

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KATI ATIK DÜZENLİ DEPOLAMA SAHALARINDA DEPO GAZI TAHMİN
MODELLERİNE ALTERNATİF MODEL GELİŞTİRİLMESİ**

HAMDİ MURAT ÇETİNDİR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. BESTAMİN ÖZKAYA**

İSTANBUL, 2012

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KATI ATIK DÜZENLİ DEPOLAMA SAHALARINDA DEPO GAZI TAHMİN
MODELLERİNE ALTERNATİF MODEL GELİŞTİRİLMESİ**

Hamdi Murat ÇETİNDEMİR tarafından hazırlanan tez çalışması 21.09.2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Bestamin ÖZKAYA
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Bestamin ÖZKAYA
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Osman Atilla ARIKAN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet ÇAKMAKCI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Düzenli depolama sahalarında enerji üretimi, depo sahalarında oluşan depo gazının çevresel etkilerini mimuma indirmek için mevcut durumda en uygulanabilir yöntemdir. Oluşan gazın içinde %50 oranında bulunan metan gazı, sera gazı etkisi açısından karbondioksitten 21 kat daha zararlıdır. %50 metan içeren depo gazının alt ısı değeri 16-18 MJ/Nm³ olması ise depo gazını yakıt olarak kullanılmaya uygun kılacaktır.

Depo sahalarında oluşan gazın tahmini, projenin boyutlandırılması ve dizayn kriterleri açısından büyük önem teşkil etmektedir. Proje bütçesi ve yapılacak yatırım, depo sahasında oluşması beklenen depo gazı miktarına göre şekillenmektedir. Gerçeğin üzerindeki tahminler bütçede artışa sebep olurken, gerçeğin altındaki tahminler oluşan gazın tamamının toplanamamasına, çevresel zararlara ve hukuki yaptırımlara sebep olmaktadır.

Düzenli depolamanın Türkiye’de yaygınlaşması ile birlikte İstanbul, Ankara, Gaziantep, Adana ve Bolu gibi şehirlerde depo gazından elektrik üretim tesisleri kurulmuştur. Bu depo sahalarında oluşması beklenen depo gazı ile ilgili tahminler genel olarak gerçek değerlerin üstünde çıkmaktadır. Düzenli depolama yapılan bu illerde depolama yöntemi başta olmak üzere, biyolojik aktiviteyi durdurucu etkenler, günlük örtü ve yüzey kaplama faaliyetleri oluşacak depo gazı miktarını doğrudan etkilemektedir. Mevcut modeller, tüm bu değişkenleri temsil edecek parametrelere sahip değildir.

Bu çalışmada, düzenli depolama sahalarında oluşan depo gazı hakkında Türkiye’ye ve Dünya’ya ait örnekler incelenmiş İstanbul Avrupa yakası Odayeri Düzenli Depolama Sahası için alternatif bir depo gazı modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan model İstanbul Anadolu yakası Kömürcüoda Düzenli Depolama Sahası depo gazı verilerine uygulanarak test edilmiştir.

Çalışmam boyunca bilgi ve tecrübeleriyle bana yardımcı olan tez danışmanım ve değerli hocam Sayın Doç. Dr. Bestamin Özkaya’ya, eğitim hayatım boyunca bana her konuda destek olan Sayın Doç. Dr. Atilla Osman Arıkan’a, bilgi ve tecrübesi ile her konuda örnek aldığım Sayın İlker Sel’e, değerli hocam Mehmet Çakmakçı’ya, bana bu imkanı sağladığı için Mehmet Gür başta olmak üzere desteklerinden dolayı tüm Ortadoğu Enerji ailesine ve ilgileri için sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Eylül, 2012

Hamdi Murat ÇETİNDİR

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	lix
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖZET.....	xii
ABSTRACT.....	xiv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Bulgular	2
BÖLÜM 2	
DEPO GAZI.....	3
2.1 Depo Gazı Nedir	3
2.2 Depo Sahalarında Oluşan Depo Gazı ve Önemi.....	5
2.3 Dünya’da ve Türkiye’de Depo Gazı	5
2.3.1 Avrupa	7
2.3.1.1 Fransa	7
2.3.1.2 Almanya	8
2.3.1.3 Hollanda	8
2.3.1.4 İspanya	8
2.3.1.5 Birleşik Krallık	9
2.3.2 Asya ve Pasifik	10
2.3.3 Afrika	10
2.3.4 Kuzey Amerika	11

2.3.5	Kanada	11
2.3.6	Türkiye	11
2.4	Depo Gazı Oluşma Mekanizması	12
2.4.1	Depo Gazı Özellikleri ve Zararları	16
2.4.2	Depo Gazı Üretimini Etkileyen Faktörler	17
2.4.3	Depo Gazı Karakteristiği	21
2.5	Depo Gazının Enerji Potansiyeli.....	23
2.6	Depo Gazı Kullanımı ve Faydalar	25

BÖLÜM 3

DEPO GAZI MODELLEMESİ.....	28
----------------------------	----

3.1	Depo Gazı Modellemesi Nedir.....	28
3.2	Depo Gazı Modelleme Konsepti.....	30
3.3	Depo Gazı Modellemesinin Faydaları.....	31
3.3.1	Gaz Toplama Sistemi Dizaynı ve Boyutlandırması.....	31
3.3.2	İzleme ve Yasal Zorunluluklar	32
3.4	Gaz Modellerinin Sınıflandırılması	33
3.4.1	Sıfıncı Dereceden Model	34
3.4.2	Sabit Oranlı Model.....	35
3.4.3	Birinci Dereceden Model.....	36
3.4.4	Geliştirilmiş Birinci Dereceden Model	36
3.4.5	Çok Fazlı Model	37
3.4.6	İkinci Dereceden Model	37
3.4.7	Scholl Canyon Modeli	38
3.4.8	Üçgen Modeli	39
3.4.9	Tabasaran Modeli	40
3.4.10	Palos Verdes Kinetik Modeli	41
3.4.11	Sheldon Arleta Modeli	42
3.4.12	GASFILL Modeli	43
3.4.13	Sitokyometrik Model.....	44
3.4.14	LandGEM Model.....	44
3.4.15	LFGGEN Modeli	46
3.4.16	EPER Modelleri	48
3.4.16.1	EPER Almanya	48
3.4.16.2	EPER Fransa	50
3.4.17	IPCC 2006 Modeli	50
3.4.18	TNO Modeli	53
3.4.19	Afvalzorg Modeli	54
3.4.20	CALMIM Modeli	55
3.4.21	LMOP Modelleri	55
3.4.22	GasSIM Modeli	57
3.4.23	RET Screen Depo Gazı Modeli	59
3.4.24	EMCON MGM Modeli	59
3.4.25	IGNIG Modeli.....	60
3.4.26	Sonlu Elemanlar Modeli	61

3.4.27	Weber Modeli	61
BÖLÜM 4		
DEPO GAZI TAHMİN MODELİNİN OLUŞTURULMASI VE YÖNTEM		63
4.1	Düzenli Depolama Sahası	63
4.2	Elektrik Üretim Tesisi ve Aktif Gaz Çekimi Yapılan Saha	64
4.3	Depolanan Atık ile İlgili Genel Bilgiler	64
4.4	Depo Gazı Tahmin Modeli	64
4.5	Giriş Parametreleri	69
4.5.1	Atık Kompozisyonu	69
4.5.2	Metan Üretim Sabiti	70
4.5.3	Metan Üretim Potansiyeli	70
4.6	Uygulanan Depo Gazı Tahmin Modelleri	71
4.6.1	IPCC Modeli	71
4.6.2	Scholl Canyon Modeli	72
4.6.3	EPA Colombia Modeli	73
4.6.4	Weber Modeli.....	76
4.7	Depo Gazı Tahmin Modeli : OTD Modeli.....	76
BÖLÜM 5		
MODEL ÇIKTILARI		86
5.1	IPCC Modeli Sonuçları	86
5.2	Scholl Canyon Modeli Sonuçları	88
5.3	EPA Colombia Modeli Sonuçları	90
5.4	Weber Modeli Sonuçları.....	92
5.5	OTD Modeli Sonuçları.....	94
5.6	Depo Gazı Tahmin Modellerinin Karşılaştırılması	97
5.7	OTD Modelinin Kömürcüoda Düzenli Depolama Sahası Verileri ile Test Edilmesi	108
BÖLÜM 6		
SONUÇ VE ÖNERİLER		113
KAYNAKLAR		117
ÖZGEÇMİŞ		121

SİMGE LİSTESİ

%	Yüzde
°C	Santigrad derece
CH ₄	Metan
CO	Karbonmonoksit
CO ₂	Karbondioksit
CO _{2eq}	Karbonmonoksit eşdeğeri
GW	Gigawatt
GWh	Gigawatt saat
H ₂ S	Hidrojen sülfür
Mt	Megaton
k	Metan üretim sabiti
kt	kiloton
kW	kilowatt
kWh	kilowatt saat
L ₀	Metan üretim sabiti
m ³	Metreküp
MJ	Megajoule
Mt	Megaton
MW	Megawatt
MWh	Megawatt saat
Nm ³	Normal metreküp
NO _x	Azot oksitleri
Ppb	Milyarda bir
Ppm	Milyonda bir
SO _x	Sülfür oksitleri

KISALTMA LİSTESİ

EPA	Çevre Koruma Örgütü
EPER	Avrupa Kirletici Emisyonları Birliği
GE	General Elektrik
HDPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen
İSTAÇ	İstanbul Çevre Yönetimi Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi
LFG	Depo gazı
LMOP	Depo Sahası Kaynaklı Metan Emisyonunu Önleme Programı
MCF	Metan Düzeltme Faktörü
YEK	Yenilebilir Enerji Kanunu

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Metan gazının diğer sera gazları ile karşılaştırılması 4
Şekil 2.2	İnsan kaynaklı metan kaynaklarının dağılımı 5
Şekil 2.3	Ülkelere göre evsel katı atık kaynaklı metan emisyonları 6
Şekil 2.4	İngiltere'nin yenilenebilir enerji potansiyeli 9
Şekil 2.5	Metan oluşum fazları 13
Şekil 2.6	Depo gazı oluşum ve toplanabilen depo gazı eğrisi 15
Şekil 2.7	Biyorektör depo sahası ve klasik depo sahası gaz oluşum eğrileri 18
Şekil 3.1	Birinci dereceden model ile gaz miktarı oluşumu tahmini 31
Şekil 3.2	Sıfıncı dereceden model ile yapılmış bir modelleme 35
Şekil 3.3	Sabit oranlı model 36
Şekil 3.4	Üçgen depo gazı modeli 40
Şekil 4.1	Depo sahası genel görünümü ve enerji tesisi 63
Şekil 4.2	Döküm devam eden saha 64
Şekil 4.3	İstanbul'un düzenli depolama sahaları 65
Şekil 4.4	Manifold yapısı 66
Şekil 4.5	Odayeri Elektik Üretim Tesisi enerji akışı 67
Şekil 4.6	Depolama şekli 83
Şekil 5.1	IPCC depo gazı oluşum modeli 88
Şekil 5.2	Scholl Canyon depo gazı oluşum modeli 90
Şekil 5.3	EPA Colombia depo gazı oluşum modeli 92
Şekil 5.4	Weber depo gazı oluşum modeli 94
Şekil 5.5	OTD depo gazı oluşum modeli 97
Şekil 5.6	Oluşması beklenen metan gazı miktarlarının karşılaştırması 100
Şekil 5.7	Oluşması beklenen metan gazının %70 verim ile toplanabilecek kısmı.. 103
Şekil 5.8	Model verilerin saha verileri ile karşılaştırılması 106
Şekil 5.9	Model verilerin saatlik saha verileri ile karşılaştırılması 107
Şekil 5.10	Kömürçüoda verileri ile kalibre edilmiş OTD modelin karşılaştırılması 112

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	2012 yılında YEK kapsamında elektrik satışı yapacak kuruluşlar 12
Çizelge 2.2	Metan oluşum fazları 13
Çizelge 2.3	Tipik depo gazı bileşenleri 16
Çizelge 2.4	Depo gazı içinde bulunan iz bileşenler 22
Çizelge 4.1	Yıllara göre depolanan atık miktarı 68
Çizelge 4.2	İstanbul için yıllara göre atık karakterizasyonundaki değişim 68
Çizelge 4.3	Eski saha ve yeni saha için atık kompozisyonları 69
Çizelge 4.4	IPCC modeline göre atık çeşitlerinin DOC oranları 71
Çizelge 4.5	IPCC modelinde kullanılan metan üretim katsayıları 71
Çizelge 4.6	IPCC modelinde kullanılan metan üretim potansiyelleri 71
Çizelge 4.7	IPCC modeline ait atık yarı ömürleri 72
Çizelge 4.8	Scholl Canyon modelinde kullanılan metan üretim katsayıları 72
Çizelge 4.9	Scholl Canyon modelinde kullanılan metan üretim potansiyelleri 72
Çizelge 4.10	Scholl Canyon modeline ait atık yarı ömürleri 72
Çizelge 4.11	EPA Colombia modeline göre atık çeşitlerinin DOC oranları 73
Çizelge 4.12	EPA Colombia modelinde ayrışma türüne göre kompozisyonları 73
Çizelge 4.13	Ayrışma türüne ve yağış miktarına bağlı k sabitinin değişimi 74
Çizelge 4.14	EPA Colombia modelinde kullanılan metan üretim sabitleri 74
Çizelge 4.15	EPA Colombia modelinde kullanılan metan üretim potansiyelleri 74
Çizelge 4.16	EPA modellerinde kullanılan MCF faktörleri 74
Çizelge 4.17	Toplama verimini etkileyen faktörler 76
Çizelge 4.18	OTD modeline göre aerobik fazda atık çeşitlerinin DOC içerikleri 81
Çizelge 4.19	OTD modelinde aerobik fazda kullanılan ayrışma katsayıları 81
Çizelge 4.20	OTD modeline göre aerobik faza ait atık yarı ömürleri 81
Çizelge 4.21	OTD modeline göre anaerobik fazda atık çeşitlerinin DOC oranları 82
Çizelge 4.22	OTD modelinde anaerobik fazda kullanılan metan üretim katsayıları ... 82
Çizelge 4.23	OTD modelinde anaerobik fazdaki metan üretim potansiyelleri 82
Çizelge 4.24	Depo sahasına özel işletme parametreleri 83
Çizelge 4.25	Atık hacmi 83
Çizelge 4.26	Oksijenden etkilenmeyen hacim 84
Çizelge 4.27	Atığın oksijen ile reaksiyona giren miktarı 84
Çizelge 4.28	OTD modeline ait atık yarı ömürleri 85
Çizelge 5.1	IPCC model çıktıları 86
Çizelge 5.2	Scholl Canyon modeli çıktıları 88

Çizelge 5.3	EPA Colombia modeli çıktıları	90
Çizelge 5.4	Weber modeli çıktıları	92
Çizelge 5.5	Farklı p değerleri için eski saha verilerinin model çıktılarına oranları	95
Çizelge 5.6	Farklı p değerleri için yeni saha verilerinin model çıktılarına oranları	95
Çizelge 5.7	OTD modeli çıktıları	95
Çizelge 5.8	Oluşması beklenen depo gazı miktarlarının karşılaştırması	97
Çizelge 5.9	1995-2040 yılları arasında oluşması beklenen metan gazı miktarı	99
Çizelge 5.10	Pik üretim yıllarında beklenen üretimin toplam üretime oranı	99
Çizelge 5.11	Oluşacak metan gazının %70 verim ile toplanabilecek kısmı	101
Çizelge 5.12	%70 verim ile toplanabilecek toplam metan gazı miktarı	102
Çizelge 5.13	Model verileri ile saha verilerinin karşılaştırılması	104
Çizelge 5.14	Aktif çekim yapılan alanların kuyu açılan alanlara oranı	105
Çizelge 5.15	Odayeri Saha verilerinin model çıktılarına oranı	108
Çizelge 5.16	Depolanan atık miktarı	108
Çizelge 5.17	Kömürcüoda atık kompozisyonu	109
Çizelge 5.18	Farklı p değerleri için saha verilerinin model çıktılarına oranları	109
Çizelge 5.19	OTD modeli Kömürcüoda çıktıları ve saha verileri	109
Çizelge 5.20	p=0,65 için OTD modeli ile Kömürcüoda saha verileri arasındaki oran	111

**KATI ATIK DÜZENLİ DEPOLAMA SAHALARINDA DEPO GAZI TAHMİN
MODELLERİNE ALTERNATİF MODEL GELİŞTİRİLMESİ**

Hamdi Murat ÇETİNDİR

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Bestamin ÖZKAYA

Artan katı atık miktarına bağlı olarak, düzenli depolama sahalarının tüm dünyada yaygınlaşması ile birlikte bu sahalarda oluşacak metan gazının tahmini, gerek sera gazı etkisi ve gerekse bu sahalarda yapılacak proje yatırımları yönünden oldukça önemli bir basamak haline gelmiştir. Bir projenin başlangıcı esnasında yapılan gerçeğin çok altındaki tahminler, sonradan düzeltilmesi çok zor sonuçlar doğururken, gerçeğin çok üzerindeki tahminler ise yatırım maliyetini bir hayli arttırmakta ve büyük miktarlarda zararlara sebebiyet vermektedir. Oluşacak depo gazının hesaplanması amacıyla yaygın olarak belli başlı modeller kullanılmaktadır. Bu modeller standart özellikteki sahalarda için görece olarak gerçeğe yakın sonuçlar verirken, spesifik özellikleri bünyesinde barındıran bir çok örnek için doğru sonuçları verememektedir.

İstanbul'da iki adet düzenli depolama sahası mevcuttur. Odayeri düzenli depolama tesisi Avrupa'nın en büyük katı atık depolama tesisi olup 1995 yılında faaliyetine başlamıştır ve şu ana kadar yaklaşık 39 milyon ton katı atık depolanmıştır. Asya yakasındaki Kömürcüoda tesisi de 1995 yılında faaliyetine başlamış, şu ana kadar yaklaşık 15 milyon ton katı atık depolanmıştır. Her iki sahadaki elektrik üretim tesisleri ise 2009 yılı içinde devreye alınmışlardır.

Her iki saha içinde, proje öncesinde çalıştırılan modeller ile elde edilen sonuçlar gerçek saha sonuçları ile uyuşmadığından alternatif bir model oluşturma ihtiyacı doğmuştur. Matematiksel modelin oluşturulması esnasında Odayeri tesisine ait verilerden yola

ıkılmış, oluşturulan model Kömürcüoda tesisi için çalıştırılmıştır. Oluşturulan modelin hem standart özellikteki sahalar, hem de İstanbul Asya ve Avrupa yakasındaki iki tesis için doğru sonuçlar vermesi amaçlanmış, elde edilen verilerin hem Odayeri Düzenli Depolama Sahası hem de Kömürcüoda Düzenli Depolama Sahası verileri ile uyumlu olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Depo gazı, düzenli depolama, depo gazı modelleme,

**ALTERNATIVE MODEL FOR PREDICTION OF LANDFILL GAS FROM
SANITARY LANDFILLS**

Hamdi Murat ÇETİNDİR

Department of Environmental Engineering

MSc. Thesis

Advisor : Assoc. Prof. Bestamin ÖZKAYA

Due to the increasing trend of waste generation and sanitary landfills worldwide, assumption of landfill gas (LFG) which is generated in these landfills is coming to prominence by regarding green house effects of LFG and LFG to energy projects. When under estimations of LFG cause failure of projects, over estimations causes unnecessary investments which effects directly to the project budget. For prediction of LFG which is generated in landfills some common models are in use. These models give consistent result for conventional sanitary landfills. But, if landfill consists some site specific characteristic such as different storage methods and waste streams, results fall short of real situation.

Istanbul has two sanitary landfills in European and Asian sites. Odayeri sanitary landfill which is the biggest sanitary landfill in Europe has been operated since 1995 and 30 million tons of waste has been landfilled so far. Kömürcüoda sanitary landfill site has been operated since 1995 in Asian and 15 millions tons of waste has been landfilled so far. LFG to energy project has been installed in 2009 for both of the sites.

After the over assumptions of models which was used before the project was noticed, it was needed to alternative model which consist all site specific characteristics of both landfill sites. New model is based on Odayeri sanitary landfill datas and it is tested with Kömürcüoda sanitary landfill actual datas.

It is aimed that new model will be useful both conventional sanitary landfills and specific landfills such as Odayeri and Kömürcüoda.

Key words: LFG, sanitary landfill, LFG modelling

1.1 Literatür Özeti

Nüfus artışına paralel olarak oluşan katı atık miktarı her geçen gün artmaktadır. Bu atıkların bertarafında başvurulan en yaygın yöntem atığın depolanmasıdır. Depolanan atığın çevresel açıdan oldukça zararlı emisyonların kaynağı olan depo gazını oluşturması nedeniyle, depo gazı emisyonlarının düşürülmesi global çapta büyük önem kazanmıştır [1].

Verimli bir depo gazı geri kazanımı, sadece düzenli depo sahalarında oluşan gazın aktif bir şekilde çekilmesi ile mümkün olmaktadır. Bütün ülkelerin ilk hedefi depo sahasında depolanan atık miktarını azaltmak, ikincisi ise depolanan atığın çevreye ve atmosfere olan etkisini en aza indirmektir. Benzer şekilde İstanbul'da, 1993 yılında Ümraniye Hekimbaşı düzensiz depolama alanında meydana gelen faciada 27 kişinin hayatını kaybetmesi sonrasında İstanbul'un iki yakasına birer düzenli depolama sahası kurulması kararlaştırılmıştır. Depolanan atığın çevresel etkilerinin minimuma indirilmesi amacıyla 2008 yılına kadar pasif olarak bertaraf edilen depo gazı, bu tarihten sonra aktif bir şekilde toplanarak elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaya başlanmıştır.

Depo sahasında oluşan depo gazı, gaz kuyuları vasıtasıyla elektrik üretim tesisine transfer edilmekte ve burada bulunan gaz motorlarında yakıt olarak kullanılmaktadır. Böylece, Yanma ürünlerine dönüşen metan gazının atmosfere olan etkisi 21 kat azaltılmaktadır [2].

Depo gazının yakıt olarak kullanılması, bir taraftan çevresel etkilerin minimuma inmesini sağlarken diğer taraftan depo sahalarını ekonomik açıdan kârlı birer yatırım haline getirmiştir. 29.12.2010 tarihinde Yenilebilir Enerji Kanunu (YEK) kapsamına alınan “Çöp Biyogazı”nı yakıt olarak kullanan elektrik üretim tesislerinin ürettikleri her kilowatt elektrik için 0,13 \$ cent sabit fiyat alım garantisi getirilmiştir. Ülkemizde 2012 yılı itibariyle bu kapsamda elektrik üretimi yapan 7 tesis bulunmaktadır [3].

Yatırım yapılacak depo sahalarında minimum kurulu gücün hesaplanması, yatırımın en önemli basamağını oluşturmaktadır. Kurulu güç, depo sahasında oluşacak depo gazı miktarı tahminleri sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu tahminler, depolanan atığın miktarı ve içeriği gibi birçok değişken göz önünde bulundurularak çalıştırılan modeller ile yapılmaktadır [4].

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı, İstanbul’un iki depo sahasında oluşacak toplam depo gazı miktarını hesaplayacak alternatif bir model oluşturmaktır. Bu amaçla; mevcut modellerin dört yıllık süre zarfında gerçekleşen durumu yansıtmıyor olması nedeniyle İstanbul’un Avrupa yakasında bulunan Odayeri Düzenli Depolama Sahası için yeni bir model oluşturulmuş ve bu model Asya yakasında bulunan Kömürcüoda Düzenli Depolama Sahası için test edilmiştir.

1.3 Bulgular

Literatürdeki mevcut depo gazı tahmin modellerinin ve oluşturulan alternatif modelin sonuçları göz önünde bulundurulduğunda, oluşturulan modelin, yapılacak yeni yatırımlara ve kapasite arttırmalarına temel oluşturacağı sonucuna varılmıştır.

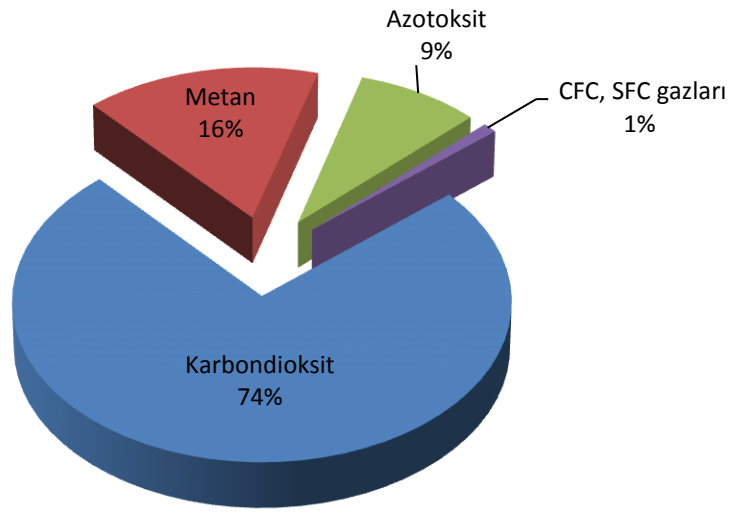
2.1 Depo Gazı Nedir

Her gün milyonlarca ton evsel katı atık düzenli depolama sahalarında yada diğer depo alanlarında depolanmaktadır. Depolanan bu atığın ayrışması sonucunda ise önemli çevresel etkileri olan depo gazı oluşmaktadır.

Depo gazı genel olarak, patlama riski, kokuya sebep olması ve iklim değişikliğine etkisi ile bilinmektedir. Fakat uygun yöntemler kullanılarak depolanan atık enerji üretimi için bir kaynak haline de gelebilmektedir. Birçok ülkede, depo alanının güvenliğini sağlamak ve oluşan kötü kokunun önüne geçmek için, oluşan depo gazı çeşitli yöntemler kullanılarak işlenmektedir. Kullanılan yöntemler arasında en yaygın olanı gazın uygun şartları sağlayan bacalarda yakılmasıdır. Bu yöntem ile depo gazının sera gazı etkisi de azaltılmış olur. Diğer yöntem ise çok daha ekonomik olan ve aynı zamanda depo sahalarını potansiyel birer yatırım haline dönüştüren elektrik üretimidir. Depo gazı kullanılarak elektrik üretildiğinde hem elektrik satışından, hem karbon kredisinden kazanç sağlanabilmektedir. Bunlara ek olarak depo gazının sera gazı etkisi aynı şekilde azaltılabilmektedir. Gelişmiş ülkeler için, gelişmekte olan ülkelerin depo gazı ile ilgili faaliyetleri oldukça önemlidir. Karbon kredisi ticareti sayesinde bütün ülkeler depo gazı ile ilgili faaliyetlerden ticari faydalar sağlayabilmektedirler [1].

Atmosferde bulunduğu kısa süre içinde iklim değişikliğine etkisi göz önünde bulundurulduğunda, depo gazının %50'sini oluşturan metan emisyonlarının azaltılması yakın gelecekteki en önemli hedeflerden biridir.

Doğal kaynaklardan ve insan kaynaklı aktiviteler sonucu oluşan metanın toplam sera gazları içindeki yüzdesi %16 civarındadır (Şekil 2.1). 2005 yılında , 44 Mt CO₂eq toplam sera gazı emisyonunun 7 Mt CO₂eq'i metan gazı olarak kaydedilmiştir. Toplam metan emisyonunun %60 kadarı insan kaynaklı olan aktivitelerden meydana gelmektedir. Bu aktivitelere örnek olarak zirai faaliyetler, kömür madenciliği, depo sahaları, doğalgaz ve benzeri petrol aktiviteleri örnek verilebilir. Son 200 yılda atmosferdeki metan konsantrasyonu 2 katına çıkmıştır. Son 20 yılda ise metan konsantrasyonu artmaya devam ederken artış hızında azalma görülmüştür. Bunun sebepleri arasında dünya çapında farkındalık oluşması, metanın enerji için kullanım alternatiflerinin gelişmesi gösterilebilir [1].

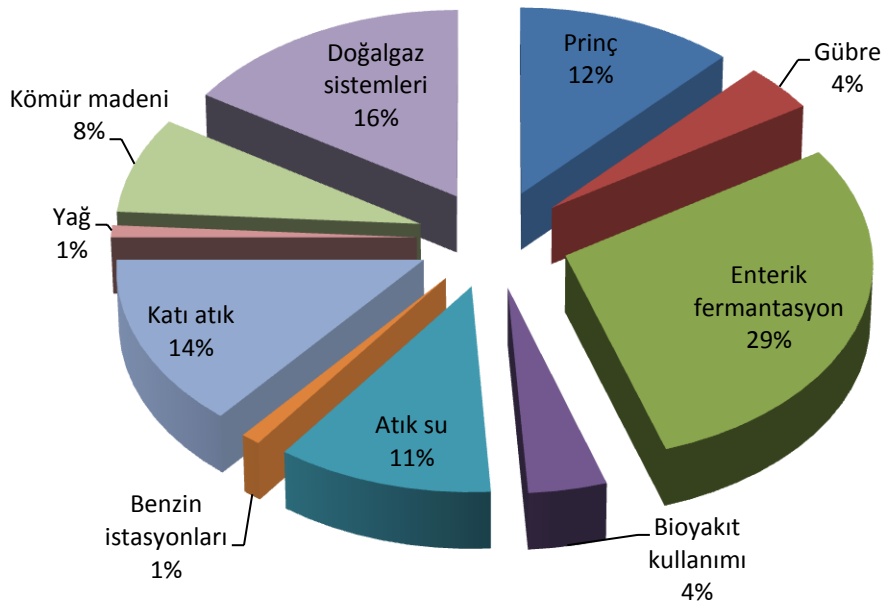


Şekil 2.1 Metan gazının diğer sera gazları ile karşılaştırılması

Metan emisyonlarının düşürülmesi enerji ve güvenlik gibi yönler ile birlikte çevresel açıdan çok büyük önem taşımaktadır. Metanın sera gazı etkisi karbondioksite göre 21 kat daha fazladır [2]. Buna bağlı olarak yakın dönemde iklim değişikliği ile ilgili atılacak adımların da başında gelmektedir. Metanın enerji üretiminde kullanılabilecek bir kaynak olması ve ekonomiyi canlandıran bir etken olarak görülmesiyle birlikte, tüm dünyada konvansiyonel enerji üretim metodlarına alternatif bir sistem oluşmaya başlamıştır. Ticari faydanın yanında, metanın çevresel zararları en aza indirgenmekte ve enerji ihtiyacının bir kısmı bu yolla sağlanabilmektedir.

2.2 Depo Sahalarında Oluşan Depo Gazı ve Önemi

Metan (CH_4) karbonmonoksitten sonra en zararlı sera gazıdır (Şekil 2.1). Atmosferdeki kimyasal ömrü yaklaşık 12 yıldır. Şekil 2.2’de gösterildiği üzere toplam metan emisyonunun %14’ü evsel katı atık kaynaklıdır. Metan, düzenli depo sahalarında ya da vahşi depo sahalarında, oksijensiz ortamda bakterilerin organik atığı ayrıştırması yoluyla oluşmaktadır. Depo sahasında oluşan depo gazının yaklaşık %50’sini metan oluşturur. Geri kalan kısmın büyük çoğunluğunu karbonmonoksit oluşturmaktadır. Ek olarak az miktarlarda olmak koşuluyla 100’ün üzerinde gaza rastlanabilmektedir. Depo gazının aktif olarak toplanmadığı ve kullanılmadığı sistemlerde bu gaz doğrudan atmosfere karışmaktadır [1].



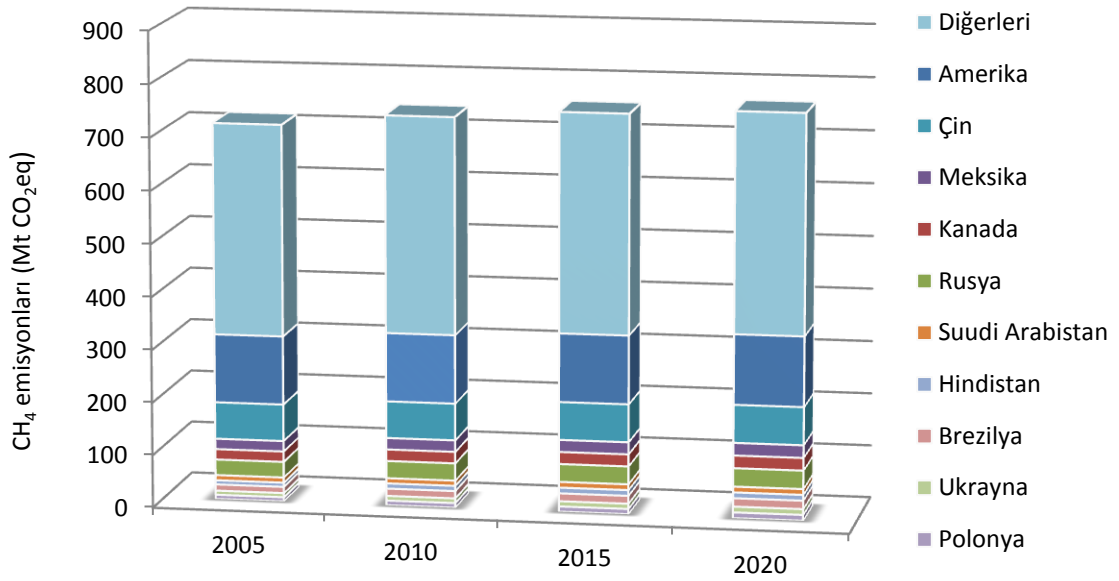
Şekil 2.2 İnsan kaynaklı metan kaynaklarının dağılımı

2.3 Dünya’da ve Türkiye’de Depo Gazı

Depo sahası kaynaklı metan emisyonunun 2005-2020 yılları arasında %9 artması beklenmektedir. 2008 yılı itibariyle depo sahalarından kaynaklanan emisyonu en fazla sebep olan ülkeler ve bölgeler Amerika, Çin, Rusya, Meksika, Kanada ve Güneydoğu Asya’dır (Şekil 2.3).

Birçok gelişmiş ülke, depo sahalarından kaynaklanacak metan emisyonunu kısıtlamak veya düşürmek için yasalara, yönetmeliklere ya da programlara sahiptir. Geri

dönüşümün teşvik edilmesi, kompost faaliyetlerine teşviklerin verilmesi, depo gazının yakılması yada enerjiye dönüştürülmesinin zorunlu hale getirilmesi verilebilecek örneklerdir. Gelişmiş ülkeler bu faaliyetler ile atmosfere salınım oranına düşürücü etki yaparken, Asya ve Doğu Avrupa’da artış devam etmektedir. Nüfus artışıyla beraber daha büyük depo sahası ihtiyaçları oluşmaktadır. Bu bölgelerde kontrolsüz vahşi depolama yerini düzenli depolamaya bırakmaya başladıkça atmosfere salınacak metan emisyonu nüfus ile paralellik göstermeyecektir.



Şekil 2.3 Ülkelere göre evsel katı atık kaynaklı metan emisyonları [1]

Gelişmiş ülkelerin metan emisyonları yasal kısıtlamalara, geri dönüşümün etkin bir şekilde gerçekleştirilmesine ve depo sahasında oluşan metan gazının potansiyel bir hammadde olarak görülüp enerji üretiminde kullanılmasına bağlı olarak, gelişmekte olan ülkelere göre daha düşüktür. Gelişmekte olan ülkelerde geri dönüşüm faaliyetleri tam olarak gerçekleştirilemezken, yasal boşluklar ve düzensiz vahşi depo sahaları nedeniyle daha yüksek metan emisyonları görülmektedir [2].

Düzenli depolamanın yaygın bir şekilde kullanıma geçmesiyle birlikte depo gazı yakma ya da işleme konsepti daha ön plana çıkmıştır. Ek olarak düzenli depolama, sızıntı suyu yönetimini de beraberinde getirmektedir. Gelişmekte olan ülkelerin atığa bakış açısı ise daha az yönetim gerektirecek olan vahşi şekilde depolama şeklindedir. Çünkü düzenli depolama alanları başlangıçtan itibaren belirli bir sistem dahilinde çevresel etkileri en

az olacak şekilde işletilmektedirler. Atık yönetimi belli bir bilgi birikimini ve pratiği gerektirmektedir. Bu pratik bölgeden bölgeye farklılık gösterebilmektedir. İyi bir katı atık yönetimi sisteminde depo gazı ve sızıntı suyu yönteminden önce, bölgenin özellikleri dikkate alınarak hazırlanmış atık yönetim sistemi geliştirilmektedir [1].

2.3.1 Avrupa

Son 20 yıl içinde Avrupa, düzenli depolama alanında oldukça büyük gelişim kaydetmiştir. Küçük ve orta ölçekli uygulamalardan, çok büyük ölçekteki entegre yönetim sistemlerine başarılı bir şekilde geçilmiştir. Yönetmelikler ve düzenli kontroller ve yaptırımlar sızıntı suyu kontrol-arıtma sistemlerini ve depo gazı kontrol sistemlerini zorunlu hale getirmiştir. Çevre kanunları ve diğer yaptırımlar nedeniyle düzenli depo sahalarına ayrılan bütçeler artış göstermiştir. Avrupa'daki düzenli depo sahalarından elde edilen depo gazı ya yakılmakta ya da elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Bu sahalar ek olarak bioreaktör depo sahası olarak adlandırılan, sızıntı suyunun ya da ilave nem içeriğinin geri devrettirildiği sistemlere de rastlanmaktadır. Bu sayede daha hızlı biyolojik ayrışma için gerekli şartlar sağlanmaktadır [4].

2.3.1.1 Fransa

2005 yılında Fransa'da depolan atık miktarı 21 milyon ton'dur. Depolanan atıktan elde edilen depo gazı miktarının yaklaşık 3,2 milyar m³ olduğu tahmin edilmektedir (%50 metan içeriği ile). Teorik olarak olduğu düşünülen metanın %60'ı toplanmıştır. Toplanan gazın büyük çoğunluğu yakılmıştır. Toplam gaz miktarının %18 kadarı ise elektriğe dönüştürülmek üzere kullanılmıştır. 45 düzenli depolama sahasında 120 kt metan enerji üretmek amacı ile kullanılmıştır. Bu tesislerin bir çoğu sadece elektrik üretmektedir. Az bir kısmı ise depo gazını bölgesel ısıtma amacıyla kullanmaktadır [5].

Fransa'da bulunan depo gazından enerji üretimi yapan tesislerin kurulu gücü 100 MW'dır. Yıllık olarak üretilen elektrik miktarı 750 GW'a yakındır. Biyolojik olarak ayrışabilen atığın depo sahasında depolanacak miktarının 2020 yılında 8 milyon ton'a düşmesi beklenmektedir. Buna rağmen depo gazı faaliyetleri önemli olmaya devam edecektir. 2007-2020 yılları arasındaki enerji potansiyeli 410 MW olarak hesaplanmıştır [7].

2.3.1.2 Almanya

Almanya’da 2011 yılında 4 milyon ton evsel katı atık depolanmıştır. Depolanan atıktan elde edilen depo gazı miktarı 3.2 milyar m³’dür (%50 metan içeriği ile). Teorik olarak oluştuğu düşünülen depo gazının %57’si toplanmış ve kullanılmıştır. Kullanılan kısmın çok az miktarı yakılmıştır. Elektrik üretim tesislerinde kullanılan depo gazı ile 2500 GWh elektrik üretilmiştir. Teknolojinin gelişmesi ve tecrübenin artması ile birlikte daha yüksek toplama verimleri elde edilebilmektedir. 2020 yılında, depo gazı kullanılarak elektrik üretimi yapacak tesislerin toplam kurulu gücünün 160 MW olacağı öngörülmektedir [7].

2.3.1.3 Hollanda

Hollanda’da depo sahalarında oluşan depo gazının kullanılmasına 1980’li yıllarda başlanmıştır. 1992 yılı itibariyle depo gazından enerji üretimi hız kazanmış ve 1997 yılında 44 depo sahasında oluşan gaz aktif olarak çekilebilir hale gelmiştir. Depo gazının direkt kullanımı %8 civarındadır. Oluşan gazın %20’si saflaştırılarak doğalgaz kalitesine getirilmektedir. 2008 yılında Hollanda da depo sahalarında depolanan atık miktarı 1,5 Mt’dur. Oluşan depo gazı miktarı 0,9 milyar m³’dür (%50 metan içeriği ile). Oluştugu düşünülen depo gazının %14’ü toplanıp kullanılmıştır. Düşük bir miktarı yakılırken, oluşan gazın büyük miktarı ile 121 GW elektrik üretilmiştir. Depo gazının doğalgaza çevrildiği santraller ile birlikte bölgesel ısıtma amaçlı kullanım görülmektedir. Doğalgaza saflaştırılan depo gazından 109 GW elektrik üretilmiştir. Biyolojik olarak ayrışabilen atığın depolanmasına sınırlama getirilmesi ile birlikte depo sahalarında oluşacak depo gazı miktarında düşüş olması beklenmektedir. Hollanda, önemli bir depo gazı potansiyeline sahip olmasına rağmen toplanan depo gazı miktarı oldukça düşük seviyelerdedir [6].

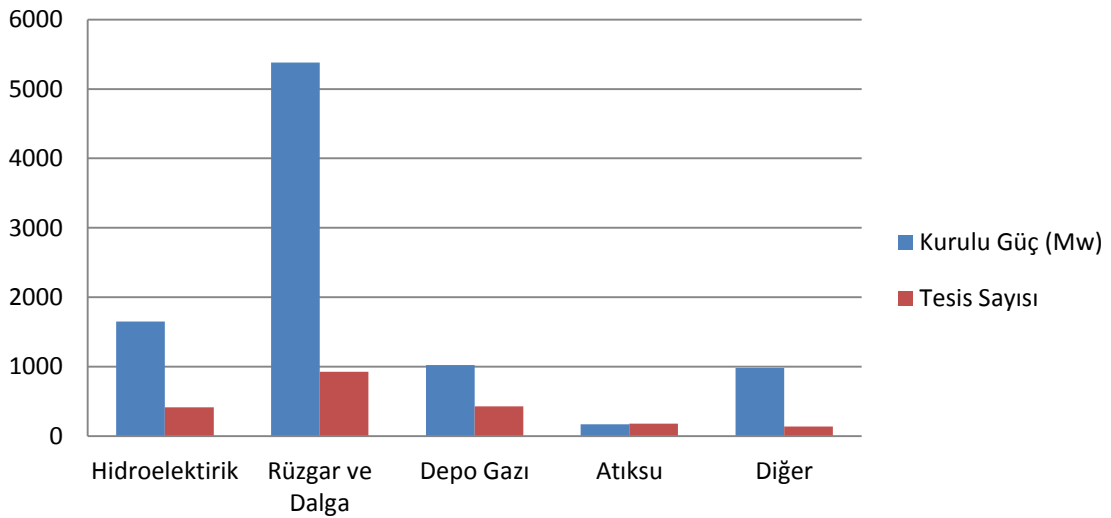
2.3.1.4 İspanya

2006 yılında İspanya’da depolama alanlarında depolanan atık miktarı 14,8 milyon ton’dur. Depolanan atıktan oluşan depo gazı miktarı 1,5 milyar m³’tür (%50 metan içeriği ile). Teorik olarak oluştuğu düşünülen gazın %29’u toplanmış ve kullanılmıştır. Depo gazının enerjiye dönüştürüldüğü 29 tesis bulunmaktadır. Toplam kurulu güç 100

MW'dır. Depo gazından enerji üretimi için 2007-2020 yılları arasındaki hedeflenen kurulu güç 230 MW civarındadır [5].

2.3.1.5 Birleşik Krallık

Yenilenebilir enerji üretimde Birleşik Krallık, diğer ülkelere göre oldukça öndedir. Britanya'da üretilen toplam elektriğin %2,25'i yenilenebilir kaynaklardan üretilmektedir. Yenilenebilir kaynaklar içinde depo gazının oranı %57 civarındadır [7]. Evsel, endüstriyel ve ticari atığı'nın %50'si depo sahalarında depolanmaktadır. Oluşan 58 milyon ton atığın, 21 milyon ton'u evsel atık, 19 milyon ton'u ticari atık , 18 milyon ton'u endüstriyel atıktır. Depolanan atıktan oluşan depo gazı miktarı 9,2 milyar m³'tür (%50 metan içeriği ile). Teorik olarak oluştuğu düşünülen gazın %72'si toplanmıştır. Bu gazın ise %50'si enerji üretimde kullanılırken geriye kalan kısım yakılmıştır. Depo sahasında oluşan depo gazını kullanan 430 tesisin kurulu kapasitelerinin toplamı 1024 MW'dır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 İngiltere'nin yenilenebilir enerji potansiyeli [8]

Depo gazı tuğla ve mobilya üretimi yapılan tesislerde yakıt olarak kullanılabilirken, %33,5'u depo gazından elektrik üretimi yapan tesislerde değerlendirilmektedir. 2007-2020 yılları için hesaplanan ortalama kurulu güç 1410 MW'dır [7]. Britanya'da depo gazı ve atıksudan elektrik üretimi diğer yenilenebilir kaynaklara göre en düşük maliyetli yöntemlerdir.

2.3.2 Asya ve Pasifik

Düzenli depolama, Doğu Asya'nın ve Pasifik'in gelişmiş bölgelerinde atık yönetiminde en sık kullanılan yöntemdir. Depo sahalarının kapasitesi azaldıkça daha sıkı çevresel yönetmelikler uygulanmaya başlanmıştır. Japonya ve Avusturalya gibi ülkeler depo sahalarını tehlikeli atık bulunup bulunmadığına ve sızıntı suyu – depo gazı sistemlerinin kurulu olup olmadığına göre sınıflandırmıştır [8].

Bu bölgelerde bulunan gelişmekte olan ülkelerde ise vahşi depolama başlıca kullanılan metoddur. Çok nadir olsa da kil tabakası kullanarak sızıntı suyu yönetimine önem verildiği görülmektedir. Organik madde ve plastik madde miktarının yüksek olmasına bağlı olarak oksijensiz ortamda depo gazı hızlı bir şekilde oluşmakta ve Bangkok ve Manila da yaşanıldığı gibi kontrol altına alınması güç yangınlara sebep olmaktadır [9].

Gelişmekte olan ülkelerin Bandung, Jakarta ve Manila gibi bazı şehirlerinde düzenli depolama sahaları dizayn edilmiş ve işletilmiştir. Diğer bölgelerde ise vahşi depolamanın hem çevresel etkileri hem de insan sağlığına etkileri yoğun şekilde görülmektedir.

Güney ve Batı Asya'da vahşi depolama yöntemi hakimdir. Büyük şehirlerdeki depo sahaları, düzenli depolama sahası olarak dizayn edilmelerine rağmen düzenli depolamanın gereği olan yüzey kaplama, sızıntı suyu toplama-arıtma sistemleri ve atığın sıkıştırılması gibi işlemler yapılmamaktadır. Deneysel çapta depo gazı uygulamaları denenmektedir. Depo sahalarında, depo gazı kaynaklı yangınlar oldukça yaygındır [7].

2.3.3 Afrika

Afrikada bulunan depolama alanlarındaki yöntem açık yada vahşi depolama şeklindedir. Düzenli depolama için mevcut yönetmelikler olmasına rağmen iş gücü eksikliği ile birlikte finansal problemler nedeniyle hayata geçirilememiştir. Depo sahası kurulurken göz önünde bulundurulacak faktörler, insan sağlığı ve çevresel faktörler yerine ulaşım bedellerini minimize edecek faktörler olmaktadır. İnşaa edilen sahalarda nadir olarak çit ve membran uygulamalarına rastlanmaktadır. Günlük örtü tabakası uygulaması , sızıntı suyu yönetimi ve depo gazı uygulamaları ise maliyetlerin çok yüksek

olması ve teknik eleman ihtiyacı nedeniyle çok ender uygulanmaktadır. Güney Afrika, Tunus ve Mısır'ın içinde olduğu birkaç ülke düzenli depolama alanında gelişme göstermeye başlamıştır [6].

2.3.4 Kuzey Amerika

Kuzey Amerika'da oluşan evsel katı atığının %60-70'i düzenli depo sahalarında depolanmaktadır. Depo sahasında depolanan katı atık azalma eğilimindeyken, üretilen evsel katı artık her geçen gün artmaktadır. Kuzey Amerika'daki depolama sahalarının büyük çoğunluğunda sızdırmaz taban, sızıntı suyu drenaj sistemi, üst örtü uygulamaları ve çevresel etkiyi azaltacak bir çok uygulama yapılmaktadır. Depo gazından elektrik üretimi uygulamaları sıkça kullanılmaktadır. Amerika'da yaklaşık 460 depo gazından enerji projesi vardır. Ek olarak, 60 proje de fizibilite yada inşaa aşamasındadır [10].

2.3.5 Kanada

Kanada da depo gazı yönünden oldukça önemli adımlar atmaktadır. Entegre katı atık yönetimine geçiş ile birlikte açık depo sahalarının ıslahı, yönetmelik ve prosedürlerin oluşturulması, zemin ve üst örtü faaliyetlerinin gerçekleştirildiği görülmektedir. 1990 yılında teorik olarak oluşan gazın % 21'i işlenebilirken bu oran 2007 yılında %28'e çıkmıştır. 2007 yılında 65 depo gazı işleme tesisinde yaklaşık 330 kt CH₄ işlenmiştir (6390 kt CO₂eq). Elde edilen metanın %50'si enerji üretiminde kullanılırken kalan kısım ise yakılmıştır. 65 tesisin 14'ünde elektrik üretimi, 36 tanesinde yakma işlemi ve 15 tanesinde ise hem elektrik üretimi hem de yakma işlemi gerçekleştirilmektedir [12].

2.3.6 Türkiye

Son 5 yıl içinde Türkiye'de düzenli depo sahalarından elektrik üretimi artan çevre bilincine paralel olarak gelişim göstermiştir. Özellikle 1993 yılında Ümraniye'de meydana gelen facia sonrasında Türkiye genelinde düzenli depolama faaliyetlerine önem verilmeye başlanmıştır ve 2012 yılı itibarıyla 40'ı aşkın düzenli depo sahası işletmededir. 2010 yılında yürürlüğe giren Yenilenebilir Enerji Kanunu ile birlikte düzenli depo sahalarında oluşan depo gazını kullanılarak üretilen elektriğe sabit fiyat ve alış garantisi getirilmesi sektörün önemli bir ivme kazanmasını sağlamıştır. Çizelge

2.1’de 2012 yılı için YEK kapsamında elektrik üretimi yapmaya hak kazanmış depo gazından elektrik üreten tesisler verilmiştir.

Çizelge 2.1 2012 yılında YEK kapsamında elektrik satışı yapacak kuruluşlar

Tesis	Kurulu Güç (MW)	Ünite Sayısı (adet)	Yıllık Üretim Miktarı (kWh)	Önceki Yıl Gerçekleşen Üretim Miktarı (kWh)
Sincan Çadır Tepe Biyokütle Enerji Santrali	5,80	4	49.615.560	27.674.610
Bolu Çöp Biyogaz Projesi	1,16	1	8.143.200	-
Gaziantep Biyogaz Projesi	5,81	5	48.859.000	3.810.650
Odayeri Çöp Gazı Santrali	17,41	12	132.000.000	71.042.716
ITC Adana Enerji Üretim Tesisi	11,61	8	99.231.120	11.289.560
Aslım Enerji Üretim Tesisi	5,8	4	44.224.000	1.012.780
Mamak Biyogaz Santrali	26,12	18	218.675.492	107.366.348
Kayseri Biyogaz Santrali	1,61	1	11.200.000	-

Gerekli şartları yerine getiren kuruluşlarında YEK kapsamına girmesiyle birlikte 8 olan bu sayının 12’ye çıkması beklenmektedir. Türkiye genelinde depo gazından elektrik enerjisi üreten tesislerin kurulu güçleri toplamı 90 MW civarındadır.

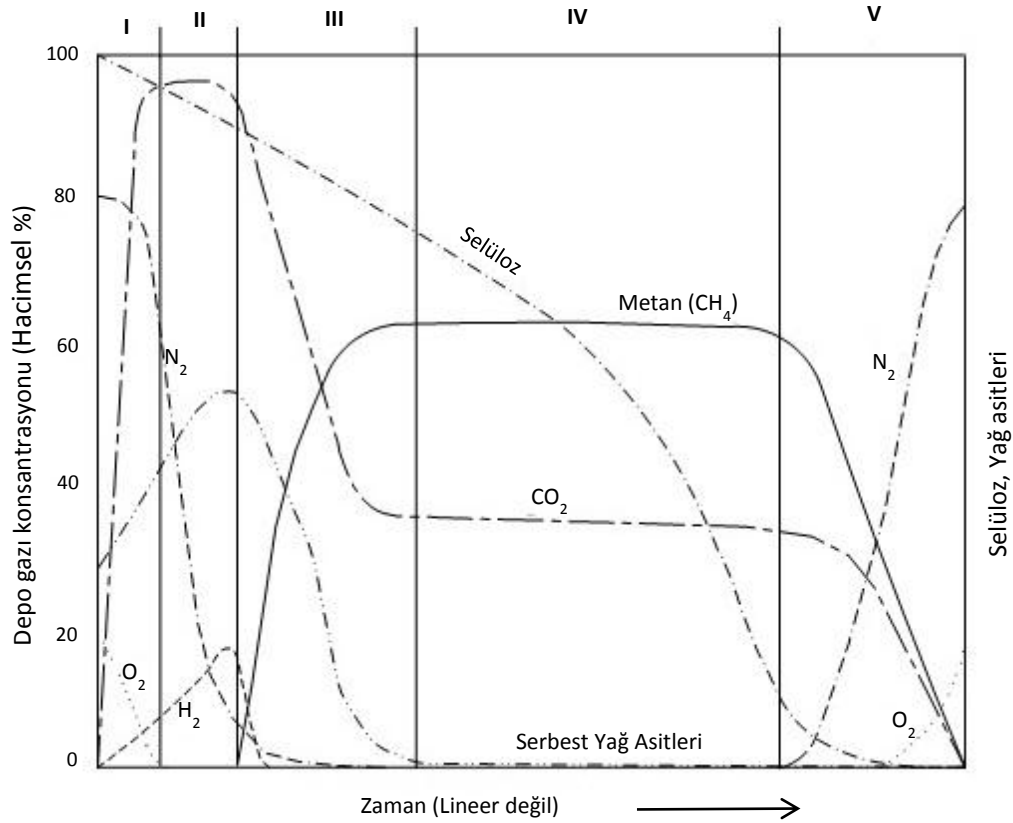
Türkiye şartlarında düzenli depolama en ucuz bertaraf metodu olmaya devam etmektedir. Dünya Bankası verilerine göre 1 ton atığı depolamanın maliyeti 15 \$ civarındadır. Bu nedenle, düzenli depolama ve düzenli depolama sahalarında oluşacak depo gazından elektrik üretimin ilerleyen yıllarda daha da yaygınlaşması beklenmektedir [13].

2.4 Depo Gazı Oluşum Mekanizması

Depo gazı atık içinde oluşan fiziksel, kimsayal ve biyolojik süreçlerin sonunda meydana gelmektedir. Atık içinde bulunan organik maddenin varlığına bağlı olarak mikrobiyal süreçler işlemekte ve gaz üretimi gerçekleşmektedir. Bu prosesler bulundukları ortamın şartlarına oldukça hassastırlar. Ortam şartları ve diğer bir çok fizikokimyasal durum mikrobiyal popülasyonu etkilediği gibi gaz oluşumunu da etkilemektedir. Kısa süreli çalışmalar ile birlikte laboratuvar ölçekli çalışmaların depo sahalarına uyarlamaları depo sahasına koyulan 1 kg atıktan 0,05 m³-0,4 m³ gaz elde edilebildiğini

göstermiştir. Geleneksel olarak depolanan atığın %75-80'i katı malzeme, %20-25'i nem muhtevası olarak düşünülmektedir [14].

Depo gazı oluşumu için ortamın anaerobik olması gerekmektedir. Dış ortam şartları veya doğal sebeplerden dolayı anaerobik ortam aerobik ortama dönebilir. Bu durumda oluşacak depo gazı miktarı oluşması beklenen depo gazı miktarının altına düşer. Aerobik şartlar altında da organik madde ayrışmaya devam etmektedir.



Şekil 2.5 Metan oluşum fazları [7]

Metan oluşum fazlarının yıllara göre dağılımı Çizelge 2.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2 Metan oluşum fazları

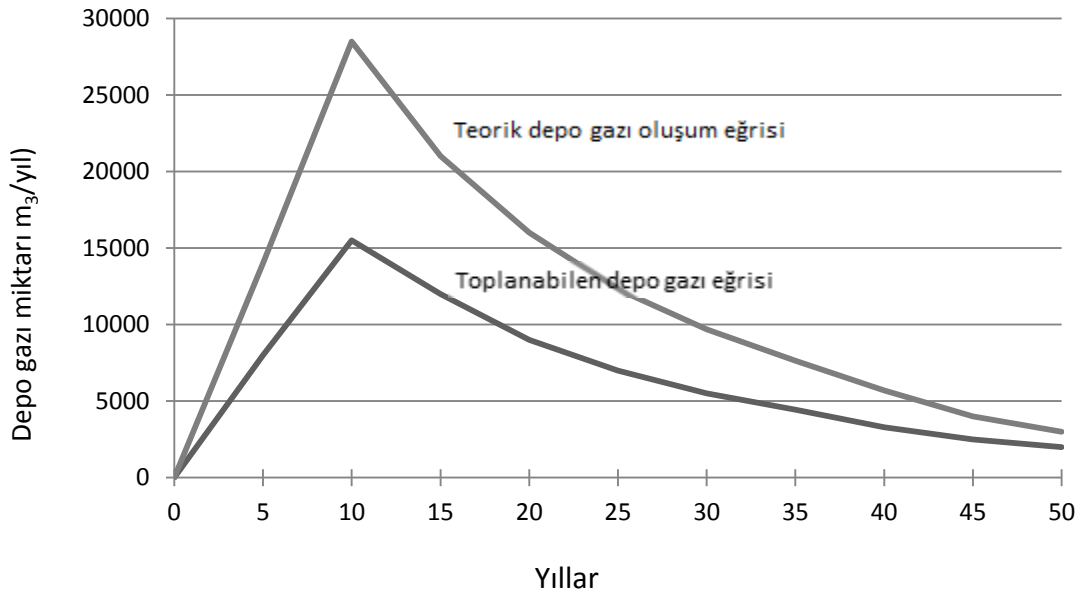
Fazlar	Durum	Zaman Aralığı
I	Aerobik	1 Gün- 1 Hafta
II	Anoksik	1-8 Ay
III	Anaerobik, Metanojenik, Stabil Değil	3 Ay - 3 Yıl
IV	Anaerobik, Metanojenik, Stabil	8 - 40 Yıl
V	Anaerobik, Metanojenik, Düşüş Eğilimi	1 - 40+ Yıl
Toplam		10 - 100 Yıl

Depo gazı oluşumu, atık depolanacağı yere koyulduktan sonra hemen başlamamaktadır. Şekil 2.5'te gösterildiği üzere farklı birbirini takip eden fazların bir ürünü olarak oluşum gerçekleşmektedir. 1. faz, atık depolama alanına koyulduktan hemen sonra başlayan oksijen varlığındaki aerobik ayrışmadır. Aerobik parçalanma sonunda karbondioksit, su ve ısı açığa çıkmaktadır. 1. faz atık içindeki oksijenin tamamı kullanılıncaya kadar devam eder. 2. faz, anoksik faz olarak adlandırılan, asidik bileşenler ile hidrojen gazının açığa çıktığı, karbondioksit oluşumunun devam ettiği hidroliz ve asidojenez prosesidir. Bu fazda, oluşan ürünler (amonyak, karbondioksit, hidrojen, su vb.) atık içinde kalmış azot ve oksijenin yerini almaktadır. 3. faz stabil olmayan metanojenik fazdır. Bu fazda ortamda hakim olan parçalanma türünün aerobikten anaerobiğe dönmesi nedeniyle karbondioksit üretiminde azalma görülmeye başlanır. Aerobik ayrışma ürünleri olan su ve ısıya ek olarak anaerobik ayrışmada metan ortaya çıkmaktadır. Bu safhada metan bakterileri bir önceki safhanın yan ürünlerini kullanarak metan üretimine başlarlar. 4. faz, stabil anaerobik safhadır. Toplam konsantrasyonun hacimsel olarak %40-60'ı arası metan konsantrasyonu görülür. Genel olarak atık, depolama sahasına getirildikten sonra 2 yıldan daha kısa bir sürede 4. faza ulaşmaktadır. Sıcaklığın ve nem muhtevasının yüksek olduğu yada suyun rahatlıkla atık gövdesine sızıp süzülebildiği depo sahalarında stabil metanojenik safhaya daha hızlı ulaşılmaktadır. Özellikle atık yükseliğinin çok yüksek olmadığı, nem içeriğinin ise yeterli olduğu depo gövdelerinden uygun şartlar sağlanması durumunda 6 ay gibi kısa bir sürede metan üretimi başlayabilmektedir [7].

Depo sahalarının çevresel etkileri incelenirken depo gazı emisyonları atığın miktarının, yaşının, cinsinin ve nem içeriğinin bir fonksiyonu olarak alınabilir. Gaz emisyonu ne kadar fazla ise çevresel etkide aynı oranda fazla olacaktır. Yakında bulunan yerleşim yerlerinin etkilenme derecesi, koku oluşumu ve güvenlik sorunları oluşan depo gazı miktarına bağlı olarak artar. Diğer bir taraftan bu artış depo sahasında enerjiye yönelik yapılacak faaliyetleri uygulanabilir hale getirir [15]. Şekil 2.6'da depo gazı potansiyeli ile ilgili olarak yapılmış bir uyarılma verilmiştir.

Depo gazı tahminlerinde birinci basamak atık kompozisyonuna bağlı olarak atığın tonaj hesabının yapılmasıdır. İnert atıkların varlığın karakterize edilmesi depo gazı oluşumuna katkı sağlamamaları yönünden önemlidir. Sonrasında evsel atıktan daha az

depo gazı potansiyeli bulunan endüstriyel vb. atıklar karakterize edilmelidir. Depo sahası atık karakterizasyonunda esas alınan oran yada katsayılar mutlaka depo sahasını yansıtmalıdır ve gelecekte de aynı karakterde atığın depolanacağı varsayılmalıdır. Depolanan atık için uygun bir katsayı kullanılarak ihtiyaç olunacak depo sahası kapasitesine ulaşılabilir.



Şekil 2.6 Depo gazı oluşum ve toplanabilen depo gazı eğrisi

Depo sahaları ıslak ve kuru olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Kuru depo sahalarında, depo gövdesindeki ayrışma ıslak sahalardakine göre daha yavaş olmakta ve daha uzun sürmektedir. Depo gövdesindeki nem muhtevasını etkileyen faktörler arasında yağış, sıcaklık, örtü toprağı ve saha yüzey durumu, sızıntı suyu toplama sisteminin durumu ve depo tabanı özellikleri bulunmaktadır. Depo gövdeleri, yıllık yağış miktarının depo gövdesine sızan miktarına bağlı olarak ıslak ve kuru olarak adlandırılmaktadır. Sınıflandırmadaki genel yaklaşım depo gövdesine sızan miktarın yıllık ortalama yağış miktarı kadar olması şeklindedir. Bu nedenle geri devir yapılan sistemlerde ıslak sistemler olarak adlandırılabilir [16].

Depo sahasından elde edilecek depo gazının miktarı depolanmış atığın miktarına ve işletim şartlarına göre değişkenlik gösterebilir. Genel olarak oksijen ile teması kesildikten 1-2 yıl sonra üssel olarak artacak şekilde depo gazı üretimi başlamaktadır [17].

2.4.1 Depo Gazı Özellikleri ve Zararları

Metan (CH_4) renksiz, kokusuz, yanıcı, toksik olmayan havadan hafif bir gazdır. Depo gazı genel olarak metan, karbondioksit ve metanojenik olmayan organik bileşiklerden meydana gelmektedir [18]. Çizelge 2.3'te tipik bir depo gazı bileşenleri verilmiştir.

Çizelge 2.3 Tipik depo gazı bileşenleri

Bileşen	Kimyasal Formül	Hacimsel %
Metan	CH_4	40-70
Karbondioksit	CO_2	30-55
Su buharı	-	0,01
Parafin hidrokarbonlar	-	0,1
Aromatik hidrokarbonlar	-	0,2
Hidrojen	H_2	0,1
Hidrojen sülfür	H_2S	0,01
Karbon monoksit	CO	0,1
İz bileşenler	-	0,5

Depo gazı, kapalı yada yarı kapalı alanlarda birikme yaparak patlayıcı ve zararlı bir atmosfer meydana getirebilir. CO_2 ve H_2S başta olmak üzere diğer depo gazı bileşenleri ise özellikle demire karşı oldukça koroziftirler [19].

Kapalı alanlarda depo gazı oksijenin yerini aldığı için büyük tehlike arz etmektedir. Havadaki konsantrasyonu %5-15 aralığında olduğunda ve yeterli tutuşma sıcaklığı sağlandığında patlayıcı etki gösterebilmektedir. Bu konsantrasyon aralığı patlama sınırı olarak verilmektedir [20].

Patlama riski alt patlama sınırı olan %5'i aştıktan sonra başlamaktadır (ortam havasının %5'inin CH_4 olması durumu). %50 metan konsantrasyonuna sahip bir depo gazının az bir miktarı ile bu oran sağlanabileceği için özellikle kapalı yada yarı kapalı alanlarda havalandırmaya oldukça önem verilmesi gerekmektedir. Düzenli depo sahalarında depo gazının sahadan kaçmasını önlemek ve çevresel zararları en aza indirmek için zemin geçirimsiz hale getirilmektedir. Zemin geçirimsizliğinin sağlanmaması durumunda depo gazı toprak içinde hareket ederek etraftaki yerleşim yerlerine ya da depo sahası dışındaki alanlara ulaşabilmektedir. Kontrolsüz olması bakımından bu gibi durumlar yangın açısından daha fazla risk oluşturmaktadır [21].

Depo gazı, içinde bulunan bileşenlerin oranlarına göre havadan ağır ya da hafif olabilmektedir. Sahanın genç veya yaşlı olması oluşan gaz miktarı bakımından farklılığa sebep olsa da, depo gazı bileşenleri açısından çok büyük farklılığa sebep olmaz (Uçucu organik maddeler haricinde).

2.4.2 Depo Gazı Üretimini Etkileyen Faktörler

Depo gazı üretimi fiziksel ve kimyasal faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Depo gazı üretimini etkileyen en önemli faktörler arasında atık bileşimi, sıcaklık, nem, pH, atmosferik şartlar, üst örtü, atık yoğunluğu ve atık yaşı gelmektedir [18].

Atık Bileşimi: Atık bileşimi, depo sahasının depo gazı üretim potansiyelinin hesaplanmasında ve depo sahasının gaz performansının değerlendirilmesindeki en önemli faktördür. Depo gazı oluşumu atık içindeki organik maddenin miktarına ve çeşidine bağlıdır. Depo gazı oluşumundaki en önemli reaksiyon organik maddenin oksijensiz ortamda ayrışmasıdır [8].

Atık Yoğunluğu ve Dane Büyüklüğü: Dane büyüklüğü ve yoğunluk, besin maddesi transferi ile nemin depo gövdesi içindeki hareketi açısından oldukça önemlidir. Küçük dane boyutları depo gazı oluşum oranını arttırmaktadır. Depo gövdesinin yoğunluğu atığın ne kadar sıkıştırılmak istenildiğine göre değişmektedir. Sıkışma, hem mekanik olarak yapılır hem de doğal yollardan atık yüksekliği arttırıkça devam eder. Atık yoğunluğunun çok yüksek olduğu bölgelerde (atık yüksekliğine bağlı olarak) depo gazı toplama sisteminde sorunlar yaşanabilmektedir. Dane büyüklüğü 250 mm'den 10 mm'ye düşürüldüğünde ayrışma hızının 4.4 kat arttığı belirtilmiştir [18].

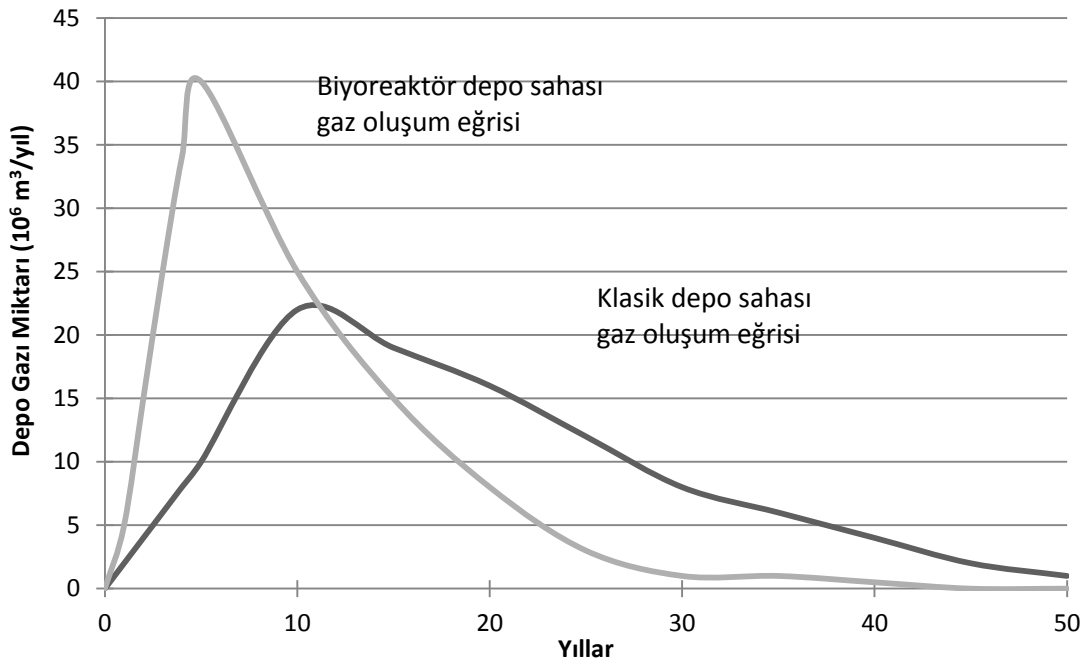
Sıcaklık: Depo gövdesi içerisindeki sıcaklık, anaerobik ortamdaki parçalanmanın ekzotermik olması nedeniyle dış ortamdan daha yüksektir. Depo gövdesi içerisinde hakim olan bakteri popülasyonuna bağlı olarak sıcaklık ve depo gazı üretim oranları değişkenlik gösterir. Ayrışma hızı ve depo gazı üretim potansiyeli sıcaklığın düşmesiyle azalır. Atık yükseliği, depo gövdesinin sıcaklığını etkileyen parametrelerden biridir. Aerobik ayrışma için optimum sıcaklık aralığı 54-71 °C iken anaerobik ayrışmada

optimum sıcaklık aralığı 30-41 °C'dir. 10 °C altında anaerobik faaliyet oldukça yavaşlamaktadır [7].

Nem İçeriği: Depolanan atığın ve depo gövdesinin nem muhtevası gaz üretim potansiyeli açısından en önemli parametrelerden biridir. Atık depolandıktan sonra nem parametresinin takip edilmesi ve su dengesinin doğru kurulması, toplam oluşacak depo gazının tahminlenmesi ve bu tahminlerin yakalanması açısından oldukça önemlidir [22].

Nem atık içinde homojen şekilde dağılmayabilir. Depo sahasının farklı bölgeleri, atığın ve yüzey örtüsünün durumuna göre farklı nem muhtevalarına sahip olabilirler. Düşük nem içeriği anaerobik parçalanmayı yavaşlatıcı veya kısıtlayıcı etki göstererek gaz üretim potansiyelini düşürmektedir. Oluşacak gaz miktarını maksimize etmek için gerekli optimum nem içeriği %50-60 aralığında olmalıdır [18].

Düzenli depo sahaları, giderek yaygınlaşan bir şekilde biyoreaktör depo sahaları olarak işletilmeye başlamaktadır. Biyoreaktör depo sahalarında yeterli miktarda su içeriği çöple temas ettirilerek kısa süre içinde yüksek miktarda gaz üretimi gerçekleştirilmekte ve hızlı bir stabilizasyon sağlanmaktadır. Şekil 2.7'de biyoreaktör depo sahası ve klasik depo sahası için depo gazı oluşum eğrileri gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Biyoreaktör depo sahası ve klasik depo sahası gaz oluşum eğrileri

Bu yöntem yöntemin kullanıldığı depo sahalarında kısa sürede büyük miktarlarda organik madde parçalanması sağlanmasına rağmen depo gövdesinde hızlı çökmelere ve sızıntı suyu toplama sisteminde normalden daha hızlı tıkanmalara rastlanmaktadır. Geri devrettirilen suyun yatay gaz toplama hatlarına dolması sahadan çekilebilecek gaz miktarında düşüşe sebep olabilir ve bu durum yeterince iyi yüzey örtüsü olmayan sistemlerde yüzeysel gaz kaçaqlarını tetikleyebilir. Benzeri sorunlar, yeterince iyi dizayn edilmemiş sızıntı suyu toplama sistemlerinde de görülebilir. Depo sahasının geneli yada bioreaktör olarak kullanılacak hücreler bu durumlar göz önünde bulundurularak dizayn edilmelidir. Biyorektör depo sahalarında doğru bir dizayn ve işletme ile depo gazı üretim hızı Şekil 2.7’de de görüldüğü üzere konvansiyonel sistemlerin oldukça üzerine çıkmaktadır [14].

pH ve Nütrientler: Atık ve sızıntı suyunun pH’ı gaz üretimini etkileyen faktörler arasındadır. Genel olarak bütün depo sahalarında pH’ın nötr olduğu durumda en yüksek depo gazı üretimi görülmektedir. Asidik pH’ın hakim olduğu ortamlarda üretimi yavaşlatıcı etkiler görüldüğünden, metan üretiminde gecikme yaşanabilir fakat genellikle depo gövdesi bu etkiyi tamponlayabilecek tampon kapasitesine sahip olmaktadır [22].

Depo sahasına koyulan atığın türüne bağlı olarak sızıntı suyunda çok geniş bir aralıkta pH ile karşılaşılabilir. Genel olarak sızıntı suyunun pH’ının 5-9 aralığında olması beklenebilir. Metan oluşma fazı boyunca hakim olan pH aralığı 6,5-8’dir. Depo gövdesinde meydana gelen asidik fazlarda (yada fazdan bağımsız olarak düşük pH’lı ortamlarda) düşük pH’ın atık içinde bulunan metali taşınabilir hale getirmesi dolayısıyla sızıntı suyu yönetiminde sorunlar yaşanabilmektedir. Bu tür ortamlar, depo sahası dışındaki canlılık açısından tehlike arz ettiği gibi, metan üreten bakteriler açısından da toksik etki gösterdiğinden mutlaka kontrol edilmeli ve gerekli önlemler alınmalıdır [23].

Atmosferik Şartlar : Atmosferik şartlar depo sahasındaki sıcaklığı, basıncı ve nem muhtevasını etkilemektedir. Depo sahası üzerindeki üst örtü tabakası veya farklı malzemeler kullanılarak oluşturulmuş katmalar, depo gövdesini izole ederek oksijenin atık ile temasının ve kontrolsüz olarak su kütlesinin depo gövdesine sızmasının önüne

geçer. Yüzey kaplama faaliyetleri atmosfereki sıcaklık değişimlerinin depo gövdesi üzerindeki etkilerini minimuma indirir ya da bu etkileri tamamen ortadan kaldırabilir.

- **Atmosferik Sıcaklık:** Soğuk iklimlerde bulunan depo sahalarında üst katmalardaki sıcaklığın düşük oluşuna bağlı olarak oluşan depo gazı miktarı normal şartlara göre daha düşük olur. Atık içinde derine inildikçe yüzeydeki düşük sıcaklığın etkisi, anaerobik faaliyet sonucunda açığa çıkan ısı ile dengelenmektedir. Atmosferik sıcaklığın depo gövdesi üzerindeki etkisi depo gövdesinin derinliğine, yoğunluğuna, hakim mikrobiyal aktivite çeşidine, kimyasal ve biyolojik reaksiyonların çeşitliliğine, atığın su içereğine ve iklime göre değişkenlik gösterir [24].

- **Atmosferik Basınç:** Atmosferik basıncın oluşacak gaz miktarı üzerindeki etkisi oldukça küçüktür. Genel olarak oluşacak gaz miktarına etkisi değil, gaz toplama sistemi işletimine olan etkisinden bahsedilebilir. Basınç değişimleri depo gazı debisinde geçici yükselme ve alçalmalara sebep olabilir. Bu etki depo gövdesindeki basınç ile atmosfer basıncı eşitleninceye kadar devam eder. Aktif gaz toplama sistemlerinde atmosferik basıncın yükselmesi ile birlikte yüksek miktarda havanın depo gövdesine girmesi beklenebilirken, tersi durumda saha yüzeyinden dışarıya depo gazı kaçıışı beklenir [25].

- **Yağış:** Depo gövdesi içerisine sızan yağmur bir taraftan atık için gerekli nemi depo gövdesine taşıırken, diğer taraftan çözünmüş oksijeni depo gövdesine taşımaktadır. Bu sebepten dolayı anaerobik olarak işletilen sistemlerde yağış devamlı olarak kontrol altında tutulmalıdır. Yüksek miktarda yağış alan depo sahalarında kontrolsüz kaçaklar meydana gelebilir. Bu durum, depo gazı yönetimini işletilmesi zor bir hale getirmektedir. Uygun yüzey örtüleri kullanılarak yağışın kontrol altına alınması düzenli depo sahalarında sıkça kullanılan bir yöntemdir [26].

Atığın Yoğunluğu: Depo sahasında depolanan atığın yoğunluğu, depolama öncesi işlemlere, atığın türüne, depo sahası şartlarına ve depo sahasındaki işlemlere göre değişkenlik göstermektedir. Atık yoğunluğu, depo gazı üretimi tahminlerinde kullanılabilmesi bakımından oldukça önemli bir parametredir. Depolanan atığın yoğunluğu 400-1700 kg/m³ arasında değişkenlik göstermektedir [27].

Atık Yaşı: Oluşacak depo gazı miktarı hesabında atığın yaşı oldukça önemli bir parametredir. Anaerobik ortam sağlandıktan sonra 20 yıl veya daha uzun süre (depo

sahasının işletilme şekline göre) depo gazı üretimi devam eder. İlk yıllarda hızlı parçalanarak organik maddenin tükenmesi dolayısıyla yaşlı çöplerde büyük miktarlarda depo gazı üretimi beklenemez. Depo sahasına ulaşan atığın atmosfer ile ilişkisi ne kadar hızlı kesilirse, o oranda anaerobik parçalanmada kullanılabilecek organik madde kalacaktır [28].

2.4.3 Depo Gazı Karakteristiği

Depo gazı içeriği, depo sahasındaki katı atığın türüne, ayrışma basamağına, oksijen varlığına, nem ve depo gövdesine sızan yağmur miktarına, pH'a, atık içinde bulunan organik maddelerin türlerine ve oranlarına, hakim olan bakteri türüne ve ortam koşullarına göre değişkenlik gösterir. Depo gazı oluşum fazları depo gazı içeriği üzerinde büyük etkiye sahiptirler. Şekil 2.5'te verildiği üzere depo gövdesinde meydana gelen fazlara bağlı olarak farklı kompozisyonlarda depo gazı oluşumu meydana gelir. Depo gazı karakteristiğine etki eden dış etmenler olarak depo sahası dizaynı ve işletme koşullarından bahsedilebilir. Uygun koşullarda dizayn edilmeyen ya da düzgün işletilemeyen bir depo gazı toplama sisteminde farklı kompozisyonlarda depo gazları ile karşılaşmak mümkündür. Atık depo sahasına koyulmadan önce yapılan ön işlemler (parçalama, danecik boyunun ufaltılması vb.), günlük örtü tabakalarının uygulanması ve sızıntı suyunun geri devri hem oluşacak depo gazı miktarını etkiler hem de depo gazı bileşiminde değişikliğe sebep olur [29].

Depo gazı bileşenleri Çizelge 2.3'te de verildiği üzere genel olarak metan, karbondioksit, su buharı ve eser miktarda diğer gazlardan oluşur [18].

Metanojenik olmayan bileşikler (NMOCs): Depo gazındaki metanojenik olmayan gazların emisyonu depolanan atığın karakterine, atık yaşına, iklimsel faktörlere, yüzey örtüsünün fiziksel ve biyokimyasal özelliklerine göre değişkenlik gösterir. Bu gazları atık içinde meydana gelen, fiziksel, kimyasal ve biyolojik etkileşimlerin bir ürünü olarak ortaya çıkmaktadır [29].

Uçucu Organik Bileşenler: Uçucu organikler, metanojenik olmayan gazların güneş ışığı ile etkileştiklerinde ozon oluşturan formu olarak bilinirler. Uçucu organiklerin depo gazı

içindeki konsantrasyonlarının tespiti kolay olmadığından, metanojenik olmayan gazların konsantrasyonu üzerinden oransal bir hesap yolu ile bulunabilirler [30].

Depo gazı içinde eser miktarda bulunan uçucu yada yarı uçucu organik gazların sayısı yaklaşık 550'dir [12]. Çizelge 2.4'te bu gazların en sık karşılaşılanları verilmiştir.

Çizelge 2.4 Depo gazı içinde bulunan iz bileşenler [18]

Bileşen	Konsantrasyon (ppb)	Bileşen	Konsantrasyon (ppb)
Metanetirol	100–44000	Terpen	100–1000
Benzen	1800–32000	Dimetilsülfid	10–1600
Trikloroetan	250–13000	Trikloroflormetan	150–150000
Etilbenzen	1–6300	Klorotriflormetan	10–2300
Diklorometan	100–260000	Kloroetan	1000–104000
Vinil klorid	500–120000	Diklorobenzen	10–26000
Pentilbenzen	100–300	Klorotoluen	1–10
Dikloroetilen	100–12000	Naptalen	10–100
Sülfürdioksit	10–5000	Metilstiren	10–3100
Dikloroetan	100–35000	Perkloroetilen	100–62000
Trikloroetan	100–60000	Dimetilsülfid	100–15000
Tetrakloroetan	600–70000	Dikloroflormetan	800–24000
Toluen	20–500000	Diklorometan	60–260000
Propil benzen	1000–25000	Tetrakloroeten	15–70000
Bütil benzen	1000–25000	Klorobenzen	100–11000
Stiren	0,5-10	Ksilen	500–115000
Karbonditetraklorid	100–2100	Etilbenzen	100–61000
Sikloheksan	10–3200	Dietileter	1–6000

Su Buharı: Organik maddelerin ayrışması sırasında organik madde ve ayrışmanın tipine bağlı olarak %4-7 arasında su buharı oluşmaktadır. Depo sahasındaki bulunan su buharı miktarı depo sahasındaki sıcaklık ve basınca göre değişiklik gösterebilir. Biyolojik ayrışma süresince sıcaklığın artış göstermesi, suyun buharlaşarak buhar formuna geçmesine ve buharın depo gazı içindeki konsantrasyonun artmasına sebep olur [31].

Diğer Bileşenler: Hidrojen, özellikle karışık organik asitlerin asetik asite dönüştüğü süreç boyunca oluşmaktadır. Oluşan hidrojen, CH₄ formuna geçiş sırasında tüketilmektedir. Hava içindeki hacimsel yüzdesi %4-%74 arasında olması durumunda hidrojen, parlayıcı etki gösterebilmektedir. CO₂'nin varlığı bu limitlerin değişmesine sebep olsa da alt limitin değişimi üzerindeki etkisi oldukça düşüktür [19].

Yoğunluk ve Viskozite: Depo gazının yoğunluğu, depo gazını oluşturan bileşenlere bağlıdır. Örneğin, anaerobik ayrışmanın birinci fazında görülebilecek bir karışım olan %10 hidrojen ve %90 CO₂ karışımı havadan ağır olacaktır. Stabil metan oluşum fazı olan 3. fazda oluşan depo gazının %60'ının CH₄ %40'nin CO₂ olduğu kabul edildiğinde meydana gelen karışım havadan hafif olacaktır [7].

2.5 Depo Gazının Enerji Potansiyeli

Depo sahasında oluşan depo gazının elektrik üretimi için kullanılacağı durumda, organik maddenin anaerobik ortamda parçalanması sonucu oluşan metanın enerji potansiyeli esas alınmaktadır. Sadece elektrik üretiminde değil bütün enerji çevrimlerinde bu potansiyel üzerinden hesap yapmak mümkündür. Büyük depo sahalarında oluşan depo gazının yüksek miktarda olması büyük sahaları enerji çevrim tesisleri açısından daha elverişli hale getirir. Depo gazının enerji çevriminde kullanılmasına ilişkin kabul görmüş genel bakış açısı, elektrik üretiminde yenilenebilir bir kaynağın kullanılacak olması ve atmosfer için son derece zararlı bir gazın etkisinin indirgenmesi şeklindedir [31]. (2.1)'de metanın oksijenli yanma denklemi verilmiştir. Oksijenli yanma sonucunda karbondioksit (CO₂), su (H₂O) ve 891 kilojoule enerji açığa çıkmaktadır [32].



Enerji üretimi açısından metan çok önemli bir gazdır. Depo gazının %50 metan içerdiği durumda depo gazı, düşük-orta kalite yakıt olarak sınıflandırılmaktadır. Bu depo gazı çeşitli işlemlerden geçirildikten sonra yüksek kalitede yakıt haline getirilerek kullanılabilir. Bunun yanında işletme türüne bağlı olarak depo gazının direk yakılması veya gaz motorlarında yakıt olarak kullanılması mümkündür [33]. Üretilen elektrik depo sahasının iç ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılabilir ya da ulusal elektrik şebekesine iletilir. Açığa çıkan ısı ile lokal ısıtma uygulamaları, sera faaliyetleri vb. ısı gerektiren faaliyetler yürütülebilmektedir. Oluşan depo gazının bu şekildeki kullanımları hem maddi geri dönüş sağlar hem de çevresel zararları minimize eder. Metanın yanma ürünü olan karbondioksit çevrimi ile karbon kredisi üzerinden maddi geri dönüş sağlamakta mümkündür [1].

Depo gazı, %40-45 metan içermesi durumunda 16-18 MJ/Nm³ alt ısı değere sahip olmaktadır. Kömürün alt ısı değeri 22 MJ/kg ve Fuel oil'in alt ısı değeri 40-42 MJ/kg'dır. Gaz motorlarının elektriksel verimleri %40 civarındayken, kojenerasyon faaliyetlerine bağlı olarak termal enerjiden de elektrik üretilmesi durumunda enerji dönüşüm verimi %90'lara kadar çıkabilmektedir [34]. %50 metan içeriğine sahip depo gazının 700-710 Nm³/saat'i ile yaklaşık olarak 1.4 MW elektrik üretilmektedir. Gaz motorunun ürettiği elektrik miktarına bağlı olarak verimi artar ya da düşer. Sadece bir gaz motorunun 2,8 MW enerji ürettiği durumda gerekli olan depo gazı miktarı (%50 metan içeriği ile) 1400 Nm³/sa'den daha az olmaktadır. Depo sahasından oluşan gazın kalorifik değerine bağlı olarak, ısıtma amaçlı kullanım için kurulan dönüşüm tesislerinde ek yakıt ihtiyacı oluşabilmektedir [35].

1 ton evsel atıktan 15-25 yıllık bir zaman diliminde yaklaşık olarak %40-50 metan içeriğine sahip 5 m³ ile 400 m³ gaz oluşmaktadır. Ortalama 1 000 000 ton evsel katı atığa sahip bir depo sahasının yıllık olarak 10 milyon m³ gaz oluşması beklenebilir. Enerji dönüşümü yapılırken 22,5 GW'a tekabül eden bu depo gazı miktarı ile yıllık 8GW eşdeğeri enerji elde edilebilir. 1 000 000 ton evsel katı atıktan oluşacak depo gazının gaz motorunda kullanılarak elektrik üretilmesi durumunda 1MW kapasiteli bir gaz motoru yeterli olacaktır. 1 m³ depo gazının enerji içeriği 0.5 m³ doğal gaz ile eşit kabul edilmektedir [7].

Depo gazının ısı kapasitesi 5-7 kWh/m³ civarındadır. Bu ısı kapasite depo gazının metan içeriğine göre değişiklik gösterir [36]. Atığın yaşı, depo sahası üst örtüsünün performansı ve diğer birçok faktöre bağlı olarak değişkenlik gösterir.

Oluşan depo gazının miktarı ve depo gazı projelerinin sürdürülebilirliği ülkere göre farklılık göstermektedir. Örneğin, Ukrayna genelinde senede 10-12 milyon ton evsel katı atık oluşmaktadır. Oluşan katı atığın %95'i depo sahalarında depolanmaktadır. Ülke genelinde 700 civarında depolama alanı olmasına rağmen bunların yaklaşık 100 tanesi enerji dönüşümü için uygundur. Bu durumda Ukrayna genelinde depolanan atığın enerji dönüşümüne uygun olan miktarı 400 milyon m³/yıl civarında olmaktadır [37].

US EPA'nın "Landfill Methane Outreach Program"ına göre mevcut duruma ilaveten 540 depo sahası daha enerji dönüşüm projelerine uygundur. Bu sahalarda oluşan depo gazı ile saatlik 1280 MW enerji üretmek mümkündür [37].

Depo gazından enerji üretiminde en sık kullanılan yöntemler içten yanmalı motorlar ve gaz türbinleridir. Elektrik motorlarında kapasite motor başına 600 kW - 3MW aralığındadır. Bazı elektrik üretim tesisinde ceket suyunun ve egzozun atık ısısı kullanılarak sıcak su elde edilmektedir [38].

2.6 Depo Gazı Kullanımı ve Faydalar

Depo gazı fosil kaynaklı yakıtlara alternatif olması nedeniyle oldukça önemlidir. Depo gazından enerji üreten projelerin ekonomik faydaları ile sera gazı emisyonlarına, hava kalitesinin iyileştirilmesine ve çevresel etkilerin minimize edilmesine olan etkileri oldukça önemlidir. Ayrıca, depo gazı işletmecileri ve depo sahası etrafında yaşayanlar için yaşanabilir bir atmosfer oluşturulması açısından depo gazının faydalı kullanımı büyük önem teşkil etmektedir [39].

Ekonomik faydalar: Birçok depo sahasında oluşan depo gazının elektrik üretimine uygun olması artık depo gazının enerji geri dönüşümü olmaksızın yakılarak ya da yakılmadan atmosfere verilmesini azaltmıştır. Sera gazı etkisi karbonmonoksit göre 21 kat daha fazla olan metan enerji geri dönüşümü ile karbondioksit başta olmak üzere diğer yanma ürünlerine dönüşmektedir. Aynı zamanda atmosferik ömrü 10-14 yıl arasında olan metanın atmosfere salınmaması ile iklim değişimi ve evsel atık kaynaklı metan emisyonlarının önüne geçilmektedir [38].

Sera Gazı Emisyonlarının Azaltımı: Elektrik üretim tesisi işletim süresi boyunca depo sahasındaki gaz toplama verimine göre oluşan gazın %60-%90'nını kullanabilmektedir. kullanılan bu gaz, su ve karbondioksit çevrilirken elektrik ve ısı üretimi de gerçekleşmektedir. İzmit Solaklar tesisinde depo gazından elektrik üretimi yoluyla 2012-2026 yılları arasında 800 000 ton CO₂eq metanın giderimi sağlanarak depo sahası kaynaklı sera gazı emisyonlarının azaltılması hedeflenmektedir [31].

Dolaylı Sera Gazı Azaltımı: Depo gazı kullanılarak üretilen enerji, petrol türevi ürünler kullanılarak üretilen enerji miktarını azaltacağından, bu ürünlerden kaynaklanan emisyonlarda düşme olması beklenebilir [40].

Doğrudan ve Dolaylı Olarak Diğer Kirleticilerin Emisyonlarında Azaltım: Depo gazının çeşitli yöntemlerle kullanılması sonucunda, depo sahasında meydana gelen fiziksel, kimyasal ve biyolojik aktiviteye bağlı olarak oluşan bileşikler daha az zararlı olan başka yan ürünlere dönüşürler. Bu bileşiklerin çok düşük konsantrasyonlarda dahi insan sağlığına zararlı etkilerinin olduğu bilinmektedir. Enerji kaynağı olarak depo gazının kullanılması durumunda, aynı miktarda enerji üretmek için petrol türevlerinin kullanılması durumuna göre daha az Sülfürdioksit (asit yağmurlarına sebebiyet verir), daha az partikül madde ve daha az azotoksit türevleri salınımı olmaktadır [41].

Depo gazının enerji üretiminde kullanılması durumunda da diğer petrol türevi yakıtlar kullanıldığında açığa çıkan NO_x emisyonları görülür. Emisyon değerleri, kullanılan ekipmana ve arıtma sistemine göre değişkenlik gösterebilir. Fakat, sistemin genel emisyon performansı incelendiğinde , birinci derecede metan'ın daha az zararlı yan ürünlere dönüştürüldüğü, dolaylı yoldan sera gazları salınımlarının azaltıldığı görülmektedir [42].

Diğer Çevresel Faydalar: Depo gazının toplanıp herhangi bir yöntem ile kullanılması, depo sahası çevresinde yaşayanların yaşam kalitesini yükseltmektedir. Depo sahası kaynaklı koku ortadan kalkmaktadır. Benzer şekilde depo sahasında oluşan gazın aktif bir şekilde çekilip kullanılması, depo gazının depo sahası dışına sızmasına ve patlama, yanma vb. gibi etkiler göstermesine engel olur [14].

Depo Sahası İşletmecisi ve Toplum İçin Faydaları: Depo sahasını işleten kuruluş ya da depo gazını işletmekten sorumlu kuruluş depo gazını elektrik motoru veya türbinlerde kullanarak enerji üretimi sağlayabilir. Üretilen elektrik tesis iç ihtiyaçlarında kullanılabilirken aynı zamanda ulusal şebekeye elektrik satışı gerçekleştirebilmektedir. Elektrik üretim tesisinin, iklim değişikliğine sebep olan emisyonları en aza indirdiği için karbon kredisi ile de maddi geri dönüş sağlanması söz konusudur. Ülke politikalarına bağlı olarak yenilenebilir enerjinin diğer enerji türlerine göre daha yüksek

fiyattan alış garantisinin olduğu durumlarda iç ihtiyaçların karşılanması yerine üretilen elektrik direk olarak son kullanıcıya ulaştırılmaktadır [40].

Depo sahasının ve elektrik üretim tesislerinin proje ve işletim safhaları uzun soluklu projelerden oluşmaktadır. Devamlı eleman ihtiyacının olması için bölgesel olarak kalkınmayı sağlayabilmektedir. Yerel yönetimler ile yapılan anlaşmalara bağlı olarak belirli sayıda personelin istihdam edilmesi, üretilen elektiriğin çevre bölgelere uygun şartlarda satılması gibi imkanlar bulunmaktadır [42].

DEPO GAZI MODELLEMESİ

3.1 Depo Gazı Modellemesi Nedir

Depo gazından enerji üretim sistemlerinin dizaynı ve planlaması, depo sahasından elde edilebilecek gazla ilgili tahmin yapmayı zorunlu kılmaktadır. Depo gazı modellemesi depo sahasından elde edilebilecek gaz miktarının tahmininde yoğun olarak kullanılan bir yöntemdir. Planlama ve dizayn aşamasında, modelde kullanılan saha verilerinin doğru ve gerçeği yansıtır şekilde olması ile model parametrelerinin doğru seçimi en önemli kriterler olarak ön plana çıkmaktadırlar [43].

Depo gazı modelleri, depolanmış katı atıktan zamana bağlı olarak elde edilebilecek metan miktarını öngörmede kullanılan tahmin araçlarıdır. Bir başka ifade ile modeller, depo gövdesindeki organik maddede zaman içinde meydana gelen karışık ayrışma reaksiyonlarını basite indirgeyen araçlar olarak tanımlanabilirler. Bu tanım yapılırken temelde kütlenin korunumu prensibi kullanılmaktadır [7].

Depo gaz modelleri ortaya çıkarılırken laboratuvar ölçekli araştırmalar ile pilot ölçekli çalışmaların verileri kullanılmaktadır. Sonrasında bu araştırma sonuçlarının gerçek ölçekli saha verileri ile doğrulanması gerekmektedir.

Modelin doğrulanması basamağında ,model çıktıları mevcut depo sahalarına ait veriler kullanılarak geçmişe dönük olarak yapılabilir. Bu amaçla belirli depo sahaları 5-50 yıl gibi zaman periyodlarında incelenebilir. İnceleme periyodu ne kadar uzun tutulursa model o ölçüde tutarlı olacaktır. Model için esas alınan depo sahası uzun bir zaman periyodunda gözlemlenirken mevcut sistemin yatırımları ve dizaynı için proje öncesinde de mutlaka bir model çalıştırılması gerekmektedir [44].

Depo gazının modelinin formüle edilmesi ve gerçek saha değerleri ile gerçekleşmesi aşamasında aşağıda da belirtildiği şekilde birçok sistematik yaklaşım mevcuttur. Bu yaklaşımlar;

- Geçerlilik : Mikrobiyal kinetikler ile bakteri popülasyonunu ile ilgili çalışmaların laboratuvar ortamındaki uygulamaları,
- Doğrulama : Depo gazı modelinden elde edilen çıktılar ile belli bir periyod boyunca izlenmiş depo sahasından elde edilen veriler arasında ilişki kurma ve karşılaştırma,
- Kalibrasyon : Daha doğru sonuçları vermesi amacıyla, depo sahasına ait gerçek verileri kullanarak modelin giriş parametrelerini düzenleme,
- Lokasyon : 2 ya da 3 depo sahası için kalibrasyon faaliyetinin yürütülmesi,
- Koşullar ve Zaman : Nem içeriği, sıcaklık, atık kompozisyonu, gaz yoğunluğu, gaz bileşimi ve mikrobiyal popülasyon gibi değişkenlerin zamana göre değişimini izlemek şeklindedir [7].

Genellikle modeller atığın ayrışmasını temsil eden basit ampirik fonksiyonlar kullanırlar. Sadece mikrobiyal büyüme ve ayrışmayı esas alan bu modeller sıfırıncı yada birinci dereceden kinetik modellerdir. Depo gazı modelleri, ampirik olarak belirlenen katsayılar yardımıyla basit ama etkili bir tahmin olanağı sunarlar.

Depo gazı modellemesinde ön önemli parametreler metan potansiyeli (L_0), metan üretim sabiti (k) ve zaman periyodudur. Karmaşık modellerde değişik atık fraksiyonları, depolanan atığın sürekli olup olmadığı veya atığın yerleşimi ile metan üretimi arasında zaman yönünden gecikme olması gibi durumlarda göz önünde bulundurulmaktadır. Fakat temelde, atığın yıllar boyunca devamlı olarak geldiği ve bu gelen atığın miktar yönünden farklılık göstereceği varsayılmaktadır.

Modelleme yolu ile bulunan sonuçlarla, gerçek sonuçlar arasında fark çıkmasının sebepleri şu şekildedir [45]:

- Depo gazı modelleri depo sahasının performansını %100 olarak yansıtmazlar.
- Atığın kesintisiz olarak geldiği ve metan üretiminin atık koyulduktan hemen sonra başladığı ya da belirli bir süre boyunca metan üretiminde gecikme olduğu varsayılır.

- Atığın fizikokimyasal kompozisyonunun homojen olduğu varsayılır.
- Gerçek saha verileri sahanın genelini yansıtacak şekilde seçilmemiş olabilir.
- Sahada oluşan metanın hangi verim ile toplandığı; kuyu sayısı, kuyular arası mesafe, saha şartları gibi bir çok değişkene bağlı olabilir.
- Model çıktısı ayrıca bir toplama verimi parametresi belirlenmediği sürece depo sahasında oluşan bütün depo gazı miktarını verir.

3.2 Depo Gazı Modelleme Konsepti

Depo gazı modelleri ne kadar karışık olurlarsa olsunlar sonuç olarak 3 ortak çıktı verirler. Bu çıktılar;

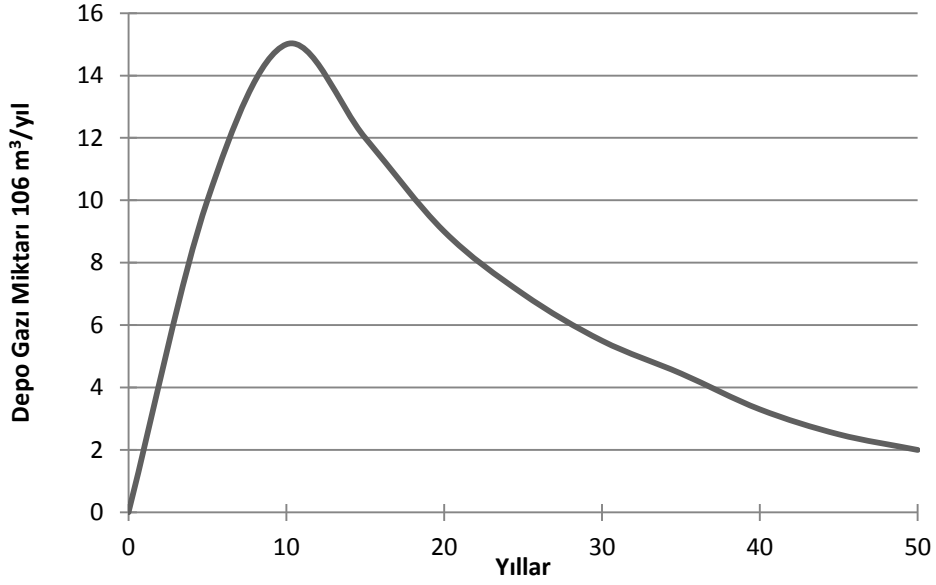
- toplam metan üretim potansiyeli,
- depo gazının ne kadar süre oluşacağı,
- depo gazı üretim eğrisi şeklindedir.

Toplam metan üretim potansiyeli : Toplam metan üretim potansiyeli, depo sahasında oluşacak toplam depo gazının miktarıdır. Tahminler genel olarak belli bir kinetik içinde depo sahasındaki atığın ayrışması temel alınarak yapılır. İlk kullanılan modellerde, atık içindeki organik maddenin tam olarak metan gazına ayrıştığı varsayıldığından 400 l/kg (1 kg kuru atıktan) gibi yüksek metan üretim değerleri görmek mümkündür [46].

Depo gazı oluşma periyodu : Depo gazının ne kadar süre ile oluşacağı modelden modele farklılık gösterebilir. Bu farklılığın sebebi modellerin depo sahasındaki aerobik ve anaerobik fazları ele alışlarının ve buna bağlı olarak kullandıkları katsayıların ve kinetiklerin farklı olmasındandır. Bütün modeller için ortak olarak depo gazı oluşma periyodu gazın belli bir kısmının ya da tamamının oluştuğu zaman olarak tanımlanmaktadır. Depo gazı oluşma periyodu hesaplarında atığın depolanmaya başladığı tarihten itibaren oluşabilecek tüm gazın yarısının oluştuğu zaman ($t_{1/2}$) önemli bir indikatördür [45].

Depo gazı üretim eğrisi : Basit yada karmaşık modeller kullanılarak yapılan tahminlerin %100 gerçek veriler ile örtüşmesi beklenemez. Model kullanmadaki amaç emisyonların

yaklaşık tahmini şeklinde olmalıdır. Şekil 3.1’de birinci dereceden bir modelin gaz üretim eğrisi verilmiştir.



Şekil 3.1 Birinci dereceden model ile gaz miktarı oluşumu tahmini

Bir çok model atığın depolanacağı yere koyulması ile atığın anaerobik olarak bozunup metan gazı oluşumunun başlaması arasına bir bekleme süresi koymaktadır. Bütün modellerde standart olarak oluşan metan miktarı belli bir süre boyunca artar. Daha sonra atık içindeki organik madde miktarındaki azalmaya ve organik maddenin türüne bağlı olarak düşüşe geçer [7].

3.3 Depo Gazı Modellemesinin Faydaları

Depo gazı modellemeleri gaz toplama sisteminin boyutlandırılmasında, yakma veya enerji elde edilecek sistemlerin dizaynında büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, depo gazı emisyonlarının tahmini ve yasal çerçevenin hazırlanması yönünden oldukça önemlidir.

3.3.1 Gaz Toplama Sistemi Dizaynı ve Boyutlandırması

Bir depo sahası için depo gazı toplama ve yakma sistemlerinin ya da enerji eldesi sağlayan sistemlerin boyutlandırılmasında, depo gazı modellemesi oldukça uygun bir araçtır. Depo gazının toplanacağı kuyular ve ilgili alanların tesbiti; toplama, arıtma ve enerji kazanım ünitelerinin boyutlandırılmasında esas alınmaktadır. Bu veriler

kullanılarak yapılan modelleme sonucu ortaya çıkacak veriler projelerin başarısında oldukça önemli bir rol oynamaktadır.

Depo gazının sahadan çekilmesinde kullanılacak borulama sistemi, mekanik ekipmanların seçimi, yakma veya enerji geri kazanım ünitelerinin boyutlarının seçiminde, oluşması beklenen metan gazı miktarı yerine tüm gaz miktarı esas alınır. Genel olarak sahada oluşan depo gazının hacimsel olarak %50 metan ve %50 karbondioksit içerdiği varsayılmaktadır. Bu nedenle boyutlandırma işleminde kullanılacak depo gazı miktarı sahada oluşan metan miktarının 2 katına eşit olarak kabul edilir [48].

3.3.2 İzleme ve Yasal Zorunluluklar

Bir çok depo gazı modeli çeşitli araştırmacılar ya da şirketler tarafından geliştirilmiştir. Belli bir zaman periyodunda belli bir atık miktarından elde edilecek depo gazı miktarını tahminlemeyi hedefleyen bu modellerde, depo sahasında yıllık olarak depolanan atık miktarı ortak çıkış noktasıdır. Depo sahasından elde edilecek toplam depo gazı miktarı yıllık olarak elde edilecek depo gazı miktarlarının toplamına eşittir. Yıllık olarak elde edilebilecek depo gazı miktarı da yıllık olarak depolanan atık miktarına bağlıdır. Genel olarak modeller, atığın depolanması ile gaz üretiminin başlaması arasındaki periyodu temsil eden bekleme zamanı kullanırlar ve değişik yükselme, sabit durma ve azalma dönemlerine sahiptirler [49].

Birinci dereceden kinetik modeller depo gövdesinde oluşacak depo gazı miktarını tahmin etmekte en çok kullanılan modellerdir. Bu modeller modelleme yapılacak depo sahası ile ilgili bir çok varsayım yapmayı gerektirmektedir. Birinci dereceden ayrışma modeli bir çok kurum ve kuruluş tarafından kabul görmüş, endüstride de yaygın olarak kullanılan bir modeldir. Model denklemi değişikliğe çok uygun olmasa da, giriş parametrelerinin değişkenliği , özellikle metan üretim potansiyeli ve metan üretim sabiti bu modelin diğer bir çok modele temel oluşturmasını sağlamıştır [7].

Kullanılan model için anahtar olarak kabul edilecek giriş parametreleri modelleme sonrasında tekrar analiz edilmelidir. Elde edilen gerçek saha verileri ile bu parametrelerin hangi hassasiyette tahmin edildiğinin analiz edilmesi, daha sonra

yapılacak çalışmalarda doğru sonuçlar almak adına oldukça önemlidir. Anahtar parametrelerin depo gazı tahminini doğrudan etkilemesi nedeniyle bu analiz mümkün olduğunca hassas yapılmalıdır.

Depo sahasının mevcut potansiyelinin hesaplanmasında, depo sahasının homojen olmayan yapısı, veri toplamanın güçlüğü, bu verilerin doğruluğu ve modele girişi yapılacak tüm parametrelerinin sahanın gerçek durumunu yansıtacak şekilde seçilmesi oldukça önemli kısıtlardır. Bu kısıtlar göz önünde bulundurularak alt ve üst limitlerin çıkarılması dizayn ve uygulama açısından oldukça önemlidir [49].

3.4 Gaz Modellerinin Sınıflandırılması

Bu bölümde depo gazı tahmininde kullanılan çeşitli modeller incelenecektir. Depo gazı modelleri en geniş anlamda “Basit Ampirik Modeller” ve “Karmaşık Modeller” olarak sınıflandırılabilir. Bir üst basamakta bu modeller; sıfıncı dereceden, birinci dereceden, ikinci dereceden, çok fazlı veya değişik derecelerin kombinasyonu olarak sınıflandırılabilir [45].

1. Sıfıncı Dereceden Model (Zero Order)
2. Sabit Oranlı Model (Constant Rate)
3. Birinci Dereceden Model (Simple First Order)
4. Geliştirilmiş Birinci Dereceden Model (Modified First Order)
5. Çok Fazlı Model (Multiphase Model)
6. İkinci Dereceden Model (Second Order Model)
7. School Canyon Model
8. Üçgen Model (Triangular)
9. Tabasaran Modeli
10. Palos Verdes Kinetik Modeli
11. Sheldon Arleta Modeli
12. GASFILL Modeli

13. Sitokyometrik Model
14. LandGEM Model
15. LFGGEN Modeli
16. EPER Modelleri
17. IPCC 2006 Modeli
18. TNO Modeli
19. Afvalzorg Modeli
20. CALMIM Modeli
21. LMOP Modelleri
22. GasSIM Modeli
23. RET Screen Depo Gazı Modeli
24. EMCON MGM Modeli
25. IGNIG Modeli
26. Sonlu Elemanlar Modeli
27. Weber Modeli

3.4.1 Sıfırncı Dereceden Model

Sıfırncı dereceden modelde, depo gazı formasyonu incelenen zaman periyodu boyunca sabittir. Depolanan atığın yaşı bir giriş parametresi değildir. Zero-order ile yapılmış bir depo gazı tahmini Şekil 3.2’de verilmiştir.

Sıfırncı dereceden modele ait matematiksel ifade (3.1)’de verilmiştir

$$Q = \frac{ML_o}{(t_0 - t_f)} \quad (3.1)$$

Burada;

Q = zamana bağlı oluşabilecek gaz miktarı (hacim),

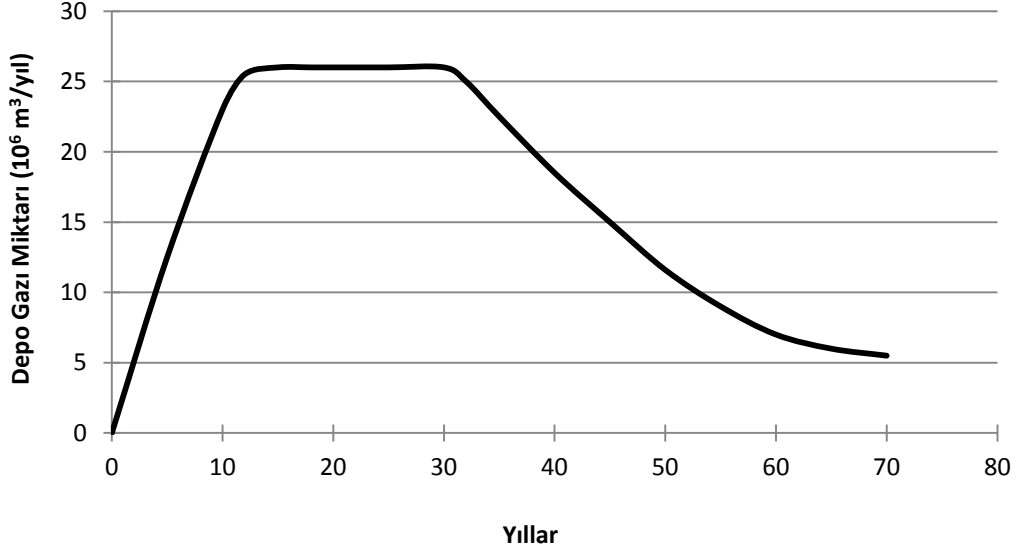
M = depolanmış atık miktarı (kütle),

L_0 = metan üretim potansiyeli (birim kütle başına hacim),

t = zaman,

t_0 = bekleme zamanı ve

t_f = üretimin sonlanacağı zamandır.



Şekil 3.2 Sıfırıncı dereceden model ile yapılmış bir modelleme

Bu model için gerekli olan parametreler metan üretim potansiyeli, depolanmış atık miktarı ve metan üretim süresidir [45].

3.4.2 Sabit Oranlı Model

Bu model atık depolanacağı yere koyulduktan sonra bir bekleme fazı olacağını kabul etmektedir. Bu periyoddan sonra atıktan oluşan gaz miktarı bir anda artar ve oluşacak gaz miktarı sabit bir hızla atık tükenene kadar devam eder. Bu sürenin sonunda baştaki gibi bir anda sıfıra düşer. Şekil 3.3'te sabit oranlı denklemin grafiği verilmiştir [7].

Sabit oranlı model modelin matematiksel ifadesi (3.2)'de verilmiştir

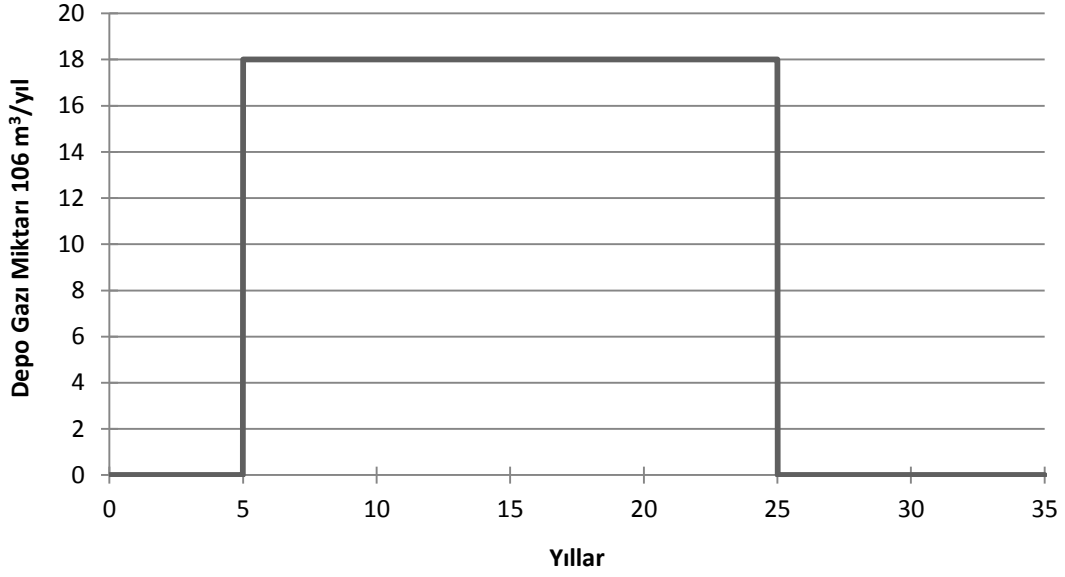
$$\frac{dC}{dt} = -k \quad (3.2)$$

Burada;

t = zaman,

C = toplam metan ya da toplam substrat miktarı,

k = sıfırcı dereceden ayrışma sabitidir.



Şekil 3.3 Sabit oranlı model

3.4.3 Birinci Dereceden Model

Birinci dereceden modelde atığın yaşının depo gazı üretimine etkisi hesaba katılmaktadır. Atığın ayrışma hızının zamana bağlı olarak üssel olarak azaldığı varsayılmaktadır. Birinci dereceden modelin matematiksel ifadesi (3.3)'te gösterilmiştir.

$$Q = ML_0 k e^{-k(t-t_0)} \quad (3.3)$$

Burada;

k = birinci dereceden ayrışma sabitidir.

Yukarıda verilen denklem için gerekli parametreler, metan üretim potansiyeli (L_0), atığın miktarı (M) ve ayrışma hızıdır (k). Bu modelin Scholl Canyon, US EPA LandGEM gibi modifikasyonları sıkça kullanılmaktadır [51].

3.4.4 Geliştirilmiş Birinci Dereceden Model

Bu model, depo gazı üretiminin yavaş bir seyirden sonra hızla yükselip daha sonra üssel olarak düşüşe geçtiğini varsaymaktadır. Geliştirilmiş birinci dereceden modelin matematiksel ifadesi (3.4)'te verilmiştir [45].

$$Q = ML_0 \frac{k + s}{s} [1 - e^{-s(t-t_0)}] \quad (3.4)$$

Burada;

s = birinci dereceden yükselme fazı sabitidir.

3.4.5 Çok Fazlı Model

Çok fazlı model birinci dereceden üssel modeli temel almıştır. Atığın farklı fraksiyonlarının farklı biyobozunma katsayılarına sahip olduğunu ve oluşacak depo gazı miktarının ilk yıllarda daha fazla olacağını öngörür. (3.5)'te çok fazlı modelin matematiksel ifadesi verilmiştir.

$$Q = ML_0 [F_r k_r e^{-k_r(t-t_0)} + F_s k_s e^{-k_s(t-t_0)}] \quad (3.5)$$

Burada;

k_r = hızlı ayrışan atıklar için birinci dereceden ayrışma sabiti,

k_s = yavaş ayrışan atıklar için birinci dereceden ayrışma sabiti,

F_r = hızlı ayrışan atıkların oranı,

F_s = yavaş ayrışan atıkların oranıdır.

Belli bir süreçte depolanmış olan atıktan elde edilebilecek gaz miktarı, her atığın üreteceği depo gazı birbirine eklenerek hesaplanmaktadır.

Modelin çalıştırabilmesi için gerekli olan parametreler, metan üretim potansiyeli (L_0), atık miktarı (M), atığın yavaş ve hızlı ayrışan bileşenlerinin yüzdeleri, ve herbiri için ayrışma katsayılarıdır (k) [7].

3.4.6 İkinci Dereceden Model

İkinci dereceden model, çok sayıda birinci dereceden reaksiyonun kullanıldığı bir modeldir. Atıkta meydana gelen karmaşık reaksiyonları temsil edebilecek şekilde farklı katsayılar kullanılmaktadır. (3.6)'da ikinci dereceden modele ait matematiksel ifade verilmiştir [51].

$$\frac{dC}{dt} = -kC^2 \quad (3.6)$$

Burada;

t = zaman,

k = ikinci dereceden ayrışma sabitidir.

3.4.7 Scholl Canyon Modeli

School Canyon modeli depo gazı oluşumu tahminlerinde en sık kullanılan modellerden biridir. Model, atığın depo sahasına koyulduktan sonraki gaz oluşumu bekleme süresini ihmal etmektedir fakat 1 yıllık bekleme süresini hesaba katan versiyonları ile de karşılaşmak mümkündür. Depo gazı hızlı bir şekilde pik noktaya ulaşırken birinci dereceden ayrışma denklemlerine göre hesap yapılmaktadır. Model, bekleme süresini ihmal ettiği gibi herhangi bir kısıtlayıcı faktörü de modele girdi olarak kullanmaz [52]. Scholl Canyon modeli, (3.7)'den (3.11)'e kadar olan denklemler ile ifade edilmektedir.

$$\frac{-dG}{dt} = kG \quad (3.7)$$

Burada;

G = t zaman sonra geri kalan oluşabilecek metan hacmidir.

(3.7)'nin integre edilmesi ile;

$$G = G_0 e^{-kt} \quad (3.8)$$

$$V = G_0 - G = G_0(1 - e^{-kt}) \quad (3.9)$$

denklemlerine ulaşılır. Burada;

G_0 = $t=0$ zamanında geri kalan oluşabilecek metan miktarı,

V = t zamanına kadar oluşmuş metan hacmidir.

(3.9)'un diferansiyeli alındığında;

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{dG}{dt} = KG = KG_0 e^{-kt} \quad (3.10)$$

denklemini elde edilir. Burada;

kG_0 = $t=0$ anında birim zamanda meydana gelen pik üretim hızıdır.

Toplam üretim, atığın farklı üretim hızlarının toplamı olacak şekilde (3.11)'de gösterildiği şekilde ifade edilmektedir.

$$Q = kG = \sum_{r=1}^n r_i k_i G_{0i} e^{-k_i t_i} \quad (3.11)$$

Burada;

n = atığın ne kadar süre ile depolandığı,

r_i = atık türünün (i) toplam atık türü içindeki oranı (i),

k_i = atık türünün (i) gaz üretim sabiti,

G_{0i} = bir atık türünden $t=0$ zamanında geri kalan oluşabilecek metan miktarı,

t_i = i. yılda atığın yaşıdır.

3.4.8 Üçgen Modeli

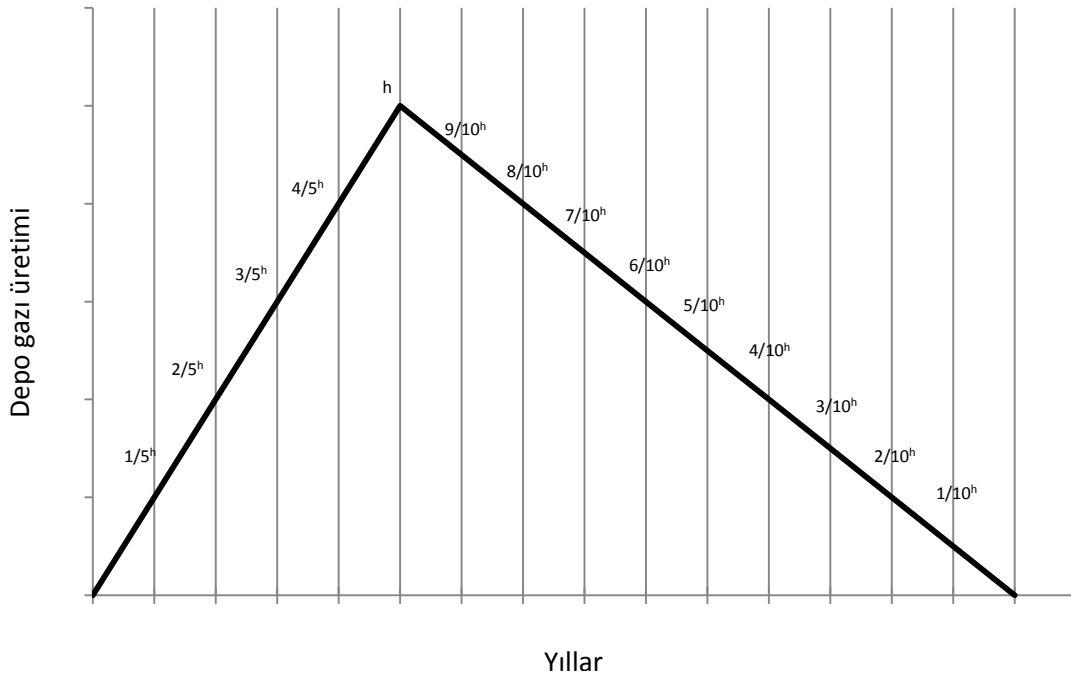
Triangular modelde atık hızlı ayrışan ve yavaş ayrışan olarak iki gruba ayrılmaktadır. Hızlı ayrışan organik atığın 3 aydan 6 yıla kadar, yavaş ayrışan atığın ise 25 yıla kadar ayrıştığı öngörülmektedir.

Ayrışma ilk 2 yıl hızla artarak pik yapar ve daha sonra yavaşca düşüşe geçer. En hızlı depo gazı üretimi ilk 5 yılda olmaktadır. İlk 5 yılda üretilen depo gazının miktarı atık içindeki yavaş ve hızlı ayrışan organiklerin miktarına göre değişkenlik gösterebilir. Modele göre gaz üretimi atık depo sahasına koyulduktan tam 1 yıl sonra başlamaktadır. Model çıktısında lineer olarak artan yükselme ve lineer olarak azalan düşme fazı olarak toplamda iki faz bulunur. Şekil 3.4'te bu fazlar görülebilir. Modelin yavaş ayrışan ve hızlı ayrışan organikler için ayrı ayrı çalıştırıldığı uygulamalar ile de karşılaşmak mümkündür. Bu durumda anlık olarak oluşması beklenen depo gazı miktarı için eğriler üst üste bindirilmektedir.

Depolanan atıktan oluşan depo gazı miktarı modele göre (3.12)'de gösterildiği üzere şu şekilde ifade edilmektedir.

$$L_0 = \frac{1}{2} t_f Q_{sp} \quad (3.12)$$

Bu modelin kullanımı kısıtlayan en önemli faktör depo gövdesindeki nem miktarıdır. Depolanan ve gaz üretimi devam eden atık için en optimum nemlilik oranı %50-60 arasındadır. İşletme koşullarına, depo gövdesindeki reaksiyonlara ve atığın türüne göre nemlilik oranının optimum koşulların altında olması durumunda toplam gaz miktarının daha uzun periyotta oluşması beklenebilir [46].



Şekil 3.4 Üçgen depo gazı modeli

Toplam depo gazı üretimi (m^3/kg) : $\frac{1}{2}$ (Depo gazı üretim periyodu) x (Pik Depo gazı oluşma hızı ($m^3/kg/yıl$))

3.4.9 Tabasaran Modeli

Tabasaran modeli atıksuyun ve arıtma çamurunun anaerobik ortamda arıtılması konusunda Avrupa'da en çok başvurulanan modellerden biridir. (3.13) ve (3.14)'te modelin matematiksel ifadeleri verilmiştir.

$$G_a = G_e(1 - e^{-kt}) \quad (3.13)$$

Burada;

G_a = a yılına kadar oluşan toplam gaz miktarı ($Nm^3 t^{-1}$),

G_e = Gaz oluşum potansiyeli ($Nm^3 t^{-1}$),

k = ayrışma sabiti = $\ln 2/t_{1/2}$,

a = zamandır.

$$G_e = 1.868 C_0(0.014T + 0.28) \quad (3.14)$$

Burada,

C_0 = atık içindeki ayrışabilir karbon içeriği (kg t^{-1}),

T = sıcaklıktır ($^{\circ}\text{C}$).

Oluşması beklenen gazın hesabında kullanılan sıcaklık düzeltmesi hücre içi faaliyetlerde kullanılacak substrat miktarının sıcaklık ile değişkenlik göstermesi nedeniyle kullanılmaktadır. Fakat depo sahalarındaki atığın bekletme süresi scalası anaerobik çürütücülerden tamamen farklıdır. Bu nedenle depo gazı modellemesinde sıcaklık düzeltme faktörü kullanılmaz. Özel durumlar depo sahasındaki sıcaklık 35°C olarak kabul edilir [7].

3.4.10 Palos Verdes Kinetik Modeli

Birinci derece kinetikleri kullanan Palos Verdes modelinde kullanılan varsayımlar şu şekildedir.

- İki fazda depo gazı oluşumu
- Birinci fazda üssel şekilde yükselen depo gazı oluşum eğrisi
- İkinci fazda üssel şekilde düşen depo gazı oluşum eğrisi
- İki fazda da oluşan depo gazı miktarının birbirine eşitliği
- Birinci faz ile ikinci fazın birleştiği noktanın pik değer olması
- Organik maddenin yavaş, orta hızlı ve hızlı ayrışan olarak 3 farklı türde ele alınması.

Organik maddenin maksimum gaz üretim potansiyeli (3.15)'te verilmiştir.

$$L_{0i} = \frac{P_i}{100} L_0 \quad (3.15)$$

Burada;

L_{0i} = organik maddenin (i) metan potansiyeli,

P_i = organik maddenin (i) toplam atık içindeki oranı,

L_0 = tüm atığın metan üretim potansiyelidir.

Bu model için kullanılan matematiksel ifadeler (3.16) ve (3.17)'de verilmiştir.

$$\frac{dV}{dt} = k_1 V \quad 0 < t < t_{1/2} \text{ (1. faz)} \quad (3.16)$$

$$\frac{dV}{dt} = k_1 = -k_2 G \quad t > t_{1/2} \text{ (2. faz)} \quad (3.17)$$

Burada;

V = t zamanda oluşan gaz miktarı,

G = t zaman sonra geri kalan oluşabilecek gaz miktarı,

k_1, k_2 = birinci ve ikinci fazdaki gaz oluşma sabitleridir.

Birinci faza ait denklemin integrali alındığında Denklem 3.18'de verilen matematiksel ifadeye ulaşılır.

$$V = V_0 e^{k_1 t} \quad (3.18)$$

Burada,

V_0 = oluşan gaz miktarıdır.

İkinci faza ait denklemin integrali alındığında ise (3.19)'da verilen matematiksel ifadeye ulaşılır.

$$G = \frac{G_0}{2} e^{-k_2(t-t_{1/2})} \quad (3.19)$$

$V = G_0 - G$ ise,

$$V = G_0 \left[1 - \frac{1}{2} e^{-k_2(t-t_{1/2})} \right] \quad (3.20)$$

Bu model tüm atıklar için tek bir metan üretim potansiyeli olduğunu ve her iki fazda eşit miktarda gaz oluştuğunu kabul etmektedir [45].

3.4.11 Sheldon Arleta Modeli

Sheldon Arleta modeli, Palos Verdes modeli ile benzerlik göstermektedir. Gaz oluşumu üssel olarak artan ve azalan iki fazdan oluşmaktadır. En yüksek depo gazı oluşumu

toplam gaz miktarının yarısı olduğu döneme denk gelmektedir. Aynı zamanda toplam oluşum süresinin %35'inde toplam gaz miktarının yarısının oluşacağı öngörülür. Model atığı, hızlı ayrışan ve yarı ömrü 9 yıl, toplam ayrışma süresi 26 yıl olan organikler ile yavaş ayrışan yarı ömrü 16 yıl, toplam ayrışma süresi 103 yıl olan organikler olarak iki şekilde ele almaktadır. Nem, sıcaklık vb. gibi kısıtlayıcı faktörler modele parametre olarak girilmemektedir [7].

3.4.12 GASFILL Modeli

Gasfill modeli 1988 yılında Montain View depo sahasında yapılan çalışma sonucu ortaya çıkmıştır. Model, bekleme fazını hesaba katmaktadır. İlk fazda hiperbolik şekilde artan gaz üretimi, ikinci fazda üssel olarak azalan gaz üretimi görülür. Atığın hızlı, orta hızlı ve yavaş ayrışan olarak üçe ayrıldığı modelde, metanın karbondioksit ile aynı molar hacimde olduğu kabul edilmektedir. Fazlara ait matematiksel ifadeler (3.21), (3.22) ve (3.23)'de verilmiştir.

$$Q_i = 0 \quad t \leq t_{0i} \quad (3.21)$$

$$Q_i = \coth \alpha_i (t_{2i} - t) - \coth \alpha_i (t_{2i} - t_{0i}) \quad t_{0i} < t \leq t_{1i} \quad (3.22)$$

$$Q_i = Q_{pi} e^{-\lambda_i (t - t_{1i})} \quad (3.23)$$

Burada;

Q_i = atık türünden (i) birim zamanda oluşacak metan,

t_{0i} = atık türü için (i) metan oluşumunun başladığı zaman,

t_{1i} = atık türü için (i) pik metan gazı oluşum zamanı,

t_{2i} = hiperbolün sonsuza yaklaşmaya başladığı zaman,

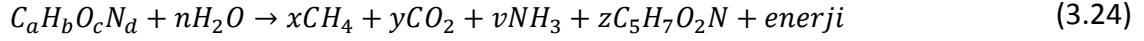
Q_{pi} = birim zamandaki pik metan oluşum hızı,

$\alpha_i \lambda_i$ = sabitlerdir.

Model, hızlı ayrışan organik maddelerin bir seneden daha kısa sürede ayrışmaya başladığını, orta hızlı ve yavaş ayrışan organik maddelerden kaynaklanan metan gazı oluşumunun en az iki sene sonra başladığını kabul etmektedir [45].

3.4.13 Sitokyometrik Model

Sitokyometrik model, atık içindeki organik maddeleri ampirik bir formül ile ifade eder ve denklemin ürün tarafında CH_4, CO_2, NH_3 ve enerji bulunur. Metan üretim potansiyeli (L_0) sitokyometrik yöntem ile elde edilir. Ayrışma prosesi (3.24)'te verilmiştir.



Bu modelin kullanımı toplam üretilecek gaz miktarını herhangi bir üretim katsayı olmaksızın verdiği için çok yaygın değildir. Aynı zamanda atığın kimyasal kompozisyonunu çok doğru şekilde bilmeyi gerektirir. Ek olarak atık içinde bulunan ve ayrılmayan malzemenin oranı da model için oldukça önemlidir. Nem ve toksisite hesaba katılmamaktadır [7].

3.4.14 LandGEM Model

LandGEM modeli, depo sahalarında depolanan atıktan kaynaklanan emisyonların tahmininde kullanılan birinci dereceden kinetiklerin kullanıldığı bir modeldir. EPA üzerinden yazılımına kolayca ulaşmak mümkün olan model temelde aşağıdaki verileri esas almaktadır [51] :

- Depo sahası dizayn kapasitesi.
- Depolanmış toplam atık miktarı veya yıllık olarak depolanmış atık miktarları.
- Metan üretim sabiti (k) ve metan üretim potansiyeli (L_0).
- Toplam organik maddeler ile metanojenik olmayan bileşenlerin konsantrasyonları.
- Atık yaşı.
- Depo sahasına tehlikeli atık kabul edilip edilmediği.

Model yazılımında önceden belirlenmiş k ve L_0 değerleri sunulmaktadır. Fakat detaylı incelemeler ve pilot ölçekli çalışmalar sonucu elde edilen değerleri kullanarak sahalara özel tahminler yapmak mümkündür. Modelin diğer bir özelliği ise bütün emisyon kaynakları ile ilgili tahmine olanak sağlamasıdır.

(3.25)'te verilen matematiksel ifade, depo sahasında yıllara göre depolanan atık miktarlarının belirsiz olduğu durumlarda kullanılmaktadır.

$$M_{NMOC} = 2kL_0 \sum_{i=1}^n M_i (e^{-kt_i}) (C_{NMOC}) (3.6 \times 10^{-9}) \quad (3.25)$$

Burada;

M_{NMOC} = metanojenik olmayan bileşenler için toplam emisyon miktarı (ton/yıl),

k = metan üretim sabiti (yıl^{-1}),

L_0 = metan üretim potansiyeli ($\text{m}^3/\text{ton atık}$),

M_i = i. bölümdeki atık miktarı (ton),

t_i = i. bölümdeki atık yaşı (yıl),

C_{NMOC} = metanojenik olmayan bileşenlerin konsantrasyonu (ppm)

3.6×10^{-9} = çevirme faktörü şeklindedir.

M_i parametresi hesaplanırken , biyolojik olarak bozunmayan atıklar toplam atık miktarı içinden çıkartılabilirler.

(3.26)'da belli bir yılda meydana gelen toplam emisyon miktarını hesaplamada kullanılabilecek matematiksel ifade verilmiştir.

$$M_{NMOC} = 2L_0R(e^{-kc} - e^{-kt})(C_{NMOC})(3.6 \times 10^{-9}) \quad (3.26)$$

Burada;

M_{NMOC} = metanojenik olmayan bileşenler için emisyon miktarı (ton/yıl),

L_0 = metan üretim potansiyeli ($\text{m}^3/\text{ton atık}$),

R = ortalama yıllık olarak depolanan atık miktarı (ton/yıl),

k = metan üretim sabiti (yıl^{-1}),

t = depolamanın başladığı zamandan itibaren geçen süre (yıl),

C_{NMOC} = metanojenik olmayan bileşenlerin konsantrasyonu (ppm),

c = dökümün sonladığı zamandan itibaren geçen süre*,

3.6×10^{-9} = çevirme faktörü şeklindedir.

*Döküm devam ediyorsa $c=0$ ve $e^{-kc} = 1$

Metan üretim potansiyeli (L_0) genel olarak atığın içerdiği selüloz miktarı ile ilişkilidir. Teorik metan üretimi miktarı, selüloz içeriği artarken artma eğilimindedir. Eğer depo sahasında metanojenik aktiviteyi bozacak şekilde bir ortam oluşma eğilimi var ise metan üretim potansiyeli için önceden belirlenmiş değerden daha düşük bir değer alınabilir. Bu ve benzeri durumların etkisi ile metan üretim potansiyelinin hesaplanması kolay olmayabilir. Bu durumda depo sahasının pH, nem muhtevası, sıcaklık ve besin içeriği gibi parametrelerini yansıtacak biyobozunurluk testleri uygulanabilir. Literatürde L_0 değerleri 6 ile 270 m³ CH₄ / ton atık arasında değişkenlik göstermektedir.

LandGEM modeli, atığın depo sahasına koyulduktan 1 sene sonra depo gazı oluşturmaya başladığını öngörmektedir. Fakat farklı depo sahalarında üretimin 6. aydan itibaren başladığı da belirtilmiştir [51].

3.4.15 LFGGEN Modeli

LFGGEN modeli Florida üniversitesi tarafından geliştirilmiştir. Gasfill modeli ile Tabasaran modelinin bir karışımı olarak nitelendirilebilecek modelin varsayımları şu şekildedir [7]:

- Depo gazı oluşumu atık depo sahasına konulduktan bir yıl sonra başlar.
- İkinci fazda oluşması beklenen depo gazı lineer olarak artar.
- İkinci fazda birinci dereceden kinetik denklemler kullanılır ve üssel olarak üretim hızı düşer.

Model girdileri arasında; biyobozunma katsayıları, biyokimyasal metan potansiyeli, 11 farklı alt katagoride ele alınan atık, ıslak, normal ve kuru olarak katagorilenmiş nem muhtevası ve hızlı, orta hızlı ve yavaş olarak ele alınan biyolojik ayrışma vardır.

LFGGEN modelinin pik metan oluşum miktarını veren matematiksel ifade (3.27)'de verilmiştir..

$$Q_{Sp} = L_0 \frac{2k}{k(t_p - t_0) + 2} \quad (3.27)$$

Burada;

Q_{Sp} = pik metan üretim miktarı (m³/yıl),

L_0 = metan üretim potansiyeli (m^3/kg),

t_0 = gecikme zamanı,

t_p = pik üretime kalan zaman,

k = ayrışma sabiti şeklindedir.

Metanojenезin ikinci safhasında, ayrışma sabiti (3.28)'de verilen matematiksel ifade yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$k = \frac{-Ln 0.01}{t_{99} - t_p} = \frac{4.6052}{t_{99} - t_p} \quad (3.28)$$

Burada;

t_{99} = pik üretimin % 1'ine ulaşmak için gerekli olan zaman şeklindedir.

Birim atık miktarı başına yıllık olarak oluşacak metan miktarı (3.29)'dan (3.32)'ye kadar verilen matematiksel ifadeler ile hesaplanabilir.

$$Q_{sj} = 0 \quad 0 < t \leq t_{aj} \quad (3.29)$$

$$Q_{sj} = \frac{Q_{spi}}{2} \left[\frac{t - t_{oj}}{t_{pj} - t_{oj}} + \frac{(t - 1) - t_{oj}}{t_{pj} - t_{oj}} \right] \quad t_{oj} < t < t_{pj} \quad (3.31)$$

$$Q_{sj} = \frac{Q_{spj}}{2} \left[e^{-k_j(t-t_{pj})} + e^{-k_j(t-1-t_{pj})} \right] \quad t_{pj} < t < t_{99} \quad (3.32)$$

Burada;

Q_{sj} = j türündeki atık için metan üretim miktarı (m^3/kg yıl),

Q_{spj} = j türündeki atık için pik metan üretim miktarı (m^3/kg yıl),

t = atık yaşı,

j = atık türü şeklindedir.

Yıllık olarak her atık türü için ayrı ayrı oluşan metan gazı miktarının toplanması ile toplam depo gazı üretimini veren matematiksel ifade (3.33)'te verilmiştir [7].

$$Q = \sum Q_{si} x M_j \quad (3.33)$$

Burada;

Q = toplam metan üretimi miktarı (m^3),

Q_{sj} = j türündeki atık için metan üretim miktarı (m^3/kg),

M_j = j türündeki atık miktarı (kg) şeklindedir.

3.4.16 EPER Modelleri

EPER (European Pollutant Emmission Register) tarafından hazırlanmış modellerdir. Daha çok, depo gazının aktif olarak çekildiği ve kullanıldığı sahalarda kullanıma uygun olan modeller EPER Fransa ve EPER Almanya olmak üzere iki çeşittir.

3.4.16.1 EPER Fransa

Model, depo sahasında oluşacak metan miktarını hesaplamak için iki yaklaşım sunmaktadır. Model çalıştırılmadan önce bu iki yaklaşımdan biri seçilir [51].

- Depo sahasında gaz toplama sistemi bulunan bir hücreden elde edilen gaz ve toplama verimi kullanılarak toplam metan gazı emisyonu hesaplaması.
- Depo sahasında gaz toplama sistemi bulunan ya da bulunmayan bir hücrede çok fazla model ve toplama verimi kullanılarak toplam metan gazı emisyonu hesaplaması.

Birinci yaklaşımda, depo sahasının gaz toplama sistemi bulunduran bir hücrede oluşan metan gazı (3.34) ve (3.35)'te verilen matematiksel ifadeler kullanılarak hesaplanır.

$$A = F \times H \times [CH_4] \quad (3.34)$$

Burada;

A = depo sahasında oluşmuş ve kullanılmış metan miktarı ($m^3CH_4/yıl$),

F = depo gazı debisi (m^3 depo gazı/saat),

H = F parametresinin stabil olarak sağlanabildiği süre (çalışma saati) (saat/yıl),

$[CH_4]$ = depo gazı içerisindeki CH_4 konsantrasyonu şeklindedir.

$$P = \frac{A}{\alpha} \quad (3.35)$$

Burada;

P = depo sahasında oluşan metan miktarı ($m^3 CH_4/yıl$)

α = toplama sistemi verimliliği (%) şeklindedir.

Depo sahasında oluşmuş ve kullanılmış metan miktarı (A), standart sıcaklık ve basınç dikkate alındıktan sonra düzeltilebilir. Depo sahasında, depo gazı toplama sisteminin bulunduğu alandaki fiziksel ve mekanik durumlar toplama verimliliğini etkilemektedir. Örneğin, aktif olarak gaz çekilen bir bölgede örtü tabakası bulunmaması durumdan toplama verimi %25, sadece örtü toprağı bulunması durumunda %40, örtü toprağı üstünde kil bulunması durumunda %65 ve geomembran bulunması durumunda %90 alınabilir [51].

İkinci yaklaşımda oluşacak metan gazı miktarı çok fazla ADEME modeli kullanılarak hesaplanmaktadır. Modelin matematiksel ifadesi (3.36)'da verilmiştir.

$$FE_{CH_4} = \sum_x FE_0 \times \left[\sum_{1,2,3} A_i \times p_i \times k_i \times e^{-k_i t} \right] \quad (3.36)$$

Burada;

FE_{CH_4} = oluşan metan miktarı ($m^3 CH_4/yıl$),

FE_0 = metan üretim potansiyeli ($m^3 CH_4/ton$ atık),

p_i = i türündeki atığın tüm atığa oranı,

k_i = ayrışma sabiti (y^{-1}),

t = atık yaşı (yıl),

A_i = düzeltme faktörü şeklindedir.

Model atıkları 3 alt kategoriye ayırmaktadır. Her atık türü için belirlenen ayrışma katsayıları model tarafından temsil edici şekilde teke düşürülür. Bu özelliği nedeniyle EPER Fransa modeli tek fazlı model olarak düşünülebilir. Model, standart olarak depo sahası yüzeyinde meydana gelen oksidasyonu oluşan depo gazının %10'u olarak

almaktadır. Toplam metan emisyonu (3.37)'de verilen matematiksel ifade yardımıyla hesaplanabilir [45].

$$CH_4 \text{ emisyonu} = P(1-\alpha) \times 0,9 + FE_{CH_4} \times 0,9 \quad (3.37)$$

Burada;

α = toplama verimi şeklindedir.

3.4.16.2 EPER Almanya

Model, depo gazı meydana gelen atığı sadece evsel atık tanımlamaktadır. Bu nedenle karışık atık depolanan depo sahalarında evsel atık miktarı ayrıca hesaplanmak zorundadır. EPER Almanya modelinin sıfırıncı dereceden matematiksel ifadesi (3.38)'de verilmiştir [50].

$$Me = M \times BDC \times BDC_f \times F \times D \times C \quad (3.38)$$

Burada;

Me = toplam depo gazı miktarı (ton CH₄/yıl),

M = yıllık olarak depolanan atık miktarı (ton atık/yıl),

BDC = biyolojik olarak ayrışabilen karbonun tüm atığa oranı (ton Karbon/ton atık),

BDC_f = anaerobik ortamda bozunabilen karbonun toplam karbona oranı (0,5),

F = karbon-CH₄ çevrim faktörü (1.33),

D = toplama verimi (0.1-0.9),

C = metan konsantrasyonu (%50) şeklindedir .

3.4.17 IPCC 2006 Modeli

IPCC modeli birinci dereceden ayrışma kinetiklerini kullanarak oluşacak toplam metan gazı emisyonunu vermektedir. Temelde diğer modellere göre daha basit sayılabilecek bir ayrışma denkleminde yola çıkmaktadır. Farklı atık türlerinin yarı ömürleri birkaç yıldan 20-30 yıla kadar değişkenlik gösterebilmektedir. Atığın bileşimin doğru karakterizasyonu ve miktarı özellikle kısa yarı ömüre sahip organik maddelerin

parçalanacağı ilk 3-5 yıldaki doğru tahmin için çok önemlidir. Toplam depo gazı projeksiyonun gerçeğe çok yaklaşık olması için izleme ve kontrol süreçlerinin 30-50 yıllık bir periyod boyunca devam ettirilmesi gerekmektedir. Depo sahasında oluşacak CH₄ miktarı 3 yaklaşım ile ele alınmaktadır [7].

Yaklaşım 1 : 1. Yaklaşımı, önceden belirlenmiş faaliyet bilgiler ve parametreler ile IPCC birinci dereceden ayrışma yöntemini kullanmaktadır.

Yaklaşım 2 : 2. yaklaşım birinci yaklaşım ile aynı denklemi kullanır. 1. yaklaşım ile aradaki en önemli fark sahaya özgü parametrelerin ve tarihsel verilerin modele birer girdi olmasıdır. Bu yaklaşım kullanılacaksa verilerin tarihe bağlı olarak değişimi en az 10 yıl boyunca incelenmiş olmalıdır. Depolanan atık miktarı en önemli girdidir.

Yaklaşım 3 : 3. yaklaşım 1. yaklaşımın ayrışma modellerini kullanır ve 2. yaklaşıma bölgelere özgü bir takım parametreler ekler. Programın ana girdileri; yarı ömür, ayrışabilir organik karbon miktarı (DOC), metan üretim potansiyeli (L₀) ve anaerobik ortamda bozunan DOC oranıdır(DOC_f).

IPCC birinci dereceden modelde tek bir yıl için oluşacak depo gazının matematiksel ifadesi (3.39)'da verilmiştir.

$$CH_4emisyonu = \left\{ \sum_x CH_4oluşan_{x,T} - R_T \right\} x(1 - OX_T) \quad (3.39)$$

Burada,

CH₄ emisyonu = T yılında oluşan depo gazı miktarı

T = hesaplanmak istenilen yıl,

x = atık türü,

R_T = T yılında elde edilen depo gazı miktarı (ton),

OX_T = T yılındaki oksidasyon faktörü şeklindedir.

OX depo sahası yüzeyinde bulunan toprak tabasında yada diğer örtü tabakalarında okside olan metan miktarını temsil etmektedir. Ayrışan atıktan T yılında meydana gelecek metan miktarı (CH₄ oluş_T) , ayrışabilir organik karbonun (DDOC_m) birinci

dereceden ayrışma kinetikleri oranında ayrıştığı varsayılarak (3.40)'ta verilen şekilde hesaplanır.

$$CH_4oluşan_T = DDOCm ayrışan_T \times F \times 16/12 \quad (3.40)$$

Burada ;

$DDOCm ayrışan_T$ = T yılında ayrışan DDOCm (ton),

F = oluşan depo gazı içinde bulunan metanın oranı,

16/12 = metan ve karbonun mol ağırlıkları arasındaki oran şeklindedir.

$$DDOCm ayrışan_T = DDOCma_{T+1} \times (1 - e^{-k}) \quad (3.41)$$

$$DDOCma_T = DDOCmd_T + (DDOCma_{T+1} \times e^{-k}) \quad (3.42)$$

Burada;

$DDOCma_T$ = T yılı sonunda bozunmadan kalan DDOC miktarı (ton),

$DDOCma_{T-1}$ = T-1 yılı sonunda bozunmadan kalan DDOC miktarı (ton),

$DDOCmd_T$ = T yılında depolanmış atık miktarı (ton),

k = reaksiyon sabiti ($k = \ln(2)/t_{1/2}$) (y^{-1}),

$t_{1/2}$ = yarı ömür şeklindedir.

$$DDOCm = W \times DOC \times DOC_f \times MCF \quad (3.43)$$

Burada;

W = depolanmış atık miktarı (ton),

DOC = depolanmış ayrışabilir organik karbon (ton karbon/ton atık),

DOC_f = depolanmış organik karbonun anaerobik koşullarda ayrışabilen oranı,

MCF = metan düzeltme faktörü şeklindedir.

Depo sahası genelinde yıllara bağlı olarak oluşacak depo gazının hesaplanmasında (3.44)'te verilen matematiksel ifade kullanılmaktadır.

$$CH_4 = (MSW_T \times MSW_F) \times MCF \times DOC \times DOC_F \times F \times \left(\frac{16}{12} - R \right) \times (1 - OX) \quad (3.44)$$

Burada;

MSW_T = depolanmış atık miktarı (ton/yıl),

MSW_F = depo sahasında depolanan atık içindeki evsel atığın oranı,

MCF = metan düzeltme faktörü,

DOC = depolanmış ayrışabilir organik karbon,

DOC_F = depolanmış organik karbonun anaerobik koşullarda ayrışabilen oranı,

F = depo gazının içindeki metanın oranı,

R = depo sahasından elde edilmiş metan miktarı (ton/yıl),

OX = oksidasyon faktörü şeklindedir.

3.4.18 TNO Modeli

TNO modelinde, karbonun depo sahasındaki ömrü boyunca ayrışması birinci dereceden denklem ile ifade edilmektedir. Belirli bir miktardaki atıktan oluşan depo gazının zamana bağlı olarak üssel azaldığı öngörülmektedir. (3.45)'te birinci dereceden ayrışmanın matematiksel ifadesi verilmiştir.

$$\alpha_t = \zeta 1.87 A C_0 k_1 e^{-k_1 t} \quad (3.45)$$

Burada;

α_t = yıllık oluşacak depo gazı miktarı (m^3 depo gazı/yıl),

ζ = düzeltme katsayısı (0,58),

1.87 = çevirme katsayısı (m^3 depo gazı/kg bozunan karbon),

A = depolanmış atık miktarı (ton),

C_0 = atık içindeki organik karbon miktarı (kg karbon/ton atık),

k_1 = ayrışma katsayısı (0,094 /yıl),

t = depolama başladığından beri geçen süre şeklindedir.

TNO modeli atık içindeki bozunabilir organik karbondan yola çıkmaktadır. Model organik karbon üzerinden yola çıktığı için farklı kompozisyonlara sahip farklı sahalarda uygulanması sırasında atığın kompozisyona bağlı hataların önüne geçmektedir.

TNO modeli toplam depo gazı miktarını hesapladığı için oluşacak depo gazında %50 oranında metan gazı bulanacağı varsayılarak oluşacak metan gazı hesaplanabilir ($d=714\text{gCH}_4.\text{m}^{-3}$). Modelin çıktılarına verim ve standart oksidasyon faktörü olarak %10 azaltma uygulanabilir [53].

3.4.19 Afvalzorg Modeli

Afvalzorg modelinde farklı türden atıklar farklı organik madde içeriğine ve ayrışma hızlarına sahiptir. Çok fazlı modellerin avantajı tipik atık kompozisyonun detaylı bir şekilde modele girdi olarak kullanılabilmesidir. Afvalzorg çok fazlı modelde benzer şekilde 8 atık çeşidi 3 farklı katagoride ele alınmıştır. Her üç katagoride oluşan depo gazı miktarı ayrı hesaplanmaktadır. Modelin birinci dereceden matematiksel ifadesi (3.46)'da verilmiştir.

$$\alpha_t = \zeta \sum_{i=1}^3 cAC_{0j}k_{1,i}e^{-k_{1,i}t} \quad (3.46)$$

Burada;

α_t = yıllık oluşacak depo gazı miktarı (m^3 depo gazı/yıl),

ζ = düzeltme katsayısı,

i = $k_{1,i}$ ayrışma katsayısına sahip atığın toplam atık içindeki oranı*,

c = çevirme katsayısı (m^3 depo gazı/kg ayrıışan organik madde)**,

A = depolanmış atık miktarı (Mt),

C_0 = atık içindeki organik madde miktarı (kg organik madde/ton atık),

$K_{1,i}$ = i türündeki atık için ayrışma katsayısı (y^{-1})

t = depolama başladığından beri geçen süre şeklindedir.

*Sadece hızlı,orta hızlı ve yavaş ayrışan organik maddeler hesaba katılmaktadır. Lignin ve plastik gibi anaerobik ortamda ayrışmaya uğramadığı varsayılan organik maddelerin depo gazı üretimine katkısı olmadığı öngörülür.

**1 Kg Organik maddenin bozunmasına bağlı olarak oluşan minumum 0.7 m³, maksimum 0.74 m³ depo gazı kullanılmıştır.

Minumum ve maksimum katsayıların kullanılmasına bağlı olarak model en iyi ve en kötü şeklinde iki depo gazı üretim çıktısı vermektedir. Afvalzorg modeli toplam depo gazı miktarını hesaplamaktadır. Oluşacak depo gazında %50 oranında metan gazı bulunduğu varsayılarak oluşacak metan gazı hesaplanabilir ($d=714\text{gCH}_4.\text{m}^{-3}$). Modelin çıktılarına verim ve standart oksidasyon faktörü olarak %10 azaltma uygulanabilir [51].

3.4.20 CALMIM Modeli

CALMIM modeli gerçek saha verileri ile kalibre edilmiş tek boyutlu taşınım ve oksidasyon modelidir. Model, depo gazı hesaplaması modelinden çok oluşacak toplam emisyon miktarını modellemektedir. Yüzey kaplamasının kısa, orta ve uzun vadedeki durumları, kaplamanın kalitesinin ve cinsinin yüzdesel dağılımları, her bir yüzey kaplaması türünde yüzeyde meydana gelecek mevsimsel oksidasyonlar model girdileridir.

CALMIM modeli, IPCC Tier III modellerinden biridir. İklim değişikliği ile ilgili olarak katı atık kaynaklı emisyonların modellemesinde kullanılır. Oluşan metan miktarı birim alanda değerlendirilmektedir. Bu nedenle model yüzey kaplama özellikleri ile ilgili olarak geniş bir arayüze sahiptir. Gaz toplama sisteminin özellikleri de modele girdi oluşturmaktadır.

Birinci dereceden olup depo sahasındaki atık miktarına direkt olarak bağlı olmayan ilk model olma özelliğini taşımaktadır [54].

3.4.21 LMOP Modelleri

Depo sahalarından kaynaklanan emisyonların azaltılması amacıyla Amerika Çevre Koruma Örgütü(EPA), LMOP (Landfill Methane Outreach Program) kapsamında birçok aday ülkeye özel modeller hazırlatmıştır. Kolombiya, Filipinler, Tayland, Ukrayna, Çin,

Meksika, Ekvator ve Orta Amerika modelleri bu proje kapsamında hazırlanmış ve bölgelere özgü özellikleri bünyesinde barındıran modellerdir. Modellerin tamamı atığın birinci derecede ayrışması üzerine kuruludur. Atık kompozisyonu, atık yaşı , depolama süresi gibi parametreler ana girdileri oluşturmaktadır. Her model bulunduğu coğrafi bölgenin özelliklerine göre değerlendirilmiştir. Modellerin oluşturulmasındaki birincil öncelik emisyon miktarlarının hesaplanması iken , ikincil olarak depo sahası işletmecilerine gaz toplama sistemlerinin verimleri ile ilgili olarak bir vizyon sağlamak amaçlanmıştır. Metan üretim katsayıları ve depo gazı oluşma potansiyelleri ülkelerin atıklarına özgüdür. Model ile birlikte önceden tanımlanmış aralıkta bir değer gelmekte ve istenilirse katsayılar daha spesifik olacak şekilde değiştirilebilmektedir [55].

Bu modellerden sonuncusu olan Kolombiya modeli LMOP kapsamında 2010 yılında SCS firması tarafından oluşturulmuştur. Model vasıtasıyla, depo gazı üretim miktarı, potansiyel toplama verileri ile gelecekteki verimlerin hesabı yapılabilmektedir. Model, gaz toplama ve kontrol sistemleri ilgili bir projeksiyon sağlamayı amaçlamaktadır.

Diğer LMOP kapsamındaki modeller gibi bu modelde Excel üzerinden çalıştırılan arayüzlere sahiptir. Model, birinci dereceden ayrışma denklemleri kullanmaktadır ve depo sahasının açılış-kapanış yılları, depolanan atık miktarı ve kompozisyonu, depo sahasının geçmişteki ve şimdiki fiziksel durumunu yansıtacak veriler gibi girdilere ihtiyaç duymaktadır. Bu girdilerin birçoğu mevcut durumdaki 33 tesisi baz alınarak önceden belirlenmiş değerlere indirgenmiştir. Bunların dışında spesifik durumlarda belirlenen aralıkta kalması şartıyla istenilen k ve L_0 değerleri kullanılabilir. Bu parametrelerin önceden belirlenmiş değerlerinin, Kolombiya'daki 2 depo sahasında oluşması beklenen gaz ve toplama verimi dikkate alınarak gerçekleştirildiği belirtilmiştir.

Kolombiya modeli LANDGEM modelini esas almaktadır ve bu modelin modifiye edilmiş halidir [55]. Modelin matematiksel ifadesi (3.47)'de verilmiştir.

$$Q_{LFG} = \sum_{t=1}^n \sum_{j=0,1}^1 2kL_0 \left[\frac{M_i}{10} \right] (e^{-kt_{ij}})(MCF)(F) \quad (3.47)$$

Burada;

Q_{LFG} = Oluşması beklenen maksimum depo gazı miktarı ($m^3/yıl$)

- i = 1 yıllık zaman gecikme,
 n = (hesap yılı – ilk atık kabul yılı),
 j = 0,1 yıllık gecikme,
 k = metan oluşum katsayısı (y^{-1}),
 L_0 = metan üretim potansiyeli (m^3/ton),
 M_i = i. yılda depo sahasında depolanmış atık miktarı (ton),
 T_{ij} = j hücresinde bulunan M_i kütlesindeki atığın i. yıldaki miktarı,
MCF = metan düzeltme faktörü,
 F = yangın düzeltme faktörü şeklindedir.

Model, önceden belirlenmiş veri setleri ile çalıştırılabildiği gibi sahaya özel veriler kullanılarak da çalıştırılabilir. Modelin bir diğer özelliğide kullanıcının saha özellikleri ilgili sorularına bağlı olarak sonuçları revize etmesidir. Bu ve diğer LMOP modelleri adlarını aldıkları ülkenin koşullarını temsil ettiğinden özellikle o bölgeler ile ilgili projeksiyonlarda çok tutarlı sonuçlar vermektedirler [56].

3.4.22 GasSIM Modeli

GasSIM modeli Golder Associates firması tarafından İngiltere ve Galler Çevre Ajansı için oluşturulmuştur. Modelin ana girdileri atık miktarı ve atık kompozisyonudur. Bunlara ek olarak sahada yapılan her türlü işlem, işletme koşulları ve dizayn girdi olarak kullanılabilmektedir [57]. Model;

- Oluşacak depo gazını,
- Yanma sonucu olacak emisyonları,
- Saha yüzeyinden olacak muhtemel kaçakları,
- Uzun ve kısa dönemde atmosfere olan etkiyi,
- Depo sahalarının yerleşim yerlerine yakınlığına bağlı olarak insanların maruz kalma oranlarını modelleyebilmektedir.

Sızma miktarı, atık yoğunluğu, geri devir oranı, geçirimsizlik ve hidrolik iletkenlik modelin sayısız girdileri arasındadır. 2002 yılında yayınlanan GasSim 1.0'in çok fazla matematiksel ifadesi (3.48)'de verilmiştir.

$$\alpha_t = \zeta c \sum_{j=0}^m \sum_{i=1}^n A_j K_j C_{0,i,j} e^{-k_i(t-j)} \quad (3.48)$$

Burada;

α_t = oluşacak depo gazı miktarı (m^3 LFG/y),

ζ = düzeltme faktörü,

c = çevirme faktörü (m^3 LFG/ kg organik madde) ,

m = toplam depolama süresi,

j = hesaplanmak istenen yıldaki atık yaşı,

n = toplam atık türü sayısı,

i = k_i ayrışma hızına sahip atığın toplam atık içindeki oranı (kg i/kg atık),

A_j = j yılındaki atık miktarı (Mt),

$C_{0,i,j}$ = j yılında i atık türündeki atığın içindeki organik madde miktarı (kgOM/MT atık),

k_i = i atık türü için ayrışma katsayısı (y^{-1}),

t = depolama faaliyetlerinin başladığı süreden itibaren geçen zaman şeklindedir.

GasSIM atıkları farklı türlere ayırarak ayrışma için farklı sabitler kullanır. Modeli diğer modellerden ayıran özellik giriş parametrelerindeki belirsizliklere Monte Carlo analizi yöntemi ile yaklaşmasıdır.

GasSim 2.0'dan itibaren modeli kullanarak belirli hücrelerin, atığın belli fazlarının yada belli bir zaman aralığında depolanan atıkların depo gazı üretim oranları, depolanan atığın özelliklerine bağlı olarak hesaplanabilmeye başlamıştır.

GasSIM 2,5'te ve önceki versiyonlarda atık depolandıktan sonra ilk olarak hızlı,orta hızlı ve yavaş ayrışan organikler birinci dereceden ayrışmaya başlarlar. Karbonun %99'unun metanojenez fazında, %1'nin ise asidojenez fazında kullanıldığı varsayılır. Ayrışma

hızlarına göre 3 katagoriye ayrılan atık için ayrışabilir organik karbon miktarı (3.49)'da verilen şekilde hesaplanır.

$$C_t = C_0 - (C_{0,1}e^{-k_1t} + C_{0,2}e^{-k_2t} + C_{0,3}e^{-k_3t}) \quad (3.49)$$

t = atığın depolanmaya başladığı zamanla hesap yılı arasındaki zaman (yıl),

C_t = t yılına kadar ayrılmış ayrışabilir karbonun miktarı (ton),

C_0 = t=0 zamanında atık içinde bulunan ayrışabilir karbon miktarı,

$C_{0,n}$ = t=0 zamanında atık içinde bulunan hızlı, orta hızlı ve yavaş ayrılan organik maddelerin miktarları (ton),

K_n = hızlı, orta hızlı ve yavaş ayrılan organik maddeler için ayrışma sabiti (y^{-1}),

C_x = x yılında bozunmuş toplam organik karbon miktarı şeklindedir.

GasSIM 2 giriş parametrelerini karakterize edebilmek için istatistiksel dağılım fonksiyonları kullanmaktadır. Depolanan atıkla ilgili bilginin az olduğu yada hiç olmadığı durumlara çözüm olarak ortaya koyulan bu yaklaşım, atık ile ilgili bilgilerden emin olunması durumunda atık ayrışma hızlarında kullanılır [58].

3.4.23 RET Screen Depo Gazı Modeli

RET Screen modeli Scholl Canyon modelini esas almaktadır. Ek olarak önceden tanımlanmış bir çok parametre sunmaktadır. Amerika Çevre Koruma Örgütü ve Kanada Çevre Örgütü gibi denetleme makamları tarafında kabul görmüş birinci dereceden ayrışma denklemi ile ifade edilebilir. Scholl Canyon modeli, biyolojik olarak ayrışabilen maddenin zaman boyunca sabit oranda olduğunu öngörmektedir. Model bu prensibe bağlı olarak oluşacak metan gazı miktarını bu ayrışabilir içerik üzerinden hesaplar [59].

3.4.24 EMCON MGM Modeli

Model atık depo sahasına koyulduktan sonra aerobik fazın sona ermesini hesaba katmaktadır. Sabit hızla artış fazını üssel olarak azalan ikinci faz izler. Atık, alt katagorilere ayrılır ve her bir atık türü için farklı üretim katsayılarına bağlı olarak farklı depo gazı miktarları elde edilir.

Modelin ana giriş parametreleri, atık miktarı, atık kompozisyonu ve nem muhtevası, bekleme süresi ve toplam gaz oluşum süresidir. Model atığı hızlı, orta hızlı ve yavaş ayrışan olarak 3 katagoride ele almaktadır [60].

3.4.25 IGNIG Modeli

IGNIG modeli birinci dereceden sabitler üzerine kurulmuş ve katı atığı 4 katagoriye ayırmış bir modeldir. Her organik atık çeşidi kendi katagorisine göre bir yarı ömüre $t_{1/2}$ sahiptir [61]. Yarı ömürler aşağıda belirtildiği şekildedir.

Atık Katagorisi:	Yarı Ömür:
A-Kağıt – Tekstil	tauA = 10 yıl
B-Park Bahçe Atığı ve diğerleri (yemek artığı hariç)	tauB = 6 yıl
C-Yemek	tauC = 3 yıl
D-Tahta (lignin hariç)	tauD = 15 yıl

Toplam oluşacak gaz miktarı bu dört katagorideki atıkların miktarlarına bağlı olarak hesaplanmaktadır. Modelin genel matematik ifadesi(3.50)'de verilmiştir.

$$EMCH_4 = \sum EMCH_{4r,x}(A) + \sum EMCH_{4r,x}(B) + \sum EMCH_{4r,x}(C) + \sum EMCH_{4r,x}(D) \quad (3.50)$$

“x” yılında depolanmış bir atık türünde (i), “x” ve “T” yılları arasında meydana gelen ayrışma (3.51)'de verilen matematiksel ifade ile hesaplanır.

$$MC_{T,x} = MSW \cdot MCF \cdot MASA \cdot (udz)_i \cdot (1 - e^{-\lambda_i(T-x)}) \text{ [Ton]} \quad (3.51)$$

Burada;

i = atık türü (A-D),

$(udz)_i$ = belirli bir atık türünün (i) yıllık olarak depolanan toplam atık içindeki oranı,

MASA = bir yıl içinde depolanan atık miktarı [Mt],

λ_i = atık yarı ömrü,

x = atığın ne kadar süre ile depolandığı,

T = hesaplamanın yapıldığı yıl,

MSW = depo alanında depolanan atık içinde evsel katı atığın oranı,

MCF = metan düzeltme faktörü şeklindedir.

“i” katagorisdeki atıkta “T” yılında meydana gelen ayrışma (3.52)’de verilmiştir.

$$MR_{T,x(i)} = MC_{T,x(i)} - MC_{T,x(i)} [\text{Ton}] \quad (3.52)$$

“x” yıl boyunca depolanmış “i” türündeki atıkta oluşacak depo gazı miktarı (3.53)’te verilen matematiksel ifade ile hesaplanabilir [60].

$$EMCH_{4T,x}(i) = DOC \cdot F \cdot C_i \cdot MR_{T(i)} [m^3 CH_4] \quad (3.53)$$

Burada;

DOC = ayrışabilir organik karbon,

F = metan gazının depo gazındaki içindeki oranı (mol/mol)

C_i = atık türüne özgü ayrışma faktörü şeklindedir.

3.4.26 Sonlu Elemanlar Modeli

Sonlu elemanlar modeli depo gazı oluşum tahminlerini süreklilik hipotezine dayandırır ve hesaplamada birçok parçalı diferansiyel denklem kullanır. Bu denklemler matrisler veya algoritmalar yardımıyla çözülmektedir.

Model, atığın farklı zamanlarda farklı bölgelere yerleşimi ile ilgili karmaşıklığı temsil edebilecek şekilde olmalıdır. Bu nedenle atık kompozisyonu, dane boyutu, nem, sıcaklık, aerobik ve anaerobik fazların süreleri gibi girdiler çok önemlidir.

Mevcut birçok sahada bu verilerin tutulmuyor oluşu ya da tutulan verilerin sağlıklı olmaması nedeniyle model çıktıları ile gerçek verilerin uyum sorunu görülmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi ile depo sahası en küçük bileşenlerine kadar ayrılabilirken, en tutarlı yaklaşımın depo sahasını tek bir parça olarak almak olduğu belirtilmiştir [7].

3.4.27 Weber Modeli

Weber modeli, Tabasaran-Rettenberger modelinin bir türevi olmakta beraber, birinci dereceden reaksiyon kinetiklerini kullanarak oluşacak depo gazının zamanla azaldığını

kabul etmektedir. Model, toplam depo gazı miktarını hesaplarken her sene depolanan atık miktarlarını birbirine ekleyerek depolanan birim atık için belirlenen süre boyunca metan gazı üretimini öngörür. Bu sebepten dolayı atık depolama işlemi tamamlandıktan 1 sene sonra depo gazı üretimi pik noktaya ulaşır ve daha sonra üssel şekilde düşüşe geçer [62].

Teorik olarak oluşacak gaz miktarı atığın toplam organik karbon (TOC) içeriğinden yola çıkılarak bulunmaktadır. İdeal gaz kanununa göre oluşması beklenen reaksiyonlar sonucu 1 kg toplam organik karbondan 1,863 m³ gaz oluşmaktadır. Modelin matematiksel ifadesi (3.54)'te verilmiştir.

$$G_{a,t}(m^3/t) = 1,868 \cdot M \cdot TOC \cdot f_{ao} \cdot f_a \cdot f_s \cdot k \cdot e^{-kt} \quad (3.54)$$

Burada;

TOC = toplam organik karbon (kg/ton),

t = zaman (yıl),

a_t = reaksiyon sabiti (yıl⁻¹)

f_{ao} = atık depolandıktan sonra ilk 6 ay için düzeltme katsayısı (0,8-0,95)

f_a = ayrışma katsayısı (ayrışabilen organik karbon/toplam organik karbon) (0,5-0,9),

f_o = optimizasyon katsayısı (0,7-1),

f_s = gaz toplama verimi (0-1) şeklindedir.

Almanya'da birçok depo gazından enerji üretimi yapılacak tesis Weber modeli esas alınarak tasarlanmıştır.

DEPO GAZI TAHMİN MODELİNİN OLUŞTURULMASI VE YÖNTEM

4.1 Düzenli Depolama Sahası

İstanbul'un Avrupa yakasının evsel katı atığı Odayeri düzenli depolama sahasında depolanmaktadır. Günlük depolama miktarı 9000 ton civarındadır. Odayeri depo sahasında 1995-2008 yılları arasında 52 hektarlık alanda yaklaşık 30 milyon ton katı atık depolanmıştır. Depo alanı eski bir maden alanı olup tabanı kil ve geomembran ile geçirimsiz hale getirilmiştir. Geomembran üzerine serilen geotekstil ve çakıl tabakası ile drenaj sistemi oluşturulmuştur. 50 m aralıklar ile döşenen perfore borular ile depo tabanındaki suyun belirlenen noktalardan tahliyesi hedeflenmiştir. Şekil 4.1'de depo sahasının genel görünümü verilmiştir.



Şekil 4.1 Depo sahası genel görünümü ve enerji tesisi (1 : Yeni depo sahası, 2:Elektrik üretim tesisi, 3 : İdari bina, 4 : Yakma tesisi, 5 : Gaz balonları, 6 : Eski depo sahası)

Depo sahasında döküm devam ederken pasif tahliye bacaları kurulmaktadır. Depolama devam ederken oluşan gazın tahliyesi bu bacalardan sağlanmaktadır. Şekil 4.2’de depo sahasının dökümün devam ettiği bir kesit görülmektedir.



Şekil 4.2 Döküm devam eden saha

4.2 Elektrik Üretim Tesisi ve Aktif Gaz Çekimi Yapılan Saha

Odayeri Elektrik Üretim Tesisi 1. etapta, 2009 yılından itibaren bu 20 milyon ton atık barındıran 52 hektarlık alanda oluşan çöp gazını elektriğe dönüştürerek faaliyetlerine başlamıştır. 2. etapta 2008-2012 yılları arasında depolanan yaklaşık 12 milyon atıktan oluşan gazdan elektrik üretimi 2011 sonlarında başlamıştır. Tesis saatlik olarak 15 MW elektrik üretmektedir. 7000-7500 m³ saat depo gazı sabit vakum altında çekilerek GE-Jenbacher marka her biri 1,4 MW elektrik üreten 12 adet gaz motoruna gönderilmektedir. Şekil 4.3’te Ortadoğu Enerji A.Ş’nin depolanan atıkta oluşan depo gazından elektrik ürettiği iki depo sahası görülmektedir. Kömürcüoda düzenli depolama sahası Odayeri düzenli depo sahası ile benzer özellikte olup Odayeri’nin yarı kapasitesindedir.



Şekil 4.3 İstanbul'un düzenli depolama sahaları

Depo gövdesinde bulunan organik maddelerin anaerobik ortamda parçalanmasına bağlı olarak oluşan depo gazı her biri 50 m aralıkla eşkenar üçgen yöntemine göre yerleştirilmiş ortalama derinlikleri 30 m olan dikey gaz kuyuları ile toplanmaktadır.

200-315 mm çapındaki HDPE borulardan oluşan kuyuların her 8-12 tanesi ayrı ayrı manifold odalarına getirilerek, vanalar vasıtasıyla gerekli optimizasyon ve regülasyon sağlanmaktadır. Sistemin çıkış vakumu ortalama olarak -40 mbar civarındadır. Vakum booster ünitesi tarafından sağlanmaktadır. Depo sahasının farklı yerlerinde konumlanmış olan 25 adet manifold çevre gaz hattına bağlanarak tesise kadar ulaşır. Şekil 4.4'te bir manifold yapısı verilmiştir. Gaz, hava ve su hatları imalatında kullanılan HDPE boruların toplam uzunluğu 70 km civarındadır.

Depo sahası genelinde kuyularda toplanan ve gaz gelişine engel olan suyun tahliyesi için pünomatik pompalar kullanılmaktadır. Bu pompalardan haftalık olarak tahliye edilen su miktarı 50 m³ civarındadır.

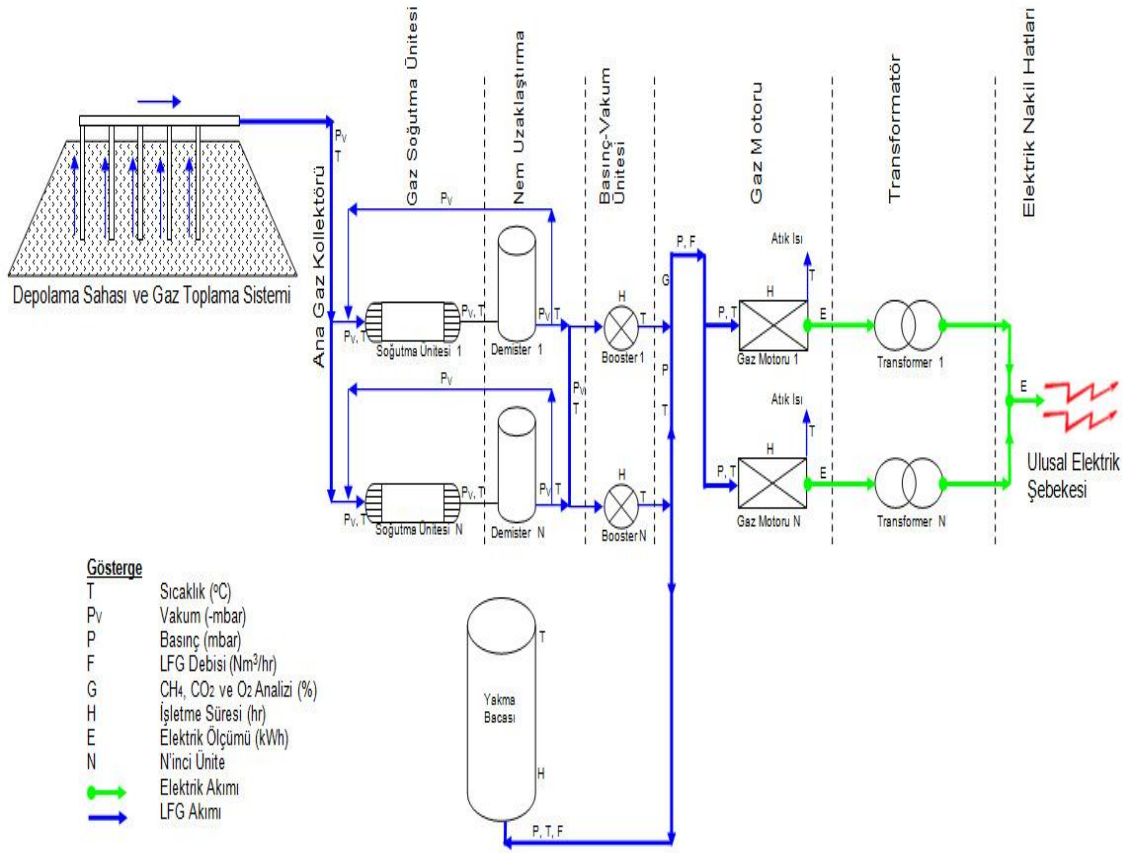


Şekil 4.4 Manifold yapısı

Gaz kuyularından depo gazını çekebilmek için gerekli vakumu oluşturmak üzere bir vakum ve basınçlandırma ünitesi tasarlanmıştır. Üniteye gelen gaz öncelikle eşanjörlerden geçirilerek soğutulmakta ve içindeki nem oranı düşürülmektedir. Bu sayede gaz motorlarının ihtiyaç duyduğu kuru bir depo gazı elde edilebilmektedir. Nemden arındırılan gaz her biri $2500 \text{ m}^3/\text{saat}$ kapasiteli 7 boosterda basınçlandırılarak doğrudan gaz motorlarına gönderilir. Sistemde herhangi bir sebepten dolayı elektrik üretilemez ise her biri 16000 m^3 'lük iki adet gaz depolama balonu kullanılmayan gazı daha sonra kullanmak amacıyla depolamaya başlar. Gaz depolarının dolması durumunda her biri $2500 \text{ m}^3/\text{saat}$ kapasiteye sahip iki adet yakma bacası devreye girer ve sahada oluşan gazı sabit vakumla çekmeye ve yakarak atmosfere vermeye devam eder. Yakma için alt sınır değeri 900°C olarak belirlenmiştir.

Elektrik üretiminde kullanılan gaz motorları 4 zamanlı 20 silindirli içten yanmalı jeneratörlerdir. Elektriksel verimleri %40 civarında olup, yakın gelecekte kojenerasyon faaliyetleri ile birlikte %80'in üzerinde toplam verim hedeflenmektedir. 1.4 MW elektrik üretmek için %50 metan içeriğine sahip yaklaşık 750 m^3 depo gazı gaz motorlarına gönderilmektedir. Üretilen elektrik 20 km boyunca havai ve yer altı hatlar

vasıtasıyla Habibler Trafo merkezine iletilir. Şekil 4.5'te Odayeri Elektrik Üretim Tesisi'ndeki enerji akışı verilmiştir.



Şekil 4.5 Odayeri Elektrik Üretim Tesisi enerji akışı

Depo sahası üzerinde açılmış 170 adet gaz kuyusu bulunmaktadır. Bu kuyular yılda 5-10 tane olacak şekilde yenilenmekte ya da bakımdan geçirilmektedir. Gaz optimizasyon faaliyetleri 1 kuyu haftada en az 1 kez ölçülecek şekilde planlanmaktadır. Saha genelinde 240 noktadan izleme faaliyeti yürütülmektedir.

4.3 Depolanın Atık ile İlgili Genel Bilgiler

İstanbul Odayeri Düzenli Depolama Alanı 1995 yılından beri faaliyettedir. Avrupa yakasında oluşan atığın tamamı bu alanda depolanmaktadır. Atık miktarının yıllara göre değişimi Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Yıllara göre depolanan atık miktarı

Yıl	Atık Miktarı (ton)	Yıl	Atık Miktarı (ton)
1995	524.013	2004	2.848.877
1996	1.112.443	2005	-
1997	1.521.541	2006	3.469.871
1998	1.775.983	2007	3.182.820
1999	2.220.225	2008	3.345.988
2000	2.282.265	2009	3.350.000
2001	2.205.211	2010	3.450.000
2002	2.304.124	2011	3.700.000
2003	2.515.444		

Depolanan çöpün karakterizasyonu yıllara göre değişkenlik göstermektedir. Farklı yıllarda yapılan çalışmalara ilişkin veriler Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 İstanbul için yıllara göre atık karakterizasyonundaki değişim

Bileşen	Arıkan, 1996	İSTAÇ, 2006	İSTAÇ, 2007	İSTAÇ, 2009	İSTAÇ, 2010	İSTAÇ, 2012
Kül	13,2	3	-	-	-	-
Organik atıklar	48	53,3	59,75	54,09	51,71	54,45
Kağıt-karton	8,4	12,7	12,37	15,57	11,05	14,9
Plastik	11,1	13,2	11,2	12,58	11,75	14,54
Cam	4,6	5,9	3,97	3,03	3,72	3,08
Tekstil	2,9	3,8	4,08	3,42	5,74	4,59
Metal	2,3	1,4	0,66	1,12	1,1	1,05
Çocuk bezi	3,2	2,6	4,49	5,45	5,03	4,82
Diğerleri	6,3	4,1	3,48	4,74	9,9	2,57

Depolanan atığın nem muhtevası %65-%70 civarındadır.

Depo sahasındaki biyolojik faaliyetler açısından sahanın bulunduğu bölgedeki yıllık yağış yüksekliği oldukça önemli bir parametredir. İstanbul için ortalama yağış yüksekliği 632,9 mm/yıl’dır.

Depo sahasındaki atmosferik sıcaklık depo gövdesinin sıcaklığını etkilememektedir. Üstü kapatılan atığın mevsimsel değişimlerden etkilenmediği varsayılmaktadır.

4.4 Depo Gazı Tahmin Modeli

Bir projeksiyon ortaya koyma aşamasında model seçimi oldukça önemli bir adımdır. Bazı modeller oluşturuldukları ülkelerin atık kompozisyonuna ve özelliklerine bağlı

olarak doğru sonuç verirlerken, bazı modeller ise daha geniş çerçevede oluşturuldukları için yeterince hassas olmayan sonuçlar verirler. Bu bölümde, İstanbul Odayeri Düzenli Depo Sahası verilene en sık kullanılan modeller olan IPCC, School Canyon, EPA LMOP Colombia Modeli, Weber modelleri uygulanmış ve büyük ölçekteki sahalara uygun olarak tasarlanmış Ortadoğu (OTD) modeli geliştirilmiştir.

4.5 Giriş Parametreleri

Odayeri Düzenli Depo Sahası'nda oluşacak depo gazı miktarının hesaplamasında kullanılacak modeller; IPCC, School Canyon, EPA LMOP Colombia modeli, Weber modeli ve OTD modelidir. Bu modeller matematiksel ifadelerine ve atığı ele alış biçimlerine bağlı olarak bir takım giriş parametrelerine ihtiyaç duyarlar. Bu parametrelerin seçiminde dikkat edilmesi gereken nokta bu parametrelerin mevcut atığı en iyi şekilde yansıtmasıdır. Mümkün olduğu sürece modelleme yapılan atık ile ilgili yapılmış deneylerin sonuçları kullanılmalıdır. Eğer bu mümkün değil ise belirli öngörüler ve kabuller dahilinde belirlenecek değerler kullanılabilir. Seçilen modellerde ortak parametreler olmak ile beraber modele özgü bazı özel parametreler de bulunmaktadır. Modellerde kullanılacak ortak parametreler bu bölümde verilirken, modellere özgü parametreler her bir model için ilgili başlık altında verilecektir. Modellerin kullandığı ortak parametreler şu şekildedir:

4.5.1 Atık Kompozisyonu

Giriş parametreleri içinde atık kompozisyonu, bütün modeller için aynı özellikte olacak şekilde alınmıştır. Eski saha ve yeni saha için farklı kompozisyonlarda alınan atık, farklı yıllarda yapılan analizlerin aritmetik ortalaması şeklindedir. Çizelge 4.3'te eski saha ve yeni saha için modellerde kullanılan atık kompozisyonu verilmiştir. Atık kompozisyonu dışındaki parametreler modellere göre değişkenlik gösterdiğinden dolayı, bu parametreler ilgili modelin başlığı altında verilmiştir.

Çizelge 4.3 Eski saha ve yeni saha için atık kompozisyonları (%)

	Organik	Bahçe atığı	Kağıt	Odun-Sap	Tekstil	Çocuk bezi
Eski Saha	50,3	1	9,7	1	3,2	2,8
Yeni Saha	52,6	1	12,3	1	5,4	5

Yetkili kuruluşun bahçe atığı ve odun içeriği ile ilgili sınıflandırması olmadığı için temsili olarak bu değerler tüm atığın %1'i olacak şekilde alınmıştır.

4.5.2 Metan Üretim Sabiti

Depolanan atık türüne bağlı olarak metan üretim hızını vermektedir. Birimi yıl⁻¹'dir. Atığın yarı ömrü belirlenmiş ise “ln(2)/k” eşitliği kullanılarak k değeri bulunabilmektedir. k sabiti, atığın özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Nem oranı, pH, sıcaklık ve besin miktarı bu özelliklerin başında gelmektedir. Deneysel çalışma yapılmaması durumunda atığın bu özellikleri göz önünde bulundurularak seçim yapılmalıdır.

Modeller atıkları ayrışma hızlarına göre çeşitli katagorilere ayırmaktadırlar. Çok hızlı ayrışma, orta hızlı ayrışma, yavaş ayrışma ve çok yavaş ayrışma gibi alt katagoriler depo sahasının bulunduğu iklime göre farklı ayrışma hızlarına sahip olabilmektedir [7].

4.5.3 Metan Üretim Potansiyeli

Metan üretim potansiyeli (L_0), bir ton atığın anaerobik ortamda ayrışması sonucu oluşabilecek toplam metan gazı miktarını ifade etmektedir. Metan üretim potansiyeli atığın türüne göre ve atık türünün içerdiği selüloz miktarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Yüksek miktarda selüloz içeren atıkların L_0 değerleri yüksek olmaktadır. Benzer şekilde nem içeriğinde L_0 üzerinde aynı etkiye sahiptir [7].

Metan üretim potansiyeli deneysel yolla bulunabileceği gibi, atığın içeriğinin bilinmesi durumunda (4.1)'de matematiksel ifade kullanılarak bulunabilir.

$$L_0 = DOC \times DOC_f \times F \times (16/12) / 0,0007168 \quad (4.1)$$

Burada,

DOC = depolanmış ayrışabilir organik karbon

DOC_f = depolanmış organik karbonun anaerobik koşullarda ayrışabilen oranı,

F = depo gazının içindeki metanın oranı (%50),

16/12 = Metanın molekül ağırlığı/ karbonun molekül ağırlığı,

0,0007168 = Standart koşullar altında metanın yoğunluğu şeklindedir.

4.6 Uygulanan Depo Gazı Tahmin Modelleri

4.6.1 IPCC Modeli

Model atık içeriklerinin farklı olmasından dolayı diğer modeller gibi eski saha ve yeni saha için ayrı olarak çalıştırılmıştır. Model, modelin önceden belirlenmiş giriş parametrelerini kullanmıştır. Deneysel olarak sahaya özgü yürütülen çalışmalar ile bu parametreler değiştirilebilmektedir. Giriş parametreleri şu şekildedir:

Atık içeriği : Modelde kullanılan atık kompozisyonu Çizelge 5.3'te verilmiştir.

DOC : Model 6 atık türü için ayrışabilir organik karbon muhtevası tanımlamaktadır. Çizelge 4.4'te IPCC modelinin kabul ettiği DOC oranları verilmiştir.

Çizelge 4.4 IPCC modeline göre atık çeşitlerinin DOC oranları

Organik	Bahçe atığı	Kağıt	Odun-Sap	Tekstil	Çocuk bezi
0,15	0,2	0,4	0,43	0,24	0,24

DOC_f : Ayrışabilen organik karbonun metana dönüşen kısmı %50 olarak alınmıştır.

Metan üretim sabiti (k) : 6 atık türü için modelde kullanılan metan üretim sabitleri Çizelge 4.5'te verilmiştir [7].

Çizelge 4.5 IPCC modelinde kullanılan metan üretim katsayıları (y⁻¹)

Organik	Bahçe atığı	Kağıt	Odun-Sap	Tekstil	Çocuk bezi
0,185	0,1	0,06	0,03	0,06	0,1

Metan üretim potansiyeli (L₀) : 6 atık türü için modelde kullanılan metan üretim potansiyelleri Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6 IPCC modelinde kullanılan metan üretim potansiyelleri (m³/ton)

Organik	Bahçe atığı	Kağıt	Odun-Sap	Tekstil	Çocuk bezi
70	90	186	200	112	112

Çevirim katsayısı : IPCC modeli için, karbon'dan metan'a çevrim faktörü 1,33 olarak alınmıştır.

Oksidasyon faktörü : Model, toplam oluşan metan gazının %20'sinin okside olduğunu kabul etmektedir.

Depolama şekli : Model, sahanın %80'nin düzenli ve kontrollü olarak işletildiğini, %20'sinin ise düzenli fakat kontrolsüz olarak işletildiğini kabul etmektedir.

Yarı ömür : Model'de kullanılan yarı ömürler (yıl) Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.7 IPCC modeline ait atık yarı ömürleri (yıl)

Organik	Bahçe atığı	Kağıt	Odun-Sap	Tekstil	Çocuk bezi
3,7	6,9	11,6	23,1	11,6	6,9

Atık yarı ömrü kullanılan metan üretim sabitine göre değişkenlik gösterebilmektedir.

4.6.2 Scholl Canyon Modeli

Atık içeriği : Modelde kullanılan atık kompozisyonu Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Metan üretim sabiti : 6 atık türü için modelde kullanılan metan üretim sabitleri Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8 Scholl Canyon modelinde kullanılan metan üretim katsayıları (y^{-1})

Organik	Bahçe atığı	Kağıt	Odun-Sap	Tekstil	Çocuk bezi
0,255	0,034	0,139	0,139	0,139	0,139

Metan üretim potansiyeli (L_0) : 6 atık türü için modelde kullanılan metan üretim potansiyelleri Çizelge 4.9'da verilmiştir [52].

Çizelge 4.9 Scholl Canyon modelinde kullanılan metan üretim potansiyelleri (m^3/ton)

Organik	Bahçe atığı	Kağıt	Odun-Sap	Tekstil	Çocuk bezi
112	110	227	110	205	112

Yarı ömür : Model'de kullanılan yarı ömürler Çizelge 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.10 Scholl Canyon modeline ait atık yarı ömürleri (yıl)

Organik	Bahçe atığı	Kağıt	Odun-Sap	Tekstil	Çocuk bezi
1	20,4	5	20,4	5	5

4.6.3 EPA Colombia Modeli

Atık içeriği : Modelde kullanılan atık kompozisyonu Çizelge 4.3'te verilmiştir.

DOC : Model 6 atık türü için ayrışabilir organik karbon muhtevası tanımlamaktadır.

Çizelge 4.11'de EPA Colombia modelinin kabul ettiği DOC oranları verilmiştir.

Çizelge 4.11 EPA Colombia modeline göre atık çeşitlerinin DOC oranları

Organik	Bahçe atığı	Kağıt	Odun-Sap	Tekstil	Çocuk bezi
0,15	0,2	0,4	0,43	0,24	0,24

DOC_f: Ayrışabilen organik karbonun metana dönüşen kısmı %50 olarak alınmıştır.

Ayrışma çeşidi : Atık türüne göre modele girdi olarak kullanılacak kompozisyonlar

Çizelge 4.12'de verilmiştir.

Çizelge 4.12 EPA Colombia modelinde ayrışma türüne göre kompozisyonları (%)

	Hızlı ayrışan	Orta hızlı ayrışan	Yavaş ayrışan	Çok yavaş ayrışan
Eski Saha	55,5	0,5	12,8	0,5
Yeni Saha	60,1	1	17,7	1

Metan üretim sabiti (k) : EPA modeli bölgenin iklimsel özelliklerine göre ayrışma katsayılarını sınıflandırmaktadır. Yıllık yağış miktarına göre yapılan bu sınıflandırma genel olarak şu başlıklar altında incelenmektedir:

- Kurak (<500 mm/yıl yağış)
- Kısmen kurak (500-999 mm/yıl yağış)
- Kısmen nemli (999-1499 mm/yıl yağış)
- Nemli (1500-1999 mm/yıl yağış)
- Çok nemli (>2000 mm/yıl yağış)

Mevsimsel özelliklere göre metan üretim sabitlerindeki değişimler Çizelge 4.13'te verilmiştir [56].

Çizelge 4.13 Ayırışma türüne ve yağış miktarına bağlı k sabitinin değişimi (y^{-1})

Ayırışma türü	Çok Nemli	Nemli	Kısmen Nemli	Kısmen Kurak	Kurak
Çok hızlı ayırışan	0.400	0.340	0.260	0.180	0.100
Orta hızlı ayırışan	0.170	0.150	0.120	0.090	0.050
Yavaş ayırışan	0.070	0.060	0.048	0.036	0.020
Çok yavaş ayırışan	0.035	0.030	0.024	0.018	0.010

İstanbul yıllık olarak 600-700 mm/yıl yağış alan bir iklimde bulunmaktadır. Bu nedenle EPA Colombia modeline göre kısmen kurak olarak nitelendirilmektedir. Modelde kullanılacak metan üretim sabitleri Çizelge 4.14'te verilmiştir.

Çizelge 4.14 EPA Colombia modelinde kullanılan metan üretim sabitleri (y^{-1})

Hızlı ayırışan	Orta hızlı ayırışan	Yavaş ayırışan	Çok yavaş ayırışan
0,180	0,090	0,036	0,018

Metan üretim potansiyeli (L_0) : 6 atık türü için modelde kullanılan metan üretim potansiyelleri Çizelge 4.15'te verilmiştir [56].

Çizelge 4.15 EPA Colombia modelinde kullanılan metan üretim potansiyelleri (m^3/ton)

Organik	Bahçe atığı	Kağıt	Odun-Sap	Tekstil	Çocuk bezi
70	90	186	200	112	112

Metan Düzeltme Faktörü (MCF) : Metan düzeltme faktörü atığın bulunduğu derinliğe ve saha özelliklerine göre değişkenlik gösteren, atığın hangi oranda anaerobik olarak ayrıştığını gösteren bir düzeltme faktörüdür. İyi yönetilen depo sahalarında bu oran MCF=1 olarak alınırken, kötü yönetilen sahalarda MCF=0,4'e kadar düşmektedir. EPA'ya göre derinliğe bağlı MCF değerleri Çizelge 4.16'da verilmiştir.

Çizelge 4.16 EPA modellerinde kullanılan MCF faktörleri

Saha Yönetimi	Derinlik < 5 m	Derinlik $\geq$ 5m
İyi yönetilmeyen depolama sahası	0.4	0.8
İyi yönetilen düzenli depolama sahası	0.8	1
Yarı-aerobik düzenli depolama sahası	0.4	0.5
Koşulları bilinmeyen saha	0.4	0.8

Saha genelinde atık derinliği 5 metreden daha derin olduğu için MCF=1 alınmıştır.

Toplama Verimi : Toplama verimleri bir çok faktöre bağılı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu faktörler şu şekildedir [56]:

- Saha Yönetimi : Sahada kullanılan günlük-haftalık örtüler, sıkıştırma oranları, sıkıştırma ve depolama şekli, sızıntı suyu yönetimi, yangın kontrolleri saha yönetimi parametresinin girdilerini oluşturmaktadır. Bu parametrelerin standartlara uygun bir şekilde gerçekleştirilmesi toplama veriminin artmasını sağlamaktadır.
- Atık Derinliği : Sığ depo sahalarında anaerobik ortamın oluşması ve muhafaza edilmesi derin depo sahalarına göre daha zordur. Bu nedenle izelge 5.6’da verilen katsayılara ek olarak arttırma veya azaltma yapılabilir.
- Üst rt : Günlük olarak kullanılan örtü toprağına ek olarak kil-membran gibi geçirimsiz malzemelerin kullanılması toplama verimini arttırmaktadır. Vakum uygulanan sistemlerde depo yüzeyinden içeriye hava çekilmesi hem vakumun etki alanını düşürür hem de oksijensiz faaliyetin sonlanmasına sebep olur.
- Taban Geçirimsizliği : Depo gövdesinin geçirimsiz malzeme ile kaplandığı durumlarda depo gövdesi içinde oluşan gaz molekülünün hareket edebileceği eksenler geçirimsiz malzemenin sınırları ile ifade edilir. Bu durum gaz toplama verimini arttırıcı yönde etki yapmaktadır.
- Atığın sıkıştırılması : Sıkıştırılmış atıklar, sıkıştırılmamış atıklara oranla daha az geçirgen olacağından muhtemel bir hava çekişine karşı daha dirençli olmaktadırlar. Ek olarak sıkışan atık kaymalara karşı daha dirençli olmaktadır.
- Sızıntı suyu yönetimi : Özellikle çok yağış alan bölgelerde zayıf drenaj yapısı atık içindeki suyun depo gövdesi içinde hapsolmasına sebep olur. Bu durum gaz kuyuları içinde su seviyesinin yükselmesine ve atık içinde meydana gelen ısının transfer olamamasına sebep olur. Bu zellikleri sahip sahalarda toplama verimi diğerlerine göre daha düşük olmaktadır. Çizelge 4.17’de toplama verime etki eden faktörler zet halinde verilmiştir.

Çizelge 4.17 Toplama verimini etkileyen faktörler

Faktör	Toplama verimine etki
Saha yönetimi	Saha iyi yönetilen bir düzenli depolama sahası değilse %15 azaltma yapılır.
Toplama sistemi	Gaz kuyuların kapsamadığı alan oranında azaltma yapılır.
Atık derinliği	$d < 10$ ise her 1 metrede %5 azaltma yapılır.
Üst örtü	Son örtü = %90, sadece ara örtü = %80, günlük örtü = %75, örtü kullanılmaması durumu = %50 verim öngörülmektedir.
Taban geçirimsizliği	Tabanda geçirimsiz kil ve senterik malzeme yok ise; geçirimsiz alan yüzdesi $\times 0,5$ oranında azaltma yapılır
Atık sıkıştırma	Sıkıştırma yapılmıyorsa %3 oranında azaltma yapılır.
Sızıntı suyu yönetimi	İklime ve drenaj sistemi performansına göre %30 oranında azaltma yapılabilir.

4.6.4 Weber Modeli

Weber modelinin modele özgü parametreleri şu şekildedir [62]:

TOC (toplam organik karbon) : 200 kg/ton kuru atık

fao (atık depolandıktan sonra ilk 6 ay için düzeltme katsayısı) : 0,8

fa (ayırışma katsayısı (ayırışabilen organik karbon/toplam organik karbon)) : 0,7

fo (optimizasyon katsayısı) : 0,9

f_s (gaz toplama verimi) : 1 (değerlendirme kısmında %70 olarak verilecektir)

4.7 Depo Gazı Tahmin Modeli : OTD Modeli

Bu çalışmada , OTD (Ortadoğu) adı verilen depo gazı tahmin modeli geliştirilmiştir. Bu model; birinci dereceden ayırışma kinetiklerinin kullanıldığı, depo sahasında depolanan atıktan oluşması beklenen metan gazı miktarını veren bir modeldir. Birim zamanda atığın uğradığı aerobik reaksiyonun, anaerobik faaliyette kullanılacak organik madde miktarında azalmaya sebep olduğu kabul edilmektedir. Atığın depolanma şekli ve saha uygulamaları modelin en önemli parametreleridir. Atığın belirlenen alanda yüzeyden itibaren 2 m'tsinin doğal koşullarda aerobik reaksiyonlarda harcandığı kabul edilmektedir. Model, atığın depo sahasına ulaştıktan sonraki süreçlerini incelemektedir.

Nem muhtevasının reaksiyon süresi boyunca istenilen sınırlarda kalacağı öngörülmektedir. Model, biyolojik bozunmayı durduracak faaliyetlerin gerçekleştiği depo sahalarında bu faaliyetleri temsil edici bir katsayı kullanmaktadır.

Atık içindeki organik karbonun döküm yapılan zaman boyunca aerobik olarak harcanan kısmının toplamdan çıkarılması ve kalan kısmın anaerobik reaksiyonda harcatılması ile yıllara bağlı olarak metan oluşumu modellenmektedir.

Çok hızlı ayrışan, hızlı ayrışan, yavaş ve çok yavaş ayrışan organik maddelerin tümünün aerobik reaksiyona uğrayacağı kabul edilmektedir. Modelin genel ifadesi (4.2)'de verilmiştir.

$$CH_4 \text{ emisyonu} = \sum_{1}^n CH_4 \text{ oluşan} \times \sigma \times d_x \times \rho \quad (4.2)$$

Burada;

CH_4 emisyonu = atık türlerine bağlı olarak oluşacak metan gazı toplamı,

n = atık türü,

CH_4 oluşan = atık türüne bağlı olarak oluşan metan gazı miktarı,

σ = toplama verimi,

ρ = biyolojik aktiviteyi kısıtlayan ya da sonlandıran faktörler şeklindedir.

Modelin i atık türünden oluşacak metan gazı miktarını matematiksel ifadesi (4.3)'te verilmiştir.

$$CH_{4,i} = 1,33 \times M_{a,i} \times DOC_{k,i} \times DOC_f \times f \quad (4.3)$$

Burada;

1,33 = metan ve karbonun mol ağırlıkları arasındaki oran,

$M_{a,i}$ = i türündeki depolanmış atık miktarı (ton/yıl),

$DOC_{k,i}$ = i türündeki atıkta aerobik ayrışma sonrasında kalan ayrışabilir karbon miktarı,

DOC_f = depolanmış organik karbonun anaerobik koşullarda ayrışabilen oranı (0,5),

f = depo gazının içindeki metanın oranı (%50),

Organik madde atık niteliği kazandıktan sonra aerobik reaksiyon başlamaktadır. (4.4)'ten (4.13)'e kadar atığın uğradığı aerobik reaksiyon sonrasında kalan organik maddeye ulaşılacak matematiksel ifadeler verilmiştir.

$$M_{a,i} = M_a \times f_i \quad (4.4)$$

Burada;

$M_{a,i}$ = i türündeki atığın miktarı (ton/yıl),

M_a = depolanmış atık miktarı (ton/yıl),

f_i = i türündeki atığın toplam atık içindeki oranı şeklindedir.

$$DOC_{a,i} = M_{a,i} * DOC_i(\%) \quad (4.5)$$

$DOC_{a,i}$ = aerobik reaksiyonda kullanacak i türündeki atığın DOC miktarı,

$M_{a,i}$ = i türündeki atığın miktarı (ton/yıl),

$DOC_{a,i}(\%)$ = i türündeki atığın içinde bulunan DOC yüzdesi (%),

$$DOC_{a,i} \text{ kullanılacak} = M_{a,i} / \alpha \quad (4.6)$$

Burada;

$DOC_{a,i} \text{ kullanılacak}$ = $DOC_{a,i}$ 'nin oksijene maruz kalacak miktarı,

α = bir hücredeki toplam atık miktarı/ bir hücredeki oksijene maruz kalan atık miktarı şeklindedir.

Toplam atığın oksijene maruz kalan miktarını hesaplamak için temsili olarak hücre şeklinde depolama yapan bir depo sahası kesiti ele alınmıştır. Oksijenli reaksiyona uğrayacak atık miktarını veren matematiksel ifade (4.7)'de verilmiştir.

$$M_{a,h \text{ aerobik}} = \left[\left(\frac{(x * y)}{2} * z \right) - \left(\frac{(x - x_a) * (y - x_a)}{2} * z \right) \right] * d \quad (4.7)$$

Burada;

$M_{a,h \text{ aerobik}}$ = bir hücrede oksijene maruz kalan atığın miktarı,

x = atığın depolanacağı yükseklik (m),

y = atığın depolanacağı uzunluk (m),

- z = platform genişliği (m),
- x_a = oksijenden etkilenen yükseklik (m),
- d = atığın yoğunluğu şeklindedir.

Maksimum atık yüksekliği 50 mt, maksimum atık uzunluğu 300 mt olan ve maksimum yüksekliğe kadar 1/3 eğimle depolama yapılan bir hücrede toplam atık miktarının oksijene maruz kalan atığa oranı (4.8)'den (4.11)'e kadar verilen matematiksel ifade ile hesaplanabilir.

$$M_{a,h1} = \sum_{n=1}^5 \frac{(x_i * n)(x_i * 3n)}{2} * z \quad y \leq 150 \text{ mt} \quad (4.8)$$

Burada;

$M_{a,h1}$ = atığın maksimum yüksekliğe kadar olan alandaki hacmi

x_i = günlük olarak depolanan çöpe bağlı ilk yükseklik,

z = platform genişliği şeklindedir.

$$M_{a,h2} = \frac{y_i * z}{2} * x_a \sum_{n=1}^6 \left(\frac{x_a}{x_i} + n \right) \quad 150 \text{ mt} < y \leq 300 \text{ mt} \quad (4.9)$$

Burada;

$M_{a,h2}$ = atığın maksimum yüksekliğe ulaştıktan sonra yayılacağı alandaki hacmi,

x_i = günlük olarak depolanan çöpe bağlı ilk yükseklik,

x_a = maksimum yükseklik,

y_i = günlük olarak depolanan çöpe bağlı ilk uzunluk,

z = platform genişliğidir.

Bir hücrede belirli bir süre boyunca depolanan atığın toplam miktarını veren matematiksel ifade (4.10)'da verilmiştir.

$$M_{a,h} = (M_{a,h1} + M_{a,h2}) * d \quad (4.10)$$

Burada;

$M_{a,h}$ = bir hücrede depolanan toplam atık miktarı şeklindedir.

Bir hücrede depolanan atığın oksijen ile reaksiyona giren atığa oranını (α) veren matematiksel ifade (4.11)'de verilmiştir.

$$\alpha = \frac{M_{a,h}}{M_{a,h} \text{ aerobik} + M_{gün}} \quad (4.11)$$

$M_{gün}$ = günlük olarak depolanan atık miktarıdır (taşınmayı temsil edici).

Atığın depolanma şekiline bağlı olarak atık içinde bulunan DOC'un aerobik reaksiyonda kullanılan miktarını veren matematiksel ifade (4.12)'de verilmiştir.

$$DOC_{a,i \text{ kullanılan}} = DOC_{a,i \text{ kullanılacak}} * (1 - e^{-k}) \quad (4.12)$$

Burada;

k = aerobik ayrışma sabitidir.

Aerobik faaliyet sonrasında geri kalan DOC miktarının matematiksel ifadesi (4.13)'te verilmiştir.

$$DOC_{a,i \text{ kalan}} = DOC_{a,i} - DOC_{a,i \text{ kullanılan}} \quad (4.13)$$

Atığın uğradığı aerobik reaksiyon sonrasında kalan ve anaerobik ortamda ayrışabilen DOC miktarını veren matematiksel ifade (4.14)'de verilmiştir.

$$DDOC_m = DOC_{a,i \text{ kalan}} * DOC_f \quad (4.14)$$

Yıllara bağlı olarak oluşması beklenen CH_4 miktarı (4.15)'ten (4.17)'ye kadar verilen matematiksel ifadeler yardımıyla hesaplanır.

$$DDOC_{m \text{ kalan}(t)} = DDOC_{m(t)} + DDOC_{m \text{ kalan}(t-1)} * \exp(-k) \quad (4.15)$$

$$DDOC_{m \text{ ayrışan}} = DDOC_{m \text{ kalan}(t-1)} * (1 - \exp(-k)) \quad (4.16)$$

$$CH_{4 \text{ oluşan}} = DDOC_{m \text{ ayrışan}} * 1,33 * F * \rho \quad (4.17)$$

Burada;

P = biyolojik aktiviyetiye durduran etkenleri temsil eden katsayıdır.

Modelin aerobik kısmını depolama şekline ve depo sahası özelliklerine göre modifiye etmek mümkündür. Çalışılmak istenilen hücrenin boyutu, çalışma eğimi, günlük atık miktarı gibi etkenler bahsedilen modifikasyonda önemli rol oynamaktadırlar.

OTD modeli aerobik ve anerobik olmak üzere iki fazdan oluşmaktadır. Aerobik faz için kullanılan parametreler şu şekildedir:

Atık içeriği : Modelde kullanılan atık kompozisyonu Çizelge 4.3'te verilmiştir.

DOC : Model 6 atık türü için ayrışabilir organik karbon muhtevası tanımlamaktadır. Çizelge 4.18'de OTD modelinin aerobik fazda kabul ettiği DOC içerikleri verilmiştir.

Çizelge 4.18 OTD modeline göre aerobik fazda atık çeşitlerinin DOC içerikleri

Organik	Bahçe atığı	Kağıt	Odun-Sap	Tekstil	Çocuk bezi
0,15	0,2	0,4	0,43	0,24	0,24

Aerobik ayrışma katsayısı (k) : 6 atık türü için modelde kullanılan metan üretim sabitleri Çizelge 4.19'da verilmiştir.

Çizelge 4.19 OTD modelinde aerobik fazda kullanılan ayrışma katsayıları (y^{-1})

Organik	Bahçe atığı	Kağıt	Odun-Sap	Tekstil	Çocuk bezi
1,85	1	0,6	0,3	0,6	1

Depolama şekli : Model sahanın hücre yöntemi ile işletildiğini varsaymaktadır. Maksimum atık yüksekliği 50 m ve depolama eğimi 1/3 olarak alınmıştır. Çalışılan platform genişliği 50 m olup 1 hücrenin maksimum uzunluğunun 300 m olduğu kabul edilmektedir.

Yarı ömür : Model'de kullanılan yarı ömürler Çizelge 4.20'de verilmiştir.

Çizelge 4.20 OTD modeline göre aerobik faza ait atık yarı ömürleri (yıl)

Organik	Bahçe atığı	Kağıt	Odun-Sap	Tekstil	Çocuk bezi
0,4	0,7	1,2	2,3	1,2	0,7

Atık yarı ömrü kullanılan metan üretim sabitine göre değişkenlik gösterebilmektedir.

OTD modelinin anerobik fazında kullanılan parametreler ise şu şekildedir:

Atık içeriği : Modelde kullanılan atık kompozisyonu Çizelge 5.3 'te verilmiştir.

DOC : Model 6 atık türü için ayrışabilir organik karbon muhtevası tanımlamaktadır. Çizelge 4.21’de OTD modelinin anaerobik fazda kabul ettiği DOC oranları verilmiştir.

Çizelge 4.21 OTD modeline göre anaerobik fazda atık çeşitlerinin DOC oranları

Organik	Bahçe atığı	Kağıt	Odun-Sap	Tekstil	Çocuk bezi
0,15	0,2	0,4	0,43	0,24	0,24

DOC_f: Ayrışabilen organik karbonun metana dönüşen kısmı %50 olarak alınmıştır.

Metan üretim sabiti (k) : 6 atık türü için modelde kullanılan metan üretim sabitleri Çizelge 4.22’te verilmiştir.

Çizelge 4.22 OTD modelinde anaerobik fazda kullanılan metan üretim katsayıları (y^{-1})

Organik	Bahçe atığı	Kağıt	Odun-Sap	Tekstil	Çocuk bezi
0,185	0,1	0,06	0,03	0,06	0,1

Metan üretim potansiyeli (L_0) : 6 atık türü için modelde kullanılan metan üretim potansiyelleri Çizelge 4.23’te verilmiştir.

Çizelge 4.23 OTD modelinde anaerobik fazdaki metan üretim potansiyelleri (m^3/ton)

Organik	Bahçe atığı	Kağıt	Odun-Sap	Tekstil	Çocuk bezi
70	90	186	200	112	112

Çevirim katsayısı : OTD modeli için, karbon’dan metan’a çevrim faktörü 1,33 olarak alınmıştır.

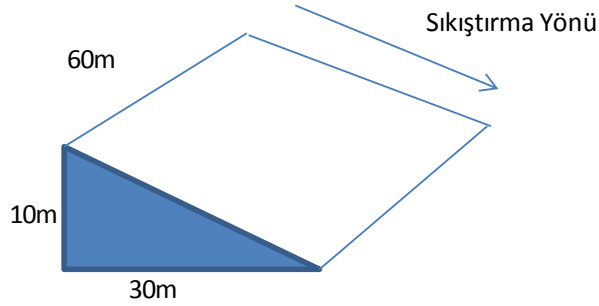
İnhibisyon faktörü (p) : Model, dış etkenlere bağlı olarak organik maddenin ayrışmasını engelleyen faaliyetler için bir katsayı kullanmaktadır (0,7-0,9).

Tüm atığın oksijen ile reaksiyona giren atığa oranı (α) : Depo sahasının spesifik depolama özellikleri Çizelge 4.24’te verilmiştir.

Çizelge 4.24 Depo sahasına özel işletme parametreleri

Eğim	1/3 m
Platform Geniğiği	60 m
Atık yüksekliği	50 m
Oksijen kısıtlaması	2 m
Atık yoğunluğu	1,1 t/m ³
Günlük atık miktarı	9000 t/gün
En	30 m
Boy	10 m
Taşıma süresi	1 gün

Atık, Şekil 4.6’da verilen şekilde depolanmaktadır.



Şekil 4.6 Depolama şekli

Atığın işletme koşullarında boyutlara bağlı olarak miktarı Çizelge 4.25’te verilmiştir.

Çizelge 4.25 Atık hacmi

		Atığın Depolandığı Uzunluk									
Atığın Depolandığı Yükseklik		30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
	10	9000	18000	27000	36000	45000	54000	63000	72000	81000	90000
	20	18000	36000	54000	72000	90000	108000	126000	144000	162000	180000
	30	27000	54000	81000	108000	135000	162000	189000	216000	243000	270000
	40	36000	72000	108000	144000	180000	216000	252000	288000	324000	360000
	50	45000	90000	135000	180000	225000	270000	315000	360000	405000	450000
	60	54000	108000	162000	216000	270000	324000	378000	432000	486000	540000
	70	63000	126000	189000	252000	315000	378000	441000	504000	567000	630000
	80	72000	144000	216000	288000	360000	432000	504000	576000	648000	720000
	90	81000	162000	243000	324000	405000	486000	567000	648000	729000	810000
	100	90000	180000	270000	360000	450000	540000	630000	720000	810000	900000

Atık depolandıktan sonra aerobik faaliyetten etkilenmeyen miktarı Çizelge 4.26’da verilmiştir.

Çizelge 4.26 Oksijenden etkilenmeyen hacim

		Atığın Depolandığı Uzunluk									
		28	58	88	118	148	178	208	238	268	298
Atığın Depolandığı Yükseklik	8	6720	13920	21120	28320	35520	42720	49920	57120	64320	71520
	18	15120	31320	47520	63720	79920	96120	112320	128520	144720	160920
	28	23520	48720	73920	99120	124320	149520	174720	199920	225120	250320
	38	31920	66120	100320	134520	168720	202920	237120	271320	305520	339720
	48	40320	83520	126720	169920	213120	256320	299520	342720	385920	429120
	58	48720	100920	153120	205320	257520	309720	361920	414120	466320	518520
	68	57120	118320	179520	240720	301920	363120	424320	485520	546720	607920
	78	65520	135720	205920	276120	346320	416520	486720	556920	627120	697320
	88	73920	153120	232320	311520	390720	469920	549120	628320	707520	786720
	98	82320	170520	258720	346920	435120	523320	611520	699720	787920	876120

Atığın depolanma süresi boyunca aerobik aktiviteye maruz kalan miktarı Çizelge 4.27’de verilmiştir.

Çizelge 4.27 Atığın oksijen ile reaksiyona giren miktarı*

		Atığın Depolandığı Uzunluk									
	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	
Atığın Depolandığı Yükseklik	10	2508	4488	6468	8448	10428	12408	14388	16368	18348	20328
	20	3168	5148	7128	9108	11088	13068	15048	17028	19008	20988
	30	3828	5808	7788	9768	11748	13728	15708	17688	19668	21648
	40	4488	6468	8448	10428	12408	14388	16368	18348	20328	22308
	50	5148	7128	9108	11088	13068	15048	17028	19008	20988	22968
	60	5808	7788	9768	11748	13728	15708	17688	19668	21648	23628
	70	6468	8448	10428	12408	14388	16368	18348	20328	22308	24288
	80	7128	9108	11088	13068	15048	17028	19008	20988	22968	24948
	90	7788	9768	11748	13728	15708	17688	19668	21648	23628	25608
	100	8448	10428	12408	14388	16368	18348	20328	22308	24288	26268

*Atık yoğunluğu 1,1 ton/m³ alınmıştır.

Bu durumda depolanan atık hacminin 450.000 m³ olduğu durumda oksijenle reaksiyona giren atık miktarı 133980 ton olmaktadır.

(3.63)’te verilen matematiksel ifade yardımıyla;

$\alpha = 3,147293$ sonucuna ulaşılmaktadır.

Depolama şekli : Depo sahasının hücre yöntemi ile işletildiği varsayılmaktadır

Toplama verimi (σ) : EPA Colombia modeli ile aynı yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntem Çizelge 4. 17’de verilmiştir (%70).

Yarı ömür : Model’de kullanılan yarı ömürler (yıl) Çizelge 4.28’te verilmiştir.

Çizelge 4.28 OTD modeline ait atık yarı ömürleri (yıl)

Organik	Bahçe atığı	Kağıt	Odun-Sap	Tekstil	Çocuk bezi
3,7	6,9	11,6	23,1	11,6	6,9

Atık yarı ömrü kullanılan metan üretim sabitine göre değişkenlik gösterebilmektedir.

BÖLÜM 5

MODEL ÇIKTILARI

Odayeri Düzenli Depolama Sahası 4. Bölüm'de belirtildiği üzere iki bölümden oluşmaktadır. Atık karakterizasyonu farklı olduğundan iki saha için modeller ayrı ayrı çalıştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar yıllara bağlı olarak birbirine eklenmiştir. Modeller, depo gazının %50'sini oluşturan metan miktarını hesaplamaktadırlar ve 2040 yılına kadar oluşması beklenen metan gazı miktarını gösterecek şekilde düzenlenmişlerdir.

5.1 IPCC Modeli Sonuçları

IPCC modeli çalıştırılarak elde edilmiş sonuçlar Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 IPCC model çıktıları ($\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{yıl}$)

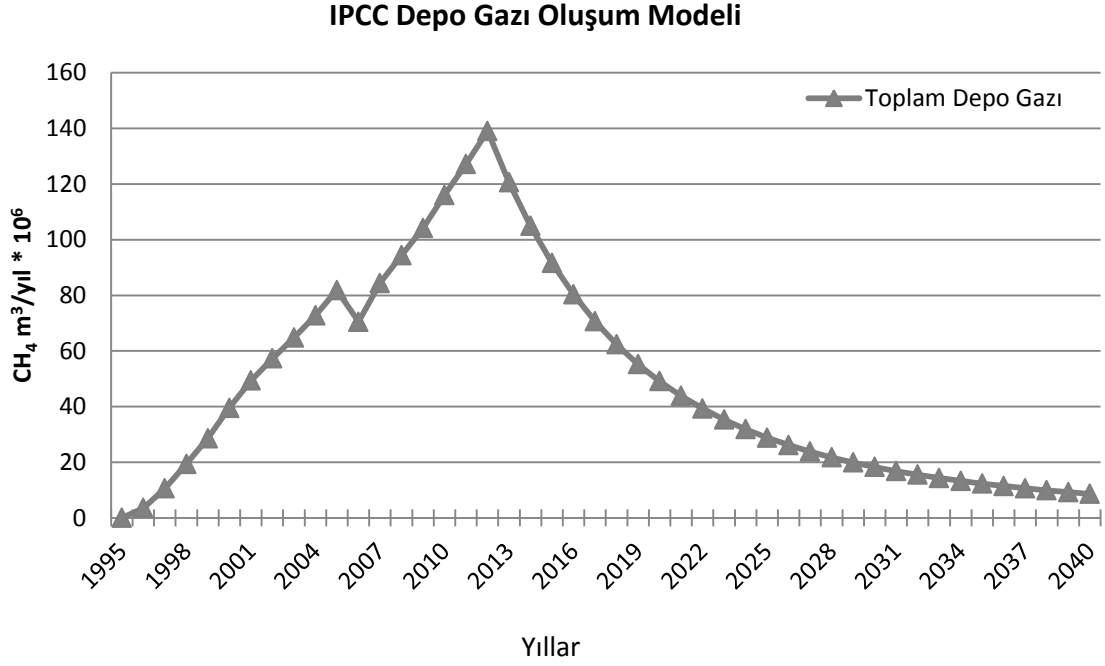
Yıllar	IPCC Eski Saha (m^3)	IPCC Yeni Saha (m^3)	IPCC Toplam (m^3)
1995	0,0	0,0	0,0
1996	3.552.599,6	0,0	3.552.599,6
1997	10.576.278,2	0,0	10.576.278,2
1998	19.355.671,2	0,0	19.355.671,2
1999	28.599.005,3	0,0	28.599.005,3
2000	39.540.509,5	0,0	39.540.509,5
2001	49.356.055,1	0,0	49.356.055,1
2002	57.283.689,0	0,0	57.283.689,0
2003	64.805.063,5	0,0	64.805.063,5
2004	72.750.088,3	0,0	72.750.088,3
2005	81.887.872,6	0,0	81.887.872,6
2006	70.485.098,4	0,0	70.485.098,4
2007	84.381.713,0	0,0	84.381.713,0
2008	94.385.747,5	0,0	94.385.747,5
2009	104.137.317,8	0,0	104.137.317,8
2010	89.893.461,1	26.120.895,1	116.014.356,2

Çizelge 5.1 (Devam) IPCC model çıktıları (m³ CH₄/yıl)

Yıllar	IPCC Eski Saha (m ³)	IPCC Yeni Saha (m ³)	IPCC Toplam (m ³)
2011	77.848.541,6	49.381.563,6	127.230.105,2
2012	67.644.700,6	71.407.421,4	139.052.122,0
2013	58.983.580,3	61.617.040,9	120.600.621,2
2014	51.616.343,6	53.332.875,9	104.949.219,5
2015	45.335.374,4	46.310.694,8	91.646.069,2
2016	39.967.374,6	40.346.769,1	80.314.143,6
2017	35.367.622,3	35.271.091,2	70.638.713,4
2018	31.415.195,8	30.941.732,3	62.356.928,1
2019	28.009.000,1	27.240.149,6	55.249.149,6
2020	25.064.461,0	24.067.280,7	49.131.741,7
2021	22.510.774,5	21.340.295,9	43.851.070,5
2022	20.288.617,5	18.989.893,9	39.278.511,4
2023	18.348.242,4	16.958.052,0	35.306.294,3
2024	16.647.891,2	15.196.153,5	31.844.044,7
2025	15.152.475,1	13.663.428,7	28.815.903,8
2026	13.832.474,6	12.325.656,6	26.158.131,2
2027	12.663.023,5	11.154.084,0	23.817.107,6
2028	11.623.146,6	10.124.525,3	21.747.671,8
2029	10.695.122,8	9.216.611,7	19.911.734,6
2030	9.863.956,1	8.413.167,1	18.277.123,2
2031	9.116.933,0	7.699.686,2	16.816.619,1
2032	8.443.254,1	7.063.900,2	15.507.154,3
2033	7.833.726,7	6.495.414,9	14.329.141,7
2034	7.280.508,0	5.985.407,8	13.265.915,9
2035	6.776.890,5	5.526.376,0	12.303.266,5
2036	6.317.122,9	5.111.925,4	11.429.048,3
2037	5.896.260,5	4.736.594,6	10.632.855,1
2038	5.510.039,6	4.395.707,9	9.905.747,5
2039	5.154.772,8	4.085.252,0	9.240.024,8
2040	4.827.261,0	3.801.773,2	8.629.034,2

IPCC modeli eski saha için pik metan üretim yılını 2009 ve bu yılda oluşması beklenen metan gazı miktarını 104.137.318 m³ olarak vermiştir. Model, yeni saha için pik metan üretim yılını 2012 ve bu yılda oluşması beklenen metan gazı miktarını 61.617.040 m³ olarak vermiştir. İki sahadan elde edilecek gaz miktarları toplandığında pik üretim yılı 2012 olmakta ve bu yılda oluşması beklenen metan gazı miktarı 139.052.122 m³ olmaktadır.

Eski ve yeni sahada oluşması beklenen toplam metan gazı miktarı Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1 IPCC depo gazı oluşum modeli

2004-2007 yılları arasında meydana gelen azalma 2005 yılında aktif gaz çekimi yapılan alan dışında bir alana döküm yapılmasındandır.

5.2 Scholl Canyon Modeli Sonuçları

Scholl Canyon modeli çalıştırılarak elde edilmiş sonuçlar Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2 Scholl Canyon modeli çıktıları (m³ CH₄/yıl)

Yıllar	Scholl Canyon Eski Saha (m ³)	Scholl Canyon Yeni Saha (m ³)	Scholl Canyon Toplam (m ³)
1995	0,0	0,0	0,0
1996	7.226.251,6	0,0	7.226.251,6
1997	21.141.009,0	0,0	21.141.009,0
1998	37.965.529,7	0,0	37.965.529,7
1999	55.018.121,3	0,0	55.018.121,3
2000	74.898.395,6	0,0	74.898.395,6
2001	91.801.318,9	0,0	91.801.318,9
2002	104.422.052,9	0,0	104.422.052,9
2003	116.048.379,9	0,0	116.048.379,9
2004	128.431.995,1	0,0	128.431.995,1

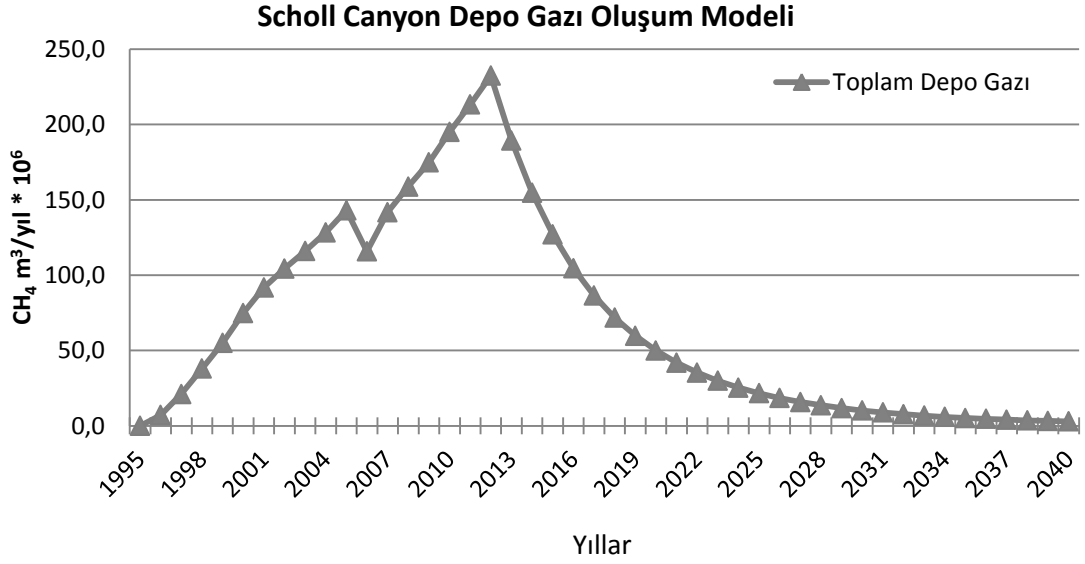
Çizelge 5.2 (Devam) Scholl Canyon modeli çıktıları (m³ CH₄/yıl)

Yıllar	Scholl Canyon Eski Saha (m ³)	Scholl Canyon Yeni Saha (m ³)	Scholl Canyon Toplam (m ³)
2005	143.101.819,0	0,0	143.101.819,0
2006	115.742.357,1	0,0	115.742.357,1
2007	141.784.414,3	0,0	141.784.414,3
2008	158.804.695,4	0,0	158.804.695,4
2009	174.832.892,0	0,0	174.832.892,0
2010	141.689.620,4	53.347.767,8	195.037.388,2
2011	115.232.988,9	98.100.628,5	213.333.617,4
2012	94.057.224,3	138.404.569,9	232.461.794,2
2013	77.060.122,5	112.285.590,9	189.345.713,5
2014	63.376.385,8	91.406.310,3	154.782.696,1
2015	52.325.749,1	74.669.863,2	126.995.612,3
2016	43.372.593,8	61.215.579,3	104.588.173,1
2017	36.094.488,7	50.367.206,0	86.461.694,6
2018	30.157.668,4	41.592.606,0	71.750.274,4
2019	25.297.908,3	34.472.370,3	59.770.278,6
2020	21.305.595,3	28.675.358,4	49.980.953,6
2021	18.014.065,9	23.939.626,2	41.953.692,1
2022	15.290.487,0	20.057.543,5	35.348.030,5
2023	13.028.718,1	16.864.171,0	29.892.889,2
2024	11.143.718,7	14.228.176,0	25.371.894,7
2025	9.567.160,1	12.044.723,7	21.611.883,7
2026	8.243.978,3	10.229.910,6	18.473.888,9
2027	7.129.662,3	8.716.398,7	15.846.061,0
2028	6.188.116,6	7.449.987,2	13.638.103,8
2029	5.389.974,6	6.386.917,8	11.776.892,4
2030	4.711.264,3	5.491.751,4	10.203.015,7
2031	4.132.351,2	4.735.694,4	8.868.045,5
2032	3.637.098,5	4.095.274,9	7.732.373,4
2033	3.212.199,0	3.551.295,4	6.763.494,4
2034	2.846.641,7	3.088.001,0	5.934.642,8
2035	2.531.285,0	2.692.418,6	5.223.703,6
2036	2.258.514,4	2.353.829,3	4.612.343,7
2037	2.021.967,2	2.063.347,4	4.085.314,6
2038	1.816.309,8	1.813.583,0	3.629.892,8
2039	1.637.058,5	1.598.369,8	3.235.428,3
2040	1.480.432,6	1.412.547,2	2.892.979,8

Scholl Canyon modeli eski saha için pik metan üretim yılını 2009 ve bu yılda oluşması beklenen metan gazı miktarını 174.832.892 m³ olarak vermiştir. Model, yeni saha için pik metan üretim yılını 2012 ve bu yılda oluşması beklenen metan gazı miktarını

138.404.570 m³ olarak vermiştir. İki sahadan elde edilecek gaz miktarları toplandığında pik üretim yılı 2012 olmakta ve bu yılda oluşması beklenen metan gazı miktarı 232.461.794 m³ olmaktadır.

Eski ve yeni sahada oluşması beklenen toplam metan gazı miktarı Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2 Scholl Canyon depo gazı oluşum modeli

2004-2007 yılları arasında meydana gelen azalma 2005 yılında aktif gaz çekimi yapılan alan dışında bir alana döküm yapılmasındandır.

5.3 EPA Colombia Modeli Sonuçları

Colombia modeli çalıştırılarak elde edilmiş sonuçlar Çizelge 5.3’de verilmiştir.

Çizelge 5.3 EPA Colombia modeli çıktıları (m³ CH₄/yıl)

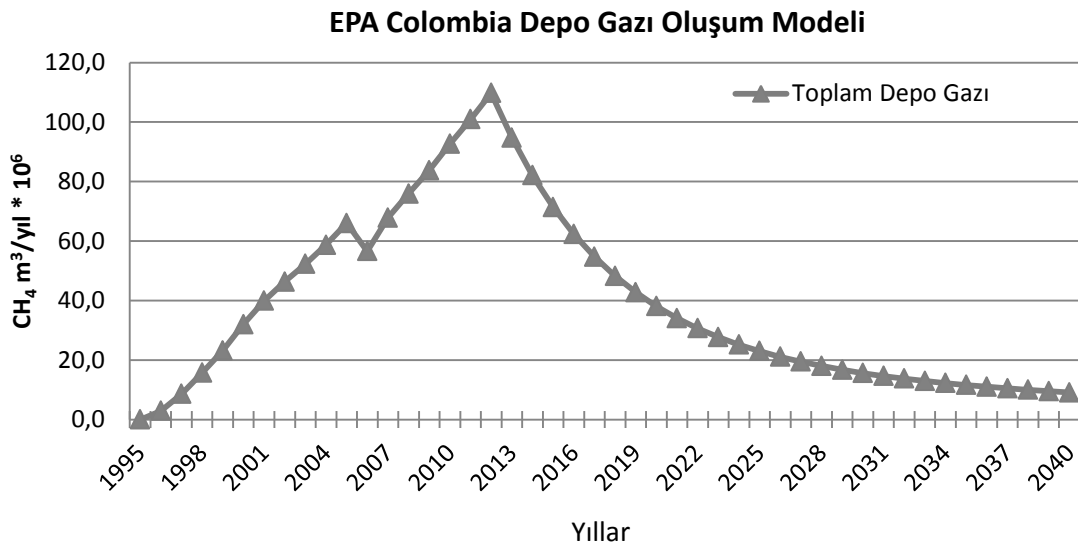
Yıllar	EPA Colombia Eski Saha (m ³)	EPA Colombia Yeni Saha (m ³)	EPA Colombia Toplam (m ³)
1995	0,0	0,0	0,0
1996	2.891.037,9	0,0	2.891.037,9
1997	8.598.132,9	0,0	8.598.132,9
1998	15.717.748,5	0,0	15.717.748,5
1999	23.196.102,8	0,0	23.196.102,8
2000	32.038.656,7	0,0	32.038.656,7
2001	39.945.412,0	0,0	39.945.412,0
2002	46.301.798,4	0,0	46.301.798,4

Çizelge 5.3 (Devam) EPA Colombia modeli çıktıları (m³ CH₄/yıl)

Yıllar	EPA Colombia Eski Saha (m ³)	EPA Colombia Yeni Saha (m ³)	EPA Colombia Toplam (m ³)
2003	52.320.616,2	0,0	52.320.616,2
2004	58.680.155,2	0,0	58.680.155,2
2005	66.006.973,1	0,0	66.006.973,1
2006	56.613.663,3	0,0	56.613.663,3
2007	67.855.663,6	0,0	67.855.663,6
2008	75.912.413,6	0,0	75.912.413,6
2009	83.758.017,3	0,0	83.758.017,3
2010	72.073.103,0	20.552.138,3	92.625.241,3
2011	62.234.018,1	38.722.773,1	100.956.791,2
2012	53.939.998,7	55.821.452,0	109.761.450,7
2013	46.939.663,0	47.806.295,7	94.745.958,7
2014	41.022.886,7	41.067.337,7	82.090.224,4
2015	36.014.015,3	35.396.168,9	71.410.184,2
2016	31.766.194,9	30.618.623,7	62.384.818,5
2017	28.156.634,9	26.589.144,4	54.745.779,3
2018	25.082.652,2	23.186.073,7	48.268.725,9
2019	22.458.365,1	20.307.721,5	42.766.086,6
2020	20.211.932,1	17.869.080,1	38.081.012,2
2021	18.283.245,0	15.799.079,9	34.082.324,9
2022	16.622.001,6	14.038.296,9	30.660.298,5
2023	15.186.095,5	12.537.037,8	27.723.133,3
2024	13.940.270,7	11.253.740,1	25.194.010,8
2025	12.854.997,8	10.153.635,8	23.008.633,6
2026	11.905.534,8	9.207.634,4	21.113.169,2
2027	11.071.142,5	8.391.390,9	19.462.533,4
2028	10.334.428,8	7.684.525,9	18.018.954,6
2029	9.680.800,5	7.069.974,9	16.750.775,4
2030	9.098.006,1	6.533.444,4	15.631.450,6
2031	8.575.752,8	6.062.957,2	14.638.709,9
2032	8.105.386,4	5.648.472,6	13.753.859,1
2033	7.679.624,8	5.281.569,8	12.961.194,6
2034	7.292.334,0	4.955.181,9	12.247.515,9
2035	6.938.341,5	4.663.375,0	11.601.716,5
2036	6.613.280,3	4.401.162,7	11.014.443,0
2037	6.313.458,2	4.164.351,6	10.477.809,8
2038	6.035.748,9	3.949.411,9	9.985.160,8
2039	5.777.500,4	3.753.369,4	9.530.869,8
2040	5.536.458,8	3.573.715,0	9.110.173,8

Colombia modeli eski saha için pik metan üretim yılını 2009 ve bu yılda oluşması beklenen metan gazı miktarını 83.758.017 m³ olarak vermiştir. Model, yeni saha için pik metan üretim yılını 2012 ve bu yılda oluşması beklenen metan gazı miktarını 55.821.452 m³ olarak vermiştir. İki sahadan elde edilecek gaz miktarları toplandığında pik üretim yılı 2012 olmakta ve bu yılda oluşması beklenen metan gazı miktarı 109.761.451 m³ olmaktadır.

Eski ve yeni sahada oluşması beklenen toplam metan gazı miktarı Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.3 EPA Colombia depo gazı oluşum modeli

2004-2007 yılları arasında meydana gelen azalma 2005 yılında aktif gaz çekimi yapılan alan dışında bir alana döküm yapılmasındandır.

5.4 Weber Modeli Sonuçları

Weber modeli çalıştırılarak elde edilmiş sonuçlar Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4 Weber modeli çıktıları (m³ CH₄/yıl)

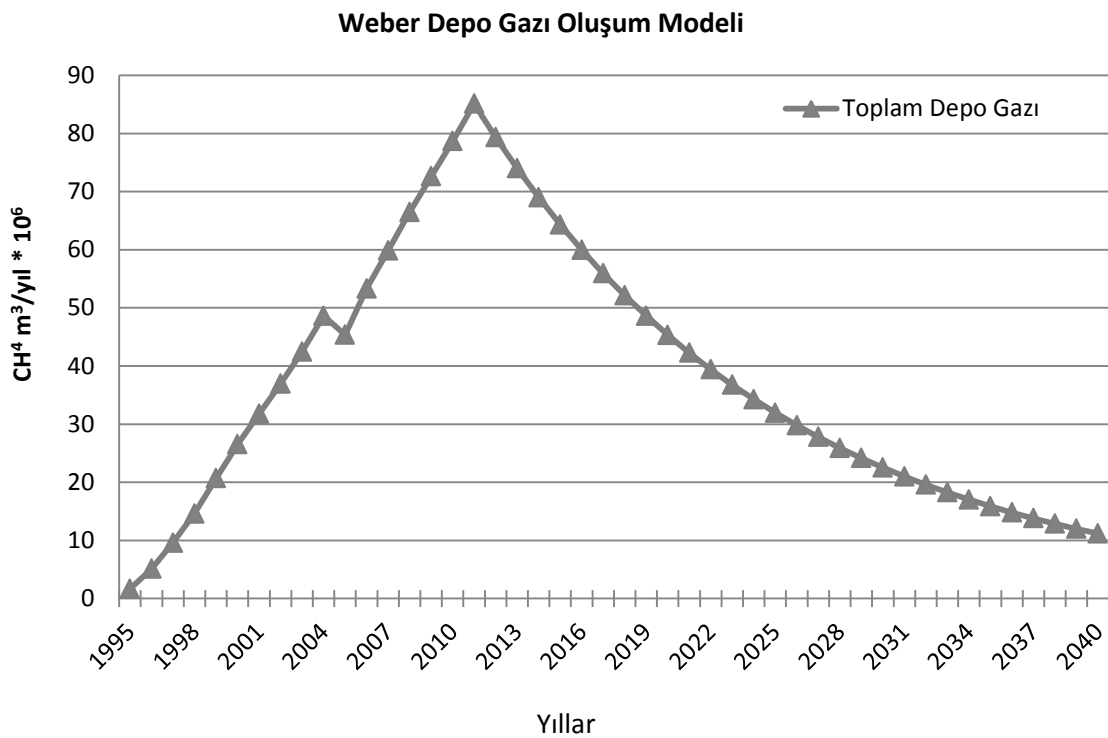
Yıllar	Weber Eski Saha (m ³)	Weber Yeni Saha (m ³)	Weber Toplam (m ³)
1995	1.667.313,3	0,0	1.667.313,3
1996	5.094.182,2	0,0	5.094.182,2
1997	9.591.048,5	0,0	9.591.048,5
1998	14.593.486,5	0,0	14.593.486,5
1999	20.671.225,5	0,0	20.671.225,5

Çizelge 5.4 (Devam) Weber modeli çıktıları (m³ CH₄/yıl)

Yıllar	Weber Eski Saha (m ³)	Weber Yeni Saha (m ³)	Weber Toplam (m ³)
2000	26.535.471,6	0,0	26.535.471,6
2001	31.758.086,7	0,0	31.758.086,7
2002	36.942.343,8	0,0	36.942.343,8
2003	42.448.494,6	0,0	42.448.494,6
2004	48.641.409,1	0,0	48.641.409,1
2005	45.352.949,2	0,0	45.352.949,2
2006	53.327.302,8	0,0	53.327.302,8
2007	59.849.197,1	0,0	59.849.197,1
2008	66.449.341,8	0,0	66.449.341,8
2009	61.956.955,6	10.659.085,7	72.616.041,3
2010	57.768.282,5	20.915.732,9	78.684.015,4
2011	53.862.789,6	31.274.421,6	85.137.211,2
2012	50.221.332,1	29.160.077,4	79.381.409,6
2013	46.826.059,7	27.188.676,0	74.014.735,7
2014	43.660.328,7	25.350.553,5	69.010.882,1
2015	40.708.620,6	23.636.699,4	64.345.320,0
2016	37.956.466,3	22.038.712,4	59.995.178,7
2017	35.390.374,6	20.548.759,3	55.939.133,9
2018	32.997.766,6	19.159.536,1	52.157.302,7
2019	30.766.913,6	17.864.233,1	48.631.146,7
2020	28.686.880,1	16.656.500,5	45.343.380,6
2021	26.747.469,7	15.530.418,2	42.277.887,9
2022	24.939.175,5	14.480.465,9	39.419.641,4
2023	23.253.133,1	13.501.496,9	36.754.630,0
2024	21.681.077,6	12.588.712,3	34.269.789,9
2025	20.215.302,7	11.737.637,5	31.952.940,3
2026	18.848.623,3	10.944.100,7	29.792.724,1
2027	17.574.339,9	10.204.211,9	27.778.551,8
2028	16.386.205,9	9.514.344,1	25.900.550,0
2029	15.278.397,1	8.871.115,6	24.149.512,8
2030	14.245.483,1	8.271.373,4	22.516.856,5
2031	13.282.400,4	7.712.177,4	20.994.577,8
2032	12.384.428,0	7.190.786,6	19.575.214,6
2033	11.547.164,2	6.704.645,0	18.251.809,1
2034	10.766.504,5	6.251.369,5	17.017.874,0
2035	10.038.622,3	5.828.738,3	15.867.360,6
2036	9.359.949,4	5.434.679,6	14.794.628,9
2037	8.727.158,9	5.067.261,6	13.794.420,6
2038	8.137.149,1	4.724.683,4	12.861.832,5
2039	7.587.027,5	4.405.265,6	11.992.293,1
2040	7.074.097,5	4.107.442,5	11.181.540,0

Weber modeli eski saha için pik metan üretim yılını 2008 ve bu yılda oluşması beklenen metan gazı miktarını $66.449.342 \text{ m}^3$ olarak vermiştir. Model, yeni saha için pik metan üretim yılını 2011 ve bu yılda oluşması beklenen metan gazı miktarını $31.274.422 \text{ m}^3$ olarak vermiştir. İki sahadan elde edilecek gaz miktarları toplandığında pik üretim yılı 2011 olmakta ve bu yılda oluşması beklenen metan gazı miktarı $85.137.211 \text{ m}^3$ olmaktadır.

Eski ve yeni sahada oluşması beklenen toplam metan gazı miktarı Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.4 Weber depo gazı oluşum modeli

2004-2007 yılları arasında meydana gelen azalma 2005 yılında aktif gaz çekimi yapılan alan dışında bir alana döküm yapılmasındandır.

5.5 OTD Modeli Sonuçları

OTD modeli için;eski sahada $p=0,8$, yeni sahada $p=0,95$ kullanılmıştır. Çizelge 5.5'te eski saha için farklı p katsayılarına karşılık gelen saha verilerinin OTD model çıktılarına oranları gösterilmiştir.

Çizelge 5.5 Farklı p değerleri için eski saha verilerinin model çıktılarına oranları

p	0,75	0,76	0,77	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85
2009	1,039	1,025	1,012	0,999	0,986	0,974	0,962	0,950	0,938	0,927	0,916
2010	1,051	1,037	1,024	1,011	0,998	0,985	0,973	0,961	0,950	0,939	0,927
2011	1,082	1,068	1,054	1,041	1,027	1,015	1,002	0,990	0,978	0,966	0,955
Ortalama	1,057	1,043	1,030	1,017	1,004	0,991	0,979	0,967	0,955	0,944	0,933

Çizelge 5.6'da yeni sahada için farklı p katsayılarına karşılık gelen saha verilerinin OTD model çıktılarına oranları gösterilmiştir.

Çizelge 5.6 Farklı p değerleri için yeni saha verilerinin model çıktılarına oranları

p	0,9	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99
2012	1,054	1,043	1,031	1,020	1,009	0,999	0,988	0,978	0,968	0,959

Çizelge 5.7'de OTD modelinin 1995-2040 yılları arasındaki metan gazı miktarına ilişkin çıktıları verilmiştir.

Çizelge 5.7 OTD modeli çıktıları (m³ CH₄/yıl)

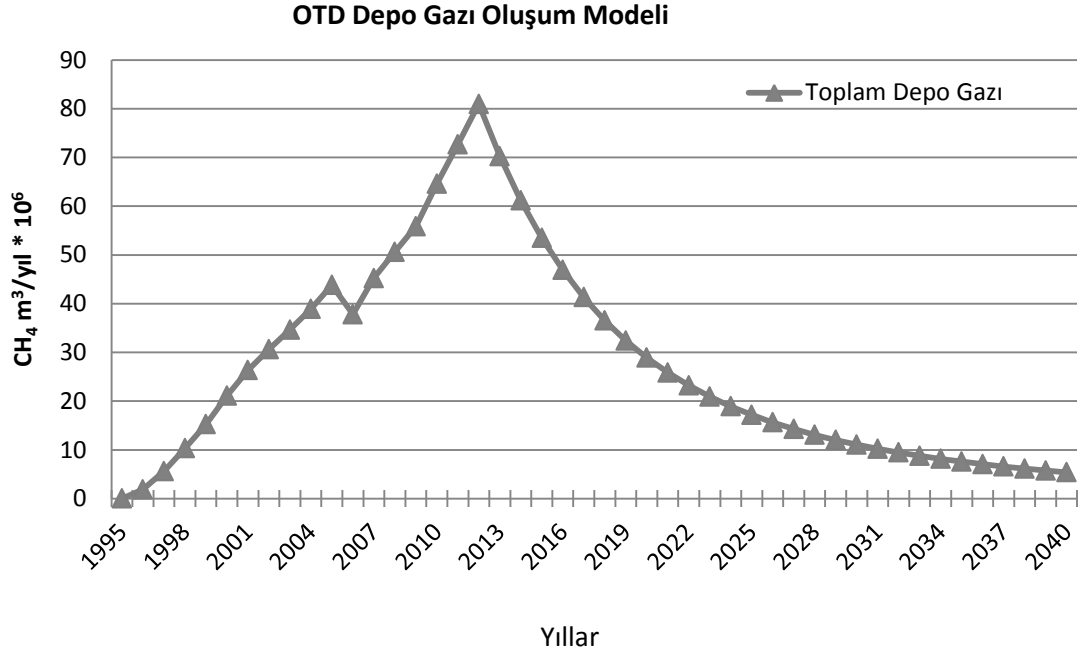
Yıllar	OTD Eski Saha (m³)	OTD Yeni Saha (m³)	OTD Toplam (m³)
1995	0,0	0,0	0,0
1996	1.892.371,5	0,0	1.892.371,5
1997	5.635.911,5	0,0	5.635.911,5
1998	10.319.049,3	0,0	10.319.049,3
1999	15.254.751,4	0,0	15.254.751,4
2000	21.100.677,0	0,0	21.100.677,0
2001	26.353.453,7	0,0	26.353.453,7
2002	30.606.378,1	0,0	30.606.378,1
2003	34.647.355,9	0,0	34.647.355,9
2004	38.918.045,3	0,0	38.918.045,3
2005	43.828.233,6	0,0	43.828.233,6
2006	37.801.766,1	0,0	37.801.766,1
2007	45.243.305,7	0,0	45.243.305,7
2008	50.618.814,8	0,0	50.618.814,8
2009	55.864.734,9	0,0	55.864.734,9
2010	48.333.556,1	16.259.549,8	64.593.106,0
2011	41.963.148,1	30.722.796,0	72.685.944,1
2012	36.564.200,2	44.407.438,6	80.971.638,8
2013	31.978.951,0	38.281.215,4	70.260.166,4
2014	28.075.888,4	33.108.227,1	61.184.115,4
2015	24.745.341,7	28.732.469,3	53.477.811,0

Çizelge 5.7 (Devam) OTD modeli çıktıları ($\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{yıl}$)

Yıllar	OTD Eski Saha (m^3)	OTD Yeni Saha (m^3)	OTD Toplam (m^3)
2016	21.895.817,1	25.023.968,5	46.919.785,7
2017	19.450.950,3	21.874.406,4	41.325.356,7
2018	17.346.971,8	19.193.482,3	36.540.454,1
2019	15.530.599,7	16.905.888,3	32.436.487,9
2020	13.957.286,3	14.948.793,9	28.906.080,2
2021	12.589.760,0	13.269.755,0	25.859.515,0
2022	11.396.812,5	11.824.973,8	23.221.786,3
2023	10.352.289,0	10.577.852,6	20.930.141,6
2024	9.434.248,9	9.497.790,5	18.932.039,4
2025	8.624.266,8	8.559.182,3	17.183.449,2
2026	7.906.850,9	7.740.586,2	15.647.437,1
2027	7.268.958,5	7.024.030,6	14.292.989,1
2028	6.699.593,1	6.394.438,0	13.094.031,1
2029	6.189.468,7	5.839.144,9	12.028.613,6
2030	5.730.729,7	5.347.502,8	11.078.232,5
2031	5.316.718,3	4.910.545,6	10.227.263,9
2032	4.941.779,8	4.520.712,7	9.462.492,5
2033	4.601.101,1	4.171.618,7	8.772.719,8
2034	4.290.575,3	3.857.861,0	8.148.436,4
2035	4.006.689,1	3.574.860,2	7.581.549,3
2036	3.746.428,5	3.318.726,3	7.065.154,8
2037	3.507.200,5	3.086.147,6	6.593.348,1
2038	3.286.767,4	2.874.297,9	6.161.065,4
2039	3.083.191,5	2.680.759,4	5.763.950,9
2040	2.894.789,5	2.503.457,4	5.398.246,9

OTD modeli, eski saha için pik metan üretim yılını 2009 ve bu yılda oluşması beklenen metan gazı miktarını $55.864.735 \text{ m}^3$ olarak vermiştir. Model, yeni saha için pik metan üretim yılını 2012 ve bu yılda oluşması beklenen metan gazı miktarını $44.407.439 \text{ m}^3$ olarak vermiştir. İki sahadan elde edilecek gaz miktarları toplandığında pik üretim yılı 2012 olmakta ve bu yılda oluşması beklenen metan gazı miktarı $80.971.639 \text{ m}^3$ olmaktadır.

Eski ve yeni sahada oluşması beklenen toplam metan gazı miktarı Şekil 5.5'te verilmiştir.



Şekil 5.5 OTD depo gazı oluşum modeli

2004-2007 yılları arasında meydana gelen azalma 2005 yılında aktif gaz çekimi yapılan alan dışında bir alana döküm yapılmasındandır.

5.6 Depo Gazı Tahmin Modellerinin Karşılaştırılması

Oluşacak metan gazını modellemek amacıyla kullanılan 5 modele ait yıllara göre değişen toplam metan gazı miktarları Çizelge 5.8’de verilmiştir. Modelleme periyodu atığın depolanmaya başladığı 1995 yılı ile 2040 yılı arasındadır.

Çizelge 5.8 Oluşması beklenen depo gazı miktarlarının karşılaştırması

Yıl	IPCC (m ³)	Scholl Canyon (m ³)	Weber (m ³)	EPA Colombia (m ³)	OTD (m ³)
1995	0	0	1.667.313	0	0
1996	3.552.600	7.226.252	5.094.182	2.891.038	1.892.372
1997	10.576.278	21.141.009	9.591.048	8.598.133	5.635.911
1998	19.355.671	37.965.530	14.593.487	15.717.748	10.319.049
1999	28.599.005	55.018.121	20.671.225	23.196.103	15.254.751
2000	39.540.509	74.898.396	26.535.472	32.038.657	21.100.677
2001	49.356.055	91.801.319	31.758.087	39.945.412	26.353.454
2002	57.283.689	104.422.053	36.942.344	46.301.798	30.606.378
2003	64.805.064	116.048.380	42.448.495	52.320.616	34.647.356
2004	72.750.088	128.431.995	48.641.409	58.680.155	38.918.045
2005	81.887.873	143.101.819	45.352.949	66.006.973	43.828.234

Çizelge 5.8 (Devam) Oluşması beklenen depo gazı miktarlarının karşılaştırması

Yıl	IPCC (m ³)	Scholl Canyon (m ³)	Weber (m ³)	EPA Colombia (m ³)	OTD (m ³)
2006	70.485.098	115.742.357	53.327.303	56.613.663	37.801.766
2007	84.381.713	141.784.414	59.849.197	67.855.664	45.243.306
2008	94.385.748	158.804.695	66.449.342	75.912.414	50.618.815
2009	104.137.318	174.832.892	72.616.041	83.758.017	55.864.735
2010	116.014.356	195.037.388	78.684.015	92.625.241	64.593.106
2011	127.230.105	213.333.617	85.137.211	100.956.791	72.685.944
2012	139.052.122	232.461.794	79.381.410	109.761.451	80.971.639
2013	120.600.621	189.345.713	74.014.736	94.745.959	70.260.166
2014	104.949.220	154.782.696	69.010.882	82.090.224	61.184.115
2015	91.646.069	126.995.612	64.345.320	71.410.184	53.477.811
2016	80.314.144	104.588.173	59.995.179	62.384.819	46.919.786
2017	70.638.713	86.461.695	55.939.134	54.745.779	41.325.357
2018	62.356.928	71.750.274	52.157.303	48.268.726	36.540.454
2019	55.249.150	59.770.279	48.631.147	42.766.087	32.436.488
2020	49.131.742	49.980.954	45.343.381	38.081.012	28.906.080
2021	43.851.070	41.953.692	42.277.888	34.082.325	25.859.515
2022	39.278.511	35.348.030	39.419.641	30.660.298	23.221.786
2023	35.306.294	29.892.889	36.754.630	27.723.133	20.930.142
2024	31.844.045	25.371.895	34.269.790	25.194.011	18.932.039
2025	28.815.904	21.611.884	31.952.940	23.008.634	17.183.449
2026	26.158.131	18.473.889	29.792.724	21.113.169	15.647.437
2027	23.817.108	15.846.061	27.778.552	19.462.533	14.292.989
2028	21.747.672	13.638.104	25.900.550	18.018.955	13.094.031
2029	19.911.735	11.776.892	24.149.513	16.750.775	12.028.614
2030	18.277.123	10.203.016	22.516.856	15.631.451	11.078.233
2031	16.816.619	8.868.046	20.994.578	14.638.710	10.227.264
2032	15.507.154	7.732.373	19.575.215	13.753.859	9.462.493
2033	14.329.142	6.763.494	18.251.809	12.961.195	8.772.720
2034	13.265.916	5.934.643	17.017.874	12.247.516	8.148.436
2035	12.303.267	5.223.704	15.867.361	11.601.717	7.581.549
2036	11.429.048	4.612.344	14.794.629	11.014.443	7.065.155
2037	10.632.855	4.085.315	13.794.421	10.477.810	6.593.348
2038	9.905.748	3.629.893	12.861.832	9.985.161	6.161.065
2039	9.240.025	3.235.428	11.992.293	9.530.870	5.763.951
2040	8.629.034	2.892.980	11.181.540	9.110.174	5.398.247

Modeller kullandıkları ayrışma denklemlerine ve Bölüm 4.5'te verilen parametrelere bağlı olarak farklı sonuçlar vermektedirler. Weber modeli diğer modellerden farklı olarak atık depo sahasına koyulduktan sonra herhangi bir bekleme süresi kullanmadığı

için 1995 yılına ait oluşması beklenen depo gazı miktarı çıktısı da vermektedir. 1995-2040 periyodunda modellerin çıktılarına göre oluşması beklenen toplam metan gazı miktarı Çizelge 5.9’da gösterilmiştir.

Çizelge 5.9 1995-2040 yılları arasında oluşması beklenen metan gazı miktarı

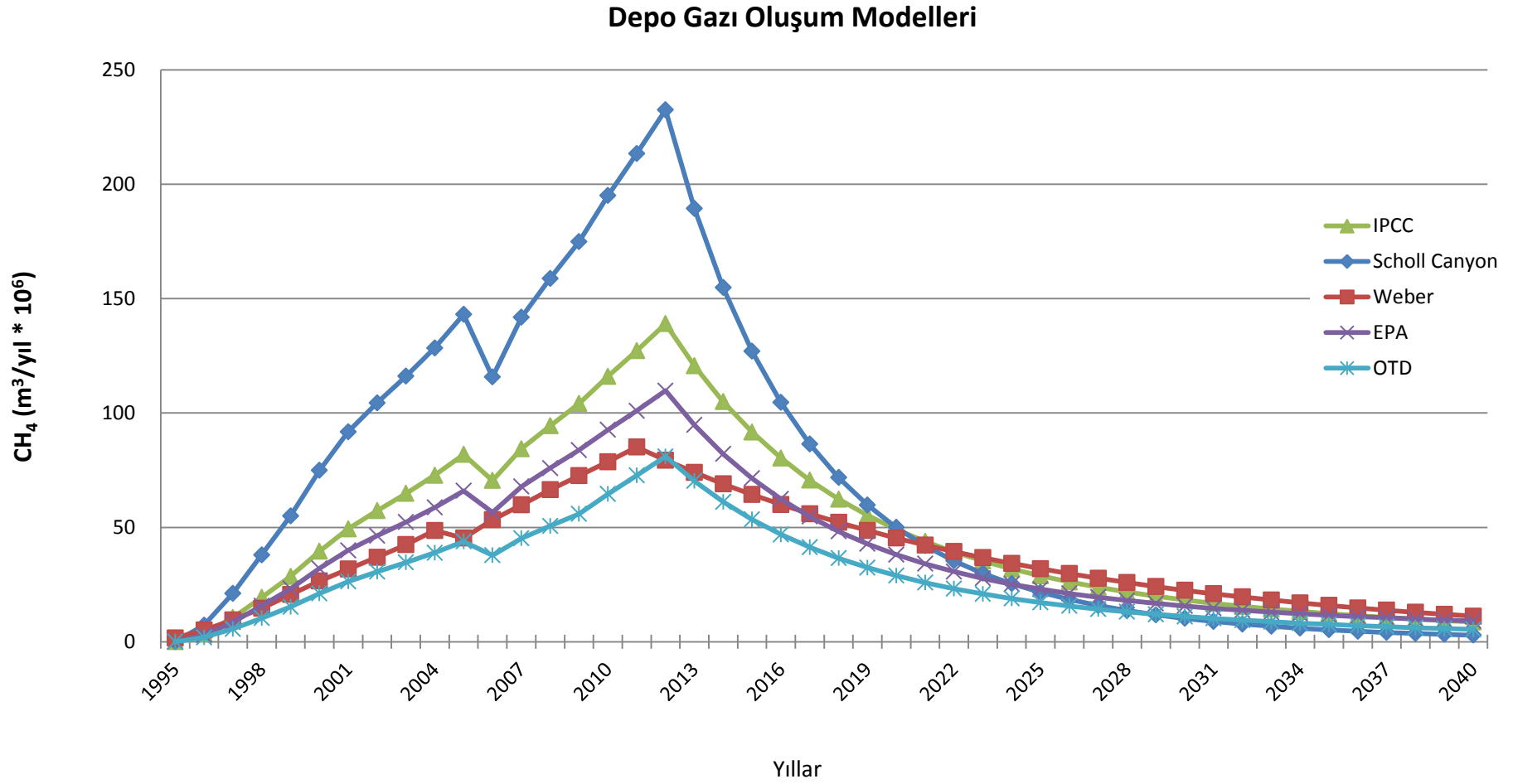
IPCC (m³)	Scholl Canyon (m³)	Weber (m³)	EPA Colombia (m³)	OTD (m³)
2.209.346.279	3.132.821.999	1.719.322.246	1.774.639.403	1.254.828.258

Modellerin pik noktaları elektrik üretim tesislerin dizayn ve boyutlandırılması ile kurulu güçleri açısından oldukça önemlidir. IPCC, Scholl Canyon, EPA Colombia ve OTD modelleri için pik üretim yılı 2012’dir. Weber modelinde ise pik üretimin 2011 yılında gerçekleşmesi öngörülmüştür. Çizelge 5.10’da modellerin pik üretim yıllarında oluşması beklenen depo gazı miktarının toplam depo gazına oranı verilmiştir.

Çizelge 5.10 Pik üretim yıllarında oluşması beklenen üretimin toplam üretime oranı

IPCC (%)	Scholl Canyon (%)	Weber (%)	EPA Colombia (%)	OTD (%)
6,29	7,42	4,95	6,19	6,45

IPCC, EPA Colombia ve OTD modelleri gaz üretimini diğer modellere göre daha stabildir. Scholl Canyon modelinde gaz üretimi ilk yıllarda hızlı bir şekilde pik yaparken Weber modeli gaz üretimini daha uzun bir periyoda yaymaktadır (Şekil 5.6).



Şekil 5.6 Oluşması beklenen metan gazı miktarlarının karşılaştırması

Oluşması beklenen metan gazı miktarının toplanabilen kısmı çeşitli etkenlere göre değişkenlik gösterebilmektedir (Çizelge 4.17). Son örtü kullanıldığında ulaşılabilinecek maksimum toplama verimi olan %90 kullanılmış olup, atık yüksekliğine bağlı olarak %5 , ve sızıntı suyu drenaj sistemindeki sorunlara paralel olarak %25 azaltma yapılarak yaklaşık %70’lik bir toplama verimi öngörülmüştür. Oluşması beklenen metan gazı miktarının ortalama %70 verim ile toplanabilecek kısmı karşılaştırmalı olarak Çizelge 5.11’de verilmiştir. Toplama verimi, sahanın durumuna, teslim alınma zamanındaki yüzey kaplama faaliyetlerine ve bu faaliyetlerin süresine göre değişkenlik göstermektedir.

Çizelge 5.11 Oluşacak metan gazının %70 verim ile toplanabilecek kısmı

Yıl	IPCC (m ³)	Scholl Canyon (m ³)	Weber (m ³)	EPA Colombia (m ³)	OTD (m ³)
1995	0	0	1.167.119	0	0
1996	2.486.820	5.058.376	3.565.928	2.023.727	1.324.660
1997	7.403.395	14.798.706	6.713.734	6.018.693	3.945.138
1998	13.548.970	26.575.871	10.215.441	11.002.424	7.223.335
1999	20.019.304	38.512.685	14.469.858	16.237.272	10.678.326
2000	27.678.357	52.428.877	18.574.830	22.427.060	14.770.474
2001	34.549.239	64.260.923	22.230.661	27.961.788	18.447.418
2002	40.098.582	73.095.437	25.859.641	32.411.259	21.424.465
2003	45.363.544	81.233.866	29.713.946	36.624.431	24.253.149
2004	50.925.062	89.902.397	34.048.986	41.076.109	27.242.632
2005	57.321.511	100.171.273	31.747.064	46.204.881	30.679.764
2006	49.339.569	81.019.650	37.329.112	39.629.564	26.461.236
2007	59.067.199	99.249.090	41.894.438	47.498.965	31.670.314
2008	66.070.023	111.163.287	46.514.539	53.138.690	35.433.170
2009	72.896.122	122.383.024	50.831.229	58.630.612	39.105.314
2010	81.210.049	136.526.172	55.078.811	64.837.669	45.215.174
2011	89.061.074	149.333.532	59.596.048	70.669.754	50.880.161
2012	97.336.485	162.723.256	55.566.987	76.833.016	56.680.147
2013	84.420.435	132.541.999	51.810.315	66.322.171	49.182.116
2014	73.464.454	108.347.887	48.307.618	57.463.157	42.828.881
2015	64.152.248	88.896.929	45.041.724	49.987.129	37.434.468
2016	56.219.901	73.211.721	41.996.625	43.669.373	32.843.850
2017	49.447.099	60.523.186	39.157.394	38.322.046	28.927.750
2018	43.649.850	50.225.192	36.510.112	33.788.108	25.578.318
2019	38.674.405	41.839.195	34.041.803	29.936.261	22.705.542
2020	34.392.219	34.986.668	31.740.366	26.656.709	20.234.256
2021	30.695.749	29.367.584	29.594.522	23.857.627	18.101.661

Çizelge 5.11 (Devam) Oluşacak metan gazının %70 verim ile toplanabilecek kısmı

Yıl	IPCC (m ³)	Scholl Canyon (m ³)	Weber (m ³)	EPA Colombia (m ³)	OTD (m ³)
2022	27.494.958	24.743.621	27.593.749	21.462.209	16.255.250
2023	24.714.406	20.925.022	25.728.241	19.406.193	14.651.099
2024	22.290.831	17.760.326	23.988.853	17.635.808	13.252.428
2025	20.171.133	15.128.319	22.367.058	16.106.043	12.028.414
2026	18.310.692	12.931.722	20.854.907	14.779.218	10.953.206
2027	16.671.975	11.092.243	19.444.986	13.623.773	10.005.092
2028	15.223.370	9.546.673	18.130.385	12.613.268	9.165.822
2029	13.938.214	8.243.825	16.904.659	11.725.543	8.420.030
2030	12.793.986	7.142.111	15.761.800	10.942.015	7.754.763
2031	11.771.633	6.207.632	14.696.204	10.247.097	7.159.085
2032	10.855.008	5.412.661	13.702.650	9.627.701	6.623.745
2033	10.030.399	4.734.446	12.776.266	9.072.836	6.140.904
2034	9.286.141	4.154.250	11.912.512	8.573.261	5.703.905
2035	8.612.287	3.656.593	11.107.152	8.121.202	5.307.084
2036	8.000.334	3.228.641	10.356.240	7.710.110	4.945.608
2037	7.442.999	2.859.720	9.656.094	7.334.467	4.615.344
2038	6.934.023	2.540.925	9.003.283	6.989.613	4.312.746
2039	6.468.017	2.264.800	8.394.605	6.671.609	4.034.766
2040	6.040.324	2.025.086	7.827.078	6.377.122	3.778.773

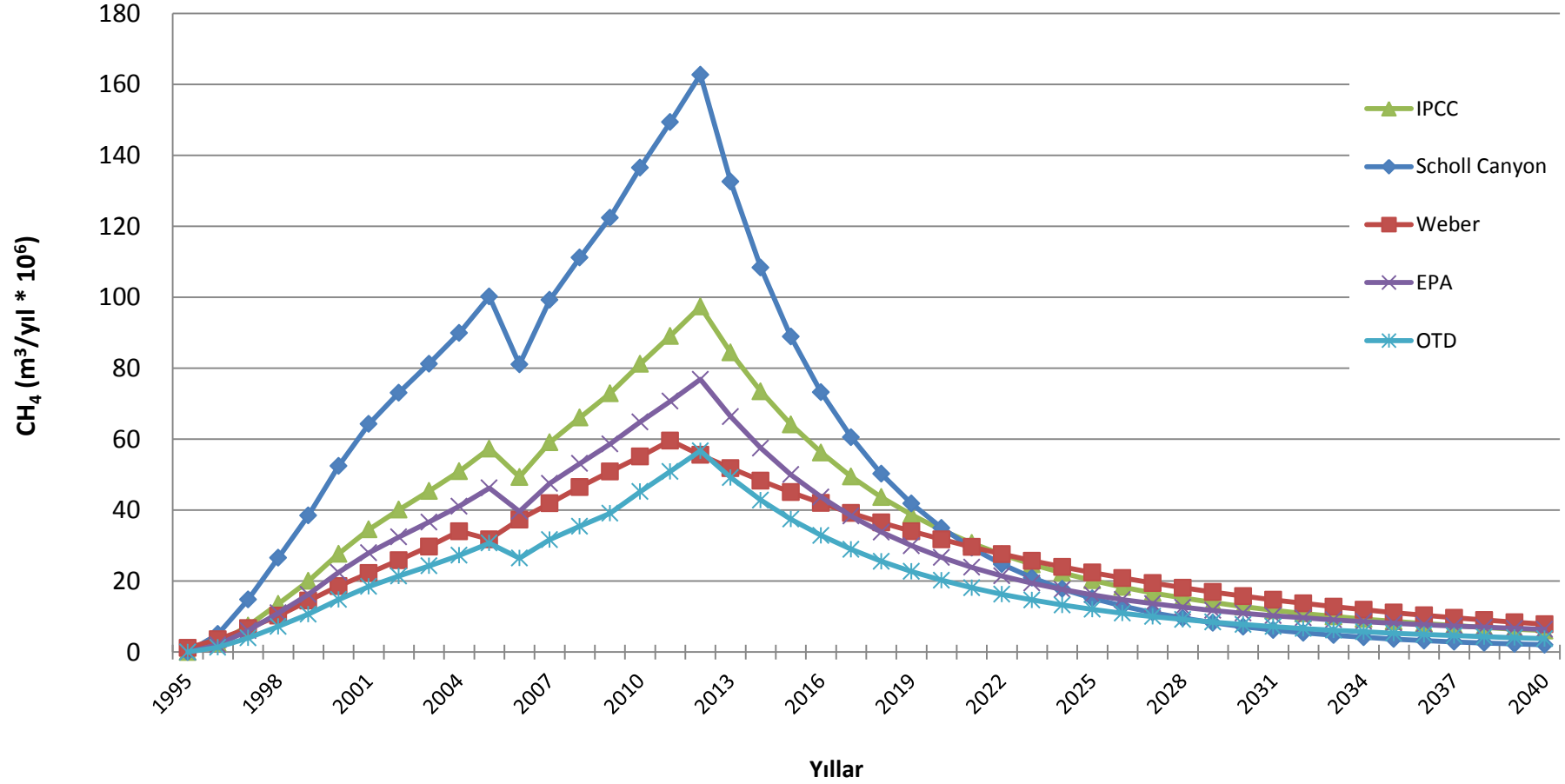
1995-2040 periyodunda modellerin çıktıklarına göre oluşması beklenen metan gazı miktarının %70 verim ile toplanabilecek kısmı Çizelge 5.12’de verilmiştir.

Çizelge 5.12 %70 verim ile toplanabilecek toplam metan gazı miktarı

IPCC (m ³)	Scholl Canyon (m ³)	Weber (m ³)	EPA Colombia (m ³)	OTD (m ³)
1.527.100.031	2.186.144.588	1.178.300.607	1.222.209.239	866.253.496

Şekil 5.7’de Oluşması beklenen metan gazının %70 verim ile toplanabilecek kısmı karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Depo Gazı Oluşum Modelleri (%70 Toplama Verimi)



Şekil 5.7 Oluşması beklenen metan gazının %70 verim ile toplanabilecek kısmı

Modellerin, sahaların teslim alınma durumuna, yüzey kaplama faaliyetlerine ve ortalama %70 toplama verimine göre kalibre edilmiş değerlerin saha verileri ile karşılaştırılması Çizelge 5.13'te verilmiştir.

Çizelge 5.13 Model verileri ile saha verilerinin karşılaştırılması

Yıl	IPCC (m ³)	Scholl Canyon (m ³)	Weber (m ³)	EPA (m ³)	OTD (m ³)	Saha Verileri (m ³)
1995	1995-2008 yılları arasında aktif gaz toplama sistemi devrede değildir.					
1996						
1997						
1998						
1999						
2000						
2001						
2002						
2003						
2004						
2005						
2006						
2007						
2008						
2009	26.034.329	43.708.223	15.489.239	20.939.504,3	13.966.183,7	13.597.780
2010	40.452.057	63.760.329	25.995.727	32.432.896,3	21.750.100,3	21.433.512
2011	37.951.164	56.176.082	26.258.110	30.339.083,8	20.457.034,7	20.755.287
2012	57.348.329	85.216.697	39.237.343	45.573.002,4	36.930.969,5	35.588.376
2013	84.420.435	132.541.999	51.810.315	66.322.171,1	49.182.116,5	
2014	73.464.454	108.347.887	48.307.618	57.463.157,1	42.828.880,8	
2015	64.152.248	88.896.929	45.041.724	49.987.129,0	37.434.467,7	
2016	56.219.901	73.211.721	41.996.625	43.669.373,0	32.843.850,0	
2017	49.447.099	60.523.186	39.157.394	38.322.045,5	28.927.749,7	
2018	43.649.850	50.225.192	36.510.112	33.788.108,2	25.578.317,9	
2019	38.674.405	41.839.195	34.041.803	29.936.260,6	22.705.541,6	
2020	34.392.219	34.986.668	31.740.366	26.656.708,5	20.234.256,1	
2021	30.695.749	29.367.584	29.594.522	23.857.627,4	18.101.660,5	
2022	27.494.958	24.743.621	27.593.749	21.462.208,9	16.255.250,4	
2023	24.714.406	20.925.022	25.728.241	19.406.193,3	14.651.099,1	
2024	22.290.831	17.760.326	23.988.853	17.635.807,6	13.252.427,6	
2025	20.171.133	15.128.319	22.367.058	16.106.043,5	12.028.414,4	
2026	18.310.692	12.931.722	20.854.907	14.779.218,5	10.953.206,0	
2027	16.671.975	11.092.243	19.444.986	13.623.773,4	10.005.092,4	
2028	15.223.370	9.546.673	18.130.385	12.613.268,2	9.165.821,8	
2029	13.938.214	8.243.825	16.904.659	11.725.542,8	8.420.029,5	
2030	12.793.986	7.142.111	15.761.800	10.942.015,4	7.754.762,8	

Çizelge 5.13 (Devam) Model verileri ile saha verilerinin karşılaştırılması

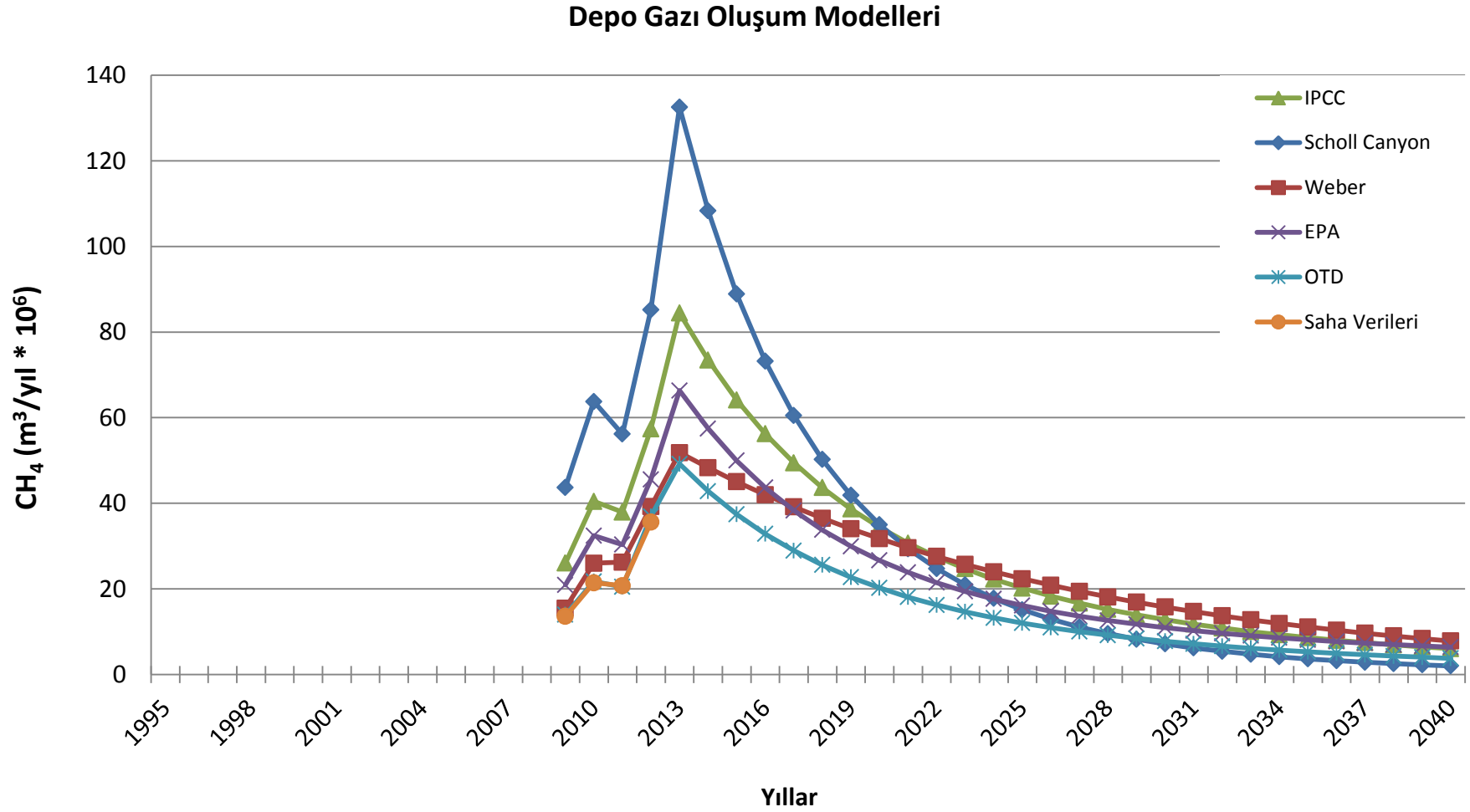
Yıl	IPCC (m ³)	Scholl Canyon (m ³)	Weber (m ³)	EPA (m ³)	OTD (m ³)	Saha Verileri (m ³)
2031	11.771.633	6.207.632	14.696.204	10.247.097,0	7.159.084,7	
2032	10.855.008	5.412.661	13.702.650	9.627.701,3	6.623.744,8	
2033	10.030.399	4.734.446	12.776.266	9.072.836,3	6.140.903,9	
2034	9.286.141	4.154.250	11.912.512	8.573.261,2	5.703.905,4	
2035	8.612.287	3.656.593	11.107.152	8.121.201,6	5.307.084,5	
2036	8.000.334	3.228.641	10.356.240	7.710.110,1	4.945.608,3	
2037	7.442.999	2.859.720	9.656.094	7.334.466,9	4.615.343,7	
2038	6.934.023	2.540.925	9.003.283	6.989.612,6	4.312.745,8	
2039	6.468.017	2.264.800	8.394.605	6.671.608,9	4.034.765,7	
2040	6.040.324	2.025.086	7.827.078	6.377.121,7	3.778.772,8	

Aktif gaz toplama sistemi 2009 yılı başında devreye alınmıştır. Aktif gaz çekimi, teslim alınan alanlara açılan kuyular vasıtası ile mümkün olmaktadır. Yıllara göre teslim alınan alanlarda açılan kuyuların etki alanlarının toplam alana oranları Çizelge 5.14'te verilmiştir.

Çizelge 5.14 Aktif çekim yapılan alanların kuyu açılan alanlara oranı

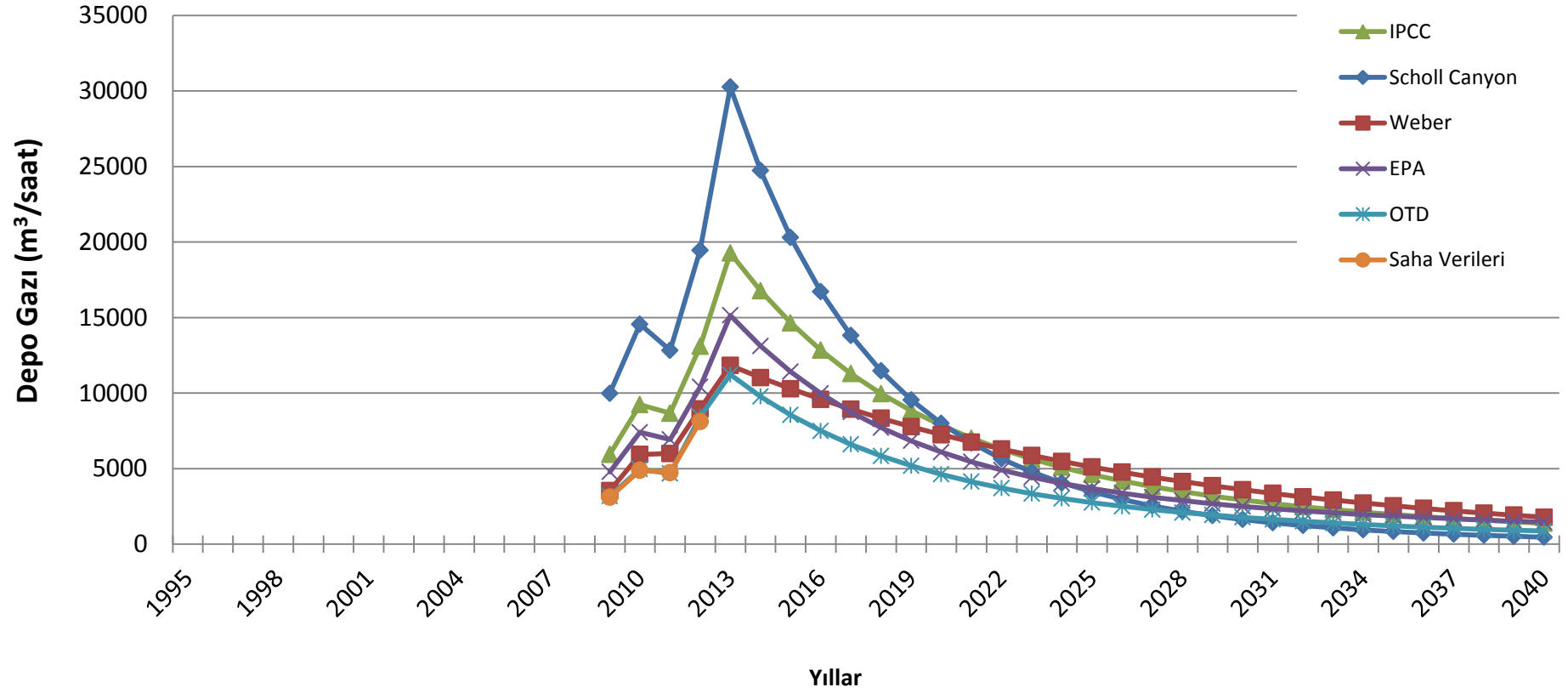
2009	2010	2011	2012
%50	%60	%65	Eski saha %100 Yeni saha %20

2011 yılı içinde eski sahanın bir bölümü tekrar depolama yapılması amacıyla geri verilmiştir. 2012 yılı itibarıyla bu alan yeni alan olarak değerlendirilmiştir. 2012 yılında eski sahanın tamamı teslim alınmış, yeni sahanın ise saha verilerinin alındığı tarih itibarıyla %20'lik kısmı teslim alınmıştır. Şekil 5.8'de model verilerin saha verileri ile karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 5.9'da ise saha verileri ve model verileri m³/saat birimi üzerinden karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.8 Model verilerin saha verileri ile karşılaştırılması

Depo Gazı Oluşum Modelleri



Şekil 5.9 Model verilerin saatlik saha verileri ile karşılaştırılması

Model çıktıları ile saha verileri oranı 1'e yaklaştıkça modelin gerçek saha koşullarını daha iyi yansıtır. Çizelge 5.15'te saha verilerinin model çıktılarına oranı verilmiştir.

Çizelge 5.15 Odayeri Saha verilerinin model çıktılarına oranı

Yıl	IPCC	Scholl Canyon	Weber	EPA	OTD
2009	0,52230	0,31110	0,87789	0,64938	0,97362
2010	0,52985	0,33616	0,82450	0,66086	0,98544
2011	0,54689	0,36947	0,79043	0,68411	1,01458
2012	0,62057	0,41762	0,90700	0,78091	0,96365
Ortalama	0,55490	0,35859	0,84996	0,69382	0,98432

OTD depo gazı oluşum modeli çıktıları 2009-2012 yılları arasında saha verilerine sırasıyla %97,362 , %98,544, %101,458 ve %96,365 oranında yaklaşmıştır. Diğer modeller içinde gerçek verilere en yakın çıktıyı 2012 yılında %90,7 ile Weber modeli, en uzak çıktıyı ise %31,11 ile Scholl Canyon modeli vermiştir.

5.7 OTD Modelinin Kömürcüoda Düzenli Depolama Sahası Verileri İle Test Edilmesi

Odayeri Düzenli Depolama Sahası için en iyi çıktıyı veren OTD modeli bu bölümde, benzer özelliklere sahip Kömürcüoda Düzenli Depolama Tesisi için çalıştırılacaktır.

Model aşağıda belirtilen parametreler dışında Bölüm 4.6'da verilen OTD model girdileri ile aynı girdileri kullanmaktadır. Kömürcüoda'ya özel parametreler ise şu şekildedir:

Atık miktarı : Kömürcüoda Düzenli Depolama Sahası'nda yıllara bağlı olarak depolanan atık miktarı Çizelge 5.16'da verilmiştir.

Çizelge 5.16 Depolanan atık miktarı

Yıl	Atık Miktarı	Yıl	Atık Miktarı
1995	228.546	2003	1.099.973
1996	628.622	2004	1.314.152
1997	779.389	2005	1.459.226
1998	885.427	2006	1.620.807
1999	965.168	2007	1.639.338
2000	1.037.624	2008	1.749.984
2001	1.013.196		
2002	1.032.549		

Atık kompozisyonu: Kömrüçüoda Düzenli Depolama Sahası'nda depolanan evsel atığın kompozisyonu Çizelge 5.17'de verilmiştir.

Çizelge 5.17 Kömürcüoda atık kompozisyonu

Organik	Bahçe atığı	Kağıt	Odun-Sap	Tekstil	Çocuk bezi
53,7	1,0	16,8	1,0	2,3	6,1

Tüm atığın oksijen ile reaksiyona giren atığa oranı (α) : 1,401345

p : Çizelge 5.18’de farklı p katsayıları kullanılarak elde edilen model çıktılarının saha verilerine oranı verilmiştir.

Çizelge 5.18 Farklı p değerleri için saha verilerinin model çıktılarına oranları

p	0,62	0,63	0,64	0,65	0,66	0,67	0,68	0,69	0,7	0,71	0,72
2009	1,048	1,032	1,015	1,000	0,985	0,970	0,956	0,942	0,928	0,915	0,903
2010	1,089	1,071	1,055	1,039	1,023	1,008	0,993	0,978	0,964	0,951	0,938
2011	1,002	0,986	0,970	0,955	0,941	0,927	0,913	0,900	0,887	0,875	0,862
2012	1,010	0,994	0,979	0,964	0,949	0,935	0,921	0,908	0,895	0,882	0,870
Ortalama	1,037	1,030	1,013	0,998	0,983	0,968	0,954	0,940	0,927	0,914	0,901

OTD modelinin Kömürcüoda Düzenli Depolamasında p=0,65 ve p=0,7 için verdiği çıktılar ve gerçek saha verileri Çizelge 5.19’da verilmiştir. Model toplama verimi olarak %70 kullanmıştır.

Çizelge 5.19 OTD modeli Kömürcüoda çıktıları ve saha verileri

Yıl	OTD ¹ (m ³)	OTD ² (m ³)	Saha Verileri (m ³)
1995	1995-2008 yılları arasında aktif gaz toplama sistemi devrede değildir.		
1996			
1997			
1998			
1999			
2000			
2001			
2002			
2003			
2004			
2005			
2006			
2007			
2008			
2009	13.337.813	14.363.799	13.334.709
2010	11.782.217	12.688.542	12.236.073
2011	10.448.514	11.252.246	9.982.283

Çizelge 5.19 (Devam) OTD modeli Kömürcüoda çıktıları ve saha verileri

Yıl	OTD ¹ (m ³)	OTD ² (m ³)	Saha Verileri (m ³)
2012	9.301.690	10.017.204	8.992.175
2013	8.312.492	8.951.915	-
2014	7.456.465	8.030.040	-
2015	6.713.150	7.229.547	-
2016	6.065.417	6.531.988	-
2017	5.498.912	5.921.905	-
2018	5.001.595	5.386.334	-
2019	4.563.358	4.914.385	-
2020	4.175.701	4.496.909	-
2021	3.831.471	4.126.200	-
2022	3.524.639	3.795.765	-
2023	3.250.114	3.500.123	-
2024	3.003.590	3.234.636	-
2025	2.781.420	2.995.375	-
2026	2.580.506	2.779.006	-
2027	2.398.213	2.582.691	-
2028	3.232.294	2.404.009	-
2029	2.080.826	2.240.889	-
2030	1.942.161	2.091.558	-
2031	1.814.883	1.954.489	-
2032	1.697.768	1.828.365	-
2033	1.589.760	1.712.049	-
2034	1.489.940	1.604.550	-
2035	1.397.507	1.505.008	-
2036	1.311.763	1.412.668	-
2037	1.232.094	1.326.870	-
2038	1.157.958	1.247.032	-
2039	1.088.878	1.172.638	-
2040	1.024.429	1.103.231	-

¹p=0,65 alınmıştır.

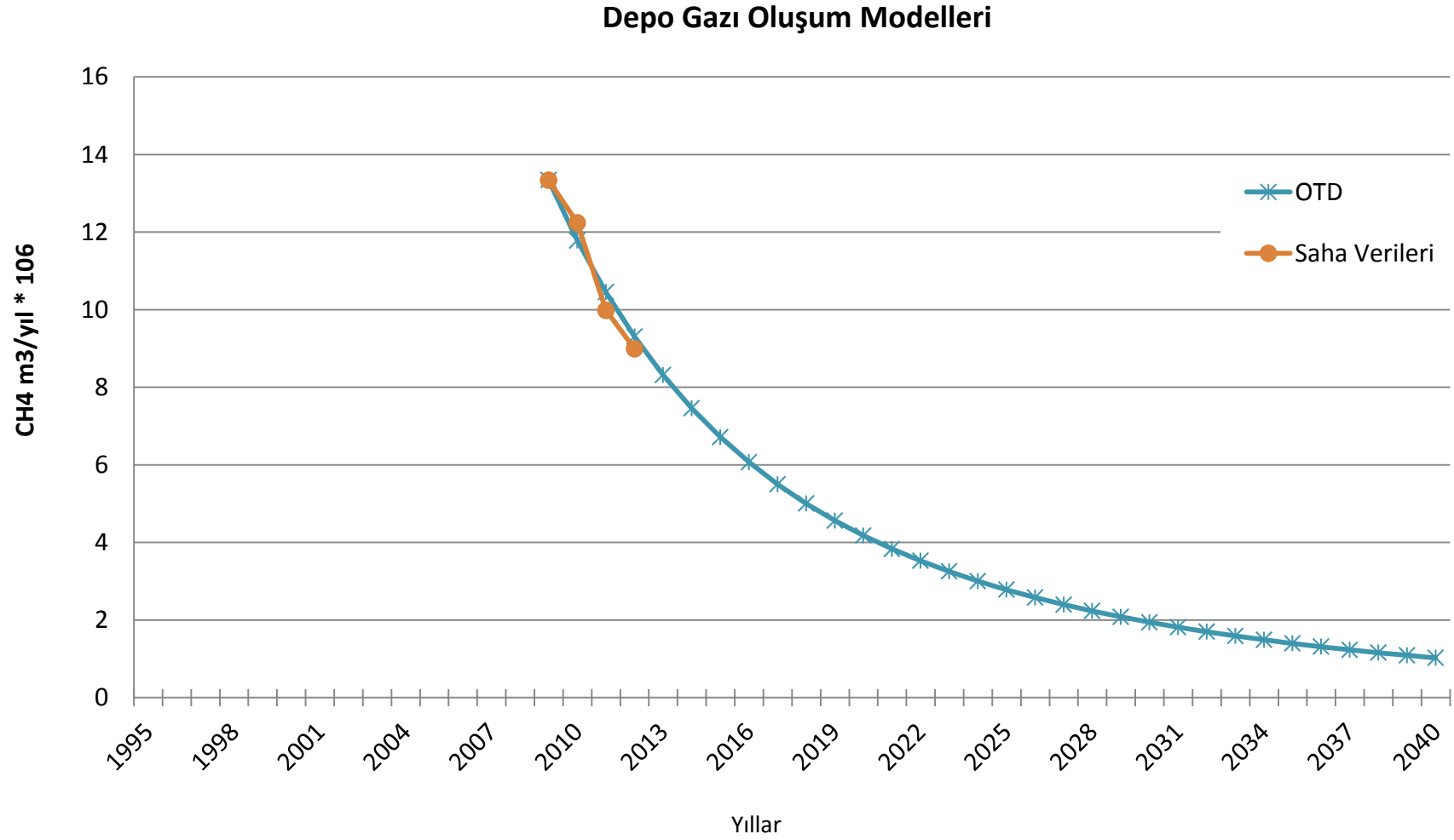
²p=0,70 alınmıştır.

Gaz çekimine başlanılan 2009 yılı itibariyle 4 yıllık periyotta saha verilerinin p:0,65 ve p=0,70 alınarak elde edilmiş OTD modeli çıktılarına oranı Çizelge 5.20’de verilmiştir.

Çizelge 5.20 $p=0,65$ için OTD modeli ile Kömürcüoda saha verileri arasındaki oran

2009	0,999767
2010	1,038520
2011	0,955378
2012	0,963685
Ortalama	0,997889

Model 2009-2012 yılları arasında $p= 0,65$ için gerçek değerlere %99,976 , %103,852 , %95,537 ve %96,368 oranında yaklaşmıştır. Şekil 5.10'da OTD modeli ile saha verileri karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.10 Kömürcüoda saha verileri ve $p=0,65$ sabiti ile kalibre edilmiş OTD modelin çıktıları

SONUÇ VE ÖNERİLER

Düzenli depolama sahalarından enerji üretimi, depo sahalarında oluşan depo gazının çevresel etkilerini mimuma indirmek için mevcut durumda en uygulanabilir yöntemdir. Oluşan gazın herhangi bir enerji çevrimine sokulmaması durumunda depo sahası çevresindeki ekolojik denge hızlı bir şekilde bozulmaktadır. Depo gazının %50'sini oluşturan metan gazı, sera gazı etkisi açısından karbondioksitten 21 kat daha zararlıdır. %50 metan içeren depo gazının alt ısı değeri 16-18 MJ/Nm³ olması ise depo gazını yakıt olarak kullanılmaya uygun kılmaktadır.

Depo sahalarında oluşan gazın tahmini, projenin boyutlandırılması ve dizayn kriterleri açısından büyük önem teşkil etmektedir. Gaz toplama sistemi proje başında pik debiye göre dizayn edileceğinden, oluşacak gazın tahmini direkt olarak proje bütçesini etkileyecektir. Normalin üzerinde yapılmış tahminlere göre boyutlandırılan bir sistem ihtiyaç olunmayacak bir yatırıma sebep olurken, normalin altındaki tahminler oluşacak gazın tamamının toplanamamasına, çevresel zararlara ve hukuki yaptırımlara sebep olmaktadır.

Dünya genelinde kullanılan modellerin sayısı 30'un üzerindedir. Bu modellerin bazıları oluşturdukları bölgelere has özellikleri taşıırken, bazıları ise genel bir denklem üzerinden daha geniş bir bakış açısı ile modelin kullanılacağı bölgelere has parametrelerin girişine imkan tanımaktadır. Bütün modeller ortak olarak depolanacak atığın özelliklerini yansıtacak girdilere ihtiyaç duyarlar. Bu girdiler neticesinde ayrışma kinetiklerine bağlı olarak alınan çıktılar, depo sahasında oluşması beklenen depo gazını veya modelin türüne göre oluşması beklenen metan gazı miktarını vermektedir. Bu çıktılar, model türüne bağlı olarak tanımlanmış ya da sahanın özelliklerini temsil edecek

şekilde seçilmiş bir toplama verimi ile kalibre edilirler. Kalibre edilmiş yeni çıktılar, projenin boyutlandırılmasında kullanılacak çıktılardır.

Yapılan çalışmada Odayeri Düzenli Depolama Sahası'nda oluşması beklenen metan gazı miktarının projeksiyonu, dünya genelinde yaygın olarak kullanılan IPCC, Scholl Canyon, EPA Colombia ve Weber modelleri kullanılarak yapılmıştır. Sonrasında alternatif olarak, sahaya ait spesifik özellikleri girdi olarak kullanabilen OTD depo gazı modeli oluşturulmuştur. OTD modeli ve diğer 4 modelin 2009-2012 yılları arasındaki çıktıları, 2009 yılı başında devreye alınan Odayeri Depo Gazından Elektrik Üretim Tesis'i'nin depo sahasından çekilen depo gazı miktarları ile karşılaştırılmıştır. OTD modeli saha verilerine 4 senelik süreçte ortalama olarak %98 oranında yaklaşırken, IPCC, Scholl Canyon, EPA Colombia ve Weber modelleri saha verilerine 4 senelik süreçte ortalama olarak sırasıyla %55, %36, %69 ve %85 oranlarında yaklaşmışlardır.

Modeller çalıştırılmak istenilen sahanın verilerini yansıtabildikleri oranda tutarlı sonuçlar vermektedirler. Modellerin tarihsel gelişimi incelendiğinde yıllara bağlı olarak model giriş parametrelerinin arttığı ve bu parametrelerin ele alınış biçimlerinin farklılaştığı görülmüştür. 2006 yılında oluşturulan IPCC modeli, 2011 yılında oluşturulmuş EPA Colombia ile benzer girdilere sahiptir. Fakat, EPA Colombia modeli atığı ve depolama özelliklerini daha detaylı biçimde ele almaktadır. Bu nedenle EPA Colombia modeli IPCC modeline oranla saha verilerine daha fazla yaklaşabilmiştir. Weber modeli Odayeri Düzenli Depolama Sahası için diğerlerine oranla daha tutarlı sonuçlar vermesine rağmen atığı ve gaz oluşumunu ele alış biçimi nedeniyle farklı örneklerde tutarsız sonuçlar verebilmektedir.

OTD modeli diğer modellerden farklı olarak maddeyi atık niteliği kazandığı andan itibaren ele almaktadır. Atığın organik kısmının depolama süresi boyunca aerobik faaliyette de kullanılması oluşacak metan gazı miktarını doğrudan etkilemektedir. Model, depolama yöntemlerinin ve saha uygulamalarının atık üzerindeki etkisini de modelleyerek saha verilerine çok yüksek oranda yaklaşabilmiştir. Benzer şekilde faaliyetlerin yürütüldüğü Kömürcüoda Düzenli Depolama sahası için çalıştırılan modelin saha verilerine $p = 0,7$ sabiti ile yaklaşım oranı %92 iken; $p = 0,65$ değeri ile yaklaşım oranı %99 olmuştur. Modelin saha verilerine bu oranda yaklaşabilmesinin nedeni

sahada yürütülen faaliyetleri, saha koşullarını ve biyolojik aktiviyeti durdurucu etkenleri modele girdi olarak kullanılabilmektedir. Model çıktılarından görülebileceği üzere, 2005 yılından önce işletmeye açılmış sahalarda işletme koşullarına ve evsel atık dışında biyolojik aktiviyeti önleyici atıkların depolanmasına bağlı olarak inhibisyon faktörü (p) 0,65-0,85 aralığındadır. Bu özellikteki sahalarda depolanan atık hakkında net bilgilerin olmaması durumunda $p = 0,7$ alınması önerilmektedir. 2005 yılından sonra işletmeye açılan sahalarda ise hem yeni yönetmeliklerin hem de işletme tecrübesinin artmasının etkisi ile p sabitinin 0,85-0,95 aralığında alınabileceği tespit edilmiştir. Depolanan atık hakkında net bilgi sahibi olunmuş ise 0,95 değeri alınabilirken, tersi durumda 0,90 alınması önerilmektedir.

İstanbul genelinde günlük olarak 14000-15000 ton atık oluşmaktadır. Bu miktarın 9000-10000 tonu Avrupa yakasında bulunan Odayeri Düzenli Depolama Sahası'nda depolanırken 4500-5000 tonu ise Asya yakasında bulunan Kömürcüoda Düzenli Depolama Sahası'nda depolanmaktadır. Bu atık miktarları birçok Avrupa ve Dünya ülkesinde, ülke genelinde oluşan atık miktarlarından daha fazladır. Saha uygulamaları, atık miktarının artışına bağlı olarak geleneksel yöntemlerin dışına çıkabilmektedir. Günlük örtü olarak tabir edilen atığın hızlı bir şekilde oksijen ile temasını kesme işleminin haftalık olarak ya da daha uzun periyotta yapılması metan üretiminde kullanılacak organik madde miktarında azalmaya sebep olmaktadır. Bu nedenle orta büyüklükteki sahalar birim depolanan atıktan elde edilen metan gazı bakımından daha verimli olmaktadır. Atık miktarının artmasına bağlı olarak işletme koşullarının zorlaşması, depolama süreci optimize edilmiş olsa da atığın aerobik ayrışmaya uğramasını engelleyememektedir.

Türkiye genelinde atık karışık olarak toplanmaktadır. Bu nedenle depolama sahasına gelen atığın %40-%50 kadarı metan üretime katkısı olmayan malzemeden oluşmaktadır. Bu kısım içinde geri dönüştürülebilir malzemelerin de olduğu göz önünde bulundurulduğunda, %40-%50'lik kısmın ayrıştırma ve geri dönüşüm faaliyetlerine yönlendirilmesi hem maddi geri dönüş sağlayacak hem de depolanan atık miktarını azaltacaktır. Bu azalmanın doğal bir sonucu olarak depolama süreci, işletme koşulları bakımından daha verimli hale gelecek ve depolanan atıktan elde edilebilecek toplam depo gazı miktarında artış olacaktır.

Bir madde atık niteliği kazandıktan hemen sonra stabilize olmaya başlamaktadır. Bu stabilizasyon, hem aerobik hem de anaerobik ortamda gerekleŖebilir. Depo sahasında enerji çevriminin dŖŖnldđ durumlarda aerobik stabilizasyon istenmemektedir. Daha uzun vadede gerekleŖen anaerobik stabilizasyon ile atığın çevresel etkileri minimuma indirilirken, elektrik üretimi ile maddi geri dnŖ sağlanabilmektedir. Maddi geri dnŖn maksimize edilmesi depo sahalarındaki uygulamalara bağlı olduğu kadar hkmetlerin ya da yerel yönetimlerin atığı ele alıŖ biçimine de bağlıdır. Geri dnŖm faaliyetlerine hız kazandırılması ve özel sektörün bu alandaki yatırımlara teŖvik edilmesi, depo sahasında depolanan ve metan üretimine katkısı olmayan maddelerin depolanmasının önüne geçecektir. Bu yolla, geri dnŖtrlen malzemeden maddi geri dnŖ sağlanabileceği gibi depolanan atık miktarındaki azalmaya bağlı olarak depo sahasında yürütülen faaliyetler organik atığın anaerobik ortamda ayrıŖmasını maksimize edecek Ŗekilde olacaktır. Atığın kaynağında ayrılması durumunda yüksek organik madde içeriğine bağlı olarak, atığın çok daha hızlı Ŗekilde stabilize edilebildiği reaktör sistemlerinin n açılacaktır. Bu durum, hem depolama için gerekli hacim ihtiyacını azaltacak, hem de çok hızlı bir Ŗekilde atığın çevresel etkilerinden kurtulmayı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Tanaka, N., (2009). "Energy Sector Methane Recovery and Use", OECD/IED, France.
- [2] IPCC, (2007). Climate Change 2007 - The Physical Science Basis, Fourth Assessment Report.
- [3] T.C. Resmi Gazete, Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun, (5346), 18.05.2005, 25819.
- [4] BIPRO, (2009). Assessing Legal Compliance With And Implementation Of The Waste Acceptance Criteria And Procedures By The EU-15, G4, Brussels.
- [5] United Nations Statistics Division, Environment and Energy Statistics, <http://unstats.un.org>, 12 Kasım 2011 .
- [6] Zanten, W.V., Landfill Gas Progresses in the Netherlands, <http://www.caddetre.org/html/200art5.htm> , 10 Ekim 2011
- [7] Rajaram, V., (2012). From Landfill Gas to Energy - Technologies and Challenges, Birinci Baskı, Taylor & Francis Group, London.
- [8] Adu-Gyamfia, K.A., Renewable Energy Landfill Gas and EfW: Now, Next and Future, http://www.pollutionsolutions-online.com/articles/soil-remediation/18/k_a_adugyamfia_r_villaa_and_f_coulona/renewable_energy_landfill_gas_an , 01 Şubat 2012
- [9] Department of Energy and Climate Change, Historic Regional Statistics, <https://restats.decc.gov.uk/cms/historic-regional-statistics/>, 24 Mart 2012 .
- [10] U.S. Environmental Protection Agency, Municipal Solid Waste (MSW) in the United States: Facts and Figures, <http://www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/msw99.htm>, 08 Nisan 2012 .
- [11] Mosqueda, S.W., The Manila Bulletin Newspaper Online - Cebu landfill fire rages on, <http://www3.mb.com.ph/articles/202334/cebu-landfill-fire-rages>, 16 Kasım 2011
- [12] Statistic Canada, The Daily – Human Activity and the Environment : Solid Waste, www.statcan.gc.ca/daily-quotidien/051202/dq051202b-eng.htm, 18 Ocak 2012

- [13] Hoornweq, V. ve Bhada-Tata, P., (2012). What a Waste, Birinci Baskı, World Bank, Washington.
- [14] Koerner, G.R. ve Koerner, R.M., (2006). "Long-term temperature monitoring of geomembranes at dry and wet landfills", *Geotextiles and Deomembranes*, 24:72-77.
- [15] UNFCCC, (2005). Clean Development Mechanism Project Design Document Form, Version 2, Ontario.
- [16] Conestoga-Rovers & Associates, (2010). Landfill Gas Management Facilities Desing Guidelines, Richmond.
- [17] ERM, (2007). World Bank - Feasibility Study of Makassar Landfill Gas Project, Final Report.
- [18] Öztürk, M., (2008). Katı Atık Depolama Alanında Metan Gazı Oluşumu, Ankara.
- [19] Dudek, J., (2010). Landfill Gas Energy Technologies, Birinci Baskı, Krakow.
- [20] Nastev, M., Therrien, R. ve Lefebvre R., (2001). "Gas Production and Migration in Landfills and Geological Materials", *Journal of Contaminant Hydrology*, 52:187-211.
- [21] Cheremisinoff, N.P., (2003). Handbook of Solid Waste Management adn Waste Minimization Technologies, Elsevier Science, USA.
- [22] Dutch Sustainable Landfill Foundtion, (2006). Opening the Black Box, Process-Based Design Criteria to Eliminate Aftercare of Landfills, Netherlands.
- [23] Warith, M.A., (2003). "Solid Waste Management: New trends in Landfill Design", *Emirates Journal for Engineering Research*, 8(1):61-7.
- [24] Maurice, C. ve Lagerkvist, A., (2003). "LFG Emission Measurements in Cold Climatic Conditions: Seasonal Variations and Methane Emissions Mitigation", *Cold Regions Science and Technology*, 36:37-46.
- [25] Groengroeft, A. ve Gebert, J., (2006). "Passive Landfill Gas Emission – Influence of Atmospheric Pressure and Implications for the Operation of Methane-Oxidising Biofilters", *Waste Management*, 26:245-251.
- [26] Einola, M.J., Kettunen, R.H. ve Rintala. J.A., (2007). "Responses of Methane Oxidation to Temperature and Water Content in Cover Soil of a Boreal Landfill", *Soil Biology & Biochemistry*, 39:1156-1164.
- [27] Abushammala, M.F., (2009). "Review on Landfill Gas Emission to the Atmosphere", *European Journal of Scientific Research*, 30(3):427-436.
- [28] Conestoga-Rovers & Associates, (2010). Handbook for the Preparation of Landfill Gas to Energy Projects, Richmond.
- [29] SCS Engineers, (2010). Design of Landfill Gas Systems, Technical Training, California.
- [30] Kim, K., (2006). "The Emission of Major Aromatic Voc as Landfill Gas From Urban Landfill Sites in Korea", *Environmental Monitoring and Assessment*, 118:407-422.

- [31] Sel, İ., Çetindemir, M. ve, Arıkan, O.A., (2012). “Düzenli Depolama Sahası Depo Gazından Elektrik Üretimi: İzaydaş Projesi”, 12. Uluslararası Yanma Sempozyumu, 24-26 Mayıs 2012, Kocaeli.
- [32] Peters, A., (2010). Concise Chemical Thermochemistry, Taylor & Francis Group, First Edition, Florida.
- [33] Caribbean Renewable Energy Development Programme, (2009). Landfill Gas Technology Brief, Guyana.
- [34] UNEP Division of Technology, (2008). Energy Technology Fact Sheet - Cogeneration, London.
- [35] EPDK, Odayeri Çöp Biyogazı Tesisi GM6, GM14, GM15 Kabul Tutanağı, 21 Aralık 2011, İstanbul.
- [36] Palmer Development Group, (2004). Methane Emission Reduction Opportunities in Twelve South African Cities: Turning a Liability into a Resource, Final Report, Johannesburg.
- [37] Matveev, Y., (2010). LFG Projects Development within the Methane-to-Market Program in Ukraine, Metahne to Markets Partnership, 2-5 Mart 2010, Kiev.
- [38] EPA, Clean Energy Strategies for Local Governments – Landfill Methane, http://www.epa.gov/statelocalclimate/documents/pdf/7.4_landfill_methane_utilization.pdf, 20 Nisan 2012
- [39] SCS Engineers, (1997). Comparative Analysis of Landfill Gas Utilization Technologies, Northeast Regional Biomass Program Mart 2010, Virginia.
- [40] EPA, LFG Energy Projects, <http://www.epa.gov/lmop/faq/lfg.html#10>, 12 Mayıs 2012
- [41] EPA, Reducing Acid Rain, <http://www.epa.gov/region1/eco/acidrain/reducing.html>, 15 Mayıs 2012
- [42] Energy Information Administration, (2003). Voluntary Reporting of Greenhouse Gases, Washington.
- [43] EPA, (2009). Landfill Gas Modeling , http://www.epa.gov/lmop/documents/pdfs/pdh_chapter2.pdf, 24 Ekim 2011.
- [44] Scharff, H., Jacobs, J., (2006). “Applying Guidance for Methane Emission Estimation for Landfills”, Waste Management, 26:417-429.
- [45] EPA, (2005). First-Order Kinetic Gas Generation Model Parameters for Wet Landfills, R-05/72, Florida.
- [46] Kumar, S., Gaikwad. A.V. ve Shekdar, P.S., (2004). “Estimation Method for National Methane Emission from Solid Waste Landfills”, Atmospheric Environment, 38:3481-3487.
- [47] OonKAY, (2010). Literature Review : Methane From Landfills - Methods to Quantify Generation, Oxidation and Emission, Netherlands.

- [48] Visvanathan, C., Landfill Management in Asia- Notions About Future Approaches to Approprtiate and Sustainable Solutions, <http://www.swlf.ait.ac.th/UpdData/International/landfill%20management%20in%20asia.pdf>, 23 Mayıs 2012.
- [49] Thompson, S., (2009). "Building a Better Methane Generation Model: Validating Models with Methane Recovery Rates from 35 Canadian Landfills", Waste Management, 29:2085-2091.
- [50] Purwanta, W., (2007). "Landfill Gas for Energy : Its Status and Prospect in Indonesia", Proceedings of Internation Sysmposium on EcoTopia Science 2007, Nagoya.
- [51] Kamalan, H., vd., (2011). "A Review on Available Landfill Gas Models", Journal of Environmental Science and Technology, 4(2):79-92.
- [52] Conestoga-Rovers & Associates, (2009). Understanding the Landfill Gas Resource and Potential Applications, Richmond.
- [53] Scharf, H. ve Jacobs, J., Methods to Ascertain Methane Emission of Landfills, [http://www.afvalzorg.nl/Libraries/Publications Methane emissions/Paper m methods to ascertain methane emission.sflb.ashx](http://www.afvalzorg.nl/Libraries/Publications%20Methane%20emissions/Paper%20methods%20to%20ascertain%20methane%20emission.sflb.ashx), 17 Şubat 2012.
- [54] Corcoran, M., Bogner, J. ve Spokas K., (2012). "A Process-Based Annual Inventory Model for Site-Specific Landfill Methane Emissions Inclusive of Seasonal Metahne Oxidation", LMOP Conference 17-19 Ocak 2012, Chicago.
- [55] EPA, Methane Emissions from Landfills, <http://www.epa.gov/lmop/basic-info/index.html#a02>, 23 Mayıs 2012
- [56] Stege, A., User's Manual Colombia Landfill Gas Model, [http://www.epa.gov/lmop/documents/pdfs/UsersManualCentralAmerica LF G model final English REV1.pdf](http://www.epa.gov/lmop/documents/pdfs/UsersManualCentralAmerica_LF_G_model_final_English_REV1.pdf), 14 Aralık 2011
- [57] Environmental Agency, (2004). Guidance on the Management of Landfill Gas, Landfill Directive, Bristol.
- [58] GasSIM, GasSIM 2.5 Technical Information, [http://www.gassim.co.uk/Technical Information.html](http://www.gassim.co.uk/Technical%20Information.html), 13 Mart 2012.
- [59] Natural Resources Canada, RETScreen Landfill Gas Tool, http://www.retscreen.net/eng/tools_landfill_gas.php., 28 Haziran 2012
- [60] European Commision, Environment and Sustainable Development - Fifth Framework Programme, http://ec.europa.eu/archives/index_en.htm, 20 Mart 2011 .
- [61] Oil and Gas Institute, (2009). "Mielec Landfill Site Pre-Feasibility Study", Methane to Market Kasım 2009, Krakow.
- [62] Haase Energietechnik A.G., (2011). IZAYDAS Landfill Gas to Energy Project Gas Survey and Assessment Report, Feasibility Report, İzmit.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Hamdi MURAT ÇETİNDİR
Doğum Tarihi ve Yeri : 17.10.1984 / EDİRNE
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : muratcetindemir@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Çevre Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2012
Lisans	Çevre Mühendisliği	İstanbul Teknik Üniversitesi	2008
Lise	Fen Bilimleri	Kağıthane Anadolu Lisesi	2003

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2009 -	Ortadoğu Enerji A.Ş.	Çevre Mühendisi