

T.C.
ARTVİN ÇORUH ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE BİLİMİ VE TEKNOLOJİLERİ ANA BİLİM DALI

ARTVİN İLİ KATI ATIKLARININ BİYOGAZ POTANSİYELİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Türkan POLAT

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Vedat YILMAZ

EYLÜL, 2025

BİLİMSEL ETİK BEYANNAMESİ

Artvin Çoruh Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsüne Yüksek Lisans Tezi / Doktora Tezi olarak sunduğum “Artvin İli Katı Atıklarının Biyogaz Potansiyeli” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım’ın;

☐ Baştan sona kadar danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Vedat YILMAZ’ın sorumluluğunda tamamladığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metin içerisinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı taahhüt ederim.

☐ Turnitin benzerlik programından alınmış olan özgünlük raporuna göre tezin benzerlik oranının % 17 olduğunu beyan ederim.

Aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Lisansüstü Eğitim-Öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim.

☐ Tezimin tamamı her yerden erişime açılabilir.

☒ Tezim sadece Artvin Çoruh Üniversitesi yerleşkelerinden erişime açılabilir.

☐ Tezimin ... ay süreyle erişime açılmasını istemiyorum. Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin tamamı her yerden erişime açılabilir.

...../.../2025

Türkan POLAT

ORCID NO: 0000-0002-3612-1483

İmza

T.C.
ARTVİN ÇORUH ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE BİLİMİ VE TEKNOLOJİLERİ ANA BİLİM DALI

ARTVİN İLİ KATI ATIKLARININ BİYOGAZ POTANSİYELİ

Türkan POLAT
ORCID NO: 0000-0002-3612-1483

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Serden BAŞAK

Jüri Üyesi : Dr. Öğr. Üyesi K. Onur DEMİRARSLAN

Jüri Üyesi : Dr. Öğr. Üyesi Vedat YILMAZ

ONAY:

Bu Yüksek Lisans / Doktora tezi, Artvin Çoruh Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenen yukarıdaki jüri üyeleri tarafından .../.../..... tarihinde oybirliği/oyçokluğu ile uygun görülmüş ve kabul edilmiştir.

.../.../.....

Prof. Dr. Mustafa Çağatay KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖN SÖZ

“Artvin İli Katı Atıklarının Biyogaz Potansiyeli” konusunda yapılan bu çalışma; Artvin Çoruh Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Çevre Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalında yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Tez konusundaki bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Vedat YILMAZ’a teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezin yazım aşamasında desteğini esirgemeyen ve daima yanımda olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

En büyük teşekkürü kendime ediyorum. Zorluklar karşısında vazgeçmeden, hedefimden sapmadan yoluma devam ettim. Sabır, azim ve kararlılıkla çalışarak bugüne ulaşabildiğim için kendimle gurur duyuyorum.

Bu çalışmanın, alan uzmanları ve uygulayıcılar için bilimsel ve teknik anlamda yol gösterici olmasını diliyorum.

Türkan POLAT

Artvin – 2025

İÇİNDEKİLER

KISALTMA DİZİNİ	VIII
ŞEKİL LİSTESİ	IX
TABLO LİSTESİ.....	X
ÖZET	XII
ABSTRACT	XII
1 GİRİŞ.....	1
1.1 Katı Atık.....	4
1.2 Katı Atıkların Kaynaklarına Göre Sınıflandırılması	5
1.2.1 Evsel/Belediye Katı Atıkları.....	5
1.2.2 Ticari Katı Atıklar.....	5
1.2.3 Endüstriyel Katı Atıklar.....	5
1.2.4 Tarımsal ve Hayvansal Katı Atıklar	6
1.2.5 İnşaat ve Yıkım Atıkları	6
1.2.6 Tıbbi Atıklar	7
1.2.7 Tehlikeli Atıklar.....	7
1.3 Katı Atık Yönetim Süreci	8
1.4 Katı Atık Bertaraf Yöntemleri.....	10
1.4.1 Geri Dönüşüm.....	11
1.4.2 Düzenli Depolama Yöntemi	12
1.4.3 Düzensiz (Vahşi) Depolama	13
1.4.4 Termal Bertaraf Yöntemleri	13
1.4.4.1 Yakma.....	14
1.4.4.2 Gazifikasyon.....	15
1.4.4.3 Piroлиз.....	15
1.4.4.4 Plazma.....	16
1.5 Biyolojik Bertaraf Yöntemleri	16
1.5.1 Kompostlaştırma.....	16
1.5.2 Anaerobik Çürütme	18
1.6 Biyogaz	18
1.6.1 Biyogazın Tanımı ve Oluşum Aşamaları	18
1.6.2 Biyogaz Üretiminin Tarihsel Gelişimi.....	20

1.6.3 Biyogazın Çevresel Etkileri	22
1.6.4 Dünya’da ve Türkiye’de Biyogaz.....	23
1.6.5 Biyogaz Olarak Değerlendirilecek Atıklar ve Karakteristikleri	25
1.6.5.1 Hayvansal Atıklar.....	25
1.6.5.2 Bitkisel Atıklar.....	25
1.6.5.3 Organik İçerikli Kentsel ve Endüstriyel Atıklar.....	26
1.6.6 Biyogaz Üretiminin Aşamaları	27
1.6.6.1 Fermentasyon ve Hidroliz.....	27
1.6.6.2 Asetik Asit Oluşumu.....	28
1.6.6.3 Metan Gazı Oluşumu.....	28
1.6.7 Biyogaz Oluşumunun Zamanla Değişimi.....	29
1.6.8 Biyogaz Üretimini Etkileyen Etmenler	30
1.6.8.1 Sıcaklık.....	30
1.6.8.2 pH.....	31
1.6.8.3 Hidrolik Alıkonma Süresi.....	32
1.6.8.4 Organik Yükleme Oranı.....	32
1.6.8.5 Uçucu Yağ Asitleri.....	32
1.6.8.6 C/N Oranı.....	33
1.6.8.7 Toksisite.....	33
1.6.9 Biyogazın Avantajları ve Dezavantajları	34
1.6.9.1 Biyogaz Üretiminin Avantajları.....	34
1.6.9.2 Biyogaz Üretiminin Dezavantajları.....	34
1.6.10 Biyogazın Kullanım Alanları.....	35
1.6.10.1 Biyogazın Isıtmada Kullanımı.....	35
1.6.10.2 Biyogazın Aydınlatmada Kullanımı.....	36
1.6.10.3 Biyogazın Motorlarda Kullanımı.....	36
1.7 Artvin İlinin Genel Özellikleri	37
1.7.1 Coğrafi Durum.....	38
1.7.2 İklim ve Bitki Örtüsü.....	39
1.7.3 Ekonomi.....	39
1.7.4 Nüfus.....	40
1.8 Literatür Çalışması	41
2 MATERYAL VE YÖNTEM	44
2.1 İller Bankası Nüfus Hesaplama Yöntemi	35
2.2 LandGEM (Landfill Gas Emissions Model)	57

3 BULGULAR VE TARTIŞMA	60
3.1 Eysel Katı Atıkların Biyogaz Potansiyeli	60
3.2 Hayvansal Atıkların Biyogaz Potansiyeli	66
4 SONUÇ VE ÖNERİLER	76
KAYNAKLAR.....	80



KISALTMA DİZİNİ

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
BEPA	Biyokütle Enerjisi Potansiyel Atlası
ÇDR	Çevre Durum Raporu
DOKAP	Doğu Karadeniz Projesi Bölge Kalkınma İdaresi Başkanlığı
EPA	Amerika Çevre Koruma Ajansı
LANDGEM	Landfill Gas Emissions Model
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
UNEP	Birleşmiş Milletler Çevre Programı
UNICEF	Birleşmiş Milletler Çocuklara Yardım Fonu
UNESCO	Birleşmiş Milletler Eğitim, Bilim ve Kültür Örgütü

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 Atık hiyerarşi piramidi	9
Şekil 1.2 Entegre atık yönetiminin unsurları	9
Şekil 1.3 Düzenli depolama sahası kesiti	12
Şekil 1.4 Kompoştlaştırma işlemi.....	17
Şekil 1.5 Biyogazın ısıtmada kullanım şekilleri.....	36
Şekil 1.6 Biyogazla çalışan aydınlatıcı.....	36
Şekil 1.7 Biyogazın motorlarda kullanımı.....	37
Şekil 1.8 Artvin Haritası.....	38
Şekil 2.1 Artvin ili, Merkez ilçesi eski vahşi depolama alanı	44
Şekil 2.2 Artvin ili eski katı atık depolama sahasının 2024 yılı görünümü.....	45
Şekil 2.3 Artvin ili, Merkez ilçesi vahşi depolama alanı görselleri.....	46
Şekil 2.4 Artvin İli, Merkez ilçesi vahşi depolama alanı uydu görüntüsü.....	47
Şekil 2.5 Artvin ili atık karakterizasyonu	52
Şekil 3.1 LandGEM sonuç rapor bölümü	63
Şekil 3.2 LandGEM grafik sonuç ekranı	66
Şekil 3.3 Artvin ili 2024 yılına ait hayvansal atıklardan elde edilen biyogaz potansiyeli ve enerji potansiyeli	74

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1 Geri kazanılmış atıkların kullanım alanları.....	11
Tablo 1.2 Biyogaz İçeriği	19
Tablo 1.3 Organik maddelerin parçalanma dereceleri	30
Tablo 1.4 Bazı ülkelerde biyogazın motorlu taşıtlarda kullanılabilmesi için biyogaz içerikleri.....	37
Tablo 1.5 Artvin ili 2024 yılı nüfus verileri	40
Tablo 2.1 Artvin ili yıllara göre atık istatistikleri	48
Tablo 2.2 Artvin ilinde atık bertaraf yöntemlerine göre atık miktarları.....	49
Tablo 2.3 Artvin ili atık kompozisyonu	51
Tablo 2.4 Artvin ili biyobozunur atık oranları	53
Tablo 2.5 Artvin ili ambalaj atık oranları	53
Tablo 2.6 Artvin ili enerji geri kazanımına uygun atıklar	53
Tablo 2.7 Artvin ilinde meydana gelen tıbbi atık miktarları.....	54
Tablo 2.8 Artvin ili hayvan sayıları ve atık miktarları	55
Tablo 3.1 Artvin iline ait 2024–2054 yılları arasında oluşan/oluşabilecek atık miktarı	61
Tablo 3.2 Artvin ili yıllara göre biyogaz miktarları	64
Tablo 3.3 Ankara ili hayvansal atıkların biyogaz miktarı	67
Tablo 3.4 Çorum iline ait 2014 yılı hayvansal atıklardan tahmini biyogaz miktarı	67
Tablo 3.5 Yozgat ili hayvansal atıklardan elde edilen biyogaz verimleri	68
Tablo 3.6 Hatay iline ait hayvan sayıları, hayvansal atık miktarı, biyogaz potansiyeli, enerji miktarı ve enerji değeri.....	68
Tablo 3.7 İzmir ili hayvansal atıklarının biyogaz miktarı	69
Tablo 3.8 Hayvansal atıkların değerlendirildiği çalışmalar	70
Tablo 3.9 Artvin ili 2024 yılına ait hayvansal atıklardan elde edilen biyogaz potansiyeli ve enerji potansiyeli.....	73
Tablo 3.10 2024 – 2054 yılları arasında hayvansal atıktan oluşabilecek tahmini biyogaz miktarı.....	75

ARTVIN İLİ KATI ATIKLARININ BİYOGAZ POTANSİYELİ

Türkan POLAT

Bu tez çalışması, Artvin ilinde oluşan evsel ve hayvansal atıklar üzerine kapsamlı bir inceleme yaparak, bu atıkların biyogaz üretimi açısından taşıdığı potansiyeli ortaya koymaktadır.

Çalışma kapsamında, Artvin ilinde oluşan evsel katı atıklar ile hayvansal atıkların biyogaz potansiyelinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda öncelikle ilin nüfus projeksiyonları hesaplanmış, kişi başına düşen günlük atık üretim miktarları belirlenerek gelecekte oluşması muhtemel atık miktarları tahmin edilmiştir. Evsel katı atıkların düzenli depolama sahasında oluşturabileceği biyogaz miktarının hesaplanmasında, Amerika Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından geliştirilen LandGEM (Landfill Gas Emissions Model) kullanılmıştır. Model aracılığıyla elde edilen depo gazı üretim verileri analiz edilerek biyogaz potansiyeli ortaya konmuştur. Hayvansal atıkların biyogaz potansiyelinin belirlenmesinde ise, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'na bağlı Enerji İşleri Genel Müdürlüğü'nün hazırlamış olduğu Biyokütle Enerjisi Potansiyeli Atlası'ndan elde edilen veriler esas alınmış; hayvan varlığına ilişkin sayısal bilgiler ile literatürde yer alan teknik katsayılar doğrultusunda potansiyel biyogaz üretim miktarları hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular, Artvin ilinde atık yönetimi politikalarının geliştirilmesi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması açısından önemli katkılar sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Atık Yönetimi, Artvin Biyogaz, Evsel Katı Atık, Hayvansal Atık, Yenilenebilir Enerji

ABSTRACT

BIOGAS POTENTIAL OF SOLID WASTE IN ARTVIN PROVINCE

Türkan POLAT

This thesis presents a comprehensive analysis of the municipal solid waste and animal waste generated in the province of Artvin, aiming to reveal their potential for biogas production. The primary objective of the study is to determine the biogas potential of household and animal waste in Artvin. In this context, population projections for the province were calculated, daily per capita waste generation rates were identified, and the estimated future waste quantities were forecasted. The biogas potential of municipal solid waste destined for the sanitary landfill site was calculated using the LandGEM (Landfill Gas Emissions Model), developed by the United States Environmental Protection Agency (EPA). The data obtained from the model regarding landfill gas production were analyzed to estimate the biogas potential. For animal waste, data from the Biomass Energy Potential Atlas prepared by the General Directorate of Energy Affairs under the Ministry of Energy and Natural Resources were used. Based on these data, along with livestock numbers and technical coefficients available in the literature, the potential biogas production from animal waste was calculated. The findings of the study offer significant contributions to the development of waste management policies and the promotion of renewable energy use in Artvin.

Keywords: Animal Waste, Artvin, Biogas, Municipal Solid Waste, Renewable Energy, Waste Management.

Atıklar, yaşamın her alanında gerçekleştirilen faaliyetler sonucunda ortaya çıkan, tamamen ortadan kaldırılamayan ancak çeşitli yöntemlerle yönetilmesi mümkün olan istenmeyen maddelerdir. Nitelik ve nicelik bakımından hızla artan atıklar, özellikle nüfus artışı, teknolojik gelişmeler, sanayileşme ve kentleşme gibi faktörlerin etkisiyle çevre üzerinde ciddi olumsuz etkiler yaratmaktadır. Bu durum, atık yönetimini ihmal edilemeyecek kadar önemli ve acil bir çevresel sorun haline getirmiştir.

İnsanoğlu yerleşik hayata geçişi ile birlikte bölgesel, sosyo-ekonomik yapı gibi farklı unsurlara bağlı olarak üretim ve beraberinde tüketim alışkanlıkları da farklılaşmaktadır. 19. yy'da gelişen sanayileşme ile kırsaldan kente göç hızlanmış, teknoloji alanında yaşanan gelişmeler ile nüfus artışı hızlanmış, pek çok olumlu etkilerin yanı sıra, başta dünya kaynaklarının hızla tükenmesi gibi bazı olumsuz sonuçlar da beraberinde görülmüştür. Büyüyen kentlerde üretilen devasa katı atıklar çok boyutlu problemlere neden olmaktadır. Atıkların doğru olarak yönetilememesi beraberinde, hava, su ve toprak kirliliği olarak olumsuz etkilerinin olduğu görülmüştür. Son 50 yıldır bu sorunların varlığının anlaşılmasıyla atıkların bertarafı için yenilikçi alternatif çözüm arayışlarına yoğunlaşmıştır. Önceleri atıkların düzensiz depolanması yeterli görülürken, 1970'li yıllardan itibaren başta gelişmiş ülkelerde görülmeye başlanılan düzenli depolama yöntemi sonrasında yakma, gazlaştırma ve anaerobik parçalanma gibi pek çok atık bertaraf teknolojileri uygulamaları geliştirilmeye başlanmıştır. Oluşan atıklar çevre sorunları yaratmakla birlikte, farklı sektörlerde kullanılabilecek ekonomik getirisi de olan maddeler olarak değerlendirilmesi üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. Yeni atık yönetimleri ile madde geri kazanımının yanı sıra ısı ve elektrik enerjisi elde edilebileceği anlaşılmıştır (Gültekin, 2021).

Kentsel katı atıkların yönetimi, sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda son derece önemli bir konudur. Her türlü faaliyetlerimiz neticesinde ortaya çıkan bu devasa atıkların etkili bir şekilde bertaraf edilmesi hem çevresel hem de ekonomik boyutlarda

ciddi sonuçlar doğurmaktadır. Çevrenin korunması, insan sağlığının güvence altına alınması ve ekonomik kaynakların verimli kullanımı, kentsel katı atık yönetiminde dikkate alınması gereken temel unsurlardır. Bu doğrultuda, atıkların uygun yöntemlerle bertaraf edilmesi, çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunurken aynı zamanda geleceğin daha yaşanabilir bir dünya vizyonuna ulaşmasını sağlamaktadır.

Yaşamın her alanında enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Aydınlatma, iklimlendirme, ulaşım, sağlık, hizmet sektörü, endüstri ve teknoloji gibi temel alanlar, enerji kullanımının yoğun olduğu başlıca örneklerdir. Bu bağlamda, ülkeler, vatandaşlarının enerji gereksinimlerini karşılamak ve ekonomik kalkınmayı desteklemek amacıyla mevcut tüm kaynak ve imkanlarını seferber etmektedir. Enerji arz güvenliğinin sağlanması ve sürdürülebilir enerji politikalarının geliştirilmesi, modern toplumların öncelikli hedefleri arasında yer almaktadır.

Günümüzde enerji gereksinimin önemli bir kısmı, fosil yakıtlar olarak adlandırılan başta kömür olmak üzere petrol ve doğalgazdan karşılanmaktadır. Ancak bu enerji kaynaklarının sınırlı rezervlere sahip olması ve çevre üzerindeki olumsuz etkileri, bu kaynakların daha verimli ve sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Aynı zamanda, alternatif enerji teknolojilerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılmasının önemi tüm dünyada açıkça kabul edilmektedir. Bu durum açıkça ortaya koymaktadır ki, temiz enerji üretimi ülkeler için çözümlenmesi gereken en kritik meselelerden biri haline gelmiştir.

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan biyogaz üretiminin son yıllarda pek çok atık yönetiminde kullanıldığı görülmektedir. Biyogazın her türlü organik maddeden elde edilebilir olması bu, enerji kaynağı için büyük avantajdır. Biyogaz, anaerobik (oksijensiz) koşullarda organik maddelerin fermentasyonu sonucu elde edilir ve bu oluşan biyogaz yaklaşık 4,70 kWh/m³ enerjiye eşdeğerdir. Üretilen biyogazın yenilebilir enerji olmasının yanı sıra organik atıkların kullanılması ile mevcut atık miktarının azaltılması ile çevre problemlerinin çözümüne katkı sunabilecektir. Kentlerde oluşan evsel, hayvansal ve endüstriyel atıkların uygunsuz koşullarda yönetilmesi durumunda başta yeraltı suları olmak üzere toprak ve hava kirliliği sorunları oluşmaktadır. Atıkların kimyasal ve biyolojik içeriklerine bağlı olarak uygun arıtma teknolojilerinin seçilmesi sürdürülebilir çevre yönetimi için önem arz etmektedir (Aktaş, 2019).

Ülkemizde her ne kadar son yıllarda biyogaz tesislerinin sayısı hızla artmış olsa da biyogaz elde edilmesine karşı bilinçlenme ve duyarlılıkta biraz geç kalınmıştır. Özellikle kırsal kesimlerdeki hayvan gübrelerinin yakıt olarak klasik bir şekilde yakılması sonucunda biyogazdan elde edilebilecek olan enerji kullanılamamaktadır. Biyogaz doğrudan enerji üretiminde kullanımı sonrası kalan ürün sıvı ve katı gübre destekleyici olarak kullanılabilmekte, böylece tam bir kaynak döngüsü tamamlanmış olmaktadır. (Aktaş, 2019).

Tezin Amacı

Son yıllarda artan nüfus, kentleşme oranındaki yükselme ve tüketim alışkanlıklarındaki değişimler, katı atık miktarlarının önemli ölçüde artmasına neden olmuştur. Bu durum, yalnızca çevresel sorunları ve depolama alanlarının yetersizliğini gündeme getirmekle kalmamakta, aynı zamanda bertaraf maliyetlerinin de giderek yükselmesine yol açmaktadır. Bununla birlikte, fosil yakıtların sınırlı rezervleri ve artan enerji ihtiyacı, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını zorunlu hale getirmektedir. Bu bağlamda, katı atıklardan biyogaz üretimi hem çevresel hem de ekonomik açıdan sürdürülebilir bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

Artvin ili, coğrafi olarak son derece engebeli bir yapıya sahip olup, ulaşım imkânlarının kısıtlı olması atık yönetimini güçleştiren önemli bir faktör olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, ilde katı atıkların düzensiz şekilde depolanması çevresel sorunların derinleşmesine yol açmakta ve özellikle sızıntı suyu ile sera gazı emisyonları bakımından risk oluşturmaktadır. Bu nedenle, Artvin’de katı atıkların yalnızca bertaraf edilmesi değil, aynı zamanda enerji üretiminde değerlendirilmesi hem bölgesel ihtiyaçlar hem de sürdürülebilir çevre yönetimi açısından büyük önem arz etmektedir.

Bu tez çalışması, söz konusu sorunlardan hareketle hazırlanmış olup, Artvin ilinde oluşan katı atıkların biyogaz potansiyelinin belirlenmesini amaçlamaktadır. Çalışma ile bir yandan atık yönetiminde karşılaşılan mevcut sorunların çözümüne katkı sağlanması, diğer yandan ise yenilenebilir enerji üretimi açısından ilin sahip olduğu potansiyelin ortaya konulması hedeflenmiştir.

1.1 Katı Atık

Atık, malların üretimi veya kullanımı sonrasında çevreye bırakılan maddeler olarak tanımlanabilir, her türlü insan faaliyeti sonucu oluşan ve uygun bertaraf yöntemlerinin uygulanmaması neticesinde ekolojik problemlere yol açılmaktadır (Gültekin, 2021).

Atık kavramı, çeşitli uluslararası kuruluşlar tarafından farklı şekillerde tanımlanmıştır. Bu tanımlar, atığın doğası, yönetimi ve çevresel etkileri hakkında önemli bilgiler sunar. Örneğin, OECD (Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü) atığı, ekonomik değeri olmayan ve arıtma ya da bertarafı gerekli olan maddeler olarak tanımlar. Bu tanım, atıkların genellikle ekonomiyle olan ilişkisinin kesildiği ve bu maddelerin çevresel olarak işlenmesi gerektiği fikrini vurgular. Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) ise atığı, üretenin kullanmadığı ve arıtma ile yok edilmesi gereken maddeler olarak tanımlar. Bu tanım, atığın insan faaliyetlerinin bir yan ürünü olduğunu ve değerinin düşük olmasının, çoğu zaman maddelerin karışık ve ayrıştırılmasının zor olmasından kaynaklandığını ifade eder. Atığın değeri, karışım derecesi ve safsızlık ile ters orantılıdır. Yani, atık ne kadar saf ve ayrıştırılabilir olursa, geri dönüşüm veya yeniden kullanım için o kadar değerli hale gelir. Bu, atık yönetimi ve geri dönüşüm süreçlerinin önemini artırır. Atığın doğru bir şekilde ayrıştırılması ve geri dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesi, atıkların değerinin artmasına ve çevre üzerindeki olumsuz etkilerin azaltılmasına katkı sağlar (Mohamed, 2017).

Günümüzde, birçok katı atık, doğaya bertaraf edilmeden önce hiçbir işleme tabi tutulmadan çöp depolama alanlarında depolanmaktadır. Bu durum, doğal kaynakların sınırlı olduğu ve bu kaynakların doğru şekilde kullanılmaması halinde tükenme riski taşıdığı gerçeğiyle paralellik gösterir. Doğal kaynakların tükenmesi, özellikle endüstriyel üretimin artması ve tüketimin hızlanmasıyla daha da belirginleşmektedir. Eğer bu kaynaklar verimli bir şekilde kullanılmazsa hem ekonomik hem de çevresel açıdan büyük sorunlar yaşanabilir.

Katı atık yönetim sistemlerini daha verimli hale getirebilmek için çeşitli araştırmalar ve projeler yürütülmektedir. Bu projeler, atıkların ayrıştırılması, geri kazanılması ve yeniden kullanılması yöntemlerini içerir. Örneğin, geri dönüşüm teknolojileri, organik atıkların biyogaz üretimi gibi enerji kaynaklarına dönüştürülmesi, atıkların daha değerli hale gelmesini sağlar. Bunun yanında, sıfır atık gibi çevreci hareketler, atık miktarını azaltmayı ve doğal kaynakları daha sürdürülebilir bir şekilde kullanmayı hedefler.

1.2 Katı Atıkların Kaynaklarına Göre Sınıflandırılması

Atıkların daha etkin ve güvenli bir şekilde yönetilmesi için temel bir yaklaşımdır. Bu sınıflandırma, atıkların kaynağına göre farklı türlere ayrılmasını ve her tür atığın çevre ve insan sağlığına zarar vermemek için uygun yöntemlerle işlenmesini sağlar. Katı atıkların doğru bir şekilde toplanması, taşınması, depolanması ve işlenmesi, çevresel etkilerin minimize edilmesi ve insan sağlığının korunması açısından büyük önem taşır.

1.2.1 Evsel/Belediye Katı Atıkları

Günlük yaşam kapsamında; toplu konut alanları, sosyal yaşam alanları (park, bahçe, piknik ve mesire yerleri gibi) ve kamusal alanlarda oluşan atıklar, evsel nitelikli katı atıklar kapsamında değerlendirilmektedir. Bu tür atıklar, bireylerin yaşam faaliyetleri sonucunda ortaya çıkan ve yönetilmesi gereken çevresel yüklerdir. Artan nüfus, kentleşme ve yaşam standartlarındaki yükselme ile birlikte katı atık üretim miktarında önemli bir artış gözlemlenmektedir. Özellikle sanayileşme, teknolojik gelişmeler ve ekonomik büyüme gibi faktörler, tüketim alışkanlıklarını doğrudan etkilemekte; bu da hem üretilen katı atık miktarının hem de atık çeşitliliğinin artmasına neden olmaktadır (Zarifi, 2022).

1.2.2 Ticari Katı Atıklar

İşyerlerinden (ofisler, mağazalar, restoranlar vb.) çıkan atıklardır. Bu atıklar genellikle evsel atıklara benzer olsa da, ticari faaliyetlerin türüne göre farklılık gösterebilir. Özellikle restoranlar gibi gıda sektöründe faaliyet gösteren işletmelerde organik atıklar ön plandadır.

1.2.3 Endüstriyel Katı Atıklar

Endüstriyel faaliyetler sonucunda ortaya çıkan atıkların uygun tekniklerle yönetilmemesi durumunda çevre ve insan sağlığı ciddi riskler taşımaktadır. Bu tür atıkların doğrudan alıcı ortamlara bırakılması, çevrede zararlı mikroorganizmaların çoğalmasına neden olmakta ve bu durum hem sucul hem de karasal ekosistemlerde yaşayan canlı türlerinin yaşamını tehlikeye atmaktadır. Kirlilik düzeyinin standartların üzerinde olması durumunda, kirleticiler solunum yolu hastalıkları başta olmak üzere ölümlere neden olabilecek sağlık sorunlarının ortaya çıkmasına yol açabilmektedir. Endüstriyel atıkların uygun yöntemlerle bertaraf edilmemesi; ekosistem dengesi üzerinde geri dönüşü zor tahribatlara, ekonomik kayıplara, kalıcı sağlık sorunlarına ve bulaşıcı hastalıkların yayılımına neden olabilmektedir. Bu nedenle, endüstriyel atıkların çevresel etkileri

dikkate alınarak sürdürülebilir atık yönetimi stratejilerinin uygulanması büyük önem arz etmektedir (Özkaya, 2020).

1.2.4 Tarımsal ve Hayvansal Katı Atıklar

Tarım faaliyetlerinden çıkan atıklardır. Bu atıklar organik olup, genellikle gübre veya kompost yapımında kullanılabilir. Ancak, bazı tarım atıkları pestisitler veya gübrelerden dolayı kimyasal kalıntılar içerebilir ve çevreyi kirletebilir. Tarımsal ürün kalıntıları, bitki örtüsü, kimyasal ilaç kutuları, plastik sulama boruları bu atık grubunu oluşturur.

Tarımsal atıkların özellikle yerleşim bölgelerine yakın yerlerde olması durumunda yerel yönetimler açısından problemler yaratmakta, besi çiftliklerinden başta etrafa rahatsız edici kokuların yanı sıra atıkların kontrolsüz olarak araziye bırakılması sonucunda yüzey ve yer altı sularında kirliliğe sebep olabilmektedir. Yıkama ve temizlik sonucu oluşan tortular, hayvan ve bitki dokuları, atık plastikler (ambalajlar hariç), hayvan idrar ve gübresi (bozuk saman da dahil), atık sular, toplanmış ya da tesis dışında işlem görmüş atıklar, ormancılık atıkları ve tehlikeli bileşikler içeren kimyasal tarım maddesi atıklarının tamamı tarımsal atıklar olarak sınıflandırılabilir (Abdulaı,2019).

1.2.5 İnşaat ve Yıkım Atıkları

İnşaat atıkları, konut, iş yeri binaları, kent içi yolları, vb. her türlü yapıların inşası ve bakımı sırasında ortaya çıkan katı atık maddeleri kapsamaktadır. Buna karşılık, yıkıntı atıkları; söz konusu yapıların onarımı, tadilatı, yenilenmesi veya tamamen yıkımı esnasında oluşan katı atıklardır. İnşaat ve yıkıntı atıklarının bileşimi, kullanılan yapı malzemelerine bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir. Bu atıklar; beton, tuğla, sıva, ahşap, metal, plastik ve cam gibi yapı elemanlarını içerebilmektedir. Atık içeriğinde yer alan yeniden başka alanlarda kullanılabilecek bu malzemeler, fiziksel olarak küçültüldükten sonra ikincil yapı malzemesi olarak değerlendirilebilmektedir. Ancak, bu tür malzemelerin geri dönüşüm süreci genellikle zaman alıcı olup, iş gücü, teknoloji ve maliyet açısından çeşitli zorluklar içermektedir. Ayrıştırma, sınıflandırma ve kalite kontrol gibi işlemler geri kazanımın etkinliğini doğrudan etkilemekte; bu nedenle sürecin optimize edilmesi gerekmektedir. İnşaat ve yıkıntı atıklarının çevre dostu bir şekilde yönetilebilmesi için, geri dönüşüm uygulamalarının yaygınlaştırılması ve bireylerin ikincil hammadde kullanımına yönlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu yaklaşım, bir yandan doğal kaynakların korunmasına katkı sağlarken diğer yandan insan sağlığına yönelik olası olumsuz etkilerin önlenmesine yardımcı olmaktadır. Aynı zamanda,

hammadde kaynaklarının daha verimli ve sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasına olanak tanımaktadır (Nalkıran, 2019).

1.2.6 Tıbbi Atıklar

Sağlık hizmeti sunulan birimlerde gerçekleştirilen işlemler sırasında ortaya çıkan enfekte olmuş, patolojik ve kesici-delici özellikteki atıklar tıbbi atık olarak tanımlanmaktadır. Bu atıklar; hastaneler, sağlık ocakları, aile sağlığı merkezleri, kan merkezleri gibi sağlık kuruluşlarının yanı sıra araştırma merkezleri ve laboratuvarlarda yürütülen faaliyetler sonucunda oluşmaktadır. Ayrıca, ev ortamlarında veya benzeri alanlarda gerçekleştirilen sağlık hizmetleri neticesinde oluşan atıklar da tıbbi atık kapsamına girmektedir. Sağlık kuruluşlarında oluşan tıbbi atıkların yaklaşık %75 ila %90'ı enfeksiyöz ya da tehlikeli özellik göstermeyen, genel tıbbi atık sınıfında değerlendirilmektedir. Geriye kalan %10 ila %25'lik kısmı ise enfeksiyöz, patolojik veya kesici-delici nitelik taşıyan ve özel yönetim gerektiren tehlikeli tıbbi atıklar olarak sınıflandırılmaktadır (Uçar, 2022).

Tıbbi atıklar, toplanma, taşınma ve bertaraf süreçleri boyunca özel önlemler gerektiren tehlikeli atık grubu içerisinde yer almaktadır. Bu tür atıkların yönetimi sırasında gerekli önlemlerin alınmaması durumunda, sağlık personeli, atık yönetimi çalışanları ve toplum genelinde ciddi sağlık riskleri ortaya çıkabilmektedir. Özellikle uygun olmayan koşullarda gerçekleştirilen toplama ve taşıma işlemleri, kesici-delici yaralanmalara ve bulaşıcı hastalıkların yayılmasına neden olabilmektedir. Tıbbi atıklar, enfeksiyon riski taşıyan patojen mikroorganizmalar içerebilmekte olup, insan sağlığı üzerinde doğrudan olumsuz etkiler yaratabilmektedir. Bunun yanı sıra, bazı tıbbi atık türlerinde bulunan kimyasal ve farmasötik bileşiklerin genetik materyal üzerinde mutajenik etkiler oluşturabildiği ve kalıtsal değişimlere yol açabileceği bilinmektedir. Bu bağlamda, tıbbi atıkların çevreye ve insan sağlığına zarar vermeyecek şekilde, ulusal mevzuat ve uluslararası standartlara uygun olarak yönetilmesi büyük önem arz etmektedir (Nalkıran, 2019).

1.2.7 Tehlikeli Atıklar

İnsan sağlığına ve çevreye yönelik potansiyel ya da olası olumsuz etkileri nedeniyle bertaraf edilmeden önce özel işlem ve yöntemlerle yönetilmesi gereken atıklardır. Bu atıklar, fiziksel, biyolojik ve kimyasal özellikleri bakımından yakıcı, toksik (zehirleyici), yanıcı, koroziv (aşındırıcı), yok edici ya da diğer maddelerle etkileşimleri sonucu zararlı özellikler gösterebilen bileşikler içerebilir. Bu kapsamda; asitler, kurşun, cıva, arsenik ve

kadmiyum gibi ağır metal bileşikleri, tarım ilaçları (pestisitler), kendiliğinden reaksiyona girme potansiyeline sahip reaktif atıklar ile radyoaktif maddeler tehlikeli atıklar sınıfında değerlendirilmektedir (Güler, 2008).

Küçük ve orta ölçekli işletmeler de bu atıkların üreticisi olabilir, bu nedenle tehlikeli atık yönetimi, sadece büyük fabrikalar için değil, daha küçük işletmeler için de önemli bir konu haline gelmektedir (Abdula,2019).

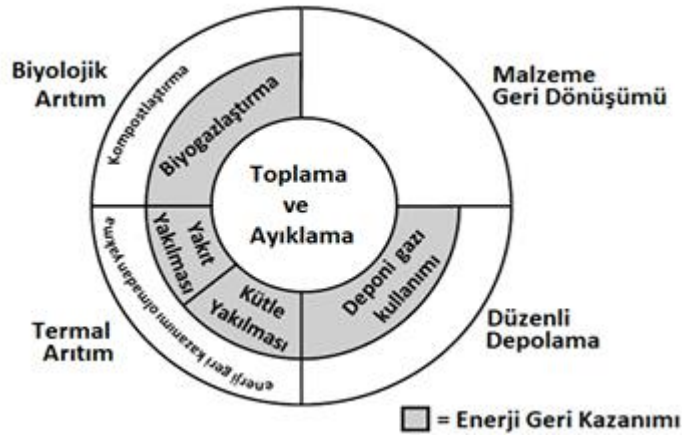
1.3 Katı Atık Yönetim Süreci

Atık yönetimi, ortaya çıkan atıkların çevre ve insan sağlığına zarar vermeyecek şekilde yönetilmesini, etkilerinin en aza indirilmesini ve halkın geri kullanım ile geri dönüşüm konusundaki eğilimlerinin dikkate alınmasını amaçlayan bir süreçtir. Bu hedefe ulaşmanın en etkili yolu, atık üretiminin azaltılmasıdır. Atık üretiminin azaltılması ise üretim süreçlerinde yapılacak iyileştirmeler ve hammadde kullanımının optimize edilmesi ile doğrudan ilişkilidir.

Katı atıkların yönetimi, farklı disiplinlerden farklı teknolojiler kullanarak birlikte çalıştığı karmaşık bir sistemdir. Entegre atık yönetimi ise atığın toplanmasından başlayarak çevresel, ekonomik ve toplumsal açıdan uygun arıtma ve bertaraf yöntemlerinin seçilmesine kadar olan tüm süreçleri kapsayan bir yaklaşımdır. Ayrıca, bu sistem, ilgili yasal düzenlemelere uygunluk sağlanmasını da içerir. Atık yönetiminde uygulanan yöntemler, birbirinden bağımsız değil, birbiriyle ilişkili ve bütüncül bir yapıya sahiptir. Bu nedenle, uygulanacak sistemlerin kendi içindeki verimliliği, bir sonraki aşamayı doğrudan etkilemektedir. Örneğin atık toplamada seçilen yöntem(ler) geri kazanım oranını da etkilemektedir. Dolayısıyla seçilen atık yönetimi sürdürülebilir ve bütünsel bir yaklaşımla ele alınmasını öncellemektedir (Tarakci, 2018).



Şekil 1. 1 Atık hiyerarşi piramidi (Demir, 2023).



Şekil 1. 2 Entegre atık yönetiminin unsurları (Zarifi, 2022).

Ülkelerin gelir düzeyi ve tüketim alışkanlıklarına bağlı olarak katı atıkların özellikleri ve miktarı değişimler göstermektedir. Bu değişkenlik, yalnızca ülkeler arasında değil, aynı ülke içinde bölgeler arasında, hatta aynı şehirde semtler arasında bile gözlemlenebilir. Etkili bir katı atık yönetimi, tüm atıkların kontrol altına alınmasını ve çevre ile insan sağlığı açısından en uygun yöntemlerle bertaraf edilmesini sağlar. Uygun koşullar altında planlanması yapılan ve işletilen bütüncül bir katı atık yönetim sistemi, kontrolsüz katı atık oluşumunu tamamen önleyerek sürdürülebilir bir çevre için gerekli altyapıyı sunar (Gültekin, 2021).

Verimli ve entegre bir atık yönetim sisteminin etkin bir şekilde işlemesi için aşağıdaki temel özellikleri taşıması gereklidir:

- Bütüncül olmalıdır. Bir yerleşim merkezinde oluşan atığın tüm bileşenlerin ve üretim kaynaklarını kapsayacak şekilde planlanmalıdır. Bu, sistemin her türlü atık türüne ve kaynağına uygun çözümler sunabilmesini sağlar.
- Ekonomik fayda sağlayabilmelidir. Geri kazanımı mümkün malzemeler, kompost üretimi ve biyogaz elde edilmesi gibi ekonomik değerler oluşturabilmelidir. Bu gelir kaynakları, piyasa koşulları ve yatırımların maliyetlerine bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir.
- Esneklik taşınmalıdır. Atık özellikleri zamanla ve mekânsal değişimlere uyum sağlayabilecek bir esneklikle tasarlanmalıdır. Bu özellik, sistemin sürdürülebilirliğini artırır.
- Bölgesel planlama gerektirir. Toplanacak atık miktarına ve nüfus büyüklüğüne göre planlanmalıdır. Özellikle büyükşehirler dışındaki yerleşim bölgelerinde bölgesel planlamalar yapılmalıdır.
- Ulusal çevre sektörü geliştirilmelidir. Yerel yönetimler, kamu ve özel sektör iş birliğiyle sinerji yaratarak dinamik bir atık yönetim sektörü oluşturmalıdır. Çevre koruma konusundaki teknik danışmanlık ve altyapı hizmetlerinin kurumsallaşması önem arz etmektedir (Ekinci,2019).

1.4 Katı Atık Bertaraf Yöntemleri

Dünya genelinde katı atıkların bertarafı için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Termal teknolojiler arasında yer alan yakma, piroliz ve gazifikasyon; biyolojik sistemlere dayalı kompostlaştırma ve biyometanizasyon ile düzenli depolama sistemleri bu yöntemlerin başlıcalarıdır. Bertaraf sistemi seçimi, genellikle maliyet faktörü göz önünde bulundurularak yapılmaktadır. Gelişmiş ülkeler, yüksek maliyetli ancak etkili olan gazifikasyon ve piroliz gibi sistemleri tercih ederken, gelişmekte olan ülkelerde daha düşük maliyetli düzenli depolama yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bertaraf sistemi seçiminde maliyet dışında yer sıkıntısı da önemli bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Özellikle Avrupa ülkelerinden bazıları, sınırlı alan nedeniyle atıkları düzenli depolama yerine hacimlerini azaltan yakma gibi teknolojileri tercih etmektedir. Bu yöntemler, yer sorununu çözmenin yanı sıra atık miktarını azaltarak enerji üretimine de katkı sağlamaktadır (Gödel, 2019).

1.4.1 Geri Dönüşüm

İnsanoğlunun geçmişten günümüze kadar gerçekleştirdiği en belirgin faaliyetlerden biri, tüketimdir. İnsan varlığının devamı, bu tüketim sürecinin de kesintisiz bir şekilde devam edeceği anlamına gelmektedir. Ancak, her geçen gün artan tüketim alışkanlıkları, beraberinde büyük miktarlarda atık oluşumuna ve birikimine neden olmaktadır. Bu birikimin olumsuz etkilerini azaltmak ve çevresel sürdürülebilirliği desteklemek adına alınabilecek en etkili tedbirlerden biri geri kazanım çalışmalarıdır. Geri kazanım, sürekli olarak artan katı atıkların azaltılarak hem çevreye katkı sağlar hem de atık yönetiminde kaynakların daha verimli bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanır. Bu süreç, yalnızca atık miktarını azaltmakla kalmaz, aynı zamanda atıklardan ekonomik değer yaratılmasına da katkıda bulunur. Geri kazanılmış atıklar, farklı sektörlerde yeniden değerlendirilerek yeni ürünlerin üretiminde ve çevre dostu uygulamalarda kullanılmaktadır. Tablo 1.1’de gösterilmiştir (Kılınçel, 2018).

Tablo 1.1 Geri kazanımı yapılan atıkların kullanım olanakları

Atık Türü	Kullanım Alanları
Cam	Eritilme sonrası cam ürünleri üretimi için kullanılabilir. Bununla birlikte beyaz cam üretimi söz konusunda kısmi sınırlamalar vardır (renkli cam muhtevası)
Metaller	Geri kazanılan metaller eritilme sonrası farklı kullanım amaçları için kullanılabilir.
Plastik	Plastik ürünlerin yeniden kullanımında farklı kısıtlar olabilir. Plastikler pek çok çeşidinin olması nedeniyle ayırma imkanlarını kısıtlamakta, sağlıklı ikincil ürün elde edilmesini sınırlamaktadır. Yeniden üretilen plastikler gıda ile temasta bulunmamalıdır. Bununla birlikte, çiçek saksısı, plastik mobilya, boru gibi malzemelerin üretilmesinde kullanılabilirler
Kağıt	Geri kazanılan kağıdın özelliğine bağlı olarak belli oranlarda geçmemek kaydıyla kullanılabilir.
Tekstil	Kağıt yapımı, dolgu malzemesi, yalıtım malzemesi, yeni ip üretimi için kullanılabilir
Ahşap	Kağıt üretiminde ve yakıt olarak kullanılabilir
Kemik	Jelatin vb. malzemelerin üretiminde kullanılabilir

1.4.2 Düzenli Depolama Yöntemi

Atıkların arazide depolanması, en eski ve en yaygın kullanılan bertaraf yöntemlerinden biridir. Ancak, katı atıkların araziye kontrolsüz bir şekilde bırakılması, sızıntı suyu ve gaz oluşumunun denetlenmemesi gibi durumlar, vahşi depolama olarak tanımlanmaktadır. Vahşi depolama, çevresel ve sağlık açısından ciddi riskler taşımaktadır. Düzenli depolama alanında sızdırmazlığın sağlanmış alanlara dökülerek sıkıştırılması ve belirli süre sonrasında örtülerek doğal bir biyolojik reaktöre dönüştürülmesi sürecini ifade etmektedir. Düzenli depolama sahalarının etkin bir şekilde yönetilmesi için mühendislik çalışmalarının eksiksiz yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda, sızıntı suyu, depo gazı emisyonları, atıkların dağılımı ve koku kontrolünün sağlanması önem taşımaktadır (Coşkun, 2015).



Şekil 1. 3 Düzenli depolama sahası kesiti (Solak, 2015).

Çevreye zararları en aza indirmek için düzenli depolama alanlarında şu önlemler alınmalıdır:

- Taban Kaplaması: Atıkların zemine doğrudan temasını önler.
- Günlük Örtü Tabakası: Atıkların üzerinin düzenli şekilde örtülmesiyle koku ve zararlı canlıların yayılımını önler.
- Üst Kaplamalar: Depolama alanı dolduktan sonra alanın çevresel etkilerini sınırlandırır.

- Yüzeysel ve Sızıntı Suyu Drenajı: Saha içerisinde biriken suların çevreye zarar vermemesi için etkili bir drenaj sistemi kurulur.
- Depo Gazı Kontrolü: Depolama sırasında oluşan metan ve karbondioksit gibi gazların toplanması ve değerlendirilmesi.

Düzenli depolama alanlarında biriken kentsel katı atıkların bozunması sonucunda, büyük ölçüde metan ve karbondioksitten oluşan depo gazı meydana gelir. Bu gazlar, kontrol altına alındığında enerji üretimi gibi faydalı amaçlar için kullanılabilirken, kontrolsüz şekilde bırakıldığında çevre ve iklim üzerinde ciddi olumsuz etkiler yaratabilir.

1.4.3 Düzensiz (Vahşi) Depolama

Geçmişten bu yana uygulanmakta olan düzensiz katı atık depolama yöntemleri; atıkların yol kenarlarına, su kaynaklarına veya kullanılmayan maden ocaklarına bırakılması şeklinde gerçekleşmiştir. Bu yöntem, ekonomikliği nedeniyle tercih edilmekle birlikte, çevresel ve halk sağlığı açısından ciddi riskleri beraberinde getirmektedir. Söz konusu alanlarda geçirimsiz taban tabakalarının bulunmaması, yağmur sularının atıklarla temas ederek sızıntı suyu oluşturmaya neden olmakta; bu da özellikle yeraltı su kaynaklarında önemli düzeyde kirliliğe yol açmaktadır. Ayrıca, bu alanlarda oluşan biyogaz içerisinde yüksek oranda bulunan metan gazı hem ciddi bir sera gazı etkisi oluşturmakta hem de yangın ve patlama gibi tehlikelere neden olabilmektedir. Düzensiz depolama, tarım arazilerinin veriminde azalma, hava ve su kirliliği ile bulaşıcı hastalıkların yayılması gibi olumsuz sonuçlara yol açmakta; bu durum, atık yönetiminde doğal iyileşmeye bırakılan yöntemlerin yetersiz ve sürdürülemez olduğunu açıkça ortaya koymaktadır (Özkaya, 2020).

1.4.4 Termal Bertaraf Yöntemleri

Termal bertaraf süreçleri, atıkların hacminin ve ağırlığının azaltılmasının yanı sıra enerji geri kazanımı sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemlerle, katı atıkların yakılabilir hacmi %85 ila %95 oranında azaltılabilmektedir. Özellikle yerleşim birimlerinin yoğun olduğu ve düzenli depolama alanlarının sınırlı olduğu bölgelerde, bu teknolojiler atık yönetimi çözümleri arasında önemli bir yere sahiptir. Termal işlemlerin bir diğer avantajı, atıkların hacmini azaltmanın yanı sıra ısı formunda enerji geri kazanımı sağlamasıdır. Bu süreç, enerji üretimiyle birlikte ekonomik ve çevresel faydalar sunmaktadır. Atıklardan enerji üretimi, büyük miktarlardaki belediye katı atıklarının sorun olmaktan çıkıp enerji için bir hammadde kaynağına dönüşmesini sağlamaktadır.

Ayrıca, bu yöntem ile başarılı olarak geri dönüştürülemeyen veya biyolojik yöntemlerle (örneğin, kompostlama) geri kazanılamayan atıkların değerlendirilmesine de olanak tanımaktadır. Atıklardan enerjinin geri kazanımı amacıyla atıkların bir kaynak olarak kullanılması, dünya genelinde giderek daha cazip bir alternatif haline gelmektedir. Bu tür yaklaşımlar, sürdürülebilir atık yönetimi ve enerji üretimi süreçlerinde önemli bir role sahiptir (Tarakci, 2018).

Atık içerisinde varolan kimyasal enerjinin, uygun enerji üretim tesisinde elektrik, ısı ve/veya yakıt olarak kullanılmak üzere parçalandığı süreçleri atık enerjisi olarak tanımlanabilmektedir. Bu süreç, hem enerji üretimine katkı sağlamak hem de atık miktarını azaltarak çevresel etkileri minimize etmek amacıyla uygulanmaktadır. Atıktan enerji üretimi ile ilgili teknolojiler, özellikle başta A.B.D., Hollanda, Almanya ve İngiltere gibi ülkelerde yaygın bir şekilde geliştirilmekte ve kullanılmaktadır. Bu teknolojiler iki ana grupta sınıflandırılmaktadır:

- Doğrudan Yanma (Yakma): Atıkların yüksek sıcaklıklarda yakılarak enerjiye dönüştürülmesi sürecidir. Bu yöntem, basit yapısı ve enerji geri kazanımı potansiyeli nedeniyle yaygın bir uygulamadır.
- İleri Dönüştürme Teknolojileri: Gazlaştırma ve piroliz gibi daha gelişmiş teknolojileri içerir. Bu yöntemler, atıkların termal veya kimyasal süreçler ile daha ileri düzeyde ayrıştırılmasını ve yüksek verimlilikte enerji üretimini sağlamaktadır.

Bu teknolojiler, yalnızca atık yönetimi ve enerji üretimi açısından değil, aynı zamanda sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada önemli bir araç olarak değerlendirilmektedir (Tarakci, 2018).

1.4.4.1 Yakma

Yakma yöntemi, yüksek ısılarda çalışan özel fırınlarda ısı değeri kapasitesi yüksek olan maddelerin yakılmasıyla uygulanan bir atık bertaraf yöntemidir. Bu süreçte, atıklardan enerji elde edilirken, aynı zamanda atıkların hacmi ve ağırlığı önemli ölçüde azaltılmakta ve depolama alanlarının üzerindeki yük hafifletilmektedir. Bu özellikleri nedeniyle yakma yöntemi, atık bertarafında en etkili ve yaygın olarak tercih edilen yöntemlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Atığın hacimsel ve ağırlık açısından küçültülmesi, özellikle düzenli depolama alanlarının sınırlı olduğu veya arazi fiyatlarının yüksek olduğu bölgelerde bu yöntemi daha cazip hale getirmektedir. Ayrıca, yakma işleminin ekonomik

olması için atığın ek bir yakıtı ihtiyaç duymadan yakılabilir özellikte olması gerekmektedir. Eğer ikincil bir yakıt kullanımı gerekli olursa, yakma yöntemi maliyet açısından avantajını yitirebilmektedir. Yakma yöntemi, sadece atıkların bertaraf edilmesini değil, aynı zamanda enerji üretimini sağlayarak çevresel ve ekonomik faydalar sunan entegre bir çözüm olarak değerlendirilmektedir (Karaca, 2022).

1.4.4.2 Gazifikasyon

Gazifikasyon yöntemi, biyokütlenin 800°C ve üzerindeki sıcaklıklarda, az miktarda oksijen bulunan bir ortamda ve atmosferik basınç altında yanabilir gazlara dönüştürülmesi esasına dayanan bir atık bertaraf yöntemidir. Bu işlem sonucunda metan, asetilen, etilen ve etan gibi hafif hidrokarbonlar ile birlikte hidrojen, karbonmonoksit, karbondioksit gibi yoğunlaşmayan gazlar oluşmaktadır. Sürecin uygulandığı koşullara bağlı olarak, ortamda oksijen ve nitrojen gazları da bulunabilir. Gazifikasyon prosesi sonunda elde edilen gazın ısı değeri yaklaşık olarak 4 MJ/m³'tür. Gazifikasyon sonucu elde edilen gaz, içerdiği bileşenlere ve enerji yoğunluğuna bağlı olarak farklı uygulamalarda kullanılabilir. Bu gaz, doğalgaz üretiminde veya hidrojen üretiminde değerlendirilebildiği gibi, ısı değeri yüksek olduğunda çamur kurutma gibi endüstriyel işlemler için ısı kaynağı olarak da kullanılabilir. Özellikle çamur kurutma uygulamalarında, gazifikasyon sürecinden elde edilen ısı sayesinde çamurun su oranı %10'a kadar düşürülebilmektedir. Gazifikasyon yöntemi, atık yönetiminde hem enerji geri kazanımı hem de atık miktarının azaltılması açısından önemli bir alternatif sunmaktadır (Karaca, 2022).

1.4.4.3 Piroliz

Piroliz, oksijensiz ortamda stabil olmayan organik maddeleri gaz, sıvı ve katı bileşenlere dönüştürebilen termal (400-800°C) bir arıtım sürecidir. Endotermik olan bu proses ekzotermik reaksiyon gösteren yakma ve gazifikasyon proseslerinden ayrılmaktadır. Gazifikasyonda da piroliz sistemlerinde olduğu üzere katı atıkları gaz, sıvı ve katı yakıtlara dönüştürülse de iki sistem arasındaki en temel fark; endotermik reaksiyonları sürdürmek için piroliz sistemlerinde oksijensiz ortamda dış bir ısı kaynağı kullanılmakta iken, gazlaştırma sistemlerinin gerekli ısıyı kendi içinden temin ederken, katı atığın yanması için hava veya oksijen kullanmasıdır (Atmaca, 2015).

1.4.4.4 Plazma

Plazma kavramsal olarak maddenin katı, sıvı ve gaz hallerinden farklı bir faz olarak tanımlanırken "maddenin dördüncü hali" olarak tariflendirilmektedir. Plazma yöntemi, özellikle yüksek sıcaklıkların gerektiği uygulamalarda kullanılır. Bu yöntemde katı maddeler, herhangi bir ayrıştırma işlemine tabi tutulmadan, 2000-5000 °C sıcaklık aralığında elektrik arklarıyla oluşturulan yüksek enerjili bir ortamda plazma haline dönüştürülür. Bu süreç, maddenin iyonlaşarak pozitif yüklü iyonlar ve serbest elektronlar içeren bir gaz formunu almasını sağlar. Plazma teknolojisi, geri dönüşüm, enerji üretimi ve malzeme işleme gibi çeşitli endüstriyel alanlarda uygulanmaktadır (Saraç, 2015).

Gaz molekülleri 2000°C'de atomlarına ayrılırken sıcaklık 3000°C'ye ulaştığında, gaz molekülleri elektron kaybederek iyonlaşma gerçekleşir. Sonuçta, gazın viskozitesi atmosfer basıncındakine eşit olur ve kazandığı serbest elektrik yüklerle gaz, metallerin içerdiğine yakın bir elektriksel iletkenlik sergiler. Bu, plazmanın karakteristik özelliklerinden biridir ve plazma teknolojisinin çeşitli uygulamalarında önemli bir rol oynar (Dereli,2012).

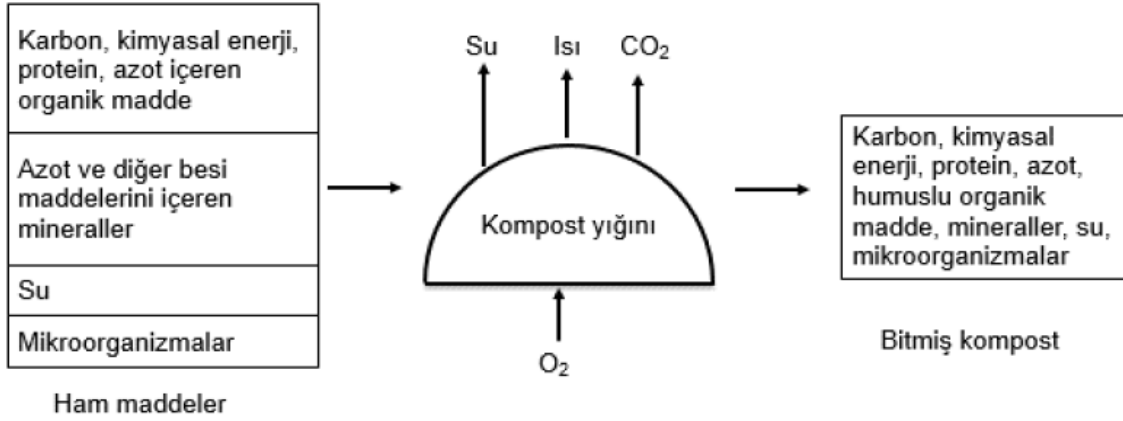
1.5 Biyolojik Bertaraf Yöntemleri

Günümüzde, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik ilgi giderek artmakta ve bu doğrultuda atıklardan enerji elde etmek için birçok farklı teknoloji geliştirilmiştir. Bu teknolojiler arasında, biyolojik süreçlere dayalı sistemler önemli bir yer tutmaktadır. Biyolojik sistemler, atıkları enerjiye dönüştürmek için farklı yöntemleri bünyesinde barındırarak hem çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamakta hem de ekonomik faydalar sunmaktadır.

1.5.1 Kompostlaştırma

Kompostlaştırma, organik atıkların, mikroorganizmalar ve diğer canlılar tarafından ayrıştırılarak doğal yollarla gübreye dönüştürülmesi işlemidir. Bu süreç, organik maddelerin (örneğin, yemek atıkları, bitki kalıntıları, yapraklar, çimenler ve hayvan dışkıları) toprağa geri kazandırılmasını sağlayarak çevreyi korur ve toprak verimliliğini artırır. Kompostlaştırma süreci, atıkların nem, oksijen ve sıcaklık kontrolü altında ayrıştırılmasıyla gerçekleşir. Mikroorganizmalar (bakteriler, mantarlar) ve bazı böcekler, bu atıkları parçalayarak daha basit bileşiklere dönüştürür. Bu işlem sonunda, zengin besin maddeleri ve organik madde içeren, toprak için faydalı olan bir gübre olan kompost ortaya

çıkar. Organik maddelerin biyolojik bozulmasını kontrol edebilen bir yöntemdir. Bu yöntem (Şekil 1.5) kullanılması durumunda; bitkisel hastalıkları önleyebilmesi, toprak için besleyici maddeler içermesi, yararlı toprak organizmalarını artırması, organik maddelerin geri kazanılması, gübre gereksinimini azaltması, toprak erozyonunu olumlu katkısı, doğal kaynakların korunması ve kirlilik önleyici gibi birçok yararları söz konusudur (Dereli, 2012).



Şekil 1.4 Kompostlaştırma İşlemi (Gödel, 2019).

Kompostlaştırma, organik atıkların doğal süreçler aracılığıyla organik gübreye dönüştürülmesi işlemidir. Bu süreçte kullanılabilen atıklar şunlardır:

- organik atıklar,
- tarım ve gıda sektörü atıkları
- park ve bahçe atıkları,
- hayvan dışkıları,
- gıda sektörü atıklar (Ekinci, 2019).

Kompost kullanımının sağladığı faydalar ise şu şekildedir:

- erozyon önleyici; toprağın üst tabakasının kaymasını engelleyerek toprağın korunmasına yardımcı olur,
- toprağın fiziksel yapısını düzenleyici; toprağın hava almasını sağlar ve su tutma kapasitesini artırır,
- bitki gelişmesine katkısı, bitkilerin sağlıklı büyümesine yardımcı olan besin maddeleri sağlar,
- mineral gübrenin etkinliğinin artması, organik kompost, bitkiler tarafından daha kolay kullanılabilen besin maddeleri içerir,

- kullanım ve uygulanması pratik, kompostun toprağa uygulanması basit bir işlemdir,
- ekonomik olması, kimyasal gübrelerin yerine kullanılabilir, böylece maliyetler düşer,
- zengin besin kaynağı olması, iyi ayrılmış olgun kompost, mikro elementlerin yanı sıra organik madde, karbon, azot, fosfor, potasyum gibi önemli besin maddelerini sağlar.

Bu avantajlar, kompost kullanımını sürdürülebilir tarım ve çevre yönetimi açısından önemli bir seçenek haline getirmektedir (Ekinci, 2019).

1.5.2 Anaerobik Çürütme

Anaerobik (havasız) çürütme, organik atıkların oksijensiz bir ortamda biyolojik olarak parçalanması işlemidir. Bu süreçte, mikroorganizmalar organik maddeleri oksijen bulunmadan parçalar ve bu işlem sonucunda biyogaz üretimi gerçekleşir. Anaerobik parçalanma prosesinin başlıca ürünleri, yaklaşık %55-65 metan (CH_4) ve %35-45 karbondioksit (CO_2) içeren biyogazdır. Anaerobik çürütme prosesleri geleneksel olarak, organik atıklar içeren atıkların arıtılmasında kullanılmaktadır. Bu süreç, sıvı atıklardaki organik maddeleri oksijensiz ortamda parçalayarak, enerji elde edilmesini sağlar. Ancak zamanla yapılan araştırmalar, evsel katı atıklar üzerinde de anaerobik çürütme prosesinin uygulanabileceğini ve bu yöntemle atıklardan enerji elde etmenin ekonomik olarak verimli olabileceğini ortaya koymuştur. Bu, atıkların çevreye zararlı etkilerini azaltmak ve aynı zamanda enerji üretmek için etkili bir yöntemdir (Mohamed, 2017).

1.6 Biyogaz

1.6.1 Biyogazın Tanımı ve Oluşum Aşamaları

Biyogaz, tarımsal ve evsel atıklar başta olmak üzere organik maddelerin anaerobik koşullarda altında mikrobiyolojik faaliyetler ile fermantasyon sonucu parçalanmasıyla oluşan bir gaz karışımı olup, Tablo 1.2’de içeriği verilmiştir (Öçal, 2013).

Kalorifik değeri yaklaşık 20 MJ/m^3 olan biyogaz, havadan %20 daha hafiftir ve yanıcı özellik gösterir. Biyogaz, yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olarak kabul edilir ve genellikle enerji üretiminde (elektrik ve ısı) veya motor yakıtı olarak kullanılır. Aynı zamanda çevresel açıdan faydalı bir süreçtir, çünkü organik atıkların bozunması sırasında

açığa çıkan metan gibi sera gazları kontrol altına alınarak enerjiye dönüştürülür (Buğutekin, 2007).

Tablo 1.2 Biyogaz içeriği

Bileşenler	Miktar (%)
Metan (CH ₄)	55-65
Karbondioksit (CO ₂)	30-45
Hidrojen Sülfür (H ₂ S)	1-2
Azot (N ₂)	0-1
Hidrojen (H ₂)	0-1
Karbon monoksit (CO)	eser düzeyde
Oksijen (O ₂)	eser düzeyde

Oksijensiz koşullarda işlevsel olan mikroorganizmaların organik maddenin parçalanması sonucu oluşan biyogaz, atığın kompozisyonu, reaktörün işletme koşullarına, uygunalanan ön arıtım yöntemi pek çok farklı ilişkilerin etkisine bağlı olarak metan yüzdesi ve miktarı içermektedir. Birbirini takip eden üç aşamada gerçekleşen anaerobik süreçler sırasıyla; hidroliz, asetik asit oluşumu ve metan üretimidir. Bu süreçlerin sonucunda biyolojik olarak organik madde parçalanmış temel ürünler olan CO₂ ve CH₄'e dönüşmektedir. Sürecin ilk aşamasını ve sürecin hızını belirleyen hidroliz aşamasında hidroliz bakterileri salgıladıkları enzimler ile karbonhidratları, proteinleri ve yağları içeren bileşikler daha küçük organik bileşiklere dönüştürürler. Bu süreçte yüksek moleküllü selüloz, nişasta ve proteinler şeker ve aminoasitlere dönüşürler. Yağların hidrolizi yavaş gerçekleştiğinden, hidroliz aşaması anaerobik işlemlerde biyolojik parçalanma hızında belirleyici olmaktadır. Asit oluşumu aşamasında fakültatif mikroorganizmalar karbonhidratlar, yağlar ve proteinlerden elde edilen yağ asitleri, aldehytler ve alkoller hücre dışına salgıladıkları enzimleri kullanarak asetik aside dönüştürürler. Bu işlem sırasında pH'da düşme gözlemlenir ve pH 3-3,5 arasına geriler. Çevresel koşullara oldukça hassas olan metan üreten bakterilerin çoğalma hızları asit fazında etkin olan bakterilere göre yavaştır. Metan bakterileri hidrojen ve asetatı kullanarak biyogazı üretmektedir. Yaklaşık olarak metanın yaklaşık %72'si asetat,

%28'si ise hidrojeni kullanan metan bakterileri tarafından karbon dioksitin indirgenme reaksiyonları ile oluşmaktadır (Garan, 2016).

1.6.2 Biyogaz Üretiminin Tarihsel Gelişimi

Anaerobik çürütme teknolojisinin tarihi, 19. yüzyılın ortalarına kadar uzanmaktadır. Hindistan'ın Bombay şehrinde 1859 yılında ilk anaerobik tesisi kurulmuştur. Bu teknolojiye ilişkin önemli bir dönüm noktası, 1881-1882 yıllarında M. Louis Maura'sın partiküler organik maddelerin havasız bir ortamda sıvılaştırılabileceğini gösteren çalışmasının Fransız dergisi Cosmos'da yayımlanmasıdır. 1883-1884 yıllarında Pasteur'ün öğrencisi Gayon, hayvan gübresine yönelik anaerobik çürütme deneyleri gerçekleştirmiştir. Pasteur, 35°C'de oluşan gaz hacmini gözlemleyerek gübrelerin anaerobik fermentasyonu ile üretilen gazın ısıtma ve aydınlatmada kullanılabileceğini fark etmiştir. Atık suyun organik maddelerinin sıvılaştırılmasına yönelik ilk çalışmalardan biri, 1890-1892 yıllarında İngiltere'de uygulanmıştır. Bu çalışmada, on kişinin ürettiği atıklar taşlarla dolu bir yataktan geçirilerek arıtılması denenmiş ve bu sistem dünyanın ilk anaerobik filtresi olarak kabul edilmiştir. 1894 yılında A.B.D.'de atık suyun hidrolitik ve bakteriyolojik etkilerle bir süre bekletilmesinin organik maddelerin bir kısmının gazlara dönüşerek çözünür hale geldiği olumlu etkileri gözlemlenmiştir. 1895 yılında İngiltere'de Donald Cameron septik tank adını verdiği tanklar geliştirmiştir. Yine aynı yıllarda, 1894 ve 1897 yılında benzer tanklar A.B.D.'de kurulmuştur. İlk endüstriyel ölçekte biyogaz üretim tesisi ise 1837 yılında Cezayir'de Isman ve Ducellier tarafından yaklaşık 10 m³ hacminde bir sistem olarak inşa edilmiş ve katı atıklarla işletilmiştir. Ancak, bu sistemin geliştirilmesi ikinci dünya savaşı sırasında duraklamıştır. Donald Cameron anaerobik parçalanmada açığa çıkan metanın değerini ilk fark edenlerden biri olmuştur. Cameron, bu metanın bir kısmını ısıtma amacıyla kullanarak, biyogazın pratik bir enerji kaynağı olarak değerlendirilmesi yönünde öncülük etmiştir. Ayrıca 1897 yılında Hindistan'ın Bombay şehrinde, atık tankları gaz kolektörleri ile donatılmış ve anaerobik bozunma sonucu oluşan gaz, çeşitli gaz motorlarının çalıştırılmasında kullanılmıştır. Bu, biyogazın enerji üretiminde kullanılması açısından önemli bir uygulamadır. 1899 yılında Herry W. Clark, Lawrence, Massachusetts'te yaptığı gözlemler sonucunda, septik tanklarından deşarj edilen sıvının rahatsız edici kokulu ve hala tam olarak çözünmemiş organik maddeler içerdiğini fark etmiştir. Bu gözlemleri, septik tankların arıtma süreçlerinin yeterliliği konusunda şüpheler doğurmuştur. Bunun üzerine Clark, atıkların ayrı bir tankta kendi kendine daha uzun süre

fermente olması gerektiğini savunmuştur. Bu fikir, anaerobik çürütme teknolojisinin iyileştirilmesi ve modern sistemlerin geliştirilmesinde önemli bir dönüm noktası olmuştur (Öçal, 2013).

Anaerobik arıtma teknolojisi, 20. yüzyıl boyunca önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Bu süreçte yapılan çalışmalar, biyogaz üretiminin ve organik atıkların verimli bir şekilde işlenmesinin temellerini oluşturmuştur. Bu alandaki tarihsel gelişmelerin bazı önemli noktaları:

Erken Gelişmeler

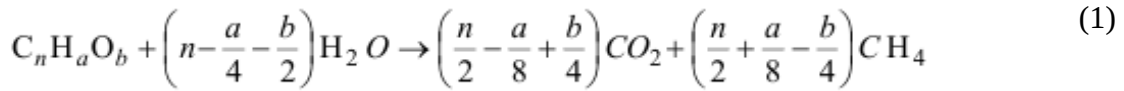
- 1914 yılında Emscher-Genossenschaft, üretilen gazın toplanması ve yakılması üzerine çalışmalar yapmıştır.
- 1923 yılında endüstriyel ölçekte toplanan metan gazı kent gaz sistemine entegre edilmiştir.
- 1927 yılında Almanya'da Essen-Rellinghausen şehrinde ilk çamur ısıtma sistemi monte edilmiştir. Tankın ısıtılması, metan gazının yakılmasını ve kullanımını daha pratik hale getirmiştir.

Çamur Isıtma ve Mikrobiyolojik Çalışmalar

- 1927 yılında Rudolfs, çamurun birim miktarı başına üretilen gazın sıcaklıktan bağımsız olduğunu, ancak sıcaklığın bozunma hızını artırdığını göstermiştir.
- Fair ve Moore, optimum anaerobik arıtma için mesofilik bölge (34-36°C) ve termofilik bölge (55-60°C) olarak iki ayrı sıcaklık bölgesi belirlemiştir (Öçal, 2013).

Mikrobiyoloji ve Kimyasal Çalışmalar

- 1920 ve 1930'larda A.M. Buswell ve ekibi, anaerobik arıtmanın mikrobiyolojisi ve kimyasını anlamada önemli katkılar sağlamıştır. Uçucu organik asitlerin bozunma sürecinde ara ürün olarak kritik bir rol oynadığını vurgulamışlardır.
- 1948 yılında Buswell ve Sollo, metan gazının asetik asitin dekarboksilasyonu yoluyla oluştuğunu göstermiştir.
- Jaris, radyoizotoplar kullanarak metanın %70'inin asetattan kaynaklandığını ortaya koymuştur.
- 1952 yılında Buswell ve Mueller, biyolojik bozunmanın denklem-1 ile ifade edilebileceğini göstermiştir:



Modern Gelişmeler

- 1950’ler: Anaerobik temas işlemi ve çürütücülerin karıştırılması teknolojileri gelişmiştir. Karıştırma, bakteri ile atığın temasını artırarak yüksek hızlı çürütücüler ortaya çıkarmıştır.
- 1955’de Schroepfer ve arkadaşları, hidrolik bekletme süresini 20 günden 1 güne düşüren reaktör çıkışına aktif çamurdan çökeltme tankı ilave edilmiştir.
- Son yıllarda, özellikle endüstriyel uygulamalarda yukarı akışlı anaerobik çamur yatak reaktörleri geliştirilmiştir. Bu reaktörler, anaerobik arıtma sistemlerinde en yaygın kullanılan teknolojilerden biri haline gelmiştir (Öçal, 2013).

Bu gelişmeler, anaerobik arıtma teknolojisinin günümüzdeki yaygın ve verimli kullanımını mümkün kılmıştır. Metan gazının enerji üretimi için kullanılmasından, arıtma süreçlerinin optimize edilmesine kadar pek çok alanda yenilikçi çözümler sunulmuştur.

1.6.3 Biyogazın Çevresel Etkileri

Organik maddelerin biyogaza dönüştürülmesi, çevresel ve ekonomik açıdan pek çok avantaj sunmaktadır. Bu süreç, hem yenilenebilir bir enerji kaynağı sağlamakta hem de çürütülmüş organik atığın toprak iyileştirici olarak kullanılmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca, atık bertarafı ile ilgili sorunların çözümüne katkı sağlamakta, oksijen gerektirmeyen koşullarda gerçekleştiği için prosesin enerji gereksinimini azaltmakta ve fosil yakıt kullanımını azaltarak sera gazı emisyonlarının düşürülmesine yardımcı olmaktadır.

Biyogaz, kararlı ve kontrol edilebilir bir enerji kaynağı olup yüksek patlayıcılık özelliğine sahiptir. Üretim sürecinde açığa çıkan karbondioksit, fotosentez yoluyla bitkiler tarafından atmosferden alınan karbondioksitin geri dönüşümü niteliğinde olduğundan, atmosferdeki sera gazı birikimine katkıda bulunmadığı kabul edilmektedir. Bu nedenle biyogazın karbon döngüsüne etkisi nötr olarak değerlendirilmektedir. Biyogaz üretimi, organik katı atıkların rastgele depolanmasından kaynaklanan koku, su ve hava kirliliği ile görüntü kirliliğini azaltarak çevresel açıdan önemli kazanımlar sağlamaktadır. Ayrıca, tesislerde elde edilen biyogaz sayesinde enerji ihtiyacının karşılanması ve süreç

sonucunda oluşan organik ürünlerin tarımsal amaçlarla toprak şartlandırıcı olarak değerlendirilmesi mümkündür.

Biyokütlenin enerjiye dönüştürülmesi esnasında hem kütsel hem de hacimsel azalma meydana gelmektedir. Bu durum, büyük şehirlerde önemli bir sorun haline gelen evsel atıklar ve arıtma çamurlarının bertarafında alternatif bir çözüm sunmakta; bu atıklardan enerji elde edilerek ekonomik fayda sağlanmakta ve depolama alanlarına olan ihtiyaç azalmaktadır. Böylece bu alanların hizmet ömrü uzatılmış olmaktadır. Biyogaz üretimi sırasında, metan gazı oluşumu engellenebilir, elde edilen son ürünün toprak düzenleyici değeri artırılabilir ve hem bitki atıklarından hem de hayvan gübresinden enerji elde edilerek karbon dioksit emisyonlarında ciddi oranda azalma sağlanabilir. Fosil yakıt tüketiminin azaltılmasıyla küresel ısınmanın etkilerinin de belirli ölçüde hafifletilebileceği öngörülmektedir. Biyogaz üretimi sonrası açığa çıkan çamur, yüksek oranda besin maddesi içermesi ve dezenfekte edilmiş olması nedeniyle tarımda toprak şartlandırıcı olarak önerilmektedir. Ancak biyolojik olarak ayrışamayan kirleticilerin çürütme ünitesinde kalması, bu çamurun tarımda kullanımı açısından bazı sorun işaretlerine yol açmaktadır.

Biyogaz içerisinde %55–60 oranında metan gazı, hava ile %5–15 arasında hacimsel karışımlar oluşturduğunda patlayıcı özellik göstermektedir. Havadan daha hafif olan biyogaz, yüzeye çıkma eğilimindedir ve gaz toplama sistemlerinin yetersiz olması durumunda yapıların alt kısımlarında birikebilir. Bu birikme sonucunda ortamda bulunan oksijen konsantrasyonu %21'den %17'nin altına düştüğünde, biyogaz havanın dörtte birini yer değiştirmiş olur ve boğulma riski meydana gelebilir. Ayrıca biyogaz içerisinde bulunan hidrojen sülfür (H_2S) gazının konsantrasyonu 800 ppm'in üzerine çıktığında toksik etkiler ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle biyogaz tesislerinde gaz izleme ve güvenlik sistemlerinin etkin biçimde kullanılması büyük önem taşımaktadır (Arıkan, 2008).

1.6.4 Dünya'da ve Türkiye'de Biyogaz

Biyogazın Asurlular tarafından ilk olarak M.Ö. 1000 yıllarında kullanmaya başlandığı tespit edilmiştir. 17. Y.Y.'da organik maddelerin havasız ortamda bozunmasıyla yanabilen bir gazın ortaya çıktığı gözlemlenmiş, 1776 yılında göl tabanından gaz kabarcıklarının çıktığını gözlemlenmiş ve tabandan alınan örneklerdeki gaza Lavoisier ve diğer araştırmacılar 1787 yılında 'Karbonlu Hidrojen' adını vermişlerdir. 1865'te

Uluslararası Kimya Kongresinde bu terim ‘metan’ olarak kabul edilmiştir (Öbekcan, 2014).

Hayvansal gübreden biyogaz üretimi ilk kez İngiltere’de gerçekleştirilmiştir ve bu teknoloji Ekseter şehrinin 1985 yılında caddelerini aydınlatmak için kullanılmıştır. Bu, biyogazın enerji kaynağı olarak potansiyelini göstermesi açısından önemli bir dönüm noktasıdır. Hindistan, 1900 yılında Bombay’da biyogaz üretim tesislerini kurarak bu alanda öncü ülkelerden biri olmuştur. Hindistan’da kurulan bu tesisler, tarımsal ve hayvansal atıkların enerjiye dönüştürülmesinin örneklerini sunmuştur. Bazı dünya ülkelerinde biyogaz hakkındaki yaptığı çalışmalar şunlardır. Çin, dünyada hayvan gübresinden biyogaz üreten tesislerin %80’ine sahiptir ve biyogaz teknolojisinin en yoğun kullanıldığı ülkelerden biridir. Hindistan, Nepal ve Tayvan bu konuda önemli çalışmalar yapmıştır ve tesislerin %10’u bu ülkelere bulunmaktadır. Kalan %10 ise diğer ülkeler arasında dağılmıştır (Buğutekin, 2007). Bangladeş gibi pek çok ülkede hızlıca kurulan tesisin çalışmadığı ve buna temel sebepler arasında, yetersiz mühendislik bilgisi, teknik ve idari alt yapının eksikliği olarak tespitler yapılmıştır (Öbekcan, 2014).

Türkiye’de ilk biyogaz üretim çalışmalarının Toprak ve Su Araştırma Enstitüsü bünyesinde 1957 yılında başladığı görülmektedir. Devamında 1960’lı yıllarda Devlet Üretim Çiftlikleri içerisinde pilot tesisler kurulmuştur. 1963 yılına gelindiğinde Eskişehir Toprak Su Araştırma Enstitüsünde 5 tesis, Eskişehir 2 köyünde, Çorum Deneme İstasyonunda 1 tesis olmak üzere toplam 8 tesis kurulmuştur. 1980 sonrasında Birleşmiş Milletler Çocuklara Yardım Fonu tarafından yapılan finansal ve teknik bilgi desteğiyle biyogaz üretim çalışmaları Devlet Planlama Teşkilatı tarafından başlatılmıştır. İlk tesis Muş-Alparslan Devlet Üretim Çiftliğinde 35 m³ kapasiteyle kurulmuştur. 1982’de Toprak Su Araştırma Enstitüsünün çalışmalarıyla devlet kredileri kullanılarak bine yakın tesis (6, 8, 12 ve 50 m³ kapasiteli) kurulmuştur. Bu tesisler kurulumları sonrası işletilmeli sürdürülebilir olmamış, özellikle yenilebilir enerji kaynağı olarak biyogaz 2000 ‘li yıllarda üniversitelerin önderlik ettiği araştırma projelerine yoğun olarak konu olmuştur. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı ile Almanya Çevre, Doğa Koruma ve Nükleer Güvenlik Bakanlığı arasında 2010 yılında bir biyogaz tesisi anlaşması yapılmış, 1200 büyükbaş hayvan yetiştirilen bir çiftlikte biyogaz üretimiyle tesisin tüm enerji ihtiyacının karşılanması planlanmış olup, fermente olmuş gübre, çiftlik arazilerinde bitki yetiştirme için kullanılabilir hale getirilmiştir. Artık Ülkemizde başta atıksu arıtma tesisleri, düzenli

katı atık depolama tesisleri ve endüstriyel gıda üretim tesislerinde olmak üzere pek çok farklı kentte biyogaz tesisleri bulunmaktadır (Şenol ve ark., 2017).

1.6.5 Biyogaz Olarak Değerlendirilecek Atıklar ve Karakteristikleri

Biyogaz üretiminde kullanılan organik kaynaklar, genel olarak üç ana grupta sınıflandırılmaktadır: Hayvansal atıklar, bitkisel atıklar ve şehir ile endüstri kökenli organik içerikli atıklar.

1.6.5.1 Hayvansal Atıklar

Hayvan atıklarının uygun şekilde yönetilmesi hem çevresel sürdürülebilirlik hem de hijyen açısından büyük önem taşır. Hayvan gübreleri uygun şekilde işlendiğinde tarımda organik gübre olarak kullanılabilir, biyogaz üretimiyle enerji elde edilebilir veya kompost yapımında değerlendirilebilir.

Bu gübre çeşitlerinin özelliklerine kısaca değinecek olursak:

- **Ham gübre:** Ahırlardan doğrudan çıkan, işlem görmemiş hayvan dışkıdır. İçeriğinde besin maddeleri fazla olsa da doğrudan kullanımı çevreye zarar verebilir.
- **Sıvı gübre:** Hayvan idrarı ve suyla seyreltilmiş gübre karışımıdır. Genellikle tarım arazilerine sıvı gübre püskürtme sistemleriyle uygulanır.
- **Bulamaç gübre:** Sıvı ve katı gübre karışımıdır. Tanklarda biriktirilerek karıştırılıp tarımsal alanlarda kullanılabilir.
- **Katı-Sıvı gübre:** Katı ve sıvı bileşenleri ayrılmış, daha kontrollü kullanılabilen bir gübre türüdür.
- **Katı gübre:** Ahırdan çıkan gübrenin kurutulması veya belirli bir süre bekletilmesiyle elde edilen, toprağa doğrudan uygulanabilen gübre çeşididir.

Bu gübrelerin uygun yöntemlerle toplanması ve işlenmesi, tarımsal üretimi artırırken çevresel kirliliği önlemeye yardımcı olur. Biyogaz tesislerinde değerlendirilmesi ise sürdürülebilir enerji üretimi açısından oldukça faydalıdır.

1.6.5.2 Bitkisel Atıklar

Bitkisel üretim sırasında oluşan başta saman, mısır, sera, şeker pancarı olmak üzere oluşan tüm atıklar değerlendirilebilir (Üçok, 2016). Bitkisel atıklardan biyogaz üretimi mümkün olsa da tek başına kullanılması önerilmez. Bunun temel nedenleri şunlardır:

- **Düşük Metan Verimi:** Hayvansal atıklara kıyasla, bitkisel atıkların metan üretim potansiyeli genellikle daha düşüktür. İçerdikleri selüloz ve lignin nedeniyle parçalanmaları daha uzun sürer.
- **Karbon-Azot (C/N) Oranı Dengesizliği:** Biyogaz üretimi için ideal C/N oranı genellikle 20:1 ile 30:1 arasındadır. Bitkisel atıklarda karbon oranı yüksek olduğu için azot içeriği düşük kalır ve fermantasyon süreci yavaşlar.
- **pH ve Asidifikasyon Sorunları:** Bitkisel atıklar hızla asidik ortam oluşturabilir, bu da metan üreten bakterilerin aktivitesini olumsuz etkileyerek biyogaz üretimini düşürebilir.

Bu nedenle bitkisel atıkların hayvansal atıklarla birlikte kullanılması (ko-fermantasyon yöntemi) daha verimli ve sürdürülebilir bir çözüm sunar.

Hayvan gübresi ve bitkisel atıklar, dengeli C/N oranı ve daha verimli biyogaz üretimi sağlar. Mutfak atıkları ve bitkisel atıklar, organik içerik zenginleşerek biyogaz verimi artar.

Sonuç olarak, kırsal kesimlerde biyogaz tesislerinin sürdürülebilir çalışabilmesi için hayvansal atıkların bitkisel atıklarla birlikte kullanılması önerilir. Eğer tek başına bitkisel atık kullanılacaksa, ön işlem (örneğin öğütme, ıslatma, enzimatik parçalama) yapılması gerekebilir.

1.6.5.3 Organik İçerikli Kentsel ve Endüstriyel Atıklar

Biyogaz üretiminde başta kanalizasyon ve arıtma tesisi çamurları olmak üzere, kâğıt sanayi ile gıda sanayisine ait organik içerikli atıklar yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, çözülmüş organik madde derişimi yüksek olan endüstriyel kaynaklı atık sular da biyogaz üretim sürecinde mutlaka değerlendirilmelidir. Bu atıklar, özellikle belediyeler ya da büyük ölçekli sanayi işletmeleri tarafından kurulan, ileri teknolojilerle donatılmış biyogaz üretim tesislerinde işlenmektedir (Buğutekin, 2007). Bu atıkların biyogaz üretimindeki rolü ve avantajları:

- **Kanalizasyon ve Dip Çamurları;** Şehirlerdeki atık su arıtma tesislerinden elde edilen çamurlardır. Yüksek organik madde içeriğine sahiptir. Arıtıldıktan sonra biyogaz üretimi için kullanılabilir, böylece hem enerji elde edilir hem de çamur bertarafı sağlanır.
- **Kâğıt Sanayi Atıkları;** Selüloz içeren organik atıklardır. Doğrudan biyogaz üretimi için uygun olmayabilir ancak diğer atıklarla birlikte ko-fermantasyon ile

kullanılabilir. Kâğıt endüstrisinden kaynaklanan çamur ve posalar biyogaz üretimine katkı sağlar.

- **Gıda Sanayi Atıkları;** Yüksek oranda organik madde içerir ve kolayca parçalanarak biyogaz üretimini hızlandırır. Süt ürünleri, meyve-sebze atıkları, bira mayası, kesimhane atıkları gibi atıklar biyogaz üretiminde değerlidir. Bu atıkların anaerobik çürütme sürecinde kullanılması, hem çevresel etkileri azaltır hem de enerji üretimini artırır.
- **Endüstriyel ve Evsel Atık Sular;** Çözünmüş organik madde miktarı yüksek olduğu için biyogaz üretimine katkı sağlar. Büyük ölçekli biyogaz tesislerinde anaerobik arıtma sistemleri ile işlenebilir. Özellikle gıda, içecek, şeker ve içme suyu endüstrilerinde çıkan atık sular, enerjiye dönüştürülerek geri kazanım sağlanabilir.

Bu atıklar genellikle belediyeler ve sanayi tesisleri tarafından kurulan büyük ölçekli biyogaz üretim tesislerinde işlenir. Bu tür tesisler, yüksek teknoloji kullanarak organik atıkları enerjiye dönüştürür, atık yönetimini daha verimli hale getirir, sera gazı emisyonlarını azaltarak çevreye katkı sağlar.

1.6.6 Biyogaz Üretiminin Aşamaları

Biyogaz üretimi, çeşitli mikroorganizmaların etkileşim halinde olduğu karmaşık bir biyokimyasal süreçtir ve üç temel safhada gerçekleşmektedir.

1.6.6.1 Fermentasyon ve Hidroliz

Anaerobik fermentasyon, organik maddelerin oksijensiz (anaerobik) ortamda belirli mikroorganizmalar tarafından ayrıştırılmasıyla gerçekleşen ve birden fazla biyokimyasal reaksiyon basamağını içeren biyolojik bir süreçtir. Bu süreçte, farklı mikrobiyal toplulukların ardışık faaliyetleri sonucunda organik bileşikler çeşitli ara ürünlere dönüştürülerek nihayetinde biyogaz üretimi sağlanmaktadır. Anaerobik fermentasyonun son ürünleri arasında, başlıca metan (CH_4) ve karbondioksit (CO_2) yer almakta olup, bunlara ek olarak düşük oranlarda hidrojen (H_2), hidrojen sülfür (H_2S) ve azot (N_2) gibi gazlar da biyogaz bileşimi içerisinde bulunmaktadır (Savaş, 2018).

Anaerobik parçalanma, çok aşamalı bir biyokimyasal süreç olup, bu süreçte temel adımlardan biri hidrolizdir. Organik bileşiklerin mikroorganizmalar tarafından temel yapı taşlarına ayrıştırılması süreci hidroliz olarak adlandırılmaktadır. Hidroliz, hücre dışı enzimler tarafından yürütülen oldukça yavaş bir süreçtir ve reaksiyon hızını etkileyen

temel faktörler arasında pH, sıcaklık ve çamur yaşı (mikroorganizmaların alıkonma süresi) yer almaktadır. Yağlar oldukça yavaş hidrolize olması nedeniyle, yüksek oranda yağ ve diğer yavaş parçalanabilir bileşenler içeren atıkların anaerobik parçalanma sürecinde hidroliz aşaması hız sınırlayıcı bir adım olabilmektedir. Bununla birlikte, bazı selüloz içeren atıkların anaerobik arıtımında da hidroliz sınırlayıcı bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, lignin, oldukça karmaşık ve düzensiz moleküler yapısı nedeniyle anaerobik koşullar altında ya hiç hidrolize olmamakta ya da hidroliz hızı son derece düşük seviyelerde gerçekleşmektedir (Öbekcan, 2014).

Organik atıklarda bulunan karbonhidratlar, proteinler ve yağlar, fermentatif ve hidrolitik bakteriler tarafından biyolojik olarak parçalanarak büyük oranda uçucu organik bileşikler, karbondioksit ve asetik aside dönüştürülmektedir. Fermentasyonun ilk aşamasında, organik bileşiklerin büyük bir kısmı uçucu yağ asitlerine dönüşmektedir.

1.6.6.2 Asetik Asit Oluşumu

Bu aşamada farklı asetogenik bakteri grupları görev almaktadır. İlk grup asetogenik bakteriler, fermentasyon ve hidroliz sürecinde oluşan uçucu yağ asitleri ve diğer organik bileşenleri asetik aside dönüştürmektedir. İkinci grup asetogenik bakteriler uçucu yağ asitlerini asetik asit ve hidrojene ayrıştırmaktadır. Bunun yanı sıra, üçüncü bir asetogenik bakteri grubu asetik asit sentezi için karbondioksit ve hidrojeni substrat olarak kullanmaktadır. Ancak, bu mekanizma ile üretilen asetik asit miktarı, uçucu yağ asitlerinin doğrudan asetik aside dönüşümünü sağlayan asetogenik bakteriler tarafından üretilen asetik asit miktarına kıyasla daha düşük seviyededir (Kaynarca, 2023).

1.6.6.3 Metan Gazı Oluşumu

Metan gazının oluştuğu anaerobik süreçlerin son aşamasında asetojenez aşaması sonucu oluşan organik asitler, hidrojen ve asetat; metanojenik mikroorganizmalar tarafından asetik asitin parçalanması ve/veya hidrojen ile karbondioksitin sentezlenmesi yoluyla metan ve karbondioksite dönüştürülmektedir. Bu dönüşüm sonucunda biyogaz elde edilmektedir (Görmüş, 2018). Metanojenler genel olarak altı gruba ayrılmaktadır: *Methanobacterium*, *Methanosarcina*, *Methanococcus*, *Methanobrevibacter*, *Methanospirillum* ve *Methanogenium*. Yaşadıkları çevresel sıcaklık koşullarına göre metanojenler üç ana gruba sınıflandırılabilir: Termofilik metanojenler, 44 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda aktivite gösterirken; mezofilik metanojenler 20–44 °C aralığında faaliyet gösterir. Psikrofilik metanojenler ise 20 °C'nin altında metabolik faaliyetlerini

sürdürebilmektedir. Bununla birlikte, tüm bu grupların metabolik işlevlerini yerine getirebilmesi için tamamen anaerobik ortamlar zorunlu olup, çok düşük oranlarda oksijen varlığı dahi toksik etki oluşturabilmektedir. Ayrıca, bu mikroorganizmalar için neredeyse nötr pH değerleri, sürdürülebilir büyüme ve metabolik aktivite açısından temel bir gerekliliktir (Atmaca, 2015).

Biyogaz üretiminde, asetik asitin oksidasyonu ile karbondioksit ve hidrojenin indirgenmesi süreçleri karşılaştırıldığında, biyogazın yaklaşık %70'i asetik asitin oksidasyonu, %27-30'u ise CO₂ ve H₂'nin indirgenmesi sonucu oluşmaktadır. Metan oluşturan bakterilerin kullanabileceği besin maddeleri sınırlıdır ve bu besinler asetik asit, hidrojen ve tek karbonlu bileşikler ile sınırlıdır. Metanojenik bakteriler, asidojenik ve asetojenik bakterilere kıyasla çevresel koşullara karşı çok daha hassas olup, büyüme ve metabolik aktiviteleri optimum koşullara bağlıdır. Metan oluşum aşaması, organik atığın bileşimine bağlı olarak hidroliz aşaması gibi yavaş ilerleyen bir süreç olabilir ve zaman zaman hız sınırlayıcı adım olabilmektedir (Görmüş, 2018).

1.6.7 Biyogaz Oluşumunun Zamanla Değişimi

Atıkların türleri ile uygulanan işlem yöntemlerindeki farklılıklar, gaz oluşumunun başlangıç zamanı ile üretim sürecinin belirlenmesinde belirsizliklere yol açmaktadır. Evsel nitelikli katı atıkların organik bileşenleri, mikroorganizmaların faaliyetleri sonucunda önce oksijen varlığında aerobik, ardından oksijensiz ortamda anaerobik süreçlerle ayrışmaktadır. Bu ayrışma süreci sonucunda başlıca karbondioksit (CO₂) ve metan (CH₄) gazlarından oluşan bir gaz karışımı meydana gelmektedir. Fermantasyon sürecinin tamamlanmasının ardından geriye kalan atıklar, oldukça yavaş ayrışan bileşenlerden oluşmaktadır.

Organik atıklar, ayrışma hızlarına göre hızlı ayrışabilen ve yavaş ayrışabilen olarak iki grupta değerlendirilmektedir. Mutfak atıkları, bahçe atıkları hızlı ayrışabilen maddeler arasında yer alırken; deri, ahşap, tekstil ve plastik atıklar yavaş ayrışabilen maddeler olarak sınıflandırılmaktadır (Solak, 2015). Tablo 1.3 'de organik maddelerin parçalanma dereceleri verilmektedir. Optimum şartlarda stabilizasyon süreci 10 – 20 yıl sürer (Solak, 2015).

Tablo 1.3 Organik maddelerin parçalanma düzeyleri.

Atık tipi	Ayrışma derecesi	Ayrışma yarı ömrü (yıl)
Mutfak	Hızlı	1
Bahçe	Orta	5
Kağıt, karton, tekstil, tahta	Yavaş	15
Plastik, deri, kauçuk, toprak	Ayrışmıyor	-

Depolama sahasının yaşlanmasıyla birlikte, zaman içerisinde gaz oluşumunun hızı kademeli olarak azalmaktadır. Kümülatif (birikimli) gaz üretimi ise belirli bir süre artış gösterdikten sonra pik noktasına ulaşır ve ardından stabil bir seviyeye gelir. Atığın depolanmasını takiben yaklaşık 3 ila 12 ay içerisinde metan üretiminin başlaması beklenmektedir. Metan gazının derişimi zamanla yavaş bir artış gösterir ve belirli bir sürenin sonunda maksimum seviyeye ulaşır (Solak, 2015).

1.6.8 Biyogaz Üretimini Etkileyen Etmenler

Anaerobik arıtım sürecinde farklı gruplara ait bakteriler görev almakta olup, organik atıkların biyogaz üretimine dönüştürülmesi için mikrobiyal dengenin sağlanmış olduğu bir ortam gereklidir. Bakterilerin optimal koşullar altında faaliyet göstermesi, sürecin kararlılığını ve verimliliğini artırmaktadır. Ancak, çevresel koşullardaki dalgalanmalar mikrobiyal dengeyi bozarak anaerobik arıtım sürecini olumsuz yönde etkileyebilir, hatta sürecin durmasına neden olabilir. Bu nedenle, anaerobik arıtım sürecinde sıcaklık, pH, hidrolik bekleme süresi, organik yükleme oranı, uçucu yağ asitleri konsantrasyonu, karbon/azot (C/N) oranı, toksisite gibi işletme parametreleri, belirlenen optimum aralıklarda sürekli olarak izlenmeli ve kontrol altında tutulmalıdır.

1.6.8.1 Sıcaklık

Sıcaklık, hem sistemin ısı ihtiyacını hem de metan üretim verimliliğini doğrudan etkilediğinden, anaerobik parçalanma sürecinin en kritik işletme parametrelerinden biridir. Metanojenik mikroorganizmalar ve uçucu yağ asidi oluşturan mikroorganizmalar sıcaklık değişimlerinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Özellikle işletme sıcaklığına kıyasla meydana gelen büyük sıcaklık dalgalanmaları, metanojenik mikroorganizmaların aktivitesini olumsuz yönde etkileyebilir.

Anaerobik arıtım süreci, üç farklı sıcaklık aralığında gerçekleştirilebilmektedir:

- Psikrofilik sıcaklık koşulları (15-25°C)
- Mezofilik sıcaklık koşulları (35-40°C)
- Termofilik sıcaklık koşulları (50-60°C)

Bu farklı ısı aralıkları içerisinde, özellikle hayvansal atıkların kullanıldığı sistemlerde mezofilik sıcaklık koşulları tercih edilmekte ve genellikle 35°C civarında işletilmektedir. Düşük sıcaklık, metan üretimini, organik madde parçalanma oranını ve bakteri büyüme hızını azaltırken, hücresel enerji tükenmesine ve hücreler arası madde akışına neden olabilmektedir.

Mezofilik sıcaklık koşullarında işletilen anaerobik arıtım süreçleri, termofilik koşullara kıyasla daha yüksek sistem kararlılığı ve daha düşük enerji maliyeti sunmaktadır. Öte yandan, termofilik sıcaklık koşullarında işletilen anaerobik arıtım süreçleri bazı avantajlar sağlamaktadır. Bunlar;

- Metanojenik bakterilerin daha hızlı büyümesi,
- Anaerobik arıtım sürecinin daha kısa sürede tamamlanması,
- Patojenlerin etkin bir şekilde yok edilmesi,
- Katı ve sıvı fazların daha etkili ayrışması,
- Katı substratlar için daha iyi biyolojik ayrışabilirlik ve sindirilebilirlik sunmasıdır.

Ancak, termofilik anaerobik arıtım süreçlerinin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bu dezavantajlar arasında daha yüksek enerji gereksinimi, sıcaklık değişimlerine karşı sistemin daha hassas olması ve termofilik süreçlerde oluşabilecek büyük orantısızlıklar yer almaktadır. Bu nedenle, sistem tasarımında ve işletme sürecinde sıcaklık parametresi dikkatlice değerlendirilmelidir (Ceyhan, 2022).

1.6.8.2 pH

Biyogaz üretiminde optimum pH aralığı 6,8 ile 7.0 arasında olduğu, anaerobik fermentasyon sürecinde pH değeri 7.0 - 7,5 arasında değişim gösterebilmektedir. Ancak, pH değerinin 6,7'nin altına düşmesi durumunda metanojenik bakterilerde toksik etkiler görülebilmekte böylece metan üretimini olumsuz yönde etkilemektedir.

Anaerobik fermentasyon sürecinde, asit üreten bakterilerin aktivitesinin artması pH seviyesinin düşmesine neden olmaktadır. Bu tür durumlarda, reaktöre organik yükleme

işlemi geçici olarak durdurularak asit oluşumunun azaltılması sağlanmaktadır. Ayrıca, pH dengesinin sağlanması ve sürecin kararlılığının korunması amacıyla sönmüş kireç (kalsiyum hidroksit) gibi alkali maddeler de kullanılmaktadır (Cihansar,2022).

1.6.8.3 Hidrolik Alıkonma Süresi

Hidrolik alıkonma süresi, bakterilerin organik maddeleri biyokimyasal olarak parçalayarak biyogaz üretimini oluşması için gereken süredir. Bu süre, sistemin verimliliği açısından kritik bir parametre olup, reaktör hacmi ile günlük besleme miktarı arasındaki oran ile belirlenmektedir. Hidrolik bekleme süresi, organik maddelerin mikroorganizmalar tarafından ayrıştırılması ve metan üretiminin tamamlanması için gerekli zamanı sağladığından, prosesin stabilitesi ve biyogaz üretim verimliliği üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Anaerobik sindirim sürecinde hidrolik bekleme süresi, sistemin işletme sıcaklığına bağlı olarak değişmekte olup, genellikle 20 ila 120 gün arasında değişim göstermektedir.

1.6.8.4 Organik Yükleme Oranı

Organik yükleme oranı, mikroorganizmaların organik maddeyi etkin bir şekilde parçalayabilmesi ve biyogaz üretiminin optimum düzeyde gerçekleşebilmesi için kritik bir denge unsurudur. Yükleme oranının çok düşük olması, sistem verimliliğinin düşmesine neden olurken, aşırı yüksek olması ise uçucu yağ asitlerinin birikmesine, pH düşüşüne ve metan üretiminin azalmasına yol açarak sistemin dengesizleşmesine sebep olabilmektedir. Bu nedenle, organik yükleme oranının reaktör tasarımına, işletme koşullarına ve mikroorganizma aktivitesine uygun şekilde belirlenmesi ve sürekli olarak kontrol edilmesi gerekmektedir.

1.6.8.5 Uçucu Yağ Asitleri

Anaerobik fermantasyon sürecinde organik maddelerin parçalanması sonucu oluşan ara ürünlerdir ve biyogaz üretim sürecinin önemli göstergelerinden biridir. Başlıca asetat, propiyonat, bütirat ve valerat gibi kısa zincirli yağ asitlerinden oluşur. Uçucu yağ asitleri metanojenik bakteriler tarafından metana dönüştürülerek biyogaz üretimi sağlanmaktadır. Ancak, uçucu yağ asitleri birikimi sistemde dengesizliklere yol açabilir. Özellikle fazla organik yükleme, düşük pH, yetersiz alkalinite ve toksik maddelerin varlığı, uçucu yağ asitlerinin reaktörde birikmesine neden olarak metanojenik aktivitenin azalmasına ve süreçte asidifikasyona yol açabilir. Bu durum, biyogaz üretiminin verimsiz hale gelmesine ve reaktörün çökmesine neden olabilir. Bu nedenle, anaerobik arıtma

süreçlerinde uçucu yağ asitleri konsantrasyonu düzenli olarak izlenmeli ve optimum seviyelerde tutulmalıdır.

1.6.8.6 C/N Oranı

Anaerobik bakteriler, fermentasyon sürecinde enerji elde etmek amacıyla karbonu kullanmakta, büyüme ve çoğalma için ise azotu tüketmektedirler. Biyogaz üretim verimliliğini etkileyen önemli faktörlerden biri olan karbon/azot (C/N) oranı, 23/1'den büyük ve 10/1'den küçük olmamalıdır. Mezofilik bakteriler, biyogaz üretimi esnasında karbonu azota oranla 25 kat daha fazla kullanmaktadır. Bu nedenle, fermentasyon tankına beslenen hammaddelerin C/N oranının 25/1'den düşük olmaması kritik bir gerekliliktir.

Tüm besi maddeleri, hayvan gübreleri, insan atıkları ve mutfak atıkları gibi kaynaklar, belirli oranlarda karbon, azot ve oksijen içermektedir. Karbon kaynağı biyogaz oluşumunda temel bir bileşen olurken, eser miktarda azot ise anaerobik bakterilerin gelişimi ve yeniden üretimi için gereklidir. Karbon enerji kaynağı olarak mikroorganizmalar tarafından kullanılırken, azot yeni hücrelerin sentezinde yapı malzemesi olarak değerlendirmektedir. Bu bağlamda, C/N oranının uygun seviyelerde tutulması, biyogaz üretim sürecinin verimliliği ve stabilitesi açısından büyük önem taşımaktadır (Karaca, 2022).

1.6.8.7 Toksisite

Anaerobik arıtma süreçlerinde ağır metaller, mineral iyonlar ve deterjanlar, mikroorganizmaların gelişimini engelleyerek toksik etki gösterebilmektedir. Anaerobik sürecin hızlanması için düşük konsantrasyonlardaki sodyum, potasyum, kalsiyum, magnezyum, amonyum ve kükürt gibi mineral iyonlar, bakteriyel büyümeyi destekleyici önemli etki sağlarken, düşük konsantrasyonlarda ağır metaller toksisiteye neden olabilmektedir. 50–200 mg/L aralığında amonyum iyonları bakteriyel gelişimi teşvik ederken, 1500 mg/L konsantrasyon üzerindeki amonyum iyonları bakteriler üzerinde toksik etki oluşturabilmektedir. Bununla birlikte, bakır, çinko, kurşun, nikel ve krom gibi ağır metallerin düşük konsantrasyonlarda olması mikroorganizmaların büyümesine destekleyici etki sunmaktayken yüksek konsantrasyonlarda olması toksik özellik sergilemektedir. Öte yandan, dezenfektanlar, antibiyotikler, ve organik solventler, anaerobik süreçlerde metan üreten bakterilerin aktivitelerini negatif etkileyerek metan oluşum kapasitesini düşürmektedir (Cihansar, 2022).

1.6.9 Biyogazın Avantajları ve Dezavantajları

Biyogaz teknolojisinin avantaj ve dezavantajları aşağıda belirtilmiştir.

1.6.9.1 Biyogaz Üretiminin Avantajları

- Atmosfere yayılan kötü kokuların önlenmesi sağlanır.
- Çevre dostu ve ekonomik bir enerji kaynağıdır.
- Atıkların hammadde olarak yeniden değerlendirilmesine olanak sağlayan bertaraf ve düzenli depolama alanları, teknoloji ve arazi kullanımına ilişkin maliyetlerin azaltılmasına katkı sağlamaktadır (Oflaz, 2023).
- Anaerobik arıtmada, diğer biyolojik arıtma yöntemleriyle karşılaştırıldığında daha düşük miktarda çamur oluşumu ve daha yüksek organik yükleme oranları oluşur (Oflaz, 2023).
- Biyogazın enerji üretiminde kullanılması, fosil kaynaklı enerji tüketimini azaltarak hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemli faydalar sağlamaktadır.
- Organik atıkların anaerobik sindirimi yoluyla, enerji açısından zengin biyogaz üretimi sağlanmakta; aynı zamanda azot (N), fosfor (P), potasyum (K), kükürt (S) gibi bitki besin elementlerini içeren ve tarımsal amaçlarla gübre olarak kullanılabilecek nitelikte bir kalıntı elde edilmektedir (Saz, 2021).
- Orta gelirli ülkelerde, atık yönetimi ve sanitasyon altyapısının iyileştirilmesi, önemli düzeyde maliyet tasarrufu potansiyeli sunmakta ve ekolojik sanitasyon uygulamalarının daha etkin bir biçimde hayata geçirilmesine yönelik önemli bir ivme sağlamaktadır (Saz, 2021).

1.6.9.2 Biyogaz Üretiminin Dezavantajları

Biyogaz işletmeleri uygun tasarımı ve sürdürülebilir işletiminde yoğun bilgi birikimi gereklidir. Bu bilgi, sistemin performansının optimize edilmesi, prosesin güvenli bir şekilde yürütülmesi ve çevresel etkilerin en aza indirilmesi açısından kritik öneme sahiptir (Oflaz, 2023).

- Biyogaz tesislerinin tasarımı ve işletilmesi sürecinde uygun ekipmanların kullanılmaması durumunda, çevresel açıdan olumsuz etkiler ortaya çıkabilmekte; özellikle görsel ve gürültü kirliliği gibi çevre sorunları meydana gelmektedir. Bu tür olumsuzluklar, hem çevresel sürdürülebilirliği hem de toplumun tesislere yönelik kabulünü olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Oflaz, 2023).
- Biyogaz yanıcı ve patlayıcıdır.

- Fermentasyon sonunda oluşan atığın gübre olarak kullanılmasında azot içeriğine, toprak ve su da kirlilik oluşturmamasına önem verilmelidir.
- Atıklarda patojen bakteriler bulunduğundan depolama ve taşıma süresince hijyen koşullarına dikkat edilmelidir.
- Ham biyogaz doğrudan yakıt olarak kullanılabilmeyle birlikte, içerdiği nem, karbondioksit ve korozif (aşındırıcı) gazlar, ilgili ekipmanların çalışma ömrünü ve operasyonel güvenilirliğini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu nedenle, biyogazın enerji sistemlerinde etkin ve uzun ömürlü bir şekilde kullanılabilmesi için, arıtma işlemleriyle söz konusu istenmeyen bileşenlerin giderilmesi gereklidir (Saz, 2021).
- Biyogazın bir diğer dezavantajı, sera etkisi üzerindeki yüksek potansiyelidir. Özellikle, içeriğinde bulunan metan gazının küresel ısınma potansiyeli karbondioksit ile kıyasla yaklaşık 21 kat daha fazladır. Bu durum, biyogazın üretimi sonrasında atmosfere herhangi bir şekilde sızmasının önlenmesi adına dikkatli bir şekilde yönetilmesini ve uygun koşullarda depolanmasını zorunlu kılmaktadır (Saz, 2021).

1.6.10 Biyogazın Kullanım Alanları

Biyogaz üretimiyle atık yönetimi amaçlanırken ekolojinin korunarak ısı ve elektrik enerjisi elde edilebilmektedir. Bununla birlikte, biyogaz üretimi sonrasında elde edilen ürünler de gübre kullanımı olmak üzere pek çok farklı alanda değerlendirme olanağı sunmaktadır (Buğutekin, 2007).

1.6.10.1 Biyogazın Isıtmada Kullanımı

Biyogazın yanma özelliği sayesinde başta kırsal alanda alt yapı hizmetlerinin yetersiz olduğu bölgelerde gaz yakıtlarla çalışabilen fırın ve ocaklarda, termosifon ve şofbenlerde kullanılabilir (Şekil 1.6). Ayrıca, biyogazın sıvılaştırılmış petrol gazı ile çalışan sobalarda kullanımı, meme çaplarında uygun basınç ayarlamaları yapılarak mümkün hale getirilebilmektedir. Daha sağlıklı ve emniyetli ısınma sağlamak amacıyla uygun sistemlerinin tercih edilmesi önerilmektedir (Öztuncay, 2009).



Şekil 1. 5 Biyogazın ısıtmada kullanım şekilleri (Öztuncay, 2009).

1.6.10.2 Biyogazın Aydınlatmada Kullanımı

Biyogaz, elektrik alt yapısının yetersiz olduğu bölgelerde aydınlatma amacıyla kullanılabilir (Şekil 1.7). Biyogazın sıvılaştırılmış petrol gazı ile çalışan lambalardan yararlanılarak aydınlatmada kullanımı da söz konusudur (Öztuncay, 2009).



Şekil 1. 6 Biyogazla çalışan aydınlatıcı (Öztuncay, 2009).

1.6.10.3 Biyogazın Motorlarda Kullanımı

Biyogaz uygun şartlar altında taşıtlarda yakıt olarak kullanılabilir. Motorlu taşıtlarda biyogazın başarılı bir şekilde kullanılabilmesi için, biyogazın içerisindeki metan oranının %96-97 seviyesinde olması ve hidrojen sülfür içeriğinin de 17 ppm'in altına düşürülmesi gerekmektedir. Biyogaz doğrudan benzinle çalışan motorlarda herhangi bir katkı maddesine gereksinim duyulmadan doğrudan kullanılabilir gibi, içeriğindeki metan gazı saflaştırılarak da yakıt olarak kullanılabilir. Bununla birlikte, dizel motorlarda kullanımı durumunda biyogaz belirli bir oranda (%18-20) motorin ile karıştırılması gerekmektedir (Aslanlı, 2009). Bazı Avrupa ülkelerinde biyogazın motorlu taşıtlarda kullanılabilmesi için gerekli biyogaz içerikleri Tablo 1.4 'de verilmiştir (Öçal, 2013).



Şekil 1. 7 Biyogazın motorlarda kullanımı (Saz, 2021).

Tablo 1.4 Bazı ülkelerde biyogazın motorlu taşıtlarda kullanılabilmesi için biyogaz içerikleri.

	Fransa	İsviçre	İsveç
Alt Isıl Değer (MJ/Nm ³)	38 - 46	-	45,5
Çiğ Noktası Sıcaklığı (°C)	En düşük dış ortam sıcaklığından 5 °C daha düşük		
Su İçeriği (max)(mg/Nm ³)	100	5	32
Metan (min) (% hacim)	97	96	97
CO ₂ (max) (% hacim)	2	-	3
Oksijen (max) (% hacim)	3.5	0.5	1
CO ₂ + O ₂ + N ₂ (max) (% hacim)	3	3	3
H ₂ S (max) (ppm)	5	4	17

1.7 Artvin İlinin Genel Özellikleri

Artvin, Doğu Karadeniz Bölgemizde yer alan, Karadeniz'e kıyısı da bulunan, Türkiye'nin Gürcistan ile sınırı olan kuzeydoğu köşesinde yer almaktadır. Doğusunda Ardahan ili, güneyinde Erzurum ili ve batısında Rize ili bulunmaktadır (URL-1).

Coğrafi ve kültürel yapısıyla Anadolu'nun diğer bölgelerinden belirgin farklılıklar göstermektedir. Yüzey şekilleri oldukça engebeli olup, il genelinde iklim çeşitliliği

fazladır. Bölgenin en önemli akarsuyu, 1956 yılına kadar ilin adını da taşıyan Çoruh Nehri'dir. Artvin topraklarının yaklaşık %55'i ormanlık alanlarla kaplıdır. Ayrıca, Murgul ilçesinde önemli bir bakır madeni bulunmaktadır. Tarihsel süreçte bölge, genellikle "Livane" ve "Çoruh" adlarıyla anılmıştır (URL-1).

Artvin içerisinde önemli millî parkları içermekte olup, Şavşat ilçesinde yer alan Karagöl Sahara Millî Parkı, kent merkezinde Hatila Milli Parkı öne çıkanlar arasındadır. Ayrıca, Türkiye'de biyosfer rezerv alanı olarak belirlenen tek bölge olan Efeler-Gorgit Tabiatı Koruma Alanı'nı da kapsayan Camili yöresi, Birleşmiş Milletler Eğitim, Bilim ve Kültür Örgütü tarafından dünya mirası niteliğinde bir ekosistem olarak değerlendirilmektedir (URL-1).



Şekil 1. 8 Artvin Haritası.

1.7.1 Coğrafi Durum

Artvin 40°35' - 41°32' kuzey enlemleri ile 41°07' - 42°00' doğu boylamları arasında yer alan, 7.436 km² genişliğinde, doğusunda Ardahan, batısında Rize, kuzeyinde Gürcistan, güneyinde Erzurum ile komşu, kuzey batısında ise kıyı uzunluğu 34 km olan Karadeniz vardır. Doğu Karadeniz Dağları'nın içinde bulunan Kaçkar, Altıparmak, Kükürtlü, İskaristi Dağları il sınırları içerisinde olup 3937 m. yüksekliğindeki Kaçkar Dağı Karadeniz Dağları'nın en yüksek noktasını oluşturur. Şavşat ve Borçka ilçeleri arasında bulunan, Çoruh ve Berta vadileri ile Gürcistan ile sınır teşkil eden Karçal Dağı 3428 m.

yüksekliği ile ilin diğer önemli bir dağıdır. İlde, geniş tarımsal üretim alanları sınırlı olup, Arhavi ve Hopa'daki alüvyal düzlükler dışında ova denebilecek düz alanlar mevcut değildir. Hayvancılıkta yoğun olarak kullanılan yaylalar ilde geniş yer kaplamaktadır (Artvin ÇDR, 2022).

1.7.2 İklim ve Bitki Örtüsü

Artvin iline ait iklim verileri Artvin Meteoroloji İstasyonu'nun 2003-2013 yılları arasındaki uzun süreli gözlem değerleri esas alınmıştır. İlde yıllık ortalama sıcaklık 12,6 °C olup, en yüksek yıllık sıcaklık 40,7 °C, en düşük yıllık sıcaklık ise -9,1 °C olarak tespit edilmiştir. Yılın en sıcak ayı 40,7 °C ile temmuz, en soğuk ayı ise -9,9 °C ile aralık ayıdır. Yıllık ortalama yağış miktarı 741,5 mm olup, en fazla yağışın gözlemlendiği ay 68,8 mm ile şubat ayıdır. Yıllık ortalama kar yağışlı gün sayısı 28,9 gün olup, ortalama rüzgâr hızı 2 m/s, ortalama bağıl nem %63,9 olarak tespit edilmiştir. Mevsimsel yağış rejimi ilkbahardan yaz mevsimine doğru belirgin bir azalma eğilimi göstermektedir. Artvin, önemli derecede endemik bitki topluluklarının varlık gösterdiği bir bölgedir. (Aras, 2016).

1.7.3 Ekonomi

Artvin 'in ülke ekonomisi içerisinde payı ve bu payın içinde sanayi sektörünün katkısı oldukça sınırlı düzeydedir. İl içerisinde organize sanayi bölgesi bulunmamakta olup, işletmeler ağırlıklı olarak gıda, maden ve orman ürünleri alanlarında yoğunlaşmaktadır. (Kaya, 2024).

Tarım sektörü açısından değerlendirildiğinde, Artvin'de geleneksel tarım yöntemlerinin yaygın olduğu ve makineli tarımın neredeyse hiç bulunmadığı görülmektedir. Tarımsal üretim, büyük ölçüde küçük ölçekli aile işletmeleri tarafından yürütülmekte olup, bu durum gübre ve zirai ilaç kullanımının oldukça sınırlı kalmasına neden olmaktadır. Barajların inşası nedeniyle verimli tarım arazileri sular altında kalmış, Çoruh Vadisi boyunca Yusufeli ilçesinde artış gösteren örtü altı sebze yetiştiriciliği kapsamında patlıcan, domates, kavun, marul, ıspanak ve maydanoz gibi çeşitli tarım ürünleri başarıyla üretilmektedir (Aras, 2016).

Artvin'in şehirleşme oranı incelendiğinde, kişi başına düşen gayri safi yurtiçi hasıla ve sanayi sektöründe çalışan nüfusun toplam istihdam içerisindeki payının Türkiye ortalamalarının altında olduğu görülmektedir. Buna karşılık, tarım sektöründe istihdam edilen nüfusun toplam istihdama oranı Türkiye ortalamasının üzerindedir. Bu durum, ilin

ekonomik yapısının ağırlıklı olarak tarım sektörüne dayalı olduğunu ve sanayi sektörünün gelişiminin sınırlı kaldığını ortaya koymaktadır (Aras, 2016).

1.7.4 Nüfus

Türkiye genelinde olduğu üzere 1980-1997 yılları arasında Artvin sürekli dışa göç veren iller arasında yer almışken, büyük barajlarının inşasına başlanması ile bölgede yeni geçici istihdam alanlarının oluşmasına katkı sağlamıştır. Bunun yanı sıra, Artvin’den yoğun göç alan Marmara Bölgesi’nde yaşam koşullarının zorlaşması, bireylerin göç kararlarını yeniden değerlendirmelerine neden olmuştur. Bu faktörlerin bir araya gelmesiyle, 1998 yılı itibarıyla Artvin’den dışa göç eğiliminde belirgin bir azalma meydana gelmiştir (URL-1). Sosyolojik ve ekonomik koşullar nedeniyle sürekli göç veren Artvin ilinde nüfus artış hızı oldukça düşük hatta negatif seviyelerde seyretmektedir. 2025 yılı Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre, 2023 yılında 172.356 olan Artvin’in nüfusu, 2024 yılında azalarak 169.280 olmuştur. Bu veriler doğrultusunda, nüfus artış hızı % -18,0 olarak hesaplanmıştır.

Artvin ilinin ilçeler ile belde ve köylere ait 2024 yılı nüfusları Tablo 1.5 ’da sunulmuştur (TÜİK 2025). Tabloda yer alan bilgilere göre, Artvin İli merkez nüfusunda artma olduğu ve ilin toplam nüfusunda azalma olduğu ve bu azalışın Ardanuç, Borçka, Kemalpaşa, Şavşat ve Yusufeli ilçelerinden kaynaklandığı görülmüştür.

Tablo 1.5 Artvin ili 2024 yılı nüfus verileri.

İL/İLÇE	İl ve İlçe Merkezi	Belde ve Köyler	Toplam
Artvin	108.825	60.455	169.280
Merkez	26.348	9.723	36.071
Ardanuç	5.376	5.630	11.006
Arhavi	17.455	4.366	21.821
Borçka	10.958	11.330	22.288
Hopa	23.369	4.437	27.806
Kemalpaşa	6.302	3.041	9.343

Tablo 1.5 (devamı)

Murgul	4.935	1.396	6.331
Şavşat	6.937	9.597	16.534
Yusufeli	7.145	10.935	18.080

1.8 Literatür Çalışması

Bu çalışmada, katı atıklardan biyogaz üretimi konusunda kapsamlı bir literatür taraması gerçekleştirilmiş ve çeşitli araştırmalar incelenerek değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, ele alınan ve yararlanılan bazı çalışmalar aşağıda sunulmaktadır.

- Demirarslan ve Başak (2018), tarafından yapılan “Doğu Karadeniz Bölgesi İlleri Yönetimi” makalesinde; ülkemizin kuzey doğusunu oluşturan Doğu Karadeniz Bölgesi katı atık miktarları ve yönetimleri incelenmiştir. Bölgede Artvin, Bayburt, Giresun, Gümüşhane, Ordu, Rize ve Trabzon illeri bulunmaktadır. Çalışma kapsamında iller bazında meydana gelen atık miktarları, atık hizmeti verilen belediye nüfusunun toplam belediye nüfusuna oranı, atık hizmeti verilen belediye nüfusunun toplam nüfusa oranı, atık hizmeti verilen belediye nüfusu, atık hizmeti verilen belediye sayısı, toplanan belediye atık miktarı (ton/yıl), kişi başı ortalama belediye atık miktarı (kg/kişi-gün) ve atık bertaraf yöntemleri incelenmiştir.
- Kaya (2024), tarafından yapılan “Kentsel Atıkların Enerji Potansiyeli – Artvin Örneği” adlı çalışmada; Artvin ili için yapılmış ve ilde oluşan atıkların türlerine göre ayrıştırılmış miktarları incelenerek, elde edilen veriler ışığında, Artvin'de değerlendirilebilecek evsel, hayvansal, tarımsal ve orman atıklarından oluşabilecek enerji üretim potansiyeli ortaya konulmuştur.
- Buğutekin (2007), tarafından yapılan “Atıklardan Biyogaz Üretiminin İncelenmesi” başlıklı doktora tezinde; biyogaz üretim şartlandırıcısı imal edilerek biyogaz üretim sınır şartlarını sağlayan atık karıştırmanın biyogaz üretimine etkisi incelenmiştir. Karıştırma sistemi iki farklı (2 d/h ve 30 d/d) manyetikli mekanik karıştırma sistemi tercih edilmiştir.
- Gültekin (2021), tarafından yapılan “Balıkesir Büyükşehir Belediyesi Evsel Atıklarının Projeksiyonu ve Biyogaz Potansiyelinin Belirlenmesi” isimli çalışmada; Balıkesir ilinde oluşan organik içeriği yüksek atık miktarları kullanılarak, depo

gazından enerji üretimi açısından önemi araştırılmıştır. Üretilen biyogazın sabit motorlarda yakıt olarak kullanıldığı ve içten yanmalı motorlar aracılığıyla kullanılarak enerjiye dönüştürüldüğü bir sistem tercih edilmiştir.

- Öçal (2013), tarafından yapılan “Biyogaz Enerjisi Üretimi ve Eskişehir İli İçin Uygulama” çalışmasında; Eskişehir ilindeki büyükbaş hayvan varlığı belirlenerek biyogaz üretim potansiyeli değerlendirilmiştir. İlçelerdeki büyükbaş hayvan barınaklarında oluşan atıklar toplanarak biyogaz tesislerine taşınmış ve hammadde olarak kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda, Eskişehir ilinde büyükbaş hayvan atıklarından elde edilen biyogazın enerji üretiminde kullanılması durumunda günlük olarak 276.454 kWh elektrik enerjisi üretilebileceği belirlenmiştir.
- Şenol ve ark. (2017), tarafından yapılan “Biyogaz Üretimi İçin Ankara’nın Başlıca Organik Atık Kaynakları” isimli araştırma makalesinde; Ankara ilinde oluşan hayvansal ve mutfak atıkları ile atık su arıtma tesisi atıkları çamurlarının yanı sıra tarımsal atıklar da dikkate alınarak bu atıklardan elde edilebilecek biyogaz üretim miktarı belirlenmiştir.
- Öbekcan (2014), tarafından yapılan “Çorum İlinin Biyogaz Üretim Potansiyelinin Araştırılması” konulu çalışmada; Çorum ili Merkez ilçesinde, 2014 yılı itibarıyla toplam 94.658 ton hayvansal katı atıktan 18.931.500 m³ biyogaz elde edilebileceği ve bunun 17 MTEP enerji eşdeğerine sahip olduğu hesaplanmıştır. Çöp depolama sahasından oluşabilecek biyogaz hacmi, LandGEM v3.02 simülasyon programı kullanılarak tahmin edilmiş olup, 2039 yılına kadar birikecek toplam biyogaz miktarının 354.519.680 m³ olacağı belirlenmiştir.
- Öztuncay (2009), tarafından yapılan “Türkiye ‘de Biyogaz Enerjisinin Kullanılabilirliği ve Ekonomikliği” konulu çalışmada; Türkiye gibi tarım ve hayvancılığın yaygın olduğu bir ülkede çok sayıda biyogaz tesisi kurulabileceği ve ülkenin doğalgaz ihtiyacının % 88 ‘inin azaltılabileceği sonucuna varılmıştır.
- Aslanlı (2009), tarafından yapılan “Hayvansal Atıklardan Biyogaz Üretimi Üzerine Çeşitli Bor Bileşiklerinin Etkinliğinin Araştırılması” konulu çalışmada; Sakrofilik ve Mezofilik koşullar altında biyogaz üretiminde uygun dozlarda bor bileşiklerinin kullanımının biyogaz veriminde yararlı olacağı önerilmektedir.

- Coşkuner (2015), tarafından yapılan “Evsel Atıktan Enerji Üretimi – Gaziantep Örneği” konulu yüksek lisans tezinde; Gaziantep katı atıklarının mevcut ve gelecek perspektifi yapılarak enerji üretim potansiyelleri üzerine çalışmalar yapılmıştır.
- Cihansar (2022), tarafından yapılan “Biyogazdan Enerji Üretiminin Çevresel Etkilerinin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Yöntemiyle Belirlenmesi” konulu çalışmada; Biyogaz enerjisi ile elektrik üretimi sırasında oluşan çevresel etkiler değerlendirilmiştir.
- Ceyhan (2022), tarafından yapılan “Evsel ve Yemekhane Atıklarından Biyogaz Üretimine İşletim Koşullarının Etkisinin Yapay Sinir Ağları İle İncelenmesi” başlıklı çalışmada; yemek (sebze ve meyve) atıklarından elde edilen biyogazın verimini etkileyen parametreler, hayvansal (at, deve ve inek) gübresinden üretilen biyogazın verimini etkileyen parametreler ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucunda, biyogaz üretiminde en belirleyici parametrenin bekleme süresi olduğu tespit edilmiştir.

2 MATERYAL ve YÖNTEM

Belediye Kanunu'nun (5393 sayılı) görev ve sorumluluklarında, belediyeler kendi sınırları içerisinde çevre ve çevre sağlığı, temizlik ve katı atık gibi hizmetleri yerine getirmekle yükümlü olduğu belirtilmektedir. İl Özel İdaresi Kanunu 'nda (5302 sayılı) belediye sınırları dışında kalan yerleşim merkezlerine katı atık hizmetini İl Özel İdaresi vermekle yükümlü olduğu belirtilmiştir. Aynı şekilde, ilgili mevzuat kapsamında katı atıkların kaynağında ayrıştırılması, toplanması, taşınması, geri dönüşümü, depolanması ve bertarafına yönelik tüm hizmetlerin doğrudan gerçekleştirilmesi veya yetkili kuruluşlarca yaptırılması konusunda yerel idarelerin sorumlu olduğu ifade edilmektedir.

Artvin ilinde katı atıkların yönetimi, uzun yıllardır devam eden bir sorun olarak varlığını sürdürmektedir. Kentte oluşan tüm atıklar ayrı bir değerlendirmeye tabi tutulmaksızın birlikte bertaraf edilmektedir. Bunun yanı sıra, çalışma alanında katı atıkların düzenli olarak depolanmasına olanak veren bir tesis bulunmamaktadır. 2015 yılına kadar atıklar, Şekil 2.1 'de gösterilen Artvin ili Merkez ilçesinde yer alan İskebe Deresi'ne depolanırken, 2015 yılından itibaren Artvin Merkez'e 17 kilometre mesafede bulunan Varyant mevkisindeki vahşi depolama alanında bertaraf edilmektedir (Uçar, 2022).



Şekil 2. 1 Artvin ili Merkez ilçesi eski vahşi depolama alanı (Uçar, 2022).

Eski katı atık depolama alanı, kentin konut alanlarının çok yakınında kalması nedeniyle kapatılarak Belediye tarafından hafriyat atığı döküm sahası olarak belirlenmiştir. İl merkezi sınırları içerisinde oluşan hafriyat atıkları bu alanda depolanmış ve üzerleri örtülerek kapatılmış, alanın 2024 yılı itibarıyla güncel durumu Şekil 2.2 'de gösterilmektedir.



Şekil 2.2 Artvin ili eski katı atık depolama sahasının 2024 yılı görünümü (Kaya, 2024).

Artvin-Ardanuç Karayolu üzerinde konumlanan yeni katı atık depolama alanı, Şekil 2.3 'de sunulmaktadır. Söz konusu alanda, il genelinde oluşan hastane atıkları hariç tüm katı atıklar biriktirilmekte ve üzerleri hafriyat malzemesi ile örtülmektedir. Uluslararası yola oldukça yakın olan sahada sık sık yangınlar meydana gelmekte olup, bu yangınlar nedeniyle hem çevresel kirlilik hem de ulaşım riskleri oluşmaktadır. Bu durum, katı atık depolama alanının yönetimi ile atık yönetimi politikalarının yeniden değerlendirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Evsel katı atıkların depolandığı söz konusu alanın uydu görüntüsü ise Şekil 2.4 'de verilmektedir.



Şekil 2. 3 Artvin ili, Merkez ilçesi vahşi depolama alanı görselleri (Kaynak:Yazar, 2025).



Şekil 2.4 Artvin İli, Merkez İlçesi vahşi depolama alanı uydu görüntüsü (Kaynak:Yazar, 2025).

Artvin Merkez İlçesi sınırları içerisinde yer alan katı atık depolama alanı Deriner Barajı gövdesine kuş uçuşu yaklaşık 2 km mesafede konumlanmaktadır. Söz konusu alanın Baraj gölüne yakınlığı, özellikle sızıntı suları olmak üzere çevresel açıdan önemli riskleri taşımaktadır. Bu nedenlerle, bölgedeki ekolojik denge ile su kaynaklarının korunması açısından katı atık sahasının kontrolü kritik bir öneme sahiptir (Kaya, 2024).

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından 2017 yılında başlatılan “Sıfır Atık Projesi”, Artvin ilinde de uygulanmaya başlanmış olmasına rağmen, hedeflendiği üzere uygulamaya geçirilememiştir. Bu durumun temel nedenlerinden biri, il merkezi ve ilçelerinde hâlen düzenli katı atık depolama sahaları ile bertaraf tesislerinin oluşturulmamış olmasıdır. Söz konusu altyapı eksiklikleri, atık yönetimi alanında önemli zafiyetlere yol açmakta ve Sıfır Atık projesinin etkin bir şekilde uygulanmasını engelleyerek il genelinde ciddi yönetimsel ve çevresel sorunlara neden olmaktadır. Bu bağlamda, projenin somut ve sürdürülebilir sonuçlar doğurabilmesi için gerekli altyapının ivedilikle tamamlanması ve ilgili tesislerin kurulmasının önemine dikkat çekilmelidir. Artvin ilinin uzun vadeli hedefleri arasında, güçlü atık yönetimi altyapısı, kırsal bölgelerde atık toplama sistemlerinin geliştirilmesi ve bölge halkının sürecin etkin katılımcısı olmasının araçları yer almalıdır. Doğal güzellikleriyle öne çıkan bir bölge olan Artvin’in katı atık yönetiminde de sürdürülebilir ve çevre dostu çözümlerin pratiklerinin geliştirilmesine odaklanılması gerektiği vurgulanmaktadır (Kaya, 2024).

Bu doğrultuda, kamu kurumları, yerel yönetimler, sivil toplum kuruluşları ve özel sektör arasındaki iş birliğinin artırılması suretiyle il genelinde entegre ve etkin bir katı atık yönetim sisteminin oluşturulması gerekmektedir.

2010-2022 yılları arası TÜİK atık istatistikleri değerlendirildiğinde toplanan kişi başı günlük ortalama atık miktarının azalış eğiliminde olduğu ve 2022 yılında 1,03 kg olarak bulunmuştur. Artvin ili atık yönetimi istatistikleri Tablo 2.1 'de verilmiştir (TÜİK, 2025).

Tablo 2.1 Artvin ili yıllara göre atık istatistikleri.

Yıllar	Atık hizmeti veren toplam belediye sayısı	Toplanan atık miktarı (ton)	Kişi başı toplanan günlük ortalama atık miktarı (kg)
2010	12	31.052	1,14
2012	12	32.232	1,12
2014	9	37.501	1,08
2016	9	43.184	1,17
2018	9	45.102	1,16
2020	9	58.062	1,13
2022	9	61.276	1,03

Tablo verilerine göre, il genelinde toplanan atık miktarında istikrarlı bir artış gözlemlenmektedir. 2022 yılı itibarıyla, ilde toplanan toplam atık miktarı 61.276 ton olarak tespit edilmiştir. Ancak, söz konusu atıkların bertaraf edilebileceği uygun bir düzenli depolama tesisinin bulunmaması, uzun vadede ciddi çevresel ve halk sağlığı sorunlarına yol açma potansiyeli taşımaktadır.

İl genelinde meydana gelen atıkların bertaraf yöntemleri ve bertaraf edilen atıkların miktarları Tablo 2.2'de verilmektedir (Demirarslan ve Başak, 2018). Bu sorunun etkin bir şekilde yönetilebilmesi için, il merkezi ve ilçeleri kapsayacak biçimde entegre bir atık yönetim sisteminin oluşturulması ve bilimsel temellere dayalı uygun bertaraf tekniklerinin belirlenerek uygulanması gerekmektedir.

Tablo 2.2 Artvin ilinde atık bertaraf yöntemlerine göre atık miktarları.

Atık Bertaraf Yöntemine Göre Atık Miktar (ton/yıl)					
Yıllar	Açıktan Yakma	Belediye Çöplüğünde Depolama	Diğer Bertaraf İşlemleri	Gömme	Nehir, Dere ve Göle Dökme
2001	718	17.255	10.889	1.460	1.095
2002	940	24.681	3.285	3.650	-
2003	-	22.394	8.760	-	4.386
2004	579	28.900	4.392	1.677	-
2006	4541	26.202	2.006	4.012	-
2008	-	33.467	-	-	-
2010	1.613	27.064	184	2.190	-
2012	-	32.232	-	-	-
2014	-	37.501	-	-	-
2016	-	42.184	-	-	-

Artvin iline ait katı atık bertaraf yöntemleri incelendiğinde, yıllar içerisinde hem kullanılan yöntemlerde hem de bertaraf edilen atık miktarlarında önemli dalgalanmaların olduğu görülmektedir. Özellikle 2001–2016 yılları arasında farklı bertaraf yöntemlerinin tercih edildiği ve bu tercihlerin yıllara göre değişkenlik gösterdiği anlaşılmaktadır.

“Açıktan yakma” yönteminin 2001 ve 2002 yıllarında kullanıldığı, sonraki yıllarda ise düzensiz aralıklarla tekrarlandığı ancak 2010 yılından itibaren tamamen terk edildiği görülmektedir. Bu durum, çevresel zararları yüksek olan bu yöntemin zamanla kullanım dışı bırakıldığını göstermektedir.

“Belediye çöplüğünde depolama” yönteminin ise neredeyse tüm yıllarda en yaygın bertaraf şekli olduğu dikkat çekmektedir. 2001 yılında 17.255 ton olan depolama miktarı, yıllar içerisinde sürekli artış göstermiş ve 2016 yılına gelindiğinde 42.184 tona ulaşmıştır. Bu artış, Artvin’de nüfusun ve tüketim alışkanlıklarının atık miktarlarına yansıdığını ortaya koyarken, aynı zamanda modern ve çevreye duyarlı atık yönetimi uygulamalarının sınırlı kaldığını da işaret etmektedir.

“Diğer bertaraf işlemleri” başlığı altında verilen miktarların ise özellikle 2001–2004 yıllarında dikkate değer olduğu, ancak 2010 yılından sonra bu yöntemin uygulanmadığı anlaşılmaktadır. Benzer şekilde, “gömme” yönteminin 2001–2010 yılları arasında belirli miktarlarda tercih edildiği, fakat 2012 sonrasında tamamen ortadan kalktığı görülmektedir.

“Nehir, dere ve göle dökme” yöntemi ise sadece 2001 ve 2003 yıllarında raporlanmış olup, bu tarihlerden sonra uygulanmadığı anlaşılmaktadır. Bu durum, çevre ve su kaynakları açısından yüksek risk barındıran bu yöntemin zamanla terk edildiğini göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, Artvin ilinde katı atıkların bertarafında 2000’li yılların başlarında farklı yöntemlerin kullanıldığı, ancak süreç içerisinde neredeyse tamamen belediye çöplüğünde depolama yöntemine yöneldiği sonucuna ulaşılmaktadır. Bu eğilim, modern bertaraf ve geri kazanım tekniklerinin yeterince uygulanmadığını ve atık yönetiminde hâlâ gelişim alanı bulunduğunu göstermektedir.

Doğu Karadeniz Projesi Bölge Kalkınma İdaresi Başkanlığı (DOKAP) tarafından 2017 yılında gerçekleştirilen çalışma kapsamında, Artvin, Bayburt, Giresun, Gümüşhane, Ordu, Rize, Samsun ve Trabzon illerinden oluşan DOKAP Bölgesi’ne ait evsel katı atıkların karakterizasyonu belirlenmiştir. Raporda, Artvin ilinin katı atık karakterizasyonu belirlenirken mevsimsel değişimler göz önüne alındığı ve yılda 4 kez her mevsimi temsil edecek şekilde veriler toplanarak analizinin yapıldığı belirtilmektedir. Karakterizasyon yapılması için atık depolama alanında toplanan atıklar içerisinde yaklaşık 25 – 30 kg rastgele örnekleme ile alınıp karıştırılan ve daha sonra 4 ‘e ayrılarak numunelerin analizinin gerçekleştirildiği ve elde edilen sonuçlar Tablo 2.3 ‘de sunulmuştur (DOKAP, 2017).

Artvin ilinde yılın farklı mevsimlerinde oluşan kentsel katı atıkların bileşenlerini ve ortalama dağılımlarını göstermektedir. Elde edilen verilere göre, mutfak atıkları ilin toplam atıkları içinde en yüksek paya sahiptir. Özellikle sonbahar döneminde bu oran %66,02 ‘ye ulaşmakta olup, yıllık ortalama olarak %48,42’yi temsil etmektedir. Bu durum, organik atıkların kentsel atık yönetiminde önemli bir yer tuttuğunu ve biyogaz üretimi açısından yüksek potansiyel taşıdığını göstermektedir.

Tablo 2.3 Artvin ili atık kompozisyonu

Atık Bileşeni	Yaz	Sonbahar	Kış	İkbahar	Ortalama
	(%)				
Mutfak atıkları (yemek sebze meyve vb.)	40,71	66,02	39,85	47,08	48,42
Kâğıt (gazete dergi defter)	15,02	6,80	8,53	7,80	9,54
Karton (süt, meyve suyu kutusu, vd.)	7,50	0	8,71	6,95	5,79
Hacimli karton	0	0	4,67	3,61	2,07
Plastik	6,76	8,16	6,97	7,94	7,46
Poşet	8,51	8,29	8,07	9,36	8,56
Cam	8,74	2,26	4,31	2,90	4,55
Metal	0,87	3,80	3,22	2,45	1,42
Park bahçe atıkları	0	0	0	0	0
Yanmayan ürünler (taş, kum, toz, seramik, kül vb.)	1,75	0	4,13	3,48	2,34
Yanabilen ürünler (tekstil, çocuk bezi, halı, terlik vb.)	0	4,67	11,53	8,43	6,16
TOPLAM	100	100	100	100	100

Diğer bileşenler incelendiğinde:

- Kâğıt ve karton ürünler (gazete, dergi, süt ve meyve suyu kutuları) toplam atığın sırasıyla ortalama % 9,54 ve % 5,79'unu oluşturmaktadır. Karton atıkların hacimli olmayan türleri daha yaygın olup, hacimli karton atıklar ortalama %2,07 ile düşük seviyededir.
- Plastik ve poşet atıkları toplamda yaklaşık %16 civarında olup, atık içinde sürekli bir varlık göstermektedir. Plastik ve poşetler geri dönüşüm açısından değerlendirilebilir ancak biyogaz üretimi açısından sınırlı katkı sağlar.
- Cam ve metal atıklar ise toplam atığın küçük bir kısmını oluşturmaktadır (% 4,55 ve % 1,42). Bu bileşenler daha çok geri kazanım amaçlı olarak ayrıştırılabilir.
- Yanabilen ürünler (tekstil, çocuk bezi, halı, terlik vb.) ortalama % 6,16 ile sınırlı bir paya sahiptir ve enerji geri kazanımı için potansiyel sunmaktadır.

- Park ve bahçe atıkları verilerde ihmal edilebilir düzeyde olup, incelenen dönemde %0 olarak gözlemlenmiştir.

Dört mevsimi kapsayan şekilde yapılan karakterizasyon çalışmalarının ortalama değerleri Şekil 2.5’de gösterilmiştir.



Şekil 2. 5 Artvin ili atık karakterizasyonu.

Atık karakterizasyonu sürecinde, atıkların üç ana başlık altında ayrı ayrı değerlendirilmesi gerekmektedir: biyobozunur atıklar, geri kazanılabilir atıklar ve diğer (inert) atıklar. Biyobozunur atıklar, biyolojik süreçler aracılığıyla, mikroorganizmalar veya enzimlerin etkisiyle ayrışabilen organik içerikli atıklar olarak tanımlanmaktadır. Geri kazanılabilir atıklar ise iki alt başlıkta incelenmektedir: ambalaj atıkları ve enerji geri kazanımı amacıyla kullanılabilen atıklar. Atığın biyolojik olarak ayrışabilen kısmını ifade eden biyobozunur faktör, atığın tamamı içerisindeki biyolojik olarak parçalanabilir bileşenin oranını göstermektedir. Örneğin, mutfak atıklarının biyobozunur faktörü 1,0 olarak kabul edilmekte olup bu durum, söz konusu atıkların % 100 oranında biyolojik olarak parçalanabilir olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, kâğıt atıkları için biyobozunurluğun %40, geri kazanılabilir miktarın % 60 olduğu varsayılmaktadır. Plastik atıkların % 70 ’inin geri dönüştürülebilir nitelikte, % 30 ’unun ise enerji geri kazanımında kullanılabilir özellikte olduğu öngörülmektedir. Cam atıklar söz konusu olduğunda ise,

bu atıkların % 90 'ının geri kazanılabilir, %10 'unun ise inert (atıl) nitelikte olduğu kabul edilmektedir (DOKAP, 2017).

Biyobozunur atıklar için Tablo 2.4 'de, ambalaj atıkları için Tablo 2.5 'de, enerji geri kazanımına uygun atıklar için Tablo 2.6 'da düzenlenmiştir.

Tablo 2.4 Artvin ili biyobozunur atık oranları

Biyobozunur atıklar	Oran (%)
Mutfak atıkları	48,42
Kağıt, karton ve hacimli karton	6,96
Park bahçe atıkları	0
Yanabilir	6,16
TOPLAM	61,54

Tablo 2.5 Artvin ili ambalaj atık oranları

Ambalaj Atıkları	Oran (%)
Kağıt, karton ve hacimli karton	10,44
Plastik	11,21
Cam	4,10
Metaller	1,42
TOPLAM	27,17

Tablo 2.6 Artvin ilinin enerji geri kazanımına uygun atıklar

Atık	Oran (%)
Plastik	4,81
Yanabilir	6,16
TOPLAM	10,97

İlde meydana gelen tıbbi atıklar ise toplanarak Trabzon'da bulunan Tıbbi Atık Bertaraf tesisine gönderilmektedir. Meydana gelen tıbbi atıkların yıllara göre değişimleri ise Tablo 2.7 'de verilmektedir (Demirarslan ve Başak, 2018).

Artvin ili sınırları içerisinde, faal durumda olan herhangi bir katı atık düzenli depolama tesisi bulunmamaktadır. Bu eksiklik, il genelinde katı atık yönetimine ilişkin mevcut sorunların daha da derinleşmesine neden olmaktadır.

Tablo 2.7 Artvin ilinde meydana gelen tıbbi atık miktarları.

	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Tıbbi Atık Miktarı (ton/yıl)	31,4	58,5	74,4	83,3	91,2	103,8

Atıkların çevresel ve halk sağlığı açısından oluşturabileceği olumsuz etkilerin önlenmesi ve sürdürülebilir bir atık yönetiminin sağlanabilmesi adına, Artvin ili özelinde yerel yönetimlerin öncülüğünde acil olarak entegre bir katı atık yönetim sisteminin oluşturulması gerekmektedir. Bu sistemin, atıkların kaynağında ayrıştırılması, taşınması, geri kazanımı, bertarafı ve gerekli altyapı yatırımlarını içerecek şekilde bütüncül bir yaklaşımla planlanması önem arz etmektedir.

Artvin ilinde tarımsal faaliyetler, ağırlıklı olarak küçük ölçekli aile tipi işletmeler tarafından yürütülürken, tarımsal üretimde insan gücüne dayalı bir modelin baskın olduğu, dolayısıyla makineli tarım uygulamaları oldukça sınırlı kaldığını işaret etmektedir. Modern tarımın neredeyse hiç kullanılmaması, tarımsal verimliliği kısıtlasa da il genelinde ekolojik tarımın gelişimi açısından fırsatlar sunmaktadır. Bitkisel üretim yoğun olarak Çoruh Nehri ve onun kolları tarafından oluşturulan vadi tabanlarında yapılmaktadır. Ancak bu sınırlı alanların dışındaki bölgelerde tarımsal faaliyetlerin yetersiz düzeyde olması, genel tarımsal üretim kapasitesini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Diğer yandan, hayvansal üretimin daha çok yüksek rakımlı bölgelerde gerçekleştirilmesi, coğrafi ve iklimsel koşullara uyum sağlayan bir üretim modeli benimsendiğini göstermektedir. Bölgede gübre ve zirai ilaç kullanımının düşük düzeyde olması, günümüzde oluşan çevresel sürdürülebilirlik açısından pozitif katkılar sunabilmektedir (ÇDR, 2022).

Artvin iline ait hayvan sayıları ve oluşan atık miktarları Enerji İşleri Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan Biyokütle Enerjisi Potansiyeli Atlası'ndan elde edilen verilere göre, Tablo 2.8'de verilmiştir (URL-2).

Tablo 2.8 Artvin ili hayvan sayıları ve atık miktarları

	Hayvan Sayısı	Atık Miktarı (ton/yıl)
Büyükbaş	61.826	443.459
Küçükbaş	129.794	135.838
Kanatlı	24.935	1.360
TOPLAM	216.555	580.657

Büyükbaş hayvanlar 61.826 adet ile ilin hayvansal varlığında önemli bir yer tutmakta olup, yıllık yaklaşık 443.459 ton atık üretmektedir. Bu, toplam hayvansal atığın büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Küçükbaş hayvanlar ise 129.794 adet ile sayıca daha fazla olmalarına rağmen, yıllık atık miktarı 135.838 ton olarak hesaplanmıştır. Bu durum, küçükbaş hayvanların birim başına daha az atık üretmesinden kaynaklanmaktadır. Kanatlı hayvanlar 24.935 adet ile en düşük sayıda olmasına paralel olarak, yıllık atık miktarı 1.360 ton seviyesindedir.

2.1 İller Bankası Nüfus Hesaplama Yöntemi

Çalışmada, biyogaz üretim kapasitesinin sağlıklı bir şekilde hesaplanabilmesi için öncelikle il nüfusunun mevcut durumu ve geleceğe yönelik projeksiyonları dikkate alınmıştır. Zira katı atık miktarının belirlenmesinde en önemli değişkenlerden biri nüfus büyüklüğüdür.

Gelecek nüfusun belirlenmesinde, Türkiye’de kamu yararına hizmet sunan İller Bankası tarafından geliştirilen projeksiyon metodu kullanılmıştır. İller Bankası, içme suyu temini, kanalizasyon, atıksu arıtma, katı atık yönetimi ve deniz deşarjı gibi kentsel alt ve üst yapı hizmetlerine ilişkin etüt, plan ve proje çalışmaları yürütmekte; bu alanlarda danışmanlık ve kontrollük hizmetleri sağlamakta ve aynı zamanda söz konusu yatırımların gerçekleştirilmesi için finansman desteği sunmaktadır. Kurumun bu kapsamda geliştirdiği nüfus projeksiyon metodu, Türkiye’de belediyecilik ve çevre yönetimi alanlarında en yaygın kullanılan, güvenilirliği kabul edilmiş yöntemlerden biri olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada da, Artvin ilinin mevcut nüfus verilerinden hareketle, İller Bankası Metodu esas alınarak gelecek 30 yıllık dönem için nüfus projeksiyonları hazırlanmış ve yıllara yönelik nüfus tahminleri yapılmıştır. Söz konusu tahminler, ilerleyen bölümlerde atık

miktarlarının hesaplanmasında temel girdi olarak kullanılmış ve biyogaz potansiyelinin ortaya konulmasında kritik bir rol üstlenmiştir.

Elde edilen nüfus projeksiyonları, çalışmanın temel verilerinden birini oluşturmaktadır. Bu veriler kullanılarak, Artvin’de ortaya çıkacak evsel katı atık miktarları belirlenmiş ve bu atıkların biyogaz üretim potansiyeli detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Böylelikle, hem atık yönetiminde yaşanan mevcut sorunlara çözüm önerileri getirilmesi hem de ilin enerji üretim kapasitesine katkı sağlayacak yenilenebilir kaynakların değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Metodun temel formülü şu şekildedir:

$$C = \left[\left(\left(\frac{N_{son}}{N_i} \right)^{\frac{1}{(t_{son}-t_i)}} - 1 \right) \right] \times 100 \quad (2)$$

C : Çoğalma katsayısı,

N_{son} : Son nüfus değeri,

N_i : İlk nüfus değeri,

t_{son} : N_{son} nüfusunun belirlendiği yıl,

t_i : N_i nüfusunun belirlendiği yıl

Bu kapsamda öncelikle çoğalma katsayıları hesap edilmiştir. Artış katsayısı 1’ den küçük bulunduğu takdirde nüfus artış katsayısı 1 olarak, artış katsayısı 1 ile 3 arasında bulunduğu takdirde nüfus artış katsayısı hesap edilen değer olarak, artış katsayısı 3’ ten büyük bulunduğu takdirde ise nüfus artış katsayısı 3 olarak kabul edilmektedir. Çoğalma katsayısı belirlendikten sonra, gelecekteki bir yıla ait nüfus tahmini aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$N_{gelecek} = N_{son} \times \left(1 + \frac{C_{ort}}{100} \right)^n \quad (3)$$

Burada;

N_{gelecek} : Hesaplanacak gelecek nüfusu,

N_{son} : Son sayım nüfusu,

t_{son} : N_{son} nüfusunun belirlendiği yıl,

$t_{gelecek}$: Ngelecek nüfusunun belirleneceği yıl,

n : İki nüfus sayımı arasında geçen süre ($t_{gelecek}-t_{son}$) yıl

olarak kabul edilmektedir.

2.2 LandGEM (Landfill Gas Emissions Model)

Katı atık düzenli depolama sahalarından kaynaklanabilecek ve hava kirliliğine neden olan gaz emisyonlarının tahmin edilmesine yönelik olarak geliştirilmiş bir modeldir. Model, atıkların bozunma sürecini birinci derece bozunma reaksiyonu esasına göre açıklamaktadır. Hesaplamalarda, düzenli depolama sahalarında oluşan depo gazının yaklaşık olarak % 50 metan (CH_4) ve % 50 karbondioksitten (CO_2) meydana geldiği varsayılmaktadır. Bununla birlikte, bu iki temel bileşenin yanı sıra, çok düşük konsantrasyonlarda bulunabilen diğer kirletici gaz türleri de model kapsamında dikkate alınmaktadır. Bu yönüyle LandGEM, hem sera gazı salımlarının hem de çevresel etkilerin tahmin edilmesinde yaygın olarak kullanılan güvenilir bir yöntem olma niteliği taşımaktadır (Atmaca, 2015).

Depolama sahasından kaynaklanan emisyonların tahmin edilebilmesi için aşağıdaki bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır.

- Depolama sahası kapasitesi,
- Depolanan yıllık atık miktarı veya depo alanında bulunan toplam atık miktarı,
- Metan üretim hızı, (k)
- Potansiyel metan üretim kapasitesi, (L_0)
- Depolama sahasının açıldığı yıl,
- Depolama sahasının tehlikeli atık bertarafı için de kullanılıp kullanılmadığı,

Modelde depo gazı oluşum hızı, birinci derece bozunma denkleminde dayandırılmaktadır. Düzenli depolama sahalarındaki atık miktarı, atığın yaşı ve bileşimine ilişkin mevcut verilerin sınırlı olması nedeniyle, daha karmaşık matematiksel yaklaşımların uygulanması tercih edilmemiştir. Bu bağlamda, LandGEM 'de gaz oluşumunun tahmini amacıyla kullanılan denklem aşağıda sunulmaktadır (Solak, 2015).

$$Q_{CH_4} = L_0 \cdot R \cdot (e^{-kc} - e^{-kt})$$

Q_{CH_4} : t anındaki metan üretim hızı ($m^3/yıl$)

L_0 : Potansiyel metan üretim kapasitesi (m^3 metan/ ton atık)

R : Depolanan yıllık atık miktarı (ton/yıl)

k : Metan üretim hızı sabiti ($yıl^{-1}$)

c : Saha kapatıldıktan sonraki yıl sayısı (yıl)

t : İlk atık depolanmaya başlamasından sonra geçen süre (yıl)

Model, karbondioksit (CO_2) ve metan (CH_4) emisyonlarının eşit oranlarda gerçekleştiğini varsaymakta olup, bu doğrultuda toplam depo gazı miktarının metan emisyonunun yaklaşık iki katı olduğu kabul edilmektedir. Düzenli depolama sahalarından kaynaklanan metan emisyonları, k ve L_0 parametrelerinin bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Burada k değeri; atığın nem içeriği, besin (nütrient) bileşimi, pH seviyesi ve sıcaklık koşulları gibi çevresel faktörlerin bir fonksiyonudur. L_0 parametresi ise depolama sahasında bulunan atık türüne bağlı olarak değişmektedir. Özellikle, atığın selüloz içeriğinin artması durumunda L_0 değeri de yükselmekte ve bu da depo gazı oluşum potansiyelini artırmaktadır (Solak, 2015).

Bu tez çalışmasında, Artvin ili için katı atıklardan kaynaklanan biyogaz potansiyelinin hesaplanmasında LandGEM (Landfill Gas Emission Model) metodu kullanılmıştır. Söz konusu model, düzenli depolama sahalarında oluşabilecek depo gazı emisyonlarının tahmin edilmesini sağlamaktadır. Çalışma kapsamında, 30 yıllık (2024 – 2054 yılları arası) bir projeksiyon dönemi esas alınarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Model Excel formatlı bir program şeklinde tasarlanmış ve parametrelerin kullanıcı tarafından kolayca girilebileceği bir veri giriş arayüzü oluşturulmuştur.

Modelde kullanılan temel parametreler aşağıdaki şekilde belirlenmiştir:

- L_0 (Metan oluşum potansiyeli): $170 m^3/Mg$
- k (Bozunma hızı sabiti): $0.05 yıl^{-1}$
- Metan oranı: %50

Veri giriş biçiminde; öncelikle düzenli depolama sahasına kabul edilen yıllık atık miktarları girilmiş, ardından yukarıda belirtilen model parametreleri kullanılarak gaz oluşum miktarları hesaplanmıştır. Model, her yıl için girilen atık miktarını, bozunma

katsayısı (k) ve metan oluşum potansiyeli (L_0) ile ilişkilendirerek yıllık ve kümülatif gaz üretim değerlerini tahmin etmektedir.

Atık bileşimi ve nem içeriği sabit kabul edilmiş, çevresel koşullardaki (sıcaklık, pH, nütrient içeriği) değişkenlikler hesaba katılmamıştır.



Bu bölümde, Artvin ilinde oluşan kentsel katı atıklar ve hayvansal gübre kaynaklı atıkların biyogaz potansiyeli, 2. Bölümde sunulan veriler ışığında detaylı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler, atık miktarları, biyogaz verimliliği ve enerji eşdeğerleri bağlamında analiz edilerek, bölgedeki mevcut ve potansiyel biyogaz üretim kapasitesi ortaya konmuştur. Ayrıca, sonuçlar ilgili literatürle karşılaştırılarak, Artvin ilinde biyogaz üretiminin çevresel ve ekonomik açıdan taşıdığı önem tartışılmıştır. Bu bağlamda, hem kentsel katı atıkların hem de hayvansal atıkların biyogaz üretimindeki katkıları ayrıntılı bir şekilde incelenmiş ve enerji geri kazanım potansiyelleri üzerine yorumlar yapılmıştır.

3.1 Evsel Katı Atıkların Biyogaz Potansiyeli

Katı atık düzenli depolama sahalarından elde edilebilecek enerji potansiyelinin değerlendirilmesinde en önemli parametre, sahada oluşabilecek metan gazı miktarının doğru ve güvenilir bir şekilde hesaplanmasıdır. Metan gazı üretimi, depolama sahasına bertaraf edilen atığın miktarı, bileşimi, nem içeriği, organik madde oranı gibi fiziksel ve kimyasal özelliklerine doğrudan bağlıdır. Bununla birlikte, deponi sahasının tasarımı, gaz toplama ve taşıma sistemlerinin etkinliği, saha işletme koşulları ve bölgesel iklimsel faktörlerde metan üretimini önemli ölçüde etkilemektedir.

Evsel katı atıklardan biyogaz üretimi üzerine kapsamlı bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Yapılan incelemeler neticesinde, bu alanda çok sayıda bilimsel çalışmanın yürütüldüğü ve çeşitli biyogaz tesislerinin kurularak enerji üretimine başladığı belirlenmiştir. Bu bağlamda, Artvin ili özelinde kentsel katı atıkların biyogaz üretim potansiyelinin hesaplanmasına yönelik yapılan çalışmaların bulguları ve elde edilen veriler esas alınmıştır.

Bu çalışma kapsamında, Artvin ili için İller Bankası nüfus projeksiyon yöntemi kullanılarak 2024–2054 yılları arasındaki nüfus tahminleri gerçekleştirilmiştir. Nüfus

projeksiyonu doğrultusunda, Türkiye İstatistik Kurumu'nun (TÜİK) 2022 yılı verilerine göre belediyeler tarafından toplanan kişi başına düşen günlük ortalama evsel katı atık miktarının 1,03 kg olduğu kabul edilerek, söz konusu 30 yıllık dönem boyunca oluşabilecek toplam atık miktarları hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen hesaplamalar sonucunda elde edilen yıllık atık miktarlarına ilişkin veriler Tablo 3.1 'de sunulmaktadır.

Tablo 3.1 Artvin iline ait 2024 – 2054 yılları arasında oluşan/oluşabilecek atık miktarı.

Yıl	Nüfus	Kişi başı günlük ortalama atık miktarı (kg/gün-kişi)	Toplanan Atık Miktarı (ton/yıl)	Organik Atık Miktarı (ton/yıl)
2024	169.280	1,03	63.640,82	30.814,88
2025	171.392	1,03	64.434,72	31.199,29
2026	173.461	1,03	65.212,54	31.575,91
2027	175.484	1,03	65.973,38	31.944,31
2028	177.460	1,03	66.716,11	32.303,94
2029	179.387	1,03	67.440,38	32.654,63
2030	181.262	1,03	68.145,44	32.996,02
2031	183.083	1,03	68.830,18	33.327,58
2032	184.849	1,03	69.493,87	33.648,93
2033	186.557	1,03	70.136,15	33.959,92
2034	188.206	1,03	70.755,90	34.260,01
2035	189.793	1,03	71.352,78	34.549,02
2036	191.317	1,03	71.925,67	34.826,41
2037	192.776	1,03	72.474,23	35.092,02
2038	194.169	1,03	72.997,73	35.345,50
2039	195.494	1,03	73.495,81	35.586,67
2040	196.749	1,03	73.967,76	35.815,19
2041	197.933	1,03	74.412,84	36.030,70
2042	199.044	1,03	74.830,71	36.233,03
2043	200.082	1,03	75.220,65	36.421,84
2044	201.045	1,03	75.582,68	36.597,14

Tablo 3.1 (devamı)

2045	201.931	1,03	75.916,10	36.758,57
2046	202.740	1,03	76.220,17	36.905,81
2047	203.471	1,03	76.494,93	37.038,85
2048	204.123	1,03	76.740,05	37.157,53
2049	204.695	1,03	76.955,17	37.261,69
2050	205.187	1,03	77.139,96	37.425,98
2051	205.598	1,03	77.294,46	37.485,95
2052	205.927	1,03	77.418,31	37.530,92
2053	206.174	1,03	77.511,19	37.560,91
2054	206.339	1,03	77.573,14	30.814,88

Yukarıdaki tabloda, Artvin ili için 30 yıllık dönem boyunca nüfus projeksiyonu, kişi başı günlük atık miktarı, yıllık toplanan atık miktarı ve atık bileşimi içerisindeki mutfak atıkları oranı dikkate alınmıştır. Nüfus projeksiyonuna göre artan nüfusla birlikte toplam atık miktarının da yıllar içerisinde artış gösterdiği belirlenmiştir. 2022 yılı verileri esas alınarak, kişi başına düşen günlük atık miktarı sabit kabul edilmiştir. Toplam atık miktarı ise, nüfus projeksiyonları doğrultusunda nüfus artışına orantılı olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, DOKAP (Doğu Karadeniz Projesi Bölge Kalkınma İdaresi) verileri doğrultusunda, evsel katı atıkların %48,42'sini mutfak atıkları oluşturmaktadır. Bu oran, biyogaz potansiyeli hesaplamalarında temel girdi olarak kullanılmıştır.

Veriler incelendiğinde, 2024 yılında 169.280 kişi olan nüfusun, 2054 yılında 206.339 kişiye ulaşacağı öngörülmektedir. Nüfus artışına paralel olarak, yıllık toplanan atık miktarı da 63.640 ton/yıl'dan 77.573 ton/yıl'a yükselmektedir. Organik atık miktarı ise aynı dönemde 30.815 ton/yıl'dan 37.561 ton/yıl'a yükselmiştir.

Nüfus artışına paralel olarak toplam atık miktarının ve mutfak atıkları miktarının da düzenli olarak arttığı görülmektedir. Organik atık miktarındaki artış, biyogaz potansiyelinin yıllar içerisinde önemli ölçüde yükseleceğini göstermektedir. 2024–2054 dönemi sonunda, organik atık miktarındaki yaklaşık %22'lik artış, Artvin ili için sürdürülebilir atık yönetimi ve enerji geri kazanımı açısından dikkate değer bir potansiyel sunmaktadır. Bu durum, uzun vadede düzenli depolama sahalarının kapasite planlaması

açısından önem taşımakta ve aynı zamanda biyogaz üretim potansiyelinin yıllara göre artış göstereceğini ortaya koymaktadır.

2024–2054 yıllarına ilişkin elde edilen nüfus ve atık miktarı verileri, LandGEM (Landfill Gas Emissions Model) yazılımına sayısal veri girişi yapılarak modellenmiş ve bu doğrultuda 2054 yılına kadar oluşabilecek toplam biyogaz hacmi tahmin edilmeye çalışılmıştır. Yapılan modelleme sonucunda elde edilen yıllık biyogaz üretim miktarlarına ilişkin veriler Şekil 3.1 ‘de gösterilmiştir. Ayrıca oluşacak biyogaz ve metan miktarları Tablo 3.2 ‘de sunulmuştur.

RESULTS										
		Landfill Name or Identifier: Artvin İli Düzenli Katık Atık Alanı								
Closure Year (with 80-year limit) = 2054		Please choose a third unit of measure to represent all of the emission rates below.								
Methane = 50 % by volume		User-specified Unit: short tons/year								
Year	Waste Accepted		Waste-In-Place		Total landfill gas			Methane		
	(Mg/year)	(short tons/year)	(Mg)	(short tons)	(Mg/year)	(m ³ /year)	(short tons/year)	(Mg/year)	(m ³ /year)	(short tons/year)
2024	30.814	33.966	0	0	0	0	0	0	0	0
2025	31.199	34.391	30.814	33.966	6.398E+02	5.122E+05	7.053E+02	1.709E+02	2.561E+05	1.883E+02
2026	31.575	34.805	62.013	68.357	1.256E+03	1.006E+06	1.385E+03	3.355E+02	5.029E+05	3.699E+02
2027	31.944	35.212	93.588	103.162	1.851E+03	1.482E+06	2.040E+03	4.943E+02	7.409E+05	5.448E+02
2028	32.303	35.608	125.532	138.374	2.424E+03	1.940E+06	2.672E+03	6.473E+02	9.702E+05	7.135E+02
2029	32.654	35.995	157.835	173.982	2.976E+03	2.383E+06	3.281E+03	7.948E+02	1.191E+06	8.762E+02
2030	32.996	36.371	190.489	209.976	3.509E+03	2.809E+06	3.868E+03	9.372E+02	1.405E+06	1.033E+03
2031	33.327	36.736	223.485	246.348	4.023E+03	3.221E+06	4.435E+03	1.074E+03	1.610E+06	1.184E+03
2032	33.648	37.090	256.812	283.084	4.519E+03	3.618E+06	4.981E+03	1.207E+03	1.809E+06	1.330E+03
2033	33.959	37.433	290.460	320.174	4.997E+03	4.001E+06	5.508E+03	1.335E+03	2.000E+06	1.471E+03
2034	34.260	37.765	324.419	357.607	5.458E+03	4.370E+06	6.017E+03	1.458E+03	2.185E+06	1.607E+03
2035	34.549	38.083	358.679	395.372	5.904E+03	4.727E+06	6.508E+03	1.577E+03	2.363E+06	1.738E+03
2036	34.826	38.389	393.228	433.455	6.333E+03	5.070E+06	6.981E+03	1.691E+03	2.535E+06	1.864E+03
2037	35.092	38.682	428.054	471.844	6.747E+03	5.402E+06	7.438E+03	1.802E+03	2.701E+06	1.986E+03
2038	35.345	38.961	463.146	510.526	7.147E+03	5.722E+06	7.878E+03	1.909E+03	2.861E+06	2.104E+03
2039	35.586	39.226	498.491	549.487	7.532E+03	6.030E+06	8.303E+03	2.012E+03	3.015E+06	2.217E+03
2040	35.815	39.479	534.077	588.713	7.904E+03	6.328E+06	8.712E+03	2.111E+03	3.164E+06	2.327E+03
2041	36.030	39.716	569.892	628.192	8.262E+03	6.615E+06	9.107E+03	2.206E+03	3.307E+06	2.432E+03
2042	36.233	39.940	605.922	667.908	8.607E+03	6.891E+06	9.488E+03	2.299E+03	3.445E+06	2.534E+03
2043	36.421	40.147	642.155	707.847	8.940E+03	7.157E+06	9.854E+03	2.387E+03	3.579E+06	2.632E+03
2044	36.597	40.341	678.576	747.994	9.260E+03	7.414E+06	1.021E+04	2.473E+03	3.707E+06	2.726E+03
2045	36.758	40.518	715.173	788.335	9.568E+03	7.660E+06	1.055E+04	2.555E+03	3.830E+06	2.817E+03
2046	36.905	40.680	751.931	828.854	9.865E+03	7.898E+06	1.087E+04	2.635E+03	3.949E+06	2.904E+03
2047	37.038	40.827	788.836	869.534	1.015E+04	8.126E+06	1.119E+04	2.711E+03	4.063E+06	2.988E+03
2048	37.157	40.958	825.874	910.361	1.042E+04	8.346E+06	1.149E+04	2.784E+03	4.173E+06	3.069E+03
2049	37.261	41.073	863.031	951.319	1.069E+04	8.556E+06	1.178E+04	2.854E+03	4.278E+06	3.146E+03
2050	37.351	41.172	900.292	992.392	1.094E+04	8.758E+06	1.206E+04	2.922E+03	4.379E+06	3.220E+03
2051	37.425	41.254	937.643	1.033.564	1.118E+04	8.952E+06	1.233E+04	2.986E+03	4.476E+06	3.292E+03
2052	37.485	41.320	975.068	1.074.817	1.141E+04	9.138E+06	1.258E+04	3.048E+03	4.569E+06	3.360E+03
2053	37.530	41.369	1.012.553	1.116.137	1.163E+04	9.315E+06	1.283E+04	3.107E+03	4.658E+06	3.425E+03
2054	37.560	41.402	1.050.083	1.157.506	1.185E+04	9.485E+06	1.306E+04	3.164E+03	4.742E+06	3.487E+03

Şekil 3. 1 LandGEM sonuç rapor bölümü.

Tablo 3.2 Artvin ili yıllara göre biyogaz miktarları

Yıl	Organik Atık Miktarı (ton/yıl)	Biyogaz Miktarı (m ³ /yıl)	Enerji Eşdeğeri (kWh/ m ³)	Net Enerji Potansiyeli (kWh/yıl)
2024	30.814	0	4,7	0
2025	31.199	512.236	4,7	2.407.510
2026	31.575	1.005.890	4,7	4.727.684
2027	31.944	1.481.719	4,7	6.964.079
2028	32.303	1.940.475	4,7	9.120.233
2029	32.654	2.382.826	4,7	11.199.280
2030	32.996	2.809.437	4,7	13.204.354
2031	33.327	3.220.928	4,7	15.138.360
2032	33.648	3.617.852	4,7	17.003.905
2033	33.959	4.000.754	4,7	18.803.546
2034	34.260	4.370.152	4,7	20.539.715
2035	34.549	4.726.538	4,7	22.214.729
2036	34.826	5.070.347	4,7	23.830.630
2037	35.092	5.401.993	4,7	25.389.365
2038	35.345	5.721.886	4,7	26.892.862
2039	35.586	6.030.383	4,7	28.342.800
2040	35.815	6.327.841	4,7	29.740.853
2041	36.030	6.614.599	4,7	31.088.614
2042	36.233	6.890.945	4,7	32.387.442
2043	36.421	7.157.189	4,7	33.638.786
2044	36.597	7.413.572	4,7	34.843.790
2045	36.758	7.660.378	4,7	36.003.776
2046	36.905	7.897.823	4,7	37.119.767
2047	37.038	8.126.131	4,7	38.192.817
2048	37.157	8.345.516	4,7	39.223.924
2049	37.261	8.556.179	4,7	40.214.041
2050	37.351	8.758.297	4,7	41.163.995
2051	37.425	8.952.054	4,7	42.074.652
2052	37.485	9.137.591	4,7	42.946.676
2053	37.530	9.315.076	4,7	43.780.859
2054	37.560	9.484.654	4,7	44.577.875
TOPLAM	1.087.660	172.931.260		812.776.921

Yapılan literatür incelemeleri sonucunda, Şenol ve ark. (2017) tarafından gerçekleştirilen “Biyogaz Üretimi İçin Ankara’nın Başlıca Organik Atık Kaynakları” başlıklı çalışma ile Aşçı (2018) tarafından gerçekleştirilen “Hatay İli Biyogaz Enerjisi Potansiyelinin İncelenmesi” konulu çalışmada belirtilen kabuller doğrultusunda; 1 m³ biyogazın enerji eşdeğerinin 4.7 kWh olduğu kabul edilmiştir.

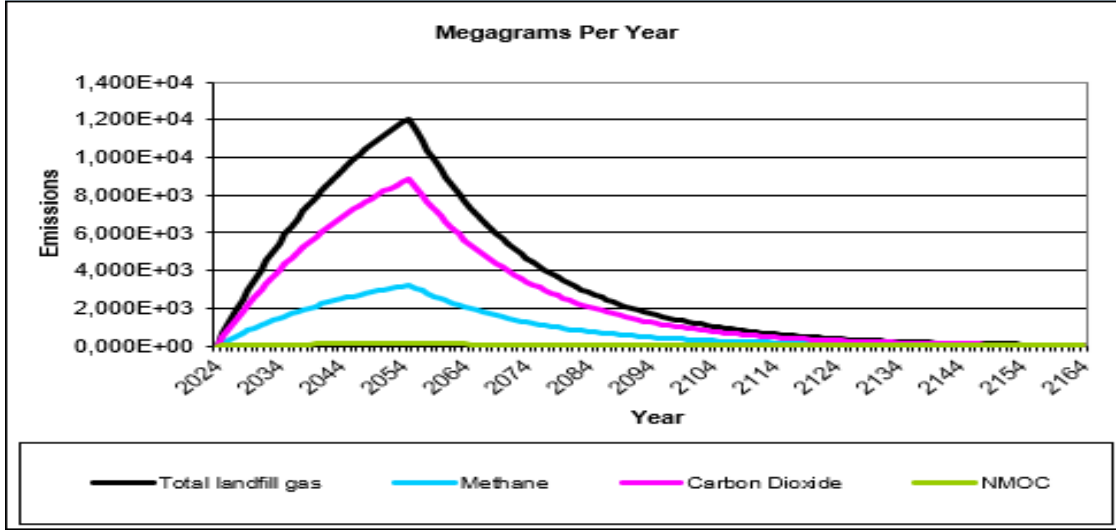
Artvin ili için yapılan projeksiyonda, 2024–2054 yılları arasındaki organik atık miktarı, biyogaz üretim potansiyeli, enerji eşdeğeri ve net enerji potansiyeli hesaplanmıştır (Tablo 3.2). Sonuçlar, nüfus artışına bağlı olarak organik atık miktarında düzenli bir artış eğilimi olduğunu göstermektedir. 2024 yılında yaklaşık 30.814 ton/yıl olan organik atık miktarı, 2054 yılına gelindiğinde 37.560 ton/yıl seviyesine ulaşmaktadır. Bu artış, atık yönetimi stratejilerinde uzun vadeli planlamanın önemini ortaya koymaktadır.

Biyogaz üretimi açısından değerlendirildiğinde, 2025 yılında yaklaşık 512.236 m³/yıl biyogaz üretimi öngörülürken, bu değer 2054 yılında 9.484.654 m³/yıl seviyesine yükselmektedir. Çalışma dönemi sonunda, toplam biyogaz üretim potansiyeli 172.931.260 m³ olarak hesaplanmıştır.

Enerji eşdeğeri bakımından, modelde 1 m³ biyogaz için 4,7 kWh enerji karşılığı dikkate alınmıştır. Buna göre, 2025 yılında 2.407.510 kWh net enerji potansiyeli öngörülürken, bu değer yıllar içerisinde artarak 2054 yılında 44.577.875 kWh/yıl seviyesine ulaşmaktadır. 30 yıllık dönem sonunda, toplam net enerji potansiyeli 812.776.921 kWh olarak hesaplanmıştır.

Artvin ilinde organik atıkların biyogaza dönüştürülmesi, uzun vadede kayda değer bir enerji üretim potansiyeli sunmaktadır. Biyogaz üretim kapasitesinin yıllara göre artışı, nüfus artışı ve buna bağlı atık miktarı artışıyla doğrudan ilişkilidir. 30 yıllık dönemde elde edilebilecek 812 milyon kWh net enerji, fosil yakıt tüketiminin azaltılmasına katkı sağlayabilecek önemli bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Bu miktar, özellikle bölgesel ölçekte elektrik üretiminde ve ısınma amaçlı enerji ihtiyacının karşılanmasında değerlendirilebilir.

LandGEM program tarafından katı atık sahasında oluşabilecek biyogaz miktarının zamansal değişimi Şekil 3.2 'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 2 LandGEM grafik sonuç ekranı.

3.2 Hayvansal Atıkların Biyogaz Potansiyeli

Bu çalışmada, literatürde yer alan bilimsel yöntemler ile daha önce gerçekleştirilmiş benzer analizler doğrultusunda, Artvin ilinde oluşan hayvansal atıklardan elde edilebilecek biyogaz potansiyeli hesaplanmıştır. Biyogaz potansiyelinin belirlenmesinde temel veri kaynağı olarak Enerji Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanmış olan Biyokütle Enerjisi Potansiyel Atlası (BEPA)’ndan kullanılan veriler esas alınmıştır. Söz konusu atlas aracılığıyla ulaşılan hayvansal atık miktarları kullanılarak, yapılan çalışmalar sonucu bulunan değerlerin ortalaması alındığında Artvin ili için teorik biyogaz üretim kapasitesi hesaplanmış ve Artvin ili özelinde mevcut biyokütle kaynaklarının enerji üretimi açısından taşıdığı potansiyel ortaya konulmuştur.

Şenol ve ark. (2017) tarafından yapılan “Biyogaz Üretimi İçin Ankara ‘nın Başlıca Organik Atık Kaynakları” isimli çalışmada Ankara ilinde hayvansal, ayrıştırılmış evsel (mutfak) ve tarımsal atıklar ile atık su arıtma tesisi çamurları dikkate alınarak bu atıklardan biyogaz üretim miktarı belirlenmiştir. Hayvansal atıklardan elde edilebilecek biyogaz değerleri Tablo 3.3’de verilmiştir.

Öbekcan (2014) tarafından yapılan “Çorum İlinin Biyogaz Potansiyelinin Araştırılması” konulu çalışmasında hayvansal atıklardan da oluşabilecek biyogaz potansiyeli üzerine de hesaplamalar yapılmıştır. 2014 – 2039 yılları arasını kapsayan bu çalışma ile Çorum ili Merkez ilçesi için 2014 yılı verileri esas alınarak yapılan hesaplamalar sonucunda, toplam

94.658 ton hayvansal katı atıktan yaklaşık 18.931.500 m³ biyogaz üretilbileceği öngörülmüştür. 2039 yılına yönelik projeksiyonlarda, canlı hayvan sayısındaki değişimlerin kesin olarak belirlenememesi nedeniyle, söz konusu yılda hayvansal atıklardan üretilbilecek biyogaz miktarının 2014 yılı ile aynı düzeyde kalacağı varsayılmıştır. Bu kabul, ileriye dönük enerji potansiyeli hesaplamalarında temel alındığı belirtilmiştir. Hayvansal atıklardan elde edilen tahmini biyogaz miktarı Tablo 3.4 ‘de verilmiştir (Öbekcan, 2014).

Tablo 3.3 Ankara ili hayvansal atıklarının biyogaz miktarı

Hayvan türü	Yaş gübre miktarı (ton/yıl)	Hayvan sayısı	Atık miktarı (ton/yıl)	Biyogaz Eşdeğeri (m ³ /ton)	Toplam biyogaz (m ³ /yıl)
Büyükbaş	3,6	365.033	1.314.118	33	43.365.920
Küçükbaş	0,7	1.185.304	829.713	58	48.123.342
Kanatlı	0,022	4.862.862	106.983	78	8.344.671

Tablo 3.4 Çorum ilinde 2014 yılı hayvansal atıklarının biyogaz miktarı

Hayvan türü	Hayvan sayısı	Yaş atık üretimi (ton/yıl)	Kuru atık miktarı (ton.KM/yıl)	Biyogaz üretimi (m ³ /yıl)
Büyükbaş	50.720	510.953	51.095	10.219.000
Küçükbaş	34.472	40.892	1.595	318.960
Kanatlı	4.887.900	142.727	41.968	8.393.540
Toplam	4.973.092	694.572	94.658	18.931.500

Mermerkaya (2023) tarafından yapılan “Yozgat İli Hayvansal Atık Kaynaklı Biyogaz Potansiyelinin Belirlenmesi” çalışmasında, Yozgat ilindeki hayvansal atıklardan üretilbilecek biyogaz potansiyeli incelenmiştir. Araştırmada kullanılan veriler, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) ile Tarım ve Orman Bakanlığı kaynaklarından temin edilmiştir. 2021 yılı itibarıyla Yozgat ilinde 242.653 adet büyükbaş, 456.097 adet küçükbaş ve 630.725 adet kanatlı hayvan mevcuttur. Söz konusu hayvan varlığından yıllık yaklaşık 2,83 milyon ton yaş hayvansal atık oluştuğu tahmin edilmektedir. Bu atıklar, hayvancılık işletmeleri açısından önemli çevresel ve yönetimsel sorunlar oluşturmaktadır. Atıkların çevreye zarar vermeden değerlendirilmesi açısından biyogaz üretimi, sürdürülebilir ve çevre dostu bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. 2021 yılı verileri esas alınarak yapılan

hesaplamalar sonucunda, Yozgat ilinde hayvansal atıklardan yıllık yaklaşık 40,7 milyon metreküp biyogaz üretilebileceği öngörülmüştür.

Çalışmada, günlük yaş atık miktarları, büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvanlar için sırasıyla 27 kg/gün, 2,5 kg/gün ve 0,1 kg/gün olarak alınmıştır. Hayvanların barınakta kalma sürelerine göre atığın elde edilebilirlik oranları; büyükbaş hayvanlar için %50, küçükbaş hayvanlar için %13 ve kümes hayvanları için %99 olarak alınmıştır. Hesaplamalarda 1 ton katı hayvansal atıktan yaklaşık 200 m³ biyogaz elde edildiği kabul edilmiştir. Biyogazdan elektrik üretimi hesaplamalarında, biyogazın metan oranı %60 olarak alınmıştır. Metanın enerji değeri 9,97 kWh/m³, kojenerasyon sisteminde elektrik üretiminde verim ise % 40 kabul edilmektedir (Mermerkaya, 2023). Bahse konu hayvansal atıklardan üretilen biyogaz potansiyelleri Tablo 3.5 ‘de verilmiştir.

Tablo 3.5 Yozgat ili hayvansal atıklarının biyogaz miktarları

Hayvan Türü	Adet	Yaş atık miktarı (ton/yıl)	Toplanabilir atık miktarı (ton/yıl)	Biyogaz miktarı (m ³ /yıl)
Büyükbaş	242.653	2.391.345	179.350	35.870.175
Küçükbaş	456.097	416.189	16.231	3.246.274
Kanatlı	630.725	23.021	7.977	1.595.355
Toplam	1.329.475	2.830.555	203.558	40.711.804

Aşçı (2018) tarafından yapılan “Hatay İli Biyogaz Enerjisi Potansiyelinin İncelenmesi” başlıklı çalışmada, Hatay ilinde biyogaz enerjisi üretmek için hayvansal atıkların potansiyeli değerlendirilmiştir. Bölgedeki hayvan sayıları kullanılarak elde edilebilecek biyogaz değerleri Tablo 3.6 ‘da verilmiştir.

Tablo 3.6 Hatay iline ait hayvan atıklarının biyogaz miktarları

Hayvan Türü	Adet	Atık miktarı (ton/yıl)	Biyogaz miktarı (m ³ /yıl)
Büyükbaş	134.016	951.628	29.657.172
Küçükbaş	490.440	440.525	20.664.664
Kanatlı	684.796	23.664	1.834.937
Toplam	1.309.252	1.415.818	52.156.774

Temel Oflaz (2023) tarafından yapılan “İzmir İli Biyogaz Potansiyeli ve Türkiye Ekonomisine Katkısı” adlı çalışmada, bitkisel atık ve hayvansal atık miktarlarından yola

çıkılarak hesaplamalar yapılmıştır. İzmir ‘de toplam 12.836,649 ton/yıl hayvansal atık oluştuğu, oluşan atığın kuru madde miktarının 1.291.163 ton/yıl olduğu ve biyogaz potansiyelinin ise 258.232,60 m³/yıl olduğu bulunmuştur. Bu çalışmada atık miktarları; büyükbaş için 10 – 20 kg/gün küçükbaş için 2 kg/gün, ve kanatlı hayvanlar için ise 0,008 – 0,1 kg/gün olarak kabul edilmiştir (Temel Oflaz, 2023). İzmir ili hayvansal atıktan biyogaz potansiyelini belirleme çalışması aşağıdaki Tablo 3.7 ‘de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Tablo 3.7 İzmir ili hayvansal atıklarının biyogaz miktarı

Hayvan Türü	Adet	Atık miktarı (ton/yıl)	Kuru atık miktarı (ton.KM/yıl)	Biyogaz miktarı (m ³ /yıl)
Büyükbaş	785.608	10.753.009	806.475	161.295.000
Küçükbaş	1.057.099	771.682	30.095	6.019.000
Kanatlı	20.786.985	1.311.958	454.593	90.918.600
Toplam	22.629.692	12.836.649	1.291.163	258.232.600

Hayvansal atıkların biyogaz potansiyeli konusunda yapılan literatür aşamasında, Ankara, Çorum, Yozgat, Hatay ve İzmir illerini kapsayan çalışmalar incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Elde edilen biyogaz potansiyelleri Tablo 3.8’da sunulmaktadır.

Şenol ve ark. (2017) tarafından gerçekleştirilen “Biyogaz Üretimi İçin Ankara’nın Başlıca Organik Atık Kaynakları” başlıklı çalışmada sunulan yöntem ve hesaplama esasları temel alınarak, Artvin ilinde hayvansal atıklardan elde edilebilecek biyogaz potansiyeli tahmin edilmiştir. Bu kapsamda, büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvan varlıklarına ilişkin güncel sayısal veriler doğrultusunda yapılan hesaplamalar sonucunda; büyükbaş hayvan atıklarından yıllık yaklaşık 14.634.147 m³, küçükbaş hayvan atıklarından 7.878.604 m³ ve kanatlı hayvan atıklarından ise 106.080 m³ biyogaz üretililebileceği öngörülmüştür. Büyükbaş hayvan atıkları açısından Ankara, yaklaşık 43,3 milyon m³/yıl biyogaz üretim potansiyeline sahiptir. Bu değer, Artvin’deki 14,6 milyon m³/yıl üretim potansiyelinden yaklaşık 3 kat daha fazladır. Küçükbaş hayvan atıkları için Ankara’nın potansiyeli 48,1 milyon m³/yıl, Artvin’in ise 7,9 milyon m³/yıl olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, Ankara’nın küçükbaş atıklardan elde edilebilecek biyogaz kapasitesinin Artvin’in yaklaşık 6 katı olduğunu göstermektedir. Kanatlı hayvan atıkları açısından ise fark çok daha belirgindir. Ankara’da potansiyel 8,3 milyon m³/yıl iken,

Artvin’de bu değer yalnızca 106 bin m³/yıl düzeyindedir. Bu da yaklaşık 80 katlık bir fark anlamına gelmektedir.

Tablo 3.8 Hayvansal atıkların değerlendirildiği çalışmalar

Çalışma	Hayvan	Atık miktarı (ton/yıl)	Biyogaz miktarı (m ³ /yıl)
Ankara (Şenol ve ark., 2017)	Büyükbaş	1.314.118	43.365.920
	Küçükbaş	829.713	48.123.342
	Kanatlı	106.983	8.344.671
Çorum (Öbekcan, 2014)	Büyükbaş	51.095	10.219.000
	Küçükbaş	1.595	318.960
	Kanatlı	41.968	8.393.540
Yozgat (Mermerkaya, 2023)	Büyükbaş	2.391.345	35.870.175
	Küçükbaş	416.189	3.246.274
	Kanatlı	23.021	1.595.355
Hatay (Aşçı, 2018)	Büyükbaş	951.628	29.657.172
	Küçükbaş	440.525	20.664.664
	Kanatlı	23.664	1.834.937
İzmir (Oflaz, 2023)	Büyükbaş	10753009	161.295.000
	Küçükbaş	771.682	6.019.000
	Kanatlı	1.311.958	90.918.600

Genel olarak değerlendirildiğinde, Ankara ilinin toplam hayvansal atıklardan biyogaz üretim kapasitesi, Artvin’e kıyasla oldukça yüksektir. Bu durum, Ankara’daki hayvan varlığının sayıca fazla olması ve özellikle küçükbaş hayvan popülasyonunun yüksekliği ile açıklanabilir. Ancak, Artvin’in sahip olduğu biyogaz potansiyeli de bölgesel ölçekte enerji üretimine katkı sağlayabilecek önemli bir kapasiteyi temsil etmektedir.

Öbekcan (2014) tarafından gerçekleştirilen “Çorum İlinin Biyogaz Potansiyelinin Araştırılması” başlıklı çalışmada, 2014 yılına ait veriler esas alınarak il genelinde oluşan hayvansal atıklardan üretilebilecek biyogaz miktarı hesaplanmıştır. Bu çalışma temel alınarak yapılan projeksiyonla, Artvin ilindeki hayvansal atıklardan elde edilebilecek biyogaz potansiyeli tahmin edilmiştir. Buna göre, büyükbaş hayvan atıklarından yıllık

yaklaşık 9.756.200 m³, küçükbaş hayvan atıklarından 1.059.600 m³ ve kanatlı hayvan atıklarından ise 80.000 m³ biyogaz üretilebileceği öngörülmektedir. Büyükbaş hayvan atıklarında; Çorum’da 10.219.000 m³, Artvin’de 9.756.200 m³ olduğundan Çorum % 4,7 daha yüksektir. Küçükbaş hayvan atıklarında; Çorum 318.960 m³, Artvin 1.059.600 m³ olduğundan Artvin yaklaşık 3,3 kat daha fazla potansiyel içerir. Kanatlı hayvan atıklarında; Çorum 8.393.540 m³, Artvin 80.000 m³ olduğundan Çorum yaklaşık 105 kat daha yüksek potansiyel sunuyor. Çorum’da nüfus ve arazi yoğunluğu biyogaz üretim altyapısı için daha avantajlıdır. Artvin dağlık yapısı, atık toplama ve tesis kurulumu açısından sınırlayıcı bir coğrafyaya sahiptir.

Mermerkaya (2023) tarafından gerçekleştirilen “Yozgat İli Hayvansal Atık Kaynaklı Biyogaz Potansiyelinin Belirlenmesi” başlıklı çalışmada, hayvansal atıklardan elde edilebilecek biyogaz miktarlarının hesaplanmasında kullanılan yöntemler temel alınarak, Artvin ili için biyogaz potansiyeli tahmin edilmiştir. İlgili hesaplamalar kapsamında, Artvin ilindeki büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvan sayısına dayalı olarak, büyükbaş hayvan atıklarından elde edilebilecek biyogaz miktarı 6.651.885 m³/yıl, küçükbaş hayvan atıklarından elde edilebilecek biyogaz miktarı 1.059.600 m³/yıl ve kanatlı hayvan atıklarından elde edilebilecek biyogaz miktarı 95.200 m³/yıl’dır. Toplam biyogaz potansiyeli açısından Yozgat ili 40.711.804 m³/yıl ile Artvin’in 7.806.685 m³/yıl’lık potansiyelinin yaklaşık 5,2 katı olarak hesaplanmıştır. Türler özelinde incelendiğinde, büyükbaş potansiyelinde Yozgat Artvin’in yaklaşık 5,4 katı, küçükbaşta yaklaşık 3,1 katı ve kanatlıda yaklaşık 16,8 katı potansiyel sunmaktadır. Sayısal veriler ve coğrafî-demografik koşullar göz önüne alındığında, Yozgat ili hayvansal atık kaynaklı biyogaz üretimi açısından Artvin’e kıyasla çok daha yüksek bir potansiyele sahiptir. Artvin için yapılan hesaplamalarda Yozgat yöntemi kullanılmış olmasına rağmen, dağlık arazi yapısı ve düşük nüfus yoğunluğu nedeniyle toplam potansiyel Yozgat’ın gerisinde kalmaktadır. Bu sonuçlar, biyogaz üretim planlamalarında her ilin coğrafî, demografik ve yönetsel özelliklerinin dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Aşçı (2018) tarafından gerçekleştirilen “Hatay İli Biyogaz Enerjisi Potansiyelinin İncelenmesi” konulu çalışmada bölgedeki hayvan sayılarından yola çıkılarak biyogaz miktarı hesaplanmıştır. Bu çalışma esas alınarak Artvin ili için bulunan biyogaz miktarları büyükbaş hayvanlar için 14.634.147 m³/yıl, küçükbaş hayvanlar için 7.878.604 m³/yıl ve kanatlı hayvanlar için 106.080 m³/yıl olarak hesaplanmıştır. Toplam biyogaz potansiyeli açısından Hatay ili 52.156.773 m³/yıl ile Artvin’in 22.618.831 m³/yıl’lık potansiyelinin

yaklaşık 2,3 katı olarak hesaplanmıştır. Türler özelinde incelendiğinde, büyükbaş potansiyelinde Hatay Artvin'in yaklaşık 2,03 katı, küçükbaşta yaklaşık 2,62 katı ve kanatlıda yaklaşık 17,3 katı potansiyel sunmaktadır. Hatay ili, Akdeniz Bölgesi'nde yer almakta olup, geniş ve düz tarım arazilerine sahiptir. Bu durum büyükbaş ve küçükbaş hayvancılık ile kanatlı üretimi için elverişli bir ortam sağlamaktadır. Artvin ise Karadeniz Bölgesi'nde dağlık ve engebeli bir coğrafyaya sahip olup, hayvancılık faaliyetleri sınırlı alanlarda ve daha çok küçük ölçekli işletmeler üzerinden yürütülmektedir. Bu coğrafi farklar, biyogaz üretim potansiyelinin toplam miktarı ve dağılımı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır.

Temel Oflaz (2023) tarafından gerçekleştirilen “İzmir İli Biyogaz Potansiyeli ve Türkiye Ekonomisine Katkısı” adlı çalışmada İzmir ilinde oluşan hayvansal atıktan biyogaz verimi hesaplanmıştır. Çalışmada izlenilen yöntem üzerinden gidilerek Artvin iline ait büyükbaş hayvanlardan 6.651.885 m³/yıl, küçükbaş hayvanlardan 1.059.536 m³/yıl ve kanatlı hayvanlardan ise 94.112 m³/yıl biyogaz veriminin elde edileceği öngörülmüştür. Toplam biyogaz potansiyeli açısından İzmir ili 258.232.600 m³/yıl ile Artvin'in 7.805.533 m³/yıl'lık potansiyelinin yaklaşık 33 katı olarak hesaplanmıştır. Sayısal veriler ve coğrafi-demografik koşullar dikkate alındığında, İzmir ili hayvansal atık kaynaklı biyogaz üretimi açısından Artvin'e kıyasla çok daha yüksek bir potansiyele sahiptir. Özellikle büyükbaş ve kanatlı hayvancılık, İzmir'in toplam biyogaz potansiyelini belirleyen ana etkenlerdir. Artvin'de yapılan hesaplamalar aynı yöntem esas alınarak gerçekleştirilmiş olsa da, coğrafi ve demografik sınırlamalar nedeniyle toplam potansiyel İzmir'in oldukça gerisinde kalmaktadır. Bu durum, biyogaz üretim planlamalarında ilin coğrafi, demografik ve altyapısal özelliklerinin dikkate alınmasının önemini ortaya koymaktadır.

Enerji potansiyeli için Şenol ve ark. (2017) tarafından gerçekleştirilen “Biyogaz Üretimi İçin Ankara'nın Başlıca Organik Atık Kaynakları” başlıklı çalışma ile Aşçı (2018) tarafından gerçekleştirilen “Hatay İli Biyogaz Enerjisi Potansiyelinin İncelenmesi” konulu çalışmada belirtilen kabuller doğrultusunda, Artvin ili için yapılan biyogaz potansiyeli ve enerji potansiyelleri Tablo 3.9 'da sunulmaktadır.

Tablo 3.9 Artvin ili 2024 yılına ait hayvansal atıklardan elde edilen biyogaz potansiyeli ve enerji potansiyeli

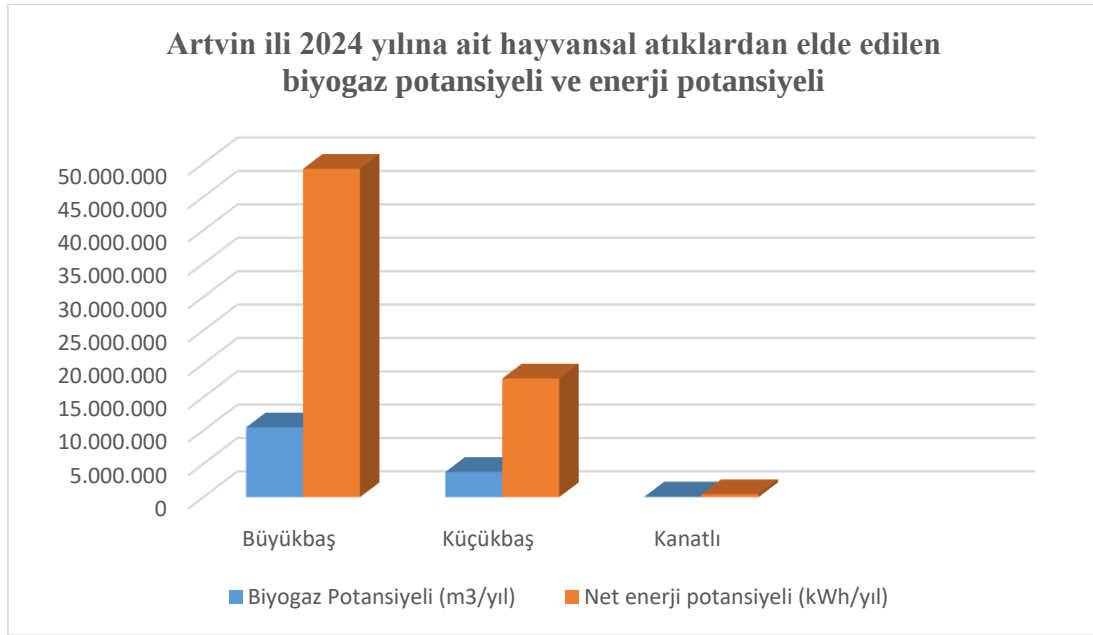
Hayvan Türü	Adet	Atık miktarı (ton/yıl)	Biyogaz potansiyeli (m ³ /yıl)	Enerji eşdeğeri (kWh/m ³)	Net enerji potansiyeli (kWh/yıl)
Büyükbaş	61.826	443.459	10.465.653	4,7	49.188.568
Küçükbaş	129.794	135.838	3.787.189	4,7	17.799.787
Kanatlı	24.935	1.360	96.294	4,7	452.584
Toplam	216.555	580.657	14.349.136		67.440.939

Tablo incelendiğinde, Artvin ilinde farklı hayvan türlerinden elde edilebilecek biyogaz ve enerji potansiyeli ayrıntılı bir şekilde ortaya konulmuştur. Büyükbaş hayvanlar, toplam 61.826 adet ile ilin hayvansal varlığında önemli bir paya sahip olup, yıllık 443.459 ton atık üretmektedir. Bu atıklardan tahmini olarak 10.465.653 m³ biyogaz elde edilebileceği ve bu biyogazın enerji eşdeğerinin 4,7 kWh/m³ olduğu göz önünde bulundurulduğunda, büyükbaş hayvan atıklarından yıllık yaklaşık 49.188.568 kWh net enerji üretilebileceği hesaplanmıştır.

Küçükbaş hayvanlar, sayıca daha fazla olmasına rağmen (129.794 adet), kişi başına düşen atık miktarının büyükbaşlara göre daha düşük olması nedeniyle toplam biyogaz potansiyeli 3.787.189 m³ olarak belirlenmiştir. Bu biyogazın enerjiye dönüştürülmesiyle elde edilebilecek net enerji miktarı 17.799.787 kWh civarındadır.

Kanatlı hayvanların biyogaz ve enerji potansiyeli ise diğer hayvan türlerine kıyasla oldukça sınırlıdır. 24.935 kanatlıdan yılda yalnızca 1.360 ton atık oluşmakta ve bu atıklardan 96.294 m³ biyogaz üretilebilmektedir. Enerji eşdeğeri hesaplandığında net enerji potansiyeli 452.584 kWh olarak belirlenmiştir.

Toplamda, ilin hayvansal atıklarından elde edilebilecek biyogaz miktarı 14.349.136 m³ ve net enerji potansiyeli 67.440.939 kWh'dir. Bu değerler, özellikle büyükbaş ve küçükbaş hayvanların biyogaz üretiminde kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, elde edilecek enerji miktarının yerel enerji ihtiyacının bir kısmını karşılayabilecek potansiyele sahip olduğu ve sürdürülebilir enerji üretimi açısından değerlendirilmesi gerektiği söylenebilir.



Şekil 3. 3 Artvin ili 2024 yılına ait hayvansal atıklardan elde edilen biyogaz potansiyeli ve enerji potansiyeli.

Bu bağlamda, hayvansal atıkların biyogaz üretimi yoluyla enerjiye dönüştürülmesi, hem çevresel atık yönetimi açısından hem de yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması açısından stratejik öneme sahiptir. Özellikle büyükbaş ve küçükbaş hayvan varlığı yüksek olan bölgelerde biyogaz tesislerinin kurulumu ekonomik ve çevresel açıdan olumlu sonuçlar doğurabilir.

Artvin ilinde hayvansal atıklardan elde edilebilecek biyogaz potansiyelinin hesaplanmasında, canlı hayvan sayısında gelecekte meydana gelebilecek artış veya azalışların kesin olarak öngörülememesi nedeniyle, 2024 yılına ait mevcut veriler referans alınmış ve izleyen yıllarda da aynı miktarda atık üretiminin devam ettiği kabul edilmiştir.

2024 yılı itibarıyla büyükbaş hayvanlardan yıllık 443.459 ton, küçükbaş hayvanlardan 135.838 ton ve kanatlılardan 1.360 ton atık oluşmaktadır. Bu değerler, büyükbaş hayvanların hem bireysel olarak ürettiği atık miktarının yüksekliği hem de toplam sayı açısından ön plana çıktığını göstermektedir. 2054 yılına kadar birikimli atık miktarı açısından da büyükbaş hayvanlar 13.303.770 ton ile en yüksek paya sahiptir; küçükbaş hayvanlar 4.075.140 ton, kanatlılar ise 40.800 ton olarak öngörülmüştür.

Tablo 3.10 2024 – 2054 yılları arasında hayvansal atıktan oluşabilecek tahmini biyogaz miktarı

Hayvan Türü	2024 Yılı Atık Miktarı (ton/yıl)	2054 Yılına Kadar Oluşabilecek Toplam Atık Miktarı (ton)	2054 Yılına Kadar Oluşabilecek Toplam Biyogaz Potansiyeli (m ³)	Enerji Eşdeğeri (kWh/m ³)	2054 Yılına Kadar Elde Edilen Net Enerji Potansiyeli (kWh)
Büyükbaş	443.459	13.303.770	399.113.100	4,7	1.875.831.570
Küçükbaş	135.838	4.075.140	122.254.200	4,7	574.594.740
Kanatlı	1.360	40.800	1.224.000	4,7	5.752.800
Toplam	580.657	17.419.710	522.591.300		2.456.179.110

Atık miktarlarına paralel olarak, büyükbaş hayvanlardan 2054 yılına kadar 399.113.100 m³ biyogaz üretilbileceği hesaplanmıştır. Küçükbaş hayvanlardan 122.254.200 m³, kanatlılardan ise 1.224.000 m³ biyogaz elde edilebilecektir. Biyogaz üretim potansiyeli açısından büyükbaş hayvanlar toplam potansiyelin yaklaşık %76,4'ünü, küçükbaşlar %23,4'ünü ve kanatlılar ise sadece %0,2'sini temsil etmektedir. Bu, enerji üretimi stratejilerinin özellikle büyükbaş hayvan atıkları üzerinde yoğunlaşması gerektiğini göstermektedir.

Biyogazın enerji eşdeğeri 4,7 kWh/m³ olarak sabit kabul edilmiştir. Buna göre, 2054 yılına kadar elde edilebilecek toplam net enerji potansiyeli büyükbaş hayvanlar için 1.875.831.570 kWh, küçükbaş hayvanlar için 574.594.740 kWh ve kanatlılar için 5.752.800 kWh olarak hesaplanmıştır. Toplamda ise 2.456.179.110 kWh enerji potansiyeli öngörülmektedir. Bu değer, Artvin ilinde hayvansal atıkların biyogaz yoluyla enerji üretimi açısından kayda değer bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

4 SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde dünya genelinde ve ülkemizde artan nüfus ile birlikte değişen tüketim alışkanlıkları, evsel katı atıkların miktarını sürekli olarak artırmakta ve bu durum, atık yönetimi açısından önemli bir çevresel sorun oluşturmaktadır. Ekoloji üzerindeki olumsuz etkilerin oluşmaması amacıyla, geçmiş deneyimlerden yararlanılarak geliştirilen mevzuat çerçevesinde, evsel katı atıkların bertarafı belirli standartlara uygun olarak gerçekleştirilmelidir. Atıkların bertarafı, ülkelerin coğrafi, ekonomik ve iklimsel koşullarına bağlı olarak farklılık göstermekte olup, en yaygın uygulanan yöntem düzenli depolamadır. Temel olarak atıkların belirlenmiş alanlarda kontrollü bir şekilde depolanmasını esas alan bu yöntem, uygun şekilde yönetilmediği takdirde uygulandığı bölgede hava, su ve toprak kirliliği gibi çeşitli çevresel sorunlara yol açabilmektedir.

Doğal kaynakların hızla tükenmesi ve küresel ölçekte enerji talebinin giderek artması, katı atık düzenli depolama sahalarında oluşan depo gazlarının yalnızca çevresel kirleticiler etkileri açısından değil, aynı zamanda enerji üretimi potansiyeli bakımından da değerlendirilmesini gündeme getirmiştir. Özellikle metan gazı içeriği yüksek olan bu gazlar, gelişen teknoloji sayesinde alternatif bir enerji kaynağı olarak değerlendirilmeye başlanmıştır. Bu bağlamda, Artvin ili sınırları içerisinde olabilecek katı atık düzenli depolama sahasında oluşabilecek metan gazı potansiyeli dikkate alınarak, elektrik üretimine yönelik tesislerin kurulması çevresel ve ekonomik açıdan önemli fırsatlar sunmaktadır. Söz konusu tesisler, sera gazı emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlarken, uygun şekilde tasarlanıp etkin biçimde işletildikleri takdirde bölgesel ölçekte ekonomik fayda sağlayabilecek enerji üretim birimleri haline gelebilirler.

Bu çalışma kapsamında, Artvin ili sınırları içerisinde oluşan evsel katı atıklar ile hayvansal kökenli organik atıklar, biyogaz üretim potansiyelleri açısından değerlendirilmiştir. Çalışmada, ilgili atık türlerinin miktarları, içerikleri ve organik madde oranları dikkate alınarak enerji üretimine uygunlukları analiz edilmiş; elde edilen veriler

doğrultusunda söz konusu atıkların biyogaz üretiminde kullanılabilirliği ortaya konulmuştur.

Artvin iline ait evsel katı atık verileri incelendiğinde, Türkiye İstatistik Kurumu'nun 2022 yılına ait istatistiklerine göre belediyeler tarafından toplanan kişi başına düşen günlük ortalama evsel katı atık miktarının 1,03 kg/gün olduğu tespit edilmiştir. 2024–2054 yılları arasındaki toplam evsel katı atık miktarının projeksiyonu yapılırken söz konusu değer referans alınarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Artvin ilinde 2024 – 2054 yılları arasında atık miktarının 63.641 ton/yıl değerinden 77.574 ton/yıl değerine ulaşması öngörülmektedir.

DOKAP tarafından 2017 yılında yapılan atık karakterizasyonu çalışmasında Artvin ili evsel katı atıklarının % 48,42 kadarının organik özellikte olduğu tespit edilmiştir. İlde kurulabilecek düzenli depolama sahasından oluşacak biyogaz miktarı, atık miktarı projeksiyonu ve atık karakterizasyonu çalışmalarından elde edilen veriler kullanılarak farklı modelleme yöntemleri ile belirlenebilir. Tüm modellerde, depolanacak atığın özellikleri ortak bir temel girdi olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, atığın organik karbon içeriği ve parçalanma katsayıları değerlerinin yanı sıra sıcaklık, yağış miktarı, gibi farklı parametreler, oluşması öngörülen depo gazı miktarını belirleyen temel etmenlerdir. Bu çalışmada Artvin ili için 2024 – 2054 yılları arasında oluşabilecek biyogaz miktarı LandGEM modeli ile hesaplanmıştır. Elde edilen biyogaz miktarı 357.151.046 m³ 'tür.

Artvin ilinde hayvansal atıklardan elde edilebilecek biyogaz potansiyelinin belirlenmesinde, canlı hayvan varlığında ilerleyen yıllarda meydana gelebilecek artış ya da azalışların net bir şekilde tahmin edilememesi nedeniyle, 2024 yılına ait güncel veriler esas alınmıştır. Hesaplamalarda, bu yıl için tespit edilen atık miktarının gelecek yıllarda da sabit kalacağı varsayımıyla hareket edilmiştir. 2054 yılına kadar ulaşılacak tahmini toplam biyogaz miktarı 522.591.300 m³ olarak bulunmuştur. 1 m³ biyogazın enerji eşdeğerinin 4.7 kWh olduğu kabul edilerek 2054 yılına kadar elde edilen net enerji potansiyeli 2.456.179.110 kWh olarak hesaplanmıştır.

Artvin ili ve çevresinde üretilecek biyogazın en önemli çevresel katkılarından biri, hayvansal atıklardan kaynaklanan çevre kirliliğinin azaltılmasına olanak sağlamasıdır. Özellikle yumurta üretimi gerçekleştiren işletmelerin yoğun olduğu bölgelerde karşılaşılan koku problemlerinin en aza indirilmesinde biyogaz üretim süreçlerinin önemli bir rol üstlenmesi beklenmektedir.

Düzenli depolama sahalarında organik içerikli atıklardan biyogaz oluşumu, hidroliz, asit oluşumu ve metan oluşumu olmak üzere üç temel biyolojik aşamada gerçekleşmektedir. Bu süreçlerde farklı mikroorganizma grupları görev almakta olup, söz konusu mikroorganizmaların etkinliğini sürdürebilmeleri için anaerobik koşulların sağlanması büyük önem arz etmektedir. Anaerobik ortamın sürekliliği ve etkin bir şekilde sağlanabilmesi, düzenli depolama sahasının uygun şekilde işletilmesi ile doğrudan ilişkilidir.

Ayrıca, geri dönüştürülebilir nitelikteki atıkların kaynağında ayrı toplanarak düzenli depolama sahalarına yönlendirilmemesi, sadece alan kullanımının optimizasyonu açısından değil, aynı zamanda sahada kalan organik atıkların daha uygun koşullarda ve daha hızlı şekilde ayrışmalarına katkı sağlayan anaerobik koşulların oluşması açısından da önemlidir.

Gaz toplama sistemlerinin verimliliğini artırmak amacıyla, gaz toplama kuyuları çevresinde ve bağlantı borularında meydana gelebilecek kaçak noktalarının geçirimsiz malzemelerle kapatılması suretiyle gaz sızıntısının engellenmesi gerekmektedir. Aynı zamanda, sızıntı suyu drenaj sisteminin etkin şekilde çalıştırılması ve bu suların bağlantı borularına karışmasının önlenmesi, gaz taşıma kapasitesini olumsuz yönde etkileyecek durumların önüne geçmektedir. Sızıntı suyunun geri devir sistemi ile sahaya yeniden verilmesi ise mikrobiyal faaliyetlerin artırılması açısından fayda sağlamakta ve bu sayede gaz üretim verimini kayda değer şekilde yükseltmektedir.

Yapılan analizler sonucunda, ilin sahip olduğu organik atık miktarının, enerji üretimi açısından belirli bir potansiyel sunduğu ortaya konmuştur. Ancak biyogaz üretiminde kullanılacak olan anaerobik sindirim sistemlerinin yatırım ve işletme maliyetlerinin oldukça yüksek olmasından dolayı küçük ölçekli yerleşimlerde ekonomik uygulanabilirliği sınırlamaktadır.

Artvin'in engebeli, dağlık ve ulaşım açısından zorlu coğrafi yapısı, biyogaz tesislerinin kurulumu, bakım ve işletme süreçlerinde ek zorluklar oluşturmaktadır. Tesislerin kurulacağı alanlara ulaşım, altyapı eksiklikleri ve iklim koşullarının sertliği, düzenli işletmeyi güçleştirmektedir. Bu bağlamda, tesislerin sürdürülebilirliği açısından lojistik planlama ve bakım maliyetleri dikkate alınmalıdır.

Bunun yanı sıra, Artvin'in "barajlar şehri" olarak anılması, enerji altyapısı ve su kaynakları yönünden önemli fırsatlar sunarken aynı zamanda bazı sınırlılıklar da

getirmektedir. Baraj gölleri, bölgedeki hidroelektrik enerji üretiminde öncelikli olarak değerlendirildiğinden, biyogaz tesislerinin enerji entegrasyonu planlanırken mevcut enerji sistemleri ile uyum gözetilmelidir. Ayrıca, baraj göllerine yakın bölgelerde kurulacak biyogaz tesislerinde çevresel riskler (sızıntı, olası taşkınlar vb.) dikkate alınmalı ve gerekli önlemler alınmalıdır.

Sonuç olarak, Artvin ilinde biyogaz üretimi potansiyeli bulunmakla birlikte, yatırım ve işletme maliyetlerinin yüksekliği, coğrafi koşulların zorluğu ve mevcut enerji altyapısının (hidroelektrik barajlar) baskınlığı dikkate alınmalıdır. Bu kapsamda şu öneriler sunulmaktadır:

- Anaerobik sindirim sistemlerinin yüksek maliyetini azaltmaya yönelik olarak, bölgesel ölçekte ortak kullanım tesisleri planlanabilir.
- Artvin'in coğrafi koşullarına uygun, küçük ölçekli ve modüler biyogaz tesisleri tercih edilerek bakım ve işletme kolaylaştırılabilir.
- Baraj gölleri ve hidroelektrik altyapısı ile biyogaz tesisleri arasında entegre enerji yönetimi sağlanarak, enerji çeşitliliği artırılabilir.
- Çevresel riskleri en aza indirmek için biyogaz tesisleri kurulmadan önce detaylı jeoteknik ve hidrolojik analizler yapılmalıdır.
- Yerel yönetimler, yatırımcılar ve çiftçiler arasında iş birliği sağlanarak ekonomik sürdürülebilirlik desteklenmelidir.

Bu doğrultuda, Artvin'de biyogaz potansiyelinin değerlendirilmesi hem çevresel fayda sağlayacak hem de yenilenebilir enerji üretimine katkıda bulunacaktır. Ancak uygulamada, teknik, ekonomik ve coğrafi kısıtların dikkate alınması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdula, A. M. (2019). Katı atık yönetimi: Evsel atıklarda gana batı gonja bölgesi analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara.
- Acun, S. (2014). Entegre katı atık yönetiminde biyoreaktör depolama alanı yaklaşımı – İstanbul örneği, Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
- Aktaş, M. (2019). Biyogaz üretiminde enerji maliyetinin saptanması, Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Anonim (2012). Aydın İli Biyogaz Potansiyeli Fizibilite Çalışma Raporu.
- Aras, P. (2016). Artvin (merkez) entegre katı atık yönetimi, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Arıkan, B. (2008). Organik evsel atıklardan anaerobik ortamda biyogaz üretiminin verimliliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Aslanlı, Ş. (2009). Hayvansal atıklardan biyogaz üretimi üzerine çeşitli bor bileşiklerinin etkinliğinin araştırılması, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.
- Aşçı, M. F. (2018). Hatay ili biyogaz enerjisi potansiyelinin incelenmesi, İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
- Atmaca, K. (2015). Samsun katı atık düzenli depolama sahası deponi gazı enerji verimliliğinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Buğutekin, A. (2007). Atıklardan biyogaz üretiminin incelenmesi, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ceyhan, Ö. (2022). Evsel ve yemekhane atıklarından biyogaz üretimine işletim koşulların etkisinin yapay sinir ağları ile incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Cihansar, İ. (2022). Biyogazdan enerji üretiminin çevresel etkilerinin yaşam döngüsü değerlendirmesi yöntemiyle belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Eskişehir.
- Coşkun, M. C. (2015). Evsel atıktan enerji üretimi – Gaziantep örneği, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- ÇŞİDB (2022). Artvin ili 2022 yılı çevre durum raporu, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Ankara.
- Demir, E. C. (2023). Türkiye ‘deki katı atık depolama alanlarının durumu ve depolimerizasyon sistemlerinin uygulanabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2023.

- Demirarslan K.O., Başak S. (2018). Doğu Karadeniz Bölgesi illeri katı atık Yönetimi, Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi, 1(3), 117 – 132.
- Dereli, C. (2012). Plazma gazlaştırma teknolojisi ile katı atık bertarafı, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- DOKAP (2017). Düzenli depolama alanları için yer tespiti çalışması ve alternatif katı atık bertaraf sistemleri araştırma projesi, Doğu Karadeniz Projesi Bölge Kalkınma İdaresi Başkanlığı (DOKAP) Çevre ve Turizm Koordinatörlüğü, Trabzon.
- Ekinci, Ö. (2019). Türkiye ‘de katı atık yönetimi uygulamaları ve kırsal alandaki yansımaları; Tokat Merkez İlçe örneği, Yüksek Lisans Tezi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat.
- Garan, S. (2016). Evsel katı atıklardan biyogaz üretiminde termal ve kimyasal önışlemlerin etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Gelengeç, Z. (2020). Erzincan katı atık düzenli depolama sahası deponi gazı ölçülmesi ve deponi gazdan enerji üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
- Gödel, R. (2019). Entegre katı atık yönetimi; İnegöl örneği, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Görmüş, C. (2018). Türkiye ‘deki hayvan gübrelerinin biyogaz enerji potansiyelinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Güler, N. (2008). Kentleşme sürecinde katı atık yönetimi ve Kocaeli örneği, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kocaeli.
- Gültekin, U. (2021). Balıkesir Büyükşehir Belediyesi evsel atıklarının projeksiyonu ve biyogaz potansiyelinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Kaya, M. (2024). Kentsel atıkların enerji potansiyeli – Artvin örneği, Yüksek Lisans Tezi, Artvin Çoruh Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Artvin.
- Kaynarca, H. (2023). Sarıcakaya İlçesinin güneş ve biyogaz enerji potansiyelinin değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Eskişehir.
- Karaca, D. (2022). Evsel katı atıkların biyometanizasyon yöntemi kullanılarak değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- Kılınçel, M. (2018). Bir kentsel katı atık termal işleme tesisinin yakıt üretim ve enerji verimliliğinin araştırılması, Doktora Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.
- Mermerkaya, E. (2023). Yozgat ili hayvansal atık kaynaklı biyogaz potansiyelinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Tokat.
- Mohamed, A. A. M. (2017). Evsel atıklardan elde edilen enerji üretimi ve Isparta örneği, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

- Nalkıran, M. (2019). Rize ili atık yönetimi, evsel katı atık karakterizasyonunu ve alternatif bertaraf yöntemlerinin değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Öbekcan, H. (2014). Çorum ilinin biyogaz üretim potansiyelinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Öçal, F. (2013). Biyogaz enerjisi üretimi ve Eskişehir ili için uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Özkaya, S. (2020). Ordu ili atık yönetimi, evsel katı atık karakterizasyonu ve alternatif bertaraf yöntemlerinin değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Öztuncay, M. K. (2009). Türkiye 'de biyogaz enerjisinin kullanılabilirliği ve ekonomikliği, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Savaş, A. Ö. (2018). Organik atıkların kullanıldığı 1000 başlık bir biyogaz tesisinin projelendirilerek imalat ve üretim maliyet analizlerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Saraç, A. O. (2015). Evsel atık değerlendirme tesisi enerji – ekonomi analizi ve Kocaeli ili için uygulama, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Saz, S. (2021). Muğla ili biyogaz potansiyelinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla.
- Solak, O. (2015). Türkiye 'deli katı atık deponi alanlarında oluşan gazın çevresel ve ekonomik açıdan incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ankara.
- Şenol, H., Elibol, E.A., Açık, Ü. ve Şenol, M. (2017). Biyogaz üretimi için Ankara'nın başlıca organik atık kaynakları, Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 6(2), 15-28.
- Tarakcı, H. (2018). Katı atıkların termal yöntemlerle etkisiz hale getirilmesi ve Trabzon – Rize örneği, Yüksek Lisans Tezi, Avrasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Temel Oflaz, A. (2023). İzmir ili biyogaz potansiyeli ve Türkiye ekonomisine katkısı, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bursa.
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), İl, İlçe ve Köy Nüfusları ve yıllık nüfus artış hızı (binde), <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?locale=tr> , Erişim Tarihi: 12 Mart 2025.
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), Belediyeler tarafından toplanan kişi başı günlük atık miktarı, <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?locale=tr> , Erişim Tarihi: 25 Mart 2025.
- Uçar, Ö. (2022). Artvin ili katı atık toplama taşıma sisteminin optimizasyonu ve geri kazanım uygulamaları, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Samsun.
- URL-1. [https://tr.wikipedia.org/wiki/Artvin_\(il\)](https://tr.wikipedia.org/wiki/Artvin_(il)) (10 Mart 2025, 14:20).
- URL-2. <https://bepa.enerji.gov.tr> (03 Haziran 2025, 10:00).

- Üçok, S. (2016). Sebze ve meyve pazar atıklarının biyogaz üretim potansiyelinin belirlenmesi üzerine bir araştırma, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Zarifi, A. F. (2022). Nevşehir ilinde katı atık yönetimi ve sıfır atık projesi uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.



İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

Türkan POLAT_Son Benzerlik Sonuç Raporu

ORJİNALLIK RAPORU

% 17	% 14	% 6	% 7
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	% 3
2	Submitted to Artvin Āoruh Āniversitesi Öğrenci Ödevi	% 3
3	www.dokap.gov.tr İnternet Kaynağı	% 1
4	docplayer.biz.tr İnternet Kaynağı	% 1
5	openaccess.ogu.edu.tr:8080 İnternet Kaynağı	% 1
6	dspace.balikesir.edu.tr İnternet Kaynağı	<% 1
7	dergipark.org.tr İnternet Kaynağı	<% 1
8	www.scribd.com İnternet Kaynağı	<% 1
9	9lib.net İnternet Kaynağı	<% 1