

**T.C.
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TÜRKİYE'DE DEPO GAZINDAN ENERJİ ELDESİ ve
ADANA İLİ ÖRNEĞİ**

**Tezi Hazırlayan
Belfin ŞAHİN**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Seval ARAS**

**Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

**Eylül 2021
NEVŞEHİR**

TEZ BİLDİRİM SAYFASI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada yer alan bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu ve bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.



Belfin ŞAHİN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmam süresince tüm bilgilerimi benimle paylaşmaktan kaçınmayan, her türlü konuda desteğini benden esirgemeyen ve tezimde büyük emeği olan, aynı zamanda kişilik olarak da bana çok şey katan Sayın Hocam Doç. Dr. Seval ARAS'a,

Maddi ve manevi olarak her zaman desteklerini hissettiren değerli AİLEME,

Desteklerinden dolayı Psk. Dan. Seray FUŐKIRAN ve Tufan KOÇYİĞİT'e,

Teknik ve idari yardımlarından dolayı Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Rektörlüğü'ne, Mühendislik Fakültesi Dekanlığı'na ve Çevre Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'na teşekkür ederim.

**TÜRKİYE’DE DEPO GAZINDAN ENERJİ ELDESİ ve
ADANA İLİ ÖRNEĞİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Belfin ŞAHİN

**NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EYLÜL 2021

ÖZET

Dünya’da ve ülkemizde zaman içinde nüfusun artmasıyla birlikte enerjiye olan ihtiyaç da artmaktadır. Bununla birlikte alternatif enerji kaynaklarına yönelim zorunlu bir durum haline gelmiştir. Nüfus artışı sebebiyle ciddi oranda bir katı atık problemiyle karşı karşıya kalınmıştır. Atıkların toplanıp geri kazanılması önemli bir mesele haline gelmiştir. Toplanmayan katı atıklardaki kimyasal maddeler, yayabileceği kötü kokular ve sızıntı sularının toprağa karışması gibi durumlar çevreye ciddi ölçüde zarar vermektedir.

Bu çalışmada LandGEM V302 matematiksel hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Model sabitleri, literatür bilgileri kullanılarak belirlenmiştir. Adana ili düzenli depolama alanına dökülen yaklaşık 7.810.662 ton katı atıktan kaynaklanabilecek elektrik enerjisi ve metan potansiyelinin belirlenebilmesi amacıyla matematiksel modelleme çalışması yapılmıştır. Tesisin kapanış yılı olan 2026’da 14.420.666 kW’s elektrik enerjisi elde edilebileceği tespit edilmiştir. 2020’den 2026 yılına kadar elektrik üretim miktarında %521,5’lik bir artış yaşanmıştır. Katı atıklar sebebiyle meydana gelen çevre sorunları ve artan enerji talebi göz önünde bulundurulduğunda, katı atıklar yok edilirken aynı zamanda enerji üretilmesi, bu sorunların çözülmesi için en iyi yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır.

Anahtar kelimeler: Depo gazı, metan, yenilenebilir enerji

Tez Danışman: Doç. Dr. Seval ARAS

Sayfa Adeti: 79

**ENERGY RECOVERY FROM LANDFILL GAS IN TURKEY; EXAMPLE OF
ADANA**

(M. Sc. Thesis)

BELFİN ŞAHİN

**UNIVERSITY OF NEVSEHIR HACI BEKTAS VELI
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

SEPTEMBER 2021

ABSTRACT

The need for energy increases with the increase of the population in the world and in our country over time. However, orientation to alternative energy sources has become a necessity. Due to population growth, a serious solid waste problem has been encountered. Collecting and recycling waste has become an important issue. Conditions such as the chemicals in the uncollected solid waste, the bad odors it may emit, and the mixing of the leachate into the soil cause serious damage to the environment.

In this study, LandGEM V302 mathematical calculation method was used in the study. Model constants are determined using literature information. A mathematical model study was carried out in order to determine the electrical energy and methane potential that may arise from approximately 7.810.662 tons of solid waste dumped in the sanitary landfill in Adana. It has been determined that 14.420.666 kWh electrical energy can be obtained in 2026, the closing year. From 2020 to 2026, there was an increase of 521,5%. Considering the environmental problems caused by garbage and the increasing energy demand, generating energy while eliminating garbage appears to be the best method to solve these problems.

Key words: Landfill gas, methane, renewable energy

Thesis Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Seval ARAS

Page Number: 79

İÇİNDEKİLER

ONAY.....	i
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
TABLolar DİZİNİ.....	xi
RESİMLER LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	xiii
1. BÖLÜM.....	1
GİRİŞ.....	1
2. BÖLÜM.....	3
GENEL BİLGİLER.....	3
2.1. Katı Atık.....	3
2.1.1. Kentsel Katı Atıklar.....	4
2.2. Entegre Katı Atık Yönetimi.....	5
2.2.1. Düzenli Depolama.....	5
2.2.1.1. Düzenli depolamada ayrışma prosesleri.....	7
2.2.1.2. Düzenli depolamada atıkların anaerobik ayrışması.....	8
a. Hidroliz.....	9
b. Asit oluşturma.....	9
c. Metan oluşturma.....	10
2.2.2. Depo Gazı Bileşenleri ve Özellikleri.....	10
2.3. Depo Gazı Oluşumu.....	13
2.3.1. Depo Gazı Oluşum Evreleri.....	14
a. Başlangıç (aerobik) evresi.....	15
b. Geçiş evresi.....	15
c. Anaerobik metanojenik kararsız evre (asit oluşma).....	15
d. Metanojenik kararlı evre (Metan oluşumu).....	16
e. Aerobik şartlara geçiş fazı (Olgunluk).....	16
2.3.2. Depo Gazında Fazların Süresi.....	16
2.3.3. Depo Gazı Oluşumunu Etkileyen Faktörler.....	18
a. Nem içeriği.....	18
b. pH ve alkalinite.....	19
c. Sıcaklık.....	20
d. Dane boyutu.....	21
e. İnhibitörler.....	21

f. Oksijen.....	22
g. Hidrojen.....	23
h. Nütrientler.....	23
i. Sülfat.....	23
2.3.4. Depo Gazının Çevreye Olan Etkileri	24
a. Depo gazlarının bitki örtüsüne zararları	25
b. İstenmeyen kokular.....	25
c. Yangın ve patlama tehlikesi.....	26
d. Küresel ısınma	26
e. Hava kirliliği.....	27
f. Yeraltı suyu kirliliği.....	28
2.3.5. Depo Gazının Hareketi Ve Taşınması.....	28
2.3.6. Depo Gazının Toplanması ve Kontrolü	29
2.3.7. Depo Gazı Miktarının Hesaplanması.....	33
1. Test kuyuları metodu	33
2. Substratların ayrışma denklemi ile hesaplama.....	34
3. Yaklaşık tahmin metodu	34
4. Depo gazı oluşumunun matematiksel modellenmesi.....	34
a. Tabasaran/Rettenberger modeli	35
b. Scholl Canyon modeli.....	35
c. United States Environmental Protection Agency (USEPA) LandGEM modeli.....	36
2.3.8. Depo Gazının Kullanılması.....	37
a. Bölgesel gaz kullanımı.....	38
b. Elektrik üretimi	38
2.4. Depo Gazından Enerji Üretilmesi	42
2.4.1. Türkiye’de Depo Gazından Enerji Üretimi.....	42
2.4.2. Depo Gazı Kullanımının Ekonomik Faydaları	43
2.4.3. Türkiye’de Depo Gazından Enerji Üretimine Yönelik Örnek Tesisler	44
a. Mamak Çöplüğü Biyogaz Tesisi	44
b. Sivas Biyokütle Enerji Üretim Tesisi	44
c. İstanbul Odayeri Çöp Gazı Santrali	44
d. Samsun Avdan Biyogaz Elektrik Santrali	45
e. Hamitler Çöplüğü Biyogaz Santrali.....	45
2.5. Literatür Taraması.....	45
3. BÖLÜM.....	48

MATERYAL VE METOD	48
3.1. Adana İli Tanıtımı	48
3.2. Adana Entegre Katı Atık Bertaraf Tesisi Tanıtımı	49
3.3. Atık Karakterizasyonu ve Miktarına Yönelik Bilgiler	50
3.4. Adana İli Depo Gazı Tesisi Tanıtımı	53
3.5. LandGEM Programı ile Metan Gazının Belirlenmesi	57
4. BÖLÜM	58
BULGULAR VE TARTIŞMA	58
4.1. Adana İli Depo Gazı Modelleme Çalışmasına Yönelik Değerlerin Hesaplanması	58
4.1.1. Nüfus Tahmini	58
4.1.2. Tahmini Katı Atık Miktarı	61
4.2. Depo Sahası Gaz Emisyonları Modeli (LandGEM) ile Oluşacak Metan Gazının Tahmini	62
4.3. Adana İli İçin Depo Gazından Elektrik Enerjisi Üretimi	63
5. BÖLÜM	70
SONUÇ VE ÖNERİ	70
KAYNAKÇA	73

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Düzenli depolama sahası kesiti.....	6
Şekil 2.2.	Düzenli depolama sahası kesit görünüşü.....	7
Şekil 2.3.	Organik maddelerin anaerobik ayrışma süreci.....	9
Şekil 2.4.	Metan fermantasyonu prensibi.....	10
Şekil 2.5.	Evsel atık için toplama sistemli gaz üretimi modeli.....	14
Şekil 2.6.	Gaz oluşumu sırasında görülen fazlar ve depo gazlarının zamana bağlı değişimi.....	14
Şekil 2.7.	Gaz miktarının zaman içerisindeki tipik değişimi.....	17
Şekil 2.8.	Gaz oluşumunu etkileyen faktörler.....	18
Şekil 2.9.	Nem içeriği ile gazın üretim hızı arasındaki ilişki.....	19
Şekil 2.10.	Anaerobik bir filtrede pH'ın rölatif CH ₄ oluşum hızı (R) üzerine etkisi.....	20
Şekil 2.11.	Bazı substratların CO ₂ 'in kısmi basıncına bağlı ayrışma oranları.....	22
Şekil 2.12.	Depo sahalarında SO ₄ ²⁻ ile depo gazı bileşimi arasındaki ilişki.....	24
Şekil 2.13.	Sera gazları konsantrasyonunda tarihsel gelişimi.....	27
Şekil 2.14.	Depo gazı toplanması için pasif gaz tahliye sistemleri.....	29
Şekil 2.15.	(a) Dikey kuyuyla gaz toplama ve geri kazanma sistemi (b) dikey aktif gaz toplama sistemi borusu.....	32
Şekil 2.16.	Yatay gaz toplama sistemi kesiti.....	33
Şekil 2.17.	Depo gazından enerji üretim sistemi.....	38
Şekil 3.1.	Adana il haritası.....	49
Şekil 3.2.	İlçeler bazında atık oranları.....	50
Şekil 3.3.	Adana ilinde 2018 yılı itibariyle katı atık kompozisyonu.....	51
Şekil 3.4.	Proses akış diyagramı.....	53
Şekil 3.5.	Yıllara göre elektrik üretimi.....	56

Şekil 4.1. Gelecek yıllara ait tahmini elektrik üretim miktarlarının grafiksel gösterimi.....	68
Şekil 4.2. Yıllara göre %'lik artış	68



TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1.	Depo gazının özellikleri ve gazda bulunan bileşenler	11
Tablo 2.2.	Metan oluşum evrelerinin yıllara göre dağılımı	17
Tablo 2.3.	EPA modeli parametreleri	37
Tablo 2.4.	İçten yanmalı motorlar ve gaz türbinlerinin karşılaştırılması	39
Tablo 2.5.	Depo gazı kullanım seçeneklerinin fizibilite özeti	41
Tablo 2.6.	Ülkeler ve tesis sayıları	42
Tablo 2.7.	Türkiye geneli lisanslı elektrik üretiminin kaynak bazında dağılımı (Temmuz 2019).....	43
Tablo 3.1.	Adana İlinde 2018 yılı için il/ilçe belediyelerince toplanan ve yerel yönetimlerce (büyükşehir belediyesi/ belediye/ birliklerce) yönetilen belediye atığı miktarı ve toplanma, taşınma ve bertaraf yöntemleri	52
Tablo 4.1.	Adana ili geçmiş nüfus verileri	58
Tablo 4.2.	Adana ili için hesaplanan geçmiş ve gelecek yıllara ait nüfus verileri	61
Tablo 4.3.	Adana ili 2019-2026 yılları arasında üretilecek tahmini katı atık miktarları.....	62
Tablo 4.4.	Adana ili biyogaz santrali için LandGEM model sonuçları	63
Tablo 4.5.	Gelecek yıllara ait tahmini elektrik üretim miktarları	67

RESİMLER LİSTESİ

Resim 3.1. Adana Sofulu öplüğü Biyogaz Santrali.....	54
Resim 3.2. Fermantasyon tesisleri	54
Resim 3.3. Gaz depolama balonu.....	55
Resim 3.4. Depo gazı toplama tesisi	55
Resim 3.5. Enerji üretim tesisi	56



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

°C	Santigrat derece
CAA	Clean Air Act
CH₄	Metan
Cm	Santimetre
CO	Karbonmonoksit
CO₂	Karbondioksit
C₂H₅OH	Etanol
C₂H₆S	Dimetil sülfid
EPA	Environmental Protection Agency
HCO³⁻	Bikarbonat
H₂CO₃	Karbonik asit
H₂S	Hidrojen sülfür
HDPE	Polietilen boru
İY	İçten yanmalı
Kg	Kilogram
KJ	Kilojoule
Km	Kilometre
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt saat
L	Litre
LEL	Patlayıcılığın en düşük sınırı
LFG	Depo gazı
M	Metre
Mm	Milimetre
Mg	Miligram
MW	Megawatt
NH₃	Amonyak
NSPS	New Source performance Standards
O₂	Oksijen
OECD	Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü
P	Fosfor

Ppm	Parts per million
SO₄²⁻	Sülfat
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
USEPA	United States Environmental Protection Agency
VOC	Uçucu organik bileşikler



1. BÖLÜM

GİRİŞ

Geçmişten günümüze teknoloji alanındaki gelişmeler, şehirleşmenin zaman içinde artması, tüketim ihtiyaçlarının artması ve zamana bağlı değişimi vb. etkenler sebebiyle doğaya bırakılan atık miktarı ve türü artış göstermektedir. Gelişen teknolojiyle yaşam standartlarının zamanla yükselişi ve şehirleşmenin çevresel açıdan sebep olduğu en önemli problemlerden biri, çeşit bakımından zengin katı atıklarıdır. Zamanla artış gösteren bu katı atıkların güvenli bir biçimde, çevreye hiçbir şekilde zarar vermeden ortadan kaldırılması, sürdürülebilir kalkınma açısından oldukça önemli bir konudur.

İnsan yaşamı ve yaşadığımız ortam son derece önemlidir. Depo sahalarında açığa çıkan depo gazının; çevre ve halk sağlığı üzerinde olumsuz etkileri göz önüne alındığında asıl sorunun burada olduğu görülmektedir. Depo gazı (LFG) içindeki CH₄ gazının atmosfere olan sera etkisi CO₂ gazının 25 katıdır [1].

Organik atıkların anaerobik ortamda çürümesiyle oluşan CH₄ gazının, atmosfere sera etkisinin olması yanında patlama riski de vardır. Günümüz koşulları göz önüne alındığında yenilenebilir enerji kaynaklarının bulunması ve sürekliliğinin sağlanabilmesi artık zorunlu bir durum haline gelmiştir. Bu durumun önemli etmenlerinden birisi de yoğun fosil yakıt tüketimi yüzünden sera gazı oluşumunun meydana gelmesidir. Fosil yakıt tüketimi çevre kirliliğine ve küresel ısınmaya neden olmaktadır [2].

Oluşan depo gazının olumsuz etkilerini minimum seviyeye indirmek büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla dünyada kullanılan çeşitli yöntemler arasında en etkili, ekonomik açıdan da düşünüldüğünde; depo gazının yakıt olarak değerlendirilmesi ve depo gazından enerji üretilmesidir [3].

CH₄ gazının enerji üretiminde kullanılmasının sera gazı yoğunluğunu azaltmasıyla beraber depo alanlarında açığa çıkan koku sorununun, çıkan gazların bitkilere zarar vermesinin, belli oranlarda metanın havayla bileşiminden kaynaklanan patlama riskinin azaltılması gibi önemli ölçüde faydaları mevcuttur.

Depo gazından elde edilebilecek enerji potansiyeli, son yıllarda bu gazdan enerji üretilmesi ile ilgili çalışmaları da beraberinde getirmiştir. Dünya genelinde depo gazı

kullanılarak elektrik enerjisi üretimi yapan birçok tesis mevcuttur. EPA'nın (Environmental Protection Agency) yaptığı araştırmalarda, sadece ABD' de 2007'den beri 450 enerji tesisi kaynaklı 1380 MW elektrik üretildiği tespit edilmiştir. Bunlara ek olarak 540 tane daha enerji tesisinin yapımı planlanmaktadır ve bunlarda da 1280 MW elektrik üretim potansiyeli bulunmaktadır [4].

Depo gazından elektrik enerjisi elde edilmesi Avrupa ülkelerinde de yaygın bir uygulamadır. Örneğin; İsveç'te üç yüz bin evin elektrik gereksinimi depo gazı santrallerinden sağlanırken, yaklaşık bir milyon evin ısıtması da yine bu santrallerden karşılanmaktadır [5].

Ülkemizin ekonomik faaliyetlerinin gelişiminden ötürü enerji tüketimi de hızlı bir şekilde artış göstermektedir. 2000 ile 2015 yılları arasında tükettiği enerji miktarı 2000 ile 2010 yılları arasında tükettiğinden 5 kat fazla oluşu enerji tüketiminin arttığının bir göstergesidir [5]. Türkiye enerji kaynakları bakımından zengin bir ülkedir. İlerleyen yıllarda enerji ihtiyacının karşılanmasında sorun yaşamamak için Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynaklarına mutlaka yönelmesi gereklidir. Biyogaz, yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olup ülkemizde de oldukça elverişlidir.

Bu tez çalışmasında; evsel atıklardan enerji üretimi ve Türkiye'deki mevcut durum incelenecektir. Aynı zamanda Adana entegre katı atık tesisinde faaliyette olan depo gazından enerji üretimi LandGEM modeli ile verimlilik açısından değerlendirilecektir. Bu çalışmanın asıl amacı gelecek zamanlarda planı yapılacak olan, depo gazından enerji üretim tesislerinin daha verimli bir biçimde kurulup işletilmesine yön vermek, çevre ve verimlilik açısından elde edilen deneyimlerden fayda sağlayacak bir şekilde kullanımının sağlanmasıdır. Ayrıca, bu çalışma; evsel atıklardan elektrik enerjisi üretim teknolojisi yatırımlarına katkı sağlaması, temiz ve düzenli bir kentleşme düzenine yardımcı olması amacını taşımaktadır.

2. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER

2.1. Katı Atık

Atık, ülkemiz mevzuatında ilk olarak 1983 tarihli ve 2872 sayılı Çevre Kanunu'nda "Herhangi bir faaliyet neticesinde çevreye atılan veya bırakılan zararlı maddeler" şeklinde tanımlanmıştır.

Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütüne (OECD) göre atık, yakın gelecekte ya da şimdiki zamanda ekonomik değeri olmayan ve bertarafı ya da arıtımı gerekli görülen maddelerdir.

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'na göre katı atık, üreticisi tarafından atılmak istenilen ve toplumun huzuru ile özellikle çevrenin korunması yönünden, düzenli olarak bertarafı gerçekleşmesi gereken arıtma çamuru ve katı maddeler olarak tanımlanmıştır.

Katı atığı başka bir şekilde tanımlanacak olursa, kullanılma süresi dolan ve yaşadığımız ortamdan uzaklaştırılması gereken her türlü katı malzeme olarak da ifadesi yapılabilir.

Sürdürülebilir kalkınma açısından katı atıkların bertarafı ciddi bir önem taşımaktadır.

Atıkların oluştukları ortamlara göre;

- Ticari Atıklar
- Evsel Atıklar
- Endüstriyel Atıklar

şeklinde sınıflandırılırlar.

Atıklar, baz alınan kaynaklarına göre sınıflandırılacak olursa;

- Evsel Atıklar
- Tıbbi Atıklar
- Tehlikeli Atıklar
- Endüstriyel Atıklar
- İnşaat Atıkları
- İri ve Hurda Atıklar
- Bahçe Atıkları

- Cadde Sokak Süprüntüleri
- Sanayi Atıkları
- Mezbaha ve Ahır Atıkları
- Enkaz ve Toprak
- Zehirli Atıklar

şeklinde sınıflandırılırlar.

Ayrıca önemli bir sınıflandırma şekli de, atıkların organik ya da inorganik katı atık olup olmadıkları şeklindedir.

Katı atık bileşenlerine göre ise;

- Gıda Atıkları
- Bahçe atıkları
- Kağıt Karton
- Plastik, kauçuk
- Tekstil
- Tahta
- Metal
- Cam
- Küf, Cüruf, Toprak

şeklinde sınıflandırılırlar [6].

2.1.1. Kentsel Katı Atıklar

Ev ve iş yerlerinden gelen, yönetiminden belediyenin sorumlu olduğu atıklardır. Kentsel katı atıklar, dünyanın gelişmişliği, sosyokültürel alışkanlıkları, mevsimlere, zamana göre tüketim alışkanlıkları, içerik ve miktar bakımından büyük ölçekte değişime uğrayabilir.

Kentsel katı atıklar; geri dönüşümü yapılabilen, mobilya-beyaz eşya gibi hacimli atıklar, ticari ve kurumsal atıklar, evlerden çıkan pil, ampul gibi tehlikeli atıklar, cadde süprüntüleri, bahçe-hal gibi pazaryeri atıklarını kapsamaktadır.

Arıtma tesisi çamurları, elektronik aletler, hurda araçlar, cihazlar, lastikler, inşaat, yıkıntı ve hafriyat atıkları ile özel işlem yapılması gerekli olan atıklar ve hastane atıkları, kentsel katı atık kavramlarının dışında kalmaktadır [7].

Zaman içerisinde insanların yaşam standartlarının artış eğilimi göstermesiyle birlikte günlük olarak tüketilen katı atık miktarında da aynı oranda artış olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde bu durum ciddi bir problem olmaya başlamıştır. Çevre ve insan sağlığına zarar verilmeden bu problemi çözebilmek amacıyla katı atık yönetimi adı altında tanımlanan bir olgu ortaya çıkarılmıştır. Bu olgu en genel şekilde, katı atıkların meydana gelmesinde çevreye ve insan sağlığına zarar verilmeden giderilmesine kadar devam eden süreçte uygulanabilecek en uygun çözümleri ortaya koyan bir süreçtir.

Türkiye’de katı atıkların hanelerden, kurum ve kuruluşlardan alınması, işleme tesislerine taşınması ve bu atıkların bertaraf işlemleri görevi belediyelere verilmiştir. Katı atıkların bertaraf işlemini, bazı belediyeler kendileri yerine getirirken, bazıları ise özelleştirmeler kapsamında ihaleler aracılığıyla özel sektörlerle yaptırmaktadırlar [8].

2.2. Entegre Katı Atık Yönetimi

Yerleşim alanlarında ortaya çıkan atıkların toplanması, ayrıştırılması, geri kazanılması, geri dönüştürülmesi, nihai olarak bertaraf faaliyetinin tek bir kuruluş aracılığı ile gerçekleşmesi entegre katı atık yönetimidir. Atık yönetimde tüm unsurlar bir bütün halinde değerlendirmeye alınarak ekonomik ve çevresel yönden sürdürülebilirliği amaçlanır. Sistemin etkinliği için, faaliyetlerin ekonomik değerinin olması, sistemi bütüncül olarak ele alması, faaliyetlerin esnek olması, yerleşim merkezleri baz alınarak planlamaların oluşturulması, ve mahalli idareler, özel sektörün ve kamu sektörünün tüm birikimlerinin sinerjisi ile doğru orantılı olacak şekilde büyüyecek bir çevre sektörünün oluşturulması gereklidir.

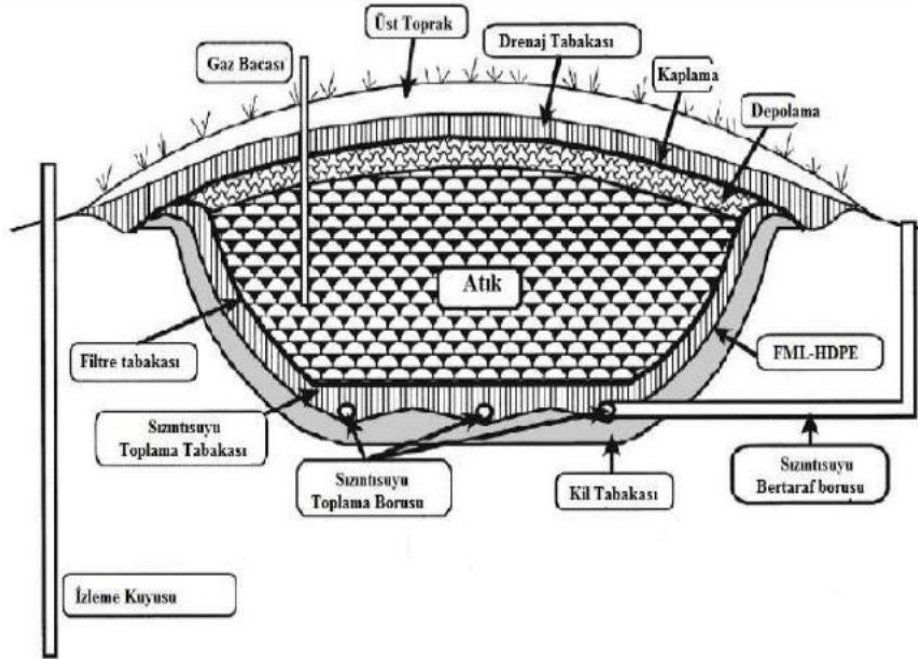
Geçmiş yıllarda sadece vahşi depolama ile giderilen atıklar için daha etkili bertaraf yöntemleri geliştirilmiş ve uygulamaya konulmuştur. Bu uygulamalar; gazlaştırma, yakma, termal dönüşüm teknolojileri, düzenli depolama, geri kazanma, piroliz, anaerobik kompostlaştırma, aerobik kompostlaştırma ve biyolojik dönüşüm teknolojileridir [9].

2.2.1. Düzenli Depolama

Düzenli depolama, atıkların etrafa rastgele dökülmesinden farklı olacak şekilde, taban kısmının sızdırmazlığı sağlanıp, atıkların çevre ve halk sağlığına uygun olacak biçimde

depo sahasına döküldükten sonra sıkıştırılıp; her gün üstünün toprakla örtülmesi, arazi dolum işlemi tamamlandıktan sonra üstünün kapatılıp en son yeşil alan yapımı gibi kullanılmak amacıyla sunulması yöntemidir [10].

Seçilen sahanın düzenli depolama yapabilmek için öncelikli olarak geçirimsizliği sağlanmalıdır. Bunun için kil ve özel olarak hazırlanan membranlar kullanılabilir. Geçirimsizlik sağlanırken aynı zamanda sızıntı sularının toplanabilmesi için drenaj sistemi de yapılır. Bu işlemler bittikten sonra katı atıkların sahaya dökülmesi işlemi gerçekleşir. Sahaya bırakılan katı atıklar her gün sıkıştırılır. Sonra en az 20 cm. kalınlığında toprakla örtülmelidir. Arazi doldukça, çürüme sonucunda açığa çıkacak gazların uzaklaştırılması için boru tertibatı yerleştirilir. Arazi tamamen dolunca üzeri 1 m toprakla örtülür [9].



Şekil 2.1. Düzenli depolama sahası kesiti [9]

Bu yöntemle birlikte, depolama sahasına dökülen katı atıkların içinde bulunan organik maddeler anaerobik bozuşma neticesinde CO_2 , CH_4 , NH_3 ve H_2S gazları ile suya dönüşmektedir. Bunlardan metan (CH_4) kalorifik değeri yüksek yanıcı bir gazdır. Bu sebepten dolayı sözü edilen gazın enerji üretimi amacıyla kullanımı önerilmektedir. Organik maddeler dışındaki bazı maddeler de değişik yöntemler kullanılarak yok edilmekte veya parçalanmaktadır. Naylon torba gibi bazı inert maddeler parçalanmadan veya bozuşmadan kalabilmektedir. Bozuşmadan ötürü zaman içerisinde sahalarda

çökmeler meydana gelmektedir. Bu yüzden terk edilmiş veya dolu olan depolama alanlarının üzerine binaların yapılmaması gereklidir. Tüm bunlar yerine sözü edilen alanlar yeşillendirilip rekreasyon, futbol sahası gibi alanlara dönüştürülebilir.



Şekil 2.2. Düzenli depolama sahası kesit görünüşü [9]

Düzenli depolama yapmanın avantajları:

- Arazi koşulları uygunsa ekonomik bir seçenektir.
- Bu yöntem nispeten ön yatırımı en az olandır.
- Her katı atık için uygulanabilen nihai bir imha yöntemidir.
- Esnek bir metot olmasından dolayı katı atık miktarına bağlı olarak kapasitesi çok kolay bir şekilde arttırılabilir.

Araziden rekreasyon amacıyla istifade edilebilir [9].

2.2.1.1. Düzenli depolamada ayrışma prosesleri

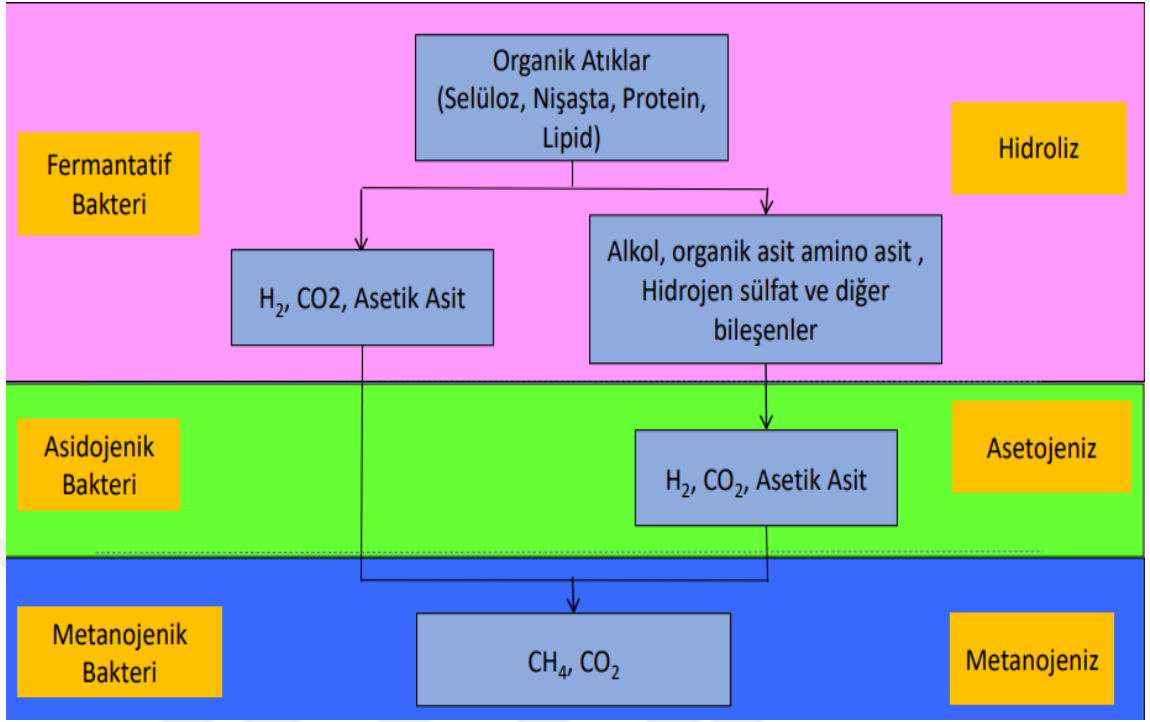
Saha içerisinde gerçekleşen ayrışma prosesleri, çevresel etkilerin anlaşılması ve kontrol edilebilmesi açısından büyük önem taşır. Depo sahalarında depolanan katı atıklar fiziksel, kimyasal ve biyolojik proseslerin etkisiyle birlikte ayrışmaktadırlar. Bunun sonucunda atık fazı (katı faz), sızıntı suyu fazı (sıvı faz), ve biyogaz (gaz fazı) olmak üzere 3 faz oluşmaktadır.

Düzenli depolama alanlarında atıkların ayrışması işlemi karmaşık bir prosestir. Fiziksel ayrışma, farklı materyallerin atıklardan ayrılması ve ayrışma sonucunda atığın fiziksel özelliklerinde ortaya çıkan değişikliklerdir. Kimyasal ayrışma, atık içerisindeki maddelerin sızıntı suyuyla çözünmesiyle gerçekleşir. Çökelme reaksiyonları, adsorpsiyon ve desorpsiyon reaksiyonları da kimyasal ayrışma sırasında açığa çıkar. Biyolojik ayrışma, depo sahasında atıkların maruz kaldığı en önemli prosestir. Biyolojik ayrışma, pH ve redoks potansiyelleri gibi değişkenler üzerindeki etkisi sebebiyle hem fiziksel hem de kimyasal ayrışmayı kontrol eden bir prosestir [11].

2.2.1.2. Düzenli depolamada atıkların anaerobik ayrışması

Katı atık depo alanları; arıtma tesislerinde yer alan anaerobik çürütücüler gibi biyokimyasal reaktör görevini üstlenirler. Anaerobik çürüme işlemi; organik atıkların oksijensiz ortamda biyokimyasal reaksiyonlarla ayrıştırılması işlemidir [12].

Depo sahalarında kendi kendilerine bırakıldığında mikroorganizmaların faaliyetleri neticesinde O_2 tamamen tükenene kadar aerobik ayrışan organik maddeler sonra anaerobik olarak ayrışır ve önemli miktarlarda CO_2 ile CH_4 içerikli gazlar açığa çıkar. Fermantasyon işlemi tamamlandıktan sonra, geriye sadece yavaş ayrışabilen artık maddeler kalır. Bu artık organik madde stabilize olmuştur. Atık stabilizasyonu optimum koşullarda 10-20 yıl aralığında tamamlanır [13].



Şekil 2.3. Organik maddelerin anaerobik ayrışma süreci [14]

Biyogaz üç evreden oluşmaktadır [15-19]. Bunlar;

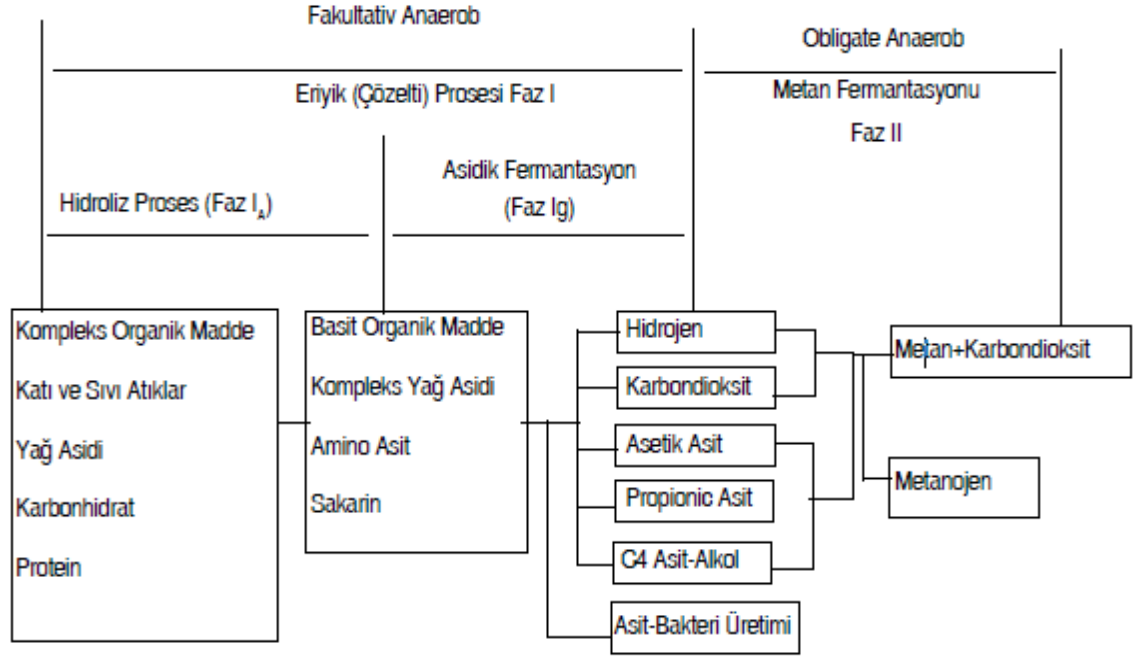
- Hidroliz Evresi
- Asit Oluşum Evresi
- Metan Oluşum Evresi

a. Hidroliz

İlk olarak, çözünür halde bulunmayan maddeler ile mikroorganizmaların salgıladıkları enzimler çamur içerisinde çözünür hale gelirler. Uzun zincirli kompleks proteinleri, yağları, karbonhidratları ve lipitleri kısa zincirli yapılara dönüştürürler. Bunun sonucunda ilk aşama olan hidroliz evresi tamamlanmış olur [15].

b. Asit oluşturma

Çözünür hale dönüşmüş organik maddeleri asetik asit, hidrojen, uçucu yağ asitleri ve karbondioksit gibi küçük yapılı maddelere dönüştürürler. Bu evre, anaerobik bakteriler aracılığıyla gerçekleştirilir. Aynı zamanda bu bakteriler, metan oluşturma bakterilerine uygun bir ortam sağlarlar. Metan fermantasyonunun prensibi Şekil 2.4'te gösterilmiştir [9].



Şekil 2.4. Metan fermantasyonu prensibi [9]

c. Metan oluşturma

Bu evrede metan oluşum hızı artarken asit oluşumunun hızı da azalmaktadır. Organik asitler ve H₂ gazından CH₄ ve CO₂ oluştuğu zaman depolama bölgesindeki pH seviyesi 6,8-8,0 civarlarına gelir. pH seviyesi yükseldiği için bazı inorganik bileşikler daha çok çözünemeyip çözeltilde kalmaya devam ederler. Bunun neticesinde sızıntı suyunda bulunan ağır metal konsantrasyonu zaman içerisinde düşüş eğilimi gösterir. Aynı zamanda depo gazının oluşum hızı da bu evrede düşer. Birçok nütrient, önceki evrelerde sızıntı suyuyla uzaklaştırılmış olup depolama sahasında kalan substratlar biyolojik olarak yavaş ayrışan yapıya sahiptirler. CH₄ ve CO₂ bu aşamada gelişim gösterirler. Eser miktarda N₂ ve O₂ gazları da görülür [20].

2.2.2. Depo Gazı Bileşenleri ve Özellikleri

Depo alanlarında bulunan gazlar amonyak, karbondioksit, karbon monoksit, hidrojen, hidrojen sülfür, metan, nitrojen ve oksijendir. Evsel katı atıkların havasız bir ortamda bozulması sonucunda elde edilen başlıca gazlar karbondioksit ve metandır [21].

Tablo 2.1. Depo gazının özellikleri ve gazda bulunan bileşenler [9]

Bileşen	Yüzde (Kuru Hacimde)
Metan	45-60
Karbondioksit	40-60
Azot	2-5
Oksijen	0,1-1,0
Sülfür, Merkaptan vb.	0-1,0
Amonyak	0,1-1,0
Hidrojen	0-0,2
Karbonmonoksit	0-0,2
Eser Bileşenler	0,01-0,6
Özellik	Değer
Sıcaklık (°C)	68-88
Özgül Ağırlık	1,02-1,06
Nem Muhtevası	Doygun
Isı Değeri (kJ/m ³)	14900-20500

Not: Depolama sahasının asıl yaşı ile gerçek % dağılımı değişim gösterir.

Metan (CH₄), rengi ve kokusu olmayan kimyasal bir bileşiktir. Ortalama olarak hacimce depo gazlarının % 50 civarını metan gazı oluşturmaktadır. Yoğunluğu, 0.6-0.7 kg/m³ aralığında değişmektedir. Gaz toplama sistemiyle tutulmayan CH₄'ın büyük bir kısmı atmosfere yayılır. CH₄, % 5-15 arasında molar konsantrasyonlarda ve O₂'nin mevcut olduğu koşullarda patlayıcı özelliği olan bir gazdır. LEL (patlayıcılığın en düşük sınırı) %5 oranında havada CH₄ bulunması durumuna denir. LEL seviyesine eşit ve bundan daha yüksek değerler depo sahasına yakın yapılar, kanallar ve binalar için tehlikeli bir durumdur. CH₄ konsantrasyonu kritik eşiğe ulaştığı zaman, atıktaki O₂ tükenmiş olacağı için sahalarda patlamaların olması gibi tehlikeler söz konusu değildir. Fakat bazı durumlarda depo gövdesi ve sahalarda yangın çıkabilme durumu vardır. CH₄'ın az da olsa önemli bir kısmı, sahanın yakınında toprak örtüsüne doğru hareket eder veya saha içerisinde veya civarındaki boşluklarda birikir. Ayrıca CH₄'ın küresel ısınmaya etkisi

de göz ardı edilmemelidir. CH₄, su buharı ve CO₂'den sonra kızılötesi ışınlarını tutabilen üçüncü önemli gazdır. Depo sahalarında meydana gelen CH₄'ı enerji kaynağı olarak kullanma fikri, son zamanlarda ortaya çıkmıştır. Açığa çıkan CH₄ hacimsel olarak %35 olduğu zaman bu amaç için kullanımı ekonomik bir yöntemdir [22].

Atmosferde karbondioksit (CO₂) %0.036 konsantrasyonundadır. Depo sahalarındaki sıcaklık koşullarında yoğunluğu 1.8 kg/m³ civarında seyretmektedir. Bu değer CH₄ yoğunluğunun yaklaşık olarak 2.8 katına eşittir. Bu nedenden ötürü, CO₂ depo sahasının alt kısımlarında hareket halindedir. Depo gazları arasında CH₄'dan sonra diğer önemli bileşeni olan CO₂ zehirli ve patlayıcı olmadığı halde atmosferdeki CO₂ konsantrasyonu son zamanlarda artış eğilimindedir. Bu sebeple çevresel yönden daha çok dikkate alınmaya başlanmıştır. CO₂'nin sebep olduğu büyük tehlikelerden biri asidik koşullar oluşturmasıdır. CO₂, suda çözünebilen bir yapıya sahip olduğu için suyla teması durumunda büyük ölçüde sıvı faza geçiş yapacaktır. Çözünen CO₂, karbonik asit (H₂CO₃) veya bikarbonat (HCO₃⁻) oluşturarak sıvının pH'ını düşürür. Bunun neticesinde sızıntı suyunun sertliği ve mineral maddenin muhtevası ve sızıntı suyu sertliği artabilir.

Depo gazı bileşimi analizinde elde edilen O₂ ve N₂; gaz toplama tertibatındaki sızıntılardan ya da numune alma esnasındaki hava girdilerinden kaynaklanmaktadır. Biyokimyasal tepkimeler sırasında oksijene olan ihtiyaç oldukça fazla olması sebebiyle hızlı bir biçimde tüketilir. Gaz fazında daimi bulunan su buharı sıcaklık artışına paralel bir şekilde artmaktadır [23].

Hidrojen hafif bir gazdır ve atmosfere doğru yükselme eğilimindedir. Yanıcı olma eğilimindedir ve % 4-7 oranında patlayıcı olabilir. Hidrojensülfür (H₂S), yanıcı ve zehirli bir gaz olup kokusu çok keskindir. Karbonmonoksit (CO), zehirlilik oranı çok yüksek bir gazdır. Kokusu ve rengi yoktur, yanıcılık özelliği vardır. CO depo sahalarında hacimce yaklaşık olarak %0,001 oranında mevcuttur.

Depo sahalarında bulunan eser bileşenler iki temel kaynaktan sağlanmaktadır. Depo sahasına giren atıklarla birlikte eser bileşenler de girerler veya saha içerisinde gerçekleşen biyotik ve abiyotik reaksiyonlar aracılığıyla üretilirler. Eser miktarda bulunan gazlar sıvı haldeki atıklarla karışıktır, fakat bu gazlar uçucu olma eğilimindedir ve uçucu olma eğiliminin sıvının buhar basıncıyla yaklaşık olarak doğru orantılı olduğu görülebilir.

Mevsimsel koşullara, ũkelere hatta aynı ũlkeden farklı ũehirlere göre farklı atık karakterizasyonu ile ilgili olarak depo gazındaki bileşenlerin özelliği, muhtevası ve derişimleri değişebilmektedir [24].

2.3. Depo Gazı Oluşumu

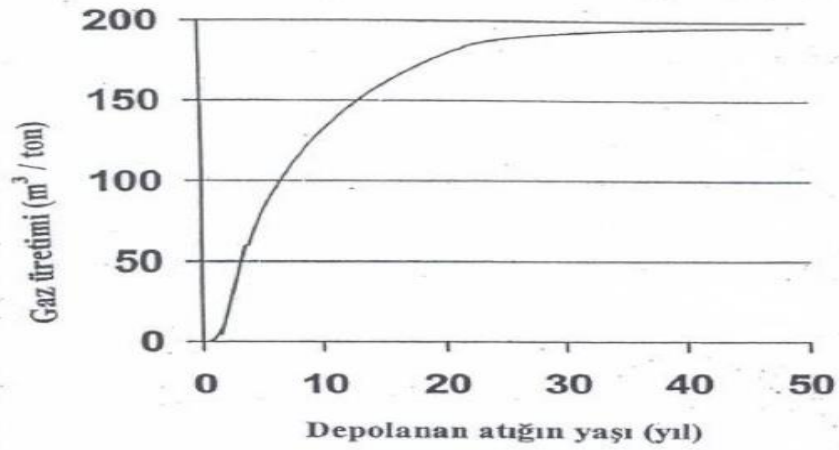
Depo alanlarındaki organik atıkların havasız koşullarda ürmesi neticesinde depo gazı açığa çıkmaktadır. Genel olarak CH₄ (%45-60), CO₂ (40%-60) ve N (%3-10) gibi bileşenlerden oluşmaktadır. Bu gazda ayrıca eser miktarda O₂, çeşitli organik kũkũrt bileşenleri, NH₃ ve su bulunmaktadır [3].

Yapılan değerlendirmeler sonucunda, depo gazı ũretiminin, depo alanının işletildiği dönemlerde ve de buna ek olarak 10-20 sene sũresince gerçekleştirilebileceği grũlmektedir. ũretim mrũ, depo gazının elde edilme sisteminin verimine ve işletme parametrelerine bağlı olacaktır.

Depolama gazının kalitesi ve gazın oluşum hızı aşağıdaki koşullara bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir:

- Atık kompozisyonu (karbon konsantrasyonu, besin içeriği (nutrient), bozuşma reaksiyonlarını engelleyici bileşenlerin (inhibitör) varlığı, nem oranı vb.)
- Sıkıştırma işleminin derecesi ve tũrũ
- Atık miktarı
- İklım
- Sahanın işletme biçimi
- Depo alanının hidrojeolojik özelliği ve alanın geometrik yapısı
- Kullanılacak rtũ katmanının kalınlığı ve tũrũ
- Atıkların n işleme derecesi (geri dnũřtũrme, balyalama, kompostlaştırma, atıkların azaltılması)

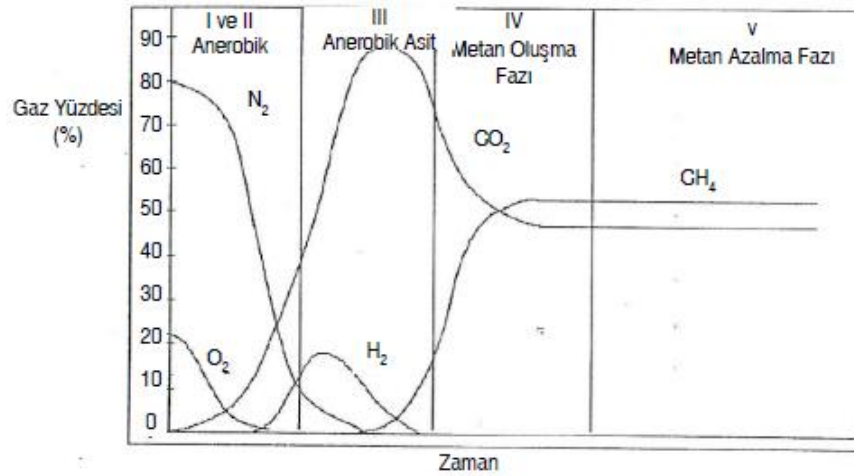
Bertaraf edilen evsel atığın, depo sahasının mrũ boyunca ortalama 170 m³ depo gazı oluşturur. Açığa çıkan depo gazının %60'ı atıkların depolama işlemi yapıldıktan sonra 10 sene içerisinde oluşmakta olup bu değer 15-20 yıllık bir sũre zarfında %90'ları bulabilecek seviyelere kadar çıkabilmektedir [25]. Eysel kaynaklı atıklara yönelik toplama sistemli gaz ũretimi modelinin yıllar içerisindeki değişimi Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5. Evsel atık için toplama sistemli gaz üretimi modeli [26]

2.3.1. Depo Gazı Oluşum Evreleri

Gaz bileşiminde zamana bağlı değişimler 5 evreden oluşmaktadır. Bunlar, aerobik evresi, anaerobik metanojenik olmayan evre (geçiş), anaerobik metanojenik kararsız evre (asit oluşma), metanojenik kararlı evre ve aerobik şartlara geçiş evre olarak sayılabilir [27-28]. Fakat, atıkların biyolojik olarak ayrışması her zaman burada belirtilen sırayla gerçekleşmeye ihtimali vardır. Bazı evreler gerçekleşmezken bazıları da aynı anda meydana gelebilir. Ayrıca, bir veya iki faz çevresel koşullar sebebiyle daha baskın hale gelebilir. Atıkların heterojen yapısına göre aynı anda depo alanının farklı bölgelerinde farklı prosesler meydana gelebilir [11].



Şekil 2.6. Gaz oluşumu sırasında görülen fazlar ve depo gazlarının zamana bağlı değişimi [29]

a. Başlangıç (aerobik) evresi

Bu fazda biyolojik ayrışma aerobik şartlar altında gerçekteşir. Bunun sebebi ise belli bir miktar havanın depolama sahasında tutulmasıdır. Atıkların ayrışmasında yardımcı olan anaerobik ve aerobik organizmaların asıl kaynağı, günlük atıkların üstlerine örtülen toprak örtüsüdür. Bu organizmaların diğer kaynakları atık su arıtma tesisi kaynaklı çürütülmüş çamurlar ve geri devredilen sızıntı sularıdır [29].

b. Geçiş evresi

Oksijenin tktilip anaerobik şartların gelişmeye başladığı evredir. Depo alanı anaerobik hale geldikten sonra, sülfat ve nitrit anaerobik şartlarda N ve H₂S'e indirgenir. Nitratın ve sülfatın indirgenmesi için gerekli olan indirgenme şartları 50-100 milivolt civarında gerçekteşir. Atıkların oksidasyon/redüksiyon potansiyeline bakılarak anaerobik koşulların başlayışı gözlemlenebilir. Açığa çıkan sızıntı suyunun pH'ı CO₂'in artması ve organik asitlerin mevcudiyetinin etkisi ile düşer [30].

c. Anaerobik metanojenik kararsız evre (asit oluşma)

Anaerobik koşulların ortama hakim olması sonucunda başlayan evredir. Asit fazı olarak da bilinen bu üçüncü evrede; geçiş fazında başlayan mikrobiyal etkinlik; kayda değer oranda organik asit ve daha az oranda H₂ retimi ile hız kazanır. Bu fazda karbondioksit gazı oluşurken daha az oranda hidrojen gazı da üretilir.

Öncelikli olarak yağlar, polisakkaritler, proteinler ve nükleik asitler gibi büyük yapılı bileşikler hidrolize uğrayarak mikroorganizmalar için daha basit formda enerji ve karbon kaynağına dnştrlrlr. Bu süreci, daha basit formdaki bu elementlerden önemli oranda asetik asit ve kompleks organik asit oluşumu izler. Bunlar asit üreten bakteri olarak adlandırılırlar [7, 24].

Organik asitlerin varlığı ile CO₂'nin artması neticesinde sızıntı suyunun pH değeri, 5 veya daha düşük değerlere inecektir. Organik atıkların sızıntı suyunda çözünmesi sebebiyle sızıntı suyunun BOI₅, KOI ve iletkenliği önemli ölçüde artacaktır. Sızıntı suyunun pH'ı düşük olduğu için, özellikle ağır metaller olmak üzere inorganik bileşenler de çözünebilir olacaktır. nemli birçok nütrient sızıntı suyundan bu fazda ortaya çıkar. Sızıntı suyu geri devredilemezse sistemde ihtiyaç olan nutrientler

kaybedilecektir. Şayet sızıntı suyu oluşmazsa, bu faz boyunca oluşan dönüşüm ürünleri depo alanı içerisinde kalır ve suda tutulur. Sülfat mevcutsa H₂S oluşur [29].

d. Metanojenik kararlı evre (Metan oluşumu)

Metan oluşum evresinde, aynı ortamda ve aynı anda metan oluşumu ve asit fermantasyonu gerçekleşmesine rağmen önceki evreyle kıyaslanacak olursa asit fermantasyonunun hızı ve miktarı oldukça düşüktür. Hidrojen gazı ve asitlerin CH₄ ve CO₂'e metabolize edilmesiyle depo sahasının pH seviyesi 6.8-8 arasına çıkarken, meydana gelen sızıntı suyunun pH' ı nötr seviyelerde kalır [24].

Biyogazın %45-60'ı hacimce CH₄'dır. Metanojenik aktivitenin neticesinde H₂ konsantrasyonu ve uçucu yağ asiti düşük seviyelerdedir. Uçucu yağ asitleri ve diğer organik maddeler CO₂ ve CH₄'a dönüştürülür. Gaz üretiminde atıkların muhteviyatına bağlı olarak salınımlar gözlenebilir [10].

e. Aerobik şartlara geçiş fazı (Olgunluk)

Organik maddelerin birçoğunun CH₄ ve CO₂'ye çevrilmesinden sonra gelen aşama olgunluk fazıdır. Bu fazda metan üretim miktarı; ortamda yavaş ayrılan organik maddeler kaldığı için ve önceki kademelerde nutrientler sızıntı suyu ile ortamdan uzaklaştırılmasından ötürü büyük ölçüde azalır. CO₂ ve CH₄'ın yavaş geliştiği fazdır. Oksijen ve azot az miktarlarda da olsa bulunabilir. Bu kademedeki sızıntı suyu yine yoğun bir biçimde fulvik ve humik asit içerir [7].

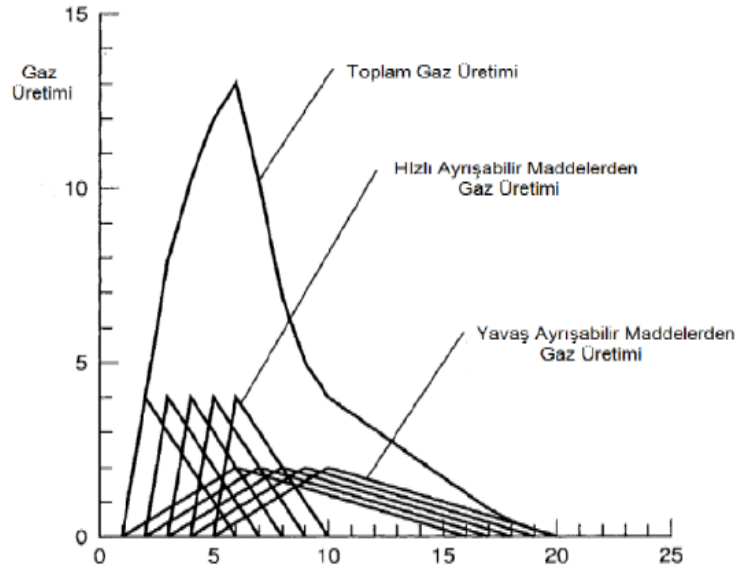
2.3.2. Depo Gazında Fazların Süresi

Depo gazında fazların süresi, organik bileşenlerin depo alanındaki dağılımı, nutrientlerin varlığı, atığın nem muhtevası, nemin depo alanı boyunca hareketi ve ilk sıkışma gibi faktörlere bağlıdır [31].

Tablo 2.2. Metan oluşum evrelerinin yıllara göre dağılımı [31]

Evre	Durum	Zaman Aralığı
I	Aerobik	1 Gün-1 Hafta
II	Anoksik	1-8 Ay
III	Anaerobik, Metanojenik, Stabil Değil	3 Ay-3 Yıl
IV	Anaerobik, Metanojenik, Stabil	8-40 Yıl
V	Anaerobik, Metanojenik, Düşüş Eğilimi	1-40+ Yıl
	Toplam	10-100 Yıl

Organik maddelerin bozunma hızı zaman içerisinde üçgen halinde bir gaz üretim şeklini oluşturmaktadır ve gaz üretiminin de depo alanını doldurulmasını takiben bir yıl sonra oluşmaya başlayacağı düşünülmektedir [32].

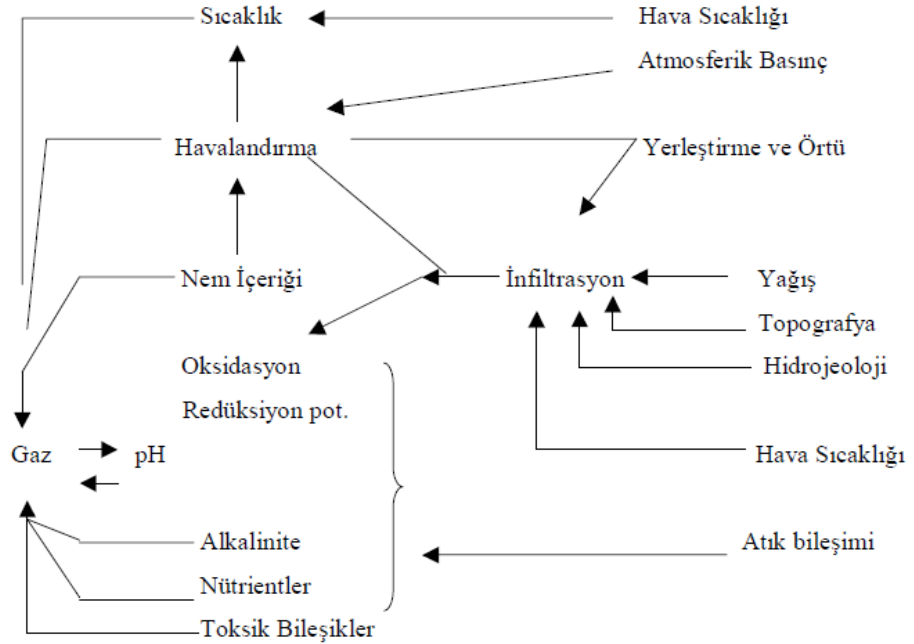


Şekil 2.7. Gaz miktarının zaman içerisindeki tipik değişimi [32]

2.3.3. Depo Gazı Oluşumunu Etkileyen Faktörler

Depo gazı üretimi değerlendirmeye alındığında dikkat edilen etmenler atığın kompozisyonuyla miktarıdır. Açığa çıkabilecek en üst seviyede potansiyel depo gazı, atık kütledeki miktarına ve organik maddenin tipine bağlıdır [25].

Depo gazının oluşumunu etkileyen faktörler mevcuttur. Bir depolama sahasında ayrışmanın ve gaz üretiminin 30-100 sene devam etmesi beklenmektedir. Bu olaylar yüksek seviyede çok daha kısa bir sürede gerçekleşebilmektedir. Depo alanındaki ayrışmanın hızını tanımlayabilecek yeterli bir hız sabiti veya basit bir eşitlik yoktur. Fakat çeşitli faktörlerin önemini açıklamak mümkündür [33].



Şekil 2.8. Gaz oluşumunu etkileyen faktörler [3]

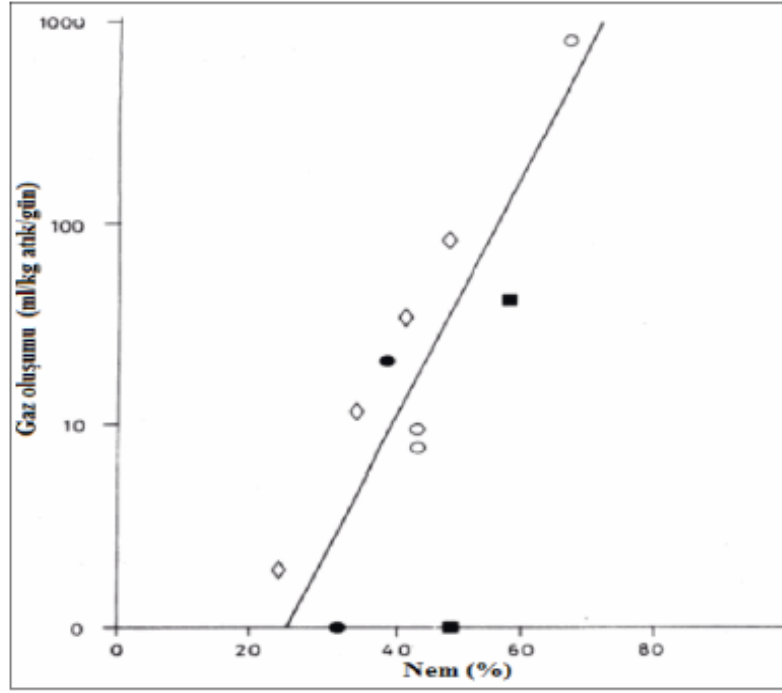
Hidrojeoloji, Nütrientler, Topografya, Yerleştirme ve Örtü, atık bileşimi düzenli depo sahası ve işletmesi esnasında kontrol edilecek faktörlerdir.

a. Nem içeriği

Gaz üretimi ve atıkların ayrışmasında nem içeriği önemli bir parametredir. Üretimin sağlanabilmesi için ihtiyaç duyulan anaerobik ortamı sağlayıp depo sahasında bakteri ve nütrientlerin taşınmasında aracı olmaktadır. Metan bakterileri için gerek duyulan nem

seviyesi oldukça düşüktür. Depolama alanlarının en kuru olduğu durumlarda bile gerekli olan nem seviyesine ulaşabilmek mümkündür. Bu sayede, bütün depo sahalarında depo gazı üretimi gerçekleşebilmektedir [3].

Şekil 2.9'da katı atık depo alanlarındaki nemin içeriği ile depo gazlarının üretim hızları arasındaki ilişki verilmiştir.



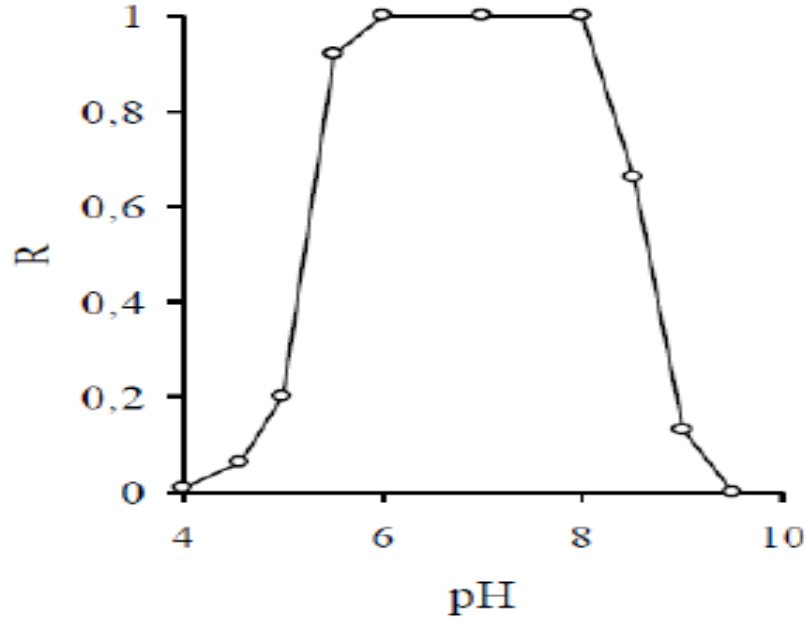
Şekil 2.9. Nem içeriği ile gazın üretim hızı arasındaki ilişki [9]

Atıklar depo alanına ilk bırakıldıkları zaman %30-40 oranlarında nem içeriği bulunmaktadır. Nem bakımından doymuş atıklarda çoğunlukla CH_4 ve CO_2 üretilir. Neme doymamış atıklardan ise çoğunlukla H_2 oluşturulur. Depo sahasından optimal seviyede metan gazı oluşumunun elde edilmesi için atıklar suya doymuş olmalıdır. Depo alanlarında biyokimyasal tepkimelerin devamlılığı açısından nem içeriği mutlaka denetlenmeli, istenilen aralığın altına indiğinde ise sızıntı suyu depo alanı içine verilmelidir. Çünkü depo alanında nemin yeterli olmadığı durumlarda biyokimyasal tepkimeler son bulur [9].

b. pH ve alkalinite

Anaerobik çürütmenin gerçekleşebilmesi için uygun pH aralığı 6.7-7.5'dur. pH değeri bu aralıkta tutulduğunda metan bakterileri hızlı bir şekilde çoğalır ve metan üretimi en

üst seviyelere ulaşır. Optimum aralığın dışına çıkılırsa, metan üretimi şekildeki gibi kısıtlanır. pH aralığı alkaliniteden, organik asit üretiminden, metan oluşum hızından, endüstriyel atıklardan ve yer altı suyu infiltrasyonundan etkilenebilmektedir. Uçucu yağ asitlerinden dolayı taze sızıntı sularının pH değeri 6-7'den daha düşüktür [1].



Şekil 2.10. Anaerobik bir filtrede pH'ın rölatif CH₄ oluşum hızı (R) üzerine etkisi [34]

c. Sıcaklık

Sıcaklık; anaerobik ayrışmayı hem termodinamik hem de kinetik yönden etkilediğinden sıcaklığın artması anaerobik sürecin verimini artırır. Sıcaklık artışıyla birlikte parçalanma reaksiyonlarının ve mikroorganizmaların çoğalma hızı da artar [35].

Sıcaklık, depolama sahasındaki mevcut bakterilerin aktivitelerini, türlerini ve gaz oluşumunu önemli derecede etkilemektedir. İki çeşit ısı kademesiyle karşılaşılabılır: Mezofilik ve (30-35 °C) ve termofilik koşullar (50-60 °C). Depolama sahasının sıcaklık derecesi atıklar yerleştirildikten sonraki 45 günlük zaman diliminde aerobik aktiviteler neticesinde en üst değerine ulaşır. Anaerobik ortamın gelişiminin başlamasıyla birlikte sıcaklık derecesi düşmeye başlar. Saha sıcaklığı genel olarak 30-60 °C aralığında değişim gösterir. Kimyasal çözünürlük sıcaklığın artmasıyla artar. Ayrıca reaksiyon hız sabiti sıcaklık değişiminden etkilenir [36].

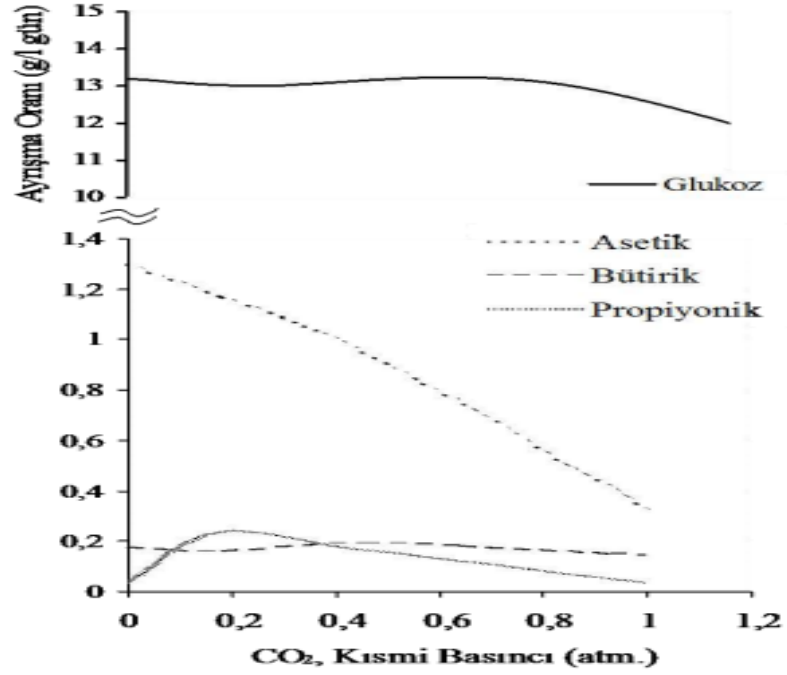
d. Dane boyutu

Gaz üretimi ve biyokimyasal reaksiyon, atık dane boyutunun azalmasıyla beraber artmaktadır. Mikroorganizmalar organik madde tüketimi için kullanacağı yüzey alanı, dane çapının küçültülmesi sonucunda artmaktadır.

Partikül çapları 250 mm'den 10 mm'ye düşürüldüğünde gaz üretimi hızında 4.4 kat oranında bir artış olduğu saptanmıştır. Depolanma işlemi yapılmadan parçalayıcı vasıtasıyla atıkların dane boyutlarında küçültülme işlemi yapılabilir. Homojen haline gelen atıklar, çok kolay depolanıp sıkıştırılabilir ve bu sayede daha da çok atığın depolanabilmesi sağlanır. Dane boyutu küçük alanlarda daha fazla gazın elde edilebileceği belirlenmiştir [34].

e. İnhibitörler

Metan oluşumunda H_2 , O_2 ve SO_4^{2-} 'in inhibasyon etkisi vardır. Propiyonik, bütirik ve asetik asitin toplam konsantrasyon miktarı 6000 mg/L 'nin üzerine çıkmaması gereklidir. CO_2 'in birçok ayrışma prosesinde üretimi gerçekleşir. Çamur yataklı kesikli reaktörlerde CO_2 'in CH_4 oluşumundaki inhibasyon etkisi belirlenmiştir. Şekil 2.11'de propiyonik, bütirik ve asetik asitin ayrışma oranları üzerindeki CO_2 'nin kısmi basınç etkisi verilmiştir. CO_2 'in kısmi basıncı sebebiyle asetik asitin ayrışma oranı etkilenmektedir. Depolama alanlarında kısmi basınç başlangıçta 0,9 atm. seviyesine çıkar, sonrasında 0,5 atm. seviyesine düşer. Amonyumun inhibasyon etkisi serbest amonyumdan kaynaklanmaktadır ve pH'ın artması sonucunda artış göstermektedir.



Şekil 2.11. Bazı substratların CO₂'in kısmi basıncına bağlı ayrışma oranları [37]

Düzenli depolama alanlarında içeriğinde ağır metal barındıran atıkların tutulmasından mutlak suretle kaçınılması gereklidir. Bunun nedeni ağır metallerin bakterileri olumsuz yönden etkilemesiyle biyokimyasal reaksiyonları durdurmalarıdır. Bu durumda depolama alanında mevcut organik maddelerin bozunması engellenmiş olunur. Tıbbi içerikli atık ve mineral yağ içerikli atıkların da depolanmasının yapılmaması gereklidir. Bu gibi maddeler depo alanı içerisindeki biyokimyasal reaksiyonları olumsuz yönden etkiler. Evsel atıkların depolandığı bölgelerde tehlikeli atıkların depolanması kesinlikle yapılmamalıdır [34].

f. Oksijen

Serbest oksijenin bulunmadığı ortamda anaerobik bakterilerin ayrışma prosesleri gerçekleşmektedir. Metanojenik bakteri, oksijen karşısında duyarlılığı çok yüksek olan bir bakteri türüdür. O₂, depolama alanlarındaki atıklara daima nüfuz edebilecek bir yapıdadır. Faka saha yüzeyinde bulunan aerobik bakteriler oksijeni tüketirler. Depo sahasındaki mevcut atıklar yeteri kadar sıkıştırılmamış ve üstlerine günlük 15 cm kalınlığında toprak serilmemişse oksijenin derinlere nüfuz edebilme ihtimali artar [9].Günlük örtü işleri ve yeterli sıkıştırma yapılmadığı takdirde kar veya yağmurla gelen

su, atıklara doğru sızıp aerobik biyolojik faaliyeti geliştirebilir ve sızıntı suyu miktarında artış görülebilir. Metanojenik bakteriler O₂ ortama girdiğinde tamamen yok olmazlar. Aerobik toprak çamurun anaerobik inkübasyonu CH₄ oluştuğu zaman sonuçlanır.

g. Hidrojen

Asetojenik ve fermantatif bakteriler aracılığıyla H₂ üretimi gerçekleşir ve de basıncı biyokimyasal reaksiyonları etkiler. H₂ basıncının düşük olması sebebiyle fermantasyon bakterileri, asetik asit, H₂ ve CO₂ üretimi yaparken, H₂ basınçlarının yüksek olduğu koşullarda CO₂ ve H₂ üretirler. Etanol (C₂H₅OH) propiyonik ve bütirik asit gibi organik bileşikler asetojenik bakteriler tarafından H₂ basıncı yüksek değilse oluşturulabilir. H₂ basıncı 9x10⁻⁵ atm.'nin altında olduğunda propiyonik asitin oluşması için gerekli koşul sağlanmış olur. Sülfat ve metanojenik indirgeyen bakteriler H₂ tüketirler. CH₄ oluşumu için 10⁻⁵ atm.'den düşük basınçlar uygundur [38].

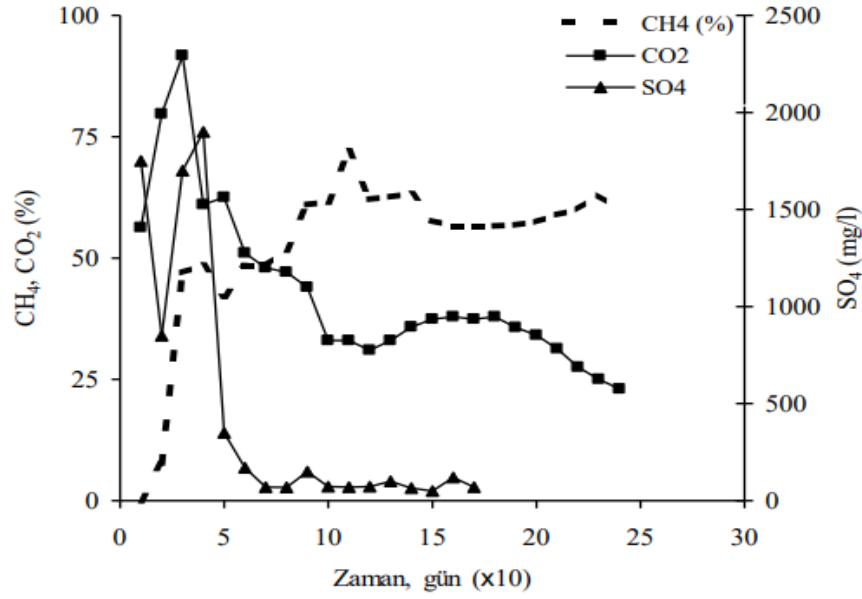
h. Nütrientler

Anaerobik mikroorganizmaların ihtiyaç duyduğu mikro nütrientlerin tamamı (kalsiyum, magnezyum, sülfür, demir, çinko, potasyum, selenyum, bakır ve molibden gibi) depolama alanların tamamında hemen hemen bulunabilmektedir. Substratın az bir kısmı 13 yeni hücre tarafından anaerobik ekosistemlerde özümser. Bu yüzden aerobik sistemlere göre çok daha az miktarda N ve P gerekmektedir. Organik maddeler (KOİ), P ve N arasındaki optimum oranlar; 100:0,44:0,08 olarak belirlenmiştir. Genellikle N ve P endüstriyel ve evsel atıkların bir arada depolandığı alanda sınırlayıcı değildir. Fakat ayrı ayrı depolandığında nütrient miktarında sınırlandırmaya sebep olabilir. Fosfor, anaerobik ayrışma proseslerini sınırlandıran en önemli nutrienttir [37].

i. Sülfat

SO₄²⁻ (sülfat) ve CH₄ bakterileri H₂ ve asetik asitin ayrışmasında rol oynarlar. Yapılan çalışmalar neticesinde ortamda SO₄²⁻ varsa CH₄ üretimi azalır. Düzenli depolama alanlarında atıklar sülfat içerikli ise depolanmalarına özellikle dikkat edilmesi gereklidir. Deri sanayi arıtma çamurları sülfat içerikli önemli atıklardan biridir. Şekil 2.12'de sızıntı suyunda bulunan SO₄²⁻ ve depo gazının zamana bağlı değişimleri

verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, SO_4^{2-} konsantrasyonundaki azalmayla CH_4 oluşumundaki artış aynı zamanda oluşmaktadır. Organik maddelerin CH_4 'a dönüşümü SO_4^{2-} H_2S 'e dönüşmeden engellenmektedir [23].



Şekil 2.12. Depo sahalarında SO_4^{2-} ile depo gazı bileşimi arasındaki ilişki [23]

CH_4 oluşumunun SO_4^{2-} ile ilişkisi, SO_4^{2-} 'in metanojenik bakteriler üzerinde zehirli bir etki ile bağdaştırılmamış, sadece substrat rekabetiyle ilişkilendirilmiştir. CH_4 bakterilerinin az olduğu kültürlerde SO_4^{2-} , CH_4 oluşumunu etkilemez, lakin eğer ortamda desulfobrio gibi SO_4^{2-} indirgeyen gruplar varsa, SO_4^{2-} 'in indirgenmesi çok fazla enerji gerektiren bir reaksiyon olmasından dolayı bir sınırlandırma söz konusudur [39].

2.3.4. Depo Gazının Çevreye Olan Etkileri

Düzenli depolama yapılabilecek alanlar, plansız depolama gibi bertaraf seçeneklerinin insan sağlığı ve çevre koşullarına olan zararlı etkilerini tamamen yok etme ihtiyacından ötürü geliştirilmiştir. Bu sayede eski yöntemlerin bazı dezavantajları ortadan kalkmıştır ancak, yeni ve önemli bir sorun olan depo gazı oluşumu ortaya çıkmıştır. Depo gazı

nedeniyle oluşabilecek tehlikeler bunların yanıcılığı, patlayıcılığı, kanserojen ve zehirli olma özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Depo gazı kaynaklı tehlikeler arasında yeraltı su kaynaklarının kirlenmesi, yangınlar ve patlamalar, kötü kokular, bitki örtüsü tahribatı, küresel ısınma, hava kirliliği ve sahada ortaya çıkan çökmeler olarak sıralanabilir [40].

a. Depo gazlarının bitki örtüsüne zararları

Depo alanlarında depo gazı kontrol altında tutulmazsa, gaz atmosfere yayılabilir. Bu esnada O₂ yer değiştirdiği için yüksek oranlarda bitki kökleri CH₄ ve CO₂ 'e maruz kalabilir. CO₂ oranının %5'e eşit ya da daha düşük olduğu durumlar bitki gelişimi için uygun bir koşuldur fakat bu oran %20'yi geçerse bitkiler üzerinde zehirleyici etki gösterir [41]. CH₄ ise doğrudan bitki gelişimini engellemeyebilir ancak CH₄ oksidasyonu esnasında topraktaki oksijen miktarı azalır ve ısı açığa çıkar. Bu durumun sonucunda toprak sıcaklığı yükselir ve bitki kökü havasız kalır.

Depo gazında eser miktarda bulunan bileşikler bitki örtülerine zehirleyici boyutta etki gösterebilir. NH₃, CO ve H₂S gibi inorganik bileşikler bitkiler için zararlıdır. Hidrokarbonlar, halo-organik bileşikler, siklik hidrokarbonlar ve Uçucu organik asitler bitkiler için oldukça tehlikelidirler. 10 ppm gibi düşük seviyelerde bile etilenin bitki örtüsü için zararlı olduğu yapılan çalışmalar sonucunda ispatlanmıştır.

Depolama yeri kapatılıp pasif aktif gaz toplama yöntemi aracılığıyla gazları toplama işlemine başlandıktan sonra üstlerine toprak serilir. En son kökleri derine doğru gitmeyen çalı türü bitkiler kullanılarak yeşillendirme yapılabilir [34].

b. İstenmeyen kokular

Depo sahalarının etrafında yaşayan ve çalışan insanlar için koku sorunu oluşması ciddi bir problemdir. Koku probleminin ortaya çıkmasına neden olan bileşikler H₂S, C₂H₆S ve merkaptanlar gibi sülfür bileşikleridir. H₂S yüksek konsantrasyon ve yüksek oranda yayılır. Depo yaşı, gazın oluşuma hızı, atık kompozisyonu, sahada bulunan mikrobiyal popülasyonların yapısı ve ayrışma safhası gibi etmenlerden dolayı depo gazı kaynaklı kokunun seviyesi değişir. Koku oluşumuna sebebiyet veren eser miktardaki bileşenlerin çoğunun zehirli olma ihtimali vardır.

Sahalarda koku ölçümü genelde işletme uygulamaları, saha genişletmesi ve izleme için gereklidir.

Ölçümler 3 yöntemle gerçekleştirilir.

- Koku panelleri
- Akıllı cihazlar
- Gaz kromatografisi [42].

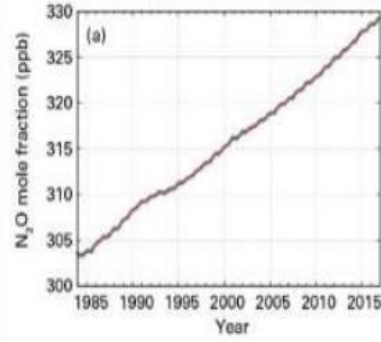
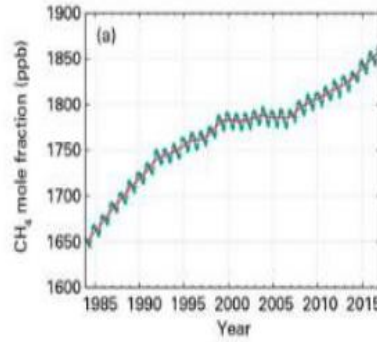
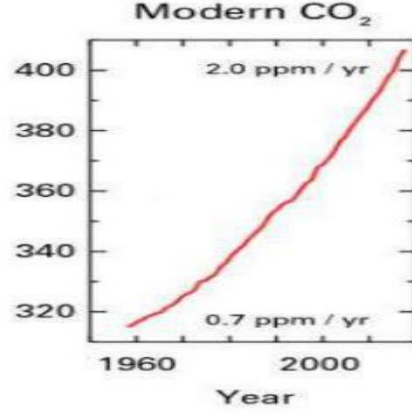
c. Yangın ve patlama tehlikesi

Depo gazının günümüzde kontrollü veya kontrolsüz bir şekilde yakılması, çevre kirliliğinin ortaya çıkması gerçeğini değiştirmez. Ön işleme tabi tutulmuş atıkların depolanması ve enerji ihtiyacı için kullanılmasından sonra, yangın riskinde azalma olmuştur. Fakat belediye atık depolama yerlerinde bu tehlikeli durum mevcuttur.

Depo gazı CH_4 yönünden zengin olduğu için enerji kazanımına elverişlidir fakat, uçuculuk, havayla birlikte patlayıcı olması gibi olumsuzlukları da mevcuttur. Depo gazının etrafa yayılımı adveksiyon ve difüzyon yolu ile gerçekleşir. Gerekli tedbirler alınmazsa depo gazı sahadan uzaklaştığında, depo sahasının yakınlarında bulunan binalara ve yer altı tesislerine girer. Toprak karakteristiğine bağlı olarak depo gazı, depolama alanından çok daha uzaklara ulaşabilir. Havanın depo gövdesine girmesiyle beraber CH_4 ve O_2 karışımının belli bir değere ulaşması sonucu yangın tehlikesi ortaya çıkabilir. Gaz toplama ve taşıma sistemlerinden çok fazla havanın çekilmesiyle hava girişi açığa çıkmaktadır. Depolanacak maddelerin alevlenme sıcaklığı $60\text{ }^\circ\text{C}$ 'den düşük olmamalıdır [34].

d. Küresel ısınma

Depo sahalarında açığa çıkan CH_4 ve CO_2 sera etkisine veya küresel ısınmaya sebep olur. CH_4 , küresel ısınmaya CO_2 'e kıyasla 28 kat daha fazla etki yapıp diğer gazlarla kıyaslanacak olursa atmosferde daha uzun süre kalır. CH_4 molekülünün atmosferde 83 kat daha az miktarda bulunmasından ötürü, CH_4 'ın sera etkisi CO_2 kaynaklı sera etkisinin dörtte biri kadardır. Sera gazlarının atmosferde yıllara göre değişimi Şekil 2.13'te verilmiştir.



Şekil 2.13. Sera gazları konsantrasyonunda tarihsel gelişimi [34]

Atmosferik CH_4 konsantrasyonu yıllık bazında % 1-2 oranlarında arttığı tespit edilmiştir. Küresel ısınmanın %18 civarının CH_4 kaynaklı olduğu belirlenmiştir. Tespit edilen değer bir yılda yaklaşık 500 milyon tona denk gelip bunun da 40-75 milyon tonu depo sahası kaynaklıdır. Açığa çıkan depo gazı enerji amaçlı kullanılmadığı sürece, nüfus ve şehirleşmenin artışıyla orantılı olarak depolama sahaları atmosferik CH_4 konsantrasyonlarının kaynakları arasında yer alacaktır [34].

e. Hava kirliliği

Depo gazları, depo alanlarından atmosfere doğru yayılarak küresel ve bölgesel ölçekte hava kirliliğine yol açmaktadır. CO_2 ve CH_4 ' ün yanı sıra eser miktarlarda da olsa uçucu organik bileşikler (VOC) atmosfere karışarak hava kirliliğine neden olmaktadır. VOC'ler depo sahasında bulunan atıkların yapısında bulunabilmekle birlikte atıkların parçalanmaları sonucunda da meydana gelebilmektedir [40]. Depo sahalarında açığa çıkan uçucu organik bileşiklerin (VOC) emisyonları $4 \cdot 10^{-4}$ - $1 \cdot 10^{-3}$ kg/m^2 /gün arasında değişebilir.

Ayrıca, metanojenlerin büyümesini inhibe ederek metanın oluşmasını etkileyebilirler. Gaz toplama sisteminde bu gazlar korozyona sebep olabilir.

Hava kirliliğinin sonucunda kanser riski de gün geçtikçe artmaktadır ve ozon tabakasına da ciddi ölçülerde zarar verdiği bilinen bir gerçektir [34].

f. Yeraltı suyu kirliliği

Depo gazları yüksek oranlarda CO₂ içerir. CO₂ yüksek çözünürlüklü olduğu için yeraltı sularını asidik yapabilir. Ayrıca depo gazında bulunan eser miktardaki zehirli gazların da hava ve yeraltı suyu kaynaklarına ciddi boyutlarda zarar verebileceği tespit edilmiştir. Atık içindeki mevcut ağır metaller de zaman içinde çözünerek yeterli sızdırmazlığı sağlanmayan depolama alanlarında yer altı suyuna karışır [34].

2.3.5. Depo Gazının Hareketi Ve Taşınması

Depo gazının hareketi basınç akımı ve difüzyon hareketiyle gerçekleşmektedir. Difüzyon ile yayılım, gazın yüksek konsantrasyonlu alandan düşük konsantrasyonlu alana yayılmasıdır. Basınç akımı ile yayılımda ise basınç farkları esas alınır. Oluşan depo gazı, alçak basınçlı alanlara doğru yönelme eğilimi göstermektedir. Depo alanlarında düşey gaz hareketine kıyasla yatay gaz hareketlerinin meydana gelmesi daha olası bir durumdur. Bu durum iki şekilde açıklanabilir.

1. Tabaka esasına göre düzenlenen atıklar her bir atık katmanının yüzeyinde daha çok sıkışarak daha düşük porozite meydana getirir. Bu duruma tabaka yüksekliğinin oldukça büyük olduğu alanlarda rastlanır.

2. Günlük ara ve nihai örtü materyalleri düşük permeabiliteli yatay tabakaların açığa çıkmasına sebep olur. Bu durum geçirimli toprak kullanıldığında dahi gözlemlenir [41].

Yatay tabakanın meydana gelmesiyle, atığın içerisinden süzülen yağmur suyu, düşey gaz hareketini kontrol altında tutacaktır. Genel olarak günlük örtü tabakalarında toplandığı bilinen sızıntı suyu bu hareketiyle düşey gaz hareketini azaltarak yatay gaz hareketini alanın sınır hatlarına doğru artırır.

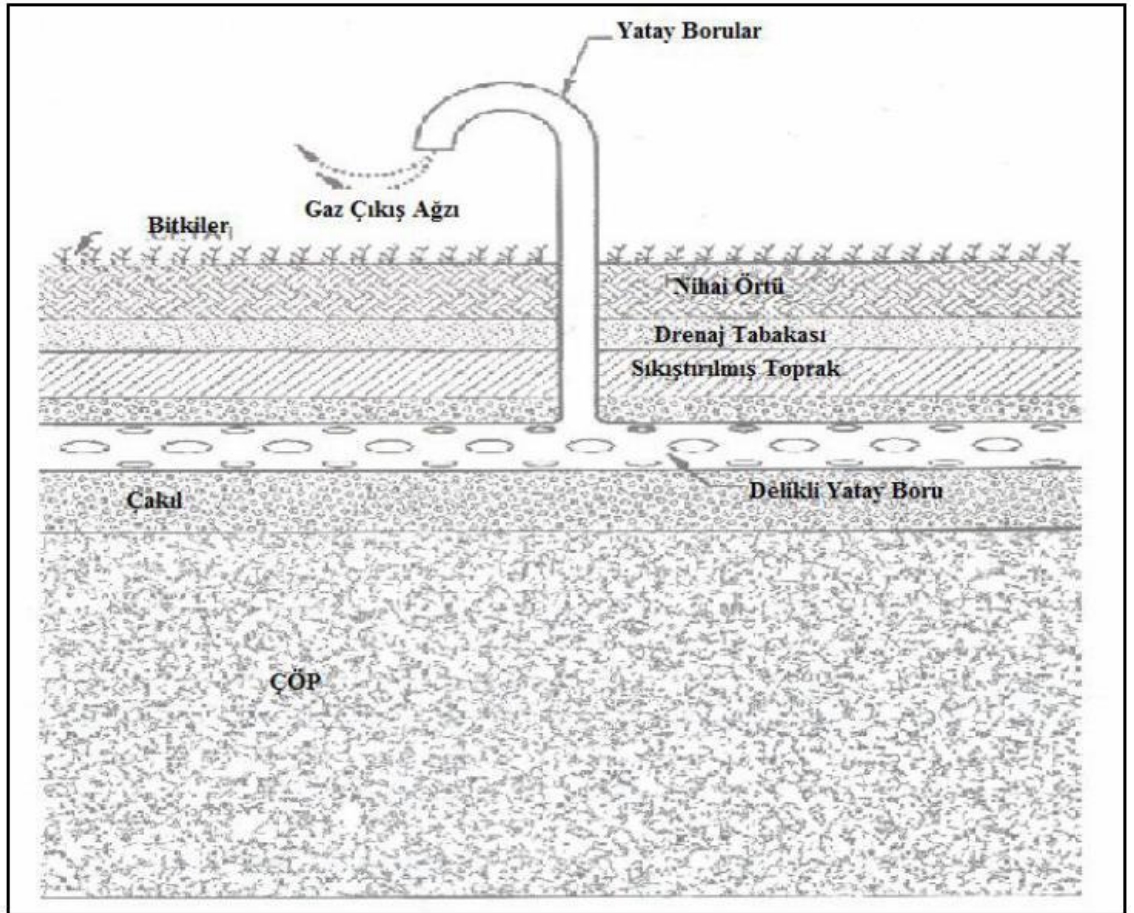
Metanın çoğunluğu atmosfere doğru yükselir fakat, depo sahasının yanal aralıklarında yaklaşık %40 metan mevcut olabilir. Eğer metan rastgele dağılacak olursa, özgül ağırlığı havanın özgül ağırlığından az olduğu için, başka depo sahaları veya bina altlarına doğru toplanabilir. CO₂ ise havadan ağır olduğu için depo sahasında çökme

eğilimindedir. Bu nedenden ötürü depo sahalarının aşağı bölgelerinde uzun seneler CO₂ fazlalık gösterebilir [41].

2.3.6. Depo Gazının Toplanması ve Kontrolü

Katı atık depo sahalarında gaz yönetimi için kurulacak sistemler pasif ve aktif gaz toplama sistemi olarak ikiye ayrılır.

Pasif sistemlerde, bir depolama sahasında üretilen gazın hareketi için, gazın basıncı temel unsurdur. Böyle bir durumda harici bir emme ünitesi kurulmadan gaz pasif olarak depolama alanından alınıp bertarafı yapılabilir veya enerji üretimi için kullanımı tercih edilebilir.



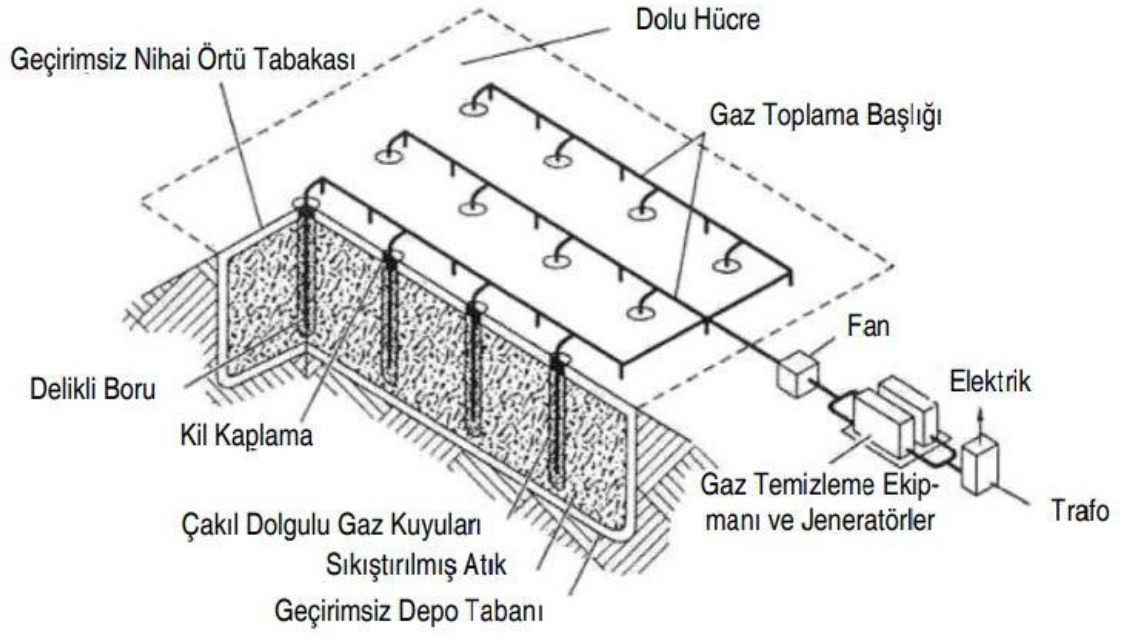
Şekil 2.14. Depo gazı toplanması için pasif gaz tahliye sistemleri [32]

Şekil 2.14'teki sistem yardımıyla gazın depolama alanı dışına çıkma işlemi gerçekleştirilir. Ancak, depo gazını atmosfere atmak için konveksiyon düzeneklerinin ve doğal basıncın kullanıldığı bu pasif sistemlerde gaz basıncının düşük olmasından

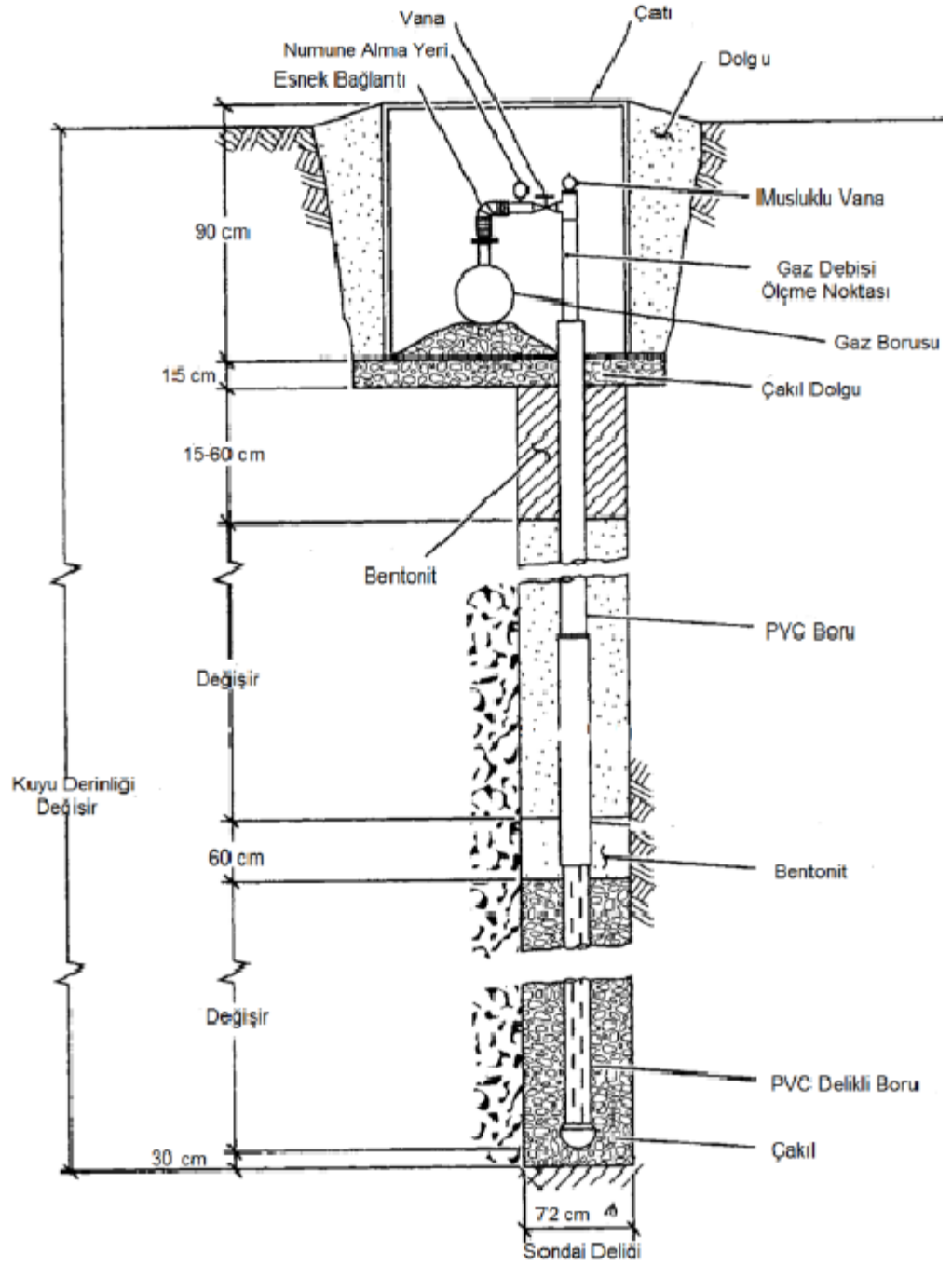
ötürü çoğu depo sahasında gazın yalnızca bir bölümünün dışarı verilebileceği tespit edilmiştir. Dolayısıyla ciddi metan birikiminin olabileceği yerlerde bu sistemler koruma yönünden uygun olmayabilir [7].

Aktif sistemlerde ise, depo gazının yanal hareketi, saha çevresinde gaz çekme kuyuları kullanarak ve bu kuyulara doğru bir basınç gradyanı yaratacak kısmi vakumun oluşturulması ile kontrol edilmektedir [3]. Bu vakum, blower adı verilen üniteler ile yapılabilmektedir. Emiş işleminin aşırı hızda yapılmaması gereklidir, böylece depolama sahasına hava girişi engellenmiş olunur.

Depo sahalarında gaz çekilmesi yapılırken yatay ve düşey gaz kuyuları kullanılmaktadır. Bazı durumlarda her ikisi de kullanılabilir. Borular, gazın emilimine imkan tanıyacak şekilde delikli olmalıdır. Genel olarak toplama borusu, 5-12 cm aralığında, yüksek yoğunluklu ve delikli polietilen (HDPE) borulardan oluşmaktadır. Düşey gaz toplama sistemleri 50-70 m aralıklarla yerleştirilmiş düşey gaz kuyularından oluşmaktadır. Kuyular, depo sahası üzerine 80-120 cm çaplı sondaj makineleri aracılığıyla inşa edilir. İnşa edilen kuyuların derinlikleri, sahanın toplam derinliğinin %50-90 mertebesinde olmalıdır. 10-20 cm çapındaki borular sondaj kuyularına gazın toplanabilmesi için yerleştirilmelidir. Üstte kalan boruların 4-5 metresi deliksiz olmalıdır. Geriye kalan boruların gazı toplayabilmesi için delikli olması gereklidir. İlerleyen zamanlarda depo sahasında oluşacak çökmelerden zarar almaması için boru bağlantıları esnek olacak şekilde inşa edilmelidir. Deliksiz borularla delikli boruların birleştiği yer en az 0.5 m bentonit-kum karışımı malzemeyle tıkanmalıdır. Depo sahanının üstüne gelen havanın atık kütlesi içine girmemesi için ve toplanan depo gazıyla karışmasını engellemek için bu işlem yapılmaktadır. Deliksiz boruların çevresindeki boşluklar kumla, delikli boruların etrafı çakıllarla kapatılmalıdır [43-44].

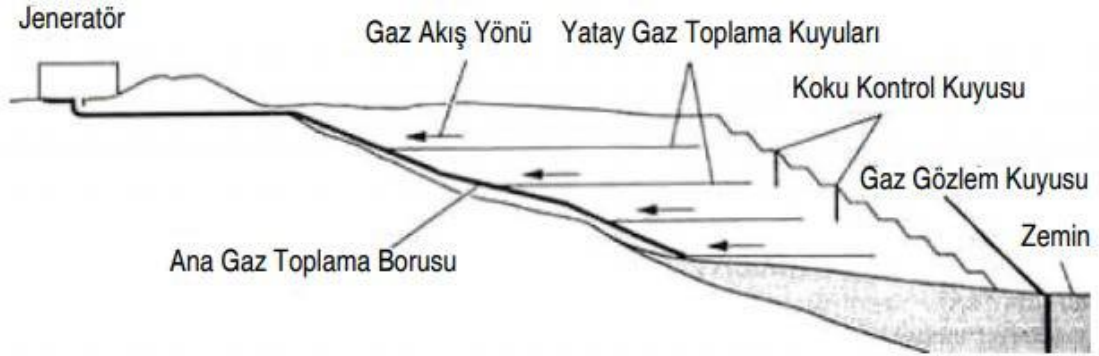


(a)



(b)

Şekil 2.15. (a) Dikey Kuyuyla Gaz Toplama ve Geri Kazanma Sistemi (b) Dikey aktif gaz toplama sistemi borusu [20, 45]



Şekil 2.16. Yatay gaz toplama sistemi kesiti [20]

2.3.7. Depo Gazı Miktarının Hesaplanması

Depo gazlarının geri kazanımı için proje geliştirmeden önce bir depo sahasının mevcut ve gelecek yıllardaki potansiyel depo gazı miktarının bilinmesi gereklidir. Açığa çıkan depo gazı miktarı sahadan sahaya farklılık gösterir.

- Atıkların özellikleri,
- Toplanan gaz ve dökülen atıkların miktarı,
- Toplanma ve tesis sisteminin tasarımı,

gibi etmenlere bağlıdır.

Teoride 1 tonluk katı atık ayrıştığında % 55 CH₄ ile 19750 kJ/m³ düşük kalorifik değere sahip 400 m³ depo gazı ortaya çıkar.

Var olan gazın miktarını belirleme ve gelecek zamanlarda açığa çıkabilecek gazın miktarını belirlemek için 4 metot kullanılır. Bunlar arasında en güvenilir olan test kuyuları açmaktır. Diğer yöntemler ise substratların ayrışma denklemi ile hesaplanması, yaklaşık tahmin metodu ve matematiksel model uygulamalarıdır [9].

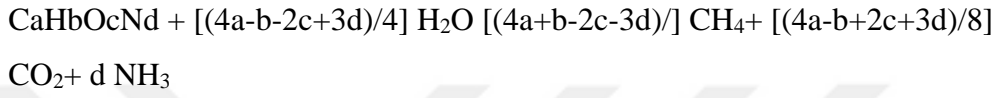
1. Test kuyuları metodu

Test kuyuları metodu, gazın miktarını belirlemek ve bu kuyularda toplanan gazı ölçmek için kullanılacak en güvenilir yöntemdir. Bu yöntemi kullanmak çok pahalıdır fakat yüksek miktarda gaz üretiminin gerçekleşmesi için yeterli atığın bulunması halinde bu yöntem tercih edilir. Güvenilir sonuçlara ulaşabilmek için sahanın büyüklüğü ve atıkların homojenliğine göre test kuyuları uygun bölgelerde gerekli sayıda açılmalıdır.

Gelişmekte olan ülkelerde; atıkların depo alanında homojen dağılmaması ve gevşek bir şekilde sıkışmasından ötürü bu yöntem ile üretilen gazın miktarı tayin edilirken, kuyularda toplanan gazın miktarının yarısı hesaba katılır [5].

2. Substratların ayrışma denklemi ile hesaplama

Bu yöntemde atıkta bulunan her organik madde $C_aH_bO_cN_d$ formunda genel bir formülle gösterilerek, aşağıdaki eşitlik yardımıyla toplam gaz hacmi tahmin edilir. Bu denklemde ayrışabilir organik atığın tümünün CO_2 , CH_4 ve NH_3 ' e dönüştüğü kabul edilir.



Bu yaklaşımla elde edilen sonuç optimum şartlar altında atıkların organik ayrışabilir kısımlarının bozunmasıyla oluşacak maksimum gaz miktarıdır. Organik atıkların tümü ayrışmadığı için gerçek değer elde edilen değerden daha düşüktür [4].

3. Yaklaşık tahmin metodu

Oluşacak depo gazının miktarını hesaplamada yararlanılabilecek en basit yöntem her 1 ton atıktan yılda $6 m^3$ gaz oluşacağını varsaymaktır. İşletilen birçok depolama sahasından bu tahmini değere ulaşılmıştır. Ortalama bir depo sahasının enerji geri kazanımını desteklemesini yansıtmaktadır. Bu yaklaşımda depo alanındaki atık miktarı bilinmelidir. Ancak atık, iklim ve depo alanına mahsus diğer özellikleri gerekli kılmaz [4].

4. Depo gazı oluşumunun matematiksel modellenmesi

Matematiksel model hesapları genel olarak atık özellikleri, miktarı ve depolama zamanı gibi bilgilere gerek duymaktadır. Katı atık depo alanlarında meydana gelen gazın belirlenmesine ilişkin modellerden literatürde sıklıkla yararlanılan ve Türkiye şartlarına en uygun sonuçları ortaya koyabilecek USEPA LandGEM, Scholl Canyon ve Tabasaran-Rettenberger modellerine aşağıda değinilmiştir [4].

a. Tabasaran/Rettenberger modeli

Tabasaran/Rettenberger tarafından geliştirilen gaz üretimi hesabı için kullanılan matematik modelidir. Modelin denklemi aşağıda gösterilmiş olup kümülatif artış göstermektedir.

$$G_t = 1,868 \cdot C_{org} \cdot (0,014T+0,28) (1- 10^{-kt})$$

G_t : t zamanına kadar üretilen gaz miktarı (m^3/ton)

G_{org} : Organik karbon içeriği (kg/ton atık)

T : Sıcaklık ($^{\circ}C$)

t : Zaman (yıl)

K : Ayrışma sabiti ($yıl^{-1}$)

Parametre seçimi çok önemlidir. G_{org} değeri hane kaynaklı katı atıklar için 170-200 kg/t aralığında değişim göstermektedir. Depo gövdesinde sıcaklık değeri çoğunlukla 25-35 $^{\circ}C$ aralığındadır [7].

b. Scholl Canyon modeli

Tek kademeli 1. derece kinetik olan bu modelde; anaerobik şartların ve mikrobiyal aktivitenin meydana gelmesi için ihtiyaç duyulan bir gecikme süresinden sonra depo gazı oluşumunun maksimum hızla başladığı varsayılmaktadır. Denklemden bu modele ait eşitlik verilmiştir.

$$Q = k \cdot L_0 \cdot R \cdot e^{-kt}$$

Bu denklemde;

Q = Metan üretim hızı ($m^3/yıl$),

L_0 = Potansiyel metan üretimi kapasitesi (m^3),

k = Metan üretim hız sabiti ($yıl^{-1}$),

R = Depolanan yıllık atık miktarı (ton),

t = Atığın ilk depolandığı seneden başlayarak geçen süre (yıl),

olarak ifade edilmektedir [46].

c. United States Environmental Protection Agency (USEPA) LandGEM modeli

LandGEM, Amerika'daki mevcut atık depolama sahalarını hava kalitesi izleme programına dahil ederek emisyon değerlerinin hesaplanması için EPA uzmanları tarafından geliştirilmiştir [47].

LandGEM katı atıkların ayrışmasından kaynaklı emisyonları ölçen bir denklemdir. 1. dereceden ayrışma reaksiyonuna dayanmaktadır. Model, emisyonlar için CAA (Clean Air Act) yönetmeliğinin uygulanabilme esasına dayalıdır. Depo sahalarının yeni olanları için NSPS (New Source Performance Standrats) ve mevcut sahalar için ise emisyon değerleri esas alınmıştır. CAA değerleri hesabı yapılabilen maksimum emisyon değerlerini ortaya koyacaktır. Saha verilerinin yetersiz olduğu durumlarda başka bir model değeri olan AP-42 kullanılmaktadır. AP-42 değerleri Amerika'daki Çevre Koruma Örgütleri'nin Hava Kirletici Emisyon Faktörleri Derlemesi yayınından alınan değerlere dayanmaktadır [44].

Depo alanından ileri gelen emisyonların öngörülebilmesi için aşağıdaki verilere ihtiyaç duyulmaktadır;

- Depo alanının hangi yıldan itibaren işletildiği
- Depo alanının tasarım kapasitesi
- Metan üretimi hızı (k)
- Depo alanına senede gelen atık miktarı veya depo alanında gömülmüş halde mevcut olan atık miktarı
- Potansiyel metan üretimi kapasitesi (L_0)
- Depo alanında atıkların karışık bertaraf edilip edilmediği

k sabiti depo alanındaki her bir atık kütlelerinin metan üretimi hızını göstermektedir. k değeri şu verilerin bir fonksiyonudur:

- Atığın nem muhtevası
- Nutrient muhtevası
- Sıcaklık
- pH

Modelde yararlanılan birinci dereceden kinetik eşitlik aşağıda verilmiştir.

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

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

L_0 : Metanın potansiyel üretim kapasitesi ($m^3 CH_4/ ton$ atık)

R : Yıllık atık miktarı (ton/yıl)

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

c : Saha kapatıldıktan sonraki yıl sayısı (yıl)

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

k ve L_0 değerleri sahada yapılan gaz ölçümleri ile hesaplanabilir. Sahada yapılmış herhangi bir ölçüm yoksa, EPA tarafından bulunan sabit değerler ile modelleme yapılabilir [48-49].

Model, CO_2 ve CH_4 emisyonlarının aynı oranda olduğunu kabul etmektedir. Depo gazı miktarının metan emisyonunun iki katı olduğu şeklinde varsayım yapılmaktadır. (EPA modeli parametreleri Tablo 2.3'te belirtilmiştir [30].

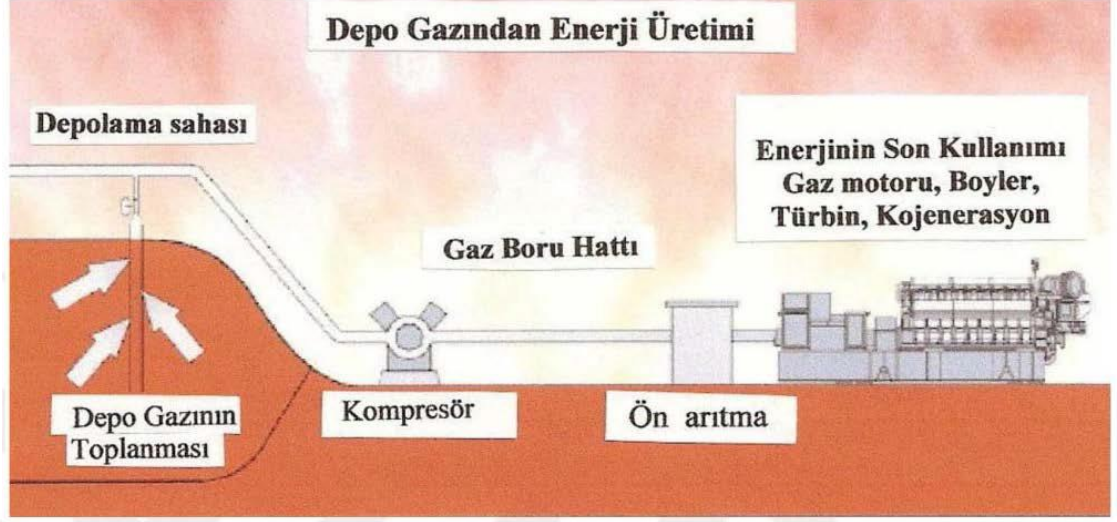
Tablo 2.3 EPA modeli parametreleri [48].

Parametre	CAA		AP-42	
	P>640 mm	P<640 mm	P>640 mm	P<640 mm
k (1/yıl)	0,05	0,02	0,04	0,02
L_0 (m^3/ton)	170	170	100	100

2.3.8. Depo Gazının Kullanılması

Depo gazının kullanılmasını etkileyen en temel faktörlerden birisi de temizlenme derecesidir. Uygulamaların ekonomik yönleri de önemlidir. Depo gazları direkt yakma, kimyasal madde üretimi, türbin yakıtı, havalandırma, araç yakıtı, doğalgaz şebekesine enjeksiyon gibi seçeneklerden biri kullanılarak ekonomik bakımdan değerlendirilebilir [44].

Saha ve çevresinin enerji ihtiyacına bağlı olarak kullanılacak alternatif seçimi belirlenir. Gerekli incelemeler yapıldıktan sonra en cazip seçenekler, tesiste üretilebilecek gazın kalitesine ve miktarına elverişli olanlardır [50].



Şekil 2.17. Depo gazından enerji üretim sistemi [9]

a. Bölgesel gaz kullanımı

Bölgesel kullanım, geri kazanımı gerçekleştiren bir gazın en kolay kullanım yöntemidir. Bölgesel kullanımın seçimi, gazın peş peşe kurutucular veya filtreler içeren boru hattı aracılığıyla taşınmasını gerektirir. Maliyeti azaltmak için mümkün olduğu kadar, tek noktada kullanım tercih edilmelidir [51].

Gaz, kullanıcılara iletilmeden temizlenmelidir. Basit seviyede temizlenen gaz, ortalama %55 oranında CH_4 içerir. Bu düzeydeki CH_4 konsantrasyonundan motorlar ve kazanlar da dahil birçok ekipmanda yararlanılabilir [50].

Fizibilite değerlendirmesi yapabilmek için, kullanıcılara gazı iletecek boru hattının uzunluğu konusunda fikir yürütülmelidir. 3 km.'nin üzerinde olan mesafeler maliyet-etkin olarak bulunmamaktadır. Güzergah, boru hattının inşaatı için de hazırlanmalıdır. Doğal engeller, gaz iletim boru hattının maliyetini arttırabilmektedir [51].

b. Elektrik üretimi

Direkt yakmanın yapılamadığı durumlarda depo gazının ekonomik bir şekilde değerlendirilebilmesi için en elverişli yöntemlerden birisi, oluşan gazdan elektrik enerjisi üretilmesidir.

Bölgesel elektrik şebekesi üzerinden dağıtılmak ya da sahadaki gereksinimlerde kullanılmak üzere üretilen elektrik için üretim yönteminin seçilmesinde öngörülen gaz

debisi oldukça önemli bir parametredir. Elektrik enerjisi elde etmek için çeşitli yöntemler vardır. En sık tercih edilenler, gaz türbinleri ve içten yanmalı motorlardır.

Gaz türbinleri sadece büyük depolama sahalarının için uygundur. Çünkü içten yanmalı motorlarla kıyaslanacak olursa daha yüksek gaz debisine ihtiyaç duymaktadır. Gaz türbinleri, nispeten daha sürekli çalışma ihtiyacı göstermektedir. Değişen elektrik yüklerini gün içerisinde karşılayabilmek amacıyla aç-kapa yapılması son derece yanlıştır. Gaz türbinleri, elektrik şebekesini devamlı besleyecek şekilde elektrik üretimi için kullanılmaktadır. İçten yanmalı motorlar, kolay bir şekilde açılıp kapatılabilmektedir ve de kesikli güç ihtiyaçlarını karşılayabilmek için uygun görülmektedir [52].

Tablo 2.4. İçten yanmalı motorlar ve gaz türbinlerinin karşılaştırılması [52]

Parametre	Avantajlı Sistem	
	Gaz Türbinleri	İçten Yanmalı
Motorlar		
İstenen boyutta bulunabilirlik		x
Yatırım maliyeti		x
İşletme ve bakım maliyeti	x	
Enerji etkinliği ve gelir		x
Toplam maliyet		x
Korozyona dayanıklılık	x	
Hava emisyonları	x	
Uzmanlık bakım ihtiyacı		x
İşletmede özel dikkat ihtiyacı	x	

➤ İçten yanmalı motorlar

En yaygın kullanılan dönüşüm teknolojileri içten yanmalı motorlardır. Sabit motorlar, orta kalite gaz kullanarak elektrik üretebilmektedirler. Motorların kapasitesi 30-2000 kilowatt aralığında değişir. Depo sahalarında 700 kW-1,4 MW kapasitesindedirler [51].

Maliyet açısından uygun olan motorlar içten yanmalı olanlardır. Düşük üretim potansiyellerine karşı esnek olmaları neticesinde, küçük depo alanları için, onları tek seçenek haline getirmiştir. İçten yanmalı motorların birçoğu, geri kazanım projesi başlatılırken temin edilip daha sonraları gaz oluşumu azaldıkça devreden çıkarılabilir ya da kullanılacak alternatif alanlara taşınabilir [50].

İçten yanmalı motorlar güvenilir ve etkin cihazlardır. Depo sahasında açığa çıkan gazların içten yanmalı motorlarda kullanılması sonucunda, gazdaki mevcut kirlilikler korozyona neden olabilmektedir. Gazın bünyesindeki kirlilikler, içten yanmalı motorların yüksek basınç ve sıcaklıkta kimyasal reaksiyona girebileceği klorlu hidrokarbonlar bulunabilmektedir. Ayrıca, depo gazındaki değişim gösteren hava, yakıttaki salınımlara karşı daha az esnektir. İçten yanmalı motorların bazıları ciddi ölçüde NOx emisyonuna sebep olabilmektedir. Bu nedenle NOx emisyonlarını azaltmaya yardımcı olacak tasarımlar da mevcuttur [52].

➤ **Gaz türbinleri**

Gaz türbinleri, elektrik firmalarına, çevre yerlerdeki kullanıcılara sahada kullanılabilmesi veya satmak amacıyla orta kaliteli gaz kullanılarak elektrik üretebilmektedir. Gaz türbinleri ekonomik açıdan daha caziptir. İçten yanmalı motorlara kıyasla daha yüksek gaz debisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebepten ötürü büyük depolama sahalarında kullanım alanı bulabilmektedirler [51].

Kapasiteleri 500 kW-10 MW arasında olmakla birlikte depo alanlarında genel olarak 2-4 MW kapasitesindedir [50].

➤ **Boru hattına verme**

Bölgesel kullanıcının bulunmaması halinde, depo gazını boru hattına vermek daha iyi bir tercih olacaktır. Yakın civarlarda kalitesi orta seviyelerde olan gazı taşıyan bir boru hattı varsa, gaz verilmeden önce sadece düşük bir gaz işlemesi yapmak yeterli olacaktır [50]. Bu işlem, gazın boru hattı basıncına kadar sıkıştırılmasını da gerekli kılar.

Yüksek veya orta kalitede gaz, istenilen saflığa getirilene kadar saflaştırılarak güvenlik önlemleri açısından bir takım koku veren bileşikler eklenerek doğal gaz boru hatlarında kullanılabilir. Fakat depo gazının her iki durumda bu yöntemlerde kullanılması ekonomik olarak uygun değildir. Bu yöntem çok büyük depo sahalarında kullanılırsa şayet ekonomik açıdan uygun olabilmektedir [32, 50].

Depo gazı, birçok ülkede yalnızca katı atık kamyonlarının yakıt ihtiyacını karşılamak amacıyla tercih edilmektedir. Nedeni, depo gazı yakıt olarak kullanılmak istendiğinde; doğal gaz kalitesine getirilmesi, araçların doğal gaz ile çalışmaya modifiye edilmesi ve bu araçlar için yakıt istasyonlarının yapılması gibi çeşitli zorluklar içermesidir [7].

Tablo 2.5. Depo gazı kullanım seçeneklerinin fizibilite özeti [51]

Seçenekler	Depolanmış min. atık miktarı	Gaz kalitesi (min. CH ₄ kons.)	Uygulanabilirlik
Bölgesel Gaz Kullanımı			
Sahada veya endüstri, yerleşim yerleri veya ticari tesislerde doğrudan kullanım	1 milyon ton	%35	Saha dışında kullanım tesisi sahadan en fazla 3-4 km. uzakta olmalıdır. Sahada yüksek enerji gereksinimi olan tesisler için uygundur. Özellikle doğalgaz kullanan tesisler.
Elektrik Üretimi			
IY Motorlar	1,5 milyon ton	%40	Elektrik şebekesi gereklidir. Satılan elektrik kullanıcının ekipmanıyla uyumlu olmalıdır. Sahada kullanım elektrik kullanan yardımcı ekipmanlara sahip sahalar için uygundur.
Gaz Türbinleri	2 milyon ton	%40	Elektrik şebekesi gerekli, satılan elektrik kullanıcının ekipmanıyla uyumu olmalıdır. Sahad kullanım elektrik kullanan yardımcı ekipmanlara sahip sahalar için uygundur.
Boru Hattına Verme			
Orta Kalite Gaz Boru Hatları	1 milyon ton	%30-50	İlave gazı taşıyacak kapasitede olmalıdır.
Yüksek Kalite Gaz Boru Hatları	1 milyon ton	%95	Özel gaz arıtma gerekmektedir. İlave gazı taşıyabilmelidir

2.4. Depo Gazından Enerji Üretilmesi

Hayvansal atıklardan faydalanılarak, biyogaz üretimi ilk kez İngiltere’de gerçekleştirilmiştir ve elde edilen biyogazla 1885’de Ekseter şehrinin sokakları aydınlatılmıştır. Bu çalışmaları Hindistan Bombay ‘da 1900 senesinde kurulan biyogaz üreticileri izlemiştir. 1900’lü yılların ilk çeyreğinde biyogaz dünyada yaygınlaşmaya başlamıştır. Dünya’da hayvan gübresinden biyogaz üretim tesislerinin %80’i Çin’de, %10’u Hindistan, Nepal ve Tayvan’da ve geri kalanı diğer ülkelerde kuruludur.

Tablo 2.6 Ülkeler ve tesis sayıları [9].

Ülkeler	Tesis Sayısı
Çin	7.000.000
Hindistan	2.900.000
Kore	29.000
Brezilya	2.300
Bangladeş	566
Nepal	49.500

Biyogaz tesislerinin yanı sıra, “katı atık termik santralleri” ile de elektrik enerjisi üretimi yapılabilir. Gübre ve yemek artıklarından faydalanarak enerji elde etmesine yönelik çalışmalar Avrupa’da yıllar geçtikçe artış göstermektedir. İsveç, Danimarka ve Almanya’da biyogaz üretim tesislerinin yapım çalışmaları devam etmektedir [9].

2.4.1. Türkiye’de Depo Gazından Enerji Üretimi

Türkiye’de biyogaz ile ilgili yapılan ilk çalışmalar 1957 senesinde Toprak ve Gübre Araştırma Enstitüsü’nde başlamıştır. 1963–1969 yılları arasında Eskişehir Bölge Toprak Su Araştırma Enstitüsü’nde çalışmalar ilerlemiştir. 1982 yılında ülkemizde biyogaza yönelik çalışmalara başlanmış ve pilot uygulamalar gerçekleştirilmiştir ve Türkiye’nin biyogaz potansiyeli 2.8-3.9 milyar m³ olduğu belirlenmiştir.

Türkiye’de biyokütleden ileri gelen enerjinin miktarı toplam enerji üretim oranı içinde oldukça düşüktür. 2019 yılı Temmuz ayında, toplam enerji üretiminin yalnızca % 0,88’ini oluşturmaktadır. Kaynak bazında lisanslı elektrik üretimi Temmuz 2019 döneminde Tablo 2.7’de verilmiştir [53].

Tablo 2.7. Türkiye geneli lisanslı elektrik üretiminin kaynak bazında dağılımı (Temmuz 2019) [53]

Tesis Bilgisi	Üretim (MWs)	Oran (%)
Rüzgar	1.964.953,33	7,14
Güneş	18.386,22	0,07
Jeotermal	677.124,83	2,46
Biyokütle	243.182,93	0,88
Barajlı Hidrolik	6.129.972,15	22,28
Doğalgaz	6.112.309,31	22,21
Linyit	4.464.226,45	16,22
Asfaltit	189.724,61	0,69
Taş Kömürü	333.542,04	1,21
İthal Kömür	5.824.421,73	21,16
Akarsu	1.515.580,46	5,51
Fuel Oil	45.702,00	0,17
Genel Toplam	27.519.126,06	100,00

Türkiye’ de bulunan mevcut enerji tesislerinin toplam kurulu gücü 84.557,76 MW iken, biyokütle enerji tesislerinin toplam kurulu gücü sadece 623,09 MW olup biyokütle enerji tesislerinin kurulu gücünün toplam enerji tesislerinininkine oranı % 0,74’tür. Ayrıca 2019 yılının ilk yarısıyla birlikte elektrik üretim santrali sayısı lisanssız santrallerle birlikte 7.957’ye kadar çıkmıştır. Bu santrallerden 48 tanesi jeotermal, 67 tanesi kömür, 664 tanesi hidroelektrik, 257 tanesi rüzgar, 327 tanesi doğal gaz, 6.349 tanesi güneş, 245 tanesi ise diğer kaynaklı santrallerdir.

Türkiye’deki mevcut santrallerden ilki 2004 yılında İstanbul’ da kurulmuştur. 2019 yılı Kasım ayından beri 78 adet santral devrededir [53].

2.4.2. Depo Gazı Kullanımının Ekonomik Faydaları

Depo gazı yenilenebilir enerji bakımından zaman içinde maliyet açısından ucuz hale gelen bir kaynağa dönüşmüştür. Depo gazından elektrik üretiminin avantajları diğer teknolojilerle kıyaslandığında;

- Yakıt masrafının olmaması ve kapasite faktörü dolayısıyla, enerji maliyeti diğer teknolojilerin çoğundan daha ekonomiktir.
- Doğalgazla kıyaslanacak olursa yakıt için döviz giderlerine ihtiyaç yoktur.
- Depo sahasında gaz yayılımı azalacağı için çevre açısından olumlu bir gelişmedir.
- Depo alanında yapılan üretim mevsimden mevsime önemli ölçüde değişim göstermez. Bir santralin hangi oranda verimli kullanıldığını gösteren ve santralin

tam kapasite çalışma süresinin birim zamana (genelde 1 sene olarak baz alınır) oranı olan kapasite faktörü ise %90 civarlarındadır. Örneğin rüzgar santrallerinde kapasite faktörü %30' dan düşüktür ve üretim gün içerisinde saatten saate değişim göstermektedir.

- Depo gazı santralleri şehrin merkezine kurulu değildir. Bu yüzden şebeke bağlantıları kısadır, bu durum da maliyet ve enerji kayıplarını önemli bir miktarda azaltır.

2.4.2. Türkiye’de Depo Gazından Enerji Üretimine Yönelik Örnek Tesisler

a. Mamak Çöplüğü Biyogaz Tesisi

Ankara'nın Mamak ilçesindedir. ITC-KA Atık Enerji firmasına ait santral 25,43 MW'e kurulu güçle Türkiye'nin 440. Ankara'nın 11. büyük enerji santralidir. Ayrıca bu tesis Türkiye'nin 3. büyük biyogaz tesisidir. Ortalama olarak 151.711.707 kWh elektrik enerjisi üretimiyle 41.771 kişinin günlük hayatta ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayabilmektedir. Tesis sadece konut elektrik tüketimi baz alacak olursa 50.791 konutun elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayabilecek üretimi yapabilmektedir [54].

b. Sivas Biyokütle Enerji Üretim Tesisi

Tesis Sivas'ın merkez ilçesindedir. Novtek Enerji bağlı ortağı olan Nov Enerji Elektrik Üretim A.Ş. tarafından işletilen santral 2,82 MW'e kurulu güçle Türkiye'nin 1273. Sivas'ın ise 23. büyük enerji santralidir. Ayrıca Türkiye'nin 2. büyük biyogaz tesisidir. Ortalama 10.538.724 kWh elektrik enerjisi üretimiyle 2.902 kişinin günlük hayatta ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayabilmektedir. Tesis sadece konut elektrik tüketimi baz alacak olursa 3528 konutun elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayabilecek üretimi yapabilmektedir [54].

c. İstanbul Odayeri Çöp Gazı Santrali

Santral İstanbul'un Eyüp ilçesi Odayeri bölgesindedir. Ortadoğu Enerji firmasına ait santral 33,81 MW'e kurulu gücü ile Türkiye'nin 347. İstanbul'un ise 7. büyük enerji santralidir. Türkiye'nin en büyük biyogaz tesisidir. Ortalama olarak 225.983.513

kWh elektrik enerjisi üretimiyle 62.220 kişinin günlük hayatta ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayabilmektedir. Santral sadece konut elektrik tüketimi baz alacak olursa 75.656 konutun elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayabilecek elektrik üretimi yapabilmektedir [54].

d. Samsun Avdan Biyogaz Elektrik Santrali

Santral Samsun'un İlkadım ilçesindedir. Türkiye'nin 1018. Samsun'un ise 12. büyük enerji santralidir. Türkiye'nin 18. büyük Biyogaz Tesisi'dir. Ortalama 29.280.588 kWh elektrik üretimi ile 8.062 kişinin günlük hayatta ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayabilir. Sadece konut elektrik tüketimi baz alınacak olursa 9.803 konutun elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayabilecek elektrik üretimi yapabilmektedir [54].

e. Hamitler Çöplüğü Biyogaz Santrali

Santral Bursa'nın Osmangazi ilçesindedir. ITC-KA Atık Enerji firmasına ait santral 9,80 MW'e kurulu gücü ile Türkiye'nin 780. Bursa'nın ise 16. büyük enerji santralidir. Türkiye'nin de 11. büyük biyogaz tesisidir. Ortalama 75.477.311 kWh elektrik üretimi ile 20.781 kişinin günlük hayatta ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayabilir. Sadece konut elektrik tüketimi baz alınacak olursa 25.269 konutun elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayabilecek elektrik üretimi yapabilmektedir [54].

2.5. Literatür Taraması

Adana ilinin merkez ilçelerindeki belediye atıklarının bertarafı, 2008 yılından beri ITC Invest Trading&Consulting AG, uzun yıllar vahşi depolama alanı olarak kullanılan alanda rehabilitasyon projesi geliştirilmiş olup çağdaş, sürdürülebilir, etkili ve tüm dünyada kabul gören geri kazanım, bertaraf ve ıslah metotlarının hayata geçirilmesini sağlayan “Entegre Katı Atık Yönetimi” başlatılmıştır. Bu kapsamda düzenli depolama alanlarının kurulması ve işletilmesi, katı atıkların çeşitli yöntemlerle bertaraf edilmesi gibi eş zamanlı yürütülen ıslah ve geri kazanım odaklı bir dizi çalışmalar yapılmıştır [55].

Özçakıl (2001)'ın yapmış olduğu çalışma Türkiye'de katı atık depo gazı geri kazanım tesislerinin değerlendirilmesi ilk çalışmalardan biridir [21]. Daha sonra Sezgin, Özcan,

Varınca ve Borat (2003) depo gazından elektrik üretiminin Türkiye’de uygulanabilirliği İstanbul, Bursa tesisleri örneği ve Saltabaş ve Yalçın (2004) depo gazından enerji elde edilmesine dair araştırmalar yapmışlardır [3, 12]. Sezgin, Özcan, Varınca ve Borat (2003)’ın yaptıkları çalışmalar sonucu, Bursa-Demirtaş tesisinden toplam 5.641.979 kW, İstanbul’da ise 2002 yılının son dört ayında toplam 2.321.040 kW elektrik enerjisi elde edildiğini tespit etmişlerdir. Ülkemiz açısından depo gazından elektrik üretimi, depo gazıyla ilgili diğer geri kazanım yöntemlerine göre uygun olabileceği kanaatine varmışlardır. Saltabaş ve Yalçın (2004)’ın yaptıkları çalışmalar sonucu, Türkiye’de daha birçok uygulamasını göreceğimiz bu tip tesisler arttıkça hem ülke ekonomisi kalkınacak hem de daha önemlisi çevreye ve insanlara olabilecek zararlar bertaraf edilecektir kanaatine varmışlardır [3, 12].

2000’li yılların başlarında yapılan bu çalışmalar sayesinde zaman içinde bu konuya dair çalışmalar artmıştır. Kiriş ve Saltabaş (2010), katı atık düzenli depolama sahalarında depo gazı (LFG) yönetimi ve İstanbul uygulamaları dair çalışma yapmışlardır. Katı atık düzenli depolama sahalarında havasız ortamda oluşan gazın, yakılarak veya enerji üretimi maksadıyla kullanılarak mutlaka bertaraf edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. İstanbul ilindeki düzenli depolama sahalarındaki çalışmalarda, depo gazının çevre ve insan sağlığına olumsuz etkilerin giderilmesinin yanında, oluşan bu gazın değerlendirilmesi suretiyle ekonomik bir değer haline getirilmesi de mümkün olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Tüm bu şartlar altında ve İstanbul örneği özelinde depo gazı yönetiminin ne kadar önemli ve gerekli olduğunu ortaya çıkartmışlardır [56]. Aydın (2013), Türkiye’de depo gazından enerji yönetimine dair çalışma yapmıştır. Depolama sahalarındaki yüzey metan konsantrasyonlarının ve sera gazı emisyonlarının azaltılması için geçirimsiz bir nihai örtü sağlanması öneminden bahsedilmiştir. Daha sık kuyuların açılması sonucuna ulaşmıştır. Bununla birlikte, kentsel katı atıkların büyük kısmının organik atıklardan oluşması nedeniyle söz konusu depo gazından enerji tesislerinin en kısa zamanda kurulması yüzey metan emisyonlarının ve sera gazı miktarının azaltılması açısından önemlidir. Bu tesisler ülkemizin dış ticaret açığının önemli kısmını oluşturan enerji açığını kapatmada az da olsa katkı sağlayacağı sonucuna ulaşmıştır [36].

Çelebi (2017), belediye atıklarından çöp gazı elde edilerek elektrik enerjisi elde edilmesine yönelik çalışma yapmıştır. Ülkemizde 2016 yılı temmuz ayı sonu itibariyle toplam elektrik kurulu gücü 77037,49 MW değerine ulaşmış olup bu değerın 32 000 MW’ı yenilenebilir enerjiye ait olduğunu tespit etmiştir. Ülkemizde yıllık evsel atık

miktarı 26 milyon ton olup, tüm katı atıkların düzenli depolama sahalarında toplanıp işlenmesi halinde 2 milyar kWh elektrik üretilebilmekte olduğu sonucuna ulaşmıştır. Ülkemizde hali hazırda 76 adet düzenli depolama sahası olduğu düşünülürse bu depolama sahalarının sadece %33'ünde enerji üretimi yapılmakta olduğu sonucuna ulaşmıştır [5].

Çakır ve Günerhan (2012), İzmir mücavir alan sınırları içerisinde oluşan kentsel katı atıkların (evsel, endüstriyel, tıbbi atıklar ile arıtma çamuru) düzenli olarak depolandığı Harmandalı Katı Atık Düzenli Depolama Alanı'nda oluşan deponi gazı potansiyelinin hesaplanması ve elektrik enerjisi olarak kullanımını araştırmışlardır. HDDA'da yapılan ölçüm ve göz önüne alınan matematiksel modelleme hesaplamalarında inceleme yapılan mevcut evsel katı atık miktarının yüksek miktarda deponi gazı potansiyeline sahip olduğunu belirlenmişlerdir. Multi-Phase modelini esas almanın daha sağlıklı sonuçlar vereceği, çünkü Multi-Phase modeli, hesaplamalarda katı atık içindeki organik bazlı atıkları (karbon içeriği yüksek) kıstas almaktadır. Dolayısıyla alandan çıkacak gaz miktarları gerçeğe yakın değerlerde olacağı sonucuna ulaşmışlardır [57].

Kankılıç ve Topal (2015), Ülkemizde depo gazı üretimi ve kullanımı yönünde araştırma yapılmış ve bu araştırmalar değerlendirilmişlerdir. Sonuçta, bu türde gaz motoru kullanan işletmelerde atık ısının elektrik üretiminde kullanılmasının avantajları ortaya çıkarmışlardır [20].

Yıldırım (2020), Sivas ili için depo gazından yıllık ne kadar enerji elde edilebileceğine yönelik LandGEM Version 3.02 kullanarak bulgular elde etmiştir. Bunun sonucunda üretilen en yüksek enerji miktarının 2030 yılında 2947 kWhs olacağı sonucuna ulaşmıştır [4].

3. BÖLÜM

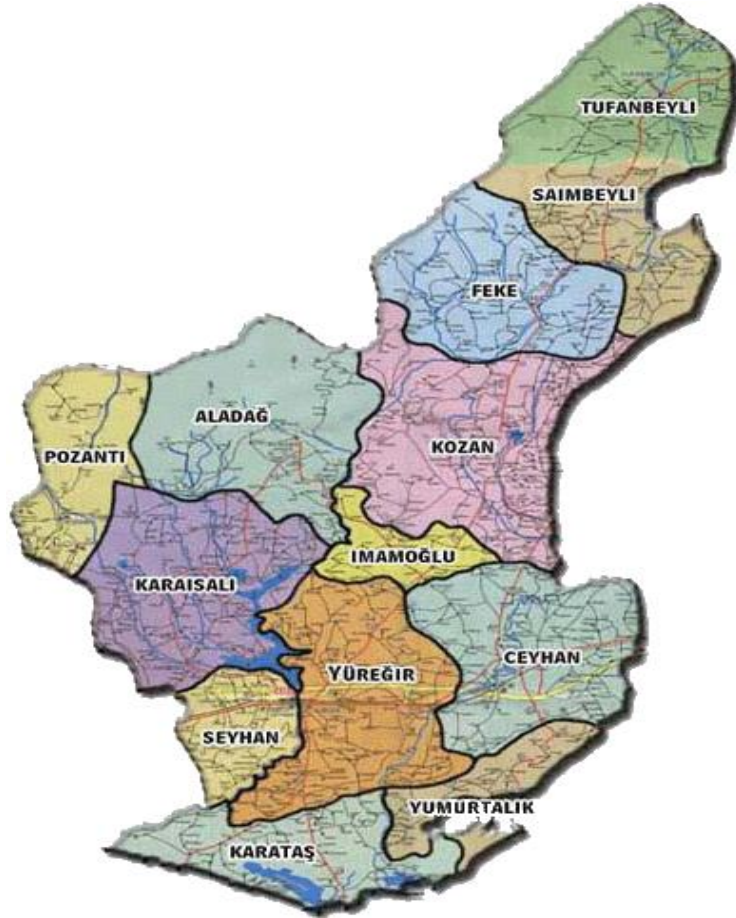
MATERYAL VE METOD

3.1. Adana İli Tanıtımı

Adana, Türkiye'nin en kalabalık altıncı şehri olup 2019 yılı verilerine göre 2.237.940 kişilik nüfusa sahiptir. İlin yüz ölçümü 13.844 km²'dir. 35°-38° kuzey enlemleri ile 34°-36° doğu boylamları arasında yer almaktadır.

01.02.2018 yılının TÜİK verilerine göre 5'i merkez ilçe (Seyhan, Çukurova, Sarıçam, Yüreğir, Karaisalı) olmak üzere toplam 15 ilçe ve belediye mevcuttur. Toplam 831 mahalle vardır.

Adana'nın merkezi; Mersin, Adana, Osmaniye ve Hatay illerini kapsayan coğrafi, ekonomik ve kültürel bir bölge olan Çukurova'nın merkezinde bulunur [58].



Şekil 3.1. Adana İl Haritası [55]

3.2. Adana Entegre Katı Atık Bertaraf Tesisi Tanıtımı

Adana Büyükşehir Belediyesi tarafından 5216 sayılı Büyükşehir Belediyesi Kanunu, 2872 sayılı Çevre Kanunu ve bu doğrultuda yayımlanarak yürürlüğe giren başta Atık Yönetimi Yönetmeliği olmak üzere mevzuat kapsamında yükümlülükleri yerine getirmek için; 2008 senesinde Sofulu bölgesinde bulunan katı atık düzensiz depolama alanında rehabilitasyon çalışması yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, 2011 senesinde Adana'nın Sarıçam ilçesinde il merkezinin kuzey-doğusunda yer alan bölgede "Adana Entegre Katı Atık Bertaraf Tesisi" çalışmaya başlamıştır.

Evsel katı atıkların toplanarak bertaraf tesisine/aktarma istasyonlarına aktarılması yükümlülüğü 5216 sayılı Büyükşehir Belediyesi Kanunu kapsamında ilçe belediyelerine, aktarma istasyonlarından bertaraf tesisine aktarılması ve bertaraf edilmesinin yükümlülüğü büyükşehir belediyelerine aittir. 6360 sayılı Kanunun 2014 senesinde yürürlüğe girmesi ile Adana Büyükşehir Belediyesi'nin sınırları, il mülki sınırları olmuştur. 5 merkez ilçede; (Seyhan, Pozantı, Ceyhan ve Karaisalı) bulunan dört adet aktarma istasyonuna ek olarak 2015 yılında Ceyhan, İmamoğlu, Kozan, Fekesaimbeyli, Tufanbeyli, Pozantı, Karaisalı, Aladağ, Karataş, Yumurtalık, Seyhan İlçelerine toplam 11 adet Katı Atık Aktarma İstasyonu daha yapılmıştır. Evsel nitelikli atıklar; merkez Çukurova, Seyhan, Sarıçam ve Yüreğir İlçe Belediyesi'ne ait katı atık kamyonları ile diğer ilçelerden transfer istasyonlarına getirilen atıklar ise Adana Büyükşehir Belediyesi'ne ait semi-treylerle Entegre Katı Atık Bertaraf Tesisi'ne taşınmaktadır [55].

Tesisin etrafı tel çit ile çevrilidir. Tesisin içerisinde kantar ve atık kabul binası, giriş kontrol binası, atölye ve idari binalar mevcuttur. Entegre tesis, tıbbi atık sterilizasyon tesisi, enerji üretim tesisi, mekanik ayırma, biyometanizasyon sistemi ve düzenli depolama sahasından oluşmaktadır.



Şekil 3.2. İlçeler bazında atık oranları [55]

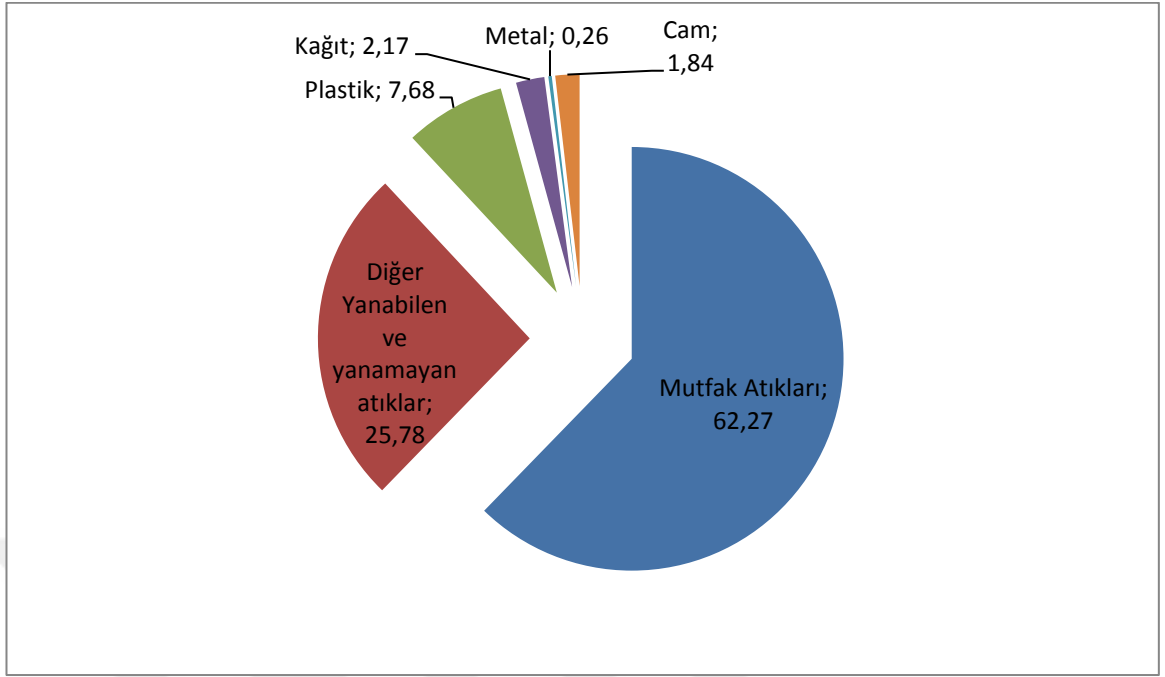
3.3. Atık Karakterizasyonu ve Miktarına Yönelik Bilgiler

Yasal mevzuat kapsamında 2011 senesinde Adana Entegre Katı Atık Bertaraf Tesisi faaliyete geçmiştir. 15 ilçenin evsel nitelikli katı atıklarının, ayıklanması, kompostlanması ve düzenli depolanması ile sağlık hizmeti veren birimlerden kaynaklanan tıbbi atıkların bertarafı yapılmaktadır. Adana İli genelinde evsel atıkların düzenli depolama yöntemiyle bertarafı sağlanmaktadır.

15 ilçe belediyesinden Adana Büyükşehir Belediyesi Entegre Katı Atık Bertaraf Tesisi'ne ticari kurum ve konutlardan toplanan ortalama olarak günlük 2.000 ton evsel katı atık getirilmektedir.

Karışık atıklar için tesiste, 3 hattan oluşan günlük 2.000 ton kapasiteli ayrıştırma ünitesi bulunmaktadır. Atıklar, ambalaj ve organik atıklar (türlerine göre) ayrıştırılmaktadır ve ambalaj atıkları lisanslı geri kazanım firmalarına gönderilmektedir.

Adana genelinden 15 merkez ilçeden tesise günlük olarak gelen evsel nitelikli katı atık kompozisyonu Şekil 3.3'te verilmiştir [55].



Şekil 3.3. Adana ilinin 2018 yılı itibariyle katı atık kompozisyonu [55]

Tablo 3.1. 2018 yılı için Adana’da il/ilçe belediyeleri tarafından toplanan ve yerel yönetimlerce yönetilen belediye atığı miktarı ve toplanma, taşınma ve bertaraf yöntemleri [55]

Büyükşehir İl/ İlçe Belediye Veya Birliğin Adı	Toplanan Ort. Katı Atık Miktarı (ton/gün)		Transfer İstasyonu Varsa Sayısı	Atık Yönetim Hizmetlerini Kim Yürütüyor	Mevcut Belediye Atık Yönetim Tesisi	
	Yaz	Kış			Düzenli Depolama	Ön İşlem
Seyhan	773,32	747,99	1	BŞ/OS	X	Mekanik Ayırma
Yüreğir	394,41	393,70	0	BŞ/ÖS	X	Mekanik Ayırma
Çukurova	292,61	288,52	0	BŞ/ÖS	X	Mekanik Ayırma
Sarıçam	135,31	134,37	0	BŞ/OS	X	Mekanik Ayırma
Karaisalı	11,45	10,37	1	BŞ/OS	X	Mekanik Ayırma
Ceyhan	135,73	130,90	1	BŞ/OS	X	Mekanik Ayırma
Kozan	75,11	74,12	1	BŞ/OS	X	Mekanik Ayırma
Pozantı	34,42	20,48	1	BŞ/OS	X	Mekanik Ayırma
İmamoğlu	18,22	18,47	1	BŞ/OS	X	Mekanik Ayırma
Karataş	15,38	8,87	1	BŞ/OS	X	Mekanik Ayırma
Yumurtalık	11,08	8,61	1	BŞ/OS	X	Mekanik Ayırma
Aladağ	8,24	5,62	1	BŞ/OS	X	Mekanik Ayırma
Tufanbeyli	11,38	11,55	1	BŞ/OS	X	Mekanik Ayırma
Saimbeyli- Feke	10,40	7,59	1	BŞ/OS	X	Mekanik Ayırma
İl Geneli	1927,05	1861,17				

BŞ/ ÖS: Belediye Şirketi/ ÖS: Özel Sektör



Resim 3.1 Adana Sofulu Çöplüğü biyogaz santrali [55]

8 adet fermantasyon sistemi mevcuttur. Organik atıkların, oksijensiz koşullarda mikroorganizmalar sayesinde bozunması sağlanıp bu sırada CH_4 gazı ortaya çıkar. Açığa çıkan CH_4 gazı depolama için balonlara alınıp daha sonra enerji üretim tesislerine gönderilmektedir.



Resim 3.2 Fermantasyon tesisleri [55]



Resim 3.3 Gaz depolama balonu [55]

Düşey ve yatay sistemleri içeren aktif gaz toplama sistemi, depolama sahasında gazın toplanabilmesi için kurulmuştur. Fermantasyon tanklarında üretimi gerçekleşen metan gazı ve toplanan gaz enerji üretim santraline yönlendirilmektedir.

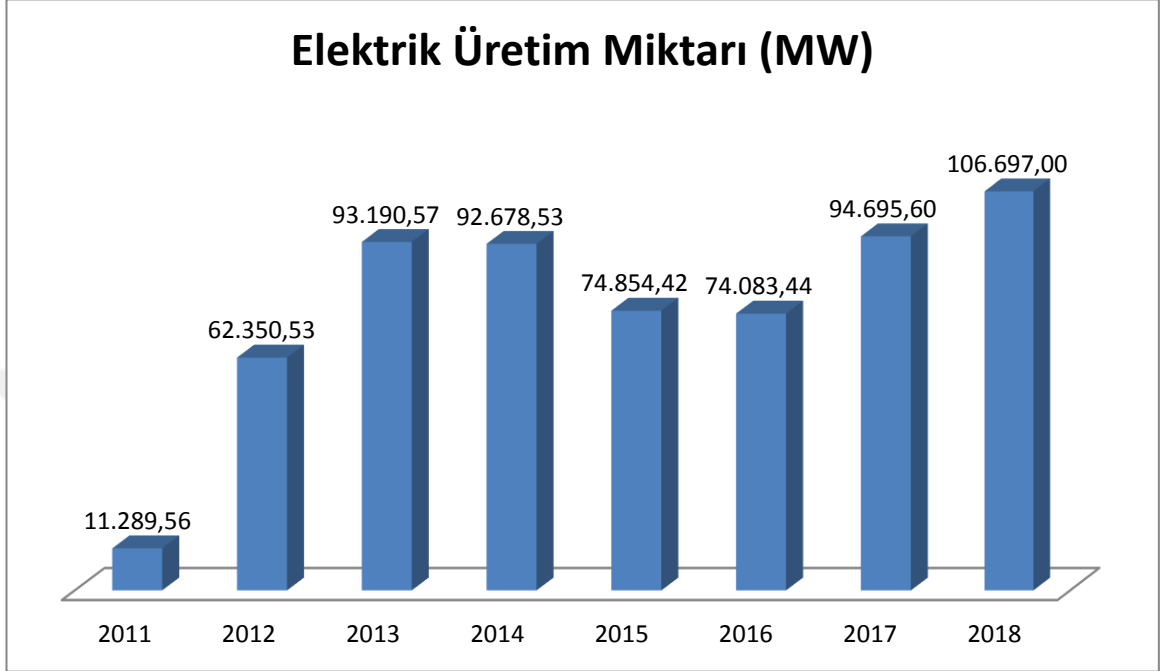


Resim 3.4 Depo gazı toplama tesisi [55]

Toplam 11 adet enerji üretim motoru bulunmaktadır. Gaz motorları gazı direkt kullanarak enerjiye dönüştürmektedir. Motorların kapasitesi 1,4 mW/h'tır. Hali hazırda 15,6 mW/h kurulu güce sahip enerji üretim tesisi ve üretilen gazın depolanması için her biri 16.000 m³'lük iki adet gaz depolama tankı mevcuttur. Tesis ortalama 50.000 hanenin elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayabilecek enerji üretimi gerçekleştirebilmektedir.

Depo yerinden gazın toplanması için yatay ve düşey sistemli aktif gaz toplama sistemi, fermantasyon ve gaz tankında üretimi yapılan metan gazı enerjisi üretim santrallerine

yönlendirilir. Adana’da, geçmiş seneler içerisindeki elektrik üretim miktarları Şekil 3.5’te verilmiştir.



Şekil 3.5. Yıllara göre elektrik üretimi [55]



Resim 3.5: Enerji üretim tesisi [55]

Adana İli’ndeki evsel atıkların yaklaşık %6’lık kısmının sokak toplayıcılarının geri kazanımını yaptığı ambalaj atıkları olduğu ve kalan %4’ lük kısmının da kontrolsüz bir şekilde vahşi depolandığı, bu yüzden kayıt altına alınamadığı tahmin edilmektedir [55].

3.5. LandGEM Programı ile Metan Gazının Belirlenmesi

LandGEM, katı atıkların ayrışmasından kaynaklı emisyonları ölçen bir denklemdir [44]. Adana Yüreğir Sofulu Çöplüğü Biyogaz Santralinden meydana gelecek tahmini metan gazı miktarı LandGEM versiyon 3.02 programı ile hesaplanmıştır. Modelin çalıştırılabilmesi için gerekli bilgiler şunlardır.

- Depolanan yıllık atık miktarı veya depo alanında bulunan toplam atık miktarı,
- Metan oluşum hızı (k),
- Metan üretim potansiyeli (L₀).

Modelde yararlanılan birinci dereceden kinetik eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$Q_{CH_4} = L_0 \cdot R \cdot (e^{-kc} - e^{-kt}) \quad [47-48].$$

Q_{CH_4} : t anındaki metan üretim hızı (m³/yıl)

L_0 : Metanın potansiyel üretim kapasitesi (m³ CH₄/ ton atık)

R : Yıllık atık miktarı (ton/yıl)

k : Metan üretim hız sabiti (yıl⁻¹)

c : Saha kapatıldıktan sonraki yıl sayısı (yıl)

t : İlk atığın depolanmaya başlamasından sonra geçen süre (yıl) [48-49].

4. BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Adana İli Depo Gazı Modelleme Çalışmasına Yönelik Değerlerin Hesaplanması

4.1.1. Nüfus Tahmini

Adana ilinde belediye atıklarının bertarafı için uzun yıllar vahşi depolama amaçlı kullanılan bölge yeniden geliştirilmiş olup 2011 senesinde Adana Entegre Katı Atık Bertaraf Tesisi 15 yıl hizmet vermek üzere faaliyete başlamıştır.

15 yıllık süreçte oluşacak ve depolanacak atık miktarının saptanmasında en önemli değişkenlerden biri de nüfus değişimidir. Dolayısıyla oluşacak atık miktarının belirlenebilmesi için gelecek yıllardaki nüfusun da belirlenmesi gereklidir [55].

Bu sebeple öncelikle nüfus projeksiyonları oluşturulmuştur. Tablo 4.1’de Adana Çevre ve Şehircilik Bakanlığı verilerinden yararlanılarak oluşturulan Adana ili geçmiş yıllara ait nüfus bilgileri verilmiştir.

Tablo 4.1. Adana ili geçmiş nüfus verileri [59]

Yıllar	Nüfus
2010	2.085.225
2011	2.108.805
2012	2.125.635
2013	2.149.260
2014	2.165.595
2015	2.183.167
2016	2.201.670
2017	2.216.475
2018	2.220.125
2019	2.237.940

Bu çalışmada gelecek nüfus tahmininde, İller Bankası aracılığıyla kullanılan bir projeksiyon yöntemi olan İller Bankası metodu kullanılmıştır. Geometrik artış esası gereği artışın sınırlandırıldığı yöntemde artış hızı çoğalma katsayısı ile gösterilmektedir. ‘Ç’ ile belirtilen çoğalma katsayısı aşağıdaki formül aracılığıyla hesaplanmaktadır.

$$\text{Ç} = [(N_{\text{son}} / N_{\text{i}}) 1 / (t_{\text{son}} - t_{\text{i}}) - 1] \cdot 100 \quad (4.1)$$

Bu denklemde;

Ç = Çoğalma katsayısı

N_{son} = Son nüfus değeri

N_i = İlk nüfus değeri

t_{son} = N_{son} nüfusunun gösterdiği yıl

t_i = N_i nüfusunun gösterdiği yıl

olarak verilmektedir [60].

Gelecekteki nüfusu tahmin edilecek ilin, geçmiş nüfus sayımlarından alınan verilere göre beşer yıllık aralıklarla çoğalma katsayıları bulunmaktadır. Bulunan çoğalma katsayılarının aritmetik ortalaması Denklem 4.2' de verilen formül yardımıyla hesaplanmaktadır [60].

$$\text{Ç}_{\text{ort}} = (\text{Ç}_1 + \dots + \text{Ç}_n) / n \quad (4.2)$$

$\text{Ç}_{\text{ort}} < 1$ ise çoğalma katsayısı 1,

$1 \leq \text{Ç}_{\text{ort}} \leq 3$ ise çoğalma katsayısı $\text{Ç}_{\text{hesaplanan}}$,

$\text{Ç}_{\text{ort}} > 3$ ise çoğalma katsayısı 3 olarak alınır [60].

Bu bilgiler ışığı altında Adana ili için çoğalma katsayıları;

Ç_1 = 2010-2014 yılları için çoğalma katsayısı

Ç_2 = 2014-2019 yılları için çoğalma katsayısı

olmak üzere Tablo 4.1' de verilen geçmiş nüfus verilerinin, Denklem 4.1' de yerine yazılmasıyla ayrı ayrı bulunmuştur. Aşağıda çoğalma katsayısı Ç_1 değeri için örnek olarak hesaplanmıştır.

$$\text{Ç} = [(N_{\text{son}} / N_i)^{1 / (t_{\text{son}} - t_i)} - 1] \cdot 100$$

Ç_1 = 2010-2014 yılları için çoğalma katsayısı

$$\text{Ç}_1 = [(N_{2014} / N_{2010})^{1 / (2014-2010)} - 1] \cdot 100$$

$$\text{Ç}_1 = [(2.165.595 / 2.085.225)^{1/4} - 1] \cdot 100$$

$\text{Ç}_1 = 0,94$ olarak bulunmuştur.

Aynı hesaplama yöntemi ile,

Ç_2 = 2014-2019 yılları için çoğalma katsayısı = 0,65 olarak bulunmuştur.

Daha sonra bulunan çoğalma katsayılarının aritmetik ortalaması Denklem 4.2' de verilen formül yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\zeta_{\text{ort}} = (\zeta_1 + \dots + \zeta_n) / n$$

$$\zeta_{\text{ort}} = (0,94 + 0,65) / 2$$

$$\zeta_{\text{ort}} = 0,8$$

Yukarıda verilen bilgilere göre hesaplanan Adana ili için çoğalma katsayısı $\zeta_{\text{hesaplanan}} = 0,8$ olup, $1 \leq \zeta_{\text{ort}} \leq 3$ ise çoğalma katsayısı $\zeta_{\text{hesaplanan}}$ olduğundan $\zeta_{\text{ort}} = 1$ olarak alınmıştır.

Çoğalma katsayısı bulunduktan sonra gelecekteki bir yıla ilişkin nüfus tahmini denklem 4.3' te verilen formül yardımıyla hesaplanır.

$$N_{\text{gelecek}} = N_{\text{son}} \cdot [1 + (\zeta_{\text{ort}}/100)]^n \quad (4.3)$$

Bu denklemde;

N_{son} = Son nüfus sayımı

N_{gelecek} = Gelecekteki nüfus hesabı

t_{gelecek} = N_{gelecek} nüfusunun tespit edileceği yıl

t_{son} = N_{son} nüfusunun tespit edildiği yıl

$n = (t_{\text{gelecek}} - t_{\text{son}})$ yıl' dır [60].

Aşağıda 2021 yılı için nüfus değeri denklem 3'den yararlanılarak örnek olarak hesaplanmıştır.

$$N_{\text{gelecek}} = N_{\text{son}} \cdot [1 + (\zeta_{\text{ort}}/100)]^n$$

$$N_{2021} = N_{2020} \cdot [1 + (\zeta_{\text{ort}}/100)]^1$$

$$N_{2021} = 2.245.400 [1 + (1/100)]^1$$

$$N_{2021} = 2.267.854$$

Adana Entegre Katı Atık Tesisi 15 yıl hizmet vermek üzere faaliyete başladığı için 2011-2026 yılları arasındaki nüfus verileri hesaplanarak Tablo 4.2' de sunulmuştur.

Tablo 4.2. Adana ili için hesaplanan geçmiş ve gelecek yıllara ait nüfus verileri

Yıllar	Nüfus
2011	2.108.805
2012	2.125.635
2013	2.149.260
2014	2.165.595
2015	2.183.167
2016	2.201.670
2017	2.216.475
2018	2.220.125
2019	2.237.940
2020	2.245.400
2021	2.267.854
2022	2.290.532
2023	2.313.437
2024	2.336.571
2025	2.359.937
2026	2.383.536

4.1.2. Tahmini Katı Atık Miktarı

Adana İlinde 2018 yılında yazın 1927 ton/gün kışın ise 1861 ton/gün katı atık oluşmaktadır [55]. TÜİK'in 2018 yılı belediye atık istatistiklerine göre, Türkiye'deki bin 399 belediye arasında atık hizmeti verilen bin 395 belediyenin 32 milyon 209 bin ton atık topladığı belirlenmiştir. Kişi başı toplanan günlük ortalama atık miktarı 1.16 kg olarak hesaplanmıştır. Adana için kabul edilen günlük kişi başına üretilen katı atık miktarı ve hesaplanan tahmini nüfuslar dikkate alınarak, katı atık tesisinde 2011-2026 yılları arasında üretilecek katı atık miktarları Tablo 4.3' de hesaplanmıştır.

Tablo 4.3. Adana ili 2019-2026 yılları arasında üretilecek tahmini katı atık miktarları

Yıllar	Nüfus	Atık Üretimi (kg/kişi-gün)	Toplam Atık (kg/gün)
2019	2.237.940	1.16	2.596.010
2020	2.245.400	1.16	2.604.664
2021	2.267.854	1.16	2.630.710
2022	2.290.532	1.16	2.657.017
2023	2.313.437	1.16	2.683.586
2024	2.336.571	1.16	2.710.422
2025	2.359.937	1.16	2.737.526
2026	2.383.536	1.16	2.764.490

4.2. Depo Sahası Gaz Emisyonları Modeli (LandGEM) ile Oluşacak Metan Gazının Tahmini

Adana Yüreğir Sofulu Çöplüğü Biyogaz Santralinden ileri gelecek tahmini metan gazı miktarı LandGEM versiyon 3.02 programı ile hesaplanmıştır.

Modelde, tehlikeli ve tehlikesiz atıkların aynı yerde bertarafı ve tehlikeli atıkların farklı bir yerde bertaraf edilmesi için iki ayrı seçenek bulunmaktadır. Adana'da evsel atıklarla birlikte, tehlikeli atıklar depolanmadığı için, birlikte bertaraf seçeneğini bulunmamaktadır. Modelde sahaya özgü bir L_0 ve k değeri bilinmemektedir. Bu nedenle CAA veya AP-42 seçenekleri için modelde hazır olarak verilen ampirik değerler kullanılabilir. Bu çalışmada k ve L_0 değerleri için CAA ampirik değerler kullanılmıştır. [49].

LandGEM versiyon 3.02 bilgisayar programında depolama sahasının açılış ve kapanış yıllarının öncelikle girilmesi gereklidir. Depolama sahasının açılış yılı 2019, kapanış yılı 2026 olarak alınmıştır. Modelde depolamaya başlanılan 2019 yılından 2026 yılına kadar olan yıllık atık miktarları girilmiştir. Yıllara göre atık miktarları model üzerinde yazılarak, CAA değerine göre oluşan metan gazının oluşum miktarı hesaplanmıştır.

Tablo 4.4. Adana ili biyogaz santrali için LandGEM model sonuçları

Yıllar	Depolanan Atık Miktarı (ton/yıl)	Kümülatif Atık Miktarı (ton/yıl)	Depo Gazı Miktarı (ton/yıl)	Depo Gazı Miktarı (m ³ /yıl)	Metan Gazı Miktarı (ton/yıl)	Metan Gazı Miktarı (m ³ /yıl)
2019	948.193	0	0	0	0	0
2020	951.354	948.193	1,968E+04	1,433E+07	5,258E+03	7,165E+06
2021	960.867	1.899.547	3,847E+04	2,801E+07	1,028E+04	1,400E+07
2022	970.475	2.860.414	5,655E+04	4,116E+07	1,510E+04	2,058E+07
2023	980.180	3.830.889	7,393E+04	5,382E+07	1,975E+04	2,691E+07
2024	989.982	4.811.069	9,068E+04	6,601E+07	2,422E+04	3,300E+07
2025	999.881	5.801.051	1,068E+05	7,775E+07	2,853E+04	3,888E+07
2026	1.009.730	6.800.932	1,224E+05	8,907E+07	3,268E+04	4,453E+07

Yapılan hesaplamalar neticesinde sahada 2026 yılına kadar toplam olarak CAA sabiti için 185.065.000.000 m³/yıl metan gazının oluştuğu sonucu elde edilmiştir.

Depo gazında CH₄ miktarı %45-60, CO₂ miktarı %40-60 aralığında mevcuttur [3]. Tesisten gelen CH₄ ve CO₂ ölçüm değerleri mevcut olmadığı için modelin başlangıcında depo gazının %50 CH₄ ve %50 CO₂ gazından oluştuğu kabul edilmiştir. Buna göre toplam olarak sahada CAA için 370.150.000.000 m³/yıl depo gazı oluşacağı belirlenmiştir.

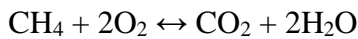
4.3. Adana İli İçin Depo Gazından Elektrik Enerjisi Üretimi

Depo gazının bileşimi, mevcut depo gazı verimliliğinin incelenebilmesi için aşağıda verilmiştir.

CH₄ = %50 (hacimce)

CO₂ = %50 (hacimce).

1 m³ depo gazının enerji eşdeğerinin bulunması için kullanılan formül aşağıda verilmiştir:



$$\Delta H(298) = -802,7 \text{ kJ/mol}$$

1 mol CH₄ sabit basınçta yandığında 802,7 kJ/mol (192 kkal) enerji açığa çıkarır [62].

Metanın yoğunluğu 0,657 kg/m³ olup, 1 m³ gazın içerisinde de 0,5 m³ metan olduğundan, metanın hacmi 0,5 m³ olacaktır. Buradan yoğunluk formülüyle metan gazının kütlesi hesaplanabilir.

$$d=m/V$$

$$0,657 \text{ kg/m}^3 \times 0,5 \text{ m}^3 = 0,328 \text{ kg} = 328 \text{ g.}$$

1 mol CH₄ (16 g) yandığı zaman

192 kkal enerji açığa çıkarırsa

328 g metan yandığı zaman

X kkal enerji açığa çıkarır

Buradan X=3936 kkal'dir.

1 kW_s 860 kkal ise

X kW_s 3936 kkal X=4,57 kW_s'dir.

Yani 1 m³/sa depo gazının enerji eşdeğeri 4,57 kW_s'dir.

Katı atık depolama sahalarında ortaya çıkan depo gazının tamamının geri kazanılması mümkün değildir. Bu nedenle incelenecek depo alanına yönelik gaz toplama verimlilikleri belirlenmelidir. Bu çalışmada depolama alanına göre ortalama depo gazı toplama verimliliği %70 olarak belirlenmiştir.

Tesisteki gaz motor ve jeneratör setleri 1,4 MW kapasitelidir. Motorların elektrik verimliliği yaklaşık % 42'dir [61]. Tesis yetkilileri bu oranı %35-45 civarı olduğunu ifade etmişlerdir. Bu bilgilere dayanarak, bu çalışmada oran %40 olarak kabul edilmiştir.

Depo gazından elde edilebilecek elektrik üretim potansiyeli aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır [63].

$$E_{el} \text{ (kW}_s\text{)} = m_{dg} \cdot LHV_{dg} \cdot R \cdot \eta_{el} \quad (4.4)$$

Bu denklemde;

m_{dg} = Toplam depo gazı debisi (Nm³/s)

LHV_{dg} = Depo gazının enerji eşdeğeri (kW_s/Nm³)

R = Gaz toplama verimliliği (%)

η_{el} = Gaz motorunun elektriksel verimliliği (%)

Bu denklemden yola çıkarak; düzenli depolamadan gelen gazın %70'i alınarak gazın debisi bulunmuştur.

2020 yılı için elektrik üretimi:

Depo gazı debisi = Düzenli depolamadan gelen gaz x (%70)

Toplam depo gazı debisi = [14.330.000.000 m³/yıl x 0,7]

= 10.031.000.000 m³/yıl

= 1.144.438 m³/s

$$= 1.144.438 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1,109 \text{ (1 m}^3 \text{ serbest gaz = 1,109 Nm}^3 \text{)}$$
$$= 1.269.182 \text{ Nm}^3/\text{s}$$

$$1 \text{ m}^3 \text{ depo gazının enerji eş değeri} = 4,57 \text{ kW s/Nm}^3$$

$$\text{Motorların elektrik verimliliği} = 0,4$$

$$2020 \text{ yılı için elektrik üretimi} = 1.269.182 \text{ Nm}^3/\text{s} \times 4,57 \text{ kW s Nm}^3 \times 0.4$$

$$2020 \text{ yılı için elektrik üretimi} = 2.320.065 \text{ kW s}$$

2021 yılı için elektrik üretimi:

$$\text{Depo gazı debisi} = \text{Düzenli depolamadan gelen gaz} \times (\%70)$$

$$\text{Toplam depo gazı debisi} = [28.010.000.000 \text{ m}^3/\text{yıl} \times 0,7]$$

$$= 19.607.000.000 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

$$= 2.236.965 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$= 2.236.965 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1,109 \text{ (1 m}^3 \text{ serbest gaz = 1,109 Nm}^3 \text{)}$$

$$= 2.480.794 \text{ Nm}^3/\text{s}$$

$$1 \text{ m}^3 \text{ depo gazının enerji eş değeri} = 4,57 \text{ kW s/Nm}^3$$

$$\text{Motorların elektrik verimliliği} = 0,4$$

$$2021 \text{ yılı için elektrik üretimi} = 2.480.794 \text{ Nm}^3/\text{s} \times 4,57 \text{ kW s Nm}^3 \times 0.4$$

$$2021 \text{ yılı için elektrik üretimi} = 4.534.891 \text{ kW s}$$

2022 yılı için elektrik üretimi:

$$\text{Depo gazı debisi} = \text{Düzenli depolamadan gelen gaz} \times (\%70)$$

$$\text{Toplam depo gazı debisi} = [41.160.000.000 \text{ m}^3/\text{yıl} \times 0,7]$$

$$= 28.812.000.000 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

$$= 3.322.304 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$= 3.322.304 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1,109 \text{ (1 m}^3 \text{ serbest gaz = 1,109 Nm}^3 \text{)}$$

$$= 3.684.435 \text{ Nm}^3/\text{s}$$

$$1 \text{ m}^3 \text{ depo gazının enerji eş değeri} = 4,57 \text{ kW s/Nm}^3$$

$$\text{Motorların elektrik verimliliği} = 0,4$$

$$2022 \text{ yılı için elektrik üretimi} = 3.684.435 \text{ Nm}^3/\text{s} \times 4,57 \text{ kW s Nm}^3 \times 0.4$$

$$2022 \text{ yılı için elektrik üretimi} = 6.735.147 \text{ kW s}$$

2023 yılı için elektrik üretimi:

$$\text{Depo gazı debisi} = \text{Düzenli depolamadan gelen gaz} \times (\%70)$$

$$\begin{aligned}\text{Toplam depo gazı debisi} &= [53.820.000.000 \text{ m}^3/\text{yıl} \times 0,7] \\ &= 37.674.000.000 \text{ m}^3/\text{yıl} \\ &= 4.298.232 \text{ m}^3/\text{s} \\ &= 4.298.232 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1,109 \text{ (1 m}^3 \text{ serbest gaz = 1,109 Nm}^3 \text{)} \\ &= 4.766.739 \text{ Nm}^3/\text{s}\end{aligned}$$

$$1 \text{ m}^3 \text{ depo gazının enerji eş değeri} = 4,57 \text{ kW s/Nm}^3$$

$$\text{Motorların elektrik verimliliği} = 0,4$$

$$2023 \text{ yılı için elektrik üretimi} = 4766 \text{ Nm}^3/\text{s} \times 4,57 \text{ kW s Nm}^3 \times 0,4$$

$$2023 \text{ yılı için elektrik üretimi} = 8.713.599 \text{ kW s}$$

2024 yılı için elektrik üretimi:

$$\text{Depo gazı debisi} = \text{Düzenli depolamadan gelen gaz} \times (\%70)$$

$$\begin{aligned}\text{Toplam depo gazı debisi} &= [66.010.000.000 \text{ m}^3/\text{yıl} \times 0,7] \\ &= 46.207.000.000 \text{ m}^3/\text{yıl} \\ &= 5.271.763 \text{ m}^3/\text{s} \\ &= 5.271.763 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1,109 \text{ (1 m}^3 \text{ serbest gaz = 1,109 Nm}^3 \text{)} \\ &= 5.846.385 \text{ Nm}^3/\text{s}\end{aligned}$$

$$1 \text{ m}^3 \text{ depo gazının enerji eş değeri} = 4,57 \text{ kW s/Nm}^3$$

$$\text{Motorların elektrik verimliliği} = 0,4$$

$$2024 \text{ yılı için elektrik üretimi} = 5847 \text{ Nm}^3/\text{s} \times 4,57 \text{ kW s Nm}^3 \times 0,4$$

$$2024 \text{ yılı için elektrik üretimi} = 10.687.192 \text{ kW s}$$

2025 yılı için elektrik üretimi:

$$\text{Depo gazı debisi} = \text{Düzenli depolamadan gelen gaz} \times (\%70)$$

$$\begin{aligned}\text{Toplam depo gazı debisi} &= [77.750.000.000 \text{ m}^3/\text{yıl} \times 0,7] \\ &= 54.425.000.000 \text{ m}^3/\text{yıl} \\ &= 6209 \text{ m}^3/\text{s} \\ &= 6.209.355 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1,109 \text{ (1 m}^3 \text{ serbest gaz = 1,109 Nm}^3 \text{)} \\ &= 6.886.175 \text{ Nm}^3/\text{s}\end{aligned}$$

$$1 \text{ m}^3 \text{ depo gazının enerji eş değeri} = 4,57 \text{ kW s/Nm}^3$$

$$\text{Motorların elektrik verimliliği} = 0,4$$

$$2025 \text{ yılı için elektrik üretimi} = 6886 \text{ Nm}^3/\text{s} \times 4,57 \text{ kW s Nm}^3 \times 0,4$$

$$2025 \text{ yılı için elektrik üretimi} = 12.587.928 \text{ kW s}$$

2026 yılı için elektrik üretimi:

Depo gazı debisi = Düzenli depolamadan gelen gaz x (%70)

Toplam depo gazı debisi = [89.070.000.000 m³/yıl x 0,7]

= 62.349.000 m³/yıl

= 7.113.406 m³/s

= 7.113.406 m³/s . 1,109 (1 m³ serbest gaz = 1,109 Nm³)

= 7.888.767 Nm³/s

1 m³ depo gazının enerji eş değeri = 4,57 kWs/Nm³

Motorların elektrik verimliliği = 0,4

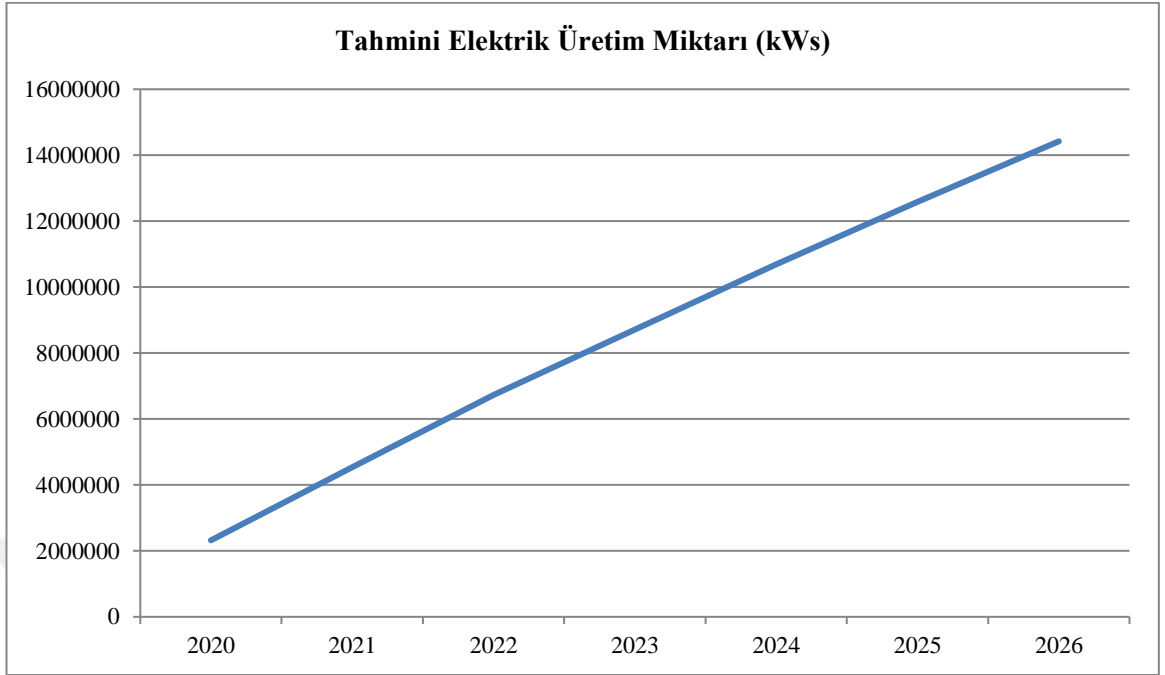
2026 yılı için elektrik üretimi = 7888 Nm³s x 4,57 kWs Nm³ x 0.4

2026 yılı için elektrik üretimi = 14.420.666 kWs

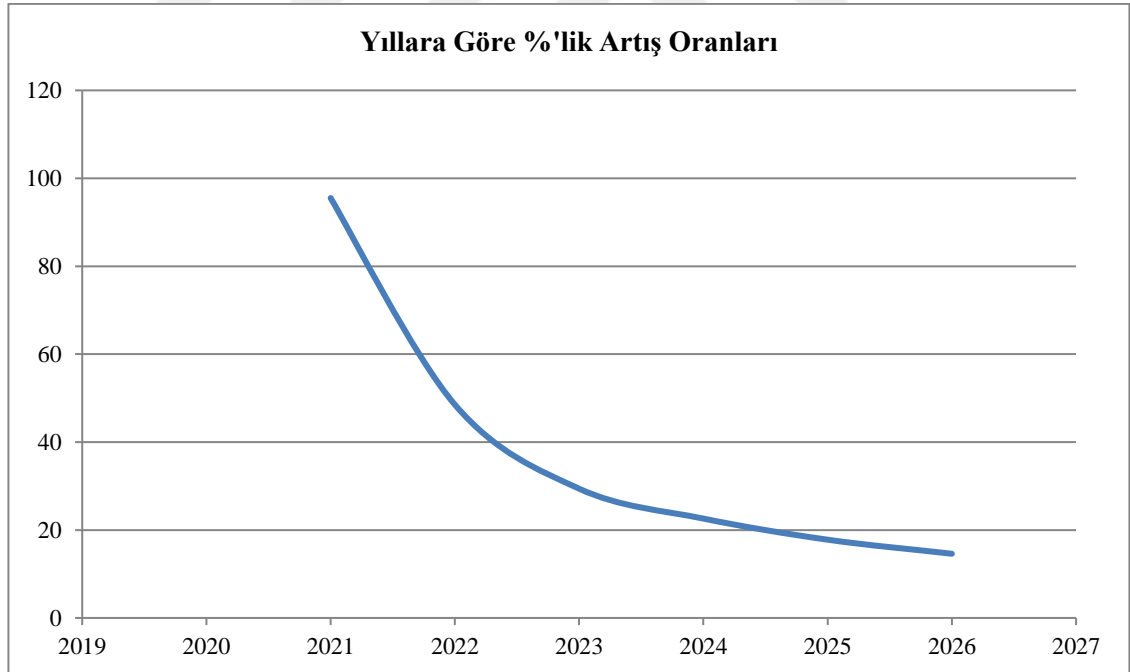
Tesis yetkilileriyle görüşme esnasında şirket politikası gereği elektrik üretimleri net olarak beyan edilmemekle birlikte geçmiş yıllara ait elektrik üretim miktarları Adana İli Çevre Durum Raporundan ulaşılmıştır. LandGEM modelinden elde edilen depo gazı miktarlarıyla hesaplanan elektrik enerjileri Tablo 4.5'te sunulup grafiksel gösterimi yapılmıştır.

Tablo 4.5. Gelecek yıllara ait tahmini elektrik üretim miktarları

Yıl	Elektrik Üretimi (kWs)	%'lik artış oranları
2020	2.320.065	
2021	4.534.891	95,5
2022	6.735.147	48,5
2023	8.713.599	29,4
2024	10.687.192	22,6
2025	12.587.928	17,8
2026	14.420.666	14,6



Şekil 4.1. Gelecek yıllara ait tahmini elektrik üretim miktarlarının grafiksel gösterimi



Şekil 4.2 Yıllara göre %'lik artış

Gelecek yıllara ait hesap yapıldığında elektrik üretiminin en yüksek olduğu değer tesisin kapanış yılı olan 2026 yılında 14420666 kWs olarak hesaplanmıştır. 2020 yılından 2026 yılına elektrik üretim miktarında %521,5'lik bir artış olacağı hesaplanmıştır. Nüfus artışı sebebiyle atık miktarında ve açığa çıkan depo gazında artış

olacağı sonucunda varılmıştır. Depo gazının her yıl artmasıyla elde edilecek elektrik enerjisi miktarında da artış olacağı tespit edilmiştir.



5. BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİ

Ekolojik dengenin bozulması ve ömürleri sınırlı enerji kaynaklarının kullanımı, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanmanın önemini zaman içinde daha da çok arttırmaktadır. Dünya nüfusunun hızlı artışı, tüketim maddelerinin çok çeşitli olması ve alışkanlıkların değişmesi ciddi atık problemlerine sebebiyet vermektedir. Bu problemin nihai bir çözüme ulaşabilmesi için yeni teknoloji kullanımının ülkemizde, hatta dünya genelinde yaygınlaştırılması gereklidir. Katı atık yönetiminin tercih edilmesi gereken modeli için, atığı insanların gözü önünden uzaklaştırıp boş bir bölgeye atmak değil, atığı ekonomi bakımından kaynak olarak görmek ve de çevre için uyumlu bertaraf seçenekleri kullanılarak uzaklaştırılması sağlanmalıdır.

Kentsel atıklardan enerji elde etmek sadece yenilenebilir enerji uygulaması değildir. Aynı zamanda CO₂ ve CH₄ emisyonlarını azaltarak çevreye fayda sağlamaktır. Kentsel atıklardan elde edilen enerji, bölgesel enerji ihtiyacını karşılamada büyük bir önem taşımaktadır.

Depo sahalarında açığa çıkan biyogazın yaklaşık %55'ini meydana getiren CH₄ gazı önemli bir enerji kaynağı olması sebebiyle küresel ısınmaya katkısı CO₂'e kıyasla 25 kat daha fazladır. Sahalardan ileri gelen ayrışma ve gaz oluşumu, sahalar kapatıldıktan 50 sene sonra bile devam edebilmektedir [24].

Adana'da düzenli depolama tesisinde zaman içinde oluşacak metan gazı miktarının atmosfere salınımı Adana Sofulu Çöplüğü Biyogaz Santrali ile enerji üretiminde kullanılarak önlenecektir. Bu nedenle katı atıklardan enerji elde etmek sadece biyoenerji uygulaması olarak görülmemelidir. Metan gazı salınımının doğrudan atmosfere verilmesinin önüne geçilerek, çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerin de minimum seviyeye düşürüldüğü göz ardı edilemeyecek bir gerçekliktir.

Adana ili düzenli depolama alanına dökülen yaklaşık 7.810.662 ton katı atıktan kaynaklanabilecek elektrik enerjisi ve metan potansiyelinin belirlenebilmesi amacıyla matematiksel modelleme çalışması yapılmıştır.

Tesisin kapanış yılı olan 2026'da 14.420.666 kW's elektrik enerjisi elde edilebileceği tespit edilmiştir. 2020'den 2026 yılına kadar elektrik üretim miktarında %521,5'lik bir artış yaşanmıştır.

Yapılan hesaplamalar neticesinde sahada 2026 yılına kadar toplam 185.065.000.000 m³/yıl metan gazı, 370.150.000.000 m³/yıl depo gazı oluşacağı belirlenmiştir.

Adana'da oluşan atıkların biyolojik olarak bozunabilen organik madde içeriği yüksektir. İlerleyen zamanlarda yapılacak çalışmalarda, kurulacak modellerde parametrelerin seçiminde sahaya özgü deneylerin gerçekleştirilmesi önemli bir husustur. Mümkün olduğunca sahada pompa testlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Böylelikle, sahanın gaz üretim potansiyeli belirlenerek gelecek yıllar için daha sağlıklı ve gerçekçi sonuçlara ulaşılabilecektir.

Ülkemizde Sivas ili için yapılmış bir çalışmada; depo gazından yıllık ne kadar enerji elde edilebileceğine yönelik LandGEM Version 3.02 kullanarak bulgular elde edilmiştir. Bunun sonucunda üretilen en yüksek enerji miktarı kapanış yılı olan 2030'da elde edilen enerji 2947 kW olarak hesaplanmıştır [4]. Bununla birlikte katı atık miktarı, nüfus ve iklimsel koşullar Adana'ya kıyasla ciddi farklılıklar göstermektedir. Aynı yöntemle enerji hesabı yapılmış olsa bile, özellikle Sivas ili için hesaplanan toplam atık miktarının 946.920 ton, Adana'nın ise 7.810.662 ton oluşu bu farklılığı belirgin bir şekilde ortaya koymaktadır.

Depo gazından elektrik elde edilmesi yenilenebilir teknolojiler içinde hidroelektrik santrallerden sonra ikinci ekonomik teknolojidir. Çevreye olan etkisi olumlu yöndedir. Kapasitesinin yüksek olması sebebi ile de güvenilir bir enerji kaynağıdır. Denenmiş ve gelişmiş bir teknoloji kullanıldığı için riski çok azdır. Genel olarak depo gazı santralleri şehirlerin birkaç kilometre dışında kalmaktadır. Bu nedenden ötürü şebeke bağlantıları kısadır, bu da maliyeti ve enerji kayıplarını azaltmaktadır.

Yakıt masrafının olmaması ve kapasite faktörü sebebiyle, enerji maliyeti kilovat saat başına yaklaşık 3.5 liradan azdır, diğer teknolojilerin bir çoğundan daha ekonomiktir [64].

Bugün, ülkemizin enerji kaynakları yeterli seviyede olmadığı için, enerji ihtiyacının büyük bir kısmı ithal etmek zorunda kalmaktadır. Enerji açığını kapatmak ve katı atık sorununu ortadan kaldırmak için Adana ve diğer büyük kentlerimizde, atıklardan geri kazanım yapıldıktan sonra, geriye kalan ve depolanması gereken atıklardan elektrik enerjisi üretilmesi ekonomik açıdan büyük önem arz etmektedir. Üretimi gerçekleşen ısı ve elektriğin belli bir kısmı tesisin kendi iç enerji ihtiyacı için kullanılması ve diğer bir kısmının yenilenebilir enerji yasası kapsamında satılması düşünülmelidir. Böylelikle düzenli depolama alanlarında açığa çıkan atıkların çevreye hiçbir şekilde zararı

dokunmadan ve de çevre dostu teknolojiler ile ülke ekonomisine geri kazandırılmış olacaktır.



KAYNAKÇA

1. Yalçın, M. A. ve Saltabaş, F., Depo Gazından Enerji Üretimi, *SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8 (1): s. 44-47, 2015.
2. Yılmaz, A., Ünvar, S., Koca, T. ve Koçer, A., Türkiye’de Biyogaz Üretimi ve Biyogaz Üretimi İstatistik Bilgileri, *Technological Applied Sciences*, 12 (4): s. 218-232, 2017.
3. Saltabaş, F. ve Yalçın, M., Depo Gazından Enerji Üretimi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8 (1), s. 44-47, 2004.
4. Yıldırım, B., “Depo Gazından Enerji Üretimi Ve Bir Örnek Uygulama” *Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi*, s. 34-36, Sivas, 2020.
5. Çelebi, M., “Belediye atıklarından çöp gazı elde edilerek elektrik enerjisi üretilmesi ve ülkemizdeki örneklerinin incelenmesi”, *İller Bankası Anonim Şirketi, Uzmanlık Tezi*, Nisan, 2017.
6. Koç, M. F.,” Depo Gazından Enerji Üretimi ve Sera Gazı Salınımına Etkisi: Zonguldak İli Örneği”, *Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s. 6-9, Zonguldak, 2019.
7. Mohamed, A. A. M., “Evsel Atıklardan Elde Edilen Enerji Üretimi ve Isparta Örneği”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Isparta, 2017.
8. Kolukısa, Z. Ü., “Belediyelerde Katı Atık Yönetimi: Malatya Belediyesi Örneği”, *İnönü Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Malatya, 2013.
9. Işık, A., “Katı Atık Bertaraf Tesislerinde Organik Atıklardan Açığa Çıkan Depo Gazı İle Enerji Elde Edilmesi”, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s. 2, s. 10-11 s. 19-22. s. 35-38, Karabük, 2014.
10. Vodyanitskii, Y. N., Biochemical Processes In Soil And Groundwater Contaminated By Leachates From Municipal Landfills, *ScienceDirect*, 14: s. 249-256, 2016.

11. Bilgili, M.S., “Katı Atık Düzenli Depo Sahalarında Atıkların Aerobik ve Anaerobik Ayrışması Üzerine Sızıntı Suyu Geri Devrinin Etkileri”, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, İstanbul, 2006.
12. Sezgin, N., Özcan, H. K., Varınca, K. ve Borat, M., Katı Atık Depo Gazından Elektrik Üretiminin Türkiye’de Uygulanabilirliğine İki Örnek: İstanbul ve Bursa Tesisleri, *Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi*, 3: 89-96, 2003.
13. Cooper, C. D., Reinhart, D. R., Rash, F., Seligman, D. ve Keely, D., “Landfill Gas Emissions Florida Center for Solid and Hazardous Wastes Management”, *Report 92-2*, 1992.
14. İnternet: Biyoalkol Teknolojisi
<https://cdn.bartın.edu.tr/biyoteknoloji/86babca0507e88ae8f7ecb1dea802c6b/sunum7biyogaz>.
15. Björnsson, L., “Intensification of the Biogas Process by Improved Process Monitoring and Biomass Retention,” *Doctoral Dissertation, Department of Biotechnology, Lund University, Sweden*, 2000.
16. Demirel, B. ve Yenigün, O., Changes in Microbial Ecology in an Anaerobic Reactor, *Bioresource Technology*, vol. 97, p. 1201–1208, 2006.
17. Dewil, R., Appels, R., Baeyens, J., Degreve, J., Peroxidation Enhances the Biogas Production in the Anaerobic Digestion of Biosolids, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 146, p. 577-581, 2007.
18. Lastella, G., Testa, C., Cornacchia, G., Notornicola, M., Voltasio, F., Sharma, V. K., Anaerobic Digestion of Semi - Solid Organic Waste: Biogas Production and its Purification,, *Energy Conversion and Management*, vol. 43, p. 63-75, 2002.
19. Solera, R., Romero, L. I. ve Sales, D., 2002. The Evolution of Biomass in a Two-phase Anaerobic Treatment Process During Start-Up, *Chemical Biochemical Engineering*, vol. 16, p. 25- 29, 2002.
20. Kankılıç, T. ve Topal, H., Belediye Atıklarından Düzenli Depolama Sahalarında Biyogaz ve Enerji Üretimi, *Mühendis ve Makina*, 56 (669): s. 58-69, 2015.
21. Özçakıl, M., “Türkiye’de Katı Atık Depo Gazı Geri Kazanım Tesislerinin Değerlendirilmesi”, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul, 2001.
22. Zanetti, M.C., Mana, L., and Genon, G., .Biogas Production Evaluation by Means of Balances, *Proceeding Sardinia*, 1997.

23. Bilgili, M. S., “Katı Atık Düzenli Depo Sahalarında Depo Gazı Oluşumunu Etkileyen Faktörlerin Belirlenmesi”, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s.31-32, İstanbul, 2002.
24. Sel, İ., “Tam Ölçekli Düzenli Depolama Sahasında Depolanmış Evsel Katı Atıkların Metan Potansiyelinin Stokastik Yöntemlerle Belirlenmesi”, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, İstanbul, 2016.
25. World Bank, Handbook for the Preparation of Landfill Gas to Energy Projects in Latin America and the Caribbean, *Conestoga-Rovers & Associates*, 2004.
26. İnternet: Alternatif Bertaraf Teknolojileri
https://istac.istanbul/contents/44/cevremakaleleri_130838592170772966.pdf.
27. Pohland, F.G. ve Kim, J.C., Microbially Mediated Attenuation Potential of Landfill Bioreactor Systems, *Water Science and Technology*, 41 (3), s. 247-254, 2000.
28. Reinhart, D.R. ve Grosh, C.J., “Analysis of Florida MSW Landfill Leachate Quality Data”, *Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management, Final Report*, 1997.
29. Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S., Integrated Solid Waste Management Engineering Principles and Management Issues, *McGraw-Hill*, New York, 1993.
30. Akpınar, N., “Kentsel Katı Atıklardan Enerji Üretimi”. *İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul, 2006.
31. Güreli, F., “Tam Ölçekli Bir Katı Atık Depo Sahasında (Odayeri) Çöp Gazından H₂S Gideriminin Araştırılması”, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı*, s. 107, İstanbul, 2015.
32. Coşkuner, M. C., Evsel Atıktan Enerji Üretimi –Gaziantep Örneği, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul, 2015.
33. Koçbaş, S. “Katı Atık Deponi Alanlarındaki Metan Gazından Elektrik Enerjisi Üretimi”, *V. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu Bildiri Kitabı*, 26- 28 Mayıs 2004, İstanbul.
34. Öztürk, M., Katı Atık Depolama Alanında Depo Gazı Oluşumu, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*, s. 13-36, Ankara, 2018.

35. Ersoy, Y., “İzmir Evsel Çöpünden Biyometan Şeklinde Enerji Geri Kazanılabilirliği”, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, İzmir, 2007.
36. Aydın, A., “Türkiye’de Depo Gazından Enerji Yönetimi”, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s.9, İstanbul, 2013.
37. Cossu, R., “Role of Landfilling in Solid Waste Management”, In: *Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact*, Edited by Christensen, T.H., Cossu, R., Stegmann, R., Academic Press, London, 1989.
38. Christensen, T.H. ve Kjeldsen, P., “Basic Biochemical Processes in Landfills”, In: *Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact*, Editors: Christensen, T.H., Cossu, R., Stegmann, R., Academic Press, London, UK, 1989.
39. Nastev, M., “Modelling Landfill Gas Generation and Migration in Sanitary Landfills and Geological Formations”, PhD Thesis, *Département de Géologie et de Génie Géologique, Faculté Des Sciences et de Génie, Université Laval, Québec*, 1998.
40. Solak, O., “Türkiye'deki Katı Atık Deponi Alanlarında Oluşan Gazın Çevresel Ve Ekonomik Açından İncelenmesi” *Hacettepe Üniversitesi Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi*, s.42, 2015.
41. Özcan, H. K., “Katı Atık Düzenli Depolama Gazlarının Genetik Algoritmalarla Modellenmesi”, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, İstanbul, 2009.
42. Christensen, T. H., *Solid Waste Technology & Management*, ISBN: 978-605-320-699-6, Nobel Akademi Yayıncılık Eğitimi Danışmanlık Tic. Ltd. Şti., pp. 1026, Ankara, 2010.
43. Kiriş, A. ve Saltabaş, F., *The Landfill Gas Management At Sanitary Landfill Site And İstanbul Case Study*, *Journal of Engineering and Natural Sciences*, Sigma 3: 209-218, 2015.
44. Özaktaç, Ş. “Düzenli Depolama Tesislerinde Depo Gazı Üretimine İlişkin Modelleme Olanaklarının Araştırılması”, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi*, s. 45–128, İstanbul, 2004.

45. Öztürk, İ., “Katı Atık Yönetimi ve AB Uyumlu Uygulamaları”, *İSTAÇ AŞ., Teknik Kitaplar Serisi*, İstanbul, 2010.
46. Çakır, A. K., “İzmir Harmandalı Düzenli Depolama Alanındaki Metan Gazı Potansiyelinin Belirlenerek Elektrik Enerjisi Değerlerinin Elde Edilmesi”, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, İzmir, 2012.
47. Fallahzadeh, S., Rahmatinia, M., Mohammadi, Z., Vaezzadeh, M., Tajamiri, A. and Soleimani, H., “Estimation Of Methane Gas By Landgem Model From Yasuj Municipal Solid Waste Landfill”, *Science Direct*, 6: 39, 391-398, Iran, 2019.
48. İnternet: US EPA, Environmental Protection Agency, “NSW State of The Environment 1995” <http://www.epa.nsw.gov.au/soe/95/>.
49. Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User’s Guide, U.S. Environmental Protection Agency, *Office of Research and Development*, Washington DC 20460, 2005.
50. Polat, U., “Solid Waste Management Case Studies In İstanbul – Kemerburgaz and Bursa – Geçit”, *Boğaziçi Üniversitesi Institute for Graduate Studies, Graduate Program*, İstanbul, 2010.
51. Gendebien, A., Pauwels, M., Constant, M., Willumsen, H.C., Butson, J., Fabry, R., Ferrero, G.L. and Nyns, E.J., “Landfill Gas: from Environment to Energy” *State of the Art and Implementation in the European Community*, s. 69-76, 1991.
52. Mc Bean, E. A., Rovers, F. A., and Farquhar, G. J., *Solid Waste Landfill Engineering and Design*, Prentice Hall, New Jersey, USA, 1995.
53. Elektrik Piyasası Sektör Raporu, *Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK)*, s.5, 2019.
54. İnternet: Şehirlerin Elektrik Santrali Kurulu Güçleri ile Üretim ve Tüketim Bilgileri <https://www.enerjiatlası.com/sehir/>.
55. Adana Çevre Ve Şehircilik İl Müdürlüğü “Adana İli 2019 Yılı Çevre Durum Raporu “, *T.C. Adana Valiliği*, s. 71-75, 2020.
56. Kiriş, A. ve Saltabaş, F., Katı Atık Düzenli Depolama Sahalarında Depo Gazı (LFG) Yönetimi ve Uygulamaları, *Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, s. 210-211, 2011.
57. Çakır, A. K. Ve Günerhan, H., İzmir Harmandalı Deponisindeki Metan Gazı Potansiyelinin Belirlenmesi, Bertaraf ve Değerlendirme Seçeneklerinin

- Araştırılması, *TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi*, 631 (53), s. 24-34, 2012.
58. İnternet: Adana İli Genel Bilgiler <https://adana.csb.gov.tr/ilimizi-taniyalim-i-1222>.
59. İnternet: Adana İli Geçmiş Nüfus Verileri <https://www.nufusu.com/il/adana-nufusu>.
60. İnternet: Kocaman T., “Plan Nüfus Projeksiyon Yöntemleri”, Sosyal Sektörler ve Koordinasyon Genel Müdürlüğü, Ankara, 2002.
http://www.baskent.edu.tr/~matemel/courses/nufus_tahmin_yontemleri_kalkinma.pdf.
61. İnternet: <http://www.cogeneration.com.ua/img/zstored/J420V21_en.pdf.
62. Lee, U., Han, J. and Wang, M., Evaluation Of Landfill Gas Emissions From Municipal Solid Waste Landfills For The Life-Cycle Analysis Of Waste-To-Energy Pathways, *Journal of Cleaner Production*, 166: 335-342, 2017.
63. Surroop, D., & Mohee, R., Power Generation From Landfill Gas, *In 2nd International Conference on Environmental Engineering and Applications IPCBEE*, vol. 17, 2011.
64. İnternet: Depo Gazlarından Elektrik Enerjisi Elde Edilmesi
<http://www.turkelektrik.com>.