

İZMİR HARMANDALI DEPONİSİNDEKİ METAN GAZI POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ, BERTARAF VE DEĞERLENDİRME SEÇENEKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Ali Kemal Çakır*

Makina Yüksek Mühendisi,
Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Makina Mühendisliği A.B.D.,
Bornova - İzmir
alikemalcan@hotmail.com

Hüseyin Gunerhan

Doç. Dr., Ege Üniversitesi,
Makina Mühendisliği Bölümü,
Bornova - İzmir
huseyingunerhan@gmail.com

ÖZET

İzmir, Harmandalı Düzenli Depolama Tesisi'nin 1992 yılında işletmeye açılmasıyla ülkemizde düzenli katı atık bertaraf sistemini ilk uygulamaya başlayan kentlerden biri olmuştur. 20 yılı aşkın işletme süresi boyunca İzmir mücavir alanı içinde üretilen kentsel katı atıkların önemli bir bölümü, bu tesiste bertaraf edilerek, katı atıklardan kaynaklanabilecek olası çevre sorunlarının ve sağlık etkilerinin asgari düzeye indirilmesi sağlanmıştır.

Bu çalışmanın temel amacı, İzmir mücavir alan sınırları içerisinde oluşan kentsel katı atıkların (evsel, endüstriyel, tıbbi atıklar ile arıtma çamuru) düzenli olarak depolandığı Harmandalı Katı Atık Düzenli Depolama Alanı'nda oluşan deponi gazı potansiyelinin hesaplanması ve elektrik enerjisi olarak kullanımının araştırılmasıdır.

Anahtar Kelimeler: Harmandalı deponisi, katı atık, deponi gazı, metan gazı, enerji üretimi

Investigation of Treatment and Assessment Options with Determining Methane Gas Potential in Harmandalı Landfill in İzmir

ABSTRACT

İzmir has been one of the cities in our country which firstly began to implement a regular solid waste disposal system with the operation of Harmandalı Landfill Facility in 1992.

An important part of municipal solid waste produced in contiguous area of İzmir during the period of 20 years was disposed in this facility in order to minimize any possible problems on health and environment caused from that solid waste.

The main objective of this study is to investigate the use of landfill gas as potential energy and electricity provided from municipal solid waste (domestic, industrial, medical waste and sewage sludge) stored regularly in Harmandalı Solid Waste Landfill Area, within the boundaries of the contiguous area of İzmir.

Keywords: Harmandalı landfill, solid waste, landfill gas, methane gas, energy production

* İletişim yazarı

Geliş tarihi : 07.05.2012
Kabul tarihi : 14.09.2012

Çakır, A. K., Gunerhan, H. 2012. "İzmir Harmandalı Deponisindeki Metan Gazı Potansiyelinin Belirlenmesi, Bertaraf ve Değerlendirme Seçeneklerinin Araştırılması," TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi, cilt 53, sayı 631, s. 24-34.

1. GİRİŞ

Türkiye'de yapılan araştırmalar ve resmi verilere göre, atık toplama ve taşıma hizmeti verilen belediyelerden 2010 yılında toplanan 25,28 milyon ton belediye atığının, % 43,5'i belediye çöplüklerine dökülürken, % 55,2'si düzenli depolama sahaları veya kompost tesislerine götürülmüş, % 1,3'ü ise diğer yöntemlerle bertaraf edilmiştir. 2008 yılıyla karşılaştırıldığında çöplüğe dökülen belediye atık miktarı % 13,2 azalırken, atık bertaraf ve geri kazanım tesislerine götürülen belediye atık miktarı % 25,6 artmıştır [1]. Bu durum katı atıkların bertarafı konusunda hâlâ yeterli altyapı hizmetinin verilemediği gerçeğini ortaya koymaktadır. Bu kapsamda özellikle büyük şehirlerin katı atık bertaraf yöntemlerini inceleme adı altında İzmir örneğinden yola çıkılmıştır.

Çalışma kapsamında, İzmir mücavir alan sınırları içerisinde oluşan kentsel katı atıkların düzenli olarak depolandığı Harmandalı Düzenli Depolama Alanı'nda (HDDA'da), deponi gazı oluşumu ve gaz toplama sistemiyle ilgili mevcut koşulların ortaya konulması ve oluşan deponi gazının bertaraf ve değerlendirme seçenekleri araştırılmıştır.

1.1 Kentsel Katı Atık Miktarları

İzmir'deki tek düzenli katı atık depolama tesisi olan Harmandalı Katı Atık Düzenli Depolama Tesisi'nde 1992-2010 yılları arasında bertaraf edilen toplam katı atık miktarları Tablo 1'de gösterilmiştir. Tablo 1 incelendiğinde evsel katı atık miktarlarının, 1992 ile 1994 yılları arasında düzenli olarak arttığı, 1994 ile 1998 yılları arasında ise parabolik bir artış gösterdiği görülmektedir. 1998-1999 yılları arasında ise atık miktarındaki düzenli artış sürmekte, 1999-2007 yılları arasında hafif eğimli düşüşler görülse de, 2007-2009 yılları arasında yine artış gözlenmektedir.

Tablo 1. 1992-2010 Yılları arasında Harmandalı Katı Atık Düzenli Depolama Tesisi'nde Bertaraf Edilen Evsel Katı Atık Miktarları [2]

Yıllar	Evsel Katı Atık Miktarları (ton)	Yıllar	Evsel Katı Atık Miktarları (ton)
1992	122520	2002	674430
1993	165300	2003	642130
1994	192201	2004	681440
1995	376400	2005	718550
1996	486945	2006	842550
1997	541870	2007	805959
1998	575240	2008	935309
1999	654760	2009	1036334
2000	644800	2010	1037951
2001	689870		

1.2 Evsel Katı Atık Karakterizasyon Çalışmaları

Katı atık karakterizasyon çalışmaları, İzmir anakent sınırları içerisinde, 2008 yılında iki adet, 2009 yılında iki adet, 2010 yılında bir adet ve 2011 yılında dokuz adet olmak üzere yaz ve kış dönemlerini yansıtacak şekilde yapılmıştır. Yapılan analiz çalışmalarına ait veriler ve ortalama değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

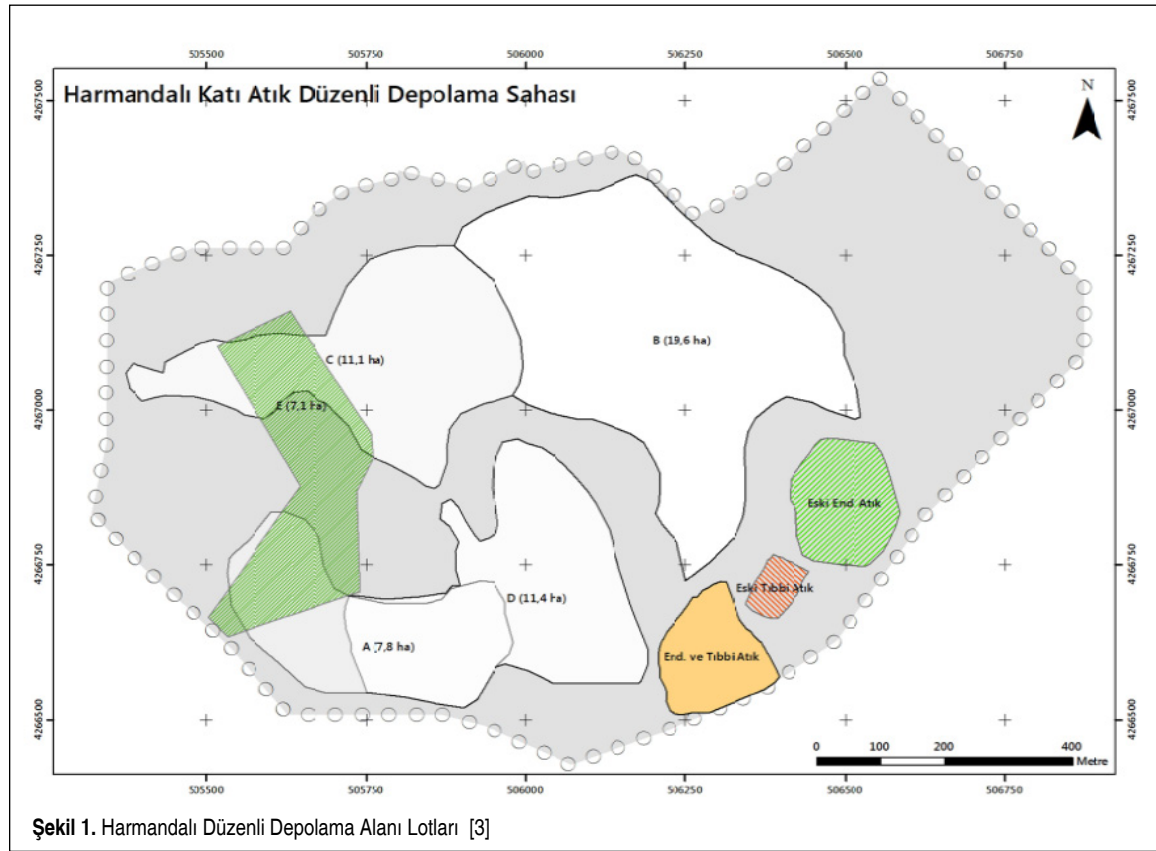
1.3 Çalışma Alanı ve Özellikleri

İzmir il sınırları içinde 38° 32' – 38° 33' kuzey enlemleri ve 27° 05' – 27° 10' doğu boylamları arasında yer alan Harmandalı Düzenli Depolama Alanı, toplam 900 dönüm alana sahiptir. Çalışma alanımız hâlen döküme aktif olan evsel katı atık lotudur (170 dönüm).

HDDA'da deponi gazı oluşum potansiyelini belirlemek için belirli bir bölge üzerinde araştırma yapılmıştır. Bu bölge, halen işletilmekte olan E bölgesi (bknz. Şekil 1) olup, bu bize alandaki gaz bileşiminin ve debisinin tespit edilmesini sağlayacaktır. Bu, alandaki mevcut gaz toplama sistemini esas

Tablo 2. Evsel Katı Atık Karakterizasyonu Genel (2008-2009-2010-2011) Sonuçları [2]

Katı atık Bileşenleri *	2008 (%)	2009 (%)	2010 (%)	2011 (%)	Ortalama (%)
Mutfak atıkları	48,78	39,71	49,1	54,66	48,06
Kâğıt	8,61	6,36	6,58	5,81	6,84
Karton	2,38	2,75	2,45	2,02	2,4
Hacimli karton	1,98	2,05	0,42	1,8	1,56
Plastik	8,31	7,23	8,36	9,49	8,34
Cam	5,37	5,09	4,43	5,37	5,06
Metal	1,65	0,33	0,51	0,63	0,78
Hacimli metal	0,13	0,09	0	0,02	0,06
Atık elektrik ve elektronik ekipman	0,07	0,14	0,13	0,41	0,19
Tehlikeli atık	0,31	0,56	0,13	1,01	0,51
Park ve bahçe atıkları	1,12	4,7	0,85	1,29	1,99
Diğer yanmayanlar	1,1	11,21	0,73	2,12	3,79
Diğer yanabilenler	7,88	12,26	7,77	12,12	10
Diğer yanabilir hacimli atıklar	0,28	0,97	0,65	0,41	0,58
Diğer yanmayan hacimli atıklar	0,61	0	0	0	0,15
Diğerleri	0,25	0,75	12,87	0,03	3,48
Kül (1 cm elek altı toz, kum, taş dahil)	11,18	5,8	5,02	2,79	6,2
Toplam	100	100	100	100	100



Şekil 1. Harmandalı Düzenli Depolama Alanı Lotları [3]

olarak ve bu bölgedeki gaz bacalarının niteliksel ve niceliksel gaz ölçümleri yapılarak sağlanacaktır.

1.4 Deponi Gazı Ölçümü

Harmandalı Düzenli Depolama Alanı'nda (HDDA'da) bulunan 77 adet bacada, Geotechnical Instruments Limited (İngiltere) Firması tarafından üretilmiş GEOTECH GA 2000 Range Gas Analyser (GA 2000) ile gaz ölçümleri yapılmıştır. GA 2000, depolama alanlarında oluşan gazların oranlarını tespit etmek için tasarlanmış bir cihazdır.

Cihazın iki ayrı ölçüm probu bulunmaktadır. Bunlardan biri orifis plaka esaslı debi ölçümü için, diğeri ise gazın bileşenlerinin (CH_4 , CO_2 , O_2 , CO , H_2S parametrelerinin) ölçümü için kullanılmaktadır. Ölçümler sırasında baca ağzının atmosferden izole edilerek tüm gazın ölçüm cihazına yönlendirilmesi gerekli olmuştur. Bu nedenle, arazi çalışmalarında bacaların tepesine uygun bir şapka imal edilmiş (Şekil 2) ve şapkanın üst kısmındaki örneklem ağzından debi ve gaz bileşenlerine yönelik örneklemeler yapılmıştır.

1.4.1 Deponi Gazı Ölçüm Sonuçları

HDDA'da yapılan ölçümler, şu anda mevcut döküm alanı olan E bölgesinde yer alan 73 adet baca (Z1-Z73) ve bunun



Şekil 2. Deponi Gazı Ölçümleri İçin Özel Olarak İmal Edilmiş Aparat [4].

dışında eski döküm alanı olan C bölgesinde yer alan dört adet baca ile birlikte toplam 77 noktada gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümlerin sonuçları, Tablo 3'te verilmiştir. Tablodaki verilerde, her gaz bacasında (veya test kuyusunda) ölçülen debi ve gaz bileşenlerinin oranları (%) verilmiştir. Ancak bazı gaz bacalarından çıkan gaz hızının çok düşük olması nedeniyle debi ölçülemediği ve tabloda "tespit edilemedi" (TE) ibaresi gösterilmiştir.

Tablo 3 incelendiğinde, CH_4 oranlarının % 2,4-61,9 arasında olduğu, inceleme yaptığımız 77 baca düşünüldüğünde ise, CH_4 ortalaması % 49,38'dir. Bu kapsamda, alan için yapılacak deponi gazı modelleme hesaplamalarında metan ortalamasını %50 alabiliriz. Gaz debisinin tespit edilemediği bacaları ayıracak olursak, 48 bacanın CH_4 ortalaması % 55,53'tür. Bu değer literatür esaslı bilgilere göre iyi bir CH_4 oranıdır.

Tablo 3. HDDA Gaz Bacaları Ölçüm Sonuçları, 2011 [4]

Baca No	Debi (ml/saat)	CH_4 (%)	CO_2 (%)	O_2 (%)	H_2S (ppm)	CO (ppm)
Z 1	TE	2,9	2,9	18,9	17	TE
Z 2	TE	4	3	19,4	1	30
Z 3	TE	11	9	15,2	0	TE
Z 4	TE	10,9	8,3	15,9	TE	TE
Z 5	TE	47,4	35,7	3,3	8	0
Z 6	TE	50,2	36,7	2,8	0	32
Z 7	TE	55,6	41,9	1	27	TE
Z 8	800	56,6	42,6	1	246	TE
Z 9	TE	2,4	3,1	18,3	0	0
Z 10	200	42,4	32,1	4,9	16	27
Z 11	TE	59,4	43,9	0,4	546	>530
Z 12	TE	41,8	32,9	5	24	51
Z 13	100	52,3	37,3	2,2	29	489
Z 14	300	60,5	44,3	0,2	293	37
Z 15	500	58,4	43	0,7	310	>530
Z 16	2600	59,2	45,1	0,2	417	TE
Z 17	TE	53,7	41,5	1,6	181	TE
Z 18	100	53	41,4	1,8	177	17
Z 19	TE	51,2	39,8	2,3	38	>530
Z 20	300	48,6	38,2	3,1	191	TE
Z 21	300	53,7	42	1,5	500	TE
Z 22	400	43	33,5	3,6	16	26
Z 23	TE	29	22,3	9,2	4	0
Z 24	TE	55	39,5	1,7	>530	59
Z 25	3300	58,7	44,2	0,2	>530	TE
Z 26	300	57	44,3	0,5	>530	TE
Z 27	300	51,8	41	1,4	505	TE
Z 28	700	58	43,9	0,5	>530	29
Z 29	TE	36,1	29,1	6,3	8	TE
Z 30	TE	40,6	32	4,7	2	TE
Z 31	TE	56,2	44,1	0,7	84	TE
Z 32	TE	54,3	42,3	1,2	100	TE
Z 33	TE	40,6	33,4	4,8	41	128
Z 34	TE	56,2	42,5	1,1	>530	TE
Z 35	400	57,5	45,5	0,4	>530	TE
Z 36	TE	57	42	0,9	48	TE
Z 37	1600	58,9	44,7	0,5	254	TE
Z 38	400	59	44,5	0,2	335	TE
Z 39	1400	58,7	43,1	0,5	167	TE
Z 40	500	57,6	43,9	0,6	278	TE
Z 41	700	49,7	39,6	2,6	78	TE

Z 42	900	50,5	41,1	1,4	215	TE
Z 43	400	54,6	44,2	0,5	113	TE
Z 44	500	55,7	43,5	0,6	164	>530
Z 45	100	53,3	40,2	1,5	156	19
Z 46	700	55,7	43	0,9	89	96
Z 47	TE	56,1	40,2	1,4	33	TE
Z 48	TE	54,8	42,5	0,3	261	26
Z 49	200	58,6	44,3	0,1	337	0
Z 50	200	60,6	43,5	0,3	TE	65
Z 51	700	60,3	44	0,3	TE	65
Z 52	400	58,9	40,1	0,4	237	TE
Z 53	TE	60,9	44,1	0,2	109	TE
Z 54	TE	60,9	49,9	0,4	98	TE
Z 55	TE	60,5	46,6	0,2	3	TE
Z 56	300	56,6	44,1	0,7	>530	TE
Z 57	900	61,9	45,4	0,1	184	TE
Z 58	TE	19,4	16	12,8	4	TE
Z 59	200	56,1	40,9	0,5	77	TE
Z 60	TE	8,8	0,2	20,6	0	0
Z 61	300	57,8	43,1	1,4	346	49
Z 62	600	64,5	42,4	1	70	137
Z 63	900	57,3	44,1	0,2	18	298
Z 64	1200	58,2	43,5	2	14	428
Z 65	700	52,8	41,3	1,7	319	TE
Z 66	300	45,9	49,1	1,6	26	144
Z 67	200	47,2	43,6	1,9	66	58
Z 68	300	49,6	44,5	1,3	91	TE
Z 69	800	57,2	45,4	0,2	114	112
Z 70	500	59,3	44,1	0,3	177	127
Z 71	1300	58,4	45,4	0,3	134	94
Z 72	600	59	44,5	0,3	215	40
Z 73	1000	58,3	46	0,2	113	98
Z 74	100	27,2	22,8	8,3	4	TE
Z 75	200	41,3	33,7	2,7	4	TE
Z 76	200	51,8	41	1	5	TE
Z 77	TE	52,2	32,5	2	4	TE

Deponi alanındaki diğer bir önemli gaz bileşeni olan CO_2 gazı yüzdesi 0,2-49,9 arasında ölçülmüş olup, 77 baca ölçüm sonuçlarının ortalaması ise % 37,9'dur. Gaz debisinin tespit edilemediği bacalar haricinde yapılan 48 bacanın CO_2 gazı ortalaması % 42,8'dir. Metan gazında olduğu gibi karbondioksit gazında da bulunan oran literatür esaslı iyi bir oran olup, değerlendirilebilecek seviyelerdedir.

Ölçüm yapılan bölgede bacalardaki oksijen gazı oranının % 0,1-20,6 değerleri arasında olduğu tespit edilmiştir. Oksijen gazının yüksek olduğu bacalarda metan gazı oranlarının düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu, oksijenin çöp sahası içindeki bakteri üremesiyle ters orantılı olmasından kaynaklanır. Dolayısıyla oksijen gazının yüksek olduğu yerlerde metan gazı oluşturacak bakteriler az sayıda yer almaktadır. Diğer yandan oksijen miktarı, deponi alanının atmosferle ne kadar irtibatlı olduğunu gösteriyor.

Ölçüm yapılan diğer gazlarla ilgili olarak; hidrojen sülfür gazının 0-546 ppm arasında değiştiği tespit edilmiş olup, ortalama değeri 168 ppm olarak hesaplanmıştır. Karbonmonoksit gazı değişim aralığı ise 0-530 ppm, ortalama değeri 137 ppm'dir.

2. HARMANDALI DÜZENLİ DEPOLAMA ALANI (HDDA) DEPONİ GAZI MODELLEME ÇALIŞMALARI

2.1 Modelleme Çalışmaları

Düzenli katı atık depolama alanlarındaki enerji potansiyelinin belirlenmesinde en önemli faktör, deponi alanından elde edilen metan gazı miktarıdır. Deponi gazını miktarını tespit etmede kullanılan çeşitli yaklaşımlar mevcuttur.

HDDA'daki gaz potansiyeli hakkında bilgi sahibi olunması amacıyla teorik tahmin yöntemlerine başvurulmuştur. Ölçüme dayalı yaklaşım dışındaki tüm yaklaşımlar, saha ile ilgili mevcut verileri esas almaktadır. Bu veriler, depolanan çöpün yıllara göre miktarı, atık karakteristiği, sahanın işletilme süresi vb.dir.

2.1.1 Literatür Esaslı Yaklaşık Tahmin

Tam ölçekli katı atık sahaları için çıkabilecek teorik deponi gazı (LFG) miktarıyla ilgili olarak 50-400 L/kg (m³/ton) aralığı verilmiştir [5]. Verilen aralığın bu kadar geniş olması (minimum ve maksimum değerler arası 8 kat fark bulunmaktadır) yukarıda belirtildiği gibi çöp karakteristiği, iklim ve depolama sahasına özgü diğer özelliklerin çıkacak gaz miktarını etkilediğinin bir başka göstergesidir.

Yukarıda verilen rakamlar HDDA özelinde kullanıldığında, mevcut evsel atık lotunda depolanan yaklaşık 4 milyon ton

çöp (2007-2010 yılları) için oluşacak gaz potansiyelinin 200-1600 milyon metreküp arasında değişebileceği söylenebilir.

2.1.2 Multi-Phase (Çoklu - Faz) Modeli ile Tahmin

Deponi gazı oluşumunun tahmin edilmesi için kullanılan modellerden biri de multi-phase (çoklu-faz) modelidir. Model, atık içindeki biyolojik ayrışabilen organik karbon oranı ve kümülatif atık miktarını esas alarak hesaplama yapmaktadır. Modelin matematiksel ifadesi, Denklem 1'de ifade edildiği gibidir [6]:

$$\alpha_t = \zeta \sum_{i=1}^3 1,87 AC_{0,i} k_{1,i} e^{-k_{1,i}t} \quad (1)$$

Denklem 1'i oluşturan parametrelerin açıklamaları;

α_t : Deponi gazı oluşum miktarı (Nm³/yıl),

ζ : Üretim faktörü,

A : Atık miktarı (ton),

$C_{0,i}$: Organik karbon miktarı (kg C/ ton atık),

$k_{1,i}$: Model değişkenleri (yavaş, orta ve hızlı parçalanma için ayrı ayrı verilir),

t: Atığın depolanmaya başladığı ilk yıldan başlayarak geçen süreyle (yıl) ifade edilir.

Modelde sadece hızlı, orta ve yavaş parçalanabilir organik atıklar hesaba katılmıştır. Modelde atık içindeki parçalanabilir atık türleri, parçalanma hızlarına göre üç grupta ele alınmaktadır. Literatürde hızlı parçalanabilen atıklar için $k_{1,i}$: 0,076-0,694 yıl⁻¹, orta hızla parçalanabilen atıklar için $k_{1,i}$: 0,046- 0,116 yıl⁻¹, yavaş parçalanabilen atıklar için $k_{1,i}$: 0,013-0,076 yıl⁻¹ arasında kabul edilebileceği ifade edilmektedir [7]. Multi-phase modelinde oluşacak deponi gazı miktarı, farklı parçalanma hızlarındaki atık miktarlarının kümülatif toplamıyla elde edilir.

Çalışma kapsamında, bu bilgiler ışığında ölçümleme ve verifikasyonla ilgili belirtilen sakıncalar göz önünde bulundurularak, multi-phase modeline ait parametre ve değişkenler kullanılarak, HDDA özelinde uygulanmıştır. Modelin çalıştırılması için üretim faktörü (ζ) 0,58; depolanan atığın içindeki organik karbon miktarı (C_0) 170 kg/ton atık; deponi gazı oluşum hız sabiti ($k_{1,i}$) hızlı, orta ve yavaş parçalanabilir atıklar için sırasıyla $k_{1,i}$: 0,185 yıl⁻¹, $k_{1,i}$: 0,100 yıl⁻¹, $k_{1,i}$:

0,030 yıl⁻¹ olarak kabul edilmiştir. Aynı zamanda evsel katı atık içindeki organik atıklara ait özellikler de hesaplamalara dâhil edilmiş olup, Tablo 4'te özet olarak sunulmuştur. Tablo 4'teki Fraksiyon-1, HDDA'daki hızlı parçalanabilir organik atıklar olan mutfak atıkları oranını, Fraksiyon-2, HDDA'daki orta hızda parçalanabilir park-bahçe atıklarını ve Fraksiyon-3 ise, HDDA'daki yavaş parçalanabilen kağıt ve türevi atıklarının oranlarını yansıtmaktadır.

2.1.3 LandGEM Modeli ile Tahmin

LandGEM v 3.02 (Deponi Gazı Emisyonları Modeli, Versiyon 3.02), deponi gazı potansiyelinin hesaplanması amacıyla geliştirilen bir programdır. Modelin çalıştırılabilmesi için şu özel bilgilere ihtiyaç vardır [4]:

- Depolanan yıllık atık miktarı veya deponi alanında bulunan toplam atık miktarı,
- Metan oluşum hızı (k),
- Metan üretim potansiyeli (L_0),
- Deponi sahasının açılış ve kapanış yılları veya deponi sahasının kullanım yılı,
- Evsel katı atıklarla birlikte tehlikeli atıklarında deponi sahasında depolanıp depolanmadığı vb.

Bu modelde kullanılan denklemin matematiksel ifadesi Denklem 2 ile verilmiştir.

$$Q_{LFG} = 2 \times \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^i kL_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-k_{1,i}t} \quad (2)$$

Denklem 2'yi oluşturan parametrelerin açıklamaları aşağıda verilmiştir.

Q_{LFG} : Yıllık deponi gazı miktarı (Nm³/yıl)

L_0 : Metan üretim potansiyeli (Nm³ CH₄ / ton atık)

M_i : i. yıldaki depolanan atık miktarı (ton)

k : Gaz üretim hızı sabiti (yıl⁻¹)

n : Hesap edilen yıl

i : 1-yıllık zaman artışı

j : 0,1-yıllık zaman artışı

t_{ij}: Atığın ilk depolanmaya başladığı yıldan itibaren geçen süre (ondalıklı yıllar, örneğin 3,2 gibi) olarak tanımlanmaktadır.

Modeli çalıştırabilmemiz için, model değişkenlerine ait kabulleri belirlememiz gerekir. Bunlardan birisi, deponi gazı içindeki metan oranıdır. HDDA'da E Bölgesi'nde yer alan 73 bacada (dört adet baca eski lotta yer almakta olup, çalışma alanı dışında kalmıştır.) yapılan deponi gazı ölçüm sonuçla-

rına göre metan gazı oranının % 50 olarak alınabileceği belirlenmiştir. Metan gazını, %38 oranında CO₂ gazı ve % 12 oranında diğer gazlar izlemektedir. Metan oranı dışında karar verilmesi gereken diğer önemli parametreler, metan üretim potansiyeli ve metan üretim hız sabiti (k) olarak sıralanabilir. Metan üretim potansiyeli (L_0), deponi sahasında bulunan atığın tipine bağlıdır. Metan üretim hız sabiti ise, atığın nem içeriği, nütrient içeriği, pH değeri ve sıcaklığın bir fonksiyonudur. Modelde sahaya özgü bir k ve L_0 değeri hesaplanmıştır. HDDA atık kompozisyonu incelendiğinde (bkz. Tablo 2), atık içeriğinin büyük bir çoğunluğunu yiyecek atıklarının oluşturduğu anlaşılmaktadır. Bu tip atıklar hızlı bozunmakta, bu nedenle metan üretim hızı (k) yüksek olmaktadır. Çalışmada limitleyici faktörlerin (gaz bacalarının yerleştirilmesindeki problemler, sızıntı suyu drenaj sisteminin olmaması, gaz bacalarında sızıntı suyu birikmesi, yağmur suyu drenaj sisteminin olmaması vb.) bulunmasından dolayı, oluşacak deponi gazı miktarlarının farklı üretim hız sabitleri için ayrı ayrı belirlenmesinin uygun olduğu düşünülmüştür.

HDDA ait metan gazı üretim potansiyelinin belirlenmesinde, Tablo 2'de yer alan 2008, 2009, 2010 ve 2011 yıllarına ait atık kompozisyonunun ortalama verileri kullanılmıştır. Bu veriler temel alınarak alana özgü parçalanabilir organik karbon miktarını (DOC) Denklem 3'e göre buluruz.

$$DOC = 0,4A + 0,16(B+C) + 0,3D \quad (3)$$

A: Kâğıt, karton, hacimli karton, tekstil vb. oranı (%)

B: Mutfak atıkları oranı (%)

C: Park-bahçe atıkları oranı (%)

D: Odun oranı (%)

Parçalanabilir organik karbon fraksiyonu (DOCf) ise, Denklem 4'e göre bulunur. Burada, deponi alanının ortalama sıcaklığı için 35 °C değeri kullanılmıştır [4].

$$DOCf = 0,014 \times T + 0,28 \quad (4)$$

Alana özgü metan üretim kapasitesini Denklem 5'e göre buluruz. Denklem 5'i oluşturan parametrelerden MFC parametre değeri, IPCC 2006 Rehberi kıstas alınarak (Düzenleme depolama alanları için gerekli olan düzeltme faktörü) 1 olarak alınmıştır.

Hacimce metan fraksiyonunun (F) değeri ise, bölüm 1.4.1'de yer alan Tablo 3'teki ortalama metan değeri esas alınarak hesaplanmıştır.

$$L_0 = MFC \times DOC \times DOCf \times F \times 16 / 12 \quad (5)$$

MFC : Düzeltme faktörü

Tablo 4. Evsel Katı Atıktaki Organik Atıkların Farklı Hızlardaki Parçalanma Oranları

Kategori	Fraksiyon-1 (Hızlı parçalanma)	Fraksiyon-2 (Orta hızda parçalanma)	Fraksiyon-3 (Yavaş parçalanma)
Evsel Atık Bileşeni (%)	45	3	12
Hız Sabiti (k)	0,185	0,100	0,030

DOC : Parçalanabilir organik karbon miktarı

DOCf : Parçalanabilir organik karbon fraksiyonu

F : Hacimce metan fraksiyonu (%)

16/12 : Moleküler ağırlık oranı, CH₄/C ile açıklanmıştır.

Denklem 3 ve Denklem 4'ten elde edilen değerlerin Denklem 5'te yerine konulması ve diğer belirtilen parametre değerlerinin de yazılmasıyla HDDA'na özgü metan üretim potansiyeli 102 m³ /ton olarak elde edilmiştir.

3. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

3.1 Multi-Phase (Çoklu Faz) Modeli Tahmin Sonuçları

Tablo 5'te verilen yıllık gaz miktarlarının toplanmasıyla, 2050 yılına kadar oluşabilecek gaz miktarının yaklaşık 290 milyon m³ mertebesinde olabileceği bulunmuştur [4].

Tablo 5. Multi-Phase (Çoklu-Faz) Modeli ile HDDA'da Oluşan Gaz Potansiyeli

Yıl	Deponi Gazı (Nm ³)	Yıl	Deponi Gazı (Nm ³)	Yıl	Deponi Gazı (Nm ³)
2008	11204402,25	2023	5028217,45	2038	1283579,34
2009	20339111,50	2024	4428763,76	2039	1213038,86
2010	27299163,36	2025	3921111,47	2040	1149630,07
2011	31604624,37	2026	3490231,00	2041	1092333,55
2012	26684051,55	2027	3123598,45	2042	1040292,45
2013	22575365,10	2028	2810775,21	2043	992785,67
2014	19142658,95	2029	2543058,24	2044	949205,56
2015	16272882,99	2030	2313189,15	2045	909039,34
2016	13871991,62	2031	2115112,37	2046	871853,63
2017	11861741,93	2032	1943773,76	2047	837281,44
2018	10177031,91	2033	1794953,28	2048	805011,47
2019	8763687,58	2034	1665125,59	2049	774779,10
2020	7576623,24	2035	1551344,19	2050	746358,83
2021	6578311,87	2036	1451144,89	Toplam	291897215,34
2022	5737513,44	2037	1362465,57		

3.2 LandGEM Modeli ile Tahmin Sonuçları

LandGEM modelinin açıklanan veriler doğrultusunda çalıştırılması sonucunda, deponi gazı oluşumunun yıllara göre değerleri, Tablo 6'da verilmektedir [4].

4. HDDA DEPONİ GAZI ENERJİ DEĞERLENDİRMESİ

Deponi gazının kontrolü, çevreye vermiş olduğu olumsuz durumlar (küresel ısınma, kötü koku, patlama riski vb.) nedeniyle gerekli olduğu gibi, gaz içindeki metanın kalorifik değerinin olması ve bunun sonucunda da enerji üretilebilmesi olanağının bulunması sebebiyle önem arz etmektedir.

Çalışma yapılan alana ait enerji değeri; deponiye ait metan gazı miktarı ve metanın kalorifik değeri kullanılarak, deponi gazından elde edilebilecek enerji miktarı hesaplanabilir. Literatürde 1 m³ metan gazının kalorifik değeri, 8500 kcal olarak verilmektedir. Buna göre; enerji miktarı, 6 Bağımsız kullanılarak hesaplanabilir [8].

$$\text{Brüt Enerji Miktarı (kWh/yıl)} = \text{MG} \times \text{MKD} / (860 \times 8760) \quad (6)$$

Bağıntıda;

Tablo 6. LandGEM Modeline Göre HDDA'da Oluşan Deponi Gazı Miktarları

Yıl	Deponi Gazı (Nm ³)			Yıl	Deponi Gazı (Nm ³)		
	k=0,35	k=0,1	k=0,05		k=0,35	k=0,1	k=0,05
2008	49408545,16	15724577,90	8038708,51	2030	199491,23	9742219,93	13746737,00
2009	92155836,42	32476433,88	16975513,26	2031	140579,09	8815125,13	13076300,72
2010	128472584,39	49605177,58	26484097,46	2032	99064,41	7976255,06	12438562,01
2011	154163692,77	65135454,11	35545070,64	2033	69809,51	7217214,04	11831926,18
2012	108637318,16	58936996,12	33811517,09	2034	49193,93	6530405,31	11254876,33
2013	76555424,21	53328399,39	32162509,94	2035	34666,38	5908955,08	10705969,54
2014	53947695,64	48253531,21	30593925,82	2036	24428,98	5346643,66	10183833,24
2015	38016298,59	43661600,60	29101842,45	2037	17214,81	4837843,25	9687161,84
2016	26789632,83	39506649,95	27682528,85	2038	12131,07	4377461,59	9214713,38
2017	18878335,18	35747095,14	26332435,99	2039	8548,62	3960891,04	8765306,50
2018	13303337,96	32345309,27	25048187,93	2040	6024,11	3583962,42	8337817,46
2019	9374703,81	29267246,12	23826573,39	2041	4245,12	3242903,31	7931177,30
2020	6606242,12	26482099,41	22664537,69	2042	2991,49	2934300,26	7544369,22
2021	4655340,14	23961994,46	21559175,14	2043	2108,06	2655064,67	7176425,99
2022	3280562,75	21681709,20	20507721,77	2044	1485,53	2402401,86	6826427,57
2023	2311773,50	19618421,77	19507548,37	2045	1046,83	2173783,09	6493498,77
2024	1629079,25	17751482,10	18556154,01	2046	737,69	1966920,28	6176807,10
2025	1147992,74	16062205,23	17651159,70	2047	519,84	1779743,07	5875560,66
2026	808976,81	14533684,31	16790302,49	2048	366,33	1610378,12	5589006,18
2027	570076,33	13150621,38	15971429,77	2049	258,15	1457130,38	5316427,14
2028	401726,00	11899174,30	15192493,95	2050	181,91	1318466,09	5057141,92
2029	283091,53	10766818,15	14451547,28	Toplam	792073359,39	769734749,21	681685027,56

Tablo 7. Multi Phase Modeline Göre Oluşan Deponi Gazının Enerji Karşılığı

Yıl	Enerji Miktarı (kWh)	Yıl	Enerji Miktarı (kWh)	Yıl	Enerji Miktarı (kWh)
2008	6320,84	2023	2836,62	2038	724,12
2009	11474,09	2024	2498,44	2039	684,32
2010	15400,53	2025	2212,05	2040	648,55
2011	17829,41	2026	1968,98	2041	616,23
2012	15053,52	2027	1762,14	2042	586,87
2013	12735,65	2028	1585,67	2043	560,07
2014	10799,13	2029	1434,64	2044	535,48
2015	9180,17	2030	1304,96	2045	512,82
2016	7825,74	2031	1193,22	2046	491,85
2017	6691,68	2032	1096,56	2047	472,34
2018	5741,26	2033	1012,60	2048	454,14
2019	4943,94	2034	939,36	2049	437,08
2020	4274,27	2035	875,17	2050	421,05
2021	3711,08	2036	818,65	Toplam	164670,70
2022	3236,76	2037	768,62		

Tablo 8. LandGEM Modeline Göre Oluşan Deponi Gazının Enerji Karşılığı

Yıl	Enerji Miktarı (kWh)			Yıl	Enerji Miktarı (kWh)			Yıl	Enerji Miktarı (kWh)		
	k=0,35	k=0,100	k=0,05		k=0,35	k=0,100	k=0,05		k=0,35	k=0,100	k=0,05
2008	27873,30	8870,85	4534,95	2023	1304,16	11067,52	11004,98	2038	6,84	2469,50	5198,38
2009	51988,73	18321,23	9576,55	2024	919,03	10014,31	10468,26	2039	4,82	2234,49	4944,85
2010	72476,44	27984,23	14940,72	2025	647,63	9061,32	9957,71	2040	3,40	2021,85	4703,69
2011	86969,80	36745,47	20052,37	2026	456,38	8199,02	9472,07	2041	2,39	1829,45	4474,29
2012	61286,58	33248,68	19074,41	2027	321,60	7418,78	9010,11	2042	1,69	1655,35	4256,08
2013	43187,93	30084,65	18144,14	2028	226,63	6712,79	8570,68	2043	1,19	1497,83	4048,50
2014	30434,02	27221,71	17259,24	2029	159,70	6073,99	8152,69	2044	0,84	1355,29	3851,06
2015	21446,49	24631,23	16417,49	2030	112,54	5495,97	7755,07	2045	0,59	1226,32	3663,24
2016	15113,09	22287,25	15616,80	2031	79,31	4972,96	7376,86	2046	0,42	1109,62	3484,58
2017	10650,01	20166,34	14855,16	2032	55,89	4499,72	7017,08	2047	0,29	1004,02	3314,63
2018	7504,94	18247,26	14130,67	2033	39,38	4071,51	6674,85	2048	0,21	908,48	3152,98
2019	5288,64	16510,80	13441,51	2034	27,75	3684,06	6349,32	2049	0,15	822,02	2999,21
2020	3726,84	14939,59	12785,96	2035	19,56	3333,47	6039,66	2050	0,10	743,80	2852,93
2021	2626,26	13517,90	12162,38	2036	13,78	3016,25	5745,10	Toplam	446839,73	434237,64	384565,33
2022	1850,69	12231,50	11569,21	2037	9,71	2729,22	5464,91				

Deponi gazının değerlendirilmesi durumunda göz önüne alınması gereken konu, toplam gaz miktarının önemli bir oranının, atığın dökümünü takiben birkaç yıl içinde çıktığıdır. Dolayısıyla kapatılan bir alan için de gazın önemli bir bölümü, kapatmayı takiben ilk birkaç yılda çıkacak, daha sonraki yıllarda daha düşük gaz çıkışları elde edilecektir. Bu durumda (elektrik) enerjisi elde etmek için yapılacak bir yatırımın fizibilitesinde toplam gaz değeri kadar, yıllık bazda çıkan gaz değerleri de önem kazanmaktadır.

HDDA Deponi Gazı Ölçüm Çalışmaları kapsamında, alanda yapılan ölçümlerde çıkan metan gazı oranı ve literatür kaynaklı hesaplamalarda alındığı gibi, deponi gazının metan oranının %50 olduğu kabul edilmiştir.

Bu bilgiler doğrultusunda, deponi gazından elde edilecek elektrik enerjisi değerleri Tablo 7 ve 8'de sunulmuştur. Elektrik enerjisi potansiyel değerleri, her bir model (gaz miktarını belirlemede kullanılan modeller) için ayrı ayrı hesaplanmıştır [3].

5. SONUÇLAR

HDDA deponi gazı potansiyelini belirlemede kullanılan

yaklaşımlara (literatür esaslı yaklaşık tahmin, matematiksel modeller) ait sonuçlar ve bu modellerden elde edilen elektrik enerjisi değerleri aşağıdaki Tablo 9'da özet olarak sunulmuştur. Alana ait deponi gazı potansiyelini belirlemede kullandığımız matematiksel tahmin metodlarından elde ettiğimiz sonuçlar oldukça iyimserdir. Yukarıda sunulan matematiksel modellere ait en yüksek deponi gazı tahmini sonucu, LandGEM metodunun kullanılmasıyla elde edilen sonuçlardır. Buna karşın, en düşük deponi gazı tahmin sonucu ise, Multi-Phase modelinin kullanılmasıyla elde edilen sonuçtur.

Kullandığımız matematiksel metotlarda, deponi gazı miktarını yıllık bazda hesapladık. Daha sonra bunların toplanmasıyla da toplam gaz miktarını elde etmiştik. Bu bize, gazın enerji yönüyle değerlendirilmesi için avantaj sağladı. Çünkü gazın enerji yönüyle değerlendirilmesi durumunda, yapılacak yatırımın fizibilitesi bakımından yıllık gaz üretimindeki değişimler önemlidir. Bundan dolayı deponi gazı modelleme çalışması sonucunda hesaplanan metan gazı miktarının yıllık bazdaki değişimi grafiksel olarak aşağıdaki Şekil 3'te sunulmuştur. Kullanılan 2 (iki) ayrı modelden elde edilen sonuçlara göre, metan gazı oluşumunun en fazla olduğu zaman dilimi 2010-2013 yılları arasındadır.

Tablo 9. HDDA'da Deponi Gazı Potansiyelini Belirlemede Kullanılan Modellere ait Toplam Değerler ve Elektrik Enerjisi Değerleri [4]

Tahmin Yöntemi			Üretilen Metan Gazı Miktarları (Nm ³) ve Elektrik Değerleri (kWh)
Literatür Esaslı Yaklaşık Tahmin Düşük Hız			100.000.000
Yüksek Hız			800.000.000
Multi-Phase Modeli			145.948.608
LandGEM Modeli	Düşük Hızlı	(k=0,05)	340.842.514
	Orta Hızlı	(k=0,100)	384.867.375
	Yüksek Hızlı	(k=0,35)	396.036.680
LandGEM Modeli	Düşük Hızlı	(k=0,05)	384565,33 (kWh)
	Orta Hızlı	(k=0,100)	434237,64 (kWh)
	Yüksek Hızlı	(k=0,35)	446839,73 (kWh)
Multi-Phase Modeli			164670,70 (kWh)

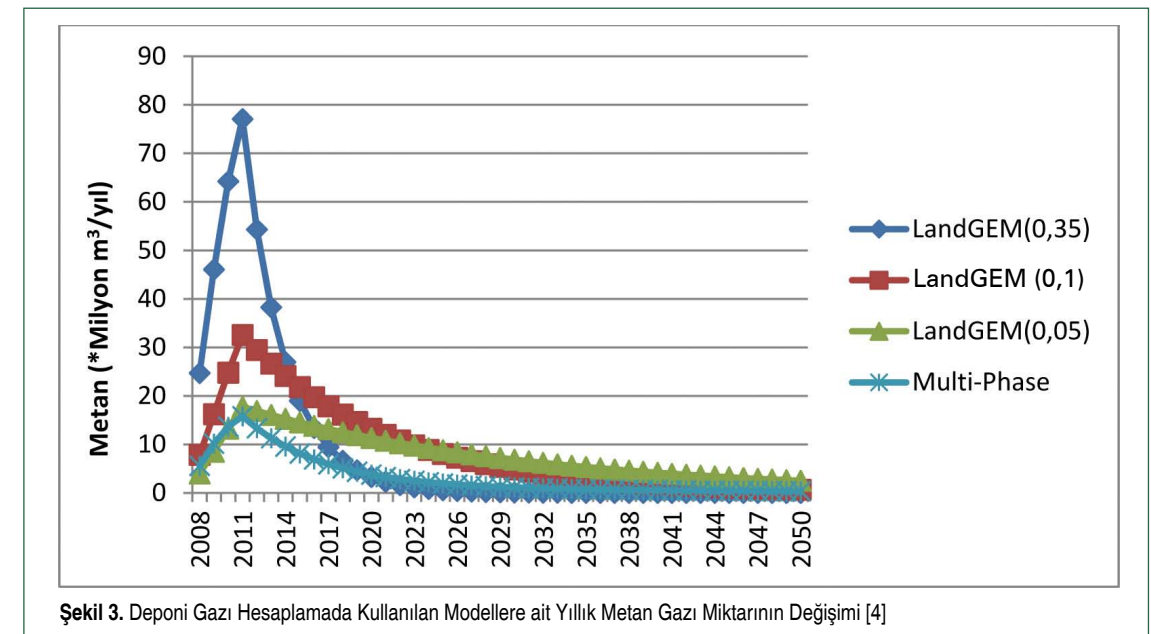
2011 yılından sonra metan gazı üretimindeki en keskin düşüşlerin olduğu model, LandGEM (k=0,35) modelleridir. Yine 2011 yılından sonra, iki modelde de kademeli olarak metan gazı üretimindeki düşüşler Şekil 3'te görülebilmektedir.

HDDA'da yapılan ölçüm ve göz önüne alınan matematiksel modelleme hesaplamalarında inceleme yapılan mevcut evsel katı atık miktarının yüksek miktarda deponi gazı potansiyeline sahip olduğu belirlenmiştir. Ancak alanda yapılacak bir enerji yatırımı düşünüldüğünde, depolama alanlarından oluşabilecek gaz potansiyelinin %60'ının ilk 10 yıl süre zarfında oluşacağı hesaba katılmalıdır [4].

Çalışma yaptığımız alan düşünüldüğünde yapılacak olan ya-

tırım çalışmasında, Multi-Phase modelini esas almak daha sağlıklı sonuçlar verecektir. Çünkü Multi-Phase modeli, hesaplamalarda çöp içindeki organik bazlı atıkları (karbon içeriği yüksek) kıstas almaktadır. Dolayısıyla alandan çıkacak gaz miktarları gerçeğe yakın değerlerde olacaktır. Bu kapsamda Multi-Phase modelinin üreteceği deponi gazı esas alınarak yapılacak enerji tesisine ait veriler Tablo 10'da verilmiştir. Tablo 10'daki veriler, alanda yapılacak enerji tesisinin sadece kurulması ve işletilmesi sürecini yansıtmaktadır (Sahaya ait işletme ve çalışma şartlarına ait bilgileri kapsamamaktadır).

Mevcut koşullarda HDDA'daki deponi gazı, bacalar veya alandan dışarı çıkarak atmosfere karışmaktadır.

**Şekil 3.** Deponi Gazı Hesaplamada Kullanılan Modellere ait Yıllık Metan Gazı Miktarının Değişimi [4]

Tablo 10. HDDA'da Yapılacak Olan Enerji Tesisine Ait Özellikli Veriler

Üretim Kapasitesi	4,5 MW
Gaz Emiş Kapasitesi	2.293 m ³ /saat
Jeneratör Sayısı ve Kapasitesi	2 adet/1.966 kW
Jeneratör Enerji Verimi	39,30%
Yıllık Jeneratör Çalışma Saati	8.000 saat
Yıllık Elektrik Üretimi	31.456.000 kWh
Yıllık Isı Üretimi	668331 m ³
Yıllık Elektrik Üretim Geliri (0,25 TL/kWh*)	7.405.056,96 TL
Yıllık Isı Üretim Geliri (0,97 TL/ m ³ **)	648.281 TL
Kojenerasyon Yatırım Maliyeti ***	6.174.000 TL
Tahmini Bakım Maliyeti ***	126.000 TL
Tahmini Yatırımın Amorti Süresi	9,5 ay

* Kaynak: [9]. ** Kaynak: [10]. *** Kaynak: [11]

Deponi gazının, hiçbir işleme tabi tutulmadan atmosfere serbest olarak verilmesi, oluşturabileceği sağlık ve çevresel etkileri sebebiyle istenmeyen bir durumdur.

Deponi gazının toplanıp, değerlendirilmesi ve alınabilecek önlemlerle çevre ve insan sağlığına olan etkisi azaltılabilir. Deponi gazının kontrolüne yönelik alınabilecek önlemler aşağıda özetlenmiştir;

- Deponi alanı üst örtü tabakasının geçirimsiz hâle getirilmesi, bu bağlamda alanda yaşanan kaymalar sonucu oluşan gaz kaçağı noktalarının geçirimsiz yapı veya toprakla kapatılması, alanının sıkıştırılmasının iyileştirilmesi,
- Deponi alanında çok üst seviyede bulunan sızıntı suyunun drenajı,
- Yukarıdaki maddeler ön şart olmak üzere mevcut gaz toplama bacalarının rehabilite edilmesi,
- Deponi gazının toplanması için gerekli olan gaz toplama sisteminin kurulması,
- Deponi gazının flare (meşale) ünitesinde yakılması veya enerji üretim amaçlı kullanılmasıyla gazın atmosfere serbest verilmesinin önlenmesi,
- Enerji üretimine yönelmesi halinde detaylı bir fizibilite çalışmasının yapılmasıdır.

Kyoto Protokolü, çevre ve iklim koşullarını olumsuz olarak etkileyen ve sera etkisine sebep olan altı gazın [Karbon dioksit (CO₂), Metan (CH₄), Diazot monoksit (N₂O), Hidroflorokarbonlar (HFCs), Perflorokarbonlar (PFCs), Kükürt heksaflorid (SF₆)] atmosfere olan salınımını azaltmayı amaçlamaktadır.

Türkiye'nin Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve

Sözleşmesine Yönelik Kyoto Protokolüne Katılmamızın Uygun Bulduğuna Dair Kanun, 5 Şubat 2009'da TBMM Genel Kurulu'nda kabul edilip, 17.02.2009/27144 Tarih-Sayı Resmî Gazete'de yayımlanarak yasalasmıştır. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi Kyoto Protokolü'nün 3. maddesine göre 2008-2012 dönemi için 1990 yılında gerçekleşen sera gazı etkisine sebep olan gazların atmosfere salınım miktarının % 5 oranında azaltılması ön görülmüştür.

Yasa ve Kyoto Protokolü düşünüldüğünde, Türkiye'nin sera gazı salım oranlarını düşürmesi gerekecektir. Bu kapsamda, İzmir özelinde yaptığımız çalışmadan elde edilecek sera gazı salım azalımı ülkemize de önemli oranda saygınlık sunup, katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

1. TÜİK, 2010. İstatistiklerle Çevre, http://www.tuik.gov.tr/VeriBilgi.do?alt_id=10, son erişim tarihi: 15.06.2012.
2. İBB, 2011. İzmir Büyükşehir Belediyesi Katı Atık İşletmeler Şube Müdürlüğü Entegre Atık Yönetim Planı, Mayıs, 2011.
3. İBB, 2011. "Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik Kapsamında Hazırlanan HDDA İyileştirme Planı," İzmir Büyükşehir Belediyesi, İZSU Genel Müdürlüğü.
4. Çakır, A.K. 2012. "İzmir Harmandalı Deponisindeki Metan Gazı Potansiyelinin Belirlenmesi ve Elektrik Enerjisi Eldesinin Sağlanması," (Basılmamış doktora tezi).
5. Ham, R. R., Barlaz, M.A. 1987. Measurements and Prediction of Landfill Gas quality and Quantity / ISWA International Sanitary Landfill Symposium. Cagliari, P. VIII-1 VIII-23.
6. Jacobs, J., Scharff, H. 2001. "Comparison of Methane Emission Models and Methane Emission Measurements," NV Afvalzorg, Netherlands.
7. Scharff, H., Jacobs, J. 2006. "Applying Guidance for Methane Emission Estimation for Landfills," Waste Management, 26, 417-429; Kamalan, H., Sabour, M., Shariatmadari, N. 2011. "A Review on Available Landfill Gas Models. Journal of Environmental Science and Technology", 4: 79-92.
8. Pecora, V., Figueiredo, N.J.V, Coelho, S.T., Velazquez, S.M.S.G. 2009. "Electricity and Illumination Generation Potential by Gas Through Utilization of Biogas from Sanitary Landfill," World Climate&Energy Event.
9. "Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun" 2010. <http://www.tbmm.gov.tr/kanunlar/k6094.html>, son erişim tarihi: 04.08.2012
10. "Isı Üretim Tarifeleri" 2012. <http://www.baskentdogalgaz.com.tr/inc/main.asp?id=tarife>, son erişim tarihi: 04.08.2012
11. Borusan Güç Sistemleri, 2012. "Kojenerasyon Kurulum ve Bakım Maliyetleri," Borusan Güç Sistemleri Departmanı-İzmir (Yerinde sözel görüşme).