

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KATI ATIK DÜZENLİ DEPO SAHALARINDA DEPO
GAZI OLUŞUMUNU ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN
BELİRLENMESİ**

728624
**YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

Çevre Müh. Mehmet Sinan BİLGİLİ

F.B.E Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 05.07.2002
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ahmet DEMİR

Prof. Dr. Ferihsan DEMİR
Prof. Dr. Lutfi Akça (i.tü) Lutfi Akça

İSTANBUL, 2002

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|--|-------|
| KISALTMA LİSTESİ | iv |
| ŞEKİL LİSTESİ..... | v |
| ÇİZELGE LİSTESİ..... | vii |
| ÖNSÖZ | viii |
| ÖZET | ix |
| ABSTRACT | xi |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. KATI ATIK YÖNETİMİ..... | 3 |
| 2.1 Genel | 3 |
| 2.2 Katı Atıkların Miktar ve Özellikleri | 3 |
| 2.3 Katı Atık Bertaraf Yöntemleri | 4 |
| 2.3.1 Geri kazanma | 5 |
| 2.3.2 Yakma | 5 |
| 2.3.3 Kompostlaştırma | 6 |
| 2.3.4 Düzenli depolama | 6 |
| 2.3.4.1 Düzenli depo sahalarının tasarımı ve işletilmesi | 7 |
| 2.3.4.2 Saha seçimi | 8 |
| 2.3.4.3 Sızıntı suyu drenajı ve toplanması | 10 |
| 2.3.4.4 Düzenli depo sahalarının işletilmesi | 10 |
| 2.4 İstanbul Katı Atık Yönetimi | 11 |
| 2.4.1 İstanbul tıbbi atık yakma tesisi | 12 |
| 2.4.2 İstanbul kompost tesisi..... | 12 |
| 2.4.3 İstanbul düzenli katı atık depolama tesisi | 13 |
| 3. KATI ATIK DÜZENLİ DEPO SAHALARINDA AYRIŞMA PROSESLERİ... 15 | |
| 3.1 Kimyasal Reaksiyonlar | 16 |
| 3.2 Biyolojik Prosesler..... | 17 |
| 3.2.1 Aerobik ayrışma..... | 17 |
| 3.2.2 Anaerobik ayrışma..... | 17 |
| 3.2.3 Enerji dengesi | 22 |
| 3.3 Fiziksel Prosesler | 23 |
| 3.3.1 Sızıntı suyu oluşumu..... | 23 |
| 3.3.2 Çökmeler..... | 25 |

| | | |
|---------|--|----|
| 4. | KATI ATIK DÜZENLİ DEPO SAHALARINDA DEPO GAZI OLUŞUMU..... | 27 |
| 4.1 | Depo Gazı Oluşum Safhaları | 28 |
| 4.1.1 | Aerobik safha..... | 28 |
| 4.1.2 | Anaerobik metanojenik olmayan faz | 29 |
| 4.1.3 | Anaerobik metanojenik kararsız faz | 29 |
| 4.1.4 | Metanojenik kararlı faz..... | 29 |
| 4.1.5 | Aerobik şartlara geçiş fazı | 29 |
| 4.2 | Depo Gazı Oluşumunu Etkileyen Çevresel Faktörler..... | 30 |
| 4.2.1 | Oksijen | 30 |
| 4.2.2 | Hidrojen | 30 |
| 4.2.3 | pH ve alkalinite..... | 31 |
| 4.2.4 | Sülfat..... | 31 |
| 4.2.5 | Nütrientler | 32 |
| 4.2.6 | İnhibitörler | 33 |
| 4.2.7 | Sıcaklık | 34 |
| 4.2.8 | Nem/su muhtevası..... | 34 |
| 4.2.9 | Dane boyutu..... | 35 |
| 4.3 | Depo Gazı Bileşenleri ve Özellikleri | 35 |
| 4.4 | Depo Gazının Kontrol Yöntemleri | 38 |
| 4.4.1 | Depo gazlarının arıtımı | 38 |
| 4.4.1.1 | Depo gazından eser bileşiklerin bertarafı | 39 |
| 4.4.1.2 | Depo gazı kondensatlarının bertarafı | 39 |
| 4.4.2 | Depo gazı kullanımının ekonomik açıdan değerlendirilmesi | 40 |
| 4.4.2.1 | Depo gazının doğal gaza dönüştürülmesi | 40 |
| 4.4.2.2 | Depo gazlarının yakılması | 41 |
| 4.4.2.3 | Depo gazının araç yakıtı olarak kullanılması | 42 |
| 4.4.2.4 | Depo gazının doğal gaz şebekesinde kullanılması | 42 |
| 4.4.2.5 | Depo gazının kimyasal madde üretiminde kullanılması | 43 |
| 5. | DEPO GAZI OLUŞUMUNUN MODELLENMESİ | 44 |
| 5.1 | Gaz Oluşum Potansiyeli..... | 44 |
| 5.1.1 | Stokhiyometrik metod..... | 45 |
| 5.1.2 | Biyolojik ayrışabilirlik testi | 46 |
| 5.1.3 | Laboratuar çalışmaları | 46 |
| 5.2 | Gaz Oluşum Hızı | 47 |
| 5.3 | Depo Gazı Oluşumu ile İlgili Modeller | 48 |
| 5.3.1 | Genel kinetik parametrelerin kullanıldığı modeller | 48 |
| 5.3.2 | Kompleks matematiksel modeller..... | 49 |
| 5.3.2.1 | Katı atıkların 1. derece kinetiğe göre ayrışması..... | 49 |
| 5.3.2.2 | Palos Verdes kinetik modeli | 49 |
| 5.3.2.3 | Sheldon-Arleta kinetik modeli..... | 50 |
| 5.3.2.4 | Scholl Canyon kinetik modeli..... | 50 |
| 5.3.2.5 | P.G.E. kinetik modeli..... | 50 |
| 5.3.2.6 | EMCON kinetik modeli..... | 51 |
| 5.3.2.7 | EPA (LandGEM) modeli | 51 |

| | | |
|-------|--|----|
| 6. | ODAYERİ KATI ATIK DÜZENLİ DEPO SAHASINDA YAPILAN ÇALIŞMALAR | 53 |
| 6.1 | Sahanın Tanıtılması | 53 |
| 6.2 | Test Hücrelerinin Tanıtılması | 55 |
| 6.3 | DeneySEL Çalışmalar | 56 |
| 6.3.1 | Katı atık analizleri..... | 57 |
| 6.3.2 | Gaz analizleri | 59 |
| 6.3.3 | Sızıntı suyu analizleri..... | 59 |
| 6.3.4 | Depo gövdesinin sıcaklığı..... | 60 |
| 7. | SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER..... | 61 |
| 7.1 | Katı Atık Analizleri | 61 |
| 7.2 | Gaz Analizleri | 67 |
| 7.3 | Sızıntı Suyu Analizleri..... | 69 |
| 7.4 | Çalışmalardan Elde Edilen Bulgular..... | 73 |
| | KAYNAKLAR..... | 75 |
| | EKLER | 79 |
| | Ek-1 Test hücrelerinin hazırlanması aşamasında yapılan çalışmalar | 80 |
| | Ek 2 Test hücrelerinde yapılan ölçümler ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar | 83 |
| | ÖZGEÇMİŞ..... | 86 |

KISALTMA LİSTESİ

| | |
|-------------------------------|--|
| CH ₄ | Metan |
| CO ₂ | Karbondioksit |
| O ₂ | Oksijen |
| H ₂ S | Hidrojen Sülfür |
| SO ₄ ²⁻ | Sülfat |
| KOİ | Kimyasal Oksijen İhtiyacı |
| G ₀ | 1 ton Atıktan Oluşabilecek Toplam Gaz Potansiyeli |
| G _k (t) | 1 ton Atıktan (t) Anına Kadar Oluşan Gaz Miktarı |
| G _p (t) | 1 Ton Atıktan (t) Anından Sonra Oluşabilecek Gaz Potansiyeli |
| G | 1 Ton Atıktan 1 Yılda Oluşan Gaz Miktarı |
| BMP | Biyolojik Metan Potansiyeli |



ŞEKİL LİSTESİ

| | | |
|------------|--|----|
| Şekil 2.1 | Muhtelif depo tabanı geçirimsizlik sistemleri..... | 9 |
| Şekil 2.2 | Depo sahasından yüzey sularını hendeklerle uzaklaştırılması..... | 9 |
| Şekil 2.3 | Sızıntı suyu toplama sistemi | 10 |
| Şekil 2.4 | İstanbul evsel katı atık kompost tesisi proses akım şeması | 13 |
| Şekil 2.5 | İstanbul'daki aktarma istasyonlarının ve depo sahalarının konumu | 14 |
| Şekil 3.1 | Depo sahalarında madde dönüşümü..... | 15 |
| Şekil 3.2 | Anaerobik ayrışma sırasında gerçekleşen ayrışma safhaları, substratlar ve önemli bakteri grupları | 18 |
| Şekil 3.3 | Düzenli depo sahalarında sızıntı suyu oluşumu..... | 24 |
| Şekil 3.4 | Depo sahalarında meydana gelen çökmelerin zamanla değişimi..... | 26 |
| Şekil 4.1 | Depo gazı bileşiminin zamanla değişimi..... | 28 |
| Şekil 4.2 | Anaerobik bir filtrede pH'nın rölatif metan oluşum hızı (R) üzerine etkisi..... | 31 |
| Şekil 4.3 | Depo sahalarında SO_4^{2-} ile gaz bileşimi arasındaki ilişki..... | 32 |
| Şekil 4.4 | CO_2 'in kısmi basıncına bağlı olarak bazı substratların ayrışma oranları | 33 |
| Şekil 4.5 | Depo gazı üretim hızı ile nem muhtevası arasındaki ilişki..... | 35 |
| Şekil 5.1 | Gaz oluşum potansiyeli ve kümülatif gaz üretimi..... | 45 |
| Şekil 5.2 | Gaz oluşumunun zamanla değişimi..... | 48 |
| Şekil 6.1 | 1995-2001 yılları arasında Odayeri depo sahasına depolanan atık miktarları.. | 53 |
| Şekil 6.2 | Odayeri depo sahasının genel görünüşü ve test hücrelerinin depolama alanındaki konumu | 54 |
| Şekil 6.3 | Test hücreleri..... | 56 |
| Şekil 6.4 | BMP testi için hazırlanan deneysel düzenek | 58 |
| Şekil 7.1 | 10 gr. kuru katı atık numunelerinden elde edilen kümülatif CH_4 miktarları | 62 |
| Şekil 7.2 | Baruthane transfer istasyonundan alınan 10 gr. atıktan oluşan günlük CH_4 miktarları..... | 62 |
| Şekil 7.3 | Halkalı transfer istasyonundan alınan 10 gr. atıktan oluşan günlük CH_4 miktarları..... | 63 |
| Şekil 7.4 | Yenibosna transfer istasyonundan alınan 10 gr. atıktan oluşan günlük CH_4 miktarları..... | 63 |
| Şekil 7.5 | Oluşan CH_4 miktarıyla giderilen $KOİ$ arasındaki ilişki..... | 64 |
| Şekil 7.6 | H1 ve H2 test hücrelerinden alınan 10 gr. atıktan oluşan kümülatif CH_4 miktarları..... | 65 |
| Şekil 7.7 | H1 test hücresinden alınan 10 gr. atıktan oluşan günlük CH_4 miktarları | 66 |
| Şekil 7.8 | H2 test hücresinden alınan 10 gr. atıktan oluşan günlük CH_4 miktarları | 66 |
| Şekil 7.9 | H1 hücresinde depo gazı bileşiminin zamanla değişimi | 67 |
| Şekil 7.10 | H2 hücresinde depo gazı bileşiminin zamanla değişimi | 68 |
| Şekil 7.11 | H1 ve H2 test hücrelerindeki CH_4 (%) leri | 68 |
| Şekil 7.12 | H1 ve H2 hücrelerinde pH'nın zamanla değişimi..... | 69 |
| Şekil 7.13 | H1 ve H2 hücrelerinde $KOİ$ 'nin zamanla değişimi..... | 70 |
| Şekil 7.14 | H1 ve H2 hücrelerinde SO_4^{2-} konsantrasyonlarının zamanla değişimi | 71 |
| Şekil 7.15 | H1 test hücresinde depo gazı bileşenleri ile sızıntı suyunun SO_4^{2-} konsantrasyonları arasındaki ilişki | 71 |
| Şekil 7.16 | H2 test hücresinde depo gazı bileşenleri ile sızıntı suyunun SO_4^{2-} konsantrasyonları arasındaki ilişki | 72 |

ÇİZELGE LİSTESİ

| | | |
|-------------|---|----|
| Çizelge 2.1 | Amerika'da ve Avrupa ülkelerinde (%) kuru ağırlık olarak katı atık bileşenleri | 4 |
| Çizelge 2.2 | Çeşitli ülkelerdeki katı atık yönetim teknolojilerinin dağılımı | 4 |
| Çizelge 2.3 | İstanbul katı atıklarının bileşenleri | 11 |
| Çizelge 3.1 | Anaerobik ayrışmayı gerçekleştiren dört grup bakteri tarafından gerçekleştirilen en önemli reaksiyonlar | 20 |
| Çizelge 4.1 | Depolama yaşı ve gaz konsantrasyonları arasındaki ilişki | 27 |
| Çizelge 4.2 | Tipik depo gazı bileşenleri | 36 |
| Çizelge 4.3 | Depo gazı içerisindeki bazı iz bileşenler ve konsantrasyonları | 36 |
| Çizelge 5.1 | A.B.D.' deki bazı depo sahalarında ölçülen CH ₄ oluşum hızları | 47 |
| Çizelge 7.1 | Odayeri katı atık depo sahasına gelen atıklar üzerinde yapılan madde grubu analizi sonuçları | 61 |
| Çizelge 7.2 | Katı atıkların organik kısmına ait özellikler | 61 |
| Çizelge 7.3 | H1 ve H2 hücrelerinde depo gövdesinin farklı derinliklerinde ölçülen aylık ortalama sıcaklık değerleri | 73 |

ÖNSÖZ

Katı atık uzaklaştırılması ve bertarafı özellikle kentsel bölgelerde önemli bir çevre problemi teşkil etmektedir. En ekonomik bertaraf metodu olan düzenli depolama; atığın kontrollü şartlar altında inert ve stabilize olmuş maddelere dönüşüncüye kadar ayrışmasına imkan vermektedir. Düzenli katı atık depo sahalarından kaynaklanan en önemli problemler depo gövdesinde mikrobiyolojik reaksiyonlar sonucunda oluşan depo gazı ve yüksek kirlilikteki sızıntı suyudur. Gaz oluşumu depo sahalarında uzun yıllar devam ettiği gibi hava yoluyla taşınabilmekte ve insan ve çevre sağlığını çeşitli yollarla tehdit etmektedir. Muhtemel tehlikelerin önlenmesi için gazların mutlaka kontrol altına alınması gerekmektedir.

Bu çalışmada, Odayeri Katı Atık Depolama Sahasında teşkil edilen test hücrelerinde nem muhtevasının katı atık depo sahalarındaki depo gazı bileşimi ve sızıntı suyu özelliklerine etkisi ile, atıkların anaerobik ayrışması ve gaz oluşumuna muhtelif faktörlerin etkileri araştırılmıştır.

Çalışmanın yönlendirilmesinde ve yürütülmesinde büyük katkıları, gösterdiği yakın alaka ve desteği dolayısıyla sayın hocam, Doç. Dr. Ahmet Demir'e şükranlarımı sunarım.

Arazi ölçekte yapılan bu çalışmanın Odayeri Katı Atık Düzenli Depolama Tesisinde gerçekleşmesini sağlayan başta Prof. Dr. Adem Baştürk olmak üzere, İSTAÇ A.Ş. elemanlarına ve saha çalışmalarındaki yardımlarından dolayı Harita Müh. Suphi Çağlar'a ve Bölüm Başkanımız Prof. Dr. Ferruh Ertürk'e teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmanın her kademesinde ilgi ve yardımını esirgemeyen Çevre Yüksek Mühendisi Bestamin Özkaya'ya, manevi desteklerinden dolayı aileme içten teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Katı atık düzenli depo sahalarında atıkların anaerobik ayrışması sonucu oluşan depo gazları metan, karbondioksit ve eser miktarlarda uçucu organik bileşiklerden oluşmaktadır. Depo gazı içerisinde bulunan organik bileşiklerin insan ve çevre sağlığına olumsuz etkisi ve önemli miktarlarda yüksek enerji kapasitesine sahip metan bulunması bu gazların kontrolü gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Katı atık düzenli depo sahalarının büyük birer biyoreaktör olarak düşünölmeye başlaması ile depo gazı içerisindeki metanın enerjiye dönüştürölerek değeriendirilmesi görüőü daha da yaygınlaşmıştır. Bu sebeple, depo sahalarında meydana gelen ayrışma proseslerinin hızlandırılması ve atıkların ayrışması için gerekli optimum şartların sağlanması için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Nem muhtevasının biyolojik ayrışma proseslerini etkileyen en önemli faktörlerden biri olması, ve atıkların nem muhtevalarının artırılmasının uygulama açısından en basit yöntem olması sebebiyle bu yöntem yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, İstanbul'un Avrupa yakasında oluşan katı atıkların bertaraf edildiği Odayeri Katı Atık Düzenli Depolama Tesisi'nde teşkil edilen kontrollü test hücreleriyle, katı atık düzenli depo sahalarında meydana gelen ayrışma prosesleri ve nem muhtevasının artırılmasıyla bu proseslerde meydana gelen değışiklikler tesbit edilmiştir. Ayrıca yapılan laboratuvar çalışmalarıyla İstanbul'un Avrupa yakasında oluşan katı atıkların metan potansiyeli belirlenmiştir.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmaları katı atık analizleri, sızıntı suyu analizleri ve gaz analizleri olmak üzere üç başlık altında toplamak mümkündür. Odayeri depolama sahasına Baruthane, Halkalı ve Yenibosna aktarma istasyonlarından gelen atıkların organik madde muhtevaları, daha sonra, biyolojik metan potansiyeli (BMP) belirlenmiş, ayrıca giderilen 1 gr. KOİ'ye karşılık oluşacak metan miktarı tesbit edilmiştir. H1 ve H2 test hücrelerine atıklar depolandıktan yaklaşık 8 ay sonra depo gövdesinden alınan atık numunelerinde de aynı analizler gerçekleştirilmiş ve nem muhtevası bakımından zenginleştirilmiş H2 hücresinde metan potansiyelinin daha düşük olduğu, buna göre bu hücrede ayrışmanın daha hızlı gerçekleştiği belirlenmiştir.

H1 ve H2 test hücrelerinde oluşan sızıntı sularında anaerobik ayrışma safhalarının belirlenmesinde önemli olan pH, KOİ ve sülfat analizleri gerçekleştirilmiştir. H2 test hücresinde anaerobik mikroorganizmaların faaliyetleri için gerekli olan optimum pH değerlerine daha kısa sürede ulaşılmıştır. Sızıntı suyunun KOİ değeri başlangıçta her iki hücrede de yüksek konsantrasyonlarda iken, metan safhasına geçişle birlikte organik asit konsantrasyonlarındaki azalma dolayısıyla KOİ konsantrasyonları da azalmış, ve bu durum H2 hücresinde daha kısa sürede gerçekleşmiştir. Ortamda sülfat mevcut iken metan bakterileri faaliyetlerini gerçekleştiremediğinden sülfat konsantrasyonlarının yüksek olduğu ilk safhalarda metan üretimine rastlanmamış, H2 test hücresinde kararlı metan safhasına kısa sürede ulaşılmasına bağlı olarak sızıntı suyundaki sülfat konsantrasyonlarının kısa sürede daha hızlı bir düşüş gösterdiği tesbit edilmiştir.

Oluşan depo gazı bileşenlerinin belirlenmesi maksadıyla yapılan ölçümlerle, nem muhtevasının artırıldığı H2 hücresinde metan miktarının daha yüksek seviyelerde olduğu, metan oluşum safhasının bu hücrede daha erken başladığı, dolayısıyla nem muhtevasının artırılmasıyla katı atıkların ayrışma hızlarının da arttığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Katı atıklar, düzenli depolama, anaerobik ayrışma, nem muhtevası, depo gazı,

ABSTRACT

Landfill gas is a mixture of gases produced during the anaerobic decomposition of wastes. It is composed of almost equal amounts of methane and carbon dioxide, and trace amounts of volatile organic compounds. Landfill gas must be controlled because of the environmental effects of these organic compounds, and the high energy content of methane. Converting methane to energy become more widespread after considering the landfills as bioreactors. Thus, several methods are improved for acceleration of the decomposition processes that occur in landfills and to obtain the optimum conditions for waste stabilization. It is well known that moisture content is one the most important factors effecting biological decomposition processes and enhancing the moisture content of the solid wastes is the most common way. So, it is being used widely for acceleration of decomposition processes.

Odayeri Sanitary Landfill is being used to remove the solid wastes of the European side of Istanbul. In this study, solid waste decomposition in landfills and the effect of moisture enhancement on these processes are determined in two test cells (H1 and H2) constituted at Odayeri Sanitary Landfill, one of which (H2) was enhanced by leachate addition. Furthermore, methane potential of the European side solid wastes of Istanbul is determined by laboratory studies.

It is possible to classify the studies into 3 categories in the thesis; solid waste analysis, leachate analysis, and landfill gas analysis. The biological methane potential (BMP) of the organic fraction of the wastes is determined after analyzing of the organic matter content of solid wastes that come from Baruthane, Halkalı, and Yenibosna transfer stations to Odayeri Sanitary Landfill. Methane production for 1 gr. of COD removal is also determined by these experimental studies. The same analysis are realized on solid waste samples that were taken from the landfill body after 8 months of operation, and it is determined that methane potential of the samples from enhanced cell (H2) is lower than the H1 test cell. In addition, the temperature variations in the landfill body are determined by temperature probes placed at 0,5; 1,0; 1,5; and 2,0 m. depths, and the decomposition phases are determined by combining these data with other analysis results.

pH, COD, and sulphate analysis are realized on the leachate generated from H1 and H2 test cells. Leachate generated from H2 test cell reached to optimum pH values necessary for the activities of anaerobic microorganisms in a shorter time than leachate generated from H1. At the beginning, COD concentrations were at high levels for both cells. After transition to methanogenic phase, COD concentrations decreased as a result of the decrease in the organic acid concentrations. COD values are decreased to fewer levels in a shorter time in H2 test cell. When sulphate is present in the leachate, methanogenic bacteria cannot realize their activities. In the first stages of the decomposition processes, sulphate concentrations are at high levels, and methane generation is not determined. The decrease of the sulphate concentration in the H2 test cell realized rapidly, because of the acceleration of the decomposition processes by moisture addition.

As a result of the landfill gas composition analysis, it is seen that, the methane quantity of the enhanced cell is higher and the methanogenic steady state phase is reached before the H1 test cell. Because, the moisture content is sufficient in both cells for the microbiological activities in the first stages of the decomposition, especially in hydrolysis and acidogenesis, there are no differences between the time spanned for exceeding these phases. Because of more convenient environmental conditions such as moisture, temperature, and pH the anaerobic decomposition in the H2 test cell realized rapidly.

Keywords: Solid wastes, landfilling, anaerobic degradation, moisture content, landfill gas

1. GİRİŞ

Toplumların sosyo-ekonomik yapıları değiştikçe üretim, dağıtım ve tüketim alışkanlıkları da değişmekte, hızlı gelişme beraberinde başka sorunlar da getirmektedir. Nüfusun artması, yaşam standartlarının yükselmesi ve teknolojiadaki gelişmelerin artması sonucu, katı atık miktarları da son yıllarda önemli miktarlarda artmıştır.

Bu atıkların çevre problemlerine yol açmayacak şekilde bertaraf edilmesi gerekmektedir. Katı atıkların düzenli depo sahalarında bertaraf edilmesi, yakma ve kompostlaştırma gibi diğer alternatif atık bertaraf yöntemleri arasında, ekonomik avantajları dolayısıyla en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Düzenli depolama, maliyetinin düşük olmasının yanında, atıkların kontrollü şartlar altında inert ve stabilize olmuş maddelere dönüşüncüye kadar ayrışmasına da imkan sağlamaktadır.

Atık içerisindeki organik maddeler mikroorganizma faaliyetleri ile ayrışır. Ayrışma proseslerinin başlangıcında, aerobik bakteriler organik maddeleri organik asitlere ve diğer kimyasal bileşiklere dönüştürürler. Atıkların üzeri kapatıldıktan sonra, ortamda bulunan oksijen, bu mikroorganizmalar tarafından hızla tüketilir. Bundan sonra meydana gelen biyolojik ayrışma prosesleri anaerobik mikroorganizmalar tarafından gerçekleştirilir. Bu mikroorganizmaların faaliyetleri sonucu ortaya çıkan temel ürünler depo gazları, yüksek kirletici konsantrasyonlarına sahip sızıntı suları ve stabilize olmuş atıklardır. Anaerobik ayrışma çok yavaş bir prosestir ve ayrışma hızı nem, sıcaklık ve pH gibi pek çok faktöre bağlı olarak değişmektedir.

Depo gazları, atık içerisindeki organik muhtevanın anaerobik ayrışması sonucu ortaya çıkan bir gaz karışımıdır. Depo gazları, hemen hemen eşit miktarlarda metan ve karbondioksit ile çok sayıda uçucu organik bileşikten meydana gelmektedir. Hava kirliliği ve istenmeyen kokulara sebep olan bu organik bileşiklerden dolayı, depo gazları çevresel bir problem olarak değerlendirilmektedir.

Katı atık depo sahalarından kaynaklanan metan ve karbondioksit global ısınmaya neden olan en önemli gazlardır. Ayrıca, metanın hava ile belirli oranlarda karışığında patlayıcılık özelliği vardır. Depo gazlarının diğer bileşenleri ise insan ve çevre sağlığı üzerinde çeşitli etkilere sebep olurlar.

Diğer taraftan, depo gazının en önemli bileşenlerinden biri olan metanın yüksek bir enerji kapasitesine sahip olması sebebiyle, bu gazın bir enerji kaynağı olarak kullanılması yolundaki

çalışmalar son yıllarda artmıştır. Bu maksatla depo gazının elektrik üretimi, araç yakıtı olarak kullanılması, doğal gaza dönüştürülmesi gibi çeşitli alternatifler geliştirilmiştir.

Gerek yeni bir enerji kaynağı olarak kullanılabilmesi ve gerekse yol açtığı çevresel etkiler dolayısıyla, katı atık depo sahalarından oluşan gaz emisyonlarının depolamadan sonra zamanla nasıl değiştiği, gaz oluşumunu etkileyen çevresel faktörler ve bunların gaz oluşumu üzerindeki etkilerinin belirlenmesi gerekmektedir.

7 bölümden oluşan bu tezde katı atık düzenli depo sahalarında meydana gelen ayrışma prosesleri, biyolojik ayrışma proseslerini etkileyen çevresel faktörler ve ayrışma sonucu ortaya çıkan metan, karbondioksit, oksijen ve hidrojen sülfür gibi depo gazlarının önemli bileşenlerinin miktarlarında zamanla meydana değişimler, İstanbul'un Avrupa yakasında oluşan katı atıkların bertaraf edildiği Odayeri depolama alanında teşkil edilen test hücrelerinde incelenmiştir. Tezin 2. bölümünde katı atıkların oluşumu, miktarı, özellikleri ve bertaraf yöntemleri ile İstanbul'da katı atık yönetimi hakkında bilgiler verilmiştir. 3. bölümde katı atıkların ayrışması sırasında depo sahalarında meydana gelen fiziksel, kimyasal ve biyolojik prosesler açıklanmıştır. 4. bölümde katı atık düzenli depo sahalarında depo gazı oluşum safhaları ve bu safhaları etkileyen çevresel faktörler açıklanarak, depo gazı bileşenleri ve kontrol yöntemleri ile depo gazlarının arıtımı ve değerlendirilmesi ile ilgili bilgiler verilmiştir. 5. bölümde katı atık depolama alanlarından oluşabilecek depo gazı miktarının önceden belirlenebilmesi için yapılabilecek çalışmalar ve bu maksatla geliştirilmiş olan bazı modeller hakkında bilgiler verilmiştir. 6. bölümde Odayeri katı atık depolama sahasında depo gazı oluşumunu etkileyen faktörlerin belirlenmesi amacıyla teşkil edilen test hücrelerinde ve laboratuarda yapılan çalışmalar hakkında bilgiler verilmiş, 7. bölümde ise yapılan arazi ve laboratuvar ölçekli çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve değerlendirmeler verilmiştir.

2. KATI ATIK YÖNETİMİ

2.1 Genel

Üreticisi tarafından atılmak istenen, toplumun huzuru ve çevrenin korunması bakımından düzenli bir şekilde bertaraf edilmesi gereken katı madde ve arıtma çamurlarının tümü katı atık olarak tanımlanmaktadır (Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği, 1991). Miktarı her geçen gün artan katı atıkların çevrede yol açtığı olumsuz etkileri nedeniyle, bu atıkların teknik yöntemlerle bertaraf edilme gerekliliği ortaya çıkmıştır.

Uygun değerlendirme ve kazanma yöntemlerinin tesbiti ve uygulanabilmesi amacıyla katı atıkların sınıflandırılması gerekmektedir. Bunun için de çeşitli sınıflandırma şekilleri geliştirilmiştir. Katı atıklar, kaynaklarına göre evsel, ticari, kurumsal ve endüstriyel katı atıklar ile sokak süprüntüleri, inşaat yıkım ve hafriyat atıkları, arıtma tesisi çamurları, tehlikeli atıklar ve hastane atıkları olarak sınıflandırılırken, bileşimlerine göre bir ayırma yapılmak istendiğinde organikler, inorganikler ve küller olmak üzere üç kısımda incelenebilirler.

Katı atık yönetiminin amacı, kaynak israfını önlemek ve kaynak yaratmanın dışında eldeki mevcut kaynaklara göre sistemin daha iyi çalışmasını sağlamaktır. Bu nedenle atıkların bertarafı için yapılan çalışmaların çevreyi en az etkileyecek, çağdaş ve en az masrafla yapılması büyük önem taşımaktadır.

2.2 Katı Atıkların Miktar ve Özellikleri

Katı atık miktarları ülkeden ülkeye ve hatta aynı ülkede kentten kente, yerel koşullara, mevsimlere ve tüketim alışkanlıklarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu değişim insanların sosyo-ekonomik yapısı ile ilgili olmakla beraber, en çok gelir seviyesiyle tüketim ve kullanım alışkanlıklarına bağlıdır. Ülkemizde kişi başına çöp üretimi ortalama 1,39 kg/kişi-gün (D.İ.E., 2000) iken bu değer Avrupa ülkelerinde 1,5-2 kg/kişi-gün, ABD'de ise 3 kg/kişi-gün dür (Gendebien, vd., 1992).

Artan nüfus ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak, katı atıkların kompozisyonunda da değişiklikler ortaya çıkmaktadır. Tüketim alışkanlıklarında meydana gelen değişiklikler sonucu katı atıkların yapısında oluşan değişimlerin sürekli olarak izlenmesi, ve bunun için de sürekli örnekleme yapılması gereklidir (Buenrostro, vd., 2001). Çizelge 2.1'de Amerika ve Avrupa ülkelerindeki katı atık bileşenlerinin ortalama değerleri verilmiştir.

TC Milli Eğitim Bakanlığı
Orman, Deniz İşleri ve Turizm Bakanlığı
Mühür

Çizelge 2.1 Amerika'da ve Avrupa ülkelerinde (%) kuru ağırlık olarak katı atık bileşenleri
(Mutasem, vd., 1997)

| Parametre | Avrupa Ülkeleri | Amerika |
|--------------------------|-----------------|---------|
| Kağıt | 20-42 | 28-50 |
| Yemek atıkları (organik) | 20-50 | 6-18 |
| Sokak süprüntüleri | 12-18 | 5-20 |
| Plastik | 3-8 | 4-10 |
| Cam | 4-12 | 4-12 |
| Tekstil | 2-14 | 1-12 |
| Metal | 3-13 | 3-13 |
| İnert/inorganikler | 1-20 | 0-6 |

2.3 Katı Atık Bertaraf Yöntemleri

Katı atıkların çevreye ve insan sağlığına zarar vermeden etkisiz hale getirilmesi ve ayrıca içerisindeki yeniden değerlendirilebilecek, ekonomik değeri yüksek maddelerin ekonomiye kazandırılması geri kazanma, yakma, kompostlaştırma ve düzenli depolama gibi işlemlerle gerçekleştirilir. Bu tekniklerin seçiminde, katı atık kompozisyonu, yoğunluğu, nem oranı, karbon/azot oranı ve yakıt değeri, göz önünde bulundurulması gereken önemli özelliklerdir. Çizelge 2.2'de bazı ülkelerde atık bertarafında kullanılan yöntemler verilmiştir.

Çizelge 2.2 Çeşitli ülkelerdeki katı atık yönetim teknolojilerinin dağılımı
(Leao, vd., 2001)

| Ülke | Katı atık bertaraf teknolojisinin kullanıldığı oran (%) | | | |
|------------|---|-------|-----------------|--------------|
| | Düzenli depolama | Yakma | Kompostlaştırma | Geri Kazanma |
| Avustralya | 82 | 2,5 | - | 15,5 |
| Kanada | 80 | 8 | 2 | 10 |
| Fransa | 45 | 42 | 10 | 3 |
| Almanya | 46 | 36 | 2 | 16 |
| Yunanistan | 100 | - | - | - |
| İrlanda | 97 | - | - | 3 |
| İtalya | 74 | 16 | 7 | 3 |
| Hollanda | 45 | 35 | 5 | 15 |
| Portekiz | 85 | - | 15 | - |
| İspanya | 64 | 6 | 17 | 13 |
| İngiltere | 88 | 6 | - | 6 |
| A.B.D. | 67 | 16 | 2 | 15 |

2.3.1 Geri kazanma

Atık içerisinde geri kazanılabilir madde (cam, plastik, kağıt, metal vb.) miktarı yeterli ise geri kazanım mutlaka yapılmalıdır. Geri kazanılabilir malzemeler diğer atıklar ile karışık toplanmaları halinde ekonomik değerlerinde çok büyük kayıplar meydana gelmektedir. Bu yüzden geri kazanım çalışması mutlaka kaynağında ayrı toplamayı içermelidir. Kaynağında ayırma uygulanmaması halinde, yerleşim merkezlerinden toplanan atıkların tamamı geri kazanım tesisinde işlenmektedir. Diğer yandan elde edilen malzemelerin değerinde de çok büyük kayıplar meydana gelmektedir. Ayrı toplamanın bir başka avantajı ise, geri kazanma tesislerinin projelendirilmesi ve işletilmesinde kolaylıklar sağlamasıdır.

Geri dönüşüm; atıkların özelliklerinden faydalanarak içindeki bileşenlerin fiziksel, kimyasal ve biyokimyasal yöntemlerle başka ürünlere veya enerjiye çevrilmesidir. Tekrar kullanımın uygulanması durumunda ürünün kullanım süresi uzatılmış olur (Daskalopoulos, vd., 1997a).

2.3.2 Yakma

Yakma katı atık hacmini azaltmak için toplanan çöplerin özel tesislerde yakılmasından ibarettir. Bu yöntem, hacim ve ağırlık küçültme oranının yüksek olması nedeniyle depolama yeri sıkıntısının çekildiği durumlarda, hastane atıklarında olduğu gibi son ürünün stabilize edilmesinin gerekli olduğu hallerde kullanılan bir yöntemdir. Katı atıkların yakılabilmesi için atığın yakmaya uygun olması ve ikincil bir yakıtı ihtiyaç duyulmaması önemlidir. Aksi takdirde yakma ekonomik olmamaktadır. Yakma işlemi sonucu kalan inorganik atıkların bertarafı için nihai bir düzenli depolamaya ihtiyaç bulunmaktadır. Yakma genellikle düzenli depolama için yer sıkıntısı olan ülkelerde, gerekli depo alanı ihtiyacını azaltması için yaygın olarak kullanılan yöntemdir.

Bu yöntem son yıllarda depolama alanlarının azlığı ve arazi fiyatlarının artması sebebiyle birçok ülke tarafından benimsenmiş ve uygulanmaktadır. Geri dönüşümü mümkün maddelerin ayrılmasından sonra, katı atık nem oranı ve kalorifik değerinin uygun olması halinde, gerekli hava kalitesi standartlarının sağlanması şartıyla bu yöntemin uygulanması ekonomik ve çevresel açıdan faydalı olabilir. Söz konusu yöntem uygulanmadan önce mutlak surette katı atıkların yakma işlemi için gerekli şartları sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmelidir (Daskalopoulos, vd., 1997b).

2.3.3 Kompostlaştırma

Katı atık içerisindeki organik kısımlar (mutfak atıkları, arıtma tesisi çamurları vb.) kompost yapılarak tekrar kullanılabilir hale getirilebilir. Kompost, katı atık içerisindeki organik kısımların biyokimyasal süreçten geçirilerek humusa benzer bir malzemeye dönüştürülmesidir. Katı ve sıvı atıklar içindeki organik maddeler çeşitli mikroorganizmalar vasıtasıyla daha basit bileşiklere, bilhassa CO₂ ve H₂O'ya dönüşür. Mikroorganizmaların metabolizma olayları neticesinde açığa çıkan ısı ile materyal 60-65 °C'ye kadar ısınır. Kompostlaştırma aerobik ve anaerobik olmak üzere başlıca iki yolla yapılır. Anaerobik süreçte dönüşüm esnasında yan ürün olarak biyogaz da elde edilmektedir. Atıkların uygun kısımları kompost yapılsa bile, yaklaşık %30'luk bir kısmının nihai olarak başka bir usulle uzaklaştırılması gerekmektedir (Daskalopoulos, vd., 1997b).

2.3.4 Düzenli depolama

Düzenli depolama; katı atıkların çevre sağlığına uygun şekilde, tabanı kil ve geomembranla (plastik folye) geçirimsiz hale getirilmiş bir araziye dökülüp sıkıştırılması ve üzerinin toprakla örtülmesini, oluşacak metan gazının bacalar vasıtasıyla toplanmasını ifade eder. XX. yüzyılın ortalarına kadar hemen hemen tüm atıklar doğal topoğrafyası uygun olan sahalara kontrolsüz ve açık şekilde boşaltılmaktaydı. Hacmi azaltmak için atıkların yakılması çok sıkça görülmekteydi. Dereler, dış eğimli araziler, taşkın yatakları ve kullanılmayan maden ocakları en yaygın atık alanları olarak kullanılıyordu. II. Dünya savaşından sonra "düzenli atık depolama" uygulamaları yaygın olmaya başladı. Böyle bir düzenli atık deposu yaklaşık 5 m.'yi bulan çöp biriktirme ünitelerinden oluşmaktaydı. Atık deposundaki günlük çalışma sonunda her bir ünite içerisindeki atık 15-20 cm kalınlığındaki doğal örtü tabakası ile kapatılmaktaydı.

Düzenli depolama alanları, sentetik geçirimsiz tabakalara sahip olmakla beraber, 1970'li yıllara kadar alanlarda geçirimsiz membranlar yaygın değildi. Günümüzde çift tabakalı membranlar kullanılmaya başlanmıştır. Düzenli atık depolarındaki atığın kontrollü olarak depolanması; kemiriciler, böcekler ve benzeri zararlı asalakları büyük ölçüde azaltmış, böylece görünüş olarak ayrı bir estetik kazandırmıştır. Modern bir atık depolama ünitesi çevreyi ve ekolojik dengeyi bozmayacak uygun mühendislik özelliklerine sahip bir arazi üzerine yapılması gereklidir.

Katı atık depolama tesislerinin yapım amacı; dizayn eden mühendis tarafından, yeterli ve sağlıklı bir depolamayı uygun bir maliyetle gerçekleştirmek olup, böyle bir sahaya yakın olan bir yerleşim için ise katı atıkların çevreye zarar vermemesi şeklinde açıklanabilmektedir.

Meskun bölgelerde evlerden atılan evsel katı atıklar, park, bahçe ve yeşil alanlardan atılan bitki artıkları, iri katı atıklar, zararlı atık olmamakla birlikte evsel katı atık özelliklerine sahip sanayi ve ticarethane katı atıkları, evsel atık su arıtma tesislerinde oluşan arıtma çamurları, zararlı atık sınıfına girmeyen sanayi arıtma tesisi çamurları katı atık depo sahalarında depolanmaktadır.

Evsel ve evsel nitelikli endüstriyel katı atıkların öncelikle geri kazanılması esastır. Geri kazanmanın ekonomik ve teknik olarak mümkün olmaması halinde, atıklar çevre sağlığının korunması amacıyla öncelikle enerji üretimi veya kompost elde edilmesi maksatlarıyla termik veya biyolojik işlemlere tabi tutulmalıdır. Ancak termik veya biyolojik işlemlere elverişli olmayan veya bu işlemler sonucu yan ürün olarak ortaya çıkan atıkların depolanması zorunludur.

Katı atıklar, özellikle büyük şehirlerde önemli çevre problemlerine yol açmaktadırlar. Bu atıkları zararsız hale getirmek için kullanılan farklı yöntemler arasında düzenli depolama, ekonomik avantajlarına bağlı olarak atık bertarafında kullanılan en yaygın yöntemdir. Dünyada oluşan katı atıkların %95'i günümüzde depo sahalarında bertaraf edilmektedir. Düzenli bir depo sahasında atıklar ince tabakalar halinde yere serilir. Daha sonra hacimlerinin azaltılması için sıkıştırılır ve uygun bir malzeme ile üzerleri örtülür. Ayrışma prosesinin başlangıcında, ortamda gaz fazında oksijen (O_2) mevcutken, atık içerisindeki organik muhteva, aerobik bakteriler tarafından organik asitlere ve diğer kimyasal bileşiklere dönüştürülür. Çöp yığını üzerine daha fazla atık doldurulduğunda ya da toprak ile örtüldüğünde, bu aerobik bakteriler mevcut O_2 'i hızla tüketirler. Bundan sonra ayrışma işlemi anaerobik bakteriler tarafından sürdürülür. Bütün bu faaliyetler sonucunda ortaya çıkan temel ürünler sızıntı suyu olarak adlandırılan bir sıvı, depo gazı olarak adlandırılan bir gaz ve stabilize olmuş atıklardır (Iglesias, vd., 2000).

2.3.4.1 Düzenli depo sahalarının tasarımı ve işletilmesi

Düzenli depo sahalarının tasarımı ve işletilmesi, depo gazı yönetimiyle çok yakından ilgilidir. Düzenli depolama sahalarının tasarımı ve inşası sırasında, depo gazı kontrol sistemi veya depo gazı toplama ve yakma sistemi, ve sızıntı suyu toplama sistemlerinin de kurulması gerekmektedir. Depo sahalarının işletilmesi de depo gazı ve sızıntı suyu oluşumunu

etkilemektedir. Bu nedenle, depo sahalarının öncelikle çok iyi bir şekilde tasarlanması, inşası ve en uygun ve ekonomik yolla işletilmeleri gerekmektedir (Pohland ve Al-Yousfi, 1994).

2.3.4.2 Saha seçimi

Katı atık düzenli depo sahalarının halk sağlığı ve çevre üzerindeki etkilerini minimize edecek şekilde tasarlanmaları gerekmektedir. Depolama yapılacak saha çok dikkatli bir şekilde seçilmelidir. Saha seçiminde dikkat edilmesi gereken temel hususlar şunlardır:

- Alan ihtiyacı,
- Civardaki yapılar,
- Hidrojeolojik karakteristikler ve yeraltı suyu seviyesi,
- İklimsel şartlar,
- Örtü malzemesinin temin edilebilirliği,
- Yerleşim birimine uzaklık.

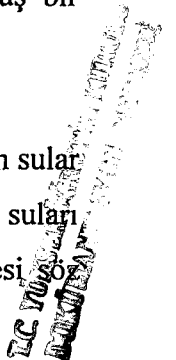
Katı atık depo sahalarında çevre kirliliği açısından en önemli problem sızıntı suyu oluşumudur. Her türlü kirletici parametreyi ihtiva eden sızıntı suyu, yüzeysel suların ve yeraltı su kaynaklarının kirlenmesine neden olmaktadır. Sızıntı suyunun bu olumsuz etkisini önlemek için depo sahasının tabanı geçirimsiz hale getirilmesi gerekmektedir.

Yüzeysel ve yer altı sularına sızıntı suyu ve gazların sızmasını önlemek için saha tabanının uygun bir malzemeyle örtülmesi gereklidir. Bu malzemeler kil ve bentonit (sodyum, kalsiyum, montmorillant), polimerler, çimento, uçucu küller veya asfaltik beton karışımı olabileceği gibi, klorlu polietilen (CPE), kloro şülfonat polietilen (CPSE veya Hipalon), etilen kopolimer bitumen (ECB), neopren, yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), polipropilen veya polivinil klorid (PVC) de olabilir (Gendebien, vd., 1992). Sızdırmazlık tabakasının permeabilitesinin 10^{-7} cm/sn den küçük olması gerekmektedir.

Saha tabanının hazırlanması sırasıyla şu kademelerle gerçekleşir;

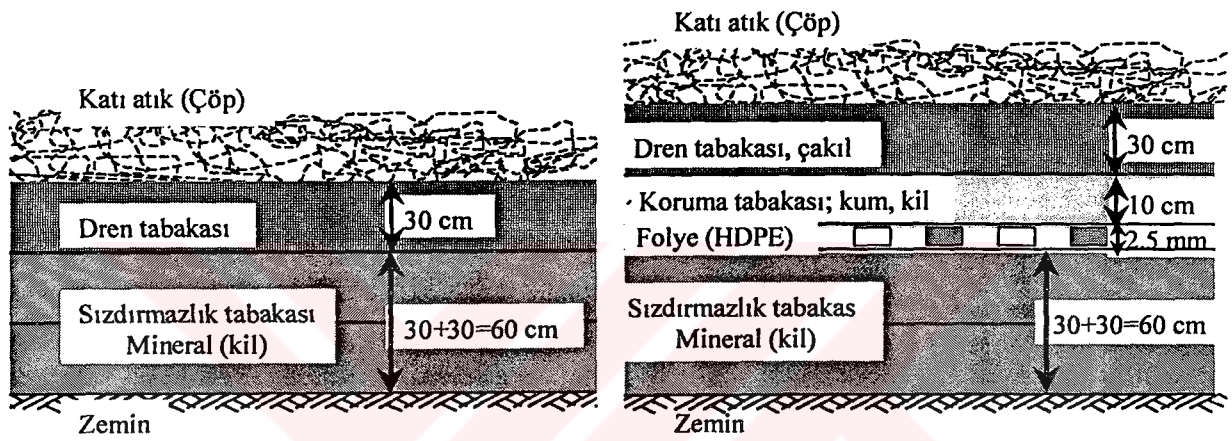
- Sahanın düzeltilmesi,
- Kontrol tabakasının altına uygun malzemenin serilmesi,
- Polimerik tabakanın serilmesi,
- Membranı çevresel etkilerden korumak için 30-40 cm. kalınlığında iyi öğütülmüş bir malzemeyle kaplanması.

Yüksek su muhtevasına sahip olan çöplerin suları, yağmur suyu ve kar erimesi ile oluşan sular depolama esnasında çöp suyu ile karışarak sızıntı suyunu oluştururlar. Oluşan bu sızıntı suları için gerekli tedbirler alınmadığı takdirde, bu suların yeraltı suyuna karışması tehlikesi

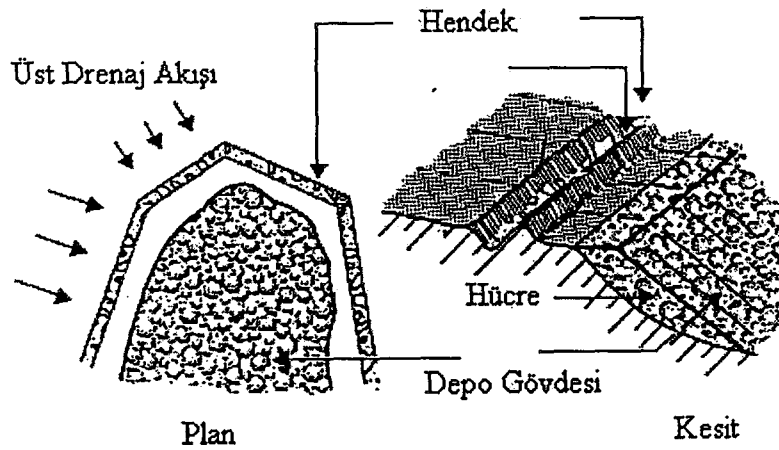


konusudur. Saha tabanı hazırlanırken esas gaye, sızıntı suyunun depo sahasından dışarı çıkmasını engellemek olmalıdır. Kil ve geomebran tabakaları ile bunu sağlamak mümkündür. Şekil 2.1'de katı atık düzenli depo sahalarında kullanılan sızdırmazlık tabakaları gösterilmiştir.

Depo sahalarında yüzeysel suların toplanması genellikle daha kolaydır ve depo sahasının etrafına Şekil 2.2'de görüldüğü gibi hendeklerin açılması bunu sağlamak için yeterlidir. Ancak yer altı sularının toplanması bu kadar basit bir işlem değildir.



Şekil 2.1 Muhtelif depo tabanı geçirimsizlik sistemleri (Demir, 1999)



Şekil 2.2 Depo sahasından yüzey sularını hendeklerle uzaklaştırılması (Gendebien, vd., 1992)

Alan metodu daha çok doğal çukurlarda uygulanır. Örtü malzemesinin genellikle başka yerlerden taşınması gerekmektedir. Aşırı miktarda sızıntı suyu olduğundan ve işletme sırasında kontrolün çok zor olması sebebiyle yaygın olarak kullanılmamaktadır.

Hücre metodunda katı atıklar daha önceden hazırlanmış alanlara depolanır. Özellikle son yıllarda, ekonomik ve emniyetli olması sebebiyle, hücre metodunun kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır.

2.4 İstanbul Katı Atık Yönetimi

Türkiye nüfusunun yaklaşık 1/5'ini barındıran İstanbul, gerek tarihi ve kültürel yapısı ve gerekse endüstrisi sebebiyle her zaman bir cazibe merkezi olmuştur. Endüstriyel tesislerin burada yoğunlaşması, kentin diğer bölgelerden sürekli olarak göç almasına sebep olmaktadır. Nüfustaki bu hızlı artış, pek çok sorunu da beraberinde getirmektedir. Bu problemlerden en önemlisi katı atıkların bertarafı işlemidir.

İstanbul' da 1953 yılına kadar denize dökülen çöpler, bu tarihten sonra Levent-Sanayi Mahallesi, Seyrantepe, Ümraniye, Mustafa Kemal Mahallesi gibi şehre yakın yerlere düzensiz olarak depolanmıştır. Bu bölgelere yakın yerlerin gecekondulaşması üzerine buralar terk edilmiş, Habibler, Ümraniye-Hekimbaşı, Yakacık, Aydınli, Halkalı, Şişli-Feriköy ve son olarak da Kemerburgaz-Hasdal bölgesine çöpler kontrolsüz bir şekilde depolanmıştır. Bu bölgelere dökülen çöplerin muhteviyatı zamana bağlı olarak değişimler göstermiş olup Çizelge 2.3'de İstanbul'da oluşan katı atıkların bileşenlerinin tespiti için yapılmış olan madde grubu analizlerinin sonuçları verilmiştir.

Çizelge 2.3 İstanbul katı atıklarının bileşenleri (%)

| Parametre | Baştürk, (1979) | WHO/UNDP, (1981) | CH2M Hill, (1992) | Öztürk vd, (1996) |
|---------------|--------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| Kül | 29 | 14,6 | 15 | 13,2 |
| Organik madde | 46,5 | 60,6 | 45 | 48 |
| Kağıt | 19 | 18,8 | 14,5 | 8,4 |
| Plastik | 3,5 | 3,1 | 9,5 | 11 |
| Cam | 3,0 | 0,7 | 3,8 | 4,6 |
| Tekstil | 3 | 3,1 | 5,6 | 2,9 |
| Metal | 1,5 | 1,5 | 2,2 | 2,3 |
| Diğerleri | 1,5 | 6,9 | 4,4 | 6,3 |
| Çocuk bezi | - | - | - | 3,2 |

İstanbul'da 1990 yılı için kişi başına ortalama atık oluşumu Avrupa yakasında 0,66 kg/kişi-gün, Asya yakasında 0,58 kg/kişi-gün olarak belirlenmiştir (CH2M-Antel,1992). 1992 yılında CH2M Hill'in yapmış olduğu fizibilite çalışması sonucunda, şehrin her iki yakasına birer adet katı atık düzenli depo sahası, 3'er adet katı atık aktarma istasyonu, bir tıbbi atık yakma tesisi ve bir adet kompost tesisi yapılması ve eski depolama alanlarının kapatılarak rehabilite edilmesi planlanmıştır (CH2M-Antel, 1992). Düzenli depolama sahaları ve tıbbi atık yakma tesisi 1995 yılında, kompost tesisi ise 2001 yılında işletmeye alınmıştır. 1995 yılından bu yana şehrin Avrupa Yakası katı atıkları Eyüp Odayeri Mevkiinde, Anadolu yakası katı atıkları ise Şile Kömürcüoda mevkiinde depolanmaktadır. Her iki depolama sahası da, 25 yıllık atık depolama kapasitesini karşılayacak şekilde planlanmış olup, yüzey yapısı tahrip edilmiş, kısmen veya tamamen terkedilmiş maden ocağı alanlarından seçilmiştir.

Şehir merkezinden toplanan atıklar, ilçe belediyeleri tarafından kendi bölgelerindeki aktarma istasyonlarına getirilerek, buradan silolarla katı atık düzenli depo sahalarına taşınmakta ve uygun teknolojilerle bu sahalarda bertaraf edilmektedir. Ayrıca özel araçlarla toplanan tıbbi atıklar da, yine buradaki tıbbi atık yakma tesisinde bertaraf edilmektedir (Demir, vd., 2001a).

2.4.1 İstanbul tıbbi atık yakma tesisi

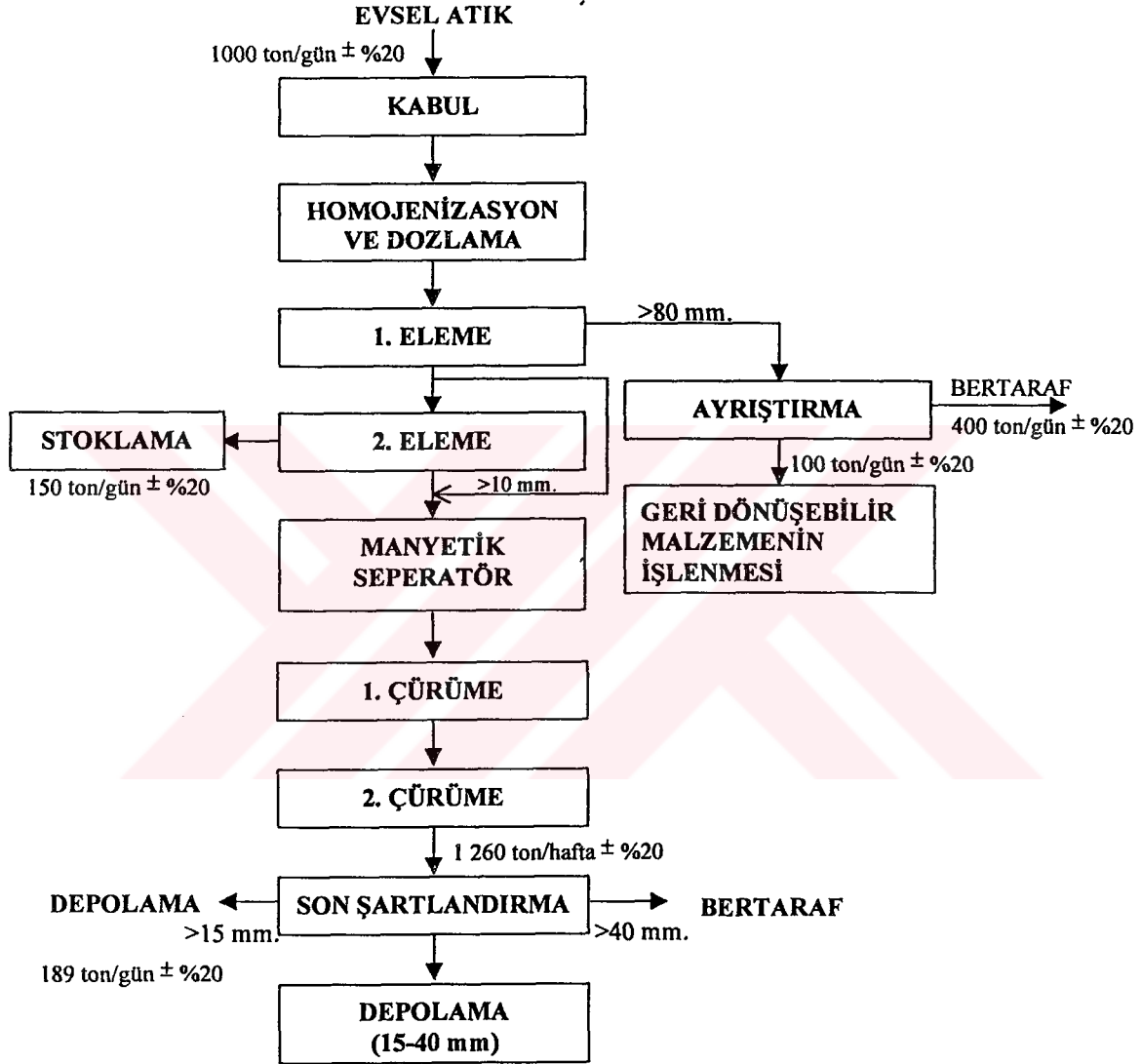
İstanbul'da oluşan tıbbi atıkların toplanması ve yakılması için ayrı bir sistem uygulanmaktadır. Tıbbi atıklar ayrı olarak sıkıştırmasız özel araçlarla toplanarak Odayeri düzenli depolama sahasındaki tıbbi atık yakma tesisine götürülmektedir. Buraya gelen tıbbi atıklar 1200 °C'de yakılarak bertaraf edilmektedir. Bu suretle atıklarda % 95 hacimsel, %70 kütleli azalma meydana gelmektedir. Yapılan tıbbi atık yakma tesisi 24 ton/gün kapasiteye sahiptir (Demir, vd., 2001b).

2.4.2 İstanbul kompost tesisi

İstanbul Büyükşehir belediyesi entegre katı atık yönetimi çerçevesinde 1000 ton/gün kapasiteli bir kompost tesisi projelendirilmiş ve inşaatı tamamlanarak işletmeye alınmış durumdadır. Tesise ilk aşamada Avrupa yakasında toplanan karışık evsel katı atıklar getirilmektedir.

Projeden amaç; depolama alanlarına gönderilen atık miktarını azaltmak ve katı atıkların değerlendirilebilir kısmını ekonomiye kazandırmaktır. Günde yaklaşık olarak 10000 ton evsel katı atığın oluştuğu İstanbul'da atıkların tamamına yakını şehrin iki yakasındaki düzenli katı atık depo sahalarında bertaraf edilmektedir. İstanbul Katı Atık Kompostlaştırma Tesisinde üretilcek

kompost miktarı 250 ton/gün olarak hedeflenmiş ve bu miktarın 100 ton/gün'lük kısmının yeşil alanların bakım ve iyileştirilmesi gibi alanlarda kullanılması, geriye kalan 150 ton/gün'lük kısmının ise maden ocaklarının ıslah edilmesi, tarım alanlarının iyileştirilmesi gibi diğer sahalarda değerlendirilmesi planlanmıştır. Şekil 2.4'de İstanbul Evsel Katı Atık Kompost Tesisi'ne ait proses akım şeması gösterilmiştir.

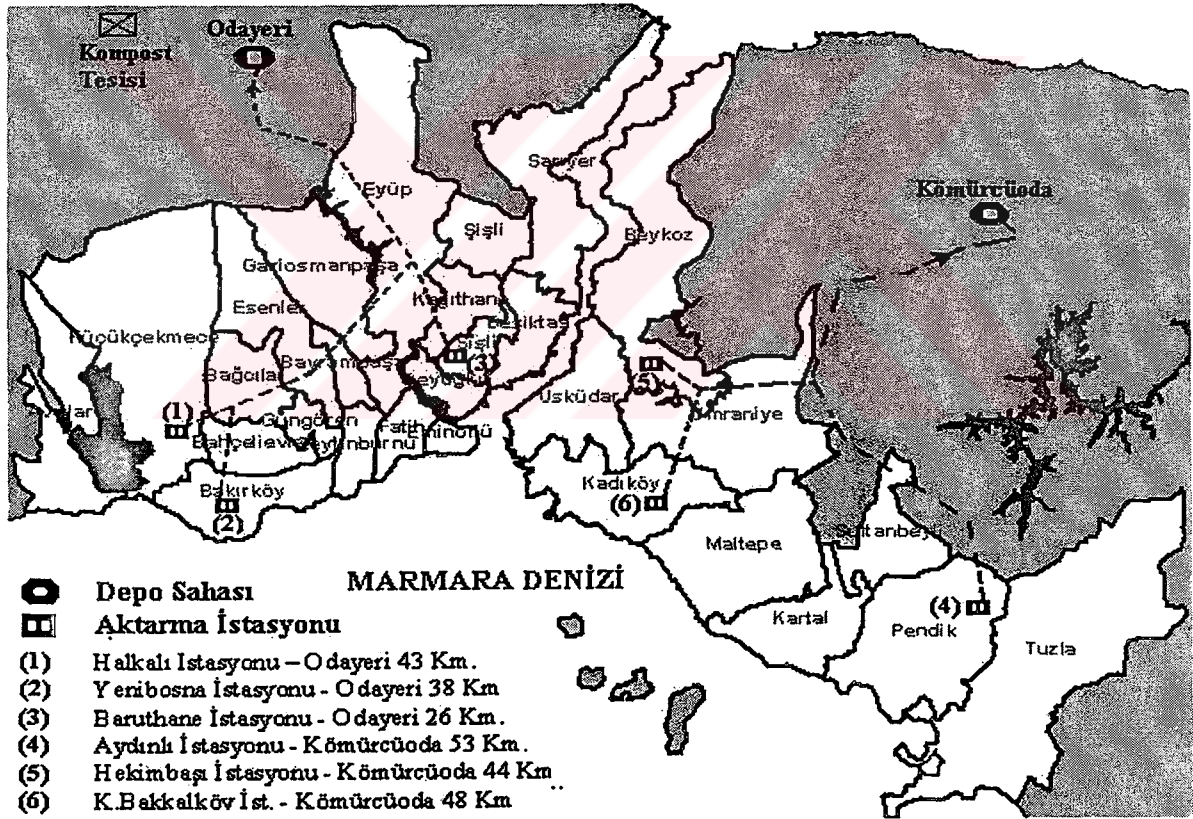


Şekil 2.4 İstanbul evsel katı atık kompost tesisi proses akım şeması
(Demir, vd., 2001c)

2.4.3 İstanbul düzenli katı atık depolama tesisi

İstanbul'un katı atıklarının bertaraf edildiği ve şehrin her iki yakasında yer alan katı atık bertaraf sahalarının yeri, yüzey yapısı tahrip edilmiş, kısmen veya tamamen terk edilmiş eski

maden ocağı alanlarından seçilmiştir. Avrupa yakasındaki Odayeri Düzenli Depolama Sahası hafif eğimli bir vadide kurulmuş olup yer yer kil, kum, çakıl ve kömür içeren tabakalarla kaplıdır. Anadolu yakasındaki Kömürcüoda Düzenli Depolama Sahası topoğrafik ve jeolojik açıdan Avrupa yakasındaki sahaya benzemektedir. Her iki saha da 25 yıllık çöp kapasitesini karşılayacak şekilde planlanmıştır. Odayeri Düzenli Depolama Sahası için 73 hektarlık bir alan öngörülmüş olup bu alanın 37 hektarlık kısmı kullanılmıştır. Kömürcüoda Düzenli Depolama Sahası için ise 61 hektarlık bir alanın halihazırda 20 hektarlık kısmı kullanılmıştır. İstanbul'daki düzenli depolama sahaları, yürürlükte olan Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliğinde belirtilen kriterler dikkate alınarak kademe kademe inşa edilmektedir. İstanbul'daki katı atık düzenli depo sahaları ve aktarma istasyonlarının yerleri Şekil 2.5'de gösterilmiştir.



Şekil 2.5 İstanbul'daki aktarma istasyonlarının ve depo sahalarının konumu
(Baştürk, vd., 2001)

3. KATI ATIK DÜZENLİ DEPO SAHALARINDA AYRIŞMA PROSESLERİ

Düzenli depolama, yakma ve kompostlaştırma gibi diğer alternatif atık bertaraf teknolojilerine nazaran maliyet açısından avantajlı olup yaygın olarak kullanılmaktadır. Depolamada karşılaşılan problemler tamamen çözülemediği halde, düzenli depolama çevresel açıdan kabul edilebilir bir yöntem olarak benimsenmiştir.

Katı atık düzenli depo sahaları, atıkların sıkışması, iklim, su muhtevası gibi şartlarla kontrol edilen biyolojik, kimyasal ve fiziksel reaksiyonların meydana geldiği bir reaktör olarak düşünülebilir. Böyle bir reaktörde (Şekil 3.1) katı faz (atık), sıvı faz (sızıntı suyu), ve gaz fazı (biyogaz) olmak üzere 3 faz mevcuttur (Lamborn, 1999).



Şekil 3.1 Depo sahalarında madde dönüşümü

Düzenli depo sahalarında atığın ayrışması ve stabilize olması sırasında gerçekleşen proseslerin anlaşılabilmesi için öncelikle, atığın depolandıktan sonra maruz kaldığı parçalanma proseslerinin anlaşılması gerekmektedir. Bu prosesler eş zamanlı olarak gerçekleşmelerine ve birbirleriyle yakından ilişkili olmalarına rağmen, genel olarak kimyasal, biyolojik ve fiziksel prosesler olmak üzere 3 gruba ayrılırlar. Gaz, sızıntı suyu, artık madde ve biyolojik olarak stabil hale gelmiş nihai ürünler, bu üç prosesin gerçekleşmesiyle meydana gelir (Reinhart ve Al-Yousfi, 1996). Biyolojik prosesler, atık stabilizasyonu sırasında gerçekleşen en önemli prosesler olup depo gazı oluşumunda birinci derecede etkilidir.

Düzenli depo sahalarında katı atıkların ayrışması sırasında, organik maddelerin diğer anaerobik ortamlarda ayrışması sırasında meydana gelen prosesler gerçekleşmektedir. Özellikle ilk kurulan depo sahalarından daha büyük ve daha derin olan modern depo sahaları, anaerobik ayrışmanın en iyi şekilde gerçekleşebileceği şartları sağlayacak şekilde tasarlanmışlardır.

Depolanan atıklar, farklı nem muhtevasına sahip organik ve inorganik maddelerin çeşitli oranlardaki karışımlarından meydana gelir. Düzenli depo sahalarında atıkların ayrışması

oldukça karmaşık bir prosestir. Fiziksel ayrışma, farklı materyallerin atıklardan ayrılması ve ayrışma sonunda atığın fiziksel özelliklerinde meydana gelen değişiklikler olarak tanımlanabilir. Kimyasal ayrışma, atık içerisindeki maddelerin sızıntı suyuyla çözünmesiyle gerçekleşir. Çökelme reaksiyonları, adsorpsiyon ve desorpsiyon reaksiyonları da kimyasal ayrışma sırasında meydana gelir. Biyolojik ayrışma ise, depo sahasında atıkların maruz kaldığı en önemli prosestir. Biyolojik ayrışma, pH ve redoks potansiyelleri gibi değişkenler üzerindeki etkisinden dolayı fiziksel ve kimyasal ayrışmayı da kontrol eden prosestir.

Katı atıklar, sadece organik maddelerden oluşmazlar ve depolanan atıkların en önemli özelliklerinden biri, bu atıkların heterojenliğidir. Katı atıkların yaklaşık olarak %75'i ayrışabilir organik maddelerden oluşmakta olup, bu organik kısım yiyecek ve bahçe atıkları gibi kolay ayrışabilen maddeler, kağıt ve tekstil gibi yavaş ayrışabilen maddeler ve plastik gibi zor ayrışabilen maddelerden oluşmaktadır (Gendebien vd., 1992).

Genel olarak, atık içerisindeki yiyecek atıklarının tamamının ve kağıt içeriğinin 2/3'lük kısmının metan (CH_4) ve karbondioksit (CO_2) oluşturmak üzere ayrıştığı, buradan hareketle depolanan atığın tamamen ayrışmadığı ve bir kısmının CH_4 ve CO_2 dışındaki nihai ürünlere dönüştüğü, ve buna göre metanojenik şartlar altında bütünüyle ayrışmayan bazı maddeler olduğu söylenebilir. Depo sahası ortamında biyolojik olarak ayrışmayan veya fiziksel olarak korunabilen maddeler plastikler, lignin ve bunlar gibi dirençli maddelerdir (Tchobanoglous, vd., 1993).

3.1 Kimyasal Reaksiyonlar

Kimyasal reaksiyonlar sonucunda atık içerisindeki kompleks bileşikler daha stabil ve basit bileşiklere dönüşür ve atığı oluşturan bileşenlerin özelliklerinde çeşitli değişiklikler meydana gelir. Bununla birlikte, kompleks organik bileşikler, bir sonraki aşamada gerçekleşecek olan mikrobiyal aktiviteye uygun formlara dönüştürülürler. Depo sahası gövdesinde meydana gelen temel kimyasal reaksiyonlar hidroliz, bozunma, çökelme ve asılı halde kalma, suyun ve kimyasal bileşiklerin buharlaşması ve iyon değiştirme reaksiyonları olarak sayılabilir (Tchobanoglous, vd., 1993).

3.2 Biyolojik Prosesler

Kendi hallerine bırakıldıklarında mikroorganizma faaliyetleri sonucunda oksijen tükenene kadar aerobik olarak ayrışan organik maddeler, daha sonra anaerobik olarak ayrışır ve önemli miktarda CO₂ ve CH₄ içeren bir gaz oluşur. Fermantasyon tamamlandığında, geriye sadece çok yavaş bir şekilde ayrışabilen artık bir madde kalır. Bu artık organik madde stabilize olmuştur. Optimum şartlar altında atık stabilizasyonu 10-20 yılda tamamlanır (Cooper, vd., 1992).

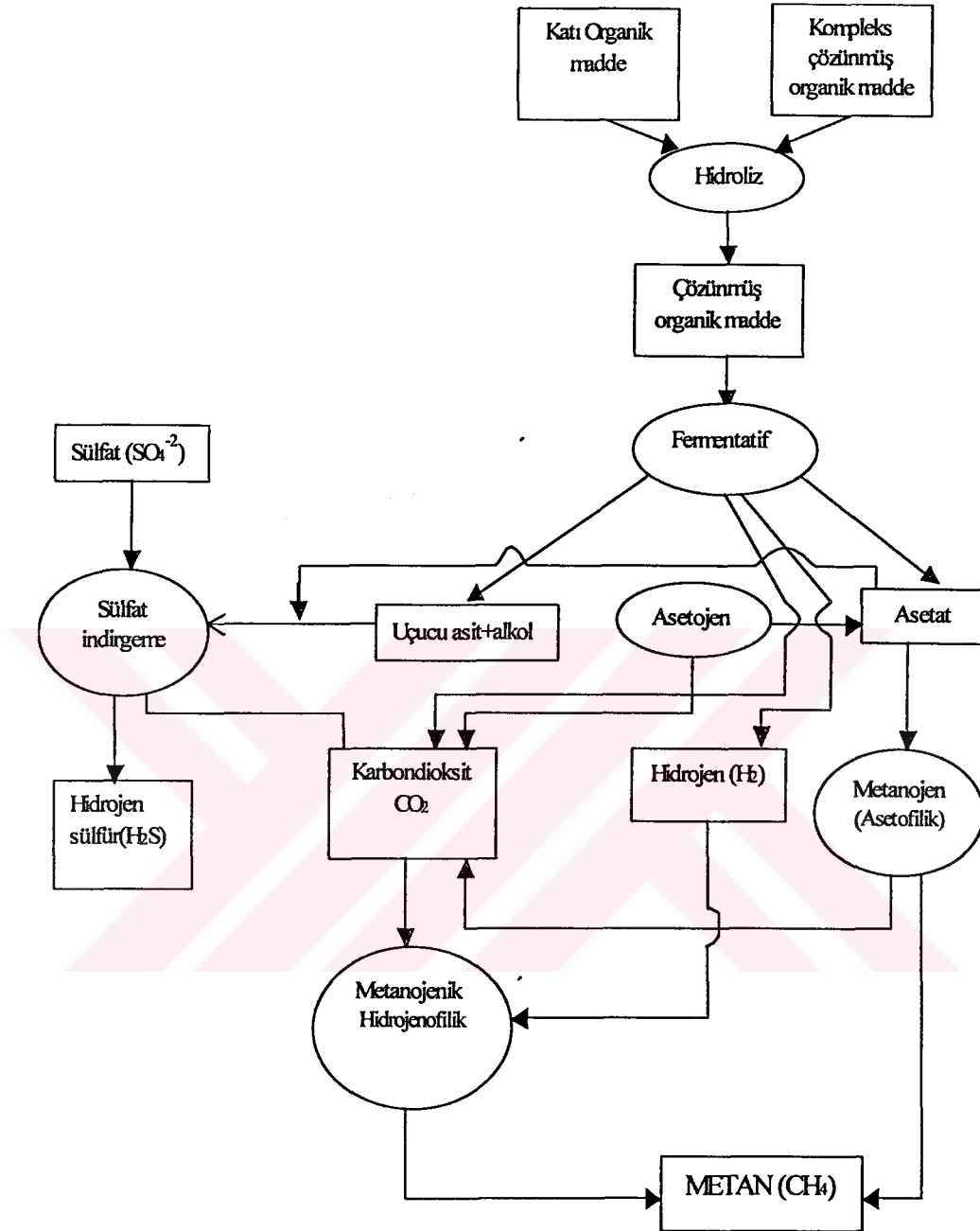
Atık içerisindeki diğer maddelerle birlikte depolanan organik bileşikler, bakteriler için gerekli olan besi maddesi ihtiyacını karşılarlar. Katı atıklar depo sahasında depolandıktan hemen sonra biyolojik ayrışma proseslerini oluşturan iki temel ayrışma başlar, aerobik ayrışma ve anaerobik ayrışma. Her iki ayrışma çeşidi de organik bileşiklerin daha basit ve çoğunlukla inorganik maddelere dönüşüm proseslerini gerçekleştiren mikroorganizmalar tarafından kontrol edilir (Christensen ve Cossu, 1998).

3.2.1 Aerobik ayrışma

Katı atık düzenli depo sahalarında atıklar depolanıp üzeri örtüldükten hemen sonra, ortamda O₂ mevcut olduğundan, organik maddelerin ayrışması ilk etapta aerobik şartlar altında gerçekleşir. Bu aşamada basit şekerler hızla parçalanırken, lignin, tannin gibi doğal polimerlerin biyolojik ayrışması daha yavaş bir şekilde gerçekleşir. Bu safhada önemli miktarda kimyasal ara ürünlerle birlikte büyük çoğunluğu CO₂ ve amonyak (NH₃) olan ve içerisinde önemli miktarda su bulunan bir gaz karışımı oluşur. Atık depolandıktan hemen sonra ısı açığa çıkmaya başlar ve sıcaklık hızla artar. Daha sonra, atık içerisindeki O₂ hızla tükenir ve atıkların ayrışması anaerobik şartlar altında devam eder.

3.2.2 Anaerobik ayrışma

Nem muhtevası yeterli derecede yüksek ise ve ortamda yeterli miktarda mikroorganizma mevcut ise ortamdaki O₂ tükenir tükenmez anaerobik ayrışma safhası başlar. Katı haldeki organik karbon bir grup bakteri tarafından karbonun en kararlı iki hali olan CH₄ ve CO₂'e dönüştürülür. Ancak, atık içerisindeki organik karbonun parçalanmasını sağlayan biyolojik prosesler daha karmaşıktır. Anaerobik mikrobiyal aktivite birbirini izleyen birkaç kademedir oluşur. Bunlar hidroliz, asit oluşumu, asetat oluşumu ve metan oluşumudur (McBean, vd., 1995). Şekil 3.2'de anaerobik ayrışmayı gerçekleştiren bakteri grupları, substratlar ve ara ürünler arasındaki en önemli etkileşimler verilmiştir.



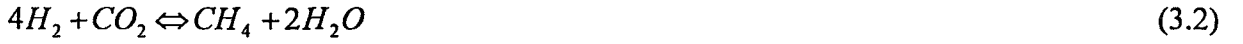
Şekil 3.2 Anaerobik ayrışma sırasında gerçekleşen ayrışma safhaları, substratlar ve önemli bakteri grupları (Christensen ve Cossu, 1998)

Birinci grup fermentatif bakteriler, kompleks besin maddelerinin hidrolizini gerçekleştirirler. Bunun sonucunda oluşan ürünler basit şekerler, aminoasitler ve yağ asitleri gibi farklı zincir uzunluklarına sahip (genellikle uzun zincirli) monomerlerdir. Bu monomerler daha sonra, aynı veya diğer bir grup fermentatif bakteri tarafından asetat, hidrojen, propiyonat, butirat,

valerat, kaproat, laktat ve etanol gibi değişik ara ürünler'e dönüştürülürler. Diğer bir grup bakteri ise son ara ürünleri asetat ve hidrojene dönüştürür. Azot ihtiva eden organik moleküller amonyum iyonlarına, sülfür içeren organik moleküller ise sülfite (HS⁻) dönüştürülürler (Gendebien vd., 1992). Son olarak, metanojenler,



reaksiyonuna göre veya CO₂'in H₂ ile indirgenmesi yolu ile;



metan oluştururlar. Çizelge 3.1'de anaerobik ayrışma proseslerinde etkin olan bakteri grupları tarafından gerçekleştirilen en önemli reaksiyonlar verilmiştir.

Hidroliz

Kompleks organik bileşiklerin, mikroorganizmalar tarafından parçalanmaya başlamadan önce çözünebilir forma dönüştürülmeleri gerektiğinden, hidroliz safhası anaerobik biyolojik ayrışma proseslerinde çok önemlidir. Organik maddelerin daha küçük, kolayca çözünebilir hale gelmesinden sonra, hidroliz prosesinin depo sahası gövdesinde sınırlayıcı proses olduğu söylenebilir (Christensen ve Cossu, 1998). Hidroliz, fermantasyon bakterileri tarafından üretilen ekstraselüler enzimlerden kaynaklanır. Fermantasyon bakterileri, anaerobik ve fakültatif anaerobik mikroorganizmalardan oluşan geniş bir bakteri grubundan oluşmaktadır.

Depo sahalarında atıkların anaerobik ayrışması sırasında gerçekleşen bu ilk fazda CH₄ oluşumu yoktur ve kompleks organik maddeler (selüloz, yağlar, proteinler ve karbonhidratlar) daha basit organik bileşenlere dönüştürülürler. Hidroliz safhası, her ne kadar bir abiyotik ayrışma prosesi olarak düşünülebilirse de daha çok bakteriyel faaliyetlerden ve biraz da kompleks organik maddelerin hidrolizini sağlayan enzimlerden etkilenir. Selülaz, bu enzimlere bir örnek olarak gösterilebilir. Bu enzim, depo sahasında glüköz bakımından en zengin bileşen olan selülozun hidrolizini gerçekleştirir. Gerek büyüklük ve gerekse yapı bakımından basit formdaki organik bileşikler enerji veya besi maddesi olarak kullanılmak üzere hücre duvarından geçebilir. Atık içerisindeki organik bileşenlerin bir kısmı bu safhada stabilize olur, ve organik atığın küçük bir kısmı bakteri hücrelerine dönüşür. Yapılarından ve içerdikleri hidroliz olamayan zincirlerden dolayı, organik maddelerin tamamı daha basit bileşiklere dönüştürülemeyebilir. Bu bileşenler biyolojik olarak ayrışmayan maddeler olarak adlandırılır, ve bunların atık içerisindeki miktarları atığın özelliklerine, depo sahasının işletme

şartlarına, mevsimlere vb. nedenlere bağlı olarak önemli oranda değişiklik gösterir (Veeken, vd., 2000).

Çizelge 3.1 Anaerobik ayrışmayı gerçekleştiren dört grup bakteri tarafından gerçekleştirilen en önemli reaksiyonlar (Christensen ve Cossu, 1998)

| | |
|------------------------------------|-----------------------------------|
| Fermentatif Prosesler | |
| $C_6H_{12}O_6 + 2 H_2O$ | $2 CH_3COOH + H_2 + 2 CO_2$ |
| $C_6H_{12}O_6$ | $CH_3C_2H_4COOH + 2 H_2 + 2 CO_2$ |
| $C_6H_{12}O_6$ | $2 CH_3CH_2OH + 2 CO_2$ |
| Asetojenik Prosesler | |
| $CH_3CH_2COOH + 2 H_2O$ | $CH_3COOH + 3 H_2 + CO_2$ |
| $CH_3C_2H_4COOH + 2 H_2O$ | $2 CH_3COOH + 2 H_2$ |
| $CH_3CH_2OH + H_2O$ | $CH_3COOH + 2 H_2$ |
| $C_6H_5COOH + 4 H_2O$ | $CH_3COOH + H_2$ |
| Metanojenik Prosesler | |
| $4 H_2 + CO_2$ | $CH_4 + 2 H_2O$ |
| CH_3COOH | $CH_4 + CO_2$ |
| $HCOOH + 3 H_2$ | $CH_4 + 2 H_2O$ |
| $CH_3OH + H_2$ | $CH_4 + H_2O$ |
| Sülfat İndirgeme Prosesleri | |
| $4 H_2 + SO_4^{2-} + H^+$ | $HS^- + 4 H_2O$ |
| $CH_3COOH + SO_4^{2-}$ | $CO_2 + HS^- + HCO_3^- + H_2O$ |
| $CH_3C_2H_4COOH + SO_4^{2-} + H^+$ | $4 CH_3COOH + HS^-$ |

HCOOH: formik asit, CH₃COOH: asetik asit, CH₃CH₂COOH: propiyonik asit, CH₃C₂H₄COOH: butirik asit, C₆H₁₂O₆: glükoz, CH₃OH: metanol, CH₃CH₂OH: etanol, C₆H₅COOH: benzoik asit, CH₄: metan, CO₂: karbon dioksit, H₂: hidrojen, SO₄²⁻: sülfat, HS⁻: hidrojen sülfid, HCO₃⁻: hidrojen karbonat, H⁺: proton, H₂O: su.

Asitojen-Asit Oluşumu

Bu safhada, hidroliz safhasında meydana gelen daha basit ara ürünlerin bir dizi reaksiyon sonucunda fermantasyonu söz konusudur. Fermantasyon ürünleri başta uçucu yağ asitleri (VFA) olmak üzere alkoller, CO₂ ve hidrojen (H₂)'den oluşmaktadır. Bu fermantasyon prosesleri metanojenik olmayan mikroorganizmalar için birincil enerji kaynağını oluşturmaktadırlar. Bu safhada da, organik maddenin büyük bir kısmının yapısı değişir ve sadece küçük bir kısmı stabilize olur ya da enerji kaynağı olarak tüketilir (Speece, 1996).

Asetojen-Asetat Oluşumu

Bu safhada metanojenik olmayan bakteriler, daha karmaşık bir yapıya sahip olan alkoller ve daha uzun zincirli organik asitleri (yağ asitleri) asetik asit, H₂ ve CO₂'ye dönüştürürler. Çok miktarda H₂ üretildiğinden, ortamda H₂ tüketen bakterilerin de (sülfat indirgeyen bakteriler, metanojenler) bulunması gerekmektedir. Böylelikle, sistem içerisinde H₂'nin kısmi basıncı çok düşük değerlerde tutulmuş olur. Bu şartlar sağlanmadığı takdirde yağ asitleri ortamda birikmeye başlayacak ve pH değeri düşecek, ve bu safhadan sonra meydana gelecek olan metan oluşum safhası inhibasyona uğramış olacaktır. Bu safhada çok aktif olan sülfat indirgeyen bakteriler metanojenlere çok benzerler. Bu bakteriler H₂, asetik asit ve uzun zincirli uçucu yağ asitlerinin parçalanmasını sağlarlar (Christensen ve Cossu, 1998).

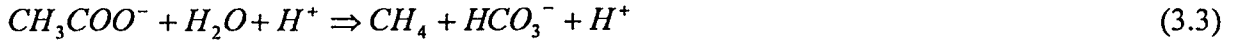
Metanojen-Metan Oluşumu

Metan oluşturan bakteriler tarafından gerçekleştirilen bu safha organik maddelerin anaerobik stabilizasyonunun son kademesidir. Metanojenler, hücre şekli ve yapısı bakımından çok az farklılık gösteren ve çok değişik türleri olan bir bakteri grubudur. Metanojenik bakteriler zorunlu anaerobiktirler ve çok düşük redoks potansiyeline sahiptirler. Metanojenler genel olarak 6 gruba ayrılmışlardır; *Methanobacterium*, *Methanosarcina*, *Methanococcus*, *Methanobrevibacter*, *Methanospirillum*, ve *Methanogenium*. Yaşadıkları ortamın sıcaklığına göre ise metanojenler 3 gruba ayrılabilir: termofilik grup 44 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda faaliyet gösterirler, mezofilik bakteriler 20-44 °C arasında faaliyet gösterirler, ve psikrofilik bakteriler ise 20 °C'nin altında faaliyetlerini sürdürürler. Ancak her üç grup bakterinin de faaliyetlerini gerçekleştirebilmesi için tamamen anaerobik bir ortam (çok düşük oranlarda O₂ de bu bakteriler için toksik olabilir) ve hemen hemen nötr pH değerleri, gerekli olan temel şartlardır (Öztürk, 1999).

Metan bakterileri, metabolizmaları için besi maddesi ve enerji kaynağı olarak çok sınırlı sayıda substrat kullanırlar. Bazı özel türler sadece bir veya iki organik bileşiği kullanabilirler. Karbon, oksijen, hidrojen, azot ve fosfor, mikroorganizmalar için temel besin kaynaklarını oluştururlar. Demir, nikel, kobalt, sülfür, kalsiyum ve diğer iz bileşikler gibi nutrientlere ise daha az miktarda gereksinim duyarlar. Evsel kaynaklı atıklar bu temel besin kaynaklarını yeterli miktarlarda ihtiva ederler. Ancak endüstriyel atıklar veya evsel ve endüstriyel atıkların karışımları, azot (N₂) ve/veya fosfor (P) bakımından fakir olduklarından biyolojik büyümeyi sınırlandırabilirler (Stegmann ve Spendlin, 1985).

Metanojen bakteri türlerinin büyük çoğunluğu ihtiyaç duydukları enerjiyi iki temel reaksiyona dayanarak elde ettiklerinden, metanojenler fizyolojik olarak iki grupta toplanabilir (Pohland ve Kim, 2000).

Asetat kullanan metanojenler: Asetat, CH₄ bakterileri için en önemli substrattır ve CH₄'ın % 70'i bu substrattan oluşur. Asetofilik bakteriler, aşağıdaki reaksiyona bağlı olarak, asetik asit (CH₃COOH) veya asetatı (CH₃COO⁻) direkt olarak CO₂ ve CH₄ gibi nihai ürünlere dönüştürürler;



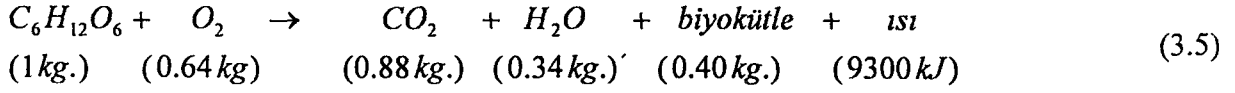
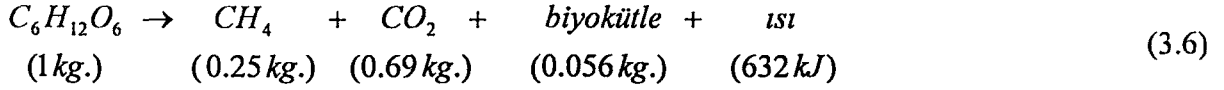
H₂ kullanan metanojenler: Hidrojenofilik bakteriler, daha önceki safhalarda diğer bakteri grupları tarafından üretilen H₂'i kullanarak CO₂'i CH₄'a dönüştürürler. CH₄'ın % 25-30'luk kısmı bu reaksiyonlar sonucu üretilir.



3.2.3 Enerji dengesi

Aerobik ve anaerobik ayrışma prosesleri, enerji dengesi bakımından büyük farklılıklar gösterirler. Aerobik ayrışma ekzotermik bir süreçtir ve yüksek miktarda ısı üretir. Bunun sonucunda atık içerisindeki sıcaklık yükselir. Bu nedenle, depo sahalarında en yüksek sıcaklık değerlerine ilk 45 gün içerisinde ulaşılır. Bu pik değere ulaşmak için geçen süre hemen hemen aerobik ayrışmanın devam ettiği süre kadardır. Öte yandan, anaerobik ayrışma süreci sırasında açığa çıkan ısı çok düşüktür ve bu süreçten açığa çıkan ısı ihmal edilebilir. Anaerobik ayrışma safhasına geçiş evresi tamamlandıktan sonra sıcaklık 30-35 °C civarında sabit kalır. Bu sıcaklık değerleri, mezofilik metan bakterileri için optimum değerlerdir. Aerobik ayrışma sırasında elde edilen enerjinin % 59'u biyokütle içerisinde depolanırken (yeni bakteri hücreleri), % 41'i kullanılır. Anaerobik ayrışma sırasında oluşan enerjinin ise % 8'i biyokütle içerisinde % 89'luk kısmı da oluşan metan gazı içerisinde depolanırken, sadece % 3'lük kısmı kullanılır.

Glikozun biyolojik ayrışması sırasındaki kütle dengesi için (3.5) ve (3.6) eşitlikleri yazılabilir. Biyolojik ayrışma prosesleri sırasında meydana gelen enerji arasındaki farklılıklar bu eşitliklerden açıkça görülebilmektedir (Gendebien, vd., 1992).

Aerobik Ayrışma:***Anaerobik Ayrışma:*****3.3 Fiziksel Prosesler**

Atıkların ayrışması sırasında meydana gelen fiziksel prosesler, diğer proseslere göre daha belirgindir. Fiziksel ayrışma sızıntı suyunun depo sahasının alt katmanlarına geçmesi, depo gövdesinde meydana gelen çökmeler ve gaz emisyonlarının atmosfere ve sahaya yakın bölgelerdeki toprağa yayılması olmak üzere üç grupta incelenebilir.

3.3.1 Sızıntı suyu oluşumu

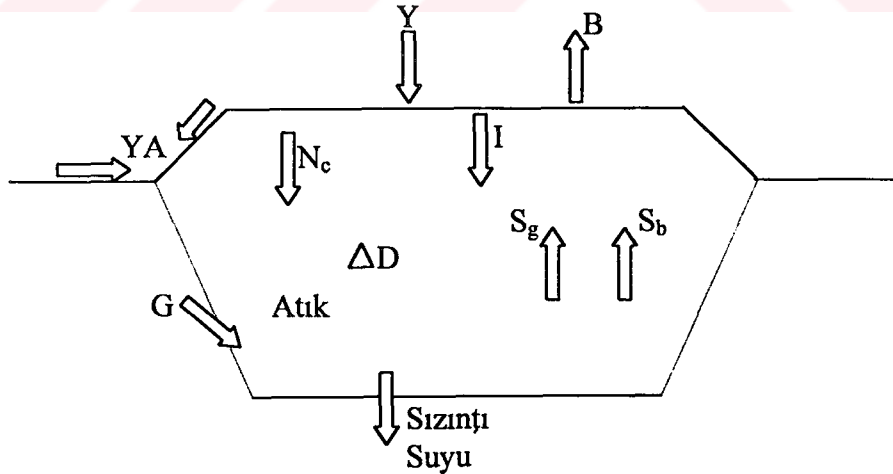
Sızıntı suyu, depo sahasında depolanan atığın içerisindeki suyun ve yağmur sularının atık içerisinde süzülerek çözünmüş ve askıdaki maddeleri ekstrakte etmesi sonucu oluşur. Atık içerisindeki maddelerin bir kısmı suda çok çabuk çözünebilirken, biyolojik ayrışma sırasında diğer maddeler de çözünebilir forma dönüşürler. Bu maddelerin sızıntı suyu içerisindeki varlığı ve konsantrasyonları zamana bağlı olarak değişir. Eski depo sahalarından oluşan sızıntı suları genellikle daha az miktarlarda çözünmüş katı madde ihtiva ederler. Ayrıca, sızıntı suyunun pH değeri de zamanla yükselmektedir. Biyolojik ayrışma proseslerinin başlangıcında, VFA konsantrasyonlarının yüksek olması sebebiyle pH değerleri 5-6.5 arasında değişmekte, bu ilk safhanın ardından sızıntı suyunun pH değeri yaklaşık olarak nötr değerlere ulaşmaktadır.

Atıklar ilk depolandıkları anda % 20-30 civarında nem içerirler (ıslak ağırlık). Depo sahasına yüzeysel veya yeraltı sularının girmesi veya yağışların infiltrasyonu sonucunda atığın nem muhtevası doygunluk değerine ulaşır. Doygunluk kapasitesi aşıldığında, su atık içerisinde süzölmeye başlar. Oluşan sızıntı suyu miktarının depo sahasına dışardan giren su miktarıyla orantılı olduğu söylenebilir (Yuen, vd., 1997b).

Depo sahalarında oluşacak sızıntı suyunun önceden tahmin edilmesi için basit su dengesi eşitliğinden faydalanılabilir. Bu eşitliğe göre, depo sahasına giren su miktarı çıkan su miktarına eşittir (California Waste Management Board,1989). Sızıntı suyu oluşumuna neden olan en önemli faktör, yağışların atık içerisine infiltrasyonudur (I). Infiltrasyon oranı depo sahasının yüzeysel şartlarına, üst örtü tabakasının mevcudiyetine ve eğer mevcutsa bu tabakanın permeabilitesine ve sahanın iklimsel şartlarına bağlı olarak değişmektedir. Yüzeysel akış ve buharlaşma miktarları, yağış miktarından çıkarıldığında infiltrasyon değeri hesaplanabilir ($I = Y - YA - B$). Sızıntı suyu oluşumuna sebep olan diğer kaynaklar akiferlerden kaynaklanan yeraltı suyu akışı (G) ve katı atık ve örtü malzemesinin mevcut su muhtevaları (N_c)'dır. Atığın nem muhtevası olarak depolama alanına giren suyun miktarı atık tipine ve depolamanın yapıldığı mevsime göre değişiklik göstermektedir. Depo sahasında depo gazı üretimi için bir miktar su tüketilirken (S_g) bir miktar da depo gazı içerisinde su buharı (S_b) olarak buharlaşır. Su dengesini ifade eden eşitlik

$$SS = I + YA + G + N_c - S_g - S_b \pm \Delta D \quad (3.7)$$

şeklindedir. Burada SS, oluşan sızıntı suyu miktarını ve ΔD ise sahanın su tutma kapasitesinde meydana gelen değişimi ifade eder. Katı atık düzenli depo sahaları için su dengesi Şekil 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.3 Düzenli depo sahalarında sızıntı suyu oluşumu (Nastev, 1998)

(Y: Yağış; B: Buharlaşma; YA: Yüzeysel akış; I: İnfiltrasyon; Nc: Atığın ve örtü malzemesinin nem muhtevası; G: Yer altı suyu akışı; Sg: Depo gazı için harcanan su; Sb: Su buharı; D: Depolanan miktardaki değişim miktarı)

3.3.2 Çökmeler

Depo sahalarında meydana gelen çökmeler, üst örtü malzemesini, drenaj sistemini, sızıntı suyu pompalama sistemini ve yatay gaz bacalarını etkiler. Katı atıklar, heterojen yapıları ve yüksek oranda organik madde ihtiva etmeleri sebebiyle diğer kirletici maddelerden farklı özellikler göstermektedirler. Atığın fiziksel özellikleri ve yapısı sürekli olarak değişmektedir. Laboratuvar çalışmaları büyük ölçekte olmadıkları takdirde, temsil edici numune almak çok zor olduğundan güvenilir sonuçlar vermeyebilir. Bu nedenle depo sahalarında çökmelerin belirlenmesinde saha çalışmaları daha yaygın olara kullanılmakta ve bu çalışmalardan daha güvenilir sonuçlar elde edilmektedir.

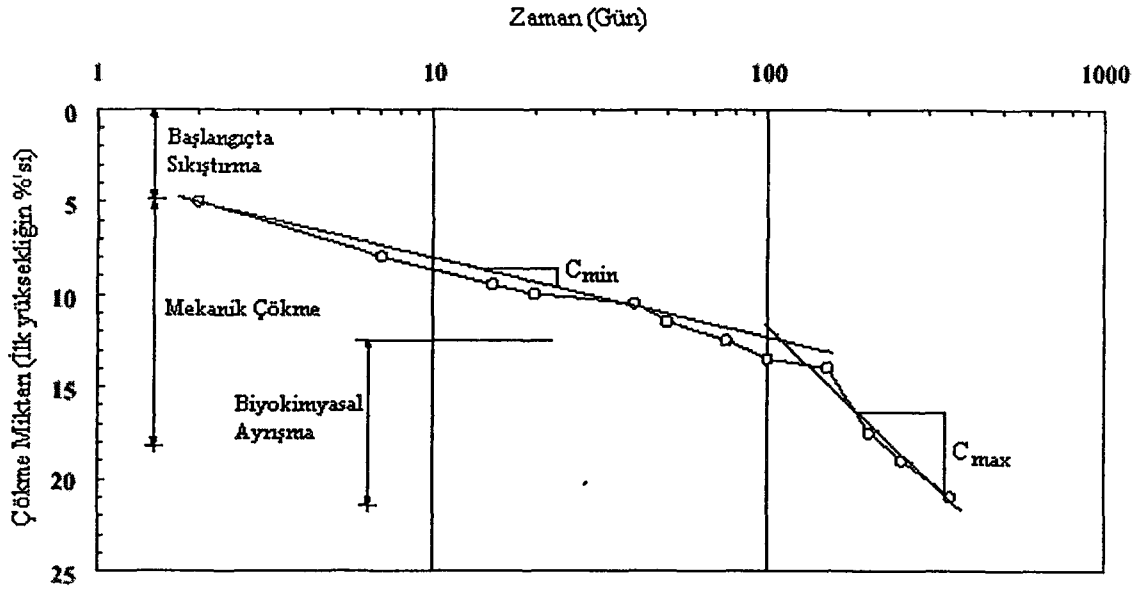
Meydana gelecek çökme miktarları önceden tahmin edilememesine rağmen, bunların da hesaba katılarak depolama kapasitesinin artırılması gerekir. Toplam çökme miktarının % 90'ının atıklar depolandıktan sonraki ilk birkaç yıl içerisinde meydana geldiği belirtilmiştir (Wall ve Zeiss, 1995).

Depo sahalarında meydana gelen çökmelerin sebepleri mekanik ve biyokimyasal olmak üzere iki gruba ayrılabilir (Oweis, vd., 1990). Bunları şu şekilde sıralamak mümkündür:

- Atık depolandıktan sonra ağır iş makinelerinin çalışması sonucu katı partiküllerde meydana gelen deformasyon ve boşluk hacminin azalması sonucu oluşan mekanik çökmeler,
- Çözünabilen maddelerin süzülen su içerisinde çürütmesi, oksidasyonu, yanması, çözünmesi gibi fiziko-kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan çökmeler,
- Katı atığın organik kısmının biyolojik olarak ayrışması ve depo gazı oluşumuna bağlı olarak meydana gelen hacim kaybı sonucu oluşan çökmeler.

Depolama süresince meydana gelen çökme miktarı üniform olmayıp, depo gövdesinin yüksekliği, atık yaşı, su muhtevası, sahanın geometrik özellikleri ve sahada cereyan eden biyolojik proseslere bağlı olarak önemli değişiklikler göstermektedir. Biyolojik ayrışma proseslerini hızlandıran bütün faktörler, aynı zamanda çökme oranını da arttırmaktadır (organik madde muhtevası, sıcaklık, su muhtevası, pH, vb.). Bununla birlikte, depo sahasının değişik bölgelerinde etkin olan farklı ayrışma prosesleri sebebiyle de çökme miktarı üniform olmayabilir. Ancak yinede meydana gelen çökmelerin büyük bir kısmının ilk 1 veya 2 yıl içerisinde görüldüğü, genel olarak benimsenmiştir. Aerobik ayrışmaya maruz kalan atıkta meydana gelen çökme oranı daha yüksektir. Atığın depolanma sırasında daha fazla sıkıştırılması toplam çökme miktarını azaltmaktadır. Depo sahasına gelen atığın yoğunluğu 0.12-0.4 ton/m³ arasında değişir. Sıkıştırmadan sonra ise atık yoğunluğu 1 ton/m³'e kadar

yükselebilir. Depolama sahalarında meydana gelen çökme safhaları Şekil 3.4'de verilmiştir (Nastev, 1998).



Şekil 3.4 Depo sahalarında meydana gelen çökmelerin zamanla değişimi

4. KATI ATIK DÜZENLİ DEPO SAHALARINDA DEPO GAZI OLUŞUMU

Katı atık düzenli depo sahalarının tasarımı, sahalar büyük birer reaktör olarak düşünölmeye başladıktan sonra oldukça büyük bir gelişim göstermiştir. Depo sahalarının tasarımı ve depolamada uygulanacak teknikler daha fazla gaz üretecek şekilde planlanmalıdır. Oluşan depo gazının içerisinde CH_4 'ın uzun yıllar boyunca varolduğunun tesbit edilmesi, oluşan bu gazın çevreye ve insan sağlığına zarar vermesi ve yüksek bir enerji kapasitesine sahip olması sebebiyle kontrol edilme gerekliliğini ortaya çıkarmıştır (Qin, vd., 2001).

Depo sahalarından oluşan gaz fazının bileşimi zamana bağlı olarak önemli değişiklikler gösterir ve atık içerisindeki organik maddelerin biyolojik ayrışması sırasında meydana gelen stabilizasyon proseslerinin bir fonksiyonudur. Biyolojik ayrışma safhasının karakteristik özellikleri CO_2 ve CH_4 oluşumudur. Başlangıçta, O_2 fraksiyonu aerobik mikroorganizmalar tarafından tamamen tüketilir ve CO_2 oluşmaya başlamasıyla birlikte azot (N_2) miktarı azalmaya başlar. Bunu takiben CH_4 miktarında artış görölmeye başlar. CH_4 ve CO_2 üretimini tarif eden iki parametre vardır. Bunlar oluşum potansiyeli ve oluşum hızıdır. Oluşum potansiyeli atığın biyolojik ayrışma için uygun olan organik kısmına bağlıdır. Gaz oluşum potansiyeli su muhtevası, yoğunluk, sıcaklık, pH vb. gibi çevresel faktörlerden oldukça fazla etkilenir (Nopharatana, vd., 1998).

Katı atıklar, depo sahalarında depolandıkları ilk anda gaz fazını atmosferik hava oluşturmaktadır. Daha sonra meydana gelen ayrışma prosesleriyle birlikte, başlangıçta gaz fazını oluşturan bileşenler ya tamamen tüketilir (O_2) ya da üretilen gazlarla yer değiştirir. Ayrıca, depo sahasına atmosferden difüzyon veya adveksiyon yoluyla giren bazı gazlar da vardır. Çizelge 4.1'de çöp yaşına bağlı olarak depo gazı bileşiminde meydana gelen değişimler verilmiştir.

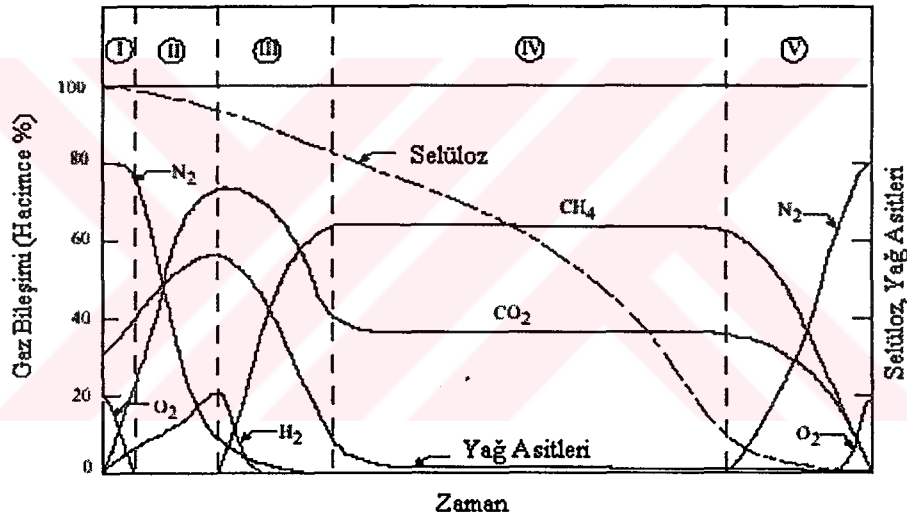
Çizelge 4.1 Depolama yaşı ve gaz konsantrasyonları arasındaki ilişki

| Çöp Yaşı (ay) | Ortalama Hacimsel Oran (%) | | |
|---------------|----------------------------|--------|--------|
| | N_2 | CO_2 | CH_4 |
| 0-3 | 5,2 | 88 | 5 |
| 3-6 | 3,8 | 76 | 21 |
| 6-12 | 0,4 | 65 | 29 |
| 12-18 | 1,1 | 52 | 40 |
| 18-24 | 0,4 | 53 | 47 |
| 24-30 | 0,2 | 52 | 48 |
| 30-36 | 1,3 | 46 | 51 |
| 36-42 | 0,9 | 50 | 47 |
| 42-48 | 0,4 | 51 | 48 |

4.1 Depo Gazı Oluşum Safhaları

Gaz bileşiminde zamanla meydana gelen değişimler 5 fazda sınıflandırılmıştır. Bunlar, aerobik safha, anaerobik metanojenik olmayan safha, anaerobik metanojenik kararsız safha, metanojenik kararlı safha ve aerobik şartlara geçiş fazı olarak sayılabilir (Gujer ve Zenhder, 1983;Reinhart, 1997; Pohland ve Kim, 2000).

Şekil 4.1'de depo sahalarında meydana gelen ayrışma safhaları verilmiştir. Ancak, atıkların biyolojik ayrışması her zaman burada gösterildiği gibi sırayla gerçekleşmeyebilir. Bazı safhalar gerçekleşmezken bazıları da aynı anda meydana gelebilir. Ayrıca, çevresel şartlara bağlı olarak bir veya iki faz baskın hale gelebilir. Bunun yanında, atıkların heterojen yapısına bağlı olarak, aynı anda depo sahasının farklı bölgelerinde farklı prosesler de meydana gelebilir.



Şekil 4.1 Depo gazı bileşiminin zamanla değişimi (Nastev, 1998)

4.1.1 Aerobik safha

Bu safha katı atık depo sahasına atıkların depolanarak saha içerisinde su muhtevasının artmasıyla başlar. Elde edilen bu yeni ortamla birlikte aktif mikrobiyal bir topluluk ortaya çıkar ve biyokimyasal ayrışmanın gerçekleşebilmesi için ilk birkaç gün ile birkaç hafta arasında çevresel şartlarda bazı değişiklikler meydana gelir. Bu safhanın karakteristik özelliği atık depolandığı sırada atmosferden gelen O₂'nin varlığıdır. Oksijen ihtiyacı çok yüksek olduğundan, kısa süre sonra gaz fazındaki O₂ tamamen tükenir. Bu fazda, tüketilen O₂ ile orantılı miktarda CO₂ üretilir. Öte yandan N₂ konsantrasyonunda çok az bir azalma görülür.

Bu fazda çok fazla ısı üretilir ve depo gövdesinin sıcaklığı 60-70 °C'ye kadar çıkabilir (Nastev, 1998).

4.1.2 Anaerobik metanojenik olmayan faz

Bu safhada depo gövdesindeki oksijenin tükenmeye başlamasıyla birlikte aerobik ortamdan anaerobik ortama geçişin başlangıcı görülür. Oksijenin tükenmesiyle birlikte, anaerobik faaliyetin baskın olduğu 2. faz başlar. Organik asitlerin oluşmaya başlamasıyla daha belirgin miktarlarda CO₂ üretilmeye başlar ve anaerobik ayrışma safhası başlamış olur. CO₂'in ulaşabileceği maksimum değer hacimce % 70-90 arasında değişir. Bu değerlere atık depolandıktan 11-40 gün sonra ulaşılabilir. Hidrojen (H₂) konsantrasyonu ise hacimce % 20 civarındadır. Burada birincil elektron kabul ediciler nitrat (NO₃⁻) ve sülfattır (SO₄²⁻).

4.1.3 Anaerobik metanojenik kararsız faz

Depolamanın tamamlanmasından sonra ilk kez bu safhada CH₄ oluşur ve oluşan CH₄ miktarı zamanla artar. CO₂ ve N₂ miktarlarında azalma görülürken H₂ tamamen tükenir. Redox potansiyelleri düşer. 1. ve 2. fazların tamamlanması 10-50 gün arasında gerçekleşirken 3. faz 200-500 gün arasında tamamlanır. Ayrışma süreleri arasındaki bu farklılıklar, ayrışma prosesinin her zaman gerçekleştiğini, fakat ayrışmanın tamamlanması için gerekli olan sürenin yerel şartlara bağlı olarak çok fazla değiştiğini göstermektedir (Nastev, 1998).

4.1.4 Metanojenik kararlı faz

Bu fazda gaz üretimi ve bileşenleri hemen hemen sabit olup % 40-70 CH₄ ve % 30-60 CO₂'den oluşur. En yüksek CH₄ konsantrasyonun görülmesi sebebiyle bu safha oldukça önemlidir. Yapılan saha çalışmalarında CH₄'ın molar fraksiyonu % 50'nin altında ise ve aynı zamanda gaz içerisinde H₂ de mevcut ise CH₄ üretiminin yavaş gerçekleştiği gözlenmiştir. Bu fazda gaz bileşimi sabit olmakla birlikte, gaz oluşum hızı zamanla düşer. Ancak, yinede depo gazı basıncı atmosferik havanın atık kütlesi içerisine girmesini engelleyecek seviyelerdedir. Bu safha, gaz miktarının yavaş yavaş azalmasıyla ortalama 10-20 yılda tamamlanır (Gendebien, vd., 1992).

4.1.5 Aerobik şartlara geçiş fazı

Bu safhada ayrışma prosesleri ve depo gazı üretimi önemli oranda azalır. Başlangıçtaki atmosferik şartlar yeniden ortaya çıkar. Bugüne kadar hiçbir çalışma atığın ayrışmasını tamamlanmasına kadar devam etmemesine rağmen, eski sahalardan elde edilen veriler

dayanarak mevcut organik karbon kullanıldıktan sonra metanojenik faaliyetin azaldığı ve CH₄ ve CO₂ konsantrasyonlarının hızla düştüğü söylenebilir. Sonuçta kalan artık madde ise biyolojik olarak inert haldedir (Reinhart ve Al-Yousfi, 1996).

4.2 Depo Gazı Oluşumunu Etkileyen Çevresel Faktörler

Atık içerisinde meydana gelen fiziksel, kimyasal ve biyolojik prosesler sonucunda sızıntı suyu ve depo gazı olarak adlandırılan bir gaz ortaya çıkar. Katı atıklardan oluşabilecek gaz miktarı atığın organik madde muhtevasına bağlıdır. Diğer taraftan, atık stabilizasyonu ve CH₄ oluşumu; oksijen, hidrojen, pH, alkalinite, nutrientler, inhibitörler, sıcaklık ve su muhtevası gibi abiyotik faktörler ile atık bertarafında kullanılan farklı tekniklerden oldukça fazla etkilenmektedir (Christensen ve Cossu, 1998).

Bu faktörlerden bazıları aşağıda açıklanmıştır.

4.2.1 Oksijen

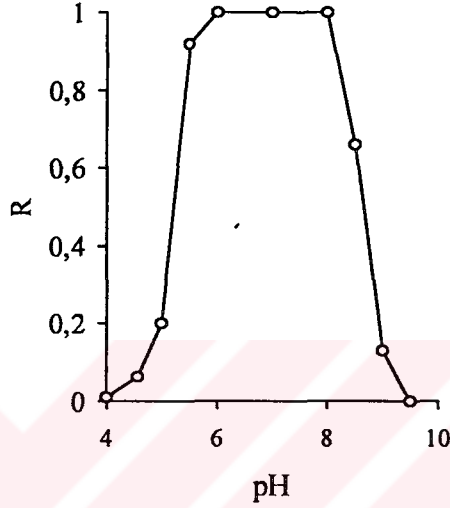
Ortamda serbest oksijenin bulunmaması, anaerobik bakterilerin ayrışma proseslerini gerçekleştirmesi için gerekli ve zorunlu bir şarttır. Metanojenik bakteriler, O₂'e en duyarlı bakterilerdir. O₂ depo sahasındaki atık içerisine her zaman nüfuz eder. Ancak depo sahası yüzeyindeki aerobik bakteriler oksijeni tüketirler. Metanojenik bakterilerin spor oluşturan formu belirlenmemiş olmasına rağmen, metanojenik topluluklar ortama O₂ girişiyle tamamen yok olmazlar. Aerobik çamurun ve aerobik toprağın anaerobik inkübasyonu CH₄ oluşumuyla sonuçlanır (Christensen ve Cossu, 1998).

4.2.2 Hidrojen

Hidrojen fermantatif ve asetojenik bakteriler tarafından üretilir ve üretilen H₂'in basıncı biyokimyasal dönüşümleri etkiler. Fermantasyon bakterileri, hidrojen basıncı düşük olduğunda H₂, CO₂ ve asetik asit üretirken, yüksek H₂ basınçlarında ise H₂ ve CO₂ üretirler. Etanol, butirik asit ve propiyonik asit gibi organik bileşikler H₂ basıncı çok yüksek değilse asetojenik bakteriler tarafından da oluşturulabilir. Propiyonik asitin oluşabilmesi için H₂ basıncının 9*10⁻⁵ atm.'in altında olması gerekmektedir. Yani H₂ basıncı yüksek ise propiyonik (ve butirik) asit oluşacak fakat bu bileşikler daha fazla ayrılmayacaktır. Hidrojen, metanojenik ve sülfat indirgeyen bakteriler tarafından tüketilir. 10⁻⁵ atm.den düşük basınçlar, H₂ ve CO₂'den CH₄ oluşumu için uygundur (Christensen ve Cossu, 1998).

4.2.3 pH ve alkalinite

Metan bakterileri pH 6-8 aralığında faaliyet gösterirler. Optimum CH_4 oluşumu pH 7.0-7.2 aralığında görülmektedir. pH değerinin 6'nın altına düşmesi metan bakterileri üzerinde toksik etki gösterebilir. pH değerlerinin nötr olması durumunda atık ayrışma proseslerinin daha hızlı gerçekleştiği gözlenmiştir (Christensen ve Cossu, 1998). Şekil 4.2'de farklı metanojen kültürlerinin karışımı için pH'a bağlı olarak CH_4 üretim oranları (R) verilmiştir.



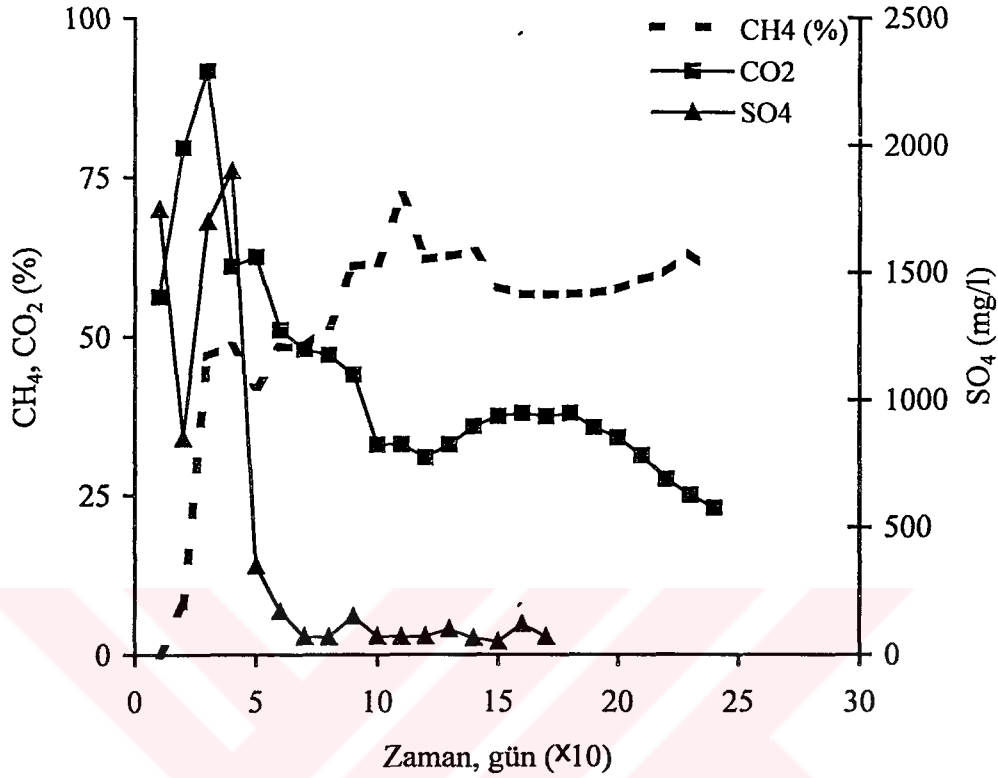
Şekil 4.2 Anaerobik bir filtrede pH'nın rölatif metan oluşum hızı (R) üzerine etkisi (Christensen ve Cossu, 1998)

Alkalinite, sistemin anaerob ayrışma için gerekli pH değerinin istenen seviyenin altına düşmesine yol açan uçucu ve diğer asitleri tamponlama kapasitesini gösterir. Düşük alkalinite değerlerinde ortamdaki asitler pH değerinin düşmesine sebep olarak biyolojik aktiviteyi durdurabilirken, yüksek alkalinite değerleri sistemi düzensiz pH değişimlerine karşı korur. Alkalinitenin düşük olması uçucu yağ asitlerinin birikmesine yol açar. Evsel atıksu çamurunun anaerob ayrışması için gerekli toplam alkalinite değeri 2000 mg/l CaCO_3 civarında olduğu belirlenmiştir (Speece, 1995).

4.2.4 Sülfat

Hem sülfat bakterileri hem de metan bakterileri asetik asit ve hidrojenin ayrışmasını sağlarlar. Yapılan deneysel ve pilot ölçekli çalışmalar, ortamda sülfat mevcut iken metan üretiminin önemli ölçüde azaldığını göstermiştir. Şekil 4.3'de depo gazı bileşimi ile sızıntı suyundaki SO_4^{2-} konsantrasyonlarının zamana göre değişimi verilmiştir (Stegmann ve Spendlin, 1985).

Şekilden de görüldüğü gibi, CH₄ oluşumundaki artış ile sülfat konsantrasyonlarındaki azalma aynı anda meydana gelmektedir.



Şekil 4.3 Depo sahalarında SO₄²⁻ ile gaz bileşimi arasındaki ilişki (Stegmann ve Spendlin, 1985)

Metan oluşumunun sülfatla ilişkisi , sülfatın metanojenik bakteriler üzerindeki herhangi bir toksik etkisiyle bağdaştırılmamış, sadece substrat rekabetiyle ilişkilendirilmiştir. Metan bakterilerinin az olduğu kültürlerde sülfat, metan oluşumunu etkilemez, ancak eğer ortamda *Desulfovibrio* gibi sülfat indirgeyen gruplar varsa, sülfatın indirgenmesi çok fazla enerji gerektiren bir reaksiyon olduğundan bir sınırlandırma söz konusudur (Nastev, 1998).

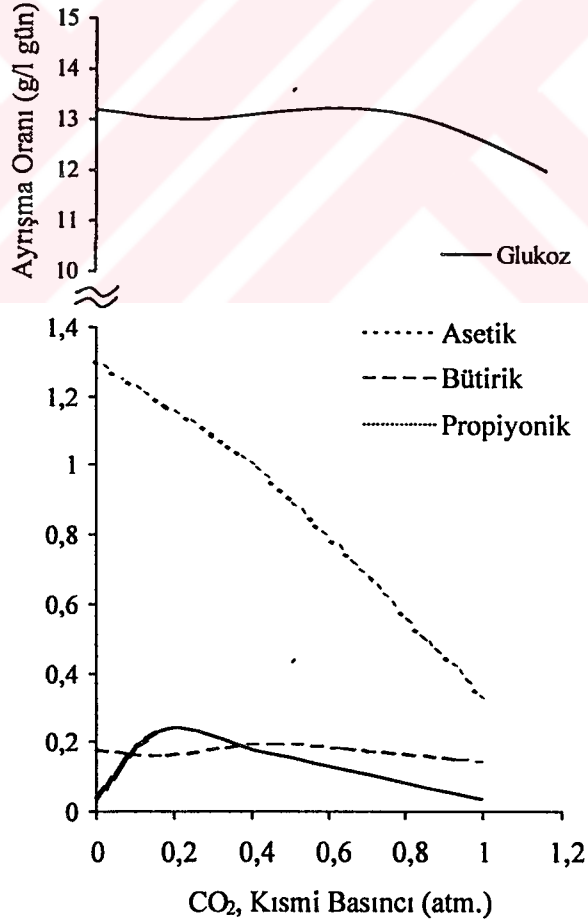
4.2.5 Nütrientler

Anaerobik mikroorganizmalar için gerekli olan mikronütrientlerin tamamı (sülfür, kalsiyum, magnezyum, potasyum, demir, çinko, bakır, molibden ve selenyum gibi) hemen hemen tüm depo sahalarında mevcuttur. Anaerobik ekosistemlerde substratın sadece küçük bir kısmı yeni hücreler tarafından özümser, bu nedenle aerobik sistemlerden çok daha az miktarlarda azot ve fosfor gereklidir. Organik maddeler (KOİ), azot ve fosfor arasındaki optimum oranlar; 100:0,44:0,08 olarak belirlenmiştir (Christensen ve Cossu, 1998). Genel olarak, evsel ve endüstriyel atıkların birlikte depolandığı bir depo sahasında azot ve fosfor sınırlayıcı değildir, fakat sadece evsel veya

endüstriyel atıkların depolandığı sahalarda nutrient miktarının sınırlandırılmasına yol açabilir. Fosfor, anaerobik ayrışma prosesini sınırlandıran en önemli nütrienttir.

4.2.6 İnhibitörler

Oksijen, hidrojen ve sülfatın metan oluşumu üzerinde bir inhibisyon etkisi olduğu bilinmektedir. Uçucu yağ asitlerinin metan oluşumu üzerine etkisi pek çok araştırmaya konu olmuştur (Christensen ve Cossu, 1998). Asetik asit, propiyonik asit ve bütirik asitin toplam konsantrasyonlarının 6000 mg/L 'nin üzerinde olmaması gerekmektedir. Ayrışma proseslerinin çoğunda CO₂ üretilir. CO₂'in CH₄ oluşumu üzerindeki inhibisyon etkisi çamur yataklı kesikli reaktörlerde belirlenmiştir. Şekil 4.4'de CO₂'ini kısmi basıncının asetik asit, propiyonik asit ve bütirik asitin ayrışma oranları üzerine etkisi verilmiştir. Asetik asitin ayrışma oranı CO₂'in kısmi basıncından önemli ölçüde etkilenir. Depo sahalarındaki CO₂'nin kısmi basıncı başlangıç fazlarında 0,9 atm. çıkabilir ve daha sonra 0,5 atm. seviyesine düşer. Amonyumun inhibisyon etkisi serbest amonyumdan kaynaklanmaktadır ve pH'nın artmasıyla artmaktadır.



Şekil 4.4 CO₂'in kısmi basıncına bağlı olarak bazı substratların ayrışma oranları (Christensen ve Cossu, 1998)

4.2.7 Sıcaklık

Diğer bütün mikrobiyolojik proseslerde olduğu gibi anaerobik ayrışma da sıcaklıktan çok fazla etkilenmektedir. Metan bakterileri 40 °C civarında yaşayan bir mezofilik grup ve maksimum 70 °C civarında yaşayan termofilik bir gruptan oluşurlar.

Atıkların aerobik ve anaerobik ayrışmaları ısı veren reaksiyonlardır, ancak anaerobik ısı oluşumu genellikle ihmal edilebilir seviyededir. Buna örnek olarak glikozun aerobik ve anaerobik ayrışması verilebilir. Reaksiyonlar neticesinde anaerobik ayrışma ile aerobik ayrışmadan oluşan ısının sadece %7'sinin açığa çıktığı görülmektedir (Denklem 3.5 ve 3.6).

Depo gövdesinin sıcaklığı yoğunluk, yüzey alanı, nem muhtevası vb. gibi faktörlerden etkilenir. Biyolojik ayrışmanın ilk safhasında 70 °C gibi yüksek sıcaklıklara ulaşılabilir. Anaerobik ayrışma safhası başladığında ise sıcaklık düşer ve 30-35 °C civarında sabit kalır. Bu sıcaklık değerleri mezofilik metan bakterileri için optimum sıcaklıklardır. Sıcaklığın yükselmesi, genellikle gaz üretiminin de arttığının bir göstergesi olarak kabul edilir. Hartz, vd., (1982), biyolojik ayrışma ile sıcaklık arasındaki ilişkiyi ampirik bir ifadeyle belirtmiş ve depo sahalarında metan oluşumu için optimum sıcaklığın 41 °C olduğunu belirlemiştir.

Buna göre;

$$\ln \frac{G_2}{G_1} = E_a \frac{T_2 - T_1}{RT_1 T_2} \quad (4.1)$$

olup, burada G_1 ve G_2 , T_1 ve T_2 sıcaklıklarındaki (°K) gaz oluşumları; R , gaz sabiti (1.987 cal/°K/mol) ve E_a = aktivasyon enerjisini (20 kcal/mol) ifade etmektedir. Bu ifadeye göre sıcaklık arttıkça biyolojik ayrışma da logaritmik olarak artacaktır.

4.2.8 Nem/su muhtevası

Nem muhtevası, besi maddesi miktarıyla birlikte depo gazı oluşumunu kontrol eden en önemli faktördür. Şekil 4.5'de depo gazı oluşum hızıyla atığın nem muhtevası arasındaki ilişki gösterilmiştir.

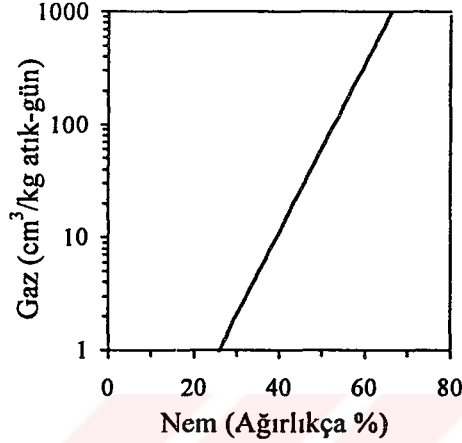
Katı atıklar depo sahalarına ilk depolandıklarında % 30-40 arasında nem muhtevasına sahiptirler. Suya doymun olmayan atıklardan daha çok H_2 üretilirken, suya doymun atıklar daha çok CH_4 ve CO_2 oluştururlar. Birim katı atık başına oluşan biyogaz üretimi ile nem oranı arasında logaritmik bir ilişki vardır. Depo sahasında metan üretiminin optimize edilebilmesi için atıkların suya doymun olması gerekir.

Steyer vd. (1999), nem oranının %20-70 arasında olması halinde günlük gaz üretiminin,

$$y = 0.024 \times e^{(0.15 \times \%H_2O)} \quad (4.2)$$

eşitliği ile tesbit edilebileceğini belirlemiştir. Burada,

y : cm³ biyogaz/kg katı atık-gün' dür.



Şekil 4.5 Depo gazı üretim hızı ile nem muhtevası arasındaki ilişki (Lisk, 1991)

4.2.9 Dane boyutu

Dane boyutlarının azalması gaz üretimini arttırmaktadır. Dane çapının küçültülmesi ile mikroorganizmaların organik maddeleri tüketmek için kullandığı yüzey alanı artmaktadır. Senior ve Balba, (1987) tarafından yapılan çalışmada partikül çapının 250 mm. den 10 mm. ye düşürülmesi ile gaz üretiminin 4.4 kat arttığı belirtilmiştir (Nastev, 1998).

4.3 Depo Gazı Bileşenleri ve Özellikleri

Katı atık düzenli depo sahalarından oluşan gazların büyük çoğunluğunu CH₄ ve CO₂ oluştursa da, yapılan çalışmalarda gaz içerisinde 170 den fazla bileşiğin olduğu belirlenmiştir (Gendebien, vd., 1992). Çoğu eser miktarda olan bu gazlar, insan ve çevre sağlığı açısından önemli problemler ortaya çıkarabilir. Bu nedenle, depo gazlarının kontrol edilmesi ve eğer mümkünse değerlendirilmesi gerekmektedir.

Tipik depo gazı bileşenleri Çizelge 4.2'de, iz bileşenleri ve konsantrasyonları ise Çizelge 4.3'de verilmiştir (Gendebien, vd., 1992).

Çizelge 4.2 Tipik depo gazı bileşenleri

| Bileşen | Kimyasal Formül | % Hacim |
|--------------------------------|------------------|---------|
| Metan | CH ₄ | 47,4 |
| Karbondioksit | CO ₂ | 47,0 |
| Su buharı (25 °C'de) | - | 3,0 |
| Parafin hidrokarbonlar | - | 0,1 |
| Aromatik-siklik hidrokarbonlar | - | 0,2 |
| Hidrojen | H ₂ | 0,1 |
| Hidrojen sülfür | H ₂ S | 0,01 |
| Karbon monoksit | CO | 0,1 |
| İz bileşenler | - | 0,5 |

Çizelge 4.3 Depo gazı içerisindeki bazı iz bileşenler ve konsantrasyonları

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

Düzenli depo sahalarının gerek tasarımı ve gerekse işletilmesi sırasında alınan tüm önlemlere ve çıkarılan tüm yönetmeliklere rağmen, depo sahalarının insan ve çevre sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri tam olarak önlenememektedir. Depo gazlarının en önemli bileşenleri ve bunların sebep olduğu çevresel etkiler şu şekilde özetlenebilir;

Metan (CH₄), renksiz ve kokusuz bir hidrokarbondur. Metan gazı depo gazının hacimce ortalama % 55'ini oluşturur. Yoğunluğu, depo sahasındaki sıcaklık aralıklarında 0.6-0.7 kg/m³ arasında değişir. Bu değerler atmosferik havanın yoğunluğunun hemen hemen yarısına

eşit olduğundan, CH₄ rahatlıkla depo sahası sınırları dışına çıkabilir. Gaz toplama sistemiyle tutulmayan CH₄'ın büyük bir kısmı atmosfere yayılır. CH₄, % 5-15 arasında molar konsantrasyonlarda ve O₂'nin mevcut olduğu durumlarda patlayıcı bir gazdır. Havada %5 oranında CH₄ bulunması en düşük patlayıcılık sınırı (LEL) olarak adlandırılır. LEL seviyesine eşit veya daha yüksek konsantrasyonlar, binalar, kanallar veya depo sahasına yakın diğer yapılar için tehlikelidir. CH₄ konsantrasyonları bu kritik seviyeye ulaştığında, atık içerisindeki O₂ tamamen tükenmiş olduğundan depo sahalarında patlamaların meydana gelmesi gibi direkt bir tehlike söz konusu değildir. Ancak bazı durumlarda depo gövdesinde ve sahada yangınlar çıkabilir. CH₄'ın daha az ancak yine de önemli bir kısmı, sahanın yakınında toprak örtüsüne doğru hareket eder veya saha içerisindeki veya civardaki boşluklarda birikir. Ayrıca CH₄'ın global ısınmaya etkisi de göz önünde bulundurulmalıdır. CO₂ ve su buharından sonra infrared ışınlarını tutan üçüncü önemli gaz CH₄'dır. Her bir CH₄ molekülü, bir CO₂ molekülünün absorblayabileceği infrared fotonlarının 23 kat daha fazlasını absorblayabilir. Ancak, atmosferde 83 kat daha az miktarda CH₄ molekülü bulunduğu için, CH₄'ın sera etkisi CO₂'nin sebep olduğu sera etkisinin ¼'ü kadardır (Gardner, vd., 1993).

Öte yandan, depo sahalarından oluşan CH₄'ın bir enerji kaynağı olarak kullanılması düşüncesi, son yıllarda ortaya çıkmıştır. CH₄ konsantrasyonu hacimce %35 olduğunda gazın bu amaçla kullanılması ekonomiktir. Doğal gazın ısı değeri 30,8 MJ/m³ (29,2 Btu/m³) olduğu göz önüne alındığında, %50 CH₄ ihtiva eden depo gazının, ısı değeri 15,1 MJ/m³ (14,3 Btu/m³) olan orta dereceli bir enerji kaynağı olduğu görülmektedir (Gendebien, vd., 1992).

Karbon dioksit (CO₂), atmosferde % 0.036 konsantrasyonunda mevcuttur. Depo sahalarındaki sıcaklıklarda yoğunluğu yaklaşık 1.8 kg/m³ civarındadır. Bu değer atmosferik havanın yoğunluğunun 1.5, CH₄'ın yoğunluğunun ise yaklaşık 2.8 katına eşittir. Bu sebeple, CO₂ depo sahasının alt kısımlarında hareket halindedir. Depo gazının diğer önemli bileşeni olan CO₂ patlayıcı veya zehirli olmamasına rağmen atmosferdeki CO₂ konsantrasyonları özellikle son yıllarda büyük ölçülerde artış gösterdiğinden önem kazanmış ve çevresel açıdan dikkate alınmaya başlanmıştır. CO₂ konsantrasyonundaki bu dengesiz artış sonucunda 1948 yılında atmosferdeki ortalama CO₂ konsantrasyonu 310 ppm (hacimce % 0.031) iken, 1996'da bu değer 356 ppm (hacimce % 0.0356) seviyesine ulaşmıştır (Nastev, 1998). Bu büyük artış, CO₂'in sera etkisinden dolayı global ısınmaya yol açabilecek seviyelerdedir. CO₂'in yol açtığı ikinci büyük tehlike asidik şartların oluşmasına yol açmasıdır. CO₂, suda çözünebilir özellikte olduğundan, su ile temas halindeki CO₂'in büyük bir kısmı sıvı faza geçecektir. Çözünmüş

CO₂, bikarbonat (HCO₃⁻) iyonları ve/veya karbonik asit (H₂CO₃) oluşturarak sıvının pH'ını düşürür. Bunun sonucunda sızıntı suyunun sertliği ve mineral madde muhtevası artabilir.

Atmosferik hava, azot (N₂, hacimce % 78), oksijen (O₂, % 21), argon (A, % 1) ve eser miktarda diğer bileşenlerden oluşur. Depo gazı bileşimi analizleri yapılırken ölçülen O₂ ve N₂'un kaynaklarını numune alma sırasında hava girişi veya gaz toplama sistemindeki sızıntılar oluşturmaktadır. Kimyasal ve biyolojik reaksiyonlar sırasında O₂'e çok fazla gereksinim duyulduğundan hızla tükenir.

Su buharı, gaz fazında her zaman mevcuttur. Sıcaklığın artmasıyla birlikte ortamdaki su buharının miktarı da artar. Spesifik ısıl değeri diğer gazlara oranla çok yüksek olduğundan, gaz fazında ısı taşınımını sağlayan en önemli unsurdur.

4.4 Depo Gazının Kontrol Yöntemleri

Düzenli depo sahalarında, depo gazının atmosfere taşınmasına izin verilmemesi gerekmektedir. Bunun en kolay ve en uygun yolu, oluşan gazın toplanarak enerji elde edilmesi amacıyla arıtılarak kullanılmasıdır. Böylelikle hem depo gazlarının olumsuz etkileri bertaraf edilmiş olacak, hem de yeni bir enerji kaynağı olarak kullanılabilir. Bu amaçla gerçekleştirilen gaz toplama ve ayırma işlemleri sırasında CH₄ içeriği yüksek bir gaz elde edilmektedir.

Yüksek metan içeriğine sahip depo gazının enerji elde etmek için kullanılması önemli ölçüde uygulama alanı bulmaktadır. Depo gazından enerji elde etmek için çeşitli teknolojiler mevcut olup maliyet analizleri yapıldıktan sonra bu gazın enerjiye dönüştürülmesi gerekmektedir (Gendebien, vd., 1992).

Katı atık depo sahalarındaki gaz oluşum hızı sahadan sahaya ve zamana göre değişiklik göstermektedir. Depo sahası işletim planında gazın kullanımı için gerekli dizayn yapılmadan önce, gaz hacmi ve hızının dikkatlice izlenmesi gerekmektedir. Ayrıca bu gazlar, insanlar ve saha çevresinde potansiyel tehlike oluşturduğu için kontrol altına almak maksadıyla izleme çalışmalarının yapılması gereklidir (Price, vd., 1998).

4.4.1 Depo gazlarının arıtımı

Depo gazlarının toplanıp kullanılmadan önce arıtılmaları gerekmektedir. Depo gazı arıtımının iki temel amacı vardır. Birincisi, depo gazlarının nihai kullanımı için depo sahasından alınan veya burada oluşan kirliliklerin bertaraf edilmesi, ikincisi ise depo gazının doğal gaz olarak

MÜHÜR

adlandırılan, hemen hemen saf metana dönüştürülmesinin sağlanmasıdır. Bu gaz aynı zamanda yüksek BTU' ya (British Thermal Unit) sahip bir gazdır. Bu nedenle depo gazı arıtımı, en büyük bileşenlerinden birisi olan CO₂'in giderimini sağlamalıdır. Bunun dışında giderilmesi gereken diğer bileşenler halojenli bileşikler, H₂S gibi korozif maddeler veya metanı seyrelten ve ısıtma değerini etkileyen karbon monoksit, azot ve sudur (Gendebien, vd., 1992).

4.4.1.1 Depo gazından eser bileşiklerin bertarafı

Yüksek konsantrasyonlarda halojenli organik bileşikler içeren depo gazları 3 teknikle arıtılabilir : Aktif karbon, reçine veya moleküler eleklerle adsorpsiyon; sıvılarda adsorpsiyon ve soğutmayla yoğunlaşma.

Sabit yataklı aktif karbonla adsorpsiyon en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Bu teknik yaklaşık 50 yıl kadar önce bulunan, solventlerin geri alınması proseslerine uymaktadır. Otomatik olarak çalışan parçalardan oluştuğundan işletme bakım ihtiyacı düşüktür. Basınç salınımıyla çalışan adsorpsiyon sistemleri de depo gazındaki iz kirlilikleri gidermekte kullanılan bir başka yöntemdir. Depo gazlarının arıtımında bazen biyofiltreler de kullanılabilir (Gendebien, vd., 1992).

4.4.1.2 Depo gazı kondensatlarının bertarafı

Depo gazı su buharına hemen hemen %100 doygundur. Gazın toplanması ve işlenmesi süresince sıcaklık değişikliklerine bağlı olarak bu su buharı yoğunlaşır ve organik ve inorganik eser bileşikleri çözer. Kondensatlar korozif özellikte olup, bileşenlerine bağlı olarak sonuçta patlayıcılık veya toksik özellikler gösterirler. Bu nedenle depo gazı içeriğinde bulunan kondensatların bertarafı gereklidir.

Depo gazı kondensatları, gazdan ayrıldıktan sonra güvenli bir yolla bertaraf edilmeli veya potansiyel tehlike özelliklerinden dolayı arıtılmalıdır. Toplanan kondensatlar depo sahasına geri devrettirilebilir, yüzeyden uygulamayla veya kuyulara geri verilerek toplanan sızıntı suyuyla birlikte arıtılabilir. Bazı uygulamalarda kondensat fazının ayrı olarak toplanması söz konusudur. Sıvı faz arıtma tesisine gönderilirken ayrılan hidrokarbon fazı petrol ve yağ üreticilerine satılır veya flairlarda yakılır (Gendebien, vd., 1992).

4.4.2 Depo gazı kullanımının ekonomik açıdan değerlendirilmesi

Depo gazlarının nihai kullanımı aşağıdaki alternatiflerden biriyle gerçekleşmektedir (Reinhart, 1994):

1. Havalandırma (geri kazanım yok, koku ve patlama tehlikesi, sera etkisi),
2. Flairlarla yakma (geri kazanım yok, daha az koku ve patlama tehlikesi),
3. Direkt yakma (ısı üretimi),
4. Motor yakıtı (ısının geri kazanımıyla ve geri kazanımsız mekanik veya elektrik gücü),
5. Türbin yakıtı (elektrik gücü),
6. Araç yakıtı (mekanik güç),
7. Doğal gaz şebekesine enjeksiyon,
8. Kimyasal madde üretimi.

Depo gazının nihai kullanımıyla diğer kaynaklardan oluşan biyogazın nihai kullanımı arasında fark yoktur. Bununla birlikte yukarıdaki tercihlerin uygulanabilirliği depo gazı ve diğer biyogaz kaynakları arasında farklılıklar göstermektedir. Dikkat edilmesi gereken konu depo gazının özelliklerindeki değişiklikler ve depo gazında her zaman bulunması muhtemel olan, özellikle halojen içeren organik bileşikler gibi eser bileşiklerdir.

4.4.2.1 Depo gazının doğal gaza dönüştürülmesi

Depo gazları, içeriğindeki CO₂ muhtevası hacimsel olarak %1-3'ün altına düştüğünde doğal gaz olarak düşünülebilir. H₂S muhtevası 5 mg/m³'ün altında kalmalıdır. CO₂ giderimi sıyırma, moleküler boyutta çalışan aktif odun kömürü, absorpsiyon, sentetik polimer membranlardan geçirme, veya düşük sıcaklıkta distilasyon yöntemlerinden biriyle sağlanabilir.

Absorpsiyon proseslerinde CO₂, organik bir solvent yada su içerisinde çözünür. Adsorpsiyon prosesleri, Selexol veya Krysol prosesleri gibi metanolün çok düşük sıcaklıklara kadar soğutulduğu fiziksel, veya monoetanolaminin (MEA) kullanıldığı kimyasal solvent sistemleri içerirler. Kimyasal solvent proseslerinde H₂S ve CO₂ kimyasal reaksiyonlarla giderilirken, fiziksel solvent proseslerinde her iki gaz da solvent içerisindeki kısmi basınçlarına bağlı olarak çözünürler. Düşük sıcaklıkta distilasyon proseslerinde depo gazı sıvılaştırılır ve distilasyonla bileşenlerine ayrılır.

Metanın zenginleştirilmesi, SMSC olarak adlandırılan basınç salınlı karbon moleküler eleklerle ve basınç ve sıcaklık salınlı kolon prosesleriyle başarıyla sağlanabilir (Gendebien, vd., 1992).

4.4.2.2 Depo gazlarının yakılması

Flairlerle yakma, depo gazlarının ve bunlardan kaynaklanan kokunun kontrolü için depo sahalarında uygulanan en yaygın metottur. Depo gazlarının enerjiye dönüşümü söz konusu olduğunda da, güvenlik açısından flair bulundurulması zorunludur.

Flairların çevresel önemi, hidrokarbon bileşiklerini yok etme verimleri ve dioksin gibi yanmayan ürünlerin oluşmamasıdır. Flairlardaki giderme verimi %98-99.5 civarındadır. Giderme verimi tamamıyla depo gazı kompozisyonunun, atmosferik şartların, yakıcı tasarımının, ateşleme kaynağı gibi parametrelerin bir fonksiyonu olan alevin stabilitesine bağlıdır. Depo gazları %30-60 arasında CH_4 ihtiva ettiklerinde, flairlarda rahatlıkla sabit bir alev elde edilebilir. Kapalı flairlar ise, azot oksitler (N_yO_x), karbon monoksit ve hidrokarbonlar gibi toksik emisyonları daha verimli bir şekilde giderme özelliğine sahiptirler (Gendebien, vd, 1992).

Depo gazlarının direkt yakılması

Direkt yakma depo gazlarının tüketilmesinde kullanılan en basit ve en eski yöntemdir. Kullanılan yakıt doğal gaz ve depo gazlarının bir karışımından oluştuğundan, yakıcının adaptasyonu için gerekli olan modifikasyonlar daha basittir ve korozyon problemleri minimumdur (Ruth, 1998). Depo gazları genellikle geniş endüstriyel kazanlarda veya tuğla, kireç veya çimento fırınlarında yakılır. Depo gazı ayrıca seralarda kullanılabilir. Ayrıca, atıksu arıtma tesislerinden ortaya çıkan arıtma çamurlarının kurutulmasında da kullanılabilir.

Depo gazlarının sabit motorlarda yakıt olarak kullanılması

Direkt yakmanın mümkün olmadığı durumlarda depo gazlarının arıtım ve değerlendirilmesinde kullanılabilecek en ekonomik çözüm yolu elektrik üretimidir. Elektrik üretimi, depo gazının motorlarda yakıt olarak kullanılmasıyla gerçekleşir. Motorların, depo gazlarında kullanılmaya başlamadan önce bazı modifikasyonlara tabi tutulmaları gerekir. Depo gazının yapısından dolayı, aşınmaya karşı normalden daha dayanıklı malzemenin yapılmış vanalar ve vana kapakları kullanılmalıdır.

Motorun bazı parçalarının halojenli organik bileşiklerin zararlarına karşı çok hassas olması diğer bir kısıtlamadır. Depo gazındaki bu bileşikler, motorun yüksek sıcaklığından dolayı HCl ve CO₂ ye ayrılırlar. HCl'nin büyük kısmı çıkış gazıyla birlikte çevreye yayılır. Bu gaz motor teçhizatını direkt olarak yada yağın asitlenmesi yoluyla etkiler.

Korozyonla ortaya çıkan zararların önlenmesi için; motor yağına bazı ilaveler yapılarak HCl'nin tamponlanması sağlanabilir, tehlikeye yol açabilecek malzemelerden imal edilmiş ekipmanlar korozyona dirençli maddelerle kaplanabilir ve depo gazı, halojenli organik iz bileşiklerin bertarafını sağlayacak şekilde artırılabilir (Spiegel, vd., 1997).

Depo gazının gaz türbinlerinde yakıt olarak kullanılması

Bir gaz türbini atmosferden önemli miktarda hava alır, bu havayı sıkıştırır, ısıtmak için bir yakıt kullanır ve daha sonra bunu bir enerji türbinine göndererek mekanik güç veya elektrik enerjisi üretimini sağlar. Depo gazındaki metanın ısı muhtevası 13000-18000 kJ/m³ gibi değerlerde olmasına rağmen, herhangi bir modifikasyon uygulanmadan kullanılabilir. Eğer ısıtma değeri daha düşükse, çift yakıt sisteminin kullanılması daha uygundur. Gaz türbinlerinde yakma ile motorlarda yakma işlemleri hava/yakıt oranı, türbülans, bekleme süresi ve ateşleme kaynağı gibi parametrelerin optimum değerlerde olmasını gerektirir.

Gaz türbinlerinin en önemli avantajı, dizel motorlardan veya buhar türbininden daha az yer kaplamasıdır. Ayrıca gaz türbinleri, daha fazla elektrik enerjisi üretir ve bakım ve maliyetleri daha düşüktür. Ancak bir gaz türbininin depo gazı ile çalıştırılabilmesi için her sıkıştırmadan sonra yağ ve suyun ayrılması gerekmektedir (Gendebien, vd., 1992).

4.4.2.3 Depo gazının araç yakıtı olarak kullanılması

Depo gazları bazı şartlar sağlandıktan sonra araç yakıtı olarak kullanılabilir. Önce, depo gazı doğal gaz kalitesine yükseltilir, daha sonra araçlar doğal gazla çalışmaya uyumlu hale getirilir.

4.4.2.4 Depo gazının doğal gaz şebekesinde kullanılması

Depo gazının sahanın içinde veya yakınında kullanılması mümkün olmadığında, gazın doğal gaz kalitesine çıkarılması ve şebekeye verilmesi düşünülebilir. Depo gazı şebekeye verilmeden önce artırılır ve hemen hemen saf metana dönüştürülür. Bunun yanında güvenlik nedeniyle gaza bazı koku yapıcı bileşikler ilave edilir. Bazı durumlarda propan ilavesi gerekli olabilir. Depo gazının iyileştirilmesi için uygulanacak arıtma prosesleri depo gazının bileşimi ve istenen kalite standartları ile ilgilidir (Gendebien, vd., 1992).

4.4.2.5 Depo gazının kimyasal madde üretiminde kullanılması

Depo gazının içeriğindeki metandan, petrokimyasal proseslerde hammadde olarak yararlanılması, teknik olarak mümkündür. Depo gazlarından bu şekilde yararlanılabilmesi için bu nihai kullanım şeklinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bugün için en uygun kullanım şekli metanol (CH_3OH) üretimi olarak görülmektedir (Gendebien, vd., 1992).



5. DEPO GAZI OLUŞUMUNUN MODELLENMESİ

5.1 Gaz Oluşum Potansiyeli

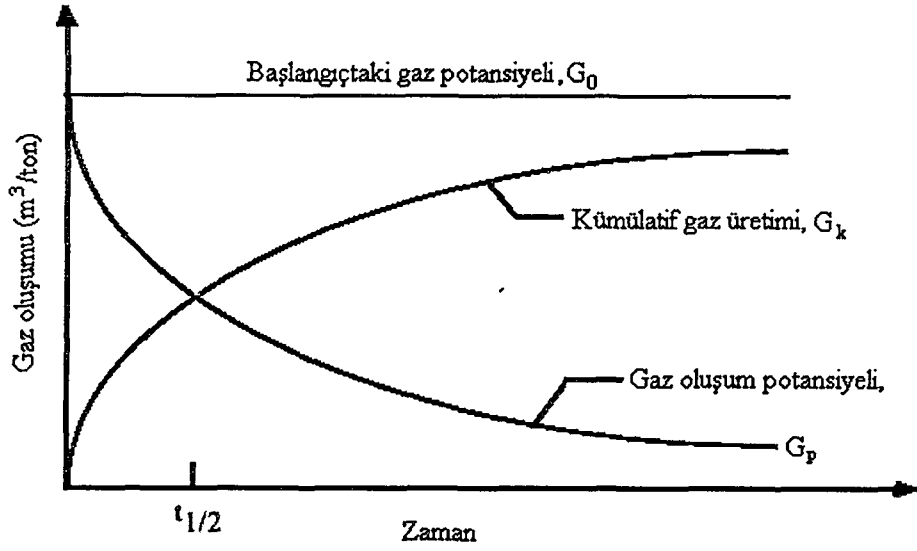
Düzenli depo sahalarında gaz oluşum oranları ve gaz potansiyelinin izahında kullanılan bazı terimler şu şekilde açıklanabilir;

- *Başlangıçtaki gaz potansiyeli, ($G_0, m^3/ton$):* belirli bir miktar atıktan oluşması beklenen depo gazı miktarını ifade eder.
- *Kümülatif gaz oluşumu, ($G_k(t), m^3/ton$):* belirli bir miktar atıktan (t) anına kadar oluşan gaz miktarını ifade eder. $t=0$ anında kümülatif gaz oluşumu da sıfırdır ($G_k=0$). Daha sonra gaz oluşumu ve kümülatif gaz miktarı bir süre hızla artar.
- *Oluşum potansiyeli veya geriye kalan gaz potansiyeli, ($G_p(t), m^3/ton$):* belirli bir miktar atıktan (t) anından sonra oluşabilecek gaz potansiyelini ifade eder. Gaz oluşumunun başlangıcında oluşum potansiyeli yüksek ve hemen hemen başlangıçtaki gaz potansiyeline eşittir. Zamanla, oluşum potansiyeli hızla düşerek sıfıra yaklaşır.
- *Gaz oluşum hızı, $G, G(t) = \frac{dG_k}{dt} = -\frac{dG_p}{dt}$, ($m^3/ton/yıl$),* belirli bir miktar atıktan bir yılda meydana gelen depo gazı miktarıdır.

Başlangıçtaki gaz potansiyeli, gaz oluşum potansiyeli ve kümülatif gaz oluşumu Şekil 5.1'de verilmiştir. $t = t_{1/2}$ süresi, atığın organik madde muhtevasının yarısının biyolojik olarak ayrışması için gerekli olan süredir. Şekil 5.1'den de görüldüğü gibi, herhangi bir (t) süresi için, başlangıç potansiyeli, kümülatif oluşum ile oluşum potansiyelinin toplamına eşittir ($G_0 = G_p + G_k$). Ayrıca, $t = t_{1/2}$ anında, gaz potansiyeli ile kümülatif gaz miktarı birbirine eşittir ($G_p = G_k$).

Başlangıç potansiyeli ile gaz oluşum hızı, gaz oluşum prosesinin temel özellikleridir. Gaz oluşumu atığın biyolojik olarak ayrışabilen ve nihai ürünler olan CH_4 , CO_2 ve ısıya dönüşebilen organik madde muhtevasına bağlıdır. Katı atıktan oluşabilecek CH_4 ve CO_2 miktarlarının belirlenmesinde kullanılan birkaç yöntem vardır. Bu yöntemler teorik bilgilere ya da laboratuvar ölçümlerine dayanmaktadır. Ancak bu yöntemler, depo sahalarında genellikle gerçekleşmesi mümkün olmayan optimum şartlardaki gaz potansiyelinin belirlenmesini sağlamaktadırlar (Nastev, 1998). Katı atık düzenli depo sahalarında depo gazı oluşum potansiyelinin belirlenmesinde stokhiyometrik metod, ayrışabilirlik testleri ve laboratuvar

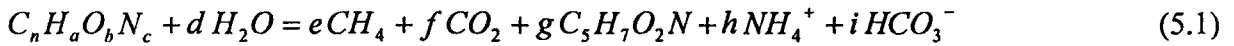
çalışmaları olmak üzere 3 yöntem kullanılmaktadır.



Şekil 5.1 Gaz oluşum potansiyeli ve kümülatif gaz üretimi

5.1.1 Stokhiyometrik metod

Katı atıklardan oluşabilecek CH_4 potansiyelinin belirlenebilmesi için öncelikle depolanan her bir ton atıktan oluşabilecek maksimum CH_4 potansiyelinin teorik olarak hesaplanması gerekmektedir. Depo gazını oluşturan temel gazların karbon içerdiği bilindiğine göre atığın karbon muhtevasının belirlenmesi gereklidir. Atıktan oluşabilecek toplam CH_4 miktarı için



yazılabilir. Burada, a - n stokhiyometrik katsayılar, $C_n H_a O_b N_c$ katı atığın amprik ifadesi ve $C_5 H_7 O_2 N$ ise bakteri hücresinin amprik formülünü göstermektedir. Karbon, hidrojen, oksijen ve azotun, yaş ağırlığın sırasıyla % 28, % 3.5, % 22.4 ve % 0.33'ünü oluşturduğu varsayıldığında atığın formülü $C_{99} H_{149} O_{59} N$ olur. Buna göre CH_4 potansiyeli yaklaşık olarak $270 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t}$ atık, CO_2 potansiyeli ise $230 \text{ m}^3 \text{ CO}_2/\text{t}$ atık olarak hesaplanır. Bu değerler hacimsel olarak % 54 CH_4 ve % 46 CO_2 'e karşılık gelmektedir. Buna göre, bir ton yaş atıktan yaklaşık 500 m^3 depo gazı oluşması beklenebilir. Kuru ağırlık için ise bu değer yaklaşık 700 - 800 m^3 'tür. Ancak bu hesaplamalar depo gövdesindeki organik maddenin tamamının ayrıştığı varsayılarak ve sahada optimum şartların var olduğu düşünülerek gerçekleştirilmiştir (Shelton ve Tiedje, 1984).

5.1.2 Biyolojik ayrışabilirlik testi

Katı atıklardan oluşabilecek maksimum CH₄ miktarı, atık bileşenlerinin biyolojik ayrışabilirliklerine bağlı olarak hesaplanabilir. Bunun için çeşitli yaklaşımlar kullanılmaktadır:

- a) Biyolojik olarak ayrışabilen 1 kg. uçucu katı maddeden 517 litre CH₄ oluşabilir.
- b) Ayrışabilen maddeler atık kütlelerinin % 50'sini oluşturur ve bunun da % 50'si uçucudur.
- c) Evsel atıkların % 70'i biyolojik olarak ayrışabilir ve bu ayrışabilen kısmın % 70'i anaerobik ortamda gaz fazına geçer.

Farklı atık türleri üzerinde yapılan biyolojik ayrışabilirlik testlerinde teorik CH₄ miktarları 6-230 m³/t atık arasında hesaplanmış, ortalama olarak ise bu değer 47 m³/t atık olarak belirlenmiştir (Nastev, 1998).

5.1.3 Laboratuvar çalışmaları

Organik maddenin ayrışması sonucu oluşabilecek gaz miktarı, özel olarak hazırlanmış laboratuvar ölçekli 0.2 ile 3-4 m³'lük test hücrelerinde de belirlenebilir (Kinman vd., 1987). Biyolojik ayrışma yavaş bir proses olduğundan, laboratuvar ölçekli çalışmalarda ayrışma süresini kısaltmak gerekmektedir. Bunun için biyolojik ayrışmayı etkileyen temel faktörler kontrol altında tutulur ve ortama çeşitli nutrientler ve bakteri hücreleri (arıtma çamuru) ilave edilir. Bu şartlar altında CH₄ oluşum potansiyeli ortalama olarak 210-260 m³/t atık civarındadır. Bunun dışında, laboratuvar çalışmaları depo sahasından alınmış kısmen ayrılmış atık numuneleri üzerinde de gerçekleştirilebilir. Bu durumda atığın geriye kalan CH₄ potansiyeli hesaplanabilir. Bunun için sahanın farklı bölgelerinden ve ayrışmanın farklı safhalarından numune alınması gerekmektedir. Alınan numunelerin hava ile temasını önlemek için atıklar hemen kapalı kaplara (plastik torbalar) yerleştirilmelidir. Bu tip çalışmalarda kullanılan numune miktarı çok azdır (5-10 gr). Taze atık ve depolamadan 4.4 yıl sonra depo sahasından alınan atık numunelerinde yapılan laboratuvar çalışmalarında, geriye kalan CH₄ potansiyeli 92-136 m³/t kuru atık iken, oluşan CH₄ miktarı 39-93 m³/t kuru atık olarak belirlenmiştir (Mehta, 2000).

Farklı teorik metodlar ve laboratuvar çalışmaları neticelerine göre depo sahalarının gaz oluşum potansiyelinin 100-250 m³/t yaş atık arasında değiştiği, oluşan gazın % 55'inin CH₄ olduğu varsayıldığında CH₄ potansiyeli 55-137 m³/t yaş atık olduğu belirtilmektedir. Horan, (1991) toplam CH₄ potansiyelinin 62-112 m³/t atık olduğunu tesbit etmiştir.

5.2 Gaz Oluşum Hızı

Depo sahasının ömrü boyunca gaz oluşum hızı üniform değildir. Atıklar depolandıktan sonraki ilk birkaç yıl içerisinde gaz oluşum hızı en yüksek değerlere ulaşır ve daha sonra yavaş yavaş düşer. Gaz oluşum hızlarıyla ilgili en doğru sonuçlar düzenli depo sahalarında yapılan ölçümlerden veya özel olarak hazırlanmış test hücrelerinden elde edilebilir. Bu şekilde elde edilen veriler çok değişik faktörlerden etkilenebilir.

Depo sahalarında yapılan gaz ölçümleri, gaz bacalarından belirli bir süre gaz çekilerek gerçekleştirilir. Daha sonra çekilen gaz veya gazın içerisindeki CH_4 miktarı gazın çekildiği süreye ve gaz bacasının etkin olduğu bölgedeki atık kütesine bölünerek gaz oluşum hızı hesaplanır. Bu metodun en önemli dezavantajları gaz çekme hızının oluşum hızına eşit kabul edilmesi, atığın miktarının tahmin edilmesi, gaz bacasının etkin olduğu bölgenin tam olarak belirlenememesi ve oluşan gazın tamamının bacada toplanamayıp bir kısmının atmosfere yayılmasıdır. Bu nedenle literatürde çok farklı gaz oluşum hızlarına rastlanmaktadır. Gaz oluşum hızlarıyla ilgili A.B.D.' deki bazı depo sahalarında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 A.B.D.' deki bazı depo sahalarında ölçülen CH_4 oluşum hızları
(Nastev, 1998)

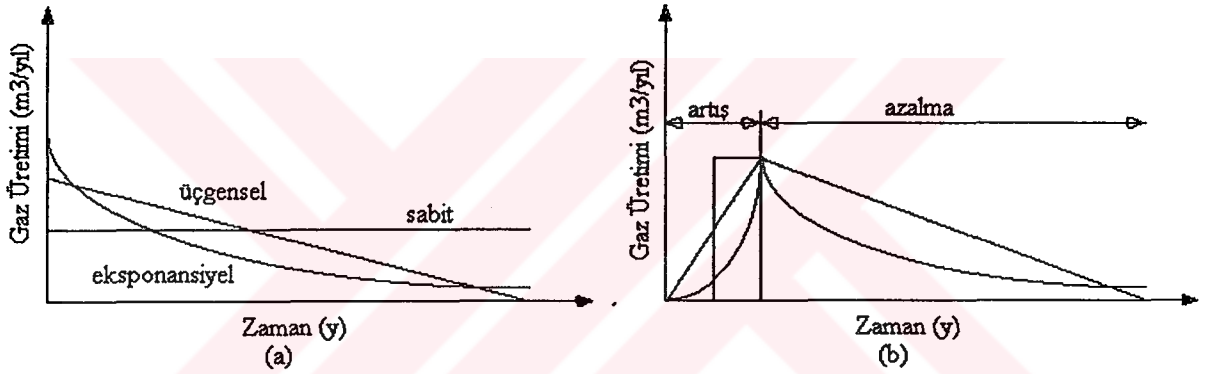
| Depo Sahası | Atık Miktarı ($t \cdot 10^6$) | CH_4 Oluşum Hızı ($m^3 / t/y$) |
|----------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| Azuza Western | 6 | 2,5 |
| Coyote Canyon | 19,6 | 2,5 |
| Hewitt | 5,6 | 2,5 |
| Palos Verdes | 3,4 | 3,1 |
| Scholl Canyon | 4,3 | 1,2 |
| Sheldon Arleta | 2,7 | 5,6 |
| Mountaingate | 14,0 | 2,9 |
| Olinda | 10,0 | 2,1 |
| Bradley | 17,0 | 2,9 |
| Industry Hills | 2,6 | 2,0 |
| Puente Hills | 42,0 | 7,1 |
| Calumet | 7,0 | 7,3 |
| Mountain View | 1,0 | 10,2 |
| Davis Street | 4,0 | 7,7 |
| Monterey Park | 18,0 | 4,4 |
| Toyon | 16,0 | 3,1 |
| Penrose | 9,0 | 5,4 |

5.3 Depo Gazı Oluşumu ile İlgili Modeller

Katı atık düzenli depo sahalarından oluşacak gaz miktarının matematiksel olarak ifade edilmesi için iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlar; genel kinetik parametrelerle basit amprik fonksiyonların kullanıldığı depo gazı oluşum hızı hesapları, ve biyolojik ayrışma sırasında meydana gelen fiziko-kimyasal reaksiyonlara dayanarak elde edilen kinetik parametrelerin kullanıldığı depo gazı oluşum hızı hesaplamalarıdır.

5.3.1 Genel kinetik parametrelerin kullanıldığı modeller

Literatürde en fazla karşılaşılan modeller bu tür modeller olup (Lee, vd., 1993; Manna, vd., 1999; Bonori, vd., 2001) başlangıçta CH₄ üretimi çok az veya hiç yoktur. Bundan sonra, CH₄ oluşumu lineer veya eksponansiyel olarak gerçekleşir (Şekil 5.2).



Şekil 5.2 Gaz oluşumunun zamanla değişimi, (Anex, 1996)
a) basit fonksiyonlar, b) kombinasyonlar

Bu tür basit modellerin çoğunda biyolojik ayrışma prosesleri için geliştirilen ve Monod eşitliği olarak bilinen ifade kullanılmaktadır. Bu matematiksel ifade;

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{KXC}{K_c + C} \quad (5.2)$$

şeklindedir. Burada, C, t anındaki substrat konsantrasyonu; X, mikroorganizma konsantrasyonu (kg mikroorganizma/m³ atık); K, 1 kg. mikroorganizmanın kullanabileceği maksimum substrat miktarı; K_c, substart kullanımının maksimum değerinin yarısına eşit olduğu andaki atık konsantrasyonudur.

5.3.2 Kompleks matematiksel modeller

Bu modeller, gaz oluşum hızını etkileyen fiziksel, kimyasal ve biyolojik değişkenlerin (atık bileşimi, su muhtevası, sıcaklık, absorpsiyon, adsorpsiyon, buharlaşma, seyrelme, fitrasyon, çökelme, nötralizasyon, oksidasyon, redüksiyon, vb.) etkilerini kompleks matematiksel ifadelerle belirtmektedir. Bu değişkenlerin depo sahalarındaki ayrışma prosesleri üzerine etkisinin belirlenebilmesi için çok detaylı analizlerin yapılması gerekmektedir. Bazı kompleks matematiksel modellerin esasları aşağıda kısaca verilmiştir.

5.3.2.1 Katı atıkların 1. derece kinetiğe göre ayrışması

Bu modele göre katı atıkların ayrışma oranı atık içerisindeki ayrışabilen madde miktarıyla doğru orantılıdır.

$$\frac{dC(t)}{dt} = -k * C(t) \quad (5.3)$$

Burada k, ayrışma hızı sabitini (yıl^{-1}); C(t), t anında katı atık içerisinde bulunan biyolojik olarak ayrışabilen organik madde miktarını (kg/yıl); ve t, zamanı (yıl) göstermektedir. Bu eşitliğin entegrasyonu;

$$C(t) = C_0 * e^{-kt} \quad (5.4)$$

ifadesi bulunur. Burada C_0 , atık içerisinde başlangıçta bulunan, kuru, organik, biyolojik olarak ayrışabilen madde miktarıdır.

Depo gazı oluşum hızı α , ($\text{m}^3/\text{ton/yıl}$), katı atıkların ayrışma oranıyla doğru orantılıdır.

$$\alpha = -0.8 * C_0 * e^{-kt} \quad (5.5)$$

Burada 0.8, 1 kg kuru organik maddeden oluşacak depo gazı miktarıdır.

5.3.2.2 Palos Verdes kinetik modeli

Palos Verdes kinetik modeli, depo sahalarında gaz üretim kinetiğini ortaya koyan iki kademeli 1. derece matematiksel bir modeldir. Birinci kademede, gaz oluşumu zamanla artmakta, ikinci kademede ise zamanla eksponansiyel olarak azalmaktadır. Bu modelde, birinci kademeden ikinci kademeye geçişin, oluşması beklenen gaz miktarının yarısı meydana geldiğinde gerçekleştiği görülmüştür, ve buna yarı ömür denir. Organik atıklar kolay ayrışabilen (yiyecek ve bahçe artıkları), zor ayrışabilen (kağıt, tekstil) ve ayrışmayan (plastik, naylon) maddeler

olmak üzere üç kategoriye ayrılır. Oluşan gazın toplam hacmi, her bir atık sınıfından oluşan gazın toplamına eşittir (Gendebien, vd., 1992).

5.3.2.3 Sheldon-Arleta kinetik modeli

Bu model de Palos Verdes kinetik modeline benzer iki kademeli 1. dereceden kinetik bir modeldir. Modelde gaz oluşumunun zamanla ilişkisini ortaya çıkarmak için boyutsuz bir gaz oluşum eğrisi çizilmiştir. Bu modelde atıklar kolay ayrışabilen ve zor ayrışabilen atıklar olarak iki gruba ayrılmıştır (Gendebien, vd., 1992).

5.3.2.4 Scholl Canyon kinetik modeli

Tek kademeli, 1. dereceden kinetik bir modeldir ve Palos Verdes ve Sheldon-Arleta kinetik modellerinin ikinci kademelerine benzemektedir. Modele göre, anaerobik şartların olduğu ve mikrobiyal kütlelerin gelişerek stabilize olduğu süre boyunca gaz oluşumu artmaktadır. Bundan sonra, atık içerisindeki organik fraksiyonun azalmasıyla gaz oluşum oranı da azalır. Scholl Canyon kinetik modelinin matematiksel ifadesi şu şekildedir;

$$Q = 2 * L_0 * R * (e^{-kc} - e^{-kt}) \quad (5.6)$$

Q= yıllık gaz oluşumu miktarı (m^3 /yıl), L_0 = depolanan atıktan oluşabilecek metan miktarı (m^3 /ton), R= depo sahasının aktif ömrü boyunca depolanan ortalama atık miktarı (ton/yıl), k= metan oluşum hızı sabiti (m^3 /yıl), c= depo sahası kapatıldıktan sonra geçen süre (yıl), t= ilk depolamanın başlamasından sonra geçen süredir (yıl) (Gendebien, vd., 1992).

5.3.2.5 P.G.E. kinetik modeli

Pasifik gaz ve elektrik, depo gazı oluşumu için kinetik bir model geliştirmiştir. Bu modelde gaz oluşum oranlarının zamana karşı değişimi ve belirli bir zaman aralığında atığın gaza dönüşüm oranı belirlenmektedir. Hem parabolik hem de eksponansiyel formlar kullanılmış ve aktif depo sahaları için eksponansiyel ifadelerin daha uygun sonuçlar verdiği görülmüştür. Modelde, atık miktarı (birim zamanda depolanan atık), atık yüksekliği ve depolanan atığın yoğunluğu gibi veriler de kullanılmaktadır. Bu veriler kullanılarak atık içerisindeki her bir bileşen için gaz oluşumu zamana bağlı olarak hesaplanır ve bu değerler toplanarak toplam gaz oluşumu belirlenir (Gendebien, vd., 1992).

5.3.2.6 EMCON kinetik modeli

EMCON'un geliştirmiş olduğu metan oluşum modeli MGM'nin (Methane Generation Model) uygulanabilmesi için atık tonajı, bileşimi, su muhtevası, CH₄ oluşumu başlayana kadar geçen sũre gibi başlangıç verilerine ihtiyaç vardır. Bu model, organik maddenin anaerobik ayrışması için optimum şartlar mevcut iken, ıslak ağırlığı bilinen (i) bileşeninden oluşabilecek maksimum CH₄ hacminin belirlenmesinde kullanılır. Bunun için şu matematiksel ifade geliştirilmiştir.

$$C_i = k * k' * W_i * P_i * (1 - M_i) * V_i * E_i \quad (5.7)$$

Burada, W_i: atığın toplam ağırlığı, P_i: i bileşeninin toplam atık kũtlesi içerisindeki miktarı, M_i: i bileşeninin nem muhtevası, V_i: i bileşeninin uçucu katı madde muhtevası, E_i: i bileşeninin biyolojik olarak ayrışabilen kuru uçucu katı madde muhtevası, C_i: i bileşeninden oluşabilecek gaz hacmidir. Ayrıca k=351 litre CH₄/kg KOİ, k'= 1.5 kg KOİ/ kg uçucu katı maddedir. n adet bileşenenden meydana gelen atıktan oluşabilecek toplam CH₄ miktarı;

$$C_t = \sum_{i=1}^n C_i \quad (5.8)$$

ifadesiyle hesaplanabilir.

5.3.2.7 EPA (LandGEM) modeli

LandGEM (Landfill Gas Emission Model) modeli, katı atık dũzenli depo sahalarından oluşabilecek, hava kirliliğine yol açan gaz emisyonlarının tahmininde kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Model birinci derece bir bozunma reaksiyonuna dayanmaktadır (Thornloe, 1998). Modelde depo gazının yarı yarıya metan ve karbondiokstitten oluştuğu kabul edilmiş, bununla birlikte çok dũřuk konsantrasyonlardaki diğer kirleticiler de gũz nũnde bulundurulmuştur. Herhangi bir katı atık dũzenli depo sahasından oluşabilecek emisyonların tahmin edilebilmesi için şu bilgiler kullanılmaktadır:

- Depo sahasının dizayn kapasitesi (depo sahasında bertaraf edilebilecek toplam katı atık miktarı),
- Depo sahasında bertaraf edilmiş atık miktarı veya sahanın ortalama yıllık atık bertaraf kapasitesi
- Metan oluşum hızı (k),
- Potansiyel metan üretim kapasitesi (L₀),
- Depo sahasının kaç yıldır kullanıldığı,
- Evsel katı atıklarla birlikte tehlikeli atıkların da sahada depolanıp depolanmadığı

Modelde kullanılan denklem temel bir birinci derece bozunma denklemi olup

$$Q_{CH_4} = L_0 * R * (e^{-kc} - e^{-kt}) \quad (5.9)$$

şeklindedir. Burada;

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

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

R = depolama ömrü boyunca yıllık bertaraf edilen atık miktarı, (ton/yıl),

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

c = saha kapatıldıktan sonraki yıl sayısı, (yıl) (depolama devam ediyorsa c=0),

t = depolamanın ilk başladığı yıldan beri geçen süreyi, (yıl), göstermektedir.

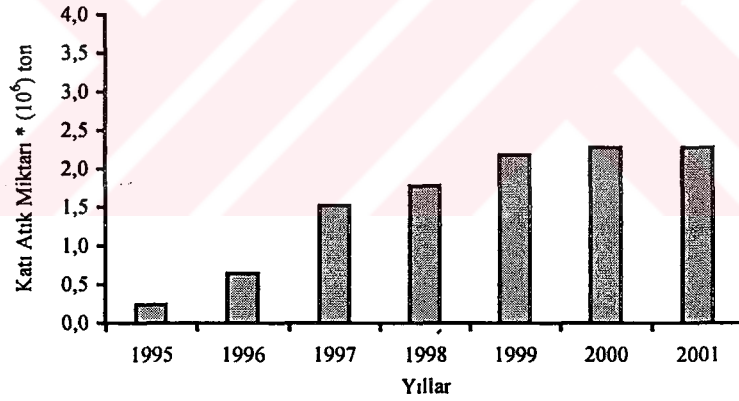
Modelde emisyonların hesaplanması iki farklı standarda göre tasarlanmış ve bunun seçimi kullanıcıya bırakılmıştır. Bunlardan biri CAA (Clean Air Act) yönetmeliklerinin uygulanabilirliği esasına dayanmaktadır ve bu sette k değeri $0,05 \text{ yıl}^{-1}$ ve L_0 değeri $170 \text{ m}^3/\text{ton}$ atık olarak kabul edilmiştir. AP-42 olarak adlandırılan (US EPA Compilation of Air Pollutant Emission Factors) ikinci standartta ise $k = 0,04 \text{ yıl}^{-1}$ ve $L_0 = 100 \text{ m}^3/\text{ton}$ atık kabul edilmiştir. Bu değerlerin tamamı kullanıcıya göre değiştirilebilmekte ve bunların yerine deneylerle elde edilen veriler kullanılabilir. Modelde ayrıca sahanın kapanacağı yıla kadar depolanacak atık miktarı otomatik olarak hesaplanmakta ve kalan süreye eşit bir şekilde dağıtılmaktadır (Thornloe, 1998).



6. ODAYERİ KATI ATIK DÜZENLİ DEPO SAHASINDA YAPILAN ÇALIŞMALAR

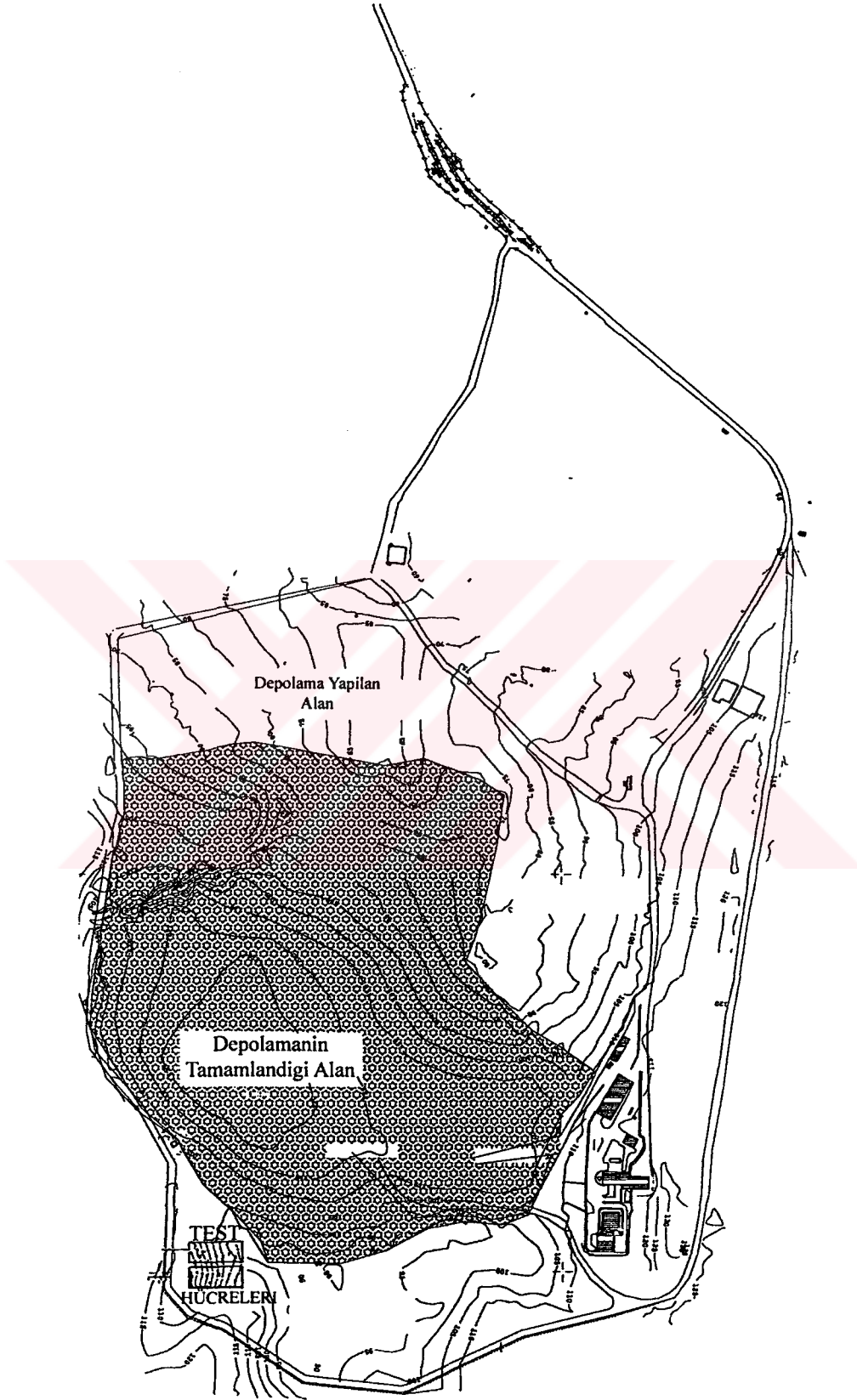
6.1 Sahanın Tanıtılması

Türkiye'nin en büyük atık depolama kapasitesine sahip olan ve İstanbul'un Avrupa yakasında oluşan katı atıkların bertaraf edildiği Odayeri Düzenli Katı Atık Depo Sahası, Eyüp ilçesi Kemerburgaz beldesinde Kalyoncu sırtı batısındaki vadide yer almaktadır. Vadinin boyu 2500 m., eni sırttan sırtta maksimum 800 m. dir. Odayeri depo sahası yaklaşık 125 hektarlık izdüşüm alanı ile 1995'ten bu yana İstanbul Avrupa yakası katı atıklarının bir kısmının, 2000 yılı itibariyle de tamamının bertaraf edildiği bir saha konumuna ulaşmıştır. 1995'de faaliyete giren depo sahasının işletme süresi 25 yıl olarak tasarlanmıştır (Demir, vd., 2001d). Ancak, özellikle Avrupa yakasında oluşan katı atık miktarının hızla artması sebebiyle, depolamanın başlamasından bu yana geçen 7 yıllık süre zarfında sahanın toplam kapasitesinin hemen hemen yarısı kullanılmıştır. Şekil 6.1'de Odayeri Katı Atık Düzenli Depo Sahası'na 1995 yılından itibaren depolanan atık miktarları görülmektedir.



Şekil 6.1 1995-2001 yılları arasında Odayeri depo sahasına depolanan atık miktarları

Avrupa yakasında oluşan katı atıklar, ilçe belediyelerince Baruthane, Halkalı ve Yenibosna aktarma istasyonlarına taşınmakta, buradan da silolarla Odayeri Katı Atık Düzenli Depo Sahası'na aktarılmaktadır. Atıkların hücre metoduyla depolandığı Odayeri katı atık depo sahasının genel görünüşü ve çalışmanın gerçekleştirildiği test hücrelerinin konumu Şekil 6.2'de verilmiştir.



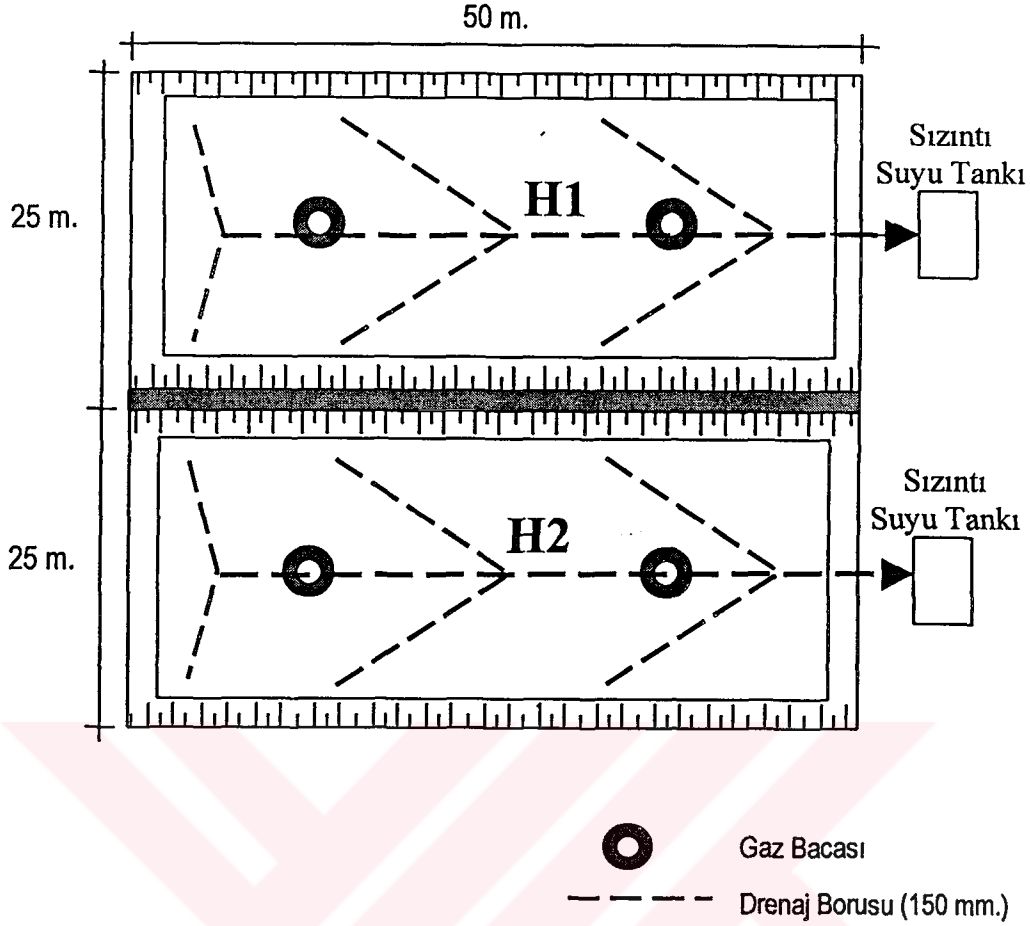
Şekil 6.2 Odayeri depo sahasının genel görünüşü ve test hücrelerinin depolama alanındaki konumu

6.2 Test Hücrelerinin Tanıtılması

Katı atık düzenli depo sahalarında depo gazı oluşumu ve buna etki eden faktörlerin belirlenmesi amacıyla Odayeri katı atık depo sahası içerisinde 25*50*5 m. boyutlarında 2 adet test hücresi teşkil edilmiştir. Test hücrelerinin Odayeri depolama sahasındaki konumu Şekil 6.2’de verilmiştir.

Hücrelerin yapılacağı alanda kazı çalışmaları tamamlanıp tabanı sıkıştırıldıktan sonra üzerine yaklaşık 60 cm. kil tabakası serilmiştir. Kil tabakasının üzeri geçirimsizliği sağlamak üzere, 2 mm. kalınlığında HDPE (Yüksek Yoğunluklu Polietilen) folye ile kaplanmıştır. Folyenin zarar görmesini önlemek için koruyucu bir tabaka (geotekstil) teşkil edilmiştir. Drenaj tabakası, çakıl ve dren borularından oluşturulmuş olup $\phi 150$ HDPE borular kullanılmıştır. Ayrıca oluşacak depo gazının tahliyesi için her hücrede ikişer adet olmak üzere toplam 4 adet gaz bacası teşkil edilmiştir. Hücrelerin hazırlanması aşamasında sahada yapılan çalışmalar (kazı çalışmaları, taban ve üst örtü teşkili, vs.) EK-1’de verilmiştir.

Hücrelere atık depolama işlemine 3 Ekim 2001 tarihinde başlanmış, 8 Ekim 2001 tarihinde ise tamamlanmıştır. Katı atık miktarı her bir hücre için yaklaşık olarak birbirine eşit olup hücrelere toplam 11.000 ton çöp depolanmıştır. Hücrelerin üzeri 30 cm. üst örtü toprağı ve 40 cm. kil serilerek kapatılmıştır. Oluşan sızıntı sularını toplamak amacıyla her bir hücrenin drenaj borusu çıkışına birer adet 10 ton kapasiteli tank yerleştirilmiştir. Şekil 6.3’de test hücrelerine ait detaylar verilmiştir. Su muhtevasının katı atıkların biyolojik ayrışması üzerine etkisi de incelendiğinden, hücrelerin biri (H2), depolama işlemi tamamlanıp üst örtü serilmeden önce yaklaşık 30 ton sızıntı suyu ile nemlendirilmiştir. Depo gövdesinde ayrışmayı etkileyen bir diğer faktör olan sıcaklığın belirlenmesi amacıyla, atık içerisinde 0,5; 1,0; 1,5 ve 2m. derinliklerde olmak üzere her bir hücreye 4’er adet sıcaklık probu yerleştirilmiştir.



Şekil 6.3 Test hücreleri

6.3 Deneysel Çalışmalar

Odayeri katı atık depolama sahasında hazırlanan test hücrelerinde depo gazı bileşenlerinin zamanla değişiminin izlenmesi yanında, gövde sıcaklığı ve sızıntı suyunda stabilizasyon indikatörleri olarak pH, sülfat (SO_4^{2-}) ve kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) analizleri yapılmıştır. Ayrıca, depolamadan önce her bir aktarma istasyonundan gelen katı atıkların madde grupları tesbit edilmiştir. Nem muhtevası bakımından zenginleştirilmiş H2 hücresi ile H1 test hücrelerinde gerçekleştirilen sızıntı suyu ve gaz analizlerinin sonuçları EK-2'de verilmiştir.

Test hücrelerinde gerçekleştirilen analizleri katı atık, sızıntı suyu ve gaz analizleri olmak üzere 3 ana başlık altında incelemek mümkündür. Yapılan bu çalışmalarla depo sahasındaki her 3 fazın da özelliklerinin zamanla değişimi ve ayrıca birbirleriyle olan etkileşimleri

araştırılmıştır. Deneylerin tümü, ilgili standartlara ve deneyde kullanılan araç-gereçlerin üreticileri tarafından hazırlanan kullanım kılavuzlarına göre gerçekleştirilmiştir.

6.3.1 Katı atık analizleri

Katı atıklar, bileşenleri bakımından çok büyük farklılıklar gösteren heterojen karışımlardır. Katı atık bileşenlerinde gözlenen büyük farklılıklara rağmen, atıkları oluşturan en büyük bileşenin organik maddeler olduğu söylenebilir. Organik maddelerin büyük çoğunluğu aerobik veya anaerobik mikroorganizmalar tarafından parçalanabildiğinden, gaz oluşumu katı atıkların organik madde muhtevasına bağlıdır. Bu nedenle, test hücrelerine depolama yapılmadan önce İstanbul'un Avrupa yakasında oluşan katı atıkların özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca, H1 ve H2 hücrelerinde meydana gelen ayrışma proseslerinin hangi aşamada olduğunun belirlenmesi amacıyla depolama tamamlandıktan yaklaşık 8 ay sonra depo gövdesinden katı atık numuneleri alınarak analizler tekrarlanmıştır.

Madde Grubu Analizi

Odayeri katı atık düzenli depo sahasına Baruthane, Halkalı ve Yenibosna transfer istasyonlarından gelen katı atıklar üzerinde yapılan madde grubu analizi, her bir bileşenin sınıflandırılması, tartılması ve atık kütlesi içerisindeki oranlarının belirlenmesi yoluyla gerçekleştirilmiştir (TSE, 13.030). Bu amaçla her bir transfer istasyonundan gelen atıklardan bir miktar alınarak karıştırılmış ve homojen hale getirilmiş bu atıkların 1 m³'lük kısmı 1 cm. çaplı elekten elenmiştir. Elek altında kalan kısım kül, elek üstü malzeme ise kağıt, cam, plastik, tekstil, naylon, çocuk bezi, organik madde ve diğer maddeler olarak sınıflandırıldıktan sonra, her bir madde grubunun toplam atık kütlesi içerisindeki oranı belirlenmiştir.

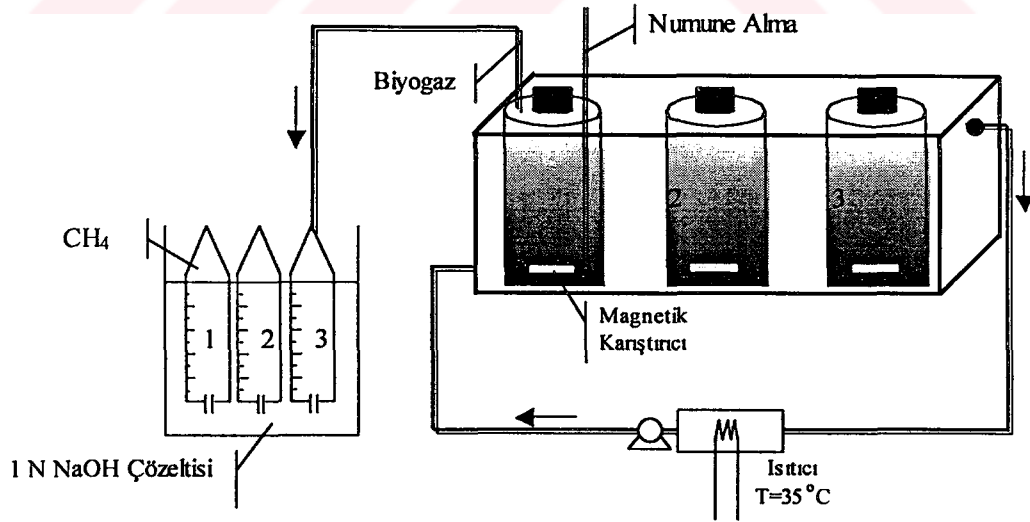
Biyolojik Metan Potansiyeli (BMP)

BMP testi, katı atıkların CH₄'a dönüşüm oranlarının belirlenmesinde kullanılan hızlı ve ekonomik bir yöntemdir (Gunaseelan, 1997). Anaerobik ayrışma proseslerinde oluşan CH₄ miktarı genellikle giderilen KOİ'nin bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Yapılan çalışmalarda farklı atık türleri için CH₄ potansiyelleri belirlenmiştir (Owen, vd., 1979; Owens, vd., 1993; Lin, vd., 1999; Mehta, 2000). BMP testi, ilk defa Owen, vd. (1979) tarafından uygulanmış ve Owens, vd. (1993) tarafından geliştirilmiştir. Lin, vd., (1999) tarafından yapılan çalışmada, BMP testi kimyasal ön arıtmaya tabi tutulmuş çamura uygulanmış ve giderilen 1 gr. KOİ başına oluşabilecek CH₄ miktarı 349 ml. (1 atm. basınç ve 35 °C sıcaklıkta) olarak belirlenmiştir. Mehta, (2000) tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise,

BMP testi ile depo gövdesinin farklı derinliklerinden alınan atık numunelerinin ayrışma oranları belirlenmiştir.

BMP testi için atıkların organik kısmı 103 °C'de 24 saat kurutulduktan sonra öğütülerek 2 mm. lik elekten elenmiş, daha sonra 10 gr. (kuru ağırlık) ağırlığındaki numuneler 0.1 N NaOH çözeltisi içerisinde 120 °C sıcaklık ve 1 atm. basınç altında 2 saat süreyle ön hidroliz işlemine tabi tutulmuştur (Marticorena, vd., 1993). Ön hidroliz işlemi tamamlandıktan sonra numunelere 20 ml. mineral çözelti (Öztürk, 1993) ve 30 ml. anaerobik çamur (aşı) ilave edilmiştir. Numuneler 500 ml.'lik serum şişeleri içerisinde 35 °C'de magnetik karıştırıcılarla karıştırılarak inkübe edilmiştir. Oluşan biyogaz içerisindeki CO₂, 1 N NaOH çözeltisinde tutularak CH₄ miktarı ölçülmüştür. Deney düzeneği Şekil 6.4'de verilmiştir. Deney süresince gaz fazında CH₄ ve sıvı fazda KOİ değerleri ölçülmüştür. Gaz oluşumu tamamlandıktan sonra (20 gün), birim kuru ağırlık başına giderilen KOİ'ye karşılık oluşan CH₄ miktarları belirlenmiştir.

Test hücrelerine depolama yapılmadan önce her bir aktarma istasyonundan gelen katı atıklar üzerinde ve depolamanın tamamlanmasından yaklaşık 8 ay sonra depo gövdesinden alınan atık numuneleri üzerinde bu deneyler tekrarlanmış, böylece H1 ve H2 hücrelerinde ayrışma oranları belirlenmiştir.



Şekil 6.4 BMP testi için hazırlanan deneysel düzenek

6.3.2 Gaz analizleri

H1 ve H2 test hücrelerinde bulunan 4 adet gaz bacasında gaz analizleri depo sahalarında gaz emisyonlarının ölçümünde kullanılmak üzere Gas Data Limited tarafından imal edilmiş Landfill Monitoring System Version 4.17 model analiz cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Infrared CH_4 ve CO_2 dedektörlerine sahip olan cihaz, diğer gazlar ve sıcaklık ve basınç gibi diğer çevresel faktörlerin de belirlenebileceği şekilde tasarlanarak üretici firma tarafından kalibre edilmiştir (Gas Data Limited, 2000). Bu cihazla depo gazında CH_4 , CO_2 , O_2 ve H_2S değerleri belirlenmiştir. Sonuçlar, her bir hücredeki iki adet gaz bacasında okunan değerlerin ortalaması şeklinde verilmiştir.

6.3.3 Sızıntı suyu analizleri

Odayeri Katı Atık Depo Sahası'nda bulunan H1 ve H2 test hücrelerinden oluşan sızıntı suları üzerinde depo gazı oluşumu ve ayrışma proseslerinin belirlenmesinde etkili olan pH, KOİ ve SO_4^{2-} analizleri, APHA (1995)'deki standart metodlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

pH Tayini

Test hücrelerinde oluşan sızıntı sularının pH değerleri Jenway 3040 Ion Analyser cihazı kullanılarak belirlenmiştir.

Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) Tayini

Sızıntı suyunda KOİ değerleri APHA (1995) 5220-D bölümünde belirtilen kapalı reflux, kolorimetrik yöntemle tesbit edilmiştir. Hach Reflux tüplerine 2.5 ml. numune, 1.5 ml. parçalama reaktifi ve 3.5 ml sülfürik asit reaktifi ilave edildikten sonra sıkıca kapatılarak karıştırılmıştır. Karışım bir termoreaktörde (Velp Scientifica ECO 16) 2 saat süreyle $150\text{ }^\circ\text{C}$ 'de ısıtılmıştır. Tüpler soğuduktan sonra Jenway UV/VIS spektrofotometrede (Model 6105) 600 nm dalga boyunda absorbansı okunup KOİ değeri hesaplanmıştır. Teorik KOİ'si $1.176\text{ mg O}_2/\text{lt}$ olan potasyum hidrojen ftalat (KHP) kullanılarak 20-900 mg/lt konsantrasyonlarında standart çözeltiler kullanılarak kalibrasyon eğrisi hazırlanmıştır.

Sülfat (SO_4^{2-}) Tayini

Sızıntı sularındaki sülfat değerleri APHA (1995) 4500-E bölümünde belirtilen türbidimetrik yöntemle tesbit edilmiştir. Na_2SO_4 kullanılarak SO_4^{2-} miktarı 0-10 mg/lt konsantrasyonlarında olacak şekilde standart çözeltilerle kalibrasyon eğrisi hazırlanmıştır. Sızıntı suyu numunelerinin SO_4^{2-} konsantrasyonları 3-8 mg/L civarında olacak şekilde seyreltildikten sonra, 50 ml.

numuneye bir miktar $BaCl_2$ ve 10 ml. tampon çözelti ilave edilerek magnetik karıştırıcıda 60 saniye karıştırılmıştır. Oluşan $BaSO_4$ 'ın sebep olduğu bulanıklık değerleri, Jenway UV/VIS spektrofotometrede (Model 6105) 420 nm. dalga boyunda okunmuştur.

6.3.4 Depo gövdesinin sıcaklığı

Test hücrelerinde gövdedeki sıcaklık değişimlerinin belirlenmesi amacıyla atık içerisinde 0.5; 1; 1.5 ve 2 m. derinliklere yerleştirilen sıcaklık problemleriyle ölçümler yapılmıştır.

7. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

7.1 Katı Atık Analizleri

Madde Grubu Analizi

İstanbul'un Avrupa yakası katı atıklarının depolandığı Odayeri Katı Atık Düzenli Depo Sahası'na Baruthane, Halkalı ve Yenibosna ağırtma istasyonlarından gelen atıklar üzerinde yapılan madde grubu analizlerinden elde edilen ortalama sonuçlar Çizelge 7.1'de verilmiştir. Ayrıca organik atıklar üzerinde su muhtevası, organik madde muhtevası, toplam organik karbon (TOK), toplam Kjeldahl azotu (TKN), C/N oranı, pH ve toplam fosfor (P) analizleri gerçekleştirilmiş, elde edilen sonuçlar Çizelge 7.2'de verilmiştir.

Çizelge 7.1 Odayeri katı atık depo sahasına gelen atıklar üzerinde yapılan madde grubu analizi sonuçları (%)

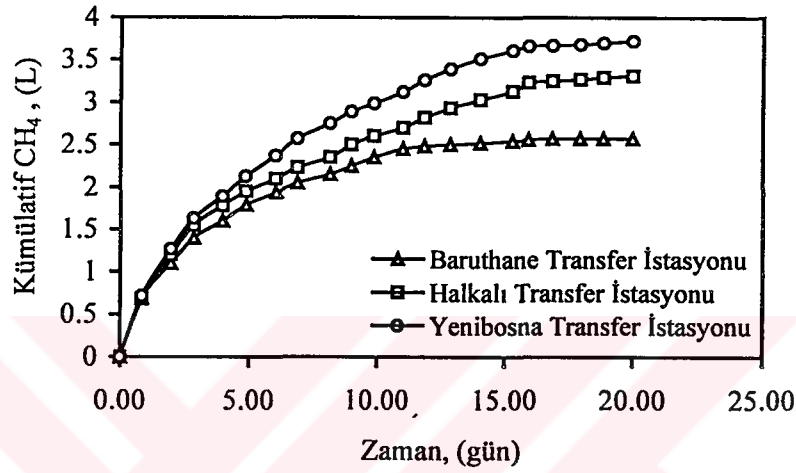
| Madde Grubu | Yenibosna | Halkalı | Baruthane |
|------------------|--------------|--------------|--------------|
| Kağıt | 2,5 | 10,6 | 10,2 |
| Cam | 9,1 | 5,4 | 4,1 |
| Metal | 8,0 | 2,7 | 6,7 |
| Plastik | 8,5 | 1,7 | 4,1 |
| Tekstil | 4,7 | 5,4 | 6,1 |
| Naylon | 6,9 | 12,4 | 6,7 |
| Organik Madde | 45,3 | 40,6 | 43,0 |
| Çocuk Bezi | 9,0 | 12,3 | 7,0 |
| Kül ve Diğerleri | 6,0 | 8,9 | 12,1 |
| Toplam | 100,0 | 100,0 | 100,0 |

Çizelge 7.2 Katı atıkların organik kısmına ait özellikler

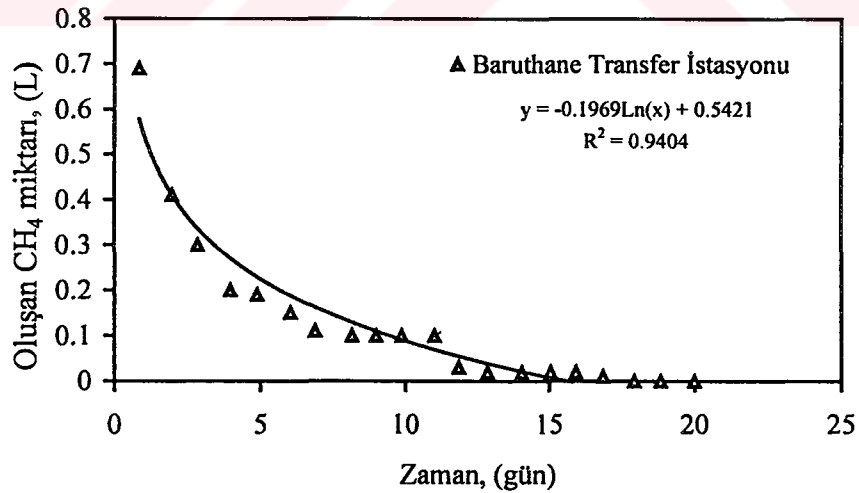
| Numune Adı | Su Muhtevası (%) | Organik Madde (%) | TOK (%) | TKN (%) | C/N | pH | Fosfor (mg/kg) |
|------------|------------------|-------------------|---------|---------|------|-----|----------------|
| Baruthane | 76,2 | 73,08 | 21,5 | 2,06 | 10,4 | 5,9 | 1186 |
| Halkalı | 82,00 | 81,12 | 24,5 | 2,48 | 9,9 | 5,0 | 919 |
| Yenibosna | 72,00 | 82,2 | 25,4 | 3,33 | 7,6 | 6,2 | 1235 |

Biyolojik Metan Potansiyeli (BMP) Testi

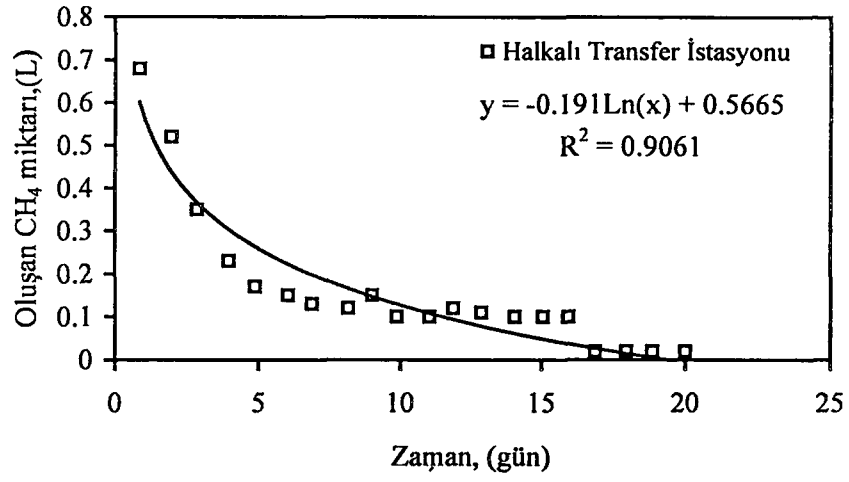
Her bir aktarma istasyonundan gelen atıkların organik kısmından alınan 10 gr. (kuru ağırlık) numune üzerinde gerçekleştirilen BMP testleri sonucunda elde edilen kümülatif CH₄ oluşumları Şekil 7.1’de verilmiştir. Baruthane, Halkalı ve Yenibosna transfer istasyonlarından alınan 10 gr. (kuru ağırlık) atık numunelerinin CH₄ oluşum oranları sırasıyla Şekil 7.2, 7.3 ve 7.4’de, Şekil 7.5 (a), (b) ve (c)’de ise giderilen KOİ başına oluşan CH₄ miktarları verilmiştir.



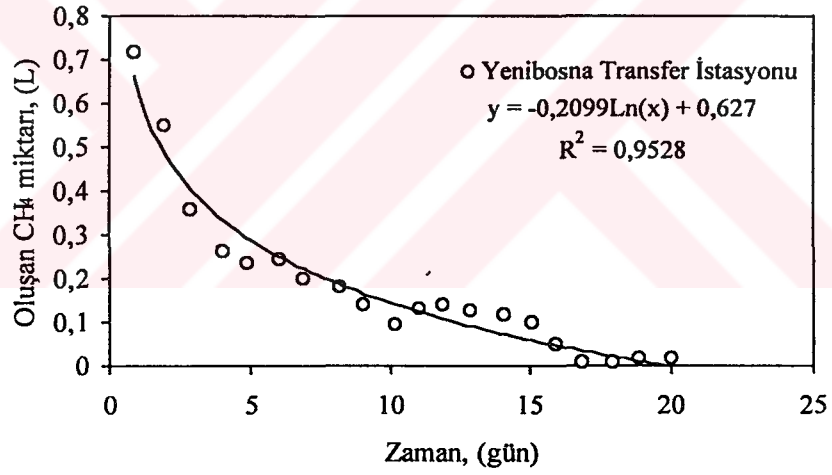
Şekil 7.1 10 gr. kuru katı atık numunelerinden elde edilen kümülatif CH₄ miktarları



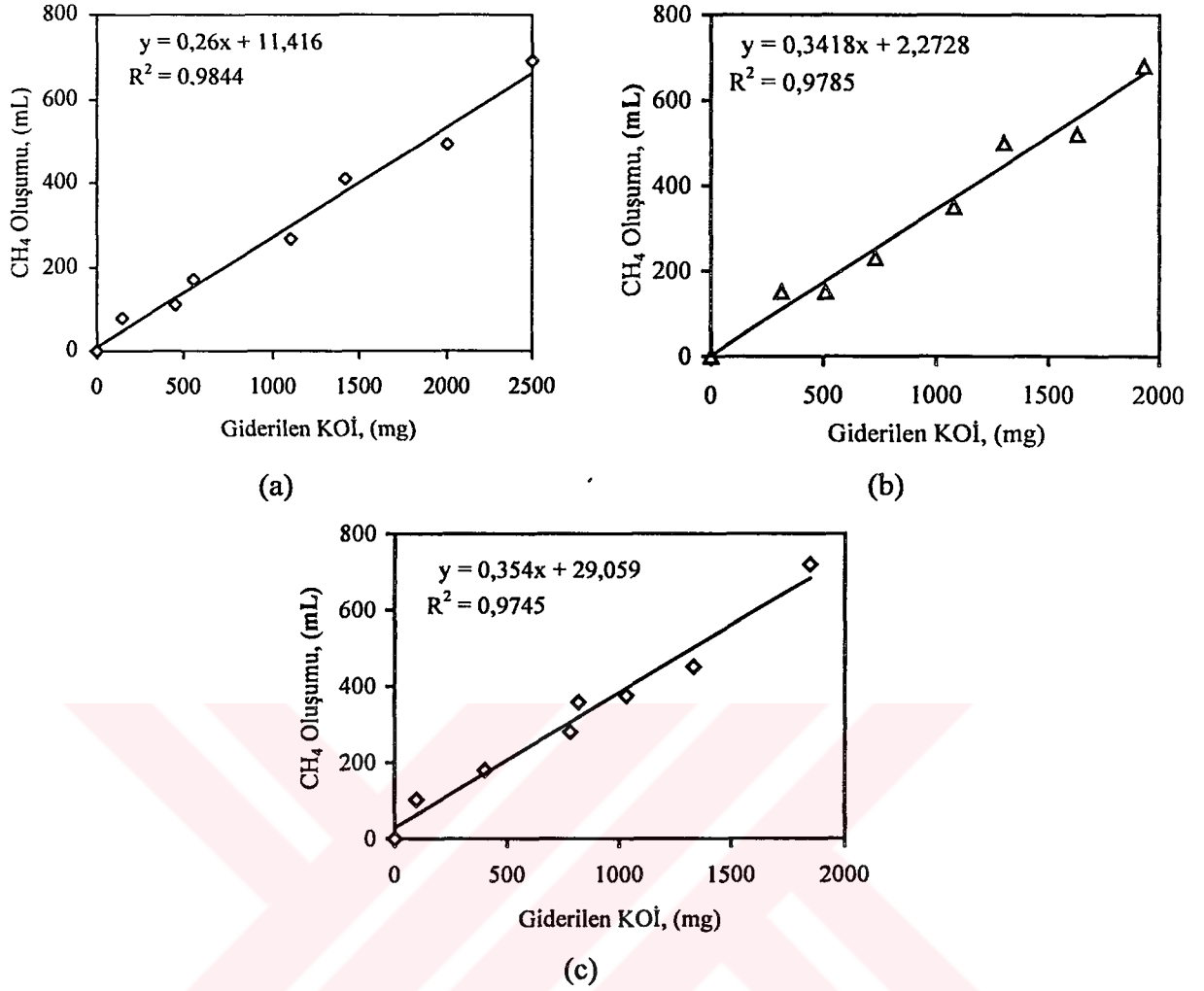
Şekil 7.2 Baruthane transfer istasyonundan alınan 10 gr. atıktan oluşan günlük CH₄ miktarları



Şekil 7.3 Halkalı transfer istasyonundan alınan 10 gr. atıktan oluşan günlük CH₄ miktarları



Şekil 7.4 Yenibosna transfer istasyonundan alınan 10 gr. atıktan oluşan günlük CH₄ miktarları



Şekil 7.5 Oluşan CH₄ miktarıyla giderilen KOİ arasındaki ilişki
(a) Baruthane transfer istasyonu; (b) Halkalı transfer istasyonu; (c) Yenibosna transfer istasyonu

Katı atıklardan oluşabilecek CH₄ miktarını belirlemek amacıyla Odayeri Katı Atık Düzenli Depo Sahası'na gelen atıklar üzerinde gerçekleştirilen BMP deneyi ile Baruthane, Halkalı ve Yenibosna aktarma istasyonlarından gelen atıklardan oluşabilecek CH₄ miktarlarının 1 gr. kuru organik atık için sırasıyla 257, 331 ve 372 ml., ortalama CH₄ potansiyeli ise 320 ml CH₄/ 1 gr. kuru organik madde olarak tesbit edilmiştir. Odayeri katı atık depolama alanına gelen atıkların ortalama organik madde muhtevasının % 43 ve organik maddenin su muhtevasının % 75 olduğu kabul edilerek, İstanbul'un Avrupa yakasında oluşan katı atıkların CH₄ potansiyeli yaklaşık 34,5 m³ CH₄/1 ton yaş atık olarak hesaplanmıştır. Buna ilave olarak giderilen 1 gr. KOİ'ye karşılık oluşacak CH₄ miktarları tesbit edilmiş ve bu değerler de sırasıyla 260; 340 ve 354 ml. CH₄ olarak bulunmuştur.

Şekil 7.5 (a), (b) ve (c) den de görüldüğü üzere, 1 gr. KOİ giderimine karşılık oluşabilecek CH₄ miktarlarının elde edildiği doğru denklemleri Baruthane transfer istasyonundan gelen atıklar için;

$$y = 0,26x + 11,416$$

Halkalı transfer istasyonundan gelen atıklar için;

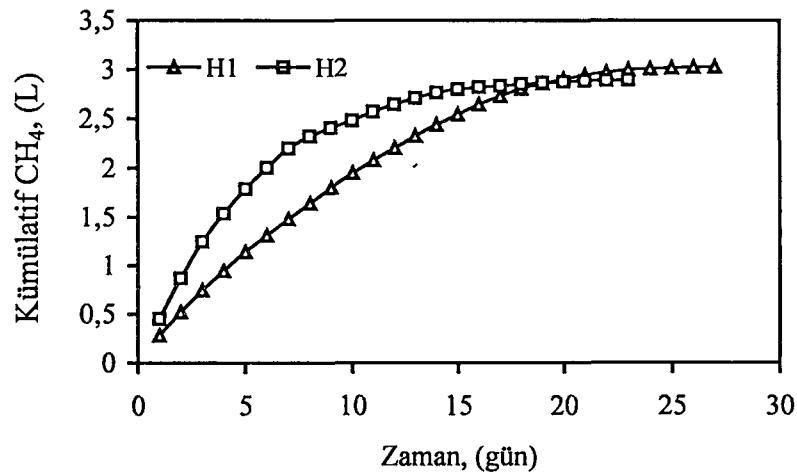
$$y = 0,3418x + 2,2728$$

Yenibosna transfer istasyonundan gelen atıklar için;

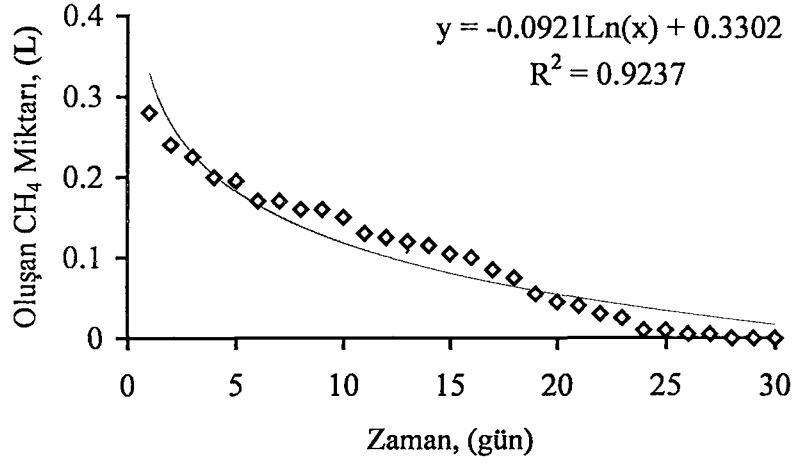
$$y = 0,354x + 29,059$$

olarak hesaplanmıştır.

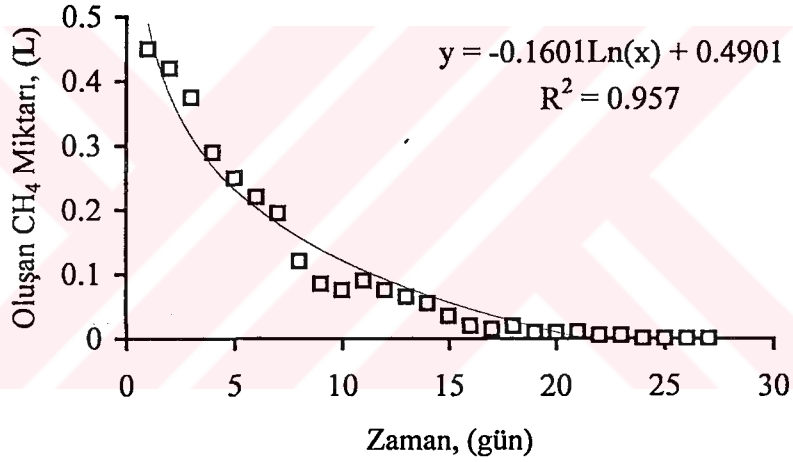
H1 ve H2 test hücrelerine atıklar depolandıktan yaklaşık 8 ay sonra her bir hücrenin 2 değişik noktasından alınan atık numuneleri üzerinde gerçekleştirilen BMP testi ile 1 gr. kuru organik madde için geriye kalan ortalama CH₄ potansiyeli sırasıyla 303 ml. ve 289,5 ml. olarak tesbit edilmiştir. Alınan atık numunelerinden oluşan kümülatif CH₄ miktarları Şekil 7.6'da, her bir hücreden alınan atık numunelerinden oluşan günlük ortalama CH₄ miktarları ise Şekil 7.7 ve 7.8'de verilmiştir.



Şekil 7.6 H1 ve H2 test hücrelerinden alınan 10 gr. atıktan oluşan kümülatif CH₄ miktarları



Şekil 7.7 H1 test hücresinden alınan 10 gr. atıktan oluşan günlük CH₄ miktarları



Şekil 7.8 H2 test hücresinden alınan 10 gr. atıktan oluşan günlük CH₄ miktarları

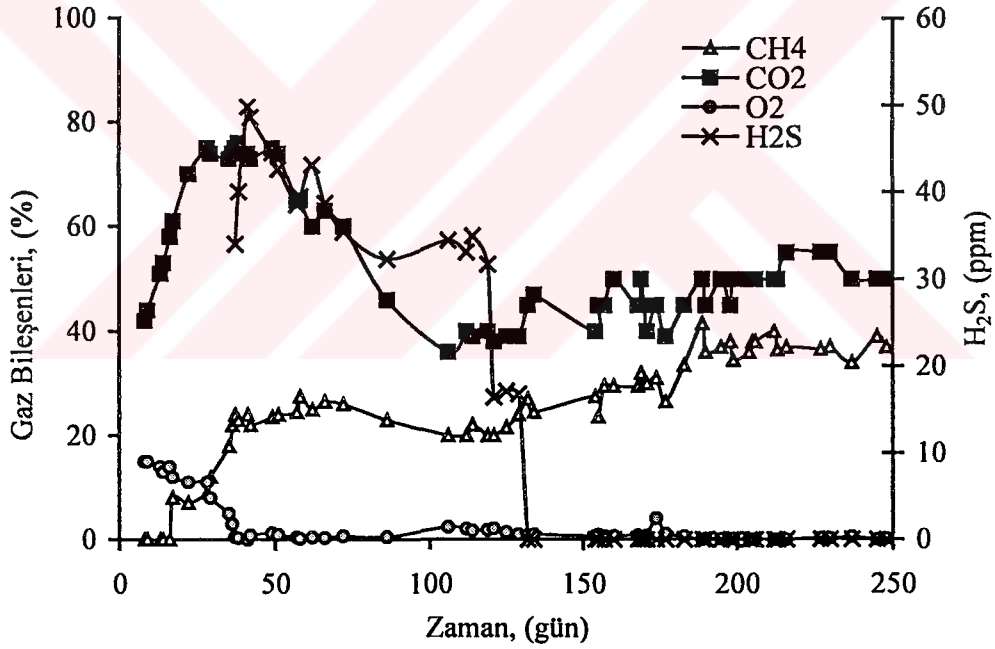
H1 test hücresinde geriye kalan CH₄ potansiyeli 32,6 m³ CH₄/ 1 ton yaş atık iken, H2 test hücresinde bu değer 31,1 m³ CH₄/ 1 ton yaş atık olarak belirlenmiştir. Buna göre, H1 test hücresinde 8 aylık süre sonunda toplam potansiyelin % 5,5'i, H2 test hücresinde ise % 9,9'u oluşmuştur. Ayrıca, H1 ve H2 test hücrelerinde 1 yılın ortalaması olarak CH₄ oluşum hızları sırasıyla 2,85 m³ CH₄/1 ton yaş atık/yıl ve 5,10 m³ CH₄/ 1 ton yaş atık/yıl olarak hesaplanmıştır.

Nem muhtevası bakımından zenginleştirilmiş H2 hücresinde geriye kalan CH₄ potansiyelinin daha düşük olması, 8 aylık süre sonunda bu hücrede ayrışmanın daha hızlı gerçekleştiğini göstermektedir. Bir başka deyişle, 8 aylık depolama süresi sonunda H2 test hücresinde H1 hücresine göre daha fazla miktarda CH₄ oluşmuştur. Bu sonuçlara göre, katı atık düzenli depo

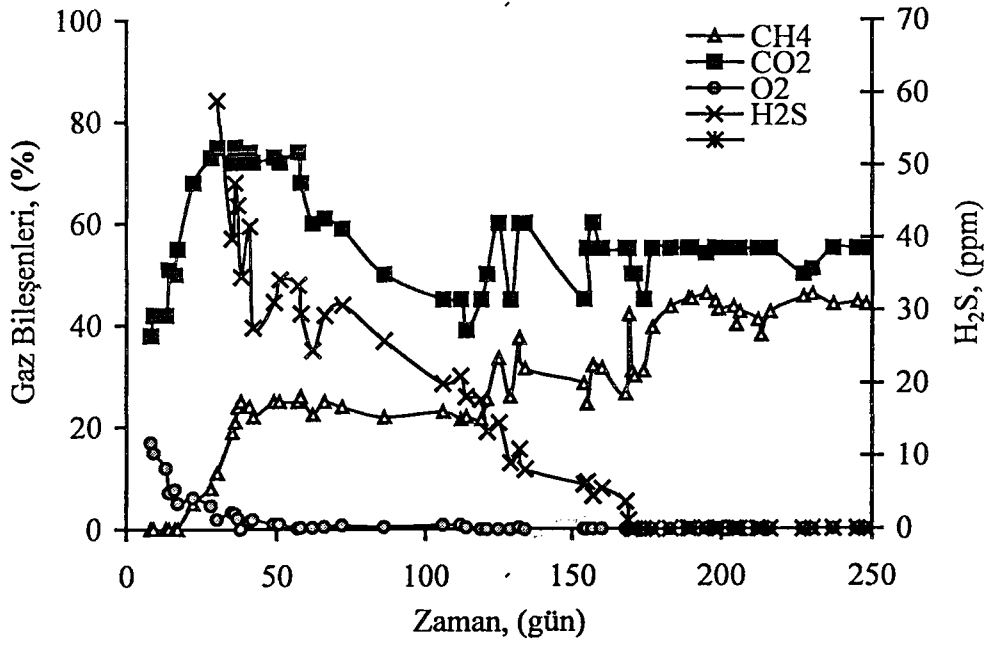
sahalarında nem muhtevasının arttırılması ile atıkların ayrışma hızlarının önemli ölçüde arttığı belirlenmiştir.

7.2 Gaz Analizleri

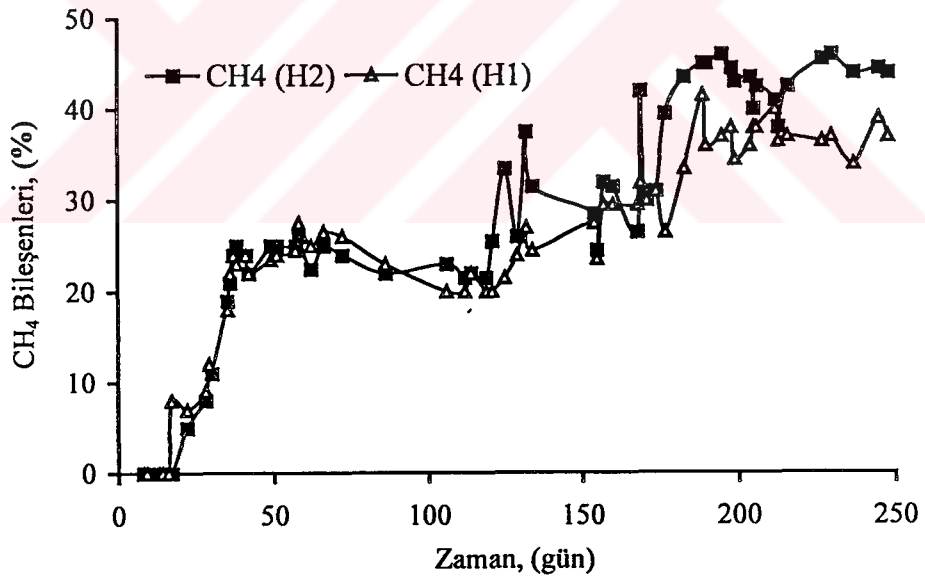
Odayeri katı atık düzenli depo sahasında, nem muhtevasının katı atıkların ayrışma hızları ve depo gazı bileşiminin zamanla değişimi üzerine etkisinin belirlenmesi amacıyla teşkil edilmiş olan test hücrelerinde yapılan gaz ölçümlerine bağlı olarak ayrışma safhaları belirlenmiştir. H1 test hücresinde depo gazı bileşiminin zamanla değişimi Şekil 7.9'da, nem muhtevası bakımından zenginleştirilmiş H2 hücresinde depo gazı bileşenlerinin zamanla değişimi ise Şekil 7.10'da verilmiştir. Ayrıca karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla her iki hücredeki CH_4 miktarları Şekil 7.11'de verilmiştir.



Şekil 7.9 H1 hücresinde depo gazı bileşiminin zamanla değişimi



Şekil 7.10 H2 hücresinde depo gazı bileşiminin zamanla değişimi



Şekil 7.11 H1 ve H2 test hücrelerindeki CH₄ (%) leri

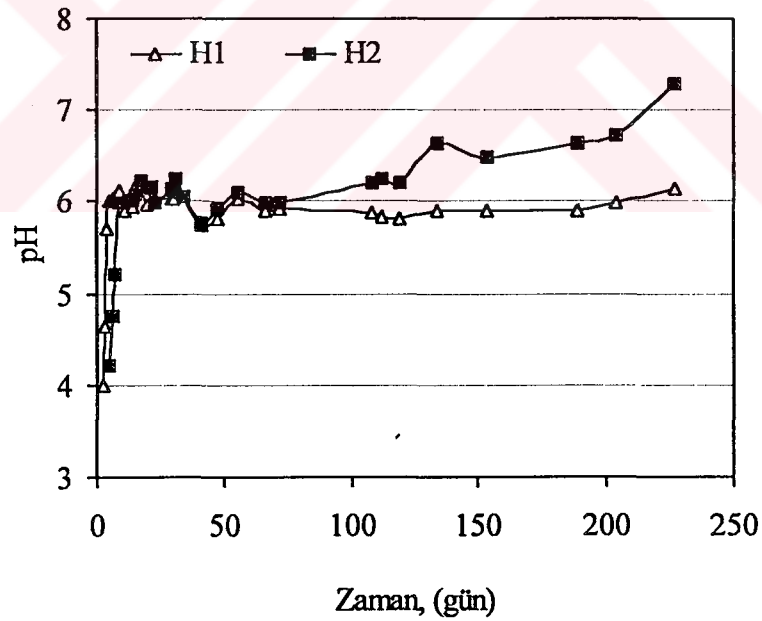
Depo gazı içerisindeki yüksek CO₂ konsantrasyonları hidroliz ve asit oluşum safhalarının karakteristik özellikleridir. Bu iki safhanın birbirinden ayrılabilmesi için depo gövdesindeki sıcaklık değişimlerinin de izlenmesi gerekir. Hidroliz safhasında, aerobik ayrışma sırasında çok fazla miktarda ısı açığa çıktığından gövde sıcaklığı 40 °C'nin üzerine çıkmaktadır. H1 ve H2 hücrelerinde hidroliz safhasının yaklaşık olarak 10 gün sürdüğü belirlenmiştir. Her iki

hücrede de bu safhanın aşılması için aynı sürelerin gerekmesi, depo ortamında başlangıçta nem muhtevasının mikroorganizma faaliyetleri için yeterli olduğunu göstermektedir. 2. safhada (metanojenik olmayan anaerobik safha) CO₂ konsantrasyonları % 70 seviyelerindedir. Bu safha için de her iki hücre arasında çok büyük farklılıklar tesbit edilmemiştir. Ancak gerek CH₄ safhasına geçiş süresinde ve gerekse bu süre sonunda depo gazının CH₄ bileşeninde her iki hücre arasında büyük farklılıklar olduğu belirlenmiştir. H₂ hücresinde depolama tamamlandıktan yaklaşık 150 gün sonra kararlı bir CH₄ oluşumu gözlenmeye başlamış ve bu süreç hala devam etmektedir. CH₄ ve CO₂ konsantrasyonlarının % 40-50 arasında değiştiği bu safha H1 hücresinde henüz yeni başlamıştır.

7.3 Sızıntı Suyu Analizleri

pH

H1 test hücresi ile nem muhtevası bakımından zenginleştirilmiş H2 hücresinde oluşan sızıntı sularının pH değerleri Şekil 7.12’de verilmiştir.



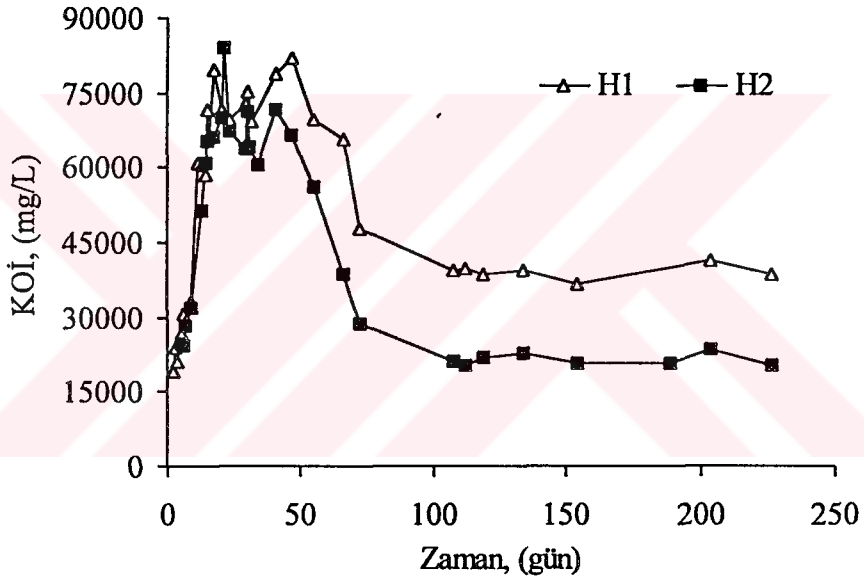
Şekil 7.12 H1 ve H2 hücrelerinde pH'nın zamanla değişimi

Test hücrelerinde oluşan ilk sızıntı sularında her iki hücrede de pH=4 civarında ölçülmüştür. Ayrışmanın ilk safhalarında uçucu yağ asitlerinin oluşması sebebiyle pH değerleri düşük seviyelerdeyken, CH₄ safhasına geçişle birlikte pH'da artış gözlenmiş ve hemen hemen nötr değerlere ulaşılmıştır. H2 test hücresinde metanojenik bakterilerin faaliyetleri için uygun pH

değerlerine 5 ayda ulaşılmışken, H1 test hücresinde bu değerlere 8 ay sonunda ancak ulaşılabilmektedir. Buna göre, nem muhtevasının artması ile anaerobik ayrışma için optimum pH değerlerine daha kısa sürede ulaşıldığı belirlenmiştir. H2 hücresinde atıklar depolandıktan yaklaşık 250 gün sonra pH değeri 7,2 civarında iken H1 hücresinde bu süre sonunda pH değeri 6,2 civarındadır. Bu da önceden nemlendirilen hücrede atıkların stabilizasyonunun daha hızlı bir şekilde gerçekleştiğinin ve metan fazına daha erken ulaşıldığının bir göstergesidir.

Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)

H1 ve H2 hücrelerinden oluşan sızıntı sularının KOİ değerlerinin zamanla değişimi Şekil 7.13’de verilmiştir.

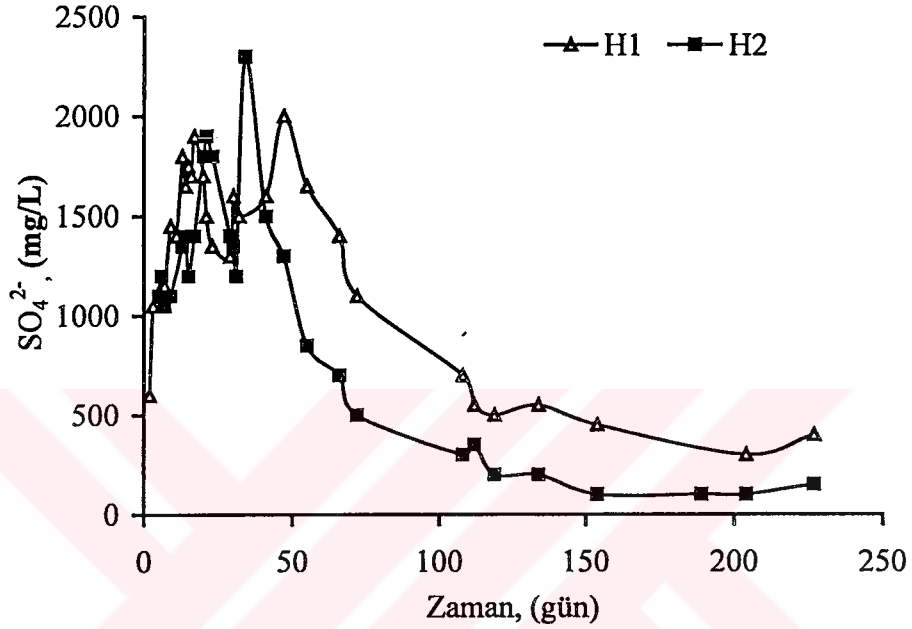


Şekil 7.13 H1 ve H2 hücrelerinde KOİ'nin zamanla değişimi

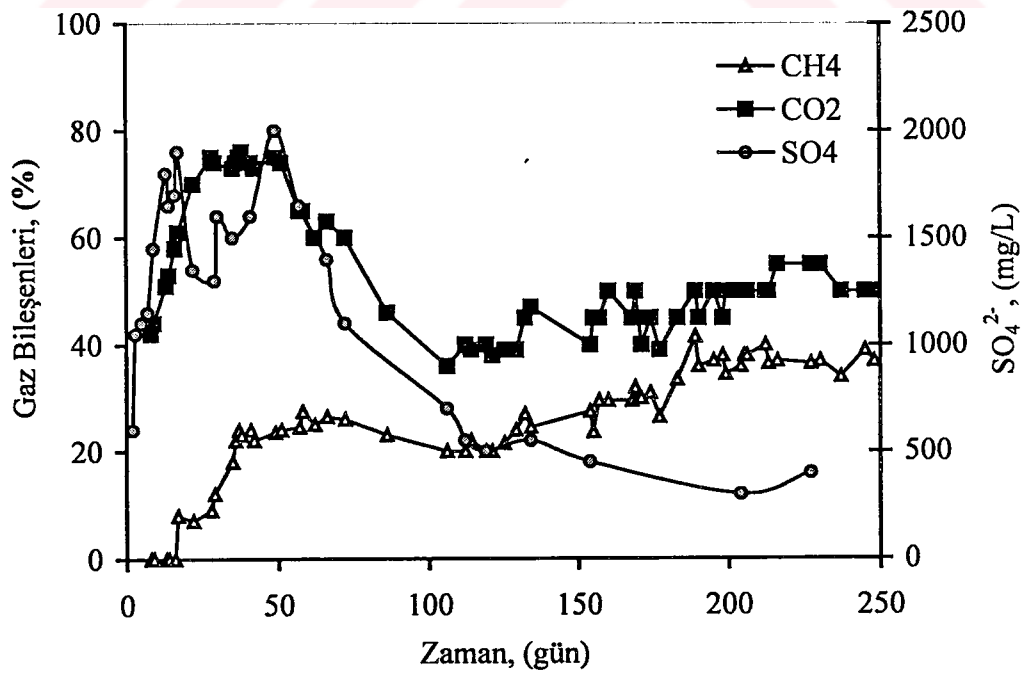
Sızıntı suyunun KOİ değerleri, organik maddelerin anaerobik ayrışmasının bir ölçüsü olarak değerlendirilebilir. H1 ve H2 test hücrelerinde KOİ konsantrasyonları depolamanın hemen ardından yükselmeye başlamış ve maksimum değerlere yaklaşık 1 ay sonra ulaşılmıştır. Bu süre zarfında organik madde konsantrasyonlarının yüksek olması, kompleks organik maddelerin daha kolay çözünebilir organik asitlere dönüştüğü asit safhasında olduğunu göstermektedir. Bu aşamadan sonra sızıntı suyunun KOİ konsantrasyonları düşmeye başlamıştır. H2 test hücresinde KOİ'deki düşüşün daha hızlı olması CH_4 safhasına geçişle birlikte uçucu yağ asidi konsantrasyonlarındaki azalmadan kaynaklanmıştır.

Sülfat (SO_4^{2-})

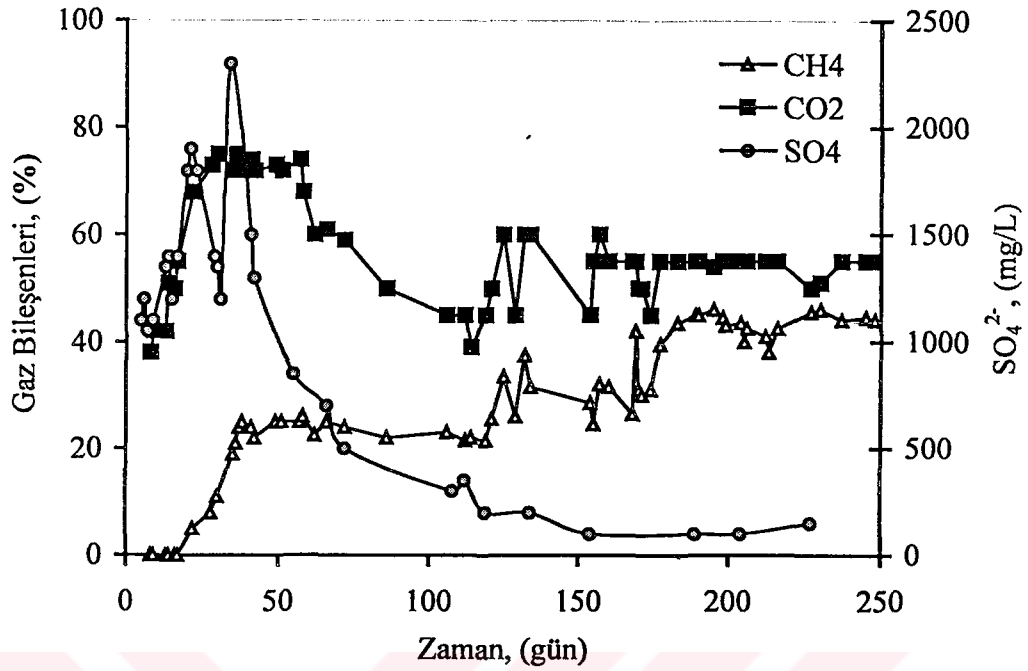
Test hücrelerinde oluşan sızıntı sularındaki SO_4^{2-} konsantrasyonlarının zamanla değişimi Şekil 7.14'de, sızıntı suyunun SO_4^{2-} konsantrasyonuyla depo gazının en önemli iki bileşeni olan CH_4 ve CO_2 arasındaki ilişki ise her iki hücre için ayrı ayrı Şekil 7.15 ve 7.16'da verilmiştir.



Şekil 7.14 H1 ve H2 hücrelerinde SO_4^{2-} konsantrasyonlarının zamanla değişimi



Şekil 7.15 H1 test hücresinde depo gazı bileşenleri ile sızıntı suyunun SO_4^{2-} konsantrasyonları arasındaki ilişki



Şekil 7.16 H2 test hücresinde depo gazı bileşenleri ile sızıntı suyunun SO_4^{2-} konsantrasyonları arasındaki ilişki

Depolamanın tamamlandığı ilk günlerde sızıntı suyunda SO_4^{2-} konsantrasyonları 1000 mg/L civarında olup zamanla artış göstermiştir. H2 test hücresinde maksimum SO_4^{2-} konsantrasyonuna (2300 mg/L) depolamadan 30 gün sonra, H1 test hücresinde ise 45 gün sonra (2000 mg/L) ulaşılmıştır. Ortamda SO_4^{2-} mevcutken CH_4 bakterileri faaliyet gösterememektedir. Depolama tamamlandıktan yaklaşık 5 ay sonra H2 test hücresinde SO_4^{2-} konsantrasyonları 100 mg/L seviyelerine düşmüştür. H1 test hücresinde ise bu süre sonunda SO_4^{2-} konsantrasyonları 500 mg/L civarında ölçülmüştür. SO_4^{2-} konsantrasyonları göz önüne alındığında H2 hücresinde metanojenik kararlı faza depolamadan 150 gün sonra ulaşılmış, H1 hücresinde ise bu safha henüz yeni başlamış ve ayrışma bu güne kadar metanojenik kararsız safhadadır.

Gövde Sıcaklığı

Test hücrelerinde depo gövdesine yerleştirilen sıcaklık problemleriyle yapılan ölçümler sonucunda elde edilen aylık ortalama sıcaklık değerleri Çizelge 7.3’de verilmiştir.

Çizelge 7.3 H1 ve H2 hücrelerinde depo gövdesinin farklı derinliklerinde ölçülen aylık ortalama sıcaklık değerleri (°C)

| Aylar | H1 | | | | H2 | | | |
|--------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | 0,5 m. | 1 m. | 1,5 m. | 2 m. | 0,5 m. | 1 m. | 1,5 m. | 2 m. |
| Ekim | 26,45 | 34,93 | 38,70 | 39,81 | 29,88 | 37,31 | 40,59 | 41,89 |
| Kasım | 18,18 | 25,70 | 30,17 | 34,54 | 19,25 | 24,14 | 30,27 | 34,63 |
| Aralık | 11,63 | 19,70 | 23,07 | 28,70 | 12,90 | 20,53 | 22,70 | 30,20 |
| Ocak | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Şubat | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Mart | 12,54 | 14,67 | 17,39 | 19,11 | 13,23 | 15,34 | 17,33 | 19,46 |
| Nisan | 12,39 | 14,30 | 16,13 | 18,40 | 12,73 | 14,88 | 16,44 | 18,43 |
| Mayıs | 20,93 | 21,85 | 22,58 | 24,08 | 20,48 | 21,15 | 22,28 | 25,65 |

Test hücrelerine atıklar depolanarak üst örtü tabakasının hazırlanmasından sonra, ortamdaki O₂ tükenene kadar atıkların ayrışması aerobik mikroorganizmalar tarafından gerçekleştirilmiştir. Aerobik ayrışma sonucu fazla miktarda ısı açığa çıktığından ortamın sıcaklığı hızla artmıştır. Daha sonra gövdedeki sıcaklık değerleri hidroliz safhasının tamamlanmasıyla birlikte düşüş eğilimine girmiştir. Sıcaklığın 30 °C civarında sabit kalması beklenirken hava koşulları dolayısıyla 20 °C’ye kadar düşmüştür.

7.4 Çalışmalardan Elde Edilen Bulgular

Odayeri katı atık depo sahasındaki test hücrelerinde ve laboratuarda yapılan çalışmalardan elde edilen neticeler şu şekilde özetlenebilir.

1. Odayeri katı atık depolama sahasına gelen 1 ton atıktan oluşabilecek toplam CH₄ miktarı ortalama olarak 34,5 m³ CH₄/ 1 ton yaş atık olarak belirlenmiştir.
2. Depolamanın tamamlanmasından 8 ay sonra depo gövdesinden alınan atık numunelerinde yapılan BMP analizleri sonucunda 1 ton atık için geriye kalan CH₄ potansiyelleri H1 test hücresi için 32,6 m³ CH₄/ 1 ton yaş atık, H2 test hücresi için ise 31,1 m³ CH₄/ 1 ton yaş atık olarak tesbit edilmiştir. Buna göre hücredeki ayrışma hızları ise sırasıyla 2,85 m³ CH₄/ 1 ton yaş atık/yıl ve 5,10 m³ CH₄/ 1 ton yaş atık/yıl olarak belirlenmiştir. Buna göre nem muhtevası bakımından zenginleştirilmiş H2 test hücresinde ayrışmanın daha hızlı gerçekleşmektedir.

3. Sızıntı suyunda gerçekleştirilen pH analizi sonuçlarına göre, nem muhtevası arttırılmış olan H2 test hücresinde metanojenik mikroorganizmaların faaliyetleri için uygun pH değerlerine daha kısa sürede ulaşılmakta ve metan oluşum safhası daha erken başlamaktadır.
4. Depo sahalarında ayrışmanın ilk safhalarında ortamda bulunan yüksek organik madde konsantrasyonları sebebiyle KOİ yüksek değerler alırken, organik maddelerin mikroorganizmalar tarafından parçalanması sonucu KOİ konsantrasyonları zamanla azalmaktadır. Nem muhtevası zengin olan H2 test hücresinde KOİ değerlerinin daha kısa sürede ve daha hızlı bir şekilde azalma gösterdiği belirlenmiştir.
5. Sızıntı suyunda SO_4^{2-} yüksek konsantrasyonlarda olduğunda SO_4^{2-} indirgeyen bakteriler CH_4 bakterilerinden daha aktiftirler. Ayrışmanın ilk safhalarında SO_4^{2-} konsantrasyonları her iki test hücresinde de yüksek konsantrasyonlarda olmakla birlikte, zamanla bu konsantrasyonlar azalmıştır. Nem muhtevası bakımından zenginleştirilmiş H2 test hücresinde, H1 hücresine göre daha düşük SO_4^{2-} konsantrasyonlarına daha kısa sürede ulaşılmış, böylece CH_4 bakterileri ortamda baskın hale gelerek daha kısa sürede CH_4 safhasına ulaşmıştır.

KAYNAKLAR

Anex, R.P., (1996), "Optimal Waste Decomposition-Landfill as Treatment Process", Journal of Environmental Engineering, November, 964-974.

APHA, American Public Health Association, (1995), "Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater", 19th Edition, , Washington DC.

Baştürk, A., Demir, A., Günay, A., Özkaya, B., Ak, N., Yıldız, Ş., (2000), "İstanbul Evsel Katı Atık Yönetimi", UKAK Ulusal Katı Atık Kongresi, 1. Oturum, 11-17, 18-21 Nisan, İzmir.

Bonori, B., Pasquali, G., Bergonzoni, M., (2001), "Landfill Gas Production Valued with a Mathematical Method", Proceedings Sardinia 2001, Eighth International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Italy.

Buenrostro, O., Bocco, G., Cram, S., (2001), "Classification of Sources of Municipal Solid Wastes in Developing Countries", Resources, Conservation and Recycling, 32: 29-41.

California Waste Management Board, (1989), Volume 1, "Landfill Leachate Monitoring and Control Systems", Procedural Guidance Manual for Sanitary Landfills.

CH2M Hill-Antel, (1992), "İstanbul Ana Kenti İçin Hazırlanan Katı Atık Yönetim Etüdü", İstanbul.

Christensen, T.H., Cossu, R., (1998), "Basic Processes in Landfills", Proceedings of the International Training Seminar on Management and Treatment of MSW Landfill Leachate, CISA-Sanitary Environmental Engineering Centre, 2-4 December 1998, Cagliari, Italy

Cooper, C.D., Reinhart, D.R., Rash, F., Seligman, D., Keely, D., (1992), "Landfill Gas Emissions", Florida Center for Solid and Hazardous Wastes Management, Report 92-2.

D.İ.E Başkanlığı, (2000) "1996 Belediye Çevre Envanteri Anketi Geçici Sonuçları" www.die.gov.tr.

Daskalopoulos, E., Badr, O., Probert, S.D., (1997a), "Economic and Environmental Evaluations of Waste Treatment and Disposal Technologies for Municipal Solid Waste", Applied Energy, 58:4: 209-255.

Daskalopoulos, E., Badr, O., Probert, S.D., (1997b), "An Integrated Approach to Municipal Solid Waste Management", Resources, Conservation and Recycling, 24: 33-50.

Demir, A. ve Tüylüoğlu, B.S., (1999), "Düzenli Depolama Tesislerinin Tasarım ve İşletilmesi", Kent Yönetimi, İnsan ve Çevre Sorunları Sempozyumu, Ed. Öztürk, İ., Demir, A.ve Alp, K., C. 3: 273-281, 17-19 Şubat 1999,İstanbul.

Demir, A., Özkaya, B., Avşar, F., (2001c), "İstanbul Katı Atık Yönetiminde Kompostlaştırma ve Geri Kazanma", Arıtım 2000: 455-432, 17-20 Mayıs 2001, İstanbul.

Demir, A., Özkaya, B., Bilgili, M.S., Debik, E., Günay, A., Kanat, G., Karaaslan, Y., (2001a), "Odayeri Düzenli Katı Atık Depo Sahasında Sızıntı Suyu ve Depo Gazı Oluşumu", Araştırma Projesi Nihai Raporu, İSTAÇ A.Ş.'ye, Ekim 2001.

Demir, A., Özkaya, B., Debik, E., Kanat, G., "Odayeri Katı Atık Depo Sahasında Sızıntı Suyu ve Gaz Oluşumu", (2001d), Araştırma Projesi İkinci Ara Raporu, İSTAÇ A.Ş.'ye., Mart 2001.

- Demir, A., Şengün, R.B., Özkaya, B., (2001b), "İstanbul Tibbi Atık Yönetimi", UKAK Ulusal Katı Atık Kongresi, Poster Bildiriler, 29-32, 18-21 Nisan 2001, İzmir.
- El-Fadel, M., Findikakis, A.N., Leckie, J.O., (1997) "Environmental Impacts of Solid Waste Landfilling", *Journal of Environmental Management*, 50:1-25.
- Gas Data Limited, , "LMSxi User Manual", Revision A, 14 December 2000.
- Gendebien, A. , Pauwels, M. Constant, M. Damanet, M.J., Nyns, E.J., Willumsen, H.C., Butson, J., Fabry R., Ferrero, G.L. (1992), "Landfill Gas: From Environment to Energy", Commission of the European Communities, Final Report, Luxemburg.
- Gujer, W., Zehnder, A. J. B., (1983), "Conversion processes in anaerobik digestion", *Water Science and Technology*, 15: 8/9: 127-167.
- Gunaseelan, V.N., (1997) "Anaerobic Digestion of Biomass for methane Production:A Review", *Biomass and Bioenergy*, 13:2, 83-114.
- Hartz, K.E., Klink, R.E.,Ham, R.K., (1982), "Temperature Effects:Methane Generation From Landfill Samples", *Journal of Environmental Engineering Division*, 4:8, 629-638.
- Iglesias, J.R., Pelaez, L.Castrillon, Maison, E.M., Andres, H.S., 2000, "Biomethanization of Municipal Solid Waste In A Pilot Plant", *Water Research*, 34:2, 447-454.
- Kinman, R.N., Nutini, D.L., Walsh, J.J., Vogt, W.G., Stamm, J., Rickabaugh,J., (1987), "Gas Enhancement Techniques in Landfill Simulators", *Waste Management and Research*, 5: 13-25.
- Lamborn, J., (1999), "Modelling Landfill Gas Generation", PhD, Swinburne University of Technology, Victoria, Australia.
- Leao, S., Bishop, I., Evans, D., (2001), "Assessing the Demand of Solid Waste Disposal in Urban Region by Urban Dynamics Modelling in a GIS Environment" *Resources, Conservation and Recycling*, 33: 289–313.
- Lee, J.J., Jung, I.H., Lee, W.B., Kim, J.O., (1993), "Computer and Experimental Simulations of the Production of Methane Gas From Municipal Solid Waste", *Water Scince and Technology*, 27:2, 225-234.
- Lin, J.G., Ma, Y.S., Chao, A.C., and Huang, C.L., (1999) "BMP Test on Chemically Pretreated Sludge", *Biosource Technology*, 68: 187-192.
- Lisk, D.J., (1991), "Environmental Effects of Landfills", *The Science of the Total Environment*, 100: 415-468.
- Manna, L., Zanetti, M.C., Genon, G., (1999), "Modeling Biogas Production at Landfill Site", *Resources,Conservation and Recycling*, 26: 1-14.
- Marticorena, B., (1993) "Prediction Rules for Biogas Valorization in Municipal Solid Waste Landfills", *Water Science and Technology*, 27:2, 235-241.
- McBean E. A., Rovers F. A., Farquhar G. J., (1995) "Solid Waste Landfill Engineering and Design" Prentice-Hall, Inc. New Jersey, USA.
- Mehta, R.C., (2000), "Comparision of Refuse Decomposition in the Presence and Absence of Leachate Recirculation at the Yolo County, California Test Cells", Ms Thesis, Department of Civil Engineering, Graduate Faculty of North Carolina State University.

- Nastev, M., (1998), "Modelling Landfill Gas Generation and Migration in Sanitary Landfills and Geological Formations", PhD Thesis, Département de Géologie et de Génie Géologique, Faculté Des Sciences et de Génie, Université Laval, Québec.
- Nopharatana, A., Clarke, W.P., Pullammanappallil, P.C., Silvey, P., Chynoweth, D.P., (1998), "Evaluation of Methanogenic Activities During Anaerobic Digestion of Municipal Solid Waste", *Bioresource Technology*, 64: 169-174.
- Oweis, I.S., Smith, D.A., Elwood, R.B., Greene, D.S., (1990), "Hydraulic Characteristics of Municipal Refuse", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 116:4, 539-553.
- Owen, W.F., Stuckey, D.C., Healey, J.B., Young, L.Y. and McCarty, P.L., (1979) "Bioassay for Monitoring Biochemical Methane Potential and Anaerobic Toxicity", *Water Research*, 13: 485-492.
- Owens, J.M., and Chynoweth, D.P., (1993) "Biochemical Methane Potential of MSW Components", *Water Science and Technology*, 27:1-14.
- Özkaya, B., (2001), "Katı Atık Düzenli Depo Sahalarında Sızıntı Suyu Geri Devir Etkilerinin Tam Ölçekli Bir Sahada (Odayeri) Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Öztürk, İ., (1999), "Anaerobik Biyoteknoloji ve Atık Arıtımındaki Uygulamaları", İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
- Öztürk, M., (1993), "Degradation of Acetate, Propionate, and Butyrate Under Shock Temperature", *Journal of Environmental Engineering*, 119:2, 321-331.
- Pohland, F.G. ve Al-Yousfi, B., (1994), "Design and Operation of Landfills for Optimum Stabilization and Biogas Production", *Water Science and Technology*, 30:12, 117-124.
- Pohland, F.G., Kim, J.C., (2000), "Microbially Mediated Attenuation Potential of Landfill Bioreactor Systems", *Water Science and Technology*, 41:3, 247-254.
- Price, T.J., Probert, S.D., Manley, B.J.W., (1998), "Improving the Reliability of LFG-Generation Assesment Tests", *Applied Energy*, 60, 41-63.
- Qin, W., Egolfopoulos, F.N., Tsotsis, T.T., (2001), "Fundamental and Environmental Aspects of Landfill Gas Utilization for Power Generation", *Chemical Engineering Journal*, 82, 157-172.
- Reinhart, D.R., (1994), *Beneficial Use of Landfill Gas*", Florida Center for Solid and Hazardous Wastes, Report 94-7.
- Reinhart, D.R., Al-Yousfi, A.B., (1996), "The Impact of Leachate Recirculation on Municipal Solid Waste Landfill Operating Characteristics", *Waste Management and Research*, 14, 337-346.
- Reinhart, D.R., Grosh, C.J., (1997), "Analysis of Florida MSW Landfill Leachate Quality Data", Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management, Final Report
- Ruth, L.A., (1998), "Energy From Municipal Solid Waste: A Comparison With Coal Combustion Technology", *Prog. Energy Combustion Science*, 24, 545-564.
- Shelton, D.R., Tiedje, J.M., (1984), "General Method for Determining Anaerobic Biodegradation Potential", *Applied and Environmental Biotechnology*, 47:4, 850-857.

- Speece, R.E., (1996), "Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewaters", Archae Press, Nashville, Tennessee, USA.
- Spiegel, R.J., Troccoli, J.C., Preston, J.L., (1997), "Test Results for Fuel-Cell Operation on Landfill Gas", *Energy*, 22:8, 777-786.
- Stegmann, R., Spendlin, H.H., (1985), "Research Activities On Enhancement Of Biochemical Processes In Sanitary Landfill", *Water Pollution Res. J. Can.*, 4:2, 572-591.
- Steyer, E., Hiligsmann, S., Radu, J.P., Charlier, R., Destain, J., Drion, R. and Thonart, P., (1999), "A Biological Pluridisciplinary Model to Predict Municipal Landfill Lifa", *Proceedings Sardinia 99, Seventh International Waste Management and Landfill Symposium CISA-Sanitary Environmental Engineering Centre, 4-8 October, Cagliari, Italy.*
- T.C. Resmi Gazete, (1991), "Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği", Sayı 20814, 14 Mart 1991.
- Tchobanoglous, R., Theisen, H., Vigil, S., (1993), "Integrated Solid Waste Management - Engineering Principles and Management Issues", McGraw-Hill, Inc., New York.
- Thornloe, S.A., (1998), "User's Manual Landfill Gas Emissions Model Version 2.0," USEPA Control Technology Center and Office of Research and Development.
- Türk Standartları Enstitüsü, ICS 13.030, Katı Atıklar.
- Veeken, A., Kalyuzhnyi, S., Scharff, H., Hamelers, B., (2000), "Effect of pH and VFA on Hydrolysis of Organic Solid Waste", *Journal of Environmental Engineering*, 126:12, 1076-1081.
- Wall, D.K., Zeiss, C. (1995). "Municipal landfill biodegradation and settlement", *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, 121: 214-224.
- Yuen, S.T.S., Styles, J.R., Wang, Q.J., McMahon, T.A., (1997a), "The Design, Construction and Instrumentation of a Full-Scale Bioreactor Landfill", *Geo Environment 97, 1st Australia-New Zealand Conference On Environmental Geotechnics, November 1997, Melbourne, Australia.*
- Yuen, S.T.S., Wang, Q.J., Styles, J.R., McMahon, T.A., (1997b), "The Role of Water in Landfills: A Full-Scale Hydrological Study", *AWWA 17th. Federal Convention-Water in Balance, March 1997, Melbourne, Australia.*

EKLER

- Ek 1 Test hücresinin hazırlanması aşamasında yapılan çalışmalar
- Ek 2 Test hücrelerinde yapılan ölçümler ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar



Ek-1 Test hücrelerinin hazırlanması aşamasında yapılan çalışmalar

Şekil Ek 1.1 Test hücrelerinde kazı çalışmaları



Şekil Ek 1.2 Test hücrelerinin tabanına kil serilmesi



Şekil Ek 1.3 Test hücrelerinin tabanının geomembranla kaplanması



Şekil Ek 1.4 Sızıntı suyu drenaj sistemi



Şekil Ek 1.5 Gaz bacasının teşkili



Şekil Ek 1.6 Üst örtü tabakasının teşkili

Ek 2 Test hücrelerinde yapılan ölçümler ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar

| <i>Sızıntı Suyu Analizleri</i> | | | | | | | |
|--------------------------------|-------------------------|-----------|-------------------|---|-----------|-------------------|---|
| <i>Numune Tarih</i> | <i>Geçen süre (gün)</i> | <i>H1</i> | | | <i>H2</i> | | |
| | | <i>pH</i> | <i>KOİ (mg/L)</i> | <i>SO₄²⁻ (mg/L)</i> | <i>pH</i> | <i>KOİ (mg/L)</i> | <i>SO₄²⁻ (mg/L)</i> |
| 03.10.2001 | 1 | - | - | - | | | |
| 04.10.2001 | 2 | 3,99 | 19255 | 600 | | | |
| 05.10.2001 | 3 | 4,65 | 23850 | 1050 | | | |
| 06.10.2001 | 4 | 5,71 | 21294 | - | | | |
| 07.10.2001 | 5 | 6,01 | 26850 | 1100 | 4,21 | 24626 | 1100 |
| 08.10.2001 | 6 | 6,03 | 30555 | 1150 | 4,76 | 24440 | 1200 |
| 09.10.2001 | 7 | 6,06 | 28887 | 1150 | 5,20 | 28335 | 1050 |
| 11.10.2001 | 9 | 6,11 | 33149 | 1450 | 5,98 | 31852 | 1100 |
| 13.10.2001 | 11 | 5,90 | 60768 | 1400 | | | |
| 15.10.2001 | 13 | 6,03 | 60398 | 1800 | 6,00 | 51209 | 1350 |
| 16.10.2001 | 14 | 5,95 | 58359 | 1650 | 6,00 | 60768 | 1400 |
| 17.10.2001 | 15 | 6,17 | 71498 | 1750 | 6,08 | 65197 | 1200 |
| 18.10.2001 | 16 | 6,11 | 66680 | 1700 | | | |
| 19.10.2001 | 17 | 6,18 | 79653 | 1900 | 6,22 | 65939 | 1400 |
| 22.10.2001 | 20 | 5,96 | 71498 | 1700 | 6,13 | 70016 | 1800 |
| 23.10.2001 | 21 | 6,17 | 70016 | 1500 | 6,17 | 84101 | 1900 |
| 25.10.2001 | 23 | 6,04 | 69645 | 1350 | 5,98 | 67422 | 1800 |
| 31.10.2001 | 29 | 6,04 | 72981 | 1300 | 6,14 | 63715 | 1400 |
| 01.11.2001 | 30 | 6,02 | 75205 | 1600 | 6,11 | 71128 | 1350 |
| 02.11.2001 | 31 | | | | 6,24 | 64086 | 1200 |
| 03.11.2001 | 32 | 6,09 | 69276 | 1500 | | | |
| 05.11.2001 | 34 | | | | 6,05 | 60379 | 2300 |
| 12.11.2001 | 41 | 5,75 | 78921 | 1600 | 5,78 | 71507 | 1500 |
| 18.11.2001 | 47 | 5,82 | 81886 | 2000 | 5,93 | 66687 | 1300 |
| 26.11.2001 | 55 | 6,04 | 69655 | 1650 | 6,09 | 56219 | 850 |
| 07.12.2001 | 66 | 5,89 | 65753 | 1400 | 5,98 | 38583 | 700 |
| 13.12.2001 | 72 | 5,92 | 47945 | 1100 | 5,98 | 28552 | 500 |
| 18.01.2002 | 108 | 5,87 | 39417 | 700 | 6,21 | 20988 | 300 |
| 22.01.2002 | 112 | 5,84 | 39951 | 550 | 6,24 | 20216 | 350 |
| 29.01.2002 | 119 | 5,81 | 38561 | 500 | 6,20 | 21762 | 200 |
| 13.02.2002 | 134 | 5,91 | 39456 | 550 | 6,64 | 22542 | 200 |
| 05.03.2002 | 154 | 5,89 | 36491 | 450 | 6,49 | 20552 | 100 |
| 09.04.2002 | 189 | 5,90 | - | - | 6,63 | 20688 | 100 |
| 24.04.2002 | 204 | 5,99 | 41285 | 300 | 6,72 | 23600 | 100 |
| 17.05.2002 | 227 | 6,13 | 38452 | 400 | 7,28 | 20438 | 150 |

| Depo Gazı Ölçüm Sonuçları | | | | | | | | | |
|---------------------------|------------------|---------------------|---------------------|--------------------|------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|------------------------|
| Ölçüm Tarih | Geçen süre (gün) | H1 | | | | H2 | | | |
| | | CH ₄ (%) | CO ₂ (%) | O ₂ (%) | H ₂ S (ppm) | CH ₄ (%) | CO ₂ (%) | O ₂ (%) | H ₂ S (ppm) |
| 10.10.2001 | 8 | 0 | 42 | 15 | - | 0 | 38 | 17 | - |
| 11.10.2001 | 9 | 0 | 44 | 15 | - | 0 | 42 | 15 | - |
| 15.10.2001 | 13 | 0 | 51 | 14 | - | 0 | 42 | 12 | - |
| 16.10.2001 | 14 | 0 | 53 | 13 | - | 0 | 51 | 7,2 | - |
| 18.10.2001 | 16 | 0 | 58 | 14 | - | 0 | 50 | 7,8 | - |
| 19.10.2001 | 17 | 8 | 61 | 12 | - | 0 | 55 | 5,1 | - |
| 24.10.2001 | 22 | 7 | 70 | 11 | - | 5 | 68 | 6,2 | - |
| 30.10.2001 | 28 | 9 | 75 | 11 | - | 8 | 73 | 4,7 | - |
| 31.10.2001 | 29 | 12 | 74 | 8 | | | | | |
| 01.11.2001 | 30 | | | | | 11 | 75 | 2 | 59 |
| 06.11.2001 | 35 | 18 | 73 | 5 | - | 19 | 72 | 3,4 | 40 |
| 07.11.2001 | 36 | 22 | 74 | 3 | - | 21 | 75 | 3,1 | 47,6 |
| 08.11.2001 | 37 | 24 | 75 | 0,5 | 34 | 24 | 72 | 2,2 | 44,5 |
| 09.11.2001 | 38 | 23 | 76 | 0,3 | 40 | 25 | 74 | 0 | 34,7 |
| 12.11.2001 | 41 | 24 | 74 | 0 | 49,8 | 24 | 74 | 1,5 | 41,6 |
| 13.11.2001 | 42 | 22 | 73 | 0,8 | 48,6 | 22 | 72 | 1,9 | 27,7 |
| 20.11.2001 | 49 | 23,5 | 75 | 1,2 | 44,5 | 25 | 73 | 1 | 31,2 |
| 22.11.2001 | 51 | 24 | 74 | 0,9 | 42,6 | 25 | 72 | 1 | 34,3 |
| 28.11.2001 | 57 | 24,5 | 65 | 0,4 | 38,5 | 25 | 74 | 0,2 | 33,5 |
| 29.11.2001 | 58 | 27,5 | 65 | 0,2 | 39,5 | 26 | 68 | 0,3 | 29,6 |
| 03.12.2001 | 62 | 25 | 60 | 0,4 | 43,1 | 22,5 | 60 | 0,3 | 24,6 |
| 07.12.2001 | 66 | 26,5 | 63 | 0,3 | 38,7 | 25 | 61 | 0,5 | 29,4 |
| 13.12.2001 | 72 | 26 | 60 | 0,7 | 35,4 | 24 | 59 | 0,8 | 30,8 |
| 27.12.2001 | 86 | 23 | 46 | 0,5 | 32,3 | 22 | 50 | 0,5 | 25,9 |
| 16.01.2002 | 106 | 20 | 36 | 2,4 | 34,4 | 23 | 45 | 0,8 | 20,0 |
| 22.01.2002 | 112 | 20 | 40 | 2,0 | 33,1 | 21,5 | 45 | 0,8 | 21,0 |
| 24.01.2002 | 114 | 22 | 39 | 1,7 | 34,9 | 22 | 39 | 0,3 | 18,2 |
| 29.01.2002 | 119 | 20 | 40 | 1,8 | 31,7 | 21,5 | 45 | 0 | 17,8 |
| 31.01.2002 | 121 | 20 | 38 | 2,1 | 16,4 | 25,5 | 50 | 0 | 13,4 |
| 04.02.2002 | 125 | 21,5 | 39 | 1,4 | 17,1 | 33,5 | 60 | 0 | 14,6 |
| 08.02.2002 | 129 | 24 | 39 | 1,0 | 16,8 | 26 | 45 | 0 | 9,1 |
| 11.02.2002 | 132 | 27 | 45 | 0,8 | 0 | 37,5 | 60 | 0,4 | 11,0 |
| 13.02.2002 | 134 | 24,5 | 47 | 1,0 | 0 | 31,5 | 60 | 0 | 8,2 |
| 05.03.2002 | 154 | 27,5 | 40 | 0,7 | 0 | 28,5 | 45 | 0 | 6,1 |
| 06.03.2002 | 155 | 23,6 | 45 | 0,9 | 0 | 24,5 | 55 | 0 | 6,4 |
| 08.03.2002 | 157 | 29,5 | 45 | 0,7 | 0 | 32 | 60 | 0 | 4,5 |
| 11.03.2002 | 160 | 29,5 | 50 | 0,7 | 0 | 31,5 | 55 | 0 | 5,5 |
| 19.03.2002 | 168 | 29,5 | 45 | 0,8 | 0 | 26,5 | 55 | 0 | 3,7 |
| 20.03.2002 | 169 | 32 | 50 | 0,5 | 0 | 42 | 55 | 0 | 1,2 |
| 21.03.2002 | 170 | 30 | 45 | 0,5 | 0 | 31 | 50 | 0 | 0 |
| 22.03.2002 | 171 | 30 | 40 | 0,8 | 0 | 30 | 50 | 0 | 0 |
| 25.03.2002 | 174 | 31 | 45 | 0,4 | 0 | 31 | 45 | 0 | 0 |

| Depo Gazı Ölçüm Sonuçları | | | | | | | | | |
|---------------------------|------------------|---------------------|---------------------|--------------------|------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|------------------------|
| Ölçüm Tarih | Geçen süre (gün) | H1 | | | | H2 | | | |
| | | CH ₄ (%) | CO ₂ (%) | O ₂ (%) | H ₂ S (ppm) | CH ₄ (%) | CO ₂ (%) | O ₂ (%) | H ₂ S (ppm) |
| 28.03.2002 | 177 | 26,5 | 39 | 1,1 | 0 | 39,5 | 55 | 0 | 0 |
| 03.04.2002 | 183 | 33,5 | 45 | 0,6 | 0 | 43,5 | 55 | 0 | 0 |
| 09.04.2002 | 189 | 41,5 | 50 | 0 | 0 | 45 | 55 | 0 | 0 |
| 10.04.2002 | 190 | 36 | 45 | 0,2 | 0 | 45 | 55 | 0 | 0 |
| 15.04.2002 | 195 | 37 | 50 | 0,1 | 0 | 46 | 54 | 0 | 0 |
| 18.04.2002 | 198 | 38 | 45 | 0,2 | 0 | 44,5 | 55 | 0 | 0 |
| 19.04.2002 | 199 | 34,5 | 50 | 0,2 | 0 | 43 | 55 | 0 | 0 |
| 24.04.2002 | 204 | 36 | 50 | 0 | 0 | 43,5 | 55 | 0 | 0 |
| 25.04.2002 | 205 | 38 | 50 | 0 | 0 | 40 | 55 | 0 | 0 |
| 26.04.2002 | 206 | 38 | 50 | 0,1 | 0 | 42,5 | 55 | 0 | 0 |
| 02.05.2002 | 212 | 40 | 50 | 0 | 0 | 41 | 55 | 0 | 0 |
| 03.05.2002 | 213 | 36,5 | 50 | 0 | 0 | 38 | 55 | 0 | 0 |
| 06.05.2002 | 216 | 37 | 55 | 0 | 0 | 42,5 | 55 | 0 | 0 |
| 17.05.2002 | 227 | 36,5 | 55 | 0,2 | 0 | 45,5 | 50 | 0 | 0 |
| 20.05.2002 | 230 | 37 | 55 | 0,2 | 0 | 46 | 51 | 0 | 0 |
| 27.05.2002 | 237 | 34 | 50 | 0,5 | 0 | 44 | 55 | 0 | 0 |
| 04.06.2002 | 245 | 39 | 50 | 0 | 0 | 44,5 | 55 | 0 | 0 |
| 07.06.2002 | 248 | 37 | 50 | 0,2 | 0 | 44 | 55 | 0 | 0 |

ÖZGEÇMİŞ

| | | |
|---------------|------------|--|
| Doğum tarihi | 01.03.1977 | |
| Doğum yeri | Siirt | |
| Lise | 1987-1995 | Siirt Atatürk Anadolu Lisesi |
| Lisans | 1995-1999 | Fırat Üniversitesi Mühendislik Fak. Çevre Mühendisliği Bölümü |
| Yüksek Lisans | 2000- | Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı |



20. YILBAŞI KURULU
2020-2021
MÜHÜR