Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi, 27, 39-41.
- Navina, B.K., Velmurugan, N.K., Kumar, P.S., Rangasamy, G., Palanivelu, J., Thamarai, P., Vickram, A.S., Saravanan, A. ve Shakoor, A., 2024. Fungal bioremediation approaches for the removal of toxic pollutants: mechanistic understanding for biorefinery applications, Chemosphere, 350, 141123.
- Nevzorova, T. ve Kutcherov, V., 2019. Barriers to the wider implementation of biogas as a source of energy: a state-of-the-art review, Energy Strategy Reviews, 26, 100414.
- Nuralan Poyraz, H., 2020. Kayseri ili için hayvansal atık kaynaklı biyogazdan elektrik enerjisi üretim potansiyelinin ve maliyetinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Özbaşer, F. ve Erdem, E., 2013. Biogas Production and Utilization a review, Lalahan Hayvansal Araştırmalar Enstitüsü Dergisi, 53, 2, 115-124.

- Özcan, M., Öztürk, S. ve Yıldırım, M., 2011. Türkiye'nin farklı kaynak tiplerine göre biyogaz potansiyellerinin belirlenmesi, IV. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Kocaeli, Bildiriler Kitabı, 243-247.
- Özçelik, T., 2020. Konya ili Beyşehir ilçesinin hayvan gübrelerinin biyogaz enerji potansiyellerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Öztürk, B., 2019. Aydın ili biyogaz potansiyelinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aydın.
- Öztürk, M. 2017. Hayvan Gübresinden Biyogaz Üretimi, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.
- Pehlivan, E., 2009. Biyogaz ve biyogaz uygulamaları, II. İç Anadolu Bölgesi Enerji Forumu, Konya.
- Rulkens, W., 2008. Sewage Sludge as a Biomass Resource for the Production of Energy: Overview and Assessment of the Various Options, Energy & Fuels, 22, 1, 9–15.
- Rutz, D., Janssen, R., Hoffstede, U., Beil, M., Hahn, H., Kulisic, B., Jurić, Ž., Kruhek, M., Ribic, B., Haider, P., Gostomska, A., Nogueira, M.A., Martins, A.S., Martins, M., doCéu Albuquerque, M., Dzene, I., Niklass, M., Gubernatorova, I., Schinnerl, D., Ruszel, M. ve Pawlak, P., 2011. Organic waste for biogas production in urban areas, Proceedings of 19th European Biomass Conference And Exhibition, Berlin, Germany, Proceedings Book, 2125–2131.
- Salihoğlu, N.K., Teksoy, A. ve Altan, K., 2019. Büyükbaş ve küçükbaş hayvan atıklarından biyogaz üretim potansiyelinin belirlenmesi: Balıkesir İli örneği, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8, 1, 31-47.
- Scarlat, N., Dallemand, J.F., Monforti-Ferrario, F., Banja, M. ve Motola, V., 2015. Renewable energy policy framework and bioenergy contribution in the European Union–An overview from National Renewable Energy Action Plans and Progress Reports, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 51, 969-985.
- Seyhan, A.K., ve Badem, A., 2018. Erzincan ilindeki hayvansal atıkların biyogaz potansiyelinin araştırılması, Academic Platform-Journal of Engineering and Science, 6, 1, 25-35.
- Smith, S. R., 2009. Organic contaminants in sewage sludge (biosolids) and their significance for agricultural recycling, Philosophical Transactions Of The Royal Society A: Mathematical, Physical And Engineering Sciences, 367, 1904, 4005-4041.
- Şengür, Ö., 2024. An Integrated Approach for Methane Enriched Biogas Production and Nutrient Recovery from Nitrogen Rich Biomass, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Şenol, H., Elibol, E.A., Açikel, Ü. ve Şenol, M., 2017. Türkiye’de biyogaz üretimi için başlıca biyokütle kaynakları, Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 6, 2, 81-92.
- Teklehaimanot, T.G., 2018. Biogas generation and main factors affecting in the production of biogas. International Journal of Advanced Technology and Innovative Research, 10, 1, 22-25.
- Tolay, M., Yamankaradeniz, H., Yardımcı, S. ve Reiter, R., 2008. Hayvansal atıklardan biyogaz üretimi, VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 1-6.
- Üçgül, V., 2019. Tekirdağ ilinin hayvansal atık kaynaklı biyogaz potansiyelinin değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Üstünsoy, B., 2024. Aksaray ilinin tarımsal atık kaynaklı biyogaz potansiyelinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- Weiland, P., 2010. Biogas production: Current state and perspectives, Applied Microbiology and Biotechnology, 85, 4, 849-860.
- Yağlı, H. ve Koç, Y., 2019. Hayvan gübresinden biyogaz üretim potansiyelinin belirlenmesi: Adana ili örnek hesaplama, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 34, 3, 35-48.
- Yapılcan, H.E., 2021. Aksaray ili hayvansal atık kaynaklı biyogaz potansiyelinin değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Aksaray.
- Yılmaz, A., 2019. Türkiye’de biyogaz üretimi ve kurulu santrallerin ürettiği elektrik enerjisi, Ecological Life Sciences, 14, 1, 12-28
- Yılmaz, A., Ünvar, S., Koca, T. ve Koçer, A., 2017. Türkiye’de biyogaz üretimi ve biyogaz üretimi istatistik bilgileri, Technological Applied Sciences, 12, 4, 218-232.
- Yılmaz, M., 2012. Türkiye’nin enerji potansiyeli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi açısından önemi, Ankara Üniversitesi Çevrebilim Dergisi, 4, 2, 33-54.
- Yılmaz, V., 2017. The effects of incubation and operational conditions on biogas production, Karaelmas Journal of Science and Engineering, 7, 2, 595-601.
- Yılmaz, A., Ünvar, S., Koçer, A., ve Aygün, B., 2018. Factors affecting the production of biogas, International Journal of Sciens and Engineering Research, 9, 5, 59-62.

Zhai, N., Zhang, T., Yin, D., Yang, G., Wang, X., Ren, G. ve Feng, Y., 2015. Effect of initial pH on anaerobic co-digestion of kitchen waste and cow manure, Waste Management, 38, 126-131.

Ziauddin Z. ve Rajesh R., 2015. Production and analysis of biogas from kitchen waste, International Research Journal of Engineering And Technology, 2, 4, 622-632.

URL-1 < <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuatmetin/1.5.5346.pdf> >, Erişim Tarihi: 25.02.2025.

URL-2 < <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/> >, Erişim Tarihi: 28.02.2025.

URL-3 < <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik> >, Erişim Tarihi: 02.03.2025.

URL-4 < <https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri> >, Erişim Tarihi: 02.03.2025.

URL-5 < <https://www.enerjiatlası.com/en-buyuk/biyogaz> >, Erişim Tarihi: 05.03.2025.

URL-6 < <https://bepa.enerji.gov.tr> >, Erişim Tarihi: 05.03.2025.

URL-7 < <https://www.enerjiatlası.com/biyogaz/> >, Erişim Tarihi: 05.03.2025.

URL-8 < <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-biyokutle> >, Erişim Tarihi: 05.03.2025.

URL-9 < <https://tuba.gov.tr/files/yayınlar/raporlar/TUBA-978-625-8352-01-6.pdf> > Erişim Tarihi: 06.03.2025.

URL-10 < <https://bepa.enerji.gov.tr/> > Erişim Tarihi: 10.03.2025.

URL-11 < <http://www.nevsehir.gov.tr/tarihce> >, Erişim Tarihi: 10.04.2025.

URL-12 < <http://www.nevsehirozeliidare.gov.tr/yoremizi-taniyalim> >, Erişim Tarihi: 10.04.2025.

URL-13 < http://www.nevsehir.gov.tr/kurumlar/nevsehir.gov.tr/cografi_yapi.pdf >, Erişim Tarihi: 11.04.2025.

URL-14 < <https://www.ntso.org.tr/tr/sayfa/nevsehirin-sosyo-ekonomik-yapisi-43> >, Erişim Tarihi: 11.04.2025.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Ali Osman KARAÇAM

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 2015-2018

Yüksek Lisans : Biruni Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği (Tezsiz), 2021
Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, 2022-2025

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1. Samsun Büyükşehir Belediyesi Doğu İleri Biyolojik Arıtma Tesisi / Yaz Stajı / 2016
2. Samsun Büyükşehir Belediyesi SASKİ Daire Başkanlığı / Yaz Stajı / 2017
3. Vizyon Çevre İş Güvenliği Eğitim Sağlık Dan. San. Tic. Ltd. Şti. 2020/2021
4. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı 2022/

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Kongrelerde Sunulan Makaleler

1. Karaçam A.O. ve Sönmez G., 2025. Nevşehir İli Hayvansal Atık Kaynaklı Biyogaz Potansiyelinin Araştırılması: Ön Çalışma, 5. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar ve Yenilikçi Çalışmalar Sempozyumu (ISSRIS'25), Bandırma, Proceeding Book of ISSRIS'25, 496-498.