



T.C.
SIVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEPO GAZINDAN ENERJİ ÜRETİMİ VE BİR ÖRNEK
UYGULAMA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Başak YILDIRIM

(201292101140)

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi İlknur ŞENTÜRK

SIVAS
MAYIS 2020

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.



Bütün hakları saklıdır.
Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Başak YILDIRIM, 2020

ETİK

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir farklılık yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

5.05.2020

Başak YILDIRIM



TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca bana güler yüzü ve samimiyetiyle bilgi ve desteğini esirgemeyen, değerli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi İlknur ŞENTÜRK' e teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Çalıőmalarımın yürütölmesi esnasında bilgi ve yardımlarını esirgemeyen Arő. Gör. Cihangir KALE'ye teőekkürlerimi sunarım.

Bu tezi tüm eğitim-öğretim çalıőmalarımda beni destekleyen babam Türkay YILDIRIM'a, annem Gülay YILDIRIM'a ve ağabeyim Buğra YILDIRIM'a ithaf ediyorum.

ÖZET

DEPO GAZINDAN ENERJİ ÜRETİMİ VE BİR ÖRNEK UYGULAMA

Başak YILDIRIM

Yüksek Lisans Tezi

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İlknur ŞENTÜRK

2020, 103+ xv sayfa

Bu çalışmada; evsel atıktan enerji üretimi konusu ve Türkiye'deki mevcut durum incelenerek, aynı zamanda Sivas İli düzenli depolama sahasında faaliyette olan çöp gazından elektrik üretim tesisi LandGEM Modeli vasıtasıyla verimlilik açısından değerlendirilmiştir. Sivas İli için gelecek yıllara yönelik nüfus değişimi İller Bankası metodundan yararlanılarak tahmin edilmiştir. Bu tahmin sonuçlarına bakılarak gelecek yıllara yönelik oluşması öngörülen evsel katı atık miktarları hesaplanmıştır. Sivas İli katı atık kompozisyon verileri ile IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) metodolojisinden yararlanılarak metan üretim potansiyeli (L_0) hesaplanmış ve Sivas ilinin yağış miktarı vb. gibi meteorolojik verileri göz önüne alınarak metan üretim hızı (k) belirlenmiştir. Temin edilen veriler ile deponi gazı tahmin modeli olan LandGEM versiyon 3.02 Modeli çalıştırılarak; Sivas Seyfebeli düzensiz deponi ve Sivas düzenli deponi alanlarına yönelik deponi gazı ve metan miktarları elde edilmiştir. Bu sahalardan elde edilebilecek elektrik enerjisi potansiyelleri hesaplanmış ve tesis verileri ile karşılaştırılmıştır. Yararlanılan LandGEM Modeli vasıtasıyla gerçeğe yakın boyutta tahminler yapıldığı ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Evsel Atık, Çöp Gazı, Deponi Gazı Tahmin, LandGEM, Sivas

ABSTRACT

ENERGY GENERATION FROM LANDFILL GAS AND A SAMPLE APPLICATION

Başak YILDIRIM

Master's Thesis

Department of Environmental Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. İlknur ŞENTÜRK

2020, 103+ xv pages

In this study, energy generation from domestic waste and the current situation in Turkey were examined, and the electricity generation plant using landfill gas and operating in the sanitary landfill in Sivas province was also evaluated for efficiency through the LandGEM Model. The population change for future years in Sivas province was estimated using the İller Bankası method. Based on these estimation results, the amounts of domestic solid waste projected to be generated in future years were calculated. The methane production potential (L_0) was calculated by the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) methodology using the solid waste composition data in Sivas province and the methane production rate (k) was determined by considering the meteorological data of Sivas province such as the amount of precipitation, etc. The LandGEM version 3.02 Model, which is the landfill gas estimation model, was run with the obtained data, and the amounts of landfill gas and methane were obtained for the Sivas Seyfebeli open municipal solid waste (MSW) dump site and Sivas sanitary landfill. The electrical energy potentials that could be obtained from these sites were calculated and compared with the production data of the plant. It was revealed that realistic estimations were made through the LandGEM Model used.

Keywords: Domestic Waste, Landfill Gas, Landfill Gas Estimate, LandGEM, Sivas

İÇİNDEKİLER

ETİK.....	v
TEŞEKKÜR	vi
ÖZET.....	vii
ABSTRACT	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER DİZİNİ	xiii
KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. KATI ATIKLARDAN GAZ OLUŞUMU VE DEPONİ GAZI.....	3
2.1. Katı Atıklar.....	3
2.2. Düzenli Katı Atık Depolama Alanları.....	5
2.3. Düzenli Depolama Alanlarında Atıkların Anaerobik Ayrışması	8
2.3.1. Hidroliz.....	9
2.3.2. Asit oluşumu.....	9
2.3.3. Metan oluşumu	10
2.4. Deponi Gazı Bileşenleri ve Özellikleri.....	10
2.4.1. Deponi gazı oluşumu	13
2.4.2. Deponi gazı oluşma ve ayrışma evreleri.....	13
2.4.3. Deponi gazı oluşumunu etkileyen faktörler.....	18
2.4.4. Deponi gazı oluşumunun zamanla değişimi	25
2.4.5. Deponi gazının çevresel etkileri	26
2.4.6. Deponi gazının hareketi ve taşınım mekanizması	29
2.4.7. Deponi gazının toplanması ve kontrolü.....	30
2.5. Deponi Gazı Miktarının Hesaplanması	34
2.5.1. Test kuyuları metodu	34
2.5.2. Yaklaşık tahmin metodu	35
2.5.3. Substratların ayrışma denklemi ile hesaplama	35
2.5.4. Deponi gazı oluşumunun modellenmesi.....	36
3. DEPONİ GAZININ KULLANILMASI.....	40
3.1. Deponi Gazı Kullanım Seçenekleri	41
4. DEPONİ GAZINDAN ENERJİ ÜRETİLMESİ	45
4.1. Türkiye’de Deponi Gazından Enerji Üretimi	45
4.2. Deponi Gazı Kullanımının Ekonomik Yararları	48
4.3. Deponi Gazından Enerji Üretimi Örnek Uygulamaları.....	49
5. MATERYAL VE YÖNTEM.....	54
5.1. Sivas Düzenli Depolama Tesisinin Tanıtımı.....	54
5.2. Sivas Çöp Gazı Elektrik Üretim Tesisinin Tanıtımı	56
5.3. Sivas’ta Evsel Katı Atık Miktarı ve Bileşimi.....	62
5.4. Sivas Deponi Gazı Modelleme Çalışmasına Yönelik Değerlerin Hesaplanması	67
5.4.1. Nüfus Tahmini	67
5.4.2. Katı Atık Tahmini.....	71
5.4.3. Sivas vahşi depolama alanında ve Sivas düzenli depolama tesisinde depolanacak atık miktarları	72

6. BULGULAR	75
6.1. Oluşacak Metan Gazının LandGEM Modeli ile Tahmini	75
6.2. Deponi Gazının Enerji Potansiyeli	87
6.3. Deponi Gazından Elektrik Üretimi.....	88
7. TARTIŞMA VE SONUÇLAR	93
KAYNAKLAR	96
EKLER	102
Ek-1 Katı Atık Döküm Sahasının Genel Görünümü ve Boru Yerleşim Planı	102
ÖZGEÇMİŞ	103



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	Kentsel katı atıklar	4
Şekil 2.2	Düzenli bir depolama sahasının kesiti.....	6
Şekil 2.3	Model bir düzenli depolama alanı.....	7
Şekil 2.4	Organik maddelerin anaerobik ayrışma süreci.....	9
Şekil 2.5	Katı atıkların dekompozisyonu sonucu meydana gelen ürünler	13
Şekil 2.6	Deponi gazı bileşenleri ve metanın oluşma basamakları	15
Şekil 2.7	Depolama alanlarında gaz ve sızıntı suyu oluşumunu etkileyen faktörler.....	18
Şekil 2.8	Anaerobik ayrışma hızının sıcaklık ile ilişkisi	20
Şekil 2.9	Anaerobik Bir Filtrede pH'nın Rölatif CH ₄ Oluşum Hızı (R) Üzerine Etkisi. .	21
Şekil 2.10	Karbondioksitin kısmi basıncının bazı substratların ayrışma oranlarına etkisi	23
Şekil 2.11	Deponi gazı üretim hızı ile nem içeriği arasındaki ilişki	24
Şekil 2.12	Gaz miktarının zaman içerisindeki tipik değişimi.....	26
Şekil 2.13	Deponi alanlarında yatay gaz hareketi	29
Şekil 2.14	Deponi gazı toplanması için pasif gaz tahliye sistemleri.....	31
Şekil 2.15	Dikey aktif gaz toplama sisteminin etki çapları ve üstten görünüşü.....	32
Şekil 2.16	(a) Dikey Kuyularla Gaz Toplama ve Geri Kazanma Sistemi (b) Dikey aktif gaz toplama sistemi borusu	33
Şekil 2.17	Yatay gaz toplama sistemi kesiti.....	34
Şekil 3.1.	Deponi gazından enerji üretim sistemi.....	42
Şekil 4.1	Biyokütle kaynaklı lisanslı elektrik üretim santralleri.	48
Şekil 4.2	Odayeri deponi gazından enerji tesisi	49
Şekil 4.3	Kömürçüoda deponi gazından enerji üretim tesisi.....	50
Şekil 4.4	Mamak çöplüğü biyogaz santrali	51
Şekil 4.5	Ankara Çadırtepe deponi gazından enerji tesisi.....	51
Şekil 4.6	Sofulu Çöplüğü Biyogaz Santrali.....	52
Şekil 4.7	Hamitler çöplüğü deponi gazından enerji tesisi	53
Şekil 5.1	Sivas düzenli depolama tesisi konumu.....	55
Şekil 5.2	Sivas 1. kademe katı atık döküm sahası.....	55
Şekil 5.3	Sivas çöp gazı elektrik üretim tesisi.....	56
Şekil 5.4	Tesiste bulunan ölçüm istasyonları	57
Şekil 5.5	Tesiste kullanılan gaz ölçüm cihazı	57
Şekil 5.6	Clima Air 3 cihazı	58
Şekil 5.7	Tesiste kullanılan sülfür tankı ve ana hat.....	58
Şekil 5.8	Tesiste gaz soğutma amacıyla kullanılan Chiller sistemi.....	59
Şekil 5.9	Tesiste kullanılan gaz motorları ve gaz yakma bacası	60
Şekil 5.10	Tesiste kullanılan sifonlar	61
Şekil 5.11	Deponi gazını ölçüm istasyonlarına götüren boru sistemleri.....	61
Şekil 5.12	Tesiste kullanılan trafolar.....	61
Şekil 5.13	Deponi gazı ölçümlerinin yapıldığı kapaklar	62
Şekil 5.14	Tesiste üretilen elektriğin enterkonnekte sisteme iletimi.....	62
Şekil 6.1	Sivas Seyfebeli vahşi depolama sahası için LandGEM model sonuçları.....	78
Şekil 6.2	Sivas düzenli depolama tesisi 1. kademe için LandGEM model sonuçları.....	83
Şekil 6.3	Depolanmış atık miktarına karşı LandGEM modelinden hesaplanan enerji potansiyelleri.....	91
Şekil 6.4	LandGEM Modeline göre hesaplanan deponi gazından üretilen elektriğin yıllara göre dağılımı.....	92

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1	Deponi gazı içeriğindeki bazı eser bileşenler ve derişimleri	11
Çizelge 2.2	Deponi gazı bileşenlerinin hacimsel oranları.	11
Çizelge 2.3	Gaz oluşum aşamaları ve yaklaşık süreleri.....	14
Çizelge 2.4	Bir deponi sahasının kapatılmasını takiben geçen ilk 48 ay boyunca gözlemlenen gazların yüzdesel dağılımı	15
Çizelge 2.5	Deponi alanında gaz oluşumunu etkileyecek değişkenler	18
Çizelge 2.6	Organik maddelerin ayrışabilirlik seviyeleri	25
Çizelge 2.7	AP-42 ve CAA parametreleri	39
Çizelge 4.1	Türkiye geneli lisanslı elektrik üretiminin kaynak bazında dağılımı	45
Çizelge 4.2	Türkiye'deki biyokütle enerji santralleri	46
Çizelge 5.1	Sivas İlinde 2017 yılında toplanan belediye atıkları).	64
Çizelge 5.2	Yıllara göre Sivas İlinde toplanan belediye atık miktarları.	64
Çizelge 5.3	Sivas ili katı atık karakterizasyonu 2017, 2018, 2019 yaz dönemi sonuçları	65
Çizelge 5.4	Sivas ili katı atık karakterizasyonu 2017, 2018, 2019 kış dönemi sonuçları	66
Çizelge 5.5	Sivas ili katı atık karakterizasyonu	66
Çizelge 5.6	Sivas Merkez ilçesinin geçmiş nüfus verileri	67
Çizelge 5.7	Sivas Merkez ilçesi için hesaplanan geçmiş ve gelecek yıllara ait nüfus verileri	70
Çizelge 5.8	Sivas Merkez ilçesinde 1999-2013 yılları arasında üretilecek tahmini katı atık miktarları	71
Çizelge 5.9	Sivas Merkez ilçesinde 2014-2029 yılları arasında üretilecek tahmini katı atık miktarları	72
Çizelge 5.10	1999-2013 yılları arasında Sivas Seyfebeli vahşi depolama alanında depolanacak tahmini katı atık miktarları.....	73
Çizelge 5.11	2014-2029 yılları arasında Sivas düzenli deponi alanında depolanacak tahmini katı atık miktarları.....	73
Çizelge 6.1	Sivas Seyfebeli vahşi depolama sahası için LandGEM model sonuçları	80
Çizelge 6.2	Sivas Seyfebeli vahşi depolama için model sonuçlarının özeti	83
Çizelge 6.3	Sivas düzenli depolama tesisi 1. kademe için LandGEM model sonuçları	84
Çizelge 6.4	Sivas DDT 1. kademe için model sonuçlarının özeti	87
Çizelge 6.5	Gaz motorlarına ait teknik özellikler	89
Çizelge 6.6	LandGEM modeline göre enerji potansiyelleri ve tesis verilerinin karşılaştırılması	91

SİMGELER DİZİNİ

$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
$(\text{CH}_3)_2\text{S}$	Dimetil sülfid
CH_4	Metan
CO	Karbonmonoksit
CO_2	Karbondioksit
Ç	Çoğalma katsayısı
Ç_{ort}	Çoğalma katsayılarının aritmetik ortalaması
DOC	Parçalanabilir organik karbon
DOC_f	Parçalanabilir organik karbon fraksiyonu
E_{el}	Elektrik üretim potansiyeli
F	Hacimce metan fraksiyonu
H_2	Hidrojen
H_2O	Su
H_2S	Hidrojen sülfür
i	1 yıllık zaman artışı
J	0.1 yıllık zaman artışı
k	Metan üretim hızı
kkal	Kilokalori
kg	Kilogram
kW	Kilowatt
kWs	Kilowatt saat
L_0	Metan oluşum potansiyeli
LHV_{dg}	Deponi gazının enerji eşdeğeri
m^3	Metreküp
MCF	Düzenli depolama alanları için düzeltme faktörü
m_{dg}	Toplam deponi gazı debisi
Mg	Milyon gram
M_i	i. yıldaki depolanan katı atık miktarı
MW	Megawatt
MWe	Megawatt elektrik
MWs	Megawatt saat
mV	Milivolt

n	Hesaplama yılı
n_{el}	Gaz motorunun elektriksel verimliliği
N₂	Azot
NH₃	Amonyak
NH₄	Amonyum
N_{gelecek}	Hesaplanacak gelecekteki nüfus
N_i	İlk nüfus değeri
N_{son}	Son nüfus değeri
O	Oksijen
ppb	Milyarda bir
ppm	Milyonda bir
R	Gaz toplama verimliliği
%	Yüzde

KISALTMALAR DİZİNİ

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AP-42	Hava kirletici faktörleri
CAA	Temiz hava yasası
DDT	Düzenli depolama tesisi
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
HAPs	Tehlikeli hava kirleticiler
IPCC	Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli
KOİ	Kimyasal Oksijen İhtiyacı
LandGEM	Depolama Sahası Gazı Emisyonları Modeli
LEL	Alt tutuşma sınırı
LFG	Deponi gazı
NMOC	Metan harici organik bileşikler
OECD	Ekonomik İş Birliği ve Kalkınma Örgütü
TUİK	Türkiye İstatistik Kurumu
UEL	Üst tutuşma sınırı
UNEP	Birleşmiş Milletler Çevre Programı
UOB	Uçucu organik bileşikler
USEPA	Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı
YEKDEM	Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması

1. GİRİŞ

Günümüzde kentleşme, teknolojik gelişmeler, tüketim ihtiyaçlarının değişikliği vb. etkenler nedeniyle doğaya bırakılan atık miktarı ve türü giderek artmaktadır. Gelişen teknolojiyle birlikte yaşam standartlarının yükselmesi ve kentleşmenin çevresel yönden sebep olduğu en önemli sorunlardan biri, hepimizin evinden her gün çıkan çeşitli içeriklerde katı atıklardır. Yaşamsal faaliyetlerimizin doğal sonucu olarak ortaya çıkan, türü ve miktarı çeşitli sebeplerle giderek artan bu katı atıkların güvenli bir biçimde, çevreye zarar vermeden ortadan kaldırılması sürdürülebilir kalkınma açısından da oldukça önemli bir konudur (Coşkuner, 2015).

Katı atık yönetimi, (katı atıkların oluşumundan uygun bir biçimde yok edilmesine kadar devam eden süreç) göz ardı edilemeyen bir çevre sorunudur. Fakat depo sahalarında meydana gelen deponi gazının; çevre ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkileri göz önüne alındığında asıl sıkıntının burada olduğu görülmektedir. Deponi gazı, depolama alanlarında katı atık içerisindeki organik içeriğin anaerobik ayrışması sonucu ortaya çıkan; metan, karbondioksit ve çok sayıda uçucu organik bileşikten meydana gelen bir gaz karışımıdır. Deponi gazı potansiyel sağlık tehditlerinin yanı sıra; yangınlar ve patlamalara, bitki örtüsü hasarına, hoş olmayan kokulara, hava kirliliğine ve küresel ısınmaya sebep olduğundan çevresel bir problem olarak değerlendirilmektedir (Atmaca, 2015).

Katı atık depolama alanlarında oluşan deponi gazlarından metan gazı (CH₄) ve karbondioksit (CO₂) küresel ısınmaya sebep olan en önemli sera gazlarıdır. Sera gazları küresel iklim değişiklikleri meydana getirmekle birlikte; hava kirliliği ve istenmeyen kötü kokulara sebep olmaktadır. Coşkuner'e (2015) göre karbondioksitin atmosferdeki ömrü yaklaşık 100 yıl civarında iken, metanınki ise 10 yıl civarındadır. Metan; dünyadaki sera gazlarının atmosferdeki miktarının yaklaşık %16' sına denk gelmektedir. Küresel ısınmada karbondioksite oranla metanın 25 kat daha etkili olmasından ötürü, metan gazı miktarının azaltılması çevre için büyük önem arz etmektedir (Kankılıç ve Topal, 2015).

Dolayısıyla, oluşan deponi gazının olumsuz etkilerini mümkün olan en asgari seviyeye düşürmek gerekmektedir. Bu amaçla dünyada kullanılan çeşitli yöntemler

arasında en tesirli olanı ekonomik boyutu da düşünülduğünde; şüphesiz deponi gazının yakıt olarak değerlendirilmesi ve deponi gazından enerji üretilmesidir (Saltabaş ve Yalçın, 2004).

Metan gazının enerji üretiminde kullanılmasının; diğer fosil yakıtların tüketilmesini önleyerek sera gazlarının yoğunluğunu azaltmasının yanında, deponi alanlarında oluşan koku probleminin giderilmesi ve yine deponi alanından çıkan gazların bitkilere zarar vermesinin önlenmesi ve belli oranlarda metanın havayla bileşiminden kaynaklanan patlama riskinin azaltılması gibi faydaları vardır.

Deponi gazının içerdiği yüksek enerji potansiyeli, son yıllarda bu gazdan enerji üretilmesi ile ilgili çalışmaları arttırmıştır. Dünya’ da deponi gazından elektrik enerjisi üreten birçok tesis bulunmaktadır. EPA’nın (Environmental Protection Agency) yaptığı araştırmalarda, yalnızca ABD’ de 2007 yılı itibariyle 450 tane enerji tesisinden 1380 MW elektrik üretildiği belirlenmiştir. Bunlara ilaveten 540 tane daha enerji tesisinin yapılması planlanmakta ve bunlarda da 1280 MW elektrik üretim potansiyeli bulunmaktadır. Deponi gazından elektrik üretimi Avrupa ülkelerinde de oldukça yaygın bir uygulamadır. Örneğin; İsveç’te üç yüz bin evin elektrik gereksinimi deponi gazı santrallerinden sağlanırken, yaklaşık bir milyon evin ısıtması da yine bu santrallerden karşılanmaktadır. Dokuz buçuk milyon nüfuslu İsveç’te ülke genelinde meydana getirilen çöpten daha yüksek kapasiteli santraller bulunduğundan 2013 yılında mecburen Norveç’ten çöp ithal etmiştir.

Bu tez çalışmasında; evsel atıklardan enerji üretimi konusu ve Türkiye’deki mevcut durum incelenerek aynı zamanda Sivas İli düzenli depolama sahasında faaliyette olan deponi gazından enerji üretim tesisi LandGEM modeli ile verimlilik açısından değerlendirilecektir. Bu çalışmada temel hedef; yeni planlanacak olan deponi gazından enerji üretim tesislerinin daha verimli bir biçimde kurulmasına ve işletilmesine yön vermek için, çevre ve verimlilik açısından elde edilen deneyimlerden faydalanmalarını sağlamaktır. Çalışma sonuçlarının; evsel atıklardan elektrik enerjisi üretim teknolojisi yatırımlarına katkı sağlayacağı gibi temiz ve düzenli kentleşmeye de yardımcı olması beklenmektedir.

2. KATI ATIKLARDAN GAZ OLUŞUMU VE DEPONİ GAZI

2.1. Katı Atıklar

Atık olgusuna yönelik kaynaklarda birçok tanım bulunmakla birlikte gerek bilimsel yayınlarda gerekse hukuki düzenlemelerde atıklara yönelik çeşitli yaklaşımlar mevcuttur. Atık olgusu, en genel anlamda; kullanılıp atılan ve bu perspektifle bulunduğu alandan uzaklaştırılması istenen değersiz nesnelere (Kolukısa, 2013).

Atık terimi; 2872 sayılı Çevre Kanununda “Herhangi bir faaliyet sonucunda oluşan, çevreye atılan veya bırakılan her türlü madde” şeklinde tanımlanmaktadır (T.C. Resmi Gazete, 11 Ağustos, sayı: 18132).

Uluslararası kuruluşlar tarafından da atık kavramının çeşitli tanımları yapılmıştır. Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütüne (OECD) göre atık, yakın gelecekte ya da mevcut durumda ekonomik değeri olmayan ve bertarafı ya da arıtımı gerekli olan maddelerdir.

Katı atıklar ise atık türlerinin en önemli bölümünü oluşturup basitçe, kullanıcısı tarafından artık işe yaramayacağı düşüncesiyle atılan ve evsel, endüstriyel, ticari fonksiyonlar sonucunda oluşan ancak çevre, insan sağlığı ve diğer toplumsal faydaları göz önüne alınarak planlı bir şekilde uzaklaştırılması esas olan maddeler olarak tarif edilebilir (Kolukısa, 2013).

Katı atıkların fiziksel, kimyasal ve teknik özellikleri açısından birçok çeşidi vardır. Katı atıkları bu kompleks çeşitlilikleri arasında tek bir çatı altında toplamak oldukça zor olmaktadır. Bundan dolayı katı atıkları; ortak özelliklerine göre farklı gruplara ayırıp bir sınıflandırma yapmak gerekir. Bu sınıflandırma sonucu katı atıklar; kaynaklarına göre katı atıklar ile birleşimleri ve özelliklerine göre katı atıklar olmak üzere iki grupta incelenmektedir. Tehlikeli atıklar, evsel atıklar, tıbbi atıklar, endüstriyel özellikli atıklar, evsel özellikli endüstriyel atıklar, tarımsal ve hayvansal atıklar kaynaklarına göre katı atık gruplarıdır. Birleşim ve özelliklerine göre ise katı atıkları; inert katı atıklar ve organik katı atıklar olarak iki alt ana başlık altında inceleyebiliriz. Organik katı atıklar su ve kuru maddeden meydana gelir. Kuru madde ise yanabilen kısım ve külden (inert madde) oluşmaktadır. Biyokimyasal olarak yanabilme ve ayrışabilme özelliklerine sahip olan organik katı atıklara örnek olarak;

hayvansal ve bitkisel atıklar ile kağıt, tekstil atıkları örnek gösterilebilir. Buna ek olarak; deri, lastik, kemik, plastik gibi organik atıkların ise biyokimyasal ayrışması neredeyse imkânsız ya da çok yavaştır (Kolukısa, 2013).

İnert atıklar ise; fiziksel veya kimyasal tepkimeye girmeyen, biyolojik bozulmaya maruz kalmayan, temas halinde olduğu maddeleri çevreye ve insan hayatına olumsuz etki bırakacak bir biçimde etkilemeyen, yüzey ve yeraltı suyu kirliliği tehlikesi oluşturmayan, çözünme ve yanma olaylarına maruz kalmayan maddeler olarak sınıflandırılır (T.C. Resmi Gazete, 12 Mayıs 2010, sayı: 27579).

Kentsel katı atıklar (Belediye atıkları) ise, ev ve iş yerlerinden gelen yönetiminden belediyenin mesul olduğu atıklar olarak tanımlanmaktadır.

Kentsel katı atıkların bileşimi aşağıda Şekil 2.1' de gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Kentsel katı atık bileşimi (Mohamed, 2017).

Şekil 2.1'de gösterilen atıklar kentsel katı atık kavramı içinde yer alırken; arıtma tesisi çamurları, atık elektrikli ve elektronik aletler, hurda araçlar, cihazlar, lastikler, inşaat, yıkıntı ve hafriyat atıkları ile özel işlem gerektiren atıklar ve hastane atıkları kentsel katı atık kavramı dışında yer alır (Mohamed, 2017).

Artan yaşam standartları ve ekonomik ilerleme sonucu kişi başına düşen katı atık üretim miktarının artmasıyla birlikte özellikle gelişmekte olan ülkelerde kentsel katı atıklar önemli bir problem boyutuna ulaşmıştır. Bu denli önemli bir problemin çevreye ve insan sağlığına zarar vermeden çözümünde ise katı atık yönetimi adı altında tanımlanan bir olgu ortaya atılmıştır. Bu olgu en genel anlamda, katı atıkların meydana gelmesinden çevreye ve insan sağlığına zarar vermeden giderilmesine

kadar devam eden süreçte en uygun çözümleri ortaya koyan bir prosestir (Yılmaz ve Bozkurt, 2010).

Katı atıkların üretilmesinden nihai bertarafına kadar, insan ve çevre sağlığına zarar vermeden mevzuatlara uygun olarak uygulanacak prosesten; atık üreten kişiler, kuruluşlar ve yerel yöneticiler sorumludur. Türkiye’de katı atıkların evlerden, kurum ve kuruluşlardan alınması, işleme tesislerine taşınması ve bertaraf işlemleri görevi belediyelere verilmiştir. Bu etkinlikleri, bazı belediyeler kendileri yerine getirirken, bazıları ise özelleştirmeler kapsamında ihalelerle özel sektöre yaptırmaktadır (Kolukısa, 2013).

Entegre katı atık yönetimi ise, atık yönetiminde atığın doğaya verdiği zararı minimize etmek için bir sonraki hamle olup gittikçe önem kazanmaktadır. Entegre atık yönetimi atığın; kaynağında azaltılmasıyla beraber enerji ve doğal kaynak tasarrufu ile geri kazanım ve geri dönüşümünü amaçlayarak, farklı süreçlerde ekonomik boyutta değerlendirilmesini hedefler (Gezer ve Işıldar, 2016). Katı atık yönetimi uygulamalarında elde edilecek başarı, başta sorumlu buldukları bölgenin çevre ve ekonomisine devamında ise ülke çapında çevre ve ekonomiye yarar sağlayacaktır. Etkin bir katı atık yönetimi sayesinde hem sürdürülebilir bir kalkınma elde edilirken hem de doğal kaynakların sağlıklı bir biçimde korunması sağlanacaktır (Eren, 2010).

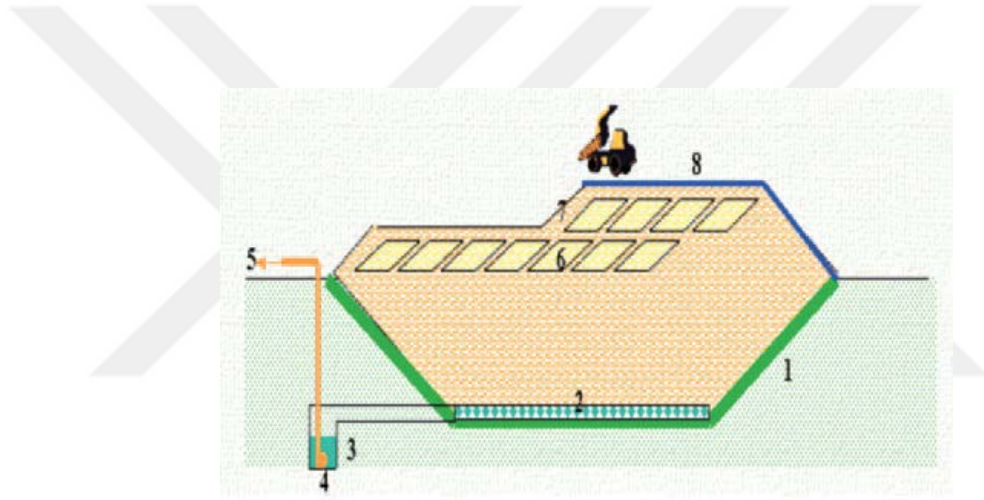
Üretilen atık miktarının azaltılması, atıkların geri kazanımı ve yine atıkların çevreye ve insan sağlığına zarar vermeden giderilmesi ilkeleri bütün dünyada olduğu gibi Türkiye’de de katı atıkların etkin yönetiminin olmazsa olmaz unsurlarındandır. Geçmişte sadece vahşi depolama ile giderilen belediye atıkları için; değişen dünya şartları neticesinde daha etkili bertaraf yöntemleri geliştirilmiş ve uygulamaya konulmuştur. Bu uygulamalar ise; gazlaştırma, yakma, termal dönüşüm teknolojileri, düzenli depolama, geri kazanma, piroliz, anaerobik kompostlaştırma, aerobik kompostlaştırma ve biyolojik dönüşüm teknolojileridir (Işık, 2014).

2.2. Düzenli Katı Atık Depolama Alanları

Dünyada geçmişten günümüze dek en yaygın kullanılan katı atık bertaraf yöntemi atıkların depolama alanlarında biriktirilmesidir. Fakat arazide biriktirilen bu atıkların plansız depolanması; gaz ve sızıntı suyu oluşumu ile çevre açısından olumsuz etkiler

doğurmaktadır. Çevre ve insan sağlığını olumsuz yönde etkileyen bu depolama şekli vahşi depolama olarak isimlendirilmektedir (Solak, 2015).

Vahşi depolamanın olumsuz sonuçlarını önlemek amacıyla II. Dünya savaşından sonra ortaya çıkan düzenli depolama kavramı ise; katı atıkların, çevre ve insan sağlığını korumak amacıyla çevresi tamamen izole edilerek sızdırmazlığı sağlanan arazilere dökülüp, sıkıştırılarak hacmi azaltılıp, üzerlerinin günlük örtü tabakası ile örtülüp, mühendislik metotlarına uygun bir şekilde doğal biyolojik reaktör haline getirilmesidir. Düzenli depolamada asıl önemli olan oluşan sızıntı suyu ve deponi gazının çevreye zarar vermeden uzaklaştırılmasıdır. Şekil 2.2’de düzenli bir depolama sahasının kesiti görülmektedir.



Şekil 2.2 Düzenli bir depolama sahasının kesiti (Cellatoğlu vd.; 2010).

Şekil 2.2’ de -1- rakamı ile belirtilen yeşil alanlardan da anlaşılacağı gibi düzenli depolama alanlarının tabanı ve dipte kalan yan bölgeler doğal ve sentetik gereçlerle bütünüyle izole edilmelidir. Bununla birlikte geçirimsizlik tabakası kil ve geomembranlarla sağlanarak sızıntı sularının toprağa karışması engellenmelidir. Tabanda aynı zamanda -2- rakamı ile gösterilen bölümde sızıntı sularının toplanarak birikimini sağlayan bir boru sistemi bulunmaktadır. Bu borular vasıtasıyla toplanan sızıntı suları -3- numaralı alanda gösterilen depoda biriktirilerek -4- numaradaki bir pompa vasıtasıyla düzenli deponiden -5- numaralı alana tasfiye edilir. Tasfiye edilen sızıntı suyu arıtılarak su kaynakları ve toprak kirliliğinin önlenmesi amaçlanır. -6-ve -7- nolu kısımda düzenli deponi alanlarında günlük çöp hücreleri bulunmaktadır. Bu günlük hücrelerde; her gün günlük toplanan katı atıklar depolanarak -8- nolu kısımda

gösterildiği gibi üzerleri tabii toprak veya kompost gibi gereçlerle örtülerek sıkıştırılır. Buna günlük örtü tabakası denilir. Tüm depolama işlemi bittikten sonra sahanın bütün yüzeyine uygulanan son örtü katmanı ise genelde toprak ve/veya geomembran gereçlerin kullanımıyla ve üst üste birkaç tabakanın sıkıştırılmasıyla oluşur (Cellatoğlu vd.; 2010).

Düzenli deponilerin avantajları gelişigüzel depolamaya göre şöyle sıralanabilir;

- Düzenli katı atık deponi alanları vahşi depolama sonucu ortaya çıkan görüntü ve çevre kirliliğini engeller.
- Oluşan sızıntı suları kontrollü bir biçimde uzaklaştırıldığından yer altı ve yüzey sularının kirlenmesi önlenir.
- Çöplerden oluşan metan ve karbondioksit gibi sera gazları kontrollü bir biçimde toplandığından hava kirliliğinin ve patlama riskinin önüne geçilir.
- Çeşitli haşereler için üreme ve barınma yeri olan çöpler düzenli depolamayla birlikte ortadan kalkar (Cellatoğlu vd.; 2010).

Şekil 2.3’de model bir düzenli depolama alanı gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Model bir düzenli depolama alanı (Atmaca, 2015).

Katı atıkların düzenli deponi alanlarında giderilmesi, piroliz ve kompostlaştırma gibi uygulamalara nazaran daha ekonomik olmakla birlikte vahşi depolama ile kıyaslandığında yüksek maliyet getirmektedir. Bu sorun düzenli depolama alanlarında bertaraf edilen katı atıklardan ekonomik fayda sağlamak amacıyla enerji

üretimi fikrini ortaya çıkarmıştır. Sonuçta katı atıkların çürümesi sonucu deponi gazı oluşmakta ve bu deponi gazından da enerji elde edilebilmektedir.

2.3. Düzenli Depolama Alanlarında Atıkların Anaerobik Ayrışması

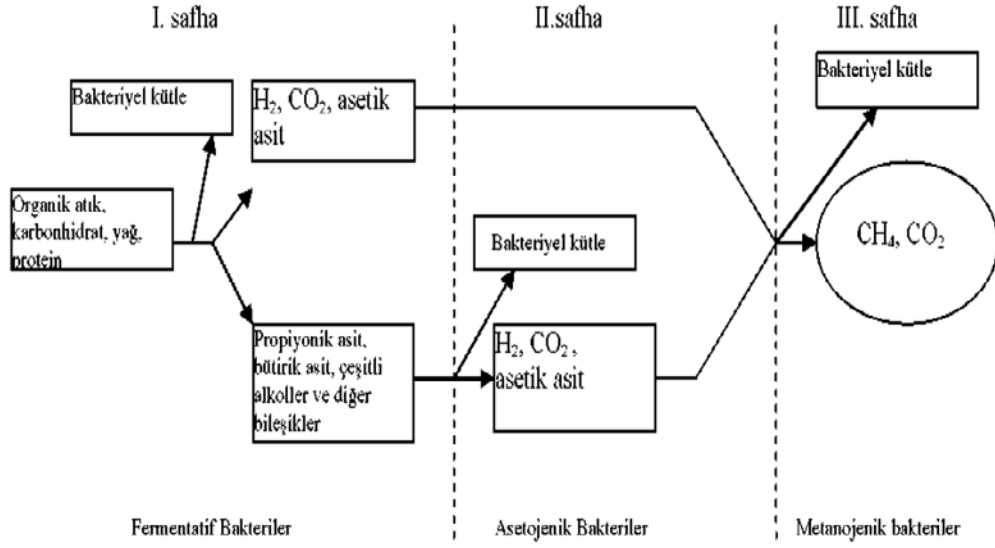
Düzenli deponi alanında biriktirilen katı atıklar fiziksel, kimyasal ve biyolojik prosesler gibi birtakım süreçlerle ayrışırlar. Kimyasal ve fiziksel süreçler; biyolojik etkinliklerde ihtiyaç duyulan nutrientlerin varlığını etkilediğinden bu süreçler birbirinden ayrı düşünülemez (Özcan, 2009).

Çöplerin ayrışmasında görev alan fiziksel süreçler; atığın su yardımıyla çökmesi, yerini değiştirmesi ve katı atıkların fiziksel olarak bozulmasıdır. Kimyasal süreçler ise; iyon değiştirme, hidroliz, desorpsiyon/sorpsiyon, çökme/çözünmedir. Bu kimyasal süreçler çöpün özelliğinin değişmesine neden olurken çöp bileşenlerinin daha fazla hareket yeteneği edinmesine de imkan verir. Fiziksel ve kimyasal süreçler şüphesiz deponi alanlarında atığın ayrışmasına yardımcı olurlar ancak biyolojik süreçler anaerobik ayrışmada en önemli prosestir. Çünkü metan biyolojik süreçler vasıtasıyla meydana gelmektedir (Özcan, 2009).

Biyolojik süreçler, katı atığın depolama alanına bırakılmasını takiben içerdiği organik maddelerin biyolojik olarak değişim ve dönüşüme uğradığı süreçlerdir. Bu süreçler hidroliz, asit oluşumu ve metan oluşumudur. Çöpler depolama alanlarına ilk olarak bırakıldığında ortamda oksijen bulunur dolayısı ile aerobik ayrışma gerçekleşir. Aerobik ayrışma sonucunda karbondioksit ve su oluşur. Ayrıca aerobik ayrışma sırasında koku açığa çıkmaktadır. Bu kokunun sebebi ise ortamda organik esterlerin yer almasıdır. Aerobik ayrışma süreci ortamın ihtiva ettiği oksijen bitinceye dek sürer (Özcan, 2009).

Bu aşamadan sonra katı atık deponi alanları; arıtma tesislerinde yer alan anaerobik çürütücüler misali biyokimyasal reaktör görevini üstlenirler. Anaerobik çürüme işlemi; organik atıkların oksijensiz bir platformda biyokimyasal reaksiyonlarla ayrıştırılmasıdır (Sezgin vd., 2003).

Organik maddelerin anaerobik ayrışma süreci Şekil 2.4'de verilmiştir.



Şekil 2.4 Organik maddelerin anaerobik ayrışma süreci (Öbekcan, 2014).

2.3.1. Hidroliz

Kademeli bir proses olan anaerobik parçalanmanın ana adımlarından biri hidrolizdir.



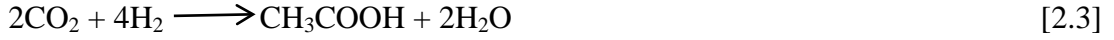
Denklem [2.1]'den de anlaşılacağı gibi en basit anlamda hidroliz, polimerlerin monomere dönüştürülmesi işlemidir. Kompleks polimerlerin, mikroorganizmaların salgıladıkları hücre dışı enzimler vasıtasıyla yapı taşlarına parçalanması ve hücre zarından geçebilecek boyutlara ulaştırılması işlemi Hidroliz olarak tanımlanmaktadır. Hücre zarından geçebilecek boyutlara ulaştırılan bu moleküller hücre içerisinde enerji elde etmek ve hücresel bileşenler oluşturmak için kullanılırlar (Öbekcan, 2014).

2.3.2. Asit oluşumu

Hidroliz aşamasında; daha basit yapıya ve daha çözünbilir duruma gelen organik maddeler bu aşamada, anaerobik bakteriler tarafından karbondioksit, hidrojen, asetik asit ve uçucu yağ asitleri gibi daha da küçük yapılara dönüştürülürler (Kankılıç ve Topal, 2015). Hidroliz sonucu oluşan uçucu yağ asitleri bu aşamada araya giren bir grup asetojenik (asit üreten) bakteri tarafından asetik asit ve hidrojene dönüştürülür.



Başka bir grup asetojenik bakteri de yine hidroliz sonucu açığa çıkan karbondioksit ve hidrojeni bu aşamada yukarıdaki dönüşüme oranla daha az olan miktarlarda asetik asite dönüştürmektedir (Öbekcan, 2014).



2.3.3. Metan oluşumu

Anaerobik ayrışmanın son bölümünde metanojenik (metan üreten) bakteriler araya girmektedir. Bu safhada bir grup metanojenik bakteri karbondioksit ve hidrojeni metan ve suya dönüştürürler.



Başka bir kısım bakteriler ise asit oluşumu fazında ortaya çıkan asetik asidi yukarıdaki üretime oranla daha fazla olan miktarlarda (yaklaşık %70) metana dönüştürerek, metan ve karbondioksit açığa çıkarırlar.



2.4. Deponi Gazı Bileşenleri ve Özellikleri

Deponi gazı; 170'den fazla bileşeni içeriğinde bulundurmakla birlikte, gazın büyük çoğunluğu CH_4 ve CO_2 'den meydana gelmektedir. Başlıca fazla oranlarda bulunun gazlarla az oranlarda bulunan eser gazlardan meydana gelen deponi gazında; eser gazlar az oranlarda bulunsalar dahi toksik etki yaratabilirler. Dolayısıyla çevre ve insan sağlığı yönünden ciddi sorunlar ortaya çıkarabilecek bu deponi gazının kontrolü ve değerlendirilmesi oldukça önemlidir (Özçakıl, 2001).

Deponi alanlarında bulunan iz bileşenler ya saha içerisinde meydana gelen abiyotik ve biyotik tepkimelerle oluşturulur ya da sahalara atıklarla girer. Deponi gazı içeriğindeki bazı iz bileşenler ve derişimleri Çizelge 2.1'de verilmiştir. Uçucu organik bileşikler (UOB), deponi gazında bulunan iz bileşiklerin önemli bir kısmını oluşturur. UOB derişimi, deponi sahalarna tehlikeli atıkların dökülmesinin engellenmesiyle birlikte önemli ölçüde azalır (Özçakıl, 2001).

Çizelge 2.1 Deponi gazı içeriğindeki bazı eser bileşenler ve derişimleri (Bilgili, 2002).

Bileşen	Derişim (ppb)
Trikloroetan	250-13000
Propil benzen	1000-25000
Bütil benzen	1000-25000
Sikloheksan	10-3200
Dikloroflorometan	500-24000
Etilbenzen	100-61000
Klorobenzen	100-11000
Sülfiddioksit	10-5000
Metanetiöl	100-44000

Deponi sahaları NH_4 , NH_3 , H_2 , CH_4 , CO , CO_2 , N_2 , O_2 , su buharı, parafin hidrokarbonlar, aromatik-siklik hidrokarbon gazlarını içermektedir. Havasız ortamda evsel katı atıkların bozulması sonucu elde edilen başlıca gazlar karbondioksit ve metandır. Deponi gazında bulunan bu gazların hacimsel oranları aşağıda Çizelge 2.2’de verilmiştir (Özçakıl, 2001).

Çizelge 2.2 Deponi gazı bileşenlerinin hacimsel oranları (Özçakıl, 2001; Bilgili, 2002).

Bileşen	Kimyasal Formül	Hacimsel Yüzde
Metan	CH_4	45-60 (55)
Karbondioksit	CO_2	35-45
Azot	N_2	2-5
Oksijen	O_2	0.1-1.0
Hidrojen sülfür	H_2S	0-1.0
Amonyak	NH_4	0.1-1.0
Hidrojen	H_2	0-0.2
Karbonmonoksit	CO	0-0.2
Su buharı (25°C’de)	-	~ 3.0
Parafin hidrokarbonlar	-	~ 0.1
Aromatik-siklik hidrokarbonlar	-	~ 0.2
İz bileşenler	-	0.01-0.6

Renksiz ve kokusuz bir hidrokarbon olan metan (CH_4), deponi gazında hacimce ortalama olarak %55 oranında bulunur. Yoğunluğu deponi alanlarındaki sıcaklığa bağlı olarak $0.6-0.7 \text{ kg/m}^3$ arasında değişen metan gazı; bu özelliğiyle havanın yoğunluğunun aşağı yukarı yarısına denk geldiğinden kolaylıkla deponi alanı dışına

sızabilir. Gaz toplama yöntemleriyle alıkonulamayan ve önemli bir bölümü atmosfere yayılan metanın havadaki derişimi % 5-15 olduğunda ve O₂ mevcudiyetinde patlayıcı özellik taşır. Ortamda %5 oranında metan varlığı alt tutuşma sınırı (LEL) olarak ifade edilir. LEL sınırından daha yüksek veya eşit derişimler deponi alanı yakınındaki yapılar, kanallar ve binalar için risklidir. Bu ciddi sınırlara erişen metan derişimleri teoride, atık içeriğindeki oksijen tümüyle tüketilmiş olduğundan deponi alanlarında patlamalara sebebiyet vermezken; pratikte deponi alanlarında sınırlı seviyede oksijen olduğundan patlama tehlikesi yaratabilir. Metanın az ancak buna rağmen önemli bir bölümü ise toprağına doğru sızarak deponi alanının içinde veya etrafındaki boşluklarda birikir. Ayrıca kızılötesi ışınları tutmada oldukça yetenekli olan metanın küresel ısınmadaki rolü de göz ardı edilmemelidir. Bir metan molekölü bir karbondioksit molekölünün tuttuğı kızılötesi ışıklardan 23 kat daha fazlasını tutabilmektedir (Bilgili, 2002).

Deponi gazlarının diğer önemli kısmını oluşturan karbondioksit ise, zehirli ya da patlayıcı yapıda olmamasının yanı sıra atmosferde derişiminin büyük ölçüde ve giderek artması çevresel açıdan önemini artırmaktadır. Karbondioksit de tıpkı metan gibi küresel ısınmaya neden olan sera gazlarındanır. Öte yandan karbondioksit suda çözünebildiğinden su ile teması durumunda büyük bir bölümü sıvı faza girerek sızıntı suyunun pH'sını düşürür. Dolayısıyla sızıntı suyunun sertliğı ve mineral madde içeriğı artar (Bilgili, 2002).

Deponi gazı bileşimi analizinde elde edilen O₂ ve N₂; gaz toplama tertibatındaki sızıntılardan ya da numune alma esnasındaki hava girdilerinden kaynaklanmaktadır. Biyokimyasal tepkimeler esnasında oksijene oldukça fazla ihtiyaç olduğundan hızlı bir biçimde tüketilir. Gaz fazında daimi bulunan su buharı sıcaklığın artmasına paralel olarak artmaktadır (Bilgili, 2002).

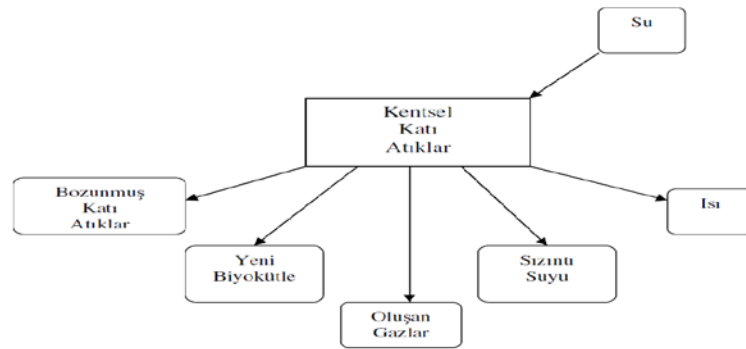
İnorganik ve organik sülfür bileşikleri deponi gazına tipik kokusunu verirken, deponi gazında yüksek konsantrasyonlarda bulunan en bariz sülfür bileşigi H₂S yani hidrojen sülfürdür. Bu duruma evsel atığın barındırmaması gereken ve içeriğinde yoğun kalsiyum sülfat bulunan hafriyat atıklarının mevcudiyeti neden olmaktadır. Hafriyat ve yıkıntı atıkları içerisinde jipsler ve kartonpiyerler bulunmaktadır. Bu maddeler yapısında ise sülfat bileşikleri içerir. Bu sülfat bileşikleri deponi sahalarında havasız ortamda ayrışmalar neticesinde sağlık ve koku problemlerine yol

açabilen H₂S gazını açığa çıkarmaktadır. Oluşan H₂S'in önemli bir bölümü sızıntı suyunda çözünerek uzaklaşırken bir bölümü de deponi gazıyla beraber taşınmaktadır (Sel, 2016).

Mevsim şartlarına, ülkelere ve hatta aynı ülkede farklı şehirlere göre farklı atık karakterizasyonu ile ilişkili olarak deponi gazındaki bileşenlerin özelliği, muhtevası ve derişimleri değişebilmektedir (Sel, 2016).

2.4.1. Deponi gazı oluşumu

Deponi gazı; katı atık deponi sahalarından kazanılan gazdır. Deponi sahaları, içerisinde belli oranda organik madde barındıran ve bu organik maddenin tümü ayrışana kadar kullanılan basit bir havasız kesikli reaktör gibi varsayılabilir (Sel, 2016). Deponi alanlarında meydana gelen evsel katı atıkların dekompozisyonu fiziksel, kimyasal ve biyolojik proseslerin birleşiminden oluşan karmaşık bir süreçtir. Bu süreç Bölüm 2.3' de ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Kimyasal, fiziksel ve biyolojik dekompozisyon sonucu meydana gelen ürünler Şekil 2.5'de gösterilmekle beraber biyolojik süreçler anaerobik ayrışmada en önemli aşamadır. Çünkü metan biyolojik süreçler vasıtasıyla meydana gelmektedir (Akpınar, 2006).



Şekil 2.5 Katı atıkların dekompozisyonu sonucu meydana gelen ürünler (Akpınar, 2006).

2.4.2. Deponi gazı oluşma ve ayrışma evreleri

Biyolojik bozunma sırasında metan gazı üretilmekte ve biyolojik bozunma aerobik ve anaerobik olarak ikiye ayrılmaktadır. Katı atıkların biyolojik dekompozisyonunun beş kademe de meydana geldiği düşünölmektedir (Akpınar, 2006).

Deponi sahalarının hacmine bağı olarak atıkların biriktirilmesi birkaç yıl devam eder. Ayrışma ve gaz oluşumu ise deponi sahaları kapatıldıktan 50 yıl sonra dahi sürebilir. Bu süreci Çizelge 2.3’de verilen 5 ana aşamada gruplandırmak mümkün olmakla beraber fazların yaklaşık sürelerine de aynı çizelgede değinilmiştir (Sel, 2016).

- I. Başlangıç (aerobik) fazı
- II. Geçiş (anoksik) fazı
- III. Kararsız metanojenik (fermantasyon-asit oluşum) fazı
- IV. Kararlı metanojenik faz
- V. Olgunluk fazı

Çizelge 2.3 Gaz oluşum aşamaları ve yaklaşık süreleri (Sel, 2016).

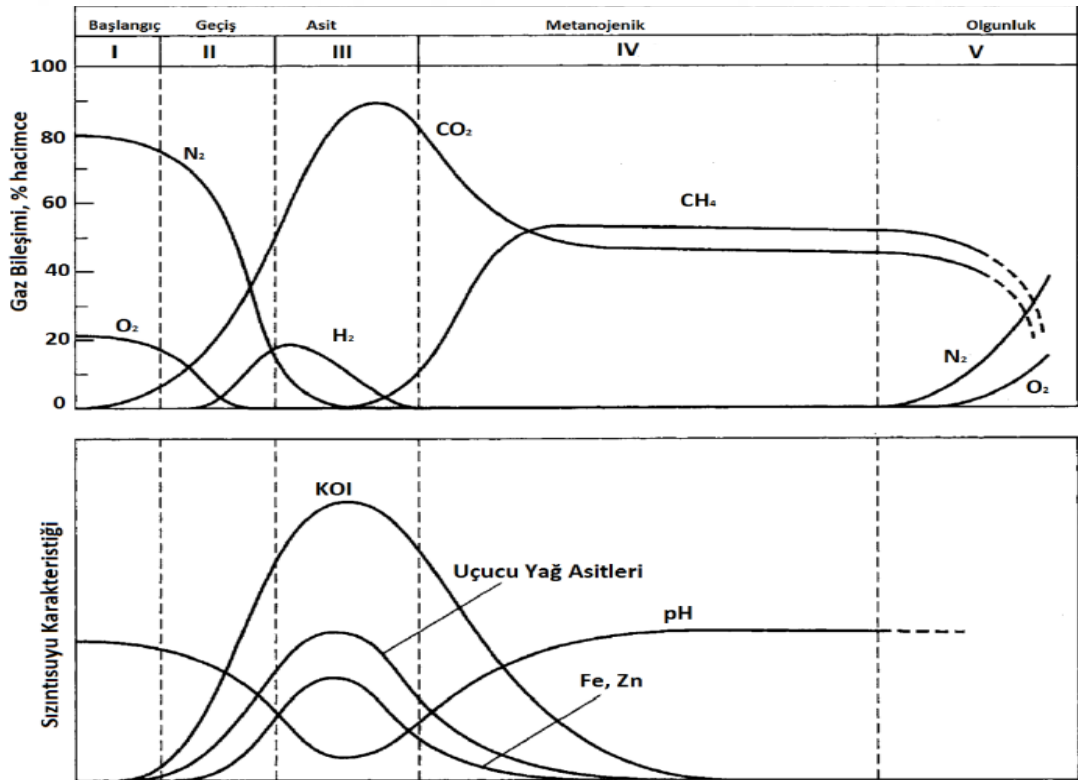
	Aşamalar	Yaklaşık Süreler
I.	Başlangıç fazı (aerobik)	Birkaç saat-bir hafta
II.	Geçiş fazı (anoksik)	1-6 ay
III.	Kararsız metanojenik faz (anaerobik)	3 ay-3 yıl
IV.	Kararlı metanojenik faz (anaerobik)	8-40 yıl
V.	Olgun metanojenik azalma fazı (anaerobik)	1-40 yıl

Çizelge 2.3’de verilen ayrışma fazları her zaman burada gösterildiği gibi sırayla gerçekleşmeyebilir. Kimi fazlar meydana gelmezken kimileri de aynı anda gerçekleşebilir. Buna ek olarak; bir veya iki safha çevresel şartlara göre baskın hal alabilir. Yine ek olarak aynı anda deponi alanının değişik bölgelerinde farklı süreçler, atıkların heterojen yapısına göre oluşabilir (Bilgili, 2002). Çizelge 2.4’de deponi sahasının kapatılmasını takiben geçen ilk 48 ay esnasında gözlemlenen gazların zamana bağı dağılımları yüzdesel olarak verilmiştir.

Çizelge 2.4 Bir deponi sahasının kapatılmasını takiben geçen ilk 48 ay boyunca gözlemlenen gazların yüzdesel dağılımı (Tchbonoglous vd., 1993).

Hücresinin kapatılmasını takiben geçen zaman (Ay)	Ortalama Hacimsel Yüzde		
	Metan	Karbondiyoksit	Azot
0-3	5	88	5,2
3-6	21	76	3,8
6-12	29	65	0,4
12-18	40	52	1,1
18-24	47	53	0,4
24-30	48	52	0,2
30-36	51	46	1,3
36-42	47	50	0,9
42-48	48	51	0,4

Şekil 2.6’da ve Çizelge 2.3’de düzenli deponi alanı içerisindeki deponi gazının en önemli bileşeni olan metanın oluşma basamakları ve bu basamakların yaklaşık süreleri verilmiştir. Bu bilgiler gereğince bir deponi sahasının toplamda ortalama ömrü (aktif ve pasif) 80 yıl kabul edilmektedir (Sel, 2016).



Şekil 2.6 Deponi gazı bileşenleri ve metanın oluşma basamakları (Sel, 2016).

I. Başlangıç (aerobik) fazı

Aerobik bozunma fazı olarak da adlandırılan ilk kademede ortamdaki gazların büyük bir kısmını atıkların içerisindeki boşluklarda yer alan oksijen ve azot gazı oluşturmaktadır. Dolayısıyla çöp deponi alanına atılan organik maddeler sahaya ilk serildiğinde aerobik ayrışmaya maruz kalırlar. Ayrışmayı gerçekteşiren aerobik ve anaerobik mikroorganizmalar ise başlıca atıkların üstüne serilen günlük toprak örtüsünden temin edilmekle birlikte, geri devrettirilen sızıntı suları ve atık su arıtma tesisi çamurları da diğer kaynaklardır (Sel, 2016; Özçakıl, 2001).

Deponi alanındaki oksijen oranı aerobik ayrışma için ihtiyaç duyulan oksijen oranından az olduğunda aerobik çürümeye ara verilecektir. Ancak sahanın üzeri kapatılana dek aerobik ayrışma devam eder (Mohamed, 2017).

II. Geçiş (anoksik) fazı

Tüketilen oksijenle beraber anaerobik koşullar meydana gelmeden hemen önce anoksik bir ortam oluşur geçiş kademesi olarak isimlendirilen bu faza anoksik faz da denilmektedir. Deponi alanı anaerobik hale geldiğinde, biyolojik dönüşüm tepkimelerinde elektron alıcısı olan nitrat ve sülfat anaerobik şartlarda azot gazına ve hidrojen sülfüre indirgenir. Atıkların oksidasyon/redüksiyon potansiyeline bakılarak anaerobik koşulların başlayışı gözlemlenebilir. İndirgeme için ihtiyaç duyulan koşullar 50-100 mV civarındadır. Metan üretimi için optimum oksidasyon/redüksiyon potansiyeli değerleri ise 150-300 mV arasındadır. Karmaşık yapıdaki organik maddelerin ara ürünlere ve organik asitlere dönüşümü esnasında oksidasyon/redüksiyon potansiyeli azalır. Karbondioksit miktarının artması ve organik asitlerin meydana gelmesiyle beraber oluşan sızıntı suyunun pH'sı düşmeye başlar (Mohamed, 2017).

III. Kararsız metanojenik (fermantasyon-asit oluşum) fazı

Kararsız metanojenik faz yani fermentasyon fazı; anaerobik koşulların ortama hakim olmasıyla başlamaktadır. Asit fazı olarak da bilinen bu üçüncü kademede; bir önceki fazda yani geçiş (anoksik) fazında başlayan mikrobiyal etkinlik; kayda değer oranda organik asit üretimi ve daha az oranda hidrojen gazı üretimiyle beraber hız kazanır. Bu fazda oluşan temel gaz karbondioksit olmakla birlikte daha az oranda hidrojen gazı da üretilir. Öncelikle yağlar, polisakkaritler, proteinler ve nükleik asitler gibi

büyük yapılı bileşikler hidrolize uğrayarak mikroorganizmalar için daha basit formda enerji ve karbon kaynağına dönüştürülür. Bu süreci, daha basit formdaki bu elementlerden önemli oranda asetik asit ve daha az oranlarda fülvik ve kompleks organik asit oluşumu izler. Bu tepkimeleri gerçekleştiren bakteriler asit üreten bakteriler olarak adlandırılır (Mohamed, 2017; Sel, 2016).

Bu aşamada sızıntı suyunun pH'sı 5 ve altına düşmektedir. Nedeni yüksek oranlardaki CO₂ ve organik asit oluşumudur. Sızıntı suyunun pH'sının düşmesi, bu faz süresince öncelikle ağır metaller olmak üzere inorganik bileşenlerin sızıntı suyu içerisinde çözünür forma geçmesine yol açar. Ve yine bu fazda önemli nutrientler sızıntı suyunda bulunduğundan sızıntı suyu devredilmelidir. Devredilemediği takdirde sistem önemli nutrientlerden yoksun kalmaktadır (Mohamed, 2017; Özçakıl, 2001).

IV. Kararlı metanojenik faz

Bu aşamada bir önceki kademe olan asit fazında oluşan hidrojen gazı ve asetik asit, metanojenik bakteriler vasıtasıyla metabolize edilerek metan ve karbondioksit çevrilmektedir. Bazı hallerde üçüncü kademenin sonlarına doğru gelişmeye başlayan ve anaerob özellik gösteren bu bakteriler; literatürde metanojenik, metanojenler ya da metan yapıcılar olarak adlandırılırlar (Mohamed, 2017).

Bu kademe aynı ortamda ve aynı anda metan oluşumu ve asit fermantasyonu gerçekleşmesine rağmen önceki aşamaya kıyasla asit fermantasyonunun hızı ve miktarı oldukça düşüktür. Hidrojen gazı ve asitlerin metan ve karbondioksit metabolize edilmesiyle deponi alanındaki pH değeri 6,8-8 arasına çıkarken, meydana gelen sızıntı suyunun pH' ı nötr seviyelerde bulunur (Sel, 2016).

V. Olgunluk fazı

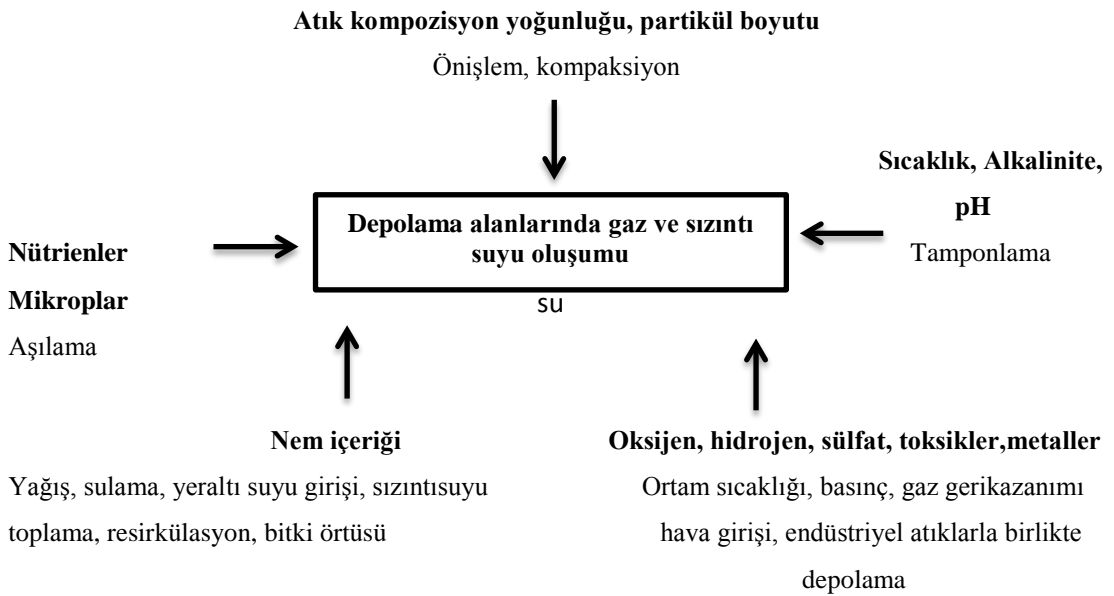
Bir önceki faz sırasında (metanojenik faz) deponi alanı ortamında var olan kolayca ayrışabilen organik maddelerin büyük bir kısmının CH₄ ve CO₂'ye çevrilmesinden sonra gelen aşama olgunluk fazıdır. Bu fazda metan üretim miktarı; ortamda yavaş ayrışan organik maddeler kaldığından ve önceki kademelerde nutrientler sızıntı suyu ile ortamdaki uzaklaştırıldığından büyük ölçüde azalır. Karbondioksit ve metan bu fazda oldukça yavaş gelişir. Sızıntı suyu da yine bu kademe yoğun bir biçimde fülvik ve humik asit içerir (Mohamed, 2017).

2.4.3. Deponi gazı oluşumunu etkileyen faktörler

Evsel özellikli, katı atık deponi alanlarında meydana gelen deponi gazı miktarı öncelikle atığın organik madde içeriğine bağlı olmakla beraber; oksijen, hidrojen, alkalinite, pH, su muhtevası, sıcaklık, besi maddeleri ve inhibitörler gibi abiyotik unsurlar da atık stabilizasyonu ve metan oluşumu için oldukça önemlidir. Bu unsurlar Çizelge 2.5 ve Şekil 2.7’de verilmiştir (Solak, 2015).

Çizelge 2.5 Deponi alanında gaz oluşumunu etkileyecek değişkenler (El-Fadel vd., 1997)

Değişkenler	Gaz zenginleşme potansiyeli			Gaz inhibisyon potansiyeli		
	Düşük	Orta	Yüksek	Düşük	Orta	Yüksek
Kompozisyon		+		-		
Yoğunluk	+					
Partikül boyutu	+					
Sıcaklık		+			-	
pH		+		-		
Nütrientler	+			-		
Mikroorganizmalar	+			-		
Nem			+			
Oksijen						-
Hidrojen	+			-		
Sülfat				-		
Toksisite					-	
Metaller				-		



Şekil 2.7 Depolama alanlarında gaz ve sızıntı suyu oluşumunu etkileyen faktörler (El-Fadel vd., 1997).

Atık kompozisyonu

Deponi alanından deponi gazı üretim kapasitesinin hesaplanmasında en önemli faktördür. Çünkü atığın muhteva ettiği organik madde miktarı ve özellikleri açığa çıkabilecek azami deponi gazı miktarını belirlemektedir. Organik maddenin oksijensiz alanda bozunması deponi gazı oluşumunda en önemli tepkimedir. Hızlı bozunabilir organik atıklar (kağıt, mutfak, karton, park-bahçe atıkları vb.) metan gazı oranını artırmaktadır (Sel, 2016).

Oksijen

Anaerobik süreçlerde kararlılığı elde etmek ve ayrışmanın bakterilerce ortaya konulabilmesi için serbest oksijenin ortamda katiyen bulunmaması gerekir. Metan üreten bakteriler; oksijene karşı aşırı hassas olduklarından ortamda kimyasal bağlı oksijen olması halinde dahi (NO₃-, H₂O₂ gibi) anaerobik süreçler olumsuz etkilenir (Ersoy, 2007).

Depo alanındaki atık içerisine oksijenin sürekli girebilme ihtimali vardır fakat depo alanı yüzeyinde aerobik mikroorganizmalar vasıtasıyla tüketilir. Dolayısıyla deponi alanında atıklar yeterli ölçüde sıkıştırılmalı ve yüzeyi günlük 15 cm kalınlığında toprak örtü tabakası ile kaplanmalıdır. Aksi halde oksijen daha derinlere ulaşarak anaerobik parçalanmayı olumsuz yönde etkileyebilir (Işık, 2014).

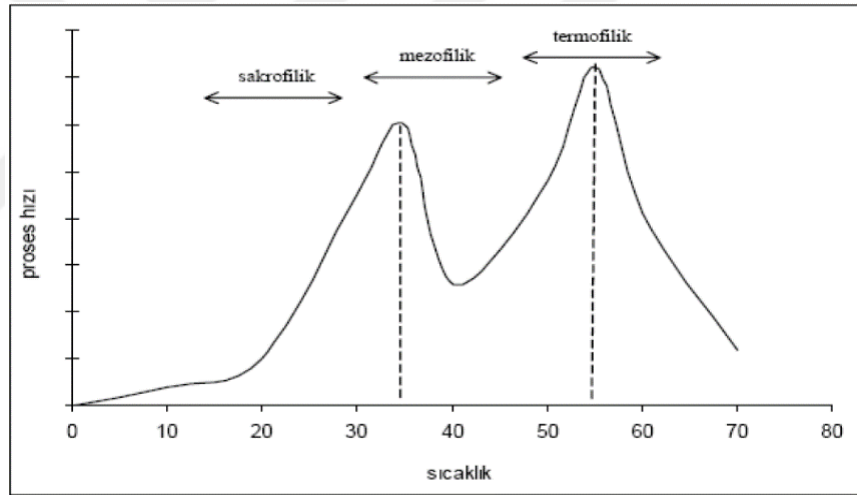
Hidrojen (H₂)

Fermantasyon yapan bakteriler ve asit üreten bakteriler vasıtasıyla H₂ üretilir ancak meydana gelen H₂'nin basıncı biyokimyasal tepkimelere etki eder. Fermantatif bakteriler H₂ basıncı yüksek olduğunda H₂ ve CO₂ ortaya çıkarırken, H₂ basıncı düşük olduğunda asetik asit, H₂ ve CO₂ meydana getirirler. H₂ basıncının çok yüksek olmadığı durumlarda; propiyonik asit ve bütirik asit gibi organik maddeler, asit üreten mikroorganizmalar vasıtasıyla da üretilebilirler. Diğer bir deyişle hidrojen basıncı yüksek ise bütirik ve propiyonik asit meydana gelecek fakat bunlar daha fazla ayrılmayacaktır. Sülfat indirgeyen bakteriler ve metanojenler vasıtasıyla hidrojen kullanılır. Karbondioksit ve hidrojenden metan üretimi için 10⁻⁵ atm' nin altındaki basınçlar elverişlidir (Solak, 2015).

Sıcaklık

Sıcaklık şartları; ortama egemen olan mikroorganizma türlerini ve gaz oluşum miktarını etkilediğinden diğer tüm mikrobiyolojik süreçlerdeki gibi anaerobik parçalanmayı meydana getiren mikroorganizmaları da oldukça etkilemektedir. Anaerobik parçalanmayı gerçekleştiren metan bakterileri mezofilik ve termofilik olmak üzere iki gruptan oluşur (Saltabaş ve Yalçın, 2004).

Öte yandan sıcaklık; anaerobik ayrışmayı hem termodinamik hem de kinetik yönden etkilediğinden sıcaklığın artması anaerobik sürecin verimini artırır. Çünkü artan sıcaklıkla beraber parçalanma reaksiyonlarının ve mikroorganizmaların çoğalma hızı da artar (Ersoy, 2007). Şekil 2.8’ de anaerobik ayrışma hızının sıcaklık ile ilişkisi verilmiştir.



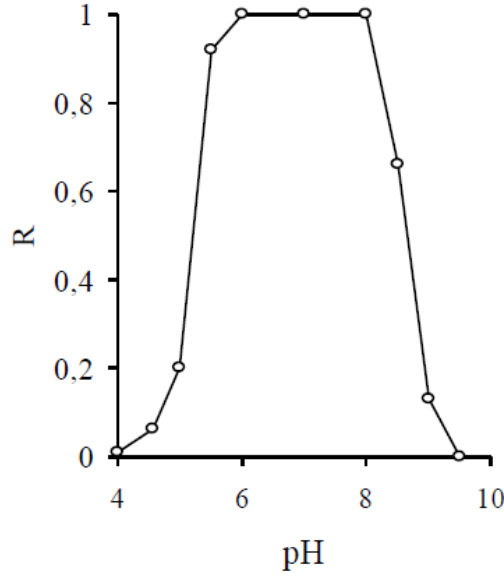
Şekil 2.8 Anaerobik ayrışma hızının sıcaklık ile ilişkisi (Ersoy, 2007).

Termofilik bakterilerin çalıştığı (45-65°C) sıcaklık aralığından daha yüksek sıcaklıklarda, kinetik etkinlik ve çoğalma hızı artar. Bu durum asit üreten bakterilerin metan üretenlerden daha fazla asit üretmesine neden olarak ortamın dengesini bozabilir (Ersoy, 2007).

pH ve alkalinite

Anaerobik parçalanma için en elverişli pH aralığı 6,7-7,5’dir. pH bu aralıkta sınırlandığında biyokütlenin çoğalma hızı artmakta ve metan üretimi en yüksek seviyelere çıkmaktadır. Bu değerlerin dışına çıkıldığında ise yani pH’ın 8’den büyük

6'dan küçük olması halinde metan üretim miktarı aşırı bir biçimde sınırlanmaktadır. Dolayısıyla anaerobik süreçte pH kontrol altında tutulmalıdır (Saltabaş ve Yalçın, 2004). Şekil 2.9' da pH'a bağlı metan üretim hızı (R) verilmiştir.



Şekil 2.9 Anaerobik Bir Filtrede pH'nın Rölatif CH₄ Oluşum Hızı (R) Üzerine Etkisi (Öztürk, 2018).

Depolama alanlarındaki pH değişimine alkalinite, organik asit üretimi, metan oluşumu, endüstriyel atıkların varlığı ve yeraltı suyu infiltrasyonu tesir edebilir (Saltabaş ve Yalçın, 2004). Deponi alanlarındaki pH değişiminde etkili olan alkalinite, anaerobik parçalanmanın gerçekleşebilmesi için elverişli pH düzeylerinin istenilen değerlerin altına düşmesine sebep olan uçucu ve diğer asitleri tamponlama yeteneğidir. Alkalinitenin düşük olduğu durumlarda ortamda uçucu yağ asitleri birikerek, pH seviyesinin düşmesine yol açıp biyolojik etkinliği inhibe edebilirken, alkalinitenin yüksek olduğu durumlarda pH salınımları engellenir (Mohamed, 2017).

Besi maddeleri

Deponi alanlarında mikroorganizmalar yaşamsal faaliyetlerini sürdürebilmek için azot, fosfor, karbon, hidrojen gibi besi maddelerine ve bakır, sülfür, demir, selenyum, çinko, kalsiyum, potasyum, magnezyum gibi iz elementlerin varlığına ihtiyaç duymaktadırlar. Anaerobik bakterilerin ihtiyaç duyduğu bu besi maddelerinin tamamı aşağı yukarı bütün deponi alanlarında yeterli miktarlarda bulunmaktadır.

Ancak bazı besi maddelerinin belirli oranlarda olmalarına ihtiyaç duyulmaktadır (Saltabaş ve Yalçın, 2004).

Organik maddeler (KOİ), azot ve fosfor arasındaki optimal değerler

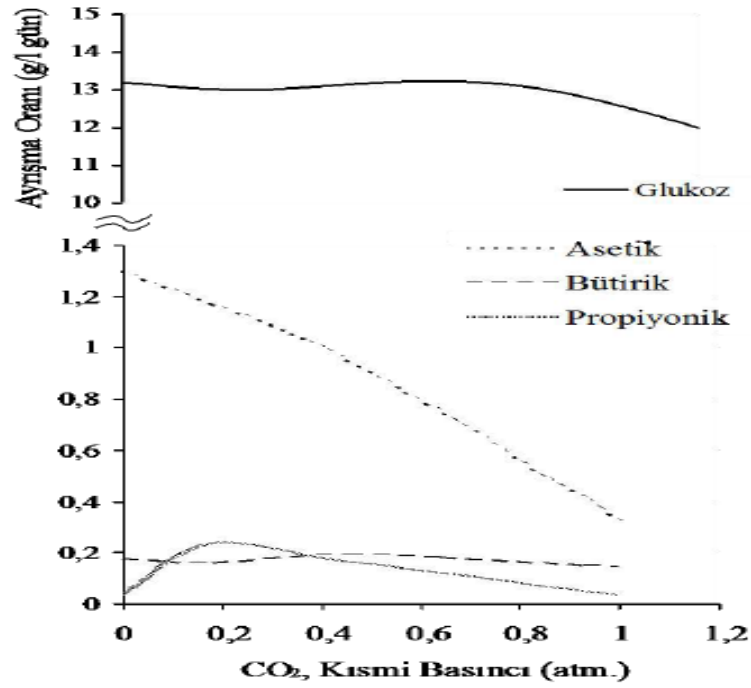
Anaerobik proseslerde substratın yalnızca küçük bir bölümü yeni hücreler vasıtasıyla özümlediğinden aerobik süreçlerden bir hayli az oranlarda azot ve fosfora ihtiyaç duyulur. Gazın meydana gelmesinde organik maddeler, azot ve fosfor için belirtilen optimal oranlar 100:0,44-0,88 olarak tayin edilmiştir. Aslında azot:fosfor oranından daha önemli olan karbon:azot oranıdır. Bu oranın 25-30 arasında olması gerekir. 30'dan fazla olursa ortamda asitleşme hızlı olur ve düşük pH oluşumu gözlenir. 20'den küçük olursa amonyak oluşumu fazla olur ve yüksek pH gözlenir.

Genelde endüstriyel ve evsel atıkların beraber depolandığı deponi alanlarında fosfor ve azot sınırlayıcı olmamakla birlikte, ayrı ayrı depolandıkları alanlarda nutrient oranının sınırlandırılmasına neden olabilir. Anaerobik ayrışma prosesini sınırlandıran en önemli nutrientin fosfor olması ciddi bir sorundur. Bu sorun düzenli deponi alanlarında %65 katı madde muhteva eden suyu alınmış arıtma çamurlarının günlük örtü tabakası şeklinde kullanılmasıyla çözülür (Solak, 2015).

İnhibitörler

İçeriğinde sülfat bulunan atıklar düzenli deponi sahalarında depolanmamalıdır. Deponi alanlarında sülfat konsantrasyonlarının artmasıyla birlikte sülfat indirgeyen bakteriler ortama hakim olmaya başlar, derişimi artan H₂S ise anaerobik prosesleri inhibe eder (Ersoy, 2007).

Metan üretimini ortamda SO₄⁻², O₂ ve H₂'nin varlığı inhibe etmektedir. Yine uçucu yağ asitlerinin metan üretimine etkisi hakkında birçok çalışma yapılmıştır. Bütirik asit, asetik asit ve propiyonik asidin derişimleri toplamda 6000 mg/L'nin üstüne çıkmamalıdır. Ayrışma süreçlerinin birçoğunda ortaya çıkan CO₂'in sistem üzerinde inhibe edici etkisi bulunmaktadır (Işık, 2014). Karbondioksitin kısmi basıncından asetik asidin ayrışma miktarı önemli derecede etkilenir. Şekil 2.10'da propiyonik asit, asetik asit, bütirik asit ve bazı substratların ayrışma oranlarına karbondioksitin kısmi basıncının etkisi gösterilmiştir.



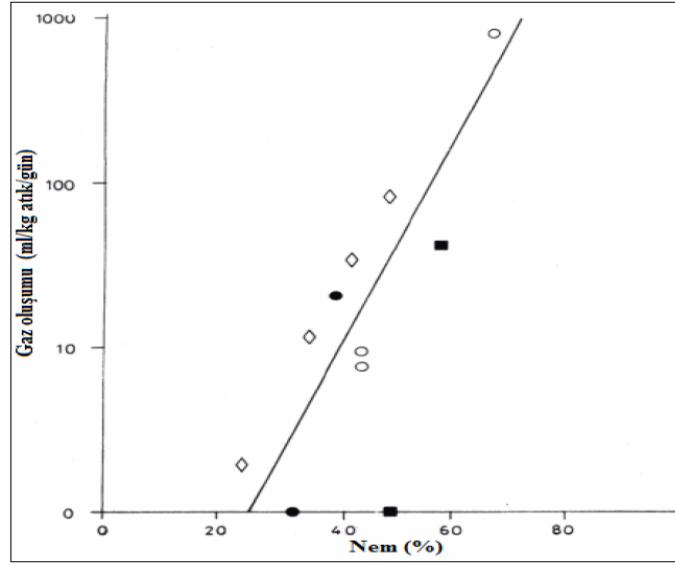
Şekil 2.10 Karbondioksitin kısmi basıncının bazı substratların ayrışma oranlarına etkisi (Öztürk, 2018).

Yüksek konsantrasyonlarda protein ya da NH_4 içeren atıklarda NH_3 inhibisyonu görülmektedir ve amonyak toksisitesinde sıcaklık, pH gibi parametreler inhibisyonun derecesini belirler (Ersoy, 2007).

Ağır metaller mikroorganizmaları negatif yönde etkileyip biyokimyasal tepkimeleri durdurduğundan ve organik maddelerin ayrışmasını engellediğinden ağır metal içerikli tehlikeli katı veya sıvı atıklar düzenli deponi sahalarında depolanmamalıdır. Mineral yağ ve tıbbi içerikli atıklar da biyokimyasal tepkimeleri negatif yönde etkilediğinden bu tür maddelerin de mevcudiyetinden kaçınılmalıdır. Evsel katı atık deponi alanlarında, tehlikeli atık bulunduran atıklar kati surette depolanmamalıdır (Solak, 2015).

Nem içeriği

Düzenli deponi sahalarındaki nem içeriği; nütrientlerin ve bakterilerin taşınmasına vesile olduğundan ve gaz oluşumu için ihtiyaç duyulan anaerobik ortamı yarattığından, atık ayrışması ve gaz oluşumunda çok önemli bir faktördür (Saltabaş ve Yalçın, 2004). Şekil 2.11'de deponi gazı üretim hızı ile deponi alanlarındaki nem içeriği arasındaki ilişki verilmiştir.



Şekil 2.11 Deponi gazı üretim hızı ile nem içeriği arasındaki ilişki (Işık, 2014).

Atıklarda deponi alanına ilk bırakıldıklarında %30-40 oranlarında nem içeriği bulunmaktadır. Neme doymuş atıklarda çoğunlukla metan ve karbondioksit üretilir. Neme doymamışlardan ise çoğunlukla H_2 oluşturulur. Deponi sahasından optimal seviyede metan gazı oluşumunun elde edilmesi için atıklar suya doymun olmalıdır. Deponi alanlarında biyokimyasal tepkimelerin devamlılığı için nem içeriği denetlenmeli, istenilen aralıktan alt seviyelere indiğinde ise sızıntı suyu deponi alanı içine verilmelidir. Çünkü deponi alanında nem yeterli olmadığında biyokimyasal tepkimeler son bulur (Işık, 2014).

Dane boyutu

Küçük dane boyutuna sahip öğütülmüş katı atıklar; biyokütlenin organik polimerleri parçalamak için yararlandığı yüzey alanını büyüttüğünden, mikrobiyal etkinliği ve gaz oluşumunu arttırmaktadır (Saltabaş ve Yalçın, 2004).

Deponi alanlarında, atıklar depolanmadan önce parçalayıcı yardımıyla atıkların dane boyutu azaltılarak daha homojen hale getirilebilmekte, ayrıca daha kolay sıkıştırılabilmekte ve bu şekilde daha kolay ve daha çok miktarda depolanabilmektedir. Dane boyutu azaltılmış deponi sahalarında daha fazla gaz üretildiğinden ve atığın depolanmadan önce parçalandığı tesislerde çok daha fazla çöp biriktirildiğinden kimi ülkelerde uygulanan bu parçalama işleminin ülkemizde de atıklar depolanmadan önce yapılmasında yarar vardır (Solak, 2015).

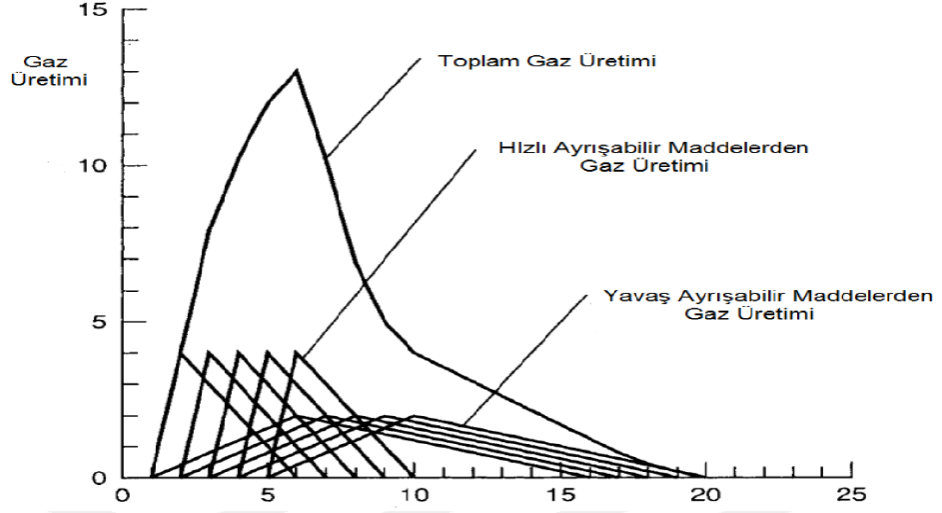
2.4.4. Deponi gazı oluşumunun zamanla değişimi

Katı atıklar içerisinde meydana gelen kimyasal, fiziksel ve mikrobiyolojik prosedürler nihayetinde oluşan deponi gazının içerisindeki organik bileşenler nedeniyle gaz üretim süreci öncelikle mikrobiyolojik süreçlerle kontrol edilmektedir. Çevresel şartlara oldukça duyarlı olan mikrobiyolojik süreçlerde ise doğal ve insan nedenli birçok etmen mikroorganizma çeşidine, sayısına haliyle deponi gazı üretim hızına etki etmektedir. Normal şartlarda ilk 5 yılda en yüksek seviyeye ulaşan gaz üretimi sonralarda azalmaya başlayarak 25 yıl ve daha sonraki süreçlerde azalmasını sürdürmektedir (Coşkuner, 2015). Hızlı ve yavaş ayrışanlar olmak üzere ikiye ayrılan organik maddelerden gazete, kağıt, yiyecek atıkları, bahçe atıkları hızlı ayrışabilenler grubuna girerken; plastik atıkları, tahta, deri, tekstil atıkları ise yavaş ayrışan atıklar grubuna girmektedir (Akpınar, 2006). Çizelge 2.6'da organik maddelerin ayrışabilirlik seviyeleri verilmiştir.

Çizelge 2.6 Organik maddelerin ayrışabilirlik seviyeleri (Akpınar, 2006).

Atık Türü	Ayrışma Seviyesi	Ayrışma Yarı Ömrü (Sene)
Toprak, deri, kauçuk, plastik	Ayrışma özelliği yok	Süresiz
Yiyecek	Hızlı	1
Kağıt, tekstil, karton, tahta	Yavaş	15
Bahçe	Orta	5

Deponi alanında zamanla gaz üretimi aşamalı olarak düşmektedir. Şekil 2.12'de organik maddelerin (yavaş ve hızlı ayrışan olarak) anaerobik parçalanmasıyla meydana gelen gazın zamanla tipik değişimi verilmiştir. Verilen grafikten de anlaşılacağı üzere organik maddelerin bozunma hızı zamanla üçgen halinde bir gaz üretim şekli oluşturmakta ve gaz üretiminin de deponi alanının doldurulmasını takiben geçen tam bir yılın sonunda oluşmaya başlayacağı düşünülmektedir (Coşkuner, 2015).



Şekil 2.12 Gaz miktarının zaman içerisindeki tipik değişimi (Coşkuner, 2015).

2.4.5. Deponi gazının çevresel etkileri

Uygun bir biçimde toplanmayan ve denetimi yapılmayan deponi gazları çevre ve insan sağlığı bakımından birçok probleme neden olmaktadır. Bu etkiler aşağıda anlatılmıştır.

İklim değişikliği

Katı atık deponi alanlarında ortaya çıkan gazların önemli bir kısmını oluşturan karbondioksit ve metan, küresel ısınmaya yol açan iki önemli unsurdur. Katı atık deponi sahaları doğada insan kaynaklı metan emisyonlarının %3-19'una neden olmaktadır. Bir karbondioksit molekülünün absorblayabildiği kızıl ötesi ışınların 23 kat daha fazlasını absorblayan metan moleküllerinin sera etkisi, karbondioksitin neden olduğu sera etkisinin dörtte biri kadardır. Nedeni ise atmosferde karbondioksitten 83 kat daha az oranda metan molekülü bulunmasıdır.

Yangın ve patlama etkisi

Katı atık deponi alanlarında çok sık karşılaşılan yangınlara ve patlamalara yol açan yanıcı madde ise genellikle metan gazıdır (Çakır, 2012). Yoğunluğu deponi alanlarındaki sıcaklığa bağlı olarak 0.6-0.7 kg/m³ arasında değişen metan gazı; bu özelliğiyle havanın yoğunluğunun aşağı yukarı yarısına denk geldiğinden kolaylıkla deponi alanı dışına sızabilir. Metanın az ancak buna rağmen önemli bir bölümü ise toprağa doğru sızarak deponi alanının içinde veya etrafındaki boşluklarda birikir.

Gaz toplama yöntemleriyle alıkonulamayan ve önemli bir bölümü atmosfere yayılan metanın havadaki derişimi % 5-15 olduğunda ve O₂ mevcudiyetinde patlayıcı özellik taşır. Bu sınır değerler alt tutuşma sınır (Lower Explosive Limit, LEL) ve üst tutuşma sınır (Upper Explosive Limit, UEL) olarak ifade edilmektedir. LEL'den düşük metan oranlarında patlama meydana gelmezken, UEL üzerinde gaz patlama olmaksızın yanmaktadır. Metan oranları bu ciddi düzeye vardığında, atığın içindeki oksijen tamamıyla bittiğinden deponi alanlarında patlamaların oluşması gibi doğrudan bir risk yoktur. Fakat birtakım hallerde sahada ya da depo gövdesinde yangınlar meydana gelebilmektedir (Solak, 2015).

Hava kirliliğine etkisi

Deponi gazları, katı atık deponi alanlarından atmosfere yayılarak küresel ve bölgesel ölçekte hava kirliliğine yol açmaktadır. CO₂ ve CH₄' ün yanı sıra eser miktarlarda da olsa Uçucu Organik bileşikler (UOB'ler) atmosfere karışarak hava kirliliğine neden olmaktadır. UOB'ler depo sahasında bulunan atıkların yapısında bulunabilmekle birlikte atıkların parçalanmaları sonucunda da meydana gelebilmektedir (Solak, 2015). Buna ek olarak endüstriyel atıkların evsel atıklarla birlikte depolanmasıyla UOB'leri, koku yayan maddeleri ve tehlikeli hava kirleticileri (HAP_s) içeren eser miktarda bileşenler oluşur. UOB'ler ozon tabakasını olumsuz yönde etkilediği gibi kanser riskini de artırmaktadır. Ayrıca eser gazlar, metan üreten bakterilerin büyümemesi üzerinde inhibisyon etkisi yaratarak metan gazı üretimini etkileyebilmektedir. Benzen, civa, vinil klorid, tetrakloroetan, dikloroetan, trikloroetan HAP_s'lara örnek verilmektedir ve hava kirliliğine sebep olmakla birlikte insan sağlığı üzerinde de olumsuz etkileri bulunmaktadır (Çakır, 2012).

İstenmeyen kokular oluşturması

Amonyak, kükürtlü maddeler ve bazı metan gazı haricindeki organik karbonlu maddeler kokunun açığa çıkmasına neden olan bileşenlerdir ve kokuya yol açan iz miktardaki bileşenler toksik olabilir. Deponi alanındaki gaz oluşum fazları, atığın yaşı ve içeriğine bağlı olarak kokunun seviyesi değişkenlik gösterir. Deponi sahalarında meydana gelen kükürtlü bileşikler; merkaptanlar, (CH₃)₂S, yani dimetil sülfid ve hidrojen sülfürdür. Deponi sahalarının yakınlarında koku probleminin ana kaynağı bu kükürtlü bileşiklerdir. Deponi gazında ise bu bileşiklerden en fazla

oranda hidrojen sülfür mevcuttur ve düşük konsantrasyonlarda dahi keskin bir çürük yumurta kokusu açığa çıkarır.

Yeraltı suyu kirliliğine neden olması

Karbondioksit yüksek çözünürlüğe sahiptir. Yüksek derişimlerde CO₂ ihtiva eden deponi gazları rahatça yeraltı sularına karışarak kirliliğe neden olur. Ayrıca deponi gazında iz miktarda mevcut olan bir takım gazlar oldukça toksiktir. Bu zehirleyici gazlardan bilhassa uçucu hidrokarbonlar, yeraltı sularında kirliliğe yol açar. İz orandaki bu zehirleyici gazların ve derişimi yüksek olan CO₂' nin yeraltı suyunu asidik ortama çevirme kapasitesi mevcuttur (Özcan, 2009).

Buna ilaveten katı atık içeriğindeki ağır metaller, zaman içerisinde çözünerek gerekli sızdırmazlığa sahip olmayan deponi sahalarında yeraltı suyuna karışarak kirliliğe neden olmaktadır.

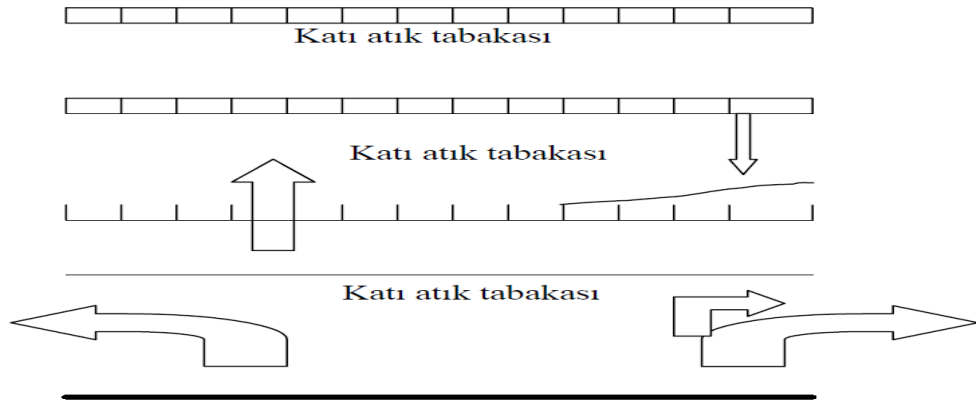
Bitkilere olan etkisi

Deponi gazı bileşenlerinin bitki örtüsünü dolaylı ya da dolaysız negatif yönde etkilediği literatürde ortaya konulmuştur. Depo alanlarında deponi gazı kontrol altında tutulmazsa, yukarı doğru hareket ederek yükselen gaz atmosfere yayılabilir. Bu esnada oksijen yer değiştirdiğinden bitki kökleri yüksek oranlarda CH₄ ve CO₂ ile karşı karşıya kalabilir. CO₂ oranının %5'e eşit ya da düşük olduğu durumlar normal bitki gelişimi için uygundur fakat bu oranın %20'yi geçmesi halinde bitkilere zehirleyici etki gösterir (Özcan, 2009). CH₄ ise doğrudan bitki gelişimini engellemeyebilir ancak CH₄ oksidasyonu esnasında topraktaki oksijen azalır ve ısı açığa çıkar. Bu durum toprağın sıcaklığının yükselmesine yol açacağından bitki kökü havasız kalır.

Deponi gazı bileşenlerinden olan iz bileşenler, bitki örtüsüne zehirleyici etki yapabilir. Siklik hidrokarbonlar, uçucu organik asitler, diğer hidrokarbonlar ve halo-organikler bitkiler için aşırı derecede risklidir. Yapılan çalışmalarda etilenin 10 ppm gibi oldukça düşük oranlarda dahi bitki örtüsüne zararı ortaya konulmuştur (Çakır, 2012).

2.4.6. Deponi gazının hareketi ve taşınım mekanizması

Deponi gazının hareketi iki yolla gerçekleşmektedir. Bunlar basınç akımı ve difüzyondur. Gazın yüksek konsantrasyonlu alanlardan düşük konsantrasyonlu alanlara doğru hareketiyle difüzyon ile yayılma gerçekleşir. Bir diğer yayılım şekli olan basınç akımı ile yayılımda ise basınç farkları esas alınır. Meydana gelen deponi gazı, alçak basınçlı alanlara doğru yönelmeye yatkındır. Deponi alanlarında düşey gaz hareketine kıyasla yatay gaz hareketlerinin meydana gelmesi daha muhtemeldir. Bu durum iki nedenle açıklanabilir. Tabaka esasına göre düzenlenen atıklar her bir atık katmanının yüzeyinde daha çok sıkışarak daha düşük porozite meydana getirir ki bu birinci nedendir. Bu duruma tabaka yüksekliğinin oldukça büyük olduğu alanlarda rastlanır. Diğer bir neden ise günlük ara ve nihai örtü materyalleri düşük permeabiliteli yatay tabakaların meydana gelmesine neden olur. Bu durum geçirimli toprak kullanıldığında dahi gözlemlenir. Yatay tabakanın meydana gelmesiyle, atığın içerisinden süzülen yağmur suyu düşey gaz hareketini kontrol altında tutacaktır. Genel olarak günlük örtü tabakalarında toplandığı bilinen sızıntı suyu bu hareketiyle düşey gaz hareketini azaltarak yatay gaz hareketini alanın sınır hatlarına doğru artırır. Bu durum Şekil 2.13’ de özetlenmiştir (Özcan, 2009).



Şekil 2.13 Deponi alanlarında yatay gaz hareketi (Özcan, 2009).

Metanın çoğunluğunun atmosfere doğru yükselmesine karşın deponi sahasının sınırlarından 120 metreye kadar ulaşan yanal aralıklarda %40 nispetinde metan mevcut olabilir. Şayet metan gelişigüzel uzaklaşacak olursa binaların altında ya da diğer deponi sahalarına yakın alanlarda toplanabilir. Çünkü metanın özgül ağırlığı

havanın özgül ağırlığından azdır. Karbondioksit ise havadan ağır olduğu için deponi sahasında çökme eğilimindedir. Bu sebeptendir ki deponi sahalarının aşağı bölgelerinde uzun yıllar CO₂ konsantrasyonu fazlalık gösterebilir (Özcan, 2009).

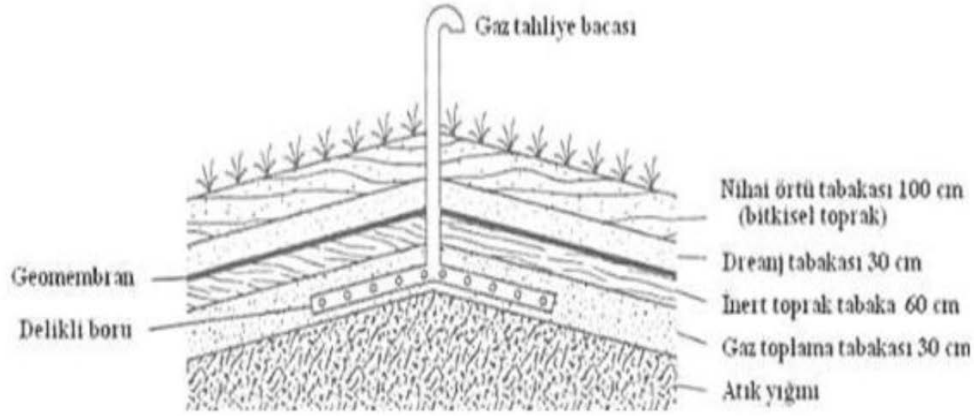
2.4.7. Deponi gazının toplanması ve kontrolü

Düzenli deponi alanı gazları; yeraltında gaz hareketlerini minimum düzeye indirmek, kokuyu ve atmosferde yayılan emisyonları azaltmak ve ayrıca deponi gazından enerji üretebilmek için kontrol altında tutulmaktadır. Dolayısıyla hem toplanan metan gazını değerlendirerek kullanmak hem de deponi gazının çevreye olan olumsuz etkilerini önlemek amacıyla, gaz toplama tertibatlarıyla deponi gazlarının toplanması sağlanmalıdır. Deponi alanının belli bir kısmı kapatıldıktan sonra toplanmaya başlanması gereken bu gazlar, enerji üretiminde kullanılmayacaksa kontrollü bir biçimde yakılarak atmosfere verilmelidir (Özcan, 2009).

Deponi gazı hareketini kontrol altına almak amacıyla aktif sistemler ve pasif sistemler kullanılır. Deponi gazı, aktif gaz toplama sistemlerinde pasif sistemlere oranla daha verimli bir biçimde toplanmaktadır. Aktif gaz toplama sistemlerinde gaz, gaz emme körükleri (blower) desteğiyle çekilirken pasif sistemlerde; deponi gazının difüzyonla hareket etmesi denetim altında tutulur. Pasif sistemler ekonomik yönden daha avantajlı olmasına karşın yerleşim birimlerine yakın deponi sahalarında aktif sistemlerin kullanılması daha uygundur (Mohamed, 2017).

Pasif gaz toplama/tahliye sistemleri

Özcan'a (2009) göre; karbondioksit ve metan oluşumunun sınırlı olduğu hallerde kullanılması daha verimli olan pasif kontrol sistemlerinden en yaygın olanı; deponi gazının, alanın üstünde mevcut olan alevli yakıcıda yakılmasıdır. Bunun için nihai deponi alanı örtüsünden katı atığa doğru uzanan delikler açılmaktadır. Çıkan deponi gazındaki metan yeterli seviyede ise fazla sayıda delik birbirine bağlanıp gaz yakıcıya gönderilebilmektedir. Yakıcı kullanılan pasif ağızlıklarda istenilen seviyede UOB ve koku gideriminin elde edilememesi bu metotta dikkate alınması gerekli olan noktadır.



Şekil 2.14 Deponi gazı toplanması için pasif gaz tahliye sistemleri (Coşkuner, 2015).

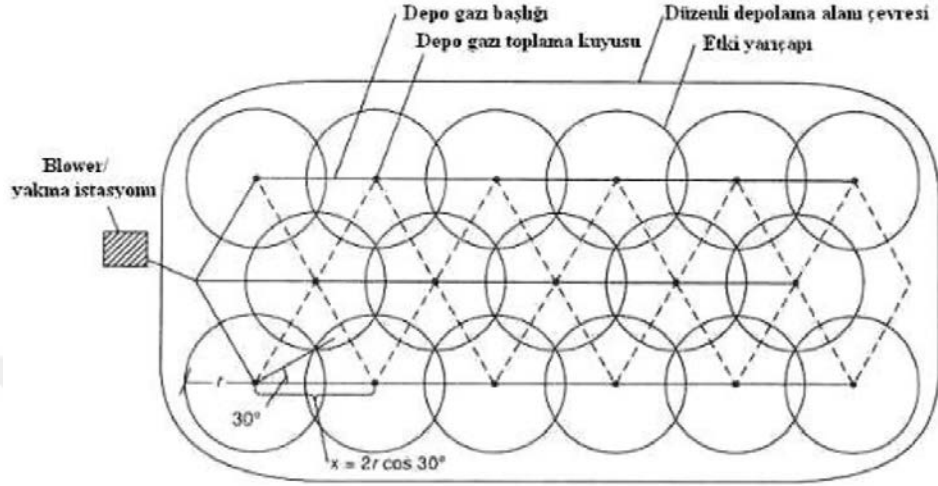
Yukarıdaki şekildeki sistem yardımıyla gazın deponi sahası dışına çıkışı gerçekleştirilir. Ancak deponi gazını atmosfere atmak için konveksiyon düzeneklerinin ve doğal basıncın kullanıldığı bu pasif sistemlerde gaz basıncının düşük olması sebebiyle çoğu deponi sahasında gazın yalnızca bir bölümünün dışarı verilebileceği belirlenmiştir. Dolayısıyla ciddi metan birikiminin olabileceği hallerde ve alanlarda bu sistemler koruma yönünden uygun olmayabilir (Mohamed, 2017). Ayrıca atığın derinliğinin 10 m'den fazla olduğu hallerde, atığın yaşının 20 yıldan az olduğu hallerde ve korunması planlanan yerleşim biriminin deponi alanına mesafesinin 1,5 km'den az olduğu hallerde yine aktif kontrol sistemleri kullanılmalıdır (Özcan, 2009).

Aktif gaz toplama / çekme sistemleri

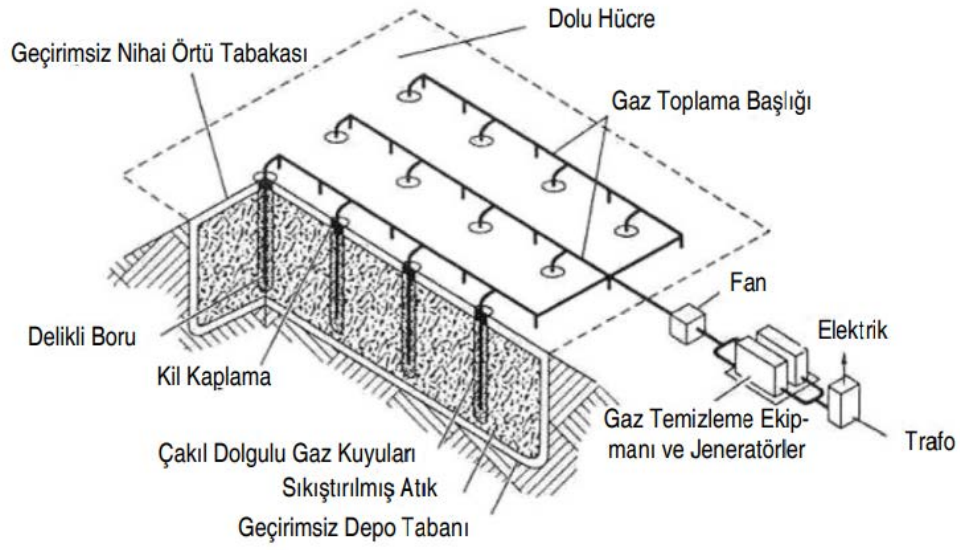
Aktif sistemlerde gazın toplanması amacıyla deponi alanına yatay ya da dikey kuyular açılmaktadır. Gaz toplama kuyularının bir boru ağı ile birbirine bağlandığı dikey sistemlerde deponi gazı vakum pompasıyla çekilir. Günümüzde en geniş kullanım alanına dikey sistemler sahipken, yatay sistemler ise gazın hemen geri kazanılmasının gerekli olduğu deponi alanları için elverişlidir. Yatay ve dikey sistemlerin birlikte kullanıldığı hallerde her bir kuyu, gazı ana toplayıcıya ileten yatay borulara bağlanmaktadır (Coşkuner, 2015).

Etki yarıçapları kesişecek biçimde Şekil 2.15' de gösterildiği gibi dizayn edilen dikey kuyular döner sondaj ya da burgu metoduyla açılmaktadır. Karakteristik bir gaz toplama kuyusu, 45-90 cm civarında bir sondajla 10-15 cm civarındaki borunun yerleştirilmesiyle tasarlanır. Dikey boruların alt kısmının üçte biri Şekil 2.16' da

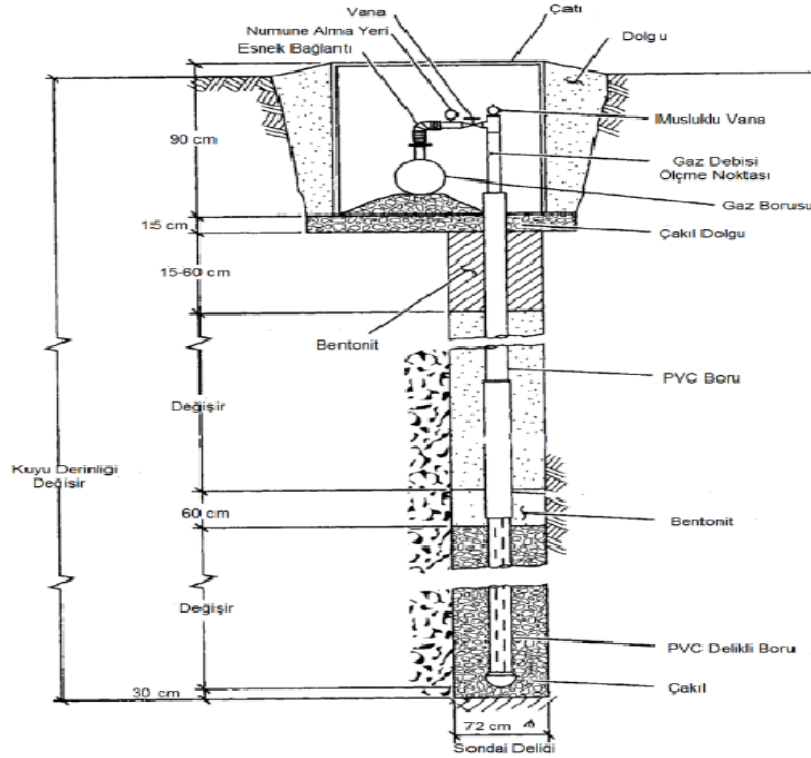
görüldüğü üzere deliklidir ve çakıl dolguya oturmuştur. Geri kalan kısmı delikli değildir, toprak içinde ve kille kaplıdır.



Şekil 2.15 Dikey aktif gaz toplama sisteminin etki çapları ve üstten görünüşü (Aydın, 2013).



(a)

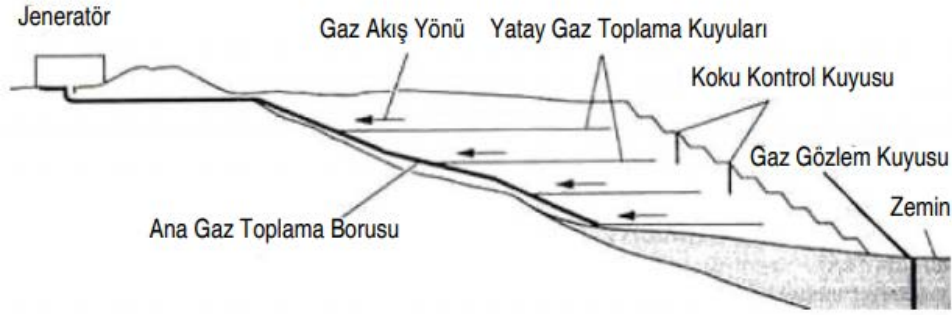


(b)

Şekil 2.16 (a) Dikey Kuyularla Gaz Toplama ve Geri Kazanma Sistemi (b) Dikey aktif gaz toplama sistemi borusu (Öztürk, 2010; Kankılıç ve Topal, 2015).

Dikey gaz çekme kuyularına alternatif olarak kullanılan yatay gaz çekme kuyuları sisteminde, katı atığın içine yatay gaz çekme hendeği kazılır. Yarı yarıya çakılla doldurulan hendeğin içerisine iki ucu açık delikli bir boru yerleştirilerek sonrasında

üstü tamamen çakılla doldurulur ve katı atık ile kapatılır (Özcan, 2009). Şekil 2.17’de yatay gaz toplama sistemi kesiti verilmiştir.



Şekil 2.17 Yatay gaz toplama sistemi kesiti (Kankılıç ve Topal, 2015).

2.5. Deponi Gazı Miktarının Hesaplanması

Katı atık düzenli deponi sahalarından ileri gelebilecek emisyonların tahmin edilmesi amacıyla, deponi sahasının toplam bertaraf kabiliyeti, deponi sahasında halihazırda depolanan atık oranı veya sahanın yıllık yaklaşık depolama kapasitesi, metanın oluşum hızı, sahanın kaç yıldır kullanıldığı, potansiyel metan üretim kapasitesi ve sahada evsel atıklarla birlikte tehlikeli atıkların da depolanıp depolanmadığı gibi bilgiler gerekmektedir (Mohamed, 2017).

Teorikte 1 ton katı atığın bozunması sonucunda %55 metan içerikli ve 19.750 kJ/m^3 düşük ısı değerli 400 m^3 deponi gazı açığa çıkmaktadır. Gelecekte açığa çıkabilecek ve var olan gaz miktarını tayin etmek amacıyla 4 yöntem kullanılsa da bu hesaplamalar için en güvenilir yöntem test kuyuları açmaktır. Öteki yöntemler ise substratların ayrışma denklemi ile hesaplanması, yaklaşık tahmin metodu ve matematiksel model uygulamalarıdır (Işık, 2014).

2.5.1. Test kuyuları metodu

Gaz miktarının tayinindeki en güvenilir yöntem test kuyuları açmak ve kuyularda biriken gazı ölçmektir. Bu metot oldukça pahalı olduğu için sadece deponi sahasında fazla miktarlarda gaz üretimi amacıyla yeterli ölçüde atığın bulunduğu durumlarda uygulanır. Test kuyuları, güvenilir sonuçlara ulaşmak için deponi sahasının

büyüklüğüne ve sahadaki atık homojenliğine göre sahayı temsil eden kesimlerde makul ve mantıklı sayıda açılmalıdır. Bu metodun önemli bir avantajı da gazın miktarıyla beraber kalitesinin de tayin edilebilmesidir. Gazın kalitesini ve debisini ölçmek amacıyla her bir kuyuda biriken gaza ayrı ayrı testler uygulanır. Gaz içerisindeki sülfür, metan, partikül, azot ve hidrokarbon oranlarının da saptanmasıyla yapılan gaz kalitesi ölçümü geri kazanım ve işletme tesisinin planlamasında oldukça önemlidir (Özcan, 2009).

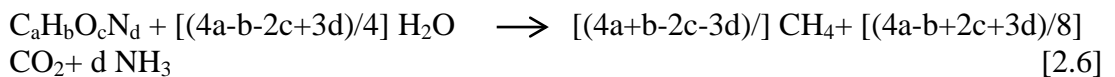
Gelişmekte olan ülkelerde; atıkların deponi alanında homojen olarak dağılmaması ve gevşek bir şekilde sıkışmasından dolayı bu yöntem ile üretilen gazın miktarı tayin edilirken, kuyularda toplanan gazın miktarının yalnızca yarısı hesaba katılır. Buna ek olarak gaz yayılması çok genel bir sorun olduğundan yanlış saptamalara sebebiyet vermektedir. Toplanan gaz miktarının yarısını göz önünde bulundurmak geri kazanım tesisinin büyüklüğünü tayin etmede daha gerçekçi bir değer verir (Işık, 2014).

2.5.2. Yaklaşık tahmin metodu

Açığa çıkacak deponi gazının miktarını hesaplamada yararlanılabilecek en kolay yol her 1 ton atıktan yılda 6 m³ gaz oluşacağını varsaymaktır. Bu kaba tahmine işletilmekte olan birçok deponi sahasından ulaşılmıştır. Dolayısıyla bu yaklaşımda deponi alanındaki atık miktarının bilinmesi gereklidir. Ancak iklim, atık ve deponi alanına mahsus diğer özellikleri gerekli kılmaz (Özcan, 2009).

2.5.3. Substratların ayrışma denklemi ile hesaplama

Bozunabilir organik atığın hepsinin CH₄, CO₂ ve NH₃'e dönüştüğü varsayılan aşağıda verilen denklem [2.6] yardımıyla, toplam gaz hacmi tahmin edilir. Bu metotta plastikler dışında atığın içinde bulunan her organik madde C_aH_bO_cN_d şeklinde genel bir yöntemle gösterilir.



En elverişli şartlar altında atıkların organik parçalarının bozunabilir bölümlerinin ayrışmasıyla ortaya çıkabilecek maksimum gaz miktarı belirlenir. Dolayısıyla

organik atıkların hepsi bozunamadığından bulunan değer, gerçek değerden daha yüksektir (Akpınar, 2006).

2.5.4. Deponi gazı oluşumunun modellenmesi

Modeller, deponi gövdesindeki organik maddede zamanla oluşan karmaşık ayrışma tepkimelerini basitleştiren araçlardır. Bu tanımda ana prensip kütle korunumu kanunudur (Çetindemir, 2012).

Alandaki depolama sırasında ve kapatıldıktan sonra gaz üretimiyle ilgili bilgiler sunan matematiksel model hesapları genel olarak atık özellikleri, miktarı ve depolama zamanı gibi bilgilere gerek duymaktadır (Mohamed, 2017). Katı atık deponi alanlarında meydana gelen gazın belirlenmesine ilişkin modellerden literatürde sıkla yararlanılan ve Türkiye şartlarına en uygun sonuçları ortaya koyabilecek USEPA LandGEM, Scholl Canyon ve Tabasaran-Rettenberger modellerine aşağıda değinilmiştir (Yarıntepe, 2011).

Scholl Canyon modeli

Tek kademeli 1. derece kinetik model olan bu modelde; anaerobik şartların ve mikrobiyal aktivitenin meydana gelmesi için ihtiyaç duyulan bir gecikme süresinden sonra deponi gazı oluşumunun maksimum hızla başladığı varsayılmaktadır. Denklem [2.7]'de bu modele ait eşitlik verilmiştir (Çakır, 2012).

$$Q = k \cdot L_0 \cdot R \cdot e^{-kt} \quad [2.7]$$

Bu denklemde; Q = Metan üretim hızı ($m^3/yıl$), L_0 = Potansiyel metan üretimi kapasitesi (m^3), k = Metan üretim hız sabiti ($yıl^{-1}$), R = Depolanan yıllık atık miktarı (ton), t = Atığın ilk depolandığı seneden başlayarak geçen süre (yıl), olarak ifade edilmektedir.

Tabasaran – Rettenberger modeli

Gaz üretimi hesabı amacıyla Tabasaran ile Rettenberger (1987) aracılığıyla geliştirilen modelde, belirli bir zaman aralığında açığa çıkan gaz miktarı kümülatif

bir şekilde tespit edilmektedir. Aşağıda Denklem [2.8]'de bu modele ait eşitlik verilmiştir (Mohamed, 2017).

$$G_t = 1,868 \cdot C_{org} \cdot (1-10^{-kt}) \cdot (0,014T + 0,28) \quad [2.8]$$

Bu denklemde; $G_t = t$. Seneye dek 1 ton atık ile açığa çıkan gaz miktarı (m^3), 1,868 = Standart koşullarda 1 kg organik karbondan biyogaz üretim potansiyeli (m^3), $T = ^\circ C$ cinsinden sıcaklık (genellikle $25^\circ C - 35^\circ C$ arasındadır), k = Deponi gazı üretim hız sabiti ($yıl^{-1}$) (0,025-0,05 arasında bir değer seçilmelidir), C_{org} = 1 ton atıkta bozunabilir organik karbon muhtevası (kg/ton atık) (Evsel katı atıklar için 170-200 kg/ton arasındadır.), t = Atığın ilk depolandığı yıldan itibaren geçen süre (yıl) olarak ifade edilmektedir (Mohamed, 2017).

United States Environmental Protection Agency (USEPA) LandGEM modeli

Katı atık deponi alanlarından kaynaklanan emisyonların miktarının otomatik olarak tespit edilmesi amacıyla planlanan Depolama Sahası Gazı Emisyonları Modeli (LandGEM= Landfill Gas Emission Model); Birleşik Devletler Koruma Ajansı (United States Environmental Protection Agency) aracılığıyla geliştirilmiştir. Model, deponi alanı gazının aynı oranlarda karbondioksit ile metandan ve bunlara ek olarak diğer hava kirleticilerden de düşük konsantrasyonlarda bulunması esasına dayanır. Deponi alanından ileri gelen emisyonların öngörülebilmesi amacıyla aşağıda sunulan verilere gerek duyulmaktadır;

- Deponi alanının hangi seneden itibaren işletildiği
- Deponi alanı tasarım kapasitesi
- Metan üretimi hızı (k)
- Deponi alanına senede gelen atık miktarı ve ya deponi alanında gömülmüş halde mevcut olan atık miktarı
- Potansiyel metan üretimi kapasitesi (L_0)
- Deponi alanında tehlikeli atığın da bulunup bulunmadığı yani atıkların karışık bertaraf edilip edilmediği (Taşkan, 2001).

Modelde yararlanılan birinci dereceden kinetik eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$Q_{CH_4} = L_0 \cdot R \cdot (e^{-kc} - e^{-kt}) \quad [2.9]$$

Bu denklemde; $Q_{CH_4} = t$ anındaki metan üretimi hızı ($m^3/yıl$), $R =$ Depolanan yıllık atık miktarı (ton), $c =$ Alan kapatımından sonraki yıl sayısı (yıl), ($c=0$ kabul edilir depolama yapıldığında), $L_0 =$ Potansiyel metan oluşum kapasitesi (m^3), $k =$ Metan üretimi hız sabiti ($yıl^{-1}$), $t =$ Depolamanın ilk başladığı yıldan itibaren geçen süre (yıl).

Bu modelde en önemli parametreler metan gazı oluşum sabiti (k) ve metan gazı oluşum potansiyelidir (L_0). Modelde emisyonların hesaplanması iki farklı standarda göre tasarlanmış ve bunun seçimi kullanıcıya bırakılmıştır. Bunlardan biri CAA (Clean Air Act) yönetmeliklerinin uygulanabilirliği esasına dayanmaktadır ve bu sette k değeri; bölgenin yağış miktarına göre $0,05 \text{ yıl}^{-1}$ ya da $0,02 \text{ yıl}^{-1}$ ve L_0 değeri $170 \text{ m}^3/\text{ton}$ atık olarak kabul edilmiştir. AP-42 olarak adlandırılan (US EPA Compilation of Air Pollutant Emission Factors) ikinci standartta ise yine yağış miktarına göre $k = 0,04 \text{ yıl}^{-1}$ ya da $k = 0,002 \text{ yıl}^{-1}$ ve $L_0 = 100 \text{ m}^3/\text{ton}$ atık kabul edilmiştir (Öztürk, 2018).

CH_4 ve CO_2 emisyonlarının eşit oranda olduğunu yani deponi gazı miktarını CH_4 emisyonunun iki katı olduğunu kabul eden LandGEM modelinde; deponi alanından ileri gelen metan oluşumu iki değişkenden yararlanılarak hesaplanmaktadır. Bu değişkenler k , metan üretimi hız sabiti ve L_0 , atığın potansiyel metan üretim kapasitesidir. k sabiti deponi alanındaki her bir atık kütesinin metan üretimi hızını göstermektedir. k değeri şu verilerin bir fonksiyonudur:

- Atığın nem muhtevası
- Nutrient muhtevası
- Sıcaklık
- pH

L_0 değeri deponi alanında mevcut olan atığın türüne göre değişiklik göstermekle birlikte bu değer atığın selüloz muhtevasıyla doğru orantılıdır. Modelde depolama alanına ilişkin bir L_0 ve k değeri bilinmediği hallerde USEPA aracılığıyla emisyonların hesaplanması amacı ile iki farklı standart planlanmış ve bu standartlardan yararlanmak için seçim kullanıcıya bırakılmıştır. Bunlar USEPA

Compilation of Air Pollutant Emission Factors (AP-42) ve Clean Air Act (CAA) standartlarıdır.

Çizelge 2.7’de (AP-42) ve (CAA) değerleri hazır parametre olarak verilmiştir. k değerleri için kuraklık kriterinin olması burada önemli noktadır. Senede 635 mm’den daha az ya da daha çok yağış alan bölgelere göre k değerleri aynı çizelgede verilmiştir. L_0 değeri için ise yine 2 hazır değer bulunmaktadır. Bunlar Çizelge 2.7’de verilen; AP-42 alternatifi için $100 \text{ m}^3/\text{ton}$, CAA için ise $170 \text{ m}^3/\text{ton}$ ’dur (Mohamed, 2017). Ancak verilen bu değerler kullanıcıya göre değiştirilebilmektedir. Yani bu değerler yerine deneylerle sağlanan verilerden yararlanılabilmektedir (Yarıntepe, 2011).

Çizelge 2.7 AP-42 ve CAA parametreleri (USEPA, 2005).

Parametre	AP-42		CAA	
	P>635mm	P<635mm	P>635mm	P<635mm
k (1/yıl)	0,04	0,02	0,05	0,02
L_0 (m^3/ton)	100	100	170	170

3. DEPONİ GAZININ KULLANILMASI

Deponi gazlarının kullanılmasını etkileyen temel faktörlerden en önemlisi deponi gazının temizlenme derecesidir. Bunun yanında kısmen de olsa uygulamaların ekonomik işlevlerine bağlıdır. Deponi gazları direkt yakma, havalandırma, türbin yakıtı, kimyasal madde üretimi, doğalgaz şebekesine enjeksiyon, araç yakıtı gibi seçeneklerden biri kullanılarak ekonomik olarak değerlendirilebilir (Özaktaç, 2004).

Ancak toplanan deponi gazının kullanılmadan önce arıtma işleminden geçirilmesi gerekebilmektedir. Deponi gazının arıtılması iki amaçla yapılır. İlki, deponi gazındaki kirleticiler, gazın son kullanımları amacıyla uzaklaştırılmalıdır. İkincisi ise, deponi gazını saf metan gibi doğal gaz kalitesine çıkarabilmektir. Kolay nem giderme işlemlerinden daha karmaşık olan ve doğal gaz hatlarına gaz vermek gibi temizleme işlemlerine kadar değişen, gaz arıtma seçeneklerinin bu iki ucu arasında birçok arıtma seçeneği mevcuttur.

Biyogazın depolama, kullanım ve taşınmasında problem oluşturan ana bileşenler H₂S, H₂O, CO₂ ve halojenlenmiş bileşiklerdir. Bu bileşikler düşük konsantrasyona sahip olsalar bile, bir kısmı insan sağlığı ve çevre için olumsuz etkiler oluşturdukları için kullanım öncesi giderilmeleri gerekir. Biyogaz içinde az miktarlarda da olsa yağ ve katı partiküller de bulunmaktadır. Uygun bir filtrenin kullanılması ile bu partiküller biyogazdan uzaklaştırılabilir (İlkılıç ve Deviren, 2011).

Deponi gazı hemen hemen %100 oranında su buharına doygundur. Deponi gazının toplanması ve işlenmesi sırasında sıcaklık değişimi nedeniyle su buharı yoğunlaşarak inorganik ve organik bileşikleri çözer ve bünyesine alır. Yoğuşma suları içeriklerine bağlı olarak patlayıcı, korozif ve toksik özellikler gösterir. Dolayısıyla suya doygun halde bulunan deponi gazını soğutmak ve yoğuşmuş suyu alıp kurutmak, hem toplama sisteminde olabilecek tıkanmalar hem de korozyon riski nedeniyle oldukça önemlidir (Özaktaç, 2004).

Yüksek konsantrasyonlarda sistemin inhibe olmasına neden olacağı için H₂S miktarı fazla olduğunda, ayrı bir kimyasal reaktörde H₂S giderimi daha uygun olmaktadır (Ter Maat vd.; 2005). H₂S'in giderilmesi için kullanılan yöntemler aşağıda verilmiştir:

Biyogazın içine O2 veya hava verilmesi,
Besleme materyaline demir klorür katılması,
Demir talaş içerisinden biyogazın geçirilmesi,
Demir oksit paletlerden biyogazın geçirilmesi,
Aktif karbon kullanılması,
Su ile temizleme,
Sodyum hidroksit ile temizleme,
Biyolojik desülfürizasyon (İlkılıç ve Deviren, 2011).

Biyogazın içindeki karbondioksitin giderilmesi veya temizlenmesi, biyogazın zenginleştirilmesi anlamına gelmektedir. Biyogaz içindeki CO2 miktarı metandan sonra biyogazın en yüksek bileşenini oluşturur. Bu nedenle CO2 biyogazın enerji seviyesini düşürür ve enerji seyreltici olarak adlandırılır. Biyogazın doğal gaz veya otomobil yakıtı olarak kullanılabilmesi için içindeki CO2 miktarının belli bir seviyenin altına düşürülmesi gerekmektedir. Biyogaz içerisindeki CO2 gazının giderilmesinde ise genellikle dört metot kullanılmaktadır:

Su ile temizleme,
Polietilen glikol ile absorblama,
Karbon moleküler elek kullanma,
Membranla ayırma (İlkılıç ve Deviren, 2011).

Bu yöntemlerden uygun olanı seçilerek gazın kalitesi yükseltilmelidir.

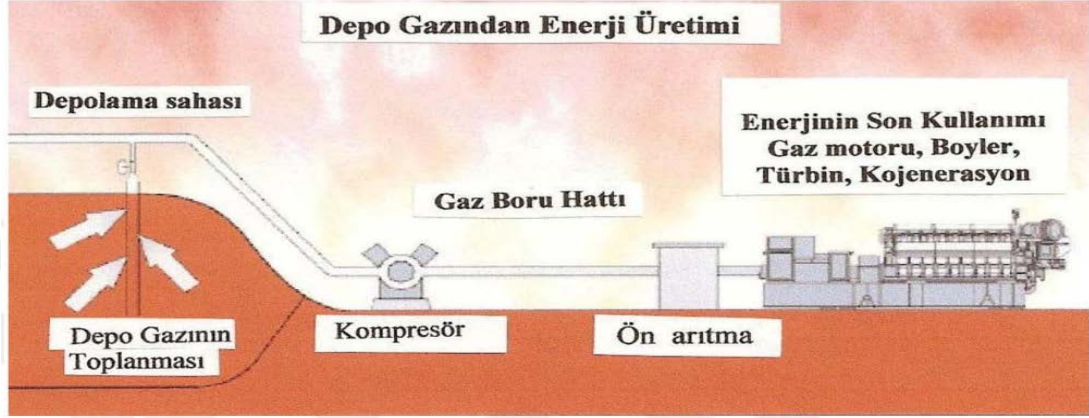
3.1. Deponi Gazı Kullanım Seçenekleri

Deponi alanlarından toplanan metan çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. Hangi alternatifin kullanılacağına seçimi ilk olarak saha ve çevresindeki alandaki enerji ihtiyaçlarına bağlıdır. Bu gereksinimler saptandıktan sonra en cazip seçenekler, tesiste üretilebilecek gazın miktarına ve kalitesine elverişli olanlardır (Polat, 2010).

Metanın yalnızca %25 üzerindeki konsantrasyonları enerji üretimi için değerlidir. Deponi gazı farklı şekillerde kullanılabilir. Örneğin; kazan yakıtı olarak proses ısıtmada ve elektrik üretiminde kullanılabilir. Doğal gaz kalitesine (boru hattı

kalitesi) saflaştırıldıktan sonra bir şehrin doğal gaz dağıtım şebekesine enjekte edilebilir ve kimyasal madde üretimi gerçekleştirilebilir (Polat, 2010; Mohamed, 2017).

Şekil 3.1' de deponi gazından enerji üretim sisteminin genel şekli verilmiştir.



Şekil 3.1. Deponi gazından enerji üretim sistemi (Mohamed, 2017).

Bölgesel kullanım

Geri kazanılan gazdan yararlanmak amacıyla uygulanabilecek en kolay alternatif bölgesel kullanımdır. Bu amaçla ortam ısıtma/soğutma, endüstriyel kazanlarda kullanım ve endüstriyel ısıtma/ortak yakma şeklinde kullanılabilir. Deponi gazın direkt yakma yöntemiyle tuğla fırınlarında, endüstriyel kazanlarda ya da çimento fırınlarında kullanılabileceği gibi seraları ısıtma amacıyla da yararlanılabilir (Mohamed, 2017).

Bu metot, deponi gazının gaz toplama noktasından gaz kullanım noktalarına bir boru hattıyla iletilmesi esasına dayandığı için burada en önemli nokta işletme ve boru maliyetlerini olabildiğince minimum düzeye indirmek amacıyla kullanıcıların deponi sahasına yakın mesafede olmalarıdır. Gaz kullanıcıya iletilmeden önce belli bir miktarda temizlenmelidir. Basit seviyede temizlenen bu gaz ortalama olarak %55 oranında metan içerir. Bu düzeydeki metan konsantrasyonundan motorlar ve kazanlar dahil birçok ekipmanda yararlanılabilir (Polat, 2010).

Bu metodun uygulanabilirliğini ele almak amacıyla gazı kullanıcıya iletmek için ihtiyaç duyulan boru hattı uzunluğunun yaklaşık olarak belirlenmesi gerekir.

Yukarıda da tartışıldığı üzere 3 km'yi aşan mesafeler ekonomik açıdan uygun değildir. Ayrıca boru hattı kurulumuna uygun bir yol bulunmalıdır. Aşırı engebeli araziler veya nehirler boru hattı inşasını maliyetli duruma getirebilir (Polat, 2010; Mohamed, 2017).

Elektrik üretimi

Deponi alanı şartları nedeniyle direk yakmanın yapılamadığı hallerde deponi gazının ekonomik olarak değerlendirilmesi amacıyla en elverişli çözümlerden biri de oluşan gazdan elektrik üretilmesidir.

Bölgesel elektrik şebekesi üzerinden dağıtılmak ya da sahadaki gereksinimlerde kullanılmak üzere üretilen elektrik için üretim yönteminin seçilmesinde öngörülen gaz debisi oldukça önemli bir parametredir. Elektrik üretimi için çeşitli yöntemler bulunmakla birlikte en sık yararlanılanları gaz türbinleri ve içten yanmalı motorlardır. İçten yanmalı motorlar gaz türbinlerine göre daha düşük gaz debilerinde çalışabilmektedir. Bu nedenle yalnızca büyük deponi sahalarında gaz türbinleri elverişlidir. Buna ek olarak gaz türbinleri içten yanmalı motorlara oranla daha sürekli çalışma gereksinimi göstermekte haliyle gün içerisindeki elektrik yükü değişimlerini tolere etmek amacıyla kapatılıp açılması elverişli olmamaktadır. Özetle; gaz türbinleri elektrik şebekesini durmadan destekleyecek tarzda çalışmakta olup bölgesel elektrik şebekesine verilmek üzere elektrik üretimi için elverişlidir. İçten yanmalı motorlar ise basit bir şekilde kapatılıp açılabilir. Dolayısıyla aralıklı güç gereksinimleri için daha elverişli olmasıyla beraber bölgesel elektrik şebekeleri için de uygundur (Polat, 2010; Coşkun, 2015).

İçten yanmalı motorlar, deponi gazı uygulamalarında en sık kullanılan dönüşüm teknolojisi olup kapasiteleri 30-2000 kilowatt (kW) arasında değişim göstermektedir. Deponi alanlarında kullanılanlar ise genellikle 700 kW-1,4 MW kapasitesindedir. İçten yanmalı motorlar makul maliyetli teknolojiler olup özellikle düşük üretim potansiyellerine karşı esnek olmaları, küçük deponi alanları için onları tek seçenek durumuna getirmiştir. Birçok içten yanmalı motor, geri kazanım projesi başlatılırken temin edilip daha sonraları gaz oluşumu azaldıkça devreden çıkarılabilir ya da kullanılabilir alternatif alanlara taşınabilir (Polat, 2010).

Gaz türbinleri kullanımının ekonomik olabilmesi için içten yanmalı motorlara göre daha fazla debide gaza ihtiyaç duymakta, dolayısıyla nispeten daha büyük deponi alanlarında kullanılmaları elverişlidir. Kapasiteleri 500 kW-10 MW arasında olmakla birlikte deponi alanlarında genel olarak 2-4 MW kapasitesindedir (Polat, 2010).

Boru hattına verme

Deponi gazı, boru gazı kalitesinde saflaştırılarak doğal gaz hattına verilebilmekte ya da bu kalitedeki gazdan taşıt yakıtı olarak yararlanılabilmektedir. Deponi gazı çoğu ülkede yalnızca çöp kamyonlarında yakıt olarak kullanılmaktadır. Nedeni ise, deponi gazı yakıt olarak kullanılmak istendiğinde; doğal gaz kalitesine getirilmesi, taşıtların doğal gaz ile çalışmaya modifiye edilmesi ve bu taşıtlar için yakıt istasyonlarının yapılması gibi çeşitli zorluklar içermesidir (Mohamed, 2017).

Deponi gazı sahalarının doğal gaz boru hatlarına yakın olduğu hallerde deponi gazını boru hattına vermek elverişli bir alternatif olabilmektedir. Gaz nakleden bir boru hattı yakınlardaysa, gazı enjeksiyon etmeden önce istenilen gaz kalitesine göre gaz işlemeye ihtiyaç duyulabilir. Gazın boru hattı basıncına kadar sıkıştırılması da boru hattına vermede göz önünde bulundurulması gereken bir konudur. Orta kalitede ya da yüksek kalitede gaz, istenilen saflıkta metan haline getirilene kadar saflaştırılarak güvenlik amacıyla da bir takım koku veren bileşikler eklenerek doğal gaz boru hatlarında kullanılabilir. Ancak deponi gazının her iki durumda bu yöntemlerde kullanılması ekonomik değildir. Dolayısıyla çok büyük deponi sahalarında bu yöntem ekonomik olabilmektedir (Polat, 2010; Coşkun, 2015).

4. DEPONİ GAZINDAN ENERJİ ÜRETİLMESİ

4.1. Türkiye’de Deponi Gazından Enerji Üretimi

Toplam enerji üretim oranı içinde biyokütleden ileri gelen enerjinin miktarı oldukça düşük olan Türkiye’de; 2019 yılı Temmuz ayı itibariyle biyokütleden üretilen enerji, toplam enerji üretiminin yalnızca % 0,88’ini oluşturmaktadır. Temmuz 2019 döneminde lisanslı elektrik üretimi, kaynak bazında Çizelge 4.1’de verilmiştir (EPDK, 2019).

Çizelge 4.1 Türkiye geneli lisanslı elektrik üretiminin kaynak bazında dağılımı (EPDK, 2019).

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

Enerji piyasası Düzenleme Kurumundan elde edilen 2019 yılı temmuz ayı verilerine göre Türkiye’ de enerji tesislerinin toplam kurulu gücü 84.557,76 MW iken, biyokütle enerji tesislerinin toplam kurulu gücü yalnızca 623,09 MW olup biyokütle enerji tesislerinin kurulu gücünün toplam enerji tesislerinininkine oranı % 0,74’tür (EPDK, 2019). Ayrıca 2019 yılı ilk yarısı itibariyle elektrik üretim santrali sayısı lisanssız santraller dahil 7.957’ye çıkmıştır. Bu santrallerden 67 tanesi kömür, 48 tanesi jeotermal, 664 tanesi hidroelektrik, 327 tanesi doğal gaz, 257 tanesi rüzgar, 6.349 tanesi güneş, 245 tanesi ise diğer kaynaklı santrallerdir (URL-1).

Biyokütle enerji santrallerinin tarihi oldukça yeni olan Türkiye’de bahsi geçen santrallerden ilki 2004 yılında İstanbul’ da kurulmuştur. 2019 yılı Kasım ayı itibariyle ise Türkiye genelinde 78 adet santral devrededir (URL-2). Çizelge 4.2’ de

bu santraller ve özellikleri verilmiş olup parantez içindeki değer, tesisin inşa aşamasındaki kısmı da tamamlandığında ulaşılabilecek toplam kurulu gücü ifade eder.

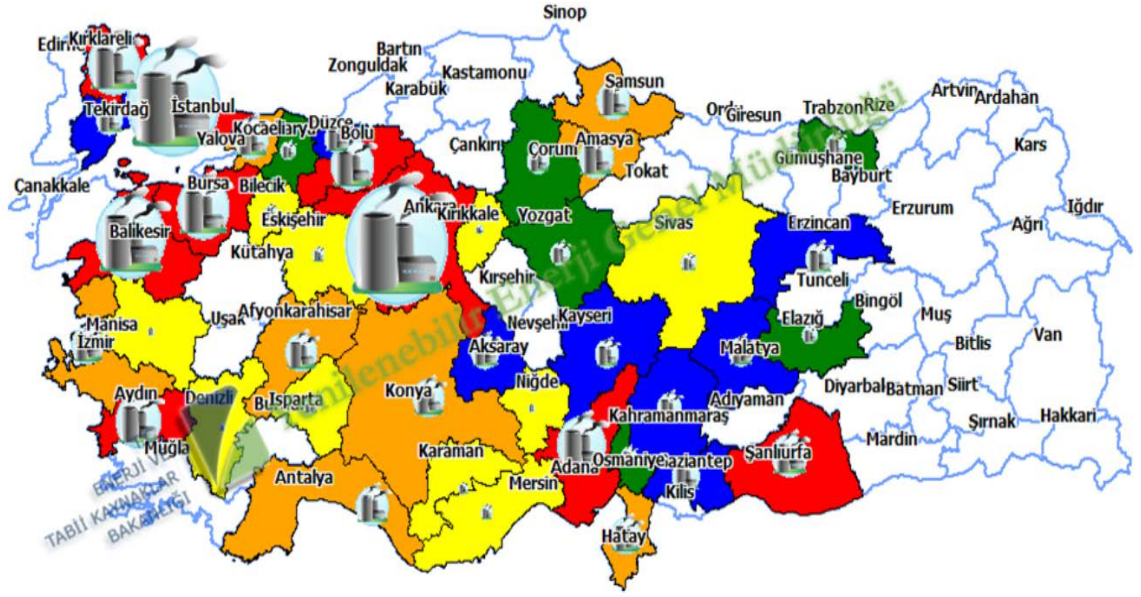
Çizelge 4.2 Türkiye’deki biyokütle enerji santralleri (URL-2).

No	Santral Adı	Bulunduğu İl	Kurulu Güç
1	Odayeri Çöp Gazı Santrali	İstanbul	34 MW
2	Kömürçüoda Çöplüğü Biyogaz Santrali	İstanbul	14 MW
3	Hasdal	İstanbul	4,02 MW
4	Kemberburgaz Çöplüğü Biyogaz Santrali	İstanbul	0,98 MW (5.826 MW)
5	Mamak Çöplüğü Biyogaz Tesisi	Ankara	25 MW (36 MW)
6	Çadırtepe Biyokütle Santrali	Ankara	23 MW
7	ITC-KA Sincan Biyokütle Gazlaştırma Tesisi	Ankara	11 MW
8	Belka Çöp Gazı Biyogaz	Ankara	3,20 MW
9	Albe Biyogaz Santrali	Ankara	3,20 MW
10	Polatlı Biyogaz Tesisi	Ankara	1,47 MW
11	Beyazırma Biyogaz Tesisi	Ankara	0,79 MW (2.379 MW)
12	Tire Biyogaz Tesisi	İzmir	4,27 MW
13	Tire Biyogaz Elektrik Santrali	İzmir	1,20 MW (4.8 MW)
14	Sofulu Çöplüğü Biyogaz Santrali	Adana	16 MW
15	Pakmil Biyokütle Santrali	Adana	1,76 MW
16	ITC Antalya Biyokütle Santrali	Antalya	14 MW
17	Manavgat Çöp Gazı Santrali	Antalya	3,60 MW
18	Sezer Bio Enerji	Antalya	0,50 MW
19	Afyon Hayvansal Atık Biyogaz Santrali	Afyonkarahisar	8,40 MW
20	Afyon Biyogaz Enerji Santrali	Afyonkarahisar	4,02 MW
21	Arel Enerji Biyokütle Tesisi	Afyonkarahisar	2,40 MW
22	Sandıklı Biyokütle Elektrik Üretim Tesisi	Afyonkarahisar	1,40 MW
23	Aksaray OSB Gübre Gazı Elektrik Santrali	Aksaray	6,40 MW
24	Aksaray Çöp Gazı Elektrik Santrali	Aksaray	1,42 MW
25	Yapılcanlar Biyogaz Enerji Santrali	Aksaray	1,07 MW
26	Amasya Çöp Gazı Elektrik Üretim Santrali	Amasya	1,20 MW (2.4 MW)
27	Sigma Suluova Biyogaz Tesisi	Amasya	1,00 MW (2 MW)
28	Senkron Efeler Biyogaz Santrali	Aydın	3,60 MW (4.8 MW)
29	Mavi Bayrak Biyokütle Enerji Santrali	Aydın	2,50 MW (12 MW)
30	Bağfaş Gübre Fabrikası Biyogaz Santrali	Balıkesir	9,92 MW
31	Gönen Biyogaz Tesisi	Balıkesir	3,62 MW
32	Mauri Maya Bandırma Biyogaz Santrali	Balıkesir	2,33 MW
33	Bandırma Edincik Biyogaz Santrali	Balıkesir	2,13 MW
34	Biosun Bilecik Kojenerasyon Enerji Santrali	Bilecik	1,6 MW
35	Bolu Çöplüğü Biyogaz Santrali	Bolu	1,13 MW
36	Hamitler Çöplüğü Biyogaz Santrali	Bursa	9,80 MW
37	Karacabey Biyogaz Tesisi	Bursa	6,40 MW
38	Nisa Biyokütle Elektrik Üretim Tesisi	Bursa	5,48 MW
39	Cargill Tarım Bursa Bioenerji Santrali	Bursa	0,12 MW
40	Çorum Mecitözü Biyokütle Enerji Santrali	Çorum	5,00 MW
41	Pir Enerji Düzce Biyogaz Santrali	Düzce	4,26 MW (6.393 MW)
42	Kumkısık Çöplüğü Biyogaz Santrali	Denizli	0,64 MW
43	ITC-KA Elazığ Çöp Gazı Santrali	Elazığ	2,83 MW
44	Eses Enerji Biyogaz Santrali	Eskişehir	2,04 MW
45	Gaziantep Çöp Gazı Santrali	Gaziantep	5,66 MW
46	İskenderun Çöp Gazı Elektrik Üretim Tesisi	Hatay	4,24 MW
47	Hatay Gökçeğöz Çöp Santrali	Hatay	4,24 MW
48	Arel Isparta Çöp Gazı Santrali	Isparta	2,83 MW

Çizelge 4.2 (Devamı) Türkiye’deki biyokütle enerji santralleri (URL-2).

No	Santral Adı	Bulunduğu İl	Kurulu Güç
49	Eman Enerji Karaman Biyokütle Enerji Santrali	Kahramanmaraş	0,95 MW
50	Karaman Biyogaz Tesisi	Karaman	1,41 MW
51	Kayseri Çöplüğü Biyogaz Elektrik Santrali	Kayseri	5,78 MW
52	Kırıkkale Çöp Gazı Enerji Santrali	Kırıkkale	1,00 MW
53	Vesmec Çöp gazı Santrali	Kırklareli	1,20 MW
54	Kocaeli Çöplüğü Biyogaz Santrali	Kocaeli	6,51 MW
55	Dilovası Çöp Biyogaz Santrali	Kocaeli	2,13 MW
56	Kartepe Biyokütle Enerji Santrali	Kocaeli	1,00 MW (1.5 MW)
57	Hayat Biyokütle Elektrik Üretim Santrali	Kocaeli	0,96 MW
58	Solaklar İzaydaş Çöp Gazı	Kocaeli	0,33 MW
59	Konya Aslım Çöplüğü Elektrik Üretim Santrali	Konya	5,66 MW
60	Ekim Grup Gübre Gazı	Konya	1,20 MW
61	Malatya 1 Çöp Gaz Elektrik Üretim Tesisi	Malatya	4,00 MW
62	Malatya BŞB Çöp Gazı Elektrik Üretim Santrali	Malatya	1,20 MW (2.4 MW)
63	Eman Enerji Mersin Biyokütle Enerji Santrali	Mersin	6,02 MW
64	Eman Enerji Silifke Biyokütle Enerji Santrali	Mersin	1,20 MW
65	Mas 1 Yenilenebilir Enerji Üretim Tesisi	Niğde	2,40 MW
66	Atlas İnşaat Osmaniye Çöp Gazı Santrali	Osmaniye	3,12 MW
67	Karma Gıda Biyogaz Santrali	Sakarya	1,49 MW
68	Pamukova Katı Atık Biyogaz Santrali	Sakarya	1,40 MW
69	Avdan Biyogaz Tesisi	Samsun	6,00 MW
70	Samsun Çarşamba Çöp Gazı Santrali	Samsun	1,42 MW
71	Sivas Biyokütle Elektrik Üretim Tesisi	Sivas	2,82 MW
72	Şanlıurfa Biyokütle Enerji Santrali	Şanlıurfa	6,24 MW
73	Doğal enerji Biyokütle Enerji Santrali	Şanlıurfa	0,82 MW (5.2 MW)
74	Modern Biyokütle Enerji Santrali	Tekirdağ	6,00 MW
75	Tokat Çöp gazı Elektrik Üretim Santrali	Tokat	2,30 MW
76	Trabzon Rize Çöp Gazı Santrali	Trabzon	4,24 MW
77	Uşak Çöp Gazı Enerji Santrali	Uşak	1,20 MW
78	Itc-Ka Yozgat Enerji Üretim Tesisi	Yozgat	4,24 MWe

Şekil 4.1’de Türkiye genelindeki biyokütle enerji santralleri gösterilmektedir (URL-3). Türkiye Biyokütle Enerjisi Atlası (BEPA), ‘‘Türkiye’nin neresinde hangi biyokütle kaynağından ne kadar elektrik ne kadar biyoyakıt üretme potansiyeli olduğunu, bu kaynakların ülkenin hangi yörelerinde yoğunlaştığını harita üzerinde grafiksel ve sayısal ifadeler ile dinamik olarak sunabilen CBS uygulamasıdır’’. BEPA uygulaması kullanılarak il ve ilçe bazında biyokütle enerjisi potansiyeli işlemleri ortaya konabilir (URL-4).



Şekil 4.1 Biyokütle kaynaklı lisanslı elektrik üretim santralleri (URL-3).

4.2. Deponi Gazı Kullanımının Ekonomik Yararları

Yenilenebilir enerji sınıfında gittikçe ucuzlayan bir kaynak halini alan deponi gazından elektrik üretiminin avantajları diğer teknolojilerle kıyaslandığında aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Deponi alanında meydana gelen gaz kullanıldığından yakıt maliyeti olmaz. Dolayısıyla doğal gazın aksine, yakıt için döviz harcamaları da olmaz.
- Çevreye net etkisi deponi alanında gaz yayılımını azalttığından pozitiftir.
- Deponi alanında üretim mevsimden mevsime önemli ölçüde değişmez. Bir santralin ne oranda verimli kullanıldığını gösteren ve santralin ful kapasite çalışma süresinin birim zamana (genel olarak 1 yıl alınır) oranı olan kapasite faktörü ise %90 dolaylarındadır. Örnek olarak rüzgar santrallerinde kapasite faktörü %30' dan düşüktür ve üretim gün içerisinde saatten saate değişiklik gösterir.
- Deponi gazı santralleri şehirlere birkaç kilometre uzaklıkta olduğundan şebeke bağlantıları da kısa olur. Bu durum enerji kayıplarını ve maliyeti azaltmaktadır.
- Yakıt giderlerinin yokluğu ve kapasite faktörü dolayısıyla diğer teknolojilerin birçoğundan daha ekonomiktir (Özaktaç, 2004).

4.3. Deponi Gazından Enerji Üretimi Örnek Uygulamaları

Türkiye’ de bulunan bazı tesisler ve özellikleri aşağıda açıklanmıştır.

➤ İstanbul Odayeri Çöp Gazı Santrali

Şekil 4.2’de verilen Türkiye’nin en büyük Biyogaz Tesisi olan Odayeri Çöp Gazı Santrali, İstanbul’un Eyüp İlçesi Odayeri bölgesinde bulunmaktadır. 33,81 MWe kurulu gücüyle Türkiye’nin 334. İstanbul’un ise 7. büyük enerji santrali durumundadır. Tesis ayrıca Türkiye'nin en büyük Biyogaz Tesisi’dir. Tesis ortalama 296149,320 MWh (2016 üretimi 300 GWh ve İl tüketimine oranı %0,67) elektrik üretimiyle 68.273 kişinin; sanayi, konut, resmi daire, metro ulaşımı gibi günlük hayatta gereksinim duyduğu elektrik enerjisine yetebilmektedir. Santral yalnızca konut elektrik tüketimi bazında ele alındığında ise 71.741 konutun elektrik enerjisini karşılayabilmektedir (URL-2, URL-5).



Şekil 4.2 Odayeri deponi gazından enerji tesisi (Aydın, 2013).

➤ İstanbul Kömürcüoda çöplüğü deponi gazından enerji tesisi

Şekil 4.3’de verilen Türkiye’nin 7. büyük Biyogaz Tesisi olan Kömürcüoda Çöp Gazından Enerji Santrali, İstanbul Şile İlçesi Kömürcüoda Sahası’nda bulunmaktadır. 16,98 MWe kurulu gücüyle Türkiye’nin 559. İstanbul’un ise 10. büyük enerji santrali durumundadır. Tesis ortalama 148.744,800 MWh (2015 üretimi 88 GWh ve İl tüketimine oranı %0,2) elektrik üretimiyle 27.633 kişinin; sanayi, konut, resmi daire, metro ulaşımı gibi günlük hayatta gereksinim duyduğu elektrik enerjisine yetebilmektedir. Santral yalnızca konut elektrik tüketimi bazında ele

alındığında ise 29.036 konutun elektrik enerjisini karşılayabilmektedir (URL-2, URL-5).



Şekil 4.3 Kömürçüoda deponi gazından enerji üretim tesisi (Aydın, 2013).

➤ **Ankara Mamak Çöplüğü deponi gazından enerji tesisi**

Şekil 4.4'te verilen Türkiye'nin 3. büyük Biyogaz Tesisi olan Mamak Çöplüğü Biyogaz Santrali, Ankara'nın Mamak İlçesindedir. 25,43 MWe kurulu gücüyle Türkiye'nin 413. Ankara'nın ise 11. büyük enerji santrali durumundadır. Tesis ortalama 151.711.707 kWs elektrik üretimiyle 45.834 kişinin; sanayi, konut, resmi daire, metro ulaşımı gibi günlük hayatta gereksinim duyduğu elektrik enerjisine yetebilmektedir. Santral yalnızca konut elektrik tüketimi bazında ele alındığında ise 48.162 konutun elektrik enerjisini karşılayabilmektedir (URL-2).



Şekil 4.4 Mamak çöplüğü biyogaz santrali (Aydın, 2013).

➤ **Ankara Sincan çöplüğü deponi gazından enerji tesisi**

Şekil 4.5’de verilen Türkiye’nin 4. büyük Biyogaz Tesisi olan Sincan Çadırtepe Biyogaz Santrali, Ankara’nın Sincan İlçesindedir. 22,66 MWe kurulu gücüyle Türkiye’nin 451. Ankara’nın ise 13. büyük enerji santrali durumundadır. Tesis ortalama 78.466.953 kWs elektrik üretimiyle 23.706 kişinin; sanayi, konut, resmi daire, metro ulaşımı gibi günlük hayatta gereksinim duyduğu elektrik enerjisine yetebilmektedir. Santral yalnızca konut elektrik tüketimi bazında ele alındığında ise 24.910 konutun elektrik enerjisini karşılayabilmektedir (URL-2).



Şekil 4.5 Ankara Çadırtepe deponi gazından enerji tesisi (Aydın, 2013).

➤ Sofulu Çöplüğü Biyogaz Santrali

Şekil 4.6’da verilen Türkiye’nin 5. büyük Biyogaz Tesisi olan Sofulu Çöplüğü Biyogaz Santrali, Adana Yüreğir İlçesi Sofulu bölgesinde bulunmaktadır. 15,57 MWe kurulu gücüyle Türkiye’nin 564. Adana’nın ise 24. büyük enerji santrali durumundadır. Tesis ortalama 88.752.392 kWs elektrik üretimiyle 26.813 kişinin; sanayi, konut, resmi daire, metro ulaşımı gibi günlük hayatta gereksinim duyduğu elektrik enerjisine yetebilmektedir. Santral yalnızca konut elektrik tüketimi bazında ele alındığında ise 28.175 konutun elektrik enerjisini karşılayabilmektedir (URL-2).



Şekil 4.6 Sofulu Çöplüğü Biyogaz Santrali (Aydın, 2013).

➤ Hamitler çöplüğü deponi gazından enerji tesisi

Şekil 4.7’de verilen Türkiye’nin 11. büyük Biyogaz Tesisi olan Hamitler Çöplüğü Biyogaz Santrali, Bursa Osmangazi İlçesinde bulunmaktadır. 9,80 MWe kurulu gücüyle Türkiye’nin 721. Bursa’nın ise 16. büyük enerji santrali durumundadır. Tesis ortalama 75.477.311 kWs elektrik üretimiyle 22.803 kişinin; sanayi, konut, resmi daire, metro ulaşımı gibi günlük hayatta gereksinim duyduğu elektrik enerjisine yetebilmektedir. Santral yalnızca konut elektrik tüketimi bazında ele alındığında ise 23.961 konutun elektrik enerjisini karşılayabilmektedir (URL-2).



Şekil 4.7 Hamitler çöplüğü deponi gazından enerji tesisi (Aydın, 2013).

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. Sivas Düzenli Depolama Tesisinin Tanıtımı

Sivas Düzenli Depolama Tesisi (DDT); Sivas İli, Merkez İlçesi, Erzincan Karayolu 12. km yol ayrımını takiben 1,5 km' de Seyfebeli-Haçın Deresi mevkiinde 89 hektarlık mera sınıfı arazide bulunmaktadır. Sivas İli merkezine 15 km uzaklıkta olan DDT' nin kuzeyinde Sivas-Erzincan Karayolu, kuzey batısında organize sanayi bölgesi, güneyinde ise Kızılırmak bulunmaktadır. Deniz seviyesinden yüksekliği 1.323 m'dir. Şekil 5.1' de Sivas düzenli depolama tesisinin konumu verilmiştir. Sivas Merkez İlçesi ile birlikte Zara, Yıldızeli, Hafik, Doğanşar ve Ulaş ilçelerinin katı atıklarının da bu tesise nakledilmesi planlanmıştır (Derya Müh., 2006; Sivas Valiliği, 2017). Ancak tesis yetkililerinden alınan bilgiye göre henüz transfer istasyonları yapılmamıştır. Dolayısıyla Sivas DDT'nde şu an sadece Merkez İlçenin katı atıkları depolanmaktadır ve tesise her gün ortalama 350 ton evsel atık alınmaktadır.

Sivas DDT kademeli olarak inşa edilip, kademeler sedde ile ayrılmıştır. Dış seddeler kalıcı, ara seddeler geçicidir. Bu şekilde depo tabanının doğa şartlarından negatif yönde etkilenmesinin önlenmesi hedeflenmiştir. 3 kademeye ayrılmış olan tesiste; şu an 1. kademede depolama yapılmakta olup katı atık döküm sahasına ait fotoğraf Şekil 5.2'de verilmiştir. Sivas katı atık DDT'ne yönelik sayısal bilgiler ise tesis yetkililerinden alınan bilgilerle güncelleştirilerek aşağıda sunulmuştur.

Katı atık sahası alanı: 1. kademe 73722 m²
 2. kademe 66300 m²
 3. kademe 71000 m²

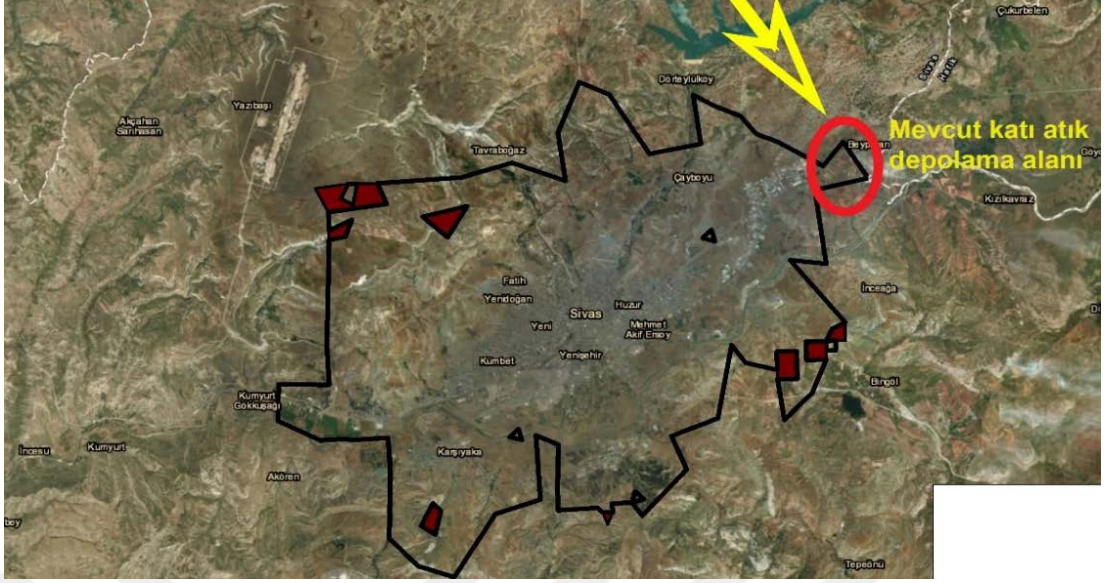
Katı atık sahası toplam depolama kapasitesi: 3.018.046 m³

İşletmeye alım tarihi: 2014

Kullanılmakta olan katı atık alanı: 1. kademe

Katı atık sahası kullanım ömrü: Her bir kademe için 5 yıl olup toplamda 15 yıldır.

(1. kademe + 2. kademe +3. kademe)



Şekil 5.1 Sivas düzenli depolama tesisi konumu (Ciritci ve Türk, 2019).



Şekil 5.2 Sivas 1. kademe katı atık döküm sahası

Sivas DDT' nde idari ve teknik hizmetlerin yürütüleceği bekçi binası, kantar binası ve platformu, tamir bakım atölyesi, idari bina, garaj, tekerlek yıkama ünitesi bulunmaktadır. Bunlara ek olarak yangın suyu ve içme suyu için bir depo, enerji dağıtım amacıyla trafo binası, atıksu için bir sızdırmaz fosseptik, enerji kesintisi halinde ise jeneratör bulunmaktadır. Tesiste katı atıklardan meydana gelen sızıntı suyunun toplanması için sızıntı suyu toplama havuzu ve sızıntı sularının geri çevrimi

için pompa haznesi bulunmaktadır. Katı atık kütesinde meydana gelen çöp gazı ise yatayda 12 m, dikeyde 8 m uzaklıktaki yatay borular vasıtasıyla toplanarak Sivas çöp gazı elektrik üretim tesisinde değerlendirilmektedir (Derya Müh., 2006). Katı atık döküm sahasının genel görünümü ve boru yerleşim planı Ek-1’ de verilmiştir.

5.2. Sivas Çöp Gazı Elektrik Üretim Tesisinin Tanıtımı

Sivas Çöp Gazı Elektrik Üretim Tesisi; Sivas DDT sahası içerisinde yer almaktadır. Nov Enerji Elektrik Üretim A.Ş tarafından işletilen ve 2015 yılında ilgili firmaya 15 yıllığına kiralanılan santral 2,82 MWe kurulu gücü ile Türkiye’nin 1197. Sivas İlinin ise 23. büyük enerji santralidir (Şekil 5.3) (URL-2).



Şekil 5.3 Sivas çöp gazı elektrik üretim tesisi

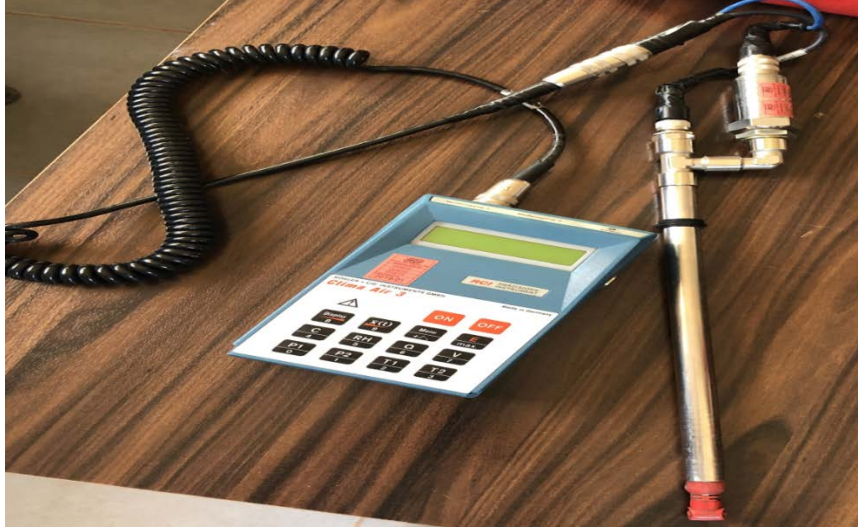
Tesiste, deponi alanından çekilen gazların toplandığı 9 tane ölçüm istasyonu bulunmaktadır (Şekil 5.4). Bu istasyonlarda haftada iki kez gaz ölçümleri yapılmakta, yapılan ölçümlerde deponi gazının bileşenlerini (CH_4 , CO_2 , O_2 , H_2S) saptamak amacıyla Geotech Biogas 5000 cihazı kullanılmaktadır (Şekil 5.5). Gazın basıncı, debisi, sıcaklığı ise Clima Air 3 cihazıyla ölçülmektedir (Şekil 5.6).



Şekil 5.4 Tesiste bulunan ölçüm istasyonları



Şekil 5.5 Tesiste kullanılan gaz ölçüm cihazı



Şekil 5.6 Clima Air 3 cihazı

İstasyonlarda toplanan gazlar, tüm istasyonların birleştirildiği ana hatta iletilmektedir. Ana hatta toplanan gaz; sülfür içerdiğinden ve sülfür gaz motorlarına zarar verdiğinden öncelikle sülfür tankında içerdiği sülfürden arındırılmaktadır (Şekil 5.7).



Şekil 5.7 Tesiste kullanılan sülfür tankı ve ana hat

Sülfürden arındırılan deponi gazı Chiller sisteminde soğutulmaktadır (Şekil 5.8). Chiller, gazın soğutulmasını sağlayan yüksek kapasiteli soğutma sistemidir. Gazın soğutulmasının nedeni; gaz vakumlama ile çekilirken ısınmaktadır ve bu durum gaz motorlarında korozyona neden olmaktadır. Chiller sisteminde, deponi gazı belirli bir sıcaklığa dek soğutulurken nemini salması sağlanır.



Şekil 5.8 Tesiste gaz soğutma amacıyla kullanılan Chiller sistemi

Belli bir seviyeye kadar temizlenen çöp gazı; son olarak gaz motorlarında yakılarak elektrik enerjisine çevrilmektedir. Trafo vasıtasıyla santralde 400 V olarak üretilen enerji yükseltilerek; enerji nakil hatları ile enterkonnekte sisteme verilmektedir.

Tesiste her biri 1.4 MW kapasiteli 2 adet gaz motor (Jenbacher J 420 GS model) ve jeneratör seti bulunmaktadır (Şekil 5.9). Gaz motorları 20 silindirli olup 4 zamanlı motor prensibi ile çalışmaktadır. Gaz motorlarına ait teknik özellikler ilerleyen bölümlerde Çizelge 6.5’de verilmiştir. Tesise gelen gazın fazla olması halinde, tesisin bakıma alınması halinde veya tesiste bulunan motorların arızalanması halinde; depolama alanından çekilen gaz, yakma bacasında yakılarak tahliye edilir. Böylece santralin çalışmaması durumunda bile çevreye çok zararı bulunan metan gazı direkt olarak doğaya verilmez ve emisyon değeri düşürülür.



Şekil 5.9 Tesiste kullanılan gaz motorları ve gaz yakma bacası

Tesiste elektrik üretimine ilk olarak 2015 yılında başlanılmış olup önceleri Seyfebeli vahşi depolama sahasından yararlanılmıştır. Sözü edilen vahşi depolama sahası 1999 yılında işletmeye alınmış ve 2014 yılında rehabilite edilerek yine aynı yıl düzenli depolamaya geçilmiştir. 2019 yılı Ekim ayında tesise yapmış olduğumuz ziyaretler esnasında tesis yetkililerinin vermiş olduğu bilgiye göre, tesiste günlük ortalama 55200 kW's elektrik üretilmektedir. 4 kişilik bir ailede yıllık ortalama enerji ihtiyacı 2,4 MW's olarak kabul edilmektedir (Yarıntepe, 2011). Buradan günlük enerji ihtiyacı yaklaşık 6,6 kW's bulunur. Buna göre tesisten yaklaşık 8364 hanenin ($55200 \text{ kW's} / 6,6 \text{ kW's} = 8364$) ya da 33.455 kişinin elektrik ihtiyacının karşılandığı tesis yetkilileri tarafından bildirilmiştir.

Yapılan tesis ziyaretlerine ilişkin diğer fotoğraflar Şekil 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 ve 5.14'de verilmiştir.



Şekil 5.10 Tesiste kullanılan sifonlar



Şekil 5.11 Deponi gazını ölçüm istasyonlarına götüren boru sistemleri



Şekil 5.12 Tesiste kullanılan trafolar



Şekil 5.13 Deponi gazı ölçümlerinin yapıldığı kapaklar



Şekil 5.14 Tesiste üretilen elektriğin enterkonnekte sisteme iletimini yapan direkler

5.3. Sivas'ta Evsel Katı Atık Miktarı ve Bileşimi

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Katı Atık Ana Planı 1. Aşama Kapsamında Sivas, Yıldızeli, Zara, Ulaş, Doğanşar ve Hafik Belediyelerinin katılımıyla SİVÇEKAB, Sivas Merkez ve Çevre Belediyeler Katı Atık Yönetim Birliği kurulmuştur. Sivas Merkez İlçe ve birliğin içinde olan tüm belediyelerin evsel katı atıkları transfer istasyonları inşa edildikten sonra Sivas DDT'nde depolanacaktır. Ancak henüz transfer istasyonları inşa edilmemiştir (Sivas Valiliği, 2018). Dolayısıyla sadece Merkez ilçenin katı atıkları Sivas DDT'nde depolanmaktadır. 3 kademe şeklinde planlanan DDT'inde halen ilk kademe kullanılmakta olup kapasitesi yaklaşık

1.000.000 m³ tür. Kapasite olarak yaklaşık %92'si dolmuş olan 1. kademenin tamamen dolmasıyla birlikte diğer iki kademe inşa edilecektir. 2014 yılı itibariyle işletmeye alınan Sivas DDT' nin 2029 yılına kadar toplam 3.018.046 m³ atık depolayabilecek kapasitede olması planlanmaktadır. Düzenli depolama metodu uygulanan tesiste ön işlem olarak mekanik ayırma yapılmakta diğer biyokurutma, kompost gibi ön işlemler ya da yakma işlemi yapılmamaktadır. Deponi alanında 1. kademenin %92'lik kısmı dolduğundan üzeri tamamen kapatılmıştır. Kullanımda olan %8'lik kısımda ise, 24 saat boyunca sahaya çöp araçları giriş yaptığından bu alan kapatılmamaktadır. Dolayısıyla günlük örtü tabakası kullanılmamaktadır. Toplama havuzunda toplanan katı atık sızıntı sularının buharlaştırılarak azaltılması ve deponi gövdesindeki biyokimyasal tepkimenin hızlandırılması amacıyla tesiste sızıntı suları katı atık alanı yüzeyine resirküle edilmektedir.

Sivas İlinde 2017 yılında yaz aylarında günlük yaklaşık 350 ton, kış aylarında ise günlük yaklaşık 340 ton katı atık oluşmaktadır. Kişi başına üretilen ortalama katı atık miktarı ise yaz aylarında 0,95 kg/gün, kış aylarında ise 0,94 kg/gün' dür. Sivas ili ve birliğe dahil olan ilçe belediyelerinin katı atıklarına ilişkin ayrıntılı bilgiler Çizelge 5.1' de verilmiştir (Sivas Valiliği, 2018).

Çizelge 5.1 Sivas İlinde 2017 yılında toplanan belediye atıkları (Sivas Valiliği, 2018).

Belediye veya Birliğin Adı	Belediye/ Birlik ise Birliğe Dahil Belediyeler	Nüfus		Toplanan Ort. Katı Atık Miktarı (ton/gün)		Kişi Başı Üretilen Ort. Katı Atık Miktarı (kg/gün)	
		Yaz	Kış	Yaz	Kış	Yaz	Kış
Sivas		365.135	365.135	348,5	346,8	0,95	0,94
SİVÇEKAB	Zara	21.857	21.857				
	Hafik	9.091	9.091				
	Ulaş	8.666	8.666				
	Yıldızeli	34.860	34.860				
	Doğanşar	2.914	2.914				
VADİKAB (Bu 4 ilçede birliğe dahildir)	Koyulhisar	12.194	12.194				
	Gölova	3.047	3.047				
	Suşehri	25.098	25.098				
	Akıncılar	4.872	4.872				
GAŞKAB	Gemerek	22.338	22.338				
	İmranlı	7.115	7.115				
	Kangal	21.484	21.484				
	Altınyayla	9.562	9.562				
	Divriği	15.721	15.721				
	Gürün	18.842	18.842				
	Şarkışla	37.411	37.411				
İl Geneli		620.207	620.207				

Çizelge 5.2’de Sivas ilinde belediyeler vasıtasıyla toplanan atık miktarları TÜİK verilerinden yararlanarak verilmiştir (URL-6).

Çizelge 5.2 Yıllara göre Sivas İlinde toplanan belediye atık miktarları (URL-6).

Yıl	Belediye Atık Miktarı (ton/yıl)
2001	298426
2002	312672
2003	310344
2004	320361
2006	264032
2008	206976
2010	182945
2012	206397
2014	185401
2016	205568
2018	193399

Sivas İline ait atık kompozisyonları yaz ve kış dönemlerinde atık miktarlarının farklılık gösterebileceği düşünüldüğünden ayrı ayrı ele alınmıştır. Bu durumda atık miktarları için ortalama bir değer öngörebilmek amacıyla Sivas Belediyesi

yetkililerinden temin edilen 2017, 2018 ve 2019 yıllarına ait yaz ve kış dönemlerini yansıtan veriler, Çizelge 5.3 ve 5.4' de sunulmuş ve bu dönemlere ait ortalama değerler hesaplanmıştır. Yaz ve kış dönemlerine ait ortalama değerler hesaplandıktan sonra 3 yıllık ortalama değerler ise Çizelge 5.5' de hesaplanıp elde edilen veriler Sivas ili katı atık karakterizasyon oranları olarak bu çalışmada kullanılmıştır.

Çizelge 5.3 Sivas ili katı atık karakterizasyonu 2017, 2018, 2019 yaz dönemi sonuçları (Sivas Belediyesi, 2019).

Katı Atık Bileşeni	2017 (%)	2018 (%)	2019 (%)	Ortalama (%)
Mutfak atıkları	39,9	38,8	39,9	39,5
Kağıt	5,2	4,8	3,9	4,6
Karton	4,6	4,3	4,1	4,3
Hacimli karton	8,9	8,3	6,1	7,7
Plastik	12,8	12,7	11,1	12,2
Cam	10,4	11,9	12,4	11,5
Metal	7,3	7,5	3,8	6,2
Hacimli metal	2,0	2,1	2,3	2,1
Atık elektrik ve elektronik ekipman	-	-	-	-
Tehlikeli atık	-	-	-	-
Park ve bahçe atıkları	2,0	2,0	5,1	3,0
Diğer yanmayanlar (kül)	-	-	-	-
Diğer yanabilenler	3,2	3,7	3,9	3,6
Diğer yanabilir hacimli atıklar	3,3	3,6	4,1	3,7
Diğer yanmayan hacimli atıklar	1,0	1,0	3,4	1,8

Çizelge 5.4 Sivas ili katı atık karakterizasyonu 2017, 2018, 2019 kış dönemi sonuçları (Sivas Belediyesi, 2019).

Katı Atık Bileşeni	2017 (%)	2018 (%)	2019 (%)	Ortalama (%)
Mutfak atıkları	32,3	31,6	33,5	32,5
Kağıt	0,4	0,6	0,6	0,5
Karton	0,3	0,5	0,5	0,4
Hacimli karton	10,0	9,1	9,0	9,4
Plastik	13,3	12,2	9,0	11,5
Cam	10,0	11,0	13,0	11,3
Metal	0,4	0,4	0,0	0,3
Hacimli metal	1,2	1,0	0,1	0,8
Atık elektrik ve elektronik ekipman	-	-	-	-
Tehlikeli atık	-	-	-	-
Park ve bahçe atıkları	-	-	-	-
Diğer yanmayanlar (kül)	9,9	6,3	6,0	7,4
Diğer yanabilenler	11,5	13,0	13,3	12,6
Diğer yanabilir hacimli atıklar	10,5	10,3	9,5	10,1
Diğer yanmayan hacimli atıklar	0,3	3,8	3,4	2,5

Çizelge 5.5 Sivas ili katı atık karakterizasyonu (2017, 2018, 2019 sonuçları)

Katı Atık Bileşeni	Yaz Ort. (%)	Kış Ort. (%)	Üç Yıllık Ortalama Değer (%)
Mutfak atıkları	39,51	32,45	35,98
Kağıt	4,61	0,53	2,57
Karton	4,33	0,42	2,37
Hacimli karton	7,74	9,38	8,56
Plastik	12,21	11,48	11,85
Cam	11,55	11,32	11,43
Metal	6,17	0,26	3,21
Hacimli metal	2,11	0,76	1,43
Atık elektrik ve elektronik ekipman	-	-	-
Tehlikeli atık	-	-	-
Park ve bahçe atıkları	3,04	-	3,04
Diğer yanmayanlar (kül)	-	7,36	7,36
Diğer yanabilenler	3,57	12,58	8,08
Diğer yanabilir hacimli atıklar	3,66	10,08	6,87
Diğer yanmayan hacimli atıklar	1,79	2,46	2,13

5.4. Sivas Deponi Gazı Modelleme Çalışmasına Yönelik Değerlerin Hesaplanması

5.4.1. Nüfus Tahmini

Sivas DDT; 2014 yılında işletmeye alınmış olup 15 yıl hizmet vermek üzere projelendirilmiştir. 15 yıllık süreçte oluşacak ve depolanacak atık miktarının saptanmasında en önemli değişkenlerden biri de nüfus değişimidir. Dolayısıyla 2014'ten 2029 yılına dek oluşacak atık miktarının tayin edilebilmesi için bu yıllar arasındaki nüfusun da belirlenmesi gerekir.

Bu amaçla öncelikle nüfus projeksiyonları oluşturulmuştur. Çizelge 5.6' da TÜİK verilerinden yararlanılarak oluşturulan Sivas Merkez ilçesinin geçmiş yıllara ait nüfus bilgileri verilmiştir (URL-7).

Çizelge 5.6 Sivas Merkez ilçesinin geçmiş nüfus verileri (URL-7).

Yıllar	Nüfus
1990	270.329
2000	299.935
2007	335.002
2008	329.011
2009	338.728
2010	354.913
2011	345.762
2012	346.629
2013	348.623
2014	351.431
2015	359.219
2016	365.135
2017	372.300
2018	377.561

Bu çalışmada gelecek nüfus tahmininde, Türkiye'de kanalizasyon, katı atık, içme suyu, arıtma gibi her çeşit kentsel alt ve üst yapı hizmetlerine ilişkin plan proje hazırlayan, ilgili konularda kontrollük ve danışmanlık hizmeti veren, bu yatırımların gerçekleşmesine yönelik kredi temin eden bir kurum niteliğinde olan İller Bankası aracılığıyla kullanılan bir projeksiyon yöntemi olan İller Bankası metodundan yararlanılmıştır. Geometrik artış esası gereğince artışın sınırlandırıldığı yöntemde artış hızı çoğalma katsayısı ile gösterilmektedir. 'Ç' ile belirtilen çoğalma katsayısı aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\zeta = [(N_{\text{son}} / N_i)^{1 / (t_{\text{son}} - t_i)} - 1] \cdot 100 \quad [5.1]$$

Bu denklemde;

ζ = Çoğalma katsayısı,

N_i = ilk nüfus değeri

N_{son} = Son nüfus değeri

t_i = N_i nüfusunun gösterdiği yıl

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

olarak verilmektedir.

Gelecekteki nüfusu tahmin edilecek belde veya şehrin, geçmiş nüfus sayımlarından alınan verilere göre beşer yıllık aralıklarla çoğalma katsayıları bulunmaktadır. Proje alanına ait geçmiş nüfus verileri Çizelge 5.6' da verilmiştir. Bulunan çoğalma katsayılarının aritmetik ortalaması Denklem [5.2]' de verilen formül yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\zeta_{\text{ort}} = (\zeta_1 + \dots + \zeta_n) / n \quad [5.2]$$

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

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

$\zeta_{\text{ort}} > 3$ ise çoğalma katsayısı 3 olarak alınır (Yarıntepe, 2011).

Bu bilgiler ışığı altında Sivas Merkez ilçesi için çoğalma katsayıları;

ζ_1 = 1990-2000 yılları için çoğalma katsayısı

ζ_2 = 2000-2007 yılları için çoğalma katsayısı

ζ_3 = 2007-2012 yılları için çoğalma katsayısı

ζ_4 = 2012-2017 yılları için çoğalma katsayısı

olmak üzere Çizelge 5.6' da verilen geçmiş nüfus verilerinin, Denklem [5.1]' de yerine yazılmasıyla ayrı ayrı bulunmuştur. Aşağıda çoğalma katsayısı ζ_1 değeri için örnek olarak hesaplanmıştır.

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

ζ_1 = 1990-2000 yılları için çoğalma katsayısı

$$\zeta_1 = [(N_{2000} / N_{1990})^{1 / (2000-1990)} - 1] \cdot 100$$

$$\zeta_1 = [(299.935 / 270.329)^{1/10} - 1] \cdot 100$$

ζ_1 = 1,04 olarak bulunmuştur.

Aynı hesaplama yöntemi ile,

ζ_2 = 2000-2007 yılları için çoğalma katsayısı = 1,6

ζ_3 = 2007-2012 yılları için çoğalma katsayısı = 0,68

ζ_4 = 2012-2017 yılları için çoğalma katsayısı = 1,44 olarak bulunmuştur.

Daha sonra bulunan çoğalma katsayılarının aritmetik ortalaması Denklem [5.2]'de verilen formül yardımıyla hesaplanmıştır.

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

$$\zeta_{\text{ort}} = (1,04 + 1,6 + 0,68 + 1,44) / 4$$

$$\zeta_{\text{ort}} = 1,19$$

Yukarıda verilen bilgilerden yola çıkarak hesaplanan Sivas Merkez ilçesi için çoğalma katsayısı $\zeta_{\text{hesaplanan}} = 1,19$ olup, $1 \leq \zeta_{\text{ort}} \leq 3$ ise çoğalma katsayısı $\zeta_{\text{hesaplanan}}$ olduğundan $\zeta_{\text{ort}} = 1,19$ olarak alınmıştır.

Çoğalma katsayısı bulunduktan sonra gelecekteki bir yıla ilişkin nüfus tahmini Denklem [5.3]'te verilen formül yardımıyla hesaplanır (Yarıntepe, 2011).

$$N_{\text{gelecek}} = N_{\text{son}} \cdot [1 + (\zeta_{\text{ort}}/100)]^n \quad [5.3]$$

Bu denklemde;

N_{gelecek} = Hesaplanacak gelecekteki nüfus

N_{son} = Son nüfus sayımı

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

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

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

Aşağıda 2021 yılı için nüfus değeri Denklem [5.3]' den yararlanılarak örnek olarak hesaplanmıştır.

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

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

$$N_{2021} = 386600 \cdot [1 + (1.19/100)]^1$$

$$N_{2021} = 391200$$

Ayrıca tesis ziyaretleri esnasında yetkililerden; enerji üretiminde 1999-2013 yılları arasında işletimde olan Seyfebeli vahşi deponi alanı ve 2014 yılında işleme alınan düzenli depolama alanından eş zamanlı olarak yararlanıldığı bilgisi alınmıştır.

Dolayısıyla bu çalışmada Sivas Seyfebeli vahşi depolama alanı da hesaba katılmış ve işletimde olduğu 1999-2013 yılları ile Sivas DDT' nin işletimde olacağı 2014-2029 yıllarına ait nüfus verileri yukarıda anlatıldığı gibi hesaplanarak Çizelge 5.7' de sunulmuştur.

Çizelge 5.7 Sivas Merkez ilçesi için hesaplanan geçmiş ve gelecek yıllara ait nüfus verileri

1999-2013 Yılları	Nüfus	2014-2029 Yılları	Nüfus
1999	297504	2014	351431
2000	299935	2015	359219
2001	303144	2016	365135
2002	306387	2017	372300
2003	309665	2018	377561
2004	312987	2019	381325
2005	316327	2020	386600
2006	319712	2021	391200
2007	335002	2022	395855
2008	329011	2023	400566
2009	338728	2024	405333
2010	354913	2025	410156
2011	345762	2026	415037
2012	346629	2027	419976
2013	348623	2028	424974
		2029	430031

5.4.2. Katı Atık Tahmini

Sivas İlinde 2017 yılında yaz aylarında günlük yaklaşık 350 ton kış aylarında ise günlük yaklaşık 340 ton katı atık oluşmaktadır. Kişi başına üretilen ortalama katı atık miktarı ise yaz aylarında 0,95 kg/gün kış aylarında ise 0,94 kg/gün dür (Sivas Valiliği, 2018). Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından yayımlanan Katı Atık Ana Planında (2006) ise Türkiye 11 benzer bölgeye ayrılarak her bölge için kişi başına üretilen katı atık miktarları verilmiştir. Planda Sivas Merkez İlçesi 2e bölgesine girmekte olup kişi başına üretilen katı atık miktarları 0,9 kg/gün'dür (Atık Yönetimi Eylem Planı, 2008). Fakat Sivas DDT'nin işleme alınmasıyla birlikte alınan tartım sonuçlarının kesin ve güncel bilgiler verdiği düşünülerek tesis yetkililerinden de bilgi edinilmiş olup kişi başına oluşan atık miktarı 1 kg/gün olarak belirlenmiştir.

Sivas Merkez İlçesi için kabul edilen günlük kişi başına üretilen katı atık miktarı ve hesaplanan tahmini nüfuslar dikkate alınarak, Sivas Seyfebeli vahşi döküm sahasının işletimde olduğu 1999-2013 ile Sivas Düzenli Depolama Tesisinin işletimde olacağı 2014-2029 yılları arasında üretilen katı atık miktarları Çizelge 5.8 ve 5.9' da ayrı ayrı hesaplanmıştır. 2014 yılı başı itibariyle Sivas Seyfebeli vahşi döküm sahasına atık kabulü yapılmamıştır. Bu nedenle hesaplamalar 1999-2013 yıllarını kapsamaktadır.

Çizelge 5.8 Sivas Merkez ilçesinde 1999-2013 yılları arasında üretilen tahmini katı atık miktarları

Yıllar	Nüfus	Atık Üretimi (kg/kişi-gün)	Toplam Atık (kg/gün)
1999	297504	1	297504
2000	299935	1	299935
2001	303144	1	303144
2002	306387	1	306387
2003	309665	1	309665
2004	312987	1	312987
2005	316327	1	316327
2006	319712	1	319712
2007	335002	1	335002
2008	329011	1	329011
2009	338728	1	338728
2010	354913	1	354913
2011	345762	1	345762
2012	346629	1	346629
2013	348623	1	348623

Çizelge 5.9 Sivas Merkez ilçesinde 2014-2029 yılları arasında üretilecek tahmini katı atık miktarları

Yıllar	Nüfus	Atık Üretimi (kg/kişi-gün)	Toplam Atık (kg/gün)
2014	351431	1	351431
2015	359219	1	359219
2016	365135	1	365135
2017	372300	1	372300
2018	377561	1	377561
2019	381325	1	381325
2020	386600	1	386600
2021	391200	1	391200
2022	395855	1	395855
2023	400566	1	400566
2024	405333	1	405333
2025	410156	1	410156
2026	415037	1	415037
2027	419976	1	419976
2028	424974	1	424974
2029	430031	1	430031

5.4.3. Sivas vahşi depolama alanında ve Sivas düzenli depolama tesisinde depolanacak atık miktarları

Tesiste depolanacak katı atık miktarı; toplam katı atık miktarından, toplam katı atıktaki ambalaj atıkları miktarının çıkarılmasıyla bulunmaktadır. Sivas Çöp Gazı Elektrik Üretim Tesisi yetkililerinden alınan bilgiye göre tesiste ayrıştırma işlemi yapılmaktadır. Ancak bu oran %1 ila %3 arasında değişmekte olup atık miktarını etkileyecek boyutta değildir. Dolayısıyla atığın %97-99'luk kısmı evsel niteliklidir.

Düzenli deponi alanına gelen katı atıkların birim hacim ağırlıkları genelde 0,3-0,7 ton/m³ aralığındadır. Türkiye için ise bu durum düzenli deponi sahalarında gereken sıkıştırma işlemlerinden sonra 0,75-1 ton/m³ aralığında değişebilmektedir (Yarıntepe, 2011). Sivas düzenli deponi sahasında ise depolanacak katı atıkların birim hacim ağırlıkları tesis yetkililerinden alınan bilgiye göre sıkıştırma işleminden sonra 0,8 ton/m³ olarak belirlenmiştir.

Bu bilgiler ışığında Sivas Seyfebeli vahşi depolama alanı ve Sivas düzenli deponi sahasında depolanması tahmin edilen katı atık miktarları ve hacimleri Çizelge 5.10 ve 5.11' de ayrı ayrı verilmiştir.

Çizelge 5.10 1999-2013 yılları arasında Sivas Seyfebeli vahşi depolama alanında depolanacak tahmini katı atık miktarları

Yıl	Toplam atık (kg/gün)	Depolanan katı atık miktarı, ton/yıl
1999	297504	108589
2000	299935	109476
2001	303144	110648
2002	306387	111831
2003	309665	113028
2004	312987	114240
2005	316327	115459
2006	319712	116695
2007	335002	122276
2008	329011	120089
2009	338728	123636
2010	354913	129543
2011	345762	126203
2012	346629	126520
2013	348623	127247

Çizelge 5.11 2014-2029 yılları arasında Sivas düzenli deponi alanında depolanacak tahmini katı atık miktarları

Yıl	Toplam atık (kg/gün)	Depolanan katı atık miktarı, ton/yıl	Depolanan katı atık miktarı, m ³ /yıl*
2014	351431	128272	160340
2015	359219	131115	163894
2016	365135	133274	166593
2017	372300	135890	169863
2018	377561	137810	172263
2019	381325	139450	174313
2020	386600	141109	176386
2021	391200	142788	178485
2022	395855	144487	180609
2023	400566	146207	182759
2024	405333	147947	184934
2025	410156	149707	187134
2026	415037	151489	189361
2027	419976	153291	191614
2028	424974	155116	193895
2029	430031	156961	196201
Toplam		2.294.913	2.868.642

* Katı atık miktarı (ton/yıl), katı atıkların birim hacim ağırlıkları olan 0,8 ton/m³ e bölünerek hesaplanmıştır.

Sivas DDT'ne atık depolanması 2014 yılında 1. kademe ile başlamıştır. 1. kademe dolduğunda sırasıyla 2. ve 3. kademeler devreye alınacaktır. Her kademenin atık

depolama kapasitesi yaklaşık 1.000.000 m³ olup, yapılan hesaplamalar sonucu 2019 yılı sonu itibariyle 1.007.264 m³ atık birikimi olduğundan 1. kademe dolmuş vaziyette görünmektedir. Ancak deponi sahasında atıkların bozunması sonucu boşlukların meydana geleceği ve oluşan bu boşluklar çökmelere neden olarak her kademenin atık depolama kapasitesini %10 oranında artıracak tahmin edilmektedir (Yarıntepe, 2011). Dolayısıyla 2019 yılı sonu itibariyle bu oran %92 olarak düşünülebilir. Kademelerin depolama kapasiteleri ve hesaplanan depolanacak atık oranları dikkate alındığında proje alanının ömrü boyunca 2.868.642 m³ atık depolayacağı öngörülmüş olup 2029 yılı sonunda deponi alanının dolmayacağı belirlenmiştir. Ancak tesis inşa edilmeden önce Sivas Merkez İlçesi ile birlikte Zara, Yıldızeli, Hafik, Doğanşar ve Ulaş ilçelerinin katı atıklarının bu tesise nakledilmesi planlanmış fakat henüz transfer istasyonları yapılmadığından söz konusu ilçelerden tesise şu ana kadar atık alınmamıştır. Yapılan hesaplamalar sadece Sivas Merkez İlçesi'nin atıkları göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Dolayısıyla transfer istasyonlarının inşa edilmesiyle birlikte söz konusu ilçelerin de atıkları devreye gireceğinden hesaplamalar yeniden yapılmalıdır.

6. BULGULAR

6.1. Oluşacak Metan Gazının LandGEM Modeli ile Tahmini

Sivas Çöp Gazı Elektrik Üretim Tesisi katı atık düzenli deponi sahasından ve Sivas Seyfebeli düzensiz depolama sahasından ileri gelecek tahmini metan gazı miktarı bölüm 2.5.4'te detaylı bir şekilde açıklanan Depo Gazı Emisyonları Modeli LandGEM versiyon 3.02 (LandGEM v 3.02) programı ile hesaplanmıştır. Modeli kullanabilmek amacıyla; deponi sahasında bulunan toplam atık miktarı ya da depolanan yıllık atık miktarı, metan üretim potansiyeli, metan üretim hızı, deponi alanının kullanılmaya başlandığı yıl gibi bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır. LandGEM modeli metan oluşumunu Denklem [6.1]' de verildiği gibi birinci dereceden reaksiyon ile belirlemektedir (Mambeli Barros vd., 2014).

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 kL_0 \left[\frac{M_i}{10} \right] e^{-kt_{ij}} \quad [6.1]$$

Bu denklemde; Q_{CH_4} = hesaplama yılındaki yıllık metan üretimi ($m^3/yıl$), k = Metan üretimi hızı ($yıl^{-1}$), L_0 = Metan oluşum potansiyeli (m^3/ton), $i= 1$ yıllık artış, $j= 0,1$ yıllık zaman artışı, M_i = i . yıldaki depolanan katı atık miktarı (ton), $n=$ Hesaplama yılı – atık kabulünün ilk yılı, t_{ij} = i . yılda kabul edilen M_i miktarındaki atığın j . bölümündeki yaşı (ondalık yıllar, örneğin 3,2 gibi) olarak ifade edilmektedir.

Model için ilk olarak tesis yetkililerinden düzenli deponi alanının açılış ve kapanış tarihleri alındıktan sonra Çizelge 5.10 ve Çizelge 5.11'de verilen atık projeksiyonları oluşturulmuştur. Ancak Sivas DDT, 3 Kademe olarak planlanmış olup şu an kullanılmakta olan 1. kademenin 2020 yılı itibariyle dolacağı öngörülmüştür. Dolayısıyla bu çalışmada mevcut atıkların depolandığı 1. kademe ve gaz hesaplamaları için 2014-2020 yılları arası atıklar ile, 1999-2013 yılları Seyfebeli vahşi depolama alanının atıkları göz önünde bulundurulmuştur. Daha sonra modeli çalıştırabilmek için belirlememiz gereken model parametrelerinden biri olan deponi gazı içerisindeki metan oranı; tesisde yapılan ölçümler sonucunda%51,4 olarak belirlenmiştir.

Metan oranı haricinde belirlenmesi gereken diğer önemli değişkenler, metan üretim hız sabiti (k) ve metan üretim potansiyeli (L_0)'dir. Metan üretim hız sabiti k ; atığın nütrient içeriği, nem içeriği, sıcaklık ve pH değerinin bir fonksiyonu olmakla birlikte

k değerini belirlemede esas faktör atığın nem içeriğidir (Kale, 2017). Metan üretim potansiyeli L_0 ise; depo alanında bulunan atık türüne bağlıdır. Bu çalışmada Sivas DDT'ne ilişkin spesifik bir k ve L_0 değeri hesaplanmıştır. Çalışma alanına yönelik spesifik k değeri aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanmaktadır (Park vd., 2018).

$$k = [3,2 \cdot 10^{-5} \cdot \text{yıllık yağış miktarı (mm)}] + 0,01 \quad [6.2]$$

1930-2019 yılları arasında toplanan verilere göre yıllık toplam yağış miktarı ortalaması 432.0 mm'dir (URL-8). Verilen değerler yerine yazıldığında buradan $k = 0,023 \text{ yıl}^{-1}$ olarak bulunmuştur.

$$k = [3,2 \cdot 10^{-5} \cdot 429,3] + 0,01$$

$$k = 0,024 \text{ yıl}^{-1}$$

Sivas DDT'ne ilişkin L_0 (metan gazı üretim potansiyeli) parametresinin belirlenmesinde Çizelge 5.5'de sunulan Sivas ili katı atık karakterizasyonu (2017, 2018, 2019 yılları 3 yıllık ortalama) verileri kullanılmıştır. Bu veriler ışığı altında çalışma alanına yönelik parçalanabilir organik karbon (DOC) miktarı Denklem [6.3]' e göre bulunmuştur (Singh vd., 2018).

$$\text{DOC} = 0,4A + 0,17B + 0,15C + 0,3D \quad [6.3]$$

Burada;

A = Kağıt, karton, mukavva, kalın karton, tekstil atıkları (bez, paçavra vb.), %

B = Park-bahçe atıkları oranı, %

C = Mutfak atıkları oranı, %

D = Ahşap, tahta, kereste atığı, %

Denklem [6.3]' e göre çalışma alanına yönelik DOC değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır;

$$\text{DOC} = 0,4 (2,57+2,37+8,56) + 0,17 (3,04) + 0,15 (35,98) + 0,3 (8,08 + 6,87)$$

$$\text{DOC} = \% 15,7988$$

$$\text{DOC} = 0,15798$$

Yapılan araştırmalar, katı atıktaki parçalanabilir organik karbon miktarının %8 - %30 arasında olduğunu göstermektedir (Park vd., 2018). Dolayısıyla bulunan DOC değerinin literatüre uygun olduğu görülmüştür.

DOC_f parametresi ise, DOC' un düzenli depolama alanında bozunacak kısmı olup, parçalanabilir organik karbon fraksiyonudur. DOC_f Denklem [6.4]'e göre bulunur. Burada verilen T; depolama alanının ortalama sıcaklığı olmakla birlikte çalışma alanı için bu değer 35°C olarak alınmıştır.

$$\text{DOC}_f = 0,014 \cdot T + 0,28 \quad [6.4]$$

Çalışma alanı için $\text{DOC}_f = 0,014 \cdot 35 + 0,28 = 0,77$ olarak bulunmuştur.

Çalışma alanına yönelik metan üretim kapasitesi ise Denklem [6.5]'e göre bulunmaktadır (Park vd., 2018).

$$L_0 = [(\text{DOC} \cdot \text{DOC}_f \cdot \text{MCF} \cdot F \cdot 16/12) / 0,714] \cdot 1000 \quad [6.5]$$

Burada;

DOC = Parçalanabilir organik karbon miktarı

DOC_f = Parçalanabilir organik karbon fraksiyonu

MCF = Düzenli depolama alanları için düzeltme faktörü

F = Hacimce metan fraksiyonu, %

16/12 = CH₄ / C (Moleküler ağırlık oranı)

0,714 = CH₄ yoğunluğu olarak açıklanmaktadır.

Çalışma alanına yönelik L₀ hesaplanırken yukarıda bulunan DOC ve DOC_f değerleri yerine yazılmıştır. Organik maddelerin anaerobik olarak ayrışan kısmı şeklinde belirtilen MCF parametresi; IPCC 2006 Rehberinde katı atık depolama alanlarının yönetilme şekline göre 4 kategoriye ayrılmış ve her kategoriye göre bir MCF değerleri belirtilmiştir (Eggleston vd., 2006). Bu rehber baz alınarak çalışma alanı için MCF faktörü 1 alınmış ve F değerleri ise tesis yetkililerinden alınan bilgiye göre %51,4 (hacimce) olarak verilmiştir. Bu değerler Denklem [6.5]'de yerine konulduğunda çalışma alanına özđü metan üretim potansiyeli 116,7 m³/ton olarak belirlenmiştir.

Potansiyel metan üretim kapasitesi, L_0 , için değerler USEPA (1997, 2005, 2008) tarafından verilmiştir ve geleneksel depolama alanları için $100 \text{ m}^3/\text{ton}$ ila $170 \text{ m}^3/\text{ton}$ arasındadır (Mambeli Barros vd., 2014). Bu bilgiden yola çıkarak yapılan kabullere göre hesaplanan L_0 değerinin uygun olduğu söylenebilir.

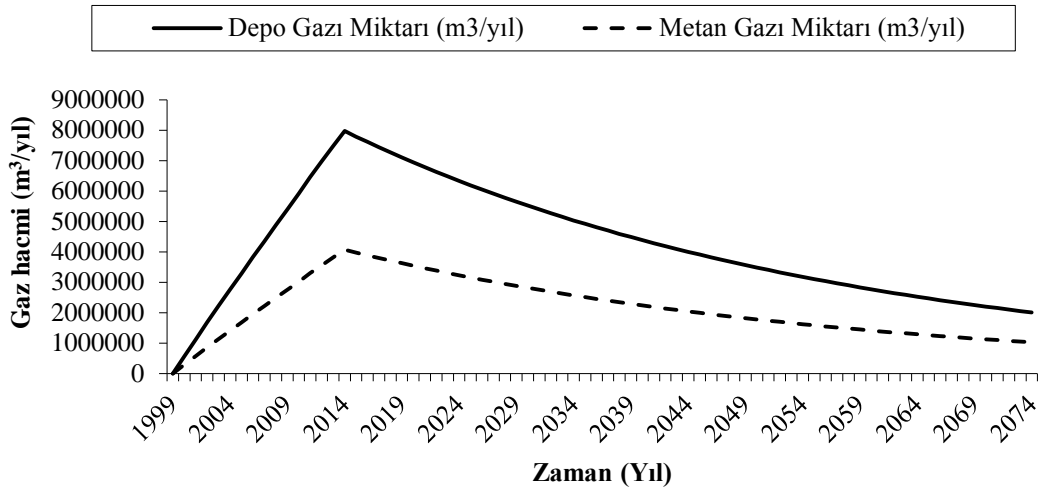
$$L_0 = [(0,1579 \cdot 0,77 \cdot 1 \cdot 0,514 \cdot 16/12) / 0,714] \cdot 1000$$

$$L_0 = 116,7 \text{ m}^3/\text{ton}$$

LandGEM modeline yönelik gerekli veriler sağlandıktan sonra her iki çalışma alanı için de LandGEM modeli uygulanmıştır.

Seyfebeli vahşi depolama alanına yönelik model çalışmaları

Şekil 6.1 ve Çizelge 6.1’de çalışma alanına yönelik hesaplanan deponi gazı ve metan gazı miktarları verilmiştir.



Şekil 6.1 Sivas Seyfebeli vahşi depolama sahası için LandGEM model sonuçları

Seyfebeli vahşi depolama sahası için; yıllık bazda hesaplanan metan gazı ve deponi gazı miktarı Şekil 6.1’de görülmektedir. Atık birikiminin ilk ve son yılı arasında bileşiklerin parçalanması arttıkça, metan gazı miktarı ve deponi gazı miktarı artar. Şekilde özellikle 2010 yılından başlayarak 2014 yılına kadar maksimum gaz oluşumu devam etmiştir. Grafikte 2014 yılından sonra dereceli olarak bir azalma olduğu görülmektedir. Bunun sebebi olarak deponi sahalarında oluşabilecek gaz

potansiyelinin % 60' ının, atıkların depolanmasını takiben ilk 10 yıllık süre zarfında oluştuğu ve 15-20 yıllık süre zarfında ise %90 seviyesine çıkması gösterilebilir. Geriye kalan yıllarda az miktarlarda gaz oluşumu olur ve 30 yıl sonra gaz oluşumu oldukça yavaşlar ve durma seviyesine gelir.



Çizelge 6.1 Sivas Seyfebeli vahşi depolama sahası için LandGEM model sonuçları

Yıllar	Atık Miktarı (ton/yıl)	Kümülatif Atık Miktarı (ton)	Deponi Gazı Miktarı (ton/yıl)	Deponi Gazı Miktarı (m ³ /yıl)	Metan Gazı Miktarı (ton/yıl)	Metan Gazı Miktarı (m ³ /yıl)
1999	108.589	0	0	0	0	0
2000	109.476	108.589	712	567100	192,9	289200
2001	110.648	218.065	1414	1126000	383,1	574200
2002	111.831	328.713	2107	1678000	571	855800
2003	113.028	440.544	2792	2224000	756,7	1134000
2004	114.240	553.572	3470	2764000	940,3	1409000
2005	115.459	667.812	4140	3297000	1122	1682000
2006	116.695	783.271	4803	3825000	1302	1951000
2007	122.276	899.966	5459	4348000	1479	2217000
2008	120.089	1.022.242	6136	4888000	1663	2493000
2009	123.636	1.142.331	6784	5404000	1839	2756000
2010	129.543	1.265.967	7440	5926000	2016	3022000
2011	126.203	1.395.510	8121	6468000	2201	3299000
2012	126.520	1.521.713	8763	6980000	2375	3560000
2013	127.247	1.648.233	9394	7482000	2546	3816000
2014	0	1.775.480	10010	7976000	2714	4068000
2015	0	1.775.480	9787	7795000	2652	3976000
2016	0	1.775.480	9564	7618000	2592	3885000
2017	0	1.775.480	9347	7445000	2533	3797000
2018	0	1.775.480	9134	7275000	2475	3710000
2019	0	1.775.480	8927	7110000	2419	3626000
2020	0	1.775.480	8724	6948000	2364	3544000
2021	0	1.775.480	8525	6790000	2310	3463000
2022	0	1.775.480	8331	6636000	2258	3384000
2023	0	1.775.480	8142	6485000	2207	3307000
2024	0	1.775.480	7957	6338000	2156	3232000
2025	0	1.775.480	7776	6193000	2107	3159000
2026	0	1.775.480	7599	6053000	2059	3087000
2027	0	1.775.480	7426	5915000	2013	3017000
2028	0	1.775.480	7257	5781000	1967	2948000
2029	0	1.775.480	7092	5649000	1922	2881000
2030	0	1.775.480	6931	5521000	1878	2816000
2031	0	1.775.480	6774	5395000	1836	2752000
2032	0	1.775.480	6620	5272000	1794	2689000
2033	0	1.775.480	6469	5153000	1753	2628000
2034	0	1.775.480	6322	5035000	1713	2568000
2035	0	1.775.480	6178	4921000	1674	2510000
2036	0	1.775.480	6038	4809000	1636	2453000
2037	0	1.775.480	5900	4700000	1599	2397000
2038	0	1.775.480	5766	4593000	1563	2342000
2039	0	1.775.480	5635	4488000	1527	2289000
2040	0	1.775.480	5507	4386000	1492	2237000
2041	0	1.775.480	5382	4287000	1459	2186000
2042	0	1.775.480	5259	4189000	1425	2136000
2043	0	1.775.480	5140	4094000	1393	2088000
2044	0	1.775.480	5023	4001000	1361	2040000
2045	0	1.775.480	4909	3910000	1330	1994000
2046	0	1.775.480	4797	3821000	1300	1949000
2047	0	1.775.480	4688	3734000	1271	1904000
2048	0	1.775.480	4582	3649000	1242	1861000
2049	0	1.775.480	4477	3566000	1213	1819000

Çizelge 6.1 (Devamı) Sivas Seyfebeli vahşi depolama sahası için LandGEM model sonuçları

Yıllar	Atık Miktarı (ton/yıl)	Kümülatif Atık Miktarı (ton)	Deponi Gazı Miktarı (ton/yıl)	Deponi Gazı Miktarı (m ³ /yıl)	Metan Gazı Miktarı (ton/yıl)	Metan Gazı Miktarı (m ³ /yıl)
2050	0	1.775.480	4376	3485000	1186	1777000
2051	0	1.775.480	4276	3406000	1159	1737000
2052	0	1.775.480	4179	3328000	1132	1697000
2053	0	1.775.480	4084	3253000	1107	1659000
2054	0	1.775.480	3991	3179000	1082	1621000
2055	0	1.775.480	3900	3107000	1057	1584000
2056	0	1.775.480	3812	3036000	1033	1548000
2057	0	1.775.480	3725	2967000	1009	1513000
2058	0	1.775.480	3640	2899000	986,5	1479000
2059	0	1.775.480	3557	2833000	964,1	1445000
2060	0	1.775.480	3477	2769000	942,2	1412000
2061	0	1.775.480	3397	2706000	920,7	1380000
2062	0	1.775.480	3320	2645000	899,8	1349000
2063	0	1.775.480	3245	2584000	879,3	1318000
2064	0	1.775.480	3171	2526000	859,3	1288000
2065	0	1.775.480	3099	2468000	839,8	1259000
2066	0	1.775.480	3028	2412000	820,7	1230000
2067	0	1.775.480	2960	2357000	802	1202000
2068	0	1.775.480	2892	2304000	783,8	1175000
2069	0	1.775.480	2826	2251000	766	1148000
2070	0	1.775.480	2762	2200000	748,6	1122000
2071	0	1.775.480	2699	2150000	731,6	1097000
2072	0	1.775.480	2638	2101000	714,9	1072000
2073	0	1.775.480	2578	2053000	698,7	1047000
2074	0	1.775.480	2519	2007000	682,8	1023000
2075	0	1.775.480	2462	1961000	667,3	1000000
2076	0	1.775.480	2406	1916000	652,1	977400
2077	0	1.775.480	2351	1873000	637,3	955200
2078	0	1.775.480	2298	1830000	622,8	933500
2079	0	1.775.480	2246	1789000	608,6	912200
2080	0	1.775.480	2195	1748000	594,8	891500
2081	0	1.775.480	2145	1708000	581,2	871200
2082	0	1.775.480	2096	1669000	568	851400
2083	0	1.775.480	2048	1631000	555,1	832100
2084	0	1.775.480	2002	1594000	542,5	813100
2085	0	1.775.480	1956	1558000	530,2	794700
2086	0	1.775.480	1912	1523000	518,1	776600
2087	0	1.775.480	1868	1488000	506,3	758900
2088	0	1.775.480	1826	1454000	494,8	741700
2089	0	1.775.480	1784	1421000	483,6	724800
2090	0	1.775.480	1744	1389000	472,6	708300
2091	0	1.775.480	1704	1357000	461,8	692200
2092	0	1.775.480	1665	1326000	451,3	676500
2093	0	1.775.480	1627	1296000	441,1	661100
2094	0	1.775.480	1590	1267000	431	646100
2095	0	1.775.480	1554	1238000	421,2	631400
2096	0	1.775.480	1519	1210000	411,6	617000
2097	0	1.775.480	1484	1182000	402,3	603000
2098	0	1.775.480	1451	1155000	393,1	589300
2099	0	1.775.480	1418	1129000	384,2	575900
2100	0	1.775.480	1385	1104000	375,5	562800
2101	0	1.775.480	1354	1078000	366,9	550000

Çizelge 6.1 (Devamı) Sivas Seyfebeli vahşi depolama sahası için LandGEM model sonuçları

Yıllar	Atık Miktarı (ton/yıl)	Kümülatif Atık Miktarı (ton)	Deponi Gazı Miktarı (ton/yıl)	Deponi Gazı Miktarı (m ³ /yıl)	Metan Gazı Miktarı (ton/yıl)	Metan Gazı Miktarı (m ³ /yıl)
2102	0	1.775.480	1323	1054000	358,6	537500
2103	0	1.775.480	1293	1030000	350,4	525300
2104	0	1.775.480	1264	1007000	342,5	513300
2105	0	1.775.480	1235	983600	334,7	501700
2106	0	1.775.480	1207	961300	327,1	490200
2107	0	1.775.480	1179	939400	319,6	479100
2108	0	1.775.480	1153	918100	312,4	468200
2109	0	1.775.480	1126	897200	305,3	457600
2110	0	1.775.480	1101	876800	298,3	447200
2111	0	1.775.480	1076	856800	291,5	437000
2112	0	1.775.480	1051	837400	284,9	427100
2113	0	1.775.480	1027	818300	278,4	417300
2114	0	1.775.480	1004	799700	272,1	407900
2115	0	1.775.480	981,2	781500	265,9	398600
2116	0	1.775.480	958,9	763800	259,9	389500
2117	0	1.775.480	937,1	746400	254	380700
2118	0	1.775.480	915,8	729400	248,2	372000
2119	0	1.775.480	895	712800	242,5	363500
2120	0	1.775.480	874,6	696600	237	355300
2121	0	1.775.480	854,7	680800	231,6	347200
2122	0	1.775.480	835,3	665300	226,4	339300
2123	0	1.775.480	816,3	650200	221,2	331600
2124	0	1.775.480	797,7	635400	216,2	324100
2125	0	1.775.480	779,6	621000	211,3	316700
2126	0	1.775.480	761,9	606800	206,5	309500
2127	0	1.775.480	744,6	593000	201,8	302400
2128	0	1.775.480	727,6	579600	197,2	295600
2129	0	1.775.480	711,1	566400	192,7	288900
2130	0	1.775.480	694,9	553500	188,3	282300
2131	0	1.775.480	679,1	540900	184	275900
2132	0	1.775.480	663,7	528600	179,9	269600
2133	0	1.775.480	648,6	516600	175,8	263500
2134	0	1.775.480	633,8	504800	171,8	257500
2135	0	1.775.480	619,4	493400	167,9	251600
2136	0	1.775.480	605,3	482100	164	245900
2137	0	1.775.480	591,6	471200	160,3	240300
2138	0	1.775.480	578,1	460500	156,7	234800
2139	0	1.775.480	565	450000	153,1	229500
				Toplam		Toplam
				388438300		198105300

Modelde 140 yıla yönelik hesap yapılmakta ve bu sayı değiştirilememektedir. Modelleme ile yapılan hesaplamalar neticesinde Sivas Seyfebeli vahşi depolama alanında 2139 yılına kadar toplam 198.105.300 m³ metan ve 388.438.300 m³ deponi gazı oluşacağı hesaplanmıştır. Birim metan gazı oluşumu ise yaklaşık olarak 111,5 m³ metan /ton atık olarak bulunmuştur. Çizelge 6.2’de model sonuçları özetlenmiştir.

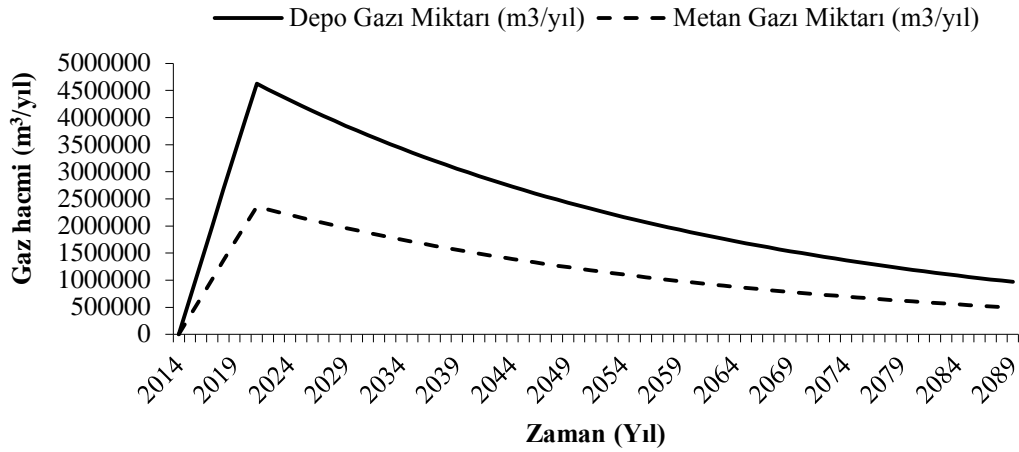
Çizelge 6.2 Sivas Seyfebeli vahşi depolama için model sonuçlarının özeti

Toplam atık (ton) (A)	Toplam metan oluşumu (m³) (B)	Toplam gaz oluşumu (m³)	Birim metan oluşumu (m³ CH₄/ton atık) (B/A)
1.775.480	198.105.300	388.438.300	111,5

Kaynaklarda, ton atık başına meydana gelen metan gazı oranı 6,2-270 m³ CH₄/ton olarak verilmektedir (Yarıntepe, 2011). Çalışma alanına yönelik yapılan hesaplamalarda bu değer yaklaşık olarak 111,5 m³ CH₄/ton atık olarak bulunmuş ve kaynaklarda verilen değerler arasında olduğu görülmüştür.

Sivas düzenli depolama sahasına yönelik model çalışmaları

Şekil 6.2 ve Çizelge 6.3’de Sivas DDT’ ne yönelik hesaplanan deponi gazı ve metan gazı miktarları verilmiştir.



Şekil 6.2 Sivas düzenli depolama tesisi 1. kademe için LandGEM model sonuçları

Sivas DDT, 1. kademe için; yıllık bazda hesaplanan metan gazı ve deponi gazı miktarı Şekil 6.2’ de görülmektedir. Atık birikiminin ilk ve son yılı arasında bileşiklerin parçalanması arttıkça, metan gazı miktarı ve deponi gazı miktarı artar. Dolayısıyla; Sivas DDT, 1. kademenin dolacağı 2020 yılından sonra gaz üretimlerinin dereceli olarak azalacağı görülmektedir.

Çizelge 6.3 Sivas düzenli depolama tesisi 1. kademe için LandGEM model sonuçları

Yıllar	Atık Miktarı (ton/yıl)	Kümülatif Atık Miktarı (ton)	Deponi Gazı Miktarı (ton/yıl)	Deponi Gazı Miktarı (m ³ /yıl)	Metan Gazı Miktarı (ton/yıl)	Metan Gazı Miktarı (m ³ /yıl)
2014	128.272	-	0	0	0	0
2015	131.115	128.272	841	669900	227,9	341600
2016	133.274	259.387	1682	1339000	455,7	683100
2017	135.890	392.661	2517	2005000	682,2	1022000
2018	137.810	528.551	3351	2669000	908,1	1361000
2019	139.450	666.361	4178	3328000	1132	1697000
2020	141.109	805.811	4998	3981000	1354	2030000
2021	-	946.920	5809	4627000	1574	2360000
2022	-	946.920	5677	4522000	1538	2306000
2023	-	946.920	5548	4419000	1504	2254000
2024	-	946.920	5422	4318000	1469	2202000
2025	-	946.920	5298	4220000	1436	2152000
2026	-	946.920	5178	4124000	1403	2103000
2027	-	946.920	5060	4031000	1371	2056000
2028	-	946.920	4945	3939000	1340	2009000
2029	-	946.920	4833	3849000	1310	1963000
2030	-	946.920	4723	3762000	1280	1919000
2031	-	946.920	4616	3676000	1251	1875000
2032	-	946.920	4511	3593000	1222	1832000
2033	-	946.920	4408	3511000	1195	1791000
2034	-	946.920	4308	3431000	1167	1750000
2035	-	946.920	4210	3353000	1141	1710000
2036	-	946.920	4114	3277000	1115	1671000
2037	-	946.920	4021	3202000	1090	1633000
2038	-	946.920	3929	3130000	1065	1596000
2039	-	946.920	3840	3058000	1041	1560000
2040	-	946.920	3753	2989000	1017	1524000
2041	-	946.920	3667	2921000	993,8	1490000
2042	-	946.920	3584	2854000	971,2	1456000
2043	-	946.920	3502	2790000	949,1	1423000
2044	-	946.920	3423	2726000	927,6	1390000
2045	-	946.920	3345	2664000	906,5	1359000
2046	-	946.920	3269	2604000	885,9	1328000
2047	-	946.920	3194	2544000	865,7	1298000
2048	-	946.920	3122	2487000	846	1268000
2049	-	946.920	3051	2430000	826,8	1239000
2050	-	946.920	2981	2375000	808	1211000
2051	-	946.920	2914	2321000	789,6	1184000
2052	-	946.920	2847	2268000	771,7	1157000
2053	-	946.920	2783	2216000	754,1	1130000
2054	-	946.920	2719	2166000	737	1105000
2055	-	946.920	2658	2117000	720,2	1080000

Çizelge 6.3 (Devamı) Sivas düzenli depolama tesisi 1. kademe için LandGEM model sonuçları

Yıllar	Atık Miktarı (ton/yıl)	Kümülatif Atık Miktarı (ton)	Deponi Gazı Miktarı (ton/yıl)	Deponi Gazı Miktarı (m ³ /yıl)	Metan Gazı Miktarı (ton/yıl)	Metan Gazı Miktarı (m ³ /yıl)
2056	-	946.920	2597	2069000	703,8	1055000
2057	-	946.920	2538	2022000	687,8	1031000
2058	-	946.920	2480	1976000	672,2	1008000
2059	-	946.920	2424	1931000	656,9	984700
2060	-	946.920	2369	1887000	642	962300
2061	-	946.920	2315	1844000	627,4	940400
2062	-	946.920	2262	1802000	613,1	919000
2063	-	946.920	2211	1761000	599,2	898100
2064	-	946.920	2161	1721000	585,6	877700
2065	-	946.920	2112	1682000	572,2	857700
2066	-	946.920	2064	1644000	559,2	838200
2067	-	946.920	2017	1606000	546,5	819200
2068	-	946.920	1971	1570000	534,1	800600
2069	-	946.920	1926	1534000	521,9	782400
2070	-	946.920	1882	1499000	510,1	764600
2071	-	946.920	1839	1465000	498,5	747200
2072	-	946.920	1798	1432000	487,1	730200
2073	-	946.920	1757	1399000	476,1	713600
2074	-	946.920	1717	1367000	465,2	697400
2075	-	946.920	1678	1336000	454,7	681500
2076	-	946.920	1640	1306000	444,3	666000
2077	-	946.920	1602	1276000	434,2	650900
2078	-	946.920	1566	1247000	424,4	636100
2079	-	946.920	1530	1219000	414,7	621600
2080	-	946.920	1495	1191000	405,3	607500
2081	-	946.920	1461	1164000	396,1	593700
2082	-	946.920	1428	1138000	387,1	580200
2083	-	946.920	1396	1112000	378,3	567000
2084	-	946.920	1364	1086000	369,7	554100
2085	-	946.920	1333	1062000	361,2	541500
2086	-	946.920	1303	1038000	353	529200
2087	-	946.920	1273	1014000	345	517100
2088	-	946.920	1244	990900	337,2	505400
2089	-	946.920	1216	968400	329,5	493900
2090	-	946.920	1188	946400	322	482700
2091	-	946.920	1161	924900	314,7	471700
2092	-	946.920	1135	903800	307,5	461000
2093	-	946.920	1109	883300	300,5	450500
2094	-	946.920	1084	863200	293,7	440200
2095	-	946.920	1059	843600	287	430200
2096	-	946.920	1035	824400	280,5	420400
2097	-	946.920	1011	805600	274,1	410900
2098	-	946.920	988,5	787300	267,9	401500
2099	-	946.920	966	769400	261,8	392400
2100	-	946.920	944	751900	255,8	383500
2101	-	946.920	922,6	734800	250	374800
2102	-	946.920	901,6	718100	244,3	366200
2103	-	946.920	881,1	701800	238,8	357900
2104	-	946.920	861,1	685800	233,4	349800
2105	-	946.920	841,5	670200	228	341800

Çizelge 6.3 (Devamı) Sivas düzenli depolama tesisi 1. kademe için LandGEM model sonuçları

Yıllar	Atık Miktarı (ton/yıl)	Kümülatif Atık Miktarı (ton)	Deponi Gazı Miktarı (ton/yıl)	Deponi Gazı Miktarı (m ³ /yıl)	Metan Gazı Miktarı (ton/yıl)	Metan Gazı Miktarı (m ³ /yıl)
2106	-	946.920	822,4	655000	222,9	334100
2107	-	946.920	803,7	640100	217,8	326500
2108	-	946.920	785,4	625600	212,8	319000
2109	-	946.920	767,5	611300	208	311800
2110	-	946.920	750,1	597400	203,3	304700
2111	-	946.920	733	583900	198,7	297800
2112	-	946.920	716,4	570600	194,1	291000
2113	-	946.920	700,1	557600	189,7	284400
2114	-	946.920	684,2	544900	185,4	277900
2115	-	946.920	668,6	532500	181,2	271600
2116	-	946.920	653,4	520400	177,1	265400
2117	-	946.920	638,5	508600	173	259400
2118	-	946.920	624	497000	169,1	253500
2119	-	946.920	609,8	485700	165,3	247700
2120	-	946.920	596	474700	161,5	242100
2121	-	946.920	582,4	463900	157,8	236600
2122	-	946.920	569,2	453300	154,2	231200
2123	-	946.920	556,2	443000	150,7	225900
2124	-	946.920	543,6	433000	147,3	220800
2125	-	946.920	531,2	423100	144	215800
2126	-	946.920	519,1	413500	140,7	210900
2127	-	946.920	507,3	404100	137,5	206100
2128	-	946.920	495,8	394900	134,4	201400
2129	-	946.920	484,5	385900	131,3	196800
2130	-	946.920	473,5	377200	128,3	192300
2131	-	946.920	462,7	368600	125,4	188000
2132	-	946.920	452,2	360200	122,6	183700
2133	-	946.920	441,9	352000	119,8	179500
2134	-	946.920	431,9	344000	117	175400
2135	-	946.920	422,1	336200	114,4	171500
2136	-	946.920	412,5	328500	111,8	167600
2137	-	946.920	403,1	321100	109,2	163700
2138	-	946.920	393,9	313800	106,8	160000
2139	-	946.920	385	306600	104,3	156400
2140	-	946.920	376,2	299700	102	152800
2141	-	946.920	367,7	292800	99,64	149400
2142	-	946.920	359,3	286200	97,37	146000
2143	-	946.920	351,1	279700	95,16	142600
2144	-	946.920	343,2	273300	93	139400
2145	-	946.920	335,4	267100	90,88	136200
2146	-	946.920	327,7	261000	88,82	133100
2147	-	946.920	320,3	255100	86,8	130100
2148	-	946.920	313	249300	84,82	127100
2149	-	946.920	305,9	243600	82,89	124300
2150	-	946.920	298,9	238100	81,01	121400
2151	-	946.920	292,1	232700	79,17	118700
2152	-	946.920	285,5	227400	77,37	116000
2153	-	946.920	279	222200	75,61	113300
2154	-	946.920	272,6	217200	73,89	110800
				Toplam		Toplam
				207936100		106048100

Modelleme ile yapılan hesaplamalar neticesinde Sivas DDT 1. kademesinde 2154 yılına kadar toplam 106.048.100 m³ CH₄ ve 207.936.100 m³ deponi gazı oluşacağı hesaplanmıştır. Birim metan gazı oluşumu ise yaklaşık olarak 112 m³ CH₄ / ton atık olarak bulunmuştur. Çizelge 6.4’de model sonuçları özetlenmiştir.

Çizelge 6.4 Sivas DDT 1. kademe için model sonuçlarının özeti

Toplam atık (ton) (A)	Toplam metan oluşumu (m ³) (B)	Toplam gaz oluşumu (m ³)	Birim metan oluşumu (m ³ CH ₄ / ton atık) (B/A)
946.920	106.048.100	207.936.100	112

Çalışma alanına yönelik yapılan hesaplamalarda bu değer yaklaşık olarak 112 m³ CH₄/ton atık olarak bulunmuş ve kaynaklarda verilen değerler arasında olduğu görülmüştür.

6.2. Deponi Gazının Enerji Potansiyeli

Sivas Çöp Gazı Elektrik Üretim Tesisi yetkililerinden edinilen bilgilere göre deponi gazının bileşimi, mevcut deponi gazı verimliliğinin incelenebilmesi amacıyla aşağıda verilmiştir.

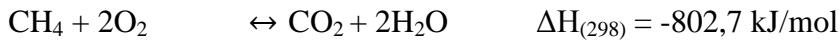
CH₄ = %51,4 (hacimce)

CO₂ = %37,9 (hacimce)

O₂ = %0,3 (hacimce)

H₂S = 454 ppm

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



1 mol CH₄ sabit basınçta yandığında 802,7 kJ/mol (192 kkal) enerji açığa çıkarır (Lee ve Trimn, 1995; Karakurt vd., 2010).

Metanın yoğunluğu 0,717 kg/m³ olup, 1 m³ gazın içerisinde de 0,514 m³ metan olduğundan, metanın hacmi 0,514 m³ olacaktır. Buradan yoğunluk formülüyle metan gazının kütlesi hesaplanabilir.

$$d=m/V$$

$$0,717 \text{ kg/m}^3 \times 0,514 \text{ m}^3 = 0,368 \text{ kg} = 368 \text{ g.}$$

1 mol CH ₄ (16 g) yandığı zaman	192 kkal enerji açığa çıkarırsa
368 g metan yandığı zaman	X kkal enerji açığa çıkarır

Buradan X=4416 kkal'dir.

1 kW_s = 860 kkal olduğuna göre açığa çıkan 4416 kkal'lik enerji 5,1 kW_s'e eşdeğerdir. Yani 1 m³/saat deponi gazının enerji eşdeğeri 4416 kkal = 5,1 kW_s dir. Buradan çıkan sonuçla, bu çalışmada deponi gazının enerji eşdeğeri 5 kW_s/m³ alınmıştır.

6.3. Deponi Gazından Elektrik Üretimi

Katı atık depolama alanlarında oluşan deponi gazının tümünün geri kazanılması mümkün değildir (Coşkuner, 2015). Bu nedenle incelenecek depolama alanlarına yönelik gaz toplama verimliliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada depolama alanlarına göre ortalama deponi gazı toplama verimliliği Seyfebeli vahşi depolama alanı için %67, Sivas DDT için ise %75 olarak belirlenmiştir (Amini, 2011). Dolayısıyla ilgili yıllar için enerji hesaplaması yapılırken vahşi depolamadan elde edilen gazın %67'si, düzenli depolamadan elde edilen gazın ise %75'i alınmıştır.

Tesiste her biri 1,4 MW kapasiteli 2 adet gaz motor ve jeneratör seti bulunmaktadır. Motorlara ait teknik özellikler Çizelge 6.5' te verilmiştir. Motorların elektrik verimliliği % 41,9 dur (URL-9). Tesis yetkilileri bu oranı %35-45 olarak beyan etmişlerdir. Bu bilgiler ışığı altında çalışmada bu oran %41 olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 6.5 Gaz motorlarına ait teknik özellikler (URL-9).

Gaz Motorunun Modeli	JMS 420 GS-BL
Elektriksel Çıkış (kWe)	1415
Termal Çıkış (kW)	1431
Elektriksel Verimlilik (%)	41,9
Termal Verimlilik (%)	42,4

Bu bilgilerden hareketle deponi gazından elde edilebilecek elektrik üretim potansiyeli Denklem [6.6] kullanılarak hesaplanmıştır (Kale, 2017; Surroop ve Mohee, 2011).

$$E_{el} \text{ (kWs)} = m_{dg} \cdot LHV_{dg} \cdot R \cdot n_{el} \quad [6.6]$$

Bu denklemde;

$$m_{dg} = \text{Toplam deponi gazı debisi (Nm}^3\text{/s)}$$

$$LHV_{dg} = \text{Deponi gazının enerji eşdeğeri (kWs/Nm}^3\text{)}$$

$$R = \text{Gaz toplama verimliliği (\%)}$$

$$n_{el} = \text{Gaz motorunun elektriksel verimliliği (\%)}$$

Denklem [6.6]' dan yola çıkarak; öncelikle vahşi depolamadan gelen gazın %67'si, düzenli depolamadan gelen gazın %75'i alınarak toplam gaz debisi bulunmuştur. Daha sonra deponi gazının enerji eşdeğeri, Bölüm 6.2' de bulunan 5 kWs/m³ ve tesiste kullanılan motorların elektrik verimliliği ile çarpılarak 2017, 2018 ve 2019 yılları için elektrik üretimi ayrı ayrı hesaplanmıştır.

2017 yılı için elektrik üretimi

$$\text{Toplam deponi gazı debisi} = \text{Vahşi depolamadan gelen gaz} \times (\%67) + \text{Düzenli depolamadan gelen gaz} \times (\%75)$$

$$\text{Toplam deponi gazı debisi} = [7445000 \text{ (m}^3\text{/yıl)} \times 0,67] + [2005000 \text{ (m}^3\text{/yıl)} \times 0,75]$$

$$\text{Toplam deponi gazı debisi} = 6491900 \text{ m}^3\text{/yıl}$$

$$\text{Toplam deponi gazı debisi} = 741 \text{ m}^3\text{/s}$$

$$\text{Toplam deponi gazı debisi} = 741 \text{ m}^3\text{/s} \cdot 1,109 \text{ (1 m}^3 \text{ serbest gaz} = 1,109 \text{ Nm}^3\text{)}$$

$$\text{Toplam deponi gazı debisi} = 822 \text{ Nm}^3\text{/s}$$

1 m³ deponi gazının enerji eş değeri = 5 kW/s/Nm³

Motorların elektrik verimliliği = 0,41

2017 yılı için elektrik üretimi = $822 \frac{Nm^3}{s} \times 5 \frac{kWs}{Nm^3} \times 0.4$

2017 yılı için elektrik üretimi = 1685 kW/s

2018 yılı için elektrik üretimi

Toplam deponi gazı debisi = Vahşi depolamadan gelen gaz x (%67) + Düzenli depolamadan gelen gaz x (%75)

Toplam deponi gazı debisi = [7275000 (m³/yıl) x 0,67] + [2669000 (m³/yıl) x 0,75]

Toplam deponi gazı debisi = 6876000 m³/yıl

Toplam deponi gazı debisi = 785 m³/s

Toplam deponi gazı debisi = 785 m³/s . 1,109 (1 m³ serbest gaz = 1,109 Nm³)

Toplam deponi gazı debisi = 870,5 Nm³/s

1 m³ deponi gazının enerji eş değeri = 5 kW/s/Nm³

Motorların elektrik verimliliği = 0,41

2018 yılı için elektrik üretimi = $870,5 \frac{Nm^3}{s} \times 5 \frac{kWs}{Nm^3} \times 0.41$

2018 yılı için elektrik üretimi = 1784,53 kW/s

2019 yılı için elektrik üretimi

Toplam deponi gazı debisi = Vahşi depolamadan gelen gaz x (%67) + Düzenli depolamadan gelen gaz x (%75)

Toplam deponi gazı debisi = [7110000 (m³/yıl) x 0,67] + [3328000 (m³/yıl) x 0,75]

Toplam deponi gazı debisi = 7259700 m³/yıl

Toplam deponi gazı debisi = 829 m³/s

Toplam deponi gazı debisi = 829 m³/s . 1,109 (1 m³ serbest gaz = 1,109 Nm³)

Toplam deponi gazı debisi = 919 Nm³/s

1 m³ deponi gazının enerji eş değeri = 5 kW/s/Nm³

Motorların elektrik verimliliği = 0,41

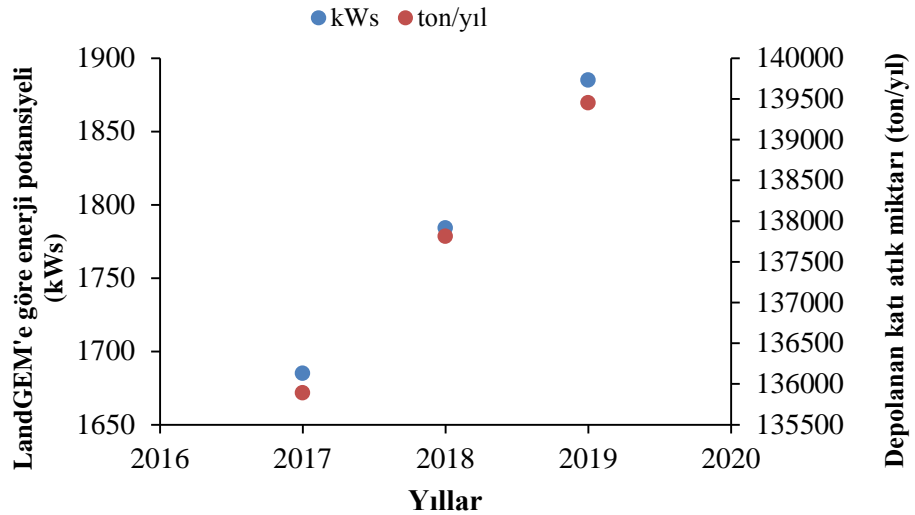
$$2019 \text{ yılı için elektrik üretimi} = 919 \frac{m^3}{s} \times 5 \frac{kWs}{m^3} \times 0.41$$

$$2019 \text{ yılı için elektrik üretimi} = 1885 \text{ kWs}$$

Tesis yetkilileriyle görüşme esnasında şirket politikası gereği elektrik üretimleri net olarak beyan edilmemekle birlikte 2017, 2018 ve 2019 yılları için ortalama bir değer olarak sırasıyla 1572, 1717, 1992 kWs elektrik üretildiği bilgisi verilmiştir. Modelden elde edilen deponi gazı miktarlarıyla hesaplanan elektrik enerjisi ile tesisten alınan ortalama değerler Çizelge 6.6'da verilmiştir. Şekil 6.3'de ise depolanan atık miktarına karşı LandGEM modelinden hesaplanan enerji potansiyelleri verilmiştir.

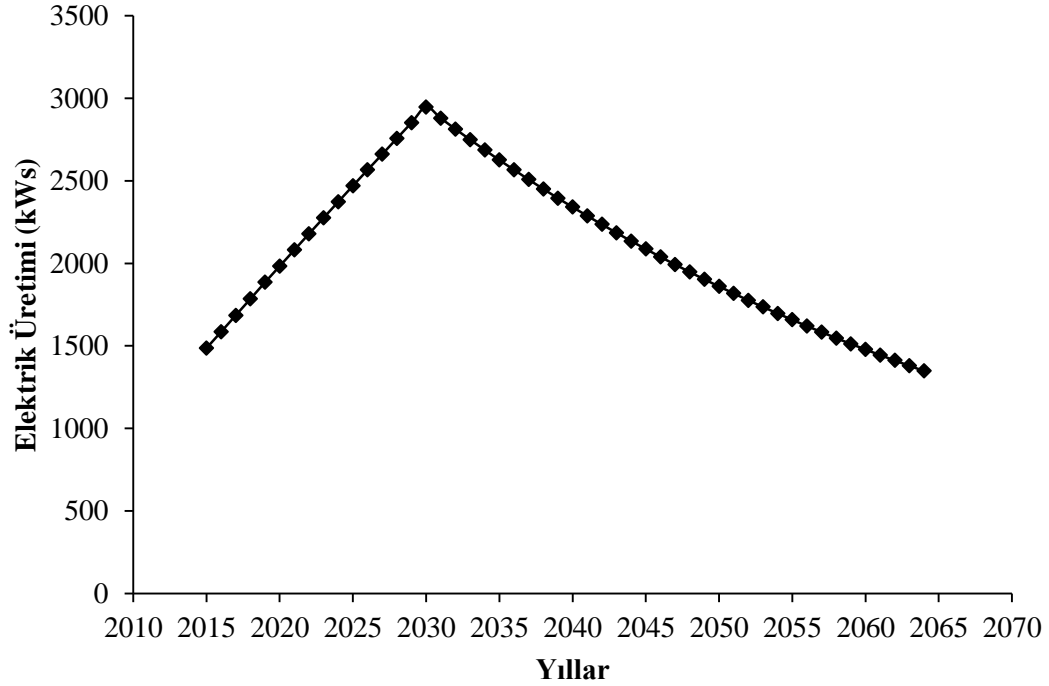
Çizelge 6.6 LandGEM modeline göre enerji potansiyelleri ve tesis verilerinin karşılaştırılması

Yıllar	Modele göre Enerji Potansiyeli (kWs)	Tesis Verileri (kWs)
2017	1685	1572
2018	1784	1717
2019	1885	1992



Şekil 6.3 Depolanan atık miktarına karşı LandGEM modelinden hesaplanan enerji potansiyelleri

LandGEM Modeline göre hesaplanan deponi gazından, üretilen elektriğin yıllara göre dağılımı ise Şekil 6.4’de verilmiştir. Üretilen en yüksek enerji miktarı 2030 yılında 2947 kWs olarak hesaplanmıştır. Bu durum kapatılan bir depolama sahasında deponi gazının önemli bir kısmının; kapatmayı takip eden ilk bir kaç yılda oluşması, sonraki yıllarda ise daha düşük gaz oluşumlarının meydana gelmesiyle açıklanabilir. Şekilde özellikle 2021 yılından başlayarak 2030 yılına kadar enerji üretimi artmıştır. 2030 yılından sonra deponi sahalarında oluşabilecek gaz potansiyelinin düşmesiyle ilintili olarak dereceli bir azalma olduğu görülmektedir. 2060 yılında ise Sivas Çöp Gazı Elektrik Üretim Tesisinin ekonomik uygulanabilir ömrünün neredeyse sona erdiği görülmektedir.



Şekil 6.4 LandGEM modeline göre deponi gazından elektrik üretiminin yıllara göre dağılımı

7. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Enerji; ülkelerin refah düzeyini belirleyen önemli bir faktördür. Ülkelerin gelişmişlik seviyeleri belirlenirken, ilgili ülkelerin ürettiği ve tükettiği enerji oranlarına bakılır. Dolayısıyla enerji, sosyoekonomik kalkınma yönünden oldukça önemlidir.

Ülkemizde nüfus artışı ve teknolojinin gelişmesiyle beraber her geçen gün enerjiye olan talep artmaktadır. Bu enerji talebi %70 civarında fosil yakıtlardan karşılanmakta ve fosil yakıtlar ciddi boyutta çevre kirliliğine yol açmaktadır. Enerji talebinin artmasına ek olarak yaşam standartlarının yükselmesi ve tüketim ihtiyaçlarının çeşitlenmesiyle birlikte önemli ölçüde katı atık problemi ortaya çıkmıştır. Yaşamsal faaliyetlerimizin doğal sonucu olarak meydana gelen; türü ve miktarı çeşitli sebeplerle giderek artan bu katı atıkların, bir taraftan çevre ve insan sağlığına zarar vermeden uzaklaştırılması gerekirken diğer taraftan önemli ölçüde ekonomik değere sahip olması göz ardı edilemez bir gerçekliktir. Katı atıkların havasız ortamda bozunması sonucu meydana gelen biyogaz; katı atıklardan temin edilen en değerli ürünlerden biri olup yüksek enerji potansiyeline sahiptir.

Katı atık deponi sahalarından ileri gelen biyogazın yaklaşık %55'ini meydana getiren metan gazı önemli ölçüde enerji kaynağı olmasıyla birlikte küresel ısınmaya katkısı karbondioksite göre 25 kat daha fazladır. Buna ek olarak deponi sahalarından ileri gelen ayrışma ve gaz oluşumu sahalar kapatıldıktan 50 yıl sonra dahi sürebilmektedir (Sel, 2016). Bu bilgilerden hareketle Sivas DDT' nin işletimde olacağı 2014-2029 yılları arasında depolama alanından ileri gelecek 17.705 tonluk metan gazı miktarının atmosfere salınımı Sivas Çöp Gazı Elektrik Üretim Tesisinin inşası ile enerji üretiminde kullanılarak önlenecektir. Dolayısıyla katı atıklardan enerji eldesi yalnızca biyoenerji uygulaması olarak düşünülmemeli metan gazı salınımının doğrudan atmosfere verilmesi önlenerek, çevre ve insan sağlığı üzerindeki negatif etkisinin de minimum düzeye düşürüldüğü göz ardı edilmemesi gereken bir gerçekliktir.

Atıktaki biyolojik olarak bozunabilir organik madde içeriği; deponi sahalarından ileri gelen metan gazı oranını etkileyen en önemli parametredir. Buna ilaveten deponi sahasının üzerinin örtülü olup olmadığı, nem içeriği ve iç sıcaklığı gibi parametreler de meydana gelecek metan gazı oranına etki etmektedir. Deponi sahalarından meydana gelecek metan gazı miktarının saptanmasında yararlanılan modellerde de

bu değişkenler dikkate alınmıştır. Modellerde yararlanılan değişkenler gerçeğe ne kadar yakın olur ise modellemelerden sağlanan sonuçlar da o oranda doğru olmaktadır.

Sivas'ta oluşan belediye atığının biyolojik olarak bozunabilen organik madde içeriği yüksektir. Bununla birlikte pratik bir bilgi yaklaşımı ile çöp gazı santrallerinde ortalama 1,2 MW'lık kurulu güç için, günlük ortalama 200 ton belediye atığına ihtiyaç duyulmaktadır (Coşkuner, 2005). Sivas' ta oluşan belediye atığı günlük ortalama 350 ton civarında olup bu bilgiler doğrultusunda Sivas DDT'nde çöp gazından enerji elde edilmesinin uygulama açısından uygun olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada 1999-2013 yılları arasında Sivas Seyfebeli vahşi depolama alanından elde edilen gaz miktarı ile 2014-2020 yılları arasında 1. kademe düzenli depolama tesisinden elde edilecek deponi gazı potansiyeli LandGEM modellemesiyle araştırılmıştır. Bu amaç ile iki çalışma alanında da ilgili yıllarda depolanacak katı atık miktarları hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar neticesinde 1999-2013 yılları arasında Sivas Seyfebeli vahşi depolama alanında depolanacak atık miktarı 1.775.480 ton; 2014-2029 yılları arasında Sivas DTT'nde depolanacak atık miktarı 2.294.913 ton olarak bulunmuştur.

Sivas DTT'nde depolanan katı atıkların birim hacim ağırlıkları tesis yetkililerinden alınan bilgiye göre sıkıştırma işleminden sonra 0,8 ton/m³ olarak belirlenmiş ve buradan toplam depolanacak atığın hacmi 2.868.642 m³ olarak hesaplanmıştır. Sivas DDT'ne atık depolanması 2014 yılında 1. kademe ile başlamıştır. 1. kademe dolduğunda sırasıyla 2. ve 3. kademeler devreye alınacaktır. Her kademenin atık depolama kapasitesi yaklaşık 1.000.000 m³ tür. Kademelerin depolama kapasiteleri ve hesaplanan depolanacak atık oranları dikkate alındığında proje alanının ömrü boyunca 2.868.642 m³ atık depolayacağı ngrlmş olup 2029 yılı sonunda deponi alanının dolmayacağı belirlenmiştir. Ancak tesis inşa edilmeden önce Sivas Merkez İlçesi ile birlikte Zara, Yıldızeli, Hafik, Doğanşar ve Ulaş ilçelerinin katı atıklarının bu tesise nakledilmesi planlanmış fakat henüz transfer istasyonları yapılmadığından söz konusu ilçelerden tesise bu zamana kadar atık alınmamıştır. Yapılan hesaplamalar sadece Sivas Merkez İlçesi'nin atıkları göz önünde bulundurulurken yapılmıştır. Dolayısıyla transfer istasyonlarının inşa edilmesiyle birlikte söz konusu ilçelerin de atıkları devreye gireceğinden hesaplamalar yeniden yapılmalıdır.

Deponi sahalarında depolanacak katı atık miktarları bulunduğundan sonra modeli çalıştırabilmek için belirlememiz gereken model parametrelerinden biri olan deponi gazı içerisindeki metan oranı; tesis yetkililerinden alınan bilgiye göre %51.4 olarak belirlenmiştir. Metan oranı haricinde belirlenmesi gereken diğer önemli değişkenler, metan üretim hız sabiti (k) ve metan üretim potansiyeli (L_0); modellerde yararlanılan değişkenler gerçeğe ne kadar yakın olur ise modellemelerden sağlanan sonuçlar da o oranda doğru olacağı düşüncesi ile çalışma alanına yönelik spesifik olarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda, metan üretim hız sabiti $k= 0,023 \text{ yıl}^{-1}$ ve metan üretim potansiyeli $L_0 =116,7 \text{ m}^3/\text{ton}$ olarak bulunmuştur. LandGEM modeline yönelik gerekli veriler sağlandıktan sonra çalışma alanları için ayrı ayrı model uygulanmıştır ve sonuç olarak Sivas DDT'nde 1. kademedeki ton başına oluşacak metan gazı miktarı $112 \text{ m}^3/\text{ton}$, Sivas Seyfebeli vahşi depolama sahasında ise $111 \text{ m}^3/\text{ton}$ olarak hesaplanmıştır. Kaynaklarda, ton atık başına meydana gelen metan gazı oranı $6,2-270 \text{ m}^3 \text{ metan/ton}$ olarak verilmektedir (Yarıntepe, 2011). LandGEM modellemesi ile bulunan metan oluşum potansiyellerinin kaynaklarda verilen değerler arasında olduğu görülmüştür.

Modelden elde edilen veriler ile enerji hesaplaması çalışmalarında 2017, 2018, 2019 yılları için sırasıyla 1685 kW's, 1784 kW's, 1885 kW's değerleri bulunmuş olup aynı yıllar için tesisten alınan değerler kıyaslandığında oldukça yakın değerler elde edildiği görülmüştür. Dolayısıyla bu çalışmada yararlanılan LandGEM modeli vasıtasıyla gerçeğe yakın boyutta tahminler yapıldığı ortaya konmuştur.

KAYNAKLAR

- Akpınar, N.**, (2006). Kentsel Katı Atıklardan Enerji Üretimi. *İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul.
- Amini, H. R.** (2011). Landfill Gas to Energy, Landfill Gas to Energy incentives & Benefits, PhD Thesis, Universty of Central Florida, Orlando.
- Atmaca, K.**, (2015). Samsun Katı Atık Düzenli Depolama Sahası Deponi Gazı Enerji Verimliliğinin İncelenmesi, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Samsun.
- Aydın, A.**, (2013). Türkiye’ de Depo Gazından Enerji Yönetimi. *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul.
- Behçet, R., İlkılıç, C., Oral, F.**, Malatya İlinde Oluşan Evsel Katı Atıklardaki Enerji Potansiyeli
- Bilgili, M. S.**, (2002). Katı Atık Düzenli Depo Sahalarında Depo Gazı Oluşumunu Etkileyen Faktörlerin Belirlenmesi. *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul.
- Cellatoğlu, N., İlkan, M., Egelioglu, F.**, (2010). Dikmen Çöplüğü Bir Enerji Kaynağına Dönüştürülebilir mi?.
- Ciritci, D., & Tarık, T. Ü. R. K.** (2019). Alternatif katı atık depolama alanlarının analitik hiyerarşi süreci ve coğrafi bilgi sistemleri ile otomatik olarak belirlenmesi: Sivas ili örneği. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*,6(1), 61-74
- Coşkuner, M. C.**, (2015). Evsel Atıktan Enerji Üretimi –Gaziantep Örneği, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul.
- Çakır, A. K.**, (2012). İzmir Harmandalı Düzenli Depolama Alanındaki Metan Gazı Potansiyelinin Belirlenerek Elektrik Enerjisi Değerlerinin Elde Edilmesi, *Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, İzmir.
- Çetindemir, H. M.**, (2012). Katı Atık Düzenli Depolama sahalarında Depo Gazı Tahmin Modellerine Alternatif Model Geliştirilmesi. *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul.
- Çevre Kanunu**, (1983, 11 Ağustos). Resmi Gazete (Sayı: 18132). Tarih: 11.08.1983, Sayı: 18132

- Çevre ve Orman Bakanlığı**, (2008). Atık Yönetimi Eylem Planı 2008-2012, Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, syf 12, Ankara.
- Derya Müh.**, (2006). Sivas Entegre Katı Atık Depolama Projesi, Uygulama Projesi Raporu, Derya Müh. İnş. San. ve Tic. A.Ş., Sivas, 57 s.
- Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., and Tanabe, K.** (2006). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Japan: N. p., 2006. Web.
- El-Benny, D.**, (2002). Katı Atık Düzensiz Sahaları İçin Uygun Gaz Oluşum Modellerinin Belirlenmesi. *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul.
- El-Fadel, M., Findikakis, A. N., & Leckie, J. O.** (1997). Environmental impacts of solid waste landfilling. *Journal of environmental management*, 50(1), 1-25.
- EPDK**, (2019). Elektrik Piyasası Sektör Raporu, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), Temmuz 2019, syf 5.
- Eren, S.**, (2010). Evsel Atıklardan Elde Edilen Elektrik Enerjisinin Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Tahmini, *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya.
- Ersoy, Y.**, (2007). İzmir Evsel Çöpünden Biyometan Şeklinde enerji Geri Kazanılabilirliği. *Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, İzmir.
- Gezer, N., Işıldar, G. Y.**, (2016). Ankara İlindeki KOBİ'lerde Endüstriyel Atık Yönetimi, *Ankara Üniversitesi SBF Dergisi*, 72(2), 355-375.
- IPCC** (2006). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Intergovernmental Panel on Climate Change. Vol. 5. Waste.
- Işık, A.**, (2014). Katı Atık Bertaraf Tesislerinde Organik Atıklardan Açığa Çıkan Depo Gazı İle Enerji Elde Edilmesi, *Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Karabük.
- İlkılıç, C., Deviren, H.**, (2011). Biyogazın Oluşumu ve Biyogazı Saflaştırma Yöntemleri. In *6 th International Advanced Technologies Symposium*, pp150-155 (pp. 16-18).
- Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği**. (1994, 14 Mart). Resmi Gazete (Sayı: 20814). Tarih: 14.03.1994; Sayı: 20814

- Kale, C.**, (2017). Farklı Ölçeklerdeki Katı Atık Depolama Sahalarında Biyogaz ve Enerji Potansiyellerinin Araştırılması, *Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Niğde.
- Kankılıç, T., Topal, H.**, (2015). Belediye Atıklarından Düzenli Depolama Sahalarında Biyogaz ve Enerji Üretimi. *Mühendis ve Makine Dergisi*, 56 (669), 58-69
- Karakurt, İ., Aydın, G., Aydın, K.**, (2010). Mitigation and Utilization Technologies of Low Concentration Methane in Mine Ventilation Air. *Journal of Engineering and Natural Sciences*, Sigma 28, 49-65.
- Kolukısa, Z. Ü.**, (2013). Belediyelerde Katı Atık Yönetimi: Malatya Belediyesi Örneği, *İnönü Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Malatya.
- Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide**, (2005). U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Washington, DC 20460
- Lee, J.H. and Trimm, D.L.**, (1995). Catalytic Combustion of Methane. *Fuel Processing Technology* 42, 339-359.
- Mambeli Barros, R., Tiago Filho, G.L., da Silva, T.R.**, (2014). The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. *Energy Policy* 65, 150–164. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.028>
- Mohamed, A. A. M.**, (2017). Eysel Atıklardan Elde Edilen Enerji Üretimi ve Isparta Örneği, *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Isparta.
- Öbekcan, H.**, (2014). Çorum İlinin Biyogaz Üretim Potansiyelinin Araştırılması. *Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Samsun.
- Özaktaç, Ş.**, (2004). Düzenli Depolama Tesislerinde Depo Gazı Üretimine İlişkin Modelleme Olanaklarının Araştırılması. *İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul.
- Özcan, H. K.**, (2009). Katı Atık Düzenli Depolama Gazlarının Genetik Algoritmalarla Modellenmesi. *İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi*, İstanbul.

- Özçakıl, M.**, (2001). Türkiye’de Katı Atık Depo Gazı Geri Kazınım Tesislerinin Değerlendirilmesi. *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul.
- Öztürk, İ.** (2010). Katı Atık Yönetimi ve AB Uyumlu Uygulamaları, İSTAÇ AŞ., Teknik Kitaplar Serisi, İstanbul.
- Öztürk, M.** (2018). Katı Atık Depolama Alanında Depo Gazı Oluşumu, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Ankara, 36 s.
- Park, J. K., Chong, Y. G., Tameda, K., & Lee, N. H.** (2018). Methods for determining the methane generation potential and methane generation rate constant for the FOD model: a review. *Waste Management & Research*, 36(3), 200-220.
- Polat, U.**, (2010). Solid Waste Management Case Studies In Istanbul - Kemerburgaz and Bursa – Gecit. *Boğaziçi Üniversitesi, Institute for Graduate Studies, Graduate Program*, İstanbul.
- Saltabaş, F., Yalçın, M.**, (2004). Depo Gazından Enerji Üretimi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(1), 44-47.
- Sel, İ.**, (2016). Tam Ölçekli Düzenli Depolama Sahasında Depolanmış Evsel Katı Atıkların Metan Potansiyelinin Stokastik Yöntemlerle Belirlenmesi. *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, İstanbul.
- Sezgin, N., Özcan, H. K., Varınca, K., Borat, M.**, (2003). Katı Atık Depo Gazından Elektrik Üretiminin Türkiye’de Uygulanabilirliğine İki Örnek: İstanbul ve Bursa tesisleri. *Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi*, 3, 89-96.
- Singh, C. K., Kumar, A., & Roy, S. S.** (2018). Quantitative analysis of the methane gas emissions from municipal solid waste in India. *Scientific reports*, 8(1), 2913.
- Sivas Belediyesi**, (2019). Temizlik İşleri Müdürlüğü, 2017 2018 2019 Tartım Çizelgeleri, Aralık, 2019.
- Sivas Valiliği**, (2016). Sivas İli 2015 Yılı Çevre Durum Raporu, Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, Sivas.
- Sivas Valiliği**, (2018). Sivas İli 2017 Yılı Çevre Durum Raporu, Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, Sivas.

- Solak, O.,** (2015). Türkiye’deki Katı Atık Deponi Alanlarında Oluşan Gazın Çevresel Ve Ekonomik Açından İncelenmesi. *Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Ankara.
- Surroop, D., & Mohee, R.** (2011). Power generation from landfill gas. In 2nd International Conference on Environmental Engineering and Applications IPCBEE (Vol. 17).
- Taşkan, E. O.,** (2001). Depolama Sahası Gazlarının Yönetimi ve Modellemesi. *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul.
- Tchbonoglous, G., Theisen, H., Vıgıl, S.A.,** (1993). Integrated solid waste management engineering principles and management issues, McGraw Hill International Editions.
- Tehlikesiz ve İnert Atıkların Geri Kazanımı Tebliği.** (2010, 12 Mayıs). Resmi Gazete (Sayı: 27579). Tarih: 12.05.2010, Sayı: 27579
- Ter Maat, H., Hogendoorn, J. A., & Versteeg, G. F.,** (2005). The removal of hydrogen sulfide from gas streams using an aqueous metal sulfate absorbent: Part I. The absorption of hydrogen sulfide in metal sulfate solutions. *Separation and Purification Technology*, 43(3), 183-197.
- Yarıntepe, C.C.,** (2011). Depo Gazı Oluşum Modellerinin Karşılaştırması: Çanakkale Örneği. *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Çanakkale.
- Yılmaz, A., Bozkurt, Y.,** (2010). Türkiye’de Kentsel Katı Atık Yönetimi Uygulamaları ve Kütahya Katı Atık Birliği (KÜKAB) Örneği. *Süleyman Demirel Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 15(1), 11-28
- URL-1** <<https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Elektrik>>, alındığı tarih: 05.11.2019
- URL-2** <<https://www.enerjiatlası.com/biyogaz/>>, alındığı tarih: 08.11.2019
- URL-3** <<http://bepa.yegm.gov.tr/>>, alındığı tarih: 20.11.2019
- URL-4** <<http://bepa.yegm.gov.tr/KullanımKilavuzu.aspx>>, alındığı tarih: 20.11.2019

URL-5 <<https://www.kap.org.tr/tr/ekindir/33E834398225023CE0530A4A622B5826>>, alınığı tarih: 26.4.2020

URL-6 <<https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=119&locale=tr>>, alınığı tarih: 03.01.2020

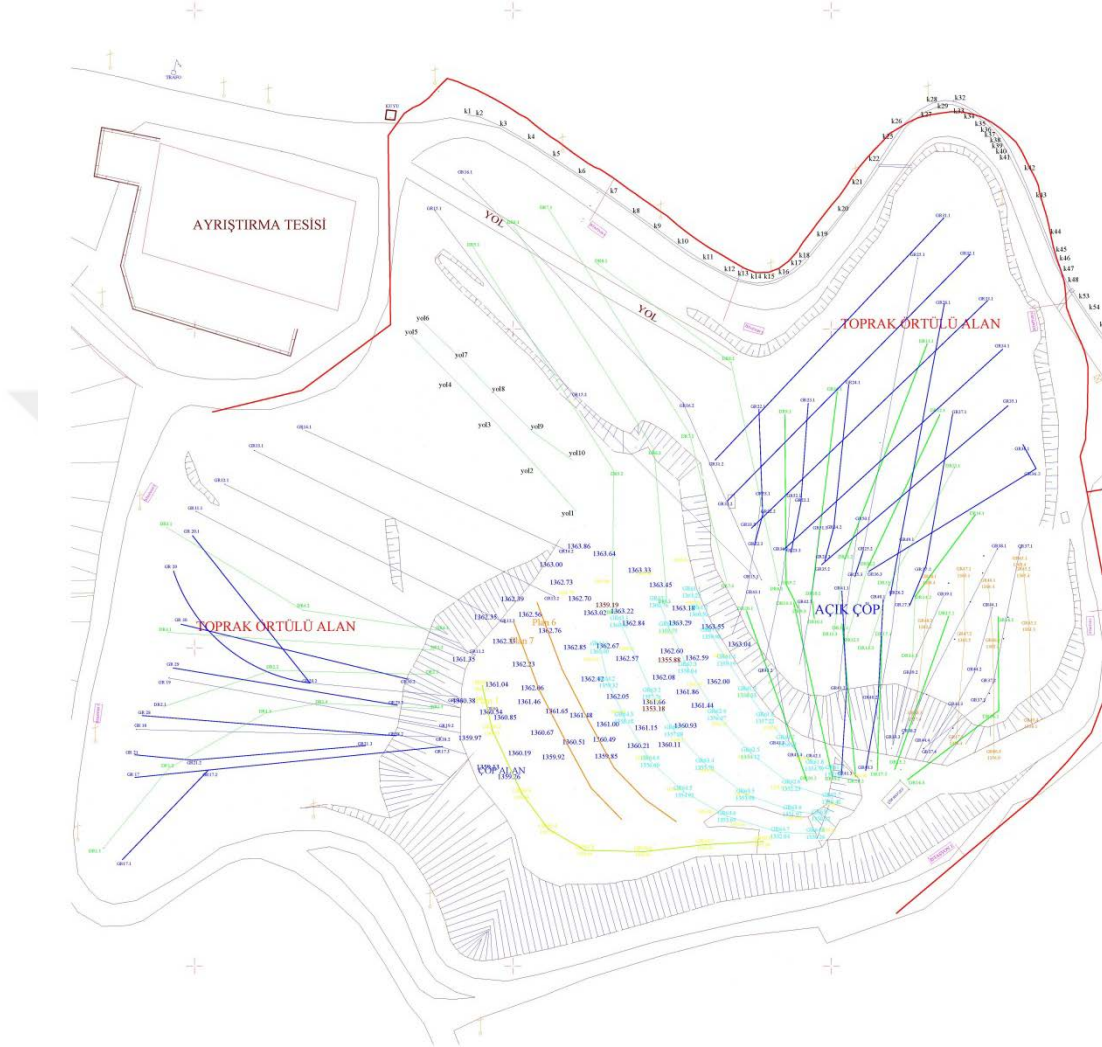
URL-7 <<https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=95&locale=tr>>, alınığı tarih: 12.01.2020

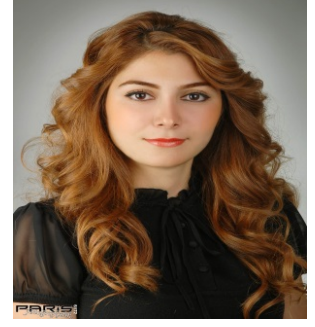
URL-8 <<https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=A&m=SIVAS>>, alınığı tarih: 23.01.2020

URL-9 <http://www.cogeneration.com.ua/img/zstored/J420V21_en.pdf>, alınığı tarih: 11.02.2020

EKLER

Ek-1 Katı Atık Döküm Sahasının Genel Görünümü ve Boru Yerleşim Planı





ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı	Başak YILDIRIM
Doğum Yeri ve Tarihi	Sivas, 12.07.1987
Medeni Hali	Bekar
Yabancı Dil	İngilizce
İletişim Adresi	Çayyurt Mahallesi, 15. Sokak Merkez/SİVAS
E-posta Adresi	basakyildirim13@gmail.com

Eğitim ve Akademik Durumu

Lise: Sivas Kongre Lisesi, 2004
Önlisans: Adalet Önlisans Programı, 2020
Lisans: Cumhuriyet Üniversitesi, Çevre Mühendisliği, 2010
Yüksek Lisans: Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2020

İş Tecrübesi

EN-ÇEV A.Ş / Ankara / Çevre Mühendisi
Referans İş Sağlığı ve Güvenliği Enerji Çevre Danışmanlık Mühendislik Eğitim
Madencilik İnşaat Tic. Ltd. Şti / Sivas/ İş Güvenli Uzmanı
ESTAŞ A.Ş / Sivas / İş Güvenli Uzmanı, Çevre Mühendisi, Ar-Ge
Seta Çevre Danışmanlık Mühendislik İş Sağlığı ve Güvenliği Sanayi Ticaret Limited
Şirketi / Sivas / Çevre Mühendisi