

**TÜRKİYE'DEKİ KATI ATIK DEPONİ ALANLARINDA  
OLUŞAN GAZIN ÇEVRESEL VE EKONOMİK AÇIDAN  
İNCELENMESİ**

**ENVIRONMENTAL AND ECONOMICAL INVESTIGATION  
OF SANITARY LANDFILL GAS IN TURKEY**

**Orhan SOLAK**

**Dr. Türkay ONACAK**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2015

**Orhan SOLAK**' ın hazırladığı “**Türkiye'deki Katı Atık Deponi Alanlarında Oluşan Gazın Çevresel Ve Ekonomik Açidan İncelenmesi**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**' nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Beril SALMAN AKIN

Başkan

.....

Dr. Türkay ONACAK

Danışman

.....

Prof. Dr. Ayşenur UĞURLU

Üye

.....

Doç. Dr. Ayşe Müge ANDAÇ ÖZDİL

Üye

.....

Yrd. Doç. Dr. Hatice YÜKSEL

Üye

.....

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma SEVİN DÜZ  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

.../07/2015

Orhan SOLAK

## ÖZET

# TÜRKİYE'DEKİ KATI ATIK DEPONİ ALANLARINDA OLUŞAN GAZIN ÇEVRESEL VE EKONOMİK AÇIDAN İNCELENMESİ

**Orhan SOLAK**

**Yüksek Lisans, Çevre Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Dr. Türkay ONACAK**

**Temmuz 2015, 82 Sayfa**

Günümüzdeki hızlı nüfus artışı, kentleşme ve teknolojik gelişmeler sonucunda, katı atık miktarlarında önemli oranda artış gözlemlenmektedir. Oluşan katı atıkların çevre için olumsuz etkilerinin önlenmesi amacıyla, mevzuatta belirlenen standartlara uygun şekilde bertaraf edilmeleri gerekmektedir. Bu amaçla, ülkemizde ve dünyada ağırlıklı olarak uygulanan yöntem katı atıkların düzenli depolanması yöntemidir.

Depolama sahalarında depolanan atıkların zamanla stabilize olması sırasında, atıkların içinde bulunan organik maddelerin biyokimyasal olarak ayrışması sonucu enerji kapasitesi yüksek depo gazı oluşmaktadır. Son yıllarda enerji talebinin artması sebebiyle, Dünya genelinde depolama sahalarında oluşan depo gazının yönetiminde depo gazından enerji temini ile ilgili çalışmalarda artış görülmektedir.

Katı atık depolama alanlarında oluşan depo gazının çevresel olumsuz etkilerinin yanında bileşimindeki yüksek orandaki metan içeriğinden dolayı önemli ölçüde sera gazı etkisi bulunmaktadır. Bu sebeple oluşan gazın kontrolü sera gazı emisyonlarının azaltımı açısından da büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, Türkiye İstatistik Kurumu ve Çevre ve Şehircilik Bakanlığı verileri kullanılarak 2006 Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli Ulusal Sera Gazı Envanterleri Hazırlama Rehberine göre ülkemizde evsel nitelikli katı atık depolama alanlarında oluşan metan gazı miktarı hesaplanmıştır.

Çalışma neticesinde, ülkemizde 2015 yılı için evsel nitelikli atık depolama sahalarında oluşan metan gazı miktarının 738.000 ton olduğu ve bu değer her yıl artarak 2030 yılında 1.025.000 ton değerine ulaşacağı hesaplanmıştır.

Söz konusu metan üretimi hesaplandıktan sonra, elde edilen sonuçlar Amerika Birleşik Devletleri'nin Çevre Koruma Ajansı Kuruluşu olan EPA'nın (Environmental Protection Agency) Katı Atık Depolama Sahası Metan Yardım Programı (Landfill Methane Outreach Program) altında evsel nitelikli katı atık depolama sahalarında oluşan depo gazından enerji temini sağlayan projelerin sera gazı emisyon azaltımının, çevresel faydaların ve enerji üretiminin hesaplanması amacıyla geliştirdiği model kullanılarak değerlendirilmiştir. Buna göre 2015 yılı için 370,47 MW olarak hesaplanan elektrik üretim potansiyeli 2030 yılında 514,54 MW olarak belirlenmiştir. Yıllara göre artış eğilimi sera gazı emisyon azaltımı miktarlarında da görülmektedir. 2015 yılı için yaklaşık 20,1 Milyon ton CO<sub>2</sub> eşdeğeri olarak belirlenen sera gazı emisyon azaltımı potansiyeli 2030 yılında yaklaşık 27,9 Milyon ton CO<sub>2</sub> eşdeğeri miktarı olarak hesaplanmıştır.

Daha sonra, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektriğin satın alım bedellerine ilişkin olarak Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'ndan alınan verilerle söz konusu elektrik üretim potansiyelinin finansal karşılığı hesaplanmıştır. Buna göre üretilen elektriğin satışından 2015 yılı için elde edilebilecek finansal gelir yaklaşık 394 Milyon Amerikan Doları olup 2030 yılı için bu değer yaklaşık 547,5 Milyon Amerikan Doları olarak belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Katı atık, düzenli depolama, depo gazı, metan, sera gazı emisyonları.

## **ABSTRACT**

# **ENVIRONMENTAL AND ECONOMICAL INVESTIGATION OF SANITARY LANDFILL GAS IN TURKEY**

**Orhan SOLAK**

**Master of Science, Department of Environmental Engineering**

**Supervisor: Dr. Türkay ONACAK**

**July 2015, 82 Pages**

Due to the rapid population growth, urbanization and technological improvements in our century, waste generation is increasing significantly. In order to prevent harmful environmental effects of these waste, suitable methods should be applied in compliance with relevant regulations. In this respect, sanitary landfilling is the most commonly applied controlling method both in our country and all around the world.

During the stabilization of the solid waste collected in landfills, landfill gas with high energy potential accumulates over time with biochemical decomposition of the organic compounds in the waste. Since the energy demand is increasing in the last decades, number of the studies on energy recovery from landfill gas are increasing in all around the world.

In addition to harmful environmental impacts, landfill gas has also significant greenhouse gas impact because of high rate of methane content in the composition. Therefore, controlling of landfill gas is also crucial for reducing greenhouse gas emissions.

In this study, Turkey's greenhouse gas emissions resulting from landfills were calculated by 2006 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories with data taken from TURKSTAT and Ministry of Environment and Urbanisation.

The study shows that the methane generation from municipal solid waste in Turkey is about 738,000 tonnes in 2015, this figure increases each year and reaches 1,025,000 tonnes in 2030.

After the calculation of the methane generation, the results were evaluated by the United States EPA (Environmental Protection Agency) Landfill Methane Outreach Program Model developed for landfill gas to energy projects to identify greenhouse gases (GHG) mitigation, environmental benefits and electricity production potential. In 2015, Turkey's electricity production potential from landfill gas is 370.47 MW and this figure reaches 514.54 MW in 2030. Similarly, GHG mitigation potential increases on a yearly basis. GHG mitigation potential from landfill gas to electricity production of Turkey is about 20.1 Million tonnes CO<sub>2</sub> equivalent in 2015 and it increases about 27.9 Million tonnes CO<sub>2</sub> equivalent in 2030.

Then, the electricity production potential was converted to financial value by using renewable energy electricity production purchase price data taken from Turkey's Energy Market Regulatory Authority. In monetary terms, Turkey's electricity production potential from landfill gas was estimated about 394 Million USD in 2015 and 547.5 Million USD in 2030.

**Key Words:** Solid waste, sanitary landfill, landfill gas, methane, greenhouse gas emissions.

## **TEŞEKKÜR**

Bu tezi hazırlamamda bana yardımcı olan sayın hocam Dr. Türkay ONACAK'a, hayatım boyunca bana desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen çok sevdiğim annem ve babam Şükriye SOLAK ve İbrahim SOLAK'a ve manevi desteklerinden dolayı kıymetli eşim Fulya SOLAK'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Orhan SOLAK



# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ÇİZELGELER LİSTESİ .....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	x
KISALTMALAR LİSTESİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Amaç.....	1
1.2 Kapsam .....	2
1.3 Literatür Özeti.....	2
2. KATI ATIK BERTARAFINDA DÜZENLİ DEPOLAMA.....	5
2.1 Giriş .....	5
2.2 Düzenli Depolama Sahası Dizaynı ve İşletilmesi.....	6
2.3 Yasal Çerçeve .....	8
2.3.1 Ulusal Atık Mevzuatında Düzenli Depolama.....	8
2.3.1.1 Atık Yönetimi Yönetmeliği .....	8
2.3.1.2 Atıkların Düzenli Depolanmasına İlişkin Yönetmelik .....	9
2.3.2 Avrupa Birliği Atık Mevzuatında Düzenli Depolama.....	11
2.3.2.1 Atık Çerçeve Direktifi .....	11
2.3.2.2 Düzenli Depolama Direktifi .....	11
2.4 Evsel Katı Atık Yönetiminde Ülkemizdeki Mevcut Durum .....	13
3. KATI ATIK DEPO GAZI OLUŞUMU VE ÖZELLİKLERİ .....	16
3.1 Giriş .....	16
3.2 Depo Gazı Oluşumu .....	18
3.2.1 Aerobik Safha .....	18
3.2.2 Anaerobik Metanojenik Olmayan Safha .....	19
3.2.3 Anaerobik Metanojenik Kararsız Safha .....	19
3.2.4 Metanojenik Kararlı Safha.....	19
3.2.5 Aerobik Şartlara Geçiş Safhası.....	20
3.3 Depo Gazı Oluşumunun Zamanla Değişimi.....	20

3.4 Depo Gazı Oluşumunu Etkileyen Faktörler .....	21
3.4.1 Hidrojen .....	21
3.4.2 Oksijen .....	22
3.4.3 pH ve Alkalinite .....	22
3.4.4 Sülfat .....	23
3.4.5 Besi Maddeleri (Nütrientler) .....	24
3.4.6 İnhibitörler .....	24
3.4.7 Sıcaklık .....	25
3.4.8 Nem/Su Muhtevası .....	26
3.4.9 Dane Boyutu .....	27
3.5 Depo Gazlarının Çevresel Etkileri .....	28
3.5.1 İklim Değişikliğine Etkisi .....	28
3.5.2 Yangın ve Patlama Tehlikesi .....	29
3.5.3 Hava Kirliliğine Etkisi .....	30
3.5.4 Yeraltı Suyu Kirliliği .....	30
3.5.5 İstenmeyen Kokular .....	30
3.6 Depo Gazı Miktarı Hesaplama Yöntemleri .....	30
3.6.1 Test Kuyuları .....	31
3.6.2 Yaklaşık Tahmin .....	31
3.6.3 Substratların Ayrışma Denklemi ile Hesaplama .....	31
3.6.4 Matematiksel Modeller Yardımıyla Hesap .....	32
3.6.4.1 Tabasaran/Rettenberger Modeli .....	32
3.6.4.2 LandGEM (Landfill Gas Emission Model) Modeli .....	33
3.6.4.3 Çoklu Faz Modeli .....	34
3.7 Depo Gazının Toplanması ve Kontrolü .....	35
3.7.1 Pasif Gaz Kontrol Sistemleri .....	35
3.7.2 Aktif Gaz Kontrol Sistemleri .....	36
4. DEPO GAZININ ENERJİ AMAÇLI KULLANIMI .....	39
4.1 Kullanılan Teknolojiler .....	39
4.1.1 Direkt Isıtma Uygulamaları .....	39
4.1.2 Elektrik Üretimi Uygulamaları .....	40
4.1.2.1 Depo Gazının Sabit Motorlarda Yakıt Olarak Kullanımı .....	40
4.1.2.2 Depo Gazının Gaz Türbinlerinde Yakıt Olarak Kullanımı .....	41
4.1.2.3 Depo Gazının Buhar Türbinlerinde Yakıt Olarak Kullanımı .....	41

4.1.2.4 Kojenerasyon .....	41
4.1.2.5 Yakıt hücresi.....	42
4.1.3 Boru Hattı Kalitesinde Gaz Saflaştırma .....	42
4.1.3.1 İşlenmiş Depo Gazının Taşıt Yakıtı Olarak Kullanımı .....	42
4.1.3.2 İşlenmiş Depo Gazının Doğalgaz Şebekesine Enjeksiyonu .....	42
4.1.4 Kimyasalların Üretiminde Kullanılması.....	43
4.1.5 Depo Gazının Arıtılması.....	43
4.2 Depo Gazından Elektrik Üreten Teknolojilerin Finansal ve Ekonomik Analizi.....	44
4.2.1 Maliyetler .....	48
4.2.2 Gelirler.....	52
4.2.3 Ekonomik Analiz.....	53
5. IPCC 2006 REHBERİNE GÖRE KATI ATIK DEPOLAMA SAHALARINDA OLUŞAN METAN GAZININ HESAPLANMASI .....	55
5.1 Giriş .....	55
5.2 Metodolojik Hususlar .....	55
5.2.1 Yöntemin Seçimi .....	55
5.2.1.1 Birinci Dereceden Çürüme Modeli.....	57
5.2.2 Aktivite Verilerinin Belirlenmesi .....	61
5.2.3 Emisyon Faktörlerinin ve Parametrelerin Belirlenmesi .....	61
5.2.3.1 Parçalanabilir Organik Karbon.....	61
5.2.3.2 Çözülmüş Parçalanabilir Organik Karbonun Oranı.....	59
5.2.3.3 Metan Düzeltme Faktörü .....	62
5.2.3.4 Depo Gazındaki Metan Oranı.....	63
5.2.3.5 Oksidasyon Faktörü.....	63
5.2.3.6 Yarı Ömür.....	63
5.2.3.7 Metan Geri Kazanımı .....	64
5.2.3.8 Gecikme Zamanı.....	64
5.3 Modelin Çalıştırılması İçin Verilerin Temini ve Referans Değerlerin Belirlenmesi	64
5.4 Modelden Elde Edilen Sayısal Sonuçlar .....	70
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	72
KAYNAKLAR.....	78
EKLER .....	80
ÖZGEÇMİŞ.....	81

# ÇİZELGELER LİSTESİ

## Sayfa

Çizelge 2.1: Türkiye İçin Evsel Nitelikli Katı Atık Üretimi Tahmini.....	14
Çizelge 2.2: Türkiye'nin Sektörlere Göre Toplam Sera Gazı Emisyonları .....	15
Çizelge 3.1: Depo Gazında Bulunan Bileşenler ve Depo Gazının Özellikleri.....	17
Çizelge 3.2: Organik Maddelerin Ayrışabilirlik Dereceleri .....	20
Çizelge 3.3: EPA Modeli Parametreleri .....	34
Çizelge 4.1: Senaryolara İlişkin Fayda-Maliyet Özeti .....	46
Çizelge 5.1: Saha Tipine Göre Metan Düzeltme Faktörü Değerleri .....	62
Çizelge 5.2: Saha Tipine Göre Metan Oksidasyon Faktörü Değerleri.....	63
Çizelge 5.3: Türkiye İçin Yıllara Göre Kişi Başı Atık Miktarları.....	65
Çizelge 5.4: IPCC 2006 DOC İçin Verilen Referans Değerler .....	66
Çizelge 5.5: IPCC 2006 Atık Kompozisyonu İçin Verilen Referans Değerler .....	67
Çizelge 5.6: IPCC 2006 Atık Yönetim Tipi Dağılımı İçin Verilen Referans Değerler.....	68
Çizelge 5.7: Türkiye İçin Hesaplanan Yıllara Göre Atık Yönetimi Tipi Dağılımları.....	68
Çizelge 5.8: IPCC 2006 MCF Değerleri İçin Verilen Referans Değerler .....	69
Çizelge 5.9: IPCC 2006 Metan Üretim Oranı Sabiti k Değeri İçin Referans Değerler.....	70
Çizelge 5.10: IPCC 2006 Model Sonuçları: .....	70

## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1: Düzenli Depolama Sahası Kesiti.....	7
Şekil 2.2: TÜİK 2010 Yılı Verilerine Göre Atık Bertaraf Yöntemleri .....	14
Şekil 2.3: Türkiye’de Katı Atık Kompozisyonu.....	15
Şekil 3.1: Depo Gazlarının Oluşumu ve Zamana Göre Değişimleri.....	21
Şekil 3.2: Anaerobik Bir Filtrede pH’ın Metan Oluşum Hızı Üzerine Etkisi .....	22
Şekil 3.3: Depo Sahalarında Sülfat İle Gaz Bileşimi Arasındaki İlişki .....	23
Şekil 3.4: CO <sub>2</sub> Kısmi Basıncına Bağlı Olarak Bazı Substratların Ayrışma Oranları .....	25
Şekil 3.5: Düşey Kuyular Kullanılan Gaz Geri Kazanım Sistemi.....	36
Şekil 3.6: Dikey Bir Gaz Çekme Kuyusu.....	38
Şekil 4.1: Depo Gazından Enerji Üretimi.....	40
Şekil 4.2: Depo Gazı Arıtımı Akım Şeması .....	44
Şekil 6.1: Türkiye için Katı Atık Sahalarında Oluşan Metan Gazı Miktarı .....	74

## KISALTMALAR LİSTESİ

AB	: Avrupa Birliği
BMİDÇS	: Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
CNG	: Sıkıştırılmış Doğalgaz
DOC	: Parçalanabilir Organik Bileşikler
EPA	: Çevre Koruma Ajansı
IPCC	: Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli
LandGEM	: Katı Atık Depo Gazı Emisyon Modeli
LEL	: En Düşük Patlayıcılık Sınır Değeri
LNG	: Sıvılaştırılmış Doğalgaz
MCF	: Metan Düzeltme Faktörü
NPV	: Net Bugünkü Değer
OX	: Oksidasyon Faktörü
PAFC	: Fosforik Asit Yakıt Hücresi
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
UEL	: En Yüksek Patlayıcılık Sınır Değer

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Amaç

Çevre üzerinde büyük bir baskı oluşturan ve etkisi gün geçtikçe artan atık sorununun çözümü için tüm yöntemlerin kombinasyonu ile etkin bir atık yönetimi sağlayan “Entegre Atık Yönetimi” anlayışının benimsenmesi gerekmektedir. Entegre atık yönetiminde, atık yönetiminin tüm unsurları bir bütün olarak değerlendirilerek hem çevresel hem de ekonomik açıdan sürdürülebilirliğin sağlanması hedeflenir. Bu çerçevede, atık bertarafının sağlanmasının yanında, elde edilecek geri dönüşüm materyalleri, kompost ve enerji gibi ürünler sayesinde yüksek bertaraf maliyetlerinin azaltılması amaçlanır.

Dünyada artan nüfus ve gelişen teknoloji nedeniyle enerji ihtiyacının artması ve bu ihtiyacı karşılayacak enerji kaynaklarının gün geçtikçe azalması sebebiyle, katı atıklardan elde edilebilecek ürünler arasında enerji, üzerinde en çok çalışılan konulardan biri durumundadır.

Ülkemiz için evsel nitelikli katı atıkların kontrolünde ağırlıklı olarak uygulanmakta olan sistem katı atıkların düzenli ya da düzensiz olarak depolanmasıdır. Bu nedenle, ülkemizde katı atıklardan enerji temini konusunda katı atık depolama sahalarında oluşan depo gazlarının değerlendirilmesi konusu ön plana çıkmaktadır. Bu sahalarda oluşan gazların enerjiye dönüşümünü sağlayan uygulamaların yaygınlaştırılması, enerji sıkıntısı yaşayan ülkemizin ekonomisine katkı sağlanması açısından oldukça önemlidir. Ayrıca, bu şekilde elde edilen enerji sayesinde, aynı miktarda enerjiyi üretmek için yakılması gereken fosil yakıtlardan kaynaklanacak kirletici emisyonların ve sera gazı emisyonlarının salınımları da engellenmiş olacaktır.

Bu kapsamda, gerçekleştirilen tez çalışmasında 2030 yılına kadar ülkemizde evsel nitelikli katı atıkların depolanması ile oluşan metan üretiminin, üretilen metanın elektrik üretim potansiyelinin, bu potansiyelin finansal karşılığının ve hesaplanan metanın elektrik üretimi ile değerlendirilmesi durumunda elde edilecek sera gazı emisyon azaltım miktarının tahmini yoluyla ülkemizin bu konudaki potansiyelinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

## 1.2 Kapsam

Ülkemiz, iklim değişikliği sorununa karşı küresel tepkinin temelini oluşturmak üzere 1992 yılında kabul edilen ve neredeyse evrensel bir katılıma ulaşan Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi’ne (BMİDÇS) 24 Mayıs 2004 tarihinde taraf olmuştur.

Söz konusu Sözleşme yükümlülükleri kapsamında, tüm taraf ülkeler ile birlikte her yıl Ulusal Sera Gazı Emisyon Envanteri hazırlanmakta ve Sözleşme Sekreteryası'na sunulmaktadır.

Taraf ülkelerin, Ulusal Sera Gazı Envanterlerinin hazırlanması sürecinde ülkelere rehberlik etmesi ve sunulan raporların standardının sağlanması amacıyla Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından son olarak 2006 yılında Ulusal Sera Gazı Envanterleri Hazırlama Rehberi yayımlanmıştır.

Bu çalışmada, söz konusu rehber kullanılarak ülkemiz için evsel nitelikli katı atık depolama alanlarında oluşan metan gazı miktarı hesaplanmıştır. Daha sonra, elde edilen sonuçların ekonomik ve çevresel açıdan karşılığının belirlenmesi amacıyla Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı Kuruluşu EPA'nın (Environmental Protection Agency) Katı Atık Depolama Sahası Metan Yardım Programı (Landfill Methane Outreach Program) altında, depo gazından enerji temini sağlayan projelerin sera gazı emisyon azaltımının, çevresel faydalarının ve enerji üretiminin hesaplanması amacıyla geliştirilen model kullanılarak değerlendirme yapılmıştır.

Son olarak, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektriğin satın alım bedellerine ilişkin olarak Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'ndan alınan verilerle söz konusu elektrik üretim potansiyelinin finansal karşılığı hesaplanmıştır.

### **1.3 Literatür Özeti**

Literatür araştırması neticesinde, konuya ilişkin elde edilen çalışmaların bazıları aşağıda özetlenmektedir:

Roberto Bove ve Piero Lunghi, evsel katı atıklardan elektrik üretiminde kullanılan geleneksel ve yeni teknolojilere ilişkin bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışma kapsamında, içten yanmalı motorlar, gaz türbinleri, buhar türbinleri ve yakıt hücreleri arasında yapılan teknik ve ekonomik değerlendirmede içten yanmalı motorların çevresel açıdan en düşük verimliliğe sahip olmasına rağmen ekonomik unsurlardan dolayı Dünya genelinde en yaygın kullanılan sistem olduğu ifade edilmiştir. Diğer taraftan yakıt hücrelerinin çevresel açıdan en temiz teknolojiler olmasına ve yüksek enerji verimliliği sağlamasına rağmen geleneksel yöntemlerle kıyaslandığında yüksek yatırım maliyetleri sebebiyle Dünya genelinde çok fazla tercih edilmediği belirtilmiştir [16].



Nergiz AKPINAR tarafından gerçekleştirilen yüksek lisans tez çalışmasında, kentsel atıklardan enerji üretimi kapsamında düzenli depolama, yakma, gazlaştırma ve anaerobik çürütme teknolojileri incelenmiştir. Çalışma sonucunda, dünya genelinde depo gazından enerji temininde yakma teknolojilerinin en yaygın teknolojiler olduğu, anaerobik çürütme teknolojisinin de daha çok Avrupa'da kullanılmakta olduğu belirlenmiştir. Gazlaştırma teknolojisinin ise yakmaya göre elektrik üretim verimi daha yüksek olması ve kirletici emisyonlarının çok düşük olması itibarıyla son dönemde üzerinde en çok çalışılan teknoloji olduğu, ancak, yüksek yatırım maliyeti sebebiyle henüz büyük boyutlarda gazlaştırma tesislerinin hayata geçirilemediği ifade edilmiştir [17].

Mehmet Sinan BİLGİLİ tarafından gerçekleştirilen yüksek lisans tez çalışmasında, İstanbul Odayeri Katı Atık Düzenli Depolama Sahasında teşkil edilen kontrollü test hücreleri ile depolama sahalarında gerçekleşen ayrışma prosesleri ve depolama sahasında nem oranının artırılması ile meydana gelen değişiklikler izlenmiş ve nem oranı arttıkça ayrışma hızının da arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, laboratuvar çalışması ile İstanbul'un Avrupa yakasında katı atıklardan metan üretim potansiyeli tahmin edilmiştir. Çalışma neticesinde, İstanbul Odayeri için 1 ton atıktan elde edilen metan miktarı ortalama 34,5 m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir [22].

R. Pipaty ve I. Savolainen, evsel katı atıklardan kaynaklanan sera gazı emisyonlarının kontrolünde enerji üretiminin rolü üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışma kapsamında, evsel katı atık yönetimi açısından düzenli depolama, depo gazı geri dönüşümü, yakma veya enerji üretimi, biyolojik arıtma ve atıkların yakılması işlemleri değerlendirilmiştir. Çalışma neticesinde, atıkların depolanması yönteminin en yüksek sera gazı etkisine sahip olduğu, ancak depo gazı geri kazanımı veya enerji üretimi yöntemleriyle önemli ölçüde sera gazı emisyon azaltımı sağlanabileceği belirlenmiştir [23].

Paulina Jaramillo ve H. Scott Mathews, Amerika Birleşik Devletleri için depo gazından enerji temini projelerinin ekonomik ve sosyal faydalarının değerlendirilmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışma kapsamında, bu alanda yaygın olarak kullanılan içten yanmalı motor sistemleri ile birlikte gaz ve buhar türbini sistemleri değerlendirilmiştir. Çevresel açıdan bakıldığında bu sistemlerin tümü depo gazının kontrolsüz salınımindan daha az sera gazı emisyon çıkış değerlerine sahip olduğu, ancak, sistemlerin birbirleri arasında karşılaştırma yapıldığında buhar türbini sistemlerinin en düşük sera gazı emisyon çıkış değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Gaz türbinleri bu alanda buhar türbinlerinden

sonra gelmektedir. İçten yanmalı motorlar ise depo gazının kontrollü olarak yakılmasından daha fazla emisyon çıkışına sebep olmaktadır. Buna rağmen, bu sistemlerden en çok kullanılanının içten yanmalı motorlar olduğu belirtilmektedir. Dünyadaki bu tür tesislerin yaklaşık olarak üçte ikisinin içten yanmalı motor sistemlerini kullandığı ifade edilmektedir. Çalışmaya göre, bunun sebebi özellikle düşük ve orta kapasiteli tesislerde içten yanmalı motorların diğer sistemlere nazaran finansal olarak daha yüksek net bugünkü değerlere sahip olmalarıdır. Ancak, 10 milyon tonun üzerinde atık kapasitesine sahip depolama sahalarında, gaz türbini sistemlerinin finansal net bugünkü değerinin içten yanmalı motor sistemlerinden daha yüksek olduğu ifade edilmektedir. Bu nedenle, özellikle yüksek biyogaz üretim potansiyeline sahip depolama sahaları için, gaz türbini sistemlerinin hem finansal hem de çevresel açıdan içten yanmalı motor sistemlerine göre daha avantajlı olduğu belirtilmektedir [25].

Nickolas J. Themelis ve Priscilla A. Ulloa, Amerika Birleşik Devletleri'nde evsel nitelikli katı atık depolama sahalarında metan gazı oluşumu üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, 2007 yılı itibarıyla Amerika Birleşik Devletlerinde yaklaşık 380 evsel katı atık depolama sahasında 2,6 milyon ton metan gazının tutulduğu ve bu miktarın %70' inin ısı ve elektrik üretiminde kullanıldığı ifade edilmektedir. Ayrıca, küresel ölçekte evsel nitelikli katı atıklardan yıllık olarak yaklaşık 50 milyon ton metan gazı üretimi gerçekleştiği ve bunun sadece 5 milyon tonunun tutulduğu, geriye kalan 45 milyon tonun atmosfere yayıldığı belirtilmektedir. Metan gazının sera gazı etkisinin karbondioksit nazaran 23 kat fazla olduğu varsayımıyla bu değer yaklaşık 1 Milyar ton/CO<sub>2</sub> eşdeğerine ulaştığı ifade edilmektedir [26].

Wanida Wanichpongpan ve Shabbir H. Gheewala tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, Tayland'da depo gazı enerji temini projeleri için yaşam döngüsü analizi yapılmıştır. Çalışma sonucunda birlik modeli çerçevesinde merkezi bir noktada atıkların depolanmasının atıkların ayrı ayrı küçük ölçekli sahalarda depolanmasına göre hem sera gazı emisyonları açısından hem de enerji üretimi açısından daha verimli olduğu görülmüştür. Yapılan hassasiyet analizinde ise depolama sahasında oluşan metan gazından kaynaklanan sera gazı etkisinin gaz toplama sisteminin verimliliğine ve depolama sahasındaki metan oksidasyon oranına duyarlı olduğu belirlenmiştir [29].

## 2. KATI ATIK BERTARAFINDA DÜZENLİ DEPOLAMA

### 2.1 Giriş

Evsel nitelikli katı atıkların depolama sahalarında depolanması, dünyada eskiden beri en yaygın olarak kullanılan katı atık bertaraf yöntemidir. Katı atıkların arazide uygunsuz biçimde depolanması neticesinde sızıntı suyu ve kontrolsüz gaz oluşumu gibi durumlar gerçekleşmekte ve bu durum vahşi depolama olarak tanımlanmaktadır [8].

Evsel nitelikli katı atıkların vahşi depolama yöntemi ile bertarafının sakıncalarından bazıları atıklardan kaynaklanan kötü kokuların çevreye yayılması, çöplerin rüzgâr ile etrafa dağılarak görüntü kirliliğine sebep olması, sinek, fare, böcek gibi haşerelerin bu sahalarda barınma ve üreme imkânı bulması, çöplerden çıkan sızıntı sularının yeraltı sularını ve yüzeysel su kaynaklarını kirletmesi, açığa çıkan metan gazından dolayı yangın, patlama riskleri, hava kirliliği ve sera gazı etkileridir [9].

Düzenli depolama ise kısaca yukarıda belirtilen olumsuzlukların engellenmesi amacıyla evsel nitelikli katı atıkların, zemin sızdırmazlığı sağlanmış büyük alanlarda depolanması, depolanan atıkların sıkıştırma yoluyla hacminin azaltılması, üzerinin günlük örtü tabakası ile örtülmesi, sızıntı suyunun ve depo gazının toplama sistemleri ile toplanarak bertarafı şeklinde tanımlanabilir [9].

Düzenli depolama yönteminde sahanın uygun mühendislik tasarımının yapılmış olması gerekmektedir. Genel olarak, düzenli bir depolama sahasının mühendislik projeleri ve işletme uygulamaları aşağıda belirtilen temel unsurları kapsamaktadır;

- Uygun saha seçimi ve belirlenen sahanın zemin sızdırmazlığının sağlanması;
- Gaz toplama ve sızıntı suyu toplama sistemlerinin montajı, depo gazlarının ve sızıntı suyunun toplanarak bertaraf edilmesi;
- Yağmur sularının sahaya sızmasının engellenmesi için uygun drenaj sistemlerinin tasarımı;
- İşletme kontrolünün kolaylaştırılması ve sızıntı suyu miktarının azaltılması için açıkta kalan atık depolama alanı yüzeyinin en aza indirilmesi;
- Depolama sahasının işletilmesi aşamasında sahanın kademe kademe doldurulması;
- Stabilizasyonun en üst seviyede tutulması için depolama sahası içindeki eğimlerin kontrol altında tutulması;

- Yağmur suyunun depolanan atıklara sızmasının, atıkların rüzgârla savrulmasının, zararlı kemirgenlerin ve kuşların olumsuz etkilerinin minimum seviyede tutulması için günlük toprak örtüsünün kullanılması;
- Sıkıştırma ile depolanan atığın içinde bulunan boşlukların en aza indirilmesi, bu sayede aerobik ayrışmadan kaynaklanan yangın riskinin azaltılması, kemirgen istilasının minimum seviyede tutulması ve sahada farklı seviyelerde yerleşmelerin önlenmesi [11].

Düzenli depolama sahaları çeşitleri, depolanacak atıkların cinslerine ve tehlike potansiyellerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Genel olarak aşağıdaki depolama sahaları yaygın olarak kullanılmaktadır:

- Toprak, hafriyat ve yıkım artıkları için kullanılan depolama sahaları,
- Evsel atık depolama sahaları, (evsel, evsel nitelikli ticari ve endüstriyel atıklar)
- Tıbbi ve tehlikeli atıklar için kullanılan depolama sahaları [12].

## **2.2 Düzenli Depolama Sahası Dizaynı ve İşletilmesi**

Düzenli depolama sahası tasarım paketi, her projede olduğu gibi planlardan, detaylı mühendislik projelerinden, tasarım raporlarından ve maliyet hesaplamalarından oluşur. Şekil 2.1’de standart bir düzenli depolama sahasının kesiti görülmektedir. Dizayn aşamalarından bahsetmeden önce düzenli depolama sürecinde kullanılan bazı terimlerin tanımlamalarını yapmak faydalı olacaktır. Buna göre;

**Hücre:** Bir işletme periyodunda (genellikle 1 gün) sahaya yerleştirilen malzemenin hacmini tanımlar. Hücre, depolanan katı atık ve üzerine dökülen günlük örtüden oluşur.

**Kademe:** Düzenli depolama sahasının aktif alanındaki hücrelerin üzerini örten tam bir katmandır. Tipik olarak depolama sahaları bir seri kademedden oluşur.

**Günlük örtü:** Genellikle doğal topraktan veya kompost gibi alternatif materyallerden oluşur ve her işletme periyodu sonunda alanın yüzeyine dökülür. Günlük örtünün amacı atıkların savrulmasını kontrol etmek, fareler, sinekler ve diğer hastalık yapıcı unsurların alana giriş ve çıkışını önlemek ve işletme esnasında alana suyun girişini kontrol etmektir [13].



**Şekil 2.1: Düzenli Depolama Sahası Kesiti [17]**

**Basamak:** Genellikle yüksekliği 15-25 metreyi aşacak sahalarda kullanılır. Yüzeysel drenaj kanallarının ve depo gazı geri kazanım borularının yerleştirilmesi için sahanın eğim stabilitesinin sürdürülmesi gerekir ve bu da basamaklarla sağlanır.

**Son örtü:** Tüm depolama işlemi tamamlandıktan sonra bütün sahanın yüzeyine uygulanan örtü tabakasıdır. Son örtü yüzey drenajını yükseltecek, sızan suları önleyecek ve yüzey bitkilerini destekleyecek şekilde genellikle toprak ve/veya geomembran materyallerden oluşan birkaç tabakadan meydana gelir.

**Depo gazı:** Sahada oluşan gazların karışımıdır. Büyük kısmı evsel nitelikli katı atıkların organik kısımlarının anaerobik bozunması sonucu oluşan metan ve karbondioksitten meydana gelir.

**Sızıntı suyu:** Depolama sahasında depolanan atığın bileşimindeki suyun ve yağmur sularının depo zeminine doğru hareketi neticesinde oluşan sıvı olarak adlandırılır. Derin sahalarda sızıntı suyu sıklıkla orta noktalarda toplanır. Sızıntı suyu yağıştan sızan suların ve saha içindeki sulama suyunun bir sonucudur. Sızıntı suyu, depolanmış atıkların çözünmesi sonucunda depolama sahasında meydana gelen kimyasal ve biyokimyasal reaksiyonlardan kaynaklanan çeşitli kimyasal bileşenler içerir.

**Kaplama:** Dipte ve alt seviyede kalan yan bölgelerde saha sızdırmazlığını sağlamak amacıyla kullanılan doğal ve sentetik malzemelerdir. Kaplamalar genellikle sızıntı suyu ve depo gazının göçünü önleyecek şekilde tasarlanmış kil ve/veya geomembran malzemenin oluşan tabakalardan meydana gelir.

**Depolama sahasının kapatılması:** Sahanın depolama ömrü tamamlandığında sahanın güvenli şekilde kapatılması için yapılması gereken adımları tanımlar. Kapatma sonrası ise sahanın uzun dönem (30-50 yıl) izleme ve bakım aktiviteleri gerçekleştirilir [13].

## **2.3 Yasal Çerçeve**

### **2.3.1 Ulusal Atık Mevzuatında Düzenli Depolama**

Ülkemizde katı atıkların toplanması, taşınması, geri kazanımı ve bertarafına ilişkin yükümlülükler Çevre Kanunu, Belediyeler Kanunu ve Büyükşehir Belediyesi Kanunu gereğince Belediyeler ve Büyükşehir Belediyelerine verilmiştir. Katı atıkların kontrolü usullerini düzenleyen yönetmelikler ise 02.04.2015 tarihli ve 29314 sayılı "Atık Yönetimi Yönetmeliği" ile 26.03.2010 tarihli ve 27533 sayılı "Atıkların Düzenli Depolanmasına İlişkin Yönetmelik"dir. Bu bölümde, bu iki yönetmelikten kısaca bahsedilmiştir.

#### **2.3.1.1 Atık Yönetimi Yönetmeliği (2.4.2015/29314)**

Bu yönetmeliğin amacı, yönetmelikte tanımlandığı şekilde aşağıdaki üç ana başlıkta özetlenmektedir.

- Atıkların oluşumundan bertarafına kadar çevre ve insan sağlığına zarar vermeden yönetiminin sağlanmasına,
- Atık oluşumunun azaltılması, atıkların yeniden kullanımı, geri dönüşümü, geri kazanımı gibi yollar ile doğal kaynak kullanımının azaltılması ve atık yönetiminin sağlanmasına,
- Çevre ve insan sağlığı açısından belirli ölçütlere, temel şart ve özelliklere sahip, bu Yönetmeliğin kapsamındaki ürünlerin üretimi ile piyasa gözetimi ve denetimine ilişkin genel usul ve esasların belirlenmesidir.

Belediye atıklarının yönetimine ilişkin olarak bu yönetmeliğin 5. Maddesinde aşağıda belirtilen hükümler yer almaktadır.

- Atıkların düzenli depolama yöntemi ile bertaraf edilmesinde, 26/3/2010 tarihli ve 27533 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik hükümleri uygulanır.

- Belediye atıklarının yönetimi, iklim, nüfus, atık miktarı, coğrafi koşullar, optimum taşıma mesafesi göz önünde bulundurularak en geniş bölgenin faydalanabileceği şekilde bölgesel düzeyde sağlanır.
- Belediye atıklarının hacminin azaltılması, kısmen enerji veya maddesel geri kazanımının sağlanması ve nihai bertarafı amacıyla çevre ile uyumlu fiziksel, kimyasal, biyolojik veya termal teknolojilerin kullanılması esastır [1].

### **2.3.1.2 Atıkların Düzenli Depolanmasına İlişkin Yönetmelik (26.03.2010/27533)**

Bu Yönetmelik, düzenli depolama tesislerine ilişkin teknik esaslar ile atıkların düzenli depolama tesislerine kabulü ve atıkların düzenli depolanmasına ilişkin usul ve esaslar ile alınacak önlemleri, yapılacak denetimleri ve tabi olunacak sorumlulukları kapsamaktadır. Yönetmeliğin amacı; atıkların düzenli depolama yöntemi ile bertarafı sürecinde;

- Oluşabilecek sızıntı sularının ve depo gazlarının toprak, hava, yeraltı suları ve yüzeysel suların üzerindeki olumsuz etkilerinin asgari düzeye indirilerek çevre kirliliğinin önlenmesine,
- Atıkların türüne göre uygun depo tabanı teknik tasarımlarının yapılması ve düzenli depolama tesislerinin inşa edilmesine,
- Düzenli depolama tesislerine atık kabulü işlemlerine,
- Düzenli depolama tesislerinin işletilmesi, kapatılması ile kapatma sonrası kontrol ve bakım süreçlerine,
- İşletme, kapatma ve kapatma sonrası bakım süreçlerinde sera etkisi de dâhil olmak üzere çevre ve insan sağlığı açısından risk teşkil edebilecek olumsuzlukların önlenmesine,
- Mevcut düzenli depolama tesislerinin ıslahı, kapatılması ve kapatma sonrası bakım süreçlerine

ilişkin teknik ve idari hususlar ile uyulması gereken genel kuralları belirlemektir [2].

Yönetmeliğin beşinci maddesinde düzenli depolama tesisleri aşağıdaki şekilde sınıflandırılmaktadır.

- I. sınıf düzenli depolama tesisi: Tehlikeli atıkların depolanması için gereken altyapıya sahip tesis.
- II. sınıf düzenli depolama tesisi: Belediye atıkları ile tehlikesiz atıkların

depolanması için gereken altyapıya sahip tesis.

- III. sınıf düzenli depolama tesisi: İnert atıkların depolanması için gereken altyapıya sahip tesis.

Çalışmanın konusu olan depo gazının uzaklaştırılması ile ilgili düzenleme bu yönetmeliğin 8. maddesinde yer almaktadır. Buna göre, yönetmeliğin 8. Maddesinde;

- Depolama tesisinde oluşan gazların birikmesini ve toplanmasını kontrol altına almak amacıyla 17. maddede belirtilen önlemler alınır. Depolama tesisindeki gazların toplanması, işlenmesi ve kullanılması işlemleri çevre ve insan sağlığına zarar vermeyecek şekilde yapılır.
- Biyobozunur atıkları kabul eden tüm düzenli depolama tesislerinde gazlar toplanıp doğrudan veya işlenerek enerji üretiminde kullanılır. Elde edilen depo gazının, enerji üretiminde kullanılmasının ekonomik olmaması halinde depo gazı meşalelerde yakılır.

hükümleri yer almaktadır. Burada anılan yönetmeliğin 17. Maddesi, katı atık depo tesisi üst örtüsünün teşkiline ilişkin düzenlemeleri içermektedir. Bu maddede;

- Atık depolama işlemi tamamen bittikten sonra depolama alanında üst örtü teşkil edilmeden önce, alan normal kazı toprağı örtüsü ile tesviye edilir. Kapatma işlemine başlamadan önce; atıkların veya yapının kayma ve çökme riskine karşı depolanan atık kütesinin yeterince oturduğu tespit edilir.
- Düzenli depolama tesisi sınıflarına göre, tesisin kurulduğu bölgenin yağış özelliklerinden dolayı kapatma sonrası süreçte sızıntı suyunun oluşumunun engellenmesi ve depoda oluşacak gazların toplanması için depo üst örtüsü asgari aşağıda verilen şartları sağlayacak şekilde teşkil edilir:
  - Yalnızca gaz oluşumu beklenen II. sınıf düzenli depolama tesislerinde; depo gazlarının oluşturacağı potansiyel risklerin engellenmesi amacıyla gaz drenaj katmanı inşa edilir.
  - Yapay geçirimsizlik kaplamasının I. sınıf düzenli depolama tesislerinde uygulanması mecburidir.
  - Mineral geçirimsizlik tabakası en az 25 cm kalınlığında iki tabaka halinde uygulanır. Drenaj tabakasının en az 50 cm kalınlığında olması ve en az  $K \geq 1.0 \times 10^{-4}$  m/s geçirgenliğe sahip olması gerekir.



- Üst örtü toprağı daha sonradan bitkilerin yetiştirilmesini sağlayabilecek şekilde yetiştirilecek bitki türüne bağılı olarak en az 50 cm kalınlığında olması gerekir.
- III. sınıf düzenli depolama tesisleri için bu hükümler uygulanmamakla birlikte bu sahalarda atık depolama işlemleri tamamen bittikten sonra sahanın üstünün kapatılması ve yeşillendirilmesi zorunludur.

hükümleri yer almaktadır [2].

## **2.3.2 Avrupa Birliğı Atık Mevzuatında Düzenli Depolama**

### **2.3.2.1 Atık Çerçeve Direktifi (2008/98/EC)**

Avrupa Birliğı (AB) Mevzuatında, atık yönetiminin temel unsurlarını belirleyen direktif 2008/98/EC sayılı Atık Çerçeve Direktifidir. Bu Direktif, atıkların tanımı, atık yönetiminin temel unsurları, geri dönüşüm ve geri kazanım gibi konularda temel kuralları belirlemektedir. Direktif, temel olarak atıkların istenmeyen etkilerini önlemek, azaltmak ve kaynak kullanımında etkinlik sağlamak yoluyla çevre ve insan sağığının korunmasına yönelik tedbirleri düzenlemektedir. Direktif, atıkların yönetimine ilişkin mevzuat ve politikaların uygulanmasına dair öncelik sırasıyla aşağıdaki gibi bir atık hiyerarşisi tanımlamaktadır [5]:

1. Atıkların önlenmesi;
2. Atıkların yeniden kullanımına yönelik hazırlıklar;
3. Atıkların geri dönüşümü;
4. Diğer geri kazanım yolları (örneğin, enerjinin geri kazanımı) ve
5. Atıkların bertarafı.

### **2.3.2.2 Düzenli Depolama Direktifi (1999/31/EC)**

AB Mevzuatında katı atıkların depolanması hususunda ise 1999/31/EC sayılı Düzenli Depolama Direktifi uygulanmaktadır. Bu Direktifin amacı, mümkün olduğunca depolamaya giden atık miktarını azaltmak ve düzenli depolama ile ilgili sıkı standartlar oluşturmaktır. Değişik kategorilerdeki atıkları (evsel atık, tehlikeli atık, tehlikesiz atık ve inert atık) tanımlar ve saha içine veya üzerine çöp depolama için tanımlanmış olan tüm atık depolama sahalarna uygulanır. Düzenli depolama sahaları, tehlikeli atıklar için, tehlikeli olmayan atıklar için ve inert atıklar için olmak üzere üç sınıfa ayrılır. Tehlikeli atıklar ile evsel atıkların birlikte depolanması yasaktır. Depolama maliyeti işletmenin yanı sıra kapatma maliyetlerini de içermelidir. Toplam metan emisyonunu azaltmak için depolama

sahasına giden biyobozunur atık miktarının azaltılması öngörülmektedir. Hem yeni hem de mevcut sahalardan oluşan metan toplanarak kullanılmalı veya yakılarak bertaraf edilmelidir [3].

Bu Direktif yeni ve mevcut sahaların çok sıkı kontrolünü gerektiren detaylı bir izin prosedürü içerir. Çöp depolama sahalarının yer seçimi, tasarımı, işletilmesi, izlenmesi ve kapatıldıktan sonraki bakımı ve gözlenmesi ile ilgili somut gereklilikleri ortaya koyar. Atıklar ve depolama sahaları konularında son derece sıkı işletme ve teknik yaptırımlar getirmektedir. Aynı zamanda depolama faaliyetlerinin çevreye olan etkilerini tamamen engellemek veya en aza indirmek amacıyla alınması gereken önlemleri ve prosedürleri de tanımlamaktadır [3].

Direktif, atık kabul prosedürleri, sahanın konumu, tasarım ve inşaat, işletme prosedürleri, kontrol ve izleme prosedürleri, kapatma ve sonrası bakımı gibi uygulamaya yönelik hususları da belirler. Depolama sahasının tüm hayatı boyunca yüzey ve yer altı sularında sebep olabileceği kirlilik, toprak ve havaya yapacağı kirlilik, sera etkisi dâhil küresel çevreye olan etkileri ve insan sağlığına olası etkileri kontrol edilmelidir [3].

Söz konusu Direktif yürürlüğe girmeden önce kapatılan depolama alanları depolama sahası kapatma kriterlerine uymak zorunda değildir. Ancak üye ülkeler, halen işletmekte oldukları veya yapmayı planladıkları yeni depolama sahaları (düzensiz depolama sahaları dâhil) konusunda aşağıdaki listede sunulan yaptırımların tamamını verilen süre içinde ve mümkün olan en çabuk şekilde yerine getirmekle yükümlüdürler:

- Bir depolama sahası işletmecisi, saha ile ilgili ve AB Düzenli Depolama Direktifinde belirtilen hususlara uyumlu düzenleme önlemlerinin alındığı bir durum planı hazırlamak ve bunu yetkili otoritelere, üye ülkenin yasa ve yönetmeliklerini hayata geçirdiği bir yıl içinde sunmak zorundadır.
- Yetkili otorite, kendilerine sunulan plan ve mevcut AB yönetmeliği bazında yapacağı inceleme sonucunda depolama sahasının işletilmesinin devamı konusunda kesin bir karar verir.
- Yetkili otorite kabul edilen plan bazında gerekli işlemlerin yapılmasını ve planın tamamlanması için gerekli geçiş süresini onaylar. AB üyesi ülkelerdeki depolama sahaları, AB Düzenli Depolama Direktifi ile ilgili kendi yasa ve yönetmeliklerini hayata geçirdikten sekiz yıl sonra bu direktifte belirtilen hususlara uymak zorundadır [3].

#### **2.4 Eysel Katı Atık Yönetiminde Ülkemizdeki Mevcut Durum**

Ülkemizde halen atıkların önemli bir kısmı mevzuata uygun şekilde bertaraf edilmemektedir. Bu duruma yol açan pek çok idari, mali ve teknik sebep vardır. Öncelikle atık depolama alanları için yer seçimi önemli sorunlardan biri olarak göze çarpmaktadır. Aynı bölgede çok sayıda yerel yönetim biriminin bulunması diğer altyapı hizmetlerinde olduğu gibi katı atık hizmetlerinde de işbirliğini zorunlu kılmaktadır. Yeni yasal düzenlemelerle teşvik edilen mahalli idare birlik modeli uygulamaları, yerel düzeydeki çevresel hizmetlerin gerçekleştirilmesini kolaylaştırıcı bir yapı olarak dikkat çekmektedir. Benzer çevre sorunlarıyla karşı karşıya bulunan belediyelerin ortaklaşa kurdukları birliklerin uygulamaları, zamanı ve finansman kaynaklarını verimli kullanmak açısından önemli olmaktadır. Bu çerçevede, mahalli idare birlikleri tarafından yürütülen katı atık projelerinin arttığı görülmektedir. Ayrıca, bölgesel kalkınma politikaları kapsamında, bölgesel ölçekli çevre sorunlarının çözülmesinde de hizmet birlikleri modellerinin kullanılması öngörülmektedir. Nitekim AB destekli bölgesel kalkınma projelerinde hizmet birliklerinin kurulması tavsiye edilen bir konudur [4].

Bu itibarla mülga Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından yayımlanan 2008-2012 Atık Yönetimi Eylem Planı'nda tüm iller için Belediye Birlik Yapıları önerilmiştir.

Türkiye'de yaygın olarak kullanılan atık toplama metodu, kaldırım kenarına bırakılan plastik torbalar ve çok katlı binalarda yaşayan nüfusa hizmet veren büyük atık konteynırlarından oluşmaktadır. Türkiye'de atık toplama sıklığının şehirlerde her gün iken küçük yerleşimlerde haftada 1-3 sefere kadar değiştiği belirtilmiştir. Türkiye genelinde toplama araçlarının hacmi genellikle 7 m<sup>3</sup> ile 13 m<sup>3</sup> arasında değişmektedir. Nüfusu 2.000 kişinin altındaki yerleşimlerde yaşayan kırsal nüfus haricinde, belediyenin hizmet alanında yer alan nüfusun yaklaşık olarak tümü düzenli atık toplama hizmetlerinden yararlanabilmektedir [4].

Türkiye'de atıklar evsel nitelikli atıkların bertarafı amacıyla hızla düzenli depolama alanları inşa edilmekte ve işletmeye alınmaktadır. Hâlihazırda Türkiye genelinde kurulan 80 adet katı atık düzenli depolama tesisi ile belediye sınırlarında yer alan nüfusun yaklaşık % 71'ine toplam nüfusun ise % 65'ine hizmet sağlanmaktadır.

Tıbbi atıkların yönetimi ile ilgili ilk yönetmelik 1993 yılında yürürlüğe girmekle birlikte yönetmeliğin uygulanmasında özellikle belediyelerden kaynaklanan bazı eksiklikler söz konusudur. Tıbbi atıkların kaynağında, diğer atıklardan ayrı toplanması, taşınması ve geçici depolanmaları konularında sağlık kuruluşlarında tıbbi atıkların uygun şekilde

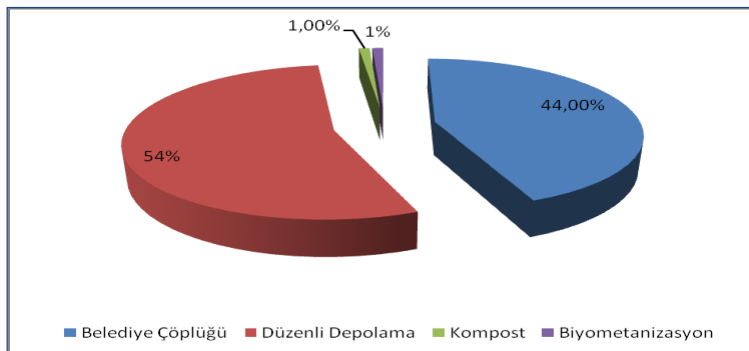
bertarafından sorumlu olan belediyelerde önemli gelişmeler yaşanmaktadır. Ancak birçok ilçe belediyesinde bugüne kadar yeterli sayıda ve teknik kapasitede bertaraf tesisi kurulamamıştır [4].

Eski adıyla Çevre ve Orman Bakanlığı, Yüksek Maliyetli Çevre Yatırımlarının Planlaması için Teknik Yardım Projesi (EHCIP Projesi, 2005) kapsamında yapılan Türkiye'nin evsel nitelikli katı atık üretimi tahminleri Çizelge 2.1'de topluca özetlenmiştir. Söz konusu atık üretimleri, milli gelir ve nüfusun sırasıyla % 5,1 ve % 1,5~2,5 oranlarında artacağı, kişi başına atık üretiminin de takriben % 2~% 3 oranında geometrik olarak artacağı kabulü ile hesaplanmıştır [6].

**Çizelge 2.1: Türkiye İçin Evsel Nitelikli Katı Atık Üretimi Tahmini [6]**

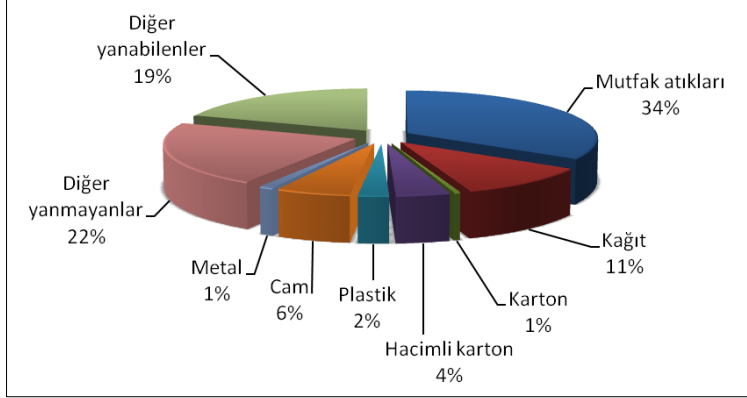
Atık Kaynağı	2003 (ton)	2010 (ton)	2020 (ton)	2023 (ton)
Kentsel Yerleşim	12.152.366	15.087.209	18.854.323	19.913.958
Kırsal Yerleşim	6.099.800	6.521.337	6.775.735	6.782.885
Endüstri	3.557.994	5.031.798	8.080.831	9.311.489
Ticari&Kurumsal	5.419.099	7.946.504	13.805.801	16.283.167
<b>Toplam</b>	<b>27.229.259</b>	<b>34.586.848</b>	<b>47.516.690</b>	<b>52.291.499</b>

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre Türkiye'de 2010 yılında ülke nüfusunun % 83'ü, belediye nüfusunun ise % 99'u atık toplama hizmetinden yararlanmaktadır. Belediyelerden toplanan atığın % 55'i düzenli depolama ve kompostlaştırma gibi atık yönetimi mevzuatına uygun yöntemlerle bertaraf edilmektedir [6].



**Şekil 2.2: TÜİK 2010 Yılı Verilerine Göre Atık Bertaraf Yöntemleri [21]**

Ülkemiz için Katı Atık Ana Planı Projesi (2006) kapsamında yapılan katı atık kompozisyon belirleme çalışmasının sonucu Şekil 2.3’de yer almaktadır.



**Şekil 2.3: Türkiye’de Katı Atık Kompozisyonu (2006) [4]**

Atık sektörü, başlıca sera gazları olan metan (CH<sub>4</sub>), nitroz oksit (N<sub>2</sub>O) ve karbondioksit (CO<sub>2</sub>) gazlarının emisyonuna yol açan ana sektörlerden biri olarak iklim değişikliği ve küresel ısınmada önemli rol oynamaktadır. Küresel ölçekte, 2004 yılı itibarı ile insan kaynaklı sera gazı emisyonlarının % 3’ünün atık sektöründen kaynaklandığı tahmin edilmektedir (IPCC, 2007). Türkiye’nin 1990-2012 yılları arası toplam sera gazı emisyonu ve sektörlere göre dağılımı Çizelge 2.2’de verilmiştir.

**Çizelge 2.2: Türkiye’nin sektörlere göre toplam sera gazı emisyonları (milyon ton CO<sub>2</sub> eşdeğeri), 1990-2012 [7]**

Milyon Ton	1990	1995	2000	2005	2010	2011	2012
Enerji	132,9	161,5	213,2	242,4	285,1	301,3	308,6
Endüstriyel İşlemler	15,5	24,3	24,4	28,8	55,7	58,6	62,8
Tarımsal Faaliyetler	30,4	29,2	27,8	26,3	27,1	28,8	32,3
Atık	9,7	23,9	32,6	33,3	35,6	35,3	36,2
<b>Toplam</b>	<b>188,5</b>	<b>238,9</b>	<b>298,1</b>	<b>330,7</b>	<b>403,5</b>	<b>424,1</b>	<b>439,9</b>

Not: Arazi kullanımı ve arazi kullanım değişimlerinden kaynaklanan emisyonlar dâhil edilmemiştir.

Burada da görüldüğü üzere, 2012 yılı için atık sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyon miktarı Türkiye’nin toplam sera gazı emisyonlarında yaklaşık % 8,2 gibi bir paya sahip durumdadır. Bu da katı atık depolama alanlarında oluşan metan gazından enerji temininin yanında, sera gazı emisyonlarının kontrolünün de ulusal ölçekte önemini ortaya koymaktadır.

### 3. KATI ATIK DEPO GAZI OLUŞUMU VE ÖZELLİKLERİ

#### 3.1 Giriş

Depo gazı, katı atık depolama sahasında oluşan ve büyük miktarlarda bulunan ana gazlardan ve az miktarda bulunan eser gazların karışımıdır. Depo gazı evsel katı atıkların bileşimindeki organik maddelerin anaerobik bozunması sonucu oluşur.

Depolama sahalarında bulunan başlıca gazlar metan ( $CH_4$ ), karbondioksit ( $CO_2$ ), karbonmonoksit ( $CO$ ), hidrojen ( $H_2$ ), hidrojensülfür ( $H_2S$ ), amonyak ( $NH_3$ ), azot ( $N_2$ ) ve oksijendir ( $O_2$ ). Depo gazı genellikle % 45-60 oranında metan ve % 40-60 oranında karbondioksit içermektedir. Diğer gazlar, depo gazında çok küçük miktarlarda bulunmaktadır. Bu gazların depolama sahasında bulunma oranları ve depo gazı özellikleri Çizelge 3.1’de belirtilmiştir [13].

Depo gazının en önemli özelliği yüksek metan içeriğinden dolayı sahip olduğu enerji değeridir. Ortalama alt kalorifik değer metreküp başına 20.000 Kjoule civarında gerçekleşmektedir. Depo gazının diğer özellikleri potansiyel patlayıcılığı, boğuculuğu, zehirliliği ve kötü kokusudur [15].

Depo gazının patlayıcılığı esas olarak metan içeriğinden kaynaklanmaktadır. Metan renksiz, kokusuz, yanıcı bir gazdır ve birim ağırlığı havadan daha azdır. Hacimce % 5-15 metan derişimleri hava ile patlayıcı karışımlar oluşturmaktadır. Metan derişimi bu kritik seviyeye ulaştığı zaman depo alanında sınırlı miktarda oksijen bulunduğundan dolayı patlama tehlikesi olur. Patlama seviyesindeki metan karışımı, depo dışına göç eden metan gazı ve havanın karışmasıyla oluşur. Bu üst limitin üzerinde metan-hava karışımı alev verildiğinde yanmakta, fakat patlayıcılık göstermemektedir [15].

Depo gazındaki diğer önemli bir gaz da renksiz, kokusuz ve yanıcı olmayan özellikte olan karbondioksittir. Karbondioksit havadan daha ağırdır. Zehirli olmayan özelliğine karşın karbondioksit, solunum sisteminde oksijenin yerini alarak hayat için tehlikeli özellik göstermektedir.

### Çizelge 3.1: Depo Gazında Bulunan Bileşenler ve Depo Gazının Özellikleri [13]

(Not: Gerçek yüzde dağılımı depolama sahası yaşı ile değişmektedir)

Bileşen	Yüzde (Kuru Hacimde)
CH <sub>4</sub> (metan)	45-60
CO <sub>2</sub> (karbondioksit)	40-60
N <sub>2</sub> (azot)	2-5
O <sub>2</sub> (oksijen)	0,1-1,0
Sülfür, Merkaptan v.b.	0-1,0
NH <sub>3</sub> (amonyak)	0,1-1,0
H <sub>2</sub> (hidrojen)	0-0,2
CO (karbonmonoksit)	0-0,2
Eser Bileşenler	0,01-0,6
Özellik	Değer
Sıcaklık (°C)	68-88
Özgül Ağırlık	1,02-1,06
Nem	Doygun
Isıl Değeri (Kjoule /m <sup>3</sup> )	14.900-20.500

Hidrojen, organik maddenin biyolojik ayrışmasının ilk aşamalarında oluşmaktadır. En hafif gazdır ve atmosfere doğru yükselme eğilimindedir. Yüksek miktarda yanıcıdır ve havada hacimce % 4-7 oranında patlayıcılık aralığına sahiptir.

Azot ve oksijen, depo gazında ancak atmosferik havanın girişiyle bulunmaktadır. Azot inert bir madde olup metanın yanıcılığı üzerindeki etkisinden dolayı önem taşımaktadır. Hidrojensülfür, yüksek miktarda zehirli ve yanıcıdır ve keskin bir kokuya sahiptir. Karbonmonoksit renksiz, kokusuz ve yüksek zehirliliğe sahip bir gazdır. Depo gazındaki oranı ise yaklaşık hacimce % 0,001 kadardır.

Depo gazında yaklaşık 30 mg/m<sup>3</sup> amonyak derişimleri bulunmaktadır. Metaller de depo gazında buhar basınçları ve sıcaklıktan dolayı bulunabilmektedirler. Yüksek derişimlerde bulunan tek bileşik yüksek buhar basıncından dolayı cıvadır. 370 µg/m<sup>3</sup> cıvanın rastlandığı depolama sahaları bulunmuştur [15].

Eser depo gazı bileşenlerinin büyük bir çoğunluğu uçucu organik bileşikler sınıfına girer. Eser gazların sızıntı suyunda mevcut olması sızıntı suyu ile temas halinde bulunan gazın derişimine bağlıdır. Eser bileşenler depolama sahasına gelen atıklarla girer veya saha

içinde gerçekleşen reaksiyonlarla üretilir. Depo gazının içinde bulunan eser gazlar sıvı formda gelen atıklarla karışıktır ancak bunlar uçucu olmaya meyillidirler [13].

Yüksek miktarlarda uçucu organik bileşiklerin mevcudiyeti, özellikle uçucu organik bileşikler içeren endüstriyel ve ticari atık kabul etmiş yaşlı depolama sahalarında gözlenmiştir. Tehlikeli atık bertarafının yasaklandığı yeni düzenli depolama sahalarında uçucu organik bileşiklerin derişimleri çok düşüktür [13].

### **3.2 Depo Gazı Oluşumu**

Depolama sahasında gerçekleşen evsel nitelikli katı atıkların bozunması karmaşık bir süreçtir. Bozunma fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçlerin birleşimi şeklinde gerçekleşmektedir. Fiziksel bozunma, sızıntı suyunun atıktan süzülmesi ve böylece atığın fiziksel özelliklerinde değişikliklerin meydana gelmesi şeklinde gerçekleşmektedir. Kimyasal bozunma ise materyallerin sızıntı suyunda çözünmesi sonucunda kimyasal süreçlerin gerçekleşmesi ile meydana gelir. Kimyasal süreçler hidroliz, çözünme/çökme, adsorpsiyon/desorpsiyon ve iyon değişimi reaksiyonlarından oluşur. Biyolojik bozunma ise depolama sahasında bulunan atığın ana bozunma mekanizmasıdır. Biyolojik bozunma pH, redoks potansiyeli gibi değişkenleri etkilediğinden aynı zamanda kimyasal ve fiziksel bozunmayı da kontrol etmektedir. Atığın fiziksel ve kimyasal bozunması depolama sahası stabilitesi için önemli olmasına rağmen, biyolojik bozunma metan üretimi açısından en önemli süreçtir. Biyolojik bozunma doğal olarak var olan bakteriler sayesinde gerçekleşen ve metan üretiminin gerçekleştiği oldukça karmaşık bir süreçtir [17].

Biyolojik bozunma aerobik ve anaerobik bozunma olarak ikiye ayrılır. Literatürde atıkların biyolojik bozunmasının dört veya beş fazda gerçekleştiği belirtilmektedir. Beş fazla dört faz arasındaki fark, beş fazda anaerobik asit oluşum fazının geçiş fazı ve asit fazı olarak ayrılmasıdır. Bu bölümde, biyolojik bozunma aşağıda belirtildiği şekilde beş faz olarak değerlendirilmiştir.

#### **3.2.1 Aerobik Safha**

Katı atık depolama sahalarında atıkların depolanması ile saha içerisindeki su miktarının artması ve ortamda mevcut bulunan O<sub>2</sub>'nin varlığıyla birlikte aktif mikrobiyal bir topluluk ortaya çıkar. Daha sonra biyokimyasal reaksiyonun gerçekleşebilmesi için ilk birkaç gün ile birkaç hafta arasında çevresel şartlarda bazı değişiklikler meydana gelir. Bu safhanın en belirgin özelliği atıkların depolandığı sırada atmosferden gelen oksijenin varlığıdır. Biyolojik olarak ayrışabilir organik maddelerin reaksiyona girebilmesi için oksijen ihtiyacı çok yüksek olduğundan, kısa süre sonra gaz fazındaki oksijen tamamen tükenir. Bu fazda,



tüketilen oksijen ile orantılı miktarda karbondioksit üretilir. Diğer taraftan azot gazı derişiminde çok küçük miktarda azalma görülür. Bu safhada ekzotermik olup çok fazla ısı üretilir ve depo gövdesinin sıcaklığı 60-70°C' ye kadar çıkabilir [15].

### **3.2.2 Anaerobik Metanojenik Olmayan Safha**

Bu safhada depo gövdesindeki oksijenin tükenmeye başlamasıyla birlikte aerobik ortamdaki anaerobik ortama geçişin başladığı görülür. Atıktaki nem oranı yeterli ve ortamda yeterli derecede mikroorganizma mevcut ise oksijenin tükenmesiyle birlikte, anaerobik faaliyetin baskın olduğu anaerobik ayrışma başlar. Katı haldeki organik maddeler bakteriler tarafından karbonun en kararlı iki hali olan CH<sub>4</sub> ve CO<sub>2</sub>'ye dönüştürülür. Karbondioksitin ulaşabileceği maksimum değer hacimce % 70-90 arasında değişir. Bu değerlere çevre şartlarına ve depolama şartlarına bağlı olarak atık depolandıktan 11-40 gün sonra ulaşılabilir. Bu safhada hidrojen gazı derişimi ise hacimce % 20 civarındadır. Burada birinci elektron kabul ediciler nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) ve sülfattır (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). Yani bu safhada oksijen ihtiyacı için nitratın ve sülfatın oksijeni kullanılır [22].

### **3.2.3 Anaerobik Metanojenik Kararsız Safha**

Depolamanın tamamlanmasından sonra ilk kez bu safhada metan oluşur ve oluşan metan miktarı zamanla artar. Karbondioksit ve azot miktarlarında azalma görülürken hidrojen tamamen tükenir. Redoks potansiyelleri düşer. Birinci ve ikinci safhaların tamamlanması 10-50 gün arasında gerçekleşirken üçüncü safha 200-500 gün arasında tamamlanır. Ayrışma süreleri arasındaki bu farklılıklar, ayrışma sürecinin her zaman gerçekleştiğini, fakat ayrışmanın tamamlanması için gerekli olan sürenin yerel şartlara bağlı olarak çok fazla değiştiğini göstermektedir [22].

### **3.2.4 Metanojenik Kararlı Safha**

Bu fazda gaz üretimi ve bileşenleri hemen hemen sabit olup % 40-70 metan ve % 30-60 karbondioksitten oluşur. En yüksek metan derişiminin görülmesi sebebiyle bu safha oldukça önemlidir. Yapılan saha çalışmalarında metanın molar bileşimi % 50'nin altında olduğunda ve aynı zamanda gaz içerisinde hidrojen de mevcut olduğunda metan üretiminin yavaş gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu safha gaz bileşimi sabit olmakla birlikte, gaz oluşum hızı zamanla düşer. Ancak, yine de depo gazı basıncı atmosferik havanın depo içerisine girmesini engelleyecek seviyelerdedir. Bu safha, gaz miktarının yavaş yavaş azalmasıyla ortalama 10-20 yılda tamamlanır. Bu safhanın bu kadar uzun olmasının ana sebebi atık içindeki katı fazdaki organik maddelerin sıvı faza çok uzun süre içinde dönüşmesidir [22].

### 3.2.5 Aerobik Şartlara Geçiş Safhası

Bu safhada ayrışma süreçleri ve depo gazı üretimi önemli oranda azalır. Başlangıçtaki atmosferik şartlar yeniden etkili olmaya başlar. Bugüne kadar hiçbir çalışma atığın ayrışmasının tamamlanmasına kadar devam etmemesine rağmen, eski sahalardan elde edilen verilere dayanarak mevcut organik karbon kullanıldıktan sonra metanojenik faaliyetin azaldığı ve metan ve karbondioksit derişimlerinin hızla düştüğü söylenebilir. Sonuçta kalan artık madde ise biyolojik olarak inert ve stabil haldedir [22].

### 3.3 Depo Gazı Oluşumunun Zamanla Değişimi

Atıkların farklı türleri ve işlem tarzı gibi sebepler gaz oluşumunun başlangıcı ve üretim süresinin belirlenmesinde zorluk yaratmaktadır. Mikroorganizmaların faaliyetleri sonucu, evsel nitelikli katı atıkların organik bileşimi oksijen var olduğu sürece aerobik olarak, daha sonra anaerobik olarak ayrışır ve başlıca karbondioksit ve metandan oluşan bir gaz açığa çıkar. Fermantasyon sonlandığında, kalan atık çok yavaş ayrışabilen atıktır.

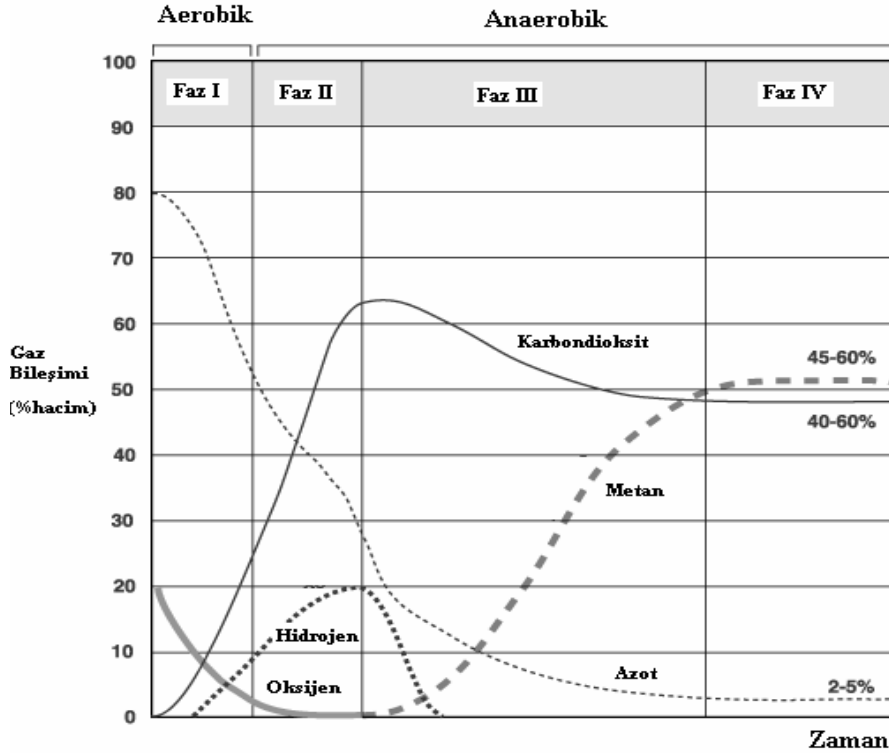
Organik maddeler hızlı ve yavaş ayrışabilenler olarak iki gruba ayrılır. Yiyecek atıkları, kağıt, gazete, bahçe atıkları hızlı ayrışabilen, deri, tahta, tekstil, plastik atıklar yavaş ayrışabilen atıklar olarak kabul edilir. Çizelge 3.2.'de organik maddelerin ayrışma dereceleri görülmektedir. Artık organik madde stabilize olmuştur. Optimum şartlar altında stabilizasyon süreci 10-20 yıl sürer [17].

**Çizelge 3.2: Organik Maddelerin Ayrışabilirlik Dereceleri [15]**

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

Depolama sahası yaşlandıkça zaman içerisinde gaz oluşum hızı kademeli olarak düşer. Kümülatif gaz üretimi ise pik noktaya ulaştıktan sonra stabil hale gelir.

Atığın depolanmasından itibaren 3 ile 12 ay içerisinde metan üretiminin gerçekleşmesi beklenebilmektedir. Metan derişimi zamanla yavaş yavaş artacak ve belli bir süre sonra maksimum değere ulaşacaktır. Fazlara göre depo gazı oluşum eğrileri Şekil 3.1' de gösterilmiştir.



**Şekil 3.1: Depo Gazlarının Oluşumu ve Zamana Göre Değişimleri [18]**

### 3.4 Depo Gazı Oluşumunu Etkileyen Faktörler

Evsel nitelikli, katı atık depolama sahasında oluşan depo gazı miktarı atığın organik madde içeriğine bağlıdır. Diğer taraftan, atık stabilizasyonu ve metan oluşumu; hidrojen, oksijen, pH, alkalinite, besi maddeleri (nütrientler), inhibitörler, sıcaklık ve su muhtevası gibi abiyotik faktörler ile atık bertarafında kullanılan farklı tekniklerden oldukça fazla etkilenmektedir. Depo gazı oluşumunu etkileyen faktörlerden bazıları aşağıda açıklanmıştır.

#### 3.4.1 Hidrojen

Hidrojen fermantatif ve asetojenik bakteriler tarafından üretilir ve üretilen hidrojenin basıncı biyokimyasal reaksiyonları etkiler. Fermantasyon bakterileri, hidrojen basıncı düşük olduğunda hidrojen, karbondioksit ve asetik asit üretirken, yüksek hidrojen basınçlarında ise hidrojen ve karbondioksit üretirler. Etanol, butirik asit ve propiyonik asit gibi organik bileşikler hidrojen basıncı çok yüksek değilse asetojenik bakteriler tarafından oluşturulabilir. Propiyonik asidin oluşabilmesi için hidrojen basıncının  $9 \times 10^{-5}$  atm.'in altında olması gerekmektedir. Yani hidrojen basıncı yüksek ise propiyonik ve butirik asit oluşacak fakat bu bileşikler daha fazla ayrılmayacaktır. Hidrojen, metanojenik ve sülfat indirgeyen bakteriler tarafından tüketilir.  $10^{-5}$  atm.'den düşük basınçlar, hidrojen ve karbondioksitten metan oluşumu için uygundur [19].

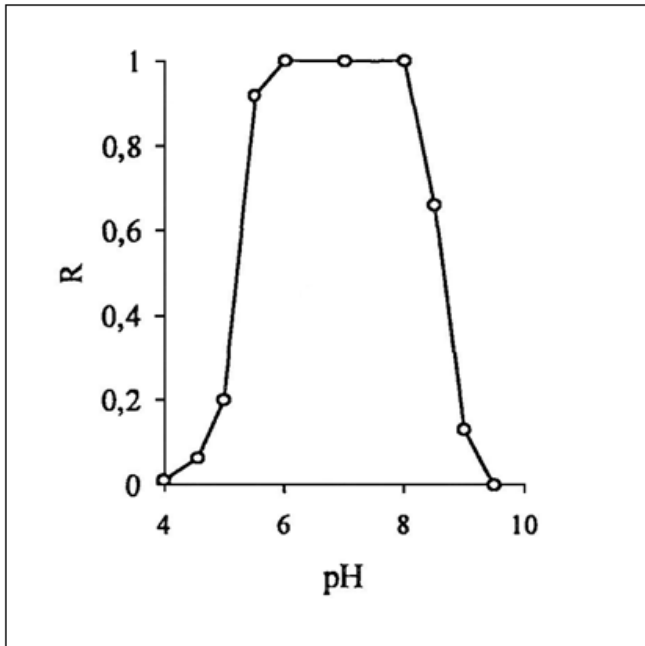
### 3.4.2 Oksijen

Anaerobik bakterilerin ayrışma süreçlerini gerçekleştirmesi için ortamda serbest oksijenin bulunmaması gerekmektedir. Metanojenik bakteriler, oksijene karşı en duyarlı bakterilerdir. Oksijen, depo sahasındaki atık içerisine her zaman nüfuz edebilir. Ancak depo sahası yüzeyindeki aerobik bakteriler oksijeni tüketirler. Eğer depolama sahasında katı atıklar yeterli oranda sıkıştırılmamış ve üzeri günlük olarak 15 cm kalınlıkta toprakla örtülmemişse oksijen daha derinlere kadar nüfuz edebilir. Depolama alanında yeterli sıkıştırma ve günlük örtü işleri yapılmadığı zaman yağmur veya karla gelen oksijenli su, çöp içine sızarak aerobik biyolojik faaliyeti geliştirebilir ve sızıntı suyu miktarını artırabilir. Metanojenik bakterilerin spor oluşturan formu belirlenmemiş olmasına rağmen, metanojenik topluluklar ortama oksijen girişiyle tamamen yok olmazlar [19].

### 3.4.3 pH ve Alkalinite

Metan bakterileri pH 6-8 aralığında faaliyet gösterirler. Optimum metan oluşumu pH 7,0-7,2 aralığında görülmektedir. pH değerinin 6'nın altına düşmesi, metan bakterileri üzerinde toksik etki gösterebilir. Yapılan çalışmalarda pH değerlerinin nötr olması durumunda atık ayrışma süreçlerinin daha hızlı gerçekleştiği gözlenmiştir [19].

Şekil 3.2' de farklı metanojen kültürlerinin karışımı için pH'a bağlı olarak metan üretim oranları (R) verilmiştir.



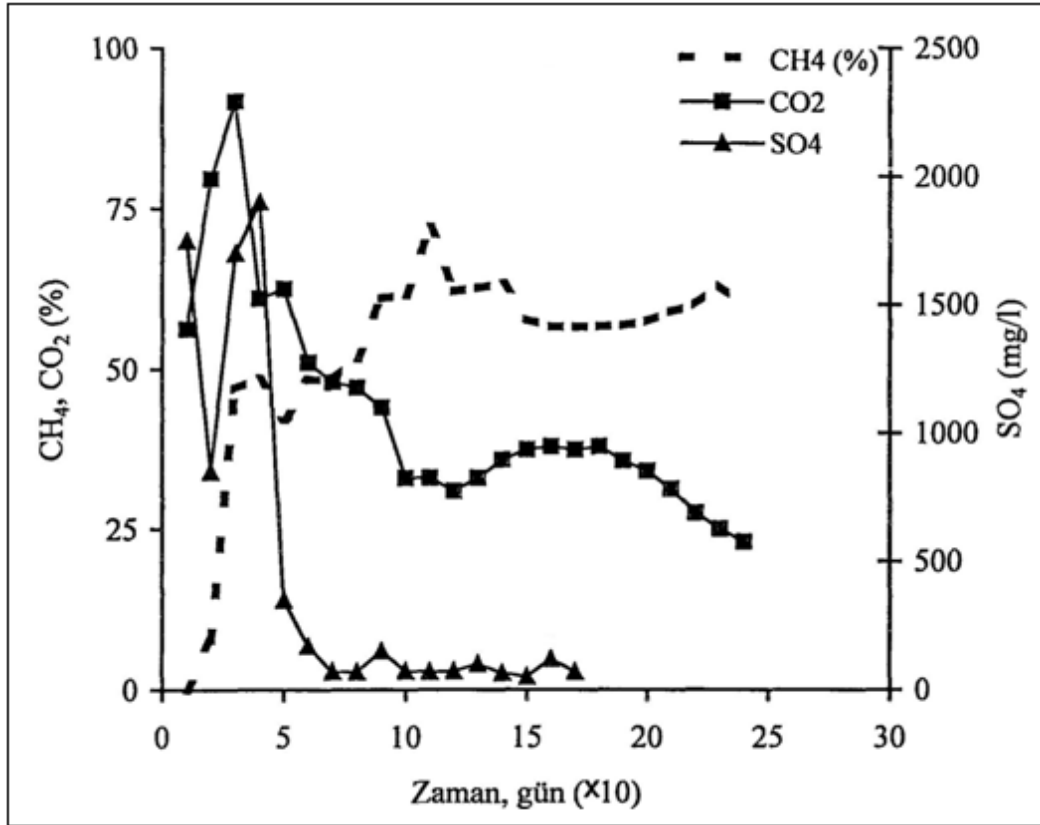
Şekil 3.2: Anaerobik Bir Filtrede pH'ın Metan Oluşum Hızı (R) Üzerine Etkisi [19]

Alkalinite, sistemin anaerobik ayrışma için gerekli olan pH değerinin istenen seviyenin

altına düşmesine yol açan uçucu ve diğer asitleri tamponlama kapasitesini gösterir. Düşük alkalinite değerlerinde ortamdaki asitler pH değerinin düşmesine sebep olarak biyolojik aktiviteyi durdurabilirken, yüksek alkalinite değerleri sistemi düzensiz pH değişimlerine karşı korur. Alkalinitenin düşük olması uçucu yağ asitlerinin birikmesine yol açar. Evsel atıksu çamurunun anaerobik ayrışması için gerekli toplam alkalinite değeri 2000 mg/l  $\text{CaCO}_3$  civarında olduğu belirlenmiştir [22].

#### 3.4.4 Sülfat

Hem sülfat bakterileri hem de metan bakterileri asetik asit ve hidrojenin ayrışmasını sağlarlar. Yapılan deneysel ve pilot ölçekli çalışmalar, ortamda sülfat mevcut iken metan üretiminin önemli ölçüde azaldığını göstermiştir. Sülfat içeren atıkların düzenli depolama alanlarında depolanmasına dikkat edilmelidir. Sülfat içeren önemli atıklardan biri de deri sanayi arıtma çamurlarıdır. Şekil 3.3'de depo gazı bileşimi ile sızıntı suyundaki sülfat derişimlerinin zamana göre değişimi verilmiştir [17].



Şekil 3.3: Depo Sahalarında Sülfat İle Gaz Bileşimi Arasındaki İlişki [17]

Şekilde de görüldüğü gibi, metan oluşumundaki artış ile sülfat derişimindeki azalma aynı anda meydana gelmektedir. Yani atık içindeki sülfat biyokimyasal ayrışmaya uğramadan (sülfat hidrojen sülfüre dönüşmeden) organik maddeleri metana dönüşümü

engellenmektedir. Metan oluşumunun sülfat ile ilişkisi, sülfatın metanojenik bakteriler üzerindeki herhangi bir toksik etkisiyle bağdaştırılmamış, sadece substrat rekabetiyle ilişkilendirilmiştir. Metan bakterilerinin az olduğu kültürlerde  $SO_4^{2-}$ , metan oluşumunu etkilemez, ancak ortamda *Desulfovibrio* gibi sülfat indirgeyen gruplar varsa, sülfatın indirgenmesi çok fazla enerji gerektiren bir reaksiyon olduğundan bir sınırlandırma söz konusudur [22].

### **3.4.5 Besi Maddeleri (Nütrientler)**

Anaerobik mikroorganizmalar için gerekli olan mikro nütrientlerin tamamı (sülfür, kalsiyum, magnezyum, potasyum, demir, çinko, bakır, molibden ve selenyum gibi) hemen hemen tüm depo sahalarında mevcuttur. Anaerobik ortamlarda substratın sadece küçük bir kısmı yeni hücreler tarafından özümser, bu nedenle aerobik sistemlerden çok daha az miktarlarda azot ve fosfor gereklidir. Gaz oluşumu için, organik maddeler, azot ve fosfor arasındaki optimum oranlar 100:0,44:0,08 olarak belirlenmiştir [19].

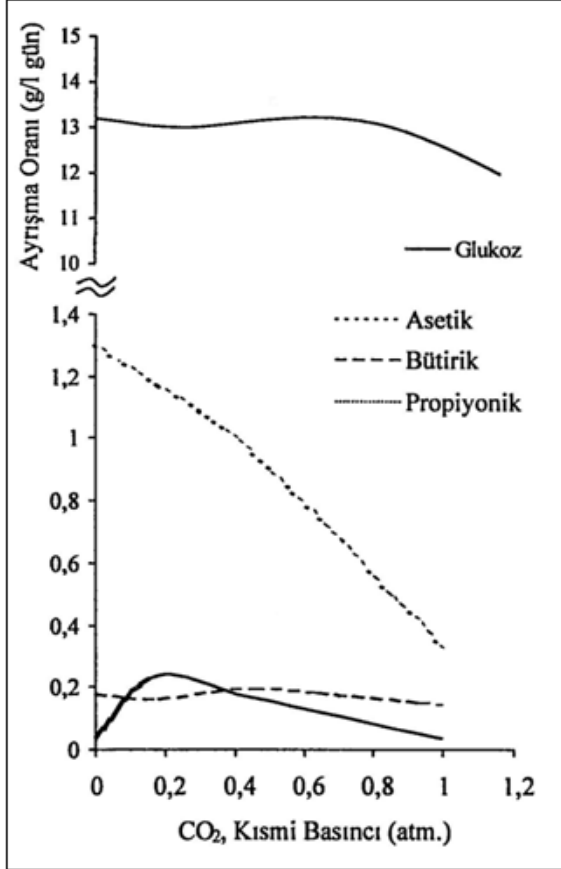
Genel olarak, evsel ve endüstriyel atıkların birlikte depolandığı bir depo sahasında azot ve fosfor sınırlayıcı değildir, fakat evsel veya endüstriyel atıkların ayrı ayrı depolandığı sahalarda nütrient miktarının sınırlandırılmasına yol açabilir. Fosfor, anaerobik ayrışma sürecini sınırlandıran en önemli nütrienttir. Düzenli depolama sahalarında, suyu alınmış (% 65 katı madde içeren) evsel arıtma çamurlarının günlük örtü olarak kullanılması bu problemi çözer [19].

### **3.4.6 İnhibitörler**

Oksijen, hidrojen ve sülfatın metan oluşumu üzerinde bir inhibisyon etkisi olduğu bilinmektedir. Uçucu yağ asitlerinin metan oluşumu üzerine etkisi pek çok araştırmaya konu olmuştur. Asetik asit, propiyonik asit ve bütirik asitin toplam derişimlerinin 6000 mg/L'nin üzerinde olmaması gerekmektedir. Ayrışma süreçlerinin çoğunda karbondioksit üretilir. Karbondioksitin metan oluşumu üzerindeki inhibisyon etkisi çamur yataklı kesikli reaktörlerde belirlenmiştir.

Şekil 3.4'de karbondioksitin kısmi basıncının asetik asit, propiyonik asit ve bütirik asitin ayrışma oranları üzerine etkisi verilmiştir. Asetik asitin ayrışma oranı karbondioksitin kısmi basıncından önemli ölçüde etkilenir. Depo sahalarındaki karbondioksitin kısmi basıncı başlangıç fazlarında 0,9 atm çıkabilir ve daha sonra 0,5 atm. seviyesine düşer. Amonyumun inhibisyon etkisi serbest amonyumdan kaynaklanmaktadır ve pH'ın artmasıyla artmaktadır.

Ağır metal içeren tehlikeli katı veya sıvı atıkların düzenli depolama alanlarında depolanmasından kaçınılmalıdır. Ağır metaller bakterileri olumsuz olarak etkileyerek biyokimyasal reaksiyonları durdururlar. Bu da depolama tesisinde bulunan organik maddelerin bozunmasını engellerler. Katı atık içinde mineral yağ ve tıbbi atık içeren atıklarında depolanması yapılmamalıdır. Bu tür maddelerde depolama içindeki biyokimyasal reaksiyonları olumsuz etkiler. Evsel atık depolama sahalarında tehlikeli atık içeren atıklar kesinlikle depolanmalıdır [22].



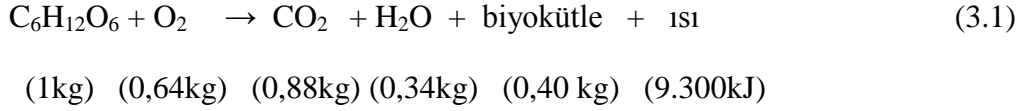
Şekil 3.4: CO<sub>2</sub> Kısmi Basıncına Bağlı Olarak Bazı Substratların Ayrışma Oranları [19]

### 3.4.7 Sıcaklık

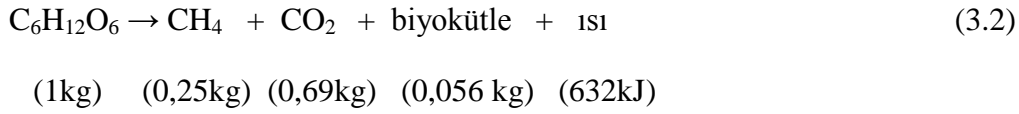
Diğer bütün mikrobiyolojik süreçlerde olduğu gibi anaerobik ayrışmayı sağlayan bakteriler sıcaklıktan çok fazla etkilenmektedir. Metan bakterileri 40°C civarında yaşayan bir mezofilik grup ve maksimum 70°C civarında yaşayan termofilik bir gruptan oluşurlar. Atıkların aerobik ve anaerobik ayrışmaları ısı veren reaksiyonlardır, ancak anaerobik ısı oluşumu genellikle ihmal edilebilir seviyededir.

Buna örnek olarak glikozun aerobik ve anaerobik ayrışması verilebilir. Reaksiyonlar neticesinde anaerobik ayrışma ile aerobik ayrışmadan oluşan ısının sadece % 7'sinin açığa çıktığı görülmektedir [19].

Aerobik Ayrışma:



Anaerobik Ayrışma:



Depo gövdesinin sıcaklığı yoğunluk, yüzey alanı, nem muhtevası vb. gibi faktörlerden etkilenir. Biyolojik ayrışmanın ilk safhasında 70°C gibi yüksek sıcaklıklara ulaşılabilir. Anaerobik ayrışma safhası başladığında ise sıcaklık düşer ve 30-35°C civarında sabit kalır. Bu sıcaklık değerleri mezofilik metan bakterileri için optimum sıcaklıklardır. Sıcaklığın yükselmesi, genellikle gaz üretiminin de arttığının bir göstergesi olarak kabul edilir. Hartz, biyolojik ayrışma ile sıcaklık arasındaki ilişkiyi ampirik bir ifadeyle belirtmiş ve depo sahalarında metan oluşumu için optimum sıcaklığın 41°C olduğunu belirlemiştir. Buna göre;

$$\ln G_2/G_1 = E_a (T_2-T_1)/RT_1T_2 \quad (3.3)$$

olup burada  $G_1$  ve  $G_2$ ,  $T_1$  ve  $T_2$  sıcaklıklarındaki ( $^{\circ}\text{K}$ ) gaz oluşumları;  $R$ , gaz sabiti (1.987 cal/ $^{\circ}\text{K}/\text{mol}$ ) ve  $E_a$ , aktivasyon enerjisini (20 kcal/mol) ifade etmektedir. Bu ifadeye göre sıcaklık arttıkça biyolojik ayrışma da logaritmik olarak artacaktır [22].

### 3.4.8 Nem/Su Muhtevası

Düzenli depolama alanı içindeki nem muhtevası, besi maddesi miktarıyla birlikte depo gazı oluşumunu kontrol eden en önemli faktörlerden biridir. Katı atıklar depo sahalarına ilk depolandıklarında % 30-40 arasında nem muhtevasına sahiptirler. Suya doymun olmayan atıklar daha çok hidrojen üretirken, suya doymun atıklar daha çok metan ve karbondioksit oluştururlar. Birim katı atık başına oluşan depo gazı üretimi ile nem oranı arasında logaritmik bir ilişki vardır. Depo sahasında metan üretiminin optimize edilebilmesi için atıkların suya doymun olması gerekir. Steyer, depolama alanı içinde nem oranının % 20-70 arasında olması halinde günlük gaz üretiminin aşağıdaki eşitlik ile tespit edilebileceğini belirlemiştir.



$$y = 0,024 \times e^{(0,15 \times H_2O \%)} \quad (3.4)$$

y : cm<sup>3</sup> depo gazı/kg kuru katı atık-gün' dür.

Depolama sahasındaki nem oranının % 30'un altında olduğunda gaz üretiminin durma noktasına geldiği görülmektedir. Bu nedenle, depolama alanı içinde biyokimyasal reaksiyonu devam ettirmek için nem muhtevası kontrol altında tutulmalıdır. Nem muhtevası sınır değerlerinin altına düştüğü zaman sızıntı suyu depolama alanı içine enjekte edilmelidir. Depolama alanında biyokimyasal reaksiyon artıca depolanacak katı atık miktarının da artacağı unutulmamalıdır. Depolama sahasında nem yetersizliğinden biyokimyasal reaksiyon durma noktasına gelir. Organik maddelerin biyokimyasal bozunmasını hızlandırmak için depolama alanı gövdesinde yeterli oranda nem olmalıdır. Bu değer yaklaşık olarak % 50'dir [22].

Ortama sızıntı suyu uygun şartlarda verilerek nem oranı kontrol edilebilir. Böylece sızıntı suyu içindeki organik maddelerin biyokimyasal ayrışması da sağlanmış olur. Ayrıca, sızıntı suyunun depolama sahası içine daha iyi nüfuz edebilmesi için, atıkların ön ayırma ve parçalama işlemlerinden geçirilmesinde yarar vardır. Bu sayede, sızıntı suyunun dağılımını engelleyebilecek plastik ve diğer materyaller atıktan ayrılır, büyük parçacıklar parçalanır ve sızıntı suyunun depo içine daha kolay sızması sağlanır [22].

#### **3.4.9 Dane Boyutu**

Katı atık dane boyutlarının azalması biyokimyasal reaksiyonu ve gaz üretimini arttırmaktadır. Dane çapının küçültülmesi ile mikroorganizmaların organik maddeleri tüketmek için kullandığı yüzey alanı artmaktadır. Yapılan çalışmalarda parçacık çapının 250 mm'den 10 mm'ye düşürülmesi ile gaz üretim hızının 4,4 kat arttığı belirlenmiştir. Katı atık depolama tesislerinde atıklar depolanmadan önce parçalayıcı kullanılarak atığın dane boyutu küçültülebilir. Dane boyutu küçültülen katı atıklar daha homojen hale gelmekte, daha kolay depolanabilmekte, sıkıştırılabilmekte ve böylece daha fazla atık depolanabilmektedir. Bazı ülkelerde katı atıklar depolamadan önce parçalama işlemi yapılmaktadır. Ülkemizde de katı atıklar depolanmadan önce benzer uygulamaya geçmesinde yarar vardır. Dane boyu küçültülmüş alanlardan daha fazla gaz elde edileceği unutulmamalıdır. Ayrıca katı atığın parçalandığı tesislerde daha fazla çöp depolanabilmektedir [22].

### 3.5 Depo Gazlarının Çevresel Etkileri

Günümüzde evsel atıklar geçmişe oranla daha fazla üretilmektedirler. Bunun temel sebebi değişen hayat standartlarının ve tüketim alışkanlıklarının evsel katı atıkların bileşimini değiştirmiş olmasıdır. Evsel katı atıklarda kül içeriğindeki azalmaya karşılık kâğıt ve karton gibi ambalaj malzemesi miktarında bir artış söz konusudur [18].

Katı atıkların düzenli depolanması vahşi depolamanın çevreye olan olumsuz etkilerini ortadan kaldırmış olsa da, depo gazı kontrolü gibi yeni bir problemle karşılaşmıştır. Katı atık depo sahası gazları uygun şekilde toplanmazsa, çevre ve halk sağlığı açısından bazı sorunlar ortaya çıkmaktadır.

Depo gazlarının çevresel etkileri;

- İklim değişikliği
- Yangınlar ve patlamalar
- Depo gazlarının hava kirliliğine etkisi
- Bitki örtüsüne zararları
- Yeraltı suyu kirliliği
- İstenmeyen kokular olarak sıralanabilir [18].

#### 3.5.1 İklim Değişikliğine Etkisi

İklim değişikliği açısından atık sektöründen kaynaklanan küresel emisyonlar ( $CH_4$ ,  $N_2O$ ,  $CO_2$ ) 1970 yılından 2010 yılına kadar neredeyse 2 kat artmıştır. 2010 yılı için atık sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyonları 1.446 Milyon ton  $CO_2$  eşdeğeri ile toplam küresel emisyonların yaklaşık olarak % 3'üne denk gelmektedir. 1970 yılında ise atık sektöründen kaynaklanan emisyonların 734 Milyon ton  $CO_2$  eşdeğeri ile toplam küresel emisyonlardaki katkısı % 2,6 idi. Katı atık depolama alanlarının atık sektörü içindeki payına bakacak olursak, 1970 yılında % 46 olan oran 2010 yılı için % 43 olmuştur. Atık sektöründeki en büyük pay 1970 yılında % 51 ve 2010 yılında % 54 orana sahip olan atıksu yönetiminden kaynaklanan atıklardan oluşmaktadır. Diğer düşük oranlı kaynaklar ise atık yakma ve diğer uygulamalardır [20].

Katı atık depolama sahalarından çıkan gazın bileşimindeki metan ve karbondioksit emisyonları küresel ısınmaya katkıda bulunurlar. Metan, moleküler ölçekte küresel ısınmaya karbondioksitten 20–25 kat daha fazla etki yapmakta ve diğer gazlara nazaran atmosferde kalma süresi daha uzun olmaktadır [18].

Toplam küresel ısınmanın yaklaşık % 18'ine metan gazının sebep olduğu belirlenmiştir. Bu değer yılda yaklaşık 500 milyon tona karşılık gelmekte ve bunun da 40-75 milyon tonu katı atık depo sahalarından kaynaklanmaktadır [18].

Dünya genelinde katı atık depolama sahalarından yıllık olarak yaklaşık 50 milyon ton metan gazı üretimi gerçekleştiği ve bunun yaklaşık 6 milyon tonunun düzenli depolama sahalarından kaynaklandığı ifade edilmektedir [20].

17. yüzyıl başlarında keşfedilen karbondioksit atmosferde % 0,03 oranında bulunmaktadır. 1860 yılından bu yana görülen yaklaşık 0,7°C'lik küresel ısınmanın % 60'lık bölümünün karbondioksitten kaynaklandığı belirlenmiştir [18].

Katı atık depolama sahalarından çıkan depo gazları bileşimindeki % 40-60 CO<sub>2</sub> ile bu noktada da küresel ısınmaya katkıda bulunurlar.

Sera gazları olarak bilinen gazların atmosferdeki derişimlerinin artması bazı çevresel problemler doğurmaktadır. Oluşması beklenen muhtemel problemler;

- Deniz suyu seviyelerinin artması ve sahil şeritleri ile akarsu deltalarının sular altında kalması,
- Buzulların ve kar örtülerinin erimesiyle tatlı su kaynaklarının azalması,
- Atmosferik ısınmayla birlikte, artan sıcaklığın etkisiyle salgın hastalıkların daha kolay yayılması ve buna bağlı olarak ölümlerin artması,
- Sıcaklığın etkisiyle ekolojik çeşitliliğin azalması ve bazı türlerin soylarının tükenmesi,
- Değişen atmosferik sıcaklıklara bağlı olarak tarımsal üretimde azalmaların görülmesi olarak sıralanabilir.

### **3.5.2 Yangın ve Patlama Tehlikesi**

Hava içerisindeki metan derişimi % 5-15 arasında olduğunda patlama riski doğmaktadır. Bu sınır değerlere sırasıyla alt patlama sınırı (LEL - Lower Explosive Limit) ve üst patlama sınırı (UEL - Upper Explosive Limit) denilmektedir. LEL altındaki metan yüzdelerinde patlama söz konusu olmamaktadır. UEL üzerinde ise gaz patlama yapmaksızın yanmaktadır. Bu durum literatürde, 1 hacim metanın 10 hacim hava(veya 2 hacim oksijen) ile karışması ile patlama olur şeklinde açıklanmaktadır. Metan derişimleri bu kritik seviyeye ulaştığında, atık içerisindeki oksijen tamamen tükenmiş olduğundan depolama sahalarında patlamaların meydana gelmesi gibi doğrudan bir tehlike söz konusu değildir. Ancak, bazı durumlarda depo gövdesinde ve sahada yangınlar çıkabilir [18].

### **3.5.3 Hava Kirliliğine Etkisi**

Katı atık depolama sahalarından atmosfere yayılan depo gazları bölgesel ve küresel ölçekte hava kirliliğine neden olmaktadır. Metan ve karbondioksit yanında küçük miktarlarda da olsa uçucu organik bileşikler atmosfere karışmaktadır. Bu uçucu organik bileşikler depo alanına getirilen atıkların yapısında bulunabilirler ya da atıkların parçalanmaları sonucu oluşabilirler [18].

Uçucu organik bileşikler oluşan toplam gaz miktarının % 1'inden daha az olmalarına rağmen fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı oldukça önemli çevre kirleticileridir. Bu bileşiklerin en önemli tehlikeleri hava kirliliğine sebep olmaları itibarıyla halk sağlığını olumsuz etkilemeleridir [18].

### **3.5.4 Yeraltı Suyu Kirliliği**

Depo gazı, karbondioksit çözünürlüğünün yüksek olmasından dolayı rahatça yeraltı sularına karışarak kirlilik yaratabilmektedir. Bununla birlikte depo gazında eser olarak bulunan bazı gazlar son derece toksiktir. Bu gazlar (özellikle uçucu hidrokarbonlar) yeraltı sularında kirliliğe neden olmaktadır [18].

### **3.5.5 İstenmeyen Kokular**

Kokular, depo gazı içerisinde, düşük derişimlerde kokuya yol açan bileşenlerin (esterler, hidrojen sülfid, organosülfürler, alkilbenzenler, limonen ve diğer hidrokarbonlar) bulunmasından kaynaklanmaktadır. Kokuya sebep olan eser miktardaki bileşenlerin çoğu toksik olabilir. Koku yapıcı maddeler rüzgâr gibi meteorolojik faktörlerin de etkisiyle depo sahasından çok uzaklara taşınıp kokuyu yayabilirler [18].

### **3.6 Depo Gazı Miktarı Hesaplama Yöntemleri**

Oluşan depo gazı miktarı sahadan sahaya farklılık gösterir. Çünkü metanojen faaliyet birçok çevresel faktöre göre değişir. Teorik olarak 1 ton çöpün ayrışması neticesinde % 55 metan içeren ve  $19.750 \text{ Kjoule /m}^3$  düşük kalorifik değere sahip  $400 \text{ m}^3$  depo gazı oluşur. Bir depolama sahası için depo gazı geri kazanım projesi yapmadan önce mevcut ve gelecekteki potansiyel depo gazının miktarı bilinmelidir. Toplanan gazın miktarı, dökülen atık miktarı, bu atıkların özellikleri, tesis ve toplama sisteminin tasarımı gibi birçok faktöre bağlıdır [24].

Mevcut ve gelecekte oluşabilecek gaz miktarını belirlemek için dört farklı metot vardır. Mevcut gaz üretimini hesaplamak için en güvenilir metot atık için test kuyuları açmaktır. Diğer metotlar da kabaca tahmin, substratların ayrışma denklemi ile hesap ve model

hesaplamalarıdır.

### 3.6.1 Test Kuyuları

Gaz miktarının belirlenmesindeki en güvenilir metot, test kuyuları açmak ve bu kuyularda toplanan gazı ölçmektir. Bu yöntem çok pahalıdır ve ancak depo alanında büyük miktarlarda gaz üretilmesi için yeterince atık bulunması halinde bu yönteme başvurulur. Test kuyuları, güvenilir sonuçlar elde etmek için depo alanındaki atık homojenliğine ve saha büyüklüğüne göre sahayı temsil edici bölgelerde uygun sayıda açılmalıdır.

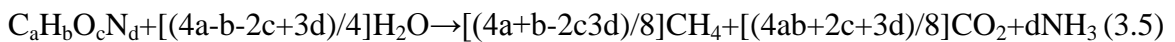
Gelişmekte olan ülkelerde, test kuyuları ile oluşan gazın miktarını belirlerken, test kuyularında toplanan gaz miktarının sadece yarısı dikkate alınır. Bunun sebebi atıkların sahada gevşek bir biçimde sıkışmış olması veya homojen olarak dağılmamış olmasıdır. Ayrıca gaz yayılması çok yaygın bir problemdir ve yanlış tahminlere sebep olmaktadır. Elde edilen değerlerin yarısını dikkate almak gaz geri kazanım sisteminin büyüklüğünü belirlemede daha gerçekçi bir değer elde edilmesini sağlar. Bu metodun önemli bir faydası da toplanan gazın miktarıyla birlikte kalitesinin de ölçülebilir olmasıdır. Gaz içindeki metan, hidrokarbon, sülfür, parçacık ve azot miktarları da analiz edilmelidir. Bu analiz, gaz geri kazanım sisteminin tasarımı için çok önemlidir [24].

### 3.6.2 Yaklaşık Tahmin

Bir depolama sahasında oluşacak gaz miktarının tahminindeki en basit metot depolama sahasındaki her bir ton atığın yılda  $6 \text{ m}^3$  gaz oluşturacağı kabulüdür. Bu tahmini değer işletilmekte olan birçok depo alanından elde edilmiştir ve enerji geri kazanım projesini destekleyecek ortalama bir depolama sahasını yansıtmaktadır. Ancak, bu yaklaşım atık, iklim ve depolama sahasına özgü diğer özellikleri hesaba katmamaktadır. Bu kaba yaklaşım depolama sahasında ne kadar atığın bulunduğu bilinmesini gerekli kılmaktadır. Atıklar ideal olarak 10 yıldan genç olmalıdırlar. Sahaya bağlı olarak gaz oluşumu 5-15 yıl sürebilir. Bu yöntemden elde edilen sonuçlar  $\pm \% 50$  oranında değişir [24].

### 3.6.3 Substratların Ayrışma Denklemi ile Hesaplama

Bu yöntemde atıkta bulunan (plastikler hariç) her organik madde  $\text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c\text{N}_d$  formunda genel bir formülle gösterilerek aşağıdaki eşitlik yardımıyla toplam gaz hacmi tahmin edilir. Bu denklemde ayrışabilir organik atığın tümünün karbondioksit, metan ve amonyaka dönüştüğü kabul edilir.



Atığın  $C_aH_bO_cN_d$  şeklinde genel bir formülle ifade edilebilmesi için depolama sahasındaki atık bileşimi ve her bileşenin elemental analizi(C, H, O, N, S, kül içerikleri) bilinmelidir. Bu yaklaşımla elde edilen sonuç optimum şartlar altında atıkların organik bileşimlerinin ayrışabilir kısımlarının bozunmasıyla oluşacak maksimum gaz miktarıdır. Organik atıkların tümü ayrışmadığı için gerçek değer elde edilen değerden daha düşüktür [13].

### 3.6.4 Matematiksel Modeller Yardımıyla Hesap

Test kuyuları belirli zamanlarda sahadaki gaz üretim hızlarına dair gerçek veriler sağlanmasına karşılık, matematiksel model hesapları sahadaki depolama esnasında ve kapatılmasından sonra gaz üretimine ilişkin veriler ortaya koymaktadır. Bu modeller tipik olarak depolama zamanı, depolanan atığın miktarı ve atıkların özellikleri gibi verilere ihtiyaç göstermektedir. Katı atık depo sahaslarında oluşan gazın belirlenmesiyle ilgili birçok model geliştirilmiştir. Bu modellerden üçü aşağıda açıklanmıştır.

#### 3.6.4.1 Tabasaran/Rettenberger Modeli

Gaz üretiminin hesabı için Tabasaran/Rettenberger tarafından geliştirilen matematik model kullanılmaktadır. Model denklemi aşağıda gösterilmiştir.

$$G_t = 1,868 \cdot G_{org} \cdot (0,014T + 0,28) (1 - 10^{-kt}) \quad (3.6)$$

$G_t$  : 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 ( $yıl^{-1}$ )

Bu bağıntı kümülatif bir artış göstermektedir. Modelin uygulanmasında en önemli husus parametrelerin seçimidir.  $G_{org}$  değeri evsel katı atıklar için 170-200  $kg/ton$  arasında değişmektedir. Sıcaklık depo gövdesinde çoğunlukla 25-35 $^{\circ}C$  arasındadır. Üstü örtülmemiş sahalarda bu sıcaklığın üzerine çıktığı tespit edilmiştir.  $k$  değeri % 75 organik madde indirgenmesi ve 12-24 yıl dolgu süresi için 0,025-0,05 arasında seçilmektedir. Almanya'daki depolama sahaslarında yapılan ölçümler sonucu bu değer 0,035-0,04 olarak verilmektedir [17].

### 3.6.4.2 LandGEM (Landfill Gas Emission Model) Modeli

Depo gazı emisyonları modeli depolama sahalarından kaynaklanan metan, karbondioksit ve düşük derişimlerde bulunan diğer hava kirleticilerin emisyonlarının miktarını belirlemek için tasarlanmıştır. Depolama sahasından kaynaklanan emisyonların tahmin edilebilmesi için aşağıdaki bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır.

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

Modelde depo gazı oluşma hızı birinci derece bozunma denklemine dayanmaktadır. Depolama sahalarındaki atığın miktarı, yaşı ve bileşimine ait mevcut verilerin yetersizliğinden dolayı daha karmaşık bir yöntem kullanılmamıştır. Modelde kullanılan denklem aşağıdaki gibidir.

$$Q_{CH_4} = L_0 \cdot R \cdot (e^{-kc} - e^{-kt}) \quad (3.7)$$

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

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

R : Depolanan yıllık atık miktarı (ton/yıl)

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

c : Saha kapatıldıktan sonraki yıl sayısı (yıl)

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

Model, karbondioksit ve metan emisyonlarının aynı oranda olduğunu kabul etmektedir, yani depo gazı miktarının metan emisyonunun iki katı olduğu varsayılmaktadır. Depolama sahasından kaynaklanan metan k ve  $L_0$ 'ın fonksiyonudur. k değeri atığın nem içeriği, nütrient içeriği, pH değeri ve sıcaklığın bir fonksiyonudur.  $L_0$  değeri ise depolama sahasında bulunan atığın tipine bağlıdır. Atığın selüloz içeriği arttıkça,  $L_0$  değeri de artmaktadır.

Modelde sahaya özgü bir k ve L<sub>0</sub> değeri girilemiyorsa, modelde hazır olarak verilen iki set değer mevcuttur. Bunlar Clean Air Act (CAA) ve AP-42 değerleridir. CAA değerleri depolama sahası emisyonları için CAA yönetmeliklerinin uygulanabilirliği esasına dayanmaktadır. AP-42 değerleri ise EPA'nın Compilation of Air Emission Factors'dan alınmış değerlere dayanmaktadır. k değerleri için bir kuraklık kriteri mevcuttur. k değerleri yılda 640 mm'den daha az yağış alan bölgeler için farklılık gösterir. CAA ve AP-42 değerleri Çizelge 3.3.'de gösterilmiştir [17].

**Çizelge 3.3: EPA Modeli Parametreleri [17]**

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

#### 3.6.4.3 Çoklu Faz Modeli

Depo gazı oluşumunun tahmin edilmesi için kullanılan modellerden biri de çoklu faz modelidir. Model, katı atıkların büyük bir kısmının düzenli depolama metodu ile bertaraf edilen Hollanda'da geliştirilmiştir. Model, atık içindeki biyolojik ayrışabilen organik karbon oranı ve kümülatif atık miktarını esas almaktadır [17].

Modelin matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$\alpha t = \zeta \sum 1,87 \cdot A \cdot C_{0,i} \cdot k_{t,i} \cdot e^{-k_{t,i} t} \quad (3.8)$$

- A : Kümülatif atık miktarı (ton)  
 $\alpha t$  : Depo gazı oluşum miktarı (m<sup>3</sup>/yıl)  
 $\zeta$  : Üretim faktörü  
 $k_{t,i}$  : Model değişkenleri  
 $C_{0,i}$  : Yavaş, orta ve hızlı ayrışan organik karbon miktarları (kg C/ton atık)  
T : Atık dökümünün başlamasından itibaren geçen süre (yıl)

Hollanda'da yapılan çalışmalar sonucu belirlenen optimum model değişkenleri aşağıda verilmektedir:

- $\zeta$  : 0,58  
 $k_{t,i}$  : 0,185 yıl<sup>-1</sup>  
 $k_{t,i}$  : 0,100 yıl<sup>-1</sup>  
 $k_{t,i}$  : 0.030 yıl<sup>-1</sup>



### **3.7 Depo Gazının Toplanması ve Kontrolü**

Depo gazının hareketi atmosferik emisyonları azaltmak, açığa çıkan koku emisyonlarını minimuma indirmek, yüzey altına gaz göçünü asgariye indirmek ve metandan enerji elde edebilmek için kontrol edilir. Kontrol sistemleri aktif ve pasif gaz kontrol sistemleri olmak üzere sınıflandırılabilir. Aktif sistemlerde, depo gazı blower yardımıyla çekilir. Pasif gaz kontrol sistemlerinde ise depo gazının difüzyonla hareket etmesi kontrol edilir. Aktif toplama ile depo gazı daha verimli şekilde toplanabilir. Pasif gaz kontrol sistemleri maliyet açısından daha avantajlıdır [17].

#### **3.7.1 Pasif Gaz Kontrol Sistemleri**

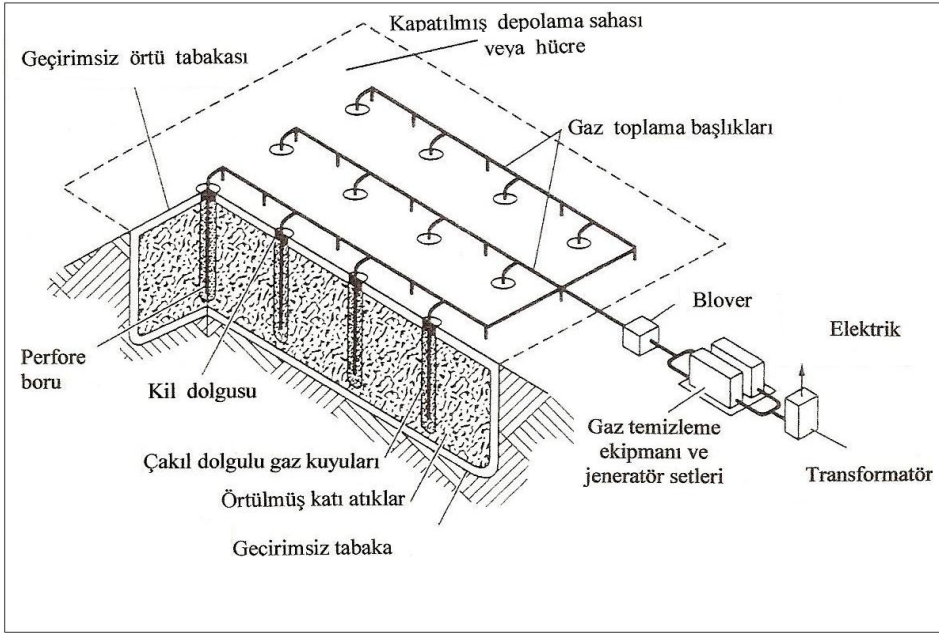
Pasif gaz kontrol sistemleri bariyer ve ağızlık gibi düşük geçirgenliğe sahip malzemelerin kullanımı veya atık ve civarı arasındaki büyük iletkenlik farkı esasına dayanmaktadır. Bu sistemler hendeklerden, boru ağızlıklarından, membranlardan v.b. oluşmaktadır. Pasif kontrol sistemlerinde, depolama sahasında oluşan gaz basıncı, gazın hareketi için ana unsur olarak görev yapmaktadır. Pasif gaz kontrol sistemleri hem ana gazlar hem de eser gazlar için ana gazların yüksek hızla üretimi esnasında gerçekleştirilebilmektedir. Bu da, gaz akışının arzu edilen doğrultuda gerçekleşmesi için daha yüksek geçirgenliğe sahip yolların oluşturulmasıyla sağlanmaktadır. Örneğin; çakıl dolu hendek gazı yakma ağzına iletmekte görev yapabilmektedir. Ana gazların üretiminin sınırlı olduğu durumlarda pasif kontrol sistemleri çok verimli olamamaktadır. Bunun sebebi; moleküler difüzyonun baskın taşınım mekanizması olmasıdır [13].

Pasif gaz kontrol sistemlerinde depo gazı hareketini kontrol etmek için hava menfezleri kullanılabilir. Hava menfezlerin dışında çevre hendekleri, saha çevresi gaz çekme hendekleri ve saha çevresi hava enjeksiyon kuyuları da pasif gaz kontrol elemanları olarak kullanılmaktadır. Yapılan araştırmalar ve sahaların gözlemlenmesi sonucu elde edilen veriler pasif sistemlerin sadece sınırlı bir koruma sağladığını ortaya koymuştur. Metanın binalarda birikerek önemli bir risk oluşturacağı alanlarda, pasif gaz kontrol sistemleri koruma açısından yeterli olmayabilirler. Depolama sahalarında önceden tahmin edilemeyen gaz hareketi nedeniyle modern depolama sahalarında pasif gaz kontrol sistemleri yerine daha çok aktif gaz kontrol sistemleri kullanılmaktadır [13].

### 3.7.2 Aktif Gaz Kontrol Sistemleri

Depo gazının yanal hareketi, saha çevresinde gaz çekme kuyuları ve hendekler kullanılarak ve bu kuyulara doğru bir basınç gradyanı yaratacak kısmi vakumun oluşturulmasıyla kontrol edilebilmektedir. Çekilen gaz metan ve uçucu organik bileşiklerin kontrolü amacıyla yakılabilmekte ya da enerji üretiminde kullanılabilir [13].

Her iki durumda da gaz geri kazanım kuyuları ve vakum pompaları kullanılır. Kuyuların ve blower ekipmanının bağlantısını sağlayan bir boru ağı inşa edilir. Şekil 3.5’de bir depo alanında düşey kuyular kullanılan bir gaz geri kazanım sistemi görülmektedir [13].



Şekil 3.5: Düşey Kuyular Kullanılan Gaz Geri Kazanım Sistemi [13]

Aktif gaz toplama sistemi aşağıdaki birimlerden ibarettir:

**Gaz çıkarma kuyuları:** Bunlar depo gazının toplanması için dikey veya yatay şekilde depolama gövdesine yerleştirilir.

**Gaz toplama noktası:** Toplanan tüm gaz buraya getirilip birleştirilir. Toplama noktası bir tank veya bir boru olabilir. Gaz toplama noktası, ölçüm ve ayarlama ekipmanlarıyla donatılmalıdır.

**Su ayırıcısı:** Damıtma suyu sıyrıcı veya soğutma tertibatıyla gaz debisinden ayrıştırılır, sonra pompa vasıtasıyla arıtma tesisine gönderilir.

**Gaz çekme borusu:** Gaz toplama noktası ve fan arasındaki boru hattıdır.

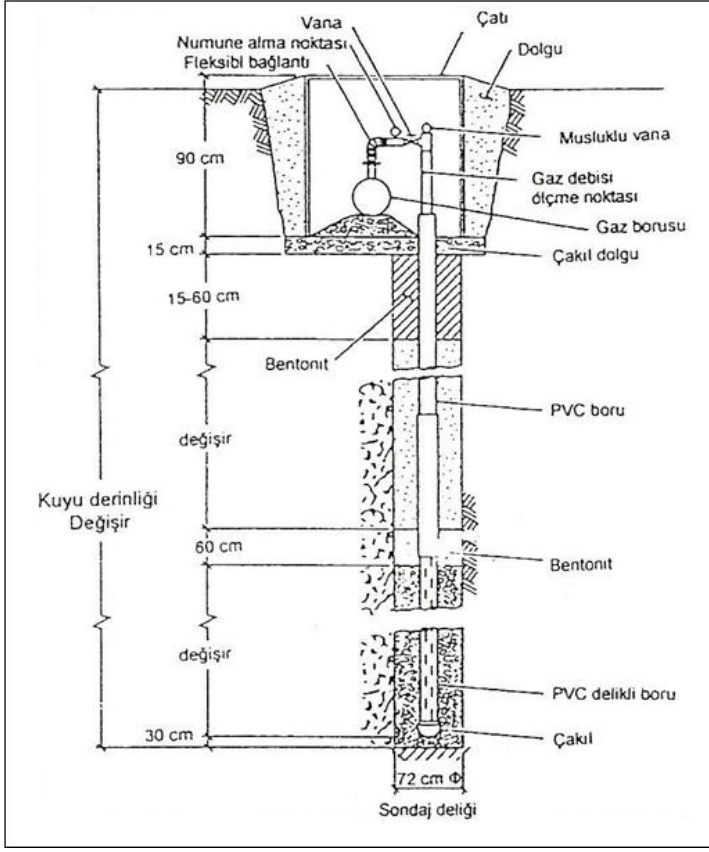
**Fan ve basınç ayarı:** Fan, gazı depolama gövdesinden çekmek için eksi basınç, alevlendirme veya yakma ünitesine göndermek için artı basınç üretir. Basınç ayarı, eksi ve artı basınçları optimum seviyede tutar. Gaz çekimi için gerekli olan basınçlar, 200-300 mbar mertebesindedir.

**Fan kulübesi:** Küçük depolama sahalarında fan bir konteynır içinde ya da çatı altında durabilir. Büyük sahalarda, fan genellikle yakma ünitesinin bulunduğu binada bulundurulur.

**Yakma ünitesi:** Yakma enerji üretim birimi ve yan ekipmanlarından (gaz temizleme birimi, gaz ayırma birimi, şalter dolapları) oluşur. Aktif gaz toplama sistemlerinin temel elemanı yatay ve düşey gaz çıkarma kuyularıdır. Bu kuyuların fiziksel yapıları çok farklı olmakla birlikte işlevleri aynıdır. Gaz depo etrafı çakıl kaplı delikli boru boyunca düşey/yatay borulara pompalanarak emme basıncı sağlanır. Kuyular etki yarıçapları kesişecek şekilde dizilirler. Düşey gaz çıkarma kuyuları bitmiş depo alanlarına veya depo alanlarının tamamlanmış kısımlarına yerleştirilirler. Borunun alt kısmının üçte biri deliklidir ve çakıl dolgu tabakasına oturmuştur. Kalan kısmı delikli değildir ve toprak içindedir, kil tabakası ile kaplıdır. Şekil 3.6'da bir gaz çekme kuyusunun detayları görülmektedir [12, 13].

Depo gazı elektrik üretimi için kullanılmadığı durumlarda, alev sistemlerinde yakılarak tasfiye edilir. Yakmada, kokulu gazlar da imha edilmiş olur. Depo gazının yakılması için özel gaz yakıcılar geliştirilmiştir. Bu gaz yakıcılarda depo gazı hava ilavesiyle yakılır.

Konvansiyonel gaz yakıcılarda depo gazı yaklaşık 1000°C sıcaklıkta yakılır. Yüksek sıcaklıklardaki gaz yakıcılarda ise 1200°C'ye varan sıcaklıklara çıkılabilmektedir. Yüksek sıcaklıklı yakıcılarda, yakma sırasındaki dioksin oluşumu kısmen engellenebilir. Ancak bunların yatırım ve işletme giderleri konvansiyonel gaz yakıcılara göre daha yüksektir [12].



**Şekil 3.6: Dikey Bir Gaz Çekme Kuyusu[13]**

## 4. DEPO GAZININ ENERJİ AMAÇLI KULLANIMI

### 4.1 Kullanılan Teknolojiler

Genel itibariyle dünyada uygulanan teknolojilerde depo gazından enerji geri kazanımı amacıyla uygulanan dört farklı yöntem bulunmaktadır. Bunlar; direkt ısıtma, elektrik üretimi, kimyasal besleme stoğu ve boru hattı kalitesinde gaza saflaştırma yöntemidir. Her bir yöntem kendi içerisinde farklı uygulama teknolojilerine sahiptir [17].

Yöntemler ve uygulama teknolojileri aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

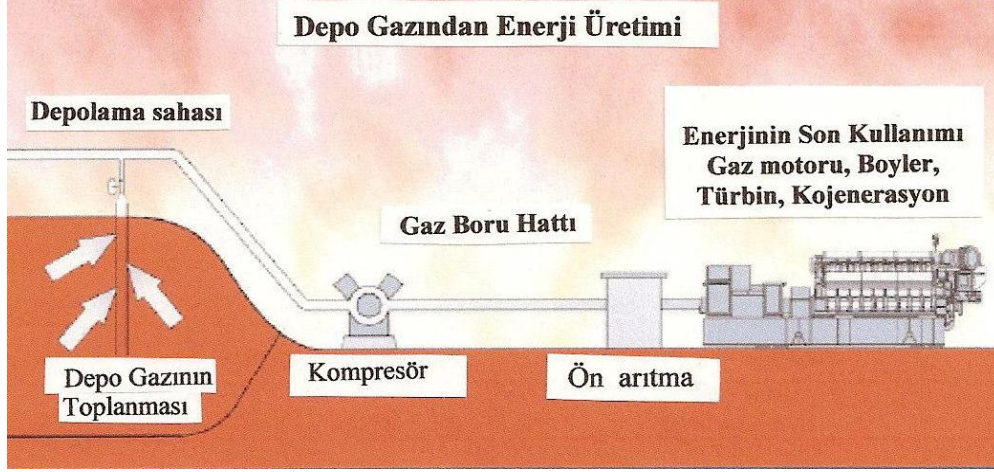
- 1) Direkt ısıtma uygulamaları
  - Endüstriyel kazanlar için kullanımı
  - Ortam ısıtma ve soğutma
  - Endüstriyel ısıtma/ortak yakma
- 2) Elektrik üretimi uygulamaları
  - İçten yanmalı motorlarda kullanımı
  - Gaz türbinlerinde kullanımı
  - Buhar türbinlerinde kullanımı
  - Kojenerasyon uygulamaları
  - Mikro türbinlerde kullanımı
  - Yakıt pillerinde kullanımı
- 3) Boru hattı kalitesinde gaza saflaştırma
  - Taşıt yakıtı olarak kullanımı
  - Yerel doğalgaz şebekesine enjeksiyon
- 4) Kimyasal üretim süreçlerinde besleme stoğu olarak
  - Metanole dönüşüm
  - Dizel yakıtı dönüşüm

#### 4.1.1 Direkt Isıtma Uygulamaları

Direkt ısıtma yöntemi, depo gazının enerji amaçlı kullanımını için en basit ve en ucuz olan yöntemdir. Depo gazı genellikle büyük endüstriyel kazanlarda, tuğla fırınlarında, kireç veya çimento fırınlarında yakılır. Depo gazı ayrıca seraları ısıtmakta kullanılabilir. Depo gazının direkt ısıtma amaçlı kullanımında en önemli nokta kullanıcıların depolama sahasının yakınında olmalarının gerekmesidir. Çünkü depo gazının uzak mesafelere taşınması yerinde kullanılmasından oldukça pahalıdır [15].

#### 4.1.2 Elektrik Üretimi Uygulamaları

Sahanın şartları itibariyle direkt yakmanın mümkün olmadığı durumlarda depo gazının değerlendirilmesi için en ekonomik çözüm depo gazının elektrik üretimi amacıyla gaz motorları, gaz türbinleri, buhar türbinleri ve yakıt pilleri kullanılarak değerlendirilmesidir. Şekil 4.1’de tipik bir depo gazından enerji üretim şeması görülmektedir.



Şekil 4.1: Depo Gazından Enerji Üretimi [17]

##### 4.1.2.1 Depo Gazının Sabit Motorlarda Yakıt Olarak Kullanımı

Depo gazından enerji temini uygulamaları kapsamında, elektrik üretimi, depo gazının yakıt olarak kullanıldığı sabit motorlarda yakılması yoluyla gerçekleştirilebilir. Bu yöntem için depo gazının içten yanmalı motorlarda yakılarak enerji kazanımı teknolojisi en basit ve ucuz olan alternatiftir. Çünkü bu alternatif için özel bir altyapı gerekli değildir. Depo gazı saf gaz olarak veya çift yakıtlı motorlarda ilave yakıt olarak kullanılabilir. Bu motorlar 400 KW'dan 2 MW'a kadar geniş üniteler şeklinde ya da konteynırlarda daha küçük portatif üniteler şeklinde de olabilir. Portatif olanlar depo gazı üretimi profiline göre bir sahadan diğerine taşınabilmesi yönünden avantajlıdır [17].

Depo gazının içten yanmalı motorlarda yakılarak enerji temini oldukça yaygın bir yöntemdir. İçten yanmalı motorlar Otto motoru gibi kıvılcımla ateşlemeli ve dizel veya çift yakıtlı motorlar gibi kompresyonlu ateşlemeli olmak üzere sınıflandırılabilir. Genelde modifiye edilmiş kıvılcımla ateşlemeli motorlar kullanılır [17].

Depo gazının yakıt olarak kullanılması için, motorlarda bazı değişiklikler yapmak gerekir. Depo gazı kuru, doğal yapısı nedeniyle herhangi bir yağlama özelliğine sahip değildir. Bu yüzden vanaların normalden daha dayanıklı olması gerekir. Hidrojen sülfürün korozif etkisi nedeniyle bakır parçalar değiştirilmelidir [17].

#### **4.1.2.2 Depo Gazının Gaz Türbinlerinde Yakıt Olarak Kullanımı**

Gaz türbinleri depolama sahasının etrafında bulunan kullanıcılara, elektrik temin eden firmalara veya saha içerisinde kullanılmak üzere elektrik üretimi amacıyla orta kalitede gaz kullanırlar. Gaz türbinlerinin içten yanmalı motorlardan daha verimli olabilmesi için daha yüksek gaz debisi olmalıdır. Bu sebepten dolayı gaz türbinleri daha büyük depolama sahalarında kullanılır. 500 KW'dan 10 MW'a kadar boyutlarda bulunurlar, ancak depolama sahalarında en çok kullanılanları 2-4 MW aralığında olanlarıdır [17].

Gaz türbinlerindeki yanma sabit motorlardakilerle aynı parametrelere bağlıdır. Bunlar tutuşma limitleri ile hava-yakıt oranı, yeterli türbülans, yeterli kalma zamanı ve bir ateşleme kaynağıdır. Gaz türbinlerinin başlıca avantajı içten yanmalı motor veya buhar türbinine göre çok daha az yer kaplamasıdır. Bir gaz türbini jeneratörü toplam ağırlığının bir tonuna karşılık 70-140 KW elektrik üretirken bu oran içten yanmalı motorlarda 1 ton için 27 KW olmaktadır. Tipik bir buhar türbininde ise ton başına karşılık gelen elektrik üretimi miktarı 10 KW'dır. İkinci avantajı ise bakımların diğerlerine nazaran daha az bakım ve onarıma ihtiyaç duymasındır. Genel olarak gaz türbinlerinin bakımları 10.000 saat aralıklarla onarımları da 100.000 saat aralıklarla yapılmaktadır [15].

#### **4.1.2.3 Depo Gazının Buhar Türbinlerinde Yakıt Olarak Kullanımı**

Bu yöntem en az kullanılan elektrik üretimi metodudur. Genelde gaz debisinin 8-9 MW'lık sistemleri desteklediği çok büyük depolama sahalarında uygulanabilir. Buhar türbin sistemleri içten yanmalı motorlardan veya gaz türbinlerinden daha yüksek oranda KW başına maliyete sahiptirler [15].

Genelde paketlenmiş bir birim olan konvansiyonel gaz/sıvı yakıt boyleri ve elektrik üreten buhar türbin jeneratörü içerir. Bu teknoloji genelde tam bir soğutma döngüsü, yeterli proses kaynağı ve soğutma suyunu gerektirir [24].

#### **4.1.2.4 Kojenerasyon**

Kojenerasyon, ısı ve elektrik üretiminin genellikle tek çeşit yakıt kullanılarak, birlikte gerçekleştirildiği ve atık ısıdan veya buhardan yeniden yararlanmayı hedefleyen sistemlere verilen genel bir isimdir. Kojenerasyon çok önemli bir enerji tasarruf yöntemidir. Endüstriyel tesislerin ısı ve elektrik ihtiyaçlarını karşılamak için bu yöntemi kullanarak ısı ve elektrik enerjisi üretmesi ayrı ayrı üretimlerine kıyasla daha az yakıt kullanımı ile gerçekleşmektedir. Depo gazından enerji temini uygulamalarında kojenerasyon tesislerini kullanmak mümkündür. Küçük ve orta ölçekli sahalarda gaz motoru kullanılarak, büyük sahalarda gaz türbini kullanılarak depo gazından ısı ve elektrik üretilmektedir. Dünyada

yaygın olarak kullanılan uygulamalardan biridir [17].

#### **4.1.2.5 Yakıt hücresi**

Yakıt hücreleri depo gazından kazanılan hidrojeni ve havadan elde edilen oksijeni bir elektrokimyasal reaksiyonda birleştirerek enerji oluşturur. Yüksek verimlerde, yakıt ve hava eldesi olduğu sürece elektrik sürekli üretilir. Güç üretimi için uygun üç tip yakıt hücresi vardır. Bunlar; fosforik asit yakıt hücreleri, molten karbonat yakıt hücreleri ve katı oksit yakıt hücreleridir. Yakıt kaynakları olarak hidrojen gazı veya yeniden formlandırılmış metanol kullanan fosforik asit yakıt hücreleri (PAFC) bir depo gazı uygulamasının ticarileştirilmesine en yakın olanıdır [24].

Depo gazından enerji geri kazanımı amacıyla çalışan yakıt hücreleri çevresel açıdan en temiz depo gazı enerji dönüşümü teknolojisi olup modülerite, düşük kapasite, yüksek verim, sessiz işletim, düşük çevresel etki nedeniyle elektrik üretimi için yüksek verim gösterirler. Bunlara ek olarak yakıt hücrelerinin işletme ve bakım maliyetleri düşüktür. Ancak, geleneksel sistemlere oranla yüksek olan yatırım maliyetleri sebebiyle diğer teknolojilerle rekabet etmesi güçtür. Yine de, yüksek verimde enerji dönüşümü gerçekleştirilmesi avantajı itibariyle yakıt hücreleri depo gazı enerji temini projeleri için tercih edilmeye başlanmış olup çevresel açıdan en temiz teknoloji olmasının da etkisiyle gelecekte depo gazından elektrik elde etmek için tercih edilen bir teknoloji olması beklenmektedir [16].

#### **4.1.3 Boru Hattı Kalitesinde Gaz Saflaştırma**

##### **4.1.3.1 İşlenmiş Depo Gazının Taşıt Yakıtı Olarak Kullanımı**

Depo gazı taşıt yakıtı olarak kullanılabilir, fakat bunun için bazı koşullar gereklidir. Öncelikle depo gazı doğal gaz kalitesine yükseltilmelidir. İkinci olarak taşıtların doğal gazla çalışması için modifiye edilmeleri gerekir. Son olarak taşıtlar için yakıt istasyonları olmalı ya da sabit bir noktadan bu hizmet verilmelidir. Birçok ülkede depo gazı yakıt olarak sadece çöp kamyonlarında kullanılmaktadır. Bu durumda sadece depo gazının yakıt olarak kullanımıyla gaz problemi çözülemez, çünkü üretilen depo gazı miktarı çok daha fazladır [15].

##### **4.1.3.2 İşlenmiş Depo Gazının Doğalgaz Şebekesine Enjeksiyonu**

Depo gazı arıtılır ve hemen hemen saf metan haline gelene kadar saflaştırılır. Güvenlik için bazı koku verici bileşikler eklenir. Arıtma prosesleri depo gazının bileşimine, istenen gaz kalitesine ve yerel piyasa şartlarına bağlıdır. Bu yöntemde en önemli nokta doğalgaz boru şebekesine yakınlıktır. Her durumda, depo gazının bu şekilde kullanımı pahalıdır, saf



karbondioksit geri kazanılıp satılsa bile sistem ekonomik olmayabilir. Bu uygulama Amerika'da çok büyük depolama alanlarıyla sınırlı olmak üzere karlı bir uygulama olmuştur [15].

#### **4.1.4 Kimyasalların Üretiminde Kullanılması**

Depo gazının petrokimya proseslerinde metan gazı elde edilerek besleme stoğu olarak kullanılması teknik olarak mümkündür. Birçok kimyasalın metandan, dolayısıyla sentez gazı (CO ve H<sub>2</sub> karışımı) üretilmesi mümkündür ve depo gazının bu son kullanım yönteminin karlılığı ispatlanmıştır. Bununla birlikte CH<sub>3</sub>OH (metanol) üretimi, bu olasılıkların içinde en ekonomik olanıdır. Ayrıca karbondioksit geri kazanılarak ticari bir ürün haline getirilebilir [15].

#### **4.1.5 Depo Gazının Arıtılması**

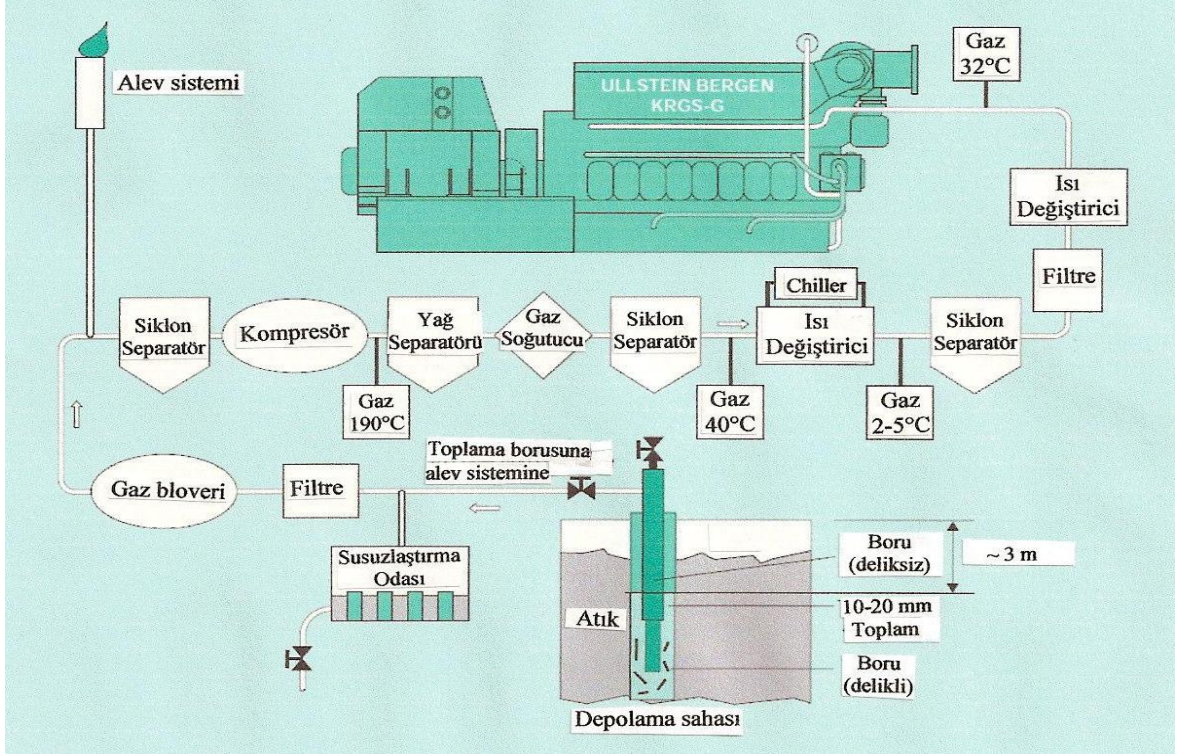
Gaz arıtma alternatifleri basit nem giderme işleminden, doğal gaz hatlarına gaz vermek için yapılan karmaşık temizleme işlemlerine kadar değişir. Bu iki uç alternatif arasında birçok arıtma imkânları vardır. Depo gazı arıtma sistemi yoğuşma, parçacık giderimi, gazın susuzlaştırılması, karbondioksit giderimi, hidrojen sülfür ve azot giderimini içerir [17].

Depo gazı suya doygunudur. Bu sebeple soğutularak ve yoğuşmuş suyu tutarak kurutmak gerekmektedir. Depo gazı yoğuşma suları korozif özelliklere sahiptir. Susuzlaştırma ve toz parçacıkların giderimi için yapılan filtrasyondan sonra elde edilen ham depo gazı hala karbondioksit ve eser bileşenler, özellikle bazı hidrojen sülfürler gibi halojenli hidrokarbonlar ihtiva eder [17].

Depo gazındaki karbondioksitin kullanıldığı yerlerde, depo gazındaki karbondioksit ve metan birbirinden ayrılabilir. Karbondioksitin metandan ayrılması fiziksel adsorpsiyon, kimyasal adsorpsiyon ve membran ayırma yöntemleriyle yapılır [13].

Depo gazı karbondioksiti azaltılarak, örneğin hacimce % 3'ün altında, nemi giderilerek, hidrojen sülfür muhtevası 3,5 mg/m<sup>3</sup>' ün altına getirilerek doğal gaz kalitesine getirilebilir. Bu arıtma prosesleri sıvı içine gaz absorpsiyonu, katı üstüne kimyasal veya fiziksel adsorpsiyon, membranla ayırma ve biyolojik ayırma prosesleridir [11].

Şekil 4.2'de gaz motorlu bir elektrik üretim tesisinin gaz arıtma akım şeması görülmektedir.



**Şekil 4.2: Depo Gazı Arıtımı Akım Şeması [17]**

#### 4.2 Depo Gazından Elektrik Üreten Teknolojilerin Finansal Ve Ekonomik Analizi

Depo gazı değerlendirme tesislerinin yatırım ve işletme maliyetleri;

- Sahadaki atık miktarına,
- Depo sahasının boyutlarına,
- Depo gazı oluşum potansiyeline,
- Petrol ve türevlerinin maliyetlerine,
- Çimento, kum, çakıl ve boru gibi malzemelerin maliyetlerine,
- Bölgedeki inşaat firmalarının ulaşılabilirliğine ve fiyatlarına,
- Malzeme üretim tesislerinin yakınlığına,
- Bölgenin coğrafi koşullarına göre değişkenlik göstermektedir.

Depolama sahaslarının karakteristik özellikleri, projenin tasarım tercihlerini ve depo gazı değerlendirme tesisinin yatırım ve işletme maliyetlerini doğrudan etkilemektedir. Dolayısıyla, bu tür maliyetlerin analizinde her projeyi kendi özelinde değerlendirmek en sağlıklı yoldur [10].

Ayrıca, bu tür projelerin ekonomik analizinde bölgesel ve ulusal ölçekte geçerli olan enerji fiyatları önemli rol oynamaktadır. Projelerin ekonomik durumunu değerlendirmek için fayda maliyet analizinin yapılması ile mümkün olmaktadır. Maliyetler, yatırım maliyeti, yıllık bakım ve işletme maliyeti ile karbon ve enerji vergilerinden kaynaklanan maliyetlerdir. Ekonomik fayda ise üretilen enerjinin satılmasından elde edilen gelirlerdir. Bunun yanı sıra, oluşan metan emisyonlarının giderimi ve depo gazından etkilenecek yer altı sularının arıtım maliyeti ekonomik faydanın değerlendirilmesinde göz önünde bulundurulmalıdır. Bu analiz aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır [10].

Depolama sahası i için kurulacak depo gazı değerlendirme tesisinin ekonomik faydası Eşitlik 4.1’de belirtildiği gibi, üretilen metanın satışı (RHi), giderilen karbon emisyonun ekonomik değeri (RCi) ve yer altı suyu iyileştirme bedelinden (BGi) oluşan ekonomik faydadan toplama sistemi maliyeti (CCi), bakım ve işletme maliyeti (COi) ve elde edilen gazın taşıma maliyetlerinden (CTi) oluşan toplam maliyetin farkından elde edilir [10].

$$P_i = R_{Hi} + R_{Ci} + B_{Gi} - C_{Ci} - C_{Oi} - C_{Ti} \quad (4.1)$$

Depo gazı değerlendirme en önemli yenilenebilir enerji teknolojilerinden biri olmasına karşın, depo gazı değerlendirme projeleri her zaman başarılı olamamaktadır. Projelerin başarısızlığı teknik problemlerden ziyade teknik olmayan sorunlardan kaynaklanmaktadır. Bu sorunlar;

- İşletmecilerin depo gazı geri dönüşümü ile ilgili farkındalığı ve potansiyel kullanıcılar ve finansçılar ile ilgili risk algısı,
- Proje ve enerji temini ekonomisi,
- Mülkiyetler ve diğer haklar,
- Pazar erişimi,
- Finans,
- Planlama,
- İzinler, lisanslar ve diğer bürokratik işlemler.

Depo gazı değerlendirme tesisleri için yapılan ekonomik analizdeki temel unsurlar proje için en uygun alternatifin ve teknolojinin seçimi ile uygun finansal yapının teminidir. Bu bölümde, ekonomik analiz yapılması için gerekli adımlar tanımlanmıştır [10].

Depo gazı değerlendirme projelerinin analizinde 6 senaryodan biri tercih edilir. Bunlar;

- 1- Depo gazının taşıt yakıtı olarak kullanılması için LNG ye dönüştürülmesi,
- 2- Depo gazının taşıt yakıtı olarak kullanılması için CNG ye dönüştürülmesi,
- 3- Depo gazının boru hattı doğal gaza dönüştürülmesi,
- 4- Depo gazından elektrik üretimi,
- 5- Depo gazının yakılması,
- 6- Hiçbir şey yapılmaması.

Birçok fayda ve maliyet tüm seçenekler ile ilişkili olmakla birlikte her bir seçeneğin kendine özgü fayda ve maliyet unsurları bulunmaktadır. Çizelge 4.1 her bir senaryoya ilişkin fayda ve maliyetleri özetlemektedir [10].

**Çizelge 4.1: Senaryolara İlişkin Fayda-Maliyet Özeti [10]**

	1	2	3	4	5	6
<b>Faydalar</b>						
Dizel Yakıt-Doğalgaz Kazanımı	X	X	X			
Elektrik Üretimi				X		
Karbon Kredisi	X	X	X	X	X	
Vergi İndirimi	X	X	X	X		
Diğer Emisyonların Azaltımı	X	X				
<b>Maliyetler</b>						
Depolama Sahası İşletme	X	X	X	X	X	X
CNG/LNG Tesisi ve İşletme	X	X				
Boru Hattı Doğalgaz Tesisi Ve İşletme			X			
Elektrik Üretim Tesisi ve İşletme				X		
Yakma Sistemi ve İşletme					X	
Oluşan Emisyonların Maliyeti						X

**Her bir senaryo için fayda maliyet oranının tahmini:** Fayda ve maliyetler herbir senaryo için değerlendirilmelidir. Her bir senaryonun birbirinden farklı faydası ve maliyeti vardır. Projenin verimliliğine bağlı olarak belirli bir senaryonun uygulanması için fayda ve maliyetlere ilişkin farklı oranlar kullanılabilir [10].

$$\text{Fayda/Maliyet Oranı (B:C)} = \text{NPV Maliyet} / \text{NPV Fayda} \quad (4.2)$$

**Senaryo 1 ve 2:** Bu senaryolarda, maliyetler, tesisin kurulum ve işletme maliyetlerinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, satın alınacak kamyonların net bugünkü değerleri de göz önünde bulundurulmalıdır. Faydalar ise, elde edilen dizel yakıtların, karbon ve vergi kredilerinin ve emisyon gideriminin toplamından elde edilen değer net bugünkü değere dönüştürülmesi ile bulunur.

**Senaryo 3:** Bu senaryo için maliyetler tesisin kurulum ve işletme maliyetlerinden kaynaklanmaktadır. Faydalar ise, elde edilen dizel yakıtların, karbon ve vergi kredilerinin ve emisyon gideriminin toplamından elde edilen değer net bugünkü değere dönüştürülmesi ile bulunur.

**Senaryo 4:** Burada da maliyetler, elektrik tesisinin kurulum ve işletme maliyetlerinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, satın alınacak kamyonların net bugünkü değerleri de göz önünde bulundurulmalıdır. Faydalar ise, elde edilen elektriğin satış bedeli ile karbon ve vergi kredilerinin ve emisyon gideriminin toplamından elde edilen değer net bugünkü değere dönüştürülmesi ile bulunur. İletim hatlarındaki kayıp göz önünde bulundurulmalı ve bunun için net bir kayıp oranı belirlenmelidir.

**Senaryo 5:** Buradaki maliyetler, yakma tesisinin kurulum ve işletme maliyetlerinden kaynaklanmaktadır. Fayda ise sadece karbon kredisinden kaynaklanmaktadır.

**Senaryo 6:** Burada depolama sahası ömrü boyunca kaynaklanacak işletme ve bakım maliyetleri değerlendirilmelidir. Ancak bu maliyetler tüm senaryolar için geçerli olduğu için bu senaryoda fayda maliyet oranı belirlenmemektedir.

Değerlendirme sürecindeki ilk adım ön ekonomik fizibilite değerlendirmesi yapılmasıdır. Eğer ön değerlendirmede proje uygulanabilir gözükürse, depolama sahası için uygulanabilir senaryolar için detaylı ekonomik değerlendirme yapılmalıdır. Ön değerlendirme çalışmasında ekipman maliyetleri, izin-lisans maliyetleri, finansal metotlar ve faiz oranları gibi genel hususlar değerlendirilir. Detaylı fizibilite çalışmasında ise projenin spesifik maliyetleri ve varsayımlar (ekipman fiyat teklifleri, boru hattı uzunluğu, arazi sahibi sayısı, mevzuata göre ihtiyaç duyulan izin lisans işlemleri için maliyetler, faiz

oranları, belirlenen finansal metot v.b.) üzerinden değerlendirme yapılır. Her iki analizin sonucunda yatırım kararının alınması için gerekli finansal ihtiyaçların belirlenmesi amacıyla aşağıdaki değerler belirlenir [10].

- Toplam Yatırım Maliyetleri
- İlk Yıl İçin Yıllık İşletme Maliyeti
- İç Karlılık Oranı
- Geri Ödeme Süresi
- Net Bugünkü Değer

#### **4.2.1 Maliyetler**

Depo gazından enerji temini projelerinde maliyetler depo gazı toplama ve yakma, elektrik üretimi, doğrudan kullanım ya da diğer senaryolar üzerinden belirlenebilir. Depo gazından enerji temini projesi sistem kurulumu maliyetleri ile işletme ve bakım maliyetlerini sağlayacaktır. Depo gazının sahanın tümünde ya da sadece en üretken bölümde toplanıp toplanmayacağı hususunu belirlemek gerekmektedir. Bu karar bazı durumlarda yasal mevzuata göre şekillenebilir. Genellikle maliyet açısından en etkin yöntem ilk etapta küçük bir gaz toplama sistemi kurulması, daha sonra yeni dolan atık sahaları ile birlikte sistemin genişletilerek enerji üretim kapasitesinin artırılmasıdır [10].

Depo gazı toplama ve yakma sistemi maliyetleri: Buradaki maliyetler önerilen sistemle ilişkilidir (Depo gazı çekme kuyuları, borulama, yoğunlaştırma, yakma sistemi v.b.). Bu maddelerin özeti şu şekildedir;

- Proje yönetimi ve mobilizasyon,
- Yatay ve dikey gaz çıkarma kuyuları(kuyu sayısı ve ortalama derinlik). Gaz çıkarma kuyuları maliyetleri kuyular, kuyu başlıkları, sondaj maliyetleri, kelebek valfler, sondaj atıklarının bertarafı,
- Sızıntı suyu toplama ekipmanları,
- Ana gaz toplama borusu (Boru çapı ve uzunluğu, bağlantı valfleri),
- Gaz toplama boruları,
- Yoğunlaştırma sistemi,
- Blower ve Yakma sistemi kurulumu,

- Depo gazı ölçüm ve kayıt sistemi,
- Saha için güvenlik çiti,
- Mühendislik ve beklenmeyen giderler.

Maliyetler tasarım detaylarına göre önemli ölçüde değişkenlik gösterebilir. Örneğin, gaz toplama borularının kurulum maliyeti depolama sahası derinliğine göre artış gösterir. Ayrıca, maliyetler ekipmanların tipine göre de değişebilir. Bazı ekipmanlar başlangıç kurulumunda düşük maliyetli olup işletme ve bakım açısından yüksek maliyetlidir. Bunun yanı sıra, projenin bulunduğu yerin ekonomik şartlarına ve pazar koşullarına göre de maliyetler değişkenlik göstermektedir. Saha şartları da maliyeti etkileyen bir diğer özelliktir. Örneğin, sızıntı suyu oluşumu fazla miktarda ise Depo gazı toplaması sıkıntılı olabilmekte ve önemli miktarda ilave yatırım ve işletme maliyeti oluşabilmektedir. Bazı depolama sahalarında, gelecekte biyogaz oluşumunun artacağı öngörüldüğünde mevcut kapasitenin üzerinde işletme kapasiteli tesis kurma ihtiyacı doğabilir. Bu durumda işletmenin yatırım maliyeti artacaktır. Benzer şekilde, bazı depolama sahalarında mevcut durumda ihtiyaç olmasa bile gelecekteki gaz potansiyeli düşünülerek yatay gaz toplama boruları kullanılabilir. Bu da gözükten yatırım maliyetini yükseltecektir [10].

**Yıllık İşletme ve Bakım Maliyetleri:** Katı atık depo gazı toplama sistemlerinin yıllık işletme ve bakım maliyetleri yatırım maliyetinin yaklaşık % 7-10 kadarına tekabül etmektedir. Bu maliyetler, işletme ve bakım maliyetlerine ilişkin olarak iş gücü, test ekipmanları, olağan işletme ve bakım masrafları ve bir miktar kuyu açma ve boru yenileme maliyetlerini kapsamaktadır. Çalışan personelin deneyimi ve niteliği, depo gazı yönetim sisteminin işletme ve bakım maliyetlerini etkileyebilir. Diğer yıllık maliyetler emisyon azaltımı, kayıt ücretleri, depo gazı emisyonlarının azaltımının izlenmesi ve doğrulanması ile ilgili maliyetlerdir [10].

**Proje Maliyetleri:** Proje süresi boyunca oluşan depo gazı miktarlarındaki değişkenlikten dolayı, tesisin kurulum kapasitesinin minimum, maksimum ya da ortalama biyogaz oluşumuna göre planlanması gereklidir. Bu husus tesis için en uygun teknolojinin belirlenmesi açısından önemlidir. Burada, depo gazı enerji kazanım sistemlerinin yüksek maliyetlerinden dolayı kapasite analizinde 15 yıllık proje sürecinde en düşük gaz oluşum miktarına yakın kapasitelendirme çoğunlukla önerilmektedir. Ancak, bu durumda elektrik üretimi potansiyelinde yeteri kadar faydalanamama durumu ortaya çıkabilir. En iyi kapasitelendirme yaklaşımı, depo gazı oluşum eğrisi, elektrik gelirleri, diğer gelir akışları

ve sözleşme şartlarının değerlendirmesi ile belirlenir. Minimum ve maksimum gaz akışlarının ekonomik açıdan analizi de faydalı olabilir. Ayrıca, zamanla gaz oluşumunun artışına göre ilave üretim kapasitesi de göz önünde bulundurulmalıdır [10].

**Direkt Kullanım Projeleri Maliyetleri:** Direkt kullanım projeleri son kullanıcıların depolama sahasına makul uzaklıkta olması durumunda uygulanabilir bir alternatif olarak değerlendirilebilir. Direkt kullanım projelerine örnek olarak endüstriyel buhar kazanları, proses ısıtıcıları, endüstriyel fırınlar, ocaklar ve endüstriyel, ticari ya da kurumsal tesislerin ortam ısıtması verilebilir. Direkt kullanım projelerinde, son kullanıcıların ihtiyaçlarına göre maliyetler değişkenlik göstermesine rağmen temel olarak aşağıdaki maliyetleri kapsamaktadır.

- Son kullanıcının ihtiyaçlarına uygun olarak gazın arıtımı ve sıkıştırılması,
- Son kullanıcıya ulaştırmak için gaz iletim hattı,
- Boru hattı boyunca depo gazının yoğunlaşmasının kontrolü için gaz yoğunlaştırma sistemi.

Boru hattının ölçüleri yatırım maliyetini etkilemektedir. Zamanla biyogaz artışı olması beklenen projelerde, maliyet açısından en etkin yöntem boru ölçülerinin proje süresi boyunca tam kapasiteye yakın biçimde projelendirilmesi ve gaz akışlarındaki artışa göre arıtma ile basınç ekipmanlarının eklenmesidir [10].

Depo gazı basınç ve arıtma sistemlerinin maliyetleri, kompresör, nem giderme ve depo gazının kullanıma hazır hale gelmesi için gerekli filtrasyon sistemlerinin maliyetleridir. Son kullanıcının ihtiyacına göre daha iyi bir gaz arıtma gerekiyorsa maliyet yükselir. Gaz iletim hattı maliyetleri tipik yapım işi şartlarına göre ve boru hattı tasarımına göre öngörülmelidir. Ayrıca, direkt kullanım sistemlerinde boru hattının geçtiği rotadaki arazi koşulları ve demiryolu, otoyol ve su kaynakları gibi diğer engeller de yatırım maliyetini etkilemektedir [10].

**Diğer proje alternatifleri:** Elektrik üretimi ve direkt kullanım projelerine ilave olarak, daha az kullanılan entegre ısı ve enerji üretim sistemleri, sızıntı suyu buharlaştırma, araç yakıtı ve doğalgaza dönüşüm gibi depo gazı enerji temini projeleri de mevcuttur. Bu alternatifler genel uygulamalar kadar yaygın olmasalar da doğru şartlar altında diğer alternatifler arasında maliyet açısından en etkin yöntem olarak ön plana çıkabilirler [10].



Son kullanıcıların depolama sahasına yakın olduğu durumlarda ya da depo gazının hem elektrik üretimi için hem de atık ısının kullanımı için son kullanıcıya taşındığı şartlarda entegre ısı ve enerji üretim sistemleri daha iyi bir alternatif olarak değerlendirilebilir. Son kullanıcı tarafından üretilen elektrik kullanılabilir ya da dışarıya satılabilir [10].

Sızıntı suyu buharlaştırma sistemlerinde, depo gazının sızıntı suyunun buharlaştırılması amacıyla kullanılması, böylece sızıntı suyunun miktarının ve dolayısıyla bertaraf maliyetinin azaltılması hedeflenir. Bu projeler, arıtmanın olmadığı ya da maliyetli olduğu durumda uygulanabilir [10].

Araç yakıtı olarak kullanım projelerindeki maliyetler yakıt dolun istasyonları ve araçların yakıtı uygun hale dönüşüm maliyetleri ile ilgilidir.

Depo gazının doğalgaza dönüşüm projeleri yüksek maliyetli olmalarına karşın yükselen enerji maliyetleri bu projeleri maliyet etkin hale getirebilir. Bu tür projeler özellikle büyük depolama sahalarında ve doğalgaz iletim hattına yakın sahalarda uygulanabilir.

Depo gazı enerji temini projelerinde proje harcamaları aşağıda özetlenmektedir.

- Depo gazı toplama, yakma ve enerji temini için başlangıç yatırımı,
- Depo gazının depolama sahası sahibinden satın alınması,
- Sistemin yıllık işletme ve bakım masrafları.

Direkt kullanım projelerinde proje harcamaları aşağıda özetlenmektedir.

- Depo gazı toplama, yakma, gaz arıtma/yoğunlaştırma ve borulama için başlangıç yatırımı,
- Depo gazının depolama sahası sahibinden satın alınması,
- Sistemin yıllık işletme ve bakım masrafları.

Depo gazı yakma sistemi projelerinde proje harcamaları aşağıda özetlenmektedir.

- Depo gazı toplama ve yakma için başlangıç yatırımı,
- Depo gazının depolama sahası sahibinden satın alınması,
- Sistemin yıllık işletme ve bakım masrafları.

#### 4.2.2 Gelirler

**Elektrik Üretimi Proje Gelirleri:** Bir elektrik üretimi projesinin ekonomik analizinde sitede kullanılan elektrik maliyetinin karşılanması hususu da göz önünde bulundurulmalıdır. Proje ile üretilen enerji depolama sahasının diğer sistemlerinde kullanılarak bu sayede dışarıdan satın alınması gereken elektrik maliyeti karşılanabilir.

Depo gazı enerji temini projeleri yenilenebilir enerji olarak görülmesi ve bu nedenle yeşil enerji olarak kabul edilmesi sebebiyle ilave çevresel gelir sağlayabilirler. Bu gelirler, teşvikler, vergi indirimleri, sera gazı emisyon ticareti gibi gelirlerdir. Bu gelirler ekonomik analizde çeşitli şekillerde gösterilebilirler. Ancak, en çok kullanılanı cents/kWh şeklindedir. Depo gazı maliyetleri nakit hibeler, kWha başına yenilenebilir enerji vergileri, CO2 eşdeğeri üzerinden ton başına sera gazı maliyetleri ve kWha başına elektrik vergi ödemeleri olmak üzere dört başlık altında toplanabilir.

Aşağıdaki liste herhangi bir depo gazı enerji temini projesi için kullanılabilir çevresel gelir akışlarını içermektedir.

- Yüksek fiyatlandırma (Premium Pricing), yeşil enerji programları doğrultusunda uygulanan yenilenebilir enerji projeleri için sıklıkla uygulanmaktadır. Burada, üretilen enerji yenilenebilir enerji olduğu için normal enerji satış fiyatlarının üzerinde gelir elde edilebilmektedir.
- Yenilenebilir enerji sertifikası, serbest piyasada tüketicilerin çevresel etkilerinin azaltılması amacıyla satılmaktadır. Bunlar tipik olarak 1 megawatt-saat(MWh) lik elektrik jeneratörleri ile birlikte endüstri tesislerine, ticari kuruluşlara, kurumlara ve hatta talep edilmesi durumunda sivil halka bile satılabilmektedir. Eğer, üretilen enerji yeşil enerji programları yoluyla pazarlanamıyorsa proje sahibi kar amacıyla yenilenebilir enerji sertifikalarını serbest piyasaya sürebilir.
- Vergi kredileri, vergi muafiyetleri ve diğer vergi teşvikleri ile ulusal ve bölgesel hibe mekanizmaları, düşük maliyetli bonolar ve borçlanma programları Depo gazı enerji temini projeleri için kullanılabilir. Bir diğer sık kullanılan finansal kaynak ise Elektrik Kooperatifleri, kamu kuruluşları ve yerel enerji üreticileri için depo gazı enerji temini projelerini de içeren yenilenebilir enerji projeleri için finansal kaynak sağlayan Temiz Yenilenebilir Enerji Programıdır (Clean Renewable Energy Bond Program-CREB).

- Pek çok ulusal ve bölgesel kurumlar kendi sorumluluğundaki sera gazı emisyonlarını azaltmak için gerekli adımları atmaktadır [10].

**Proje Gelirlerinin Direkt Kullanımı:** Bu durumda gelirler elde edilen depo gazının son kullanıcıya satışı ile gerçekleşmektedir. Bu nedenle üretilen depo gazının fiyatı elde edilecek geliri de belirlemektedir.

Elektrik üretim tesislerinde aşağıdaki gelirler değerlendirilebilir:

- Üretilen elektrik enerji firmalarına satılabilir.
- Sera gazı emisyon azaltımı sertifikalandırılarak satılabilir.

Gazın direkt kullanımında aşağıdaki gelirler değerlendirilebilir.

- Depo gazı son kullanıcılara satılabilir.
- Sera gazı emisyon azaltımı sertifikalandırılarak satılabilir.

Yakma sistemlerinde ise sadece sera gazı emisyon azaltımı sertifikalandırılarak satılabilir [10].

#### **4.2.3 Ekonomik Analiz**

Bir proje için gelirler ve maliyetler belirlendikten sonra uygulanabilir olarak değerlendiriliyorsa detaylı bir ekonomik fizibilite analizi yapılması gerekmektedir. Detaylı analiz yapıldığında, maliyet ve gelir akışını hesaplamak için bir hesaplama modeli kullanılmalıdır. Böylece proje ömrü boyunca muhtemel ekonomik performansa ilişkin daha somut bir netice elde edilebilir. Burada kullanılan temel parametreler;

- Proje yatırım ve işletme maliyetleri,
- İşletme özeti,
- Finansman Maliyetleri,
- Enflasyon Oranları,
- Üretilen ürünün piyasa fiyatı,
- Gelir hesaplama,
- Maliyet belirsizlik faktörleri,
- Vergiler.

Proje için kullanılan finansal mekanizmalar üretilen ürünün maliyetini etkilemektedir. Proje ömrü, krediler, faiz oranları, vergiler, iskonto oranları, teminat oranları gibi faktörlerde projenin ve böylece üretilecek ürünün maliyetini doğrudan etkilemektedir [10].

Sonuç olarak, uygulanması planlanan bir projenin yatırım kararının alınabilmesi için detaylı finansal analiz yapılması ve projenin finansal sürdürülebilirliğinin değerlendirilerek en uygun alternatifin belirlenmesi evsel nitelikli katı atık depolama alanlarında oluşan metan gazından enerji üretimi projelerinin başarılı olabilmeleri için gerekliliktir [10].

## 5. IPCC 2006 REHBERİNE GÖRE KATI ATIK DEPOLAMA SAHALARINDA OLUŞAN METAN GAZININ HESAPLANMASI

### 5.1 Giriş

Evsel, endüstriyel ve diğer katı atıkların işlenmesi ve bertarafı sürecinde önemli miktarda metan ( $CH_4$ ) üretiminin yanında, biyojenik karbondioksit ( $CO_2$ ), azotdioksit ( $N_2O$ ) ile daha az miktarlarda azot oksitler ( $NO_x$ ), karbon monoksit ( $CO$ ) ve metan dışı uçucu organik bileşiklerin üretimi gerçekleşmektedir. Katı atık depolama alanlarında üretilen metan gazı, küresel insan kaynaklı sera gazı emisyonlarının yüzde 3-4'ünü oluşturmaktadır.

Son yıllarda, birçok sanayileşmiş ülkede atık yönetiminde üretilen atığın azaltılması amacıyla uygulanan atık minimizasyonu, geri dönüşüm ve tekrar kullanım politikalarının yanında atıkların çevresel etkilerini azaltmak için alternatif uygulamalar üzerinde durulmaktadır. Ayrıca, katı atık depolama alanlarında oluşan metan gazının azaltımı amacıyla katı atık depo gazı geri dönüşüm uygulamaları daha yaygın hale gelmiştir.

1996 IPCC Ulusal Sera Gazı Envanteri Rehberleri ve Ulusal Sera Gazı Envanterlerinde Belirsizlik Yönetimi için İyi Uygulamalar Rehberinde katı atık depolama alanlarında oluşan metan emisyonlarının hesaplanması için iki yöntem tarif edilmektedir:

- Kütle-Denge Yöntemi ve
- Birinci Dereceden Çürüme Yöntemi.

Bu bölümde, yıllık emisyonların hesaplanmasında Birinci Dereceden Çürüme yöntemi daha sağlıklı veri sağlaması itibariyle ön plana çıkarılmaktadır. Bu bölümde, Kütle-Denge Yöntemi yerine, referans değerleri veren ve adım adım rehberlik sağlayan basit bir elektronik modeli de içeren Birinci Dereceden Çürüme yöntemi verilmektedir. 2006 IPCC Rehberine göre tüm ülkelerin Birinci Dereceden Çürüme metodunu kullanması gerekmektedir [14].

### 5.2 Metodolojik Hususlar

#### 5.2.1 Yöntemin Seçimi

IPCC metodolojisi, katı atık depolama alanlarında oluşan metan emisyonlarının hesaplanmasında birinci dereceden çürüme yöntemine dayanmaktadır. Bu yöntem, varsayılan parçalanabilir organik bileşenin (DOC; Degradable Organic Carbon) bir kaç on yıl boyunca yavaş yavaş çürümesi sonucunda  $CH_4$  ve  $CO_2$  oluşumunun gerçekleştiğini

varsaymaktadır. Eğer koşullar sabit ise, metan üretim hızı sadece atıkta bulunan karbon miktarına bağlıdır. Katı atık depolama alanlarında oluşan metan emisyonları atıkların depolanmasından itibaren ilk birkaç yıl içinde en yüksek değerlere ulaşmakta, daha sonra yıllar geçtikçe çürüme sonucu bakterilerin ayrışabilir karbonu parçalaması neticesinde azalmaktadır [14].

Katı atık depolama alanlarındaki ayrışabilir materyallerin CH<sub>4</sub> ve CO<sub>2</sub>'ye dönüşümü bir dizi reaksiyon zinciri ve paralel reaksiyonlar yoluyla gerçekleşmektedir. Model, bütün olarak karmaşık ve depolama sahalarının şartlarına göre değişken olabilir. Ancak, laboratuvar analizleri ve saha gözlemleri sonucu elde edilen metan üretim verileri birinci dereceden kinetik ile genel ayrışma sürecinin tahmin edilebileceğini göstermekte olup bu husus yaygın olarak kabul edilmiştir (Örn: Hoeks, 1983). Bu nedenle, katı atık depolama alanlarında oluşan metan emisyonlarının hesaplanması için temel birinci dereceden çürüme modeli benimsenmiştir.

Atık türleri için yarı ömürler birkaç yıl ya da daha uzun süreler olarak değişkenlik göstermektedir. Birinci dereceden çürüme yöntemi, kabul edilebilir ölçüde doğru sonuçlar elde etmek için 3-5 yarı ömür boyunca depolama sahasında toplanan atık miktarı için ölçülmüş ya da tahmini verilere ihtiyaç duymaktadır. Bu da, iyi bir uygulama ve kabul edilebilir doğrulukta sonuçlar için tipik bertaraf uygulama koşulları altında en az 50 yıllık bertaraf verilerine karşılık gelmektedir.

IPCC 2006 rehberi, tarihsel atık bertaraf verilerinin nasıl tahmin edileceği konusunda rehberlik sağlamanın yanında, tüm parametreler için referans değerleri ve ülkelerin birinci dereceden çürüme metodunu kullanmalarına yardımcı olmak için temel bir hesaplama modelini sağlamaktadır.

Rehberde, katı atık depolama alanlarında oluşan metan emisyonlarının hesaplanmasında üç temel kademe tanımlanmaktadır:

- Kademe 1: Referans aktivite verileri ve referans değerler üzerinden hesaplamaları içerir.
- Kademe 2: Bazı referans değerler ile birlikte ile birlikte ülke özelinde iyi kalitede aktivite verileri ve mevcut ve tarihsel depolama verileri üzerinden hesaplamaları içerir. Ülkeye ilişkin 10 yıl ya da daha eski veriler istatistiklere veya araştırmalara dayalı olmalıdır. Katı atık depolama alanlarında depolanan atığın miktarı bilgisine ihtiyaç vardır.

- Kademe 3: Ülke özelinde iyi kalitede aktivite verileri ile birlikte ulusal ölçekte geliştirilen referans değerler üzerinden hesaplamaları içerir. Temel referans değerler, atığın yarı ömrü, metan üretim potansiyeli (Lo), atıktaki parçalanabilir organik karbon (DOC-Degradable Organic Carbon) içeriği ve parçalanabilir organik karbonun çürüme oranıdır (DOCf).

Bu çalışmada, ülkemiz koşulları göz önünde bulundurularak mevcut erişilebilir aktivite verileri ile birlikte IPCC 2006 rehberinde verilen referans değerler üzerinden hesaplama yapılmıştır (Kademe 2) [14].

### 5.2.1.1 Birinci Dereceden Çürüme Modeli

#### Metan Emisyonları

Katı atık depolama alanlarında oluşan bir yıllık metan emisyonları Eşitlik 5.1 kullanılarak hesaplanabilir. Metan, anaerobik koşullar altında organik maddelerin bozunması sonucu oluşur. Oluşan metanın bir kısmı, depolama alanının yüzeyinde okside olur. Geriye kalan metan enerji üretimi için değerlendirilebilir veya yakılarak bertaraf edilir. Böylece, depolama alanından yayılan metan gerçekte üretilen miktardan daha az olacaktır [14].

#### Depolama sahasında oluşan CH<sub>4</sub> emisyonları:

$$\text{CH}_4 \text{ Emisyonları} = [ \sum_x \text{CH}_4 \text{ üretilen}_{x,T} - R_T ] \cdot (1 - \text{OX}_T) \quad (5.1)$$

CH<sub>4</sub> Emisyonları : T yılı için yıllık üretilen metan emisyonu, Gg

T : Envanter yılı

X : Atık kategorisi

R<sub>T</sub> : T yılı için yıllık metan geri kazanımı, Gg

OX<sub>T</sub> : T yılı için oksidasyon faktörü, (oran)

Geri kazanılan metan, üretilen metan değerinden çıkarılmalıdır. Çünkü depolama sahasının yüzeyindeki oksidasyon için sadece geri kazanılmayan metanın oranı önemlidir.

#### Metan Üretimi

Depolama sahasının yıllık metan üretim potansiyeli ilk on yıldan sonra yıllar geçtikçe azalacaktır. Birinci dereceden çürüme modeli, her yıl CH<sub>4</sub> ve CO<sub>2</sub> 'ye indirgenen parçalanabilir malzemenin oranını tanımlayan bir üstel faktör üzerine inşa edilmiştir.

Modeldeki ana unsurlardan biri depolama alanında depolanan atığın parçalanabilir organik madde içeriğidir (DOCm-Degradable Organic Matter). Bu değer, depolama sahasına gelen atık kategorileri (belediye atıkları, arıtma çamurları, endüstriyel atıklar v.b.) ve atık tipleri

(yiyecek, kâğıt, ağaç, tekstil v.b.) bilgileri ya da alternatif olarak depolanan atığın bileşimindeki parçalanabilir organik karbon miktarı üzerinden hesaplanır. Ayrıca, ülkedeki depolama sahasının tipi ve Bölüm 5.2.3'de tanımlanan parametrelere ilişkin bilgilere ihtiyaç vardır. Kademe 1 için bölgesel referans aktivite verisi ve referans IPCC parametreleri kullanılabilir ve bu değerler elektronik modele girilmiştir. Kademe 2 ve 3 için ise ülkeye özgü aktivite verilerine parametrelere ihtiyaç duyulmaktadır [14].

Metan üretimi hesabına ilişkin eşitlikler aşağıda verilmiştir. Tüm atık kategorileri için metan emisyonlarının hesabı aynı olduğu için eşitliklerde atık kategorilerine ilişkin hususlar ihmal edilmiştir.

Yıllar boyunca ortaya çıkan metan üretim potansiyeli, depolama sahaslarında depolanan atığın bileşimi, miktarı ve depolama sahasındaki atık yönetimi faaliyetleri üzerinden hesaplanmaktadır.

Parçalanabilir ve ayrışabilir organik karbon (DDOC<sub>m</sub>; Decomposable Degradable Organic Carbon) miktarının hesaplanması için temel eşitlik Eşitlik 5.2 'de verilmiştir. DDOC<sub>m</sub>, katı atık depolama sahasındaki organik karbonun anaerobik koşullar altında parçalanabilir kısmıdır. Bu değer, denklemler ve elektronik tablo modellerinde DDOC<sub>m</sub> olarak kullanılmıştır. İndeks m kütle için kullanılmaktadır. DDOC<sub>m</sub> üretilen atık miktarına (W), atıktaki parçalanabilir organik karbonun oranına (DOC), anaerobik koşullar altında çürüyen atıktaki ayrışabilir organik karbonun oranına (DOC<sub>f</sub>) ve metan düzeltme faktörü (MCF) olarak tanımlanan depolama sahasındaki atığın aerobik şartlar altında çürüyecek kısmı ile hesaplanmaktadır [14].

#### **Parçalanabilir ve ayrışabilir organik karbon miktarı:**

$$DDOC_m = W \cdot DOC \cdot DOC_f \cdot MCF \quad (5.2)$$

DDOC <sub>m</sub>	: Parçalanabilir ve ayrışabilir organik karbon miktarı, Gg
W	: Depolanan atık miktarı, Gg
DOC	: Depolama yılındaki ayrışabilir organik karbon, oran, Gg C/Gg
DOC <sub>f</sub>	: Ayrışabilir organik karbonun oranı
MCF	: Anaerobik çürüme için metan düzeltme faktörü, oran

Her ne kadar metan üretim potansiyeli (Lo) bu rehberlerde açık bir şekilde kullanılmasa da, bu değer DDOC<sub>m</sub> üretimi, gazdaki metan derişimi (F) ve metan ile karbonun moleküler ağırlık oranının çarpımına eşittir.



### **Metan üretim potansiyeli:**

$$Lo = DDOCm \cdot F \cdot 16 / 12 \quad (5.3)$$

- Lo : Metan üretim potansiyeli, Gg CH<sub>4</sub>  
DDOCm : Ayrışabilir organik karbon, Gg  
F : Üretilen depo gazındaki metan oranı  
16/12 : CH<sub>4</sub>/C moleküler ağırlık oranı

### **Birinci Dereceden Çürüme Denklemleri**

Birinci dereceden çürüme reaksiyonunda, ürün miktarı her zaman reaktif malzeme miktarı ile orantılıdır. Bu, atığın depolama sahasında depolandığı yıl ile yıllık üretilen CH<sub>4</sub>'ın ilgisinin olmadığı anlamına gelir. Önemli olan mevcut durumda sahada çürümekte olan malzemenin miktarıdır.

Bu, aynı zamanda ilk yıl depolama sahasında depolanan bozunabilir atık miktarını biliniyorsa, hesaplama yönteminde her yıl ilk yıl olarak kabul edilebilir anlamına gelmekte ve hesaplama, çürüme reaksiyonu 1 Ocaktan itibaren başlayacak şekilde varsayılarak aşağıdaki iki basit denklem yardımı ile yapılmaktadır [14].

### **T yılı sonunda atık depolama sahasında biriken parçalanabilir ve ayrışabilir organik karbon miktarı:**

$$DDOCma_T = DDOCmd_T + (DDOCma_{T-1} \cdot e^{-k}) \quad (5.4)$$

### **T yılı sonunda ayrışan parçalanabilir ve ayrışabilir organik karbon miktarı:**

$$DDOCm_{decomp_T} = DDOCma_{T-1} \cdot (1 - e^{-k}) \quad (5.5)$$

- T : Envanter yılı  
DDOCma<sub>T</sub> : T yılı sonunda depolama sahasında biriken DDOCm, Gg  
DDOCma<sub>T-1</sub> : T-1 yılı sonunda depolama sahasında biriken DDOCm, Gg  
DDOCmd<sub>T</sub> : T yılında depolama sahasında biriken DDOCm, Gg  
DDOCm<sub>decompT</sub> : T yılında depolama sahasında ayrışan DDOCm, Gg  
k : Reaksiyon Sabiti,  $k = \ln(2)/t_{1/2}$  (y-1)  
t<sub>1/2</sub> : yarı ömür (y)

## Üretilen Metanın Hesaplanması

Ayrıştırılabilir maddelerden oluşan metan gazının miktarı üretilen depo gazındaki metan oranı ile  $CH_4/C$  moleküler ağırlık oranının çarpımı ile bulunmaktadır [14].

### Ayrışmış DDOC<sub>m</sub>'den üretilen metan miktarı:

$$CH_4 \text{ üretilen } T = DDOC_{m T} \cdot F \cdot 16 / 12 \quad (5.6)$$

$CH_4$ üretilen $T$	: Üretilen metan miktarı
$DDOC_{m T}$	: T yılda parçalanmış DDOC <sub>m</sub> , Gg
F	: $CH_4$ oranı,
16/12	: $CH_4/C$ moleküler ağırlık oranı

## Temel Birinci Dereceden Çürüme Hesaplama Modeli

Bu model yukarıda belirtilen 5.4 ve 5.5 eşitlikleri esas alınarak geliştirilmiştir. Model her yıl depolanan atık miktarı ve önceki yıllardan kalan atık miktarı ile her yıl üretilen metan ve karbondioksit miktarını hesaplamaktadır.

Model, metan emisyonlarının hesabında, erişilebilir aktivite verilerine göre iki alternatif sunmaktadır. Ülkeler, modeli kullanırken mevcut verilerine göre bu iki alternatiften birini tercih etmelidir [14].

- Birinci seçenek, atık kompozisyonu verilerine bağlı çoklu faz modelidir. Burada, atığın bileşimindeki her bir madde (Mutfak atıkları, park ve bahçe atıkları, kâğıt, ağaç, tekstil vb.) ayrı ayrı girilmektedir.
- Diğer seçenek atığın miktarına bağlı tekli faz modelidir. Burada atığın toplam miktarı üzerinden hesaplama yapılmaktadır.

Modelde, her bir atık kategorisinde ve birinci seçenek için her bir atık tipinde ayrışma yarı ömrü için ayrı değerler girilebilir. Ya da ayrışma yarı ömrü değeri her atık kategorisi ve tipi için aynı değer de kabul edilebilir. Birinci yaklaşımda, atık sahasında yer alan farklı türdeki atıkların birbirinden bağımsız olarak ayrıştığı kabul edilir. İkinci yaklaşımda ise, atık türlerinin ayrışmalarının birbirine bağlı olarak gerçekleşeceği varsayılır. Bu iki yaklaşımdan hangisinin daha iyi olduğuna dair bir kanıt bulunmamaktadır. Ülkeler sahip oldukları verilere göre iki seçenektan birini seçebilir. Atık kompozisyonu verileri nispeten sabit ise model benzer sonuçları vermektedir. Ancak, yemek atıkları veya parçalanabilir organik maddelerin miktarlarında önemli farklılıklar bulunması durumunda modelden elde

edilen sonuçlar da farklı olmaktadır [14].

### **5.2.2 Aktivite Verilerinin Belirlenmesi**

Aktivite verilerinin belirlenmesinde ülkelerin son 50 yılına dair kişi başı atık miktarları, nüfus bilgileri, kişi başı gayri safi milli hâsıla değerleri ve endüstriyel üretim bilgileri gibi verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Ülkeler, atık miktarlarına ilişkin 50 yıllık veriye sahip olmadıklarında bu değerleri nüfus üzerinden varsayım yolu ile tamamlayabilirler. Diğer veriler de ulusal istatistiki bilgilerden temin edilebilir. Ulusal veriler yetersiz kaldığında uluslararası istatistiki bilgiler de kullanılabilir [14].

### **5.2.3 Emisyon Faktörlerinin ve Parametrelerin Belirlenmesi**

#### **5.2.3.1 Parçalanabilir Organik Karbon (DOC: Degradable Organic Carbon)**

Parçalanabilir organik karbon, atıktaki biyokimyasal parçalanabilir organik karbon şeklinde ifade edilebilir. Bu değer, atığın kompozisyonuna bağlı olarak tahmin edilebilir ve Denklem 5.7’de görüldüğü üzere atıktaki farklı bileşenlerin parçalanabilir karbon içeriklerinin ağırlıklı ortalamaları ile hesaplanabilir. Model, DOC değerleri için ekteki IPCC 2006 Rehberi Tablo 2.4’de belirtilen referans değerleri sunmaktadır [14].

#### **Referans karbon içeriği değerleri ile DOC hesaplanması:**

$$DOC = \sum_i (DOC_i \cdot W_i) \quad (5.7)$$

DOC = Atıktaki parçalanabilir organik karbonun oranı, Gg C/Gg waste

DOC<sub>i</sub> = i tip atıktaki parçalanabilir organik karbonun oranı,

Örn., Kağıt için referans değer 0.4

W<sub>i</sub> = Atık kategorisi ile atık tipinin oranı

Örn., Doğu Asya’da kağıt için referans değer 0.188

DOC değerinin hesaplanmasında atığın bileşimindeki inert maddelerin (kâğıt, cam, plastik, metal gibi parçalanmayan atıklar) oranı da önemlidir. Ekte yer alan IPCC 2006 Rehberi Tablo 2.3’de bu değerler için verilen referans değerler sunulmaktadır.

Rehber, bu değerlerin hesaplanması için ülkede yeterli veri bulunması durumunda ülkeye özgü değerlerin kullanılmasını önermektedir [14].

### 5.2.3.2 Çözünmüş Parçalanabilir Organik Karbonun Oranı (DOCf)

DOCf, depolama sahasından ayrılmış ve parçalanmış olan karbonun oranının miktarıdır. Bu değer, depolama sahasındaki parçalanabilir organik karbonun bir kısmının anaerobik koşullar altında parçalanmayacağını ya da çok yavaş şekilde parçalanacağını gösterir. Rehber DOCf için referans değer olarak 0,5 değerini önermektedir. DOCf değeri sıcaklık, nem, pH, atık kompozisyonu gibi pek çok parametreye bağlıdır. DOCf için ulusal veriler ya da benzer ülkelerin verileri iyi araştırılmaları ve dokümanite edilmeleri koşuluyla kullanılabilir [14].

### 5.2.3.3 Metan Düzeltme Faktörü (MCF: Methane Correction Factor)

Atık bertaraf uygulamaları saha yönetimine, atığın kontrol tipine ve saha özelliklerine göre değişkenlik göstermektedir. MCF düzensiz depolama sahalarının, anaerobik koşullarda yönetilen düzenli depolama sahalarından daha az metan ürettiğini gerçeğinden dolayı hesaplanmaktadır. Düzensiz depolama sahalarında atıklar daha geniş bir oranda sahanın üst yüzeyinde aerobik olarak ayrışmaktadır. 5 metreden daha derin şekilde kullanılan düzensiz depolama sahalarında durum daha iyidir. Yarı aerobik yönetilen düzenli depolama sahalarında ise atık yüzeyinde hava ile temas gerçekleşmekte ve yarı aerobik durum oluşmaktadır. Çizelge 5.1 IPCC Rehberine göre saha koşulları için MCF referans değerlerini göstermektedir [14].

**Çizelge 5.1: Saha Tipine Göre Metan Düzeltme Faktörü (MCF) Değerleri**

Saha Tipi	Metan Düzeltme Faktörü
Anaerobik - Düzenli Depolama Sahası	1,0
Yarı aerobik - Düzenli Depolama Sahası	0,5
Düzenli Depolama Sahası (Derinlik > 5m)	0,8
Düzenli Depolama Sahası (Derinlik < 5m)	0,4
Diğer Sahalar (Kategorize edilemeyen)	0,6

#### 5.2.3.4 Depo Gazındaki Metan Oranı (F)

Çoğu depolama sahası yaklaşık % 50 oranında metan içeren depo gazı üretmektedir. Yalnızca bileşiminde önemli miktarda yağ ve yakıt içeren atıklar % 50'nin üzerinde metan içeren depo gazı üretebilirler. Bu nedenle, IPCC Rehberi metan oranı için 0,5 referans değerini önermektedir [14].

#### 5.2.3.5 Oksidasyon Faktörü (OX)

Oksidasyon faktörü, depolama sahasındaki metanın toprakta ya da ortamda okside olan miktarını ifade etmektedir. Saha kalınlığı, fiziksel şartlar ve nem oksidasyon faktörünü etkilemektedir. Çalışmalar, iyi yönetilen düzenli depolama sahalarının düzensiz sahalarla göre daha yüksek oksidasyon değerlerine sahip olduğunu göstermektedir. Çizelge 5.2 IPCC 2006 Rehberine göre oksidasyon faktörü için referans değerleri göstermektedir [14].

**Çizelge 5.2: Saha Tipine Göre Metan Oksidasyon Faktörü (OX) Değerleri**

Depolama Sahası Tipi	Oksidasyon Faktörü (OX)
Düzenli, düzensiz ve diğer sahalarda	0
Düzenli ve oksidasyon malzemesi (toprak ve kompost gibi) ile donatılmış sahalarda	0,1

#### 5.2.3.6 Yarı Ömür

Yarı ömür değeri  $t_{1/2}$ , atıktaki parçalanabilir organik karbonun başlangıçtaki ağırlığının yarısına ulaşması için gereken zamanı ifade etmektedir. Modelde ve verilen eşitliklerde k reaksiyon sabiti kullanılmaktadır. k ile  $t_{1/2}$  arasındaki ilişki  $k = \ln(2) / t_{1/2}$  şeklindedir. Yarı ömür, atık kompozisyonu, iklim koşulları, saha koşulları, işletme koşulları gibi pek çok durumdan etkilenmektedir. Arjantin, Yeni Zelanda, Amerika Birleşik Devletleri, Birleşik Krallık ve Hollanda'da yapılan çalışmalar  $t_{1/2}$  değerinin 3 ile 35 yıl arasında değiştiğini göstermektedir.

Buna göre en hızlı yarı ömür değerleri ( $k = 0,2$ ;  $t_{1/2} = 3$  yıl) yüksek nem koşullarında ve yemek artıkları gibi hızlı ayrışabilen atıklar için, en yavaş değerler de ( $k = 0,02$ ;  $t_{1/2} = 35$  yıl) kuru saha koşullarında ve kağıt ve ağaç gibi yavaş ayrışan atıklar için düşünülebilir. Ülkeler kendi koşullarına göre bu değerleri belirlemelidir.

Değerlerin atanmasında iki ana yaklaşım önerilmektedir. Birinci yaklaşımda, atıkların bileşimindeki materyallerin ağırlıklarına göre değerlendirme yapılarak tek bir değer atanması; ikinci yaklaşımda ise atığın bileşimindeki materyallerin birbirinden bağımsız

olarak değerlendirilerek her bir materyal için ayrı ayrı değerler atanması beklenmektedir. Bu iki alternatiften herhangi birinin üstünlüğü bulunmamaktadır [14].

k ile  $t_{1/2}$  için referans alınabilecek değerler ekte yer alan IPCC 2006 Rehberi Bölüm 3 Tablo 3.3 ve Tablo 3.4’de verilmektedir.

#### **5.2.3.7 Metan Geri Kazanımı (R)**

Depolama sahalarında oluşan metan gazı geri kazanılabilir ya da enerji üretimi için veya bertaraf edilmek için yakılabilir. Modeldeki değer, bu şekilde kullanılan metan gazının oranını belirtmektedir. Geri kazanılan metan Denklem 1’de R olarak belirtilmiştir. IPCC 2006 Rehberinde metan geri kazanımı için verilen referans değer 0’dır [14].

#### **5.2.3.8 Gecikme Zamanı**

Çoğu katı atık depolama sahasında yıllar boyunca sürekli günlük depolama yapılır. Ancak metan üretimi atık depolama başlar başlamaz gerçekleşmez. İlk birkaç hafta ortamdaki oksijen tükenene kadar ayrışma aerobiktir. Daha sonra, toplamda birkaç ay süren ve hidrojen üretiminin gerçekleştiği asidifikasyon süreci başlar. Metan üretimi ise asidifikasyon sürecinden normal koşullara geçiş sürecinde başlar.

Atık depolama ile metan üretimi arasındaki süreç kimyasal olarak karmaşıktır ve ardışık mikrobiyal reaksiyonlar içermektedir. Gecikme zamanı belirsizdir ve atık kompozisyonuna ve iklim koşullarına bağlı olarak değişkenlik gösterir. IPCC 2006 Rehberi gecikme zamanı için referans değer olarak 6 ay değerini önermektedir. Model kullanıcıya referans değeri 0 ile 6 ay arasında kalmak koşuluyla değiştirme imkânı vermektedir. Ancak, referans değer dışındaki değerlerin kullanımı için gerekli ölçüm ya da hesaplamaların verilmesi gerekmektedir [14].

### **5.3 Modelin Çalıştırılması İçin Verilerin Temini ve Referans Değerlerin Belirlenmesi**

Daha önce de belirtildiği gibi Türkiye için evsel nitelikli katı atıkların depolanması sonucunda oluşan metan gazının hesaplanması için mevcut verilerin kullanılarak ve gerektiğinde referans değerler atanarak modelin çalıştırılması gerekmektedir. Buna göre söz konusu veriler aşağıda belirtildiği şekilde kullanılmıştır.

**Aktivite Verileri:** 1950 yılından itibaren yıllara göre nüfus bilgileri ve 2030 yılına kadar olan nüfus projeksiyonları Türkiye İstatistik Kurumunun internet sayfasından temin edilmiştir. Projeksiyonlarda TÜİK 2013-2075 Senaryo 1 verileri kullanılmıştır.

TÜİK tarafından derlenen ulusal atık verilerine bakıldığında ise, atık istatistikleri kapsamında belediyeler tarafından ya da belediyeler adına toplanan belediye atık miktarı, hizmet edilen nüfus yüzdesi, diğer atıklardan ayrı toplanan tıbbi atık miktarı, bertaraf yöntemlerine göre bertaraf edilen belediye atık ve tıbbi atık miktarı, çöplüğün 1000 m yakınında bulunan yerler, çöplüklerden çıkan sızıntı suyu miktarı ve arıtılma durumu, kapatılan çöplüklerin ne amaçla kullanıldığı ve buralarda enerji üretiminin olup/olmadığı, çöplüklerde pil, akü, hafriyat ve yıkıntı atığı vb için ayrı bir bölümün olup olmadığı, belediyelerin katı atık yönetimi ile ilgili çıkarılan yönetmelik hükümlerini uygulayıp uygulamadıkları ve uygulamama sebepleri derlenmektedir. 1994-2004 dönemi için ise belediye teşkilatı kurulmamış belediyelere ait veri derlenememiştir.

Dolayısıyla, Türkiye'deki atık üretimi için TÜİK'in mevcut verileri IPCC 2006 hesaplama modeli için toplam üretilen atık miktarı dışında yeterli veri girdisini sağlayamamaktadır. Hem bu sebeple, hem de yıllık kişi başına düşen atık miktarında ülkemiz için TÜİK atık verileri kullanılarak Çizelge 5.3'de verilen değerler hesaplanarak sağlama yapıldığında önemli bir fark bulunmadığı kanaatiyle IPCC Rehberinde Güney Avrupa Ülkeleri için verilen 0,38 ton/yıl referans değeri kullanılmıştır. Modelde verilen referans değer üzerinden üretilen atığın % 85'inin depolama sahasına getirildiği kabul edilmiştir.

**Çizelge 5.3: Türkiye İçin Yıllara Göre Kişi Başı Atık Miktarları**

<b>Yıl</b>	<b>Toplam Nüfus</b>	<b>Üretilen Atık Miktarı (Ton)</b>	<b>Kişi Başı Atık Miktarı (Ton)</b>
2004	67.599.000	25.014.000	0,37
2006	69.295.000	25.280.000	0,36
2008	71.517.100	24.361.000	0,34
2010	73.722.988	25.277.000	0,34
2012	75.627.384	25.845.000	0,34

**Atıktaki Parçalanabilir Organik Karbonun Oranı (DOC):** Çizelge 5.4’de verilen modelin sunduğu referans değerler kullanılmıştır.

**Çizelge 5.4: IPCC 2006 DOC İçin Verilen Referans Değerler [14]**

	IPCC Referans Değer		Ülkeye özgü parametreler
<b>Başlangıç Yılı</b>		1950	1950
<b>DOC (Parçalanabilir Organik Karbon)</b>			
<b>(yaş bazda ağırlık oranı)</b>	<b>Aralık</b>	<b>Referans</b>	
Yemek Atıkları	0.08-0.20	0,15	0,15
Bahçe Atıkları	0.18-0.22	0,2	0,2
Kâğıt	0.36-0.45	0,4	0,4
Ağaç ve Saman	0.39-0.46	0,43	0,43
Tekstil	0.20-0.40	0,24	0,24
Tek Kullanımlık Çocuk Bezleri	0.18-0.32	0,24	0,24
Kanalizasyon	0.04-0.05	0,05	0,05
Endüstriyel Atık	0-0.54	0,15	0,15
<b>DOCf (Farklılaşan DOC oranı)</b>		0,5	0,5

**Atık Kompozisyonu:** Çizelge 5.5’ de modelin sunduğu referans değerler verilmiştir. Burada, ülkemiz için atık kompozisyonuna ilişkin veriye yönelik çalışmaların eksikliği sebebiyle sıkıntı yaşanmıştır. Ancak, IPCC 2006 Rehberinde verilen referans değerlere bakıldığında ülkemizin atık bileşimi açısından mevcut durumunu yansıtmadığı görülmektedir. Bu nedenle, 2008 - 2012 Atık Yönetimi Eylem Planı’nda sunulan ve 2006 yılında yürütülen Katı Atık Ana Planı Projesi Atık Kompozisyonu belirleme çalışması sonucu (Bölüm 2, Şekil 2.3) göz önünde bulundurularak Çizelge 5.5’de verilen değerler uygulanmıştır. Burada, yemek atıkları için alınan % 53 değeri Türkiye’nin atık kompozisyonu çalışmasındaki mutfak atıkları ile yanabilir atıkların oranlarının toplamından, kâğıt atıkları için alınan % 16 değeri kâğıt, karton ve hacimli karton oranlarının toplamından, plastik ve diğer inert atıklar için alınan % 31 değeri ise geriye kalan plastik, metal, cam ve diğer yanmayan atıkların oranlarının toplamından elde edilmiştir.



**Çizelge 5.5: IPCC 2006 Atık Kompozisyonu İçin Verilen Referans Değerler [14]**

<b>Katı atık bertaraf sitelerine gelen atığın bileşimi</b>							
	<b>Yemek</b>	<b>Bahçe</b>	<b>Kağıt</b>	<b>Ağaç</b>	<b>Tekstil</b>	<b>Çocuk Bezi</b>	<b>Plastik ve diğer inert atıklar</b>
Referans Değerler	%30	%0	%22	%8	%5	%0	%36
Ülkeye Özgü Kullanılan Değer	%53	%0	%16	%0	%0	%0	%31

**Metan Oranı (F):** IPCC 2006 Rehberinin hesaplama modeli için sunduğu referans değer 0,5 kullanılmıştır.

**Atık Yönetim Tipi Dağılım Oranları:** Her ne kadar 2000 yılı başlarına kadar atık yönetimi açısından düzenli depolama sahalarının sayısı yok denecek kadar az idiyse de günümüzde ülkemizin toplam nüfusunun yaklaşık % 65'i düzenli depolama hizmetinden yararlanmaktadır. 2023 yılı itibariyle ise ülke nüfusunun tamamının mevzuata uygun biçimde atık yönetimi hizmetinden yararlandırılması hedeflenmektedir. Depolama sahalarının sığ ve derin olması ya da yönetilen depolama sahalarının yarı aerobik olup olmadığına dair ise herhangi bir veri ya da çalışma bulunmamaktadır.

Çizelge 5.6'da sunulan IPCC 2006 Rehberinin hesaplama modeli için sağladığı referans değerlere bakıldığında ülkemizin mevcut durumunu yansıtmadığı görülmektedir. Bu nedenle ülkemize özgü bir hesaplama için 1994 yılından önce atıklarımızın tamamının düzensiz depolama sahalarında bertaraf edildiği kabul edilmiş ve modelde kategorize edilmeyen kısımda değerlendirilmiştir. 1994 yılından 2012 yılına kadar olan sürede TÜİK verileri kullanılarak Çizelge 5.7'de sunulan değerler kullanılmıştır. Burada TÜİK verilerinde yer almayan 1999, 2000, 2005, 2007, 2009, 2011 yıllarının verileri için bir önceki ve bir sonraki yıl verilerinin aritmetik ortalamaları alınmıştır.

2013-2030 yılları arasında ise mevcut durumda ülkemizin katı atıklarının % 65'inin düzenli depolama sahalarında bertaraf edildiği ve 2023 yılında bu değer % 100'e ulaşacağı kabulü üzerinden varsayım yapılmıştır. Düzensiz depolama sahalarının sığ ve derinlik durumuna göre oranlar IPCC 2006 Rehberi referans değerlerindeki oran (25/30), düzenli depolama sahaları içinde anaerobik ve yarı aerobik durumuna göre oranlar da yine söz konusu rehberdeki referans değerlerindeki oran (25/5) kullanılarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 5.6: IPCC 2006 Atık Yönetim Tipi Dağılımı İçin Verilen Referans Değerler**  
[14]

<b>Belediye Atıkları için Atık Yönetim Tipi Dağılımları</b>					
	Düzensiz Depolama, sığ	Düzensiz Depolama, derin	Düzenli Depolama	Düzenli Depolama, yarı aerobik	Diğer
Referans Değerler	%25	%30	%25	%5	%15

**Çizelge 5.7: IPCC 2006 Modeli İçin Hesaplanan Ülkemizin Yıllara Göre Atık Yönetimi Tipi Dağılımları**

<b>Belediye Atıkları için Atık Yönetim Tipi Dağılımları</b>					
Yıl	Düzensiz Depolama, sığ	Düzensiz Depolama, derin	Düzenli Depolama	Düzenli Depolama, yarı aerobik	Diğer
1994	37,06	44,48	3,80	0,76	13,90
1995	37,34	44,80	5,75	1,15	10,96
1996	35,41	42,49	10,58	2,12	9,40
1997	31,59	37,91	15,00	3,00	12,50
1998	30,73	36,87	17,58	3,52	11,30
1999	30,35	36,42	18,98	3,80	10,45
2000	29,98	35,97	20,38	4,08	9,60
2001	26,36	31,64	27,50	5,50	9,00
2002	29,23	35,07	23,17	4,63	7,90
2003	28,82	34,58	23,75	4,75	8,10
2004	29,82	35,78	23,33	4,67	6,40
2005	28,34	34,01	27,21	5,44	5,00
2006	26,86	32,24	31,08	6,22	3,60
2007	25,25	30,30	34,25	6,85	3,35
2008	23,64	28,36	37,42	7,48	3,10
2009	21,70	26,05	41,38	8,28	2,60
2010	19,77	23,73	45,33	9,07	2,10
2011	18,48	22,17	47,63	9,53	2,20
2012	17,18	20,62	49,92	9,98	2,30
2013	16,61	19,93	51,06	10,21	2,20

2014	16,03	19,24	52,19	10,44	2,10
2015	15,45	18,55	53,33	10,67	2,00
2016	13,64	16,36	56,67	11,33	2,00
2017	11,82	14,18	60,00	12,00	2,00
2018	10,00	12,00	63,33	12,67	2,00
2019	8,18	9,82	66,67	13,33	2,00
2020	6,36	7,64	70,00	14,00	2,00
2021	4,55	5,45	73,33	14,67	2,00
2022	2,27	2,73	77,50	15,50	2,00
2023	0,00	0,00	81,67	16,33	2,00
2024	0,00	0,00	81,67	16,33	2,00
2025	0,00	0,00	81,67	16,33	2,00
2026	0,00	0,00	81,67	16,33	2,00
2027	0,00	0,00	81,67	16,33	2,00
2028	0,00	0,00	81,67	16,33	2,00
2029	0,00	0,00	81,67	16,33	2,00
2030	0,00	0,00	81,67	16,33	2,00

**Metan Düzeltme Faktörü (MCF):** IPCC 2006 Rehberinde hesaplama modeli için Çizelge 5.8’de verilen referans değerler kullanılmıştır.

**Çizelge 5.8: IPCC 2006 MCF Değerleri İçin Verilen Referans Değerler [14]**

<b>Belediye Atıkları için Atık Yönetim Tipine Göre MCF Değerleri</b>					
	Yönetilmeyen, sığ	Yönetilmeyen, derin	Yönetilen	Yönetilen, yarı aerobik	Kategorize edilmeyen
Referans Değer	0,4	0,8	1	0,5	0,6
Ülkeye özgü değer	0,4	0,8	1	0,5	0,6

**Oksidasyon Faktörü (OX):** Modelin sunduğu referans değer olarak 0 kullanılmıştır.

**k Reaksiyon Sabiti ve Yarı Ömür:** k reaksiyon sabiti için Çizelge 5.9’da verilen modelin sunduğu referans değerler kullanılmıştır.

Yarı ömür için de model üzerinden  $k = \ln(2) / t_{1/2}$  formülü üzerinden hesaplama yapılmıştır.

**Çizelge 5.9: IPCC 2006 Metan Üretim Oranı Sabiti k Değeri İçin Referans Değerler [14]**

Metan üretim oranı sabiti (k) (yıl <sup>-1</sup> )	Referans Değer		Ülkeye özgü değer
	Aralık	Referans Değer	
Yemek Atıkları	0.1–0.2	0,185	0,1225
Bahçe	0.06–0.1	0,1	0,075
Kâğıt	0.05–0.07	0,06	0,05
Ağaç ve saman	0.02–0.04	0,03	0,025
Tekstil	0.05–0.07	0,06	0,05
Çocuk Bezleri	0.06–0.1	0,1	0,075
Kanalizasyon atıkları	0.1–0.2	0,185	0,1225
Endüstriyel Atıklar	0.08–0.1	0,09	0,07

**Metan Geri Kazanımı:** Modelin sunduğu referans değer olarak 0 kullanılmıştır.

**Gecikme Zamanı:** Modelin sunduğu referans değer olan 6 ay değeri kullanılmıştır.

#### 5.4 Modelden Elde Edilen Sayısal Sonuçlar

Yukarıda belirtildiği şekilde mevcut verilerin modele girilmesi ve mevcut olmayan veriler için modelin sunduğu referans değerlerin kullanılması sonucunda Çizelge 5.10'da verilen sonuçlar elde edilmiştir.

**Çizelge 5.10: IPCC 2006 Model Sonuçları: 2000-2030 Yılları Arasında Türkiye için Göre Yıllara Göre Metan Üretim Miktarı**

Hesaplama Yılı	Yemek Atıkları Metan Üretim Miktarı (Gg)	Kâğıt Atıkları Metan Üretim Miktarı (Gg)	Toplam Metan Üretim Miktarı (Gg)
1990	239	148	387
1991	244	152	396
1992	249	156	405
1993	254	160	414
1994	259	164	423
1995	266	168	434
1996	273	173	446
1997	280	178	458

1998	289	183	472
1999	297	188	485
2000	306	193	499
2001	314	199	513
2002	324	205	529
2003	332	210	543
2004	340	216	556
2005	348	221	569
2006	356	227	583
2007	365	233	598
2008	374	239	613
2009	384	245	630
2010	395	252	647
2011	406	259	665
2012	417	266	684
2013	429	274	702
2014	440	281	720
2015	450	288	738
2016	461	295	756
2017	472	303	774
2018	483	310	793
2019	494	318	812
2020	506	326	832
2021	518	334	852
2022	530	342	872
2023	543	351	894
2024	556	359	915
2025	568	368	936
2026	580	376	956
2027	590	384	974
2028	600	392	992
2029	609	399	1.009
2030	618	407	1.025

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Katı atıkların insan ve çevre sağlığını tehdit edici etkilerinin azaltılması amacıyla, mevzuat ile belirlenen standartlara uygun şekilde bertaraf edilmeleri gerekmektedir. Bu itibarla, ülkemizde ağırlıklı olarak uygulanan yöntem katı atıkların düzenli depolanması şeklindedir. Eski adıyla Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından yayımlanan 2008-2012 Atık Yönetimi Eylem Planı'na göre, 2007 yılı itibariyle, ülkemiz nüfusunun yaklaşık olarak % 45'i tarafından üretilen atıklar düzenli depolama sahalarında bertaraf edilmektedir. Mevcut durumda, bu oran % 65 seviyelerindedir. Ulusal hedeflere bakıldığında ise, 2023 yılı hedeflerinde ülkemiz nüfusunun ürettiği evsel katı atıkların tamamının mevzuata uygun biçimde bertaraf edilmesi planlanmaktadır.

Evsel nitelikli katı atık depolama sahalarının yönetiminde, oluşan depo gazlarının kontrolü önemli bir yer tutmaktadır. Bunun sebebi, depo gazının kirletici etkilerinin ve gazın bileşiminde ağırlıklı olarak bulunan metan ve karbondioksit emisyonlarının sera gazı etkisinin yanında oluşan gazın bileşimindeki metandan kaynaklanan yüksek enerji potansiyelidir. Bu itibarla, özellikle son yıllarda artan enerji ihtiyacı ve azalan enerji kaynakları sebebiyle, katı atık depolama sahalarında oluşan depo gazının yönetiminde, metan gazından enerji temini hususundaki çalışmalar artmaktadır. Bu sayede, metan gazından elektrik, araç yakıtı ve doğalgaz gibi ürünler elde edilmektedir. Bunların arasından elektrik üretiminin, oluşan elektriğin satılması sonucunda gelir elde edilmesi veya kullanılması sebebiyle diğerlerine göre daha avantajlı olduğu söylenebilir.

Söz konusu depo gazlarından enerji temini sağlayan projelerin uygulanabilmeleri için öncelikle uygulanması planlanan projelerin detaylı biçimde fayda-maliyet analizlerinin yapılması gerekmektedir. Bu tür projelerin fayda-maliyet analizleri, depolama sahasının biyogaz üretim kapasitesine, bölgenin yerel enerji birim fiyatlarına ve projenin yatırım, işletme ve bakım giderlerine göre yapılmaktadır. Bu tür analizler yapılırken özellikle değerlendirilen depolama sahalarının sahip olduğu biyogaz üretim kapasitelerinin çok iyi analiz edilmesi gerekmektedir. Zira doğru öngörülmeleyen biyogaz potansiyeli ile hazırlanan projelerin finansal açıdan başarılı olmaları mümkün değildir.

Ayrıca, bu tür projelerin planlanmasında finansal analiz ile birlikte çevresel etkilerin de değerlendirildiği kapsamlı bir analizin yapılması daha doğrudur. Çünkü depo gazı enerji temini projelerinin en önemli katkısı sera gazı emisyon faktörlerindeki azalmadan kaynaklanmaktadır.

Çevresel etkilerin değerlendirildiği ekonomik analizde, projelerin finansal faydalarının yanı sıra, projelerin uygulanması ile değerlendirilen depo gazının sera gazı etkisindeki azalma, kirletici emisyonların kontrolü, yeraltı suyu kirliliğinin önlenmesi gibi çevresel unsurlar mali değerlere dönüştürülüp proje katkısı olarak değerlendirilmelidir. Bunun yanında, elde edilen enerjinin kullanılacağı alanlarda, aynı miktarda enerjinin diğer enerji üretim uygulamaları ile temini sırasında oluşacak ortalama sera gazı emisyonları ve diğer kirletici unsurlar da proje katkısı olarak göz önünde bulundurulmalıdır. Yapılan çalışmalarda, bu tür enerji temini projelerinin çevresel faydalarının ekonomik değerlere çevrilmesi durumunda finansal gelirlerin yaklaşık 2-6 kat üzerinde ekonomik katkı sağlandığı görülmektedir. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri için yapılan bir çalışmada, depo gazından enerji temini projelerinin finansal açıdan uygulanabilir olması için gerekli kilovatsaat başına elektrik üretim bedeli 0,3-0,4 Amerikan Doları olarak belirlenmiş iken, aynı ülke için çevresel etkilerin de değerlendirildiği ekonomik analiz sonucunda ise bu değer 0,085 Amerikan Dolarının altına indiği görülmüştür. Ancak, buradaki fayda nakit olarak işletmelere yansımadağı için bu durum işletmeler tarafından çoğu kez göz ardı edilmektedir [25].

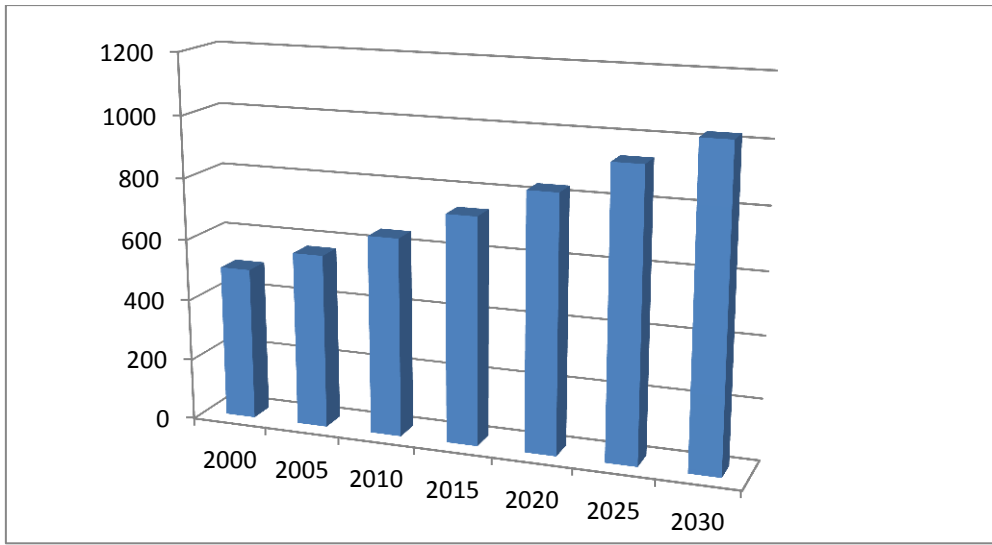
Ülkemiz 77 milyonu aşan nüfusu ve yaklaşık olarak yıllık 30 milyon ton % 60-70 organik madde içeriğine sahip evsel nitelikli katı atık üretimi ile depo gazından enerji temini konusunda çok önemli bir potansiyele sahiptir. Ayrıca, 2008-2012 Atık Yönetimi Eylem Planında öngörülen "Atıkların düzenli depolama sahalarında depolanması, geri dönüşüm materyallerinin atıktan ayrıştırılması, Belediyelere ait atıkların birlik modeli çerçevesinde transfer araçları ile taşınarak daha büyük kapasiteli depolama sahalarında depolanması" konuları da depo gazlarının oluşumunu olumlu yönde etkileyen unsurlardır.

Bunun yanı sıra, bu tür yenilenebilir enerji üretimleri için sağlanan uluslararası finansal kaynaklar, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen birim enerji başına sağlanan ulusal teşvikler, sera gazı emisyon azaltımı açısından uluslararası gönüllü karbon piyasaları kapsamında elde edilecek gelirler bu tür projeler için uygulamayı teşvik edici ilave gelirler olarak değerlendirilmelidir. Daha da önemlisi, bu tür projelerin faaliyete geçmesi ile sera gazı emisyon miktarlarından elde edilecek azalma, tüm dünyada önemi gün geçtikçe artan iklim değişikliği konusunda ülkemize politik alanda önemli katkılar sağlayacaktır.

Bu tez çalışmasında, Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli tarafından ülkelerin Ulusal Sera Gazı Emisyon Envanterlerini hazırlamalarına rehberlik etmesi amacıyla 2006 yılında yayımlanan Ulusal Sera Gazı Envanterleri Hazırlama Rehberine uygun olarak Türkiye'nin

evsel nitelikli katı atık depolama sahalarından kaynaklanan metan gazı miktarı hesaplanmıştır. Hesaplama için gerekli aktivite verileri Türkiye İstatistik Kurumunun resmi internet sitesinden ve Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın atık yönetimine ilişkin çalışmalarından temin edilmiştir. Diğer gerekli veri ve parametreler için de IPCC Rehberinde yer alan temel ve bölgesel referans değerler kullanılmıştır.

Çalışma sonucunda, 2015 yılı için Türkiye'nin evsel nitelikli katı atık depolama sahalarından kaynaklanan yıllık metan üretim miktarı 738.000 ton olarak hesaplanmıştır. Hesaplama 2030 yılında bu miktarın gelişen ekonomi ve artan ülke nüfusu ile paralel biçimde artarak 1.000.000 tonun üzerine çıkacağı tahmin edilmektedir.



**Şekil 6.1: Türkiye için Katı Atık Sahalarında Oluşan Metan Gazı Miktarı, (Gg/yıl)**

Söz konusu metan üretimi hesaplandıktan sonra, Amerika Birleşik Devletleri'nin Çevre Koruma Ajansı Kuruluşu olan EPA'nın (Environmental Protection Agency) Katı Atık Depolama Sahası Metan Yardım Programı (Landfill Methane Outreach Program) altında evsel nitelikli katı atık depolama sahalarında oluşan depo gazından enerji temini sağlayan projelerin sera gazı emisyon azaltımı, çevresel faydalar ve enerji üretiminin hesaplanması amacıyla geliştirdiği modele ülkemiz için IPCC modeli ile hesaplanan metan üretimi verileri girilmiş ve Çizelge 6.1'de verilen sonuçlar elde edilmiştir.



**Çizelge 6.1: EPA Depo Gazından Enerji Temini Projeleri Enerji Üretimi ve Sera Gazı Azaltımı Potansiyeli Hesaplama Modeli Sonuçları**

Üretilen Metan Miktarı		Elektrik Üretim Potansiyeli	Yıllık Emisyon Azaltımı	
Yıl	Ton CH <sub>4</sub> /yıl	MW	Milyon m <sup>3</sup> CO <sub>2</sub> /yıl	Ton CO <sub>2</sub> /yıl
2015	738.000	370,47	15,76	20.077.530
2020	832.000	417,66	17,77	22.634.830
2025	936.000	469,87	19,99	25.464.180
2030	1.025.000	514,54	21,89	27.885.450

Sonuçlara bakıldığında, üretilen metan gazının elektrik üretim potansiyelinin 2015 yılı için 370,47 MW olduğu ve bu değer her yıl artarak 2030 yılında 514,54 MW değerine ulaşacağı beklenmektedir. Sera gazı emisyonlarının azaltımı açısından bakıldığında ise 2015 yılı için 20 milyon tonun üzerinde CO<sub>2</sub> eşdeğerinde sera gazı emisyon azaltım potansiyelinin bulunduğu ve bu değer de yine yıllık olarak artarak 2030 yılında 28 milyon ton CO<sub>2</sub> eşdeğerine yaklaşacağı öngörülmektedir.

Türkiye Elektrik İletim A.Ş. verilerine göre 31 Mayıs 2015 tarihi itibarıyla Ülkemizin elektrik üretimi açısından yakıt cinlerine göre toplam kurulu güç dağılımı Çizelge 6.2’de verilmektedir. Görüldüğü üzere, ülkemizin elektrik üretimi açısından toplamda kurulu gücü 71.429,7 MW’dır. Model sonuçları değerlendirildiğinde, evsel nitelikli katı atık depolama sahalarında oluşan metan gazından elektrik üretimi potansiyelinin ülkemizin 2015 yılı toplam elektrik üretiminin yaklaşık olarak % 0,52’sine tekabül ettiği görülmektedir [27].

Türkiye Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu’nun Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması (YEKDEM) kapsamında biyogaz tesislerinde üretilen elektrik için belirlediği satın alım bedeli 133 USD/MWsa ‘dır [28]. Buna göre, söz konusu elektrik üretiminin finansal karşılığına bakıldığında;

2015 yılı için 370,47 MW olarak belirlenen elektrik üretiminin tesislerin yıllık 8000 saat çalışması varsayımı üzerinden finansal karşılığı aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$A = 370,47 \text{ MW} * 8000 \text{ saat} * 133 \text{ USD/MWsa} = \mathbf{394.180.080 \text{ USD}}$$

Aynı tarife üzerinden 2030 yılı üretim potansiyeli için finansal değere bakıldığında ise aşağıdaki sonuç ortaya çıkmaktadır.

$$B = 514,54 \text{ MW} * 8000 \text{ saat} * 133 \text{ USD/MWsa} = \mathbf{547.470.560 \text{ USD}}$$

**Çizelge 6.2: Yakıt Cinslerine Göre Türkiye'nin Elektrik Enerjisi Kurulu Gücü [27]**

Yakıt Cinsleri	31 Mayıs 2015 Sonu İtibariyle		
	Kurulu Güç MW	Katkı %	Santral Sayısı Adet
Fuel-Oil + Asfaltit + Nafta + Motorin	774,3	1,1	17
Taş Kömürü + Linyit	8.588,4	12,0	23
İthal Kömür	6.070,2	8,5	9
Doğalgaz + LNG	21.573,3	30,2	237
Yenilen.+Atık+Atıkısı+Pirolitik Yağ	298,0	0,4	60
Çok Yakıtlılar Katı+Sıvı	667,8	0,9	9
Çok Yakıtlılar Sıvı+D.Gaz	4.015,8	5,6	40
Jeotermal	427,4	0,6	15
Hidrolik Barajlı	17.721,4	24,8	84
Hidrolik Akarsu	7.275,5	10,2	444
Rüzgar	3.933,5	5,5	99
Güneş (Lisanssız)	84,1	0,1	165
<b>TOPLAM</b>	<b>71.429,7</b>	<b>100,0</b>	<b>1.202</b>

Burada, hesaplamalardan elde edilen finansal gelirler yalnızca elektrik satış bedelidir. Bunun yanında, her ne kadar şu günlerde ton başına sera gazı emisyon azaltımı fiyatları 1 Avro seviyelerine kadar düşmüş olsa da, bu projelerden gönüllü karbon piyasaları kapsamında elde edilecek karbon kredilerinin satılması yoluyla da önemli ölçüde gelir elde edilebilir.

Ülkemizde, bu alandaki enerji potansiyelinin değerlendirilmesi amacıyla, Ek 1'de verildiği üzere 19 adet depo gazı enerji temini projesi uygulanmaktadır (Gold Standard). Toplam kurulu gücü 110 MW üzerinde olan bu projeler sayesinde ülkemiz açısından önemli miktarda finansal gelir elde edilmekte ve toplamda yıllık 3 milyon tonun üzerinde CO<sub>2</sub> eşdeğerinde sera gazı emisyon azaltımı gerçekleştirilmektedir.

Ancak, yukarıda verilen model sonuçlarına bakıldığında ve hâlihazırda bulunan 1500-2000 adet düzensiz depolama sahası ve 80 adet düzenli depolama sahası düşünüldüğünde ülkemizin daha pek çok bölgesinde biyogaz üretimi açısından yeterli potansiyele sahip olan ve enerji temini konusunda değerlendirilmeyi bekleyen evsel nitelikli katı atık depolama sahası bulunmaktadır.

Sonuç olarak, hem çevresel hem de finansal açıdan katkısı oldukça fazla olan, aynı zamanda önemli ölçüde sera gazı emisyon azaltımı potansiyeli bulunan evsel nitelikli katı atık depolama sahalarında oluşan metan gazından enerji temini projeleri için ülkemizin sahip olduğu potansiyelin değerlendirilmesi amacıyla, ülkemizdeki mevcut katı atık depolama sahalarının incelenerek enerji temini amacıyla yeterli metan gazı üretim kapasitesi bulunan sahaların belirlenmesi için gerekli envanter çalışmalarının yapılması ve belirlenen sahalarda depo gazı enerji temini projelerinin uygulanabilmesi için gerekli teknik ve mali destek mekanizmalarının geliştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, kurulması planlanan enerji temini projeleri için teknoloji seçiminde, projenin finansal katkısı kadar çevresel etkilerin de göz önünde bulundurulması ve buna göre çevre dostu temiz teknolojilere öncelik verilmesi ülkemiz açısından daha faydalı olacaktır.

## KAYNAKLAR

- [1] 2.4.2015 tarihli ve 29314 sayılı Atık Yönetimi Yönetmeliği, <http://www.csb.gov.tr/gm/cygm/index.php?Sayfa=sayfa&Tur=webmenu&Id=266>, (Haziran, **2015**).
- [2] 26.3.2010 tarihli ve 27533 sayılı Atıkların Düzenli Depolanmasına İlişkin Yönetmelik, <http://www.csb.gov.tr/turkce/index.php?Sayfa=yonetmelikliste>, (Haziran, **2015**).
- [3] Council Directive 1999/31/EC of 26 April 2009 on the landfill of waste, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:1999:182:0001:0019:EN:PDF>, (Haziran, **2015**).
- [4] Çevre ve Orman Bakanlığı, 2008-2012 Atık Yönetimi Eylem Planı, <http://www.cygm.gov.tr/CYGM/Files/EylemPlan/atikeylemlani.pdf>, (Haziran, **2015**).
- [5] Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32008L0098>, (Haziran, **2015**).
- [6] Çevre ve Orman Bakanlığı, Atık Sektörü Mevcut Durum Değerlendirmesi Raporu, [http://iklim.cob.gov.tr/iklim/Files/Atik\\_Sektoru\\_Mevcut\\_Durum\\_Degerlendirmesi\\_Raporu.pdf](http://iklim.cob.gov.tr/iklim/Files/Atik_Sektoru_Mevcut_Durum_Degerlendirmesi_Raporu.pdf), (Haziran, **2015**).
- [7] 1990-2012 National Greenhouse Gas Inventory Report, Annual Report Submission under the Framework Convention on Climate Change, Turkish Statistical Institute, [http://unfccc.int/national\\_reports/annex\\_i\\_ghg\\_inventories/national\\_inventories\\_submissions/items/8108.php](http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/8108.php), (Haziran, **2015**).
- [8] El-Beny, D., *Katı Atık Düzensiz Sahaları İçin Uygun Gaz Oluşum Modellerinin Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, **2012**.
- [9] Demir, A. ve Tüylüoğlu, B.S., *Düzenli Depolama Tesislerinin Tasarım ve İşletilmesi, Kent Yönetimi İnsan ve Çevre Sorunları Sempozyumu*, İstanbul, **1999**.
- [10] Vasudevan Rajaram, Faisal Zia Siddiqui, Mohd Emran Khan, *From Landfill Gas to Energy – Technologies and Challenges*, CRC Press/Balkema, Leiden, The Netherlands, **2012**.
- [11] Environmental Resources Management, *Katı Atık Yönetimi Uygulama Çalışması: Türkiye Cumhuriyeti Trabzon Ve Rize İçin Atık Bertaraf Stratejisi*, Trabzon Çevre Orman İl Müdürlüğü, Londra, **1996**.
- [12] DHV Consultants BV, R&R Bilimsel ve Teknik Hizmetler Ltd. Şti., *Düşük ve Yüksek Bütçeli Belediyeler için Katı Atık Depolama Sahalarının Standart Olarak Planlanması ve Tasarımı*, İZAYDAŞ Yerel Yönetimlerin Çalışmasına Yardımcı Olacak Kılavuz Kitapçıklar, İstanbul, **2006**.
- [13] Tchobanoglous, G., Theisen, H. and Vigil, S.A., *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues*, McGrawHill International Editions, **1993**.
- [14] IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 5, Waste, <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>, (Haziran, **2015**).

- [15] Gendebien, A. and Commission of the European Communities, *Landfill Gas From Environment to Energy-Final Report*, Commission of the European Communities, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, **1992**.
- [16] Roberto Bove, Piero Lunghi, *Electric Power Generation From Landfill Gas Using Traditional And Innovative Technologies*, *Energy Conversion and Management*, 47, 1391-1401, **2006**.
- [17] Nergiz AKPINAR, *Kentsel Katı Atıklardan Enerji Üretimi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, **2006**.
- [18] H.Kurtuluş ÖZCAN, Mehmet BORAT, Cuma BAYAT, *Katı Atık Depo Sahası Gazları ve Çevresel Etkileri*, II. Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongresi, İstanbul Üniversitesi, **2005**.
- [19] Christensen, T.H., Cossu, R, "Basic Processes in Landfills", *Proceedings of the International Training Seminar on Management and Treatment of MSW Landfill Leachate*, CISA, Sanitary Environmental Engineering Centre, Cagliari, ITALY, **1998**.
- [20] IPCC Working Group III–Mitigation of Climate Change, Assessment Report 5, <http://mitigation2014.org/report/publication/>, (Haziran, **2015**).
- [21] Çevre ve Orman Bakanlığı, *Türkiye’de Atık Yönetimi*, Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, Atık Yönetimi Sempozyumu, Sempozyum Kitapçığı, **2011**
- [22] M. Sinan BİLGİLİ, *Katı Atık Düzenli Depo Sahalarında Depo Gazı Oluşumunu Etkileyen Faktörlerin Belirlenmesi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, **2002**.
- [23] R. Pipaty and I. Savolainen, *Role of Energy Production In The Control Of Greenhouse Gas Emissions From Waste Management*, *Energy Convers. Mgmt*, Vol. 37, Nos 6-8, 1105-1110, **1996**.
- [24] Özçakıl, M., *Türkiye’de Katı Atık Depo Gazı Geri Kazanım Tesislerinin Değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, **2001**.
- [25] Paulina Jaramillo, H. Scott Matthews, *Landfill Gas-to-Energy Projects: Analysis of Net Private and Social Benefits*, *Environmental Science & Technology*, Vol. 39, No. 19, 7365-7373, **2005**.
- [26] Nickolas J. Themelis, Priscilla A. Ulloa, *Methane generation in landfills*, *Renewable Energy* 32, 1243–1257, **2007**.
- [27] Türkiye Elektrik İletim A.Ş. Yük Tevzi Dairesi Başkanlığı İşletme Faaliyetleri Raporları, <http://www.teias.gov.tr/YukTevziRaporlari.aspx>, (Haziran, **2015**).
- [28] Türkiye Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması (YEKDEM), Yenilenebilir Enerji Kaynakları Listesi, <http://www.epdk.org.tr/index.php/elektrik-piyasasi/yekdem>, (Haziran, **2015**).
- [29] Wanida Wanichpongpan, Shabbir H. Gheewala, *Life cycle assessment as a decision support tool for landfill gas-to energy projects*, *Journal of Cleaner Production*, 15, 1819-1826, **2007**.
- [30] United States Environmental Protection Agency Landfill Methane Outreach Programme, 2014 LFG Energy Benefits Calculator, <http://www.epa.gov/lmop/projects-candidates/lfge-calculator.html>, (Haziran, **2015**).

## **EKLER**

- 1- Türkiye'deki Eysel Nitelikli Katı Atıklardan Enerji Temini Projeleri Listesi (CD)
- 2- 2006 IPCC Ulusal Sera Gazı Envanterleri Hazırlama Rehberi (CD)
- 3- 2006 IPCC Hesaplama Modeli ve Sonuçları (CD)
- 4- Eysel Katı Atık Depo Gazı Enerji Temini Projeleri için Emisyon Azaltımı, Çevre ve Enerji Kazanımları Hesaplama Aracı (CD)

# ÖZGEÇMİŞ

## Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Orhan SOLAK  
Doğum Yeri : Karamürsel/KOCAELİ  
Medeni Hali : Evli  
E-posta : orhan.solak@csb.gov.tr  
Adres : Harbiye Mah. Veznedar Sok. 20/25 Dikmen /ÇANKAYA

## Eğitim Bilgileri

Lise : Karamürsel Anadolu Lisesi  
Lisans : Kocaeli Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü  
Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü  
Doktora : -

## Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce : İyi (KPDS: 83)

## İş Denevimi

### **1- Teknik Katı Atık Yönetimi Tic. Ltd. Şti.**

Görevi : Çevre Mühendisi  
Çalıştığı Tarihler : 26.04.2005 - 31.12.2006

### **2- Çevre ve Orman Bakanlığı - Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü**

Görevi : Uzman  
Çalıştığı Tarihler : 22.01.2007 – 28.02.2011  
- Kocaeli İl Çevre ve Orman Müdürlüğü : 22.01.2007 - 01.02.2008  
- IPA Koordinasyon ve Uygulama Merkezi : 04.02.2008 – 28.02.2011

### **3- Trakya Kalkınma Ajansı**

Birimi : İzleme ve Değerlendirme Birimi  
Görevi : Uzman  
Çalıştığı Tarihler : 01.03.2011 – 31.07.2012

#### **4- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı - Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü**

Birimi : İklim Değişikliği Dairesi Başkanlığı  
Görevi : Şube Müdürü  
Çalıştığı Tarihler : 02.08.2012 – Devam ediyor

#### **Deneyim Alanları**

- İklim Değişikliği
- Katı Atık Yönetimi

#### **Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi**

-

#### **Tezden Üretilmiş Yayınlar**

-

#### **Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar**

-