



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



**KATI ATIK DÜZENSİZ DEPOLAMA SAHALARI
REHABİLİTASYONU VE DEPO GAZINDAN ENERJİ
ÜRETİMİNİN TEKNİK VE EKONOMİK
UYGULANABİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Çisem SARIÇİÇEK

Güneş Enerjisi Anabilim Dalı

İZMİR

2019

T.C
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**KATI ATIK DÜZENSİZ DEPOLAMA SAHALARI
REHABİLİTASYONU VE DEPO GAZINDAN ENERJİ
ÜRETİMİNİN TEKNİK VE EKONOMİK
UYGULANABİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Çisem SARIÇİÇEK

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hasan SARPTAŞ

Güneş Enerjisi Anabilim Dalı
Enerji Teknolojileri Yüksek Lisans Programı

İzmir
2019

Çisem Sarıççek tarafından Yüksek Lisans tezi olarak sunulan “Katı Atık Düzensiz Depolama Sahaları Rehabilitasyonu ve Depo Gazından Enerji Üretiminin Teknik ve Ekonomik Uygulanabilirliğinin Değerlendirilmesi” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 2/12/2019 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

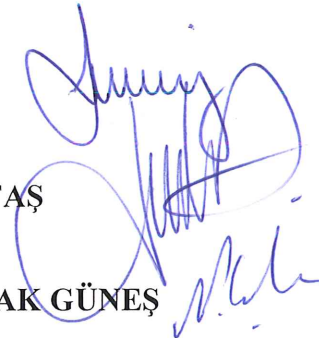
Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı : Prof. Dr. Deniz DÖLGEN

Raportör Üye : Dr. Öğr. Üyesi Hasan SARPTAŞ

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Neslihan ÇOLAK GÜNEŞ



EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Katı Atık Düzensiz Depolama Sahaları Rehabilitasyonu ve Depo Gazından Enerji Üretiminin Teknik ve Ekonomik Uygulanabilirliğinin Değerlendirilmesi” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

02/12/2019

İmzası

Çisem SARIÇİÇEK

ÖZET**KATI ATIK DÜZENSİZ DEPOLAMA SAHALARI
REHABİLİTASYONU VE DEPO GAZINDAN ENERJİ ÜRETİMİNİN
TEKNİK VE EKONOMİK UYGULANABİLİRLİĞİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

SARIÇİÇEK, Çisem

Yüksek Lisans Tezi, Güneş Enerjisi Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Hasan SARPTAŞ

Aralık 2019, 125 sayfa

Çevresel açıdan uygun olmasa da düzensiz çöp döküm sahaları katı atık yönetiminde halen uygulanmakta ve mühendislik esaslara göre işletilen düzenli depolama sahalarına yeni geçildiğinden pek çok yerleşimde bulunan bu düzensiz döküm alanları çözüm beklemektedir.

Düzensiz depolama sahaları, rehabilitasyon için ciddi finansal kaynak gerektiren aynı zamanda depo gazından enerji üretimi konusunda önemli potansiyele sahip alanlardır. Bu nedenle yeni kapanmış bir düzensiz çöp döküm sahasında depo gazından enerji üretiminin rehabilitasyon maliyetlerini karşılayıp karşılayamayacağı cevap bekleyen bir sorudur. Bu kapsamda örnek bir düzensiz çöp döküm sahası seçilerek rehabilitasyon süreci ve enerji üretiminin teknik ve ekonomik uygulanabilirliği incelenmiştir. Örnek sahanın rehabilitasyon ve enerji üretim sistemi ilk kurulum maliyetleri ile elektrik üretiminden elde edilecek gelir hesaplanmıştır. Ekonomik uygulanabilirliğin incelenebilmesi için LandGEM modelinden yararlanılarak ileri dönük depo gazı tahmini yapılmış ve potansiyel enerji üretimi hesaplanmıştır.

Çalışma bulgularına göre, örnek sahanın enerji üretim değeri 2018 yılında ortalama 0,897 MW iken, tahmini enerji üretimi kestirimi aynı yılda 0,823 MW olarak belirlenmiştir. Tesisin 15 yıl işletileceği göz önünde bulundurularak ilişki maliyet analizi bulgularına göre, 3,18 milyon \$ kar ettiği tespit edilmiştir.

Çalışma sonucunda düzensiz depolama sahaları için yapılan rehabilitasyon çalışmalarının teknik ve ekonomik olarak uygulanabilir olduğu fakat kâr marjının düşük olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar sözcükler: Enerji üretimi, depo gazı, düzensiz depolama sahası, rehabilitasyon, ekonomi.



ABSTRACT**EVALUATION OF TECHNICAL AND ECONOMIC APPLICABILITY OF
REHABILITATION OF MUNICIPAL SOLID WASTE STORAGE AREAS
AND ENERGY GENERATION FROM WAREHOUSE GAS**

SARIÇİÇEK, Çisem

MSC in Department of Solar Energy

Supervisor: Assoc. Dr. Hasan SARPTAŞ

December 2019, 125 pages

Despite being non-suitable within environmental parameters, uncontrolled disposal sites are still being used as a part of the solid waste management and many of these sites in many places are waiting to be fixed, as the implementation of sanitary landfills are fairly new.

Uncontrolled disposal sites are fields, which require serious funding and have major potential, as they are a means to produce energy. Therefore, the question of whether the producing energy from the stored gas could cover the expenses of the rehabilitation facility is an important one for a newly closed uncontrolled disposal site. Within this context, a sample uncontrolled disposal sight was selected and the rehabilitation process and technical and economical feasibility of its energy production was monitored. Rehabilitation and energy production system of the sample field's initial set up expenses and the income from its electricity production were calculated. In order to examine the economical feasibility, LandGEM model was used when estimating the prospective storage gas and potential energy production levels were calculated.

According to the findings of the study, while the yearly average of energy production of the sample field was 0,897 MW in 2018, approximate prediction of energy production was valued as 0,823 MW in the same year. Having considered the fact that the field will be operated for 15 years, it was discovered that the profits will be 3,18 million \$ within the context of cost-analysis findings.

In conclusion of the study, it was realised that the rehabilitation process for the uncontrolled disposal sites was feasible in technical and economical terms, yet, it's profit margin was determined as low yield.

Keywords: Energy production, storage gas, municipal solid waste storage areas, rehabilitation, economy.



ÖNSÖZ

İçerisinde bulunduğumuz yüzyılda, geleneksel enerji kaynakları yerine çeşitli yenilenebilir enerji kaynakları kullanımının çevresel, ekonomik ve teknik yönlerden daha üstün olduğu yadsınamaz bir gerçektir. Yenilenebilir enerji kapsamında depo gazından enerji eldesi ve düzensiz çöp döküm alanlarının rehabilite edilmesi, çevresel iyileştirme sağlamak, su, toprak ve hava kirliliğini önlemek, gelecek nesillere daha temiz yaşam alanları bırakmak açısından önem arz etmektedir. Çevrenin zarar görmeyeceği bir enerji üretim şekli olmaması sebebiyle çevreye minimum zarar veren enerji kaynaklarının seçimi ön plana çıkmaktadır. Özellikle vahşi depolama alanlarından kaynaklı çevresel felaketlerin rehabilitasyon ve depo gazından elektrik enerjisi eldesi ile kontrol altına alınması, etkilerin ortadan kaldırılması yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması ile ideal bir çözüm olmaktadır. Böylelikle düzensiz çöp depolama alanlarından hem enerji üretimi hem de tahrip edilmiş bu alanlarda iyileştirme sağlanmaktadır. Çalışmamın konusunu ve kapsamını şekillendiren bu hususlar ışığında, konuya hem duyarlı bir birey hem de akademik anlamda bir mühendis perspektifiyle yaklaşmıştır. Bu yaklaşım aracılığıyla Türkiye’de bulunan birçok düzensiz çöp alanı için uygulanabilecek bir maliyet analizi arka planı oluşturulması ve buna benzer çalışmalarda yaşanabilecek sıkıntılar ile ilgili öneriler sunulmuştur.

İZMİR

02/12/2019

Çisem SARIÇİÇEK

İÇİNDEKİLERSayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
ÖNSÖZ	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiii
TABLolar LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
2. KATI ATIKLARIN DÜZENSİZ DEPOLANMASI	3
2.1. Giriş	3
2.2. Düzensiz Çöp Döküm Uygulamaları ve Sorunları	3
2.3. İstatistiklerle Dünyada ve Türkiye’de Durum	6
3. DÜZENSİZ DEPOLAMA SAHALARININ REHABİLİTASYONU	11
3.1. Giriş	11
3.2. Rehabilitate Edilecek Alanının Analiz Edilmesi	11
3.3. Rehabilitasyon Süreci	13
3.3.1. Depo Gazının Bertaraf Edilmesi	13

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.3.2. Sızıntı Suyunun Tahliye Edilmesi	16
3.3.3. Üst Örtü Tabakasının Oluşturulması	17
3.3.4. Rehabilitasyon Alanının Peyzajı ve Bakımı	20
4. DEPO GAZI VE ENERJİ GERİ KAZANIMI	22
4.1. Depo Gazının Bileşimi ve Özellikleri	22
4.2. Depo Gazı Oluşumu	23
4.2.1. Bakteriyel Ayrışma	23
4.2.2. Buharlaşma	27
4.2.3 Kimyasal Reaksiyonlar	27
4.3. Depo Gazı Oluşumunu Etkileyen Faktörler	27
4.3.1. Atık Bileşimi	28
4.3.2. Oksijen Kullanılabilirliği	28
4.3.3. Nem Kullanılabilirliği	28
4.3.4. Sıcaklık	28
4.3.5. Atık Yaşı	29
4.4. Depo Gazı Üretiminin Tahmini: Depo Gazı Modelleri	29
4.4.1 Sıfır Derece Modeller	30

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.4.2 Birinci Derece Modeller	31
4.4.3 İkinci Derece Model	35
4.4.4. Çok Fazlı Model (Afvalzorg)	35
4.5. LandGEM Model Parametrelerinin Belirlenmesi.....	36
4.6. Depo Gazı Enerji İçeriğinin Hesaplanması	37
4.7. Depo Gazı Enerji Geri Kazanım Yöntemleri.....	39
4.7.1. Giriş	39
4.7.2. İçten Yanmalı Motorlar	41
4.7.3. Gaz Türbinleri.....	41
4.7.4. Buhar Türbini.....	42
4.8. Depo Gazından Enerji Geri Kazanımının Ekonomisi	42
5. VERİ VE YÖNTEM.....	56
5.1. Çalışma Sahası.....	56
5.2. Katı Atık Miktar ve Bileşimi	57
5.3. Çalışma Sahasında Yapılan Rehabilitasyon Çalışmaları.....	59
5.4. Depo Gazı Enerji Potansiyelinin Tahmini	62
5.4.1. Depo Gazı Miktar Kestirimi	62

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

5.4.2. Depo Gazı Brüt / Net Enerji Değerinin Hesabı	64
5.4.3 Gerçek Veriler ile Enerji Üretim Kestiriminin Karşılaştırılması.....	66
5.5. Rehabilitasyon ve Enerji Üretim Sistemi Kurulum Giderleri.....	66
5.5.1. İş Makinası ve Personel/İşçilik Giderleri	67
5.5.2. Şevlendirme, Sıkıştırma ve Toprakla Kapama Gideri.....	68
5.5.3. Gaz Toplama Sistemi Kurulum Giderleri.....	68
5.5.4. Enerji Üretim Sistemleri Kurulum Giderleri	70
5.5.5. Sızıntı Suyu Tahliyesi Giderleri	72
5.5.6. Üst Örtü Toprağı Giderleri	73
5.5.7. Peyzaj ve Çevre Düzenleme Giderleri.....	75
5.5.8 Rehabilitasyon Sonrası Bakım Giderleri	76
6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	79
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	87
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	90
TEŞEKKÜR	105
ÖZGEÇMİŞ.....	106

ŞEKİLLER LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Katı atık yığınları içerisinde su dağılımı (Fellner ve Brunner, 2010).....	4
2.2 Bölgesel olarak katı atık bertarafı (World Bank, 2018)	7
2.3 Ülkelere göre belli yıllarda üretilen belediye atıkları (kişi başı kg) (Eurostat, 2018).....	7
2.4 Bölgelere göre atık üretim tahminleri (World Bank, 2018)	10
3.1 Yüzeyin eğimi (UNEP, 2005).....	18
3.2 Örtü sistemlerinin temel bileşenleri (Özel, vd. 2006).....	19
4.1 Zamana bağlı depo gazı oluşum eğrisi (Tchobangoglus vd, 1993).....	26
4.2 Gaz geri kazanım süreci şeması (Akıncı vd, 2010)	40
4.3 Depo gazı ile elektrik üreten buhar türbini şeması (Cosulich vd, 1992)	42
4.4 Gaziantep Şahinbey depo gazı tesisi yatırım dağılımı grafiği (Coşkuner, 2015)	48
5.1 Çalışma sahası uydu görüntüsü	56
5.2 Örnek tesise ait 2018 yılı atık kompozisyonu.....	57
5.3 Aktif gaz toplama sistemi rigol ve fore kazık krokisi	61
5.4 Yıllara göre toplam gaz ve metan üretimi miktarları.....	64

TABLOLAR LİSTESİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Katı atıkların kaynak ve tipleri (Shekdar, 2009)	6
3.1 Kapatılan vahşi depolama alanlarının bakım ve kontrol periyotları (Gökçe, Aydemir, Hasanoğlu, Özbay, 2015)	21
4.1 Depolama gazı bileşimi (ATSDR, 2001).....	22
4.2 Atık karakterizasyonu ve potansiyel metan kapasitesi (CRA, 2009)	36
4.3 k değeri seçim matrisi (CRA, 2009).....	37
4.4 Saha tipine göre MCF değerleri (IPCC, 2000; Karayılan, 2018)	39
4.5 İçten yanmalı motorların gücü ve gerekli gaz akışı debisi (LMOP, 2017)	41
4.6 Depo gazı ve sızıntı suyu kontrolü ve izlenmesi (Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik, 2010)	46
4.7 Projenin maliyet kalemleri (Ertürk ve Örgün, 2011).....	48
4.8 Gaziantep Şahinbey enerji üretim tesisi, enerji üretim kısmı keşif özeti (Coşkuner, 2015)	49
4.9 Gaziantep Şahinbey enerji üretim tesisi genel işler keşif özeti (Coşkuner, 2015)	50
4.10 Elektrik üretiminin tipik yatırım ve işletme maliyetleri (Erdoğan, 2012).....	52
4.11 Hiriya depolama alanının mühendislik rehabilitasyonunun maliyeti (milyon ABD doları)	52
4.12 Barycz depolama alanı ile ilgili bilgiler (ISWA, 2012).....	54

TABLOLAR LİSTESİ (devam)

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
5.1 Organik maddelerin ayrışabilirlik dereceleri (Solak, 2015)	57
5.2 Depolanan atık miktarları	58
5.3 Hesaplama için kullanılan parametreler	64
5.4 İş makineleri maliyeti	67
5.5 Personel giderleri	68
5.6 Gaz toplama sisteminde kullanılan boru maliyet hesabı	69
5.7 Gaz toplama sisteminde kullanılan fore kazık işçilik maliyeti	69
5.8 Gaz toplama sisteminde kullanılan mıcır ve jeotekstil maliyet hesabı	70
5.9 Şalt sahası maliyetleri	70
5.10 Enerji üretim sistemlerinde kullanılan ana ekipman maliyetleri	71
5.11 Enerji üretim sistemlerinde kullanılan diğer ekipman maliyetleri	71
5.12 Sızıntı suyu tahliye sistemi maliyetleri (Entegre tesis verileri referans alınmıştır.)	73
5.13 Kıl maliyeti	74
5.14. Drenaj tabakası maliyeti	74
5.15 Üst örtü toprağı maliyeti	75
5.16 Peyzaj ve çevre düzenleme maliyetleri (Çakıl Peyzaj, 2019)	75

TABLOLAR LİSTESİ (devam)

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
5.17 Yeraltı suyu parametreleri için MELBES birim fiyatları	76
5.18 Yıllık yeraltı suyu izleme analiz maliyeti	76
5.19 Yıllık personel maliyeti (Aydın Efeler Düzenli Katı Atık Depolama Sahası, 2019)	77
5.20 Motor bakım giderleri (Aydın Efeler Düzenli Katı Atık Depolama Sahası, 2019)	77
5.21 Yağ değişim maliyeti (Aydın Efeler Düzenli Katı Atık Depolama Sahası, 2019)	78
6.1 Sahaya ait gerçek bilgiler	79
6.2 Rehabilitasyon ve enerji üretim sistemi ilk kurulum maliyetleri	80
6.3 Örnek saha için üretim değerleri	81
6.4 Depo gazı miktar tahmini için model parametreleri	82
6.5 2018-2040 yılları arasında üretilecek tahmini oranlar	82
6.6 Hesaplanan enerji değerleri	83
6.7 Tahmini ve gerçek verilerin karşılaştırılması	83
6.8 Enerji potansiyeli kestirimi ile elde edilecek değerler	85
6.9 Toplam maliyet ve elde edilecek gelir karşılaştırması	85

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
AB	Avrupa Birliği
ATSDR	Toksik Maddeler ve Hastalık Kayıt Ajansı
CH ₃ COOH	Asetik asit
CO ₂	Karbondioksit
EA	Çevre Ajansı
EPA	Çevre Koruma Ajansı
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
H ₂	Hidrojen
ISAT	Uygun Teknolojiye İlişkin Bilgi ve Danışmanlık Hizmeti
ISWA	Uluslararası Katı Atık Derneği
Kw	Kilowatt
kWh	Kilowatt saat
LMOP	Landfill Methane Outreach Program
MELBES	Merkezi Laboratuvar Belirleme Sistemi
MGM	Meteoroloji Genel Müdürlüğü
MJ	Megajoule

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
MW	Megawatt
NMOC	Metan Dışı Organik Bileşik
NO ₃	Nitrat
OECD	Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü
SO ₄	Sülfat
UNEP	Birleşmiş Milletler Çevre Programı
UN-Habitat	Birleşmiş Milletler İnsan Yerleşimleri Programı
WEC	World Energy Council
TBB	Türkiye Belediyeler Birliği
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu

1. GİRİŞ

Nüfus artışı, kentleşme ve ekonomik büyüme ile endüstriyel üretim proseslerindeki/teknolojilerdeki gelişmeler nedeniyle değişen tüketim alışkanlıklarının özellikle kentlerde yarattığı en büyük sorun katı atıklardır. Bu nedenle, günümüzde, yerel yönetimlerin başlıca hizmet alanı – su temini ve atıksu toplama yanında – kentsel katı atıkların çevre ve insan sağlığına zarar vermeyecek şekilde toplanması ve bertaraf edilmesidir. Ancak gerek katı atık miktar ve bileşimi günlük, haftalık ve mevsimsel olarak önemli değişiklikler gösterdiğinden (haftanın belli günlerinde daha çok atık oluşumu, yaz aylarında atığın organik madde ve nem içeriğinin ve kış aylarında ise kül içeriğinin artması gibi) gerekse katı atıkların toplanması ve çevresel açıdan uygun şekilde bertaraf edilmesi önemli teknik kapasite ve yüksek finansal kaynak gerektirdiğinden katı atıklar özellikle az gelişmiş ülkelerde ve gelişmekte olan ülkelerin ise çoğunluğunda düzensiz olarak açık alanlar, terkedilmiş maden ocakları, kuru dere yatakları ve deniz kıyıları gibi alanlara dökülerek uzaklaştırılmaktadır. Bu durum uzun yıllar bir problem olarak görülmemiş ve katı atıkların açık alanlara dökülmesi sonucu oluşan çevresel riskler göz ardı edilmiştir (TBB, 2015). Özellikle ülkemizde, düzensiz çöp döküm alanlarının ne kadar zararlı ve tehlikeli olduğu bu alanlarda çıkan yangınlarla ve patlamalarla gündeme gelmiştir (Yılmaz ve Bozkurt, 2010). Böylece atıkların sadece atıldıkları şekilde kalmadığı, fiziksel ve biyokimyasal reaksiyonlarla çeşitli evrelerden geçtikleri/bozundukları anlaşılmıştır. Bu doğrultuda düzensiz çöp döküm sahaları rehabilite edilmeli, kontrol altına alınarak çevreye verdikleri zarar en aza indirilmelidir (TBB, 2014). Çöp döküm sahalarının rehabilitasyonu Sarptaş vd. (2006) tarafından yapılan çalışmada “kirlenmiş bölgelerin temizlenmesi” şeklinde açıklanmaktadır. Rehabilitasyon açısından özellikle yeraltı suları ile ilgili çevre ve insan sağlığına zarar veren özelliklerin ortadan kaldırılması oldukça önemlidir. Rehabilitasyon kapsamında sahanın tamamen kapatılması zorunlu değildir fakat rehabilitasyonun ardından sahanın kullanılabilecek ekonomik ömrünün yeterli olması gerekmektedir.

Düzensiz çöp döküm sahalarında rehabilitasyon çalışması kapsamında uygun gaz toplama sisteminin oluşturulması ve sonrasında elektrik üretim tesisinin kurulmasıyla oluşan depo gazından enerji geri kazanılabilmektedir (WEC, 2013). Üretilen enerji yerel ve ulusal şebekeler aracılığı ile dağıtılabilir. İstenilen sıcaklıkta elde edilebilen ısı yerel olarak ısıtmada ya da belirli termodinamik amaçlar için kullanılabilir. En gelişmiş ve yaygın olarak kullanılan teknoloji kombine ısı ve güç santralleridir (WEC, 2013).

Düzensiz çöp döküm sahalarında rehabilitasyon çalışması kapsamında uygun gaz toplama sisteminin oluşturulması ve sonrasında elektrik üretim tesisinin kurulmasıyla oluşan depo gazından enerji geri kazanılabilmektedir (WEC, 2013). Bu nedenle düzensiz çöp döküm sahalarında rehabilitasyon sonrası depo gazından enerji üretim tesislerinin kurulmasında, teknik uygulanabilirlik yanında ekonomik uygulanabilirliğin de değerlendirilmesi önemli bir gerekliliktir. Bu değerlendirmeler ile düzensiz çöp döküm sahasında oluşan depo gazından üretilen enerji ile rehabilitasyon ve enerji üretim tesisi – ilk yatırım ve işletme – giderlerinin ne ölçüde karşılanabileceği ve/veya bu tesisten elde edilebilecek kar oranı tespit edilebilir.

Bu gereklilikleri dikkate alan bu çalışma kapsamında düzensiz çöp döküm sahalarının rehabilitasyon sonrası enerji geri kazanımı sürecinde uygulamadaki zorlukların ortaya konması, düzensiz çöp döküm sahalarından elde edilebilecek depo gazı miktarı ve buna bağlı olarak enerji potansiyelinin belirlenerek örnek bir saha üzerinde enerji geri kazanımının teknik ve ekonomik olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

2. KATI ATIKLARIN DÜZENSİZ DEPOLANMASI

2.1. Giriş

Düzensiz çöp dökümü işlemi, toprak, yeraltı suyu ve yüzeysel su kaynaklarının kirlenme riskleri ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri göz önünde bulundurulmadan, diğer bir ifade ile herhangi bir mühendislik önlem / teknik olmaksızın boş arazilere (ülkemizde özellikle kuru dere yataklarına) boşaltılması işlemidir (Çekim, Yıldız ve Dere, 2015).

Dünyanın gelişmekte olan birçok düşük ve orta gelirli bölgelerinde atıklar, uygun bir katı atık sistemi bulunmadığından, özelliklerine ve tehlikeli olup olmadığına bakılmaksızın düzensiz çöp döküm alanlarına gönderilmektedir (Taylor ve Allen, 2003). Çöpün mikroorganizma faaliyetleri ile biyolojik olarak parçalanması sonucu oluşan sızıntı suları yeraltı suyu ve toprak kirliliğine, oluşan depo gazı ise hava kirliliği ve koku problemlerine sebep olmaktadır (Pasko ve Mochalova, 2014). Bu nedenle mühendislik esaslara göre planlanıp işletilen, sızıntı suyu ve depo gazı çıktıları kontrol altında tutulan düzenli depolama sahalarının aksine düzensiz çöp döküm alanlarında çevre ve insan sağlığı açısından uygun olmayan koşullar oluşmaktadır.

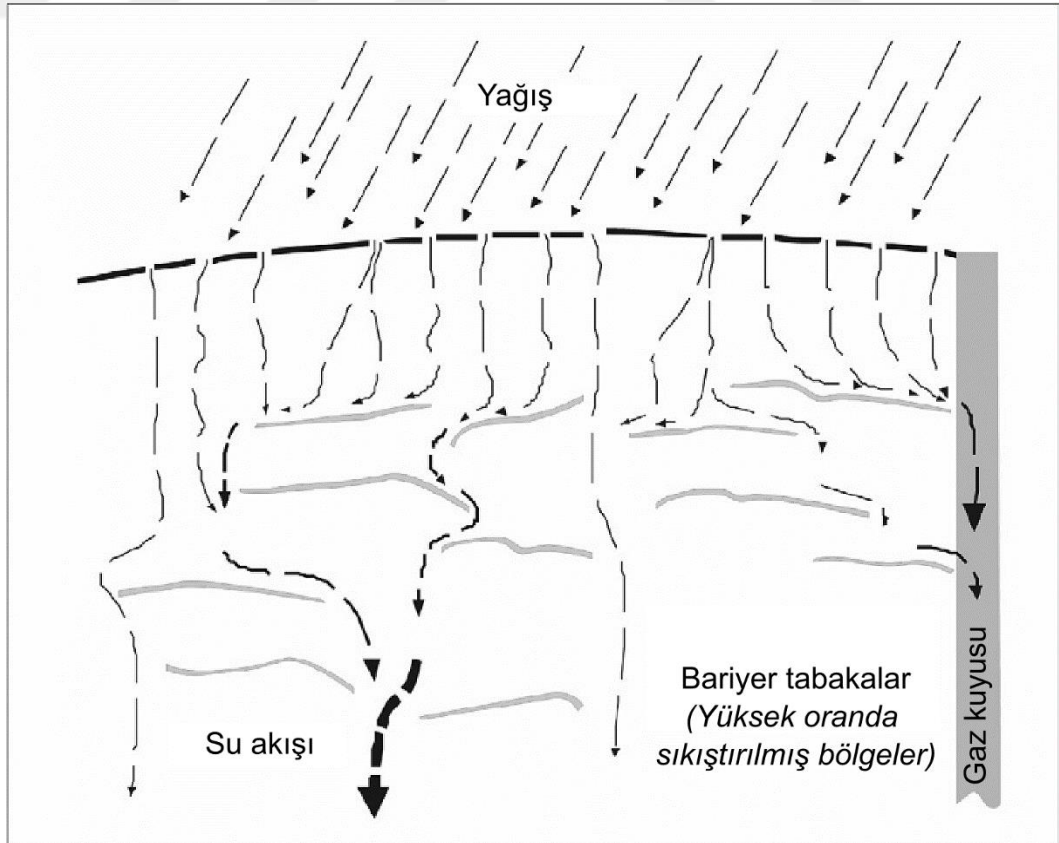
Ülkemizde ise atık üretim miktarlarının doğru olarak tespit edilememesi, kurumsal çerçeve ve finansal kaynaklarının eksik olması, eğitilmiş işgücünün bulunamaması ve yetersiz atık yönetimi uygulamaları nedenleri ile düzensiz depolama alanlarının sayısı oldukça fazladır. Düzensiz çöp döküm sahaları, pratikte uygulanan bir bertaraf şekli olmakla birlikte entegre / sürdürülebilir katı atık yönetimi açısından bir katı atık bertaraf yöntemi değildir (De ve Debnath, 2016, Demie ve Degefa, 2015, Ali, Hamid ve Yasmin, 2013).

2.2. Düzensiz Çöp Döküm Uygulamaları ve Sorunları

Döküm sahalarındaki atıkların bileşimi, esas olarak, söz konusu toplumun tüketim alışkanlıkları ve atık yönetim sistemleri ile ve yaygın olarak kullanılan malzemelerde yapılan değişikliklerle belirlenir. Döküm sahalarının kirleticilerinden ve potansiyel sağlık risklerinden dolayı yeraltı suyu kirliliği önemli bir sorun teşkil etmektedir. Düzensiz döküm alanına yakın yerler daha fazla yeraltı suyu kirliliğine maruz kalma riskine sahiptir (Mor, Ravindra, Dahiya and Chandra 2006). Döküm sahasında oluşan sızıntının içerisinde, kalsiyum, magnezyum,

potasyum, azot, amonyak, demir, bakır, manganez, krom, nikel, kurşun gibi temel elementler ile fenoller, poliaromatik hidrokarbonlar, aseton, benzen, tolüen, kloroform vb. organik bileşikler yer almaktadır (Parveen, Arjun ve Vyankatesh, 2012). Bu element ve bileşiklerin sızıntı suyu içindeki konsantrasyonu, atıkların bileşimi, sıkıştırma derecesi, atıkların emme kapasitesi, atıkların yaşı, iklim ve yağış seviyeleri, döküm alanının sıcaklığı, boyutu gibi faktörlere bağlıdır (Bhalla Swamee, Kumar, Bansal, 2012). Bu zararlı maddelerin bazıları, yayılma sırasında toprak tarafından da adsorbe edilmektedir (Parveen, vd., 2012). Dolayısıyla döküm sahasını çevreleyen alanların toprak kalitesini de etkilemektedir. Bu durum yerel bitki örtüsünün büyümesi ve değişmesi bakımından biyo çeşitlilik üzerinde olumsuz bir etki yaratmaktadır (Newton, 2018).

Toprağın eğimli olmasının yanı sıra gözenek yapısı gibi etkenlere bağlı olarak sızıntı sularının akış yönü değişebilmektedir (Simunek, Jarvis, Van Genuchten, Gärdenäs, 2003). Şekil 2.1’de katı atıkların içerisinde oluşan sızıntı sularının dağılımı görülmektedir. Sızıntı suyunun ilerleyerek katı atık kütesinden toprak ve yeraltı suyuna ulaşması yer altı ve yer üstü su kirliliğini meydana getirirken aynı zamanda toprağın kirlenerek bitkilerin zarar görmesine neden olmaktadır (Fellner ve Brunner, 2010).



Şekil 2.1 Katı atık yığınları içerisinde su dağılımı (Fellner ve Brunner, 2010)

Görünüşün ve kokunun rahatsızlık vermesiyle birlikte bu alanlarda üreyen haşerelerin oluşması da ayrı bir çevresel sorundur. Böceklerin yayılımı, kötü kokunun oluşması ve suların kirlenmesi beraberinde hastalıkları getirmektedir. Bu sebeplerden kaynaklı olarak hastalıklar bulaşıcı bir hal alarak insan sağlığını tehdit edebilmektedir (Chin, 2011). Doğru şekilde toplanmayan ve imha edilmeyen katı atıklar, böcekler, haşaratlar ve toplayıcı hayvanlar için bir üreme alanı haline gelerek hava ve su yolu ile bulaşıcı hastalıkların yayılmasına neden olabilmektedir. (Harvey, Baghri and Reed, 2005). UN-Habitat tarafından yapılan araştırmalar, atıkların sık sık toplanmadığı bölgelerde bağırsak yolu hastalıklarının iki kat, akut solunum yolu enfeksiyonlarının ise altı kat daha fazla ortaya çıktığını göstermektedir. Bunun yanı sıra hastanelerdeki enfeksiyon taşıyan ve taşımayan atıklar, evsel atıklarla birlikte toplanarak belediyeler tarafından düzensiz katı atık alanlarına taşımaktadır. Bu alanlarda toplayıcılık yapan insanların ya da yaşayan canlıların enfeksiyon taşıyan iğnelerden hastalık kapmaları ve diğer birçok materyalden kaynaklanan yaralanmaları nedeniyle ciddi sağlık sorunlarına sebebiyet vermektedir (UN-Habitat, 2009). International Solid Waste Association (ISWA) (Uluslararası Katı Atık Birliği)'nin yol haritasına göre, dünyanın en büyük 50 çöplüğü, 64 milyon insanın günlük hayatını etkilemektedir. Düzensiz depolama alanlarına yakın yerlerde büyüyen çocuklar, maddi açıdan ailelerini desteklemek zorunda kaldıkları için eğitim gibi temel insani haklardan mahrum kalmaktadır. Küçük çocuklar, tehlikeli atıkların bulunduğu alanlarda, aileleriyle birlikte geri dönüştürülebilir materyalleri toplayarak geçinmeye çalışmaktadır. Bu bağlamda insanlar hayatlarını, hayatta kalabilmek adına tehlikeye atmaktadır (ISWA, 2017).

Çekim vd, (2015), Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nin katı atık sorunları ve çevresel etkilerini ortaya çıkarabilmek adına yaptığı, Adıyaman katı atık depolama alanındaki incelemelerinde, sızıntı sularının doğrudan İncesu Çayı'na verildiğini ve bu çayın yakın mesafedeki Atatürk Baraj Gölü'ne karıştığını tespit etmiştir. Bununla birlikte depolama alanına getirilen atıkların düzensiz bir şekilde depolanmakta ve bazı atıkların ise depolama alanında gelişi güzel şekilde yakılmış olduğu görülmüştür. Karamete (2008), Konya katı atık depolama sahası kapsamında yaptığı çalışmasında alandaki sızıntı suyunun, toksik oranının çok yüksek olduğunu ve bitki ve akuatik yaşam için uygun olmadığını tespit etmiştir. Bunlarla birlikte Türkiye'de 1993 yılında yaşanan Ümraniye açık depolama sahasındaki gaz sıkışması sonucu meydana gelen patlamada 39 kişi hayatını kaybetmiştir (Yılmaz ve Bozkurt, 2010).

Düzensiz döküm alanlarının bu etkileri göz önüne alınırsa bu tür alanların toprak ve yeraltı suyu kirliliğine yol açtığı, halk sağlığını tehlikeye attığı, arazileri verimsiz hale getirdiği ve toprakların değerini düşürdüğü anlaşılmaktadır. Genel olarak bakılacak olursa düzensiz depolama alanları sağlık, güvenlik ve çevresel tehditleri ortaya çıkarmaktadır.

2.3. İstatistiklerle Dünyada ve Türkiye’de Durum

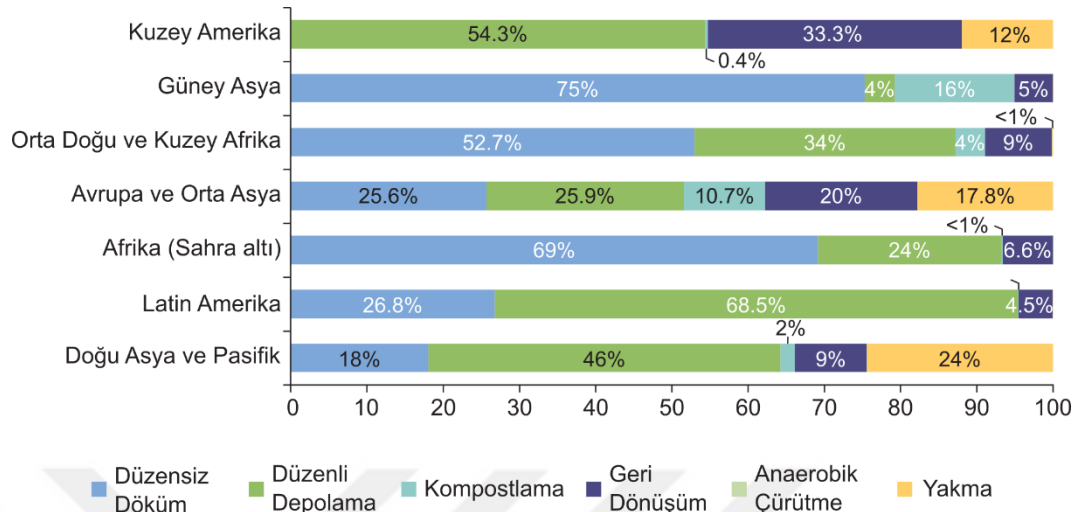
Dünya nüfusunun her geçen gün artması ile tüketim artmakta ve bu tüketimin sonucunda meydana gelen atık miktarı da yükselmektedir. Dünyada ve Türkiye’deki katı atıkların oluşum kaynakları ve tipleri Tablo 2.1’de atık üretim yerleri ile gösterilmektedir. Katı atık kaynakları yerleşim, ticari, kamusal ve belediye hizmetleri kapsamında 4 kısımda incelenmektedir. Bu kaynaklar doğrultusunda hangi üretici kesimden ne tür katı atıklar meydana geldiği görülebilmektedir (Shekdar, 2009).

Tablo 2.1 Katı atıkların kaynak ve tipleri (Shekdar, 2009)

Kaynaklar	Atık Üreticisi	Katı Atık Tipleri
Yerleşim	Konutlar	Yemek atıkları, Kâğıt, Karton, Plastik, Kumaş, Cam, Metal, Kül, Özel atıklar (Büyük eşyalar, tüketici elektroniği, Pil ve Kablo) ve Tehlikeli evsel atıklar.
Ticari	Dükkanlar, Oteller, Restoranlar, Marketler, Ofis Binaları	Kâğıt, Karton, Plastik, Ahşap, Yemek atıkları, Cam, Metal, Özel atıklar, Tehlikeli evsel atıklar.
Kurumsal	Okullar, Hükümet Merkezi, Hastaneler, Hapishaneler	Kâğıt, Karton, Plastik, Ahşap, Yemek atıkları, Cam, Metal, Özel atıklar, Tehlikeli evsel tıklar.
Belediye Hizmetleri	Sokakların temizlenmesi, Peyzaj çalışmaları, Parklar, Kumsallar, Rekreatyon alanları	Sokak çöpleri, Peyzaj ve ağaç budama, Parklardaki genel atıklar, Kumsallar ve diğer rekreatyon alanları

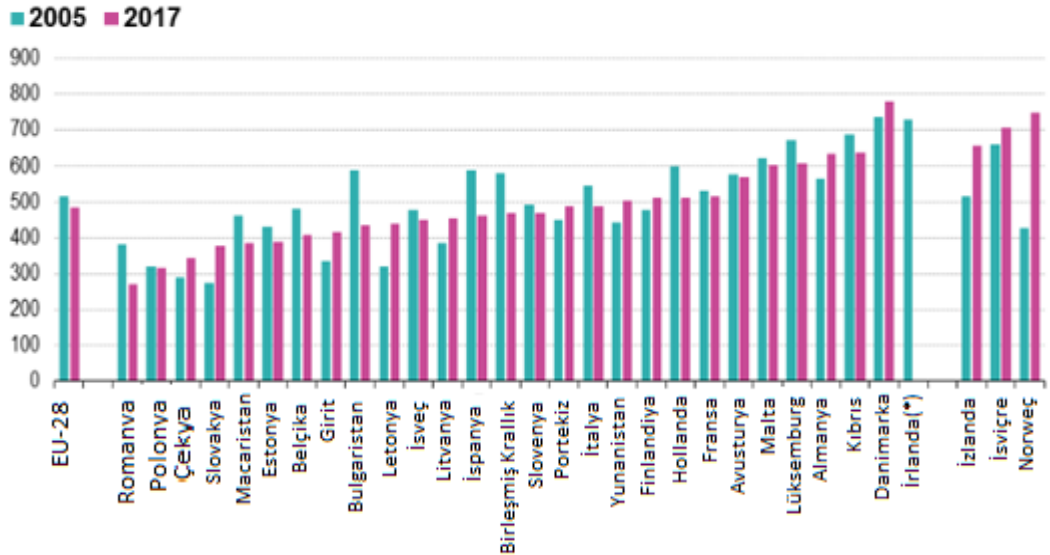
Atık bertaraf verileri oldukça zor toplanmaktadır. Birçok ülke, ulusal düzeyde atık bertaraf verileri toplamamaktadır, bu nedenle gelir düzeylerine ve bölgelere göre veri karşılaştırmaları yapmak zorlaşmaktadır. Verilerin mevcut olduğu durumlarda ise kategorilerin her biri için kullanılan tanımlar çoğunlukla bilinmemekte veya tutarlı olmamaktadır. Bunun yanı sıra, hangi yöntemlerle hesaplama yapıldığı da bilinmemektedir. Dünya Bankası, 87 ülke için çeşitli

kaynaklardan atık bertaraf verilerini temin ederek Şekil 2.2’de gösterilen verileri elde etmiştir (World Bank, 2012).



Şekil 2.2 Bölgesel olarak katı atık bertarafı (World Bank, 2018)

Şekil 2.3’te ülkeler bazında belli yıllarda meydana gelen belediye atıklarının oranları görülmektedir. 2017 yılında, belediye atık üretimi toplamı, Romanya'daki kişi başına 272 kg'dan Danimarka'daki kişi başına 781 kg'a kadar değişmektedir.



Şekil 2.3 Ülkelere göre belli yıllarda üretilen belediye atıkları (kişi başı kg) (Eurostat, 2018)

(*) İrlanda için 2017 verisi mevcut değildir.

Çin’de nüfus artışıyla birlikte katı atık oluşumu yılda %10 artış göstermekte olup üretilen katı atık miktarı 2013'te 172,4 milyon tonun üzerine çıkmıştır (Rong ve ark., 2017). Çin, bu bakımdan dünyada en fazla katı atık üreten ülkeler arasında

yer almaktadır. Bununla birlikte 2013 yılında yılda 46,3 milyon ton kapasiteli 166 atık yakma tesisi aktif olarak kullanılmaktadır (Zhou, San ve Yi, 2017).

Japonya, Almanya ve İsveç gibi gelişmiş ülkeler düzensiz döküm alanlarını artık kullanmamaktadırlar. Bu ülkelerin katı atık politikalarına bakıldığında, önceliğin atık üretimini en aza indirmek olduğu, toplanan atıkların ise geri dönüşüm ya da yakarak enerji elde etme gibi yollarla ortadan kaldırıldığı anlaşılmaktadır. Ancak Afrika, Çin ve Güneydoğu Asya'daki ülkeler gibi az gelişmiş ya da gelişmekte olan ülkelerde ise düzensiz döküm alanlarının yaygın olarak kullanıldığı bilinmektedir. Fakat bu ülkeler, günümüzde bu konuya hassasiyetle yaklaşarak çeşitli politikalar izleyerek iyileştirme yoluna gitmektedirler (World Bank, 2012).

İsveç, katı atık yönetiminde Avrupa ülkeleri arasında en aktif ülkelerdendir. Ülkedeki katı atık yönetimi, yerel, bölgesel, ulusal ve AB düzeyinde mevzuat, planlama ve stratejik olarak yönetilmekte ve yönlendirilmektedir (Schultz, 2017). İsveç çevre kanunu kapsamında evsel atıkların toplanması, taşınması, geri dönüştürülmesi ve bertaraf edilmesinden belediyeler sorumludur. Atıklar, geri dönüşüm, işlenme, enerji geri kazanımı ve düzenli depolama gibi yöntemler dahilinde bertaraf edilmektedir. Tehlikeli atıklar ise özellikleri bağlamında bu yöntemlerin yanı sıra farklı yöntemler de kullanılarak işlenmektedir (Wiqvist, 2017).

İngiltere'de atıkların toplanması, taşınması, geri kazanımı ve bertarafı, gözetimi ve bertaraf tesislerinin bakımı Atık Çevre Direktifi doğrultusunda gerçekleştirilmektedir (Rogerson, 2013: 10). 2016-2017 döneminde çöp yakma tesislerine gönderilen atıklar 7,1 milyondan 10,2 milyon tona çıkmıştır. Aynı dönem içerisinde tüm yerel yönetim atıklarının %39'u yakmaya gönderilmiştir (UK DEFRA, 2017).

Almanya'da atık yönetimi ulusal hükümet, federal devletler ve yerel yetkililer arasında gerçekleştirilmektedir. Söz konusu atık yönetimi atıkların, toplanması, taşınması, atık önleme ve geri kazanımın teşvik edilmesi için önlemler, atık bertaraf tesislerinin kurulması ve işletilmesini kapsamaktadır (Cave, 2017). Kaynak verimliliğine katkıda bulunulması bağlamında toplamda 15.000 tesis geri dönüşüm tesisi ve geri kazanım prosedürleri bulunmaktadır. Almanya'daki geri dönüşüm oranlarına bakıldığında belediye atıklarının %60, ticari atıklarının %60 ve inşaat atıklarının %90 oranında olduğu görülmektedir (Nelles vd., 2016).

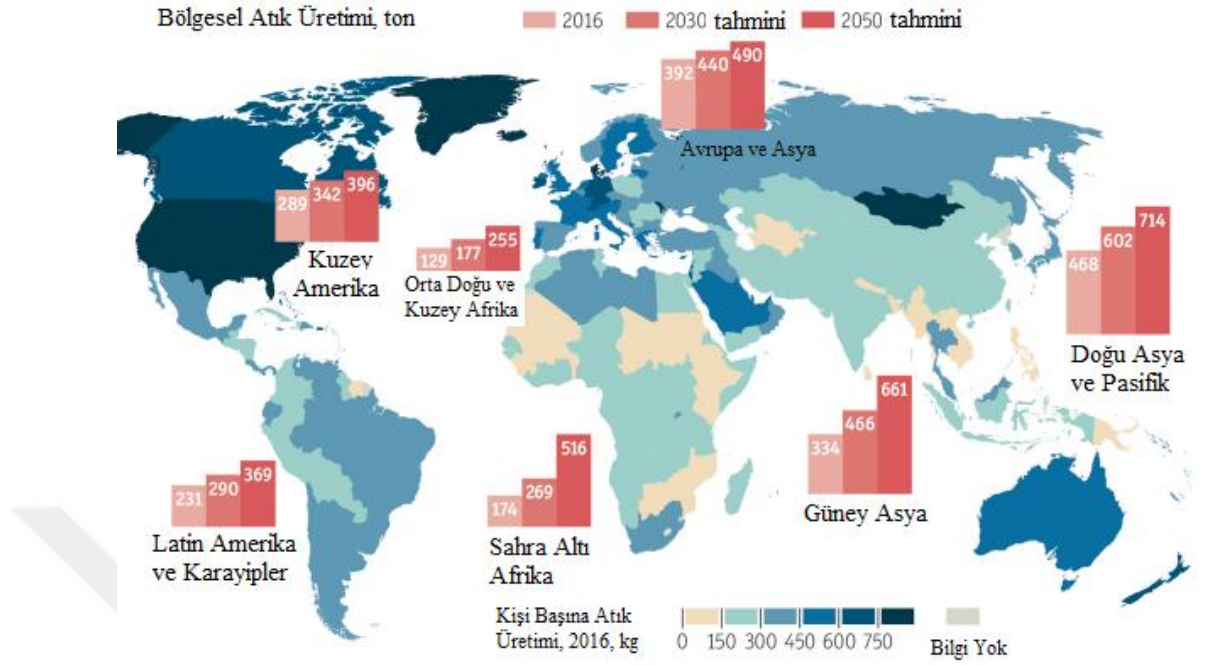
2017 Altyapı Raporunda Amerika’da yılda yaklaşık 258 milyon ton katı atık üretildiği belirtilmiştir. Bu atıkların %53’ü depolama alanlarına gönderilmiş, %12,8’i yakılmış ve %34,6’sı enerji üretimi için geri dönüştürülmüştür. EPA’nın sunmuş olduğu raporda Amerika’daki katı atıkların %70’inden fazlasının düzenli depolama alanlarına gönderildiği belirtilmiştir. 86 belediye atık enerji işleme tesisinin günde yaklaşık olarak 100.000 ton katı atığı elektriğe çevirdiği anlaşılmıştır (ASCE, 2017).

Ülkemizde toplanan 33,2 milyon atıktan %67,2’si düzenli depolama tesislerine gönderilirken %20,24’ü belediye çöplüklerine, %12,33’ü geri kazanım tesislerine, %0,23’ü ise açık alanlara dökülerek, gömülerek ya da açıkta yakılarak bertaraf edilmiştir (TÜİK, 2018). İç Anadolu, Akdeniz ve Marmara bölgelerinin yarısında, Karadeniz bölgesinin büyük bir kısmı ile Güneydoğu Anadolu ve Doğu Anadolu bölgelerinin tamamında, belediyeler tarafından toplanan katı atıkların işlendiği herhangi bir tesisin bulunmadığı ortaya konmuştur (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2016).

Akdoğan ve Güleç (2007), Türkiye’deki merkez belediyelerinin katı atık hizmetleri, katı atık yaklaşımları ve belediyelerin konu hakkındaki düşüncelerini ele aldıkları çalışmalarında ulaştıkları veriler, katı atık yönetiminin ne kadar önemli olduğunun henüz tam olarak anlaşılmadığını ve konuyla ilgili çalışmaların başlangıç seviyesinde olduğunu ortaya koymuştur.

AB uyum süreci içerisinde, 1999/31/EC Düzenli Depolama Direktifine kapsamında, depolama alanlarına kabul edilebilecek katı atık içerisindeki biyobozunabilir atık (organik fraksiyon) oranı, 2006 yılından itibaren 2020 yılı sonuna kadar aşamalı şekilde azaltılması planlanmıştır (Öztürk, 2017).

Dünya Bankası 2018 Raporuna göre hızlı kentleşme ve büyüyen nüfus nedeniyle yıllık atık üretiminin önümüzdeki 30 yılda tüm dünyada 3,40 milyar tona çıkması beklenmektedir. Dünya nüfusunun %16’sını oluşturan yüksek gelirli ülkelerin dünyadaki atıkların üçte birinden fazlasını (%34) ürettiği belirtilmektedir. Doğu Asya ve Pasifik bölgesi, dünyadaki tüm atığın neredeyse %23’ünü üretmektedir. Sahra altı Afrika’daki atık üretiminin ise 2050 yılında üç kattan fazla artması beklenmektedir. Güney Asya’da ise bu oranın iki katına çıkacağı tahmin edilmektedir. Yüksek gelirli ülkelerdeki atıkların üçte birinden fazlasının geri dönüşüm ve kompost yoluyla geri kazandırıldığı ancak düşük gelirli ülkelerdeki atıkların sadece %4’ünün geri dönüştürüldüğü belirtilmiştir (World Bank, 2018).



Şekil 2.4 Bölgelere göre atık üretim tahminleri (World Bank, 2018)

3. DÜZENSİZ DEPOLAMA SAHALARININ REHABİLİTASYONU

3.1. Giriş

Düzensiz döküm sahalarının olumsuz etkilerini ve çevreye verdikleri zararları ortadan kaldırmak için çeşitli iyileştirme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin bir kısmı geçici olmakla birlikte söz konusu sahaların rehabilite edilmesi gibi kalıcı çözümler tercih edilmektedir. Bu aşamada düzensiz döküm sahalarının rehabilitasyonu hem döküm alanının iyileştirilmesi hem de kullanılabilir malzemelerin olabildiğince geri dönüştürülmesini içerir (Chakrabarti ve Dubey, 2015).

Düzensiz döküm sahalarının rehabilitasyonu, depolanan atıkla ilişkili risklerin azaltılması ve dengelenmesini; yani sahada oluşan sızıntı su ve depo gazının toplanması ve kontrolü, kötü koku, leş yiyen hayvanlar ve haşereler gibi olumsuzlukların azaltılmasını amaçlar (Karthik ve Joseph, 2008). Düzensiz döküm alanlarının rehabilitasyonu depo gazının bertaraf edilmesi, saha suyunun tahliye edilmesi, üst örtü tabakasının uygulanması ve rehabilitasyon alanının peyzajı ile tamamlanmaktadır. Ancak sahanın rehabilite edilmesinden sonra düzenli olarak bakımının yapılması da uygulamanın sürdürülebilir olması bakımından önem taşımaktadır.

3.2. Rehabilite Edilecek Alanının Analiz Edilmesi

Düzensiz bir çöp sahasının kapatılmasına yönelik temel şartlar arasında toprak örtüsü, bitki örtüsü tabakası, drenaj kontrol sistemi, sızıntı suyu ve gaz yönetim sistemleri, izleme sistemleri ve saha güvenliği yer almaktadır (Kibe, 2014).

Düzensiz döküm alanının rehabilitasyonu, rehabilitasyonun yapılacağı alanın özellikleri ve koşullarına (çöp bileşimi, yeraltı suyu varlığı, yerleşim alanlarına yakınlığı, vb.) ve proje için ayrılan bütçeye bağlı olan bir iştir. Bir alanın rehabilite edilip edilmeyeceğini belirlemek için ortaya çıkacak çevresel riskler değerlendirilmelidir. Bu bağlamda risk değerlendirme süreci, belirli risklerin tanımlanması, ölçülmesi ve değerlendirilmesi ile karar vermeyi sağlayan bir dizi mantıksal, sistemik ve iyi tanımlanmış faaliyetleri kapsamaktadır. Atık bertaraf tesislerinin kamu sağlığı ve çevre üzerindeki potansiyel olumsuz etkilerinin belirlenmesi aşağıda sıralanan değerlendirmelere göre yapılmaktadır (Joseph, Esakku, Nagendran ve Visvanathan, 2005):

- Hem su hem de hava kirleticilerinin salınım değerleri.
- Kirlenen alanın büyüklüğü, kirletici maddelerin kalıcılığı ve dönüşümü.
- Hava, su ve toprak kaynaklarını olumsuz etkileyen bu kirleticilerin konsantrasyonları ve değişimi.
- Kirletici maddelerden etkilenebilecek insan sayısı ve özellikle hassas popülasyonlar.
- Kirletici salınımının meydana geleceği toplam süre.
- Maruz kalma süresi.
- Diğer kirletici salınımlarının ve buna maruz kalan bir nüfusun, bölgeden elde edilen kirletici maddelere daha duyarlı olmasına neden olabilecek, olumsuz sağlık koşullarının bir araya geldiğinde ortaya çıkan etkileri.
- Alanın katı atık derinliği ve sıkıştırma derecesi gibi özellikleri.
- Döküm sahasına aktif ömrü boyunca kabul edilen atıkların miktar ve bileşimi.
- Bölgesel genişlik ve bertaraf edilen toplam katı atık miktarı ile belirlenen döküm sahasının büyüklüğü.

Düzensiz depolama alanlarının rehabilitasyonu kapsamında söz konusu sahanın bilgilerini elde etmek amacıyla durum analizi yapılması gerekmektedir. Bu aşamada saha ve çevresine ait topografik, jeolojik, hidrolojik ve hidrojeolojik haritalar, sahaya atılan çöplerin özellikleri (endüstriyel atık, evsel atık, tıbbi atık gibi), bu atıkların miktarının tespit edilmesi, sahanın fotoğraflarının çekilmesi, depo alanının derinliğinin tespit edilmesi ve yapısının tanımlanması rehabilitasyonun doğru şekilde yapılabilmesi için gereklidir. Rehabilitasyonu yapılacak bölgenin hava, su ve toprak kalitesinin tespit edilebilmesi amacıyla örnekleme çalışmaları da yapılabilmektedir (Sarptaş, Gündüz, Dölgen ve Alpaslan, 2006).

3.3. Rehabilitasyon Süreci

Düzensiz döküm sahalarının rehabilitasyonu, sahanın ve sahadaki atıkların özelliklerinin göz önünde bulundurularak aşama aşama gerçekleştirilmesi gereken bir süreci kapsamaktadır. Düzensiz döküm sahalarının rehabilitasyon süreci 4 aşamada ele alınabilir. Bu aşamalar üst örtü tabakasının oluşturulması, depo gazının bertaraf edilmesi, saha suyunun tahliye edilmesi ve rehabilitasyon alanının peyzajı ile tamamlanmaktadır.

3.3.1. Depo Gazının Bertaraf Edilmesi

Depo gazının kontrol edilmesindeki amaç, sera gazı emisyonlarının kontrol altına alarak çevreye verdiği zararı en aza indirmek, aynı zamanda patlama vb. tehlikelerin önüne geçmektir. Bu da depo gazlarının toplanması ve bertarafı ile sağlanabilmektedir (ATSDR, 2001).

Depo gazının kontrol edilmesinin önemi aşağıda şu şekilde sıralanmaktadır (Beck, 2008):

- Çevrede yer alan bitki örtüsünün zarar görmesini önlemek.
- Hava kirliliğinin önlenmesi ve düzenleyici hava emisyon kriterlerine uyulması,
- Oluşan gazın saha dışına çıkması nedeniyle oluşabilecek tehlikelerin önlenmesi,
- Sahanın stabilite sağlanmasıyla zararın önlenmesi,
- Kötü kokunun kontrol altına alınması
- Enerjinin geri kazanımı,

Yüksek metan miktarına sahip depo gazı genellikle elektrik üretimi için kullanılmaktadır. Ancak metan miktarı belli bir seviyenin altına düştüğünde elektrik üretimine uygun değildir. Metan miktarı azalan depo gazları, düşük kalorili gaz olarak adlandırılmaktadır. Bu durumda kontrol altına alınarak yakılması gerekmektedir (EA, 2009).

Düzensiz çöp döküm alanlarında meydana gelen depo gazının, yüzeyin kapatılması aşamasında, gaz toplama sistemlerinin kurulması gerekmektedir. Atık derinliği 7 metreden fazla olan alanlarda dikey gaz kuyuları açılmalıdır. Derinliği 7 metreden düşük olan alanlarda ise yatay drenaj yapılabilir. Gaz toplama kuyularının çapı yaklaşık 1 metre derinliği ise atık dolgu derinliğine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Aynı zamanda alan kesitinin %70 oranında depo yüzeyinden içeride olması gerekmektedir. Depo gövdesinde yer alacak olan gaz toplama bacalarının etki yarıçapı 50 metre olmalıdır (Şekil 3.1). Düzensiz çöp döküm alanından toplanan gazın kontrolünde aktif ya da pasif sistemler kullanılmalıdır. Daha geniş ve genç düzensiz depolama alanlardaki depo gazı enerjiye dönüştürülebilmesi mümkünken bunun gerçekleştirilemeyeceği durumlarda toplanan gazların meşale (flare) ile yakılması gerekmektedir (Yıldız, 2012). Depo gazı her ne kadar içerdiği metan oranı bakımından küresel ısınmayı hızlandırıcı etkiye sahip olsa da yakıldığında metandan çok daha düşük sera gazı etkisi yaratan karbondioksit çevrilerek oluşacak sera gazı etkisini azaltmaktadır (Johari, Ahmed, Hasi, Alkali ve Ramli, 2012).

Düzensiz çöp döküm alanından toplanan gazın kontrolü için kullanılan aktif ya da pasif sistemler şu şekilde açıklanmaktadır:

Aktif Gaz Toplama Sistemi: Aktif gaz toplama sistemleri, en verimli depolama gazı toplama araçları olarak kullanılmaktadır. Aktif gaz toplama sistemleri, pasif toplama sistemlerine benzer dikey ve yatay gaz toplama kuyusunu içermektedir. Ancak, pasif sistemdeki gaz toplama kuyularından farklı olarak, aktif sistemdeki kuyular, gaz akışını düzenleyen ve örnekleme görevi yapacak vanalara sahip olmalıdır. Örnekleme, sistem operatörünün gaz üretimini, bileşimini ve basıncını ölçmesini sağlamaktadır (AFS, 2012).

Pasif Gaz Toplama Sistemi: atmosfere ya da kontrol sistemine vermek için depolama basıncında ve gaz konsantrasyonlarında mevcut varyasyonları kullanır. Pasif toplama sistemleri, bir depolama sahasının aktif çalışması sırasında veya kapatıldıktan sonra kurulabilir. Pasif sistemler, çöp gazı toplamak için ekstraksiyon kuyuları olarak da adlandırılan toplama kuyularını kullanır. Toplama kuyuları tipik olarak delikli veya oluklu plastikten imal edilir ve depolama sahası boyunca dikey olarak, atık kalınlığının %50 ila %90'ı arasındaki derinliklere yerleştirilir (ATSDR, 2001).

Depolama sahalarının içerisinde zamanla ortaya çıkan ve doğru şekilde toplanmayan gazlar, yanıcı ve patlayıcı özellikler taşıdıklarından dolayı, oldukça tehlikeli olabilmektedir. Bu nedenle, depo gazı toplama miktarının en üst düzeye çıkarılması için aşağıda yer alan önemli noktalara öncelik verilmelidir (European Commision, 2004):

- Depo gazının aktif olarak kullanılacağı alan, çöp gazı salınımının en aza indirileceği şekilde tasarlanmalıdır.
- Depolama gazının toplanması işletme alanında gerçekleşmeli ve mümkün olan en kısa sürede yapılmalıdır.
- Atığın yan taraflarında gerçekleşen salınımının en aza indirilmesi için, eğim, etkili bir şekilde sınırlandırmaya izin vermeyecek kadar dik olmamalı ve aktif ayırma sistemlerinin eklenmesine, bakımlarının yapılmasına ve gerektiğinde değiştirilmelerine izin verecek seviyede olmalıdır. Atığın eğiminin, alanın kapatılmasını engelleyecek kadar dik olmamasına dikkat edilmelidir.
- Atık gaz salınımını önlemek için, atığın veya üst katmanların arasından geçen tüm altyapı bileşenlerinin sızdırmazlığından emin olunmalıdır.
- Atık gaz salınımını önlemek için, atığın veya üst katmanların arasından geçen tüm altyapı bileşenlerinin sızdırmazlığından emin olunmalıdır. Kapama işleminin sızdırmaz olması sağlanmalıdır.
- Sızıntı olması durumunda, sızıntının mümkün olan en kısa sürede tespit edilmesini ve önlenmesini sağlamak için, tüm sızdırmazlık sistemleri ile depolama sahası altyapısı için düzenli kontroller ve iyileştirmeler yapılmalıdır. Bu doğrultuda kaçak gaz emisyonları takip edilmeli ve gaz toplama sistemleri gözden geçirilmelidir. Sistem performansı, depolama gazı toplanmasını en üst seviyeye çıkarmak ve atık kütlesine giren hava miktarını en aza indirmek için düzenli olarak izlenmelidir.
- Sistemin verimliliğini değerlendirmek ve iyileştirmek için, gaz toplama sisteminin denetimleri yıllık olarak yapılmalıdır.

3.3.2. Sızıntı Suyunun Tahliye Edilmesi

Sızıntı suyu, işlemiden önce ve işlem sırasında, yüzey sularına veya yeraltı sularına karışmayacak, rahatsız edici kokulara neden olmayacak ve sızıntı suyuyla insan temasını en aza indirecek şekilde depolanmalı ve yönetilmelidir (EPA Victoria, 2015).

Sızıntı Su Buharlaştırma Havuzları

Sızıntı suyunun tahliye edilmesinde en basit ve en tercih edilen yollardan biri astarlı sızıntı suyu buharlaşma havuzlarıdır. Havuzlar, bir sızıntı suyu toplama sistemi ile bir hücre içinde sızıntı suyu toplamak amacıyla kullanılmaktadır. Bu hücreler, sızıntının altındaki topraklara nüfuz etmesini önlemek için sentetik bir malzeme veya bir kil astarı ile kaplanabilmektedir. Havuzda yüzen havalandırıcıları kullanmak yaygın bir uygulamadır. Havalandırıcılar havuzların anaerobik hale gelmesini engelleyerek, kokuların azaltılmasında ve buharlaşmayı arttırmada kolaylık sağlamaktadır. Yıllık buharlaşma miktarı sıcaklık, yağış ve neme bağlı olarak değişmektedir. Havuzun alt kısmındaki çamurun belirli zamanlarda temizlenmesi ve depolama hücresi ya da başka bir yerde biriktirilmesi gerekmektedir (Manitoba, 2016).

Evsel / Kentsel Atıksu Arıtma Tesisinde Birlikte Arıtma

Sızıntı suyunu tahliye etme yollarından birisi evsel atıklarla birlikte geri dönüşümünün sağlanmasıdır. İşletme maliyetlerinin düşük olması nedeniyle, sızıntı suyunun belediye kentsel atık su arıtma tesisinde arıtılması tercih edilmektedir. Ancak bu yöntem, ağır metaller içeren bileşiklerin varlığından dolayı sorgulanmaktadır. Sızıntı suyunun kalitesini artıran bu yöntem, sızıntı suyunun yapısının yoğunluğuna bağlı olarak işlemin süresini değiştirebilmektedir (Renou Givaudan, Poulain, Dirassouyan ve Moulin, 2008).

Yerinde Arıtma

Gerek sızıntı suyunun döküm alanı yakınındaki evsel / kentsel atıksu arıtma tesislerine iletiminin zor ve maliyetli olması gerekse sızıntı suyunun yüksek kimyasal oksijen ihtiyacı (KOI) içeriği sebebiyle bu tesislerde arıtılmasının güç olması, yerinde sızıntı suyu arıtımı alternatif olarak sunmaktadır. Sahadaki sızıntı suyu arıtma tesisleri, münferit depolama sahalarının özel ihtiyaçlarını karşılamak

için tasarlanmıştır ve çöplüklerin atık sularını herhangi bir taşıma veya bertaraf masrafı olmaksızın işleme tabi tutmasına izin verir (Wateronline, 2014).

Sızıntı Su Arıtma Yöntemleri

Sızıntı suyunu tahliyesi için kullanılan yöntemlerden birisi biyolojik arıtmadır. Biyolojik sızıntı suyu arıtımı, genç ve olgun sızıntılarda organik maddeler ve amonyak giderimi için kanıtlanmış bir teknolojidir. Biyolojik arıtma yöntemleri, aktif çamur prosesini, dizi reaktörlerini, aerobik lagünleri ve inşa edilmiş sulak alanları içermektedir (ESEMAG, 2015).

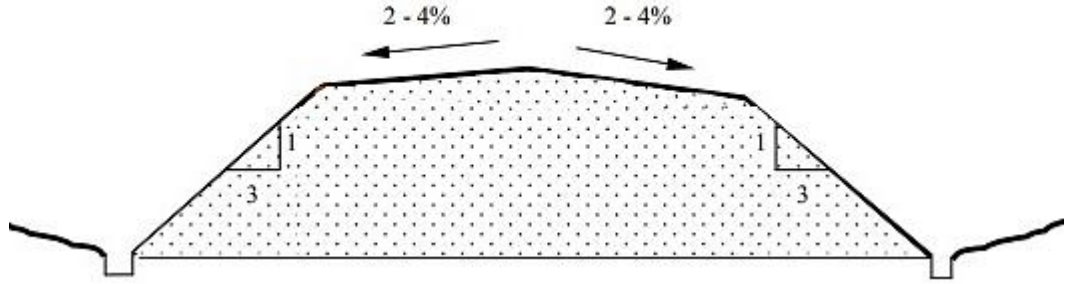
Sızıntı suları için kullanılan biyolojik yöntemlerin yanı sıra kimyasal/ fiziksel yöntemler de kullanılmaktadır. Sızıntı suyu yakındaki bir havuza pompalanır. Arıtma tesislerinde sızıntı suyu kimyasal bileşiklerle karıştırılarak ikinci işleme geçmeden önce tanktaki katı maddeler çökeltilir. Daha sonra koagülasyon-flokülasyon, kimyasal çökeltme, flotasyon, aktif karbon adsorpsiyonu, amonyum soyma, iyon değişimi, membran filtrasyonu, elektronik kimyasal arıtma ve kimyasal oksidasyon, ileri oksidasyon süreci gibi yöntemlerle işleme tabii tutulur (Liu, 2013). Biyolojik yöntemler atık suyunun bir dizi stabilizasyon havuzundan geçmesini, ya da kirleticilerin bitkiler yoluyla emilimini içerirken kimyasal yöntemler sızıntı suyunu arındırılması için kimyasalların kullanımını içermektedir (Karthik and Joseph, 2008).

Sızıntı suyunun tahliye edilmesi sırasında saha dışında yapılacak her işlem için sızıntı suyunun depolanması gerekmektedir. Bu depolama, su seviyesinin atık kütlesi içinde kabul edilebilir maksimum seviyenin üstüne çıkmaması için gereklidir. Depolama ayrıca nakliye veya nihai bertaraf çıkışında sorunların ortaya çıktığı yerlerde önemli bir destek sağlar. Tankerin ve drenajın güvenilir olduğu yerlerde kapasitesi daha fazla olan depolar kullanılabilir (EPA, 1997).

3.3.3. Üst Örtü Tabakasının Oluşturulması

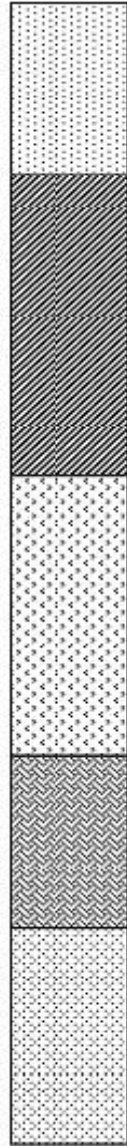
Düzensiz döküm sahalarının rehabilitasyonunda üst örtü tabakasının oluşturulmasındaki amaç, atık ile çevre arasında bir bariyer oluşturmak, sızıntıyı toplamak ve arıtma tesislerine boşaltmak için kullanılmaktadır. Böylece kontrolsüz sızıntı salınımı önlenmiş olur. Sahanın oluşturduğu potansiyel tehdit, sahanın rehabilitasyonu için gerekli olan sistemi de belirlemektedir (Hughes vd., 2013). Düzensiz döküm alanlarında herhangi bir prosedür uygulanmaması çoğunlukla çöp

yığınlarının aşırı yükseltiler oluşturmamasına neden olmaktadır. Bu yüksekliklerin tehlike yaratmaması adına çöp yığınlarının seviyelerinin düzeltilmesi gerekmektedir. Şekil 3.2’de gösterildiği üzere atık dolgusunun yüzey eğimi yaklaşık %2 ile 4 arasında olması gerekirken yamaçlardaki eğimin 1:3 ‘den daha az bir orana sahip olması gerekmektedir (UNEP, 2005).



Şekil 3.1 Yüzeyin eğimi (UNEP, 2005).

Şekil 3.3 'de ise örtü sistemlerinin temel bileşenleri gösterilmektedir. Örtü sistemlerinin en altında gaz toplama tabakası, ardından bariyer tabakası, onun üzerinde drenaj tabakası ve ardından koruma tabakası ile en üstte yüzey tabakası bulunmaktadır.



1. Yüzey Tabakası	Bitki gelişimini desteklemek; evapotranspirasyonu sağlamak; erozyonu önlemek	Üst toprak; kaba çakıl; Geosentetik erozyon kontrol sistemleri	Su ve/veya rüzgar erozyonunun kontrolü için genellikle yüzey tabakasına ihtiyaç duyulur
2. Koruma Tabakası	Suyu depolamak; bitki, hayvan ve insanların alt tabakalara girişini engellemek; bariyer tabakasını kuruma ve donma/erime durumlarından korumak; stabiliteyi korumak	Karışık toprak; kaba çakıl	Koruma tabakasının bazı formlarına daima ihtiyaç duyulur ve koruma tabakası "örtü toprağı" tabakası içerisine birleştirilebilir
3. Drenaj Tabakası	İnfiltrate olan suyun bariyer tabakası ile temasını engellemek için drene etmek; sızmanın şiddetini azaltmak	Kum; çakıl; geotekstil, geonet, geokompozit	Drenaj tabakası isteğe bağlıdır; sadece koruma tabakasına su geçişinin ve sızıntı şiddetinin fazla olduğu durumlarda gereklidir
4. Bariyer Tabakası	Atığın içine suyun infiltrasyonunu minimize etmek; gaz çıkışını sağlamak	Sıkıştırılmış kil; geomembran, geosentetik kil	Bariyer tabakasına genellikle ihtiyaç duyulur; son derece kurak alanlarda ihtiyaç duyulmaz
5. Gaz Toplama Tabakası	Gazı uzaklaştırmak ve/veya kullanmak üzere toplamak için toplama noktalarına iletmek	Kum, geotekstil, geonet	Atıktan büyük miktarlarda gaz üretimi söz konusu olduğunda ihtiyaç duyulur

Şekil 3.2 Örtü sistemlerinin temel bileşenleri (Özel, Turan ve Ergun, 2006).

Düzensiz döküm alanlarının toprak örtüsü ile kapatılması aşamasından önce sahadaki katı atıklar, geosentetik kil ya da jeomembran örtü gibi geçirimsiz bir sistem ile kapatılması yağış sularının drenaj kanallarıyla toplanmasını sağlamaktadır (Yıldız ve Herdem, 2015).

Sızıntı toplama sisteminde tipik olarak sızıntı suyunun dışarı atılması için bir dizi sızıntı suyu toplama borusu bulunmaktadır. Bariyer sistemi, tek ya da çift astarlı bir koruma tabakasından oluşmaktadır. Jeomembran ise (1.5-2 mm kalınlığında yüksek yoğunluklu polietilen) plastik tabaka, geosentetik kil astarı (iki jeotekstil arasına yerleştirilmiş, yaklaşık 5-10 mm kalınlığında, düşük geçirgenlikli kil, bentonit denilen tabaka) ya da sıkıştırılmış kil tabakasından (600-1200 mm kalınlığında) oluşmaktadır (Rowe, 2011).

Düzensiz çöp döküm alanlarının üst örtü uygulamaları Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmeliğin 17. Maddesi uyarınca gerçekleştirilmektedir. Depolama alanına üst örtü uygulaması yapılmadan önce alan normal toprak ile tesviye edilmektedir. Kapatma işleminin öncesinde atıkların kayma ve çökme riski bulunmadığı kontrol edilmelidir. Tesisin kurulmuş olduğu gölgenin yağış özellikleri dikkate alınarak kapatma sonrasında sızıntı suyunun oluşumunun engellenmesi ve depo gazlarının toplanması için depo üst örtüsü, tesisin sınıfına göre asgari düzeyde şu şartları sağlayacak şekilde teşkil edilmektedir. Mineral geçirimsizlik tabakasının en az 25 cm kalınlığında ve iki tabaka halinde uygulanması gerekmektedir. Drenaj tabakasının kalınlığının ise en az 50 cm olması ve en az $K \geq 1.0 \times 10^{-4}$ m/s geçirgenliğe sahip olması gerekmektedir. Üst örtü toprağının, ilerideki zamanlarda bitkilerin yetişmesine elverecek şekilde ve yetiştirilecek bitkinin türüne bağlı olarak en az 50 cm kalınlığında olması gerekmektedir (Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik, 2010).

3.3.4. Rehabilitasyon Alanının Peyzajı ve Bakımı

Rehabilitasyon alanının üzerinde yer alan doğal ya da ekili bitki örtüsü, estetik değer kazandırmanın yanı sıra, erozyon kontrolü ve kirleticilerin giderilmesinde de önemli bir role sahiptir. İstenen bitki performansının elde edilmesi, kök büyümesi için derin ve elverişli bir kaplamanın gerçekleştirilmesine bağlıdır. Bu bağlamda Fitatemedasyon, özellikle petrol hidrokarbonları, polisiklik aromatik hidrokarbonlar, patlayıcılar, organik maddeler ve besin maddeleri gibi atıkları yönetmek için uygun maliyetli bir araçtır. Kirlenmiş alanların iyileştirmesinde kullanılan bu yöntemin mekanizma türüne göre birçok çeşit fitoremediasyon (kirletilmiş alanların yeşil bitkiler ile iyileştirilmesi) süreci bulunmaktadır. Bunlar arasında: bitkisel özütleme, rizofiltrasyon (bitki köklerinin toksik metalleri sulardan uzaklaştırması), fitovolatilizasyon (bitkilerin ağır metalleri absorbe ederek gaz formuna dönüştürüp atmosfere vermesi), fitodegradasyon (kirleticilerin bitkilerin dokularında metabolize edilerek yok olması), rizosfer biyodegradasyonu (bitkilerin, topraktaki mikroorganizmalara besin temin eden kökleri aracılığıyla yaygın maddeleri boşaltması), hidrolik pompalama (ağaçların kökleri aracılığı ile zararlı maddeleri çekmesi), fitosorbsiyon (bitki kökleri ve yaprakları ile adsorpsiyonu ve kirletici hareketlerin önlenmesi) ve fitocapping (bitkilerin yağmurdan suyunu tüketerek kirletici hareketi azaltması) yer almaktadır (Nagendran, Selvam, Joseph, ve Chiemchaisri, 2006). Fitoremediasyon, kirlenmiş toprağı düzeltmek için hiper toplayıcı bitkinin kullanımını içermektedir. Hiper toplayıcı bitkilerin avantajı, büyük miktarlarda ağır metalleri alıp bu ağır

metalleri bitki dokularında depolarken gelişmeye devam etmeleridir. Bu tür bitkiler, bitkilerin ekolojik yaklaşımla kirlenmiş topraklarda iyi işleyebildiklerini göstermektedir. Bu işlemler ile toprağın arındırılması için uzun bir zaman alsa da kentsel alanın ve peyzaj alanlarının gelecekte daha temiz bir yer haline getirilmesinde faydalı olabilecek iyi bir peyzaj tasarımı stratejisi olarak kullanılmaktadır (Khalizah, Thani, Noorjannah, ve Hashim, 2016).

Depolama sahalarının rehabilitasyon işlemleri tamamlandıktan sonra sahanın sorumluluğu tesisi işleten belediyeye aittir. Belediyenin bu bağlamda rehabilitasyon alanının izlenmesi, bakımı ve kontrolü gibi görevleri bulunmaktadır. Saha kapatıldıktan sonra yapılacak izleme ve kontrol çalışmalarına, rehabilitasyondan hemen sonra başlanmalıdır. Belli dönemlerde yeraltı suyu örneği alınarak sızıntı suyunun, yeraltı su kaynaklarına sızıp sızmadığı gözlemlenmelidir (Yıldız ve Herdem, 2015).

Kapatılan vahşi depolama alanlarının bakımı ve kontrol periyotları ile ilgili bilgi Tablo 3.1’de gösterilmektedir. Yeraltı suyu, sızıntı suyu, bitki örtüsü, depo gazı, yüzey drenajı ve üst örtüsünün belirli dönemlerde yaşanabilecek problemlere karşı kontrol edilmesi gerekmektedir.

Tablo 3.1 Kapatılan vahşi depolama alanlarının bakım ve kontrol periyotları (Gökçe, Aydemir, Hasanoğlu, Özbay, 2015)

Kontrol Noktası	Kontrol Sıklığı	Potansiyel Problemler
Üst Örtü	Yılda bir defa ve şiddetli yağış sonrasında	Toprak yüzeyinde erozyon
Yüzey Drenajı	Yılda dört defa ve şiddetli yağış sonrasında	Yüzey drenaj tabakasında toprağın birikimi, dren borularının kontrolü
Depo Gazı İzleme	Düzenli	Koku, kırılan gaz bacaları, kompresör ve flare ekipmanları
Bitki Örtüsü	Yılda dört defa	Canlılık seviyesi
Yer Altı Suyu İzleme	Altı ayda bir	Yeraltı suyu kirliliği

4. DEPO GAZI VE ENERJİ GERİ KAZANIMI

4.1. Depo Gazının Bileşimi ve Özellikleri

Depo gazı içerisinde bulunan metan, kimyasal formülü CH_4 olan hidrokarbon gazıdır. Organik maddenin ayrışmasıyla oluşan metan gazı aynı zamanda bir sera gazıdır ve patlayıcı özelliğe sahiptir. Depo gazının tipik bileşimi Tablo 4.1’de verilmiştir. Depo gazının yaklaşık %50’si metandan geri kalanı ise karbon dioksit ve diğer gazlardan oluşmaktadır. Metan olmayan organik bileşikler genellikle çöp gazının %1’den azını oluştururlar. Bunların çoğu benzen, tolüen, kloroform, vinil klorür vb. zehirli kimyasallardır. Bunların en az 41 tanesi halojenli bileşiklerdir. Diğerleri halojene olmayan toksik kimyasallardır. Halojenli kimyasallar yakıldığında son derece zehirli olan ve düşük maruz kalma seviyelerinde bile uzun vadeli sağlık riski barındıran dioksinler ve furanlar gibi yüksek toksik bileşiklere dönüşebilir (Cheremisinoff, 2003).

Tablo 4.1 Depolama gazı bileşimi (ATSDR, 2001)

Bileşen	% Hacim	Özellikler
Metan	45-60	Kokusuz, renksiz
Karbondioksit	40-60	Kokusuz, renksiz, biraz asidik
Azot	2-5	Renksiz, tatsız ve kokusuz
Oksijen	0,1-1	Renksiz, tatsız ve kokusuz
Amonyak	0,1-1	Keskin kokulu renksiz gaz
Organik bileşikler (Metan dışı)	0,01-0,6	Doğal olarak bulunabilirler ya da sentetik kimyasal proseslerle oluşurlar. Depolama sahalarında en fazla bulunan gazlar; akrilonitrilbenzen, akrilonitrile, benzen, diklorometan, karbonilsülfit, etilbenzen, hekzan, vinilklorür vb
Sülfürler	0-1	Düşük konsantrasyonlarda hoş olmayan koku
Hidrojen	0-0,2	Kokusuz, renksiz
Karbon monoksit	0-0,2	Kokusuz, renksiz
Karbondioksit	40-60	Kokusuz, renksiz, biraz asidik

Depo gazları içerisinde en tehlikeli olan metan gazı havadan daha hafif, renksiz ve kokusuz bir gazdır. Depolama sahalarında metan, organik maddelerin 15 ila 20 yıllık bir süre zarfında parçalanması ile ortaya çıkmaktadır. Depolama

alanları fazla miktarda biyo bozunur atık içerdüğinden dolayı en fazla metan üretimi de bu alanlarda meydana gelmektedir (Jardine, Boardman, Osman, Vowles ve Palmer, 2004). Metan gazının en önemli özelliği, belirli koşullar altında havadaki metan karışımının sınırlı bir alanda patlayıcı olmasıdır. Patlayıcı madde özelliği, havada %5 ile %15 oranında metan konsantrasyonunun bulunmasına bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Havadaki daha düşük metan konsantrasyonlarının patlama riski bulunmaktadır. Ancak yüksek konsantrasyonlar yanıcı olabilir ve metan hava karışımında oksijen eksikliğine bağlı olarak boğulmaya neden olabilmektedir (City of Burnaby, 2009). Bu nedenle metan gazı uygun şekilde toplanıp kontrol altında tutulmadığı takdirde patlama tehlikesi ve yangın riski taşımaktadır. EPA, depolama alanlarındaki organik maddelerin ayrışması sırasında ortaya çıkan metan gazının, güneş ışınımını karbondioksit göre 20 kat daha fazla etkileme potansiyeli olduğunu belirtmiştir (EPA, 2012). Bunun sonucunda ise kentsel ve küresel sıcaklıkların oldukça arttığı görülmektedir. Metan gazı dışında, ağırtıcı ve amonyak gibi diğer ev ve tarım kimyasalları, depolama sahası içindeki hava kalitesini büyük ölçüde etkileyebilecek zehirli gazlar üretebilmektedir. Toz, partikül madde ve diğer kimyasal olmayan kirleticiler de atmosfere karışarak hava kalitesini düşürmektedir (Conserve Energy Future, B.T.)

4.2. Depo Gazı Oluşumu

Depo gazı bakteriyel ayrışma, buharlaşma ve kimyasal reaksiyonlar kapsamında üç aşamadan oluşmaktadır (ATSDR, 2001).

4.2.1. Bakteriyel Ayrışma

Depo gazlarının çoğu atıkların, toprakta ve atıklarda doğal olarak bulunan bakteriler tarafından parçalanmasıyla meydana gelen bakteriyel ayrışma yoluyla ortaya çıkmaktadır (Marcovic ve Stevovic, 2016). Depo gazının oluşabilmesi için bazı koşulların oluşması gerekmektedir. Uygun şartların oluşması ile 5 evreden oluşan süreç başlamış olur. Bu evrelerde gerçekleşen değişimler aşağıdaki gibidir (Öztürk, 2018).

Hidroliz (I. Evre): Aerobik safha olarak da adlandırılan depo gazı oluşumunun ilk aşamasında, atıkların depolandığı alan içerisinde su miktarı artmaya başlar. Suyun arttığı ortamda aktif mikrobiyal hareketlilik görülür. Birkaç gün ile birkaç hafta arasında değişen bu süreçte biyokimyasal reaksiyonun oluşabilmesi için en önemli şey oksijendir. Aerobik bakteriler beslenme sırasında

oksijeni kullanarak organik atığı oluşturan kompleks moleküler bileşikleri (karbonhidratlar, proteinler ve yağlar) parçalarlar. Organik maddelerin ayrışabilmesi için gerekli olan yüksek oksijen miktarı bir süre sonra tükenir. Tüketilen oksijen miktarı doğrultusunda aynı oranda karbondioksit üretimi gerçekleşir. Bu evrede ısı üretimi artar ve depo gövdesinin sıcaklığı 60 ile 70 dereceye kadar çıkabilir. Bu fazın başında azot konsantrasyonu %80 oksijen ise %20 oranındadır. Bu aşama mevcut oksijen tamamen kullanıldığında gerçekleşmiş olur. I. Evre, atıkların depolama sahasında atıldığı anda ne kadar oksijen bulunduğuyla ilgili olarak günler veya aylarca sürebilir. Bunun yanı sıra oksijen seviyeleri, depolama sahasının ne kadar kompakt olduğuna bağlı olarak değişim gösterebilir. (Marcovic ve Stevovic, 2016).

Lignoselülozik materyal, katı atıkların temel organik bölümünü oluşturmaktadır. Lignoselülozik malzemenin hidrolizi, biyogaz üretimi için gerekli karbon kaynağının seviyesini etkileyen önemli bir faktördür. Bu işlemde organik madde, mikroorganizmaların hücre dışı enzimleri (selüloz, amilaz, proteaz ve lipaz) tarafından enzimolize (enzim ayrışımı) edilir. Bakteriler kompleks karbonhidratların, proteinlerin ve lipidlerin uzun zincirlerini daha kısa parçalara ayırır. Diğer bir deyişle bu aşamada polisakkaritler monosakkaritlere dönüştürülür, proteinler peptitlere ve amino asitlere ayrılır (Askari vd., 2011).

Anaerobik Metanojenik Olmayan Safha (II. Evre): İkinci safhada, ortamdaki oksijenin tükenmesi ile organik asit oluşumu başlar. Böylece ortamdaki karbondioksit üretimi artar ve II. Evreye geçilmiş olur. Bu aşamada, çevresel şartlara ve depolama şartlarına göre 11 ile 40 gün arasında değişen zaman süresi içerisinde karbondioksitin ulaşabileceği en yüksek hacim değeri %70 ile %90 arasındadır. Bu arada hidrojen gazı konsantrasyonu hacim olarak %20 seviyelerindedir. Bu evre sırasında nitrat (NO_3) ve sülfatın (SO_4) oksijeni, gerekli olan oksijen ihtiyacının giderilmesi için kullanılır (Öztürk, 2018).

Anaerobik süreçte bakteriler, aerobik bakterilerin oluşturduğu metanol ve etanol gibi alkollerin yanı sıra asetik, laktik, formik ve diğer asit bileşiklerini dönüştürmektedir. Bu işlemlerden dolayı, depolama sahasındaki pH ortamı asidik hale gelir. Asitlerin nem ile karışması besinlerin çözünmesine neden olarak azot ve fosforun farklı bakteri türlerine ulaşmasını sağlar. Bu aşamada karbon dioksit ve hidrojen açığa çıkar. Ancak, oksijen depolama alanına girerse, mikrobiyal süreç I. Evreye geri dönecektir. Bu evre, mikroorganizmalar ve atık arasında önemli bir nem ve fiziksel temasın varlığını gerektirir (Marcovic ve Stevovic, 2016).

Asit üreten bakteriler, fermantasyon bakterilerinin aracı maddelerini asetik asit (CH_3COOH), hidrojen (H_2) ve karbondioksit (CO_2) dönüştürür. Asetik asitin üretilmesi için oksijen ve karbon gereklidir. Bunun için bakteriler eriyik içinde çözülmüş oksijeni kullanırlar. Böylece, asit üreten bakteriler, metan üreten bakteriler için anaerobik bir ortam yaratmış olurlar. Kimyasal açıdan bakıldığında, sadece bakteriler bu tür bir reaksiyonu sürdüremediklerinden bu işlem kısmen endergoniktir (sürdürülebilmesi enerji ile mümkündür) (ISAT, 2011).

Anaerobik Metanojenik Kararsız Safha (III. Evre): İlk kez bu safhada metan oluşumu gözlemlenir. Zaman içerisinde metan gazının miktarında artış olur. Bu aşamada metan üreten bakteriler, düşük moleküler ağırlığa sahip bileşikler ayrıştırır. Bakteriler, metan ve karbondioksit oluşturulabilmesi için hidrojen, karbondioksit ve asetik asit kullanırlar. Metan üreten mikroorganizmalar, anaerobik koşulların sağlandığı ölçüde oluşur. Hidrojeni tüketen bu bakterilerin hayati fonksiyonları için sıcaklığın sabit olması büyük önem taşımaktadır (Askari vd., 2011). Bu aşamada karbondioksit ve nitrojen miktarı azalırken hidrojen tamamen tükenir. I. ve II. Evreler 10 ile 50 gün arasında tamamlanırken III. Evrenin tamamlanması 200 ile 500 gün arasında değişebilmektedir. Söz konusu ayrışmanın tamamlanması için yeterli olan sürenin farklılığı, süreçlerin yerel şartlar açısından ne kadar değişken olduğunu göstermesi bakımından önemlidir (Öztürk, 2018).

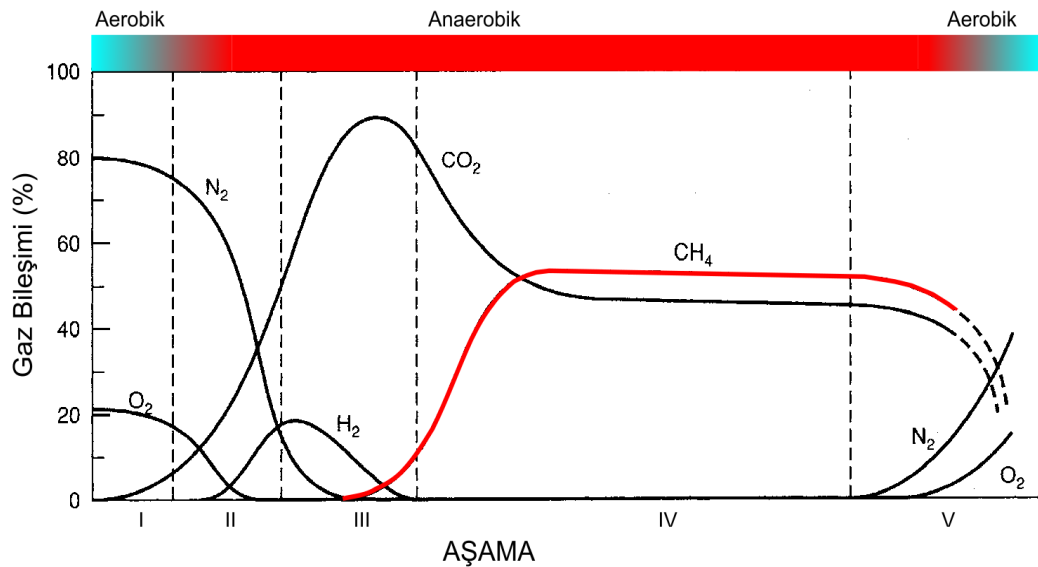
Bazı anaerobik bakteriler II. Evrede üretilen organik asitleri tükettiğinde ve asetat oluşturmaya başladığında, ayrışmanın III. Evresi başlamış olur. Bu işlem, depolama alanının, metan üreten bakteriler için gerekli olan pH 7'ye (nötr ortam) daha yakın hale gelmesine neden olur (Marcovic ve Stevovic, 2016).

Metanojenik Kararlı Safha (IV. Evre): Bu aşamada gaz üretimi ve bileşenleri bakımından büyük bir değişiklik görülmemektedir. Metan oranı %40 ile 70 arasında değişirken karbondioksit seviyesi %30 ile %60 arasındadır. Metan yoğunluğunun en yüksek olduğu seviye bu safha olduğu için oldukça önemlidir. Metan molar fraksiyonunun %50'nin altında olduğu durumlarda ve gaz içerisinde hidrojen bulunduğu metan üretim sürecinin yavaş işlediği tespit edilmiştir. Bu evrede gaz bileşiminin sabit olmasına karşın gaz üretim hızı gittikçe düşmektedir. Bu safha gaz seviyesinin gittikçe azalması ile 10 ile 20 yıl arasında tamamlanır. IV. Evrenin tamamlanmasının bu kadar uzun sürmesinin nedeni atık içerisinde bulunan katı haldeki maddelerin sıvı durumuna geçmelerinin çok uzun zaman almasıdır (Öztürk, 2018).

Metan ve asit üreten bakteriler simbiyotik bir şekilde hareket etmektedirler. Asit bakterileri, metan bakterilerinin beslenmek için kullandığı bileşikleri üretirken metan üreten bakteriler ise asit üreten bakterilerin ara ürünlerini kullanırlar. Bunların tüketilmediği durumlarda asit üreten mikroorganizmalar için zehirli koşullar ortaya çıkmaktadır. Tek bir bakteri tek bir fermentasyon yapamadığından dolayı çeşitli bakterilerin metabolik etkileri birbirlerini etkilemektedir (ISAT, 2011). Bu aşamada gaz 20 yıl boyunca sürekli olarak üretilirken, gaz emisyonu 50 yıl sonra da devam edebilir. Gazın üretimi özellikle organik atıkların daha büyük miktarlarda mevcut olması halinde daha uzun sürebilir (Marcovic ve Stevovic, 2016).

Aerobik Şartlara Geçiş Safhası (V. Evre): Son evrede ayrışma sürecinde ve depo gazı üretiminde oldukça azalma gözlenir. I. evrede görülen atmosferik şartlar tekrar etkili olmaya başlar. Günümüze değin yapılan çalışmalar ayrışma sürecinin tamamlanmasına kadar devam etmemiş olsa da eldeki veriler sayesinde, ortamdaki karbon kullanımı bittikten sonra metan oluşum faaliyetlerinin azaldığı görülmüş, metan ve karbondioksit yoğunluklarının hızla düştüğü tespit edilmiştir. Bu evre sonucunda kalan madde biyolojik olarak durağan ve stabildir (Öztürk, 2018).

Yukarıda açıklanan depo gazı oluşum aşamalarında gaz oluşumu ve gaz bileşimindeki değişim Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Zamana bağlı depo gazı oluşum eğrisi (Tchobangoglus vd, 1993)

4.2.2. Buharlaşma

Depo gazı, bazı atıkların, özellikle organik bileşiklerin bir sıvı ya da katı fazdan gaz faza geçmesi ile oluşabilir. Bu süreç buharlaşma olarak adlandırılmaktadır. Depolama gazı içindeki NMOC'lar, depolama sahasında bertaraf edilen bazı organik olmayan maddelerin buharlaşması sonucu meydana çıkabilir (Demie ve Degefa, 2015).

4.2.3 Kimyasal Reaksiyonlar

NMOC'lar dâhil olmak üzere, depo gazı, atıkta bulunan belirli kimyasalların reaksiyonları ile oluşabilir. Örneğin, klorlu ağartıcı ve amonyak depolama sahası içerisinde birbirleriyle temas ederse, zararlı bir gaz meydana gelir (Demie ve Degefa, 2015).

Belirli bir alanda üretilen çöp gazının oranı ve hacmi, atıkların karakteristiklerine (bileşimin ve çöpün bekleme süresine) ve bazı çevresel faktörlere (depolama sahasında oksijen bulunması, nem içeriği ve sıcaklığa) bağlıdır. Bir depolama sahasında ne kadar fazla organik atık bulunursa, dekompozisyon (parçalanma) sırasında bakteriler tarafından o kadar çok depo gazı üretilmektedir. Depolama sahasında kimyasal maddelerin daha fazla olması, buharlaşma ya da kimyasal reaksiyon yoluyla daha fazla metan olmayan organik bileşiklerin ve diğer gazların üretilme olasılığını arttırmaktadır. Genel olarak, daha yakın zamanda gömülü olan atıklar (10 yıldan az gömülü olan atıklar), daha eski atıklara (10 yıldan fazla gömülü) kıyasla bakteriyel ayrıştırma, buharlaşma ve kimyasal reaksiyonlar yoluyla daha fazla depolama gazı üretir. En yüksek miktarda gaz üretimi genellikle atık gömüldükten 5 ila 7 yıl sonra gerçekleşir. Metan, sadece depolama sahasında artık oksijen bulunmadığında üretilmektedir. Bir depolama sahasındaki nemin varlığı bakteri ayrışmasını tetiklediğinden dolayı gaz üretimini artırır. Nem, aynı zamanda gaz üreten kimyasal reaksiyonu da destekler. Depolama sahasının sıcaklığının yükselmesi bakteriyel aktivitenin de artmasını sağlar, bu da gaz üretiminin artması demektir. Yükselen sıcaklık aynı zamanda buharlaşmayı ve kimyasal reaksiyonu da artırır (Cheremisinoff, 2003).

4.3. Depo Gazı Oluşumunu Etkileyen Faktörler

Depo gazının oluşumunu etkileyen başlıca faktörler atık bileşimi, oksijen kullanılabilirliği, nem kullanılabilirliği, sıcaklık ve atık yaşıdır (Bilgili, 2002).

4.3.1. Atık Bileşimi

Atıktaki organik madde miktarı üretilen depo gazı miktarını da aynı doğrultuda arttırmaktadır. Bunun yanı sıra bakteriler atıkları parçalayarak kalsiyum, potasyum, magnezyum ve diğer mikro besin haline getirirler. Bu besinlerin mevcut olduğu ortamda bakteriler gelişir ve gaz üretimi hızla gerçekleşir. Söz konusu besinlerin eksik olduğu durumlarda gaz üretimi yavaşlar. Bakterilerin gelişmesini engelleyen durumlarda ise gaz üretimi tamamen durabilir. Gazın üretilme hızı aynı zamanda atık türlerinin oranına bağlı olarak değişmektedir. Selüloz gibi bazı organik madde türleri hızla parçalanırken lignin gibi maddeler çok daha yavaş şekilde parçalanmaktadır (Reinhart ve Barlaz, 2010).

4.3.2. Oksijen Kullanılabilirliği

Oksijenin var olduğu ortamlarda, aerobik hareketliliğin hızlanması sonucunda oluşan gaz çoğunlukla karbondioksitten meydana gelmektedir. Oksijenin var olmadığı ortamda ise atık, eşit miktarda metan ve karbondioksitten oluşan depo gazı üreten anaerobik bakteriler tarafından parçalanmaktadır. Düzensiz depolama alanlarında atıkların neredeyse tamamı oksijen sayesinde aerobik olarak ayrışmaktadır (Bilgili, 2002).

4.3.3. Nem Kullanılabilirliği

Bakterilerin büyüebilmesi ve gelişebilmesi için neme ihtiyaçları vardır. Bakteri aktivitesinin maksimumda olabilmesi ve dolayısıyla gaz üretiminin de en üst düzeyde olabilmesi için nem oranının %40 civarında olması gerekmektedir. Bu bakımdan sızıntı suyunun, gaz üretim oranını artırma özelliği de bulunmaktadır (Bilgili, 2002).

4.3.4. Sıcaklık

Bakterilerin gaz üretim potansiyeli sıcaklıkla ilişkilidir. Donma noktasında hayatta kalıp işlevlerini devam ettirebilseler bile en verimli oldukları sıcaklık 65°C civarındadır. Anaerobik bakteriler sadece az miktarlarda ısı üretebilirler. Bu sebeple dış ortam sıcaklığının düştüğü durumlarda mevcut sıcaklığı korumak zorlaşır. Aynı zamanda daha yüksek sıcaklıklar atık içerisindeki buharlaşmayı ve kimyasal tepkimeleri arttırarak gaz bileşenlerinin miktarının artmasını sağlar (Bilgili, 2002).

4.3.5. Atık Yaşı

Depo gazı üretimi her ne kadar atıkların birikmesinden hemen sonra başlasa da anaerobik metan üretimi sadece oksijenin absorbe edildiği yerlerde meydana gelmektedir. Gaz üretiminin önemli kısmı genellikle yaklaşık 20 yıllık bir birikim içinde gerçekleşse de atıkların bulunduğu alana göre farklılık gösterebilmektedir. Gaz üretiminin yavaş olduğu durumlarda gaz üretim süresi 40 ila 50 yıl arasında değişen sürelerde gerçekleşebilmektedir (Bilgili, 2002).

Bertaraf edilen atıkların her bir tonu, depolama sahası ömrünce yaklaşık olarak 170 metreküp depolama gazı meydana getirmektedir. Bu gazın %60'ı, atığın depolanmasından 10 yıl sonraki süreçte meydana gelmektedir. %90'ı ise 15-20 yıl içerisinde oluşmaktadır (Kiriş ve Saltabaş, 2011).

4.4. Depo Gazı Üretiminin Tahmini: Depo Gazı Modelleri

Enerji üretimi için kullanılan depo gazı, belli bir enerji talebini karşılamakta ve böylece ticari bir kaynak haline gelmektedir. Bertaraf sahalarındaki depo gazı öncelikle sera gazı emisyonlarının azaltılması ve yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanılabilmesi için araştırmacılar tarafından çeşitli depo gazı modelleri geliştirilmiştir (Virgen, González, Benítez and Sotelo, 2014). Depolama alanlarında oluşan depo gazları, koku ve emisyon kontrolü ve enerji geri kazanımı gibi çeşitli amaçlar doğrultusunda geri kazanılabilmektedir. Depo gazı toplama/kontrol sistemlerinin ve depo gazı enerji geri dönüşüm projelerinin planlaması ve tasarımı ile ilgili en önemli konu, oluşan depo gazı ve metan miktarının belirlenmesidir. Depo gazının miktarı ve onun metan içeriği gaz toplama ve kontrol sistemi tasarım gereksinimlerini, depo gazının kontrol ve kullanımı için seçilecek yöntemin uygunluğunu ve enerji geri kazanımının fizibilitesini belirler. Metan emisyonunun tahmin edilmesi ise, metan emisyon standartlarına uyumun kontrolü gibi yasal amaçlarla oldukça gereklidir (Öztürk, Arıkan, Altınbaş, Alp ve Güven, 2015).

Depo gazı içerisinde bulunan metan gazı emisyonu zamana ve mekâna göre değişim göstermektedir. Bu nedenle arazi ölçümü ile izlenmesi kolay olmadığından özel hesaplamalar gerektirmektedir (Scharff and Jacobs, 2006). Gaz üretimi belirli bir depolama sahası için herhangi bir kesinlik ile modellenemediğinden, emisyon ve toplama ölçümleri, bir üretim tahmini sağlamak için kullanılmaktadır (Huitric and Kong, 2006).

Depo gazı üretiminin tahmini için geliştirilen matematiksel modeller esas alınan kinetik eşitliğin derecesine göre sıfır, birinci ve ikinci derece modeller olmak üzere üç grupta toplanmaktadır. Katı atık kütlesini tek bir faz (biyobozunurluk açısından homojen) kabul eden bu modeller yanında atık kütlesinde farklı fazların (hızlı, orta ve yavaş bozunan) olduğunu esas alan çok fazlı modeller de ayrı bir grup olarak ele alınabilir (Coops vd; 1995).

4.4.1 Sıfır Derece Modeller

Bu modelde depo gazı oluşumu atık miktarına eşittir. Depo gazının miktarı zamana göre değişmemektedir. Aynı zamanda atığın yaşının ve çeşidinin gaz oluşumu üzerinde herhangi bir etkisi yoktur (Coops vd; 1995).

EPER Germany: Almanya’da kullanılan EPER modeline ait eşitlik şu şekildedir (Kamalan, Sabour ve Shariatmadari, 2011):

$$M_e = M \cdot BDC \cdot BDC_f \cdot F \cdot D \cdot C$$

M_e : Yayılan metan emisyon oranı,

M : Yıllık bertaraf edilen atık miktarı,

BDC : Biyobozunur karbon oranı (0.15).

BDC_f : Dönüştürülebilir biyobozunur karbon oranı (0.5).

F : Metana dönüşen karbon hesabı faktörü

D : Toplama verimi

C : Metan konsantrasyonu

SWANA Sıfırıncı Derece Modeli: Geliştirilen bu modele ait eşitlik şu şekildedir (Kamalan, vd; 2011):

$$Q = \frac{M \cdot L_0}{(t - t_0)}$$

Q : Metan üretimi (hacmi), milyon m³/yıl

M : Sahaya verilen atık miktarı, ton

L_0 : Metan üretim potansiyeli, m^3/ton

t_0 : Atık dökümü ile gaz çıkışı arasındaki gecikme süresi (*lag time*)

t : Üretimin bitiş zamanı

4.4.2 Birinci Derece Modeller

Bu modellerde atık yaşı ve karbon içeriği göz önünde bulundurulmaktadır. Kullanılmakta olan birinci derece modellerin açıklamaları aşağıda verilmektedir (Coops vd; 1995).

LandGEM Modeli: Depolama sahalarında biriken depo gazı, metan, karbondioksit, metan dışı organik bileşikler ve hava kirleticilerinin emisyon oranlarını tahmin etmek, matematiksel modeli (eşitliği) geliştirmek için bir hesaplama aracıdır. LandGEM modeli emisyonları hesaplamak için alana özgü verileri, alana özgü verilerin olmaması durumunda ise standart parametreleri kullanır. LandGEM varsayılan iki parametre kümesi içerir. Bunlar CAA ve Envanter varsayılanlarıdır (EPA, 2005).

LandGEM modeli, depo gazı potansiyelinin belirlenmesi amacıyla ABD Çevre Koruma Ajansı (USEPA) tarafından geliştirilmiş bir tahmin yöntemidir (Xiaoli, Tonjes ve Mahajan, 2016). Model depolama sahalarında oluşan metan, karbondioksit ve düşük konsantrasyonlarda bulunan diğer hava kirleticilerin emisyonlarının miktarını belirlemek için tasarlanmıştır. Diğer modellerden farklı olarak metan miktarını tanımlar. Oluşacak toplam gaz miktarı, gaz içindeki metan oranından hesaplanabilir (Sarptaş, 2016b; Güven, 2019).

Modelin çalıştırılabilmesi için aşağıdaki bilgilerin varlığı gerekmektedir (Öztürk, 2018):

- Depolama alanındaki bertaraf edilecek atık miktarının tamamı,
- Depolama alanının yıllık atık miktarı ya da şimdiye kadar toplanan atık miktarı,
- Metan oluşum hızı (k),
- Potansiyel metan üretim kapasitesi (L_0),

- Depo sahasının kaç yıldır kullanıldığı,
- Tehlikeli atıkların, belediye atıkları ile birlikte atılıp atılmadığı.

Söz konusu modelde şu eşitlik kullanılmaktadır (Sarptaş, 2016b):

$$Q_{CH_4} = k \cdot L_0 \cdot \left(\sum_{i=0}^n M_i \cdot e^{-kt_i} \right)$$

Eşitlikte;

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

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

M_i : depolama ömrü boyunca yıllık depolanan atık miktarı, (ton/yıl),

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

GasSIM Modeli: GasSIM, bir depolama alanının planlama, düzenleme ve işletme yönlerinin bir parçası olarak depolama gazı ile ilgili risk yönetim kararlarına yardımcı olmak için geliştirilmiştir. Kullanıcı, karışımın, bileşimin, biyobozunurluğun, atık ve diğer parametrelerin nem içeriğini tanımlayabilir ve böylece modelin tek bir depolama sahasına uyarlanmasını sağlayabilmektedir. Bu yöntemle gaz toplama, parlama, enerji geri kazanımı ve biyolojik metan oksidasyonu göz önüne alınarak, verilebilecek gaz akışı hesaplanmaktadır. Sonuçlar, girilen verilerinin kalitesi doğrultusunda güvenilir olmakta ve az da olsa belirsizlik içermektedir (Environment Agency, 2004). GasSIM, birçok fazlı model ve CH_4 emisyonlarının bir tahminini hesaplamak için LandGEM modeline dayanan bir başka yaklaşımı kullanmaktadır. Çok fazlı model kapsamında çalışan GasSIM, çeşitli kategorilerdeki ve fraksiyonlardaki atık girdisini ve atığın belirli bir yılı boyunca ayrıntılı şekilde ayrışma verilerini kullanmaktadır (Bhailall vd., 2016). GasSIM Modeli için kullanılan eşitlik aşağıdaki gibidir:

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

$$C_x = C_t - C_{t-1}$$

C_t : t anında parçalanabilir karbon kütlelerinin azalması (ton)

C_0 : Zamanda parçalanabilir karbon kütlesi $t = 0$ (ton)

$C_{0,i}$: Her fraksiyonda $t = 0$ zamanda parçalanabilir karbon kütlesi 1, 2, 3, sırasıyla, hızlı, orta ve yavaş parçalanabilir bölümler) (ton)

C_x : Yıl içinde bozulan karbon kütlesi (ton)

t : Atığın konması ve gaz üretimi arasındaki süre (yıl)

k_i : Karbonun her fraksiyonu için bozunma oranı sabiti (yıl başına)

IPCC Modeli: Önceki yıllarda katı atık depolama alanlarından CH_4 üretimi ile entegre edilen tek yıllık katı atık miktarından depolama gaz üretiminin hesaplanması için birinci dereceden kinetik eşitlik kullanılmaktadır. Birinci dereceden kinetik eşitlikler, bireysel ticari depolama CH_4 geri kazanım projeleri için kullanılanlara benzerdir (Bogner vd. 2003). Hesaplama sırasında atıkların içerisinde yer alan parçalanabilir atık malzeme miktarları (gıda, bahçe ve park atıkları, kâğıt ve karton, tahta, tekstil) ayrı ayrı girilir. Daha sonra toplam depo gazının tahmin edilmesi için gerekli bir dizi eşitlik ve alana özgü değişkenler kullanılarak sonuca ulaşılmaktadır (Bhailall vd., 2016).

IPCC için şu eşitlik kullanılmaktadır (Bogner vd. 2003):

$$CH_4 = \{[(MSW_t)(MSW_f(MC_f)(DOC).(DOC_f)(F)(16/12)] - R\} (1 - OX)$$

MSW_t : Katı atık üretimi

MC_f : Anaerobik olarak ayrışan katı atık toprak dolgu fraksiyonu

DOC : Toprak içinde biyobozunur organik karbon

DOC_f : Organik karbonun gaza dönüşmesi

F : Çöp gazı içinde CH_4 fraksiyonu

R : Aktif bir ekstraksiyon sistemi kullanılarak geri kazanılmış CH_4

OX : Metanotroflar tarafından oksitlenmiş CH_4 fraksiyonu

Tabasaran–Rettenberger modeli: Karbon bozunumunu birinci derece parçalama yaklaşımına benzetim yolu ile ifade ederek sınırlı bir süre içerisinde oluşan gaz miktarını tespit etmek için kullanılmaktadır. Tabasaran–Rettenberger

modelinde kullanılan eşitlik, anaerobik çürüme için geliştirilen ilişkiyi kapsamaktadır. Çürütmede, hücre sentezi için kullanılan substrat kısmı sıcaklığa göre değişim gösterdiğinden dolayı model eşitliği sıcaklık için bir düzeltme içermektedir (Fischer, Maurice ve Lagerkvist, 1999).

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

T: Sıcaklık (°C)

C_{org} : Çöpteki organik karbon (kg OK/ton atık)

k: Bozunma hız sabiti (y^{-1})

t: t yılda depolanan atık miktarı

G_t : t yıl için toplam depo gazı miktarı (m^3)

TNO Modeli: Parametreleri geniş ölçekli olan TNO modeli, depolama alanlarındaki gaz ölçüm sonuçları için kullanılan ilk modeldir. Söz konusu modelde atık kütle içerisinde parçalanmış organik karbon esas alınarak hesaplama yapılmaktadır. Zamanla atık içerisinde bulunan karbonun azalımının etkisi, birinci derece model ile hesaplanır. Belli miktar atık kütlelerinden depo gazı oluşumunun zamanla üstel olarak gerçekleştiğini kabul eder (Scharff ve Jacobs 2006).

$$G_t = d \cdot 1,87 \cdot M \cdot C_{org} \cdot k \cdot e^{-k \cdot t}$$

M: Atık miktarı (ton)

C_{org} : Atıktaki organik karbon (kg OK/ton atık)

k: Bozunma hız sabiti ($1/yıl$)

d: toplama verimliliği (-)

G_t : t yıl içinde oluşan toplam depo gazı (m^3)

Mexico: Bu model, 2005 yılında LandGEM versiyon 3.02'nin USEPA tarafından modifiye edilen birinci dereceden bozulma eşitliğini kullanarak yıllık biyogaz üretim oranını tahmin etmede kullanılmaktadır. Mexico modeli, kullanıcının açılış yılı, kapanış yılı, yıllık atık bertaraf oranları, yıllık yağış miktarı

ve toplama sistemi etkinliği gibi spesifik verileri girmesini gerektirmektedir. Bu model için şu eşitlik kullanılmaktadır (Virgen, vd; 2014):

$$Q_{LFG} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^n 2kL_0 \frac{M_i}{10} (e^{-kt_{ij}})(MCF)(F)$$

Q_{LFG} : Beklenen maksimum biyogaz üretim debisidir (m^3 / yr),

i: Bir yıl içerisindeki artıştır,

n: İlk yıldan hesaplanan atık bertaraf yılıdır,

j: 0.1 yıldaki artıştır.

k: metan üretim oranıdır yr^{-1} ,

L_0 : Metan üretim potansiyeli (m^3 / t),

M_i : i yıl içinde ki katı atık bertarafının kütlesidir (t),

t_{ij} : i yıl içinde atılan atık kütlesinin j. yıldaki yaşıdır,

MCF metan düzeltme faktörüdür,

F alev ayar faktörüdür.

4.4.3 İkinci Derece Model

İkinci dereceden modeller pek tercih edilmemektedir. Bunun sebebi, gerekli parametrelerin, modelin doğruluğunu olumsuz yönde etkileyecek kadar belirsiz olmasıdır. Çok fazlı modellerle benzer özelliklere sahiptir (Amini vd; 2013).

4.4.4. Çok Fazlı Model (Afvalzorg)

Depo gazı tahmini için geliştirilen ilk çok fazlı modeli, TNO modeli temel alınarak geliştirilmiştir. Bu modelde, depo gazı atık içerisinde bulunan biyolojik ayrışabilen organik karbon oranı ve kümülatif atık miktarının esas alınması yöntemi kullanılmaktadır. Söz konusu modelde, atık içinde yer alan parçalanabilir atık türleri parçalanma hızları göz önünde bulundurularak hızlı, orta ve iyi olmak üzere 3 ayrı grupta ele alınmaktadır. Literatürde bu gruplara atık bozunma hız sabiti değerleri, hızlı parçalanabilen atıklar için 0.076 – 0.694 1/yıl, orta hızda parçalananan

atıklar için 0.046 – 0.116 1/yıl ve yavaş parçalanen atıklar için 0.013 –0.076 1/yıl arasında kabul edilebileceği ifade edilmektedir. Multi-phase modelinde tahmini oluşacak depo gazı miktarı, farklı parçalanma hızlarındaki atık miktarlarının kümülatif toplamı ile elde edilir (Scharff ve Jacobs, 2006).

$$G_t = d \cdot 1.87 \cdot M \cdot \sum_{i=1}^3 C_{0,i} \cdot k_i \cdot e^{-k_i \cdot t}$$

M: Atık miktarı (ton)

$C_{0,i}$: Atık fraksiyonu i için organik karbon (kg OK/ton)

k_i : Atık fraksiyonu i için hız sabiti (1/yıl)

d: toplama verimliliği (-)

G_t : t yıl içinde oluşan toplam depo gazı (m^3)

4.5. LandGEM Model Parametrelerinin Belirlenmesi

Depo gazı üretim modeli parametrelerinin seçimi CRA tarafından üç kategoriye ayrılmıştır: (1) metal, cam ve plastik gibi az ayrışabilir atıklar, (2) kâğıt, ahşap, ahşap mobilyalar, kauçuk, tekstil, inşaat ve yıkım malzemesi gibi orta derecede ayrışabilir atıklar, (3) yemek atığı, bahçe atığı ve mezbaha atığı gibi – hızlı – ayrışabilir atıklar. CRA (2009) her bir atık kategorisinin metan üretimi için farklı bir potansiyel önermiştir (Tablo 4.2).

Tablo 4.2 Atık karakterizasyonu ve potansiyel metan kapasitesi (CRA, 2009)

Atık Kategorisi	L_0 (m^3 /ton)
Az Ayrışabilir	20
Orta Derecede Ayrışabilir	120
Ayrışabilir	160

Depo gazının üretim hızının değeri (k), atığın nem içeriği, organik maddenin mikroorganizmalarca besin olarak kullanılabilirliği, pH ve sıcaklıktan etkilenmektedir. Bu nedenle, eğer laboratuvar analizi yapma imkânı yoksa, k değeri yıllık ortalama yağış ve atık bileşimine göre seçilebilir. Bu değerlendirme CRA tarafından verilen k değeri seçim matrisi kullanılarak yapılmaktadır (CRA, 2009).

Tablo 4.3 k değeri seçim matrisi (CRA, 2009)

Yağış (mm/y)	Az Ayrışabilir	Orta Derecede Ayrışabilir	Ayrışabilir
<250	0.01	0.01	0.03
250 – 500	0.01	0.02	0.05
500 – 1,000	0.02	0.04	0.09
1,000 – 2,000	0.02	0.06	0.11
2,000 – 3,000	0.03	0.07	0.12
>3,000	0.03	0.08	0.13

4.6. Depo Gazı Enerji İçeriğinin Hesaplanması

Depo gazının enerji içeriği gaz kalitesine göre değişmektedir. Düşük ve orta kalitedeki depo gazının enerji içeriği 16-20 MJ/m³ iken, yüksek kaliteli depo gazı için ise bu değer 30 MJ/m³ değerine dek çıkmaktadır (Sarptaş, 2016a; Sarptaş, 2016b).

Depo gazından enerji kazanımı hesaplamalarında depo gazının nemi, içerdiği sülfür bileşikleri, metan dışı organik bileşikler ve uçucu organik asitler göz önünde bulundurulmalıdır. Depo gazında yer alan istenmeyen gazlar, yüksek nem içeriği ile bir araya geldiğinde toplama sisteminde korozyona yol açmaktadır. Bu sorunun engellenmesi için depo gazı dönüşüm sistemine göre depo gazının granül aktif karbon, seçici solvent, demir sünger ile ön arıtım gibi ön işlemlerden geçirilmesi önerilmektedir (Sarptaş, 2016b).

Ön arıtma işlemi ardından depo gazı, enerji içeriği açısından farklı şekillerde elektriğe dönüştürülebilmektedir. Bunun için dönüşüm verimliliği, gaz türbinleri, buhar türbinleri ve mikro türbinler için %25 - %30 ve pistonlu gaz motorları için %28 - %40 oranında olmaktadır. Biyokütle enerji sistemleri için kapasite faktörleri %80 ile %90 arasında değişmektedir (Sarptaş, 2016a; Abdulvahitoğlu ve Yılmaz, 2017).

Brüt enerji potansiyeli, toplanan depo gazının hacmine ve enerji içeriğine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Bu hesaplamalar yapılırken kullanılan eşitlikler aşağıda verilmiştir (Sarptaş, 2016a).

$$GEP = \eta_{gc} \cdot EC \cdot G_t$$

GEP: Brüt enerji potansiyeli (kWh)

η_{gc} : Gaz Toplama verimliliği

E: Enerji içeriği (kWh/m³)

G_t: Depo gazı modellemesi ile tanımlanan depo gazı hacmi (m³)

Depo gazı enerji geri kazanım sisteminden elde edilen net enerji potansiyeli, elektrik üretimi için kapasite faktörü dönüşüm verimliliği dikkate alınarak hesaplanabilmektedir. Net enerji hesaplaması yapılırken kullanılan eşitlikler aşağıda verilmiştir (Sarptaş, 2016b).

$$NEP = \frac{\eta_{ec} \cdot GEP}{(CF \cdot 8760)}$$

NEP: Net enerji potansiyeli (kWh)

η_{ec} : Elektriğe dönüşme verimliliği

CF: Kapasite faktörü

1 yıl = 365 gün = 365x24 saat = 8760 saat

LandGEM gibi IPCC modeli de yıllık atık bertaraf oranlarını ve bir atık bozulma oranı değişkenini (k değeri) uygulayan birinci dereceden bir bozunma denklemi kullanmaktadır. Birinci derece hesaplamalar, LandGEM değişkeni L₀'ı içermemekte, ancak bir araya getirildiğinde bu değişkenler L₀'a eşdeğer bir değişken oluşturmaktadır. Bu değişkenler; parçalanabilir organik karbonun fraksiyonu (DOC), parçalanmış organik karbonun fraksiyonu (DOCf) ve metan düzeltme faktörü (MCF)'dür (Global Methane Initiative, 2012).

IPCC tarafından önerilen metan düzeltme faktörü (MCF), düzensiz katı atık depolama alanlarının düzenli katı atık depolama alanlarına göre daha az metan ürettiğini dikkate alan bir düzeltme faktörüdür (IPCC, 2000). Bunun nedeni, büyük miktarda atık fraksiyonunun, düzensiz sahaların üst katmanlarında aerobik olarak ayrışmasıdır. Katı atık yönetimi ile ilgili MCF, çalışılan sahaya özgü bir değerdir (Penman vd., 2001). IPCC kılavuzunda varsayılan MCF değerleri Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4 Saha tipine göre MCF değerleri (IPCC, 2000; Karayılan, 2018)

Saha tipi	MCF	Gaz toplamada kayıp
Düzenli anaerobik	1	Kayıp yok
Düzenli yarı-aerobik	0,5	%50
Düzensiz – derin (≥ 5 m)	0,8	%20
Düzensiz – sığ (<5m)	0,4	%60
Sınıflanmayanlar	0,6	%40

Düzenli katı atık bertaraf sahasında, atığın kontrollü olarak yerleşimi yapılmış olmalıdır (örneğin; atıkların belirli biriktirme alanlarına yönlendirilmesi, belirli düzeyde temizlik kontrolü ve yangın kontrolü vb.). Ayrıca örtü malzemesi, mekanik sıkıştırma veya atık seviyesi dikkate alınmalıdır. Sınıflanmayan katı atık bertaraf sahaları için varsayılan değer olan 0,6 yüksek oranda düzensiz sığ alanların bulunduğu gelişmekte olan ülkeler için uygun olmayabilir. Bunun nedeni, emisyonların muhtemelen daha yüksek değerlerde öngörülmesine yol açabilmesidir. Bu nedenle, gelişmekte olan ülkelerdeki envanter ajanslarının, ülkelerinde yönetilen depolama uygulamalarını gösteren verileri belgelemedikleri sürece, MCF olarak 0,4 kullanmaları teşvik edilmektedir (IPCC, 2000). Çalışma sahasında evsel atık ile endüstriyel/sterilize edilmiş tıbbi nitelikli atıklardan ayrı depolandığı için 0,5 seçilmiştir.

4.7. Depo Gazı Enerji Geri Kazanım Yöntemleri

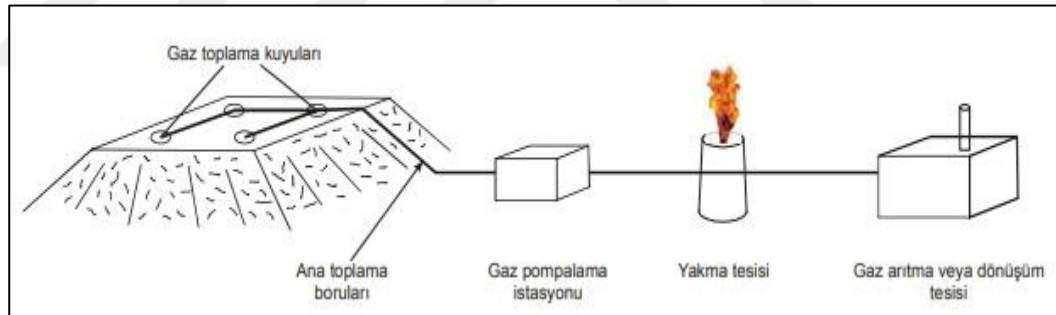
4.7.1. Giriş

Depo gazından enerji elde etme çalışmalarına 1970’li yılların ortasında başlanmıştır. 1990’lı yıllarda ise verimlilik, güvenilirlik ve maliyet tasarrufu açısından kendisini kanıtlayarak öne çıkmıştır. Depo gazından enerji elde edilmesi için yapılan teşviklerin yanı sıra metan emisyonlarının küresel iklim değişikliğine olan olumsuz etkisi kapsamında yenilenebilir enerji kaynağı arayışı ve pazar taleplerini karşılanabilmesi, enerji üretiminde depo gazının kullanılmasına yönelik çalışmaların artmasını sağlamıştır (LMOP, 2017).

Genel olarak, depo gazının geri kazanımı için gazın toplanması, 1 milyon tondan fazla katı atığın bulunduğu sahalarla sınırlandırılmaktadır. Depo gazı geri kazanımı için aşağıda yer alan dört teknik kullanılmaktadır (Beck, 2008):

- Gaz türbini motor yakıtı,
- Gaz türbini ya da içten yanmalı bir motorun çalışmasıyla elektrik üretilmesi,
- Kazan yakıtı olarak kullanılmasıyla buhar üretilmesi. Üretilen buhar ile bir tribün ya da jeneratör çalıştırılarak enerji üretimi sağlanabilmektedir.
- Gaz kalitesinin yükseltilmesi ve doğalgaz alternatifi olarak kullanımı.

Depo gazı geri kazanılması aşamasında kullanılan toplama sistemi genel olarak depolama sahası boyunca yerleştirilen bir dizi gaz toplama kuyusundan oluşmaktadır. Kuyuların sayısı ve aralıkları atık hacmi, yoğunluk, derinlik ve alan gibi depolama özelliklerine bağlıdır. Depolama sahasındaki toplama kuyularında biriken gaz geçişi için kuyular arasında geçiş yolları bulunmaktadır. Çoğu toplama sisteminde, sistemin devamlı çalışmasını sağlamak ve oluşacak sorunlara karşı önlem olarak fazladan kuyular yer alacak şekilde tasarlanmıştır. Bir kuyuda sorun olması durumunda ekstra gaz toplama kuyuları devreye girmektedir (AFS, 2012).



Şekil 4.2 Gaz geri kazanım süreci şeması (Akıncı vd, 2010)

Depo gazı geri kazanım aşamasında gaz kuyuları, pompalama tesisine gönderecek bir boru sistemi, toplanan gazın kullanılamaması durumunda yakılabilmesi için bir yakma tesisi ve gazı kullanıma hazırlayacak bir gaz arıtma ve dönüşüm tesisi kapsamında son kullanıcı gereklidir. Söz konusu son kullanıcı, depo gazının elektrik enerjisine dönüştürüleceği bir tesis ya da depo gazı içerisindeki karbondioksitin azaltılıp metan içeriğinin artırıldığı bir tesis de olabilir. Böylece son kullanıcılara doğal gaz olarak ulaştırılabilmektedir (Akıncı vd., 2010).

Gelecekteki elektrik talebinin karşılanabilmesi ve fosil yakıtın azalmasıyla birlikte, daha çevre dostu bir elektrik üretimi için bir çözüm olarak yenilenebilir bir yakıt sistemi gereklidir. Depo gazından elektrik üretmek için kullanılan çeşitli

sistemler bulunmaktadır ve her birinin avantajları ve dezavantajları vardır. Bu sistemler içten yanmalı motorlar, gaz türbinleri, buhar türbini, yakıt hücresi ve kojenerasyon sistemleridir (Akpınar, 2006).

4.7.2. İçten Yanmalı Motorlar

İçten yanmalı motorlar elektrik üretimi için uzun yıllardır kullanılmaktadır. Depo gazından elektrik elde etmek için en çok kullanılan sistem olan içten yanmalı motorlar 1 ve 3 MW arası enerji sağlamaktadır. Sermaye maliyetinin düşük olması ile birlikte ekonomik riskin oldukça düşük olması bu sistemi avantajlı hale getirmektedir. Ancak sınırlı elektrik üretim kapasitesine sahip olması artan enerji talebini karşılamada yeterli olamamaktadır. Bunun yanı sıra diğer sistemlere göre hava kirlenme kapasitesi daha fazladır (Budisulistiorini, 2007).

İçten yanmalı motorlar genellikle gaz miktarının 800 kW ila 3 MW üretebileceği alanlarda ya da motorlarda, sürdürülebilir depo gazı akış oranının %50 metanda yaklaşık 300 ila 1,100 cfm (cubic feet per minute/dakikada küp feet) olduğu yerlerde kullanılmaktadır. 3 MW'tan fazla üretimin yapılacağı durumlarda çoklu motorlar kullanılmaktadır. İçten yanmalı motorların mevcut boyutları ile ilgili örnekler Tablo 4.5'te görülmektedir (LMOP, 2017).

Tablo 4.5 İçten yanmalı motorların gücü ve gerekli gaz akışı debisi (LMOP, 2017)

Motor Gücü (kW)	Gaz Akışı (%50 Metan) (m ³ /saat)
540	346
633	413
800	595
1200	850

4.7.3. Gaz Türbinleri

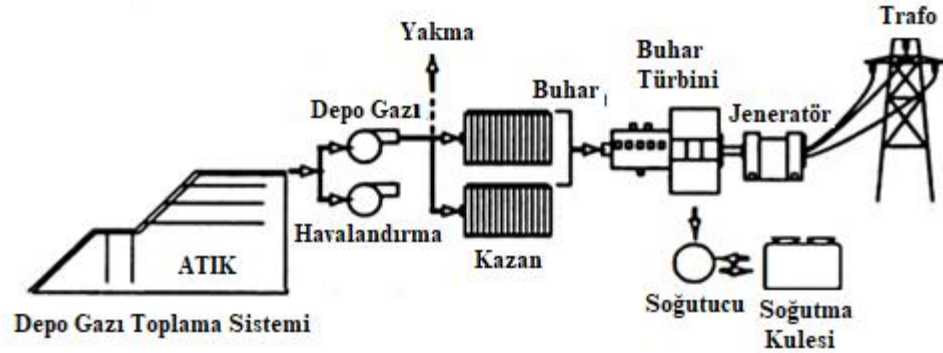
Gaz türbinleri, depo gazından elektrik elde edilmesinde içten yanmalı motorlardan sonra tercih edilen diğer bir sistemdir. Büyük ölçekli birimlerden oluşan gaz türbinleri genellikle günde minimum 2 milyon metreküplük bir depo gazı akış hızına ihtiyaç duyarak daha yüksek enerji üretimi sağlamaktadır. Bu sistemin sağladığı avantajlardan birisi de türbinin büyüklüğünün arttıkça verimliliğin de artması fakat başına üretim fiyatının azalmasıdır. Gaz türbinleri,

içten yanmalı motorlara kıyasla, daha kompakt olmanın yanı sıra daha düşük işletme ve bakım maliyetine sahiptir (U.S. EPA, 2012).

Depo gazından enerji elde etmek için kullanılan basit çevrim gaz türbinleri, tam kapasite ile çalıştığında %20 ile %28 arasında bir verim elde etmektedir. Kombine çevrim gaz türbinlerinde fazla elektriğin yakalanması için gaz türbinin egzozundaki atık ısının geri kazanılması ile sistem verimliliği yaklaşık %40 oranında artırılabilir. Gaz türbinlerinin avantajları, içten yanmalı motorlara göre daha dirençli olmaları ve düşük nitrojen oksit emisyon oranlarına sahip olmalarıdır. Gaz türbinleri dezavantajları, deniz seviyesi atmosfer basıncının 165 poundluk (74.844 kg) ya da daha fazla olduğu durumlarda gaz sıkışmasının fazla olmasıdır. Bu durumda sıkıştırma sisteminin çalıştırılabilmesi için daha fazla güce ihtiyaç duyulmaktadır (LMOP, 2017).

4.7.4. Buhar Türbini

Buhar türbin jeneratörünü çalıştırmak ve güç üretimi için Rankine döngüsü (ısı enerjisini işe dönüştürerek) kullanarak elektrik üretmek için kullanılmaktadır. Bunu için buhar jeneratöründe toplanan depo gazı yakıt olarak değerlendirilir. Şekil 4.3'te buhar türbininin çalışma sistemi gösterilmiştir (Cosulich vd., 1992).



Şekil 4.6 Depo gazı ile elektrik üreten buhar türbini şeması (Cosulich vd, 1992)

4.8. Depo Gazından Enerji Geri Kazanımının Ekonomisi

Depo gazının kullanım ekonomisi depolama gazının miktarına, yerel enerji fiyatlarına (elektrik vb.) ve ekipman seçimi gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir (Shin, Park, Kim ve Shin, 2005).

Depolama gazının elde edilmesinde depolama sahalarının karakteristik özellikleri, projenin tasarım tercihleri ile yatırım ve işletme maliyetlerini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle maliyet analizlerinde her projenin kendi şartları kapsamında değerlendirilmesi gerekmektedir. Bunun yanı sıra bölgesel ve ulusal çapta geçerli olan enerji fiyatları da önem taşımaktadır. Projelerin ekonomik açıdan değerlendirilmesinde fayda maliyet analizinden yararlanılmaktadır. Söz konusu maliyetler içinde yatırım maliyeti, yıllık işletme ve bakım maliyetleri ile karbon ve enerji vergilerinden kaynaklanan maliyetler yer almaktadır. Üretilen enerjinin satılmasından ekonomik fayda elde edilmektedir (Solak, 2015);

Depo gazı değerlendirme tesisinin ekonomik faydası (P_i), üretilen depo gazının satışından elde edilen gelir (RH_i); giderilen karbon emisyonunun ekonomik değeri (RC_i) ve yer altı suyu iyileştirme bedelinden (BG_i) oluşan faydalar ile gaz toplama sistemi ve enerji geri sistem tesis maliyeti (CC_i), işletme ve bakım maliyeti (CO_i) ve elde edilen gazın taşıma maliyetlerinden (CT_i) oluşan maliyetlerin farkı olarak tanımlanmaktadır (Rajaram, Siddiqi ve Khan, 2012'den aktaran Solak, 2015).

$$P_i = RH_i + RC_i + BG_i - CC_i - CO_i - CT_i$$

Depo gazı toplama ve yakma sistemi maliyetleri uygulanacak olan depo gazı çekme kuyuları, borulama, yoğunlaştırma, yakma sistemi ile ilgidir. Bu doğrultuda maliyetler şu şekilde sıralanabilir (Solak, 2015);

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

- Blower ve yakma (flare) sistemi kurulumu,
- Depo gazı ölçüm ve kayıt sistemi,
- Saha için güvenlik çiti,
- Mühendislik çalışmaları,
- Beklenmeyen giderler.

Maliyetler tasarım detaylarına göre değişebilmektedir. Depolama sahasının derinliğine göre gaz toplama borularının kurulum maliyeti de artabilmektedir. Bunun yanı sıra ekipmanların niteliğine göre de maliyetler değişim gösterebilmektedir. Bazı ekipmanlar kurulum aşamasında düşük maliyetli olsa da işletme ve bakım maliyeti yüksek olabilmektedir. Ayrıca projenin gerçekleştiği yerin ekonomik şartları ve pazar koşulları da maliyeti etkilemektedir. Maliyetin değişmesindeki diğer bir etken saha şartlarıdır. Sızıntı suyunun fazla miktarda olduğu durumlarda depo gazının toplanmasında sorun yaşanabilmektedir. Bu durumda ilave yatırım ve işletme maliyeti oluşmaktadır. Bazı depolama alanlarında gelecekte oluşacak biyogaz miktarının artacağına öngörüldüğü durumlarda, normal kapasitenin üzerinde bir tesis kurma ihtiyacı ortaya çıkabilmektedir (Solak, 2015).

Düzensiz çöp döküm alanlarının kapatılma masrafları alanın kapatılması esnasında gerçekleşirken kapatılmadan sonraki ilk 10 yıl içerisinde devam etmektedir. Kapatma maliyeti başlangıç ve işletme giderlerinden oluşmaktadır. Bu harcamalar aşağıdaki gibi açıklanmaktadır (UNEP, 2005).

Başlangıç Giderleri

- Son Örtü
- Drenaj kontrol sistemleri
- Alanın çevrilmesi
- Sızıntı suyu ve gaz yönetim sistemleri

- Kuyuların izlenmesi
- İşaret ve panolar
- Yeşillendirme

İşletme giderleri

- Ekipman
- Personel
- Elektrik Kullanımı

Bu durumda, bir düzensiz depolama sahasının kapatma maliyeti başlangıç giderleri ile işletme giderlerinin toplamıdır. Kapatma sonrası bakım maliyetleri ise şu şekilde sıralanmaktadır (UNEP, 2005):

İnsan gücü:

- Alanın güvenliğinin sağlanması
- Rutin denetimler
- Son örtü, drenaj kontrol sistemleri, sızıntı suyu ve gaz yönetim sistemleri gibi saha altyapısının onarımını ve bakımı,
- Yeraltı suyu, yüzey suyu, sızıntı suyu ve hava kalitesi için izleme programları yürütmek.

Onarım ve önleyici bakım maliyetleri:

- Kapakta, drenaj kontrol sistemlerinde ve diğer saha ekipmanlarının hasar varsa, onarım yapılması,
- Atıkların çökmesi nedeniyle kapatma toprağı yüzeyinde oluşan çatlakların onarılması ve sağlamlaştırılması için toprak ilavesi,

- Sızıntı suyu arıtma havuzlarının bakımının sağlanması,
- Uygulanan prosedürler için alan içerisinde gerekli yerlerin işaretlenmesi
- Laboratuvar ücretleri; Yeraltı suyu, yüzey suyu, atık su ve gaz izleme programları ile kamu veya özel laboratuvarlarda kalitelerinin test edilmesi

Bakım maliyetleri içerisinde Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından 2010 yılında çıkarılmış olan Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmeliği Ek-5 kapsamında her altı ayda bir sızıntı suyu hacmi, sızıntı suyu kompozisyonu ve depo gazı emisyonlarının gerektiği belirtilmiştir. Bu doğrultuda elde edilecek enerjinin, bu maliyetleri karşılaması önem taşımaktadır.

Tablo 4.6 Depo gazı ve sızıntı suyu kontrolü ve izlenmesi (Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik, 2010)

Parametre	Kapatma Sonrası Bakım Aşaması
Sızıntı suyu hacmi	Her altı ayda bir
Sızıntı suyu kompozisyonu ⁽¹⁾	
CH ₄ , CO ₂ , H ₂ S, O ₂ ve H ₂ emisyonları	

⁽¹⁾ Ölçülmesi gereken parametreler depolanmış atığın kompozisyonuna bağlı olarak değişiklik gösterir.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Merkezi Laboratuvar Belirleme Sistemi (MELBES) baz alınarak izleme amaçlı analiz ücretleri yaklaşık olarak sızıntı suyu yeraltı suyu analizlerinin her biri için 2.000 TL+KDV'dir.

Dünyadaki örneklere bakıldığında Hindistan'da 1987 yılında Yeni Delhi'de yer alan Timarpur'da günde 300 ton katı atık işleme kapasitesine sahip ilk büyük ölçekli katı atık yakma tesisi kurulmuş, tesis toplamda 5,7 milyon ABD dolarına mal olmuştur. Ancak atık ayrımalarının iyi yapılamaması, atık kompozisyonu ve özelliklerinin mevsime bağlı değişiklik göstermesi, uygun olmayan teknoloji seçimi, uygulamada ve bakımda yaşanan problemler gibi sebeplerden dolayı başarısızlıkla sonuçlanmıştır (Kumar, Smith, Fowler, Velis, Kumar, Arya, Rena, Kumar ve Cheeseman, 2017). Filipinler'de ise 2015 yılında, Sandoval, Pasig City'de yakıt elde edebilmek için kurulan tesiste toplam 600 ton atıktan maksimum 150 ton yakıt üretilmiştir (Sapuary, 2016).

İstanbul'da yer alan Hasdal düzensiz depolama sahası 1995 yılından sonra rehabilite edilmiştir. 2001 yılında ise enerji santrali aracılığı ile sahadaki %35 oranında metan içeren depo gazından elektrik üretilmeye başlanmıştır. Tesis 6,5 milyon dolara mal olmuştur. Kurulu gücü 4 MW olan tesiste yılda yaklaşık 8.000.000 kWh elektrik enerjisi üretilerek ulusal enerji sistemine verilmektedir. Ankara'da ise Mamak düzensiz depolama sahası için 2006 yılında 4,2 MW'lık enerji santrali kurulmuş, 2007 yılında ise 5,6 MW'lık kapasiteye ulaşmıştır. Organik atıklar 2 reaktörde işlenmektedir. 2008 yılı sonunda ise santralin kapasitesi 22,6 MW'a kadar çıkmıştır (Polat, 2011).

Ülkemizde düzensiz depolama alanlarının kapatılması ve rehabilitasyonu ile ilgili birtakım çalışmalar (Akpınar 2006, Ertürk ve Görgün, 2011; Gökçe vd, 2015, Yıldız ve Erdem, 2015) yapılmış olsa da bu çalışmalar sayıca azdır.

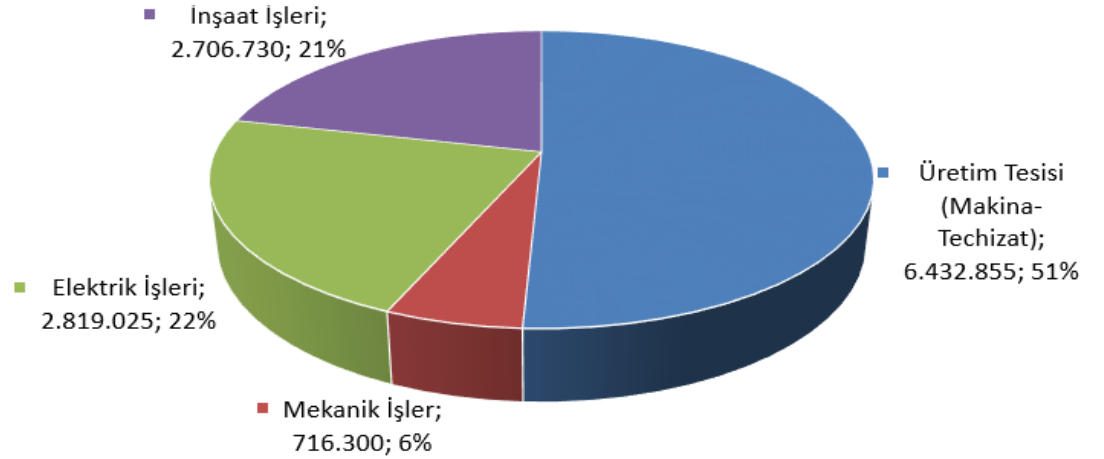
2007 yılında başlamış olan ve 2008 yılında tamamlanan Mersin Çavuşlu çöp döküm sahası için yapılan rehabilitasyon çalışmaları Türkiye'de bu konuda yapılmış olan çalışmalardan birisidir. Rehabilitasyon uygulaması, sahada yapılacak iki çöp kütlesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Birinci çöp kütlesi 16 hektarlık genişliğinde ve ortalama 10 m derinliğindedir. İkincil çöp kütlesi ise en az 10 yıldır döküm yapılmayan ve sadece 3-4 m kalınlığında çöp barındıran ve süreç içinde doğaya dâhil olmuş sınırlı bir alandır. Bu alanda yalnızca şev düzenlemesi ve son örtü uygulaması yapılmıştır. Çöp depolama alanında, doğu tarafta yer alan ve birincil atık (çöp) kütlesi olarak isimlendirilen büyük kütle için: şev düzenlemesi, sedde teşkili, sızıntı suyu drenajı ve toplama havuzu teşkili, yüzey suyu drenajı, son örtü teşkili, gaz drenajı ve bertarafı öngörülmüştür (Ertürk ve Görgün, 2011).

Tablo 4.5'te görüldüğü üzere rehabilitasyon yatırımlarında genel olarak son örtü sistemi en maliyetli kalemi teşkil etmektedir. Projenin toplam yatırım maliyeti 6.317.853 TL olup, metrekareye düşen birim maliyet 39 TL olarak gerçekleşmiştir. Rehabilitasyon maliyeti toplamda 6.317.853 TL'dir. Toplam maliyetin yaklaşık 78,79'unun son örtü uygulamasına ait olduğu hesaplanmıştır. Son örtü uygulaması haricinde en yüksek maliyet oranı %6,69 ile sedde teşkiline aittir. Yüzey Suyunun Drenaj Sistemi %0,78'lik oran ile en düşük maliyete sahiptir (Ertürk ve Görgün, 2011).

Tablo 4.7 Projenin maliyet kalemleri (Ertürk ve Örgün, 2011)

Aşamalar	Toplam Fiyat (TL)	Oran (%)
Şev Düzenlemesi ve Nihai Atık Yüzeyi Teşkili	348.051	%5,51
Sedde Teşkili	422.541	%6,69
Sızıntı Suynun Drenaj Sistemi	104.215	%1,65
Yüzey Suynun Drenaj Sistemi	49.466	%0,78
Gaz Drenaj Sistemi	234.444	%3,71
Son Örtü	4.977.579	%78,79
Tel Çit	181.577	%2,87
Toplam	6.317.853	%100,00

Gaziantep Şahinbey Düzenli Depolama Tesisinde 2010-2039 yılları arası işletme ve 2039-2056 yılları arasındaki kapanma döneminde depo gazı elde edilebilmesi için yapılan tesisin yatırım grafiği aşağıda verilmiştir. Yatırım toplam bedeli 12.675.000 \$ olarak hesaplanmıştır. Harcamaların %40'ı ithal, %60'ı ise iç piyasadan temin edilebilmektedir. Yatırımın %51'i enerji üretim ekipmanları için kullanılmıştır. Bu bedelin ise yarısı gaz motoru kalan kısmı ise cihazlar ve yardımcı ekipmanlar için kullanılmıştır. %49'luk kısmın %22'si elektrik işleri, %21'i inşaat işleri %6'sı ise mekanik işler için kullanılmıştır (Coşkun, 2015).



Şekil 4.4. Gaziantep Şahinbey depo gazı tesisi yatırım dağılımı grafiği (Coşkun, 2015)

Şahinbey düzenli depolama tesisi için yapılan harcamaların ayrıntıları aşağıdaki tablolarda görülebilmektedir (Tablo 4.8 ve Tablo 4.9).

Tablo 4.8 Gaziantep Şahinbey enerji üretim tesisi, enerji üretim kısmı keşif özeti (Coşkuner, 2015)

Enerji üretim kısmı işleri	Fiyat (\$)
Gaz Toplama Sistemi	1.934.205
Pnömatik pompalar ve aksesuarları (Sayac, hortum, basınç regülatörü)	139.425
Manifold başı ekipmanı (Ölçüm sistemi, vanalar, hortumlar, vb)	53.235
HDPE boru tesisatı malzemeleri	487.500
HDPE fitting ve yardımcı malzemeler	136.500
Vanalar ve metal fittingler	94.250
Knockout ve kondans tankları	84.500
Manifoldlar	60.320
Diğer aksesuarlar (Hortumlar, panolar, kelepçeler, muhafazalar, vb.)	104.975
Blower ve flare grupları	656.500
Boru tesisatı ve ekipman montaj işleri	89.050
İşletmeye alma	27.950
Enerji Santrali	4.188.080
Gaz motorları	3.646.500
Soğutma hava hücreleri ve fanları	24.960
Egzost sistemi ve bacalar	78.000
Gaz hattı	92.300
Vana, sayaç ve fittingleri	48.750
İzolasyon işleri	26.520
Çelik konstrüksiyon işleri	58.500
Yağ sistemi	35.100
Radyatör soğutma sistemi ve tesisatı	126.750
Ekipman montajları (Generatör ve aksamı)	11.700
İç ihtiyaç trafosu ve aksesuarları	39.000
Tesis ile İlgili Genel İşler	310.570
Nakliye ve diğer masraflar	97.500
Gümrük masrafları	17.745
Diğer masraflar	35.750
Proje bedeli	27.625
Danışmanlık ücreti	82.875

Tablo 4.9 Gaziantep Şahinbey enerji üretim tesisi genel işler keşif özeti (Coşkuner, 2015)

İnşai İşler	Fiyat (\$)
Lisans ve izinler	16.575
Ölçüm cihazları	32.500
Üretim tesisi işleri toplamı	6.432.855
Gaz Toplama Sistemi	2.194.465
Gaz Kuyusu Açma	271.440
Kanal açma-kapatma	247.000
Genel hafriyat ve dolgu işleri	109.850
Bentonite	23.400
Çakıl	54.600
Kil Kaplama	686.400
Nebati Toprak Serpme	670.800
Drenaj Kanalları Yapımı	78.000
Manifold Hücreleri	29.250
Vana Odaları	10.725
Yol Geçişleri	13.000
Enerji Santrali Binası	512.265
Santral Hafriyat ve temel inşaatı	24.050
Prefabrik Elemanlar (Demir ve Nakliye Dahil)	178.750
Ytong ve duvar örme	32.500
Çatı Kaplama	54.080
Kapı pencere, çelik doğrama işleri	31.850
Generatör Temelleri, zemin betonu ve kaplaması	24.375
Diğer ince işler	27.560
Büro tefrişatı	24.700
Çevre düzenleme ve yollar	47.450
Blower sundurması	24.050
Blower flare temelleri	5.850
Çelik köprü ve boru konsolları	37.050
Toplam	2.706.730

Tablo 4.9 Gaziantep Şahinbey enerji üretim tesisi genel işler keşif özeti (devamı)

Elektrik Tesisat İşleri	Fiyat (\$)
Proje Çalışmaları	32.500
Enerji nakil hattı işleri	1.365.000
Yardımcı tesisler elektrik işleri	39.000
Transformatörler	118.950
Enerji santrali içindeki elektrik tesisatı işleri	1.111.500
Çevre aydınlatması	36.400
Diğer elektrik işleri (yıldırımlik ve topraklama vb.)	25.000
Bina otomasyonu ve CCTV sistemi	42.250
Gaz alma sistemi	25.675
Yangın alarm sistemi	22.750
Toplam	2.819.025
Mekanik Tesisat İşleri	Fiyat (\$)
Basınçlı hava sistemleri	175.500
Gaz soğutma sistemleri (chiller grupları)	136.500
Gaz soğutma tesisatı ve otomasyonu (vana, pompa, fittings vb.)	93.600
Elektrik oda soğutma grupları	5.850
Kullanma suyu sistemi	19.500
Bina ısıtma sistemi	31.850
Yangın söndürme sistemi	253.500
Toplam	716.300
Keşif İcmali	Fiyat (\$)
Üretim tesisi işleri (makine-techizat)	6.432.855
Mekanik İşler	716.300
Elektrik İşleri	2.819.025
İnşaat İşleri	2.706.730
Genel Toplam	12.674.910

Gaz motorları ya da türbinler kullanılarak elde edilen elektrik üretimi, gaz üretiminin m³/saati başına 1,3 – 1,8 kWe olduğu belirtilmiştir. Elektrik üretiminin tipik yatırım ve işletme maliyetleri 2012 yılı için aşağıdaki gibi gösterilmiştir (Erdoğan, 2012).

Tablo 4.10 Elektrik üretiminin tipik yatırım ve işletme maliyetleri (Erdoğan, 2012)

Elektrik Üretim Ekipmanı	Tipik Yatırım Maliyetleri (€/kW)	Tipik Yıllık İşletme Maliyetleri (€/kW)
İçten yanmalı motor (<800 kW)	1600	150
İçten yanmalı motor (>800 kW)	1200	130
Gaz türbini (> 3 MW)	1000	90
Mikrotürbin (< 1MW)	3800	260

Kuarian ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, depolama sahası kapatma maliyetlerinin genel olarak, 10 hektarı ve 2 milyon m³'lük hacimsel kapasiteyi aşan yerler için hektar başına 12,5 (0,399398 TRY) ile 15 milyon Rup. (479.277,76 TRY) olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte, depolama sahası, kapatmanın planlandığı bir iki yıllık süre boyunca kentsel katı atık almaya devam ederse avantaj sağlayabilmektedir (Joseph vd. 2010).

Hindistan, Pune'da bulunan bir çöp sahasının rehabilitasyonu için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Söz konusu rehabilitasyon için yaklaşık 18.500 m²'lik bir alanına sahip çöp sahasının kapatılma maliyeti yaklaşık olarak 0,2 milyon ABD doları olarak hesaplanmıştır (Joseph vd., 2010).

Hiriya depolama alanında yapılan rehabilitasyon çalışmaları için tahmini mühendislik ve inşaat maliyetleri aşağıda verilmiştir. Bu tahminler ekip tarafından geliştirilmiştir (Ayalon, Becker ve Shani, 2006).

Tablo 4.11 Hiriya depolama alanının mühendislik rehabilitasyonunun maliyeti

Bileşenler	Tahmini Maliyet (milyon ABD Doları)
Eğimin dengelenmesi, üst sızdırmazlık, sızıntı suyu toplama sistemi ve yüzey sularının boşaltılması	27,00
Biyogazın toplanması için gerekli sistemin inşası	1,40
Sızıntı suyu arıtma tesisi	1,00
Olası Risklere Karşı Ayrılan Para %15	4,86
Planlayıcı ücretleri 15%	4,86

Düzensiz depolama alanlarının rehabilitasyonu sonrasında, kapatılan alanda oluşan depo gazı değerlendirilerek ekonomik olarak fayda sağlanabilmektedir. Bu

doğrultuda düzensiz depolama alanlarından gaz elde edilebilmesi için belirli bir yatırım yapılmaktadır. Yapılan yatırımlar sonucunda depo gazından elde edilecek kazancın önceden tahmin edilmesi, gazdan elde edilecek gelirim yatırım maliyetlerini karşılayıp karşılamayacağını görölmesi adına oldukça önemlidir.

Literatürde depo gazından elde edilen gazdan ne kadar elektrik üretilebileceği ile ilgili çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Johari ve diğ. (2012), Malezya Yarımadası'nda depolanan 8.196.000 ton atıktan 1,9 milyar kWh elektrik / yıl üretebileceğini hesaplamıştır.

Polonya'nın Krakow kentinde bulunan Barycz depolama alanına 1994 yılında bir blower ve flare istasyonu inşa edilmiş, 1998, 1999, 2002 ve 2008 yıllarında toplamda dört içten yanmalı motor kurulmuştur. Bu motorların birleşik üretim kapasitesi, 1,3 megawatt (MW) tır. 3,4 ton atıktan saatte, içeriği %55 metan olan yaklaşık 600 m³ depo gazı üretilmektedir (ISWA, 2012). Proje ile ilgili ayrıntılı bilgiler Tablo 4.12'de görölmektedir.

Endonezya'nın Jakarta kentinde bulunan Bekasi kasabasındaki depolama alanı üzerinde yapılan çalışmada atık yönetimi için çeşitli senaryolar geliştirilmiştir ve maliyet-fayda tahmini yapılmıştır. 5. Senaryoda gaz üretiminden elde edilen ve tahminen yılda ortalama 17,8 GWh olarak üretilen elektrik satışından kazanç sağlanmaktadır. Yıllık maliyet 2,414 USD gelir ise yıllık olarak 2,048 USD olarak hesaplanmıştır. Depolama alanının elektrik üretimi için maliyetin gelirden daha fazla olması sebebi ile bir fayda sağlamadığı görölmüştür (ISWA, 2012).

Türkiye'de ise Bursa-Demirtaş Katı Atık Vahşi Depolama Sahası rehabilite edilerek enerji üretimim gerçekleştirilmiştir. Saha 1960-1996 yılları arasında kullanılmış ve 1996 yılında kullanıma kapatılmıştır. Sahadan çıkan metan gazlarının toplanarak elektrik enerjisine dönüştürülmesi için 51 adet düşey gaz bacası yatay borularla birbirine bağlanmış ve böylece 12 adet kollektör merkezinde toplanmıştır. Ana gaz toplama borusu aracılığı ile jeneratörlere ulaştırılan gazlar alternatörler sayesinde elektrik enerjisine dönüştürölmektedir. Sistemde 278 kW'lık 5 adet jeneratör bulunmakta ve tesisin kurulu gücü 1,4 MW/sa, gaz emme kapasitesi 900 m³/sa'tir (Sezgin, Özcan, Varınca ve Borat, 2003).

Türkiye'de depo gazından elektrik üreten diğ er bir alan ise 1998 yılında kapatılan İstanbul'daki Kemerburgaz-Hasdal açık depo sahasıdır. Çıkan gaz kuyular aracılığı ile toplanarak istasyondaki düşük basınçlı blower ile

çekilmektedir. Çıkan gaz, burada 15 manifoldla toplanarak 3 ana kolektör aracılığı ile gaz santraline gönderilmektedir. Buradaki gaz içerisinde yer alan su buharı ve zararlı gazlar ayrıştırıldıktan sonra elde edilen saflaştırılmış gaz soğutuculardan geçirilerek gaz motorlarına gönderilmektedir. İstasyonda her biri 1 MW elektrik üretebilen 6 adet motor-alternatör grubu bulunmaktadır. 20 silindirli motorlar direkt olarak depo gazı ile çalıştırılabilmektedir. Normaldeki elektrik verimi %38,8 iken egzoz ısısının da kullanılmasıyla bu verim %80'e kadar çıkmaktadır. Elde edilen 380 V'luk elektrik trafo sayesinde 34,5 kV'a çıkabilmektedir (Sezgin vd, 2003).

Tablo 4.12 Barycz depolama alanı ile ilgili bilgiler (ISWA, 2012)

Genel Bilgiler	
Açılış Yılı	1974
Kapanış Yılı	2016
Toplam Atık (2012 yılı)	3,4 ton
Saha Kapasitesi	4,2 ton
Mevcut Atık İzi	10,8 ha
Toplam Atık İzi	36 ha
Depo Gazı Enerji Projesi	
Proje Tipi	Elektrik Üretimi
Başlangıç	Mayıs 1998
Gaz Çıkarma Kuyuları	70 Dikey Kuyu
İzleme	1
Blower/Flare İstasyonu Kapasitesi	1,000 m ³ /sa
Ortalama Gaz	%55 CH ₄ te 600 m ³ /sa
Ortalama Emisyon Azaltma	55,000 ton CO _{2e} /yıl

İstanbul'da bulunan Odayeri çöp gazı santrali 33,81 MW kurulu güce sahip olup yaklaşık 65 bin kişinin elektrik ihtiyacını karşılamaktadır. Elektrik üretimi için tesiste GE Jenbacher marka 17'si 1415 kW kapasiteye sahip ve 3'ü 1364 kW kapasiteye sahip olmak üzere toplamda 20 adet gaz motoru bulunmaktadır. Tesiste üretilen elektrik yükseltici transformatörler vasıtasıyla 34,5 kV'ya yükseltilerek 2,20 kilometre uzunluğunda 86 direkli hatla enterkonnekte sisteme bağlanıp tüketime sunulmaktadır. İhtiyaç fazlası elektrik üretimi olması durumunda elektrik yükseltici transformatörlerde 34,5 kV'ya çıkartılarak ulusal şebekeye verilmektedir (Çelebi, 2017).

Gaziantep Şahinbey Düzenli depolama tesisi için 2010 yılında "Katı Atık Düzenli Depolama Alanının Rehabilitasyonu ve Elektrik Üretim Tesisi Projesi"

gerçekleştirilmiştir. Elektrik üretiminin m^3 metan gazı başına 2,17 kWh net enerji üretildiği kabul edilmiştir. Tesisin ortalama olarak hesaplanan 12.675.000 yatırım bedelini sekiz yılda karşılayacağı, dokuzuncu yılda kara geçeceği tahmin edilmiştir (Coşkuner, 2015).

Depo gazının kullanımı sırasında enerji geri kazanım sistemlerinin tasarımı, inşası ve işletilmesi ile ilgili iş alanları da yaratılmaktadır. Yapılan projeler kapsamında mühendisler, inşaat firmaları, ekipman tedarikçileri, kamu hizmetleri ve son kullanıcılar da yer almaktadır. Sondaj, boru sistemleri, inşaat ve işletme personeli harcamaları gibi proje maliyetlerinin büyük kısmı yerel giderler olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte istihdam ve yerel satışların artması ekonomik fayda elde edilmesine yardımcı olmaktadır. Yerel işletmeler maliyeti yüksek olan fosil yakıtların yerine depo gazı kullanarak tasarruf edebilmektedir (EPA, 2018).

5. VERİ VE YÖNTEM

5.1. Çalışma Sahası

Çalışma sahası, Ege Bölgesinde bulunan bir düzensiz çöp döküm sahası olarak belirlenmiştir. Bu sahanın seçilmesindeki en önemli etkenler, sahada 2017 yılı itibari ile enerji üretim yatırımlarının ve enerji üretiminin başlaması, 2018 yılı sonu itibariyle alana atık kabulü yapılmamasıdır. Böylelikle sahanın aktif haldeki enerji üretim değerleri ile kapatıldıktan sonraki enerji üretim potansiyeli karşılaştırılmıştır. Örnek sahanın geçmişine ait depolanan atık bileşimi hakkında net bilgi bulunmamaktadır. İdare ile yüklenici arasında yapılan sözleşmeye istinaden düzensiz depolama alanının 133.097,12 m² alana sahip olduğu bilinmektedir. Aktif gaz toplama sistemlerinin sahanın son dönemlerde yalnızca evsel atıkların depolandığı belirli bir alana kurulduğu bilinmektedir. Çalışma sahasına ilişkin uydu görüntüsü Şekil 5.1’de görülmektedir.



Şekil 5.1 Çalışma sahası uydu görüntüsü (Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü, 2019)

5.2. Katı Atık Miktar ve Bileşimi

Yerel yönetimden alınan bilgiye göre çalışma sahası yaklaşık 35 yıl boyunca atık depolamıştır. Şehirde sanayi bölgesinin yer aldığı göz önünde bulundurulduğunda örnek sahada evsel atıkların yanı sıra endüstriyel atıkların da depolandığı kabul edilmiştir. Ayrıca tıbbi atık sterilizasyon tesisinden çıkan atıklar da bu sahada evsel atıklardan ayrı bir alanda depolanmıştır.

Depolanan evsel atıkların içindeki geri dönüşümü mümkün olan atıklar (plastik, metal, karton vb.) el ile ayıklanmaktadır. Geri dönüşümü mümkün olan atıkların ilk ayıklanmaya başladığı tarih bilinmemektedir. Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğünden temin edilen bilgilere göre Çalışma bölgesi sahaya ait 2018 yılı atık kompozisyon bilgisi Şekil 5.2 'de verilmiştir.



Şekil 5.2 Örnek tesise ait 2018 yılı atık kompozisyonu

Organik maddeler hızlı ve yavaş ayrışabilenler olarak iki gruba ayrılabilir. Yiyecek atıkları, kâğıt, gazete, bahçe atıkları hızlı ayrışabilen, deri, tahta, tekstil, plastik atıklar yavaş ayrışabilen atıklar olarak kabul edilir. Tablo 5.1'de organik maddelerin ayrışma dereceleri görülmektedir (Solak, 2015).

Tablo 5.1 Organik maddelerin ayrışabilirlik dereceleri (Solak, 2015)

Atık Tipi	Ayrışma Derecesi	Ayrışma Yarı Yıl Ömrü
Yiyecek	Hızlı	1
Bahçe	Orta	5
Kâğıt, karton, tekstil, tahta	Yavaş	15
Plastik, deri, kauçuk, toprak	Ayrışmıyor	-

Örnek sahada 2000 yılı öncesi dökülen çöplerin büyük oranda stabilize olduğu ve sahadaki işletme koşulları (alana beton ve inşaat yıkıntı atıklarının dökülmüş olması, dikey gaz toplama kuyuların ortalama 25m derinliğe açılması ve saha derinliğinin 35m'den derin olduğunun bilinmesi) göz önüne alınarak, bu çalışmada yapılan hesaplamalarda 2000-2018 yılları arasında sahada depolanan atık miktarı esas alınmıştır. Depolanan atıklar orta derecede ayrışabilir olarak kabul edilmiştir.

Sahaya dökülen atık miktarları 2016 yılı temmuz ayından beri kayıt altına alınmıştır. Bu nedenle sahaya dökülen atık miktarları sadece Temmuz 2016 – Aralık 2018 dönemi için temin edilebilmiştir. Bilinen değerler doğrultusunda geçmişe yönelik tahmin yapılmıştır. 2016 yılı Temmuz-Aralık ayları arasında sahaya kabul edilen 70.582 ton atık referans alınarak 2016 yılında 140 ton atık geldiği ve her yıl 2.000 ton atık artışı olduğu kabul edilerek tahminleme yapılmıştır. Bilinen değerler ve tahmini değerler Tablo 5.2 'de gösterilmiştir.

Tablo 5.2 Depolanan atık miktarları

Yıl	Atık Miktarı (ton/yıl)
2000	108.000 ^{*1}
2001	110.000 ^{*1}
2002	112.000 ^{*1}
2003	114.000 ^{*1}
2004	116.000 ^{*1}
2005	118.000 ^{*1}
2006	120.000 ^{*1}
2007	122.000 ^{*1}
2008	124.000 ^{*1}
2009	126.000 ^{*1}
2010	128.000 ^{*1}
2011	130.000 ^{*1}
2012	132.000 ^{*1}
2013	134.000 ^{*1}
2014	136.000 ^{*1}
2015	138.000 ^{*1}
2016	140.000 ^{*1}
2017	129.758 ^{*2}
2018	89.609 ^{*2}

^{*1} Tahmini değerler

^{*2} Saha kayıtları

2000 yılından 2017 yılına kadar atık miktarının giderek arttığı kabul edilmiştir; 2017 yılından itibaren azaldığı görülmektedir. Atık miktarındaki azalmanın sebebi entegre tesisin faaliyete başlaması nedeniyle çalışma sahası olarak seçilen düzensiz çöp döküm alanına atık kabul edilmemesi olmuştur. 2018 yılından sonra ise alana atık alımı tamamen durmuştur.

Entegre tesis faaliyete alındıktan sonra mekanik ayırma ünitesinde işlenen atığa bakıldığında evsel atığın ortalama olarak %43,67'i ayrışabilir, %41'i ayrışmayan, %0,03'ü hurda kâğıt, %4,79 hurda plastik, %0,51 hurma metal, %10 ise atıksudan oluştuğu tespit edilmiştir. Burada mekanik ayırma sisteminin verimliliği ve tesise gelen atık kalitesi göz önünde bulundurulmalıdır. Kâğıt ve plastik gibi atıklar çöp içerisinde kirlendiğinden hurda kapsamında çıkan atık miktarı azalmaktadır.

5.3. Çalışma Sahasında Yapılan Rehabilitasyon Çalışmaları

Çalışma sahası olarak seçilen katı atık düzensiz çöp döküm sahasının rehabilitasyonu, depo gazından enerji üretimi ve entegre atık yönetimi projeleri çevre mühendisi olarak görev yaptığım yüklenici firma sorumluluğunda başlatılmış ancak rehabilitasyon süreci tamamlanmamıştır. Bu bölümde bu proje kapsamında sahada yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

Çalışma sahasında öncelikle 1:3 oranında şevlendirme işlemi yapılarak atık kütlelerinin dağılması engellenmiştir. Gaz salınımlarını ve oksijen girişini azaltmak için sıkıştırma ve toprakla örtme işlemi yapılmıştır. Şevlendirme, sıkıştırma ve toprakla örtme işlemleri 25 tonluk HITACHI ve 21 tonluk HUNDAI ekskavatörler aracılığı ile yapılmıştır. Kullanılan toprağın bir kısmı Büyükşehir Belediyesi Fen İşleri'nden temin edilmiş, bir kısmı da saha içerisindeki alanlardan kazılarak alınmıştır. Toprak örtüsü için harcanan toprak miktarı bilinmemektedir.

Gaz sıkışmasını önlemek ve enerji üretimi gerçekleştirmek amacıyla aktif gaz toplama sistemleri kurulmuştur. Saha ikiye bölünerek toplamda 160 dikey ve 50 yatay kuyu açılmıştır. Gaz toplama istemi $150 \text{ m} \times 200 \text{ m} \times 25 \text{ m} = 750.000 \text{ m}^3$ (30 dönüm) bir alanda kurulmuştur. Kuyularda 200'lük (çapı 20 cm) 5 cm aralıklarla yaklaşık 15 cm delikli yüksek yoğunluklu polietilen PN-12,5 (et kalınlığı 1,25 cm) gaz toplama boruları tercih edilmiştir. Dikey kuyular fore kazık yardımı ile 25 m aralıklarla 8 ile 31 m derinliğinde, yatay kuyular ise ekskavatörler yardımı ile fore kazıklara bitişik olacak şekilde açılmıştır. Dikey kuyuların amacı önceden

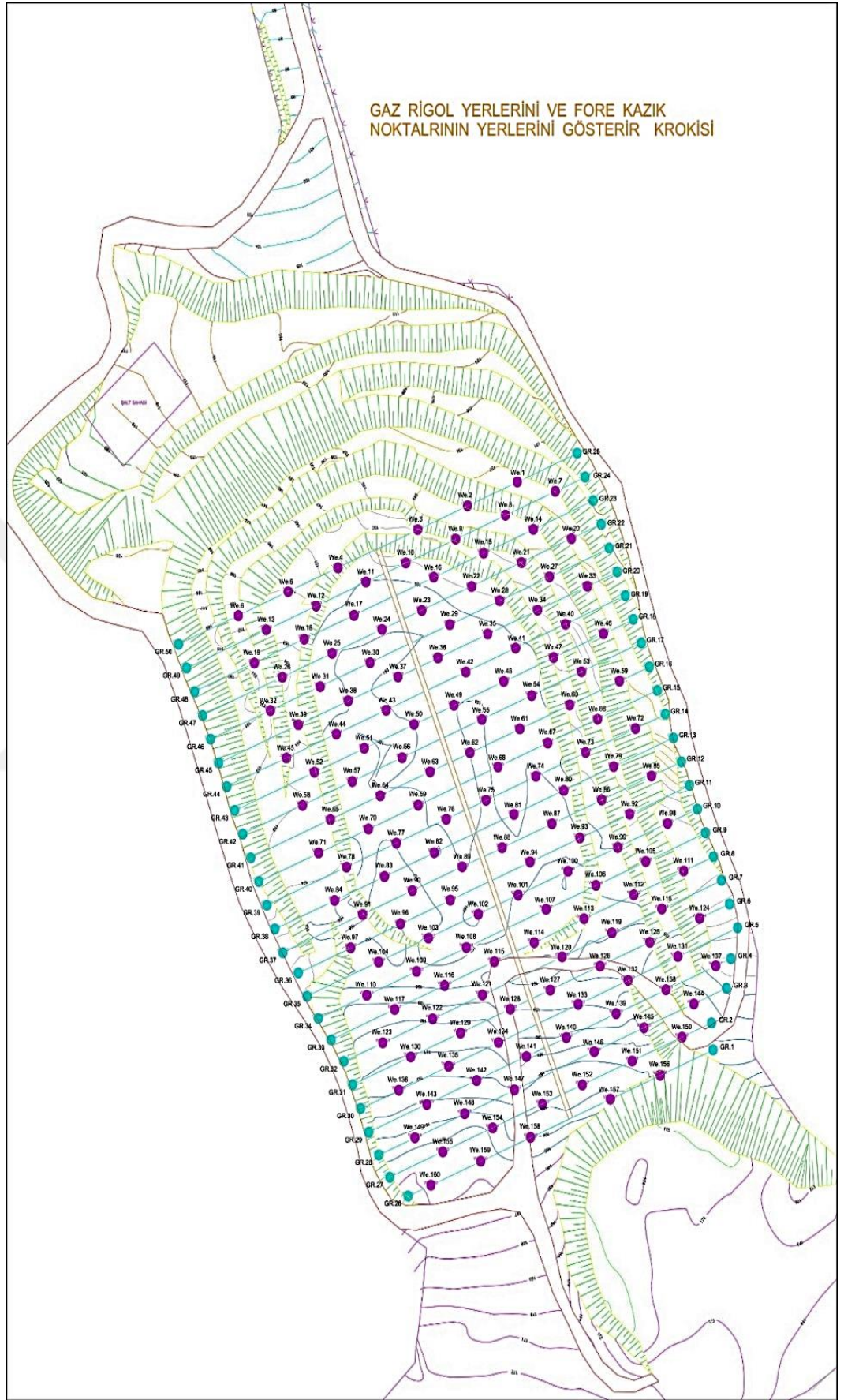
depolanmış atığın ürettiği gazı, yatay kuyuların amacı ise yeni depolanan atığın ürettiği gazı enerji üretim sistemine beslemektir. Atık kütlelerinin yerden yüksekliğinin 35 m olduğu bilinmesine rağmen yerin altına açılan çukur derinliği bilinmemektedir. Dolayısıyla sahanın %100'ünden faydalanılamamıştır. Fore kazıklar yerden 5 m yukarıda olacak şekilde açılmış, boru döşenmeden önce 1m çakıl kullanılmıştır. Dikey kuyuların açılmasında CAT marka fore kazık makinası, yatay kuyuların açılmasında HITACHI ve HUNDAI marka ekskavatörler kullanılmıştır.

Kurulan gaz toplama sistemi ana hat üzerinden enerji üretim sistemine verilmektedir. Enerji üretim sistemi ekipmanları aşağıda belirtilmiştir.

- Sifon (kondanse su havuzu)
- Chiller Grubu (biyogaz soğutma sistemi)
- Blower Grubu (gaz emme ve flare)
- Enerji Üretim Grubu (motor ve alternatör)
- Trafolar ve elektrik panoları

Enerji üretim sistemine beslenen gazın ana hat üzerindeki istasyon ve vanalardan düzenli olarak gaz ölçümleri alınmaktadır. Depo gazı metan içeriği sistemin en verimli olduğu %50 - %55 arasında tutulmak istendiğinden vanalardan sürekli olarak ayar yapılmaktadır.

Sahada rehabilitasyon süreci devam etmektedir. Geçirimsizliği sağlamak için sahanın üst yüzeyine 50 cm kil serimi yapılmıştır fakat, sızıntı suyunun tahliyesi, drenaj kanalı ve üst örtü tabakasının oluşturulması, rehabilitasyon alanı peyzajı işleri henüz tamamlanmamıştır.



Şekil 5.3 Aktif gaz toplama sistemi rigol ve fore kazık krokisi

Sızıntı suyunun tahliyesi için toprak alanda sızıntı suyu buharlaştırma havuzu oluşturulduğu ve sızıntı suyunun %80'inin burada toplandığı bilinmektedir. Sızıntı suyu boyutu ya da hacmi hakkında net bir bilgi bulunmamaktadır. Toprak alanda biriktirildiğinden sızıntı suyu tahliyesi yetersizdir. Öncelikle sızıntı suyu havuzu tabanı geçirimsizliği sağlanarak sızıntı suyunun yeraltı sularına karışması önlenmelidir. Özellikle kış aylarında yağışlarla taşmasını önlemek için depolama alanı etrafına yüzey suyunu toplayacak kuşaklama kanalı ve depolama alanı yüzeyine serilen geçirimsiz tabakadan sonra drenaj tabakası (kireç oranı düşük çakıl) serilmelidir. Sızıntı suyu buharlaştırılarak bertarafı sağlanmak isteniyorsa havalandırıcı kullanılabilir böylelikle buharlaştırma hızlandırılabilir.

Üst örtü toprağı, aktif gaz toplama sistemleri kurulup atık alımı durdurulduktan sonra, öncelikli hedef olarak enerji üretimine destek olması için takribi 80 cm toprak tabakası olacak şekilde serilmiştir. Üst örtüden önce drenaj kanalı yapılması gerekmektedir.

Peyzaj işleri, sızıntı suyu tahliyesi ve üst örtü tabakası oluşturulduktan sonra ve enerji üretimi ekonomik olmayan bir düzeye geldiğinde yapılacaktır.

5.4. Depo Gazı Enerji Potansiyelinin Tahmini

Bu çalışmada depo gazı enerji potansiyelinin tahmini için öncelikle depo gazı miktar kestirimi yapılmıştır. Ardından depo gazı enerji değeri hesaplanmıştır.

5.4.1. Depo Gazı Miktar Kestirimi

Bu çalışmada depo gazı miktarının kestirimi için en yaygın kullanılan modellerden biri olan ve hazır Excel hesaplama tablosuna sahip olan LandGEM modeli kullanılmıştır. Bölüm 4.5'te hesaplama yaklaşımı açıklanan LandGEM modeli ABD Çevre Koruma Ajansı tarafından depolama sahalarında oluşan metan, karbondioksit ve hava kirletici emisyonlarının miktarını belirlemek için tasarlanmıştır.

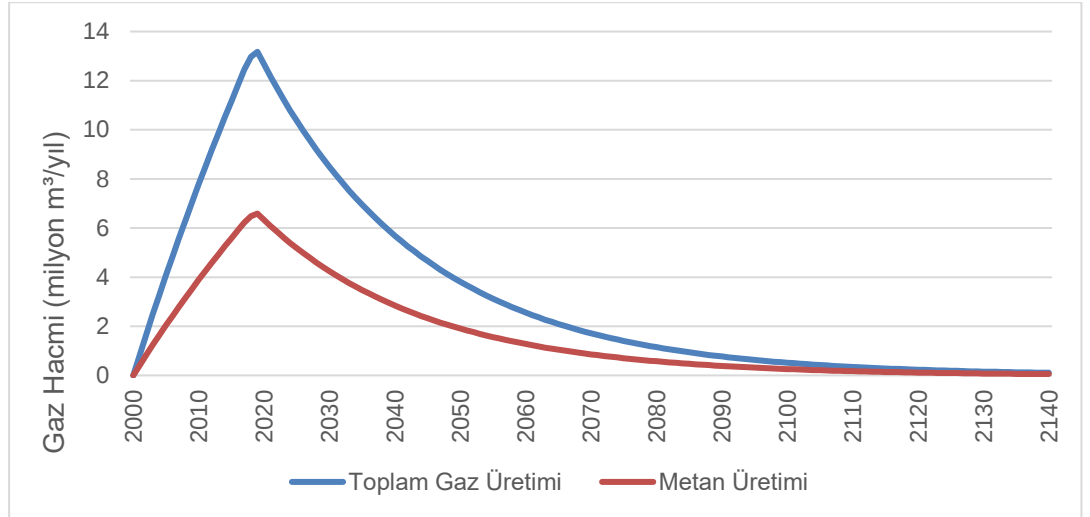
Modelin çalıştırılabilmesi için; (i) depolanan yıllık atık miktarı veya depo alanında bulunan toplam atık miktarı, (ii) metan üretim hızı (k), (iii) potansiyel metan üretim kapasitesi (L_0), (iv) depolama sahasının açıldığı yıl ve (v) depolama sahasının tehlikeli atık bertarafı için kullanılıp kullanılmadığı gibi bilgilere ihtiyaç vardır (Sarptaş, 2016b).

Depo gazı miktar hesaplamalarında sahanın geçmişi ile ilgili ayrıntılı bilgiye ulaşılamadığından ve sahanın işletmeye açıldığı 1982 yılından beri dökülen atıkların büyük bölümü stabilize oluşundan tesis açılış yılı 2000 olarak seçilmiştir; ayrıca tesiste atık kabulü 2018 yılında durdurulduğu için tesis kapanış yılı olarak 2018 ele alınmıştır. Potansiyel metan üretim kapasitesi (L_0) ve depo gazı üretim hızının (k) belirlenmesinde herhangi bir analiz yapıp deneysel sonuç elde edilmediğinden atık depolama sahaları için CRA (Conestoga-Rovers & Associates) tarafından geliştirilen parametreler kullanılmıştır.

Örnek sahanın 1930-2018 yılları toplam yağış miktarı ortalamasının 727.9 mm olduğu belirtilmiştir (MGM, 2019). Yıllık yağış ortalaması göz önüne alındığında LandGEM modelinde kullanılacak k değeri 0,04 olarak belirlenmiştir. Sarptaş (2016)'ya göre 2016 yılında İzmir kentsel atığı için atık türlerine göre metan potansiyeli hesaplanmış ve toplamda metan oluşum kapasitesi $109 \text{ m}^3/\text{CH}_4$ olarak bulunmuştur. Çalışma sahasının Ege Bölgesinde yer aldığı ve İzmir kentine yakın / benzer karakterde olduğu göz önüne alınarak örnek sahada $L_0 = 100 \text{ m}^3/\text{ton}$ kabul edilmiştir (Sarptaş, 2016b). Bölüm 4.2'de yer alan "Depolama gazı bileşimi"ne ait tabloya bakıldığında metan içeriği %45-60 arasında verilmiştir. Depolama alanında depolanan atık bileşiminin net olarak bilinmemesi ve enerji üretim sistemleri kurulum aşamasında depo alanının ürettiği gazın %100'ünden faydalanılamaması gibi sebeplerle metan içeriği %50 olarak seçilmiştir.

LandGEM modeli ile çalışma sahasında 2018 ile 2040 yılları arasında üretilen depo gazı miktarı (metan emisyonu) hesaplanmıştır. Yapılan hesaplama sonucu 2018 yılında depo gazı miktarının 12,9 milyon m^3 , metan miktarının 6,5 milyon m^3 , karbondioksit miktarının 6,5 milyon m^3 ve NMOC miktarının 52 bin m^3 olduğu tespit edilmiştir. 2040 yılında ise depo gazı miktarının 5,68 milyon m^3 , metan miktarının 2,84 milyon m^3 , karbondioksit miktarının 2,84 milyon m^3 ve NMOC miktarının ise 22,7 bin m^3 olacağı tahmin edilmiştir.

LandGEM modeline göre hesaplanan gaz miktarına (Şekil 5.4) bakıldığında toplam depo gazı ve metan üretiminin en yüksek olduğu yılın 2019 yılı olduğu görülmektedir. Bu durumun sebebi depolama alanının 2018 yılı sonu itibari ile atık alımına kapatılmasıdır. 2019 yılından itibaren atık beslemesi yapılmadığından depo gazı ve metan miktarı sürekli olarak düşmektedir.



Şekil 5.4 Yıllara göre toplam gaz ve metan üretimi miktarları

5.4.2. Depo Gazı Brüt / Net Enerji Değerinin Hesabı

Üretilen depo gazına göre brüt ve net enerji değeri gaz toplama sistem verimliliği %75, kapasite faktörü %90 seçilerek hesaplanmıştır. Örnek sahada içten yanmalı motor kullanılmakta olup dönüşüm verimliliği %30'dur. Örnek sahada evsel atıklar endüstriyel ve tıbbi atıklardan ayrı bir alanda toplandığından ve sahanın her alanından faydalanılamadığında metan düzeltme faktörü %50 olarak seçilmiştir. Hesaplama kullanılan parametre değerleri Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3 Hesaplama için kullanılan parametreler

Parametre	Değer
Depo gazı enerji içeriği (EC)	16 MJ/m ³
Gaz toplama sistemi verimi (η _{gc})	%75
Enerji dönüşüm verimi (η _{ec})	%30
Kapasite faktörü (CF)	%90
Metan düzeltme faktörü (MCF)	0.50

Örnek saha için brüt ve net enerji potansiyeli hesaplaması şu şekildedir:

2018 yılı;

$$Q_{LFG}^* = MCF \times Q_{LFG}$$

$$12.980.000 \text{ m}^3/\text{yıl} \times 0,5 = 6.490.000 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

$$\text{GEP} = 0,75 \times 16 \times 6.490.000$$

$$= 77.880.000 \text{ MJ/yıl} = 21.633.333,3 \text{ kWh/yıl}$$

$$\text{NEP} = (0,3 \times 21.633.333,3) / (0,9 \times 8760)$$

$$= 823,19 \text{ kW} = 0,823 \text{ MW}$$

2019 yılı;

$$Q_{\text{LFG}}^* = \text{MCF} \times Q_{\text{LFG}}$$

$$13.180.000 \text{ m}^3/\text{yıl} \times 0,5 = 6.588.000 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

$$\text{GEP} = 0,75 \times 16 \times 6.588.000$$

$$= 79.056.000 \text{ MJ/yıl} = 21.960.000 \text{ kWh/yıl}$$

$$\text{NEP} = (0,3 \times 21.960.000 \text{ kWh}) / (0,9 \times 8760)$$

$$= 835,62 \text{ kW} = 0,835 \text{ MW}$$

2040 yılı;

$$Q_{\text{LFG}}^* = \text{MCF} \times Q_{\text{LFG}}$$

$$5.688.000 \text{ m}^3/\text{yıl} \times 0,5 = 2.844.000 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

2040 yılı için brüt ve net enerji potansiyeli hesaplaması şu şekildedir:

$$\text{GEP} = 0,75 \times 16 \times 2.844.000$$

$$= 34.128.000 \text{ MJ/yıl} = 9.460.000 \text{ kWh/yıl}$$

$$\text{NEP} = (0,3 \times 9.460.000 \text{ kWh}) / (0,9 \times 8760)$$

$$= 360,73 \text{ kW} = 0,36 \text{ MW}$$

5.4.3 Gerçek Veriler ile Enerji Üretim Kestiriminin Karşılaştırılması

Gerçek veriler elde edilmiş olan enerji üretimi ile LandGEM modeli aracılığıyla enerji üretim kestirimi karşılaştırıldığında; örnek sahada 1,2 MW enerji üretim kapasitesine sahip olan bir adet içten yanmalı motorun 2018 yılı içinde ortalama 0,897 MW enerji ürettiği belirlenmiştir. Örnek sahada enerji üretimi kestirimine göre; 2018 yılında elde edilebilecek maksimum enerji potansiyelinin 0,823 MW olduğu tespit edilmiştir.

2019 yılında gerçek enerji üretimi ve LandGEM modeli ile enerji üretimi kestirimi karşılaştırıldığında, modelden elde edilebilecek maksimum enerji potansiyelinin 0,835 MW, gerçek verilerden elde edilen enerji üretiminin 0,417 MW olduğu belirlenmiştir. Tahmin edilen enerji üretimi ile gerçek enerji üretim değeri arasında yaklaşık 2 kat farklılık olmasının nedenleri, 2019 yılında tesiste meydana gelen arızalar dolayısıyla bazı aylarda enerji üretilememesi ve teknik sorunlar nedeniyle üretimin faturaya yansımamasıdır. Bu nedenlerle 2018 yılının aksine, 2019 yılında sahada üretilen gerçek enerji miktarı daha düşük görünmektedir.

2020 yılına yönelik yapılan enerji kestiriminde, enerji üretim miktarının 0,803 MW olacağı ve bu yıldan itibaren yapılan tahminlerde enerji üretiminin 2040 yılına kadar düzenli olarak azaldığı belirlenmiştir. Modelde 2040 yılına yönelik yapılan tahmine göre, elde edilebilecek enerji potansiyelinin 0,361 MW olduğu belirlenmiştir.

5.5. Rehabilitasyon ve Enerji Üretim Sistemi Kurulum Giderleri

Rehabilitasyon işlemi için enerji üretim sistemlerinin kurulmasına gerek yoktur yalnızca pasif gaz toplama sistemleri ile alandaki gaz sıkışmasının önlenmesi yeterlidir. Bu durumda rehabilitasyon giderleri ile enerji üretim sistemleri giderleri birbirinden ayrı tutulabilir. Fakat söz konusu sahada yapılan rehabilitasyon işlemleri yalnızca gaz üretimine yardımcı olması amacıyla yapıldığından birlikte değerlendirilmiştir.

Örnek sahada şevlendirme, sıkıştırma, toprakla kapama, gaz toplama sistemi kurulumu ve enerji üretimi işlerinin 2017 yılında yapıldığı, sızıntı suyu tahliyesi, üst örtü toprağı ve peyzaj-çevre düzenleme işlemlerinin yapılmadığı bilinmektedir.

Bilinen değerler doğrultusunda hesaplamalar, bilinmeyen değerler için ise tahmin yapılmıştır.

5.5.1. İş Makinası ve Personel/İşçilik Giderleri

Şevlendirme, sıkıştırma, gaz toplama sistemi kurulumu işlemlerinde kullanılan iş makinalarından 3 adet FATİH kamyon, HITACHI ve HUNDAI ekskavatörler operatörleri ile aylık olarak kiralanırken mazot şirket tarafından karşılanmış, bir adet CAT marka fore kazık makinesi ise operatörü ve yakıtı ile birlikte metre başına iş yapacak şekilde kiralanmıştır. Bunlara ek olarak işletmeye ait satın alma maliyeti 129.800 TL olan CAT marka D7 Dozer saha atık alımına kapanana kadar çöp itme işlemi gerçekleştirmiştir. Operatör belediye tarafından, mazot ise şirket tarafından karşılanmıştır. İş makinaları günde 8 saat ayda 24 gün çalışmıştır. Kiralık araç bakımları şirket tarafından yapılmadığından bakım onarım maliyeti yoktur. Dozer için ise 7.000 TL/ay bakım maliyeti bulunmaktadır. İş makinelerinin maliyet hesabı Tablo 5.4'te belirtilmiştir.

Tablo 5.4 İş makineleri maliyeti

İş Makinası	Araç sayısı	Kiralama Bedeli* ¹	Çalışma Süresi (Ay)	Bakım Maliyeti (TL)	Mazot Tüketimi (L/saat)	Mazot birim fiyatı* ³ (TL/L)	Maliyet (TL)
Ekskavatör	2	12.980 TL/ay	12	-	20	3,14	600.902
Kamyon	3	9.440 TL/ay	12	-	30	3,14	990.950
Dozer	1	129.800 TL* ²	24	7.000	30	3,14 (2017) 3,56 (2018)	760.904
Toplam Maliyet							2.352.757

*¹ İş makinası ve operatörü ile kiralama

*² Şirkete ait (satın alma maliyeti)

Şevlendirme, sıkıştırma, toprakla kapama işlerinin 2 ay, gaz toplama sistemi kurulum işlerinin 5 ay, enerji üretim sistemi kurulum ve enerji nakil hattı işlerinin 4 ay, kil serim işleminin 1 ay sürdüğü bilinmektedir. Fore kazık makinasına ait işçilik bedeli çalışmanın 5.5.4. bölümünde verildiğinden iş makinası giderlerine yansıtılmayacaktır. Kiralık iş makinaları için 1 yıl, dozer için ise 2 yıl üzerinden hesaplama yapılırsa; kiralık iş makinalarının maliyeti 1.591.853 TL, dozerin maliyeti (bakım maliyeti ile birlikte) 760.904 TL'dir. Toplam iş makinası maliyeti 2.352.757 TL olarak hesaplanmıştır.

Örnek sahada çalışan personele ait aylık toplam gider Tablo 5.5’te verilmiştir.

Tablo 5.5 Personel giderleri (2017 yılı için)

Personel	Kişi sayısı	Çalışma süresi (ay)	Maaş* ¹ (TL/ay)	Toplam (TL)
Mühendis	2	12	6.000	144.000
Formen	1	12	5.000	60.000
İşçi	5	12	3.000	180.000
Elek. teknikeri	3	12	3.000	108.000
Toplam Maliyet				492.000

*¹ Sigorta, yol ve yemek olarak.

İşçilik/personel maliyeti 1 yıl üzerinden 492.000 TL olarak hesaplanmıştır.

5.5.2. Şevlendirme, Sıkıştırma ve Toprakla Kapama Gideri

Toprakla kapama işleminin bir kısmı Büyükşehir Belediyesi Fen İşlerinden temin edilen hafriyat ile sağlanmış, diğer kısmı ise çalışma sahadan çıkarılan toprak ile gerçekleştirilmiştir. Toprak için herhangi bir ücret ödenmemiş olup işçilik için maliyet hesabı yapılmıştır.

Şevlendirme, sıkıştırma ve toprakla kapama işlemleri aylık olarak kiralanan 2 adet ekskavatör ve 3 adet kamyon aracılığı ile yapılmıştır. Söz konusu işlerin 2 ayda tamamlandığı göz önünde bulundurulduğunda toplam maliyetin 265.309 TL olduğu hesap edilmiştir. Fakat çalışmanın 5.5.1. bölümündeki iş makinası maliyeti hesabında belirtildiğinden toplam maliyet hesabına eklenmeyecektir.

5.5.3. Gaz Toplama Sistemi Kurulum Giderleri

Çalışma sahasında 160 adet dikey, 50 adet yatay kuyu bulunmaktadır. Kuyular içerisinde 200 mm çaplı PN-12,5’luk HDPE boru kullanılmaktadır. Her bir rigolün 75 m olduğu forelerin ise 31 m ile 8 m derinliklerde olduğu bilinmektedir. Dikey kuyu derinliklerindeki bu değişkenliğin sebebi sahanın durumu ile alakalıdır: beton vb. sert malzeme ile karşılaşıldıkça daha derine inilememiştir. Dikey kuyu derinliği ortalama 25 m kabul edildiğinde kuyularda kullanılan toplam boru uzunluğu 7.750 m olarak hesaplanmıştır.

Her bir yatay kuyunun bir ucu istasyonlar aracılığı ile gaz toplama ana hattına diğer ucu ise sızıntı suyunun toplanması için sifona bağlıdır. İstasyonlarda ve sifonlarda 110 mm çaplı PN-12,5 HDPE boru, ana hatta ise 250 mm çaplı PN-12,5 HDPE boru kullanılmıştır. Çalışma sahasında 5 adet istasyon bulunmakta, her istasyona 10 adet yatay kuyu bağlanmaktadır. Gaz toplama ana hattı uzunluğu 400 metre, bir adet istasyon (emme boruları) hattı uzunluğu 110 metredir. Bir sifonda ise 250 metre boru kullanılmaktadır. Gaz toplama sisteminde kullanılan boru maliyet hesabı Tablo 5.6'da gösterilmiştir.

Tablo 5.6 Gaz toplama sisteminde kullanılan boru maliyet hesabı

Kullanılan malzeme	Birim fiyat (\$/m)	Boru uzunluğu (m)	Maliyet (\$)
110 mm PN-12,5 HDPE boru	10,03	13.050	130.892
200 mm PN-12,5 HDPE boru	13,57	7.750	105.168
250 mm PN-12,5 HDPE boru	18,88	400	7.552
Toplam Maliyet			243.611

Dikey kuyular fore kazık, yatay kuyular ekskavatör iş makinaları yardımı ile açılmaktadır. Fore kazık maliyeti metre başına hesaplanmaktadır. Dikey kuyularda toplamda 4.000 metre boru kullanılmaktadır. Gaz toplama sisteminde kullanılan fore kazık işçilik maliyeti Tablo 5.7'de gösterilmiştir.

Tablo 5.7 Gaz toplama sisteminde kullanılan fore kazık işçilik maliyeti

İş Makinası	Araç sayısı	Kiralama Bedeli (TL/m)	Çalışma Mesafesi (m)	Maliyet (TL)
Fore kazık	1	84,96	4.000	339.840

Kuyularda kullanılan borular gaz toplamak amacıyla 5 cm aralıklarla 14-16cm'lik matkap ucu ile delinerek istenen uzunluğa göre kaynak yapılmaktadır. Bu işlem sahada çalışan personel aracılığıyla yapılmaktadır. Personel/işçilik giderleri Bölüm 5.5.1'de verildiğinden tekrar hesaplanmamıştır.

Kuyularda kullanılan borulara gaz harici bir şey girmemesi için çakıl ve kullanılmıştır. Her dikey kuyu için 1 m³ mıcır kullanılırken her yatay kuyu için 2,25

m³ mıcır kullanılmıştır. Kullanılan mıcırın birim hacim ağırlığı 1800 kg/m³'tür. Jeotekstil her yatay kuyu için toplamda 3.750 m² kullanılmıştır. Gaz toplama sisteminde kullanılan mıcır ve jeotekstil maliyet hesabı Tablo 5.8'de gösterilmiştir.

Tablo 5.8 Gaz toplama sisteminde kullanılan mıcır ve jeotekstil maliyet hesabı

Kullanılan malzeme	Birim fiyat	Miktar	Maliyet (TL)
Çakıl	27,14 TL/ton	272,5 m ³ = 490,5 ton	13.312
Jeotekstil	4,87 TL/m ²	3.750m ²	18.263
Toplam Maliyet			31.575

Buna göre çalışma sahasında kullanılan boru maliyeti 243.611 \$, fore kazık işçilik maliyeti 339.840 TL, mıcır maliyeti 13.312 TL ve jeotekstil maliyeti ise 18.262 TL olarak hesaplanmıştır.

5.5.4. Enerji Üretim Sistemleri Kurulum Giderleri

Örnek çalışma sahası enerji üretim sistemi şalt sahası yaklaşık 945m²'lik bir alana kurulmuştur. Şalt sahası giderleri zemin düzeltme, kablo kanal açılması, beton serimi, topraklama (6 metre ara ile bakır tel serimi) ve işçilik olarak ortaya çıkmaktadır. Zemin düzeltme ve kablo kanal açılması sahada çalışan personel ve ekskavatör aracılığı ile bir günde yapılmıştır. İşçilik ve iş makinası hesabı Bölüm 5.5.1'de verildiğinden tekrar hesaplanmamıştır.

Şalt sahasında 378 m³ C-35 beton, 4 ton 14'lük demir, 337 metre 70'lik bakır tel kullanılmıştır. Şalt sahasında kullanılan ekipman maliyet bilgisi Tablo 5.9'da verilmiştir.

Tablo 5.9 Şalt sahası maliyetleri

Şalt Sahası	Kullanım Miktarı	Birim fiyat	Maliyet (TL)
C-35 beton	378 m ³	129,80 TL/m ³	49.064
14'lük demir	4.000 kg	1,9 TL/kg	7.600
70'lik bakır tel	337 m	16.520 TL/m	5.567.240
İşçilik	-	-	41.300
Toplam Maliyet			5.665.204

Buna göre şalt sahası ekipman maliyeti 5.623.904 TL olarak hesaplanmıştır. İşçilik maliyeti 41.300 TL'dir. Şalt sahası maliyeti toplamda 5.665.240 TL olarak hesaplanmıştır.

Enerji üretim sistemlerinde ana ekipmanlar olarak kullanılan chiller grubu (biyogaz soğutma sistemi), blower grubu (gaz emme ve flare sistemi) elektrik enerji üretim grubu (motor ve alternatör) ekipmanlarına ait satın alma maliyetleri Tablo 5.10'da belirtilmiştir.

Tablo 5.10 Enerji üretim sistemlerinde kullanılan ana ekipman maliyetleri

Ekipman	Maliyet (€)
Chiller grubu (gaz soğutma sistemi)	70.800
Blower grubu (gaz emme ve flare)	11.800
Elektrik enerjisi üretim grubu (motor ve alternatör)	472.000
Toplam Maliyet	554.000

Diğer ekipmanlara ait satın alma maliyetleri ise tablo 5.11'de verilmiştir.

Tablo 5.11 Enerji üretim sistemlerinde kullanılan diğer ekipman maliyetleri

Ekipman	Birim Fiyat	Maliyet (\$)
Çelik konstrüksiyon (çevre çiti, trafo ve pano ünite çatısı vb.)	22.420 TL	6.146
Aydınlatma ve trafo	47.200TL	12.939
Personel konteyneri (oda+mutfak+tuvalet)	94.400 TL/adet	344.371
2 adet 1600 kW trafo	12.800 \$/adet	25.960
1 adet 250 kW iç ihtiyaç trafosu	4.720 \$/adet	4.720
1 adet nötr direnç panosu	17.700 \$/adet	17.700
1 adet iç ihtiyaç trafo panosu	7.080 \$/adet	7.080
2 adet beton köşk (kesici, yükseltici vb.)	295.000 \$/adet	590.000
Kablolama	94.400 TL	25.877
Toplam Maliyet		1.034.793

Depo gazından üretilen enerji şebekeye verilmektedir. Bu durumda enerji nakli maliyeti doğmaktadır. Enerji nakil hattı kanal açma, kanal altı kumlama, kablo serme, kablo üstü kumlama, kumlama üstü binsleme, emniyet şeridi yatırma ve kanal kapama işlerinden oluşmaktadır. Enerji üretim sisteminin bağlı olduğu

şebekenin şalt sahasına olan uzaklığı 1,5 km'dir. Şebeke bağlantısı yeraltından yapıldığından kazı işlemi ekskavatör aracılığı ile yapılmıştır. İşçilik ve iş makinası hesabı Bölüm 5.5.1'de verildiğinden tekrar hesaplanmamıştır. Kablo olarak 3 sıra olacak şekilde 4500 metre 400'lük alüminyum tel kullanılmış olup maliyeti 4.720 TL olarak hesaplanmıştır.

5.5.5. Sızıntı Suyu Tahliyesi Giderleri

Örnek sahada sızıntı suyu, gaz toplama sistemindeki sifonlarda toplanarak toprak havuzda biriktirilmektedir. Sahada mühendislik esaslarına göre tasarlanmış ve işletilen bir sızıntı suyu tahliyesi bulunmadığı için sızıntı suyu tahliye sistemi ile ilgili bir maliyet bilgisi bulunmamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada sızıntı su sistemi giderleri tahmini hesaplanmıştır. Yapılan çalışmalarda sızıntı suyu toplama havuzunun genel olarak 1000 m³ hacme sahip olduğu görülmüştür (Cindil, 2007, Aşan Doğan, 2015). Bu nedenle örnek sahada 1000 m³ hacme sahip bir sızıntı su havuzu kurulacağı öngörülerek hesaplama yapılmıştır.

Çalışma sahası 2018 yılı sonu itibariyle atık alımına kapandığından sızıntı suyu miktarı zamanla azalacaktır. Bu sebeple sızıntı suyu için arıtma tesisi yapılması ekstra maliyet olarak gözükmemektedir. Sızıntı suyu geçirimsiz bir havuzda toplanarak buharlaştırma yöntemi ile bertaraf edilebilir. Buharlaştırmanın hızlanması için havuz içerisinde blower kullanılabilir.

Yatay kuyuların ve gaz ana hattının bir uçlarının bağlı olduğu sifonlar sızıntı suyu havuzuna bağlanmalıdır. Sızıntı suyu havuzu ile sifonların birbirlerine mümkün olan en yakın mesafede kurulması hem maliyeti düşürecek hem de sızıntı suyu kontrolünün daha rahat yapılmasını sağlayacaktır. Elde Sifonları birbirine bağlamak için 200'lük PN-12,5 boru seçilmiş olup, çalışma sahası uzunluğunun 200 m ve genişliğinin 150 m olduğu bilindiğinden sifonların birbirleri ile bağlantısı için 400 metre boru, sızıntı suyu havuzuna uzanması için ise 300 metre boru kullanılacağı ve işçiliğin sahada çalışan personel tarafından yapılacağı kabul edilmiştir.

1000 m³'lük (10m x 20m x 5m) sızıntı suyu toplama havuzu için 200 m² yüzey alanı ve 5 m derinliğe sahip havuz kullanılacaktır. Entegre tesiste revize edilen sızıntı suyu havuzu bilgileri referans alınarak havuz için toplam 60 m³ beton, 18 ton demir gideceği ve iki adet blower kullanılacağı kabul edilmiştir.

Yağmur sularının sızıntı suyuna karışmasını önlemek için çalışma sahası etrafına yağmur suyu/kuşaklama kanalı döşenmesi gerekmektedir. 600 metre uzunluğunda olduğu kabul edilmiştir (200m+150m+200m + 50m). Kanalin alt taban genişliği 30 cm, yan duvar genişliklerinin 50 cm olduğu ve beton kalınlığının 5 cm olacağı varsayıldığında 39 m³ beton gideceği hesaplanmıştır.

Tablo 5.12 Sızıntı suyu tahliye sistemi maliyetleri (Entegre tesis verileri referans alınmıştır.)

Malzeme	Birim Fiyat	Kullanım miktarı	Maliyet (TL)
Demir	3.500 TL/ton	18 ton	63.000
C-35 Beton	200 TL/m ³	99 m ³ (60m ³ sızıntı suyu) (39m ³ yağmursuyu kanalı)	19.800 (12.000) (7.800)
200'lük PN-12,5 HDPE boru	14,7 € + KDV/m (91,87 TL/m)	700 m	65.290
İşçilik	-	-	45.000
Blower	15.280 TL	2 adet	30.560
Toplam Maliyet			223.650

Buradan 99 m³'lük betonun maliyeti 19.800 TL, 18 tonluk demirin maliyeti ise 63.000 TL, 700 metre boru maliyeti 65.290 TL, iki adet blowerın maliyeti ise 30.560 TL olarak hesaplanmaktadır. Havuzun kurulması ve yağmur suyu kanalı döşenmesi için işçilik maliyeti entegre tesis verileri referans alınarak 45.000 TL olarak belirlenmiştir.

5.5.6. Üst Örtü Toprağı Giderleri

Çalışma sahasında tam olarak üst örtü serimi yapılmamıştır. Sahanın üst yüzeyine 50 cm kalınlığında kil serimi yapılarak geçirimsizlik sağlanmış fakat şevlere kil serilmemiş, yağmur suyunu toplamak için drenaj kanalı yapılmamış ve tarıma elverişli toprak serimi gerçekleştirilmemiştir. Tahmini hesap yapılacaktır.

Yağmur sularının sızıntı suyu oluşturarak kirlilik yükünü artırmaması adına öncelikle 25 cm kalınlığında iki katman olacak şekilde kil/membran serilerek geçirimsizlik sağlanmalıdır (Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik, 2010). Çalışma sahası atık alımına kapandıktan sonra 50 cm kalınlığında kil serilmiştir. Örnek saha 13,3 hektarlık bir alana kurulu olmasına rağmen atık depolanan yüzey alanı 3 hektardır. 30.000 m² yüzey alanı için 15.000 m³ kil

harcanmış olup, 1 m³ kilin 2 m² alanı kapladığı bilindiğinden, şevlerde (3 tane yan yüzey) yaklaşık olarak 9.625 m³ kil harcaması gerektiği hesaplanmıştır. 1 kamyon 20 m³ kil taşımaktadır. Çalışma sahasının üst bölgesinde 750 kamyon kil kullanılmıştır. Yan yüzeyler için 481 kamyon kil gerektiği hesaplanmıştır. Bir kamyon kil fiyatı 472 TL'dir. Toplamda 1.231 kamyon kil kullanıldığında 492.400 TL+KDV maliyet oluşmaktadır (Tablo 5.13).

Tablo 5.13 Kil maliyeti

Yüzey	Yüzey alanı (m²)	Kil İhtiyacı (m³)	Kamyon	Birim Fiyat (kamyon /TL)	Maliyet (TL)
Üst Yüzey	30.000	15.000	750	472	354.000
Yan Yüzey-1	7.000	3.500	175		82.600
Yan Yüzey-2	5.250	2.625	131		61.832
Yan Yüzey-3	7.000	3.500	175		82.600
Toplam Maliyet					581.032

Mineral tabaka üzerine yağmur suyunun toplanması amacıyla drenaj tabakası döşenmelidir. Drenaj tabakasının kalınlığının ise en az 50 cm olması ve en az $K \geq 1.0 \times 10^{-4}$ m/s geçirgenliğe sahip olması gerekmektedir (Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik, 2010). Drenaj tabakası için kullanılacak kompozit malzeme, 30 metre uzunluğunda ve 2,5 m genişliğinde rulolar halinde temin edilmektedir. 1 m² fiyatı 4,13 \$'dir (Geoplas, 2019). Malzemenin serimi kolay uygulanabilir olduğundan ekstra işçilik maliyeti gerektirmemektedir. Rehabilit edilen alan için toplam drenaj kompozit malzeme maliyeti 203.403 \$ olarak hesaplanmıştır (Tablo 5.14).

Tablo 5.14 Drenaj tabakası maliyeti

Yüzey	Yüzey alanı (m²)	Birim Fiyat (\$/ m²)	Maliyet (\$)
Üst Yüzey	30.000	4,13	123.900
Yan Yüzey-1	7.000		28.910
Yan Yüzey-2	5.250		21.653
Yan Yüzey-3	7.000		28.910
Toplam Maliyet			203.403

Drenaj tabakasından sonra en az 50 cm olacak şekilde tarım toprağı serilir (Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik, 2010). Tarım toprağının saha içerisinde çekildiği farz edilirse yalnızca işçilik maliyeti oluşacaktır. 2019 yılı iş makinası ortalama aylık kira bedelleri ve mazot birim fiyatı Tablo 5.15'te verilmiştir. İş makinaları günde 8 saat ayda 24 gün çalıştığı kabul edilmiştir.

Tablo 5.15 Üst örtü toprağı maliyeti

İş Makinası	Adet	Çalışma süresi (ay)	Kiralama bedeli*1(TL/ay)	Kullanılan mazot (litre/saat)	Mazot birim fiyatı (TL/litre)	Maliyet (TL)
Ekskavatör	2	4	17.700	20	6,30	335.136
Kamyon	3	2	12.900	30	6,30	295.128
Toplam Maliyet						630.264

*1 İş makinası ve operatör ile kiralama bedeli

2 adet ekskavatör ile 1 ayda mineral tabaka serimi, 2 adet ekskavatör ile 1 ayda drenaj kanalı yapımı ve 2 adet ekskavatör ve 3 adet kamyon ile toprak seriminin 2 ayda tamamlanacağı farz edilirse işçilik maliyeti 630.264 TL olarak hesaplanmaktadır.

5.5.7. Peyzaj ve Çevre Düzenleme Giderleri

Üst örtü işlemi gerçekleştirilmediğinden peyzaj-çevre düzenleme işleri yapılmamıştır. Çalışma sahasında yapılacak peyzaj işlerinin maliyetleri bir peyzaj firmasından sağlanan maliyetler baz alınarak belirlenmiştir (Tablo 5.16).

Tablo 5.16 Peyzaj ve çevre düzenleme maliyetleri (Çakıl Peyzaj, 2019)

Kalemler		30 Dönüm/TL	50 Dönüm/TL	133 Dönüm/TL
Çimlendirme (Taşıma ve İşçilik Dahil)	Çim Tohumu	296.000	493.333	1.312.266
	Hazır Rulo Çim	445.680	742.800	1.972.833

Tabloya göre çim tohumu hazır rulo çime göre daha az maliyetlidir. İşçiliğin büyükşehir belediyesi desteği ile yapılacağı kabul edilerek çim tohumu kullanılması tercih edilmiştir. Yan yüzeyler de hesaba katılarak 50 dönümlük alan için çevre düzenlemesi yapılacağı kabul edilmiştir.

5.5.8 Rehabilitasyon Sonrası Bakım Giderleri

Rehabilitasyon sonrası bakım aşamasında su ve toprak kirliliğine sebep olması muhtemel etmenlerin kontrol altına alınması için Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik kapsamında en az 3 adet olmak üzere (1 memba 2 mansap) 6 ayda bir yeraltı suyu kontrolü yapılmalıdır. Söz konusu analiz ücreti Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Merkezi Laboratuvar Belirleme Sistemi (MELBES) referans alınarak yeraltı suyu analiz maliyeti bir adet gözlem kuyusu için 2.390 TL/yıl olarak hesaplanmıştır (Tablo 5.17).

Tablo 5.17 Yeraltı suyu parametreleri için MELBES birim fiyatları

PARAMETRE	BİRİM FİYAT (TL+KDV)
Anlık Numune Alma	180
Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)	175
Toplam Kjeldhal Azotu	173
Askıda Katı Madde (AKM)	75
Yağ Ve Gres	225
Toplam Fosfor (P)	104
Toplam Krom	104
Krom (Cr ⁺⁶)	92
Kurşun (Pb)	104
Toplam Siyanür (Cn ⁻)	161
Kadmiyum (Cd)	104
Demir (Fe)	104
Florür (F ⁻)	92
Bakır (Cu)	104
Bakır (Cu)	104
Çinko (Zn)	104
Balık Biyodeneyi (Zsf)	173
Ph	40
Renk	92
TOPLAM	2.026

Tablo 5.18 Yıllık yeraltı suyu izleme analiz maliyeti

Gözlem Kuyusu Adedi	Numune Alma Sıklığı	Birim Maliyet (€/ay)	TOPLAM MALİYET (€/yıl)
3	6 ayda bir	377	2.262

Rehabilitasyon ve enerji üretim sistemi bir arada işlendiğinden burada motor bakımı, motor yağ değişimi ve personel giderleri de hesaba katılmalıdır. Yıllık personel maliyeti Tablo 5.19’da bakım maliyeti Tablo 5.20’de, yağ değişim maliyeti Tablo 5.21’de verilmiştir (Aydın Efeler Düzenli Katı Atık Depolama Sahası, 2019).

Tablo 5.19 Yıllık personel maliyeti (Aydın Efeler Düzenli Katı Atık Depolama Sahası,2019)

Personel	Kişi sayısı	Çalışma süresi (ay)	Gider* ¹ (€/ay)	Maliyet (€/yıl)
Mühendis	1	12	1.000	12.000
Elektrik teknikeri	5	12	500	30.000
TOPLAM MALİYET				42.000

*¹ Sigorta, yol ve yemek olarak.

Tablo 5.20 Motor bakım giderleri (Aydın Efeler Düzenli Katı Atık Depolama Sahası,2019)

ÇALIŞMA SAATLERİ	YIL	BAKIM ARALIKLARI					YILLIK TOPLAM (€)		
		2000	10000	20000	30000	40000			
							YEDEK PARÇA	İŞÇİLİK	GENEL TOPLAM
0-7999	1	3					6.741	3.000	9.741
8000-15999	2	3	1				25.977	7.000	32.977
16000-23999	3	3		1			159.959	15.000	17.4959
24000-31999	4	3			1		31.651	7.000	38.651
32000-39999	5	4					8.988	4.000	12.988
40000-47999	6	3				1	160.656	15000	175.656
58000-55999	7	3	1				25.977	7.000	32.977
56000-59999	8	2					4.494	2.000	6.494
		24	2	1	1	1	424.423	60.000	484.443
Yedek Parça Toplam Liste Fiyatı (€) 703.704									

* Yıllık çalışma saati 8.000 saat olarak öngörülmüştür.

* Fiyatlar 1 adet motor içindir.

* Fiyatlara yağ dahil değildir.

* Fiyatlara turbocharger ve alternatör bakımları dahil değildir.

* Saatlik fiyata işçilik fiyatı dahildir.

Motor bakım maliyetleri için dışarıdan yapılacak 8 yıllık hizmet sözleşmesi ile yedek parça giderleri %40 indirimli olarak ödeneceği kabul edilmiştir (Aydın Efeler Düzenli Katı Atık Depolama Sahası, 2019). Buna göre yıllık 60.555,375 € motor bakım maliyeti hesaplanmıştır.

Motor çalışma saati ortalama 1.000 saate geldiğinde yağ değişimi yapılmaktadır. Ortalama 1,5 ayda bir yağ değişimi yapıldığına göre yılda 8 kez yağ değişimi yapılmalıdır. Her bir değişimde 7 varil motor yağı kullanılmaktadır. Bir varil yağ fiyatı ortalama 522 €'dur.

Tablo 5.21 Yağ değişim maliyeti (Aydın Efeler Düzenli Katı Atık Depolama Sahası,2019)

Değişim/yıl (1000 saat)	Adet (Varil)	Birim Fiyatı (€)	Maliyet (€/yıl)
8	7	522	29.232

Buna göre yıllık yeraltı sunu analiz bedelinin 2.390 TL, personel giderinin 42 bin €, motor bakım bedelinin 484 bin €, motor yağ değişim bedelinin 29 bin € olduğu hesaplanmıştır. Söz konusu giderler rehabilitasyon maliyetlerinden ayrı değerlendirilecektir.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

1982 yılında açılmış olan örnek saha 2018 yılında atık alımına kapatılmıştır. 2017 yılının Temmuz ayından itibaren elektrik üretimi yapılan sahada aktif gaz toplama sistemi olarak 160 adet dikey kuyu 50 adet yatay kuyu bulunmaktadır. Bir adet içten yanmalı motor bulunan sahanın enerji üretim kapasitesi 1,2 MW'dır. 2019 yılı için %50 metan içeriği bulunan ortalama gaz üretimi proje yetkilileri tarafından 600 kWh olarak bildirilmiştir. Örnek sahaya ait genel bilgiler Tablo 6.1'de verilmiştir.

Tablo 6.1 Sahaya ait gerçek bilgiler

Genel Bilgiler	
Açılış Yılı	1982
Kapanış Yılı	2018
Toplam Kurulu Alan	133.097 m ²
Gaz Toplama Sistemi Kurulu Alanı	30.000 m ²
Depo Gazı Enerji Projesi	
Proje Tipi	Elektrik Üretimi
Başlangıç	Temmuz 2017
İzleme	2
Gaz Çıkarma Kuyuları	160 Dikey Kuyu 50 Yatay Kuyu
Enerji Üretim Kapasitesi (1 içten yanmalı motor)	1,2 MW
2019 yılı Ortalama Gaz Üretimi	%50 CH ₄ için 600 kW/sa

Örnek sahada rehabilitasyon işlemi henüz tamamlanmadığından yapılmayan işler ile ilgili tahmini maliyet hesabı yapılmıştır. Rehabilitasyon ve enerji üretim sistemi ilk kurulum maliyetleri Tablo 6.2'de verilmiştir.

Yapılan maliyet hesabına göre rehabilitasyon ve enerji üretim sistem ilk kurulum maliyeti 18,9 milyon TL = 4,8 milyon \$ = 4,1 milyon € olarak hesaplanmıştır. Rehabilitasyon işi ve enerji üretim ilk kurulum maliyeti birbirinden ayrı tutulursa, rehabilitasyon maliyetinin 6,5 milyon TL = 1,4 milyon \$ = 1,1 milyon € olacağı ve enerji üretim sistem kurulum maliyetinin 12,4 milyon TL = 3,4 milyon \$ = 3 milyon € olacağı görülmektedir.

Tablo 6.2 Rehabilitasyon ve enerji üretim sistemi ilk kurulum maliyetleri

Gider		%	Kalemler	Maliyet	
				%	\$
İş Makinesi ve Personel/İşçilik* ¹		15,97	İş Makinesi	13,21	644.944
			Personel	2,76	134.868
Şevlendirme, Sıkıştırma ve Toprakla Kapama* ¹		0,00	Toprak için maliyet harcanmamıştır. İşçilik yukarıda hesaplanmıştır.		
Gaz Toplama Sistemi* ¹	Pasif Gaz Toplama Sis. * ¹	3,02	Boru	1,11	54.280
			Fore kazık iş makinesi	1,91	93.158
			Mıdır	0,04	2.143
	Aktif Gaz Top. Sis. * ¹	4,01	Boru	3,88	189.331
			Mıdır + Jeotekstil	0,13	6.513
Enerji Üretim Sistemi Kurulumu* ¹		65,83	Şalt Sahası (Malzeme+İşçilik)	31,80	1.552.962
			Ana Ekipmanlar	12,81	625.749
			Diğer Ekipmanlar	21,19	1.034.793
			Enerji Nakli (Kablo)	0,03	1.294
Sızıntı Suyu Tahliyesi Giderleri* ²		0,81	Sızıntı Suyu Toplama (Boru)	0,24	11.525
			Blower	0,11	5.395
			Sızıntı Suyu Havuzu (Demir+Beton)	0,27	13.239
			Yağmur Suyu Kanalı (Beton)	0,03	1.377
			İşçilik	0,16	7.944
Üst Örtü Toprağı* ²		8,54	Kil	2,10	105.565
			Drenaj Tabakası	4,16	203.403
			İşçilik	2,28	111.256
Peyzaj ve Çevre Düzenleme* ²		1,78	Çimlendirme (Taşıma ve İşçilik Dahil)	1,78	87084
Toplam		100,00		100,00	4.883.822

*¹ 2017 yılı kuruna göre hesaplanmıştır.

(2017 yılı ortalama dolar kuru 3,648 TL, euro kuru 4.116 TL)

*² 2019 yılı kuruna göre hesaplanmıştır.

(2019 yılı ortalama dolar kuru 5,665 TL, euro kuru 6.345 TL)

*³ İleriye dönük kur hesabı bilinmediğinden 2019 yılı kuruna göre hesaplanmıştır.

Enerji üretim değerleri elektrik şebekesine (Gediz Elektrik) satış faturaları baz alınarak Tablo 6.3'te verilmiştir. İç ihtiyaç (%15) hesaba katılmamıştır.

Tablo 6.3 Örnek saha için üretim değerleri

Aylar	2017		2018		2019	
	Üretim (MWe)	Gelir (bin TL)	Üretim (MWe)	Gelir (bin TL)	Üretim (MWe)	Gelir (bin TL)
Ocak	-	-	1,115	402	0,726	373
Şubat	-	-	0,969	351	*1	
Mart	-	-	1,111	413	0,64	334
Nisan	-	-	0,993	385	0,59	324
Mayıs	-	-	1,096	462	*1	
Haziran	0,363	122	0,926	416	0,513	*2
Temmuz	1,022	348	0,919	419	0,451	245
Ağustos	1,072	361	1,039	577		
Eylül	1,089	361	0,810	490		
Ekim	0,900	315	0,778	435		
Kasım	1,067	396	0,518	266		
Aralık	1.092	402	0,494	252		
Aylık Ort.	0,943	-	0,897	-	0,584	-
Toplam		2.300		4.800		1.200
Toplam Gelir	2,3 milyon TL		4,8 milyon TL		1,2 milyon TL	
	630.000 \$		997.000 \$		212.000 \$	
	558.000 €		847.000 €		189.000 €	

*1 Arıza dolayısıyla enerji üretilememiştir.

*2 Teknik sorunlar sebebiyle faturaya yansımamıştır.

*3 Her yıla gelirler o yıla ait ortalama kurlarına göre hesaplanmıştır.

2017: 3,648 TL/\$, 4.116 TL/€ (TCMB, 2017)

2018: 4,813 TL/\$, 5.663 TL/€ (TCMB, 2018)

2019: 5,665 TL/\$, 6.345 TL/€ (TCMB, 2019)

Modelde k: 0,04, L₀: 100, metan içeriği ise %50 olarak kabul edilmiştir. Depo gazı miktar tahmini için model parametreleri Tablo 6.4'te verilmiştir.

Tablo 6.4 Depo gazı miktar tahmini için model parametreleri

Genel Bilgiler		
Açılış yılı	2000	
Kapanış yılı	2018	
Belirlenen Model Parametreleri	Değer	Birim
Metan üretim oranı, k	0,04	yıl ⁻¹
Potansiyel metan üretim kapasitesi, L _o	100	m ³ /Mg
Metan içeriği, CH ₄	50	% (Hacim)

2018 ile 2040 yılları arasında ne kadar depo gazı üretileceği Tablo 6.5'te ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

Tablo 6.5 2018-2040 yılları arasında üretilecek tahmini oranlar

Yıl	Toplam Depo Gazı (m ³ /yıl)	Metan Miktarı (m ³ /yıl)
2018	12.980.000	6.490.000
2019	13.180.000	6.588.000
2020	12.660.000	6.329.000
2021	12.160.000	6.081.000
2022	11.690.000	5.843.000
2023	11.230.000	5.614.000
2024	10.790.000	5.394.000
2025	10.360.000	5.182.000
2026	9.958.000	4.979.000
2027	9.567.000	4.784.000
2028	9.192.000	4.596.000
2029	8.832.000	4.416.000
2030	8.485.000	4.243.000
2031	8.153.000	4.076.000
2032	7.833.000	3.917.000
2033	7.526.000	3.763.000
2034	7.231.000	3.615.000
2035	6.947.000	3.474.000
2036	6.675.000	3.337.000
2037	6.413.000	3.207.000
2038	6.162.000	3.081.000
2039	5.920.000	2.960.000
2040	5.688.000	2.844.000

Enerji piyasası düzenleme kurumu 2017 ve 2019 yılı Nihai YEK listesine göre biyokütle işletmeleri için satış bedelini 13,3 dolar cent/kWh olarak belirtilmiştir (EPDK, 2019). Buna göre;

2018 yılı için net elektrik enerjisi potansiyeli bedeli yaklaşık 109,5 dolar/saat, yıllık ortalama 959 bin dolar yaklaşık 4,6 milyon TL olarak hesaplanmıştır (2018 yılı ortalama dolar kuru 4,813 TL (TCMB, 2018)).

2019 yılı için net elektrik enerjisi potansiyeli bedeli 111,14 dolar/saat, yıllık ortalama 973 bin dolar yaklaşık 5,51 milyon TL olarak hesaplanmıştır (2019 yılı ortalama dolar kuru 5,665 TL (TCMB, 2019)).

2040 yılı için net elektrik enerjisi potansiyeli bedeli 2019 yılı EPDK ve dolar kuru verileri baz alınarak hesaplandığında 47,9 dolar/saat TL, yıllık ortalama 420 bin dolar yaklaşık 2,37 milyon TL olarak hesaplanmıştır.

Enerji potansiyeli kestirimine göre 2018, 2019 ve 2040 yılları için hesaplanan net ve brüt enerji değerleri Tablo 6.6’da belirtilmiştir.

Tablo 6.6 Hesaplanan enerji değerleri

Yıl	Enerji Üretim Değeri (MW)	Yıllık Elde Edilecek Gelir (TL)
2018	0,823	4,6 milyon
2019	0,835	5,5 milyon
...	...	...
2040	0,361	2,3 milyon

Enerji potansiyeli kestirimine göre hesaplanan verilerin gerçek veriler ile karşılaştırılması Tablo 6.7’de verilmiştir.

Tablo 6.7 Tahmini ve gerçek verilerin karşılaştırılması

Yıl	Enerji Potansiyel Kestirimi		Gerçek Veriler	
	Enerji Üretim Değeri (MW)	Yıllık Elde Edilecek Gelir	Enerji Üretim Değeri (MW)	Yıllık Elde Edilecek Gelir
2018	0,823	4,6 milyon TL 959 bin \$	0,897	4,8 milyon TL 1 milyon \$

Enerji potansiyeli kestirimine göre enerji üretim değeri 2018 yılında 0,823 MW 2019 yılında ise 0,835 MW’dır. Bu enerji üretim değerine göre 2018 ve 2019 yılında ortalama gelirin sırasıyla 4,6 milyon TL ve 5,5 milyon TL olması gerektiği

hesaplanmıştır. Bunun yanı sıra gerçek verilere bakıldığında sahada bulunan bir adet içten yanmalı motor kapasitesinin 1,2 MW olduğu, anlık ortalama 0,897 MW enerji üretildiği, 2018 yılı için elde edilen gelirin ise 4,8 milyon TL olduğu, 2019 yılı verilerine bakıldığında ise 7 aylık süreçte 1,2 milyon TL gelir elde edildiği anlaşılmaktadır. Bu durumda örnek sahanın 2018 yılı için kapasitesi üzerinde çalıştığı, 2019 yılında teknik aksaklıklardan dolayı elde edilecek gelirin düştüğü söylenebilir.

Rehabilitasyon maliyetleri ve enerji üretiminden elde edilen gelir karşılaştırıldığında rehabilitasyon maliyetlerinin 4,8 milyon \$ olduğu, enerji üretiminden elde edilen gelirin ise 2017 Ağustos ve 2019 Temmuz ayları arasında 1,84 milyon \$ olduğu görülmektedir.

Proje sahibinin düzensiz çöp döküm alanını 15 yıl işletebileceğine dair Büyükşehir Belediyesi ile sözleşmesi bulunmaktadır. Depo gazı miktar kestirimine göre hesaplanan değerlere bakıldığında işletme süresi boyunca (2016 ağustos-2031 ağustos) 11,69 milyon \$ elde edeceği anlaşılmaktadır (Tablo 6.8). 11,69 milyon \$'ın %15'inin iç ihtiyaç için kullanılacağı göz önünde bulundurulduğunda 9,93 milyon \$ gelir elde edecektir.

Burada rehabilitasyon maliyetleri yanında bakım maliyetleri de (yeraltı suyu analizleri, motor bakımı, motor yağ değişimi ve personel giderleri) hesaba katılmalıdır. Bakım maliyetleri rehabilitasyon sürecinde hesaba katılmadığından 2018-2031 yılları arasında oluşan maliyet hesaplanacaktır. Buna göre Yeraltı suyu izleme maliyeti 0,03 milyon \$ personel maliyetinin 0,61 milyon \$, motor bakım maliyetinin 0,88 milyon \$, motor yağ değişimi maliyetinin 0,43 milyon \$ ve toplam maliyetin 6,75 milyon \$ olduğu hesaplanmıştır. Elektrik enerjisi üretim kestirimine göre ise 2018-2031 yılları arasında net 9,93 milyon \$ gelir elde edileceği hesaplanmıştır. 15 yıllık işletme süresi boyunca 3,18 milyon \$ kar edeceği tespit edilmiştir. Toplam gelir ve gider karşılaştırması Tablo 6.9'da verilmiştir.

Hindistan, Pune'da bulunan bir çöp sahasının rehabilitasyonu için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Söz konusu rehabilitasyon için yaklaşık 18.500 m²'lik bir alanına sahip çöp sahasının kapatılma maliyeti yaklaşık olarak 0,2 milyon \$ olarak hesaplanmıştır (Joseph vd. 2005). 30.000 m²'lik bir alanda düzensiz olarak depolanan örnek çalışma sahasının rehabilitasyon maliyetlerinin ise 1,4 milyon \$ olduğu hesaplanmıştır.

Tablo 6.8 Enerji potansiyeli kestirimi ile elde edilecek değerler

Yıl	Enerji Üretimi (MWh)	Yıllık Gelir (milyon \$)
2017 (Temmuz-Aralık)	0.789	0,91
2018	0.823	0,95
2019	0.835	0,97
2020	0.803	0,93
2121	0.771	0,89
2022	0.741	0,86
2023	0.712	0,82
2024	0.684	0,79
2025	0.657	0,76
2026	0.631	0,73
2027	0.607	0,70
2028	0.583	0,67
2029	0.560	0,65
2030	0.538	0,62
2031 (Ocak-Temmuz)	0.517	0,35
2031 (Ağustos-Aralık)		0,25
2032	0.498	0,58
2033	0.477	0,55
2034	0.459	0,53
2035	0.441	0,51
2036	0.423	0,49
2037	0.407	0,47
2038	0.391	0,45
2039	0.375	0,43
2040	0.361	0,42
	Toplam	16,4

Tablo 6.9 Toplam maliyet ve elde edilecek gelir karşılaştırması

	Kalemler	Maliyet (milyon \$)	Toplam Maliyet (milyon \$)
Gelir	Elektrik enerjisi üretim kestirimi değerleri (iç ihtiyaç hesaba katılarak hesaplanan)		9,93
Gider	Rehabilitasyon	4,8	6,75
	Yeraltı suyu izleme	0,03	
	Personel	0,61	
	Motor Bakım	0,88	
	Motor Yağ Değişim	0,43	
Kar			3,18

Ertürk ve Görgün tarafından Mersin Çavuşlu çöp döküm sahasının rehabilitasyonu kapsamında yapılan çalışmada alanın rehabilitasyon maliyeti toplamda 6,31 milyon TL olarak hesaplanmıştır. Metrekare başına düşen birim maliyet ise 39 TL olarak hesaplanmıştır. Örtü toprağı, toplam maliyetin %78,79'unu kapsayacak şekilde en yüksek maliyet olduğu görülmektedir. Örnek çalışma sahası rehabilitasyon maliyetinin ise 6,5 milyon TL olduğu ve üst örtü toprağının toplam maliyetin %28,32'si olduğu hesaplanmıştır. Elektrik üretim sistemleri kurulum maliyetleri hesaba katılmamıştır. Örnek çalışma sahasında Büyükşehir Belediyesi fen işlerinden toprak desteğı alınması ve sahada bulunan mevcut toprağın iş makinalarıyla çekilmesi ile toprağı yalnızca iş makinası kira bedeli ödenmesi sebepleriyle maliyet düşük çıkmaktadır.

Coşkuner (2015) tarafından Gaziantep, Şahinbey Düzenli depolama tesisinde yapılan çalışmada yatırım toplam bedeli 12 milyon \$ olarak belirlenmiştir. Yatırımın yaklaşık %50'si enerji üretim ekipmanları için kullanılmıştır. Bu bedelin yarısı gaz motoru kalan kısmı ise cihazlar ve yardımcı ekipmanlar için kullanılmıştır. Örnek çalışma sahasında enerji üretim sistemleri kurulumu ana ekipman ve diğer (yardımcı) ekipman maliyetlerine bakıldığında toplam maliyetin 1,66 milyon \$, gaz motoru ve alternatör maliyetinin ise 533 bin \$ olduğu hesaplanmıştır. Örnek çalışma sahasında gaz motor ve alternatör maliyeti, toplam enerji üretim ekipman (ana ekipman+yardımcı ekipman) maliyetin yaklaşık %32'sini oluşturmaktadır.

Isparta düzenli depolama tesisinde 2005 yılından itibaren kentsel katı atıkları depoladığı ve 400 ton/gün atıktan 1,66-2,83 MWe/sa elektrik enerjisi üretildiğı belirtilmiştir (Mohamed, 2017). Örnek çalışma sahasında 2000 ile 2018 yılları arasında ortalama 215 ton/gün atık depolanmış ve 2018 yılı sonu itibari ile atık kabulü yapılmamıştır. 2017 – 2018 yılı 0,9 MWe/sa elektrik enerjisi üretildiğı hesaplanmıştır.

Endonezya'nın Jakarta kentinde bulunan Bekasi kasabesindeki depolama alanı için yıllık maliyet 2,4 milyon USD, gelir ise yıllık olarak 2 milyon USD olarak hesaplanmıştır. Depolama alanının elektrik üretimi için maliyetin gelirden daha fazla olması sebebi ile bir fayda sağlamadığı görülmüştür (Aprilia, Tezuka, Spaargaren, 2012). Örnek çalışma sahasında ise yıllık maliyeti ortalama 150 bin \$, geliri ise yıllık ortalama 764 bin \$'dır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Katı atıkların toplanması ve bertaraf edilmesi oldukça yüksek ilk yatırım ve işletme maliyetine sahip çevre projelerindendir. Özellikle Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde, sınırlı finansal kaynak ve yetişmiş insan gücüne sahip yerel yönetimlerin sorumluluğunda olan katı atık yönetimi pek çok yerel yönetim için en büyük gider kalemidir. Bu durum, yerel yönetimlerin katı atıkları çevresel olarak uygun şekilde bertaraf etmemesinin arkasındaki temel nedenlerden biridir. TÜİK 2018 rakamlarında göre ülkemizde toplanan katı atıkların halen %20'sinden fazlası çevresel olarak uygun olmayan şekilde düzensiz çöp döküm sahalarına (belediye çöplüklerine) boşaltılmaktadır.

Ülkemizde sürdürülebilir katı atık yönetimine geçişte ayrı toplama, mekanik biyolojik önışlemler ve düzenli depolama sahaları gibi mühendislik esaslara göre planlanan, tasarlanan ve işletilen tesisler kurulması yanında gerçekleştirilmesi gereken öncelikli çalışmalar, çevre ve insan sağlığını tehdit etmesini önlemek için düzensiz çöp döküm sahalarının çöp dökümüne kapatılması ve rehabilite (ıslah) edilmesidir.

Düzensiz çöp döküm sahalarının rehabilitasyonu, saha stabilitesinin sağlanması, yağış sularının drenajı, oluşan sızıntı su ve depo gazının kontrolü ve üst örtü teşkili gibi ciddi çalışmaları içerir. Bu nedenle rehabilitasyon çalışmaları hem önemli bir teknik uzmanlık hem de yine ciddi maliyet gerektirir. Ancak düzenli depolama sahalarında olduğu gibi, düzensiz çöp döküm sahalarında da rehabilitasyon sonrası kurulacak gaz toplama sistemi yoluyla toplanacak depo gazından enerji geri kazanımı gerçekleştirmek mümkün olabilmektedir. Rehabilitasyon çalışmaları için ayrı bir bütçe ayırmak zorunda olan yerel yönetimler kurulacak depo gazından enerji üretimi tesisi ile rehabilitasyon ve enerji üretim tesisi giderlerini karşılayabilir ve hatta enerji üretiminden ekonomik gelir elde edebilirler. Günümüzde yerel yönetimler, yeni bir finansal model ile, depo gazından enerji üretimi işlerini özel işletmelere devrederek hem ekonomik gelir elde etmeyi garanti altına almakta hem de işletme için ek insan gücü oluşturmak zorunda kalmamaktadır.

İster yerel yönetimlerce işletilsin ister özel işletmelere devredilsin, düzensiz çöp döküm sahalarının rehabilitasyonu ve depo gazından enerji üretimi konusunda işletme öncesi teknik uygulanabilirlik yanında ekonomik uygulanabilirliğin de değerlendirilmesi önemli bir gerekliliktir. Bu değerlendirmeler ile düzensiz çöp

döküm sahasında oluşan depo gazından üretilen enerji ile rehabilitasyon ve enerji üretim tesisi – ilk yatırım ve işletme – giderlerinin ne ölçüde karşılanabileceği ve/veya bu tesisten elde edilebilecek kar oranı tespit edilebilir.

Düzensiz çöp döküm alanlarında depo gazı bertarafının yapılması, sızıntı suyunun tahliye edilmesi, üst örtü tabakası serimi ve alanın doğaya kazandırılması rehabilitasyon sürecinde yapılması zorunlu işlerdir. Enerji üretimi ise ekonomik fayda sağlamak için yapılır. Bu durumda enerji üretim sistemlerinin kurulum ve bakım masrafları, belli bir süre sonra alana atık kabulü yapılmaması ve dolayısıyla gaz üretiminin azalması, belediye işbirliği yapılacak projelerde belediye katkı payı vb. masraflar hesaba katılmalıdır. Gaz üretimi bitmese bile elde edilecek gelirin, giderlerden daha az olması kaçınılmazdır.

Rehabilitasyon işleminin tek başına hiçbir getirisinin olmadığı yalnızca enerji üretimi ile ekonomik fayda sağlanabileceği görülmektedir. Literatürde belirtilen ve örnek sahadan elde edilen bilgilere bakıldığında enerji üretimi için sahanın tamamından yararlanılmadığı anlaşılmaktadır. Bu duruma göre sahanın tamamından yararlanılabilirse, enerji üretiminin dolayısıyla da elde edilen gelirin artacağı anlaşılmaktadır.

Ekonomik fayda sağlanabilmesi için işletme ömrü iyi hesaplamalı, enerji üretiminden elde edilecek gelirin sürdürülebilirliği dikkate alınmalıdır. Ayrıca atığın depolandığı yüzey alanı, alanın açıldığı tarihten itibaren depolamış olduğu atık kompozisyonu ve elde edilebilecek depo gazının kalitesi hakkında fizibilite ve laboratuvar çalışmaları yapılarak bu doğrultuda proje planlaması ve ekipman seçimi yapılmalıdır.

Depo gazının ekonomik açıdan getiri sağlayacak şekilde kullanılması ülke ekonomisine de katkı sağlayacaktır; ancak Çevre Kanunu ve yönetmeliklerine göre çevre izni olmayan, depolamaya uygun olmayan alanlarda atık bertaraf edilmesi yasaktır. Bu durumda düzensiz çöp döküm alanlarının ticari amaç gütmeksizin kapatılarak doğaya kazandırılması gerekmektedir. Kapatılacak olan alanlarda depolama alanı ömrü ve ne kadar daha atık depolanacağı dikkate alınarak enerji üretiminin sürdürülebilirliği tespit edilmelidir.

Örnek çalışma sahasında rehabilitasyon maliyetinin 1,4 milyon \$, enerji üretim sistemi kurulumu maliyetinin 3,4 milyon \$, rehabilitasyon sonrası bakım (yeraltı suyu izleme) maliyetlerinin 0,03 milyon \$ ve enerji üretim sistemi bakım

(motor bakım, yağ değişim ve personel giderleri) maliyetinin 1,92 milyon \$ olacağı ve elektrik enerjisi üretim kestirimine göre 2018-2031 yılları arasında net 9,93 milyon \$ gelir elde edileceği hesaplanmıştır. 15 yıllık işletme süresi boyunca 3,18 milyon \$ kar edeceği tespit edilmiştir.

Çalışma ve literatüre bakıldığında rehabilitasyonu yapılacak alanlarda enerji üretimi sisteminin teknik ve ekonomik açıdan uygulanabilir olduğu tespit edilmiştir. Fakat ilk yatırım maliyeti ile işletme süresi boyunca elde edilecek kar karşılaştırıldığında yatırım maliyetinden az kar edileceği yani kar marjının düşük düşük olacağı anlaşılmaktadır. Dolayısıyla bu alanların ihale ile yükleniciye devredilmesi yerine sorumlu belediyeler tarafından rehabilite edilerek enerji üretilmesi daha doğru olacaktır.

Böyle bir çalışmanın veri temini, veri gizliliğinin korunması gibi zorlukları bulunmaktadır. Kayıt altına alınmayan, takibi yapılmayan veriler olduğunda ekonomik uygulanabilirliğinin tespit edilmesi zorlaşmaktadır. Bu nedenle çalışmada birtakım işler tahminler doğrultusunda gerçekleştirilmiştir.

İleride yapılacak saha çalışmalarında, düzensiz depolama alanlarında gerçek ölçümlerin yapılması ve fayda-maliyet analiziyle geleceğe yönelik daha kesin tahminlerin yapılması önerilmektedir. Ayrıca örnek çalışma sahalarından ulaşılacak veri temini konusunda yaşanabilecek sorunlar karşısında da akademisyenlerin ve uzman kişilerin, sektörde faaliyet gösteren firmalara yönelik düzenleyebilecekleri seminer, konferans vb. eğitimler aracılığıyla doğru bilginin paylaşımı ve bunun sonucunda elde edilebilecek yerel ve ulusal faydalar konusunda bilinçlendirme yapılması ve farkındalık oluşturulması önerilebilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abdulvahitoğlu, A. ve Yılmaz, İH.**, 2017, Projected potential of landfill gas in Çukurova region, International Advanced Researches & Engineering Congress, 16-18 Kasım, Osmaniye.
- AFS**, 2012, Landfill gas collection systems, Automatic Flare Systems, http://www.afs-group.co.uk/what_gas.php (Erişim tarihi: 15 Ağustos 2018).
- Akdoğan, A. ve Güleç, S.**, 2007, Sürdürülebilir katı atık yönetimiyle ilgili tutum ve belediyelerde yöneticilerin katı atık yönetimiyle ilgili tutum ve düşüncelerinin analizine yönelik bir araştırma, H.Ü. İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 25(1): 39-69 s.
- Akıncı, G., Onargan, T., Danışman, M. A., Küçük, K., Güven, D., Gök, G. ve Bilgin, M.**, 2010, Uşak Belediyesi Katı Atık Yönetimi Fizibilite Raporuna Esas Sondajlı Atık Sahası Karakterizasyonu Belirlenmesi ve Gaz Varlığının Araştırılmasına Yönelik Ar-Ge Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Akpınar, N.**, 2006, Kentsel Katı Atıklardan Enerji Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Ali, S. M., Hamid, N. and Yasmin, A.**, 2013, Open dumping of municipal solid waste and its hazardous impacts on soil and vegetation diversity at waste dumping sites at Islamabad city, Journal of King Saud University – Science, 1-8 pp.
- Amini, H. R., Reinhart, D.R. and Niskanen, A.**, 2013, Comparison of first-order-Decay modeled and Actual Field Measured municipal solid waste landfill Methane data. Waste Manage.
- Amini, H.**, 2011, Landfill Gas To Energy: Incentives & Benefits, Orlando, University of Central Florida, Department of Civil, Environmental, and Construction Engineering, USA.

Aprilia, A., Tezuka, T. and Spaargaren, G., 2012, Household Solid Waste Management in Jakarta, Indonesia: A Socio-Economic Evaluation, In: Rebellon, LFM (ed.) Waste Management (71-100pp). InTech.

ASCE, 2017, Infrastructure Report Card.
<https://www.infrastructurereportcard.org/wpcontent/uploads/2017/01/Solid-Waste-Final.pdf> (Erişim tarihi: 10 Eylül 2019)

Askari, M. J., Safavi, K. and Mortazaeinezhad, F., 2011, Landfill biogas production process, 2011 International Conference on Food Engineering and Biotechnology IPCBEE, 9: 208-212pp.

ATSDR, 2001, Landfill Gas Primer: An Overview for Environmental Health Professionals. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, USA.

Ayalon, O., Becker, N. and Shani, E., 2006, Economic aspects of the rehabilitation of the Hiriya landfill, Waste Management, 26: 1313-1323pp.

Beck, Y. J. P., 2008, Landfill Off-Gas Collection and Treatment Systems, U.S. Army Corps of Engineers.

Bilgili, M.S., 2002, Katı Atık Düzenli Depo Sahalarında Depo Gazı Oluşumunu Etkileyen Faktörlerin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (yayımlanmamış).

Bhalla, G., Swamee, P.K., Kumar, A., and Bansal, A., 2012, Assessment of groundwater quality near municipal solid waste landfill by an aggregate index method. International Journal of Environmental Science, 2(2): 1492-1503pp.

Bhailall, S., Bogner, J., Lee, C., Piketh, S., Curtis, C. and Gcwensa, Q., 2016, Site specific landfill gas emissions: model comparisons to actual LFG yields and measured methane and carbon dioxide fluxes at six landfill sites in South Africa, Proceedings of the 23rd WasteCon Conference.

- Bogner, J. and Matthews, E.,** 2003, Global methane emissions from landfills: New methodology and annual estimates 1980–1996, *Global Biogeochemical Cycles*, 17(2): 1-18 pp.
- Budisulistiorini, S. H.,** 2007, Electricity generation from landfill gas, *Jurnal Presipitasi*, 3(2): 9-15 pp.
- Caicedo-Concha, D.M., Sandoval-Cobo, J.J., - Ramón Fernando, C-Q., Marmolejo-Rebellón, L.F., Torres-Lozada, P. and Sonia, H.,** 2019, The potential of methane production using aged landfill waste in developing countries: A case of study in Colombia. *Cogent Engineering*, 6: 1664862.
- Cave, S.,** 2017, Recycling in Germany. Research and Information Service Briefing Paper: 1-18 pp.
- Chakrabarti, M. and Dubey, A.,** 2015, Remediation techniques, for open dump sites, used for the disposal of municipal solid waste in India, *Journal of Basic and Applied Engineering Research*, 2(17): 1510-1514 pp.
- Cheremisinoff, N.P.,** 2003, *Handbook of Solid Waste Management and Waste Minimization Technologies*, 477s.
- Chin, J.,** 2011, *Waste in Asia. Responsible Research.*
- City of Burnaby,** 2009, *Methane Gas*, Burnaby Building Department, Canada.
- Conserve Energy Future, B.T.,** Environmental Pollution, Conserve Energy Future, <https://www.conserve-energy-future.com/causes-and-effects-of-environmental-pollution.php> (Erişim tarihi: 10 Ağustos 2018).
- Coops, O., Luning, L. Oonk, H. and Weenk, A.,** 1995, Validation of landfill gas formation models. *Proceedings Sardinia 95, 5th international landfill symposium*, vol III. CISAİ Environmental Sanitary Engineering Centre, Italy.

- Coşkuner, M. C.** 2015, Evsel Atıktan Enerji Üretimi – Gaziantep Örneği, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (yayımlanmamış).
- CRA,** 2009. Landfill Gas Generation Assessment Procedure Guidelines, Conestoga-Rovers & Associates.
- Çelebi, M.** 2017, Belediye Atıklarından Çöp Gazı (LFG-Landfill Gas) Elde Edilerek Elektrik Enerjisi Üretilmesi ve Ülkemizdeki Örneklerinin İncelenmesi, Uzmanlık Tezi, İller Bankası Anonim Şirketi.
- Çekim, M., Yıldız, S. ve Dere, T.,** 2015, Güneydoğu Anadolu Bölgesi Katı Atık Sorunları ve Çevresel Etkileri: Adıyaman İli Örneği, 2. *International Sustainable Buildings Symposium*: 761-766.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı,** 2010, Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik, <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2010/03/20100326-13.htm> (Erişim tarihi: 29 Kasım 2019)
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı,** 2016, Ulusal Atık Yönetimi ve Eylem Planı 2023.
- Cosulich, J., Ahmed, S. L. and Stahl, J. F.,** 1992. Palos Verdes Landfill Gas To Energy Facility, <http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/nawtec/1992-National-Waste-Processing-Conference/1992-National-Waste-Processing-Conference-32.pdf> (Erişim tarihi 15 Eylül 2019)
- De, S. and Debnath, B.,** 2016, Opportunities & challenges in capturing landfill gas from an active and un-scientificallly managed land fill site- A case study, *Procedia Environmental Sciences*, 35: 348-367pp.
- Demie, G. and Degefa, H.,** 2015, Heavy metal pollution of soil around solid waste dumping sites and its impact on adjacent community: the case of Shashemane Open Landfill, Ethiopia, *Journal of Environment and Earth Science*, 5(15): 169-178pp.

- Duyuşen-Güven, E.**, 2019, Ege Bölgesi'nde kentsel katı atık üretimi ve atığın metan gazı enerji potansiyelinin belirlenmesi. DEU FMD, 21(61): 311-322.
- EA**, 2009, Control of landfill gas containing low concentrations of methane, Environment Agency, UK.
- European Commision**, 2004, Landfill Gas Control -Guidance on the landfill gas control requirements of the Landfill Directive, Environment Agency, UK.
- EPA**, 1997, Landfill Manuals Landfill Operational Practices, Environmental Protection Agency, Ireland.
- EPA**, 2005, Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide, United States Environmental Protection Agency.
- EPA**, 2012, International Best Practices Guide for Landfill Gas Energy Projects. U.S. Environmental Protection Agency.
- EPA**, 2018, Benefits of Landfill Gas Energy Projects, <https://www.epa.gov/lmop/benefits-landfill-gas-energy-projects#four> (Erişim tarihi: 14 Eylül 2018)
- EPA Victoria**, 2015, Siting, design, operation and rehabilitation of landfills, Environment Protection Authority Victoria.
- EPDK**, 2019, Elektrik Faturalarına Esas Tarife Tabloları, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, <https://www.epdk.org.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tablolari>
- Ertürk, M. C. ve Görgün, E.**, 2011, Türkiye'deki düzensiz çöp döküm sahalarının ıslahında güncel bir örnek: Mersin Çavuşlu çöp depolama sahasının rehabilitasyonu, Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, Sigma 3: 200-208.
- ESEMAG**, 2015, Lessons learned from successful applications of biological landfill leachate treatment, <https://esemag.com/biosolids/lessons-learned->

[successful-applications-biological-landfill-leachate-treatment/](#) (Erişim tarihi: 15 Ağustos 2018).

EUROSTAT, Generation of waste by waste category, <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/graph.do?tab=graph&plugin=1&language=en&pcode=ten00108&toolbox=type>, (Erişim tarihi: 12 Nisan 2018).

EUROSTAT, 2018, Municipal waste statistics [https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php?title=File:Municipal_waste_generated_2005_and_2017_\(kg_per_capita\).png](https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php?title=File:Municipal_waste_generated_2005_and_2017_(kg_per_capita).png) (Erişim tarihi: 10 Ağustos 2019)

Fellner, J. and Brunner P.H., 2010, Modeling of leachate generation from MSW landfills by a 2-dimensional 2-domain approach, Waste Management, 30: 2084-2095pp.

Fischer, C., Maurice, C. ve Lagerkvist, A., 1999, Gas Emission from Landfills An overview of issues and research needs Survey, Swedish Environmental Protection Agency.

Global Methane Initiative, 2012, Landfill gas modelling, International Best Practices Guide for LFGE Projects, (63-76pp).

Gökçe, G., Aydemir, P., Hasanoğlu, P. ve Özbay, M., 2015, Katı atık düzenli depolama sahalarının ve vahşi depolama alanlarının ıslahı ve bitkilendirilmesi, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 3: 258-271.

Harvey, P., Baghri S. and Reed, B., 2005, Solid waste management, İçinde: Emergency Sanitation: Assessment and Programme Design (105-120pp). WEDC Publications, Leicestershire, UK.

Hughes, K. L., Christy, A.D. and Heimlich, J. E., 2013, Landfill Types and Liner Systems, Extention Factsheet, 1-4.

Huitric, R. L. ve Kong, D., 2006. Measuring Landfill Gas Collection Efficiency Using Surface Methane Concentrations,

ISAT, 2011, Biogas Digest Volume I Biogas Basics, Information and Advisory Service on Appropriate Technology.

ISWA, 2017, Annual Review Working Together Towards A Cleaner, Healthier Planet. International Solid Waste Association. Austria.

Jardine, C.N., Boardman, B., Osman, A., Vowles, J. and Palmer, J., 2004, Methane UK, Environmental Change Institute, University of Oxford.

Johari, A., Ahmed, S.I, Hasi, H., Alkali, H. and Ramli, M., 2012, Economic and environmental benefits of landfill gas from municipal solid waste in Malaysia, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16: 2907-2912pp.

Joseph, K., Esakku, S., Nagendran, R. and Visvanathan, C., 2005, A Decision Making Tool For Dumpsite Rehabilitation In Developing Countries, Tenth International Waste Management and Landfill Symposium. Italy.

Kamalan, H., Sabour, M. and Shariatmadari, N., 2011, A review on available landfill gas models, Journal of Environmental Science and Technology, 4(2): 79-92pp.

Karamete, T., 2008, Konya Katı Atık Depolama Sahası Sızıntı Sularının Toksisitesinin Değerlendirilmesi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (yayımlanmamış).

Karayılan, S., 2018, Modelling and Assessment of Landfill Gas Generation At Afyonkarahisar Landfill Site, Master's thesis, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.

Karthik, O. and Joseph, K., 2008, Dumpsite rehabilitation Manual. Centre for Environmental Studies. India.

- Kaushal, A. and Sharma., M.P.,** 2016, Methane Emission from Panki Open Dump Site of Kanpur, India. *Procedia Environmental Sciences*, 35: 337-347pp.
- Khalizah, S., Thani, S. K. S. O., Noorjannah, A. and Hashim, M.,** 2016, Grey to Green: Rehabilitation of Urban Dumpsite through Regenerative Landscape Approach. 7th Asian Conference on Environment-Behaviour Studies National Taiwan University, 1-11 pp.
- Kibe, G. S.,** 2014, Sustainable Urban Design Approach For Dumpsite Rehabilitation Case Of Decommissioning Dandora Dumpsite For Urban Park. Master's Degree. University of Nairobi Department of Architecture and Building Science.
- Kiriş, A. ve Saltabaş, F.,** 2011, Katı atık düzenli depolama sahalarında depo gazı (LFG) yönetimi ve İstanbul uygulamaları, *Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi Sigma*, 3: 209-218.
- Kumar, S., Smith, S. R., Fowler, G., Velis, C., Kumar, S. J., Arya, S., Rena, R. Kumar and Cheeseman, C.,** 2017, Challenges and opportunities associated with waste management in India, *R. Soc. Open Sci.*, 4: 1-11pp.
- Liu, S.,** 2013, Landfill Leachate Treatment Methods and Evaluation of Hedeskoga and Måsalycke Landfills. Master Thesis, Sweden, Lund University Department of Chemical Engineering.
- LMOP,** 2017, Landfill Gas Modeling, LFG Energy Project Development Handbook.
- Maheshi, D., Steven, V.P. and Karel, V.A.,** 2015, Environmental and economic assessment of 'open waste dump' mining in Sri Lanka. *Resources, Conservation and Recycling*, 102: 67-79.
- Mahful, R. and Managi, S.,** 2018, Estimating methane emission from solid waste landfill using various different methods. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 403: 012005.

MGM, 2019, İllere Ait Mevsim Normalleri, T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü.

Manitoba, 2016, Leachate Management At A Waste Management Facility, Manitoba Sustainable Management.

Marcovic, J. and Stevovic, S., 2016, The process of creation and analysis of the landfill gas from the landfill in the region of Pchinja, Journal on Processing and Energy in Agriculture, 20(2): 63-68pp.

MELBES, Yeraltı suyu parametreleri, <https://melbes.cevre.gov.tr/Facility/Application/Create>, (Erişim tarihi: 29 Kasım 2019)

Mohamed, A.A.M., 2017, Evsel Atıklardan Elde Edilen Enerji Üretimi ve Isparta Örneği, Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (yayımlanmamış).

Mor, S., Ravindra, K., Dahiya, R. P. and Chandra, A., 2006, Leachate characterization and assessment of groundwater pollution near municipal solid waste landfill site, Environmental Monitoring and Assessment, 118: 435–456 pp.

Nagendran, R., Selvam, A., Joseph, K. and Chiemchaisri, C., 2006, Phytoremediation and rehabilitation of municipal solid waste landfills and dumpsites: A brief review. Waste Management, 26: 1357-1369 pp.

Nelles, M., Grünes, J. and Morscheck, G., 2016, Waste management in Germany – Development to a sustainable circular economy? Procedia Environmental Sciences, 35: 6-14 pp.

Newton, J., 2018, The Effects of Landfills on the Environment, <https://sciencing.com/effects-landfills-environment-8662463.html> (Erişim tarihi: 09 Ağustos 2018)

OECD, 2004. Addressing the Economics of Waste. The Organisation for Economic Co-operation & Development

Özel, Ü., Turan, N. G. ve Ergun, O. N., 2006. Düzenli depolama alanlarında kullanılan örtü sistemleri, Katı Atık ve Çevre, 62: 20-29.

Öztürk, İ., Arıkan A.O., Altınbaş M., Alp K. ve Güven H., 2015, Katı Atık Dönüşüm ve Arıtma Teknolojileri (El Kitabı), Türkiye Belediyeler Birliği, Korza Yayıncılık Basım San. ve Tic. A.Ş., Ankara.

Öztürk, M., 2017, Vahşi Çöp Depolamaya Son, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.

Öztürk, M., 2018, Katı Atık Depolama Alanında Depo Gazı Oluşumu, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.

Parveen, R. S., Arjun, B. B. and Vyankatesh, B. Y., 2012, The impact of landfill on soil and groundwater quality of the Nanded City, Maharashtra, Researcher, 4(7): 56-63pp.

Pasko, O. A. and Mochalova, T. N., 2014, Toxicity assessment of contaminated soils of solid domestic waste landfill, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 21: 1-6pp.

Penman, J., Kruger, D., Galbally, I., Hiraishi, T., Nyenzy, B., Emmanul, S., Buendia, L., Hoppaus, R., Martinsen, T., Meijer, J., Miwa, K. and Tanabe, K., 2001, Waste (Chapter 5), IPCC Good Practise Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories.

Polat, D., 2011, Depogazı (LFG) Kojenerasyon Sistemlerinin Termoekonomik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Renou, S., Givaudan, J. G., Poulain, S., Dirassouyan, F. and Moulin, P.,** 2008, Landfill leachate treatment: Review and opportunity, *Journal of Hazardous Materials*, 150: 468–493pp.
- Rogerson, D.,** 2013, Waste Management Plan for England. Department for Environmental Food & Rural Affairs.
- Rong, L., Zhang, C., Jin, D. and Dai, Z.,** 2017, Assessment of the potential utilization of municipal solid waste from a closed irregular landfill, *Journal of Cleaner Production*, 142: 413-419pp.
- Rowe, R. K.,** 2011, Systems Engineering The Design and Operation of Municipal Solid Waste Landfills To Minimize Contamination of Ground Water. *Geosynthetics International*, 3-18 pp.
- Sarptaş, H.,** 2016a, Depo gazı enerji potansiyelinin depo gazı modelleri tahminlerine dayanarak belirlenmesi, 9 Eylül Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 18(3): 491-501.
- Sarptaş, H.** 2016b, Katı atık depo gazı enerji potansiyelinin matematiksel modelleme yaklaşımı ile tahmini, *TTMD Dergisi*, 102: 48-55.
- Sarptaş, H., Gündüz, O., Dölgen, D. ve Alpaslan, N.,** 2006, Düzensiz çöp depolama sahalarının rehabilitasyonu: Kuşadası örneği, *Katı Atık ve Çevre*, 62: 13-19.
- Sapuay, G. P.,** 2016, Resource recovery through RDF: Current trends in solid waste management in the Philippines, *Procedia Environmental Sciences*, 35: 464-473pp.
- Scharff, H. and Jacobs, J.,** 2006, Applying guidance for methane emission estimation for landfills, *Waste Management*, 26: 417-427pp.

- Shin, H. C., Park, J. W., Kim, H. S. and Shin, E. S.,** 2005, Environmental and economic assessment of landfill gas electricity generation in Korea using LEAP model, *Energy Policy*, 33: 1261-1270pp.
- Schultz, K.,** 2017, The Waste Management Plan For Stockholm 2017–2020. https://www.stockholmvattenochavfall.se/globalassets/pdf1/riktlinjer/avfall/avfallsplan/sva072-avfallsplan_en.pdf (Erişim tarihi: 20 Ağustos 2019).
- Sezgin, N., Özcan, H. K., Varınca, K. ve Borat, M.,** 2003, Katı atık depo gazından elektrik üretiminin Türkiye’de uygulanabilirliğine iki örnek: İstanbul ve Bursa Tesisleri, *YTÜD*, 3: 89-96.
- Shekdar, A.,** 2009, Sustainable solid waste management: An integrated approach for Asian countries, *Waste Management*, 29: 1438–1448pp.
- Simunek, J., Jarvis, N.J., van Genuchten, M.T. and Gärdenäs, A.,** 2003, Review and comparison of models for describing non-equilibrium and preferential flow and transport in The Vadose Zone. *Journal of Hydrology*, 27 (1–4): 14–35pp.
- Solak, O.,** 2015, Türkiye'deki Katı Atık Deponi Alanlarında Oluşan Gazın Çevresel ve Ekonomik Açıdan İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (yayımlanmamış).
- Sprague, S., Zietsman, J. and Ramani, T.,** 2009, Pre-Feasibility Analysis for the Conversion of Landfill Gas to Liquefied Natural Gas to Fuel Refuse Trucks in India. Texas Transportation Institute the Texas A&M University System College Station, Texas.
- Tanomoon, P.,** 2015, Preliminary Feasibility Study Sustainable Sanitary Landfill to Energy System (SSLTES): Naga City Landfill / Philippines.
- Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü,** 2019, Parsel Sorgulama Uygulaması, <https://parselsorgu.tkgm.gov.tr/> (Erişim tarihi: 18 Ekim 2019)

Taylor, A. and Allen, R., 2003, Waste Disposal and Landfill: Potential Hazards and Information Needs.

TBB, 2014, Düzenli Depolama Sahalarının Tasarımı, Yer Seçimi ve Vahşi Depolama Alanlarının Islahı, Türkiye Belediyler Birliği, Ankara.

TBB, 2015, Katı Atık Geri Dönüşüm ve Arıtma Teknolojileri (El Kitabı); Türkiye Belediyler Birliği, Ankara.

TCMB, 2017, Gösterge Niteliğindeki Merkez Bankası Kurları, https://www.tcmb.gov.tr/kurlar/kurlar_tr.html (Erişim tarihi: 29 Kasım 2019)

TCMB, 2018, Gösterge Niteliğindeki Merkez Bankası Kurları, https://www.tcmb.gov.tr/kurlar/kurlar_tr.html (Erişim tarihi: 29 Kasım 2019)

TCMB, 2019, Gösterge Niteliğindeki Merkez Bankası Kurları, https://www.tcmb.gov.tr/kurlar/kurlar_tr.html (Erişim tarihi: 29 Kasım 2019)

Tekin, Ö. F. ve Söylemez, A., 2018, Bir Yerel Çevre Politikası Olarak Vahşi Depolama Alanlarının Islahı: Konya Aslım Çöplüğü Örneği, Uluslararası Su ve Çevre Kongresi SUÇEV (22-24 Mart 2018), Bursa.

TÜİK, 2018, Seragazi Emisyon İstatistikleri 2016. <http://www.tuik.gov.tr/> (Erişim tarihi: 10 Ağustos 2019)

UK DEFRA, 2017, Statistics on Waste Managed by Local Authorities in England in 2016/17. Department for Environmental Food & Rural Affairs.

UNEP, 2005, Training Modules Closing of an Open Dumpsite and Shifting from Open Dumping to Controlled Dumping and to Sanitary Landfilling, United Nations Environment Programme. Japan.

UN-Habitat, 2009, Solid Waste Management in the World's Cities.

- Virgen, Q. A., González, P. T., Benítez, S. O. and Sotelo, S. C.,** 2014, Power generation with biogas from municipal solid waste: Prediction of gas generation with in situ parameters, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 30: 412-419 pp.
- Wateronline,** 2014, Onsite Leachate Treatment Systems Reduce Cost And Environmental Risk, <https://www.wateronline.com/doc/onsite-leachate-treatment-systems-reduce-cost-and-environmental-risk-0001> (Erişim tarihi: 15 Ağustos 2019).
- WEC,** 2013, World Energy Resources: Waste to Energy.
- Wiqvist, W.,** 2017, Swedish Waste Management 2017.
- World Bank,** 2012, What A Waste, A Global Review of Solid Waste Management, World Bank Group.
- World Bank,** 2018, What A Waste 2.0 A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050, World Bank Group.
- Xiaoli, C., Tonjes, D.J. and Mahajan, D.,** 2016, Methane emissions s energy reservoir: context, scope, causes and mitigation strategies, *Progress in Energy and Combustion Science*, 56: 33-70pp.
- Yıldız, Ş.,** 2012, Çöp gazından elektrik elde etme, *Sağlık ve Çevre Kültürü*, 6: 58-59.
- Yıldız, F. E. ve Herdem, Ş.,** 2015, İller Bankasının Katı Atık Çalışmaları Örnek: Ereğli (Zonguldak) Katı Atık Bertaraf Tesisi Rehabilitasyon Projesi, 7. Kentsel Altyapı Sempozyumu, 365-374s.
- Yılmaz, A. ve 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.

Zhou, B., Sun, C. and Yi, H. 2017, Solid waste disposal in Chinese cities: An evaluation of local performance, *Sustainability*, 9: 1-20pp.



TEŞEKKÜR

Bu çalışma süresince gerekli verilerin sağlanmasında destek olan örnek sahayı işleten firma yetkililerine, çalışanlarına ve Aydın Efeler Düzenli Depolama Tesisi çalışanlarına, özellikle kıymetli görüşlerinden yararlandığım ve tezin biçimlenmesinde değerli katkılarını aldığım sayın Dr. Öğretim Üyesi Hasan Sarptaş'a ve her zaman yanımda olup desteğini esirgemeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

02/12/2019

İmzası



Çisem SARIÇİÇEK

ÖZGEÇMİŞ

Çisem SARIÇİÇEK

EĞİTİM VE ÖĞRETİM

09/2015-12/2019- Yüksek Lisans

Enerji Teknolojileri, Güneş Enerjisi Enstitüsü, Ege Üniversitesi

09/2010-06/2015- Lisans

Çevre Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi

09/2006-09/2010- Lise

Fen Bilimleri, Bandırma Anadolu Lisesi

İŞ DENEYİMİ

03/12/2018 – Devam Ediyor

Proced Çevre Danışmanlık ve Mühendislik Ltd. Şti.

Çevre Mühendisi/Danışmanı

13/08/2016–01/08/2018

Örnek Çalışma Sahası

Çevre Mühendisi

2013-2014 - Staj

Eti Maden İşletmeleri, Bandırma (Arıtma ve işletme)

Banvit A.Ş. (Laboratuvar)

PROJELER VE ÇALIŞMALAR

▪Büyükbaş Hayvan Atıklarından Biyogaz Üretimi ve Tesis Tasarımı (2015, EÜGEE)

▪Kentsel Atıksu Arıtma Tesisi Tasarımı (2015, KOÜ Bitirme Projesi)

▪Yağmur ve Kanalizasyon Sistemleri Tasarımı (2015, KOÜ)

- Adsorpsiyon Kulesi Tasarımı (2015, KOÜ)
- ÇED Sektörel Rehberlerinin Hazırlanması- Yat Üretim Tesisleri (2014, KOÜ)

EĞİTİM VE SERTİFİKALAR

- Sıfır Atık Eğitimi (2018, T.C. Manisa Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü)
- Coğrafi Bilgi Sistemleri ArgGIS Sertifikası (2016, Anadolu Üniversitesi)
- Çevre Görevlisi Belgesi (Geçerlilik: 27.11.2015-27.11.2019, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı)
- Çevre Görevlisi Aday Eğitimi (2015, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı)
- OHSAS 18001 İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemleri Eğitimi (2015 Kocaeli Ticaret Odası) Sempozyum
- Türkiye’de Atıktan Biyoenerji (2016, Alman-Türk Ticaret ve Sanayi Odası)