

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**KENTSEL KATI ATIKLARDAN
ENERJİ ÜRETİMİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Nergiz AKPINAR**

Programı : ENERJİ BİLİMİ VE TEKNOLOJİLERİ

HAZİRAN 2006

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**KENTSEL KATI ATIKLARDAN
ENERJİ ÜRETİMİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Nergiz AKPINAR
(301031021)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 8 Mayıs 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Haziran 2006**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. Mete ŞEN
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Feridun ÖZGÜÇ (İ.T.Ü.)
Doç.Dr. Murat AYDIN (İ.T.Ü.)**

HAZİRAN 2006

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim döneminde ve tez geliştirilmesi aşamasında beni teşvik eden ve büyük destek veren, mesleki gelişimime büyük katkısı olan sayın hocam Prof. Dr. Mete ŞEN' e en içten teşekkürlerimi sunarım. Katı atık sektörüne ilgi duymamı sağlayan sayın Prof. Dr. İzzet Öztürk'e saygılarımı bu vesileyle sunmak isterim. Ayrıca, öğrenimim süresince anlayış ve yardımlarını esirgemeyen sevgili aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Mayıs 2006

Nergiz AKPINAR

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÖZET	viii
SUMMARY	ix

1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Anlam ve Önemi	1
1.2 Çalışmanın Amaç ve Kapsamı	2
2. KATI ATIK KONUSU İLE İLGİLİ TANIMLAR	3
2.1 Katı Atığın Tanımı	3
2.2 Katı Atıkların Sınıflandırılması ve Bileşimi	3
2.3 Katı Atık Yönetimi	4
3. GERİ KAZANIM	8
4. DÜZENLİ DEPOLAMA	11
4.1 Giriş	11
4.2 Düzenli Depolama Sahası Dizaynı ve İşletilmesi	12
4.3 Depo Gazı Oluşumu ve Özellikleri	15
4.3.1 Depo Gazı Bileşimi ve Özellikleri	15
4.3.2 Depo Gazı Oluşumu	19
4.3.3 Gaz Oluşumunun Zamanla Değişimi	23
4.3.4 Depo Gazı Hesaplama Yöntemleri	25
4.4 Depo Gazının Kontrolü	30
4.4.1 Pasif Gaz Kontrol Sistemleri	30
4.4.2 Aktif Gaz Kontrol Sistemleri	30
4.5 Depo Gazının Enerji Amaçlı Kullanımı	33
4.5.1 Giriş	33
4.5.2 Direkt Isıtma uygulamaları	34
4.5.3 Elektrik üretimi uygulamaları	34
4.5.3.1 Depo gazının sabit motorlarda yakıt olarak kullanımı	34
4.5.3.2 Depo gazının gaz türbinlerinde yakıt olarak kullanımı	35
4.5.3.3 Depo gazının buhar türbinlerinde yakıt olarak kullanımı	35
4.5.3.4 Kojenerasyon	36
4.5.3.5 Yakıt hücresi	36

4.5.4 Boru hattı kalitesinde gaza saflaştırma	37
4.5.4.1 İşlenmiş depo gazının taşıt yakıtı olarak kullanımı	37
4.5.4.2 İşlenmiş depo gazının doğalgaz şebekesine enjeksiyonu	37
4.5.5 Kimyasalların üretiminde kullanılması	37
4.5.6 Depo gazının arıtılması	37
5. TERMAL DÖNÜŞÜM TEKNOLOJİLERİ	39
5.1 Yakma	39
5.1.1 Giriş	39
5.1.2 Atığın yanabilirliği	39
5.1.3 Yanma prosesi	42
5.1.4 Yakma sistemleri	44
5.1.4.1 İşlenmemiş katı atık yakma sistemleri	44
5.1.4.2 İşlenmiş katı atık yakma sistemleri	47
5.1.5 Isı Geri Kazanım Sistemleri	51
5.2 Gazlaştırma	53
5.3 Piroliz	55
6. BİYOLOJİK DÖNÜŞÜM TEKNOLOJİLERİ	57
6.1 Anaerobik Çürütme	57
6.1.1 Anaerobik çürütme prosesi	57
6.1.2 Anaerobik çürütme sistemleri	58
6.1.2.1 Kuru proses	59
6.1.2.2 Islak proses	61
6.1.2.3 İki aşamalı sistemler	62
6.2 Aerobik Kompostlaştırma	63
6.2.1 Kompostlaştırma sistemleri	64
6.2.2 Kompost uygulamaları	65
7. ÖRNEK ÇALIŞMA: TRABZON-RİZE BÖLGESİ	66
7.1 Trabzon-Rize Bölgesi Genel Bilgileri	66
7.2 Trabzon-Rize Bölgesi Atık Miktarı ve Bileşimi	67
7.3 Mevcut Katı Atık Yönetim Sistemi	71
7.4 Trabzon-Rize Bölgesi için Atıklardan Enerji Üretim Seçenekleri	73
7.4.1 Düzenli Depolama	73
7.4.2 Yakma	78
7.4.3 Gazlaştırma	81
7.4.4 Anaerobik Çürütme	81
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	83
KAYNAKLAR	85
EKLER	88
ÖZGEÇMİŞ	112
EK CD : Dünya'daki uygulamalardan örnekler	

KISALTMALAR

MSW	: Municipal Solid Waste (Kentsel katı atıklar)
RDF	: Refuse Derived Fuel (Atıktan türetilmiş yakıt)
HDPE	: High Density Poly Ethylene
LDPE	: Low Density Poly Ethylene
MGK	: Malzeme Geri Kazanımı
LandGEM	: Landfill Gas Emission Model
EPA	: Environmental Protection Agency
CAA	: Clean Air Act
PAFC	: Phosphoric Acid Fuel Cell
ASTM	: American Society for Testing Materials

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1. Geri kazanılmış atıkların kullanım alanları.....	9
Tablo 4.1. Düzenli depolama tesisi dizayn basamakları.....	16
Tablo 4.2. Depo gazında bulunan bileşenler ve depo gazının özellikleri..	17
Tablo 4.3. Depo gazı bileşenlerinin fiziksel özellikleri.....	18
Tablo 4.4. Organik maddelerin ayrışabilirlik dereceleri.....	24
Tablo 4.5. LandGEM modeli parametreleri.....	29
Tablo 5.1. Kentsel katı atık bileşenlerinin ısı değerleri.....	41
Tablo 5.2. Yanma ürünleri.....	43
Tablo 5.3. İşlenmiş ve işlenmemiş katı atık yakma tesislerinin karşılaştırılması.....	48
Tablo 5.4. ASTM RDF sınıflandırması.....	49
Tablo 5.5. Kentsel katı atıkların yanması için buhar üretim hızları.....	52
Tablo 7.1 Proje bölgesi 1990 ve 2000 yılı nüfus sayım sonuçları.....	66
Tablo 7.2. Trabzon ili katı atık özellikleri.....	68
Tablo 7.3. Bazı illerin spesifik atık miktarları.....	69
Tablo 7.4. Trabzon-Rize bölgesi atık projeksiyonu.....	72
Tablo 7.5. Düzenli depolama sahasında depolanacak atık miktarı.....	74
Tablo 7.6. Model sonuçlarının özeti.....	75
Tablo 7.7. Modellere göre enerji potansiyelleri.....	77
Tablo 7.8. Direkt ısıtma sistemi yatırım maliyeti tahmini.....	78
Tablo A.1. Düzenli depolama sahası yatırım maliyeti tahmini.....	89

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Entegre katı atık yönetim diyagramı.....	5
Şekil 2.2 : Kentsel katı atıklardan enerji üretim teknolojileri.....	7
Şekil 3.1 : Ayırma tesisi akım diyagramı.....	10
Şekil 4.1 : Bir düzenli depolama sahasının kesit görünüşü.....	13
Şekil 4.2 : Düzenli depolama sahası.....	14
Şekil 4.3 : Katı atıkların bozunması sonucu oluşan ürünler.....	20
Şekil 4.4 : Anaerobik ayrışma prosesleri.....	23
Şekil 4.5 : Gaz üretim hızı ve kümülatif gaz üretimi.....	24
Şekil 4.6 : Depo gazı oluşum eğrileri.....	25
Şekil 4.7 : Düşey kuyular kullanılan gaz geri kazanım sistemi.....	31
Şekil 4.8 : Dikey bir gaz çekme kuyusu.....	32
Şekil 4.9 : Depo gazından enerji üretimi.....	34
Şekil 4.10 : Depo gazı arıtımı akım şeması.....	38
Şekil 5.1 : Tanner diyagramı.....	40
Şekil 5.2 : Bir katı atık yakma tesisinin kesiti.....	45
Şekil 5.3 : Farklı ızgara tasarımları.....	47
Şekil 5.4 : Akışkan yataklı yakma sistemi.....	50
Şekil 5.5 : Su duvarı kesiti.....	52
Şekil 5.6 : Gazlaştırma sistemi akış diyagramı.....	54
Şekil 6.1 : Anaerobik çürütme akım şeması.....	59
Şekil 6.2 : Farklı reaktör tasarımları.....	61
Şekil 7.1 : Trabzon atık bileşiminin aylık değişimleri.....	67
Şekil 7.2 : 2000 yılında belediye tarafından yapılan katı atık analizi....	68
Şekil 7.3 : Gelir gruplarına göre atıkların bileşimi.....	70
Şekil 7.4 : Yaz ve kış mevsimlerinde atık bileşimi.....	70
Şekil 7.5 : Model sonuçlarının karşılaştırılması.....	76
Şekil 7.6 : Çimento tesisi akım şeması.....	80
Şekil B.1 : LandGEM CAA modeli sonuçları.....	97
Şekil B.2 : LandGEM AP-42 modeli sonuçları.....	103
Şekil B.3 : LandGEM AP-42 modeli sonuçları(2006-2205).....	104
Şekil B.4 : AP-42 mod. göre %60 geri kazanımla yıllık gaz potansiyeli	105
Şekil C.1 : Multi phase modeli sonucu.....	111

KENTSEL KATI ATIKLARDAN ENERJİ ÜRETİMİ

ÖZET

Günümüzde kentlerin en büyük sorunlarından biri hızla artmakta olan katı atıklardır. Bu sorun atıkların bertarafında kullanılan teknolojilerin ekonomik ve çevre dostu olması ile ilgili endişeleri arttırmaktadır ve konuyla ilgili araştırmalar giderek artmaktadır. Bu çalışmada kentsel katı atıklardan enerji üretim teknolojileri değerlendirilmiştir.

Atıkları enerjiye dönüştürmek için çeşitli teknolojiler mevcuttur. Temel olarak bu teknolojilerin başlıcaları düzenli depolama, yakma, gazlaştırma ve anaerobik çürütmedir. Düzenli depolama atıkların mühendislik esaslarına göre depolanmasıdır. Depo gazı enerji üretiminde kullanılabilir. Yakma teknolojisinde atıklar kontrollü olarak ısı geri kazanımı sağlanarak yakılırlar ve buhar türbinleri kullanılarak elektrik üretimi gerçekleştirilir. Gazlaştırma teknolojisi ilk aşamada piroliz içerir daha sonra bunu yüksek sıcaklıklı reaksiyonlar takip eder ve düşük molekül ağırlıklı gazlar üretilir. Üretilen gaz içten yanmalı motorlar veya boylerler kullanılarak enerji üretimi için değerlendirilir. Anaerobik çürütme prosesinde atıkların organik kısmı oksijensiz ortamda özel tasarlanmış reaktörlerde çürütülür. Bu bakteriyel aktivite altında çürümüş atıklar metan ve karbondioksit üretir. Tüm teknolojilerin avantaj ve dezavantajları vardır. Teknoloji seçimi atığın bileşimine, miktarına ve lokal şartlara bağlıdır.

Bu çalışmada atık bertaraf teknolojileri ve atıklardan enerji kazanımı detaylı olarak incelenmiştir. Tezin birinci bölümünde, çalışmanın önemi, amacı ve kapsamı açıklanmıştır. İkinci bölümde katı atık konusu ile ilgili tanımlar ve değerlendirmeler verilmiştir. Daha sonraki bölümlerde kentsel katı atık bertaraf metodları geri kazanım, düzenli depolama, termal dönüşüm teknolojileri ve biyolojik dönüşüm teknolojileri sırasıyla anlatılmıştır. Bunlardan enerji geri kazanımı sağlayan teknolojiler daha detaylı olarak incelenmiştir. Yedinci bölümde Trabzon-Rize bölgesi için katı atıklardan enerji üretimi üzerine bir örnek çalışma yer almaktadır. Son bölümde sonuçlar değerlendirilmiş ve öneriler yapılmıştır.

ENERGY PRODUCTION FROM MUNICIPAL SOLID WASTES

SUMMARY

The large and increasing amounts of municipal solid wastes generated each year in several industrialised countries have raised concerns about the economic viability and environmental acceptability of the current waste disposal methodologies. This study evaluates the technologies which allow energy production from municipal solid wastes.

There are various options available to convert solid waste to energy. Mainly, the following types of technologies are available: sanitary landfill, incineration, gasification and anaerobic digestion. Sanitary landfill is the scientific dumping of municipal solid waste. The landfill gas could be used for generating power. Incineration technology is the controlled combustion of waste with the recovery of heat, to produce steam that in turn produces power through steam turbines. A gasification technology involves pyrolysis in the first stage, followed by higher temperature reactions of the pyrolysis products to generate low molecular weight gases. These gases could be used in internal combustion engines or in boilers to produce power. In anaerobic digestion, the organic fraction of the municipal solid waste is digested in absence of air, in specially designed digesters. Under this active bacterial activity, the digested pulp produces methane and carbon dioxide. All these technologies have merits and demerits. The choice of technology has to be made based on the waste quality, quantity and local conditions.

In this study municipal solid waste disposal technologies and waste to energy technologies were examined in detail. In the first section of the thesis, the importance, aim and extent of the study was explained. In the second section definitions and evaluations about solid wastes were given. In the other sections municipal solid wastes disposal methods which are recycling, sanitary landfill, thermal conversion technologies and biological conversion technologies were

explained respectively. Waste to energy technologies was examined more detailly than other disposal technologies. There is a case study for Trabzon-Rize project region about waste to energy technologies in the seventh section of the thesis and in the last section results were evaluated.

1. GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Anlam ve Önemi

Artan nüfus, kentleşme ve sanayileşmeye paralel olarak oluşan katı atık miktarı da hızla artmakta ve kentler için giderek daha büyük bir sorun haline gelmektedir. Geçmişte uygulanan , insan ve çevre sağlığı açısından büyük riskler taşıyan katı atıkların vahşi döküm sahalarına dökülmesi uygarlaşan dünyada giderek geçerliliğini kaybetmektedir. Günümüzde katı atıkların bertaraf edilmesi için farklı teknolojiler geliştirilmekte, mevcut teknolojiler iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Gelişmiş ülkelerde 1970’li yıllardan itibaren düzenli depolama ve yakma teknolojileri katı atıkların bertaraf edilmesinde kullanılmaya başlanmıştır. 1990 ve 2000’ li yıllarda ise gazlaştırma ve anaerobik çürütme teknolojileri atık yönetim sistemlerindeki yerlerini almaya başlamışlardır.

Katı atıkların vahşi depolama ile değil, diğer teknolojilerle bertarafı hiç şüphesiz büyük maliyetler oluşturmaktadır. Bu noktada atıklardan ekonomik olarak değerlendirilebilir ürünler elde edilip edilemeyeceği sorusu gündeme gelmiştir. Atıklardan elde edilebilecek ürünler geri kazanılabilir maddeler, kompost ve enerjidir. Enerji geri kazanımı üzerinde en çok çalışılan konulardan biridir. Ayrıca katı atıkların enerji potansiyeli oldukça yüksektir. Son yıllarda yeryüzündeki enerji kaynaklarının giderek azaldığı sıklıkla telaffuz edilmektedir. Buna karşılık teknolojiye ilerlemeler ve artan nüfus nedeniyle enerji ihtiyacı gün geçtikçe artmaktadır. Tabi ki katı atıkların tek başına artan enerji ihtiyacını karşılaması beklenemez. Ancak atıklar bertaraf edilirken aynı zamanda enerji potansiyellerinin değerlendirilmesi en uygun seçenek olacaktır. Henüz istenilen seviyeye ulaşamamış olsa da dünyada atıklardan enerji üreten ve özellikle lokal enerji ihtiyacının büyük kısmını karşılayan birçok tesis bulunmaktadır.

1.2 Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı, kentsel katı atıklardan enerji üretim teknolojilerini inceleyerek bu teknolojilerin teknik ve ekonomik analizlerinin yapılmasıdır. Bu amaçla çalışmada detaylı olarak incelenen teknolojiler düzenli depolama, yakma, gazlaştırma ve anaerobik çürütmedir.

Düzenli depolama teknolojisinde kentsel katı atıklar mühendislik çalışmaları yapılmış sahalarda biriktirilir, sahada atıkların biyolojik bozunmaları sonucu enerji değeri olan başlıca metan ve karbon dioksitten oluşan depo gazı elde edilir. Depo gazının enerji potansiyeli yaygın olarak direkt ısıtma sistemlerinde, içten yanmalı motor veya gaz türbinli kojenerasyon tesislerinde değerlendirilmektedir. Yakma teknolojisinde ise atıklar herhangi bir ön proses uygulanmadan fırınlarda yakılarak veya katı atıklar işlenerek elde edilen, kalorifik değeri daha yüksek, yakıtın akışkan yataklı sistemlerde yakılması sonucu bertaraf edilirler ve üretilen enerji elektrik ve ısı üretiminde kullanılır. Bir başka termal dönüşüm teknolojisi olan gazlaştırmada ise atıklardan sentez gazı denilen bir yakıt elde edilir ve enerji üretiminde kullanılır. Anaerobik çürütme ise bir biyolojik dönüşüm teknolojisidir. Anaerobik çürütmede kentsel katı atıkların organik kısmı reaktörlerde bozunmaya uğrar ve biyogaz elde edilir. Elde edilen biyogazın metan içeriği depo gazına oranla daha fazladır. Biyogaz depo gazında olduğu gibi direkt ısıtma sistemlerinde ve içten yanmalı motorların kullanıldığı elektrik üretim veya kojenerasyon tesislerinde değerlendirilebilir.

Düzenli depolama, yakma, gazlaştırma ve anaerobik çürütme teknolojileri baz alınarak Türkiye'nin kuzeydoğu sahilinde bulunan Trabzon-Rize bölgesi için bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada öncelikle bölgede üretilen ve ileride üretilecek atık miktarları belirlenmiş daha sonra atıkların enerji potansiyeli incelenerek atıklardan enerji üretim teknolojilerinin teknik ve ekonomik olarak uygulanabilirliği ele alınmıştır. Bu çalışma ülkemizdeki diğer iller için de bir model teşkil etmektedir.

2. KATI ATIK KONUSU İLE İLGİLİ TANIMLAR

2.1 Katı Atığın Tanımı

Katı atıklar (çöpler) evsel, endüstriyel ve her türlü insan faaliyetleri neticesinde ortaya çıkan, sahibi tarafından istenmeyen, üreticisi tarafından herhangi bir amaçla kullanılamayacak olan katı maddelerdir. [1]

14 Mart 1991 tarihinde Resmi Gazete’de yayınlanan “Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği”nde ise katı atığın tanımı “üreticisi tarafından atılmak istenen ve toplumun huzuru ve özellikle çevrenin korunması bakımından düzenli bir şekilde bertaraf edilmesi gereken katı maddeler” şeklinde yapılmıştır.

Kentsel katı atıklara üretilen ticari malların şehirlerde; özellikle evlerde veya benzer yerlerde tüketilmesiyle oluşan atıklar olduğundan kısaca evsel atık da denmektedir. Genel anlamda, uluslar arası terminolojide mücavir alan atıkları anlamına gelen MSW (Municipal Solid Wastes) harfleri ile sembolize edilmektedir. [2]

2.2 Katı Atıkların Sınıflandırılması ve Bileşimi

Katı atıklar için farklı sınıflandırmalar mevcuttur. Katı atıklar oluştukları yere göre evsel, endüstriyel ve ticari katı atıklar olarak sınıflandırılabilir. Katı atıkların kaynaklarına göre daha detaylı bir sınıflandırma ise şu şekildedir:

- 1) Evsel katı atıklar
- 2) İri ve hurda katı atıklar
- 3) Bahçe atıkları
- 4) Cadde, sokak süprüntüleri
- 5) Sanayi atıkları
- 6) Mezbaha ve ahır atıkları
- 7) Enkaz ve toprak
- 8) Tehlikeli ve zararlı atıklar
- 9) Zehirli atıklar

Kaynağına göre sınıflandırmanın dışında katı atıklar organik ve inorganik olarak da gruplandırılır. Atıkların organik ve inorganik olma oranı bertaraf yöntemleri açısından önemli kriterlerden biridir.

Katı atık bileşenlerini ise aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

- Gıda atıkları
- Bahçe atıkları
- Kağıt, karton
- Plastik, kauçuk
- Tekstil
- Tahta
- Metal
- Cam
- Kül, cüruf, toprak

Katı atıklar heterojen bir yapıya sahiptirler ve bileşimleri sürekli değişir. Katı atık miktarı ve bileşimi bazı etkenlere bağlıdır. Bu etkenler nüfus, sosyal seviye, hayat standardı, ekonomik durum, beslenme alışkanlıkları olarak sıralanabilir.

Katı atık bileşenleri için atığın bertaraf edilme yöntemi açısından önemli olan aşağıdaki sınıflandırma yapılabilir:

- Yanabilenler: Gıda atıkları, bahçe atıkları, kağıt, karton, plastik, kauçuk, tekstil
- Kompost olabilenler: Gıda atıkları, bahçe atıkları, kağıt
- Yanmayan ve kompost olmayanlar: Cam, metal, toprak, kül, cüruf, seramik
- Geri kazanılabilenler: Plastik, cam, metal, kağıt, karton [3]

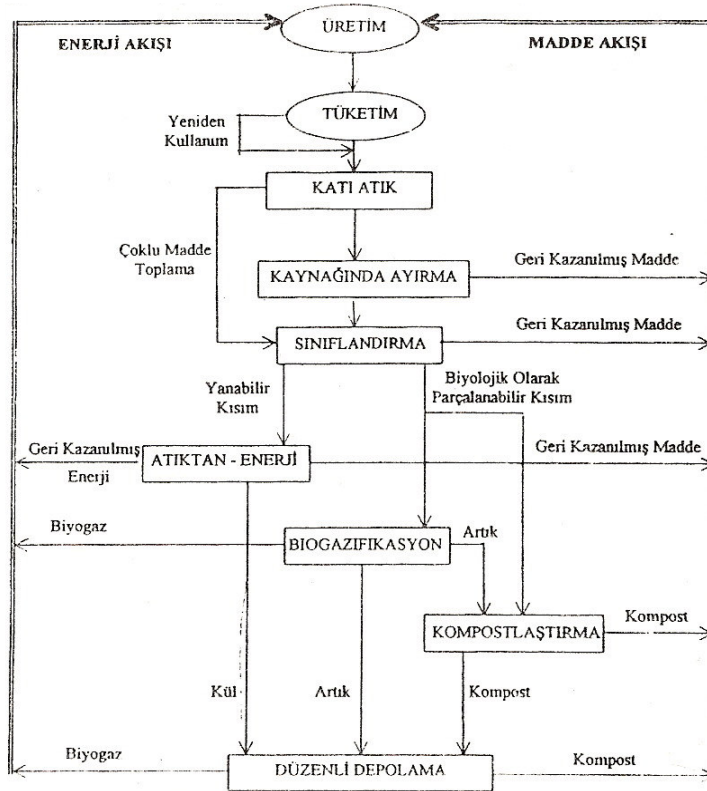
2.3 Katı Atık Yönetimi

Yerleşim biriminin nüfusu arttıkça katı atıktaki çeşitlilik ve birim atık miktarı çoğalmaktadır. Katı atıkların miktar ve özellikleri ülkeden ülkeye değiştiği gibi aynı ülkede bölgeden bölgeye hatta aynı şehirde semtten semte değişebilmektedir. Bu değişim gelir seviyesi ile tüketim ve kullanım alışkanlıklarına bağlıdır. İyi bir katı atık yönetimi ile bütün atıklar kontrol altına alınır. En ideal şartlarda planlanan ve işletilen entegre bir katı atık yönetim sisteminde hiçbir surette kontrolsüz katı atık oluşmaz.

Etkili bir katı atık yönetimi;

- Atık oluşumu,
- Kaynakta sınıflandırma, biriktirme, ayıklama ve işleme
- Toplama,
- Transfer,
- Ayırma, işleme ve dönüştürme,
- Nihai bertaraf

olmak üzere başlıca altı unsuru ihtiva eder. Bu unsurların her biri bağımsız olarak ele alınmalıdır. Şekil 2.1’de üretimden nihai bertarafa kadar katı atık yönetim akım diyagramı verilmiştir. [4]



Şekil 2.1 Entegre katı atık yönetimi akım diyagramı [4]

Katı atıklar geçmişte sadece vahşi depolama ile bertaraf edilirken, nüfusun ve tüketimin artması, çevre kirliliği gibi değişen dünya koşulları sonucu daha etkin birçok bertaraf yöntemi geliştirilmiş ve uygulanmaya başlanmıştır.

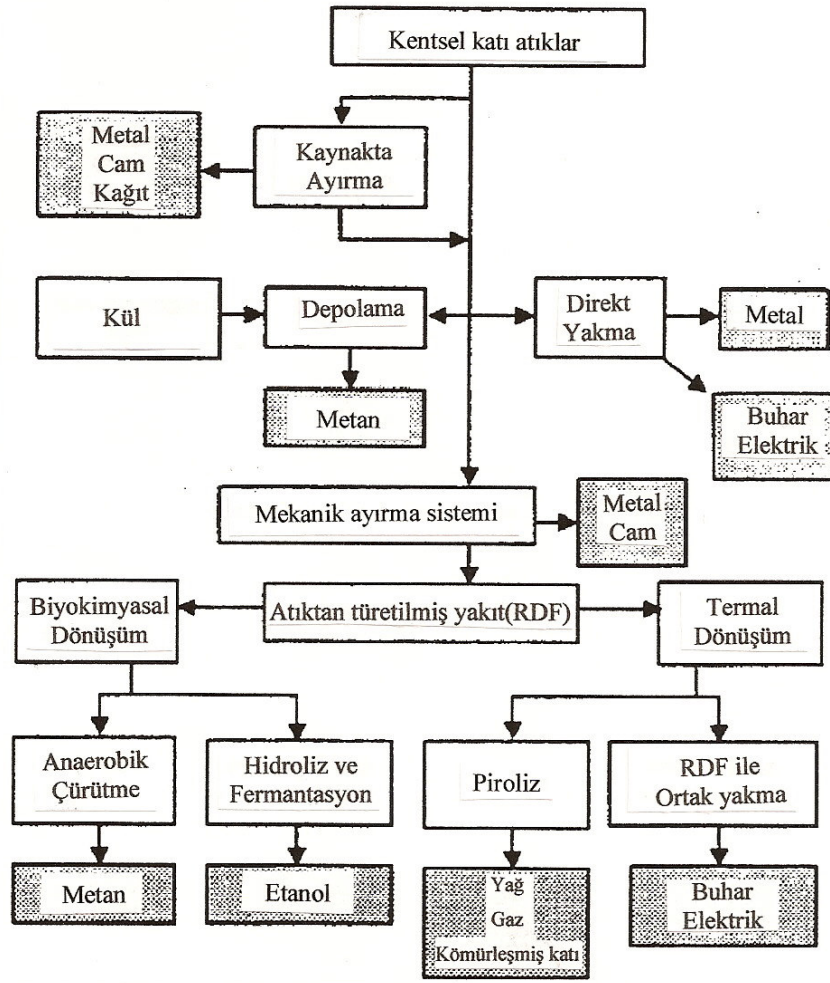
Katı atık yönetim sisteminde uygulanan değerlendirme ve bertaraf teknolojileri şu şekilde sıralanabilir:

- Geri kazanma
- Düzenli depolama
- Termal dönüşüm teknolojileri
 - Yakma
 - Gazlaştırma
 - Piroliz
- Biyolojik dönüşüm teknolojileri
 - Aerobik kompostlaştırma
 - Anaerobik kompostlaştırma [5]

Atıkların enerji değerinin fark edilmesiyle, atıkların bertaraf edilirken aynı zamanda enerjisinden faydalanma fikri giderek yaygınlaşmaktadır. Günümüzde gelişmiş ülkelerde kentsel katı atıklardan enerji üreten birçok tesis vardır. Kentsel katı atıklardan enerji elde etmek için kullanılan teknolojiler ise,

- Düzenli depolama
- Yakma
- Gazlaştırma
- Anaerobik çürütme

prosesleridir. [6] Şekil 2.2’de bu teknolojiler görülmektedir.



Şekil 2.2 Kentsel katı atıklardan enerji üretim teknolojileri [7]

3. GERİ KAZANIM

Gerek katı atıklardan kaynaklanan çevre kirliliği sorununun çözülmesinde, gerekse kaynakların ve doğanın kullanımında rasyonelliğin sağlanmasında, katı atıkların ekonomiye geri döndürülmeleri “Geri Kazanım” kavramını ortaya çıkarmıştır. Geri kazanım, geri kazanılacak atıkların bir hammadde gibi kullanılıp, sahip olduğu özellikler dikkate alınarak, değişik ürünlere ve enerjiye çevrilerek birden fazla kullanılmasıdır. Plastik, cam, metal, kağıt, seramik, tekstil, kemik ve ahşap gibi malzemeler, depolama alanlarına gömülmek yerine ikincil hammadde olarak değerlendirilebilir. Bu şekilde hem endüstrinin hammadde ihtiyacı azaltılır, endüstriye ekonomik şekilde hammadde temin edilir, hem de hammadde üretimi için harcanan enerji, su vb. tüketimi azaltılır. Ayrıca bu atıkların yoğunluğu genellikle çok düşük olduğu için, büyük bir çöp hacmini oluştururlar. Değerlendirilebilir atıkların ekonomiye geri kazanılmasıyla, depolama sahalarına giden atık hacmi önemli mertebede azalır ve depolama sahalarının ömrü böylece uzatılır. [8]

Evsel atıklarda bulunan değerlendirilebilir kuru atıklar genellikle aşağıdaki sınıflardan ibarettir:

- Cam ve seramik
- Kâğıt/karton
- Plastik (PET, PVC, PP/PE, LDPE), kauçuk
- Metal (Alüminyum, demir, pirinç alaşımları, bakır)
- Tekstil, deri
- Ahşap
- Kemik

Geri kazanılmış atıkların kullanım alanları tablo 3.1’de gösterilmiştir.

Geri kazanma, geri kazanılabilecek maddelerin kaynakta ayrılması, toplama sırasında ayırma ve merkezde ayırma yöntemlerinden birisiyle yapılabilir. Ancak geri kazanımın en etkin yolu kaynakta ayırma sistemidir. Atıkların üretildiği yerde ayrı toplanıp, sonra bir ayırma tesisinde daha saf fraksiyonlara ayrılması en uygun yaklaşımdır. Ancak bazı yerlerde bu yaklaşım sosyo-ekonomik faktörlerden dolayı mümkün değildir. Bu durumda, atıklar karışık toplanır, sonra bir ayırma tesisinde yaş çöplerden ayrıştırıldıktan sonra fraksiyonlara ayrıştırılır. [8]

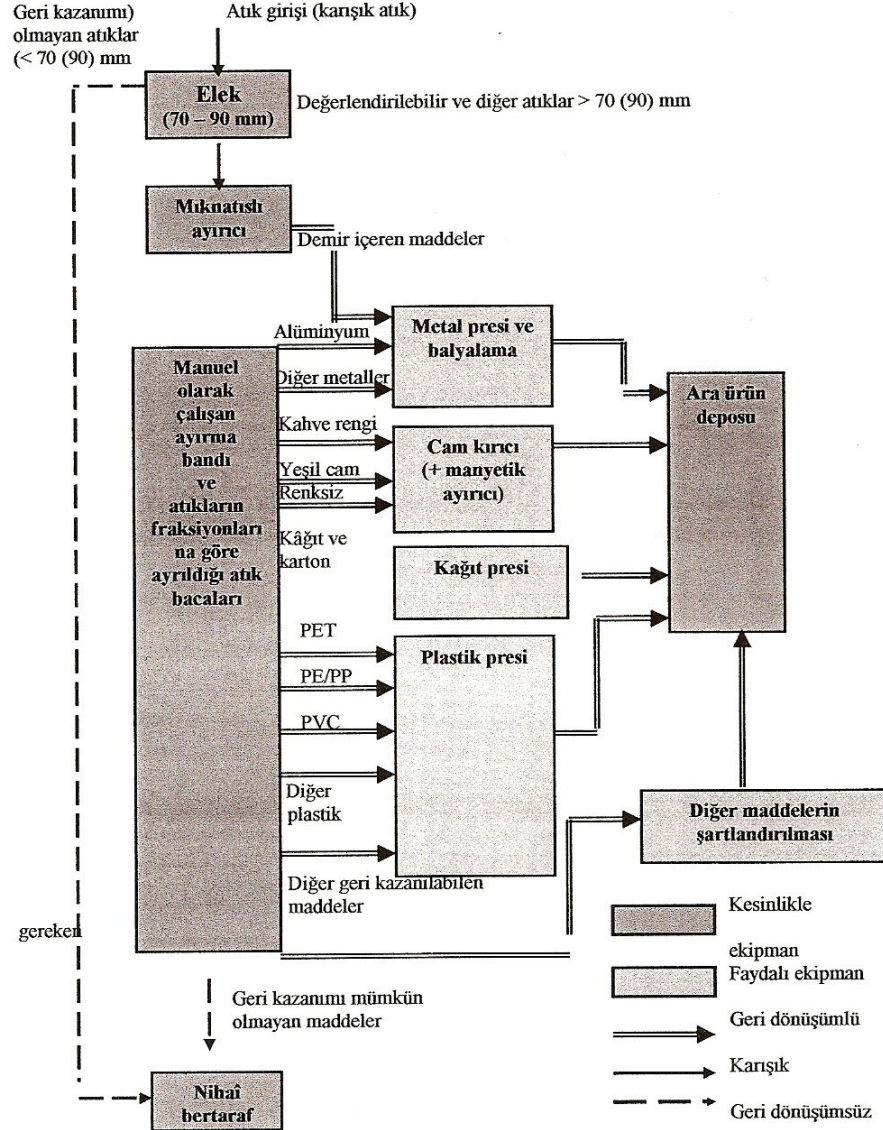
Tablo 3.1 Geri kazanılmış atıkların kullanım alanları [8]

Atık türü	Kullanım alanları
Cam	Kullanılmış cam, eritildikten sonra, tüm cam ürünleri için kullanılabilir. Ancak beyaz cam üretimi için bazı sınırlamalar vardır (renkli cam muhtevası).
Metaller	Kullanılmış metaller, eritildikten sonra, daha evvelki kullanım amacı için kullanılabilir. Alaşım özelliklerinden dolayı, çapraz uygulamalar (meselâ kutu ambalajlarını eritip pencere profilini üretmek) her zaman mümkün olmayabilir.
Plastik	Plastik ürünlerin tekrar kullanımı kısıtlıdır. Plastik çeşitlerinin çok olmasından, bunların ayırma imkânları da sınırlı olmasından dolayı (meselâ kimyevî özellikleri çok değişik ve birbirine uymayan plastiklerin özgül yoğunlukları birbirine çok yakın olabilir, bu da mekanik ayırmayı zorlaştırır), kaliteli ikincil ürün elde etmek zordur. İkincil plastik malzemeleri gıda ile temasta bulunmamalıdır. Ancak, ambalaj dış cidarı, boru (içme suyu borusu hariç), çiçek saksısı, plastik mobilya gibi eşyanın üretilmesi için kullanılabilirler.
Kâğıt	Yeni yapılan kâğıdın hamuruna katılır, belli bir oranı geçmemek kaydıyla tüm ürünler için kullanılabilir. % 100 eski kâğıttan üretilen kâğıtlar, renk ve doku uzunluğu açısından, yeni mamulden yapılan kâğıdın kalitesine ulaşamamaktadır.
Tekstil	Kâğıt yapımı, dolgu malzemesi, yalıtım malzemesi, yeni ip üretimi için kullanılabilir.
Ahşap	Kâğıt üretiminde ve yakıt olarak kullanılabilir.
Kemik	Jelatin vb. malzemelerin üretiminde kullanılabilir.

Atıklar malzeme geri kazanım (MGK) tesislerinde piyasada ekonomik şekilde değerlendirilebilecek hale getirilirler. Malzeme geri kazanım tesisleri manuel veya mekanik olarak, ya da bu metotların bir karışımı ile işletilmesine dayanılarak, kabaca üç grup içinde değerlendirilirler.

Mekanik MGK tesisleri, ayırmanın yapılabilmesi için tanecik büyüklüğü, şekil, yoğunluk ve manyetizma gibi atık özelliklerinden yararlanan bir dizi malzeme işleme prosesini kullanmaktadır. Manuel sistemler, tali malzemelerin konveyör bantlarına

alınması ve diğer fiziksel ayırma yöntemlerinin kullanılmasına dayanır. [9] Şekil 3.1’de bir ayırma tesisinin akış diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.1 Ayırma tesisi akış diyagramı [8]

4. DÜZENLİ DEPOLAMA

4.1. Giriş

Atıkların arazide depolanması atık bertaraf yöntemlerinin en eskisi ve en çok kullanılanıdır. Katı atıkların araziye gelişigüzel atılması, sızıntı suyu ve oluşan gazın kontrolünün yapılmaması vahşi depolama olarak tanımlanmaktadır. Malesef katı atıkların arazide gelişigüzel depolanması, yani vahşi depolama bütün dünyada yaygın durumdadır. [10] Çevre ve insan sağlığı açısından çok sayıda olumsuzluklar taşıyan bu bertaraf şeklinin sakıncalarından bazıları;çöplerden çıkan kötü kokuların çevredekileri rahatsız etmesi, çöplerin rüzgarla etrafa dağılarak görüntü kirliliğine sebep olması, sinek, fare gibi zararlıların barınma ve üreme yeri olması, çöplerden çıkan sızıntı sularının yeraltı ve yerüstü sularını kirletmesi, çöplükte açığa çıkan metan gazından dolayı sık sık yangın çıkması ve metan gazının patlama riskini taşınması olarak sayılabilir. [11]

Düzenli depolama ise basit olarak katı atıkların, sızdırmazlığı sağlanmış büyük alanlara dökülmesi, sıkıştırılması ve üzerinin örtülerek tabii biyolojik reaktör haline getirilmesi olarak tanımlanabilir. [4] Düzenli depolamada sızıntı suyu, depolama alanı gaz emisyonları, çöplerin dağılımı ve koku kontrolünün kolaylaştırılması için sahanın mühendisliğinin yapılmış olması gerekmektedir.

Genel olarak düzenli bir depolama sahasının mühendislik projeleri ve işletme uygulamaları aşağıdaki özellikleri kapsamaktadır;

- uygun saha seçimi, sahanın kaplanması, aktif gaz çıkarma araçlarının montajı, sızıntı suyu ve depolama alanı gaz yayılımının kontrol edilmesi;

- yüzey suyu, yeraltı suyu ve yağmur suyunun sahaya sızmasını en aza indirmeye yönelik mühendislik projesi;
- işletme kontrolünün kolaylaştırılması ve açıkta kalan atık yüzeyi en aza indirilerek çevresel etkilerin azaltılması yoluyla sızıntı suyunun azaltılması, sahanın kademe kademe doldurulması;
- stabilizasyonun en üst seviyede tutulması için depolama sahası içindeki eğimlerin kontrol altında tutulması;
- yağmur suyunun depolanan atıklara sızmasının, çöplerin rüzgarla savrulmasının, kemirgenlerin ve kuşların etkilerinin minimum seviyede tutulması için günlük toprak örtüsünün kullanılması; ve
- depolanan atığın içinde bulunan boşlukların en aza indirilmesi, aerobik ayrışmadan kaynaklanan yangın riskinin azaltılması, kemirgen istilasının minimum seviyede tutulması ve sahada farklı seviyelerde yerleşmelerin önlenmesi için sıkıştırma. [9]

Düzenli depolama sahaları çeşitleri, depolanacak atıkların cinslerine ve tehlike potansiyellerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Genel olarak, aşağıdaki depolama sahaları yaygın olarak kullanılmaktadır:

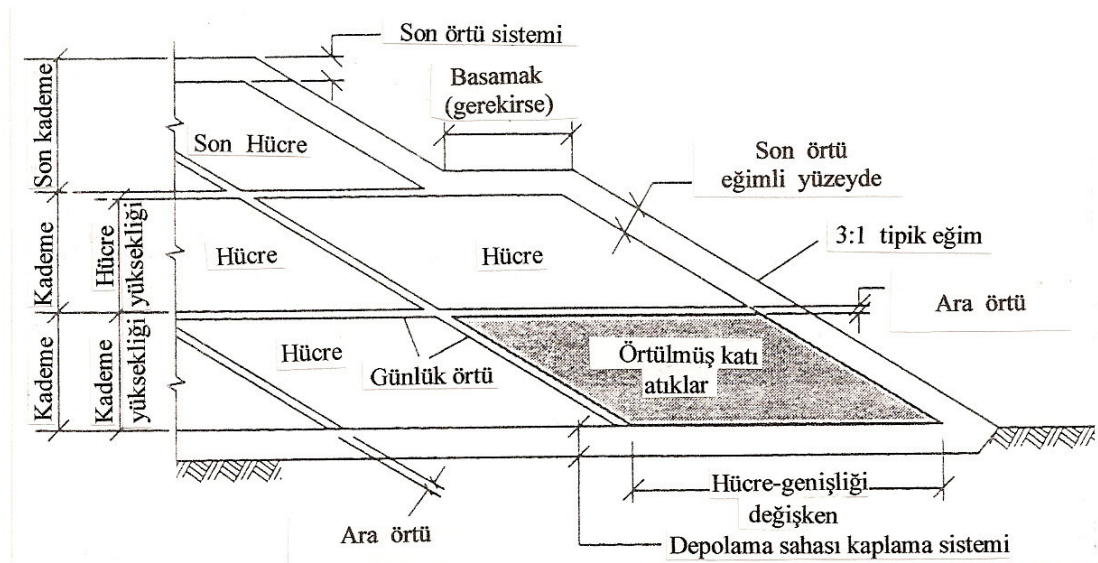
- Toprak, hafriyat ve yıkım artıkları için kullanılan depolama sahaları
- Evsel atık depolama sahaları (evsel atıklar, evsel nitelikli ticari ve endüstriyel atıklar)
- Tıbbi ve tehlikeli atıklar için kullanılan depolama sahaları [12]

4.2. Düzenli Depolama Sahası Dizaynı ve İşletilmesi

Düzenli depolama sahası dizayn paketi her projede olduğu gibi planlardan, detaylı mühendislik projelerinden, dizayn raporundan ve maliyet hesaplamalarından oluşur. Dizayn aşamalarından bahsetmeden önce düzenli depolama prosesinde kullanılan bazı terimlerin tanımlamalarını yapmak gerekir.

Hücre (cell) :Hücre terimi bir işletme periyodunda (genellikle 1 gün) sahaya yerleştirilen malzemenin hacmini tanımlar. Bir hücre, depolanan katı atık ve üzerine dökülen günlük örtüden oluşur.

Son örtü (final cover): Son örtü tüm depolama işlemi tamamlandıktan sonra bütün sahanın yüzeyine uygulanan örtü tabakasıdır. Son örtü yüzey drenajını yükseltecek, sızan suları önleyecek ve yüzey bitkilerini destekleyecek şekilde genellikle toprak ve/veya geomembran materyallerden oluşan birkaç tabakadan meydana gelir. [5]



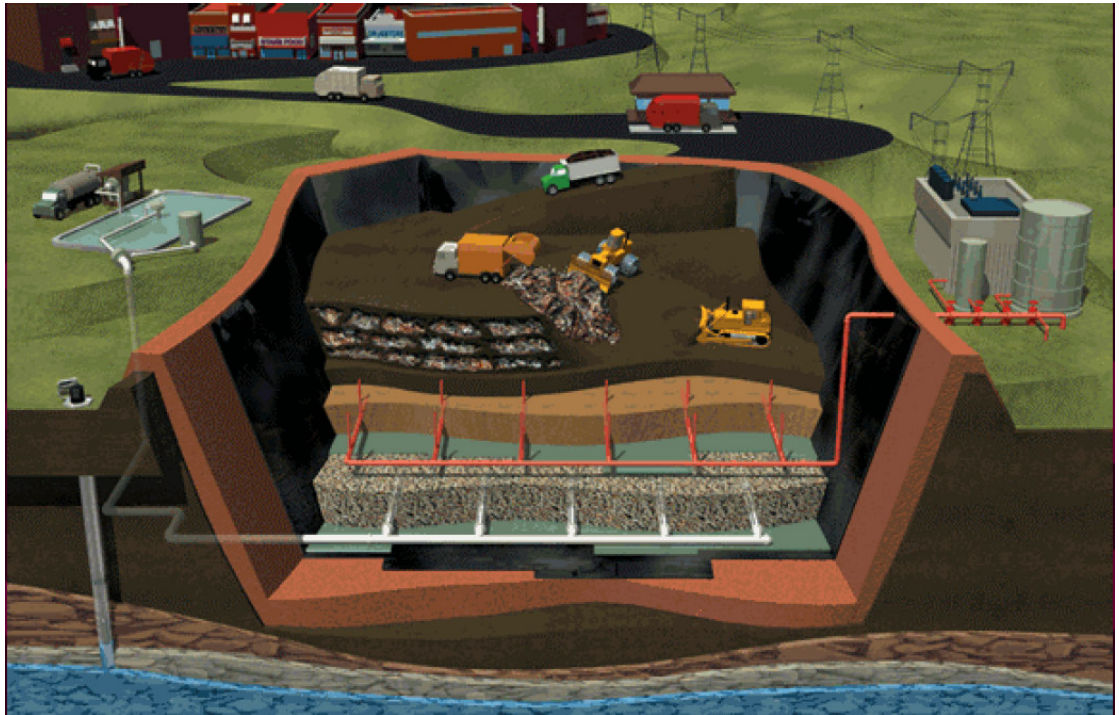
Şekil 4.1 Bir düzenli depolama sahasının kesit görünüşü [5]

Sızıntı suyu(leachate): Sahanın dibinde biriken sıvı sızıntı suyu olarak adlandırılır. Derin sahalarda sızıntı suyu sıklıkla orta noktalarda toplanır. Sızıntı suyu yağıştan sızan suların ve saha içindeki sulama suyunun bir sonucudur. Sızıntı suyu depolanmış atıkların çözünmesi sonucu ve depolama sahasında meydana gelen kimyasal ve biyokimyasal reaksiyonlardan kaynaklanan çeşitli kimyasal bileşenler içerir.

Depo gazı(landfill gas): Depo gazı sahada oluşan gazların bir karışımıdır. Büyük kısmı kentsel katı atıkların organik kısımlarının anaerobik bozunması sonucu oluşan metan ve karbon dioksitten meydana gelir.

Kaplama(liner): Depolama sahası kaplamaları dipte ve alt seviyede kalan yan bölgelerde kullanılan doğal ve sentetik malzemelerdir. Kaplamalar genellikle sızıntı suyu ve depo gazının göçünü önleyecek şekilde dizayn edilmiş kil ve/veya geomembran malzemeden oluşan tabakalardan meydana gelir.

Depolama sahasının kapatılması(landfill closure): Bu terim doldurma işleri bittiğinde sahanın güvenli olacak şekilde kapatılması için yapılması gereken adımları tanımlar. Kapatma sonrası ise sahanın uzun dönem (30-50 yıl) izleme ve bakım aktiviteleri gerçekleştirilir. [5]



Şekil 4.2 Düzenli depolama sahası [13]

Her proje zaman, saha sınırlamaları, atık özellikleri ve politik faktörlerden oluşan ayrı bir kombinasyon olduğundan projeler dizayn esnasında farklılıklar gösterse bile düzenli depolama tesisleri için izlenen genel bir plan mevcuttur, tablo 4.1' de bir düzenli depolama sahasının genel dizayn basamakları görülmektedir. [14]

4.3 Depo Gazı Oluşumu ve Özellikleri

4.3.1 Depo gazı bileşimi ve özellikleri

Depo gazı depolama sahasında oluşan gazların bir karışımıdır, büyük miktarlarda bulunan ana gazlarla, az miktarda bulunan eser gazlardan oluşur. Depo gazı kentsel katı atıkların organik fraksiyonlarının anaerobik bozunması sonucu oluşur. Bazı eser gazlar, küçük miktarlarda olmalarına rağmen, toksik etki gösterebilmekte ve kamu sağlığını tehdit edebilmektedir.

Depolama sahalarında bulunan gazlar CH_4 , CO_2 , CO , H_2 , H_2S , NH_3 , N_2 ve O_2 'dir. Depo gazı genellikle % 45-60 oranında metan, CH_4 ve % 40-60 oranında karbondioksit, CO_2 içermektedir. Diğer gazlar depo gazında ço küçük miktarlarda bulunmaktadır. Bu gazların depolama sahasında bulunma oranları ve depo gazı özellikleri tablo 4.2'de belirtilmiştir. [5]

Depo gazının en önemli özelliği metan içeriğinden dolayı enerji değeridir. Ortalama alt kalorifik değer metre küp başına 20.000 kJoule civarında gerçekleşmektedir. Depo gazının diğer özellikleri potansiyel patlayıcılığı, boğuculuğu, zehirliliği ve kötü kokusudur. [15]

Depo gazının patlayıcılığı esas olarak metan içeriğinden kaynaklanmaktadır. Metan renksiz, kokusuz, yanıcı bir gazdır ve birim ağırlığı havadan daha azdır (0,717 metan-1,29 hava). Tablo 4.3'te başlıca depolama sahası gazlarının fiziksel özellikleri verilmiştir.

Hacimce %5-15 metan konsantrasyonları hava ile patlayıcı karışımlar oluşturmaktadır. Metan konsantrasyonu bu kritik seviyeye ulaştığı zaman depo alanında sınırlı miktarda oksijen bulunduğundan dolayı patlama tehlikesi olur. Patlama seviyesindeki metan karışımı; depo dışına göç eden metan gazı ve havanın karışmasıyla oluşur. Bu üst limitin üzerinde metan-hava karışımı alev verildiğinde yanmakta, fakat patlayıcılık göstermemektedir. [15]

Tablo 4.1 Düzenli depolama tesisi dizayn basamakları [14]

1. Katı atık miktarı ve özelliklerinin belirlenmesi
 - a. Mevcut
 - b. Projelendirilmiş
2. Potansiyel sahalara için bilgilerin derlenmesi
 - a. Sınır ve topografik incelemelerin yapılması
 - b. Sahanın ve yanındaki sahanın mevcut durumunu gösteren haritaların hazırlanması
 - Arazi sınırları
 - Topografya ve eğimler
 - Yüzey suyu
 - Islak alanlar
 - Kamu tesisleri
 - Yollar
 - Yapılar
 - Konutlar
 - Alan kullanımı
 - c. Hidrojeolojik bilgilerin derlenmesi ve yerleşim haritasının hazırlanması
 - Topraklar (derinlik, yapı, hacimsel yoğunluk, gözeneklilik, geçirgenlik, nem, kazı kolaylığı, stabilite, pH)
 - Kaya yapısı (derinlik, tip, kırıkların varlığı)
 - Yeraltı suyu (ortalama derinlik, mevsimsel değişim, hidrolik gradyen ve akış yönü, akış hızı, kalite, kullanımı)
 - d. İklimsel verilerin derlenmesi
 - Yağış
 - Buharlaşma
 - Sıcaklık
 - Donma olan günlerin sayısı
 - Rüzgarın yönü
 - e. Kuralların (devlet, yerel) ve dizayn standartlarının tanımlanması
 - Yükleme oranları
 - Örtünün tekrarlanma sıklığı
 - Konutlara, yollara, yüzey suyu ve havaalanına mesafeler
 - Yeraltı suyu kalite standartları
 - Sismik ve fay zonları
 - Yollar
 - İzin başvurularının içerikleri
3. Depolama sahası dizaynı
 - a. Depolama metodu seçiminde dikkate alınanlar
 - Saha topografisi
 - Saha toprak örtüsü
 - Saha kaya yapısı
 - Saha yeraltı suyu
 - b. Dizayn boyutlarının belirtilmesi
 - Hücre genişliği, uzunluğu ve derinliği
 - Hücre konfigürasyonu
 - Depolama derinliği
 - Kaplama kalınlığı
 - Son örtü özellikleri
 - c. İşletme özelliklerinin belirtilmesi
 - Örtünün özellikleri
 - Gerekli ekipmanlar
 - Gerekli personel
4. Dizayn özellikleri
 - a. Sızıntı suyu kontrolü
 - b. Gaz kontrolü
 - c. Yüzey suyu kontrolü
 - d. Giriş yolları
 - e. Özel çalışma alanları
 - f. Özel atığın işlenmesi
 - g. Yapılar
 - h. Yardımcı tesisler
 - i. Sahanın etrafının kapatılması
 - j. Işıklandırma
 - k. Kuyuların izlenmesi
 - l. Peyzaj çalışmaları
5. Dizayn paketinin hazırlanması
 - a. İlk saha planının geliştirilmesi
 - b. Depolama sahası dış hat planlarının geliştirilmesi
 - Kazı planları
 - Ardışık depolama planları
 - Tamamlanmış depolama planları
 - Yangın, koku, gürültü kontrolleri
 - c. Katı atık depolama hacmi, gerekli toprak hacmi ve saha ömrünün hesaplanması
 - d. Aşağıdaki birimlerin belirtildiği son planların hazırlanması
 - Normal dolun alanları
 - Özel çalışma alanları
 - Sızıntı suyu kontrolü
 - Gaz kontrolü
 - Giriş yolları
 - Yapılar
 - Yardımcı tesisler
 - Sahanın etrafının kapatılması
 - Işıklandırma
 - Kuyuların izlenmesi
 - e. Kesit planlarının hazırlanması
 - Sahanın kazılmış kısmı
 - Sahanın diğer kısımları
 - Sahanın faz gelişimi
 - f. İnşaat detaylarının hazırlanması
 - Sızıntı suyu kontrolü
 - Gaz kontrolü
 - Yüzey suyu kontrolü
 - Giriş yolları
 - Yapılar
 - Kuyuların izlenmesi
 - g. Son saha kullanım planının hazırlanması
 - h. Maliyet tahminlerinin yapılması
 - i. Dizayn raporunun hazırlanması
 - j. Çevresel etki değerlendirme raporunun hazırlanması
 - k. Gerekli izinlerin alınması
 - l. İşletmecinin el kitabının hazırlanması

Tablo 4.2 Depo gazında bulunan bileşenler ve depo gazının özellikleri [5]

Bileşen	Yüzde (kuru hacimde)¹
Metan	45-60
Karbon dioksit	40-60
Azot	2-5
Oksijen	0,1-1,0
Sülfür, merkaptan vb.	0-1,0
Amonyak	0,1-1,0
Hidrojen	0-0,2
Karbonmonoksit	0-0,2
Eser bileşenler	0,01-0,6
Özellik	Değer
Sıcaklık (°C)	68-88
Özgül ağırlık	1,02-1,06
Nem muhtevası	Doygun
Isı değeri (kJ/m ³)	14900-20500

¹ Gerçek yüzde dağılımı depolama sahası yaşı ile değişmektedir.

Depo gazındaki diğer önemli bir gaz da renksiz, kokusuz ve yanıcı olmayan karbon dioksittir. CO₂ havadan daha ağırdır. Zehirli olmayan özelliğine karşın karbon dioksit, solunum sisteminde oksijenin yerini alarak hayat için tehlikeli özellik göstermektedir.

Hidrojen, H₂, organik maddenin biyolojik ayrışmasının ilk aşamalarında oluşmaktadır. Hidrojen en hafif gazdır ve atmosfere doğru yükselme eğilimindedir. Yüksek miktarda yanıcıdır ve havada hacimce %4-7 oranında patlayıcılık aralığına sahiptir.

Azot ve oksijen, depo gazında ancak atmosferik havanın girişiyle bulunmaktadır. Azot inert bir madde olup metanın yanıcılığı üzerindeki etkisinden dolayı önem taşımaktadır. Hidrojen sülfür, H₂S, yüksek miktarda zehirli ve yanıcıdır ve keskin bir kokuya sahiptir. Karbon monoksit renksiz, kokusuz ve yüksek zehirliliğe sahip bir gazdır. Depo gazındaki oranı ise yaklaşık hacimce %0,001 kadardır.

Tablo 4.3 Depo gazı bileşenlerinin fiziksel özellikleri [15]

Gaz	Formül	Birim ağırlık	Kritik sıcaklık	Havadaki Tutuşma aralığı alt/üst	Yanma hızı	Minimum tutuşma enerjisi	Tutuşma sıcaklığı	Su çözünürlüğü	Özellikler
		(kg/m ³)	(°C)	(hac.%)	(m/s)	(MJ)	(°C)	(g/l)	
Metan	CH ₄	0,717	-82,5	5/15	0,4	0,6-0,7	600	0,0645	Kokusuz, renksiz,zehirsiz
Karbon Dioksit	CO ₂	1,977	31,1	-	-	-	-	1,688	Kokusuz, renksiz,düşük kons.zehirsiz
Oksijen	O ₂	1,429	-118,8	-	-	-	-	0,043	Kokusuz, renksiz,zehirsiz
Azot	N ₂	1,25	-147,1	-	-	-	-	0,019	Kokusuz, renksiz,zehirsiz yanıcı değil
Karbon Monoksit	CO	1,25	-139	12,5/74	0,5	-	600	0,028	Kokusuz, renksiz,zehirli,
Hidrojen	H ₂	0,09	-239,9	4/74	2,8	0,05	560	0,001	Kokusuz, renksiz,zehirli değil,yanıcı
Hidrojen Sülfür	H ₂ S	1,539	100,4	4,3/45,5	-	-	-	3,846	Renksiz,zehirli
Hava		1,29	-	-	-	-	-	-	Kokusuz, renksiz,zehirli değil,yanıcı değil

Yaklaşık metre küp başına 30 mg amonyak konsantrasyonları depo gazında bulunmaktadır. Metaller de depo gazında buhar basınçları ve sıcaklıktan dolayı bulunabilmektedirler. Yüksek konsantrasyonlarda bulunan tek bileşik yüksek buhar basıncından dolayı cıva, Hg'dir. Metre küp başına 370 µg cıvanın rastlandığı depolama sahaları bulunmuştur. [15]

Eser depo gazı bileşenlerinin büyük bir çoğunluğu uçucu organik (VOC_s) bileşikler sınıfına girer. Eser gazların sızıntı suyunda mevcut olması sızıntı suyu ile temas halinde bulunan gaz konsantrasyonuna bağlıdır. Eser bileşenler depolama sahasına gelen atıklarla girer veya saha içinde gerçekleşen reaksiyonlarla üretilir. Depo gazının içinde bulunan eser gazlar sıvı formda gelen atıklarla karışıktır ancak bunlar uçucu olmaya meyillidirler. [5]

Yüksek miktarlarda VOC (uçucu organik karbon) mevcudiyeti, özellikle VOC içeren endüstriyel ve ticari atık kabul etmiş yaşlı depolama sahalarında gözlenmiştir. Tehlikeli atık bertarafının yasaklandığı yeni düzenli depolama sahalarında VOC konsantrasyonları çok düşüktür. [5]

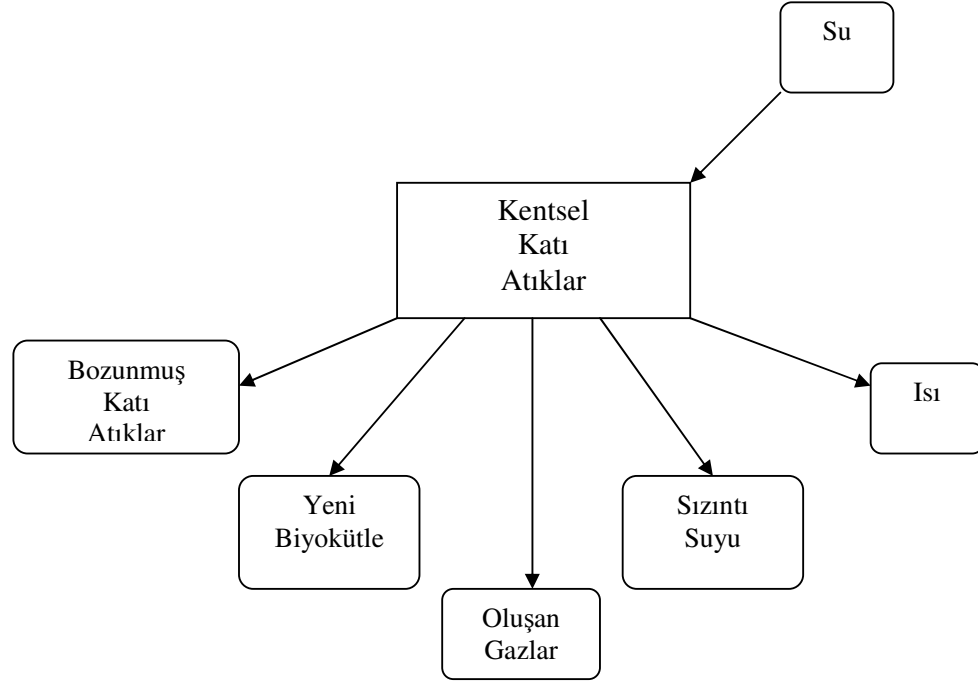
4.3.2 Depo gazı oluşumu

Depolama sahasında gerçekleşen kentsel katı atıkların bozunması karmaşık bir prosestir. Bozunma fiziksel, kimyasal ve biyolojik proseslerin bir kombinasyonudur. Fiziksel bozunma sızıntı suyunun atıktan süzülmesi ve böylece atığın fiziksel özelliklerinde değişikliklerin meydana gelmesi şeklinde düşünülebilir. Kimyasal bozunma materyallerin sızıntı suyunda çözünmesidir. Kimyasal prosesler hidroliz, çözünme/çökme, adsorpsiyon/desorpsiyon ve iyon değişimi reaksiyonlarından oluşur. Biyolojik bozunma depolama sahasında atığın bozunmasının ana mekanizmasıdır. Biyolojik bozunma pH, redoks potansiyeli gibi değişkenleri etkilediğinden aynı zamanda kimyasal ve fiziksel bozunmayı da kontrol eder. Atığın fiziksel ve kimyasal bozunması depolama sahası stabilitesi için önemli olmasına rağmen, biyolojik bozunma en önemli prosestir. Biyolojik bozunma metan gazı üretilen tek prosestir. Biyolojik bozunma doğal olarak varolan bakteriler sayesinde gerçekleşir ve oldukça kompleks bir prosestir. Fiziksel, kimyasal ve biyolojik bozunma prosesleri sonucu oluşan ürünler şekil 4.3'te gösterilmiştir. [5]

Biyolojik dönüşümler aerobik ve anaerobik bozunma olarak ikiye ayrılır. Atıkların biyolojik bozunmasının dört veya beş fazda gerçekleştiği düşünülmektedir. Beş fazla dört faz arasındaki fark, beş fazda anaerobik asit oluşum fazı geçiş fazı ve asit fazı olarak ayrılmasıdır. Burada biyolojik bozunma beş faz olarak değerlendirilmiştir.

1. faz aerobik bozunma fazıdır, 2. faz geçiş fazıdır, diğer fazlar anaerobiktir ve sırasıyla asit oluşum fazı, metan oluşma fazı ve olgunluk fazı olarak adlandırılırlar. [5, 15]

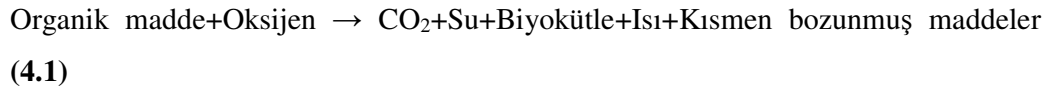
Atıkların ayrışmasını sağlayan aerobik ve anaerobik olan organizmaların esas kaynağı günlük olarak atıkların üzerine dökülen nihai toprak örtüsüdür. Bu organizmaların diğer kaynakları çürütülmüş atık su arıtma tesisi çamurları ve geri devrettirilen sızıntı sularıdır. [5]



Şekil 4.3 Katı atıkların bozunması sonucu oluşan ürünler [5]

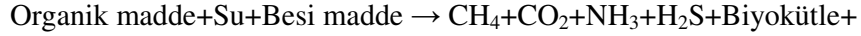
Faz 1 (Aerobik bozunma) :Depolama sahasındaki biyolojik dönüşümler aerobik bozunma ile başlar. Aerobik prosesler oksijen varlığında gerçekleşir. Bu yüzden aerobik bozunma atık sahaya ilk döküldüğünde, henüz oksijen mevcutken gerçekleşir. Depolama sahasındaki oksijen miktarı, proses için gerekli oksijen miktarından az olduğu zaman aerobik ayrışma duracaktır, aerobik proses sahanın üstü kapatılana kadar devam eder. [5, 16]

Bozunmanın birinci basamağı esnasında, aerobik mikroorganizmalar organik maddeleri CO₂, su, kısmen ayrılmış organiklere ve ısıya dönüştürürler. Aerobik bozunma aşağıdaki denklemle gösterilebilir:



Mikrobiyal aktivitelerin yürütülmesi için karbon kaynağını oluşturan çözünmüş şekerler mikroorganizmalar tarafından kullanılırken oksijen tüketilmektedir. Aerobik bakteriler %90 oranında CO₂ üretirler ve sıcaklık 70 dereceye yükselir. Atığın aerobik ayrışması esnasında çıkan kokunun sebebi organik esterlerdir. [10]

Anaerobik bozunma: Aerobik bozunmayı anaerobik bozunma takip eder. Katı atıkların anaerobik ayrışması genel olarak aşağıdaki denklemle açıklanabilir:



Kısmen bozunmuş maddeler + Isı (4.2)

1. fazdan sonra aerobik dönüşümden anaerobik dönüşüme geçilen 2. faz meydana gelir. Daha sonraki fazlar anaerobik dönüşüm fazlarıdır. Anaerobik dönüşüm 3 alt faza ayrılabilir. Bunlar:

- Asit oluşma fazı
- Metan oluşma fazı
- Olgunluk fazı' dır. [16]

Faz 2 (Geçiş fazı) : Geçiş fazında oksijen tüketilir ve anaerobik şartlar oluşmaya başlar. Depolama sahası anaerobik olduğundan biyolojik dönüşüm reaksiyonlarında elektron alıcısı olan nitrat ve sülfat, azot gazına ve hidrojen sülfüre indirgenir. Anaerobik şartların başlangıcı atıkların oksidasyon-redüksiyon potansiyeli ölçülerek izlenebilir. Oluşan sızıntı suyunun pH'ı organik asitlerin mevcudiyeti ve karbondioksitin artmasının etkisi ile düşer. [5]

Faz 3 (Asit oluşma fazı) : İkinci faz esnasında başlayan mikroorganizma aktivitesi bu fazda hızlanmaktadır. Bu fazda hidrolize olmuş organik bileşikler H_2 , CO_2 ve yağ asitlerine dönüşürler. Bu fazı yürüten bakteriler asit oluşturan bakteriler veya asetojenler olarak adlandırılmaktadır. Bu faz aşamasında sızıntı suyu olduğu takdirde ortamda organik asit ve CO_2 bulunması nedeniyle sızıntı suyunun pH'ı 5' in altına düşebilmektedir. Bu fazda birçok önemli nutrientler sızıntı suyuyla çıkar, eğer sızıntı suyu geri devredilmez ise sistemden gerekli nutrientler kaybedilecektir. Eğer sülfat mevcutsa H_2S oluşur. [5]

Faz 4 (Metan oluşum fazı) : Metan oluşum fazında bir önceki fazda oluşan asetik asit ve hidrojen gazı metan bakterileri tarafından CH_4 ve CO_2 ' ye dönüştürülmektedir. Bu dönüşümü gerçekleştiren mikroorganizmalar metanojenler olarak adlandırılan anaerobik bakterilerdir. Bu fazda hem asit hem de CH_4 üretimi birlikte ve birbirini takip ederek gerçekleşmektedir. Ancak bununla beraber asit üretim hızı önemli miktarda düşmektedir. Bu fazda asitler ve hidrojen gazı, CH_4 ve CO_2 ' ye dönüştürülmelerinden dolayı depo alanındaki pH 6,8-8 değerlerinin üstüne

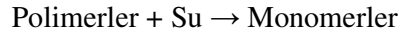
çıkılmaktadır. Oluşan CH_4 ve CO_2 miktarları zamanla arttığı için başlangıçta bu faz stabil olmayan faz olarak da adlandırılabilir. [5, 16]

Faz 5 (Olgunluk fazı) : Olgunluk fazı metan oluşum fazı esnasında ortamda bulunan kolay ayrışabilen organik maddeler, CH_4 ve CO_2 ' ye dönüştürüldükten sonra başlamaktadır. Atık içerisinde nemin hareket etmesi, önceki fazlar esnasında nutrientlerin sızıntı suyu ile ortamdan ayrılması ve depo alanında yavaş ayrışan substratların bulunması nedeniyle depo gazı üretimi bu fazda oldukça azalmaktadır. Bu fazda yavaş yavaş gelişen gazlar CH_4 ve CO_2 ' dir. Az miktarlarda azot ve oksijen de bulunabilir. [5] Anaerobik ayrışma reaksiyonları şunlardır:

1. Sulandırma



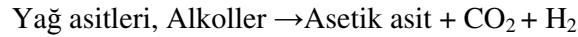
2. Hidroliz



3. Fermantasyon



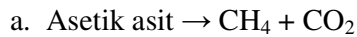
4. Asit Oluşma Fazı



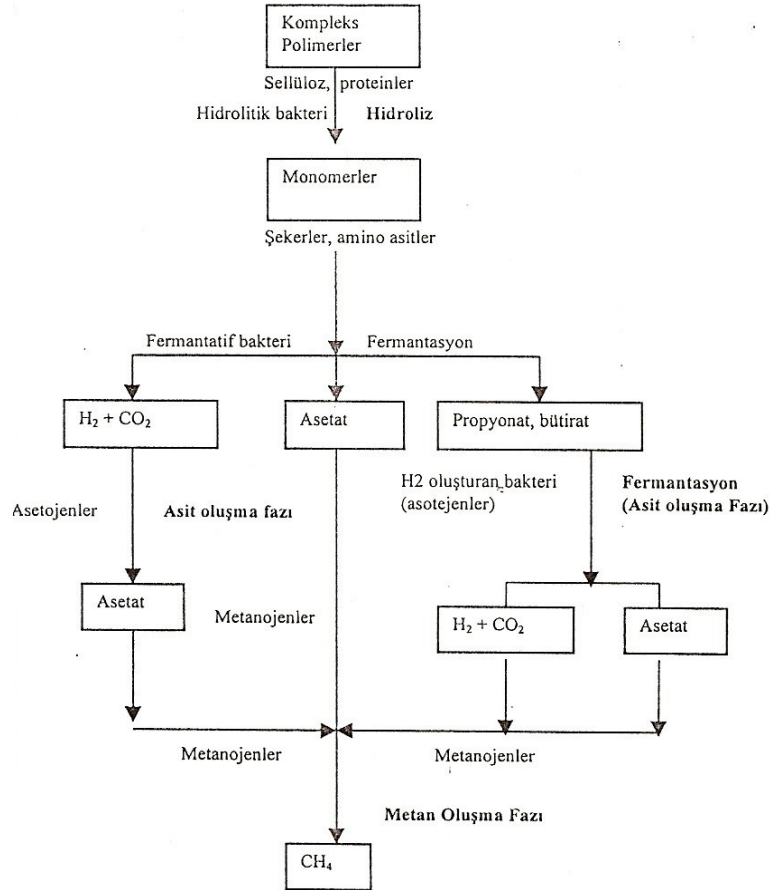
4a sülfat redüksiyonu



5. Metan Oluşma Fazı



Şekil 4.4'te ise anaerobik ayrışma prosesleri ve karbonhidratların ara ürün olan yağ asitlerine ve H_2 'ye ve son ürünler CH_4 ve CO_2 'ye ayrışmaları adım adım gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Anaerobik ayrışma prosesleri [10]

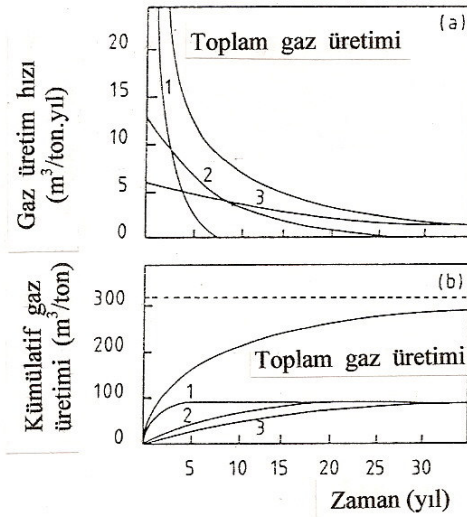
4.3.3 Gaz oluşumunun zamanla değişimi

Atıkların farklı türleri ve işlem tarzı gibi sebepler gaz oluşumunun başlangıcı ve üretim süresinin belirlenmesinde zorluk yaratmaktadır. Mikroorganizmaların faaliyetleri sonucu, kentsel katı atıkların organik fraksiyonu oksijen varolduğu süreçte aerobik olarak, daha sonra anaerobik olarak ayrışır ve başlıca CO₂ ve CH₄' ten oluşan bir gaz açığa çıkar. Fermantasyon sonlandığında, kalan atık çok yavaş ayrışabilen atıktır. Organik maddeler hızlı ve yavaş ayrışabilenler olarak iki gruba ayrılır. Yiyecek atıkları, kağıt, gazete, bahçe atıkları hızlı ayrışabilen, deri, tahta, tekstil, plastik atıklar yavaş ayrışabilen atıklar olarak kabul edilir. Tablo 4.5'te organik maddelerin ayrışma dereceleri görülmektedir. Artık organik madde stabilize olmuştur. Optimum şartlar altında stabilite 10-20 yıl sürer.

Tablo 4.4 Organik maddelerin ayrışabilirlik dereceleri [15]

Atık tipi	Ayrışma derecesi	Ayrışma yarı ömrü (yıl)
Yiyecek	Hızlı	1
Bahçe	Orta	5
Kağıt,karton,tekstil,tahta	Yavaş	15
Plastik,deri,kauçuk,toprak	Ayrışmıyor	∞

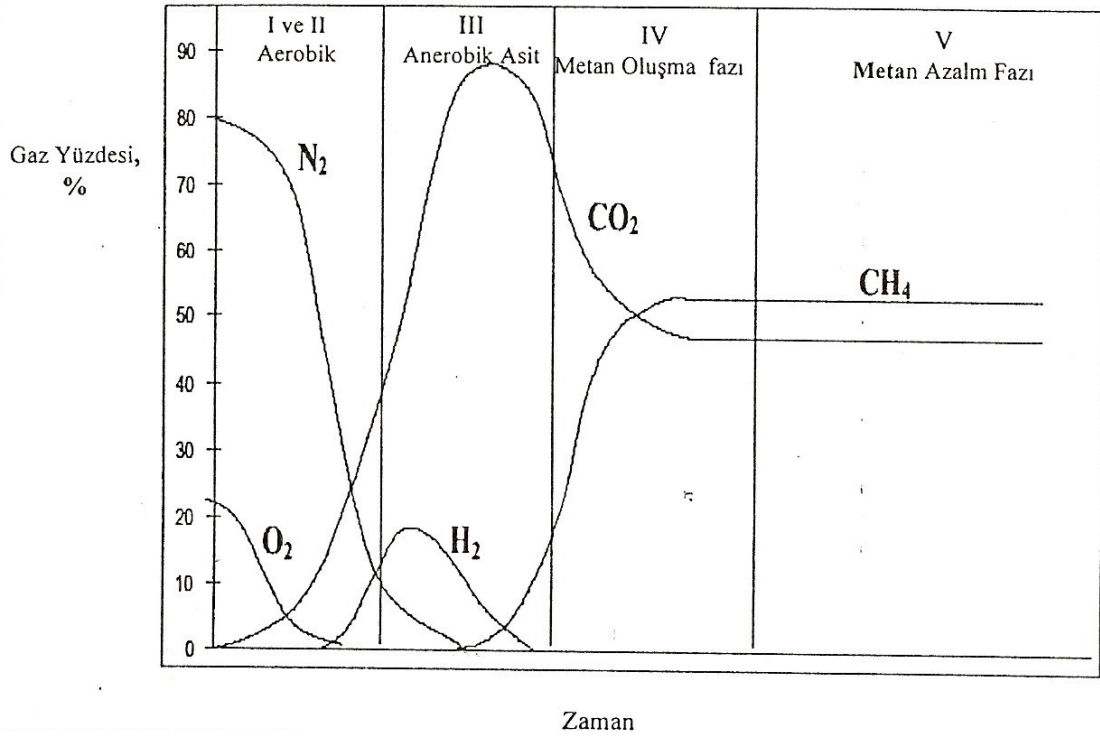
Depolama sahası yaşlandıkça zaman içerisinde gaz oluşum hızı kademeli olarak düşer. Depo gazının oluşum hızı birçok faktöre bağlıdır. Bunlar çöpün bileşimi, yaşı, su muhtevası, pH, mevcut mikrobiyal populasyon, sıcaklık, oksidasyon-redüksiyon potansiyeli, çöpün partikül boyutu, yoğunluğu, nutrientlerin miktarı ve kalitesidir. Kümülatif gaz üretimi ise pik noktaya ulaştıktan sonra stabil hale gelir. Şekil 4.5'te atıkların ayrışabilirlik derecelerine göre toplam gaz üretim hızı ve kümülatif gaz miktarları belirtilmiştir.



Şekil 4.5 (a) Gaz üretim hızı ve (b) kümülatif gaz üretimi [15]

1. Kolay ayrışabilir atık 2. Orta derecede ayrışabilir atık 3. Yavaş ayrışabilir atık

Atığın depolanmasından 3 ila 12 ay içerisinde metan gelişmesi beklenebilmektedir. Metan konsantrasyonu yavaş artacak ve maksimum değere ulaşacaktır. Fazlara göre depo gazı oluşum eğrileri şekil 4.6' da gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Depo gazı oluşum eğrileri [17]

4.3.4 Depo gazı hesaplama yöntemleri

Oluşan depo gazı miktarı sahadan sahaya farklılık gösterir. Çünkü metanojen faaliyet birçok çevresel faktöre göre değişir. Teorik olarak 1 ton çöpün ayrışması neticesinde % 55 metan içeren ve 19750 kJ/m^3 düşük kalorifik değere sahip 400 m^3 depo gazı oluşur. [18]

Bir depolama sahası için depo gazı geri kazanım projesi yapmadan önce mevcut ve gelecekteki potansiyel depo gazının miktarı bilinmelidir. Toplanan gazın miktarı, dökülen atık miktarı, bu atıkların özellikleri, tesis ve toplama sisteminin tasarımı gibi birçok faktöre bağlıdır. [18]

Mevcut ve gelecekte oluşabilecek gaz miktarını belirlemek için dört yol mevcuttur. Mevcut gaz üretimini hesaplamak için en güvenilir metot atık için test kuyuları açmaktır. Diğer metotlar da kabaca tahmin, substratların ayrışma denklemi ile hesap ve model hesaplamalarıdır.

Metot 1: Test Kuyuları

Gaz miktarının belirlenmesindeki en güvenilir metot, test kuyuları açmak ve bu kuyularda toplanan gazı ölçmektir. Bu yöntem çok pahalıdır ve ancak depo alanında

büyük miktarlarda gaz üretilmesi için yeterince atık bulunması halinde bu yöntemle başvurulur. Test kuyuları, güvenilir sonuçlar elde etmek için depo alanındaki atık homojenliğine ve saha büyüklüğüne göre sahayı temsil edici bölgelerde uygun sayıda açılmalıdır. [18]

Gelişmekte olan ülkelerde, test kuyuları ile oluşan gazın miktarını belirlerken, test kuyularında toplanan gaz miktarının sadece yarısı dikkate alınır. Bunun sebebi atıkların sahada gevşek bir biçimde sıkışmış olması veya homojen olarak dağılmamış olmasıdır. Ayrıca gaz yayılması çok yaygın bir problemdir ve yanlış tahminlere sebep olmaktadır. Elde edilen değerin yarısını dikkate almak gaz geri kazanım sisteminin büyüklüğünü belirlemede daha gerçekçi bir değer elde edilmesini sağlar.

Bu metodun önemli bir faydası da toplanan gazın miktarıyla birlikte kalitesinin de ölçülebilir olmasıdır. Gaz içindeki metan, hidrokarbon, sülfür, partikül ve azot miktarları da analiz edilmelidir. Bu analiz, gaz geri kazanım sisteminin dizaynı için çok önemlidir.

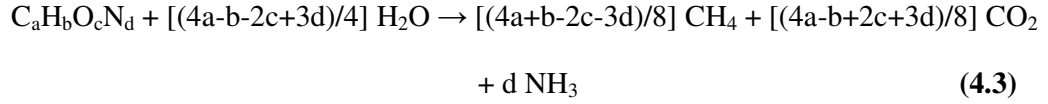
Metot 2: Yaklaşık Tahmin

Bir depolama sahasında oluşacak gaz miktarının tahminindeki en basit metot depolama sahasındaki her bir ton atığın yılda 6 m^3 gaz oluşturacağı kabulüdür. Bu tahmini değer işletilmekte olan birçok depo alanından elde edilmiştir ve enerji geri kazanım projesini destekleyecek ortalama bir depolama sahasını yansıtmaktadır. Ancak bu yaklaşım atık, iklim ve depolama sahasına özgü diğer özellikleri hesaba katmamaktadır.

Bu kaba yaklaşım depolama sahasında ne kadar atığın bulunduğu bilinmesini gerekli kılmaktadır. Atıklar ideal olarak 10 yıldan genç olmalıdırlar. Sahaya bağlı olarak gaz oluşumu 5-15 yıl sürebilir. Bu yöntemden elde edilen sonuçlar $\pm \%50$ oranında değişir. [18]

Metot 3: Sübstratların Ayrışma Denklemi ile Hesaplama

Bu yöntemde atıkta bulunan (plastikler hariç) her organik madde $\text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c\text{N}_d$ formunda genel bir formülle gösterilerek, aşağıdaki eşitlik yardımıyla toplam gaz hacmi tahmin edilir. Bu denklemde ayrışabilir organik atığın tümünün CO_2 , CH_4 ve NH_3 ' e dönüştüğü kabul edilir.



Atığın $C_aH_bO_cN_d$ şeklinde genel bir formülle ifade edilebilmesi için depolama sahasındaki atık bileşimi ve her bileşenin elemental analizi (C,H,O,N,S,kül içerikleri) bilinmelidir.Bu yaklaşımla elde edilen sonuç optimum şartlar altında atıkların organik fraksiyonlarının ayrışabilir kısımlarının bozunmasıyla oluşacak maksimum gaz miktarıdır. Organik atıkların tümü ayrışmadığı için gerçek değer elde edilen değerden daha düşüktür. [5]

Metot 4: Matematiksel Modeller Yardımıyla Hesap

Test kuyuları belirli zamanlarda sahadaki gaz üretim hızlarına dair gerçek veriler sağlamlasına karşılık, matematiksel model hesapları sahadaki depolama esnasında ve kapatılmasından sonra gaz üretimine ilişkin veriler ortaya koymaktadır. Bu modeller tipik olarak depolama zamanı, depolanan atığın miktarı ve atıkların özellikleri gibi verilere ihtiyaç göstermektedir. Katı atık depo sahalarında oluşan gazın belirlenmesiyle ilgili birçok model geliştirilmiştir. Bu modellerden üçü aşağıda açıklanmıştır.

Tabasaran/Rettenberger Modeli: Gaz üretiminin hesabı için Tabasaran/Rettenberger tarafından geliştirilen matematik model kullanılmaktadır. Model denklemi aşağıda gösterilmiştir. Bu bağıntı kümülatif bir artış göstermektedir.

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

G_t : t zamanına kadar üretilen gaz miktarı (m^3/ton)

G_{org} : Organik karbon içeriği (kg/ton atık)

T : Sıcaklık (C)

t : Zaman (yıl)

k : Ayrışma sabiti ($yıl^{-1}$)

Modelin uygulanmasında en önemli husus parametrelerin seçimidir. G_{org} değeri evsel katı atıklar için 170-200 kg/t arasında değişmektedir. Sıcaklık depo gövdesinde çoğunlukla 25-35 C arasındadır. Üstü örtülmemiş sahalarda bu sıcaklığın üzerine çıkıldığı tespit edilmiştir. k değeri %75 organik madde indirgenmesi ve 12-24 yıl

dolgu süresi için 0,025-0,05 arasında seçilmektedir. Almanya'daki depolama sahalarında yapılan ölçümler sonucu bu değer 0,035-0,04 olarak verilmektedir.[2,10]

LandGEM (Landfill Gas Emission Model) Modeli: Depo gazı emisyonları modeli depolama sahalarından kaynaklanan metan, karbondioksit ve düşük konsantrasyonlarda bulunan diğer hava kirleticilerin emisyonlarının miktarını belirlemek için tasarlanmıştır. Depolama sahasından kaynaklanan emisyonların tahmin edilebilmesi için aşağıdaki bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır.

- Depolama sahası kapasitesi
- Depolanan yıllık atık miktarı veya depo alanında bulunan toplam atık miktarı
- Metan üretim hızı (k)
- Potansiyel metan üretim kapasitesi (L_0)
- Depolama sahasının açıldığı yıl
- Depolama sahasının tehlikeli atık bertarafı için de kullanılıp kullanılmadığı

Modelde depo gazı oluşma hızı birinci derece bozunma denklemine dayanmaktadır. Depolama sahalarındaki atığın miktarı, yaşı ve bileşimine ait mevcut verilerin yetersizliğinden dolayı daha karmaşık bir yöntem kullanılmamıştır. Modelde kullanılan denklem aşağıdaki gibidir.

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

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

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

R : Depolanan yıllık atık miktarı ($ton/yıl$)

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

c : Saha kapatıldıktan sonraki yıl sayısı (yıl)

t : İlk atık depolanmaya başlamasından sonra geçen süre (yıl)

Model, CO_2 ve CH_4 emisyonlarının aynı oranda olduğunu kabul etmektedir, yani depo gazı miktarının metan emisyonunun iki katı olduğu varsayılmaktadır. Depolama sahasından kaynaklanan metan k ve L_0 ' ın fonksiyonudur. k değeri atığın nem içeriği, nutrient içeriği, pH değeri ve sıcaklığın bir fonksiyonudur. L_0 değeri ise depolama sahasında bulunan atığın tipine bağlıdır. Atığın selüloz içeriği arttıkça, L_0 değeri de artmaktadır. Modelde sahaya özgü bir k ve L_0 değeri girilemiyorsa, modelde hazır olarak verilen iki set değer mevcuttur. Bunlar CAA ve AP-42

değerleridir. CAA değerleri depolama sahası emisyonları için Clean Air Act (CAA) yönetmeliklerinin uygulanabilirliği esasına dayanmaktadır. AP-42 değerleri ise EPA'nın Compilation of Air Emission Factors' dan alınmış değerlere dayanmaktadır. k değerleri için bir kuraklık kriteri mevcuttur. k değerleri yılda 640 mm'den daha az yağış alan bölgeler için farklılık gösterir. CAA ve AP-42 değerleri tablo 4.6 da gösterilmiştir. [2,10,19]

Tablo 4.5 EPA modeli parametreleri [2]

Parametre	CAA		AP-42	
	P>640 mm	P<640mm	P>640 mm	P<640mm
k (1/yıl)	0,05	0,02	0,04	0,02
L ₀ (m ³ /ton)	170	170	100	100

Multi-Phase Modeli: Depo gazı oluşumunun tahmin edilmesi için kullanılan modellerden biri de multi-phase modelidir. Model katı atıkların büyük bir kısmının düzenli depolama metodu ile bertaraf edilen Hollanda'da geliştirilmiştir. Model, atık içindeki biyolojik ayrışabilen organik karbon oranı ve kümülatif atık miktarını esas almaktadır. [20] Modelin matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$\alpha_t = \zeta \sum 1,87 \cdot A \cdot C_{0,i} \cdot k_{t,i} \cdot e^{-k_{t,i} \cdot t}$$

A : Kümülatif atık miktarı (ton)

α_t : Depo gazı oluşum miktarı (m³/yıl)

ζ : Üretim faktörü

$k_{t,i}$: Model değişkenleri

$C_{0,i}$: Yavaş, orta ve hızlı ayrışan organik karbon miktarları (kg C/ ton katı atık)

t : Atık dökümünün başlamasından itibaren geçen süre (yıl)

Hollanda'da yapılan çalışmalar sonucu bulunan optimum model değişkenleri şu şekildedir:

ζ : 0,58

$k_{t,i}$: 0,185 yıl⁻¹

$k_{t,i}$: 0,100 yıl⁻¹

$k_{t,i}$: 0.030 yıl⁻¹

4.4 Depo Gazının Kontrolü

Depo gazının hareketi atmosferik emisyonları azaltmak, açığa çıkan koku emisyonlarını minimuma indirmek, yüzey altına gaz göçünü asgariye indirmek ve metandan enerji elde edebilmek için kontrol edilir. Kontrol sistemleri pasif ve aktif olarak sınıflandırılabilir. Aktif sistemlerde, gaz blover yardımıyla çekilir. Pasif gaz kontrol sistemlerinde ise depo gazının difüzyonla hareket etmesi kontrol edilir. Aktif toplama ile depo gazı daha verimli şekilde toplanabilir. Pasif kontrol maliyet açısından daha avantajlıdır.

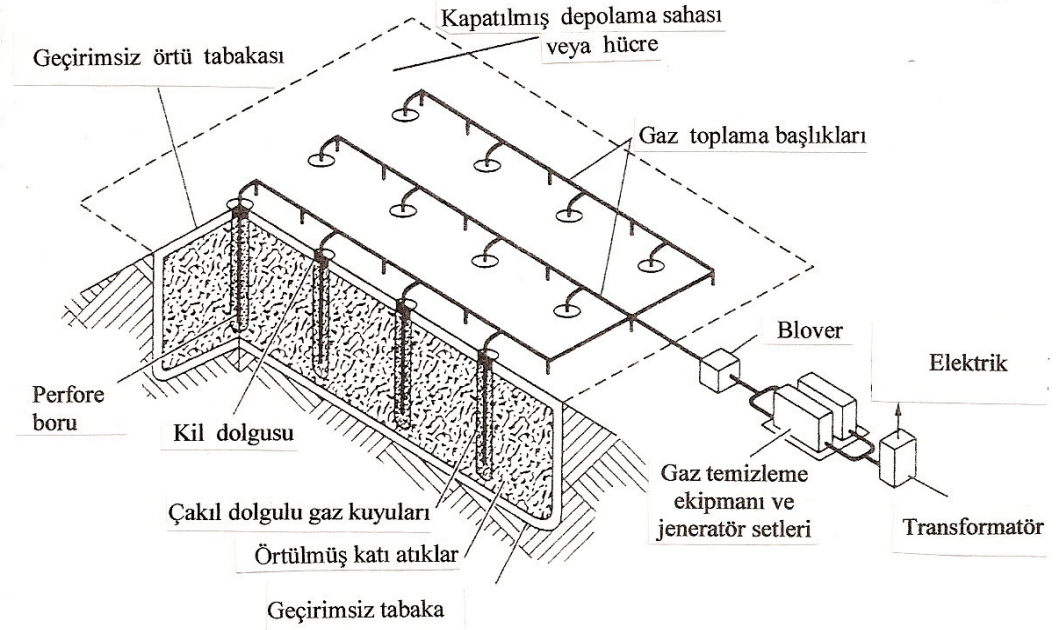
4.4.1 Pasif gaz kontrol sistemleri

Pasif hava menfezleri bazen depo gazı göçünü kontrol etmek için kullanılır. Pasif sistemler depo gazını atmosfere vermek için doğal basınç ve konveksiyon mekanizmalarını kullanırlar. [14]

Menfezlerin dışında çevre hendekleri, saha çevresi gaz çekme hendekleri ve saha çevresi hava enjeksiyon kuyuları da pasif gaz kontrol elemanları olarak kullanılmaktadır. Yapılan araştırmalar ve sahaların gözlemlenmesi sonucu elde edilen veriler pasif sistemlerin sadece sınırlı bir koruma sağladığını ortaya koymuştur. Metanın binalarda birikerek önemli bir risk oluşturacağı alanlarda, pasif sistemler koruma açısından yeterli olmayabilirler. Depolama sahalarında önceden tahmin edilemeyen gaz hareketi nedeniyle modern depolama sahalarında pasif sistemlerin kullanımı tercih edilmemektedir. Aktif sistemler daha yaygın olarak kullanılmaktadırlar. [5, 14]

4.4.2 Aktif gaz kontrol sistemleri

Aktif gaz toplama sistemleri depo gazını depolama sahasından veya etraftaki topraktan bir vakum pompası yardımıyla uzaklaştırır. Bu sistemler gaz göçünün kontrolünü ve enerji amaçlı kullanımı için metanın geri kazanımını sağlar. Her iki durumda da gaz geri kazanım kuyuları ve vakum pompaları kullanılır. Kuyuların ve blover ekipmanının bağlantısını sağlayan bir boru ağı inşa edilir. Şekil 4.7' de bir depo alanında düşey kuyular kullanılan bir gaz geri kazanım sistemi görülmektedir. [5]



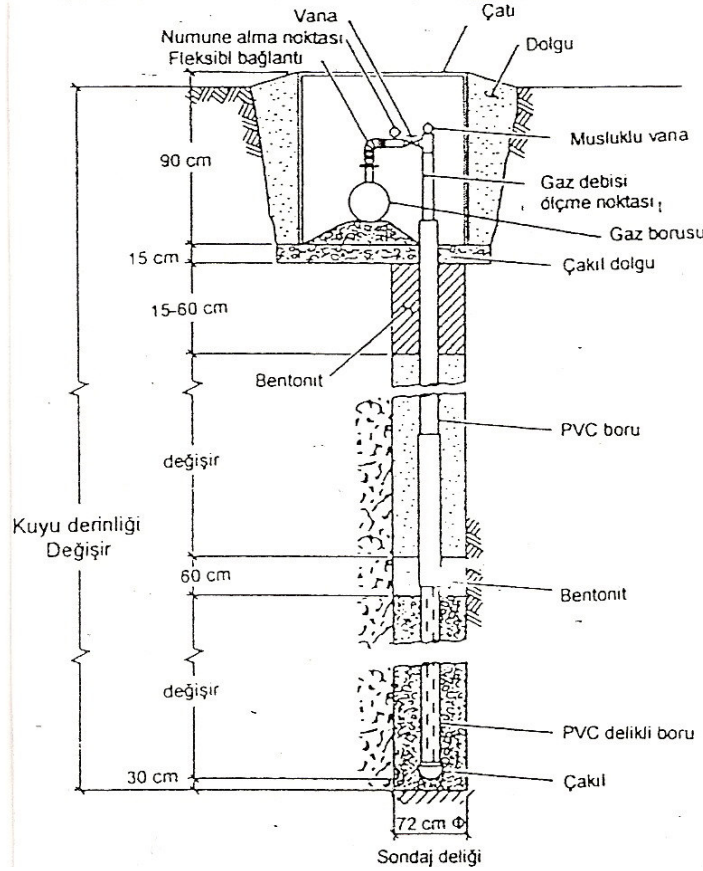
Şekil 4.7 Düşey kuyular kullanılan gaz geri kazanım sistemi [5]

Aktif gaz toplama sistemi aşağıdaki birimlerden ibarettir:

- Gaz çıkarma kuyuları: Bunlar depo gazının toplanması için dikey veya yatay şekilde depolama gövdesine yerleştirilir.
- Gaz toplama noktası: Toplanan tüm gaz buraya getirilip birleştirilir. Toplama noktası bir tank veya bir boru olabilir. Gaz kuyularında biriken damıtma suyunun çökebilmesi için, gaz toplama noktasının kotu tercihen daha aşağıda olmalıdır. Gaz toplama noktası, ölçüm ve ayarlama ekipmanlarıyla donatılmalıdır.
- Su ayırıcısı: Damıtma suyu sıyrıcı veya soğutma tertibatıyla gaz debisinden ayrıştırılır, sonra pompa vasıtasıyla arıtma tesisine gönderilir.
- Gaz çekme borusu: Gaz toplama noktası ve fan arasındaki boru hattıdır.
- Fan ve basınç ayarı: Fan, gazı depolama gövdesinden çekmek için eksi basınç, alevlendirme veya yakma ünitesine göndermek için artı basınç üretir. Basınç ayarı, eksi ve artı basınçları optimum seviyede tutar. Gaz çekimi için gerekli olan basınçlar, 200-300 mbar mertebesinde.
- Fan kulübesi: Küçük depolama sahalarında fan bir konteynir içinde ya da çatı altında durabilir. Büyük sahalarda, fan genellikle yakma ünitesinin bulunduğu binada bulundurulur.

- Yakma ünitesi: Yakma enerji üretim birimi ve yan ekipmanlarından (gaz temizleme birimi, gaz ayırma birimi, şalter dolapları) oluşur. [12]

Aktif gaz toplama sistemlerinin temel elemanı gaz çıkarma kuyularıdır. Yatay ve düşey gaz çıkarma kuyuları mevcuttur. Fiziksel yapıları çok farklı olmakla birlikte işlevleri aynıdır. Gaz depo etrafı çakıl kaplı delikli boru boyunca düşey/yatay borulara pompalanarak emme basıncı sağlanır. Kuyular etki yarıçapları kesişecek şekilde dizilirler. Düşey gaz çıkarma kuyuları bitmiş depo alanlarına veya depo alanlarının tamamlanmış kısımlarına yerleştirilirler. Borunun alt kısmının üçte biri deliklidir ve çakıl dolgu tabakasına oturmuştur. Kalan kısmı delikli değildir ve toprak içindedir, kil tabakası ile kaplıdır. Şekil 4.8’de bir gaz çekme kuyusunun detayları görülmektedir. [5,12]



Şekil 4.8 Dikey bir gaz çekme kuyusu [5]

Depo gazı elektrik üretimi için kullanılmadığı durumlarda, alev sistemlerinde yakılarak tasfiye edilir. Yakmada, kokulu gazlar da imha edilmiş olur. Depo gazının yakılması için özel gaz yakıcılar geliştirilmiştir. Bu gaz yakıcılarında depo gazı hava

ilavesiyle yakılır. Depo gazı yakıcıları otomatik çakmak, alev ve sıcaklık kontrol sistemi, otomatik kapatma valfi ve hava ayarlama sistemiyle donatılmalıdır. Konvansiyonel gaz yakıcılarda depo gazı yaklaşık 1000°C sıcaklıkta yakılır. Yüksek sıcaklıklardaki gaz yakıcılarda ise 1200°C' ye varan sıcaklıklara çıkılabilmektedir. Yüksek sıcaklıklı yakıcılarda, yakma sırasındaki dioksin oluşumu kısmen engellenebilir. Ancak bunların yatırım ve işletme giderleri konvansiyonel gaz yakıcılara göre daha yüksektir. [12]

4.5. Depo Gazının Enerji Amaçlı Kullanımı

4.5.1 Giriş

Tipik olarak depo gazı ya yakılır ya da elektrik enerjisi üretmek için kullanılır. Son zamanlarda depo gazının saflaştırılarak kullanılması ısı ve elektrik üretimine karşı bir alternatif olarak önerilmektedir.

Depo gazından enerji geri kazanımı için dört ana yol mevcuttur. Bunlar; direkt ısıtma, elektrik üretimi, kimyasal besleme stoğu ve boru hattı kalitesinde gaza saflaştırmadır. Her bir metot çeşitli depo gazı uygulamalarına sahiptir. Metotlar ve uygulama teknolojileri şu şekildedir.

- 1) Direkt ısıtma uygulamaları
 - Endüstriyel kazanlar için kullanımı
 - Ortam ısıtma ve soğutma
 - Endüstriyel ısıtma/ortak yakma
- 2) Elektrik üretimi uygulamaları
 - İçten yanmalı motorlarda kullanımı
 - Gaz türbinlerinde kullanımı
 - Buhar türbinlerinde kullanımı
 - Kojenerasyon uygulamaları
 - Mikro türbinlerde kullanımı
 - Yakıt pillerinde kullanımı
- 3) Boru hattı kalitesinde gaza saflaştırma
 - Taşıt yakıtı olarak kullanımı
 - Yerel doğalgaz şebekesine enjeksiyon

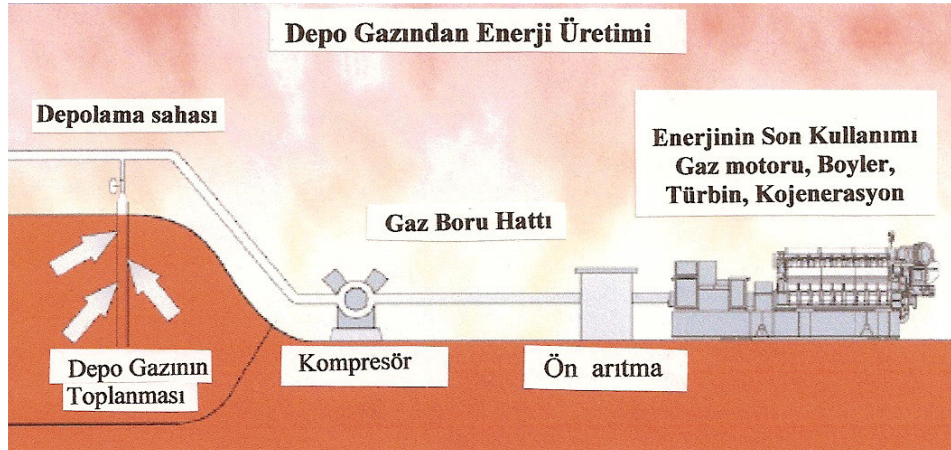
- 4) Kimyasal üretim proseslerinde besleme stoğu olarak
Metanole dönüşüm
Dizel yakıtı dönüşüm

4.5.2. Direkt ısıtma uygulamaları

Direkt yakma depo gazının kullanımında en basit ve en ucuz yöntemdir. Depo gazı genellikle büyük endüstriyel kazanlarda veya tuğla fırınlarında, kireç veya çimento fırınlarında yakılır. Depo gazı ayrıca seraları ısıtmakta kullanılabilir. Depo gazının direkt ısıtma amaçlı kullanımında en önemli nokta kullanıcıların depolama sahasının yakınında olmalarının gerekmesidir. Çünkü depo gazının uzak mesafelere taşınması yerinde kullanılmasından oldukça pahalıdır. [15]

4.5.3 Elektrik üretimi uygulamaları

Direkt yakmanın mümkün olmadığı durumlarda en ekonomik çözüm depo gazından elektrik üretimidir. Elektrik üretimi gaz motorları, gaz türbinleri, buhar türbinleri ve yakıt pilleri kullanılarak gerçekleştirilebilir. Şekil 4.9'da depo gazından enerji üretim şeması görülmektedir.



Şekil 4.9 Depo gazından enerji üretimi [22]

4.5.3.1 Depo gazının sabit motorlarda yakıt olarak kullanımı

Elektrik üretimi depo gazının yakıt olarak kullanıldığı sabit motorlarda gerçekleştirilebilir. Depo gazını içten yanmalı motorlarda yakarak enerji kazanma teknolojisi, en basit metottur. Bunun için özel bir altyapı gerekli değildir. Depo gazı saf gaz veya çift yakıtlı motorlarda kullanılabilir. Bu motorlar 400kW'dan 2MW'a kadar geniş üniteler şeklinde ya da konteynırlarda daha küçük portatif üniteler

şeklinde de olabilir. Portatif olanlar depo gazı üretim profiline göre bir sahadan diğerine taşınabilir.

Depo gazının içten yanmalı motorlarda kullanılması oldukça yaygındır. İçten yanmalı motorlar Otto motoru gibi kıvılcımla ateşlemeli ve dizel veya çift yakıtlı motorlar gibi kompresyonlu ateşlemeli olmak üzere sınıflandırılabilir. Genelde modifiye edilmiş kıvılcımla ateşlemeli motorlar kullanılır.

Depo gazının yakıt olarak kullanılması için, motorlarda bazı değişiklikler yapmak gerekir. Depo gazı kuru, doğal yapısı nedeniyle herhangi bir yağlama özelliğine sahip değildir. Bu yüzden vanaların normalden daha dayanıklı olması gerekir. Hidrojen sülfid nedeniyle bakır parçalar değiştirilmelidir.

4.5.3.2 Depo Gazının Gaz Türbinlerinde Yakıt Olarak Kullanımı

Gaz türbinleri civar bölgedeki kullanıcılara ve elektrik temin eden firmalara veya saha içinde kullanılmak üzere elektrik üretmek için orta kalitede gaz kullanırlar. Gaz türbinlerinin içten yanmalı motorlardan daha faydalı olabilmesi için daha fazla gaz debisi olmalıdır. Bu sebepten dolayı gaz türbinleri daha büyük depolama sahalarında kullanılır. 500 kW' dan 10 MW' a kadar boyutlarda bulunurlar, ancak depolama sahalarında en çok kullanılanları 2-4 MW' dır.

Bir türbindeki yanma bir motordaki ile aynı parametrelere bağlıdır. Bunlar tutuşma limitleri ile hava-yakıt oranı, yeterli türbülans, yeterli kalma zamanı ve bir ateşleme kaynağıdır. Gaz türbininin başlıca avantajı bir içten yanmalı motor veya bir buhar türbininden çok daha az yer kaplamasıdır. Bir gaz türbini jeneratörü toplam ağırlığının bir tonuna karşılık 70-140 kW elektrik üretir, bu oran içten yanmalı motorlarda 1 ton için 27 kW iken, buhar türbininde 10 kW' dır. İkinci avantajı ise bakımların 10.000 saat ve onarımların 100.000 saat aralıklarla yapılmasıdır. [15]

4.5.3.3 Depo gazının buhar türbinlerinde yakıt olarak kullanımı

Bu metot en az kullanılan elektrik üretme metodudur. Genelde gaz debisinin 8-9 MW' lık sistemleri desteklediği çok büyük depolama sahalarında uygulanabilir. Buhar türbin sistemleri içten yanmalı motorlardan veya gaz türbinlerinden daha yüksek oranda kW başına maliyete sahiptirler. [15] Genelde paketlenmiş bir birim olan konvansiyonel gaz/sıvı yakıt boyleri ve elektrik üreten buhar türbin jeneratörü

içerir. Bu teknoloji genelde tam bir soğutma döngüsü, yeterli proses kaynağı ve soğutma suyunu gerektirir. [18]

4.5.3.4 Kojenerasyon

Kojenerasyon; ısı ve elektrik üretiminin aynı tesiste ve genellikle tek çeşit yakıt kullanılarak, birlikte gerçekleştirildiği ve atık ısıdan veya buhardan yeniden yararlanmayı hedefleyen sistemlere verilen genel bir isimdir. Kojenerasyon çok önemli bir enerji tasarruf yöntemidir. Endüstriyel tesislerin ısı ve elektrik ihtiyaçlarını karşılamak için bu yöntemi kullanarak birlikte ısı ve elektrik enerjisi üretmesi ayrı ayrı üretilmelerine kıyasla daha az yakıt kullanımı ile gerçekleşmektedir. Depo gazı kullanılan kojenerasyon tesisleri yapmak da mümkündür. Küçük ve orta ölçekli sahalarda gaz motoru kullanılarak, büyük sahalarda gaz türbini kullanılarak depo gazından ısı ve elektrik üretilmektedir. Dünyada yaygın olarak kullanılan uygulamalardan biridir.

4.5.3.6 Yakıt hücresi

Depo gazında çalışan yakıt hücreleri modülerite, düşük kapasite, yüksek verim, sessiz işletim, düşük çevresel etki nedeniyle elektrik üretimi için yüksek verim gösterirler. Bunlara ek olarak yakıt hücrelerinin işletme ve bakım maliyetleri düşüktür. Bu sebeplerden dolayı gelecekte depo gazından elektrik elde etmek için ideal bir teknoloji olabilir. Günümüzde ekonomik ve teknik dezavantajları nedeniyle yakıt hücrelerinin geleneksel uygulamalarla rekabet etmesi oldukça zordur.

Yakıt hücreleri depo gazından kazanılan hidrojeni ve havadan elde edilen oksijeni bir elektrokimyasal reaksiyonda birleştirerek enerji oluşturur. Yüksek verimlerde, yakıt ve hava eldesi olduğu sürece elektrik sürekli üretilir. Güç üretimi için uygun üç tip yakıt hücresi vardır. Bunlar; fosforik asit yakıt hücreleri, molten karbonat yakıt hücreleri ve katı oksit yakıt hücreleridir. Yakıt kaynakları olarak hidrojen gazı veya yeniden formlandırılmış metanol kullanan fosforik asit yakıt hücreleri (PAFC) bir depo gazı uygulamasının ticarileştirilmesine en yakın olanıdır. [18]

4.5.4 Boru hattı kalitesinde gaza saflaştırma

4.5.4.1 İşlenmiş depo gazının taşıt yakıtı olarak kullanımı

Depo gazı taşıt yakıtı olarak kullanılabilir, fakat bunun için bazı koşullar gereklidir. Öncelikle depo gazı doğal gaz kalitesine yükseltilmelidir. İkinci olarak, taşıtların doğal gazla çalışması için modifiye edilmeleri gerekir. Son olarak taşıtlar için yakıt istasyonları olmalı yada sabit bir noktadan bu hizmet verilmelidir.

Birçok ülkede depo gazı yakıt olarak sadece çöp kamyonlarında kullanılmaktadır. Bu durumda sadece depo gazının yakıt olarak kullanımıyla gaz problemi çözülemez, çünkü üretilen depo gazı çok daha fazladır. [15]

4.5.4.2 İşlenmiş depo gazının doğalgaz şebekesine enjeksiyonu

Depo gazı arıtılır ve hemen hemen saf metan haline gelene kadar saflaştırılır. Güvenlik için bazı koku verici bileşikler eklenir. Arıtma prosesleri depo gazının bileşimine, istenen gaz kalitesine ve yerel piyasa şartlarına bağlıdır. Bu yöntemde en önemli nokta doğalgaz boru şebekesine yakınlıktır.

Her durumda, depo gazının bu şekilde kullanımı pahalıdır, saf CO₂ geri kazanılıp satılsa bile sistem ekonomik olmayabilir. Bu uygulama Amerika’ da çok büyük depolama alanlarıyla sınırlı olmak üzere karlı bir uygulama olmuştur. Hollanda’da ise şehir gazının özelliklerini depo gazını arıtarak karşılamak daha kolaydır. [15]

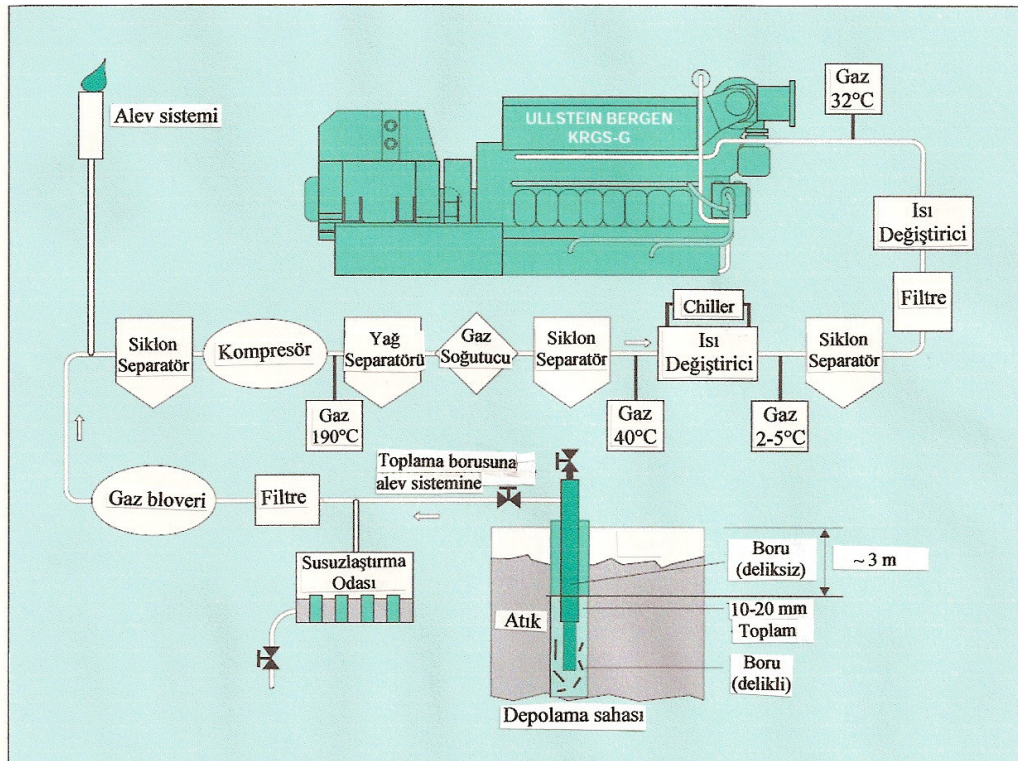
4.5.5 Kimyasalların üretiminde kullanılması

Depo gazının petrokimya proseslerinde metan gazı elde edilerek besleme stoğu olarak kullanılması teknik olarak mümkündür. Birçok kimyasalın metandan, dolayısıyla sentez gazı (CO ve H₂ karışımı) üretilmesi mümkündür ve depo gazının bu son kullanım yönteminin karlılığı ispatlanmıştır. Yine de(bununla birlikte) metanol CH₃OH üretimi, bu olasılıkların içinde en ekonomik olanıdır. Ayrıca CO₂ geri kazanılarak ticari bir ürün haline getirilebilir. [15]

4.5.6 Depo Gazının Arıtılması

Gaz arıtma alternatifleri basit nem giderme işleminden, doğal gaz hatlarına gaz vermek için yapılan kompleks temizleme işlemlerine kadar değişir. Bu iki uç alternatif arasında birçok arıtma imkanları vardır. Depo gazı arıtma sistemi yoğunlaşma,

Depo gazı karbondioksiti azaltılarak, örneğin hacimce % 3'ün altında, nemi giderilerek, hidrojen sülfür muhtevası 3,5 mg/m³'ün altına getirilerek doğal gaz kalitesine getirilebilir. Bu arıtma prosesleri sıvı içine gaz absorpsiyonu, katı üstüne kimyasal veya fiziksel adsorpsiyon, membranla ayırma ve biyolojik ayırma prosesleridir. [15] Şekil 4.10'da gaz motorlu bir elektrik üretim tesisinin gaz arıtma akım şeması görülmektedir.



Şekil 4.10 Depo gazı arıtımı akım şeması

5. TERMAL DÖNÜŞÜM TEKNOLOJİLERİ

5.1 Yakma

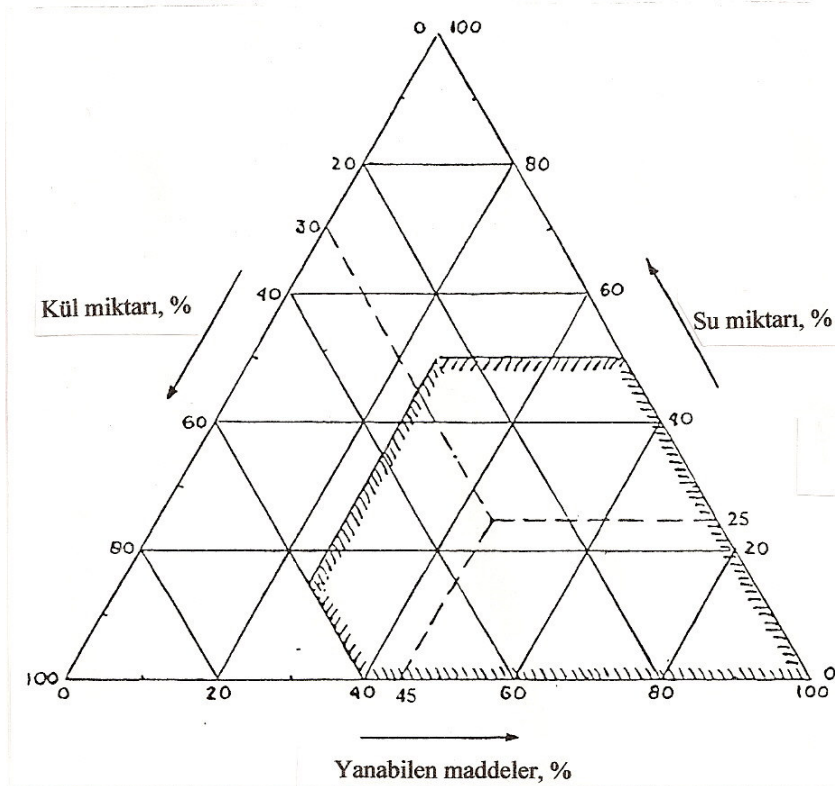
5.1.1 Giriş

Kentsel katı atıklar hacim azaltılması, stabilizasyon, patojen mikroorganizma giderimi ve enerji elde etmek amacı ile yakılırlar.[4] Yakma teknolojisinin en büyük avantajı ağırlıkça %75, hacimce %90 azalma sağlamasıdır. Dezavantajı ise yakma sonucu oluşan baca gazı emisyonlarının hava kirliliğine neden olmasıdır. Baca gazı arıtma sistemleri de maliyeti oldukça yükseltmektedir.

Bu yöntem özellikle, düzenli depolama alanı kurmak için uygun alanı bulunmayan ülkelerde tercih edilmektedir. Baca gazı emisyonları ve değerlendirilebilir atıkların malzeme olarak geri kazanılmasının mümkün olduğu durumlarda atıkların yakılarak bertarafı kamuoyu tarafından yakın geçmişte çevre bilinci gelişmiş birçok ülkede - özellikle planlanan yakma tesislerinin çevresinde yaşayanlar tarafından- protesto edilmiştir. Ancak günümüzde gelişen baca gazı arıtma teknolojileri (özellikle dioksin ve furan türevlerinin azaltılması), artan bilinç ve yaygınlaşan entegre katı atık yönetimlerini devreye girmesi ile kamuoyunun bu konulardaki muhalefeti giderek azalmıştır.

5.1.2 Atığın Yanabilirliği

Yanabilirlik atığın bileşimine bağlıdır. Atığın bileşimi yıl içindeki mevsimsel değişimlere, yerleşim birimine, atığın toplanma şekline göre değişir. Atığın bileşimi kalorifik değeri belirler. Kalorifik değer atığın yanabilirliğini belirleyen en önemli özelliktir, bunun dışında atığın nem ve kül miktarı da yanabilirliği etkileyen diğer faktörlerdir. Atığın içerdiği organik atık miktarı, kül ve nem değerleri temelinde, Tanner diyagramı atığın yanabilirliği konusunda bir fikir verebilir. Diyagrama göre taralı alan içinde kalan atık yardımcı yakıtlara gerek duymadan yanabilir. Nem ve kül yönünden zengin olan atıklar bu sınırın dışında kalırlar. [16]



Şekil 5.1 Tanner diyagramı [16]

Atığın kalorifik değerinin belirlenmesi için çeşitli yöntemler mevcuttur. Bu yöntemler atığın fiziksel, elementel ve endüstriyel analizlerini temel alır. [24]

Fiziksel Analiz : Literatürde fiziksel analiz kullanarak atığın kalorifik değerinin belirlenmesi için çeşitli modeller mevcuttur. Bu formüllerden birkaçı aşağıda belirtilmiştir.

Model	Birim	Referans
HHV = 88,2 R + 40,5 (G + P) - 6W (5.1) [25]	kcal/kg	Abu - Qudais (2000)
HHV = 49R + 22,5 (G + P) - 3,3W (5.2) [24]	Btu/lb	Ali Khan (1991)
HHV = 1238 + 15,6R + 4,4P + 2,7G - 20,7W (5.3) [24]	Btu/lb	Liu J (1996)
HHV : net kalorifik değer	P: Kağıt (% kuru ağırlık)	
R: plastik (% kuru ağırlık)	W: Su (% kuru ağırlık)	
G: organik atık (% kuru ağırlık)		

Eğer atığın bileşimi biliniyorsa, atıktaki her bir bileşenin ısı değerleri kullanılarak daha kesin bir kalorifik değer hesaplanabilir. Tablo 5.1’ de kentsel katı atık bileşenlerinin ısı değerleri görülmektedir.

Tablo 5.1 Kentsel katı atık bileşenlerinin ısı değerleri [24]

Bileşen	Isıl değer,kcal/kg kuru ağırlık
Yiyecek atıkları	1111
Kağıt	4000
Karton	3889
Plastik	7778
Tekstil	4167
Lastik	5556
Deri	4167
Bahçe atıkları	1556
Tahta	4445
Cam	33
Metaller	167
Kül,diğer safsızlıklar	1667

Elementel Analiz : Elementel analizde kullanılan en yaygın metot orijinali kömürün ısı değerinin belirlenmesi için geliştirilen Du Long eşitliğidir. [24]

$$HHV = 145C + 610 (H_2 - 1/8 O) + 40S + 10N \quad \text{Btu/lb} \quad (5.4) [24]$$

HHV: net kalorifik değer O: oksijen (% kuru ağırlık)

C: karbon (% kuru ağırlık) S: sülfür (% kuru ağırlık)

H: hidrojen (% kuru ağırlık) N: azot (% kuru ağırlık)

Dulong eşitliği dışında bu analizi temel alan farklı iki eşitlik aşağıda gösterilmiştir.

$$HHV = 81 (C - 3. O/8) + 57. 3. O/8 + 345 (H - O/16) + 25 S - 6 (9H + W) \\ \text{Kcal/kg} \quad (\text{Steuer eşitliği}) \quad (5.5) [25]$$

$$HHV = 144C + 672H + 6,2O + 41,4S - 10,8N \quad \text{Btu/lb} \quad (5.6) [24]$$

Elementel analiz ASTM tarafından yayınlanan standart metotlara göre yapılır. Karbon ve hidrojen, yakıt numunelerinin bir tüp fırında yakılmasıyla ölçülür, oluşan su ve CO₂ ‘de tutularak analizi yapılır.

Endüstriyel Analiz : Endüstriyel analizde yakıtın uçucu madde ve sabit karbon olmak üzere iki bileşeni olduğu kabul edilir. Uçucuların miktarı yakıt örneğinin 600-800 derece gibi yüksek sıcaklıklarda yakılmasıyla kaybedilen ağırlıktan tahmin edilir, sabit karbon miktarı ise numunenin 950 derecede yakılmasıyla meydana gelen ağırlık kaybı sonucu belirlenir.

Atığın kalorifik değerini belirlemek için en çok kullanılan endüstriyel analiz eşitlikleri şunlardır:

$$\text{HHV} = 45V - 6W \quad \text{kcal/kg} \quad \text{Geleneksel (5.7) [25]}$$

$$\text{HHV} = 44,75V - 5,85W + 21,2 \quad \text{kcal/kg} \quad \text{Bento (5.8) [26]}$$

HHV: net kalorifik değer

V: uçucular (% ağırlık)

W: su (% ağırlık)

5.1.3 Yanma prosesi

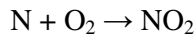
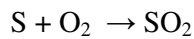
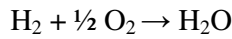
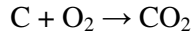
Atığın yanması için oksijen gereklidir. Atmosferik hava oksijen kaynağı olarak kullanılır. Hava temel olarak oksijen, azot ve su buharından oluşur.

Atığın yanması sonucu;

- Su, su buharına dönüşür
- İnorganik bileşikler aynen kalır
- Organik bileşikler yanma ürünlerine dönüşür.[16]

Atığın yanması sonucu oluşan ürünler Tablo 5.2 'de gösterilmiştir.

Temel yanma reaksiyonları aşağıda belirtilmiştir:



Tablo 5.2 Yanma ürünleri [16]

Atık Bileşeni	Miktarı (kg/KG atık)	Yanma ürünü
Organik		
-karbon	Cc	CO ₂
-hidrojen	Ch	H ₂ O
-sülfür	Cs	SO ₂
-azot	Cn	NO ₂
-oksijen	Co	-
-klorit	Ccl	HCl
-florid	Cfl	HF
Su	W	W(buhar)
İnorganik	I	I

Atığın organik kısmının elementer analizi biliniyorsa stokiometrik hava miktarı aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir.[16]

$$L_t = [C_c/12 + C_h/4 + C_s/32 + C_n/14 + C_o/32] \cdot 22,4 \cdot 1/0,21 \quad (5.9)$$

L _t : stokiometrik hava miktarı	[std m ³ /kg atık]
STP: standart sıcaklık ve basınç	(273 K, 1 atm)
Std m ³ : standart sıcaklık ve basınçtaki hacim	
22,4: 1 mol gazın std'deki hacmi	[l/mol]
0,21: havadaki oksijen oranı	[m ³ /m ³]

Bu eşitlikte HCL ve HF'in oluşumu ihmal edilmiştir. Ayrıca C, S, N' in oksidasyonu da CO, SO₃ ve NO oluşumları ihmal edilerek basitleştirilmiştir. [16]

Kentsel katı atıkların homojen olmayan yapısı nedeniyle atığın stokiometrik hava miktarı ile yakılması pratikte mümkün değildir. Tam yanmayı sağlamak için hava fazlası kullanmak gerekir. Fazla havanın kullanımı, sıcaklığı ve yanma ürünlerinin yani baca gazının bileşimini etkiler. Fazla hava yüzdesinin artmasıyla, baca gazındaki oksijen miktarı artar ve yanma sıcaklığı düşer. Bu bağlamda yanma havası yanma sıcaklığını kontrol etmek için kullanılabilir. [5]

Kentsel katı atıkların tam yanması için gerekli minimum sıcaklık 700-800 derecedir. Maksimum yanma sıcaklığı ise çelik yapıyı korumak için fırının iç duvarında kullanılan malzemeye bağlıdır. Çöp fırınları için bu değer yaklaşık 1000 derecedir. Sıcaklık aralığı yanma için gerekli minimum ve maksimum hava ihtiyaçlarını belirler. Yanma için gerekli hava miktarı bu aralığa denk gelmelidir. Yanma sıcaklığı hava miktarı kontrol edilerek doğru aralıkta tutulabilir. [16]

5.1.4 Yakma sistemleri

Kentsel katı atıkları yakma sistemleri ön arıtma metodolojisine göre ikiye ayrılır. Bunlar;

- İşlenmemiş katı atık yakma sistemleri (mass burning)
- İşlenmiş katı atık yakma sistemleri (RDF burning) [27]

5.1.4.1 İşlenmemiş katı atık yakma sistemleri

Atıkların herhangi bir ön proses uygulanmadan yakılması, dünyada en yaygın olan kentsel katı atıklardan enerji üretme teknolojisidir. İşlenmemiş katı atık yakma sistemlerinin başlıca bileşenleri aşağıda sıralanmıştır:

1. Atık kabulü
2. Atık ön şartlandırma (ayırma, parçalama)
3. Temiz hava ilâvesi ile kurutma ve fırında yakma, enerji üretimi
4. Cürufaların uzaklaştırılması, gerektiğinde cüruf yıkama
5. Cüruf şartlandırma: Metal (Fe) giderme, elek ile sınıflandırma, kaba fraksiyonun parçalanması
6. Yakma fırınının üst kısmında kullanılmış (ikincil) hava ilavesi ile baca gazlarının ve tozların yakılması
7. Gaz soğutma
8. Baca gazının arıtılması
9. İleri gaz temizleme
10. Temizlenmiş baca gazının alıcı ortama (havaya) deşarj edilmesi
11. Atık su arıtma
12. Enerji değerlendirme (elektrik üretimi, buhar kullanımı)

Bu teknolojiye işlenmemiş katı atık direkt olarak fırında yakılır. Başlıca ürün buhardır. Buhar direkt kullanılabilir veya elektrığe, sıcak suya, soğutma suyuna

- Depolama haznesine boşaltılırken	0,15 – 0,25 ton/m ³
- Depolama haznesine yerleştirildikten sonra	0,30 – 0,40 ton/m ³
- Vinçte	0,40 – 0,50 ton/m ³
- Fırın besleme kasasında	0,25 – 0,35 ton/m ³

Yanma prosesinin kalbi yanmanın meydana geldiği odadır. Birçok birimde atık yanma odasında hareket eden ızgaralarla ilerler ve bu ızgaraların dizaynı ve işletmesi tüm prosesin başarı veya başarısızlığını belirler. Izgara fırınları, evsel atık için en yaygın fırın tipidir. Bunların uygulama alanları oldukça geniştir. Hem kapasitesi < 1 ton/saatten daha düşük olan tesislerde, hem de 50 ton/saatten daha büyük tesislerde ızgara fırınları kullanılmaktadır. [16,24]

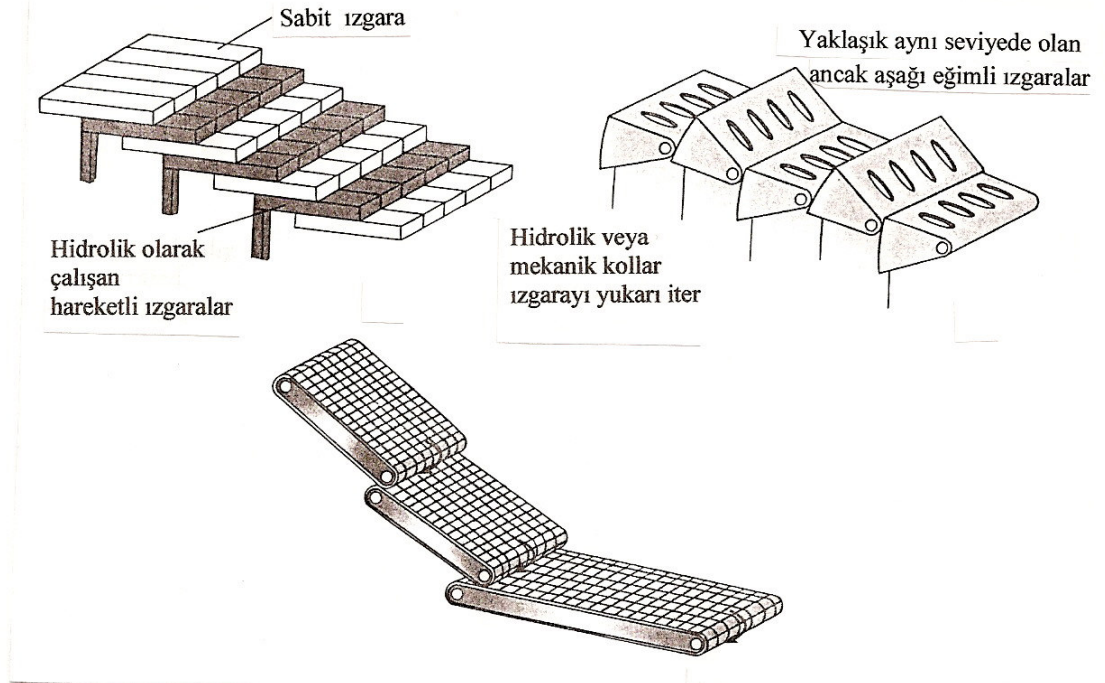
Yanma, fırının içinde temel olarak ızgarada gazlar içinse ızgaranın üzerinde yanma odasında gerçekleşir. Bu devamlı bir prosestir, atıklar ızgaranın üzerinde akmaktadırlar. Akmanın gerçekleşmesi;

- Izgaranın eğimli (30°) ve
- Hareketli olması anlamına gelir.

Izgaranın hareketi atığın karışmasını ve homojen bir yanma meydana gelmesini sağlar. Bunu gerçekleştirmek için farklı ızgara sistemleri tasarlanmıştır. Şekil 5.3'te üç farklı ızgaranın çizimleri görülmektedir. Izgaranın açıklıklarından birincil hava atığın içine nüfuz eder. Birincil hava yanmada ızgaraların soğutulmasına da yardım eder. Birincil havanın kontrolü yanma odasındaki istenen sıcaklığı sağlamakta en önemli değişkendir. Yakıcıların çoğu 980 – 1090 derece işletme sıcaklığına sahiptir, bu sıcaklık aralığında iyi yanma sağlanabilir ve kokular elimine edilebilir, ayrıca refrakter malzemenin korunması açısından da uygun bir sıcaklıktır. [16,24]

Yanma odasındaki sıcaklık başarılı bir işletme için kritik değişkendir. Eğer çok düşük olursa, 770 derecenin altında, plastiklerin büyük kısmı yanmaz. 1090 derecenin üzerindeyse fırındaki refraktörler ısıyı tutamaz.

Fazla hava miktarı arttıkça, sıcaklık düşer. Stokiometrik hava miktarlarında sıcaklık istenmeyen seviyelere yükselir. Yanma odasında sıcaklığı 1090 derecede tutmak için %100 hava fazlası gereklidir. [24]



Şekil 5.3 Farklı ızgara tasarımları [24]

Yanma odası modifikasyonlarından biri de döner fırındır. Bu fırınlarda atık kapalı bir döner çelik fırında yakılır, iç tarafı ateş geçirmeyen kayalarla kaplanmıştır. Dönme hızı dakikada birkaç turdur. Yanma havanın karşıt akışıyla meydana gelmektedir. Dönme hareketi sebebiyle atık devamlı karışmaktadır. Yanma hızı dönme hızındaki değişimle kontrol edilebilir. Döner fırınlar en iyi türbülansı sağlayan ızgara sistemidir ve böylece yanmanın hızı ve tamamlama derecesi artar.

Fırının duvarları modern yakıcılarda içinde su sirkülasyonu olan metal tüplerle kaplıdır. Su duvarı daha sonra boylerin veya ısı geri kazanım sisteminin bir parçası olur. Su boruları yanma odasını, ısıyı suya transfer ederek korurlar. [24]

5.1.4.2 İşlenmiş Katı Atık Yakma Tesisleri

İşlenmiş katı atığın (RDF: Refuse Derived Fuel) bir yakıt olarak işlenmemiş katı atığa oranla avantajları vardır. Başlıca faydaları daha yüksek ve sabit kalorifik değer, fiziksel – kimyasal bileşimin homojen olması, transferinin daha kolay olması, yanma esnasında daha az hava fazlası gerektirmesi ve baca gazı emisyonlarının daha az olmasıdır.

RDF yüksek kalite standartları nedeniyle birçok yakma sisteminde yardımcı yakıt olarak kullanılabilir. Katı atığın işlenip RDF haline gelmesi için bir dizi işlem uygulamak gerekir. Bir RDF üretim prosesi istenmeyen bileşenleri ayırmak ve daha önce belirlenen özelliklerde RDF üretmek için peşpeşe sıralanmış birkaç istasyondan oluşur. RDF üretim prosesi genellikle sırasıyla elekleme, parçalama, boyut küçültme, sınıflandırma, ayırma, kurutma ve yoğunlaştırma aşamalarından oluşur. Ekipmanların tipi, sayısı ve pozisyonu ağırlıklı olarak kütle dengesini ve oluşan ürünün kalitesini etkiler. [30]

RDF sistemde yanmadan önce yanmayan maddeler uzaklaştırılır ve atığın boyutu küçültülür. Böylece daha homojen ve daha yüksek ısı değere sahip bir yakıt elde edilir. RDF tesisinin avantajı ısı değerin daha üniform olması ve böylece yanma için gerekli fazla hava miktarının azalmasıdır. Oksijenin yetersiz olması korozyona yol açar, bu yüzden yanma havasının miktarı önemlidir. RDF sistemleri için fazla hava yaklaşık %50, direkt yanma içinse maddeler arasındaki yakıt değerinin geniş aralıklarda değişmesi sebebiyle %100'dür. Aynı miktarda yakıt direkt yakma tesisinde daha çok havaya ve daha geniş hava kirliliği kontrol sistemlerine gerek duyar.[24] Tablo 5.3' te işlenmiş ve işlenmemiş katı atık yakma tesisleri karşılaştırılmıştır.

Tablo 5.3 İşlenmiş ve işlenmemiş katı atık yakma tesislerinin karşılaştırılması [6]

	İşlenmemiş katı atık yakma tesisi	İşlenmiş katı atık yakma tesisi
Kapasite (ton/gün)	50-3200	300-500
İşletme verimi (kWh/ton)	450-580	550-600

RDF yakma sistemlerinden akışkan yataklı yakıcılarda çıkan külün kalitesi daha iyidir ve baca gazında daha az kirletici madde vardır. RDF'nin direkt yakmaya karşı bir avantajı da yakıtın pelletler halinde geniş depolama konteynırlarında depolanabilmesidir, ihtiyaç duyulduğu kadar yakılır.

ASTM RDF'i işlenme derecesine göre sınıflandırmış ve isimlendirmiştir, bu tanımlamalar tablo 5.4' de görülmektedir. RDF – 1 işlenmemiş katı atıktır, RDF – 2 atığın sadece parçalanmış halidir, böylece daha homojen bir yakıt elde edilir ve yanmanın daha verimli olması sağlanmış olur. RDF – 3 inorganik kısmi ayrılmış ve parçalanmış atıktır. RDF – 4 ayırma işlemi yapılmış ve “ fluff ” şeklinde

parçalanmış, RDF – 5 ise köpek yemi büyüklüğünde pelletler haline getirilmiş atıktır, RDF – 4 ve RDF – 5’te atık yakıt olarak daha kullanışlıdır. Son kategoriler RDF – 6 ve 7’nin pilot çalışmaları yapılmış ancak tam boyutlu tesislerde başarılı olunamamıştır.[24]

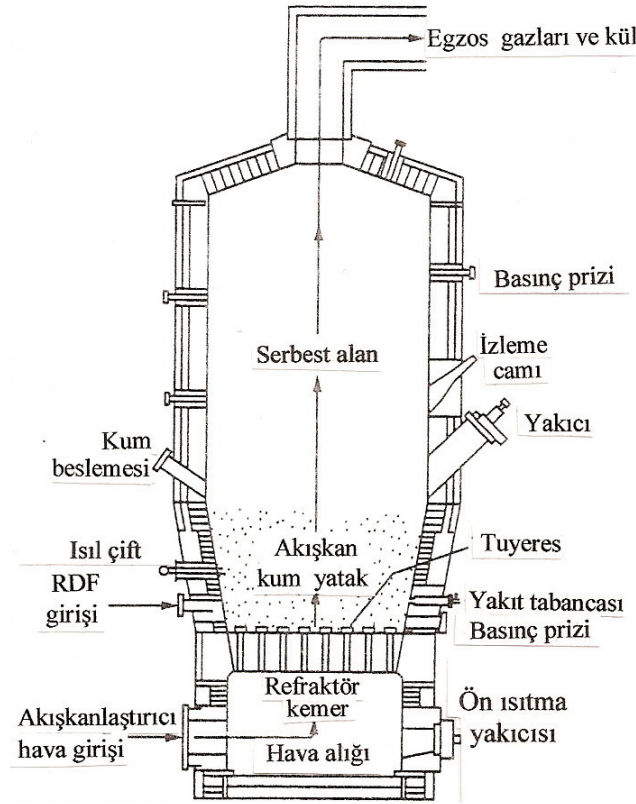
RDF yakıcılarında, RDF tipik olarak otomatik bir hareketli ızgaranın üzerinde yanar. Izgara RDF’in yanabileceği bir platform sağlar ve türbülans ve uniform bir yanmaya yardımcı olan birincil havanın girişini sağlar. En iyi sonuçlar RDF için özel olarak tasarlanmış yakma sistemlerinden elde edilir ancak bazı kömür yakan boylerler RDF veya RDF/kömür karışımını başarıyla yakacak şekilde modifiye edilir. [5]

Tablo 5.4 ASTM RDF Sınıflandırılması [24]

Ad	Tanım
RDF – 1	İşlenmemiş MSW (direkt yanma seçeneği)
RDF – 2	Parçalanmış ancak materyaller ayrılmamış MSW
RDF – 3	Parçalanmamış MSW’nin organik kısmı. Genelde materyal geri dönüşümü esnasında üretilir veya organiklerin kaynağa ayrımı ile üretilir.
RDF – 4	Genelde toz, pudra haline getirilmiş organik atık bazen “ fluff “ olarak adlandırılır.
RDF – 5	Pellet haline getirilmiş organik atık. Bu pelletler kömürle birlikte mevcut fırınlarda yakılabilirler.
RDF – 6	Atığın sıvı bir yakıt haline gelecek şekilde işlenmiş organik kısmı
RDF – 7	Gaz yakıt olacak şekilde işlenmiş organik atık

Akışkan yataklı yakma geleneksel yakma sistemlerine karşı alternatif bir dizayndır. En basit formda bir akışkan yatak yakma sistemi kum yataklı dikey çelik bir silindir , genellikle refrakter kaplamalı, destekleyici bir ızgara yüzey ve “ tuyeres “ olarak bilinen hava enjeksiyon nozüllerinden oluşur. Hava tuyereslerden verildiğinde yatak akışkanlaşır ve hacmi iki katına çıkar. RDF akışkan yatak seviyesinin altında veya üstünde reaktörün içine enjekte edilir. Akışkan yatağın kaynama hareketi türbülansı, karıştırmayı ve ısının yakıt transferini sağlar. İşletme esnasında yardımcı yakıt

(doğal gaz veya fuel oil) yatağı işletme sıcaklığına (785 – 955 derece) yükseltmek için kullanılır. Yakıcı çalıştırıldıktan sonra genellikle yardımcı yakıtı ihtiyaç duyulmaz, çünkü yatak 24 saat boyunca sıcak kalır ve bu da yardımcı yakıt olmadan hızlı yeniden başlamaya imkan sağlar. [5] Şekil 5.4'te bir akışkan yataklı yakma sistemi görülmektedir.



Şekil 5.4 Akışkan yataklı yakma sistemi [5]

Yatak kum veya kireç taşından (CaCO_3) olabilir. Kireçtaşı kullanıldığı zaman, oksijen ve yanma sonucu oluşan SO_2 ile reaksiyona girer ve CO_2 ve kalsiyum sülfat (CaSO_4) oluşur, CaSO_4 kül ile uzaklaşır. Yatak malzemesi olarak kireçtaşının kullanılması yüksek kükürt içeren kömürlerin minimum SO_2 emisyonu ile yanmasına izin verir. [5]

Katı atıkların yakılmasında dünyada akışkan yatak sistemi kullanılan tesisler mevcuttur. İlk projelerden biri Lausanne; İsviçre'de 150 ton/gün kapasiteye sahip bir akışkan yatak ünitesidir. Tesiste kentsel katı atık ve susuzlaştırılmış atıksu arıtma tesisi çamuru birlikte yakılmaktadır. Bir atık ısı kazanı buhar üretir ve üretilen buhar ısıtma ve elektrik üretimi amaçlı kullanılır. Daha büyük boyutlu bir tesis, 700

ton/gün kapasiteli, Dulath, Minnesota’da inşa edilmiştir. Tesiste günde 400 ton kentsel katı atık ve 300 ton atıksu çamuru yakılmaktadır.

5.1.5 Isı geri kazanım sistemleri

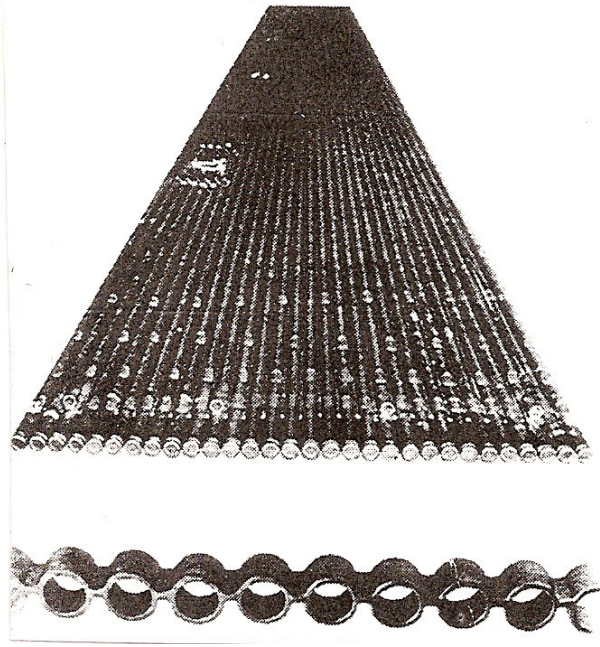
Giren atıkların kalorifik değerinin % 70’i ilâ % 80’i enerji olarak değerlendirilebilir. Geri kalanı, fırının termik ışınları, cüruf ısısı, yakılmayan malzeme ve baca gazının ısı kaybı olarak kaybedilir.

İşlenmemiş veya işlenmiş katı atık yakılarak oluşan sıcak baca gazlarından iki şekilde enerji geri kazanımı mümkündür: 1)Su duvarlı yanma odaları ve 2)atık ısı kazanları. Isı geri kazanım sistemlerinden sıcak su veya buhar üretilebilir. Sıcak su düşük sıcaklıkta endüstriyel ve lokal ısıtma amaçlı kullanılabilir. Buhar ise çok yönlüdür, ısıtma amaçlı kullanılabileceği gibi elektrik üretimi için de kullanılabilir.

Isı geri kazanımı hava kirliliği kontrol ekipmanlarının maliyetinin azalmasında olumlu bir etki yapmaktadır. Pratikte, ısı geri kazanımı olmayan katı atık yakma tesislerinde, tam yanmayı ve türbülansı sağlamak için %100 – 200 hava fazlası gereklidir ve sonuçta daha fazla baca gazı ortaya çıkar, arıtılması içinde ekipmanların kapasitesinin fazla olması gerekir ve bu da maliyeti yükseltir. Isı geri kazanım sistemi kullanıldığı zaman ise %50 – 100 hava fazlası yeterlidir ve böylece hava kirliliği kontrol cihazlarının boyutu azalır. Isı geri kazanımı esnasında baca gazlarının soğuması, baca gazlarının hacmini azaltır. [24]

Su duvarlı yanma odaları: Bu metotta, yanma odasının duvarları dikey olarak yerleştirilmiş, birbirine bağlı boyler boruları ile kaplıdır.Şekil 5.5’te yanma odasında kullanılan su boruları görülmektedir. Su borulardan geçerek yanma odasında üretilen ısıyı absorbe ederek sirküle olur ve buhar üretir. Genellikle ızgaralara bitişik fırın duvarı boruları çok yüksek sıcaklıklardan ve mekanik aşınmadan korumak için refraktör (ısıya dirençli) malzeme ile kaplanır. [24]

Atık ısı kazanı: Bu metotta ise fırının yanma odası fırın duvarlarından ısı kayıplarını azaltmak için izole edilmiş refraktör malzemeye kaplıdır. Sıcak baca gazları yanma odasının dışına yerleştirilmiş ayrı bir atık ısı kazanından geçerler. Bu metot genellikle modüler yakma ünitelerinde kullanılır. Bazı durumlarda atık ısı kazanının mevcut refraktör kaplamalı fırınlara uygulanması mümkündür. [24]



Şekil 5.5 Su duvarı kesiti [24]

Bir ısı geri kazanım sistemi aslında bir ısı değıştiricidir. Yanan atıktan gelen ısı akışkan bir sıvıya (su) transfer edilir. Kentsel katı atıkları yakan bir tesiste de ısı transfer sistemi bir kömür veya fuel – oil yakan tesisteki ile aynıdır.

Basitleştirilmiş bir analiz buhar üretim hızlarını kullanarak yapılabilir. Buhar üretimi atığın enerji miktarına bağlıdır. Tablo5.5’ de gösterildiği gibi, buhar üretim hızları atığın enerji ve nem miktarına bağlı olarak 1,5 – 4,3 ton buhar/ton atık arasında değişmektedir.

Tablo 5.5 MSW yanması için buhar üretim hızları [5]

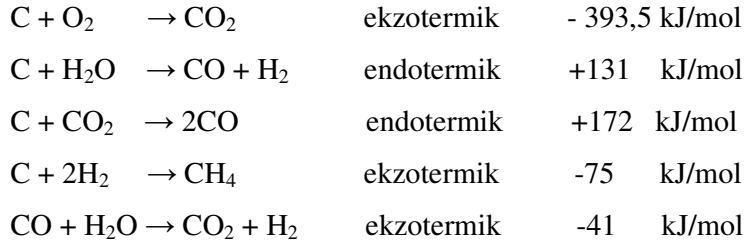
	Enerji miktarı, HHV, kJ/kg				
	15118	13955	11630	9303	6977
MSW kalitesi					
Nem, %	15.0	18.0	25.0	32.0	39.0
Yanmayanlar, %	14.0	16.0	20.0	24.0	28.0
Yanabilenler, %	71.0	66.0	55.0	44.0	33.0
Buhar üretimi ton/ton MSW	4.3	3.9	3.2	2.3	1.5

5.2 Gazlaştırma

Gazlaştırma terimi yakıtın stokiometrik hava miktarında daha az havayla yakıldığı kısmi bir yanma prosesini tarif eder. Gazlaştırma prosesi kentsel katı atıkların hacminin azaltılmasında ve enerji geri kazanımı için verimli bir tekniktir.[5] Gazlaştırmanın yanmaya göre en büyük avantajı elektrik üretim veriminin daha iyi olmasıdır. Temel enerji üretimi ise yanmadan daha düşüktür.[31] Gazlaştırma prosesinde atığın kısmi yanması sonucu CO, H₂ ve başta CH₄ olmak üzere bazı doymuş hidrokarbonlardan oluşan yanabilir bir gaz yakıt elde edilir. Elde edilen gaz daha sonra içten yanmalı motor, gaz türbini ve boylerlerde yakılarak enerji üretilir. [5]

Gazlaştırma teknolojisinin bir başka avantajı denetimli ve sınırlı bir oksijen ortamında gerçekleştirildiği için yanmaya göre çok daha az SO_x, NO_x ve CO salımı gerçekleştirmesidir, bu nedenle çevre dostu bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Ayrıca gazlaştırma prosesi sonucu %7 civarında kül oluşmaktadır, bu rakam yakma sistemlerinde %15 – 20 ‘dir. [32]

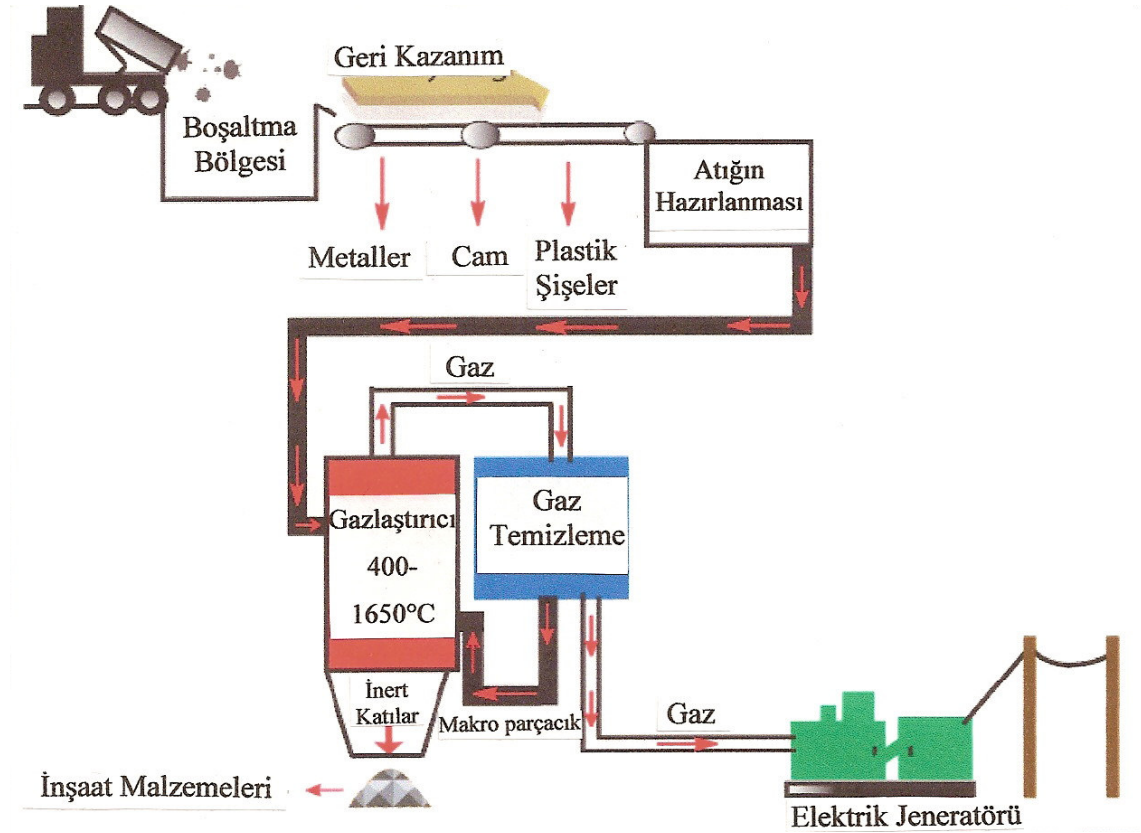
Gazlaştırma prosesi esnasında, beş temel reaksiyon meydana gelir:



Prosesin devam etmesi için gerekli ısı ekzotermik reaksiyonlardan sağlanmaktadır, oysa yanabilir bileşenler esasen endotermik reaksiyonlarla oluşur.

Havanın oksijen olarak kullanıldığı bir gazlaştırıcı atmosferik basınçta çalıştığı zaman, oluşan son ürünler hacimce %10 CO₂, %20 CO, %15 H₂, %2 CH₄ ve %53 N₂ içeren düşük ısı değerli gaz, karbon ve yakıttaki inert maddeleri içeren kömürleşmiş artık(char) ve pirolitik yağa benzeyen yoğunlaştırılabilir sıvılardır. Giriş havasındaki azotun seyreltme etkisi nedeniyle, düşük ısı değerli gaz yaklaşık 560 kJ/m³ enerji değerine sahiptir. Havanın yerine saf oksijen oksidan olarak kullanıldığı zaman (Purox sistem) enerji miktarı yaklaşık 1120 kJ/m³ olan orta ısı değerli gaz üretebilir.[5]

Gazlaştırma sistemlerinde sadece işlenmiş katı atık kullanılmaktadır. Bu yüzden atıkların öncelikle ön arıtma prosesine tabi tutulmaları gerekir. Ön arıtmadan sonra katı atıklar ana gazlaştırma odasına beslenir.[6] 5 temel tip gazlaştırıcı mevcuttur. Bunlar: 1)dikey sabit yatak, 2)yatay sabit yatak, 3)akışkan yatak, 4)çok odalı, 5)döner fırın. En yaygın olarak kullanılan gazlaştırıcı tipi dikey sabit yataktır. Dikey sabit yataklı gazlaştırıcılar basit dizaynları ve düşük yatırım maliyeti nedeniyle diğer gazlaştırıcılardan daha avantajlıdır ancak bununla birlikte yakıtın mekanik özelliklerine daha hassastır ve daha homojen bir yakıta gereksinim duyulur.[5] Şekil 5.6'da gazlaştırma sistemi akış diyagramı görülmektedir.



Şekil 5.6 Gazlaştırma sistemi akış diyagramı [33]

Gazlaştırma işlemi birkaç aşamada meydana gelmektedir. Her ne kadar sınıflandırmada piroliz yöntemi ayrı bir yöntem olarak ele alınsa da gazlaştırma yönteminin safhalarından biriside piroliz safhasıdır. Gazlaştırmanın ilk aşamasında nemin buharlaştırılması yoluyla kurutma işlemi gerçekleşir.[32] İkinci aşamada ise piroliz yöntemi yakıtın uçucu bileşenlerini 600 derecenin altındaki sıcaklıklarda oksijensiz ortamda açığa çıkartmaktadır. Daha yüksek sıcaklıklarda 900 – 1200 derecede CO, CH₄, H₂, N₂ gibi düşük molekül ağırlıklı gazlar oluşur. Gaz reaktörün

üstünden alınır ve mekanik gaz temizleyiciye gönderilir. Gaz içten yanmalı motor, türbin veya boylere girmeden önce ısı değıştircilerde soğutularak gerekli sıcaklığa getirilir. Yüksek voltaj ve düşük amperli bir elektrostatik tutucu gaz temizleme ve soğutma prosesini tamamlar.

Yağ/katran/su ayırma sistemi kondensatı elektrostatik ayırıcıdan alır. Yağ ve katran ayrılır ve tekrar reaktöre enjekte edilir. Atık ısı besleme stoğunu ön ısıtma yaparak nemini uygun değerlere getirmek için kullanılır. Gazın kalitesi düzenli olarak bir gazmetreyle gözlenir. Gaz içten yanmalı motorlara beslenerek elektrik üretilir. Motorun emisyon değerleri genelde düşüktür. Diğer bir seçenek ise gazın boylarlerde buhar üretimi için kullanılmasıdır. Daha sonra buhar türbini ile elektrik üretilir.

Tüm gazifikasyonun termal verimliliği direkt yanma prosesinden daha fazladır. Ağırlıkça %75, hacimce %90 azalma olmaktadır. Dezavantajlarından biri gaz temizleme sisteminin düzenli kontrolünün yapılma gerekliliğidir. Aksi takdirde içten yanmalı motorlar zarar görür. [5,6]

5.3 Piroliz

Piroliz katı atıkların oksijensiz ortamda termal bozunmasıdır. Maalesef literatürde küçük bir karışıklık mevcuttur, piroliz sistemi olarak adlandırılan birçok sistem aslında gazlaştırma sistemidir. Piroliz ve gazlaştırma sistemlerinin her ikisi de katı atıkları gaz, sıvı ve katı ürünlere dönüştürmek için kullanılırlar. İki sistem arasındaki temel fark ise piroliz sistemlerinin oksijensiz ortamda endotermik reaksiyonları sürdürmek için dış bir ısı kaynağı kullanırken, gazlaştırma sistemlerinin gerekli ısıyı kendi içinde sağlamasıdır ve katı atığın kısmi yanması için hava veya oksijen kullanır. Yüksek oranda ekzotermik olan yanma ve gazlaştırma proseslerine karşı, pirolitik proses yüksek oranda endotermiktir. Bu sebeple “kuru damıtma” (destructive distillation) terimi de piroliz için sıklıkla kullanılan alternatif bir terimdir. [5]

Piroliz prosesi sonucu başlıca üç fraksiyon oluşur:

- 1) Atığın organik özelliklerine bağlı olarak esasen hidrojen, metan, karbon monoksit, karbon dioksit ve diğer gazlardan oluşan bir gaz akımı.

- 2) Asetik asit, aseton, metanol ve kompleks hidrokarbonları içeren bir katran veya yağ akımında oluşan sıvı fraksiyon. Ek prosesler uygulanarak, sıvı fraksiyon fuel oil No.6 yerine sentetik bir fuel oil olarak kullanılabilir.
- 3) Saf karbon ve katı atıkta bulunan sert materyallerden oluşan kömürleşmiş katı (char).

Ürün fraksiyonlarının dağılımı sıcaklıkla değişmektedir. Pirolitik yağların enerji miktarı yaklaşık 20933 kJ/kg olarak tahmin edilmektedir. Maksimum gazlaştırma şartları altında, oluşan gazın enerji miktarının yaklaşık 2607 kJ/m³ olacağı tahmin edilmektedir.

Sadece bir adet tam ölçekli kentsel katı atık piroliz sistemi Amerika Kaliforniya’da inşa edilmiştir. Tesis (esas işletme amacı olan) satılabilir piroliz yağı üretimini gerçekleştirilememiş ve sadece iki yıl çalıştıktan sonra kapatılmıştır. Sistemin analizi yapıldığında, sistemin başarısız olmasına neden olan birkaç faktör belirlenmiştir. Bunlar;

- 1) Ön arıtma sistemin başarısızlığının nedeni, alüminyum ve cam için saflık spesifikasyonları ile karşılaşılmasıdır, bu da sistemin ekonomisini etkilemiştir.
- 2) Sistemin satılabilir bir piroliz yağı üretememesi sistemin başarısız olmasının temel nedenidir. Üretilen yağ pilot tesisten tahmin edilen %14 nem oranına değil, %52 nem oranına sahipti. Yağdaki bu yüksek nem miktarı enerji miktarını 8373 kJ/kg’a düşürmüştür, oysa pilot tesis testlerinde bu değer 20933 kJ/kg olarak tahmin edilmişti.

6. BİYOLOJİK DÖNÜŞÜM TEKNOLOJİLERİ

6.1 Anaerobik Çürütme

6.1.1 Anaerobik çürütme prosesi

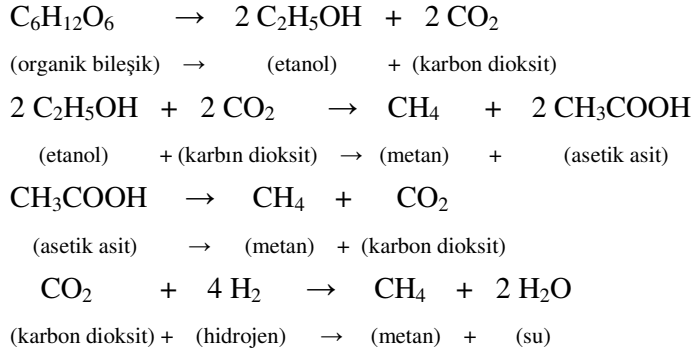
Anaerobik çürütme çöpün organik kısmının oksijensiz ortamda biyolojik olarak bozunmasıdır. Prosesin başlıca ürünü yaklaşık %64 CH₄ ve %35 CO₂'den oluşan biyogazdır. Geleneksel olarak, anaerobik çürütme prosesi içinde asılı katılar bulunan sıvı atıkların (çiftlik atıkları, atıksular gibi) arıtılmasında kullanılmaktaydı. Ancak daha sonra kentsel katı atıklar üzerinde yapılan çalışmalar sonucu bu proses kullanılarak atıklardan enerji elde edilmesinin ekonomik açıdan elverişli olabileceği görülmüştür. [34]

Kentsel katı atıkların organik kısmı kompleks bir substrattır ve metana dönüşüm aşamaları da bu yüzden daha karmaşık metabolik reaksiyonlardan oluşur. Kentsel katı atıkların organik fonksiyonunun anaerobik dönüşümünün temel olarak 3 aşamadan meydana geldiği düşünülür. İlk aşama hidrolizdir. Yüksek molekül ağırlıklı polimerler (proteinler, karbonhidratlar, lipitler) hidrolitik mikro organizmalar tarafından monomerlerine (şekerler, amino asitler, yağ asitleri) ayrılırlar. Hidrolitik bakteriler, çözünebilir ve çözünemeyen yüksek molekül ağırlıklı organik bileşiklerin her ikisinin de parçalayan hidrolitik enzimler üretirler. [34]

İkinci aşama fermentasyon olarak adlandırılır. Bu aşamada birinci aşama sonucu oluşmuş düşük molekül ağırlıklı bileşikler organik asitlere dönüşürler, anaerobik çürütmede yaygın olarak asetik asit oluşur. Bu aşamadaki mikroorganizmalar metanojenik olmayan bakterilerdir. Bu bakteriler literatürde asetojenler veya asit yapıcı bakteriler olarak adlandırılırlar.

Üçüncü aşamada ara ürünler, başlıca metan ve karbondioksit olmak üzere son ürünlere dönüşürler. Literatürde metanojenler veya metan yapıcı olarak adlandırılan bakteriler hidrojen ve asetik asiti metan ve karbondioksite dönüştürürler.

Anaerobik çürütme prosesi esnasında meydana gelen reaksiyonlar şunlardır:[35]



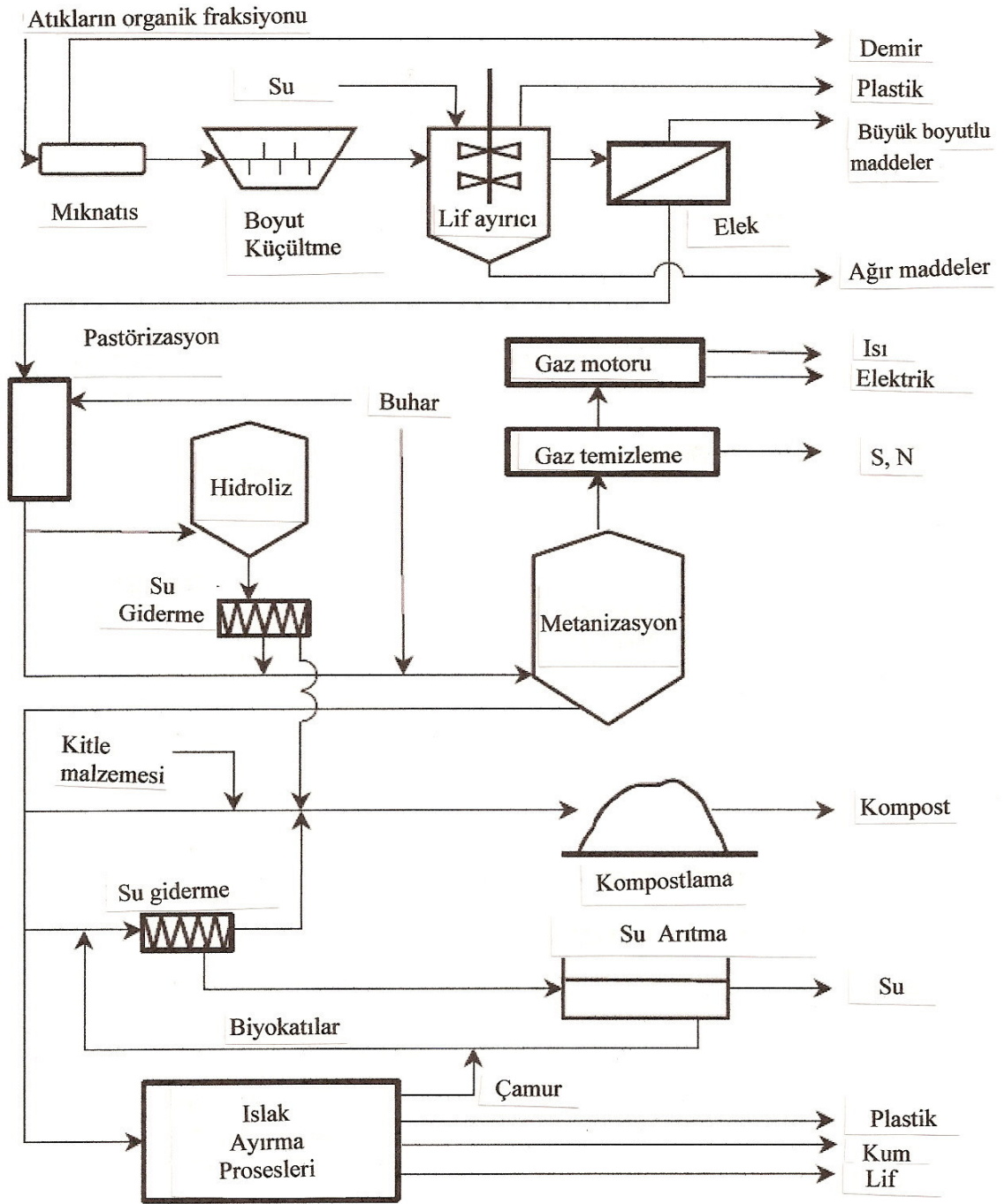
Asetik asit ve hidrojen dönüşümünü sağlayan bakterilerin büyüme hızları çok yavaştır ve bunun bir sonucu olarak organik atıkların anaerobik bozunma hızını sınırlayan etken oldukları düşünülmektedir. Atık stabilizasyonu metan ve karbon dioksit üretimi ile gerçekleşir. [5, 34]

Anaerobik arıtma sisteminin organik atıkları verimli bir şekilde stabilize edebilmesi için, metanojenik ve metanojenik olmayan bakterilerin dinamik bir dengede olmaları gerekir. Bunun için son çevresel faktörlerinde uygun olması gerekmektedir. Bakteriler pH, sıcaklık, alkalinite gibi çevresel faktörlere karşı oldukça hassastırlar. pH 6,5 – 7,5 arasında olmalıdır, pH 6,2'nin altına düşmemelidir çünkü metan bakterileri bu değerin altında fonksiyonlarını yerine getiremezler. Optimum sıcaklık aralığı mezofilik bakteriler için 30 – 38 derece, termofilik bakteriler için ise 55 – 60 derece arasında olmalıdır. [5]

6.1.2 Anaerobik çürütme sistemleri

Bir anaerobik çürütme sistemi ön arıtma, anaerobik dönüşüm, son arıtma ve sızıntı suyu ve gazların arıtılması aşamalarından oluşur. [16] Ön arıtma basamakları manyetik ayırma, öğütme, yoğunluk farkıyla ayırmadır. Son arıtma ise mekanik su giderme, aerobik kompostlaştırma ve sızıntı suyu arıtma basamaklarından oluşur. [16,34]

Anaerobik çürütme işlemi reaktörlerde gerçekleşir. Anaerobik çürütme atığın içerdiği katı miktarına göre kuru (yüksek katılı) ve ıslak (düşük katılı) prosesler olmak üzere ikiye ayrılır. Ayrıca kesikli-devamlı ve tek aşamalı-çok aşamalı olarak da sınıflandırılırlar. Şekil 6.1'de bir anaerobik çürütme prosesi akım şeması görülmektedir.



Şekil 6.1 Anaerobik çürütme prosesi akım şeması [34]

6.1.2.1 Kuru proses

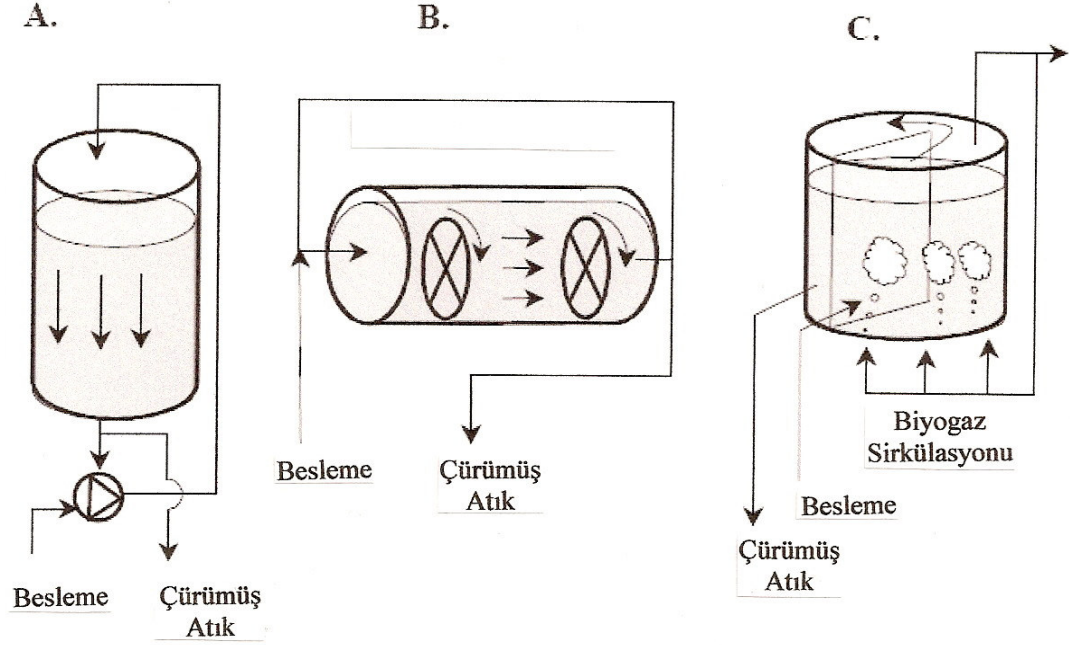
Kuru sistemlerde fermante olacak kütlenin katı atık miktarı %20 – 40 arasında değişmektedir. Sistemin iki önemli avantajı daha az suya gereksinim duyması ve daha yüksek gaz üretimidir. Kuru sistemlerde atığın ön arıtması ve bazı ekipmanlar

ıslak sistemden farklılık gösterir. Atığın taşınması konveyör bantlarla gerçekleştirilir ve viskozitesi yüksek akımlar için güçlü pompalar özel olarak dizayn edilir. Bu pompalar ıslak sistemlerde kullanılan santrifüjlü pompalardan daha pahalıdır. Yapılan tek ön arıtma 40 mm'den daha büyük olan safsızlıkların reaktöre verilmeden önce atıktan uzaklaştırılmasıdır.

Yüksek viskozitesi nedeniyle, atıklar reaktörün içine doğru hareket ederler. Böylece karıştırma için reaktörün içine mekanik bir alet yerleştirmeye gerek kalmaz. Katı atıkların yeterli derecede karışmalarını sağlamak için üç farklı dizayn geliştirilmiştir. Dranco prosesinde karıştırma fermante olmuş atıkların reaktörün altından alınarak taze atığın (6 birim çürümüş atık için 1 birim taze atık) reaktörün tepesine pompalanmasıyla sağlanır. Yani karışma atıkların sirkülasyonu ile meydana gelir. Bu basit dizayn %20 – 40 katı atık içeren atıkların arıtılmasında etkilidir. Kompogas prosesi de benzer şekilde çalışır, yalnız silindirik reaktör yatay olarak yerleştirilmiştir ve akış o doğrultuda verilir. Yatay akışa reaktörün içine yerleştirilmiş yavaş dönen tekerlekler yardım eder. Bu sistemde atığın katı miktarı yaklaşık %23 olmalıdır. Daha düşük değerlerde kum ve cam gibi ağır partiküller yüzebilir ve reaktörün içinde birikir; daha yüksek değerler ise yüksek akış direncine sahip olur. Valorga sistemi biraz daha farklıdır, bu sistemde yatay akış silindirik bir reaktörün içinde daireseldir ve karıştırma 15 dakikada bir reaktörün dibinden yüksek basınçta biyogaz enjeksiyonu ile sağlanır. Farklı reaktör tasarımları şekil 6.2'de görülmektedir.

Mekanik sınırlamalar nedeniyle Kompogas reaktörünün hacmi sabittir ve tesis kapasitesi her bir 15.000 veya 20.000 ton/yıl arıtma kapasitesine sahip birkaç reaktörün paralel olarak inşa edilmesiyle ayarlanır. Diğer taraftan Dranco ve Valorga reaktörleri istenen kapasiteye göre ayarlanabilir ancak 3300 m³ ve 25m yüksekliği aşamazlar.

Kuru sistemlerde pompalar, vidalar ve vanalar gibi ekipmanların maliyetleri ıslak sistemlere göre daha yüksekken, ön arıtma ve reaktör maliyetleri daha düşüktür. Islak sistemler 1 ton kentsel katı atığın organik fraksiyonunun arıtılması için 1 m³ taze su tüketir, kuru sistemlerdeki su tüketimi ise 10 kat daha azdır. Bunun sonucu olarak kuru sistemlerde atılan su birkaç kat daha azdır. Kuru sistemlerde termofilik şartlar altında atıkların hijyeni sağlanmış ve son ürün olarak patojensiz kompost elde edilmiş olur.[34]



Şekil 6.2 Farklı reaktör tasarımları [34]

6.1.2.2 Islak proses

İlk bakışta, ıslak sistem atıksu arıtma tesislerinde üretilen biokatıların anaerobik stabilizasyonu için yıllardır kullanılan teknolojiye benzerliği nedeniyle çekici görünmektedir. Islak sistemde fermante olacak kütlenin katı miktarı %15'ten daha azdır, bu değeri sağlamak için sisteme fazla miktarda su ilavesi yapılır. Islak sistemlerde klasik olarak tam karıştırmalı reaktör kullanılabilir. [34] Islak sistemlerde eklenen suyun sonucu olarak çok sulandırılmış çürümüş çamur oluşur, bu çamurun bertarafı için susuzlaştırılması gerekir. Susuzlaştırmadan gelen sıvı akımın da arıtılması gereklidir, bu durum sıvı sistemlerin en büyük dezavantajıdır. [5]

Prosesin basit görünüşüne karşı başarılı bir performans için birçok teknik gerekliliğin hesaba katılması ve çözülmesi gerekir. Ön arıtma prosesi atıkların çamurda yeterli kıvamda (yoğunlukta) ve kaba iri taneli, ağır kirleticilerden yoksun olmalarını sağlamak açısından önemlidir. Ön arıtma prosesi elekler, tamburlar, ezme makineleri, presler, kırıcılar ve yüzdürme ünitelerinden oluşan komplike bir tesistir.

Çamur haline getirilmiş atıklar ağır fraksiyonlar ve yüzen hafif fraksiyonlar nedeniyle homojen bir yoğunlukta değildir. Anaerobik çürütme prosesi esnasında reaktörde üç faz bulunur. Dibe çöken ağır fraksiyonların ve yüzen hafif fraksiyonların periyodik olarak reaktörden dışarı alınması gerekir. Tam karıştırmalı

reaktörün bir başka teknik dezavantajı ise kısa çevrimin olmasıdır. Reaktörün kısa çevrim yapması biogaz dönüşümünü azaltmasının yanı sıra atıkların hijyenini de etkiler, örneğin patojen mikroorganizmaların ölmesi için minimum bir kalma zamanı gerekmektedir. Waasa prosesinde bu durum ana reaktöre bir ön – oda yapıp atığın birkaç gün burada bekletilmesiyle düzeltilmeye çalışılmıştır.

Katı atıkların çamur haline getirilmesi pompa ve borulama gibi ekipmanların maliyetini düşürür, ancak bu avantaj daha geniş reaktörler, daha büyük susuzlaştırma ekipmanı ve önemli ön arıtma basamaklarının yüksek yatırım maliyetleri ile dengelenir.

Atıkları sulandırmak için yüksek miktarda su (1 ton katı atık için yaklaşık 1m³ taze su) tüketilir. Suyun satın alınması ve daha sonra arıtılması yüksek maliyetler getirir. Ayrıca su hacmiyle artan reaktör hacmini ısıtmak için kuru sistemlere oranla daha fazla enerji gerekir.

6.1.2.3 İki aşamalı sistemler

İki aşamalı sistemlerde tipik olarak birinci aşamada sulandırma – asidifikasyon reaksiyonları gerçekleşir, reaksiyonların hızı selülozun hidrolizi ile sınırlanmıştır. İkinci aşamada ise asit oluşum ve metan oluşum reaksiyonları gerçekleşir bu reaksiyonlarda hız yavaş mikrobiyal büyüme hızıyla sınırlanmıştır.

İki aşamalı sistemlerin en basiti iki tam karıştırmalı reaktörün seri olarak bağlanmasıyla elde edilir. Kentsel katı atıkların organik kısmının biyogaza dönüşümü esnasında gerçekleşen reaksiyonlar reaktörlerde ayrı ayrı optimize edilirse tüm reaksiyon hızı ve biyogaz dönüşümü artar.

6.2 Aerobik Kompostlaştırma

Aerobik kompostlaştırma kentsel katı atıkların organik kısmının kompost olarak bilinen humus benzeri bir maddeye dönüştürülmesinde kullanılan biyolojik bir prosestir. Aerobik kompostlaştırma prosesi üç temel aşamadan meydana gelir: (1) Kentsel katı atıkların ön işlenmesi, (2) aerobik bozunma, (3) ürünün hazırlanması. Ön işleme aşaması atıkların parçalanması ve ayrılmasından oluşur. Parçalamanın amacı, özgül yüzey alanının çoğaltılmasıyla, malzemenin hava ve su tutma kapasitesini yükseltip, mikroorganizmaların gerçekleştirdikleri bozuşma prosesini kolaylaştırmaktır. Kesici değirmenler, toplu değirmenler, döner elek, parçalayıcı elekler ve silindirik kırıcı standart parçalama ekipmanlarıdır. Ayırma işleminde kompostlaştırılmayan plastikler ve metaller ile kompost kalitesini düşüren kaba fraksiyonlar ve küller ayrılır.

Bir kompostlaştırma tesisinin ana birimi fermentasyon (çürüme) sistemidir. Atıkların fermentasyonu üç aşamada gerçekleşir. Ön ve ana çürüme, kompostlaştırma prosesinin ilk safhalarıdır. Ön çürümeye, çürüme prosesi mezofil bakteriler tarafından başlatılır. Atık hızla ısınır (oto ısınma prosesi) ve mikro organizmalarının bozuşma prosesi başlar. Bu aşamada, sıcaklık 75 °C'ye çıkabilir (Olgunluk derecesi I). Ön çürüme, kompostlaştırma prosesinin ilk günlerinde meydana gelir.

Ana çürüme sırasında, sıcaklık mikrobiyolojik faaliyetten kaynaklanan ısı üretiminden dolayı yüksek seviyede seyrederek. Bu safhada, bakteriyel bozuşmada başlıca faal olan mikro- organizmalar, termofil bakterilerdir (Olgunluk derecesi II, III). Bu aşama, teknolojiye ve tanımlamaya bağlı olarak, 2 - 4 hafta sürebilir.

Son çürüme aşamasında, kompost olgunlaşır ve hijyenizasyon tamamlanır. Mikro-organizmaların gerçekleştirdikleri biyolojik bozuşma yavaşlar, aynı zamanda emisyonlar da azalır. Son çürüme aşamasında, havalandırma ve nemlendirmeye genellikle gerek kalmaz. Tam hijyenizasyon ve homojen olgunlaşmayı sağlamak için, taşıma/ karıştırmaya devam edilmelidir. Son çürüme aşamasının sonucunda elde edilen kompost, olgunluk derecesi IV veya V'e ulaşmıştır.

Kompostlaştırma süreci sırasında, optimum fermentasyon koşulları sağlanmalıdır. Optimizasyondaki belirleyici faktörler,

- 1) taşıma/ karıştırma
- 2) havalandırma

3) nemlendirmedir.

Optimum çürüme koşullarını sağlamak için, kompostlaştırılacak atık kütesindeki su muhtevası % 40 - % 65 arasında tutulmalıdır. Sıcaklık, ya iki hafta boyunca en az 55 °C'de veya bir hafta boyunca 65 °C'de (kapalı tesislerde 60 °C yeterlidir) tutulmalıdır. pH değeri 7'de muhafaza edilmelidir. pH ayarı, daha evvel atık analizleriyle tespit edilen çöp bileşimine göre ayarlanarak veya kimyasal/ kireç ilâvesiyle yapılabilir. Atık içindeki organik malzeme muhtevası, yanma kaybını ölçerek belirlenebilir. Tatmin edici bir kompostlaştırma prosesini sağlamak için, yanma kaybı % 40'ın altına düşmemelidir. Kompostun hijyenik açıdan tüm sakıncalarını ortadan kaldırmak için, yukarıdaki koşulların sağlanması şarttır.

6.2.1 Kompostlaştırma sistemleri

Yığın kompostlaştırma, kompostlaştırma tünelleri ve kompostlaştırma konteynırları kentsel katı atıkların organik fraksiyonunun kompostlaştırılmasında kullanılan üç temel metottur. [38]

Yığınlarda Kompostlaştırma : Yığınlarda kompostlaştırma metodu en eski ve en kolay metottur. 5000t/yıl ve daha fazla kapasiteli kompostlaştırma tesisleri için, sadece taşıma/ karıştırmalı sistemler uygundur. Yığın metodu, ön fermentasyon, ana fermentasyon ve nihai fermentasyon periyotlarını kapsar. Mikro organizmaların bol miktarda üremesi için belli bir çöp miktarı ve belli bir hacim gereklidir. Eğer gerekli hacim sağlanırsa, ekzoterm aerobik proseslerde oluşan ve ham çöpün hijyenizasyonu için gerekli olan sıcaklıklara ulaşılabilir ve bu sıcaklık gerekli süre boyunca muhafaza edilebilir. Minimum atık miktarı, yaklaşık 50 - 100 kg ağırlığındadır. Bu atıklar, tercihen yığın şeklinde düzenlenmelidir. Kompostlaştırma yığının şekli, büyüklüğü ve işletilmesi için, mikroorganizmaların oksijen temini belirleyici faktördür. Doğal hava sirkülasyonunun yanı sıra sun'î havalandırma ve malzeme yüzeylerinin yenilenmesi için karıştırıcı ve taşıyıcı makineler kullanılmaktadır. 10000-15000 t/yıldan büyük kapasiteli kompostlaştırma tesisleri için, otomatik karıştırma/ taşıma tercih edilir.

Kompostlaştırma Tünelleri: Kompostlaştırma tünelleri hareketsiz reaktörlerden oluşur. Bu reaktörlerde, kompostlaştırılacak malzeme havalandırılır, nemlendirilir ve bazı sistemlerde ayrıca taşıma/ karıştırma da yapılır. Reaktör hücreleri tek tek (kompostlaştırma tünelleri) veya gruplar halinde kapatılabilir (kompostlaştırma

sıraları). Bu sistem, orta ve yüksek kapasiteli tesisler için uygundur. Tünel sistemindeki fermentasyon süreci yaklaşık 2 haftadır. Bu aşamadan sonra, ham kompost yığın metodu ile hijyenize edilmelidir.

Kompostlaştırma Hücreleri: Kompostlaştırma hücreleri veya kompostlaştırma konteynırı sistemlerinde, kompostlaştırılacak malzeme 20 – 70 m³ hacimli konteynırlara doldurulur. Bu konteynırlarda, atmosfer koşullarının ölçümleri gerçekleştirilebilir, yeterli su ve hava ilâvesi ile optimum fermentasyon şartlarına ulaşılabilir. Böylece, ön ve ana çürüme aşamaları hızlandırılmış olur. Genelde, konteynırlar içinde karıştırma veya taşıma gerçekleşmez. Dizi reaktör modunda işletilirler.

6.2.2 Kompost uygulamaları

Kompost, şu amaçlar için gübre ya da humus toprağı olarak kullanılabilir:

- Tarım
- Ormancılık
- Ağaçlandırma
- Bahçe ve park bakımı
- Peyzaj mimarlığı
- Endüstriyel hava arıtımı için kompost filtrelerinin yapısı

Kompost, endüstriyel hava temizlemede filtre malzemesi olarak kullanılabilir. Biyofiltre kullanımı, aşağıdaki sektörlerde yaygındır:

- Gıda endüstrisi
- Kimya endüstrisi (plastik/ çözücü üretimi)
- Endüstriyel ve evsel atıksu arıtma tesisleri
- Katı atık kompostlaştırma, ayırma ve depolama tesisleri
- Hayvancılık
- Deri endüstrisi [38]

7. ÖRNEK ÇALIŞMA: TRABZON-RİZE BÖLGESİ

7.1 Trabzon-Rize Bölgesi Genel Bilgileri

Coğrafi bilgiler : Trabzon ve Rize illeri, Türkiye'nin kuzeydoğu sahilinde yer almaktadır. Tüm alan dağlık bir yapıya sahip olup, nüfusun çoğunluğu dağlar ile kıyı arasında kalan dar düzlük alanlarda bulunmaktadır. Nüfus yoğunluğunun bir kısmı ise sahil şeridinde dik devam eden nehir kıyılarında yaşamaktadır. Dağlar genellikle denize paralel devam eder ve bu topografyayı bölen nehirler Karadeniz'e dökülürler.

İklim : Trabzon-Rize bölgesinin kıyı kesiminde her mevsimi yağışlı, yazları nemli-sıcak, kışları az soğuk ılık bir iklim hakimdir. Yüksek kesimlere gidildikçe yazlar daha serin, kışlar daha sert ve yağışlar daha fazladır. Bölgenin yağış rejimi birbirlerine çok yakın olmalarına rağmen Trabzon ve Rize arasında önemli farklılıklar gösterir. Rize' de yıllık ortalama yağış miktarı, 2300 mm iken Trabzon'da 834 mm'dir. Bugüne kadar Trabzon ve Rize için kaydedilen en yüksek ve en düşük sıcaklık değerleri sırasıyla 38,20C ve 39,20C; -7,4C ve -7,0 C' dir. Yıllık ortalama sıcaklıklar 14,50 C ve 14,10C' dir. Yıllık ortalama nem miktarı Trabzon için %71, Rize için %76' dır. Rüzgarlar genellikle güneyden eserler. [37]

Nüfus bilgileri : Trabzon ve Rize illerinin 1990 ve 2000 yılı nüfus sayım sonuçlarına bakıldığında kentlerde nüfus yoğunluğunun daha fazla arttığı ve Trabzon ili nüfus artış hızının Rize'ye oranla oldukça fazla olduğu görülmektedir.

Tablo7.1 1990 ve 2000 yılı nüfus sayım sonuçları [37]

	1990			2000			Yıllık artış hızı %		
	Toplam	Şehir	Köyler	Toplam	Şehir	Köyler	Toplam	Şehir	Köyler
Trabzon	795.849	331.321	464.528	975.137	478.954	496.183	20,31	36,84	6,59
Rize	348.776	134.082	214.694	365.938	205.245	160.693	4,80	42,56	-28,96

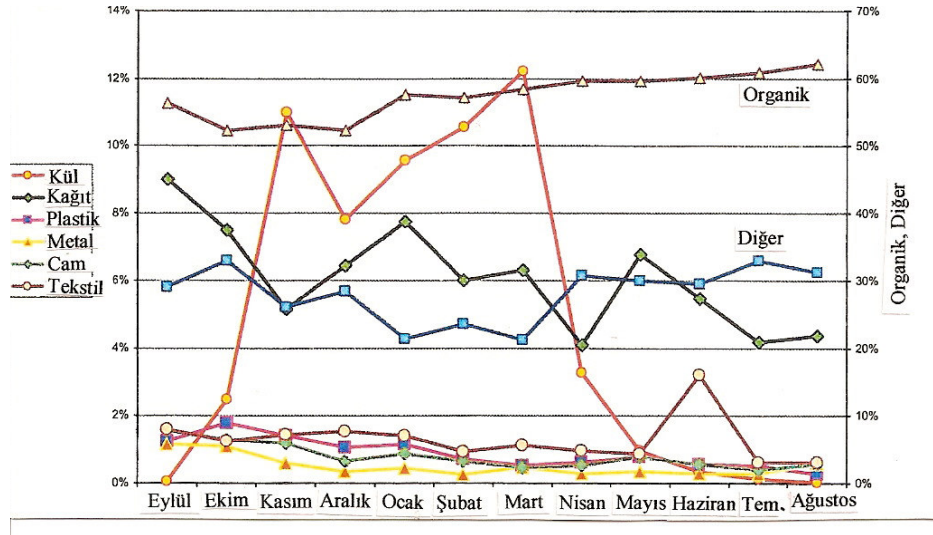
Ekonomi : Bölgenin tarım ve ticarete dayalı bir ekonomisi vardır. Trabzon, ticaret ve gemi taşımacılığı konusunda oldukça popüler bir şehirdir. Rize çay üretimiyle tanınmaktadır. Çaya ek olarak fındık da bölgenin en önemli ürünlerindendir.

Trabzon'un ekonomik gelişiminin Rize'den daha iyi olduğu görülmektedir. Bunun sebepleri Trabzon' un NIS (Newly Independent States) ülkeleri olarak bilinen Azerbaycan, Belarus, Ermenistan, Gürcistan, Kazakistan, Kırgızistan, Moldova, Özbekistan, Rusya, Tacikistan, Türkmenistan ve Ukrayna ile yapılan ticarete bir merkez haline gelmesi ve endüstriyel faaliyetlerinin daha çeşitli olmasıdır. [37]

7.2 Trabzon-Rize Bölgesi Atık Miktarı ve Bileşimi

Trabzon-Rize bölgesinin atık miktarı ve özelliklerini belirlemek için yapılmış birçok çalışma mevcuttur.

Trabzon ili katı atık özellikleri üzerine Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde hazırlanan bir doktora tezinde kullanılmak amacıyla oldukça kapsamlı bir çalışma yapılmıştır. Yapılan incelemeler 1989 Eylül ayından 1990 Ağustos ayına kadar olan zaman diliminde gerçekleştirilmiştir. Toplanan veriler Trabzon ilinin bir yıl boyunca atık bileşimindeki değişimleri göstermektedir, bu değişimler şekil 7.1' de gösterilmektedir.



Şekil 7.1 Trabzon' daki atık bileşiminin aylık değişimleri (1989-1990) [37]

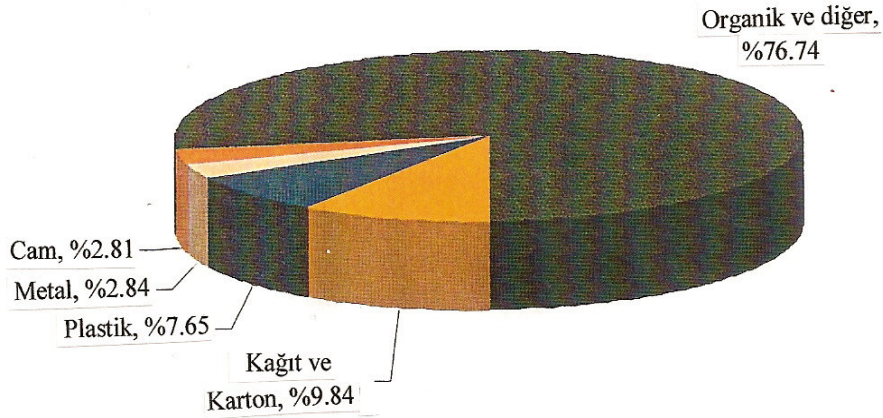
Kış aylarında kül miktarının yaklaşık % 10 seviyelerinde olduğu görülmektedir. Organik atık miktarının ise yaz aylarında daha fazla meyve ve sebze tüketimi nedeniyle arttığı görülmektedir. Çalışmada yapılan atık analizinde organik maddelerin yüzdesinin oldukça yüksek, geri dönüştürülebilir maddelerin ise % 8,3' lük bir yüzdeye sahip oldukları görülmektedir. Bu çalışmada ayrıca atığın pH değeri,

toplam azot ve karbon miktarları gibi özellikleri de incelenmiştir. Kimyasal analiz sonuçları tablo 7.2’de verilmiştir.

Tablo7.2 Trabzon ili katı atık özellikleri (1989-1990) [37]

Özellik	Ortalama değer
pH	6,32
Toplam azot	% 0,51
Toplam karbon	% 35,12
Su miktarı	% 76,25
Organik madde miktarı	% 21,48
Net kalorifik değer	1703 kcal/kg

2000 yılında Trabzon Belediyesi tarafından yapılan çalışma sonucu elde edilen atık dağılımı şekil 7.2’ de gösterilmiştir. Bu çalışmada geri dönüştürülebilir maddelerin oranı % 23,14 olarak belirlenmiştir ve bu değer önceki çalışmalara oranla oldukça yüksek bir değerdir. [37]



Şekil 7.2 2000 yılında belediye tarafından yapılan katı atık analizi [37]

2004 yılında ERM (Environmental Research Management) tarafından yapılan son çalışmalara göre Trabzon ve Rize’ de kişi başına günde 0,68 kg atık üretildiği görülmüştür. Tablo 7. 3’de bazı illerimizin atık miktarları görülmektedir. Diğer

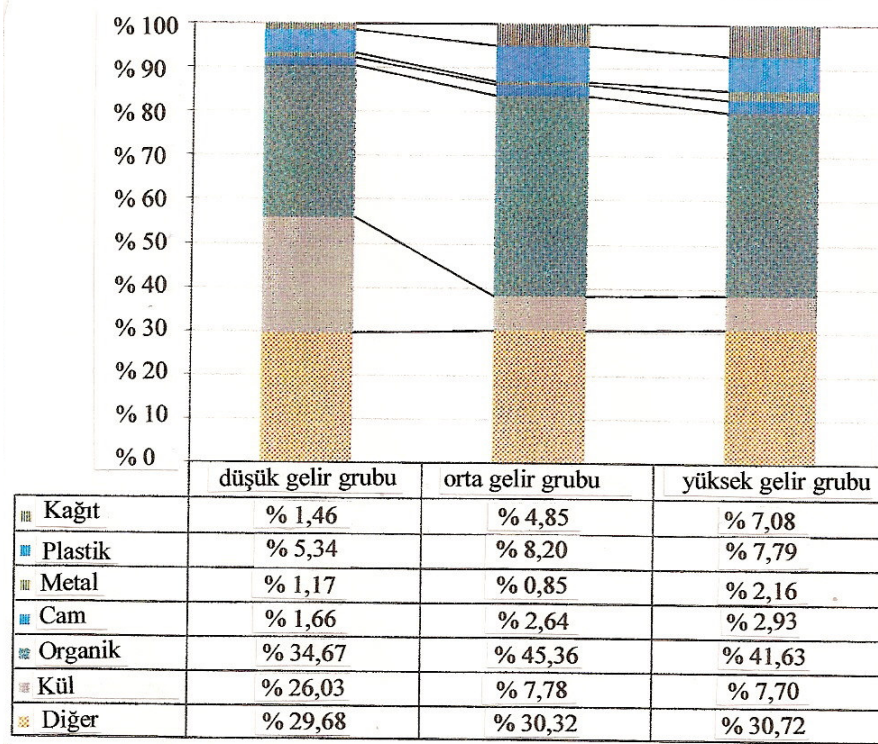
illerdeki değerlerle de kıyaslanınca Türkiye için 0,6-0,7 kg/kişi/gün atığın ortalama bir değer olduğunu söyleyebiliriz.

Tablo 7.3 Bazı illerin spesifik atık miktarları [37]

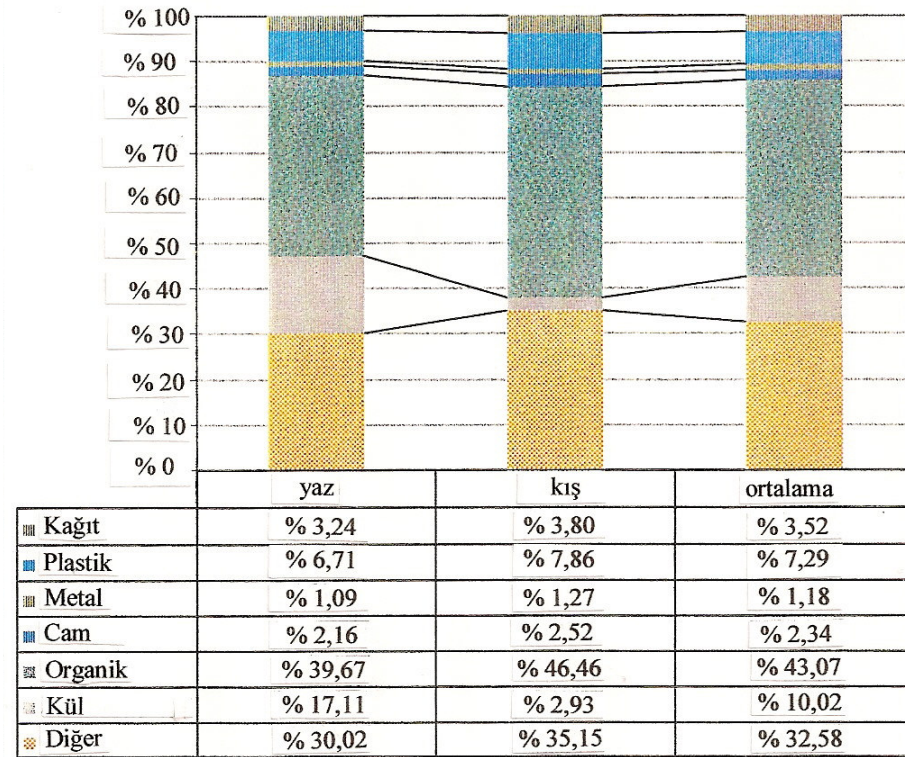
	Fethiye 2001	Samsun 1999	Denizli 1997	Ankara 1993	Bursa 1993
Örnek boyutu					
Nüfus	59800	331801	305000	335000	375000
Atık miktarı (kg/kişi/gün)	0,7	0,67	0,76	0,65	0,62

Atık bileşiminin saptanması için tüm proje bölgesinin atık özellikleri belirlenecek şekilde örnekler alınmıştır. Yapılan incelemeler sonucu evsel atıkların bileşimi farklı gelir grupları için şekil 7.3’ de görülmektedir. Şekil 7.1’ de görüldüğü gibi düşük gelir grubundaki atık bileşiminde kül miktarı oldukça fazla buna karşılık geri dönüştürülebilen ve organik fraksiyon daha küçük bir paya sahiptir. [37]

Trabzon nüfusunun %5,68’ i yüksek gelir grubuna, %43,15’ i orta düzey gelir grubuna, % 51,17’si ise düşük gelir grubuna dahildir. Bu bilgiler temelinde yaz ve kış mevsimleri için ortalama atık bileşimi belirlenmiştir. Tüm yıl için ortalama atık bileşimi hesaplanırken spesifik atık miktarının yaz mevsiminde değişmediği kabul edilmiştir ve kül miktarı diğer fraksiyonların dağılımı belirlendikten sonra kalan miktar olarak alınmıştır. Bu kabuller doğrultusunda yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen veriler şekil 7.4’ de gösterilmektedir. “Diğer” şeklinde belirtilen ve yüksek bir yüzdeye sahip olan fraksiyon 10 mm’ den küçük tekstil, lastik, elektro atık ve ağaç atıklarını kapsamaktadır. [37]



Şekil 7.3 Gelir gruplarına göre atıkların bileşimi (2004) [37]



Şekil 7.4 Yaz ve kış mevsimlerinde atık bileşimi (2004) [37]

7.3 Mevcut Katı Atık Yönetim Sistemi

Bölgedeki mevcut atık yönetim sisteminde belediye tarafından herhangi bir ayırma işlemi uygulanmamaktadır. Atıklar düzenli olarak toplanmakta ve vahşi çöp döküm sahasına dökülmektedir. Atıktaki geri kazanılabilen maddelerden kağıt, cam ve metallerin bir kısmı korsan toplayıcılar tarafından toplanmaktadır. Ayrıca belediyenin anlaştığı bir hurda firması da vahşi çöp döküm sahasında ekonomik değeri olan maddeleri toplamaktadır. [37]

Klinik atıklar bölgedeki hastane ve kliniklerden kaynaklanmaktadır. Trabzon’ da, bazı klinik atıklarının düşük bir ısıda yakıldığı bir ünite bulunmaktadır. Diğer klinik atıklar, çöp döküm sahasında evsel/ ticari atıklarla birlikte kontrolsüz bir şekilde bertaraf edilmektedir. Klinik atıkların Tıbbi Atık Kontrol Yönetmeliğine uygun olarak ayrı depolandıkları yerlerde bile, bunlar çoğunlukla diğer evsel atıklarla birlikte toplanmaktadır. [37]

Atık sular Trabzon’da sadece mekanik olarak arıtılmaktadır. Bu yüzden proje bölgesinde atık su çamuru oluşmamaktadır. Ancak 2014 yılında atık su arıtma tesisi yapılacaktır, tesiste üretilcek çamur da depolama sahasına döküleceği için projeksiyonlarda ve yapılan hesaplamalarda dikkate alınmıştır.[37]

Tehlikeli atıkların bertarafından belediye sorumlu değildir. Oluşan atıklar üreten firma tarafından bertaraf edilmektedir. Örneğin Petrol Ofisi şirketi her yıl 35 ton atığı Trabzon’dan İzmit’e göndermektedir.

Trabzon-Rize bölgesinde üretilcek olan atık miktarları için gerçekleştirilen projeksiyon tablo 7.4’ de görülmektedir. Atık miktarındaki artışın sadece nüfus artışıyla bağlantılı olarak belirlenmiştir. [37]

Tablo 7.4 Trabzon-Rize bölgesi atık projeksiyonu [37]

	Nüfus	Evsel katı atıklar	Tehlikeli atıklar	Tıbbi atıklar	İnşaat atıkları	Atıksu çamuru
Yıl	Kişi	Ton/yıl	Ton/yıl	Ton/yıl	Ton/yıl	Ton/yıl
2004	593068	132875	354	490	11861	0
2005	614261	137711	367	508	12285	0
2006	635843	142651	380	526	12717	0
2007	658302	147793	394	545	13166	0
2008	681675	153146	409	565	13633	0
2009	706002	158717	423	586	14120	0
2010	731324	164518	439	607	14626	0
2011	747665	168244	449	621	14953	0
2012	764387	172058	459	635	15288	0
2013	781499	175961	470	649	15630	0
2014	799011	179955	480	664	15980	0
2015	816933	184043	491	679	16339	19828
2016	835273	188226	502	695	16705	20324
2017	854042	192508	514	711	17081	20832
2018	873250	196891	526	727	17465	21353
2019	892908	201376	538	743	17858	21886
2020	913025	205967	550	760	18261	39346
2021	922939	208215	556	769	18459	39779
2022	932962	210487	562	777	18659	40216
2023	943096	212785	568	786	18862	40659
2024	953342	215109	574	794	19067	41106
2025	963702	217458	581	803	19274	41558
2026	974176	219832	587	812	19484	42015
2027	984767	222234	593	821	19695	42477

7.4 Trabzon-Rize Bölgesi İçin Kentsel Katı Atıklardan Enerji Üretim Seçeneklerinin Değerlendirilmesi

Mevcut katı atık yönetim sistemi oldukça zayıftır. Trabzon-Rize bölgesi için ilk aşamada bir düzenli depolama sahası yapılması planlanmaktadır. Maliyetleri ve teknolojilerinin daha karmaşık olmaları sebebiyle diğer atık bertaraf yöntemleri hazırlanan raporda alternatif olarak değerlendirilmemiştir. Atık yönetim sistemlerinde atığın bertaraf edilirken enerji potansiyelinin değerlendirilmesi günümüzde giderek önem kazanmaktadır. Atıklardan enerji elde edilmesi için mevcut teknolojiler daha da iyileştirilerek ve yeni teknolojiler geliştirilerek tüm dünyada yaygın bir şekilde kullanılması hedeflenmektedir. Bu çalışmada proje bölgesi için kentsel katı atıklardan enerji üretim teknolojileri değerlendirilip, yatırım maliyet tahminleri yapılmaya çalışılmıştır. Daha detaylı fizibilite çalışmalarının yapılabilmesi için daha fazla veriye ihtiyaç duyulmaktadır.

Kentsel katı atıklardan enerji geri kazanım teknolojileri 1) Düzenli depolama, 2) Yakma, 3) Gazlaştırma, 4) Anaerobik çürütmedir. Bu teknolojilerin sırasıyla proje bölgesi için uygulanabilirliği değerlendirilmiştir.

7.4.1 Düzenli depolama

Düzenli depolama ve depo gazından enerji eldesi teknolojisinin basitliği ve düşük maliyeti sebebiyle ilk akla gelen seçenektir. Proje bölgesinde topografik şartlardan dolayı çok büyük depolama sahaları oluşturmak mümkün değildir. Trabzon Orman ve Çevre İl Müdürlüğü tarafından 2004 yılında hazırlatılan raporda Sürmene Çamburnu mevkiindeki ~ 1,5 milyon m³ kapasiteli bir sahanın düzenli depolama için en uygun alan olduğu belirtilmiştir. Sahada 10 yıl boyunca atık depolamak mümkündür. Sahanın 2006 yılında açılacağı ve 2015 yılında kapanacağı öngörülmüştür. Atık sıkıştırma oranı 1,11 olarak kabul edilmiştir. Sahada depolanacak atık miktarı tablo 7.5 'de verilmiştir. Ayrıca depolama sahasında zararlı atık ve inşaat atıkları bulunmayacaktır, yani birlikte bertaraf söz konusu değildir. [37]

Depolama sahası için hazırlanan yatırım maliyeti tahmini ek A'da tablo A.1.'de verilmektedir. Yatırım maliyeti başlıca sahanın inşaatı, temel kapatma sistemi ve sızıntı suyu, yüzey kapatması ve yüzey suyu, gaz toplama sistemi ve işletme binası, telekomünikasyon gibi kalemlerden oluşur.

Tablo 7.5 Düzenli depolama sahasında depolanacak atık miktarı [37]

Yıl	Kümülatif atık miktarı (ton)
2006	142651
2007	290444
2008	443590
2009	602307
2010	766825
2011	935069
2012	1107127
2013	1283088
2014	1463043
2015	1666914

Enerji geri kazanım tesisinin kapasitesini belirleyebilmek için öncelikle oluşacak depo gazını belirlemek gerekir. Depolama sahasında üretilen gazın hesaplanması için EPA tarafından hazırlanan LandGEM ve multi phase modelleri kullanılmıştır.

LandGEM modelinin uygulanması: LandGEM modelinde hazır olarak verilen CAA ve AP-42 değerlerinin her ikisi için de hesaplama yapılmıştır. Hesaplama yapılacak sabitlerin belirlenmesi için bölgeye düşen yıllık yağış miktarı kriter olarak alınmaktadır. Bölge yılda 640 mm' den daha fazla yağış almaktadır. Buna göre CAA değerleri $L_0 = 170 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ton}$ atık ve $k = 0,05 \text{ 1/yıl}$ olarak alınmıştır. AP42 değerleri ise $L_0 = 100 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ton}$ atık ve $k = 0,04 \text{ 1/yıl}$ olarak alınmıştır. [19]

LandGEM modelinde metan emisyon miktarları hesaplanmaktadır. Depo gazının %50'sinin metan olduğu kabulüyle elde edilen metan üretim değerleri iki ile çarpılarak depo gazı üretim miktarı hesaplanmıştır. Hesaplamalar LandGEM modeli için saha kapatıldıktan sonra 200 yıl boyunca yapılmaktadır. AP-42 ve CAA sabitleri kullanılarak elde edilen sonuçlar ek B' de verilmektedir.

Multi phase modelinin uygulanması: Multi phase modelinde atığın organik karbon miktarı bilinmelidir. Bunun için atık bileşenlerinin literatürde verilen değerlerine göre organik karbon miktarı hesaplanır. Proje bölgesi için detaylı elek analizleri yapılmadığından organik karbon miktarı hesaplanamamıştır.

Denizli ili için daha önce yapılan bir çalışmada bu değer 110 kgC/ton atık olarak belirlenmiştir. Trabzon-Rize bölgesindeki atık bileşimi de çok farklı olmadığından

hesaplamalarda bu bölge için organik karbon miktarı 100 kgC/ton kabul edilmiştir. Modellerin karşılaştırılabilmesi için hesaplamalar LandGEM modelinde olduğu gibi saha kapatıldıktan sonra 200 yıl boyunca yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ek C' de verilmektedir. [20]

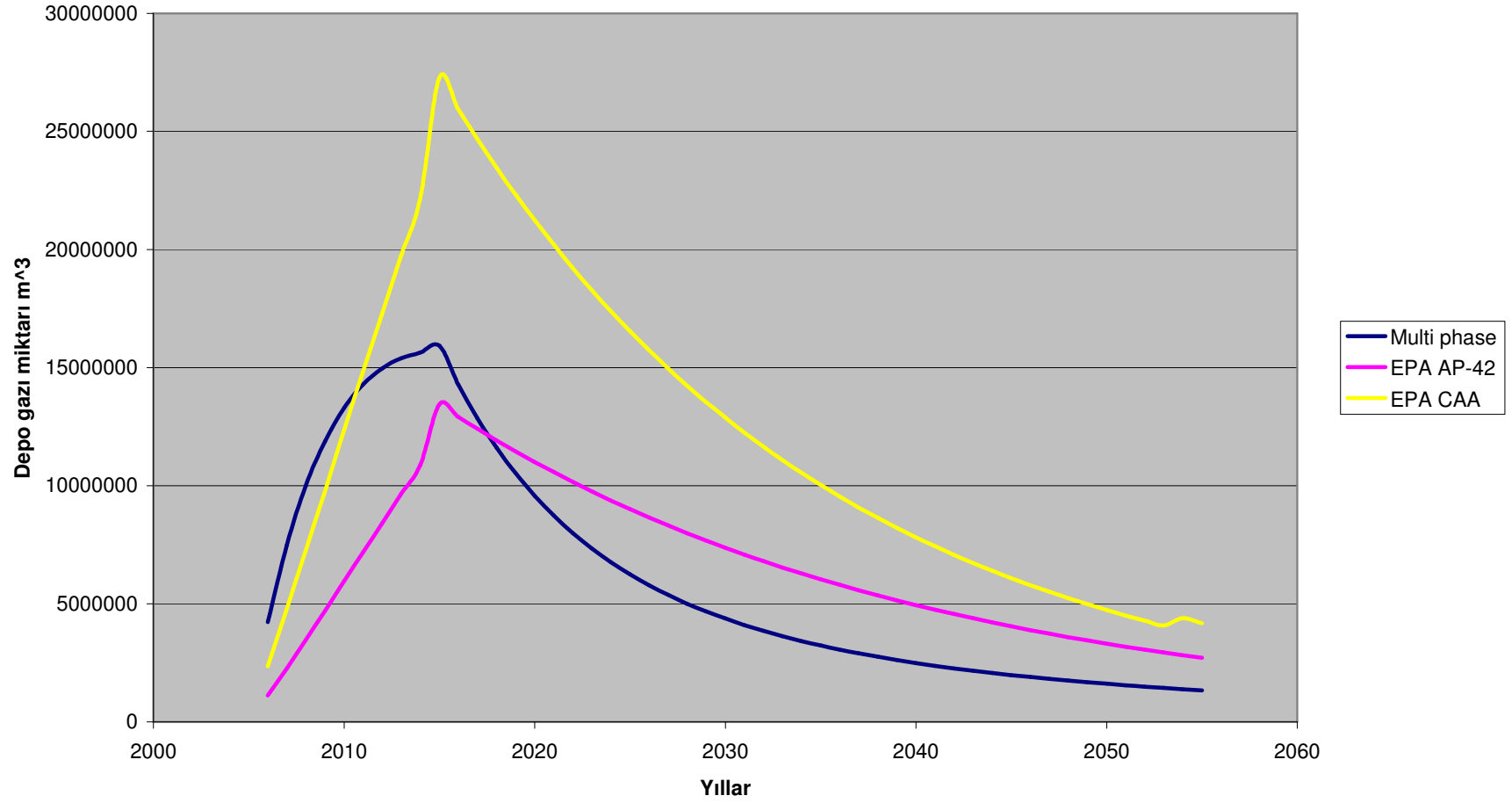
Model sonuçlarının özeti tablo 7.6 'da görülmektedir. AP-42 ve multi phase modelinin sonuçları birbirine yakın olmakla beraber CAA değerleri diğer modellere göre oldukça yüksektir. Şekil 7.5'te model sonuçlarının grafiği görülmektedir.

Tablo 7.6 Model sonuçlarının özeti (m³/yıl)

Yıl	Multi phase	LandGEM AP-42	LandGEM CAA
2006	4229273	1118685	2365438
2007	7494594	2272573	4781884
2008	9992965	3463537	7252886
2009	11883211	4693459	9781974
2010	13293253	5964411	12373026
2011	14290516	7179716	14825965
2012	14967506	8403872	17275664
2013	15397729	9637418	19723677
2014	15639444	10880931	22171613
2015	15928154	13442436	27273776
2016	14288238	12915351	25943618
2017	12862082	12408933	24678333
2018	11618513	11922372	23474756
2019	10531186	11454889	22329879
2020	9577809	11005736	21240838
2021	8739495	10574195	20204910
2022	8000221	10159575	19219505
2023	7346374	9761212	18282159
2024	6766372	9378470	17390527
2025	6250344	9010735	16542381
2026	5789866	8657419	15735600
2027	5377734	8317956	14968166
2028	5007779	7991805	14238160
2029	4674707	7678441	13543756
2030	4373968	7377366	12883219

Depo gazının enerji potansiyeli: Oluşacak depo gazının tümünün geri kazanılması mümkün değildir. Ortalama olarak oluşan gazın sahanın iyi bir şekilde kapatılması şartıyla %60'ı geri kazanılabilir. Metan gazının elektrik enerjisi eşdeğeri 10kwh/m³'tür. Depo gazının %50'sinin metan olduğu kabulüyle, depo gazının enerji eşdeğeri 5kwh/m³ alınmıştır. Enerji potansiyeli her model için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Hesaplamalar ek D'de görülmektedir. Sonuçların özeti tablo 7.7'dedir. Depo gazı geri kazanım seçenekleri değerlendirilirken LandGEM modeli AP-42 sabitleri için yapılan hesaplamalar baz alınmıştır.

Modellerin karşılaştırılması



Şekil 7.5 Model sonuçlarının karşılaştırılması

Depo Gazı Enerji Geri Kazanım Seçenekleri

Depo gazının enerji değerinden faydalanmak için kullanılan teknolojiler kazanlarda yakılarak direkt ısıtma, içten yanmalı motorlar ve gaz türbinleri kullanılarak elektrik enerjisi üretimi ve kojenerasyondur.

Yapılan hesaplamalar sonucu depo gazının direkt ısıtma amaçlı veya içten yanmalı motorlar kullanılarak ısı ve elektrik üretimi için kullanılmasının en uygun alternatifler olduğu görülmüştür. Gaz türbini kullanımı bu kadar küçük kapasiteli tesisler için uygun değildir. Yakıt pilleri, boru hattı kalitesinde gaza saflaştırma ve kimyasal üretim proseslerinde besleme stoğu olarak kullanımı gibi diğer alternatif yöntemler ise dünyada henüz yaygın olarak kullanılmadığı ve teknoloji geliştirme aşamasında oldukları için düşünülmemektedir.

Tablo 7.7 Modellere göre enerji potansiyelleri

Yıl	Multi Phase Modeline Göre Enerji Potansiyeli(MW)	LandGEM AP-42 Modeline Göre Enerji Potansiyeli(MW)	LandGEM CAA Modeline Göre Enerji Potansiyeli(MW)
2006	1,6	0,4	0,9
2007	2,8	0,9	1,8
2008	3,8	1,3	2,7
2009	4,5	1,8	3,7
2010	5,0	2,2	4,6
2011	5,4	2,7	5,6
2012	5,6	3,2	6,5
2013	5,8	3,6	7,4
2014	5,9	4,1	8,3
2015	6,0	5,1	10,2
2016	5,4	4,9	9,7
2017	4,8	4,7	9,3
2018	4,4	4,5	8,8
2019	4,0	4,3	8,4
2020	3,6	4,1	8,0
2021	3,3	4,0	7,6
2022	3,0	3,8	7,2
2023	2,8	3,7	6,9
2024	2,5	3,5	6,5
2025	2,3	3,4	6,2
2026	2,2	3,3	5,9
2027	2,0	3,1	5,6
2028	1,9	3,0	5,4
2029	1,8	2,9	5,1
2030	1,6	2,8	4,8

1)Direkt ısıtma amaçlı kullanım: Bunun için doğalgaz kazanlarından faydalanmak mümkündür. Çekilen gaz önce bir arıtma işleminden geçirilir. Arıtma işlemindeki en büyük amaç gazın neminin giderilmesidir. Ayrıca bazı safsızlıklar da uzaklaştırılır.

Tesisten 15 yıl süreyle yararlanmak mümkündür. Kazan kapasitesinin seçimi yapılırken, gaz debisinde zamanla oluşacak değişimler dikkate alınarak yüksek kapasiteli bir kazan yerine paralel bağlı daha düşük kapasiteli kazanların kullanılması uygun görülmüştür. Tesisin kapasitesi 3.7 MW olarak belirlenmiştir. Buna göre tesiste 4 adet 800.000 kcal/h (930 kW) kapasiteli doğal gaz kazanı kullanılabilir. Gazın kazan sistemine taşınması için HDPE borular kullanılması uygundur. Isı iletimi için gerekli boru hattı 7,5 km olarak alınmıştır. Bu şekilde elde edilecek ısı depolama sahası yakınındaki köylerde konutların ısıtılmasında kullanılabilir.

Direkt ısıtma amaçlı bir tesis için yatırım maliyeti tahmini çıkartılmıştır. Maliyet hesabı yapılırken “Bayındırlık ve İskan Bakanlığı 2005 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları esas alınmıştır.[38] Tablo 7.8’ de yatırım maliyeti tahmini görülmektedir.

Tablo 7.8 Direkt ısıtma sistemi yatırım maliyeti tahmini

Ekipman	Birim	Miktar	Birim fiyat (YTL)	Toplam fiyat (YTL)
Kazan	adet	4	11.660	46.640
Brülör	adet	4	9.116	36.464
Pompa	adet	8	1.175	9.400
Vanalar	toplam	1	18.500	18.500
Boru hattı	m	7500	9,2	69.000
Proje,mühendislik	toplam	1	1	18.000
Opsiyon % 20				39.600
TOPLAM				237.604

2)İçten Yanmalı Motorlu Kojenerasyon Tesisi: İçten yanmalı motorlar kullanılarak depo gazından elektrik ve ısı üretmek mümkündür. Bu amaçla 3 adet 511 kW kapasiteli içten yanmalı motor 1,5 MW’lık bir tesis için uygundur. Depo gazı içten yanmalı motorlara verilmeden önce bir ön arıtmadan geçirilir ve sıkıştırıldıktan sonra motorlara yollanır. Üretilen elektrik şebekeye verilir. Isı ise civardaki konutları ısıtmak amacıyla kullanılabilir yada seraları ısıtmak için de kullanılabilir.

Tesiste Jenbacher 212 tipi gaz motoru kullanılması uygun görülmüştür. Bir gaz motorunun fiyatı 350.000 € (560.000 YTL) dur.[39] Tesis inşaatı, yardımcı ekipmanlar, mühendislik hizmetleriyle böyle bir tesisin yaklaşık maliyeti 1.500.000 € (2.400.000 YTL) dur.

7.4.2 Yakma

Trabzon-Rize bölgesindeki atıkların yakılması sonucu enerji üretilip üretilmeyeceğinin belirlenmesi için atığın kalorifik değerinin hesaplanması

gerekmektedir. Eldeki mevcut verilerle atığın fiziksel, elementel ve endüstriyel analizlerine göre kalorifik değerinin hesaplanması mümkün değildir. Hazırlanan raporlarda atığın kalorifik değerinin 3000-4000 kJ/kg olduğu belirtilmektedir ki bu değer atıkların yakılarak enerji üretilmeyeceğini göstermektedir. [9] Atığın yakılması sonucu enerji üretilmesi için kalorifik değerinin 8000-9000 kJ/kg olması gerekmektedir. Yakma sistemlerinin baca gazı arıtma ekipmanları sebebiyle yüksek maliyetleri bu alternatifin çok fazla hesaba katılmadan elenmesine neden olmaktadır. Bu yüzden atıkların kalorifik değerlerinin hesaplanması için detaylı ve yeterli çalışmalar yapılmamaktadır. Ancak daha sağlıklı sonuçlar elde etmek için deneysel çalışmalarla bu değerin belirlenmesi gerekmektedir.

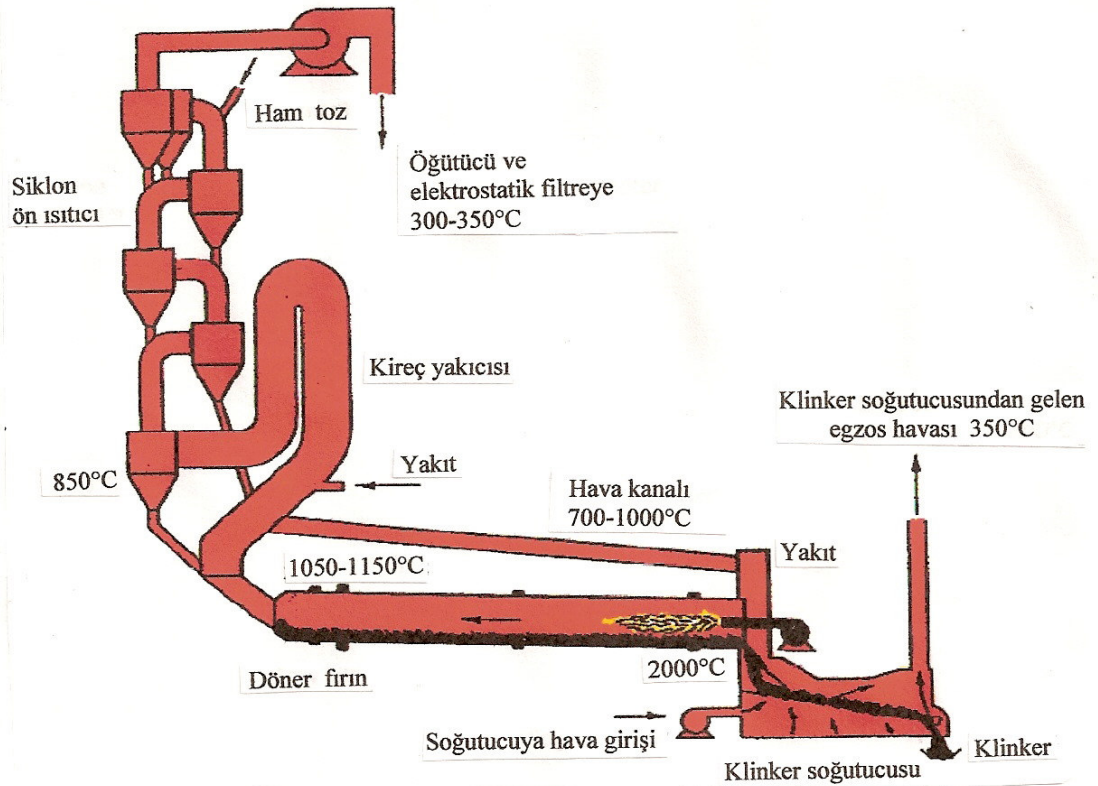
Yakma teknolojisi için bir başka alternatif ise atıkların işlenerek çimento fabrikasında ikincil yakıt olarak kullanılmasıdır. Bilindiği gibi çimento fabrikaları yüksek miktarda enerji gereksinimi olan fabrikalardır ve bunu fosil yakıtları yakarak sağlamaktadırlar. İşlenmiş atıkların fosil yakıtlarla birlikte yakılması fabrikaların yakıt maliyetlerini oldukça düşürmektedir. Trabzon'da bir çimento fabrikası bulunmaktadır.

Trabzon'daki çimento fabrikası günde 1100 ton klinker üretmektedir. Alçıtaşı (jips) ve tras eklendikten sonra üretilen klinker yaklaşık yıllık 450.000 ton çimentoya dönüşür. Tesis yılda 330 gün çalışmaktadır. Sürekli ve düzenli bir şekilde yakıtı ihtiyaç duyulması sebebiyle, çimento üretim prosesi atık yönetim konsepti için oldukça cazip bir alternatiftir. [37]

Trabzon' daki tesiste Rusya'dan alınan taş kömürü dışında başka bir yakıt kullanılmamaktadır. Yapılan analizler sonucu yakıtın %10,03 kül, %20,28 uçucu maddeden oluştuğu belirlenmiştir. Yakıtın alt ısı değeri 6198 kcal/kg' dır, sülfür miktarı sadece %0,67'dir. Klinker yakma prosesi için 920 kcal/kg ısı yeterlidir, bu durumda 163 ton/gün veya 6,8 ton/saat kömür tesisin ihtiyacını karşılamaktadır. [37]

Tesisteki çimento prosesi temel olarak normal bir üretim prosesidir. Şekil 7.6'da proses şeması görülmektedir. Klinker yakma prosesinin en önemli kısmı döner fırındır (uzunluk 60m, çap 4,2 m, eğim 3,5 derece). Kentsel katı atıkların yanması için minimum sıcaklıklar 875°C' den başlar, polivinil atıklar gibi daha stabil organik bileşikler için 1400°C' ye kadar çıkar. Yüksek sıcaklıkta kalma zamanı en az 2 saniye olmalıdır. Çimento üretiminde klinker fırında yüksek sıcaklıklarda yanar. Katı

atıklar granül halinde veya toz olarak yakılır. Diğer tehlikeli atık yakıcılarla karşılaştırıldığı zaman çimento fırınlarının özellikleri yüksek oranda toksik ve stabil organik atıkların bozunması için daha etkili bir teknolojidir. Çimento klinkerinin yanmasında 1400-1500°C sıcaklık gerekir, dolayısıyla alev sıcaklığı alevden materyale ısı transferini sağlamak için daha yüksek olmalıdır. Ön ısıtma fırınları gibi kısa fırınlarda gaz sıcaklığı yanma zonunda 2000°C'dir, orta fırında 1700°C ve fırın çıkışında yaklaşık 1100°C'dir. Kalma süresi yaklaşık 5 saniyedir. [37,40]



Şekil 7.6 Çimento tesisi akım şeması [40]

Hazırlanan raporda ön arıtma tesisinin 2008 yılında 13000 ton/yıl ikincil yakıt üretebileceği ön görülmüştür. Kağıt geri dönüşüm oranı %2,8 ve plastik dönüşüm oranı %5,8 olarak düşünülmüştür. İkincil yakıtın (düşük kalitede karışık karton ve kağıt ve düşük kalitede ıslak plastik maddeler içerir) ısıl değerine göre yılda 13000 ton ikincil yakıt 10400 ton kömürün yerine kullanılabilir. [37]

Genelde ikincil yakıt uygulaması çimento tesisinden çıkan emisyonların artmasına sebep olmaz. Her çimento üretim prosesi yüksek miktarlarda mineral ve yakıt tükettiğinden ikincil yakıtın tüm emisyonlar üzerindeki etkisi oldukça düşük kalır. Çimento fırınları alkalın şartları altında çalışırlar. Yani tüm klor fırına girdiğinde

nötralize olur ve NaCl, KCl, CaCl₂' ye dönüşür ve hepsi zehirsiz maddelerdir. Güçlü bir asidik bileşik olan hidrojen klorür emisyonları ise tehlikeli atık yakma tesislerindeki emisyonlardan daha düşüktür. Atık gazlar başlıcaları yanma havasından gelen azot, CaCO₃'ün kalsinasyonu sonucu oluşan CO₂, yakıtın yanması sonucu oluşan CO₂, yanma prosesi ve hammaddelerden gelen su buharı ve fazla oksijendir. [37,40]

Kentsel katı atıklardan elde edilen ikincil yakıtın kullanımı tesisin ekonomik durumunu olumlu yönde etkiler. İkincil yakıtın kullanılmasıyla gerekli fosil yakıt miktarı azalacaktır. Ekonomik durumun tam olarak incelenebilmesi için ikincil yakıt kullanımı için gerekli ek yatırım ve ekipmanların da dikkate alınması gerekmektedir. Yatırım maliyetleri ve işletme masraflarının iyi bir tahmininin yapılabilmesi için Trabzon çimento tesisi ile ilgili daha detaylı bilgiye ihtiyaç vardır. Böylece Avrupa'daki merkezi tesislerle karşılaştırılarak son dizayn yapılabilir. Kabaca bir tahmine göre ek yatırım maliyeti ikincil yakıtın alınması, depolanması ve besleme aletleri için 1milyon € ile 3 milyon € arasındadır. [37]

7.4.3 Gazlaştırma

Gazlaştırma teknolojisi henüz yaygın olarak kullanılmaya başlanmamış olsa da gelecekte atık bertarafı için kullanılacak temel teknolojilerden biri olacağı düşünülmektedir. Özellikle hava kirletici emisyonlarının yakma sistemlerine göre çok düşük olması ve elektrik üretim veriminin daha yüksek olması bu teknolojiyi ticari boyutta uygulayabilmek için yapılan araştırmaları hızlandırmıştır. Bu teknoloji için yatırım maliyeti tahmini yapabilmek mevcut tesislerin az olması nedeniyle oldukça zordur.

7.4.4 Anaerobik Çürütme

Anaerobik çürütme prosesinin önündeki en büyük engel atıkların kaynakta ayrı toplanmamasıdır. Dünyada birçok örneği olmasına karşın ülkemizde mevcut bir proje yoktur. Kuru prosesin ekipman sorunları nedeniyle tercih edilmesi zordur. Islak prosesin ise atık suyunun arıtılması için bir atık su arıtma tesisi kurulması gerekmektedir. Maalesef şu anda proje bölgesinde mevcut bir kimyasal atık su arıtma tesisi bile yoktur. Anaerobik çürütme teknolojisi maliyeti de belediyeler tarafından

yüksek bulunmaktadır. Bu sebeplerden dolayı şu an için bu teknolojinin uygulanma olasılığı da oldukça düşüktür.

8. SONUÇ

Dünya nüfusunun hızla artması, tüketim maddelerinin çeşitliliği ve tüketim alışkanlıklarının değişmesi ciddi bir atık sorunuyla karşı karşıya kalmamıza sebep olmaktadır. Atık sorununun etkin bir şekilde çözülebilmesi için yeni teknolojilerin kullanımının tüm dünyada yaygınlaşması gerekmektedir. Aynı zamanda önemli bir ekonomik değere sahip olan kentsel katı atıklardan bu yönde de yararlanılmalıdır. İyi bir katı atık yönetim modelinin esası katı atığı bir an önce halkın gözünün önünden uzaklaştırarak boş bir alana atmak değil onu ekonomik bir kaynak olarak görüp, çevreye en uyumlu bertaraf yöntemleri ile uzaklaştırılmasının sağlanmasıdır. Kentsel katı atıklardan elde edilebilecek en değerli ürün enerjidir. Kentsel katı atıklardan enerji elde etmek sadece bir yenilenebilir enerji uygulaması olmayıp, aynı zamanda karbondioksit emisyonlarını azaltarak çevreye fayda sağlamaktadır. Kentsel katı atıklardan sağlanan enerji özellikle lokal enerji ihtiyacını karşılamada büyük bir öneme sahiptir. Kentsel katı atıklardan enerji üretimi değişen dünya şartlarıyla gelişmiş ülkelerden sonra gelişmekte olan ülkelerin de artık gündemine girmiştir.

Bu çalışmada kentsel katı atıklardan enerji üretiminde dünyada kullanılan depo gazından enerji geri kazanımı, yakma, gazlaştırma ve anaerobik çürütme teknolojileri incelenmiştir. Depo gazının enerji potansiyelinin değerlendirilmesi ve yakma teknolojileri dünyada en çok kullanılan teknolojilerdir. Anaerobik çürütme teknolojisi daha çok Avrupa'da kullanılmaktadır. Gazlaştırma ise son dönemde üzerinde en çok çalışılan teknolojidir. Gazlaştırmanın yakmaya göre elektrik üretim verimi daha yüksektir, bir diğer önemli avantajı da hava kirletici emisyonlarının çok düşük olmasıdır. Ancak henüz büyük boyutlarda gazlaştırma tesisleri hayata geçirilememiştir. Bu teknolojinin maliyeti oldukça yüksektir.

Ülkemizde etkili bir katı atık yönetimi mevcut değildir. Ancak son yıllarda bu konuyla ilgili yapılan çalışmalar artmıştır. Bu bağlamda katı atık sorununun çok kötü olduğu bölgelerden biri olan Trabzon-Rize bölgesi proje bölgesi olarak belirlenmiştir. Proje bölgesi için hazırlanan rapordaki veriler baz alınarak bu bölgedeki atıklardan

enerji üretiminin teknik ve ekonomik boyutları incelenmiştir. Trabzon-Rize bölgesinde bir düzenli depolama sahası yapılması planlanmaktadır. Sahanın boyutları çok büyük değildir, sahada on yıl boyunca depolama yapmak mümkündür. Bu çalışmada oluşacak depo gazının miktarı LandGEM modeli ve multi phase modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucu LandGEM modeli AP-42 değerleri esas alınarak depo gazı enerji üretim seçenekleri değerlendirilmiştir. Elde edilecek depo gazından direkt ısıtma veya gaz motorlu kojenerasyon sistemleriyle enerji üretiminin uygun olabileceği görülmüştür. Direkt ısıtma sistemi kullanılarak sahanın yakınında bulunan köylerin konut ısıtmasının yapılması mümkündür. Gene kojenerasyon tesisinden elde edilecek ısı bu şekilde değerlendirilebilir, elektrik de şebekeye verilir.

Yakma sistemi atığın kalorifik değerinin düşük olması sebebiyle şu an için mümkün değildir. Ancak atık işlenerek Trabzon'da bulunan çimento fabrikasında ikincil yakıt olarak kullanılabilir.

Gazlaştırma teknolojisi henüz dünyada yaygın olarak kullanılmamaktadır, bu yüzden proje bölgesi için uygulanabilirliği çok düşüktür. Anaerobik çürütme prosesi ise teknolojinin ülkemize yabancı olması ve maliyeti sebebiyle düşünülmemektedir.

Proje bölgesinde topografik şartlardan dolayı büyük depolama sahaları bulunması oldukça zordur. Bu yüzden bu yaklaşım bugün için yeterli olsa bile uzun dönemde farklı stratejiler geliştirilmelidir. Diğer teknolojilerin uygulanmasının önündeki en büyük engel maliyettir, belediyelerimiz bu teknolojiler için bütçelerinin yeterli olmadığını belirtmektedirler. Ancak bu konuda dünyada pek çok kuruluş kredi vermektedir, bu kaynakların iyi bir şekilde gözden geçirilip uzun vadeli planların yapılması gerekmektedir. Bu alanda yapılacak yatırımların sağlayacağı önemli bir fayda da yaratacağı istihdamdır. Gelişmiş ülkelerde atık yönetimi oldukça fazla kişiye iş imkanı sağlamaktadır. Farklı teknolojiler ülkemizde uygulanarak bu alanda yetişmiş iş gücü değerlendirilmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] **Yolcu, İ.D.**, 1999. Bursa katı atık yönetimi, *Kent Yönetimi İnsan ve Çevre Sorunları Sempozyumu*, İstanbul, 17-19 Şubat, c. 3, s. 300-312.
- [2] **Taşkan, O.**, 2001. Depolama sahası gazlarının yönetimi ve modellemesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] **Bilgiş, O.**, 1994. Katı atık depolama alanlarında stabilite, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] **Demir, İ., Altınbaş, M. ve Arıkan, O.**, 1999. Katı atıklar için entegre yönetim yaklaşımı, *Kent Yönetimi İnsan ve Çevre Sorunları Sempozyumu*, İstanbul, 17-19 Şubat, c.3, s. 252-262.
- [5] **Tchobanoglous, G., Theisen, H. and Vigil, S.A.**, 1993. Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues, McGrawHill International Editions.
- [6] **Kumar, S.**, 2000. Technology options for municipal solid waste-to-energy project, *TERI Information Monitor on Environmental Science*, volume 5, number 1, 1-11.
- [7] **Kiser, J.V.L. and Burton, B.K.**, 1992. Energy from municipal waste: Picking up where recycling leaves off, *Waste Age*, November 92.
- [8] **DHV Consultants BV, R&R Bilimsel ve Teknik Hizmetler Ltd.Şti**, 2006. Atık Geri Kazanımı ve Geri Kazanılabilen Atıkların Ayır Toplanması, *İzaydaş Yerel Yönetimlerin Çalışmasına Yardımcı Olacak Kılavuz Kitapçıklar*, İstanbul.
- [9] **Environmental Resources management**, 1996. Katı atık yönetimi uygulama çalışması: Türkiye Cumhuriyeti Trabzon ve Rize için atık bertaraf stratejisi, Trabzon Çevre Orman İl Müdürlüğü, Londra.
- [10] **El-Beny, D.**, 2002 Katı atık düzensiz sahaları için uygun gaz oluşum modellerinin belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [11] **Demir, A. ve Tüylüoğlu, B.S.**, 1999. Düzenli depolama tesislerinin tasarım ve İşletilmesi, *Kent Yönetimi İnsan ve Çevre Sorunları Sempozyumu*, İstanbul, 17-19 Şubat, c. 3, s. 273-281

- [12] **DHV Consultants BV, R&R Bilimsel ve Teknik Hizmetler Ltd.Şti**, 2006. Düşük ve Yüksek Bütçeli Belediyeler için Katı Atık Depolama Sahalarının Standart Olarak Planlanması ve Tasarımı, *İzaydaş Yerel Yönetimlerin ÇalışmasınaYardımcı Olacak Kılavuz Kitapçıklar*, İstanbul.
- [13] **Gilbert, L.**, 2004. Connecting the dots, *Landfill Gas to Energy Conference*, Baton Rouge, LA, August 31.
- [14] **O’leary, P. and Walsh, P.W.**, 1995. Decision maker’s guide to solid waste management volume II, USEPA, Chapter 9 Land Disposal.
- [15] **Gendebien, A. and Commission of the European Communities**,1992. Landfill gas from environment to energy- Final report, Commission of the European Communities, Office for Official Publications of the European Communities,Luxembourg.
- [16] **Heide, J. and Eisma, M.**, 1997. Soil Management part 3: Municipal solid waste disposal selected topics, Delft University of Technology.
- [17] **Johannessen, L.M.**, 1999. Guidance note on recuperation of landfill gas from municipal solid waste landfills, The World Bank, USA.
- [18] **Özçakıl, M.**, Türkiye’de katı atık depo gazı geri kazanım tesislerinin değerlendirilmesi,*Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [19] **USEPA**, 2005. Landfill gas emissions model (LandGEM) version 3.02 user’s guide, Eds. Alexander, A., Burklin, C. and Singleton, A., USEPA Officeof Research and Development.
- [20] **Acar, A.**, 1998. Kentsel katı atık yönetimi: Denizli örneği, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [21] **Conestoga-Rovers&Associates**, Landfill gas utilization technologies.
- [22] **U.S. Department of Energy**, Biomass and Alternative Methane Fuels Fact Sheet.
- [23] **McBean, E.A., Rovers, F.A. and Farquhar, G.J.**, 1995. Solid waste landfill engineering and design, Prentice Hall PTR, New Jersey.
- [24] **Wesilind, P.A., Worrell, W.A. and Reinhart, D.R.**, 2002. Solid waste engineering, Pacific Grove, CA.
- [25] **Dong, C., Jin, B. and Li, D.**, 2003. Predicting the heating value of MSW with a feed forward neural network, *Waste management*, 23, 103-106.

- [26] **Kathiravale, S., Yunus, M.N., Sopian, K., Samsuddin, A.H. and Rahman, R.A.**, 2003. Modeling the heating value of municipal solid waste, *Fuel*, **82**, 1119-1125.
- [27] www.energy.ca.gov/development/biomass/msw.html.
- [28] **DHV Consultants BV, R&R Bilimsel ve Teknik Hizmetler Ltd.Şti**, 2006. Katı atık yakma tesisleri için teknolojiler ve yer seçimleri, *İzaydaş Yerel Yönetimlerin Çalışmasına Yardımcı Olacak Kılavuz Kitapçıklar*, İstanbul.
- [29] www.barlowprojects.com.
- [30] **Caputo, A.C. and Pelagagge, P.M.**, 2002. RDF production plants: I design and costs, *Applied thermal engineering*, **22**, 423-437.
- [31] **Murphy, J.D. and McKeogh, E.**, 2004. Technical, economic and environmental Analysis of energy production from municipal solid waste, *Renewable Energy*, **29**, 1043-1057.
- [32] **Çelik, A.**, 2005. İstanbul Büyükşehir Belediyesi evsel katı atıklardan enerji üretim faaliyetleri, *11. Uluslar arası Kojenerasyon, Kombine Çevrim ve Çevre Konferansı, ICCI 2005*, 26-27 Mayıs, s. 76-81.
- [33] **Advanced Energy Strategies, Inc**, 2004. Investigation into municipal solid Waste gasification- PUB draft, www.alamedapt.com/newsroom
- [34] **Alvarez, J.M.**, 2003. Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes IWA Publishing, London.
- [35] **Ostrem, K.M., Millrath, K. and Themelis, N.J.**, Combining anaerobic digestion and waste-to-energy, *12th North American Waste to Energy Conference*.
- [36] **DHV Consultants BV, R&R Bilimsel ve Teknik Hizmetler Ltd.Şti**, 2006. Kompostlaştırma tesisleri için alan seçimi ve teknolojiler, *İzaydaş Yerel Yönetimlerin çalışmasına yardımcı Olacak kılavuz kitapçıklar*, İstanbul.
- [37] **Environmental Resources Management**, 2004. Regional Solid Waste Management System for The Trabzon-Rize Inter-Municipal Union (TRAB-RI-KAB)
- [38] **Bayındırlık ve İskan Bakanlığı**, 2005. 2005 Yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları, Ankara.
- [39] **GE Jenbacher**, Type 2 Gas Engines Brochure
- [40] **Bolwerk, R.**, 2005. Co-processing of waste in cement plants, *IMPEL Waste Project*, Netherlands, 25-26-27 May.

EK A

Düzenli Depolama Sahası Yatırım Maliyeti Tahmini

Tablo A.1 DÜZENLİ DEPOLAMA SAHASI YATIRIM MALİYETİ TAHMİNİ

	Birim	Miktar	Birim fiyat(€)	Toplam fiyat(€)
1.Sahanın İnşaatı				
Sahanın temizlenmesi	m ²	25.000	0,5	12.500
Kütle kazısı	m ³	110.000	6	660.000
Kütle kazısı(dolumlar)	m ³	8.000	2	16.000
Sahanın incelenmesi	m ²	50.000	0,3	15.000
Toplam				703.500
2.Temel kapatma sistemi, Sızıntı suyu				
Mineral tabakası	m ³	30.000	12	360.000
Koruyucu tabaka,bütümlü	m ²	50.000	3	150.000
Alternatif:HDPE folyo, 2,5 mm	m ²	0	8,5	0
Alternatif:Geotekstil (1200g/ m ²)	m ²	0	7	0
Beton duvarlar (kalınlık:50 cm)	m ²	12.000	150	1.800.000
Beton duv. Örtmek için HDPE folyo	m ²	13.200	8,5	112.200
Drenaj tabakası	m ³	16.000	12	192.000
Koruyucu tabaka (400 g/ m ²)	m ²	50.000	2	100.000
PE-HD ana sızıntı suyu borusu (DN300)	m	380	110	41.800
PE-HD sızıntı suyu boşaltma boruları (DN200)	m	2.300	60	138.000
Sızıntı suyu boru desteği (kum)	m ³	2.200	8	17.600
Rögarlar	adet	8	2.500	20.000
Kontrol odaları	adet	2	20.000	40.000
Sızıntı suyu pompa istasyonu	adet	1	25.000	25.000
Pompa borusu (istasyondan havuza)	m	1.000	30	30.000
Sızıntı suyu havuzu	toplam	1	100.000	100.000
Sızıntı suyu arıtması (konteynır)	toplam	1	480.000	480.000
Geçici kaplama örtüsü	m ²	30.000	3	90.000
Geçici yüzey suyu deşarjı	toplam	1	15.000	15.000
Toplam				3.711.600
3.Yüzey kapatması,Yüzey suyu				
Dengeleme tabakası (50 cm)	m ³	29.000	3	87.000
Geotekstil (2 tabaka)	m ²	116.000	2	232.000
Mineral kapatma tabakası (50 cm)	m ³	29.000	12	348.000
Drenaj tabakası (30 cm)	m ³	18.000	12	216.000
Bitki yetiştirme tabakası (min.80 cm)	m ³	48.000	4	192.000
Ring yolu,asfaltlı	m	850	120	102.000
Yüzey suyu drenajı(ring yolu boyunca)	m	850	25	21.250

Bakım yolu, asfaltsız	m	1.200	60	72.000
Kanallar (yardımcı yollar boyunca)	m	1.200	10	12.000
Toplam				1.282.250
4. Gaz toplama				
Delikli borular (DN 250), 4m	adet	20	200	4.000
Delikli borular (DN 150)	m	700	32	22.400
Çelik borular (DN 800)	adet	20	700	14.000
Çakıl (16/32 mm)	m ³	320	20	6.400
Gaz boruları (DN 100)	m	250	10	2.500
Gaz boruları (DN 250)	m	1.000	40	40.000
Gaz yoğunlaşma boruları	m	2.600	5	13.000
Gaz toplama istasyonu	adet	3	25.000	75.000
Gaz sıkıştırma istasyonu	toplam	1	120.000	120.000
Alev yakıcı	toplam	1	60.000	60.000
Toplam				357.300
5.Genel				
Giriş yolu	m	620	160	99.200
Bütümlü asfaltlı alanlar	m ²	4.000	20	80.000
Beton asfaltlı alanlar	m ²	750	30	22.500
Kontrol binası, konteynır	toplam	1	12.000	12.000
Garaj binası	toplam	1	60.000	60.000
İşletme binası	toplam	1	120.000	120.000
Tartma köprüsü	toplam	1	25.000	25.000
Temizleme ünitesi	toplam	1	15.000	15.000
Kontrol ve durulama ünitesi	toplam	1	150.000	150.000
Teknik ekipman (tank/garaj)	toplam	1	110.000	110.000
Çit	m	2.000	24	48.000
Sirkülasyon (pompa/rögar/boru)	toplam	1	50.000	50.000
Enerji gereksinimi/trafo	toplam	1	40.000	40.000
Su gereksinimi	toplam	1	15.000	25.000
Septik tank	toplam	1	10.000	10.000
Telekomünikasyon	toplam	1	25.000	25.000
Toplam				891.700
GENEL TOPLAM				6.946.350

EK B

LandGEM Modeli Sonuçları

Model Parametreleri

L_0 : 170.00 m³
 k : 0.0500 1/yıl
 NMOC : 4000,00 ppmv
 Metan : hacimce %50.00
 Karbon dioksit : hacimce %50.00
 Seçilen sabitler : CAA Sabitleri

Depolama Sahası Parametreleri

Depolama sahası tipi : Beraber bertaraf durumu yok
 Açılış yılı : 2006 Kapanış yılı : 2015
 Kapasite : 1666914 ton

Model Sonuçları

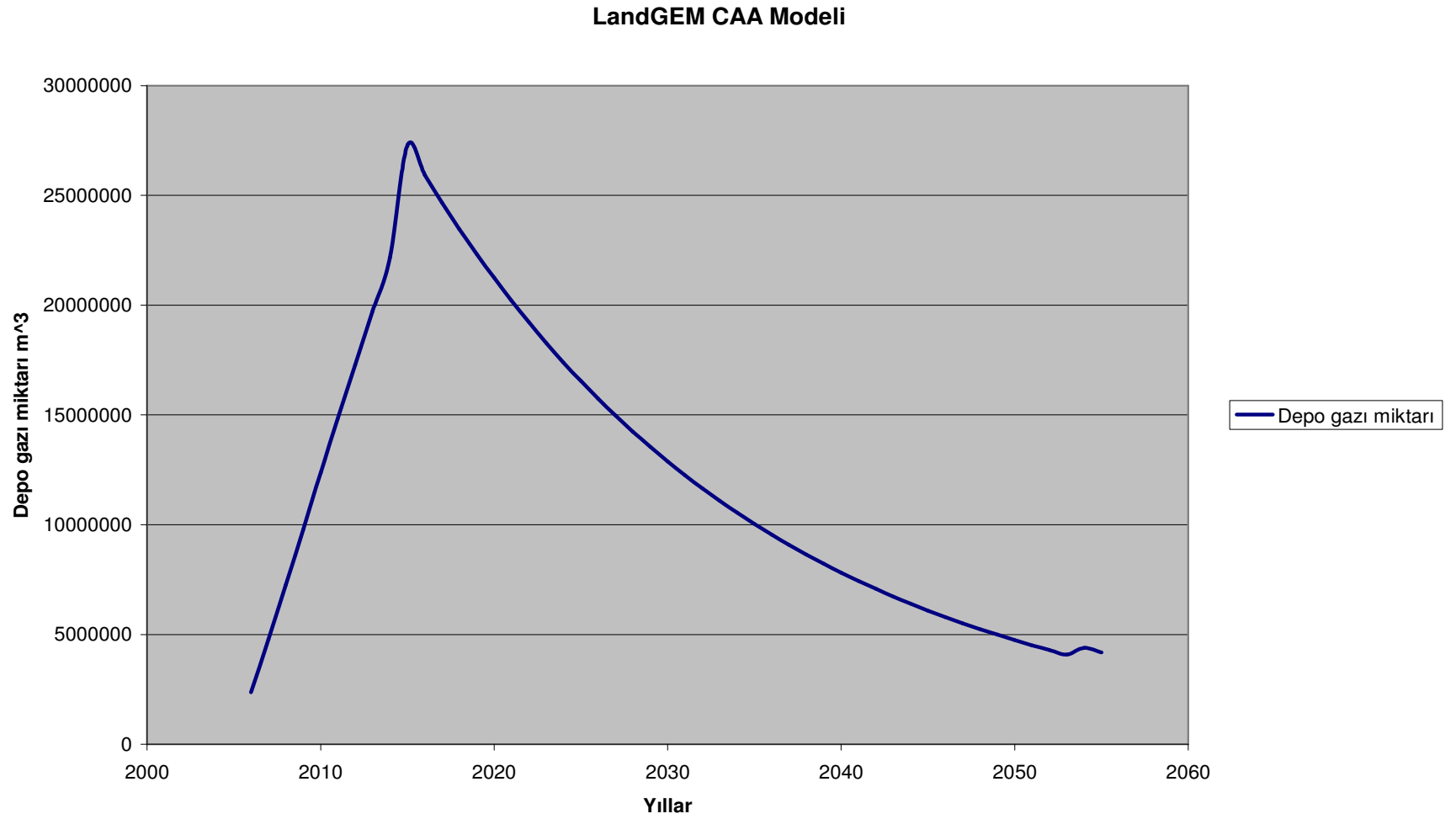
Yıl	Gömülü Atık(ton)	Metan Emisyon Hızı (ton/yıl)	(m ³ /yıl)
2006	142651	7891102	1182719
2007	147793	15952364	2390942
2008	153146	24195626	3626443
2009	158717	32632664	4890987
2010	164518	41276415	6186513
2011	168244	49459419	7412982
2012	172058	57631615	8637832
2013	175961	65798186	9861838
2014	179955	73964500	11085806
2015	203871	90985316	13636888
2016	203871	86547910	12971809
2017	203871	82326919	12339166
2018	203871	78311787	11737378
2019	203871	74492477	11164940
2020	203871	70859436	10620419
2021	203871	67403580	10102455
2022	203871	64116269	9609753
2023	203871	60989281	9141079
2024	203871	58014799	8695264
2025	203871	55185384	8271191
2026	203871	52493961	7867800
2027	203871	49933800	7484083
2028	203871	47498500	7119080
2029	203871	45181971	6771878
2030	203871	42978420	6441610
2031	203871	40882338	6127449
2032	203871	38888483	5828610
2033	203871	36991869	5544345
2034	203871	35187754	5273944
2035	203871	33471627	5016731

2036	203871	31839197	4772062
2037	203871	30286381	4539326
2038	203871	28809297	4317940
2039	203871	27404251	4107352
2040	203871	26067730	3907034
2041	203871	24796391	3716486
2042	203871	23587057	3535230
2043	203871	22436703	3362815
2044	203871	21342452	3198809
2045	203871	20301568	3042801
2046	203871	19311449	2894402
2047	203871	18369619	2753240
2048	203871	17473722	2618963
2049	203871	16621518	2491235
2050	203871	15810877	2369736
2051	203871	15039772	2254162
2052	203871	14306273	2144226
2053	203871	13608548	2039650
2054	203871	12944851	1940176
2055	203871	12313524	1845552
2056	203871	11712986	1755543
2057	203871	11141737	1669925
2058	203871	10598348	1588481
2059	203871	10081460	1511010
2060	203871	9589782	1437317
2061	203871	9122083	1367219
2062	203871	8677193	1300539
2063	203871	8254002	1237111
2064	203871	7851449	1176776
2065	203871	7468530	1119384
2066	203871	7104285	1064791
2067	203871	6757805	1012860
2068	203871	6428223	963463
2069	203871	6114715	916474
2070	203871	5816497	871777
2071	203871	5532823	829260
2072	203871	5262984	788817
2073	203871	5006305	750345
2074	203871	4762145	713751
2075	203871	4529892	678941
2076	203871	4308967	645828
2077	203871	4098816	614331
2078	203871	3898914	584370
2079	203871	3708762	555870
2080	203871	3527884	528760
2081	203871	3355827	502972
2082	203871	3192161	478441
2083	203871	3036478	455108
2084	203871	2888387	432912
2085	203871	2747518	411798
2086	203871	2613520	391715
2087	203871	2486058	372611
2088	203871	2364811	354438
2089	203871	2249478	337152

2090	203871	2139770	320709
2091	203871	2035412	305068
2092	203871	1936144	290189
2093	203871	1841717	276037
2094	203871	1751895	262574
2095	203871	1666454	249768
2096	203871	1585180	237587
2097	203871	1507870	226000
2098	203871	1434330	214978
2099	203871	1364377	204493
2100	203871	1297836	194520
2101	203871	1234540	185033
2102	203871	1174330	176009
2103	203871	1117058	167425
2104	203871	1062578	159259
2105	203871	1010756	151492
2106	203871	961460	144104
2107	203871	914569	137076
2108	203871	869965	130390
2109	203871	827537	124031
2110	203871	787177	117982
2111	203871	748786	112228
2112	203871	712267	106755
2113	203871	677530	101548
2114	203871	644486	96596
2115	203871	613054	91885
2116	203871	583155	87403
2117	203871	554714	83141
2118	203871	527661	79086
2119	203871	501926	75229
2120	203871	477447	71560
2121	203871	454162	68070
2122	203871	432012	64750
2123	203871	410943	61592
2124	203871	390901	58588
2125	203871	371836	55731
2126	203871	353702	53013
2127	203871	336451	50427
2128	203871	320042	47968
2129	203871	304434	45629
2130	203871	289586	43403
2131	203871	275463	41286
2132	203871	262029	39273
2133	203871	249249	37358
2134	203871	237093	35536
2135	203871	225530	33802
2136	203871	214531	32154
2137	203871	204068	30586
2138	203871	194116	29094
2139	203871	184648	27675
2140	203871	175643	26325
2141	203871	167077	25041
2142	203871	158928	23820
2143	203871	151177	22658

2144	203871	143804	21553
2145	203871	136791	20502
2146	203871	130120	19502
2147	203871	123774	18551
2148	203871	117737	17646
2149	203871	111995	16786
2150	203871	106533	15967
2151	203871	101337	15188
2152	203871	96395	14448
2153	203871	91694	13743
2154	203871	87222	13073
2155	203871	82968	12435
2156	203871	78921	11829
2157	203871	75072	11252
2158	203871	71411	10703
2159	203871	67928	10181
2160	203871	64615	9685
2161	203871	61464	9212
2162	203871	58466	8763
2163	203871	55615	8336
2164	203871	52903	7929
2165	203871	50323	7542
2166	203871	47868	7175
2167	203871	45534	6825
2168	203871	43313	6492
2169	203871	41201	6175
2170	203871	39191	5874
2171	203871	37280	5588
2172	203871	35462	5315
2173	203871	33732	5056
2174	203871	32087	4809
2175	203871	30522	4575
2176	203871	29034	4352
2177	203871	27618	4139
2178	203871	26271	3937
2179	203871	24989	3745
2180	203871	23771	3563
2181	203871	22611	3389
2182	203871	21509	3224
2183	203871	20460	3066
2184	203871	19462	2917
2185	203871	18513	2775
2186	203871	17610	2639
2187	203871	16751	2511
2188	203871	15934	2388
2189	203871	15157	2272
2190	203871	14418	2161
2191	203871	13714	2056
2192	203871	13046	1955
2193	203871	12409	1860
2194	203871	11804	1769
2195	203871	11228	1683
2196	203871	10681	1601
2197	203871	10160	1523

2198	203871	9664	1449
2199	203871	9193	1378
2200	203871	8745	1311
2201	203871	8318	1247
2202	203871	7913	1186
2203	203871	7527	1128
2204	203871	7160	1073
2205	203871	6810	1021



Şekil B.1 LandGEM CAA modeli sonuçları

Model Parametreleri

L_0 : 100.00 m³
 k : 0.0400 1/yıl
 NMOC : 595,00 ppmv
 Metan : hacimce %50.00
 Karbon dioksit : hacimce %50.00
 Seçilen sabitler : AP-42 Sabitleri

Depolama Sahası Parametreleri

Depolama sahası tipi : Beraber bertaraf durumu yok
 Açılış yılı : 2006 Kapanış yılı : 2015
 Kapasite : 1666914 ton

Model Sonuçları

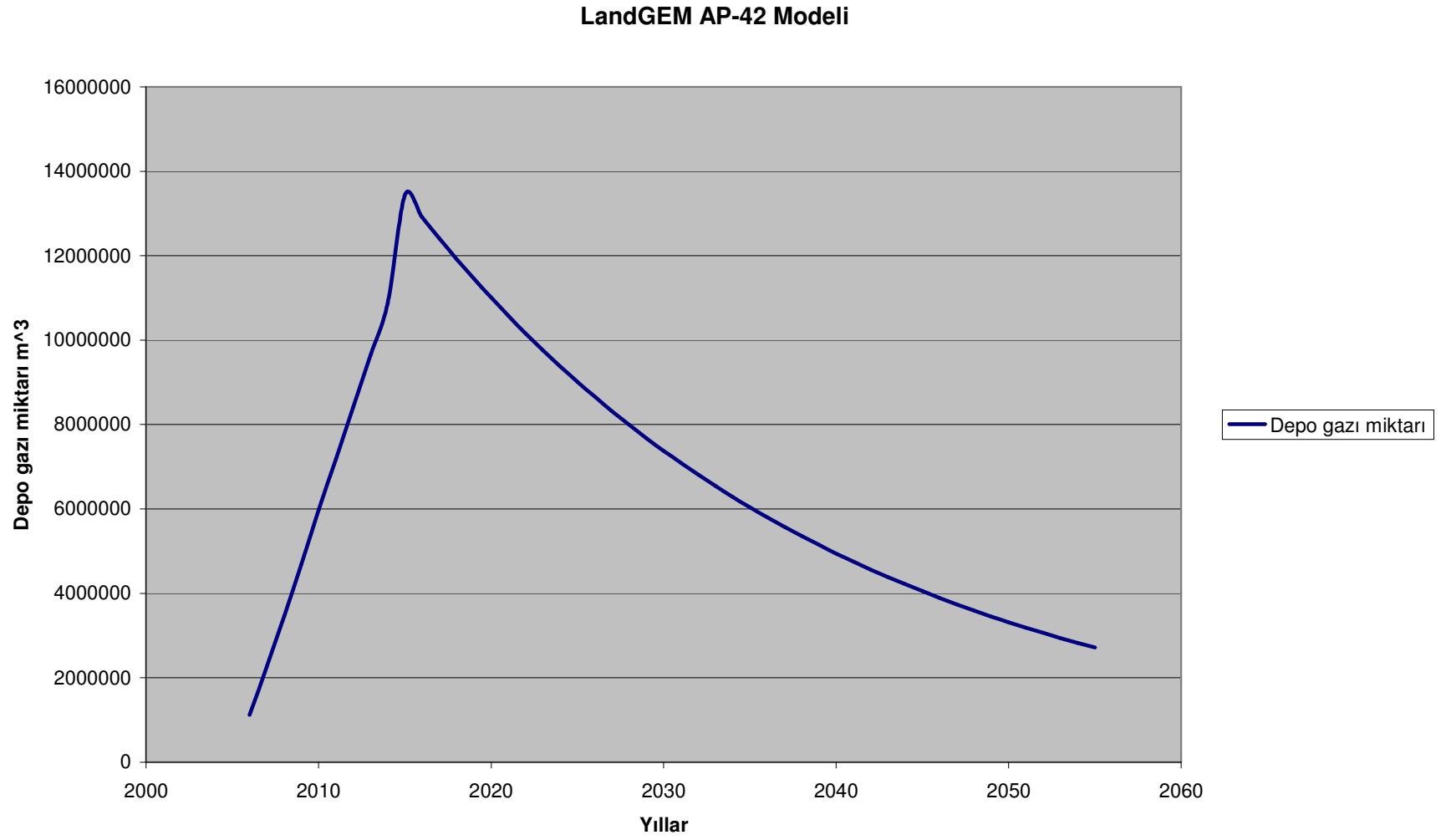
Yıl	Gömülü Atık(ton)	Metan Emisyon Hızı	
		(ton/yıl)	(m ³ /yıl)
2006	142651	3731934	559343
2007	147793	7581304	1136287
2008	153146	11554358	1731768
2009	158717	15657379	2346729
2010	164518	19897274	2982205
2011	168244	23951534	3589858
2012	172058	28035318	4201936
2013	175961	32150426	4818709
2014	179955	36298787	5440466
2015	203871	44843968	6721218
2016	203871	43085611	6457675
2017	203871	41396200	6204466
2018	203871	39773031	5961186
2019	203871	38213509	5727444
2020	203871	36715135	5502868
2021	203871	35275514	5287097
2022	203871	33892342	5079787
2023	203871	32563404	4880606
2024	203871	31286575	4689235
2025	203871	30059811	4505367
2026	203871	28881149	4328709
2027	203871	27748702	4158978
2028	203871	26660660	3995902
2029	203871	25615281	3839221
2030	203871	24610891	3688683
2031	203871	23645884	3544047
2032	203871	22718716	3405083
2033	203871	21827902	3271568
2034	203871	20972018	3143288
2035	203871	20149694	3020038
2036	203871	19359613	2901621

2037	203871	18600512	2787846
2038	203871	17871175	2678533
2039	203871	17170436	2573507
2040	203871	16497174	2472598
2041	203871	15850310	2375646
2042	203871	15228811	2282496
2043	203871	14631681	2192998
2044	203871	14057964	2107009
2045	203871	13506744	2024392
2046	203871	12977137	1945014
2047	203871	12468296	1868749
2048	203871	11979407	1795475
2049	203871	11509688	1725073
2050	203871	11058386	1657432
2051	203871	10624781	1592443
2052	203871	10208177	1530003
2053	203871	9807909	1470010
2054	203871	9423335	1412370
2055	203871	9053841	1356991
2056	203871	8698835	1303782
2057	203871	8357749	1252660
2058	203871	8030037	1203543
2059	203871	7715174	1156351
2060	203871	7412658	1111010
2061	203871	7122004	1067447
2062	203871	6842746	1025591
2063	203871	6574438	985377
2064	203871	6316650	946740
2065	203871	6068971	909618
2066	203871	5831003	873951
2067	203871	5602366	839683
2068	203871	5382694	806759
2069	203871	5171636	775125
2070	203871	4968853	744732
2071	203871	4774022	715531
2072	203871	4586830	687474
2073	203871	4406978	660518
2074	203871	4234177	634619
2075	203871	4068153	609735
2076	203871	3908638	585827
2077	203871	3755379	562856
2078	203871	3608128	540787
2079	203871	3466651	519582
2080	203871	3330722	499209
2081	203871	3200122	479635
2082	203871	3074644	460828
2083	203871	2954085	442759
2084	203871	2838254	425398
2085	203871	2726964	408718
2086	203871	2620039	392692
2087	203871	2517305	377294
2088	203871	2418601	362500
2089	203871	2323766	348286
2090	203871	2232650	334630

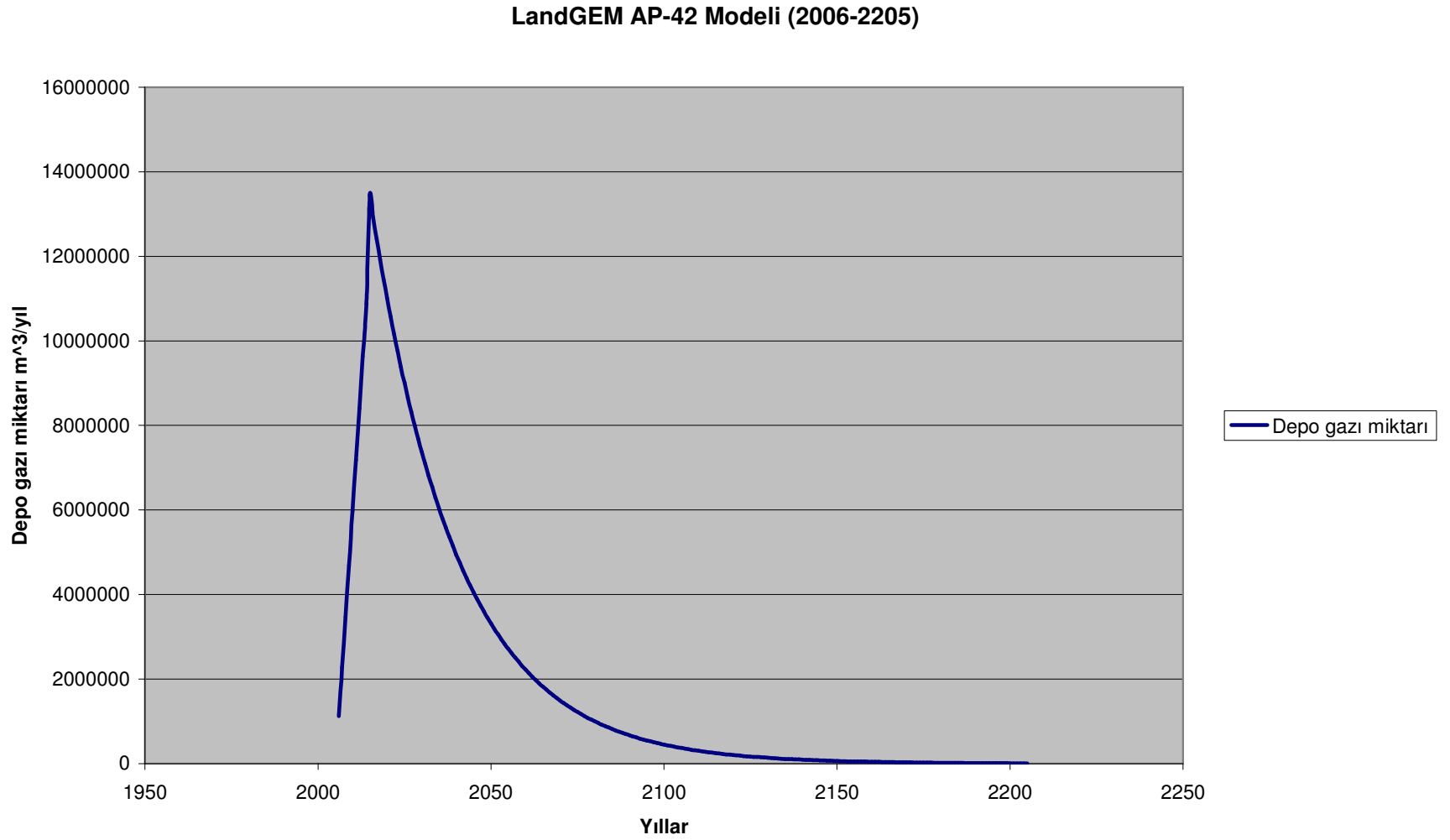
2091	203871	2145106	321509
2092	203871	2060995	308902
2093	203871	1980183	296790
2094	203871	1902539	285153
2095	203871	1827939	273972
2096	203871	1756264	263229
2097	203871	1687400	252908
2098	203871	1621236	242991
2099	203871	1557667	233463
2100	203871	1496590	224309
2101	203871	1437908	215514
2102	203871	1381527	207063
2103	203871	1327356	198944
2104	203871	1275310	191144
2105	203871	1225304	183649
2106	203871	1177259	176448
2107	203871	1131098	169529
2108	203871	1086747	162882
2109	203871	1044135	156495
2110	203871	1003194	150359
2111	203871	963858	144463
2112	203871	926065	138799
2113	203871	889753	133356
2114	203871	854866	128127
2115	203871	821346	123103
2116	203871	789140	118276
2117	203871	758198	113639
2118	203871	728468	109183
2119	203871	699905	104902
2120	203871	672461	100789
2121	203871	646094	96837
2122	203871	620760	93040
2123	203871	596420	89391
2124	203871	573034	85886
2125	203871	550565	82519
2126	203871	528977	79283
2127	203871	508235	76174
2128	203871	488307	73188
2129	203871	469160	70318
2130	203871	450764	67561
2131	203871	433089	64911
2132	203871	416108	62366
2133	203871	399792	59921
2134	203871	384116	57571
2135	203871	369055	55314
2136	203871	354584	53145
2137	203871	340680	51061
2138	203871	327322	49059
2139	203871	314488	47135
2140	203871	302156	45287
2141	203871	290309	43511
2142	203871	278925	41805
2143	203871	267989	40166
2144	203871	257481	38591

2145	203871	247385	37078
2146	203871	237685	35624
2147	203871	228365	34227
2148	203871	219410	32885
2149	203871	210807	31596
2150	203871	202541	30357
2151	203871	194600	29167
2152	203871	186969	28023
2153	203871	179638	26924
2154	203871	172594	25868
2155	203871	165827	24854
2156	203871	159325	23880
2157	203871	153078	22943
2158	203871	147075	22044
2159	203871	141308	21179
2160	203871	135768	20349
2161	203871	130444	19551
2162	203871	125329	18784
2163	203871	120415	18048
2164	203871	115693	17340
2165	203871	111157	16660
2166	203871	106799	16007
2167	203871	102611	15379
2168	203871	98587	14776
2169	203871	94722	14197
2170	203871	91008	13640
2171	203871	87439	13105
2172	203871	84011	12592
2173	203871	80717	12098
2174	203871	77552	11623
2175	203871	74511	11168
2176	203871	71589	10730
2177	203871	68782	10309
2178	203871	66085	9905
2179	203871	63494	9516
2180	203871	61004	9143
2181	203871	58612	8785
2182	203871	56314	8440
2183	203871	54106	8109
2184	203871	51984	7791
2185	203871	49946	7486
2186	203871	47988	7192
2187	203871	46106	6910
2188	203871	44298	6639
2189	203871	42561	6379
2190	203871	40892	6129
2191	203871	39289	5889
2192	203871	37748	5658
2193	203871	36268	5436
2194	203871	34846	5223
2195	203871	33480	5018
2196	203871	32167	4821
2197	203871	30906	4632
2198	203871	29694	4451

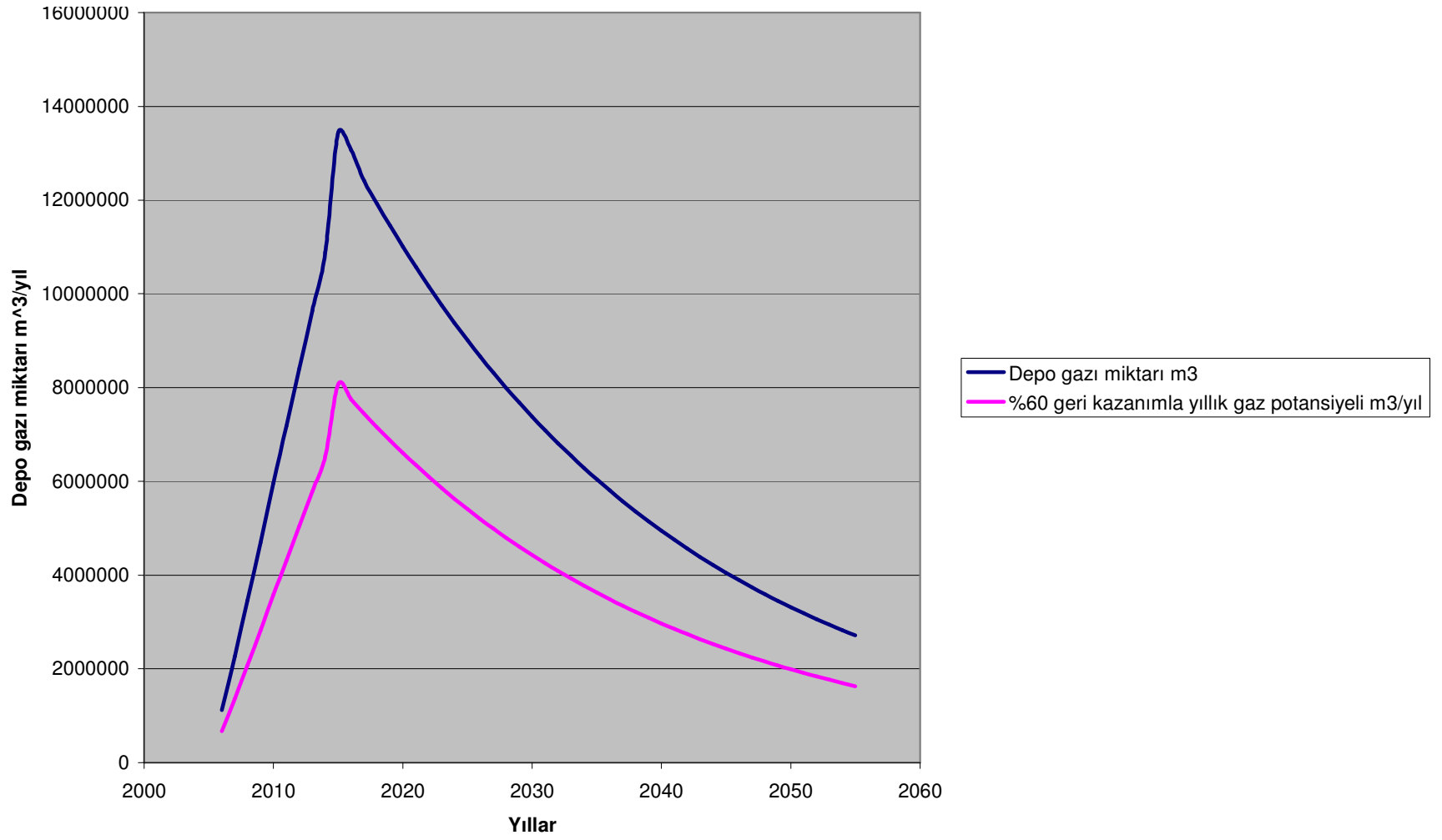
2199	203871	28530	4276
2200	203871	27411	4108
2201	203871	26336	3947
2202	203871	25304	3792
2203	203871	24311	3644
2204	203871	23358	3501
2205	203871	22442	3364



Şekil B.2 LandGEM AP-42 modeli sonuçları



Şekil B.3 LandGEM AP-42 modeli sonuçları (2006-2205)



Şekil B.4 AP-42 modeline göre %60 geri kazanımla yıllık gaz potansiyeli

EK C

Multi Phase Modeli Sonuçları

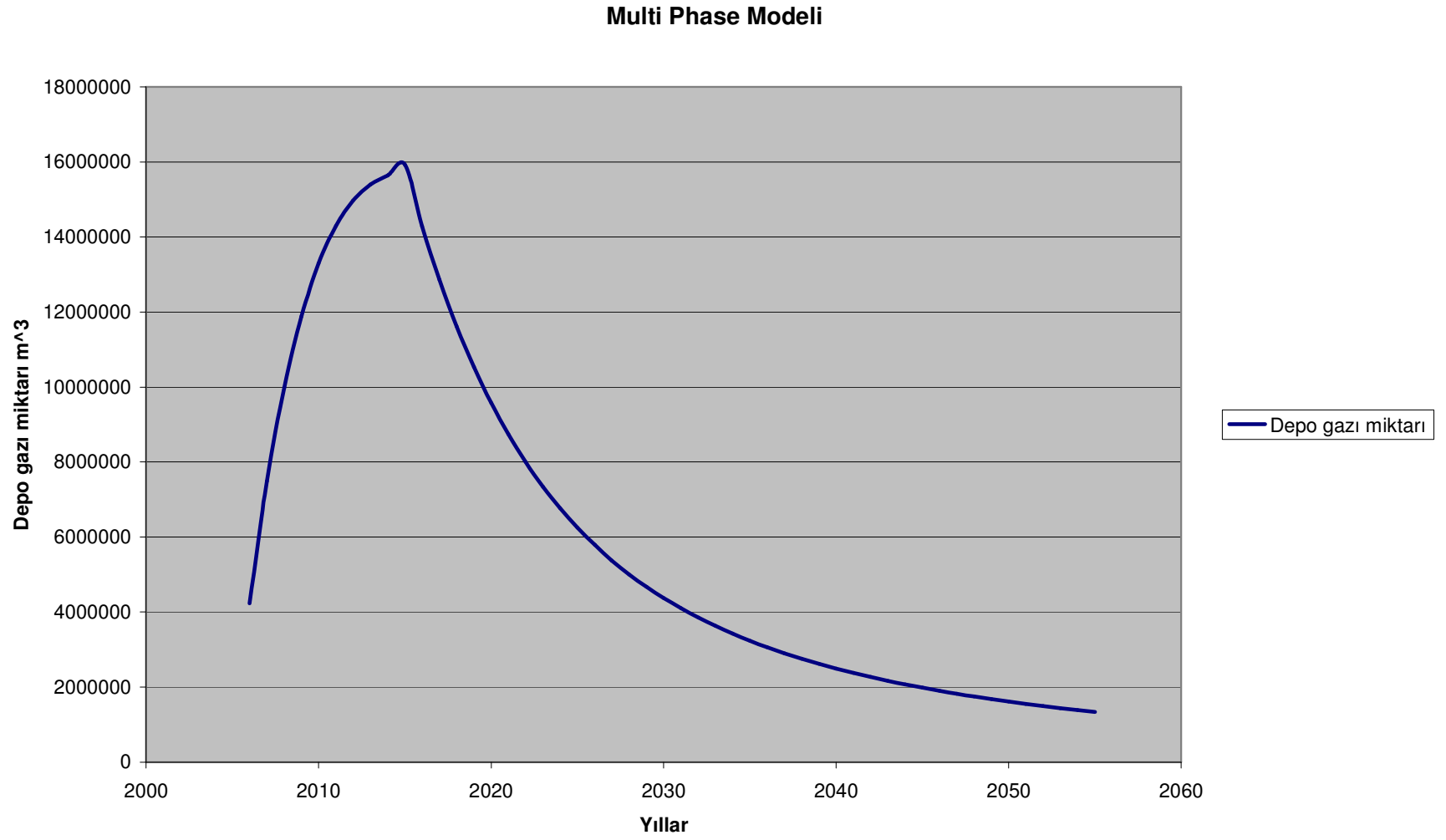
Multi Phase Model Sonuçları

Yıl	Gömülü atık(ton)	Metan Emisyon Hızı	
		(ton/yıl)	(m ³ /yıl)
2006	142651	14108855	2114637
2007	290444	25001965	3747297
2008	443590	33336532	4996483
2009	602307	39642391	5941605
2010	766825	44346293	6646627
2011	935069	47673162	7145258
2012	1107127	49931600	7483753
2013	1283088	51366825	7698865
2014	1463043	52173186	7819722
2015	1666914	53136321	7964077
2016	1666914	47665562	7144119
2017	1666914	42907906	6431041
2018	1666914	38759361	5809257
2019	1666914	35132037	5265593
2020	1666914	31951571	4788904
2021	1666914	29154954	4369747
2022	1666914	26688736	4000110
2023	1666914	24507503	3673187
2024	1666914	22572616	3383186
2025	1666914	20851147	3125172
2026	1666914	19314991	2894933
2027	1666914	17940120	2688867
2028	1666914	16705950	2503889
2029	1666914	15594823	2337354
2030	1666914	14591558	2186984
2031	1666914	13683079	2050821
2032	1666914	12858104	1927174
2033	1666914	12106874	1814579
2034	1666914	11420934	1711771
2035	1666914	10792945	1617648
2036	1666914	10216517	1531253
2037	1666914	9686082	1451751
2038	1666914	9196770	1378413
2039	1666914	8744321	1310600
2040	1666914	8324992	1247751
2041	1666914	7935494	1189373
2042	1666914	7572926	1135031
2043	1666914	7234727	1084342
2044	1666914	6918629	1036965
2045	1666914	6622620	992599
2046	1666914	6344914	950976
2047	1666914	6083917	911858
2048	1666914	5838208	875031
2049	1666914	5606516	840305
2050	1666914	5387703	807509
2051	1666914	5180745	776491
2052	1666914	4984724	747111
2053	1666914	4798810	719246

2054	1666914	4622256	692784
2055	1666914	4454383	667623
2056	1666914	4294580	643672
2057	1666914	4142289	620847
2058	1666914	3997005	599071
2059	1666914	3858266	578277
2060	1666914	3725652	558401
2061	1666914	3598778	539385
2062	1666914	3477293	521177
2063	1666914	3360874	503728
2064	1666914	3249225	486994
2065	1666914	3142074	470934
2066	1666914	3039168	455511
2067	1666914	2940277	440689
2068	1666914	2845186	426437
2069	1666914	2753696	412724
2070	1666914	2665626	399524
2071	1666914	2580802	386811
2072	1666914	2499067	374560
2073	1666914	2420274	362751
2074	1666914	2344283	351361
2075	1666914	2270967	340373
2076	1666914	2200204	329767
2077	1666914	2131883	319527
2078	1666914	2065896	309637
2079	1666914	2002146	300082
2080	1666914	1940537	290848
2081	1666914	1880982	281922
2082	1666914	1823398	273291
2083	1666914	1767707	264944
2084	1666914	1713833	256870
2085	1666914	1661708	249057
2086	1666914	1611264	241496
2087	1666914	1562438	234178
2088	1666914	1515170	227094
2089	1666914	1469403	220234
2090	1666914	1425083	213592
2091	1666914	1382158	207158
2092	1666914	1340579	200926
2093	1666914	1300298	194889
2094	1666914	1261271	189039
2095	1666914	1223454	183371
2096	1666914	1186806	177879
2097	1666914	1151288	172555
2098	1666914	1116862	167395
2099	1666914	1083491	162394
2100	1666914	1051141	157545
2101	1666914	1019779	152845
2102	1666914	989372	148287
2103	1666914	959889	143868
2104	1666914	931300	139583
2105	1666914	903577	135428
2106	1666914	876693	131399
2107	1666914	850620	127491

2108	1666914	825333	123701
2109	1666914	800807	120025
2110	1666914	777020	116460
2111	1666914	753946	113002
2112	1666914	731565	109647
2113	1666914	709855	106393
2114	1666914	688795	103237
2115	1666914	668365	100175
2116	1666914	648545	97204
2117	1666914	629318	94322
2118	1666914	610665	91527
2119	1666914	592568	88814
2120	1666914	575011	86183
2121	1666914	557976	83630
2122	1666914	541449	81152
2123	1666914	525414	78749
2124	1666914	509856	76417
2125	1666914	494761	74155
2126	1666914	480114	71960
2127	1666914	465903	69830
2128	1666914	452113	67763
2129	1666914	438733	65757
2130	1666914	425750	63812
2131	1666914	413153	61923
2132	1666914	400929	60091
2133	1666914	389068	58314
2134	1666914	377558	56588
2135	1666914	366390	54915
2136	1666914	355552	53290
2137	1666914	345036	51714
2138	1666914	334831	50185
2139	1666914	324929	48700
2140	1666914	315320	47260
2141	1666914	305995	45863
2142	1666914	296947	44506
2143	1666914	288166	43190
2144	1666914	279646	41913
2145	1666914	271377	40674
2146	1666914	263354	39471
2147	1666914	255567	38304
2148	1666914	248012	37172
2149	1666914	240679	36073
2150	1666914	233564	35007
2151	1666914	226659	33972
2152	1666914	219958	32967
2153	1666914	213456	31993
2154	1666914	207146	31047
2155	1666914	201023	30129
2156	1666914	195080	29239
2157	1666914	189314	28374
2158	1666914	183718	27536
2159	1666914	178287	26722
2160	1666914	173017	25932
2161	1666914	167903	25165

2162	1666914	162940	24421
2163	1666914	158124	23700
2164	1666914	153450	22999
2165	1666914	148914	22319
2166	1666914	144513	21660
2167	1666914	140241	21019
2168	1666914	136096	20398
2169	1666914	132074	19795
2170	1666914	128170	19210
2171	1666914	124382	18642
2172	1666914	120705	18091
2173	1666914	117138	17557
2174	1666914	113676	17038
2175	1666914	110316	16534
2176	1666914	107055	16045
2177	1666914	103891	15571
2178	1666914	100821	15111
2179	1666914	97841	14664
2180	1666914	94949	14231
2181	1666914	92143	13810
2182	1666914	89420	13402
2183	1666914	86777	13006
2184	1666914	84212	12622
2185	1666914	81723	12249
2186	1666914	79308	11887
2187	1666914	76964	11535
2188	1666914	74689	11194
2189	1666914	72482	10864
2190	1666914	70339	10542
2191	1666914	68261	10231
2192	1666914	66243	9929
2193	1666914	64285	9635
2194	1666914	62385	9350
2195	1666914	60542	9074
2196	1666914	58752	8806
2197	1666914	57016	8546
2198	1666914	55331	8293
2199	1666914	53696	8048
2200	1666914	52109	7810
2201	1666914	50569	7579
2202	1666914	49074	7355
2203	1666914	47624	7138
2204	1666914	46216	6927
2205	1666914	44850	6722



Şekil C.1 Multi phase modeli sonucu

ÖZGEÇMİŞ

Nergiz Akpınar, 28.07.1980 tarihinde İstanbul’da doğmuştur. 1998 yılında İstanbul Sakıp Sabancı Anadolu Lisesi’nden mezun olmuştur, aynı yıl Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başlamıştır. 2002 yılında “Biyokütle Atıkların Pirolizi” adlı bitirme tezini vererek mezun olmuştur. 2003 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü’nde Enerji Bilimi ve Teknolojileri programında yüksek lisans eğitimine başlamıştır.