

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KATI ATIK DEPO SAHALARINDA METEOROLOJİK
FAKTÖRLERİN DEPO GAZI OLUŞUMU ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

İBRAHİM UYANIK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. BESTAMİN ÖZKAYA**

İSTANBUL, 2012

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KATI ATIK DEPO SAHALARINDA METEOROLOJİK
FAKTÖRLERİN DEPO GAZI OLUŞUMU ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

İBRAHİM UYANIK tarafından hazırlanan tez çalışması 12.10.2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Bestamin ÖZKAYA
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Bestamin ÖZKAYA
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Erkan ŞAHİNKAYA
İstanbul Medeniyet Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Selami DEMİR
Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanmasındaki süreçte sabrını, desteğini, paylaşımcılığını ve moral motivasyonumu artırıcı yardımlarını esirgemeyen benim için her zaman en iyisini isteyen değerli hocam Doç. Dr. Bestamin ÖZKAYA'ya,
Yüksek lisans tezimle ilgili tüm aşamalarda büyük katkı sağlayan değerli arkadaşım, meslektaşım ve hocam Yrd. Doç. Dr. Selami DEMİR'E,
Tezin en önemli kısmı olan verilerin elde edilmesi hususunda yardımdan kaçınmayan Ortadoğu Enerji Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne,
Tezimin büyük bir kısmını yazdığım yer olan Harran Üniversitesi'nde teknik yönden kendimi geliştirmemi ve manevi desteklerini sağlayan değerli hocalarım, Prof Dr. Sinan UYANIK, Doç. Dr. Erkan ŞAHİNKAYA, Doç. Dr. M. İrfan YEŞİLNACAR, Yrd. Doç Dr. Sevgi DEMİREL ve Yrd. Doç Dr. A. Dilek ATASOY'a,
Harran Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümünde görev yaptığım süre boyunca beni motive eden değerli çalışma arkadaşlarım, hocalarım Arş. Gör. Deniz UÇAR, Arş. Gör. Adem YURTSEVER ve Arş. Gör. Hakan ÇELİKTEN'e,
Şanlıurfa'da görev yapmakta olduğum süre boyunca moral motivasyonumu en üst seviyede tutmama yardımcı olan ev arkadaşlarım Hasan Ali EMGİN, Sinan AŞIK ve yine Hakan ÇELİKTEN'e,
Benim akademik anlamda bu seviyeye gelebilmem için hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan kıymetli ailemin üyeleri olan annem Şerife UYANIK, babam Bünyamin UYANIK ve çok sevdiğim kardeşlerim Şeyma UYANIK ve Fatma KAMAN'a,
Evlendikten sonra ikinci ailemin değerli üyeleri olan, dualarını esirgemeyen annem Hatice BÜLBÜL ve babam Nihat BÜLBÜL'e,
Tezimi yazdığım sürecin sonlarında tanıştığım hayatımın geri kalanında yegâne hayat arkadaşım, nişanlım Ayşegül BÜLBÜL, eşim Ayşegül UYANIK'a,
Tüm destekleri ve yardımları için sonsuz teşekkür ederim ve saygılarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT.....	xiii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	2
1.3 Hipotez.....	2
BÖLÜM 2	
KATI ATIKLAR	4
2.1 Kentsel Katı Atıkların Fiziksel, Kimyasal ve Biyolojik Özellikleri	5
2.2 Katı Atıkların Düzenli Depolama Alanlarında Bertarafı	6
2.2.1 Depolama Tesisleri Sınıfları	7
2.2.2 Yer Seçimi	8
2.2.3 Depo Tabanının Teşkili	8
2.2.4 Depo Tesisi Üst Örtüsünün Teşkili.....	10
2.2.5 Depolama Yöntemleri.....	11
2.3 Katı Atık Depolama Sahalarında Gaz Oluşumu	12
2.3.1 Depo Gazının Oluşma ve Ayrışma Safhaları.....	16
2.3.2 Depo Gazının Toplanması	19
2.3.3 Depo Gazının Çevresel Etkileri	20
2.3.4 Depo Gazını Değerlendirmenin Faydaları	21
2.4 Depolama Alanlarında Gaz Oluşumunu Etkileyen Faktörler	23
2.4.1 Atık bileşenleri.....	24
2.4.2 Nutrientler	24
2.4.3 Toksik Bileşenler	24
2.4.4 Nem Muhtevası.....	25

2.4.5 Sıcaklık	25
2.4.6 pH ve Alkalinite	25
2.4.7 Oksijen	26
2.4.8 Hidrojen	26
2.4.9 Amonyak	26
2.4.10 Sülfat	27
2.4.11 Dane boyutu	28
2.4.12 Atık Stabilizasyonu	28
2.4.13 Meteorolojik Değişkenler	28
2.5 Depo Sahalarında Oluşan Gaz Miktarını Hesaplama ve Tahmin Yöntemleri	30
2.5.1 Teorik Gaz Üretimi	30
2.5.2 Kinetik Modeller	31
2.5.3 Tahmin Modelleri	31
BÖLÜM 3	
DEPO GAZINDAN ENERJİ ÜRETİMİ	33
3.1 Gaz Özellikleri	34
3.1.1 Metan (CH ₄)	34
3.1.2 Karbondioksit (CO ₂)	35
3.2 Depo Gazının Değerlendirilmesi	36
3.3 Depo Gazının Ön Arıtımı	37
3.3.1 Nem arıtımı	38
3.3.2 Kükürtlü Bileşikler	38
3.3.3 Siloksanlar	38
3.3.4 Halojenli Bileşikler	38
3.4 Depo Gazından Elektrik Enerjisi Üretimi	39
3.4.1 Pistonlu içten yanmalı motor (ICE, Otto Cycle)	39
3.4.2 Gaz türbini (GT, Brayton Cycle)	39
3.4.3 Pistonlu Gaz Motoru (Reciprocating Gas Engines)	39
3.4.4 CHP Sistemleri	39
3.4.5 Organik Rankin Çevrim Motoru (ORC, Rankine Cycle):	40
3.4.6 Sterling Çevrim Motoru (SCE)	40
3.4.7 Eriyik Karbonat Yakıt Pili (MCFC)	40
3.4.8 Katı Oksit Yakıt Pili (SOFC)	40
BÖLÜM 4	
GEREÇLER VE YÖNTEM	42
4.1 Sarıyer (Kireçburnu) Meteoroloji İstasyonu	42
4.1.1 Otomatik Meteoroloji İstasyonu	43
4.1.2 Meteorolojik Veriler	46
4.2 Odayeri Düzenli Depolama Alanı Enerji Tesisi	46
4.2.1 Düzenli depolama alanı enerji tesisi verileri	51
4.3 Veri Analizi	51
4.3.1 SOM (Self Organizing Maps – Kendinden Düzenlenen Haritalar) Modeli	52
4.4 Matematiksel Modelleme	56
4.4.1 ANN (Artificial Neural Network - Yapay Sinir Ağları) modeli	56

BÖLÜM 5

MODEL SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER	61
5.1 Veri Analizi Sonuçları	61
5.1.1 SOM Sonuçları	64
5.2 YSA Sonuçları	66
5.3 Tahmin Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	76

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	89
KAYNAKLAR.....	91
ÖZGEÇMİŞ.....	97

KISALTMA LİSTESİ

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ANN	Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Networks)
BMU	En İyi Eşleşen Birim (Best Matching Unit)
CHP	Bütünleşik Isı ve Güç (Combined heat and power)
EPA	Çevre Koruma Ajansı (Environmental Protection Agency)
GMT	Başlangıç Saati (Greenwich Mean Time)
GT	Gaz Türbini (Gas Turbine)
ICE	İçten Yanmalı Motor (Internal Cycle Engine)
IPCC	Hükümetler Arası İklim Değişim Paneli (Intergovernmental Panel on Climate Change)
KKD	Kuzey-Kuzeydoğu
LEL	En Düşük Patlayıcılık Sınırı (Lower Explosive Limit)
MCFC	Eriyik Karbonat Yakıt Pili (Molten Carbonate Fuel Cell)
MISO	Çok Girdi Tek Çıkış (Multi Input Single Output)
NMOCs	Metalik Olmayan Organik Bileşikler (Non-Metallic Organic Compounds)
ORC	Organik Rankin Döngüsü (Organic Rankine Cycle)
PCA	Temel Bileşenler Analizi (Principal Component Analysis)
RTD	Direnç Termometre (Resistance Temperature Detectors)
SCE	Sterling Çevrim Motoru (Stirling Cycle Engine)
SOM	Kendinden Düzenlenen Haritalar (Self Organizing Maps)
SOFC	Katı Oksit Yakıt Pili (Solid Oxide Fuel Cell)
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
UYA	Uçucu Yağ Asitleri
YSA	Yapay Sinir Ağları

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Katı atık düzenli depolama alanı tabakaları [15] 12
Şekil 2.2	Katı atık depo sahalarında atıkların ayrışma kademeleri..... 13
Şekil 2.3	Sızıntı suyundaki ayrışma fazlarında zamana bağlı gaz değişimi 16
Şekil 2.4	Atmosferik CO ₂ ve CH ₄ 'ün zamanla değişimi [21]..... 21
Şekil 2.5	Depo gazının çevresel etkileri [27] 22
Şekil 3.1	Pistonlu Gaz Motorundan Elektrik Üretim Tesisleri [27]..... 40
Şekil 3.2	Farklı teknolojilerin yıllara göre enerji dönüşümündeki performansları [49]..... 41
Şekil 3.3	Bir depolama alanında enerji elde edilmesinin aşamaları 41
Şekil 4.1	Otomatik İstasyon [51] 44
Şekil 4.2	Sırasıyla; sıcaklık ve nem algılayıcısı, yağışölçer [51]..... 45
Şekil 4.3	İstanbul haritası, atık transfer ve bertaraf tesisleri 48
Şekil 4.4	İstanbul Odayeri Enerji Üretim Tesisleri [52] 48
Şekil 4.5	Odayeri Enerji Tesisleri Yakma Bacası İllüstrasyonu [52] 49
Şekil 4.6	Depolama alanı üzerindeki gaz kuyuları [52]..... 49
Şekil 4.7	Gaz bacası boy kesiti 50
Şekil 4.8	Sinir ağındaki veriler ve kazanan nöron [57]..... 53
Şekil 4.9	Kendinden düzenlenen haritaların oluşturulması [75]..... 55
Şekil 4.10	Geliştirilmiş kendinden düzenlemeli ağ yapısı [76] 55
Şekil 4.11	İleri yönlü geri beslemeli bir YSA model çizelgesi..... 58
Şekil 4.12	Örnek bir YSA kurulumu 59
Şekil 5.1	Tüm verilerin SOM sonuçları 65
Şekil 5.2	Veri grubu olarak “V” kullanılarak uygulanan, sırasıyla CH ₄ , CO ₂ , O ₂ yüzdeleri ve depo gazı sıcaklığı tahmin sonuçları 67
Şekil 5.3	Veri grubu olarak “T+H” kullanılarak uygulanan, sırasıyla CH ₄ , CO ₂ , O ₂ ve depo gazı sıcaklığı tahmin sonuçları..... 69
Şekil 5.4	Veri grubu olarak “V - (T+H)” kullanılarak uygulanan, sırasıyla CH ₄ , CO ₂ , O ₂ ve depo gazı sıcaklığı tahmin sonuçları. 70
Şekil 5.5	Veri grubu olarak “V - T” kullanılarak uygulanan, sırasıyla CH ₄ , CO ₂ , O ₂ ve depo gazı sıcaklığı tahmin sonuçları..... 71
Şekil 5.6	Veri grubu olarak “T” kullanılarak uygulanan, sırasıyla CH ₄ , CO ₂ , O ₂ ve depo gazı sıcaklığı tahmin sonuçları 72
Şekil 5.7	Veri grubu olarak “H” kullanılarak uygulanan, sırasıyla CH ₄ , CO ₂ , O ₂ ve depo gazı sıcaklığı tahmin sonuçları 73
Şekil 5.8	Veri grubu olarak Yağış verileri ile “T+H” kullanılarak uygulanan, sırasıyla CH ₄ , CO ₂ , O ₂ ve Depo gazı sıcaklığı tahmin sonuçları..... 75
Şekil 5.9	Girdi verisi olarak “V” ile tahmin edilen ve ölçülen CH ₄ yüzdeleri ... 76
Şekil 5.10	Girdi verisi olarak “V” ile tahmin edilen ve ölçülen CO ₂ yüzdeleri 77

Şekil 5.11	Girdi verisi olarak “V” ile tahmin edilen ve ölçülen O ₂ yüzdeleri	77
Şekil 5.12	Girdi verisi olarak “V” ile tahmin edilen ve ölçülen	78
Şekil 5.13	Girdi verisi olarak “T+H” ile tahmin edilen ve ölçülen CH ₄ yüzdeleri.	78
Şekil 5.14	Girdi verisi olarak “T+H” ile tahmin edilen ve ölçülen CO ₂ yüzdeleri.	79
Şekil 5.15	Girdi verisi olarak “T+H” ile tahmin edilen ve ölçülen O ₂ yüzdeleri ..	79
Şekil 5.16	Girdi verisi olarak “T + H” ile tahmin edilen ve ölçülen soğutucu öncesi depo gazı sıcaklık değerleri	80
Şekil 5.17	Girdi verisi olarak “V - (T + H)” ile tahmin edilen ve ölçülen CH ₄ yüzdeleri.....	80
Şekil 5.18	Girdi verisi olarak “V - (T + H)” ile tahmin edilen ve ölçülen CO ₂ yüzdeleri.....	81
Şekil 5.19	Girdi verisi olarak “V - (T + H)” ile tahmin edilen ve ölçülen O ₂ yüzdeleri.....	81
Şekil 5.20	Girdi verisi olarak “V-(T+H)” ile tahmin edilen ve ölçülen soğutucu öncesi depo gazı sıcaklık değerleri	82
Şekil 5.21	Girdi verisi olarak “T” ile tahmin edilen ve ölçülen CH ₄ gazı yüzdeleri.....	82
Şekil 5.22	Girdi verisi olarak “T” ile tahmin edilen ve ölçülen CO ₂ gazı yüzdeleri	83
Şekil 5.23	Girdi verisi olarak “T” ile tahmin edilen ve ölçülen O ₂ gazı yüzdeleri	83
Şekil 5.24	Girdi verisi olarak “T” ile tahmin edilen ve ölçülen depo gazı sıcaklık değerleri	84
Şekil 5.25	Girdi verisi olarak “H” ile tahmin edilen ve ölçülen CH ₄ yüzdeleri	84
Şekil 5.26	Girdi verisi olarak “H” ile tahmin edilen ve ölçülen CO ₂ yüzdeleri	85
Şekil 5.27	Girdi verisi olarak “H” ile tahmin edilen ve ölçülen O ₂ gazı yüzdeleri	85
Şekil 5.28	Girdi verisi olarak “H” ile tahmin edilen ve ölçülen depo gazı sıcaklık değerleri	86
Şekil 5.29	Girdi verisi olarak “V-T” ile tahmin edilen ve ölçülen CH ₄ yüzdeleri.	86
Şekil 5.30	Girdi verisi olarak “V-T” ile tahmin edilen ve ölçülen CO ₂ yüzdeleri.	87
Şekil 5.31	Girdi verisi olarak “V-T” ile tahmin edilen ve ölçülen O ₂ yüzdeleri ...	87
Şekil 5.32	Girdi verisi olarak “V-T” ile tahmin edilen ve ölçülen soğutucu öncesi depo gazı sıcaklık değerleri	88

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	Kentsel katı atıkların fiziksel özellikleri [10] 5
Çizelge 2.2	Çeşitli ülkelerdeki katı atık yönetim teknolojilerinin dağılımı [10] 7
Çizelge 2.3	Tipik depo gazı bileşenleri 15
Çizelge 2.4	Depo gazındaki eser bileşikler..... 15
Çizelge 2.5	Atık stabilizasyonu için yapılan uygulamalar ve amaçları 28
Çizelge 2.6	LFG Tahmin Model Listesi ve Özellikleri [44], [19], [45] 32
Çizelge 3.1	İnsan Kaynaklı Metan Emisyonları 34
Çizelge 3.2	Depo gazının kullanım alanları..... 37
Çizelge 4.1	Meteorolojik veriler 47
Çizelge 4.2	Enerji tesisi ile ilgili bazı teknik bilgiler [52] 51
Çizelge 4.3	Depo gazı verileri 51
Çizelge 5.1	Depo gazı verilerinin açıklayıcı istatistiği 62
Çizelge 5.2	Meteorolojik veriler ve depo gazı verileri için korelasyon katsayıları . 62
Çizelge 5.3	Her bir değişkenin metan yüzdesi üzerindeki etki faktörü 63
Çizelge 5.4	Tüm veriler için Asal Bileşen Analizi ile belirlenen faktör ağırlıkları. 63
Çizelge 5.5	Asal Bileşen Analizi ile belirlenen diğer faktör ağırlıkları..... 64
Çizelge 5.6	Model grafikleri açıklama tablosu 66
Çizelge 5.7	Girdi veri grup kodlamaları 66
Çizelge 5.8	En iyi senaryoda her bir parametrenin etki faktörü 69
Çizelge 5.9	Farklı giriş değişkenlerinde her bir çıkış değişkeni için R değerleri 75
Çizelge 5.10	Farklı giriş değişkenlerinde her bir çıkış değişkeni için p değerleri..... 88

KATI ATIK DEPO SAHALARINDA METEOROLOJİK FAKTÖRLERİN DEPO GAZI OLUŞUMU ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

İbrahim UYANIK

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Bestamin ÖZKAYA

Evsel nitelikli katı atıkların miktarı ekonomik gelişmişlikle her geçen gün artmaktadır. Katı atıkların bertarafında en çok tercih edilen yöntem düzenli depolama sahalarının oluşturulmasıdır. Düzenli depolama sahalarının en önemli çıktılarından biri de atıklar anaerobik ayrışması sonucu oluşan depo gazıdır. Depo gazlarının; metan, karbondioksit ve bazı eser gazlar da dahil olmak üzere, küresel iklim değişimine ve sağlık problemlerine yol açtığı bilinmektedir. Depo gazının toplanması ve değerlendirilmesi hem olumsuz sonuçların ortadan kaldırılmasına, hem de ekonomik bir kaynak elde edilmesi anlamına gelmektedir. Depo gazı miktarının, oluşum mekanizmalarının ve ısıl değere sahip olan depo gazının oluşmasına etki eden faktörlerin analiz edilmesi ile enerji dönüşüm verimliliği artırılarak çevreci bir geri dönüşüm sağlanabilir.

Bu çalışmada, meteorolojik değişkenlerin depo gazı üzerindeki etkileri tam ölçekli bir sahadan alınan bir yıllık veri grupları kullanılarak incelenmiştir. Çalışma alanı, İstanbul'un Avrupa yakasındaki depolama alanı olan Odayeri düzenli depolama alanı ve Sarıyer Kireçburnu'ndaki meteoroloji istasyonunu kapsamaktadır. Çalışma, veri analizi ve tahmin modeli olmak üzere iki aşamada yapılmıştır. Veri analizi için SOM (Self Organizing Maps), kendinden düzenlenen haritalar, tahmin modeli için ise ANN (Artificial Neural Networks), yapay sinir ağları, algoritmaları kullanılmıştır.

SOM algoritması ile oluşturulan görsel haritalarda, depo gazı verileri ile meteorolojik verilerden yağış ve sıcaklık verilerinin birçoğunun birbiriyle ilişkili olduğu görülmüştür. Yapay sinir ağları ile yapılan tahmin modeli sonuçlarına göreyse, tüm veriler kullanılarak çalıştırılan model % 64 doğrulukla, toprak ve hava sıcaklıklarının

kullanıldığı modelde ise % 70 doğrulukla metan gazı oluşum yüzdesi tahmin edilebilmektedir. Diğer tahmin kombinasyonları ile yapılan tahminlerden toprak sıcaklığının depo gazını en çok etkileyen değişken olarak ortaya çıkarılmıştır. Literatürde depo gazı oluşumunu etkileyen birçok parametre daha önce yapılan çalışmalarda ortaya çıkarılmıştır. Çalışılan model ile meteorolojik faktörlerin depo gazının oluşum miktarı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Mevcut depo gazı tahmin modellerinin kullanımı, sahanın işletme şartlarına, depolanan atıkların cinsine, doğal faktörlere bağlı olarak bölgeden bölgeye farklı sonuçlar verebilmektedir. Bu durum, yüksek yatırımlı enerji tesislerinin verimliliğini ve projeksiyonunu önemli ölçüde etkilemektedir. Bu yüzden sahaya özgü birtakım girdiler göz önünde bulundurularak tahmin modellerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, meteorolojik faktörlerin depo gazı oluşumu üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar, meteorolojik faktörlerin depo gazı oluşumu üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Bunun yanında, enerji dönüşüm tesislerinin planlanması ve fizibilite çalışmaları kapsamında meteorolojik faktörlerin depo gazı tahmin modellerine önemli bir girdi olacağı sonucuna varılmıştır. Böylece enerji dönüşüm tesislerinin verimliliği ve projeksiyonu açısından sahaya özgü bir tahmin modelinin oluşturulmasına önemli bir katkı sağlandığı düşünülmektedir.

Yapılacak olan ileri düzey çalışmalarla; depo gazı miktarı da yerinde tahmin edilebilir, oluşturulan modellerle çalışan sistemin otomasyonu oluşturulabilir, gaz bacalarındaki basınçlar çevrimiçi kontrol edilerek depo sahalarındaki enerji tesislerinin daha verimli çalışması sağlanabilir.

Anahtar Kelimeler: Depo gazı, meteorolojik değişkenler, kendinden düzenlenen haritalar, yapay sinir ağları

ABSTRACT

THE EVALUATION OF THE METEOROLOGICAL FACTORS AFFECTING LANDFILL GAS GENERATION IN LANDFILLS

İbrahim UYANIK

Department of Environmental Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Bestamin ÖZKAYA

The quantity of domestic solid waste increases with increasing development. Mostly preferred method for the disposal of solid waste is constructing landfills. One of the most important final products of landfills is the gas which is produced during anaerobic decay. Landfill gas (LFG) containing methane, carbon dioxide and some other trace gases is known to induce global climate change and cause some health problems. Collection and reclamation of LFG is meant both to eliminate the detrimental effects and to get economic support for the field. With the analysis of landfill gas amount, its formation mechanisms, and the factors affecting the LFG, which has high calorific value, the energy conversion efficiency can be increased and an efficient and environment friendly way of recycling of the LFG can be provided.

In this study, a group of one year landfill gas data that is taken from a full-scale landfill is evaluated with meteorological factors. The area of interest is involved the meteorological station located in Kireçburnu, Sarıyer and the landfill site located in Odayeri, Eyüp that are both in European side of İstanbul. The study is divided into two group of analysis, one of them is data analysis and the other is modeling of data. Data analysis is made with self-organizing maps (SOM) algorithm; modeling is made with artificial neural networks (ANN) algorithm.

SOM algorithm is used for the visualization of the data by means of a map configuration. It is seen that LFG and most of meteorological data is related to each other seeing as the same color in the same hexagon. The proposed ANN model estimates methane gas percent with all input variables with the accuracy (correlation

coefficient, R) of 64 %. However when the inputs includes soil temperatures, the prediction percent increases. For instance, when inputs includes soil and air temperatures together to 70 %, but when soil temperatures took out of the inputs, it is predicted not accurately, showing 30 % correlation. This dictates that the soil temperatures play an important role in landfill gas generation. There are lots of parameters that are affecting landfill gas generation on the literature but this finding by ANN model is the first. With studied model, the effect of change in LFG formation amount is investigated with meteorological factors.

Present LFG projection models depend on the operation of landfill area, the sort of waste landfilled, and some natural factors. These factors can change from region to region that affect the efficiency and the projection of energy recovery plants. For this reason, landfill gas guess models can be improved by considering the inputs that are special to the landfill. In this study, meteorological factors are chosen as the special input for this landfill and an estimation model is developed.

The results obtained showed that meteorological factors are very important on the formation, content, and amount of landfill gas. In addition to this, it can be stated that meteorological factors are an important input for the feasibility studies and planning of energy recovery plants. With this estimation model, it can be supposed that a special model is developed for the projection and the efficiency of energy recovery plants.

By making some post-grade studies; LFG amount can be predicted on-site, an automation system can be created. And by online controlling gas pressure on gas wells, energy recovery plants can recover electricity more efficiently.

Keywords: Landfill gas, meteorological factors, Self Organizing Maps, Artificial Neural Networks

1.1 Literatür Özeti

Günümüzde artan çevre sorunlarından birisi olan katı atıkların bertarafı konusunda hem Türkiye’de hem de dünyada yenilikçi çözümler üretilmeye çalışılmaktadır. Katı atıkların bertarafı için ülkemizde yaygın olarak kullanılan yöntem düzenli depolamadır [1]. Bu sahalarda oluşan ve küresel ısınmaya sebep olan metan ve karbondioksit gibi depo gazlarının yakılarak enerji elde edilmesi de gün geçtikte artan bir eğilimle uygulanmaktadır. Bu bağlamda oluşan depo gazının, birçok değişkene bağlı olmakla birlikte, meteorolojik değişkenlerden nasıl etkilendiği de araştırılması gereken konulardan biridir.

Katı atık miktarı; gelişen teknoloji, endüstriyel ürünler ve uygulamalar ile günden güne artmaktadır. Bu atıkların bertaraf edilmesi ise insan ve çevre sağlığı açısından riskler oluşturmaktadır. Katı atıkların düzenli depolanması ve biyogazın yakılarak enerji edilmesi yöntemi; atık azaltma, geri kazanma ve yeniden kullanma, kompostlaştırma yöntemlerine kıyasla ekonomi ve çevre sağlığı yönünden sağladığı avantajlarından dolayı öncelikle tercih edilen yöntemdir. Düzenli depolama alanlarında anaerobik faaliyetler sonucu depo gazı olarak tabir edilen, çoğunlukla metan ve karbondioksitten oluşan gaz çıkışı meydana gelir. Bu gazlar, küresel ısınmaya, istenmeyen kokuların oluşmasına ve depolama sona erdiğinde bitki örtüsünün oksijensiz kalması gibi sorunlara sebep olur. Bu alanlarda depo gazının kontrollü olarak toplanması ve yakılarak enerji elde edilmesiyle bu sorunlar en aza indirilmekte, tesis işletme giderleri azalmakta ve bu enerjiyi satma imkânı sağlanmaktadır.

Düzenli depolama yöntemi, Türkiye’nin nüfusu en kalabalık kenti olan İstanbul’un kentsel katı atıklarının bertarafı için şehrin her iki yakasında bulunan katı atık depo sahalarında uygulanmaktadır. İstanbul’da 2010 yılı itibariyle günde ortalama 14.000 ton evsel katı atık bertaraf edilmektedir [2]. Avrupa Yakası’nda toplanan katı atıkların bertarafı Odayeri

Düzenli Depolama Tesisinde gerçekleştirilmektedir. İstanbul'un düzenli katı atık depo sahalarından Avrupa yakasında yer alan Odayeri katı atık depo sahasında günlük yaklaşık 8.000 ton çöp depolanmaktadır [3].

Bu çalışmada çalışma sahası olarak seçilen, İstanbul Avrupa yakasındaki Odayeri Düzenli Depolama Tesisinde meteorolojik olayların gözlenebileceği bir meteoroloji istasyonu olarak kabul edilebilecek Kireçburnu (Sarıyer) meteoroloji istasyonu, bu sahaya en yakın istasyondur. İki tesis arasındaki mesafe kuşbakışı yaklaşık 18 km'dir. Çalışma kapsamında, daha önce literatürde örneği olmayan bir yöntemle, katı atık depo gazları meteorolojik veriler kullanılarak YSA modeli ile modellenmiştir. Ayrıca, model öncesinde, veriler arasındaki ilişkinin anlaşılabilmesi adına SOM (Self Organizing Maps, özdüzenleyici haritalar) algoritması ile veriler analiz edilmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Depolama alanlarında oluşan depo gazı miktarının meteorolojik faktörlere bağlı olarak değiştiği birçok çalışmada ortaya konmuştur [4], [5], [6], [7]. Bu çalışma, meteorolojik verilerin YSA (Yapay Sinir Ağları) modeli kullanılarak depo gazı (metan, karbondioksit, oksijen) miktarının tahmin edilmesini amaçlamaktadır. Bu amaçla, öncelikle SOM (Self Organizing Map, Kendinden Düzenlenen Haritalar) haritaları oluşturularak veriler arasındaki ilişki ortaya konmuştur. Daha sonra, meteorolojik veriler ile Odayeri düzenli depolama alanından alınan depo gazı verileri yapay sinir ağları ile modellenmiştir. Meteorolojik verilerin her birinin/her bir grubun depo gazı oluşumuna ne oranda etki ettiğini inceleyebilmek adına farklı gruplarda meteorolojik veriler girdi olarak kullanılmıştır. Bu bağlamda, giriş verileri olarak kullanılan ve günlük meteorolojik veriler olan; yağış, en düşük sıcaklık, en yüksek sıcaklık, ortalama sıcaklık, 5-10-20-50-100 cm derinliklerdeki toprak sıcaklıkları, ortalama atmosfer basıncı, ortalama buhar basıncı, ortalama nem ve toprak üstü en düşük sıcaklık verileri farklı gruplamalar yapılarak kullanılmıştır. Metan, karbondioksit, oksijen ve soğutucu öncesi depo gazı sıcaklığı ise çıkış verileri olmak üzere ayrı ayrı modellenmiştir. Modelleme sonuçları ile gerçek değerler grafiklerle gösterilmiştir.

1.3 Hipotez

Bu çalışmada, katı atık depolama alanlarında oluşan depo gazı miktarının meteorolojik faktörlerle olan ilişkisi SOM (kendini düzenleyen haritalar) ve YSA (yapay sinir ağları) ile incelenmiştir.

Bu alışma ile katı atık depolama alanlarında oluşan depo gazının meteorolojik veriler kullanarak % 70'ten yüksek oranda tahmin edilebilmesi mümkün hale gelecektir. Geliştirilecek yeni bir algoritmayla depo gazının yakılarak enerji edilmesinden önce, işletim için gerekli motor gücü, enerji ihtiyacı, üretilecek enerji miktarı önceden belirlenebilecektir.

Bu çalışmanın ilk bölümünde katı atıklar hakkında genel bilgiler ve modelleme aşamaları değerlendirilmiştir. İkinci bölümde ise, depolama alanlarında ayrışma işleminin nasıl meydana geldiği ve depo gazı oluşumu ve miktarı hakkında genel bilgiler verilmiştir. 3. bölümde, katı atıklardan enerji elde edilmesi ana başlığı altında; gaz özellikleri ve enerji dönüşüm sistemleri verilmiştir. 4. bölümde veri alınan meteoroloji istasyonu ve düzenli depolama alanı ile matematiksel modellemenin teorik altyapısının açıklandığı gereçler ve yöntemler ortaya konmuştur. Beşinci bölüm, model sonuçlarının grafiklerle gösterildiği ve değerlendirmelerin yapıldığı bölümdür. Altıncı bölüm sonuçların özetlendiği, son bölüm ise kaynakların verildiği bölümdür.

BÖLÜM 2

KATI ATIKLAR

Üreticisi tarafından atılmak istenen ve toplumun huzuru ile özellikle çevrenin korunması bakımından, düzenli bir şekilde bertaraf edilmesi gereken katı maddeleri ve arıtma çamurunu ihtiva eden atıklara katı atıklar; konutlardan atılan tehlikeli ve zararlı atık kavramına girmeyen, bahçe, park ve piknik alanları gibi yerlerden gelen atıklara evsel katı atıklar denilmektedir [8]. Atıkların miktarı ve çeşidi kültürel ve sosyo-ekonomik yapıya bağlı olarak değişiklik gösterir ve uygun bertaraf edilmediklerinde çevresel problemler oluşur.

14.3.1991 tarih ve 20814 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanmış ve son olarak 1/4/2010 tarih ve 25777 sayılı Resmi Gazete’de değişiklik yapılmış “Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği”ne göre [8]; “Katı atık üreten kişi ve kuruluşlar, en az katı atık üreten teknolojiyi seçmekle, mevcut üretimdeki katı atık miktarını azaltmak, katı atık içinde zararlı madde bulundurmamakla, katı atıkların değerlendirilmesi ve maddesel geri kazanma konusunda yapılan çalışmalara katılmakla yükümlüdür.” hükmü bulunmaktadır.

Bu yönetmelikteki, “Bu Yönetmelik kapsamına giren katı atıkların bertarafı sırasında belediyeler ve yetkilerini devrettiği kişi ve kuruluşlar işlettikleri katı atık tesislerinin faaliyetlerinin planlanmasında ve işletilmesinde; insanların ruh ve beden sağlığına, hayvan sağlığına, doğal bitki örtüsüne, yeşil alanlara ve binalara, toplumun düzeni ve emniyetine, yeraltı ve yüzeysel su alanları ile su rezerv sahalarına zarar vermeyecek ve hava, gürültü yönünden çevre kirlenmesini önleyecek uygun tedbirleri almak zorundadırlar.” hükmü çerçevesinde katı atıkların bertarafı zorunlu kılınmıştır.

Buna göre, katı atıkların yönetmeliklere uygun olarak bertaraf edilmesi için, yukarıda belirtilen faaliyetlerin planlanması ve çevre ve insan sağlığının korunması için katı atık yönetiminin iyi yapılması gerekir. Bu bağlamda, evsel katı atıklar hakkında temel

bilgilerin iyi kavranması gerekir.

Katı atıklar, kaynaklarına ve bileşimlerine göre olmak üzere iki grupta incelenebilir. Kaynaklarına göre katı atıklar evsel atıklar, ticari ve kurumsal atıklar, park, bahçe ve pazar yeri atıkları, inşaat yıkım ve hafriyat atıkları, endüstriyel, tarımsal ve tıbbi atıklar ile arıtma çamurlarından oluşur. Bileşimlerine göre ise organik ve inorganik atıklar şeklinde sınıflandırılır.

2.1 Kentsel Katı Atıkların Fiziksel, Kimyasal ve Biyolojik Özellikleri

Kentsel katı atıklar, dünyada gelişmişlik seviyesine, sosyal ve kültürel alışkanlıklara, mevsimlere ve tüketim alışkanlıklarına göre miktar ve içerik olarak büyük değişim gösterebilir. Örneğin; ABD’de kişi başına üretilen evsel katı atık miktarı, Japonya ve Avrupa Birliği ülkelerinin ürettiği toplam kişi başına miktarın iki katıdır [9]. Benzer şekilde, gelir seviyesi düşük ülkelerde atık içeriğindeki organik miktar yüksekken, gelişmiş ülkelerde üretilen evsel katı atıktaki organik miktar düşüktür. Bu yüzden, atık içeriğinin, kompozisyonunun ve fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinin iyi bilinmesi önemlidir.

Kentsel katı atıkların en önemli fiziksel özellikleri; yoğunluk, su muhtevası, alan kapasitesi, özgül ağırlık ve porozitedir. Çizelge 2.1’de kentsel katı atıkların fiziksel özelliklerinin değişim aralıkları verilmiştir.

Çizelge 2.1 Kentsel katı atıkların fiziksel özellikleri [10]

Değişken	Aralık
Yoğunluk	475-830 kg/m ³
Hacimsel su muhtevası	% 15 - % 50
Arazi kapasitesi	%50 - %60 (Sıkıştırılmamış atık için)
Özgül ağırlık (t/m ³)	1,7-2,5
Boşluk oranı	0,4-0,6

Kentsel katı atıkların kimyasal özellikleri, su muhtevası, uçucu katı madde, inorganik karbon içeriği, atığın kül muhtevası ve atığın kalorifik değeridir.

Atıkların biyolojik özellikleri organik madde içeriği ile belirlenir. Kentsel katı atıkların organik bileşenleri, suda çözünebilen kısımları (şekerler, nişasta, amino asitler, uçucu organik asitler), hemiselüloz, lignin , selüloz, lignoselüloz ve proteinlerdir. Kentsel katı atıklar kuru ağırlık bazında , %40-50 selüloz, %12 hemiselüloz, %10-15 yağlar ve

organiklerin %4'ü civarında proteinlerden oluşmakta ve metan potansiyelinin %90'ı selüloz ve hemiselülozun ayrışmasından ileri gelmektedir [11]. Çöpün nem tutma potansiyeli depo sahasında oluşan sızıntı suyu miktarı ve sahaya ilave edilecek sızıntı suyu miktarını belirlemek için önemlidir. Çöpün hacimsel veya kütle bazında belirtilen nem tutma kapasitesi katı atıkların alan kapasitesi olarak tanımlanmaktadır. Yapılan çalışmalarda kentsel katı atık depo sahaları için tesbit edilen alan kapasiteleri %14-44 arasında, çöpün suyu absorblama kapasitesi ise 125 l/m³ olarak belirlenmiştir [12].

2.2 Katı Atıkların Düzenli Depolama Alanlarında Bertarafı

Düzenli depolamadan önce katı atıklar kontrolsüz olarak yığılmaktaydı. II. dünya savaşından sonra düzenli depolama kavramı ortaya çıktı. Başlarda düzensiz olarak nitelenebilecek, 5 m'lik çöp yığınlarının üzerinin 15-20 cm'lik doğal örtü ile kapatılması gibi, depolama şekli taban geçirimsizliğinin sağlanmasıyla düzenli depolama olarak anılmaya başlandı.

Geçirimsizlik tabakası kil ve geomembranla sağlanan, sıkıştırılan, düzenli depolanan, çevre ve insan sağlığını etkilemeyecek şekilde üzeri örtülen ve oluşan gazdan enerji elde edilebilen depolara düzenli depolama alanları denilmektedir.

Depolama alanlarının inşa edilmesi sırasında dikkat edilmesi gereken en önemli konular; yer seçimi, taban teşkili ve üst örtü teşkilidir. Atıkların düzenli depolanmasına dair yönetmelikte [13]; bu konular ile ilgili gerekli parametreler ve gereksinimler belirlenmiştir.

Katı atıkların düzenli depo sahalarında bertaraf edilmesi, yakma ve kompostlaştırma gibi diğer alternatif atık bertaraf yöntemleri arasında, ekonomik avantajları dolayısıyla en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Çizelge 2.2'de bazı ülkelerde atık bertarafında kullanılan yöntemler verilmiştir.

Türkiye'deki bertaraf tesislerinden derlenen verilere göre 2008 yılında 37 düzenli depolama tesisinin toplam kapasitesinin 390 milyon ton olduğu ve tesislere 11 656 827 ton atık geldiği belirlenmiştir. Gelen atığın % 93,9'u belediye atıklarını, %6,1'i ise diğer sektörler tarafından getirilen atıkları ve yakma tesisi ve kompost tesisinden aktarılan atıkları kapsamaktadır. Bu atıkların % 86'sı düzenli depolama sahalarında bertaraf edilmiş, kalan % 14'lük kısım ise satılmış ya da hibe edilmiştir [1].

Çizelge 2.2 Çeşitli ülkelerdeki katı atık yönetim teknolojilerinin dağılımı [10]

Ülke	Katı atık bertaraf teknolojisinin kullanıldığı oran (%)			
	Düzenli depolama	Yakma	Kompostlaştırma	Geri Kazanma
Avustralya	82	2,5	-	15,5
Kanada	80	8	2	10
Fransa	45	42	10	3
Almanya	46	36	2	16
Yunanistan	100	-	-	-
İrlanda	97	-	-	3
İtalya	74	16	7	3
Hollanda	45	35	5	15
Portekiz	85	-	15	-
İspanya	64	6	17	13
İngiltere	88	6	-	6
A.B.D.	67	16	2	15
Türkiye	41	-	0,01	1

Katı atıkların kontrolü yönetmeliğine göre [13], Depo tesislerinin asgari kapasiteleri, nüfusu 100.000'den küçük olan yerleşim bölgelerinde 10 yıllık depolama ihtiyacını karşılayacak şekilde, nüfusu 100.000'den büyük olan yerlerde 500.000 m³ olarak planlanır.

2.2.1 Depolama Tesisleri Sınıfları

Depolama alanları; Atıkların düzenli depolanmasına dair yönetmelikte depolanabilen atık altyapısına göre 3 sınıfa ayrılmıştır [13]:

I. sınıf düzenli depolama tesisi: Tehlikeli atıkların depolanması için gereken altyapıya sahip tesis.

II. sınıf düzenli depolama tesisi: Belediye atıkları ile tehlikesiz atıkların depolanması için gereken altyapıya sahip tesis.

III. sınıf düzenli depolama tesisi: İnert atıkların depolanması için gereken altyapıya sahip tesis.

2.2.2 Yer Seçimi

Atıkların düzenli depolanmasına dair yönetmelikte katı atık depolama alanının inşası öncesi yer seçimi için belirlenen kriterler şunlardır [13]:

Düzenli depolama tesis sınırlarının yerleşim birimlerine uzaklığı I. sınıf düzenli depolama tesisleri için en az bir kilometre, II. sınıf ve III. sınıf düzenli depolama tesisleri için ise en az iki yüz elli metre olmak zorundadır.

Ayrıca, düzenli depolama tesisinin yer seçiminde;

- a) Düzenli depolama tesisinin hava ulaşım güvenliğini etkileyip etkilemediği,
- b) Orman alanları, ağaçlandırma alanları, yaban hayatı ve bitki örtüsünün korunması gibi özel amaçlarla koruma altına alınmış alanlara uzaklığı,
- c) Bölgede bulunan yeraltı ve yüzeysel su kaynakları ve koruma havzalarının durumu, yeraltı su seviyesi ve yeraltı suyu akış yönleri,
- ç) Sahanın topografik, jeolojik, jeomorfolojik, jeoteknik ve hidrojeolojik durumu,
- d) Taşkın, heyelan, çığ, erozyon ve yüksek deprem riski,
- e) Hâkim rüzgâr yönü ve yağış durumu,
- f) Doğal veya kültürel miras durumu dikkate alınır.

Sahada akaryakıt, gaz ve içme-kullanma suyu naklinde kullanılan boru hatları, yüksek gerilim hatları bulunmaz.

Çevresel etki değerlendirmesi sürecinin tamamlanmasını müteakip seçilen alan, ilgili planlara işlenir.

2.2.3 Depo Tabanının Teşkili

Düzenli depolama tesisinin tabanı ve yan yüzeylerinde, sızıntı suyunun yeraltı suyuna karışmasını önleyecek şekilde bir geçirimsizlik tabakası teşkil edilir. Bunun için kil veya eşdeğeri malzemeden oluşturulmuş geçirimsizlik tabakası serilir. Geçirimsizlik tabakasının fiziksel, kimyasal, mekanik ve hidrolik özellikleri depolama tesisinin toprak ve yeraltı suları için oluşturacağı potansiyel riskleri önleyecek nitelikte olmak zorundadır. Geçirimsizlik malzemeleri teknik özellik bakımından Türk Standartları Enstitüsü standartlarına uygun olmalıdır.

Düzenli depolama tesisi sınıflarına göre depo tabanının asgari aşağıda belirtilen geçirgenlik ve kalınlık özelliklerine sahip olması gerekir [13]:

a) I. sınıf düzenli depolama tesisi: $K \leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/sn; kalınlık ≥ 5 m veya eşdeğeri,

b) II. sınıf düzenli depolama tesisi: $K \leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/sn; kalınlık ≥ 1 m veya eşdeğeri,

c) III. sınıf düzenli depolama tesisi: $K \leq 1,0 \times 10^{-7}$ m/sn; kalınlık ≥ 1 m veya eşdeğeri.

Jeolojik geçirimsizlik tabakasının ikinci fıkrada verilen koşulları doğal olarak sağlayamaması halinde; bu tabaka yapay olarak oluşturulur ve jeomembran kullanılarak güçlendirilir. Geçirimsiz mineral malzeme ile yapay olarak oluşturulacak geçirimsizlik tabakasının toplam kalınlığı 0,5 metreden az olamaz.

Sızıntı sularının toprak ve yeraltı suları için oluşturacağı potansiyel risklerin engellenmesi için düzenli depolama tesislerinde doğal geçirimsizlik tabakasına ilave olarak aşağıda verilen teknik özelliklerde sızıntı suyu toplama ve drenaj sistemi inşa edilir:

a) I. sınıf ve II. sınıf düzenli depolama tesislerinde jeolojik geçirimsizlik tabakası yapay geçirimsizlik malzemesi ile oluşturulur. Yapay geçirimsizlik malzemelerinin yeterli teknik özelliklere haiz olduğunun ve Ek-3'te yer alan standartlara veya bunun mümkün olmaması halinde uluslararası standartlara uygunluğu belgelenir ve Bakanlığa bildirilir.

b) Yapay geçirimsizlik tabakasının korunması amacıyla koruyucu örtü malzemesi kullanılır.

c) I. sınıf ve II. sınıf düzenli depolama tesislerinde yapay geçirimsizlik kaplaması üzerine asgari 0,5 metre kalınlığa ve en az $K \geq 1,0 \times 10^{-4}$ m/s geçirgenliğe sahip drenaj tabakası uygulanır.

ç) Drenaj katmanının içinde drenaj boruları bulunur. Boru çapı, yapılacak kontrol ve temizlemelere imkân verebilecek genişlikte olur. Depo tabanında sızıntı suyuna dayanıklı bir malzemedan imal edilmiş yeterli sayıda drenaj borusu, ana toplayıcılar ve bacalar bulunur. Sızıntı suyu toplama ve drenaj sistemi sızıntı suyu toplama havuzu ile son bulur. Sızıntı suyu toplama havuzu tesisin kurulacağı yerin meteorolojik koşulları ve depolanacak atıkların su içeriği göz önünde bulundurularak herhangi bir olumsuzluğa mahal vermeyecek şekilde tasarlanır ve inşa edilir.

d) Depo tabanının boyuna eğimi % 3'ten az olamaz.

III. sınıf düzenli depolama tesislerinde, sahada sel, taşkın gibi yağış sularından ve yüzeysel sulardan kaynaklı olumsuzlukları engelleyecek önlemlerin alınması kaydıyla bu maddenin dördüncü fıkrası uygulanmaz. Ancak Bakanlıkça gerekli görülmesi halinde bu tesislerde, yeraltı suyunun kontrolü ve izlenmesi için gerekli tedbirler alınır ve bu maddenin dördüncü fıkrasına uygun şekilde sistem kurulur.

2.2.4 Depo Tesisi Üst Örtüsünün Teşkili

Atık depolama işlemi tamamen bittikten sonra depolama alanında üst örtü teşkil edilmeden önce, alan normal kazı toprağı örtüsü ile tesviye edilir. Kapatma işlemine başlamadan önce; atıkların veya yapının kayma ve çökme riskine karşı depolanan atık kütlelerinin yeterince oturduğu tespit edilir [13].

Düzenli depolama tesisi sınıflarına göre, tesisin kurulduğu bölgenin yağış özelliklerinden dolayı kapatma sonrası süreçte sızıntı suyunun oluşumunun engellenmesi ve depoda oluşacak gazların toplanması için depo üst örtüsü asgari aşağıda verilen şartları sağlayacak şekilde teşkil edilir [13]:

a) Yalnızca gaz oluşumu beklenen II. sınıf düzenli depolama tesislerinde; depo gazlarının oluşturacağı potansiyel risklerin engellenmesi amacıyla gaz drenaj katmanı inşa edilir.

b) Yapay geçirimsizlik kaplamasının I. sınıf düzenli depolama tesislerinde uygulanması mecburidir.

c) Mineral geçirimsizlik tabakası en az 25 cm kalınlığında iki tabaka halinde uygulanır. Drenaj tabakasının en az 50 cm kalınlığında olması ve en az $K \geq 1.0 \times 10^{-4}$ m/s geçirgenliğe sahip olması gerekir.

ç) Üst örtü toprağı daha sonradan bitkilerin yetiştirilmesini sağlayabilecek şekilde yetiştirilecek bitki türüne bağlı olarak en az 50 cm kalınlığında olması gerekir.

III. sınıf düzenli depolama tesisleri için bu hükümler uygulanmamakla birlikte bu sahalarda atık depolama işlemi tamamen bittikten sonra sahanın üstünün kapatılması ve yeşillendirilmesi zorunludur.

Üst örtü teşkili, depolama alanlarında depo gazının toplanmasına etki eden önemli faktörlerden biridir [4]. Üst örtü teşkilinin en üst seviyede yapılması durumunda depoya hava girişi en az seviyede olacak, böylelikle atığın doğal anaerobik bozunum süreci sekteye uğramayacaktır.

Depo alanlarında oluşan gazlardan olan metan gazının toplama verimi depo sahasının üzerindeki örtü tabakasının özelliğine göre değişmektedir. ABD’de yapılan bir çalışmaya göre [14], geomembran ile kapatılmış depo sahalarında % 90 verimle metan elde edilirken, işletme halindeki bir hücrede ise verim % 35 olmaktadır. Kil tabakasıyla örtülmüş sahalarda ise bu verim % 85 olarak ölçülürken, geçici olarak kapatılmış hücrede ise % 65 verim elde edilmektedir.

2.2.5 Depolama Yöntemleri

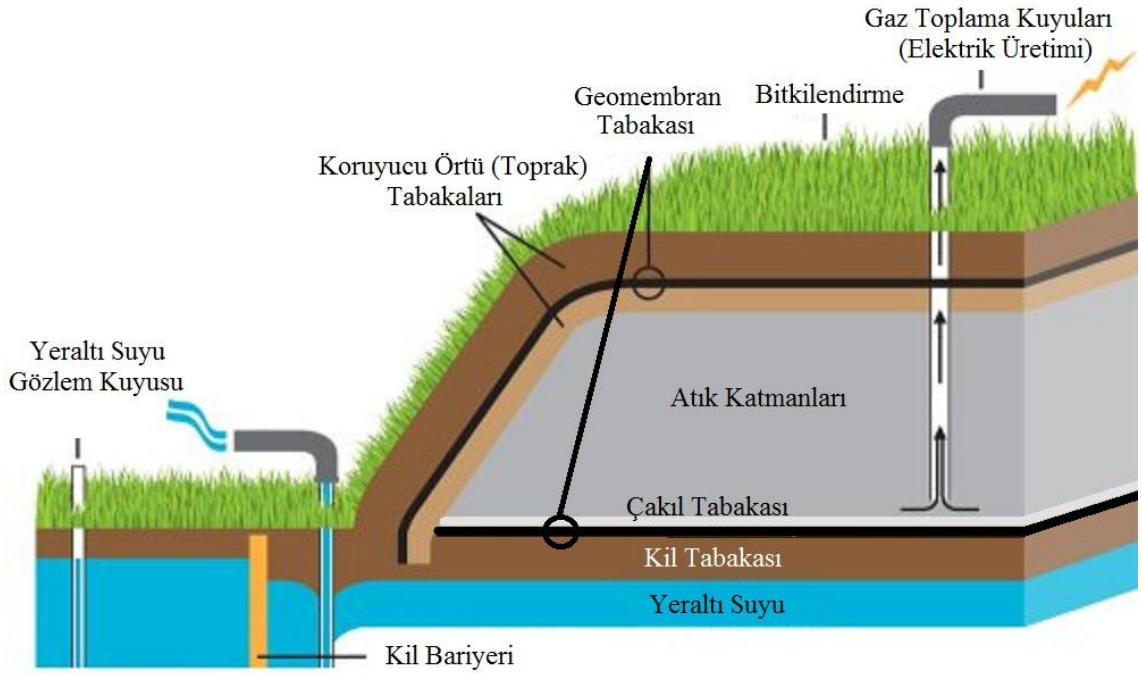
Kuru arazilerde çöp, hendek metodu, alan metodu, vadi dolgusu metodu ve rampa metodu olmak üzere çeşitli şekillerde depolanmaktadır.

Hendek metodu, yeterli toprak örtüsünün bulunduğu yerlerde uygulanır. Katı atıklar 40-100 m. uzunlukta 1-2 m. derinlikte ve 5-8 m. genişlikte kazılan hendeklere ince tabakalar halinde yayılır ve sıkıştırılır. Bu işlem, killi, sızdırmaz zeminlerde ve küçük nüfuslu yerleşimlerde uygulanır. Bu metotta çöp dökmeden önce bir dozer yardımı ile birkaç araç genişliğinde belirli bir yükseklikte (23-15 m) ve 30-150 m uzunluğunda çukur açılır. Kazılan zemin, örtü toprağı olarak daha sonra kullanılmak üzere kazılacak hendek kenarından uzakta depolanır. Arazi zemini, şev eğimini sağlayacak uygun bir kohezyon değerine sahiptir. Bu yöntemde atıklar çukur tarafına dozerler vasıtası ile serilir. Sahanın her noktası üzerinden buldozer veya kompaktör ile 2-3 defa geçilerek atıkların parçalanıp sıkışmaları sağlanır. Dolgu alanının uzunluğu, o günkü dökülen kapasite ile ölçülür yani dolgu yüksekliğine gelen bir günlük kapasitenin üzeri hemen kapatılır.

Arazinin hendek kazılmasına müsait olmadığı veya buna ihtiyaç bulunmadığı hallerde alan metodu uygulanır. Çöpler uzun ve dar şeritler halinde 30-60 cm kalınlıkta araziye serilir ve sıkıştırılarak 2-3 m yüksekliğe kadar depo edilir. Şeritlerin boyları, genelde bu yüksekliğe günün sonunda erişilecek şekilde planlanır. Günün sonunda depolanan sıkıştırılmış çöp yığınının üzerine 20-30 cm. kalınlıkta toprak tabakası örtülür. Doldurma operasyonu genellikle daha önce inşa edilen toprak bir seddenin dibinden başlar ve sıkıştırılarak sedde yüksekliğine kadar devam eder. Sıkıştırılan çöpler 6 m genişliğinde şeritler halinde yükselir. Üzeri toprakla örtülerek sıkıştırılmış çöp yığına hücre denir ve hücreler üst üste inşa edilerek planlanan seviyeye ulaşılır. Depolama yapılırken izlenmesi gereken temel sıra Şekil 2.1’de verilmiştir.

Vadi dolgusu metodunda, vadilerde düzenli depolamanın yapımından önce mevcut kuru veya sulu dereler, akarsular depolama alanın memba tarafından başlayıp mansap tarafında biten tünel veya menfezlerle çöplerle teması kesilmelidir. Menfez veya tüneller yeraltı suyu ve çöp sızıntı sularına karşı iyice yalıtılmalıdır. Vadi metoduyla çalışırken bütün çalışma bölgesi yağış ve akış sularına karşı çevresel hendeklerle donatılmalı, yağış sularının çöplerle teması kesilmeli, gerekli hallerde pompalarla sular çalışma dışına aktarılmalıdır.

Su seviyesinin az veya yüksek olduğu atık depolama yapılacak yerlerde rampa metodu uygulanır. Burada hücreler daha kalın ve uzun olarak; alan metodundaki uzunluktan daha kısadır.



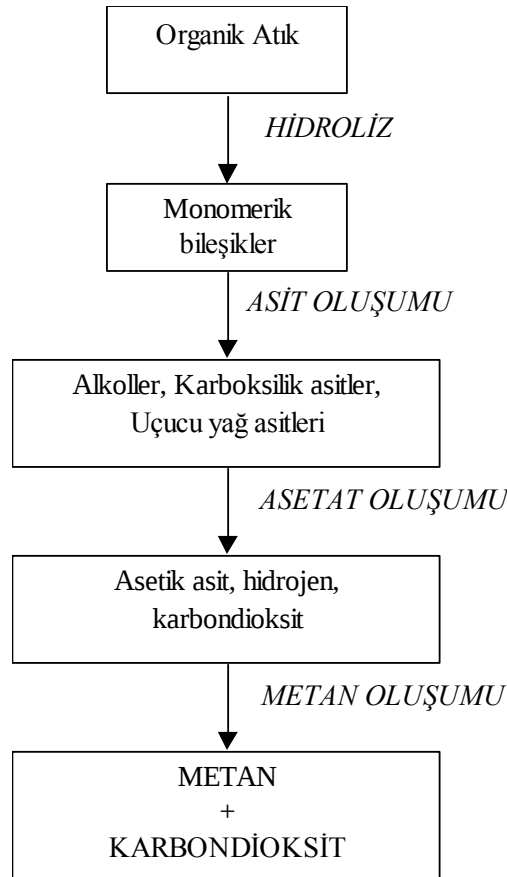
Şekil 2.1 Katı atık düzenli depolama alanı tabakaları [15]

2.3 Katı Atık Depolama Sahalarında Gaz Oluşumu

Katı atık depo sahası; katı, sıvı ve gaz fazının bir arada bulunduğu, temel giriş maddelerinin katı atık ve yağmur suyu, başlıca çıkış elementlerinin ise depo gazı ve sızıntı suyu olduğu bir çeşit reaktör olduğu söylenebilir. Depo sahalarında sıvı faz, çözünmüş veya askıda organik maddeleri ve katı fazdan gelen inorganik iyonları içerir. Gaz fazı ise genellikle karbon içeriklidir. Depo sahalarında katı atıkların ayrışması anaerobik şartlar altında gerçekleşir. Biyoreaktör depo sahalarında atıkların ayrışma kademeleri Şekil 2.2’de verilmiştir [16].

Depo sahalarında, oksijenin açık havadan difüzyonla ve yağmur suyundan temin edildiği üst tabakada meydana gelen aerobik ayrışma ve hidroliz, asit üretimi ve metan üretimi safhalarından oluşan anaerobik ayrışma olmak üzere iki tip ayrışma fazı vardır. Katı atık depo sahalarındaki ayrışmanın temelini anaerobik ayrışma teşkil etmektedir. Depo sahasında mikrobiyal aktivite sonucu gerçekleşen biyokimyasal reaksiyonların hızı atıkların çürüme süresini belirler. Atıkların nem muhtevası, sıcaklığı, yoğunluğu ve kompozisyonu ile alkalinite ve pH bozunma sürecini etkileyen başlıca parametrelerdir.

Atıkların fermentasyonu sonucu oluşan başlıca nihai ürünler uçucu yağ asitleri, CO₂ ve CH₄'dir. Depo sahasında metan oluşumunu etkileyen faktörler; sıcaklık, çöpün su muhtevası, pH/alkalinite, oksijen, hidrojen, sülfat, nütrientler ve inhibitörlerdir. Yüzey alanı/hacim oranı düşük olan büyük partiküller küçük partiküllere göre daha yavaş hidroliz olurlar. Her bileşenin ayrışma hızı farklı olduğundan kompleks ve heterojen atıkların ayrışması birinci mertbe reaksiyon kinetiğine uymaktadır [17].



Şekil 2.2 Katı atık depo sahalarında atıkların ayrışma kademeleri

Depo alanlarında bulunan temel gazlar; metan (CH₄), karbondioksit (CO₂), amonyak (NH₃), karbonmonoksit (CO), hidrojen sülfür (H₂S), azot (N₂) ve oksijen (O₂)'dir (Bkz:

Çizelge 2.3). Metan ve karbondioksit, ayrışabilen evsel katı atıkların anaerobik ayrışması neticesinde oluşan başlıca gazlardır. Depo sahası gazları genellikle % 45 – 60 oranında CH₄ ve % 40 – 60 oranında da CO₂ içermektedir [18].

Depo sahalarında atıkların stabilizasyon işlemleri, fiziksel (absorbsiyon, filtrasyon, seyrelme ve dispersiyon), kimyasal (hidroliz, adsorbsiyon/desorbsiyon, asit baz etkileşimi, çökme, iyon değiştirme, kompleks oluşumu) ve biyolojik (aerobik ve anaerobik ayrışma) işlemlerle yürütülmektedir. Fiziksel işlemler atığın su muhtevası ile yakından ilgilidir. Depo sahalarında, atıklar alan kapasitesine (atıkların ulaşabileceği minimum su muhtevası) ulaşırken, basınç gradyanının bir sonucu olarak atık partiküllerinin çözünmesi ve konsantrasyon gradyanının sonucu olarak da seyrelme meydana gelmektedir. Atıkların su muhtevası artırıldığında fiziksel işlemlere bağlı olarak çözünme hızlanmaktadır. Depo sahalarında atıkların stabilizasyonunda fiziksel ve kimyasal prosesler etkili olmasına rağmen atıkların biyolojik ayrışması en önemli prosestir.

Ilıman iklimlerde depo gövdesinin sıcaklığı organik maddelerin ayrışma hızına ve depolama derinliğine bağlı olarak 45 °C'ye kadar çıkabilir. Ancak, ılıman bölgelerdeki az sayıda depo sahası bu yüksek sıcaklıkta belli bir süre kalabilir [19]. Ayrışmanın stabil metan safhasına ulaşmasında gecikme olmaması ve sızıntı suyunun uçucu yağ asiti konsantrasyonundaki artışı kontrol etmek için bu faktörler optimize edilmelidir.

Katı atık düzenli depo sahalarında ayrışma sırasında başlangıçta kısa süreli bir aerobik ayrışma fazı ve daha sonra daha uzun süren ve depo gazı oluşumu nedeniyle daha önemli olan anaerobik ayrışma fazı gerçekleşir. Katı atıklar depo sahalarında ilk depolandıkları anda ortamda O₂ mevcuttur. Bu durum, biyolojik olarak ayrışabilen maddelerin başlangıçta aerobik şartlar altında ayrışmasına neden olur. Atıkların aerobik ayrışması sonucu karbondioksit ve su oluşur. Atıklar depolandıktan sonra O₂'nin önemli ölçüde azalması anaerobik ayrışma fazının başladığını gösterir.

Katı atık düzenli depo sahalarından oluşan depo gazlarını büyük oranda metan ve karbondioksit oluşturmakla beraber, yapılan çalışmalarda gaz içerisinde 170'ten fazla bileşiğin olduğu belirlenmiştir [19]. Tipik depo gazı bileşenleri Çizelge 2.3'te, iz bileşenleri ve miktarları ise Çizelge 2.4'de verilmiştir [10].

Düzenli depo sahalarının gerek tasarımı ve gerekse işletilmesi sırasında alınan tüm önlemlere ve çıkarılan tüm yönetmeliklere rağmen, depo sahalarının insan ve çevre

sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri tam olarak önlenememektedir. Depo gazlarının en önemli bileşenleri ve bunların özellikleri Çizelge 2.3'te özetlenmiştir.

Çizelge 2.3 Tipik depo gazı bileşenleri

Bileşen	% Kuru Hacim
Metan	40-70
Karbondioksit	30-60
Karbonmonoksit	0-3
Azot	3-5
Oksijen	0-3
Hidrojen	0-5
Hidrojen sülfür	0-2
İz bileşenler	0-1

Çizelge 2.4 Depo gazındaki eser bileşikler

Eser bileşik grubu	Konsantrasyon aralığı (mg/m ³)
Alkoller	2-2500
Organosülfür bileşikler	3-240
Halojenli hidrokarbonlar	1-2900
Aromatik hidrokarbonlar	30-1900
Aldehitler	0-200
Ketonlar	0-50
Hidrokarbonlar;	
Alkanlar	20-4500
Alkenler	6-1100
Sikloalkanlar	1-1000
Esterler	0-1300
Eterler	0-250

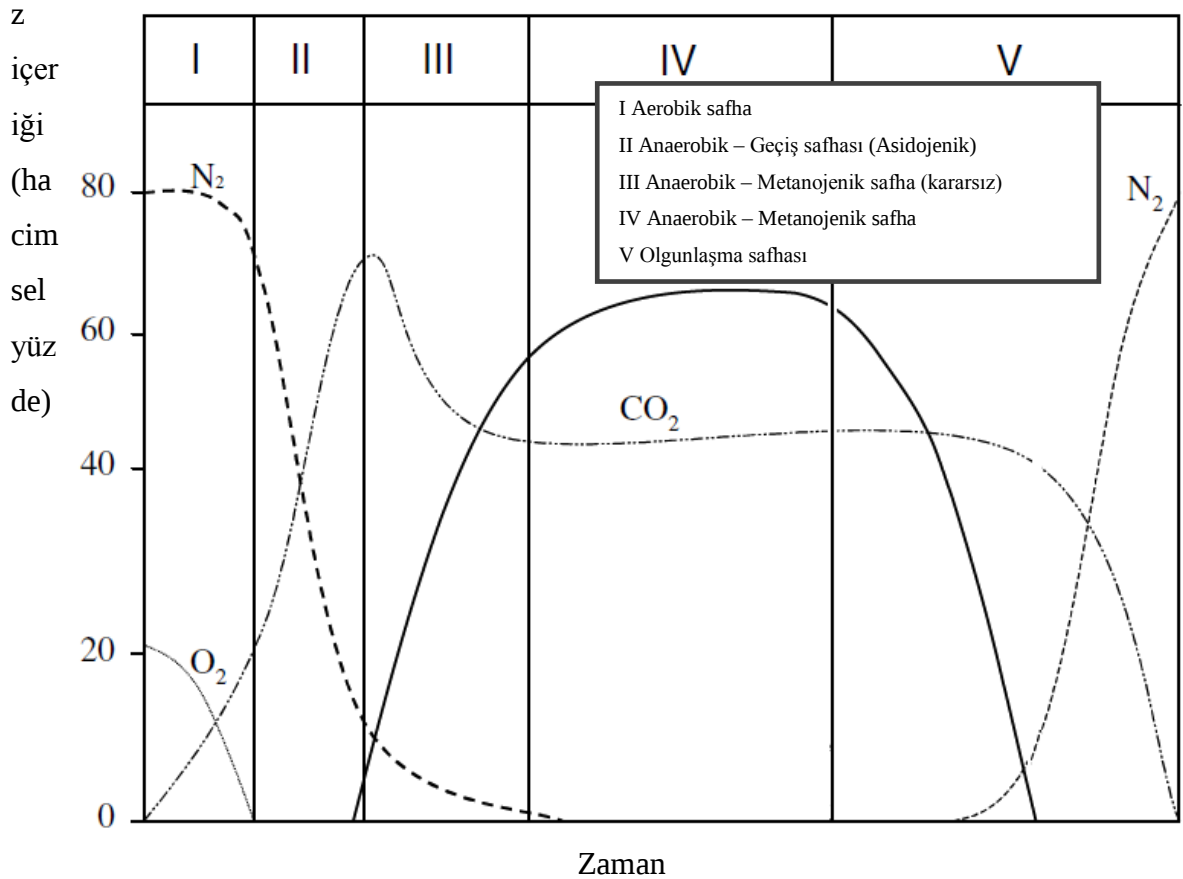
Depo gazının diğer önemli bileşeni olan CO₂ patlayıcı veya zehirli olmamasına rağmen atmosferdeki CO₂ konsantrasyonları özellikle son yıllarda büyük ölçülerde artış gösterdiğinden önem kazanmış ve çevresel açıdan dikkate alınmaya başlanmıştır. CO₂ konsantrasyonundaki bu dengesiz artış sonucunda 1948 yılında atmosferdeki ortalama CO₂ konsantrasyonu 310 ppm (hacimce % 0.031) iken, 1996'da bu değer 356 ppm (hacimce % 0.0356) seviyesine ulaşmıştır [20]. Bu büyük artış, CO₂'in sera etkisinden dolayı global ısınmaya yol açabilecek seviyelerdedir. Karbon dioksit (CO₂), günümüzde atmosferde yaklaşık % 0.039 konsantrasyonunda mevcuttur ve günden güne artma eğilimindedir [21]. CO₂'nin yol açtığı ikinci büyük tehlike ise asidik şartların

oluşmasına sebebiyet vermesidir. CO_2 , suda çözünebilir özellikte olduğundan, su ile temas halindeki CO_2 'nin büyük bir kısmı sıvı faza geçecektir. Çözülmüş CO_2 , bikarbonat (HCO_3^-) iyonları ve karbonik asit (H_2CO_3) oluşturarak sıvının pH'ını düşürür. Depo sahalarındaki sıcaklıklarda yoğunluğu yaklaşık $1,8 \text{ kg/m}^3$ civarındadır. Bu değer atmosferik havanın yoğunluğunun 1,5; CH_4 'ın yoğunluğunun ise yaklaşık 2,8 katına eşittir. Bu sebeple, CO_2 depo sahasının alt kısımlarında hareket halindedir.

Atmosferik hava, azot (N_2 , hacimce % 78), oksijen (O_2 , % 21), argon (A, % 1) ve eser miktarda diğer bileşenlerden oluşur. Depo gazı bileşimi analizleri yapılırken ölçülen O_2 ve N_2 'un kaynaklarını numune alma sırasında hava girişi veya gaz toplama sistemindeki sızıntılar oluşturmaktadır.

2.3.1 Depo Gazının Oluşma ve Ayrışma Safhaları

Katı atık depo sahalarında depolanan atıkların ayrışması genel olarak beş safhada incelenebilir. Sızıntı suyu ve depo gazı özellikleri her safhada meydana gelen farklı mikrobiyolojik aktivitenin sonucu olarak değişim göstermektedir. Sızıntı suyu ve depo gazı bileşenlerinin ayrışma safhalarındaki değişimi [22] Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3 Sızıntı suyundaki ayrışma fazlarında zamana bağlı gaz değişimi

Atıkların ayrışması esnasında her safhada meydana gelen değişimler aşağıda özetlenmiştir [10], [23]:

2.3.1.1 I. Safha (Aerobik safha)

Depolama alanındaki sınırlı miktardaki oksijen tükenene kadar geçen ve kısa süreli bir safha olan aerobik parçalanma safhasında; havadan difüzyonla gelen oksijen sayesinde proteinler, amino asitlere indirgenir. Bunlardan da CO_2 , su, nitrat ve sülfatlar oluşur. Atıktaki organik kısmın büyük bir kısmını oluşturan selüloz ise enzimler yardımıyla glikoza, glikoz da bakteriler tarafından karbondioksit (CO_2) ve suya (H_2O) dönüştürülür. Karbonhidratlar ise CO_2 , su ve yağ asitlerine hidrolize olan yağlara, gliserin ve daha basit katabolik parçalara ve alkalilere dönüşür. Bu safhada depo sıcaklığının çevre sıcaklığından yüksek olmasının sebebi, gerçekleşen reaksiyonlar neticesince açığa çıkan ısı miktarıdır. Yükselen sıcaklık ise çözünebilir tuzların sızıntı suyuna karışmasıyla sonuçlanır.

2.3.1.2 II. Safha (Geçiş Safhası)

Geçiş safhası ise, adından da anlaşılabilir gibi, ilk safhada oluşan ürünlerden sonra ara ürünlerin oluşup asit üretim safhasına hazırlanan ürünlerin oluşması ile tamamlanır. Bu nedenle, bu safhada biyolojik bozunabilirlik göstergesi olan BOİ/KOİ oranı 0,7'den yüksek değerler alabilir. Bu safhada, fermentasyon ve asit üreten bakteriler ile uçucu yağ asidi (UYA), depo sahasında oluşan biyogazın başlıca bileşeni olan CO_2 ve hidrojen gazı (H_2) üretimi gerçekleşir. Oksijen tükendiğinde ise ortam anoksik olur. Oksitlendiğinde en fazla enerji açığa çıkan bileşikler öncelikle kullanılmak üzere, anoksik şartlarda farklı elektron alıcıları kullanılabilir. Öncelikle NO_3^- kullanılır (denitrifikasyon), NO_3^- tüketildiğinde Fe^{+3} kullanılır (demir indirgenmesi). Fe^{+3} ortamda yok ise ya da tüketildiğinde SO_4^{2-} kullanılır (sülfat indirgenmesi). Son olarak sülfatın tamamı tüketildiğinde CO_2 elektron alıcısı olarak kullanılır ve metana indirgenir. Buradan, elektron alıcısına bağlı olarak bakteriyel popülasyonun değiştiği söylenebilir.

Sızıntı suyu ise asidik özellikte olup pH değeri 5-6 civarındadır. Bu nedenle; demir, mangan, çinko, kalsiyum ve magnezyum gibi inorganikler çözünerek yüksek konsantrasyonlarda sızıntı suyuna taşınır ve iyonik gücün artmasına sebep olur. Sızıntı suyunun fermentasyonu ve hidrolizi sonucu 500-2000 mg/l gibi yüksek konsantrasyonlarda NH_4^+ -N oluşabileceğinden, sızıntı suyunda istenmeyen bir koku

oluşabilir. Bu safhada redoks potansiyeli düştükçe, sızıntı suyunun başlangıçtaki yüksek sülfat konsantrasyonu zamanla azalarak sülfür üretimine neden olur ki bunun sonucu olarak da bu safhanın başlangıcında çözünmüş olan demir, mangan ve diğer ağır metaller çöker.

2.3.1.3 III. Safha (Asit Oluşum Safhası)

Gelişen metan bakterileriyle birlikte ikinci anaerobik safha başlar. Biyogaz içeriğindeki hidrojen ve karbondioksit muhteviyatı düşerken, metan içeriği artar. Uçucu yağ asiti konsantrasyonu azalırken, sülfat indirgenmesi sebebiyle SO_4^{2-} konsantrasyonu düşer. pH ve alkalinitedeki artış; kalsiyum, demir, mangan ve ağır metallerin çözünürlüğünün azalmasına sebep olur. Sülfür ise ağır metallerin çökmesini sağlar. Üçüncü safhaya kadar geçen süre 8 ile 16 ay arasında değişir.

2.3.1.4 IV. Safha (Metan Oluşum Safhası)

Bu aşamada metan üretim hızı ve gazın kompozisyonu sabittir. Sızıntı suyunun organik içeriği hızla azalır. Burada, biyogazın % 50-65'i (hacimce) metandır. Metanojenik aktivite sebebiyle uçucu yağ asiti ve H_2 konsantrasyonu düşüktür. Metan bakterileri zorunlu anaerobiktir ve nötr pH (6.6-7.3) değerlerinde faaliyetleri maksimuma ulaşır. Uçucu yağ asitleri ve diğer organik maddeler karbondioksit ve metana dönüştürülür. Atıkların muhteviyatına (mutfak atıkları, cam ve kağıt gibi) bağlı olarak gaz üretiminde salınımlar gözlemlenebilir.

2.3.1.5 V. Safha (Olgunlaşma)

Bu safhada, metanojen bakteriler için gerekli besinin azalması nedeniyle bakteriyel bozunma hızı azalır. Bu nedenle, metan üretimi azalır ve atmosferik azotun depo içerisine difüzyonu sonucu gazın N_2 bileşimi artmaya başlar.

Bu, sınırları kesin çizgilerle çizilmiş bir süreç değildir. Çürüme safhası homojen bir atık hacmi için geçerlidir. Gerçekte çürüme safhası; çöp yığınlarının yaşının ve içeriğinin değişmesi sebebiyle daha karmaşık davranabilir. Birkaç gün mertebesinde süren ilk aerobik safhadan sonra diğer safhalar sırasıyla, ay, yıl ve on yıl mertebesinde sürebilir.

Şekil 2.2'de anaerobik ayrışmanın kademeleri verilmiştir.

2.3.2 Depo Gazının Toplanması

Katı atık depolama alanlarında iki tür gaz toplama sistemi vardır; ilki, inşa edilen kuyulara doğru basınç farkından ile oluşan kısmi vakum ile toplama yapılan aktif sistem, diğeri ise harici bir emme ünitesi olmaksızın oluşan gazın basınçla hareket etmesinden faydalanılarak yapılan pasif toplama sistemidir [24]. Gaz toplama sisteminin verimli çalışmasıyla % 75 ya da daha fazla gaz toplama verimi elde edilebilir. Üzeri membranla kapatılan sahalarda ise bu oran % 99'a kadar çıkabilir [1]. Sistemin, depo gazı üretim miktarındaki değişimlere uyum sağlayarak optimizasyonunun sağlanması ancak uygun bir inşa ve verimli bir işletme ile mümkündür [4].

Gaz toplama bacaları yatay, düşey ya da her ikisini ihtiva edecek şekilde inşa edilebilir. Depolama alanına yerleştirilen bu borular etkili bir sızıntı suyu ve gaz toplanmasına olarak sağlaması açısından delikli yapıda ve yüksek yoğunluklu polietilen malzemeden üretilmiş olması gereklidir. Kuyu derinliği toplam depo derinliğinin % 50'si ile % 90'ı arasında bir yüksekliğe sahip olabilir. Genellikle 5-20 cm arasında değişen çaplarda ve 50-70 m aralıklarla yerleştirilen delikli, üstte kalan 4-5 metresi deliksiz alt kısmı delikli gaz toplama borularıyla verimli bir gaz toplama imkanı sağlanmış olur. Gaz toplama borularının delikli kısmının çakılla, deliksiz kısmı kumla kaplanması gerekir. Boru bağlantılarının ileride oluşabilecek çökme, kayma durumlarında sağlam kalabilmesi için esnek inşa edilmesi gerekmektedir [24].

Gaz toplama kuyularından toplanan gaz borularla yakma bacasına ya da enerji tesisine taşınır. Taşıma sırasında gaz içindeki nemin yoğunlaşması borular içerisinde tıkanmalara neden olduğundan bu suyun tahliyesi uygun şekilde yapılmalıdır [24].

Oluşan gazdan ısı ve elektrik üretimi ile azami ölçüde faydalanmak için şu hususlara dikkat edilmelidir [24]:

- Verimli bir gaz dönüşüm sistemi kullanılmalıdır.
- En az 10 m derinliğinde organik atık depo sahasında bulunmalıdır.
- En azından 500 bin ton atık mevcut olmalıdır.
- Atık yaşı 2-10 yaşında olmalıdır.
- Depo sahası suya doymuş olmamalıdır.

Gaz toplama noktalarında gözlenmesi gerekenler şunlardır [4]:

- Vakum

- Fark basıncı
- Sıcaklık
- Depo gazı bileşenleri
- Vana pozisyonu

2.3.3 Depo Gazının Çevresel Etkileri

Depolama alanlarında düzenli depolamaya geçiş sonrası kontrol edilmesi gereken parametrelerden birinin de depo gazı olduğu ortaya çıkmıştır. Kısa ve uzun vadede önemli çevresel etkileri olan bu gaz karışımının kontrolü ve dönüşümü yapılmalıdır.

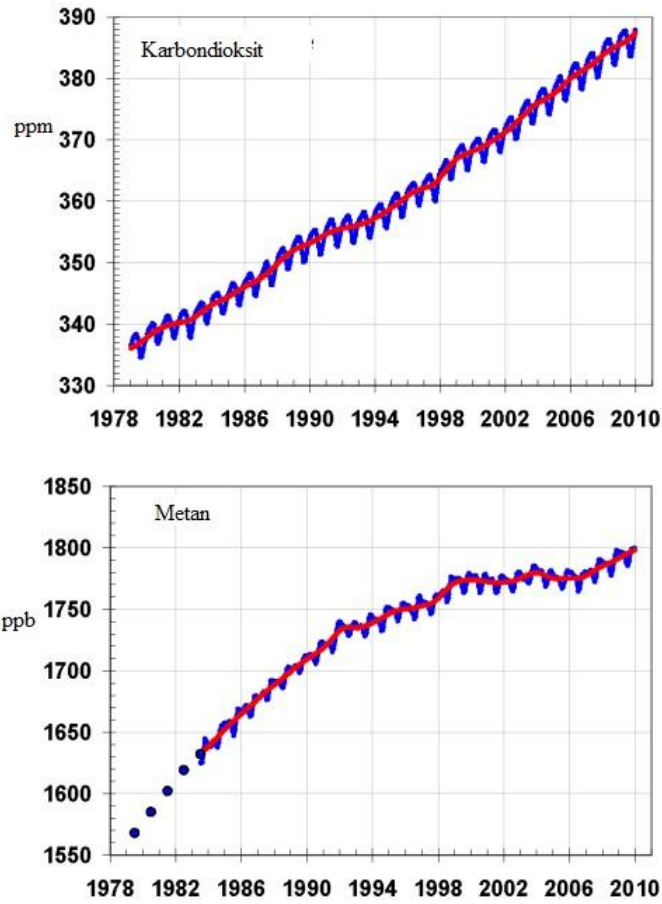
Bölüm 3.1’de özellikleri ve etkileri verilen depo gazı bileşenleri genel olarak aşağıdaki sorunlara neden olmaktadır.

- *Yangınlar ve patlamalar:* Depoda anaerobik şartlar altında oluşan metan gazı havadaki gazlarla patlayıcı özellikte karışımlar oluşturur. Düzenli toplama mekanizmaları ile toplanmayan patlayıcı özellikteki bu gaz, adveksiyon ve difüzyon mekanizmaları ile taşınmadığı durumda patlama riski oluşturur ve ölümcül kazalara neden olabilir.
- *Hava kirliliği:* Depo gazının ana bileşenleri olan metan ve karbondioksit hem doğal hem insan kaynaklı bir kirleticidir. Bunların dışında halojenli hidrokarbonlar ve aromatik hidrokarbonlar gibi “Uçucu Organik Bileşikler” (VOC) de birçok düzenli depolama alanında düşük konsantrasyonlarda ölçülmelerine rağmen [25] insan sağlığını olumsuz yönde etkilemektedir.
- *Küresel iklim değişimi:* Metan ve karbondioksit gazının ayrı ayrı küresel iklim değişikliğinin en önemli nedenleri oldukları bilinmektedir [26]. Şekil 2.4’te de görüleceği gibi her iki gazın da atmosferdeki konsantrasyonları hızla artmaktadır [21]. Özellikle metan gazı, infrared radyasyonu karbondioksitten 20 kattan fazla tutma kapasitesi nedeniyle küresel ısınmanın en önemli parametrelerinden biri olarak ortaya çıkmaktadır.
- *Bitki örtüsüne zararları:* Depo sahaları kapatıldıktan sonra park, golf sahası, kültürel alan veya ticari alan olarak kullanılabilirler. Bitki örtüsü depo gazının bitkilerin kök bölgesini oksijensiz bırakmasından ve eser bileşiklerin toksik etki yapmasından etkilenir. Bitki kökünün metana maruz kalması, metanın oksijenle reaksiyonu neticesinde oluşan karbondioksitin kök gelişimini etkilemesine

neden olur. Ayrıca, gerçekleşen reaksiyon ısı veren reaksiyon olduğu için kök havasız kalabilir.

- *İstenmeyen kokular:* Depolama alanının karmaşık yapısı (hem sızıntı suyu hem depo gazı için) birçok koku veren reaksiyonu ve bileşiği ortaya çıkardığı ve meteorolojik etmenlerin ortaya çıkan kokuları depolama alanı dışına çıkarması sonucu rahatsızlık verici kokuların yayılması sorunu ortaya çıkabilir.

Depo gazının çevresel etkilerinin ifade edildiği illüstrasyon Şekil 2.5'te görülebilir.



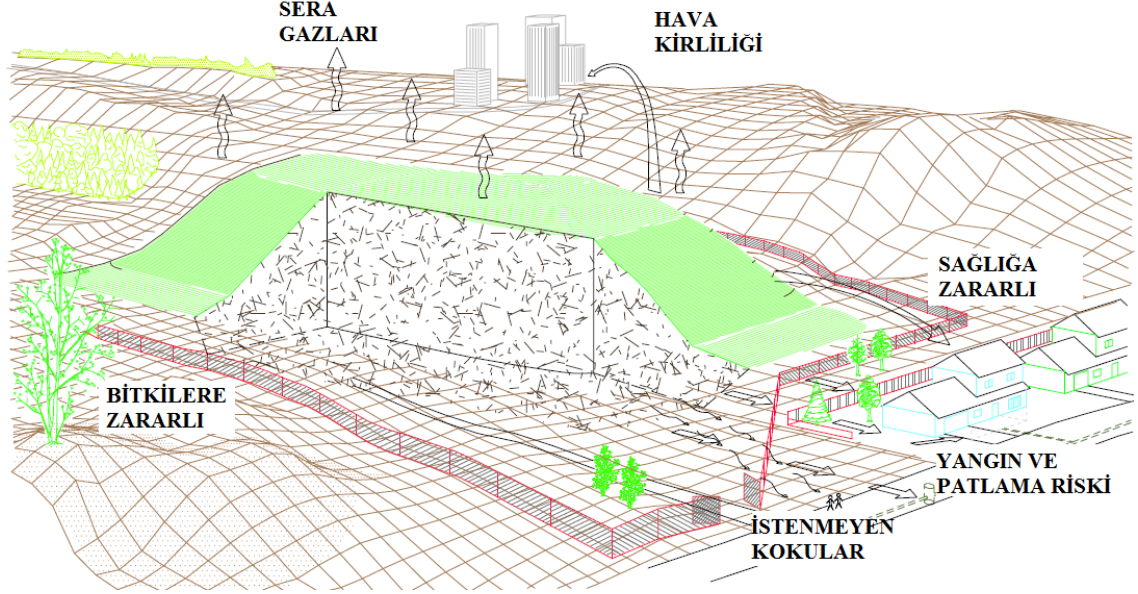
Şekil 2.4 Atmosferik CO₂ ve CH₄'ün zamanla değişimi [21]

2.3.4 Depo Gazını Değerlendirmenin Faydaları

Depo gazı, doğrudan ya da dolaylı olarak Çizelge 3.2'de belirtilen yöntemlerle kullanılabilir. Mevcut potansiyeli kullanmanın birçok yararı vardır ancak oluşan kaynağın miktarının bilinmesi de önemlidir.

Dünyada depo gazından elektrik enerjisi elde eden birçok tesis vardır. Sadece ABD'de EPA'nın yaptığı araştırmaya göre, 2007 yılı itibarıyla, 450 adet enerji tesisinden 1380

MW elektrik elde edilmektedir [28]. Bu tesislere ek olarak 540 adet daha enerji tesisi kurulması planlanmakta ve bu tesislerden de ek olarak 1280 MW elektrik elde etme potansiyeli vardır.



Şekil 2.5 Depo gazının çevresel etkileri [27]

Depo gazı miktarı ve içeriği yukarıda bahsedilen ayrışmaya etki eden faktörlere ve atık miktarına yani aslında nüfusa göre değişmektedir. ABD'deki mevcut potansiyel, Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerin temiz enerji potansiyelini ortaya koymaktadır. Bu yüzden, yerel yönetimlerin bu tesislerden ne gibi faydalar elde edeceğinin iyi bilinmesi önemlidir.

- *Çevre bilincinin oluşmasına liderlik etme*

Depo gazının kullanılmasıyla temiz enerji kullanımının ve toplumsal farkındalığın gelişimi sağlanır. Depo gazını kullanan belediyelerin elde ettiği prestij ve maddi olanaklar diğer yerel yönetimleri de temiz enerji kullanımına yöneltir.

- *Sera gazı emisyonlarının azaltılması*

Katı atık depolama alanları, ABD'de ikinci büyük insan kaynaklı metan emisyon kaynağıdır. EPA'nın yaptığı araştırmaya göre [28], enerji tesislerinin kurulmasıyla, projeye ve verimliliğe bağlı olarak metan gazı emisyonları % 60 ile % 90 arasında azaltılır.

- *Hava kalitesinin iyileştirilmesi*

Depo gazının toplanması ile ana depo gazlarından olan metan emisyonunun, zehirli hava kirleticilerin emisyonunun ve kokunun azaltılması sağlanır. İlâveten, metan içermeyen organik bileşiklerin (NMOCs) emisyonunun da azalması ile havada sis ve pus oluşması önlenir. Ayrıca, depo gazının kullanılmasıyla, dolaylı olarak SO₂ (asit yağmuru oluşmasına neden olan en önemli kirleticisi), partikül madde (solunum sistemi hastalıklarına yol açan kirleticisi), azot oksitler (NO_x) ve bazı iz zehirli hava kirleticilerinin oluşması önlenmiş olur.

- *Çevreye uyum bedelinin azaltılması*

Gelişmiş ülkelerde çevre kirliliğine neden olan işletmelerin çevreye uyum sağlamak için azaltmak zorunda olduğu emisyonları azaltmanın yanında gelir elde imkanı bulunduğu için, depolama alanları çevreye uyumun daha ucuz olduğu bir işletmedir. ABD’de Clean Air Act (Temiz hava yasası) anlaşması ile hava kirliliğine neden olan işletmeler emisyonlarını EPA’nın belirlediği sınır değerlere indirmek zorundadır.

- *İstihdamla beraber piyasanın hareketlenmesinin sağlanması*

ABD’de 3 MW’lık bir enerji tesisi için ortalama 70 kişi istihdam edilebilir. Bunların dışında, projenin inşası sırasında birçok çalışan geçici iş sahibi olur. İnşa için gerekli malzemelerin satın alınması da ekonomiyi hareketlendirir.

- *Arazi tasarrufu*

Depolama alanlarında oluşan gazın toplanmasıyla çürüme ve bozunma sağlandığı için daha fazla katı atık depolama için tesise alınabilir. Böylece arazi kullanımı azaltılabilir.

- *Diğer faydalar*

Daha iyi bir katı atık yönetimi sunması, toplumları yenilikçi ve çevresel açıdan faydalı projelere yönlmesi nedeniyle de depolama alanlarında oluşan gazlar mutlaka değerlendirilmesi gereken bir enerji kaynağıdır.

2.4 Depolama Alanlarında Gaz Oluşumunu Etkileyen Faktörler

Depolama alanlarında ayrışmayı, dolayısıyla gaz oluşumunu etkileyen birçok faktör vardır. EPA’nın derlediği bir çalışmaya göre [28], metan oluşumu temel olarak 5 farklı değişkene bağlı olarak değişmektedir. Bunlar; organik madde miktarı, besinler (nütrientler), nem içeriği, sıcaklık ve pH’tır. Machado vd.’nin [29] yaptığı çalışmaya

göre, en önemli etkenlerin; atık bileşeni, biyolojik parçalanabilirlik, nem muhtevası, atığın yaşı, pH ve sıcaklık olduğu belirtilmiştir. Bunların dışında gaz oluşumuna etki eden birçok parametre mevcuttur. Yukarıdaki kaynaklarda belirtilen etmenler dışındaki etmenler ise aşağıda derlenmiştir.

2.4.1 Atık bileşenleri

Depolama alanına gelen atığın kolay ayrışabilir özellikte olması organik asitlerin fazlaca oluşmasına ve ortamın pH'sının hızla düşmesine sebep olur. Bu da sahanın doğal tamponlama kapasitesini düşürür ve metan oluşumu geciktirebilir.

2.4.2 Nütrientler

Mikrobiyal faaliyetlerde canlılar azot fosfor ve bazı eser elementleri bünyelerine katarlar. Bu maddelerin azlığı ya da çokluğu mikrobiyal faaliyetleri doğru orantılı olarak etkiler. Bakteri hücresinin ampirik formülü $C_5H_7NO_2$ olarak kabul edilirse bakteri hücrelerinin yaklaşık % 12'si azot ve % 1,5'i fosfordur. Mikroorganizmalar için temel elementler olan azot ve fosfor, toplam KOİ'nin %1-1,15'i kadar olduğu zaman yeterli olmaktadır. Anaerobik arıtma için KOİ/N/P oranı 300/7/1 ise atık suyun organik madde ve besi maddesi açısından dengeli olduğu kabul edilir.

Anaerobik mikroorganizmalar için gerekli mikronütrientler sülfür, kalsiyum, magnezyum, potasyum, demir, çinko, bakır, kobalt, molibden ve selenyumdur. Ancak eser elementlerin gereken standartların üzerinde olması, inhibisyon etkisini de beraberinde getirebilir. Anaerobik sistemler için organik madde (KOİ olarak, C), azot (N) ve fosfor (P) arasındaki (C:N:P) en uygun oran 100:0.44:0.08 'dir. Bu oranda en düşük değere sahip olan fosfor anaerobik ayrışma sürecinde kısıtlayıcı besi maddesidir.

2.4.3 Toksik Bileşenler

Önemli miktarlarda endüstriyel kimyasallar içeren katı atık düzenli depo sahalarında, bazı özel organik maddeler (formaldehit, kloroform, fenol gibi) metan oluşumunu engelleyebilir. Sülfat, uçucu yağ asitleri, ağır metaller, kalsiyum, sodyum, potasyum, amonyak ve klorlu organik bileşenler de yüksek konsantrasyonlarda bulundukları takdirde anaerobik ayrışma için toksik etki yapabilirler.

2.4.4 Nem Muhtevası

Depo ortamında ayrışmayı ve gaz oluşumunu doğru orantılı olarak artıran en önemli parametrelerden biri de nem muhtevasıdır. Yüksek su muhtevasının, anaerobik ortamın gelişmesi, ısı transferi ve substrat difüzyonu üzerinde olumlu katkıları vardır. Birim katı atık başına oluşan biyogaz üretimi ile nem oranı arasında logaritmik bir ilişki vardır.

Metan üretiminin optimize edilebilmesi için atıkların suya doymuş olması gerekir. Depo sahalarında sızıntı suyu geri devri ile depo gövdesinin su muhtevası artırılarak anaerobik aktivite hızlandırılır ve dolayısıyla atık stabilizasyonu sağlanabilir.

2.4.5 Sıcaklık

Mikrobiyal faaliyetleri etkileyen en önemli çevresel faktörlerden birisi de sıcaklıktır. Mezofilik mikroorganizmalar için optimum büyüme için sıcaklık aralığı 30-40 °C ve termofilik olanlar için ise 50-70°C'dir. Anaerobik biyolojik ayrışma için optimum sıcaklık 30-40 °C'dir. Biyolojik ayrışmanın başladığı dönemde sıcaklık 70 °C'ye kadar çıkarken, anaerobik ayrışma safhasına gelindiğinde 30-35 °C'lerde sabit kalır. Sıcaklık parametresi, kimyasal çözünürlüğü de etkilemektedir. Anaerobik ayrışma işlemi, depo alanlarında sıcaklığa bağlı olarak değişir. Anaerob ayrışmada mezofilik (yaklaşık 35 °C) ve termofilik (yaklaşık 55 °C) olmak üzere başlıca iki sıcaklık aralığı vardır. Metan üretimi sıcaklık arttıkça artarak 35 °C de birinci pik değerine ulaşır. Ancak 45°C ve üzerinde termofilik kademe başlar ve metan üretimi 55°C'de maksimum değerine ulaşınca kadar artar. Bir çalışmada [30], 21°C ile 48°C arasında metan oluşumu üzerinde sıcaklığın etkisini araştırılmış ve metan oluşumunun 41°C için optimum düzeyde olduğu, 48 ile 55°C arasında ise metan oluşumunun durduğu tespit edilmiştir.

2.4.6 pH ve Alkalinite

Mikroorganizmaların faaliyetleri için yaşamsal boyutta önemli bir parametre olan pH'ın, bakteriler için 6,4 ila 7,2 arasında en uygun aralıkta olduğu belirlenmiştir [31]. Genel kanı ise, anaerobik proseslerde için en uygun pH aralığının 6.7-7.6 olduğudur. pH'ın 8'den yüksek olması, aktiviteyi hızla düşüren serbest (iyonize olmamış) NH₃ yüzündendir.

Organik maddelerin anaerobik olarak nihai ürünlere dönüşümü birçok bakteri türü sayesinde mümkün olur. Bu türlerin içerisinde pH'a en hassas olanı metan bakterileridir. Anaerobik reaktörlerde organik yük çok arttığında ya da sıcaklık

düştüğünde asit üreten bakterilerin ürettiği uçucu yağ asitlerinin metan bakterileri tarafından tüketilme hızı yavaşlar ve akabinde pH düşmeye başlar. Eğer sistemin tamponlama kapasitesi yeterli değilse, pH mikroorganizmalar için istenmeyen seviyeye kadar düşer ve sonuçta metan üretimi azalır ya da durabilir.

Alkalinite, uçucu ve diğer asitleri tamponlama kapasitesini gösterir. Düşük alkalinite değerlerinde ortamdaki asitler pH değerinin düşmesine sebep olarak biyolojik aktiviteyi durdurabilmektedir. Yüksek alkalinite değerlerinde ise sistem düzensiz pH değişimlerine karşı korunur. Evsel atıksu çamurunun anaerobik olarak ayrışması için gerekli toplam alkalinite değeri 2000-3500 mg/l CaCO₃ olarak belirlenmiştir [31].

2.4.7 Oksijen

Anaerobik şartların sağlanabilmesi için ortamda serbest oksijen bulunmamalıdır. Bağlı oksijen bulunması bile anaerobik arıtma sürecini olumsuz yönde etkilemektedir. Metan bakterilerinin -330 mV'un altında bir redoks potansiyeline ihtiyaçları vardır.

Depo sahalarındaki, gaz toplama sistemlerine karşı depoya giren atmosferik hava kuvvetleri önemli bir vakumun oluşmasına sebep olabilir. Bunun neticesinde atık kütlesi içerisinde aerobik bölgenin artmasıyla bu tabakalarda metan oluşumu engellenmiş olur. Metan bakterileri, oksijen girişiyle tamamı ile yok olmaz. Oluşan aerob bölgelerde anaerob ortamların varlığı bu ortamlarda metan bakterilerinin hayatta kalabilmesinin temel sebeplerindendir [10].

2.4.8 Hidrojen

Depo alanlarında hidrojen gazının fermentatif ve asidojenik bakteriler tarafından üretiminin gerçekleşmesi ile alanda oluşan gaz basıncı biyokimyasal dönüşümleri etkileyebilir. Hidrojen basıncı düşükken fermentasyon bakterileri H₂, CO₂ ve asetik asit üretirken, yüksek olduğu durumda sadece H₂ ve CO₂ üretirler. Asidojenik bakteriler ise hidrojen gazı basıncının 9×10^{-5} atm'in altında olduğu durumda propiyonik asit üretebilir. Hidrojen gazı aynı zamanda metan ve sülfat indirgeyen bakteriler tarafından da tüketilir [32].

2.4.9 Amonyak

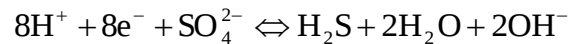
Protein, üre ve aminoasit içeren organik maddelerin hidrolizi sonucu açığa çıkan

amonyak ortamın pH'sına bağılı olarak amonyum iyonu (NH_4^+) veya amonyak bileşici (NH_3) halinde bulunabilir. Amonyumun bakteriyel faaliyetleri önleme etkisi pH'ın artmasıyla artan serbest amonyak yüzünden oluşur. Anaerobik arıtmanın asidik safhasında, 4000-5700 mg/L seviyelerindeki NH_4^+ iyonu konsantrasyonu, asit üreten bakterilerin faaliyetlerini etkilemezken, bu şartlar altında metan üreten bakterilerin aktivitelerinde % 56'lık bir düşüş meydana getirmektedir. Amonyak konsantrasyonu 200-1000 mg/L mertebelerinde anaerobik prosesler için herhangi bir olumsuz etkiye sebep olmazken, yüksek pH'ta 1500-3000 mg/l konsantrasyonlarda anaerobik bakteriler için inhibisyon etkisi vardır. Konsantrasyon 3000 mg/l'yi aştığında toksik etki yapmaktadır.

2.4.10 Sülfat

Sülfat, anaerobik şartlarda elektron alarak sülfüre dönüşen bir maddedir. Sülfat indirgeyen bakterilerin ve metan bakterilerinin; asetik asit ve hidrojen için ortaya çıkardığı rekabet, sülfat indirgeyen bakteriler lehine sonuçlanarak yüksek miktarda H_2S oluşmasına sebep olur. H_2S ise metan bakterileri üzerinde olumsuz etki yaparak inhibisyona sebep olabilmektedir. Ancak, sülfür tek başına anaerobik prosesler için toksik olmasına rağmen, genellikle ağır metallerle birlikte çöktüğü için zararlı etki göstermez. Toplam sülfürün ($\text{H}_2\text{S} + \text{HS}^- + \text{S}^{2-}$) inhibisyona sebep olduğu zararlı konsantrasyon 100 mg/l'dir [10]. Özellikle 6,5'ten düşük pH değerlerinde sülfür inhibisyonu artmaktadır.

Atıksuda SO_4^{2-} ve SO_3^{2-} bulunması durumunda aşağıdaki biyokimyasal reaksiyonlar meydana gelir.



Burada; 64 gr KOİ için 96 gr SO_4^{2-} gerekmektedir. Diğer bir deyişle, 1 gr KOİ ile 1.5 gr SO_4^{2-} indirgenmektedir. Sülfatın tam indirgenmesi teorik olarak KOİ/ SO_4^{2-} oranının 0.67'yi geçtiği zamanlarda meydana gelir. Sülfatın tamamen indirgenmesi için 0,67'den daha yüksek KOİ/ SO_4^{2-} oranlarını gerekmektedir ve bu oran 1 ile 3 arasında olduğunda sülfat indirgenmesinin gerçekleştiği belirlenmiştir [33].

Sülfatların indirgenmesi sonucu oluşan sülfür metan bakterileri için toksik etki yapmaktadır. Pratikte KOİ/ SO_4^{2-} oranı 7-10'dan düşük olduğunda önemli miktarda inhibisyon gerçekleşmektedir [34]. Nötr pH aralığında çözünmüş sülfürlerin yaklaşık

%50'si uçucu haldedir. pH 6'da sülfürlerin büyük bölümü H₂S şeklindedir.

2.4.11 Dane boyutu

Dane boyutunun düşmesi ile bakterilerin besine ulaşması için gerekli yüzey alanının artmasından dolayı metan gazı üretim hızı da artmaktadır. Benzer şekilde düşünülürse yoğun olarak sıkıştırılmış (balyalanmış) atıkların içine metan üreten bakterilerin nüfuz etmesinin zor olması sebebiyle gaz üretim hızı da yavaşlamaktadır.

2.4.12 Atık Stabilizasyonu

Atıkların ayrışmasının ve stabilizasyonunun hızlandırılması için; depo sahalarına giren bazı değişkenlerin ayarlanmasıyla atık stabilizasyonu dolayısıyla oluşan gaz miktarı artırılabilir. Buna göre Çizelge 2.5'te verilen parametreler için örnek uygulamalar [10] gösterilmiştir.

Çizelge 2.5 Atık stabilizasyonu için yapılan uygulamalar ve amaçları

Uygulama	Uygulama Amacı
Atıkların kontrolü	Organik atıkların oranının azaltılması
	Sülfat içerikli atıkların alınmaması
	Hacmin azaltılması
Atıkların öğütülmesi	Nem dağılımının homojen hale getirilmesi
	Ayrışmanın hızlandırılması
Atıkların sıkıştırılması	Depolama kapasitesinin artırılması
	Substrat ile bakteri temasının sağlanması
	Nem dağılımının sağlanması
Evsel çamur ilavesi	Ayrışma için nutrient temini
	Anaerobik mikoorganizmaların gelişimi
Enzim ilavesi	Hidroliz prosesinin hızlandırılması
Tampon ilavesi	Organik asitlerin oluşumunun engellenmesi
Sızıntı suyu geri devri	Organik kirleticiler ile metallerin giderilmesi

2.4.13 Meteorolojik Değişkenler

Katı atık depolama alanlarında depo gazı oluşma miktarını, içeriğini ve oluşma hızını yani aslında biyolojik aktivitenin değişkenliğini etkileyen birçok meteorolojik parametre mevcuttur.

Meteorolojik faktörlerden sıcaklık ve nemin incelendiği, Visvanathan tarafından [35] yapılan deneysel çalışmada, metan üreten bakterilerin üreme hızı için en uygun sıcaklığın 30-36 °C, nem muhtevasının ise % 15-20 arasında olduğu bulunmuştur. Aynı

çalışmada ayrışmanın 15 ile 40 cm arasındaki derinliklerde en yüksek hıza ulaştığı sonucuna ulaşılmıştır.

Toprak sıcaklığı ve metan emisyonu arasında güçlü bir ilişki olduğu, birkaç çalışma ile ortaya konmuştur. Börjesson vd.'nin [36] İsveç'teki bir düzenli depolama alanında yaptığı dönemsel metan konsantrasyonlarının regresyon analiziyle değerlendirilmesi çalışmasına göre, hem topraktaki hem de salınan gazdaki metan konsantrasyonunu etkileyen en önemli değişkenin toprak sıcaklığı olduğu bulunmuştur. Çalışmada, toprak sıcaklığı ile metan emisyonlarının negatif korelasyona sahip olduğu, toprak sıcaklığının düşük olduğu gece saatlerinde metan emisyonunun en yüksek seviyelere çıktığı gözlenmiştir. Diğer yandan, Tecle [37] tarafından yapılan çalışmada ise toprak sıcaklığının 5 °C'nin altında olduğu durumlarda metan emisyonunun olmadığı gözlenmiş, toprak sıcaklığının 15-24 °C olduğu saatlerde ise metan emisyonunun en yüksek seviyelere ulaştığı gözlenmiştir. Aynı çalışmada topraktaki nem içeriği ile metan emisyonunun ise tamamen zıt bir korelasyona sahip olduğu bulunmuştur. Hacimce nispeten yüksek nem içeriğine sahip bir bölgede (%46,5) metan emisyonu en düşük seviyede (%0,02) ölçülmüştür. Yukarıda belirtilen iki çalışmadaki çelişkinin iklimsel farklılık nedeniyle olduğu söylenebilir. Maurice [38] vd.'nin yaptığı benzer bir çalışmaya göre ise, aşırı soğuk iklimlerde toprak sıcaklığının ve nem içeriğinin metan oluşumuna etkisi incelenmiştir. Toprak sıcaklığının çok düşük olduğu ve toprağın çok kuru olduğu durumlarda metan oluşumunun durma noktasına geldiği belirtilen bu çalışmada, depo örtü teşkilinin bu faktörlerin olumsuz etkilerini ortadan kaldırmaya yönelik tasarlanması gerektiği önerilmiştir.

Atmosferik basıncın depo gazına etkisi ise Nastev [39] tarafından yapılan çalışma ile modellenmiştir. Buna göre, atmosferik basıncın azalmasıyla metan emisyonunda artış olduğu ortaya konmuştur. ABD'de bir depo sahasında Czepiel vd. tarafından yapılan çalışmaya göre [40] ise, basınç ile metan emisyonu arasında % 95 nispetinde korelasyon katsayısına sahip ters orantı olduğu bulunmuştur.

Meteorolojik faktörlerin depo gazına etkisinin genetik algoritma ile araştırıldığı bir başka çalışmada ise [5]; sıcaklık, bağıl nem, güneşlenme, bulutluluk, rüzgar hızı ve yağış değişkenlerinin depo gazı yüzdesinin tahmin edilmesinde % 86'lara varan oranlarda başarılı olduğu bulunmuştur.

2.5 Depo Sahalarında Oluşan Gaz Miktarını Hesaplama ve Tahmin Yöntemleri

Depo gazının içeriği büyük oranda metan ve karbondioksitten oluşmasına rağmen, ABD'deki 250 farklı depolama alanından alınan örneklerle yapılan karakterizasyon çalışmasında [41], 150 farklı parametre ölçülmüştür. Ana parametreler olarak bilinen metan ve karbondioksit oranları bu çalışmada sırasıyla ortalama % 55,63 ve % 37,15 olarak bulunmuştur. % 0,99 oranında da oksijen içeren depolama alanlarında ton atık başına ne kadar değerli gaz (metan) üretildiği ise birçok değişkene bağlı olarak oldukça farklı eğilimler göstermektedir. Bir depolama alanında yürütülen saha çalışmasında kg depolanan atık başına 0,05 ile 0,40 m³ arasında değişen miktarlarda depo gazı üretildiği bulunmuştur [42]. Birçok çalışma ile modellenerek ya da formüle edilerek hesaplanan depo gazı miktarı saha çalışmaları ya da deneysel çalışmalarla da hesaplanmaktadır.

2.5.1 Teorik Gaz Üretimi

Teorik gaz üretiminin hesaplanmasında organik maddenin mikroorganizmalar tarafından metan ve karbondioksit gazına dönüşme denklemi kullanılarak teorik gaz üretimi bozunan organik madde miktarına ya da bozunan karbon (C) miktarına göre hesaplanabilir. Hacimsel metan kütlesi 714 gr/m³ alınacaktır. Organik maddedeki (glikoz) karbon miktarı 72 g'dır.



$$180 \frac{gr}{mol} \rightarrow 48 \frac{gr}{mol} + 132 \frac{gr}{mol} \quad (2.2)$$

$$\text{Oluşan metan gazı} = \frac{48 \frac{gr}{mol}}{180 \frac{gr}{mol} \times 714 \text{ gr/m}^3} = 0,373 \frac{\text{m}^3 \text{ metan}}{\text{gr bozunan organik}} \quad (2.3)$$

İndirgenen gr karbon başına metan gazı üretimi

$$\text{Oluşan metan gazı} = \frac{48 \frac{gr}{mol}}{72 \frac{gr}{mol} \times 714 \text{ gr/m}^3} = 0,933 \frac{\text{m}^3 \text{ metan}}{\text{gr bozunan C}} \quad (2.4)$$

Depolama alanlarında oluşan metan gazının % 100'ü toplanamaz. Toplanan gazın bir kısmı depo alanında oksidasyona uğrar, bir kısmı ise salınır. Salınan metan gazı (metan emisyonu) basit bir formülle (2.5) şöyle bulunabilir [43]:

$$CH_4 \text{ emisyonu} = \text{Oluşan } CH_4 - \text{Toplanan } CH_4 - \text{Oksitlenen } CH_4 \quad (2.5)$$

Bölüm 2.2.4'te de belirtildiği gibi, depo alanı üst örtü teşkilinin türüne göre gaz toplama verimi değişebilmektedir. Toplanan metan gazı geomembranla kapatılmış sahada % 90

iken, kil ile örtülmüş sahada % 85, geçici örtü ile örtülmüş sahada % 65 verim elde edilmektedir. Okside olan metan gazı ise tam olarak bilinmemekle beraber genellikle % 10 civarlarında olduğu varsayılabilir. Bu durumda metan gazı emisyonu % 5 ile % 25 arasında oranlarla değişebilir.

2.5.2 Kinetik Modeller

Birinci derece Monod bozunma denklemi kullanarak ortaya çıkarılan TNO, LandGEM, Gassim, Afvalzorg, EPER, IPCC ve LFGREEN gibi gaz tahmin yöntemleri mevcut olmakla beraber; sıfıncı derece denklemle hesaplama yapan EPER France gibi tahmin yöntemleri de mevcuttur. Biyolojik büyümeyi temel alan ikinci dereceden karmaşık yapıdaki Halvadakis modelinin yanı sıra yapay sinir ağları kullanarak da depo gazı tahmin edilebilir [44]. Birkaç çalışma ile derlenen depo gazı tahmin modellerinin listesi ve bunlarla ilgili bazı açıklamalar Çizelge 2.6'da verilmiştir.

2.5.3 Tahmin Modelleri

Depo gazının tahmin edilmesi yapay sinir ağları kullanarak da birkaç çalışma ile yapılmıştır. Özkaya vd.'nin [46] yaptığı depolama alanı biyogazındaki metan miktarının yapay sinir ağları ile belirlenmesi de bunlardan biridir. Odayeri düzenli depolama alanında 34 ay boyunca izlenen sızıntı suyu ve depo gazı parametreleri kullanarak metan yüzdesi % 90'dan yüksek oranlarda tahmin edilmiştir. Giriş değişkenlerinin pH, alkalinite, KOİ, sülfat, iletkenlik, klorür, atık sıcaklığı ve depo yaşı olduğu sinir ağında çıkış metan yüzdesi hücrelerden birinde % 95 doğru tahmin edilmiştir. Bu sayede sızıntı suyu parametreleri temel alınarak saatlik metan yüzdesi tahmin edilebilmekte, metan yüzdesinin artırılabilmesi için kontrol stratejileri geliştirilebilmekte, enerji dönüşümü optimize edilebilmekte, enerji tesisi inşası için optimum süre belirlenebilmekte ve sızıntı suyunun geri devir stratejilerinin geliştirilmesiyle sera gazı emisyonları azaltılabilmektedir.

Benzer bir çalışma, yine aynı depolama alanı için Özcan vd. [47] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada ise Özcan vd., depo gazı parametrelerini (CH_4 , CO_2 , CO ve sıcaklık) giriş verileri, yine depo gazı parametrelerinden biri olan metanı ise çıkış verisi olarak kullanarak yapay sinir ağıyla depo gazındaki metan yüzdesini % 89'lara varan doğrulukla tahmin etmiştir.

Çizelge 2.6 LFG Tahmin Model Listesi ve Özellikleri [44], [19], [45]

Model	Açıklama
Alman EPER	Sıfırinci derece kinetik Atık miktarına bağlı
SWANA	Sıfırinci derece kinetik Atığın ağırlığına, zamana ve metan üretim potansiyeline bağlı
IPCC	Sıfırinci derece kinetik Bozunabilir organik karbon ve depolanan atığa bağlı
TNO	Sıfırinci derece kinetik Karbon içeriğine bağlı
LandGEM	Sıfırinci derece kinetik ABD'nin atık kompozisyonuna bağlı, Kullanıcı dostu
GasSim	Birinci derece, çok aşamalı model
Afvalzorg	Birinci derece, çok aşamalı model Hollanda'nın atık karakterizasyonuna bağlı Bozunma hızına göre atık türleri üçe ayrılır Bazı atık türleri için organik madde ya da karbon içeriği verisi mevcut değil
Fransız EPER	Birinci derece, çok aşamalı model
Meksika	Birinci derece model Metan üretiminde bir yıl alıştırma evresi ABD'nin atık kompozisyonuna bağlı, Metan üretim potansiyeli yağışa bağlı olarak belirlenir
LFGGEN	Metanojen safhasını iki aşamada modeller ABD'nin atık kompozisyonuna bağlı
Halvadakis	Karmaşık matematiksel model Düzenlenmesi ve kullanımı zor
Belçika modeli	Birinci derece model Atık miktarına bağlı Özümsevenen DOC miktarına bağlı Bozunma hızına bağlı
Palos Verdes Modeli	İki kademeli, birinci derece kinetik model
Sheldon Arleta Modeli	İki kademeli, birinci derece kinetik model
Emcon Modeli	İki kademeli Atık miktarı, bileşimi ve nem içeriği, gecikme zamanı ve dönüşüm zamanına bağlı birinci derece kinetik model
P, G ve E Modeli (Pasifik Gaz ve Elektrik Modeli)	Parabolik ve eksponansiyel model Atık miktarı, atık yüksekliği ve atığın yoğunluğuna bağlı
TNO modeli	Belçika modelinin değiştirilmiş versiyonu
Numerik modeller	Çok etkili Hassas sonuçlar Her depolama alanına uygun

BÖLÜM 3

DEPO GAZINDAN ENERJİ ÜRETİMİ

“Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik” (26 Mart 2010; 27533 sayılı Resmi Gazete) kapsamında depo gazlarının yönetimi aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir [13]:

“Depolama tesisinde oluşan gazların birikmesini ve toplanmasını kontrol altına almak amacıyla depo üst örtüsünün teşkili ile ilgili maddede belirtilen önlemler alınır. Depolama tesisindeki gazların toplanması, işlenmesi ve kullanılması işlemleri çevre ve insan sağlığına zarar vermeyecek şekilde yapılır.

Biyobozunur atıkları kabul eden tüm düzenli depolama tesislerinde gazlar toplanıp doğrudan veya işlenerek enerji üretiminde kullanılır. Elde edilen depo gazının, enerji üretiminde kullanılmasının ekonomik olmaması halinde depo gazı meşalelerde yakılır.”

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, Atık Yönetimi Dairesi Başkanlığı’nın yayınladığı yukarıda bahsedilen yönetmelik çerçevesinde düzenli depolama alanlarında depo gazlarından ekonomik olması halinde enerji üretimi zorunludur.

Dünyada evsel katı atıkların bertarafı konusunda birçok aşama kaydedilmiştir. Evsel katı atıkların toplanıp vahşi döküm sahalarında depolanmasından sonra meydana gelen çevresel sorunlar nedeniyle düzenli depolama alanları inşa edilmiştir. Bu sahaların yüksek yatırım maliyetleri, ortaya çıkan depo gazlarının (metan, karbondioksit vb.) küresel ısınmaya sebebiyet vermeleri ve alternatif bertaraf yöntemlerinin ortaya çıkmasıyla katı atıklardan enerji üretiminin uygun bir seçenek olduğu görülmüştür.

Evsel katı atıklardan enerji üretimi ile hem doğaya salınan metan gazının yakılması sonucu küresel ısınmanın önüne geçmeye çalışılmakta, hem de üretilen ısı ya da elektrik enerjisi ile gelir elde edilerek ekonomiye katkı sağlanmaktadır. Depo gazı miktarı ve

kalitesi; atık karakteristiğine, deponun tasarımına ve işletilmesine ve meteorolojik faktörlere bağlı olarak değişir. Bu yüzden, depo alanının davranışının bilinmesi önem teşkil eder.

3.1 Gaz Özellikleri

Depo gazındaki ana gazlar, metan ve karbondioksittir. Çizelge 2.3'e göre Metan % 40 ile % 70, Karbondioksit ise % 30 ile % 60 arasında değişen oranlarda ölçülmektedir. Yapılan bir diğer çalışmaya göre, metan yüzdesi % 40 ile % 60 arasında değişen oranlarda ölçülebilir. Karbondioksit ise % 35 ile % 50 arasında değişebilir [48]. Bu çalışmada ise, alınan veriler içinde metan % 44,8 ile % 54,6 arasında değişen değerlerde ölçülmüştür. Karbondioksit oranı ise % 37,5 ile % 44,6 değerleri arasındadır.

3.1.1 Metan (CH₄)

Metan (CH₄), renksiz ve kokusuz bir hidrokarbondur. Metan gazı doğal yollarla oluşmakla beraber, insan kaynaklı olarak doğrudan ya da dolaylı olarak üretilebilir. Metan doğal olarak; sulak alanlar, donmuş topraklar, termitler, okyanuslar, temiz su kaynakları, sulak olmayan topraklar ve doğal yangınlarla oluşabilir. İnsan kaynaklı metan emisyonlarının 1990'dan 2009'a kadar EPA tarafından ölçüldüğü ABD'de, ilgili süreçteki ölçümlerin ortalaması ve neden olan kaynaklar Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 İnsan Kaynaklı Metan Emisyonları

Kaynak	Yüzde
Doğalgaz sistemleri	30,98
Bağırsak fermentasyonu	20,69
Depolama alanları	17,75
Kömür madenleri	9,76
Gübre sanayisi	6,79
Petrol sanayisi	4,65
Atıksuların arıtılması	3,66
Ormanlık alanlar	1,90
Pirinç kültivasyonu	1,03
Diğer	2,79

Çizelge 3.1'de verilen metan kaynaklarından olan depolama alanlarından kaynaklanan metan emisyon oranı % 18'e yakındır. En büyük üçüncü emisyon kaynağı olan bu gaz, depo gazının hacimce ortalama % 55'ini oluşturur. Yoğunluğu, depo sahasındaki

sıcaklık aralıklarında 0.6-0.7 kg/m³ arasında değişir. Bu değerler atmosferik havanın yoğunluğunun hemen hemen yarısına eşit olduğundan, CH₄ rahatlıkla depo sahası sınırları dışına çıkabilir.

CH₄, % 5-15 arasında molar konsantrasyonlarda ve O₂'nin mevcut olduğu durumlarda patlayıcı bir gazdır. Metan gazının en düşük patlayıcılık sınırı (LEL) havada %5 oranında bulunmasıdır. LEL seviyesinde veya daha yüksek konsantrasyonlar, binalar, kanallar veya depo sahasına yakın diğer yapılar için tehlike arz eder. CH₄ konsantrasyonları bu kritik seviyeye ulaştığında, atık içerisindeki O₂ tamamen tükenmiş olduğundan depo sahalarında patlamaların meydana gelmesi gibi direkt bir tehlike söz konusu değildir. Ancak bazı durumlarda depo gövdesinde ve sahada yangına sebebiyet verebilir [10].

Metanın global ısınmaya etkisi de göz önünde bulundurulmalıdır. CO₂ ve su buharından sonra infrared ışınlarını tutan üçüncü önemli gaz CH₄'tür. CH₄'ün daha az ancak yine de önemli bir kısmı, sahanın yakınında toprak örtüsüne doğru hareket eder veya saha içerisindeki veya civardaki boşluklarda birikir. Her bir CH₄ molekülü, bir CO₂ molekülünün absorblayabileceği infrared fotonlarının 23 kat daha fazlasını absorblayabilir. Ancak, atmosferde 83 kat daha az miktarda CH₄ molekülü bulunduğundan, metanın sera etkisi karbondioksitin sebep olduğu sera etkisinin 1/4'ü kadardır [10].

Öte yandan, depo sahalarından oluşan CH₄'ın bir enerji kaynağı olarak kullanılması düşüncesi, son yıllarda ortaya çıkmıştır. CH₄ konsantrasyonu hacimce %35 olduğunda gazın bu amaçla kullanılması ekonomiktir. Doğal gazın ısıl değerinin 30.8 MJ/m³ (29,2 Btu/m³) olduğu göz önüne alındığında, %50 CH₄ ihtiva eden depo gazının, ısıl değeri 15,1 MJ/m³ (14,3 Btu/m³) olan orta dereceli bir enerji kaynağı olduğu görülmektedir [19].

3.1.2 Karbondioksit (CO₂)

Karbondioksit solunum sisteminde oksijenin yerini alabilmesi nedeniyle, zehirli olmamasına rağmen, hayat için tehlike oluşturabilme özelliği gösterir. Depolama alanlarında yoğunluğu yaklaşık 1,8 kg/m³ civarındadır. Bu değer atmosferik havanın yoğunluğunun 1,5 katı, metan gazınıninkinin ise yaklaşık 2,8 katına eşittir. Bu sebeple CO₂ depo sahasının alt kısımlarında hareket halindedir.

Atmosferdeki CO₂ konsantrasyonları özellikle son yıllarda büyük ölçülerde artış gösterdiğinden önem kazanmış ve çevresel açıdan dikkate alınmaya başlanmıştır. 1948 yılında atmosferdeki ortalama CO₂ konsantrasyonu 310 ppm (hacimce % 0.031) iken, 1996'da bu değer 356 ppm (hacimce % 0.0356) seviyesine ulaşmıştır [10]. Bu büyük artış, CO₂'nin sera etkisinden dolayı global ısınmaya yol açabilecek seviyelerdedir. Karbon dioksit (CO₂), günümüzde atmosferde yaklaşık % 0.039 konsantrasyonunda [21] mevcuttur ve günden güne artma eğilimindedir. Şekil 2.4'te atmosferik metan ve karbondioksitin küresel ölçekte 1978'den 2010 yılına kadar olan eğiliminin açıkça artma yönünde olduğu görülmektedir.

CO₂'nin yol açtığı ikinci büyük tehlike ise asidik şartların oluşmasına sebebiyet vermesidir. CO₂, suda çözünabilir özellikte olduğundan, su ile temas halindeki CO₂'nin büyük bir kısmı sıvı faza geçecektir. Çözünmüş CO₂, bikarbonat (HCO₃⁻) iyonları ve karbonik asit (H₂CO₃) oluşturarak sıvının pH'ını düşürür. Depo sahalarındaki sıcaklıklarda yoğunluğu yaklaşık 1,8 kg/m³ civarındadır. Bu değer atmosferik havanın yoğunluğunun 1,5; CH₄'ın yoğunluğunun ise yaklaşık 2,8 katına eşittir. Bu sebeple, CO₂ depo sahasının alt kısımlarında hareket halindedir.

3.2 Depo Gazının Değerlendirilmesi

Katı atık depolama alanlarında oluşan gazın değerlendirilmesi aşamasında ortaya birden çok seçenek çıkmaktadır. Yaygın olarak kullanılan yöntem, Türkiye'de ve dünyada, elektrik enerjisine dönüştürülerek satılması şeklindedir. Çalışmanın yapıldığı Odayeri Düzenli Depolama Alanında da depo gazından elektrik enerjisi elde edilerek enerji nakil şebekesine aktarılmaktadır.

- *Elektrik üretimi*

Depo gazının elektrik enerjisine dönüştürülmesi içten yanmalı motorlarla, mikrotürbinlerle ya da türbinlerle yapılabilir.

- *Doğrudan kullanım*

Depo gazının oluştuktan sonra doğrudan son tüketiciye ulaştırılarak yakılmasıyla ısınma amaçlı, buhar kazanında, sanayide yakma amacıyla ya da farklı amaçlarla kullanılabilir.

- *Isı ve güç amaçlı kullanım*

Depo gazı bazı durumlarda kombine şekilde yakıt kaynağı olarak kullanılabilir. Bu, ayrı ayrı ısı ya da güç amaçlı kullanımdan daha verimlidir. Özellikle depo gazına yakın olan

alanlarda ya da son kullanıcının hem elektrik hem de atık ısı ürettiği durumlar için oldukça verimli kullanılmaktadır.

- *Alternatif yakıt olarak kullanılması*

Depo gazının doğalgaz özelliğine çevrilmesi durumunda yerel yönetimler tarafından şebekeye alınabilir. Bu aşamada depo gazının karbondioksitten ayrılması işlemi uygulanmalıdır. Depo gazı; metanol, sıvı doğalgaz (LNG) ya da sıkıştırılmış doğalgaza (CNG) çevrilerek araçlarda yakıt olarak da kullanılabilir. Bu işlem için depo gazının metan içeriğinin en az % 90 olması gerekmektedir [28]. Depo gazının kullanım alanları ise bir çalışmada [49] ele alınmış ve Çizelge 3.2’de aşağıdaki şekilde özetlenmiştir.

Çizelge 3.2 Depo gazının kullanım alanları

Doğrudan ısıtma amaçlı kullanım	Sanayide buhar kazanında Isıtma ve soğutma amaçlı Sanayide ısıtma/yakma amaçlı
Elektrik üretim amaçlı kullanımı	İçten yanmalı motorlarla Gaz/buhar türbinlerinde işlenerek Yakıt pillerinde işlenerek
Kimya sektöründe hammadde olarak kullanımı	Metanole çevrilerek Dizel yakıtı çevrilerek (Araçlarda)
Doğalgaza çevirerek kullanımı	Araçlarda Doğalgaz şebekesine aktarma
Çevrenin korunmasında	Sızıntı suyunun buharlaştırılmasında
Yakma bacasında ısı elde edilmesi	ORC* ile, propan türbini SCE** ile, yüksek verimli enerji

* ORC: organic rankine cycle

** SCE: stirling cycle engine

Depolama alanlarında üretilen gazın kullanım alanlarını araştıran Amerika Birleşik Devletleri’nde yapılan bir çalışmaya göre [9], depo gazının % 72’si elektrik üretiminde, % 21’i doğrudan ısıtma amaçlı, % 4’ü doğalgaz şebekesi için ve kalan % 3’ü ise diğer amaçlar için kullanılmaktadır.

3.3 Depo Gazının Ön Arıtımı

Depo gazı herhangi bir amaçla kullanılmadan önce bir ön arıtıma ihtiyaç duyar. Giderilmesi gereken parametreler gazın hangi amaçla kullanılacağına göre değişmekle beraber ön arıtmada giderilmesi gereken ana bileşenler nem, partikül madde, hidrojen

sülfür, siloksan, halojenli organik bileşikler ve karbondioksittir.

3.3.1 Nem arıtımı

Depo gazındaki nem içeriği sistem performansının düşmesine ve diğer bileşiklerle tepkimeye girerek korozyon etki gösteren formlara dönüşmesine neden olur. Gaz borularında nem birikmesi boruların tıkanmasına hatta tamamen kapanmasına neden olabilir. Nem birikimi soğuk iklimlerde daha yaygın olarak görülür.

Toz ve partikül madde de sistem performansını etkileyebilir. Partiküllerin aşındırıcı etkisiyle boru ve ekipmanlarda yıpranma meydana gelebilir. Nem arıtma ünitesinden sonra basit bir filtre ile bu sorunun da üstesinden gelinebilir [27].

3.3.2 Kükürtlü Bileşikler

Kükürtlü bileşikler, özellikle de hidrojen sülfür, nem ihtiva eden depo gazları ile birleşerek aşırı korozyon etki gösteren sülfürik aside dönüşür. Tüm ekipmanların zarar görmesine neden olan sülfürik asit, elektrik dönüşüm sisteminin hassasiyetine göre belirli bir miktara kadar tolere edilebilir. Örneğin içten yanmalı motorlarda 100 ppm'e, mikrotürbinlerde ise 70.000 ppm'e kadar sülfürik asit konsantrasyonuna müsamaha gösterilebilir [27]

3.3.3 Siloksanlar

Evsel atıklardaki kozmetik kalıntılarda bulunan siloksanların depo gazında konsantrasyonu genellikle 0,5 ile 15 mg/m³ arasındadır. Yanma esnasında siloksanlar aşındırıcı silikon dioksitlere dönüşür. Kristal yapıdaki silikon dioksitler motorun iç yüzeylerine yapışarak motorun ömrünü kısaltır. Biriken kalıntılar oluştuğunda motor sökülerek iç yüzeydeki kalıntılar elle temizlenir. Üreticilerin koyduğu bir standarda göre [50] tolere edilebilir siloksan konsantrasyonu 0,03 ile 28 mg/m³ arasındadır.

3.3.4 Halojenli Bileşikler

Halojenli bileşikler tıpkı kükürtlü bileşikler gibi asit oluşturarak korozyon etki yapar. Hidroflorik ve hidroklorik oluşumu depo gazının nem içermesi nedeniyle olur. Halojen giderimi genellikle depo gazının evsel doğalgaza dönüştürüldüğü durumlarda kullanılır ve çoğu durumda CO₂ gideriminin olduğu sistemlerde CO₂ ile birlikte giderilir.

3.4 Depo Gazından Elektrik Enerjisi Üretimi

İtalya’da yapılan bir çalışmada [49], mevcut olan teknolojilerin enerji verimleri, çevresel etkileri ve maliyetleri analiz edilmiştir. Ayrıca, düşük dereceli ve yüksek dereceli yakıtın enerjiye dönüşümünü inceleyen bir çalışma daha [27] yapılmıştır.

3.4.1 Pistonlu içten yanmalı motor (ICE, Otto Cycle)

Maliyeti düşük ve kolay taşınabilir bir sistemdir ancak hava kirliliğine sebep olur.

3.4.2 Gaz türbini (GT, Brayton Cycle)

ICE’ye göre enerji kayıplarından dolayı düşük performansla çalışır. Emisyonları ise görece düşüktür. Pistonlu gaz motoruna göre hem daha yüksek yatırım masrafı ister hem de daha düşük enerji dönüşüm verimi sağlar. Genellikle 1 ila 10 MW elektrik çıkış aralığına sahip ünitelere sahip olmakla eklenebilir ünitelerle esnek çalışma da sağlanabilir. Depo gazından elektrik eldesi için çok tercih edilmez.

3.4.3 Pistonlu Gaz Motoru (Reciprocating Gas Engines)

30 MW’tan daha büyük kapasitede tesisler için kurulabilir. Gaz türbinlerine göre daha yüksek verimli ve kW başına daha düşük maliyetlidir. MW başına 2-3 milyon ABD doları ile bir pistonlu gaz motoru tesisi kurulabilir. Bu sistemin tek dezavantajı devamlı ve verimli bir işletme için gereken kalifiye eleman ihtiyacıdır. Sistemin bir fotoğrafı Şekil 3.1’de görülebilir.

3.4.4 CHP Sistemleri

Bütünleşik ısı ve güç sistemleri (CHP) elektrik üretmek için hem gaz türbini, hem de buhar türbini kullanır ve verimli bir enerji dönüşüm sistemi elde eder. Gaz türbini ile buhar kazanı ısıtılırken, atık ısı, buhar kazanına buhar türbinini çalıştırması için geri devrettirilir. Atık ısının kullanılmasıyla gereken LFG ihtiyacı azalır ve verimli bir enerji dönüşümü sağlanır. Gereken LFG bakımından oldukça verimli olan CHP sistemleri dikkatli işletme gerektirir.



Şekil 3.1 Pistonlu Gaz Motorundan Elektrik Üretim Tesisi [27]

3.4.5 Organik Rankin Çevrim Motoru (ORC, Rankine Cycle):

Emisyonları GT'ye yakın fakat enerji üretim verimi görece düşüktür.

3.4.6 Sterling Çevrim Motoru (SCE)

Verimi yüksek emisyonu düşük olmasına rağmen yaygın olarak kullanılmaz. Büyük motor temin edilememesi de dezavantajlarından biridir.

3.4.7 Eriyik Karbonat Yakıt Pili (MCFC)

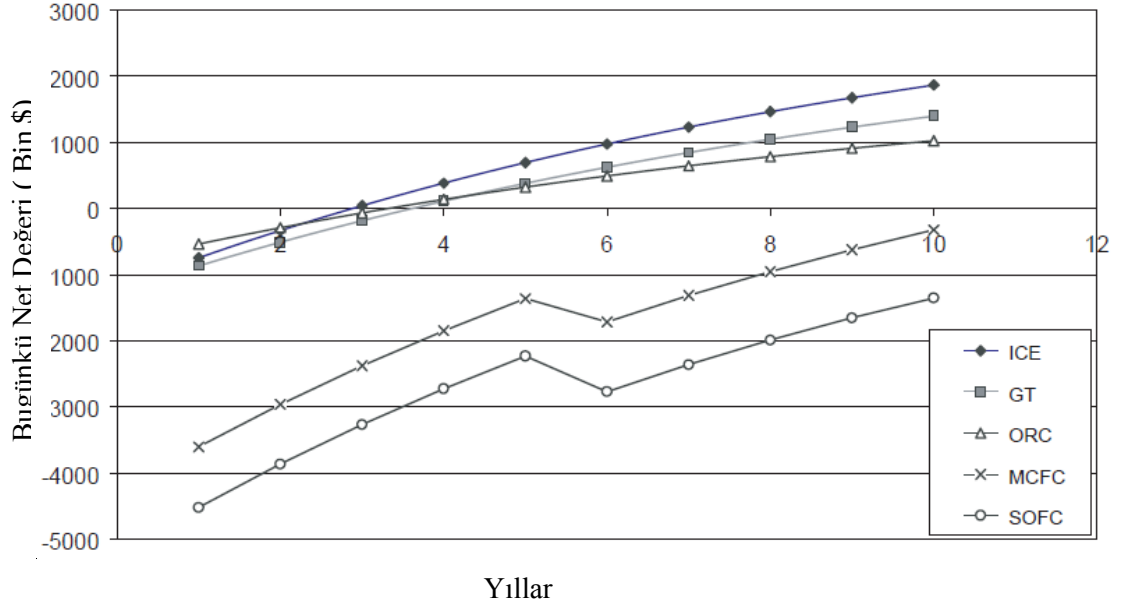
Yüksek sıcaklıkta işletilir ve yüksek enerji verimliliği sağlar ve oldukça pahalıdır.

3.4.8 Katı Oksit Yakıt Pili (SOFC)

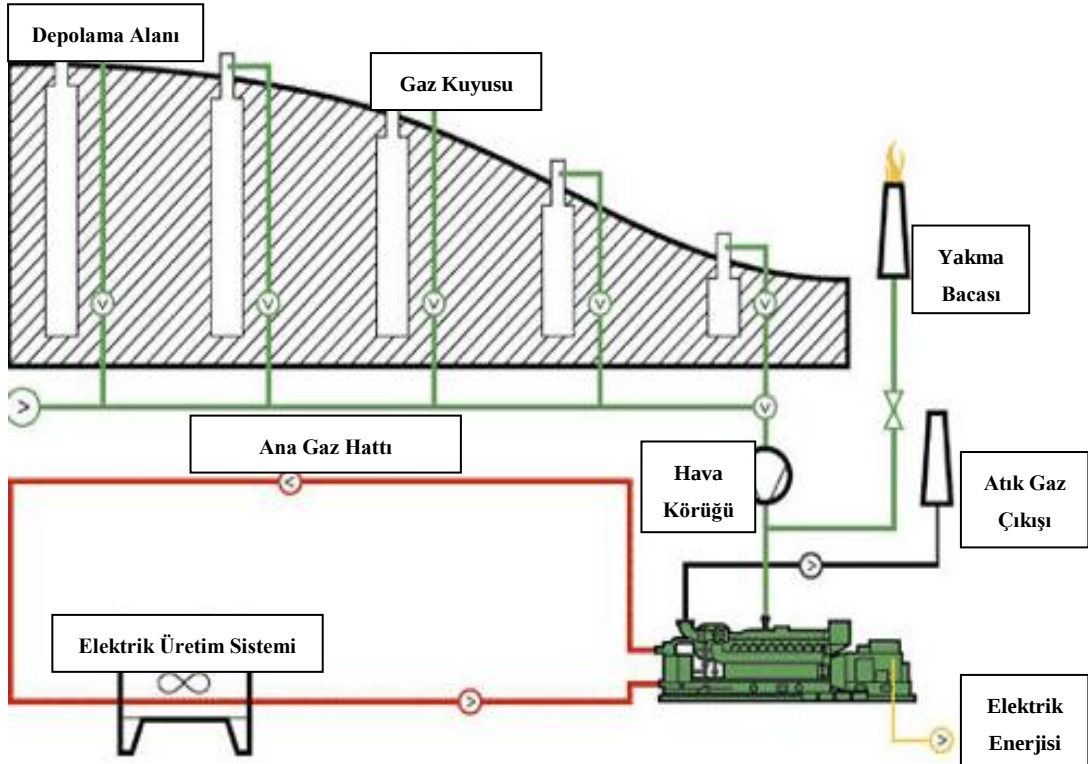
MCFC'ye çok benzer. 800-1000 °C arasında çalışır. CO'yu yakıt olarak kullanır. 800 °C altında verimsiz çalışır. Ancak MCFC'ye kıyasla çok araştırılmamıştır.

Yukarıda belirtilen enerji dönüşüm sistemlerinin bazılarının maliyet analizleri Şekil 3.2'de yapılmıştır. Buna göre, içten yanmalı motorun uzun vadede en ucuz ve en çok kullanılan enerji dönüşüm sistemi olduğu söylenebilir. Yakıt pilleri ise çevresel yönden en iyi performansı göstermekle beraber yenilikçi çalışmalar ve yaygın kullanımla ucuz, verimli ve çevreci olabilir.

Şekil 3.3'te ise bir depolama alanında gaz eldesi aşamalarının görselleştirildiği şekil verilmiştir. Depolama alanında üretilen gaz, gaz toplama bacaları ile toplanarak hava körüğü yardımıyla elektrik üretim sistemine ve yakma bacasına gönderilir. Üretilen elektrik, elektrik dağıtım hattına verilir ve atık gaz atmosfere salınır.



Şekil 3.2 Farklı teknolojilerin yıllara göre enerji dönüşümündeki performansları [49]



Şekil 3.3 Bir depolama alanında enerji elde edilmesinin aşamaları

GEREÇLER VE YÖNTEM

Katı atık depolama alanlarında depo gazlarının meteorolojik değişkenlerden nasıl etkilendiğinin belirlenebilmesi için meteorolojik verilere, depo gazı verilerine ve bu iki veri grubunun arasındaki ilişkiyi kurabilmek ya da bu ilişkiyi anlayabilmek için bir model algoritmasına ihtiyaç vardır.

Meteorolojik veriler, depolama alanına en yakın büyük istasyon olan İstanbul Sarıyer’de bulunan Kireçburnu meteoroloji istasyonuna aittir ve Meteoroloji genel müdürlüğünden alınmıştır.

Depo gazı verileri ise İstanbul ili Eyüp ilçesine bağlı Odayeri köyünde bulunan Odayeri düzenli depolama alanı enerji tesisinden alınmıştır.

2009 yılı Nisan ayı başı ile 2010 yılı Mart ayı sonuna kadar olan 1 yıllık meteorolojik veriler ve depo gazı verileri ile öncelikle SOM algoritması ile veri analizi yapılmış, sonra yapay sinir ağları algoritması kullanılarak iki veri grubu arasındaki ilişki analiz edilmiştir.

4.1 Sarıyer (Kireçburnu) Meteoroloji İstasyonu

T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü’ne bağlı olan meteoroloji istasyonlarından, istasyon numarası 17.061 olan Kireçburnu Meteoroloji İstasyonu 1930 yılında kurulmuştur. 1210 m² arsa üzerindedir. Deniz seviyesinden yüksekliği 58 metre, enlem ve boyları sırasıyla 41° 08' Kuzey - 29° 03' Doğu’dur. Ortalama sıcaklığı 13,6 °C, ortalama Basıncı 1009,9 hPa’dır. Hakim rüzgar yönü KKD (kuzey kuzeydoğu), ortalama rüzgar hızı 2,4 m/sn’dir. Ortalama nemi % 75,1 ve Yıllık toplam yağış ortalaması 808,8 kg/m²’dir. İstasyon türü ise sinoptik, büyük klima, otomatik istasyondur [51].

4.1.1 Otomatik Meteoroloji İstasyonu

Otomatik meteoroloji istasyonları; meteorolojik parametrelerdeki değişimlere duyarlı ve bu değişimlerin miktarını ölçen algılayıcılardan oluşmaktadır. Bu algılayıcıların ürettiği birimleri (volt, amper, frekans gibi) meteorolojik bilgilere ve birimlere dönüştürmek için gerekli hesaplamaları yapan ana işlem ünitesi, bu bilgilerin çeşitli yerlerde görüntülenmesini sağlayan görüntüleme üniteleri ile üretilen bilgi ve meteorolojik kodların ilgili merkezlere iletilmesini sağlayan haberleşme üniteleri de otomatik istasyon bünyesinde yer almaktadır. Otomatik istasyon elemanları Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

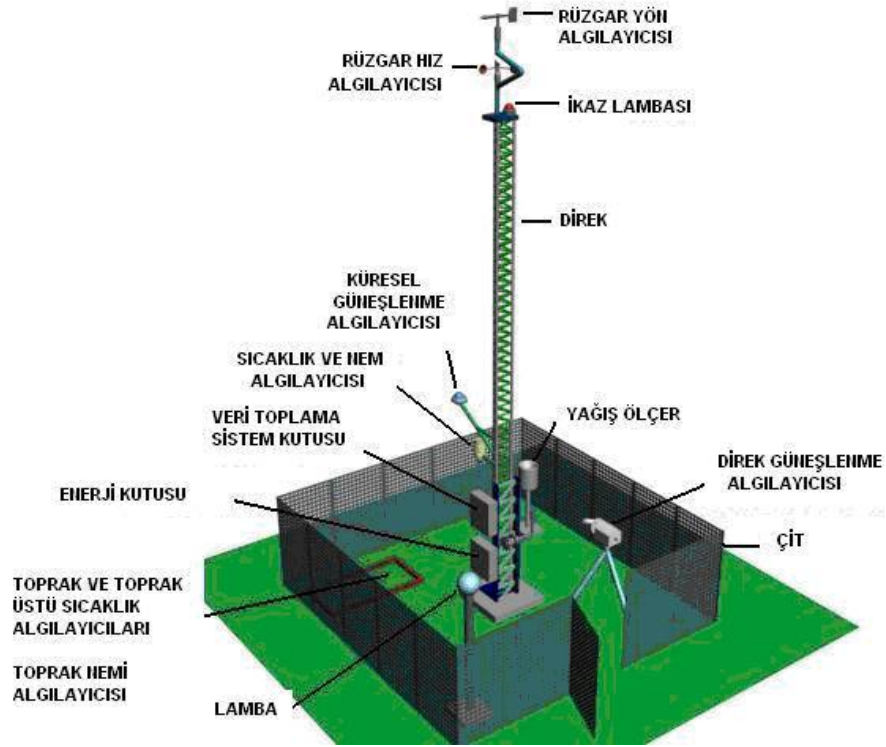
Otomatik istasyonlar, ölçülen ve hesaplanan çeşitli meteorolojik parametrelerin belirli formatlarda meteorolojik mesajlara dönüştürülmesi işlemini yaptıkları gibi, yine bu bilgilerin belirli formatlarda saklanması, grafiklere dönüştürülmesi ve yazıcılarda kaydedilmesi işlerini de yaparlar. Böylece, herhangi bir bilgi kaybı olmaksızın, meteorolojik parametrelerin sürekli olarak ve en doğru şekilde elde edilmesi sağlanmış olur [51].

4.1.1.1 Otomatik Gözlem Sisteminin Elemanları

Rüzgâr Hız ve Yön Algılayıcıları

Rüzgâr hız sensörü direğin tepesinde 10 metre yükseklikteki rüzgâr hızının ölçülmesinde kullanılır. Sensör içerisindeki optik sayıcı, sensör milinin birim zamandaki dönüş sayısını ölçer. Rüzgar hız ölçümünde kepçeli anemometre kullanılır. Rüzgarın etkisiyle kepçe döner. Birim zamandaki dönüş sayısına göre hız tespit edilir. Dönüş sayısının tespiti farklı yöntemler vardır. Ancak en yaygın kullanılan sistem fotodiyot ve manyetik anahtar (switch) yöntemidir.

Rüzgar yönü ise jüriyet yardımıyla ölçülür. Başlangıç konumunda jüriyet tam kuzeydedir (0°). Rüzgarın etkisiyle jüriyet döner. Jüriyetin başlangıç konumundan itibaren açısal konumu; fotodiyot, manyetik anahtar veya potansiyometre yöntemiyle tespit edilerek rüzgar yönü bulunur.



Şekil 4.1 Otomatik İstasyon [51]

Sıcaklık ve Nem Algılayıcısı

Hava sıcaklık ve Nem sensörü direkt güneş ışınlarına maruz kalmaması için radyasyon siperi içerisine konulmuştur. Bu siper direk üzerinde 2 metre yüksekliğe monte edilmiştir.

Meteorolojik amaçlar için; yer yüzeyine yakın hava sıcaklığı, yüksek hava sıcaklığı, toprak sıcaklığı (5, 10, 20, 50 ve 100 cm olmak üzere beş farklı derinlikte), toprak üstü asgari sıcaklık, açık siper sıcaklık, nehir, göl ve deniz suyu sıcaklıkları ölçümleri yapılır.

Sıcaklık, direnç termometre (RTD) ile ölçülür. Direnç termometrede kullanılan ölçüm elemanı platindir ve 0°C sıcaklıkta direnci 100 W'tır. Sıcaklık arttıkça direnç de lineer olarak artar. Platinin direnci ölçülerek sıcaklığa dönüştürülür. Hassas ölçüm yapmak için genellikle 4 telli ölçüm sistemi kullanılır.

Nem miktarı, meteorolojik olarak havanın nispi (bağıl) nemine karşılık gelmektedir. Herhangi bir sıcaklıktaki havanın taşıdığı su buharının aynı sıcaklıkta taşıyabileceği maksimum su buharı oranına nispi nem denir. Meteorolojik amaçlar için havanın nispi nemi, açık siper nispi nemi ve toprak nemi ölçülür. Nem ölçmek için kapasitesi nemle değişen polimer film kullanılır. Polimer film havanın nemini absorbe edince dielektrik

katsayısı değişir. Dielektrik katsayıdaki değişim kapasitansı değiştirir. Böylece kapasitans llnce nem de ölçülmüş olur. Toprak nemi ise benzer şekilde toprak içindeki su miktarı llerek hesaplanır.



şekil 4.2 Sırasıyla; sıcaklık ve nem algılayıcısı, yağışler [51]

Yağış ler

Yağış sensörü rasat parkı içerisinde yerden 1 metre yüksekliktedir. Kefeli ve ısıtıcılı tiptedir. 0.2 mm hassasiyetle çalışır. Meteorolojik yağış lm birimi, 1 m²'ye düşen su miktarı (kilogram) olarak ifade edilir. Bu da 1 mm yüksekliğindeki suya eşittir. Bu nedenle yağış miktarı milimetre cinsinden de ifade edilir. Yağış lm için, darbe (pulse) sayıcı yağış ler kullanılır. Silindirik toplama kabındaki keelerden birisi su ile dolunca pozisyon değişerek su diğer keeye dolmaya başlar. Pozisyon değiştirme esnasında manyetik anahtar (switch) kontak yaparak darbe üretir. Her bir darbe 0,2 mm yağışa karşılık gelir. Bu darbeler sayılarak yağış llr. Termostatlı ısıtıcılar kar ve doluyu eritir.

Basınç Algılayıcısı

Bir yüzeyin birim alanına bu yüzeydeki hava stnunun yapmış olduğu etkiye basınç kuvveti denir. Kristal silikon kullanılarak basınç llr. Silikonun kapasitesi basınç değişimi ile değişir ve kapasitanstaki değişim llerek basınç llmş olur.

Küresel Güneşlenme

Direk üzerinde 2 m yüksekliğe kurulmuştur. Güneşten elektromanyetik dalgalar halinde

yayılan, kısa dalga boylu radyasyondur. Bu radyasyonun atmosferde soğurulma, dağılma ve yansıma gibi işlemler sonucunda yere ulaşan kısmı doğrudan ve yayılan radyasyon olarak ikiye ayrılır. Yeryüzüne ulaşan doğrudan ve yayılan radyasyon toplamına küresel güneş radyasyonu denir.

Direk Güneşlenme

Tracker (izleyici); içerisindeki mikro bilgisayar tarafından kontrol edilen, iki adet step motorla çalışır. Yetkili kişilerce istasyon ile ilgili enlem-boylam-yükseklik ve uluslararası saat (GMT) bilgileri bir bilgisayar ile izleyicinin mini bilgisayarına kaydedilir. İzleyici; girilen zaman, enlem ve boylama göre güneşi takip eder.

Açık Siper Sıcaklık ve Nem Algılayıcıları

Açık siper sıcaklık ve nem ölçümleri 1 metre ve 2 metre yüksekliklerinde hava sıcaklık ve nem ölçümü yapan MP101A sensörü ile yapılmaktadır [51].

4.1.2 Meteorolojik Veriler

Atıkların düzenli depolanmasına dair yönetmeliğe göre; yağış hacmi (mm/gün, mm/ay), sıcaklık, [en düşük, en yüksek ve yerel saatle 14:00'te (°C)], rüzgârın yönü ve hızı (m/s), buharlaşma (mm/gün, mm/ay) ve bağıl nem günlük olarak ölçülmek zorundadır. Yönetmelikçe belirlenen meteorolojik parametrelerin depo gazı oluşumuna etkileri zaten bilinmektedir. Mevcut depolama alanında, depo gazı oluşumuna etki eden diğer parametrelerin belirlenebilmesi için alana en yakın büyük istasyon olan İstanbul ilinin Sarıyer ilçesindeki Kireçburnu Meteoroloji İstasyonunun verileri alınmıştır.

Veriler, 2009 yılının Nisan ayından, 2010 yılının Mart ayına kadar olan süreç için alınmıştır. Meteoroloji istasyonundan alınan veriler Tablo 6'da verilmiştir. Bu tablo, günlük yağış, hava sıcaklıkları (en yüksek, en düşük, ortalama °C), toprak sıcaklıkları (5, 10, 20, 50 ve 100 cm derinliklerde) ortalama atmosfer basıncı (hPa), ortalama buhar basıncı (hPa), ortalama nem (%) ve toprak üstü en düşük sıcaklık (°C) verileri ile oluşturulmuştur. Tabloda, bir yıllık süreçteki değişkenlerin en yüksek, en düşük, ortalama ve standart sapma değerleri belirlenmiştir.

4.2 Odayeri Düzenli Depolama Alanı Enerji Tesisi

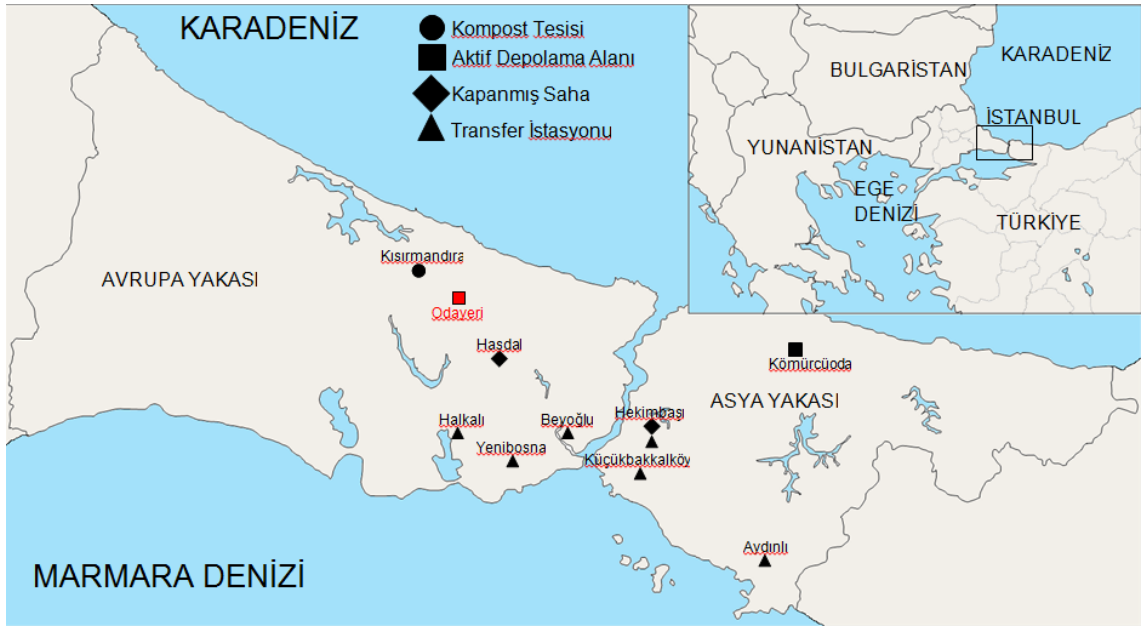
İstanbul ilinin Avrupa yakasında bulunan ve iki büyük katı atık depolama alanından biri olan Odayeri Düzenli Depolama Alanı, Eyüp ilçesine bağlı Odayeri köyünde kurulmuş

çöp depolama sahasıdır. 41°12' Kuzey, 28°51' Doğu enlem ve boylamında bulunan alanda depo gazından elektrik elde etmek için ilk olarak 1995 yılında İSTAÇ A.Ş tarafından işletmeye alınarak atık dökülmeye başlanmıştır. Evsel katı atıklar 2005 itibarı ile 125 ha'lık depo alanının 52 ha'lık bölümüne depolanmış ve depo sahası 25 yıllık kullanım süresi için projelendirilmiştir [3]. 2008 yılında elektrik üretimi için kapatılan depo, Haziran 2009'da işletmeye alınmıştır. Ortalama 30 m çöp yüksekliği olan alanda hacimsel olarak yaklaşık ortalama % 50 CH₄ ve % 42 CO₂ oluşmaktadır. İstanbul ilindeki katı atık aktarma istasyonları, kapanmış sahalar ve aktif depolama alanları harita üzerinde işaretlenmiş ve Şekil 4.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 Meteorolojik veriler

Değişken	En yüksek	En düşük	Ortalama	Standart sapma
Günlük yağış (mm)	56	0	2,9	6,7
En yüksek sıcaklık (°C)	33,2	-3,2	18,5	7,7
En düşük sıcaklık (°C)	23,7	-4	12,1	6,6
Ortalama sıcaklık (°C)	26,6	-3,4	14,8	6,9
5 cm toprak sıcaklığı (°C)	29,1	2,1	15,6	7,1
10 cm toprak sıcaklığı (°C)	29,7	1,6	15,6	7,2
20 cm toprak sıcaklığı (°C)	28,4	2,9	15,5	6,9
50 cm toprak sıcaklığı (°C)	26,7	5,3	15,5	6,1
100 cm toprak sıcaklığı (°C)	24,4	7,1	15,4	5,4
Ortalama atmosfer basıncı (hPa)	1028,4	992	1008,4	5,9
Ortalama buhar basıncı (hPa)	27,5	4,3	14,4	5,5
Ortalama nem (%)	100	45,9	81,6	12,5
Toprak üstü en düşük sıcaklık (°C)	23	-3,5	11,0	6,4

Tesis, yaklaşık 0,85 km² alan üzerine kurulmuştur. Günlük ortalama 8.000 ton çöp depolanan sahada, 2.100 m³ de sızıntı suyu oluşmaktadır [3]. Depoya gelen günlük ortalama çöp miktarı aktarma istasyonlarında düzenli olarak ölçülmektedir.



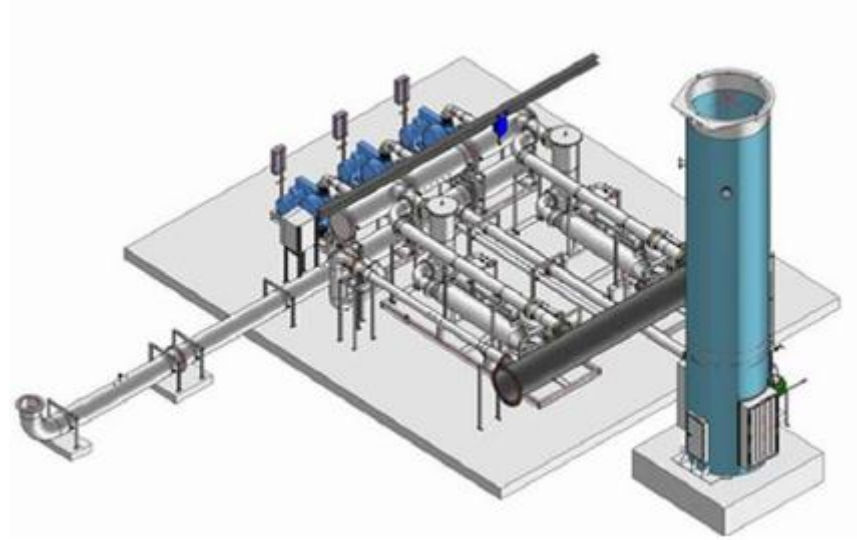
Şekil 4.3 İstanbul haritası, atık transfer ve bertaraf tesisleri

Akkaya'nın yaptığı çalışmaya göre [3], Odayeri depo sahasında 2007-2008 yıllarında depolanan çöp ve oluşan sızıntı suyu miktarları bir grafikte gösterilmiştir. Bu grafiğe göre, depolanan atık miktarı 125.000 tonun altına düşmezken, oluşan sızıntı suyu da yıl boyunca 60.000 m³'ün altına düşmemektedir. Bunun anlamı, depolanan atık miktarının yaklaşık yarısı kadar miktarda sızıntı suyu oluşmaktadır. Bu nedenle deponun suya doymun olduğu kolaylıkla söylenebilir.

İstanbul'un Sarıyer ilçesindeki Kemberburgaz-Odayeri çöp depolama alanını İstanbul Büyükşehir Belediyesi'ne bağlı bir kurum olan İSTAÇ A.Ş., bu sahaya bağlı çöp gazından elektrik üretim tesisini ise Ortadoğu Şirketler Grubu'na bağlı Ortadoğu Enerji şirketi işletmektedir. Odayeri'ndeki Enerji Tesisinin fotoğrafı Şekil 4.4'de verilmiştir. Bu tesise ait yakma bacasının şematik gösterimi ise Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.4 İstanbul Odayeri Enerji Üretim Tesisleri [52]



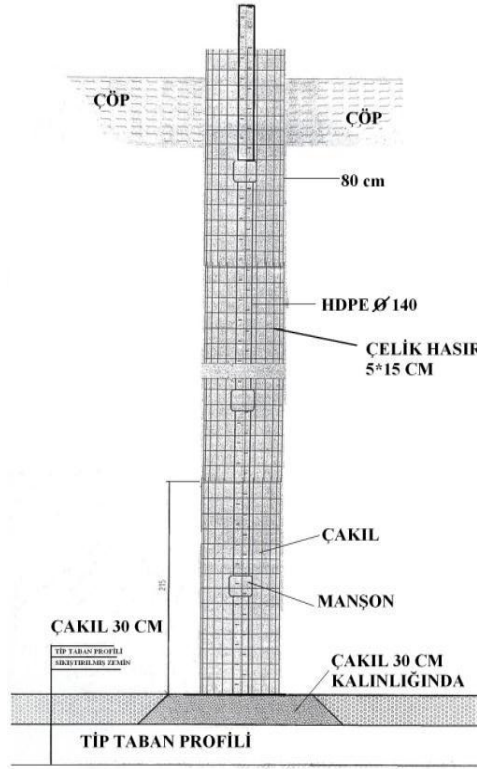
Şekil 4.5 Odayeri Enerji Tesisi Yakma Bacası İllüstrasyonu [52]

Şekil 4.6’da Ortadoğu Enerji adlı şirketin Odayeri depo sahası üzerinde çektiği fotoğraflardan birkaçı, bir depo gazı bacasının boy kesiti ise Şekil 4.7’de görülebilir.

Ortadoğu Enerji’nin hem Kemerburgaz – Odayeri’nde, hem de Şile – Kömürcüoda’da yürüttüğü projelerle, elektrik satışlarına ek olarak karbon emisyonu azaltımı geliri sağlanmaktadır. 2005 yılında çıkarılan ve 2012 yılına kadar dört değişiklik yapılan Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun kapsamında olan bu projeler; devletin, Ekim 2008 itibari ile 13,3 ABD Doları cent/kW-saat sabit fiyatlı elektrik enerjisi satın alma garantisi altındadır [53]. Odayeri çöp gazından elektrik enerjisi üretim tesisinin 2010 yılı verileri, o yıl içinde 70 milyon kWh elektrik üretildiğini göstermektedir.



Şekil 4.6 Depolama alanı üzerindeki gaz kuyuları [52]



Şekil 4.7 Gaz bacası boy kesiti

Gaz tahmin modeli olarak EPA'nın yaklaşımının (LandGEM) kullanıldığı çalışmalar sonunda; Odayeri Düzenli Depolama Sahası için maksimum kurulu gücün 25 ila 30 MW arasında olacağı hesaplanmıştır. Böylece, 2007–2030 yılları arasında yaklaşık 2.203 GWh elektrik enerjisi üretim projeksiyonu ortaya konmuştur [24].

Odayeri çöp gazından enerji üretim tesisinde elde edilen gazdan elektrik elde etme işleminde ve sonrasında;

- Çöp gazının toplanması,
- Toplanan çöp gazının önceki bölümlerde bahsedilen yöntemlerle iyileştirilmesi,
- Çöp gazının motor-jeneratör gruplarında yakılarak elektrik elde edilmesi,
- Fazla gelen gazın yakma bacalarında bertaraf edilmesi,
- Elde edilen elektriğin enerji nakil hatları ile kullanıcılara iletilmesi,
- Kojenerasyon ve trijenerasyon tesislerinin kurulması,
- Yakın çevredeki konut ve işletmelerin ısıtma, soğutma, sıcak su ihtiyaçlarının karşılanması şeklinde özetlenebilir [53].

Odayeri düzenli depolama alanı enerji tesisinin tasarımında, kuyularda biriken aşırı miktarda sızıntı suyunun alınmasına ve gaz borularında yoğunlaşan suyun kontrolüne

özellikle önem verilmiştir. Tesise ait bazı teknik bilgiler Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 Enerji tesisi ile ilgili bazı teknik bilgiler [52]

Parametre	Açıklama
Ortalama kuyu derinliği	28 m
Maksimum kuyu derinliği	43 m
Kuyu etki çapı	50 m
İmalat şekli	Fore kazık sondajı
Manifold sayısı	12
Kuyu sayısı (manifold başına)	(8-12)
Üst kaplama	60 cm kil + 50 cm toprak
Yakma bacası sayısı	2
Yakma bacası kapasitesi	2500 m ³ /saat
Yakma sıcaklığı	> 900 °C
Vakum pompası sayısı	7
Vakum pompası kapasitesi	2500 m ³ /saat
Gaz motoru sayısı	20
Gaz motoru kapasitesi	1415 kW
Elektrik nakli	Çift hatlı - 6 kablolu

4.2.1 Düzenli depolama alanı enerji tesisi verileri

Odayeri düzenli depolama alanında elektrik üretiminden önce, depo gazındaki önemli birkaç değişkenin yüzdesel oranlarının bilinmesi tesisin kapasitesi ve verimi hakkında bilgi vermektedir. Bu bağlamda, metan, karbondioksit, oksijen ve depo gazı sıcaklığı (soğutucu öncesi, °C) verileri modelde kullanılmak amacıyla alınmıştır. Mevzubahis parametrelerin en düşük, en yüksek, ortalama ve standart sapma değerleri Çizelge 4.3’te verilmiştir. Çizelge 4.3’te ise bu verilerin açıklayıcı istatistiği verilmiştir.

Çizelge 4.3 Depo gazı verileri

Değişken	En Düşük	En Yüksek	Ortalama	Standart Sapma
CH ₄ (%)	44,8	54,6	50,4	1,7
CO ₂ (%)	37,5	44,6	42,2	1,3
O ₂ (%)	0,26	3,35	1,0	0,4
Soğutucu öncesi depo gazı sıcaklığı (°C)	7	43	28,8	8,1

4.3 Veri Analizi

Matematiksel modelleme yapmadan önce depo gazı verilerinin ve meteorolojik verilerin bir analizi yapılabilir. Bu analizde veri gruplarının birbiriyle olan ilişkisi, dönemsel

değişiklikler ve dağılımların görülebileceği bir program kullanılmalıdır.

Veri analizi için, öncelikle depo gazı verilerinin açıklayıcı istatistiği oluşturulmuştur. Daha sonra tüm veri grupları arasındaki korelasyon katsayıları bulunmuştur.

Görsel veri analizi için SOM (kendinden düzenlenen haritalar) algoritması kullanılmıştır. İsminden de anlaşılacağı gibi, SOM haritaları verileri düzenli gruplar halinde (petek gibi) görselleştirmektedir.

Depo gazı tahmin sonuçları ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması için ise “Mann-Whitney Rank Sum Test” testi uygulanmıştır. Bu test ile ölçüm ve tahmin sonuçları arasında anlamlı bir fark olup olmadığına bakılmıştır. Bu amaçla, “Sigmaplot for Windows 11.0” programı kullanılmıştır. Parametrik olmayan bir analiz olan Mann-Whitney testi sonucu elde edilen p değerine göre “iki veri grubu anlamlı olarak birbirine benzemektedir” sonucu elde edilmektedir.

4.3.1 SOM (Self Organizing Maps – Kendinden Düzenlenen Haritalar) Modeli

SOM, asal bileşen analizinin (PCA) lineer olmayan bir genellemesidir [54]. Yapay sinir ağlarının özel bir sınıfı olarak da bilinen kendinden düzenlenen haritalar (SOM) algoritması, yarışmacı öğrenme yöntemine dayanmaktadır [54]. Yüksek boyutlu verilerin (özellikle deneysel verilerin) görselleştirilmesi ve analizi için kullanılan bir hesaplama yöntemidir [55].

Kendinden düzenlenen haritalar, verilerin anlamlı gruplar (cluster) halinde tanımlandığı bir harita oluşturur. Bu model, veri grubu içindeki farklılıkları en aza indirir, veriler arasındaki farklılıkları maksimize ederek homojen veri grupları oluşturur.

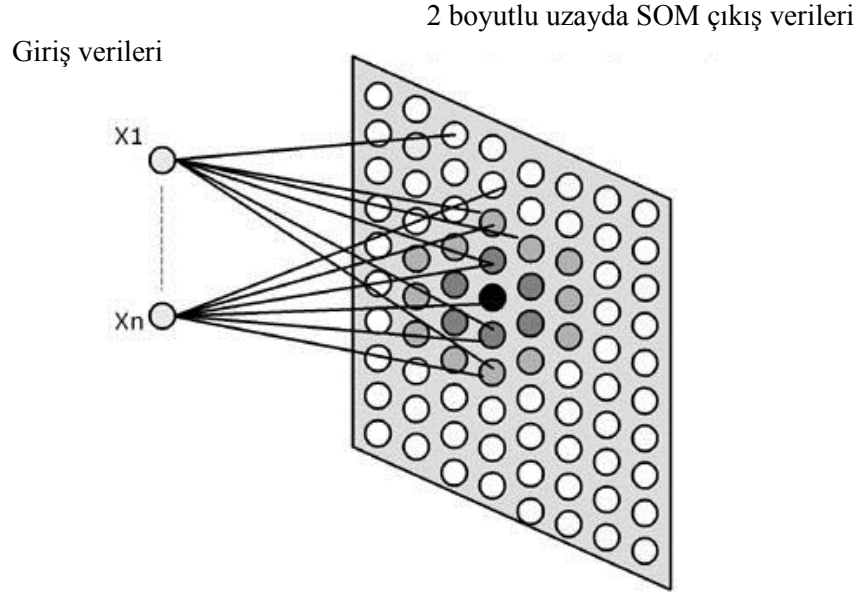
Bir SOM haritası, verilerin düşük boyutlu bir ağ üzerinde düzenlendiği nöronlar bütünüdür [56]. Nöron sayısı birkaç düzineden birkaç bine kadar değişebilir. Nöronlar birbirleri ile komşuluk ilişkilerine benzer bir şekilde yakın olur ki bu da haritadaki veriler arasındaki kümelenmeleri (topolojisini), yapılanmayı ortaya koyar.

Bu yöntemde, çıkış nöronları kendi aralarında yarışa sokulurlar ve sadece bir nöron çıkış nöronu olarak belirlenir. Buna kısaca kazanan nöron da denir. Nöronları yarıştırmamanın bir yolu da çıkış nöronları arasındaki bağlantıları kullanmaktır [54].

Kendinden düzenlenen harita oluşturmanın ortaya çıkması aslında insan beyninin çalışma prensibine de dayandırılabilir. İnsan beyni, birçok yerde topolojik olarak

sıralanan haritalar oluşturma yetisine sahiptir. Bunu yapan beyin zarıdır (serebral korteks). Yani harita oluşturma becerisi, sinir sisteminin altyapısını oluşturan sistemdir.

Topografik harita oluşturma prensibi Kohonen tarafından şöyle açıklanmıştır [54]: yersel (topografik) bir haritadaki çıkış nöronunun nihai yeri, girdi alanından çizilen belirli bir etki alanına karşılık gelir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8 Sinir ağındaki veriler ve kazanan nöron [57]

Algoritmanın kendinden düzenlenen haritayı oluşturabilmesi için oluşturulan ağıdaki bileşenlere rastgele ağırlıklar verilir ve süreç başlatılır. 3 aşamalı (yarışma, işbirliği ve uyum) bu süreçte, öncelikle her bir girdi modeli için nöronlar ağıdaki ayırıcı fonksiyonlarını hesaplatır. Ayırıcı fonksiyonlar nöronlar arasındaki rekabeti sağlamaktadır. Ayırıcı fonksiyonun en büyük değerine sahip eşsiz nöron, yarışın galibi yani kazanan nöron olur. İşbirliği aşamasında, kazanan nöronun topolojik (yersel) komşularının belirlenmesi sağlanır. Bu aşama, diğer çıkış nöronlarının belirlenmesine yardımcı olması açısından önemlidir. Son aşama ise sinaptik uyumun sağlandığı aşamadır. Bu aşamada çıktı nöronlarının giriş verileri ile uyumu artırılır, yani giriş verileri ile çıkış verileri arasındaki fark, ayırıcı fonksiyon yardımı ile azaltılır. Bu, sinapslardaki ağırlık değerlerinin değiştirilerek giriş ile çıkış arasındaki örüntünün geliştirilmesi ile olur.

Veri grubu boyutunun m olduğunu varsayalım. Giriş modeli için belirlenen veri kümesi şu şekilde olsun:

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T \quad (4.1)$$

Her bir nöronun taşıdığı sinaptik ağırlık vektörü w , her bir nöron j ile ifade edilsin.

$$w_j = [w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{jm}]^T, j = 1, 2, \dots, l \quad (4.2)$$

Burada l toplam nöron sayısı, w_j sinaptik ağırlıklar yüklenmiş giriş vektörüdür.

Daha sonra Euclid uzaklığı ölçüsü kullanılarak en iyi uyan, kazanan (BMU) nöronun bulunması için $i(x)$ formülü kullanılır.

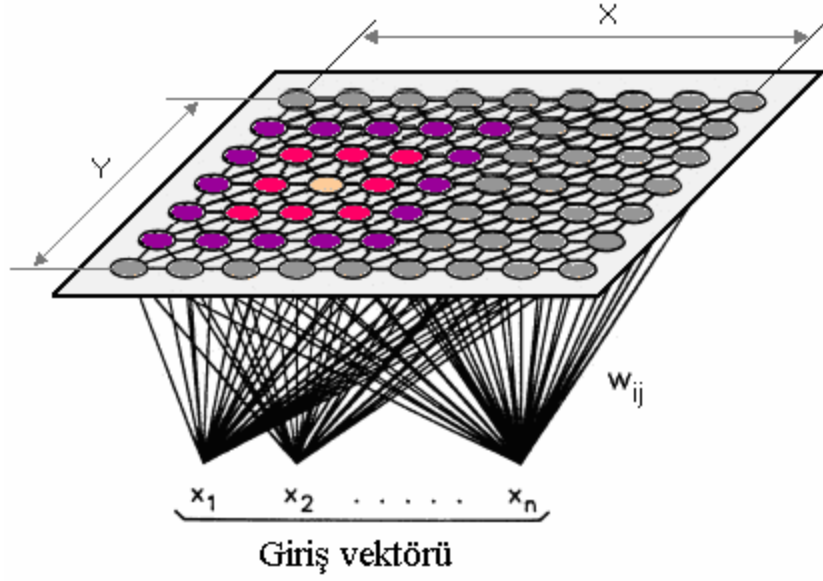
$$i(x) = \arg \min \|x - w_j\|, j = 1, 2, \dots, l \quad (4.3)$$

Sinaptik ağırlık vektörlerinin güncellenmesiyle de sonuca yaklaşma sağlanır.

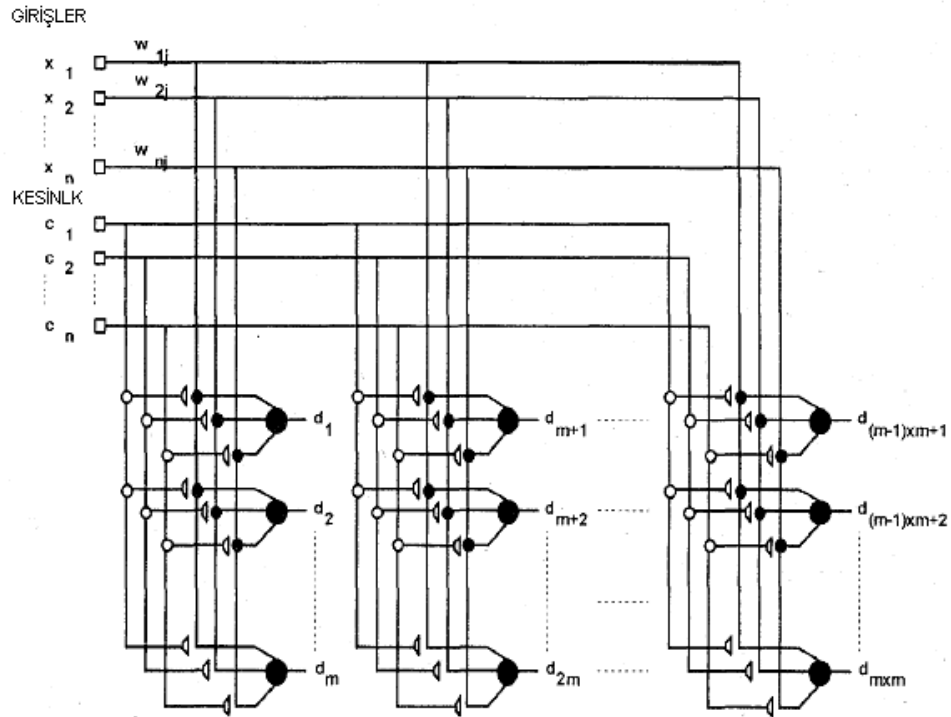
$$w_j(n+1) = w_j(n) + \eta(n)h_{j,i(x)}(n)(x(n) - w_j(n)) \quad (4.4)$$

Burada $\eta(n)$ öğrenme hızı değişkeni, $h_{j,i(x)}(n)$ kazanan nöron $i(x)$ etrafındaki komşu fonksiyondur. Hem $\eta(n)$ hem de $h_{j,i(x)}(n)$ öğrenme sırasında en iyi sonuç için devamlı değişmektedir. Son olarak nihai haritada değişiklik olmayana kadar en başa dönülerek en iyi sonuç alınır. Sonuç olarak bu modelin homojenlik testi yaptığı yani birbirine yakın verileri bir araya topladığı söylenebilir.

Kohonen ağının topolojik yapısı Şekil 4.9'de görülmektedir. Bu ağ giriş ve çıkış katmanından oluşur. Çıkış katmanı 2 boyutlu yapıdadır. Giriş katmanı ise, dağıtım katmanı vazifesi görür. Çıkış katmanındaki her bir işlem elemanı eşit sayıda niteliğe sahiptir. Diğer bir ifadeyle ağırlık vektörlerinin uzunluğu her işlem elemanı için de aynıdır. Çıkış işlem elemanları ise rastgele başlangıç değerleriyle üretilir. Yani SOM algoritmasının sıfırlama evresinde, iki boyutlu nöron yapısının örgüsündeki her bir nörona atanan girdi verisiyle aynı boyuta sahip vektörler rastlantısal olarak oluşturulurlar.



Şekil 4.9 Kendinden düzenlenen haritaların oluşturulması [75]



Şekil 4.10 Geliştirilmiş kendinden düzenlemeli ağ yapısı [76]

Bu çalışmada “SOM Toolbox for MATLAB 5” programı kullanılmıştır. Program, sonuç grafiğini altıgen gritler şeklinde oluşturmaktadır.

Kendinden düzenlenen harita oluşturarak verileri ilişkilendirilmesi bilimsel çalışmalarda

veri analiz yöntemi olarak kullanılmıştır. SOM algoritması kullanarak verilerin ilişkilendirilmesi hava kirliliği modellemelerinde, meteorolojik verilerin kullanılmasında [58], [59], [60]; ve su kalitesi ve toprak kalitesinin belirlenmesinde [61], [62] yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu algoritmanın depolama alanlarına, katı atıkların oluşumu ya da bertarafı konusu ile ilişkilendiren bir yayın henüz yoktur.

PM₁₀ profilinin uzak kaynak katkısını belirlemek için Karaca [58] tarafından yapılan çalışmaya göre, SOM, belli bir bölgeye özgü hava yörüngesinin gidişatını tahmin etmeye yarayan bir model olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada, yörünge gruplama problemi, gruplar bilinmediği için, model bazlı yaklaşımlara uygun değildir. Buna göre SOM için, hava kütlesi yörüngelerini gruplamak için çok kullanışlı bir algoritma olduğu sonucuna PM₁₀ konsantrasyonlarıyla çok uyumlu olması nedeniyle ulaşılmıştır.

Hsu ve Li [59], 21 yıllık yağış verilerini SOM ile mekânsal - uzamsal olarak düzenlemiştir. Bu sayede her hidrolojik bölgenin kendi verisi gruplar (cluster) halinde ortaya çıkmış ve bu sayede su kaynaklarının yönetimi ve iklim değişimine uyumun sağlanması ile sulak alanların yönetiminde iyileşmeye gidilmesi amaçlanmıştır.

Su kaynakları yönetiminin SOM ile modellendiği çalışmaların bir derlemesi olan Kalteh vd.'nin [62] yaptığı çalışmada ise son birkaç on yılda nehir akışının, yağış ve yüzeysel akışın, yağmurun, yüzey suyu kalitesinin ve bununla ilgili olayların-verilerin incelendiği SOM analizleri oldukça artmış olduğu vurgulanmaktadır. Bu çalışmalar, birçok durumda, SOM'un su kaynakları ve hidrolojide çeşitli problemleri çözmek için başka yöntemler uygulayabileceğini ifade etmektedir. Bu çalışmada ayrıca SOM'un ilginç becerilerinden birinin de farklı özelliklere göre gruplama/simgeleme olanağı sağlaması olduğu belirtilmiştir. Bu sayede eksik veriler SOM tarafından doldurulur ve model uygulayan mühendislere bir sorun çıkartmamaktadır.

4.4 Matematiksel Modelleme

4.4.1 ANN (Artificial Neural Network - Yapay Sinir Ağları) modeli

Yapay sinir ağları (YSA), insan beyninin bilgi işleme teknolojisinden esinlenerek geliştirilmiş bir bilgi işlem teknolojisidir. İlk yapay sinir ağı modeli 1943 yılında, bir sinir hekimi olan Warren McCulloch ile bir matematikçi olan Walter Pitts tarafından gerçekleştirilmiştir. McCulloch ve Pitts [63] insan beyninin hesaplama yeteneğinden esinlenerek, elektrik devreleriyle basit bir sinir ağı modellemiştir. YSA ile biyolojik

sinir sisteminin çalışma şekli benzetilmiştir. Sinir hücreleri nöronlar içerirler ve bu nöronlar çeşitli şekillerde birbirlerine bağlanarak ağı oluştururlar. Yapay sinir ağları, veriler arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarma ve hafızaya alma kapasitesine sahiptirler. Diğer bir ifadeyle, YSA'lar, normalde bir insanın düşünme ve gözlemlemeye yönelik doğal yeteneklerini gerektiren problemlere çözüm üretmektedir [64]. Üç yaşındaki bir çocukta 10^{15} sinaps (ağ) varken, yetişkinlerde bu miktar 10^{14} 'e kadar düşmektedir [65]. Yapılan birçok akademik çalışmada ağ sayıları ise 4 haneli sayılara bile ulaşmamaktadır.

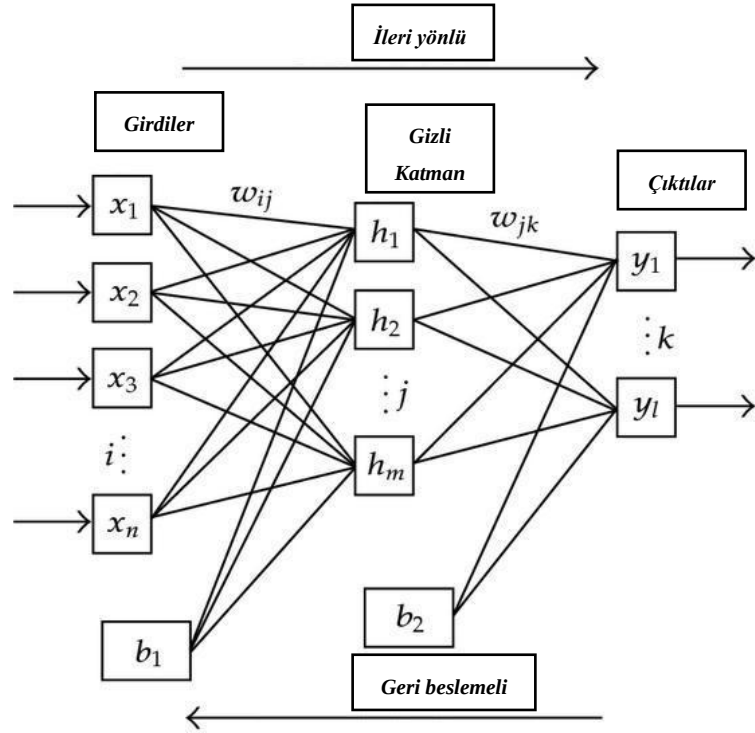
YSA'lar, ağırlıklandırılmış şekilde birbirlerine bağlanmış birçok işlem biriminden (nöronlar) oluşan matematiksel sistemlerdir. Bir işlem birimi, aslında sık sık transfer fonksiyonu olarak anılan bir denklemdir. Bu işlem birimi, diğer nöronlardan sinyalleri alır; bunları birleştirir, dönüştürür ve sayısal bir sonuç ortaya çıkartır. Genelde, işlem birimleri kabaca gerçek nöronlara karşılık gelirler ve bir ağ içinde birbirlerine bağlanırlar; bu yapı da sinir ağlarını oluşturmaktadır.

Sinirsel (neural) hesaplamanın merkezinde dağıtılmış, uyum sağlayan ve doğrusal olmayan (non-linear) işlem kavramları vardır. YSA'lar, geleneksel işlemcilerden farklı şekilde işlem yapmaktadırlar. Geleneksel işlemcilerde, tek bir merkezi işlem birimi her hareketi sırasıyla gerçekleştirir. YSA'lar ise herbiri büyük bir problemin bir parçası ile ilgilenen, çok sayıda basit işlem birimlerinden oluşmaktadır. En basit şekilde, bir işlem birimi, bir girdiyi bir ağırlık kümesi ile ağırlıklandırır, doğrusal olmayan bir şekilde dönüşümünü sağlar ve bir çıktı değeri oluşturur. İlk bakışta, işlem birimlerinin çalışma şekli yanıltıcı şekilde basittir. Sinirsel hesaplamanın gücü, toplam işlem yükünü paylaşan işlem birimlerinin birbirleri arasındaki yoğun bağlantı yapısından gelmektedir. Bu sistemlerde geri besleme (backpropagation) yöntemiyle daha sağlıklı öğrenme sağlanmaktadır.

YSA'nın ana ögesi olan matematiksel fonksiyon, ağın mimarisi tarafından şekillendirilir. Yani, fonksiyonun temel yapısını ağırlıkların büyüklüğü ve işlem elemanlarının işlem şekli belirler. YSA'ların davranışları, yani girdi veriyi çıktı veriyeye nasıl ilişkilendirdikleri, ilk olarak nöronların transfer fonksiyonlarından, nasıl birbirlerine bağlandıklarından ve bu bağlantıların ağırlıklarından etkilenir.

YSA modeli büyük miktarda ve karmaşık veriler için en uygun modellerden biridir [57]. Örnekleri kullanarak öğrenirler. Yapay sinir ağları görülmemiş örnekler hakkında bilgi üretebilirler. Kendi kendini organize etme ve öğrenebilme yetenekleri vardır. Eksik bilgi

ile çalışabilmektedirler ve hata toleransına sahiptirler. Yapay sinir ağları, giriş ve çıkışları olan kara kutular gibi düşünülebilirler. Bu kara kutunun işlevi, basitçe, matematiksel bir fonksiyonu temsil etmek şeklinde açıklanabilir.



Şekil 4.11 İleri yönlü geri beslemeli bir YSA model çizelgesi

Şekil 4.11’da, ileri yönlü geri beslemeli bir YSA modelinin tasarımı görülmektedir. Girdi değerlerinin (x) her biri, tüm gizli katmanlarda (h) belirli ağırlıklarla (w) çarpılarak ve eğilim sabitiyle (b) toplanarak bir çıktı verisi elde edilir. Bu çıktılar, bir f fonksiyonunda (tanjant – sigmoid) işleme koyularak y çıktısı elde edilir. Elde edilen değer, birinci iterasyon sonunda elde edilen değerdir. Bu değerle istenen değer arasındaki fark, hatayı (ε) oluşturur. Hata yardımıyla ağırlıklar ve sabitler güncellenerek ikinci iterasyona geçilir.

$$h_j = f(\sum(x_i * w_{ij}) + b_1) \quad (4.5)$$

$$y_k = f(\sum(h_j * w_{jk}) + b_2) \quad (4.6)$$

$$f = \text{tansig} = \frac{2}{1 + \exp(-2 * n)} - 1 \quad (4.7)$$

2. İterasyon

$$\delta_k = \varepsilon_k = f' * \varepsilon \quad (4.8)$$

$$\delta_j = \varepsilon_j = f' * \varepsilon * \sum \varepsilon_k * w_{jk} \quad (4.9)$$

$$w'_{ij,jk} = w_{ij,jk} + \eta * f' * \varepsilon * h_j, y_k \quad (4.10)$$

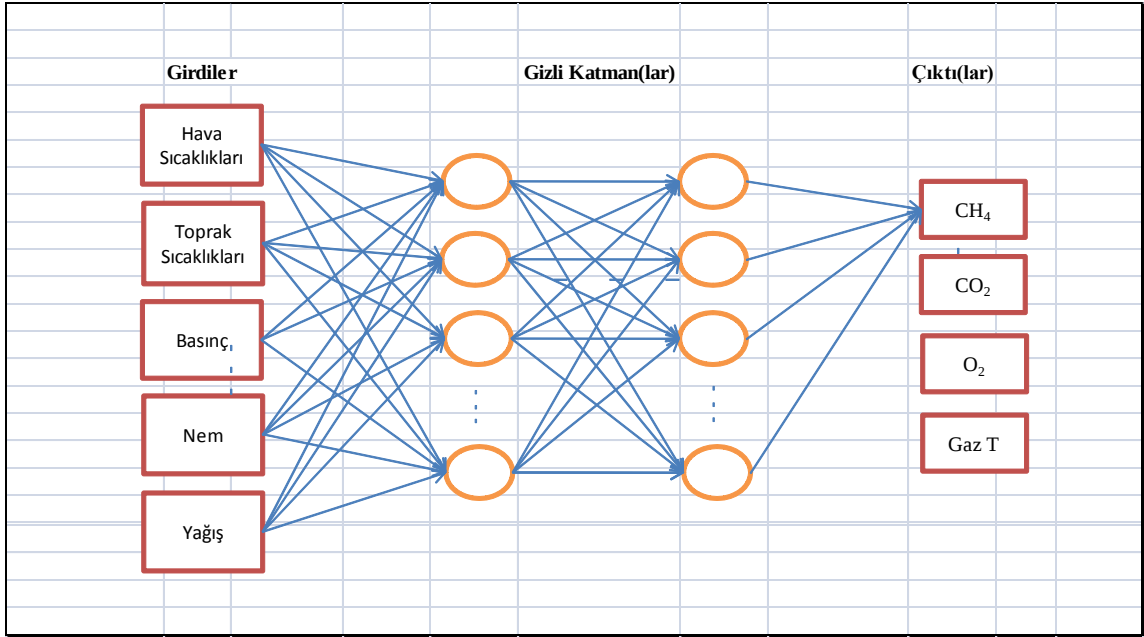
$$b' = b + \eta * \varepsilon_k \quad (4.11)$$

$f' = f$ fonksiyonunun (tansig) türevi,

$\delta =$ gizli katmandaki ya da çıktı katmanındaki hata

$\eta =$ Öğrenme hızı, çok küçük olması durumunda gerçeğe yaklaşım oldukça yavaş, çok büyük olması durumunda ise gerçeğe yaklaşılamama gibi engelleri vardır. Yaygın olarak 0,9 değeri kullanılır.

“MATLAB® 7.1.0.246 (R14) Service Pack 3” programı kullanılarak elde edilen model sonuçları bir sonraki bölümde tartışılmıştır.



Şekil 4.12 Örnek bir YSA kurulumu

YSA modeli bilimsel çalışmalarda oldukça yaygın olarak kullanılan bir MLP (çok katmanlı algılayıcı) analiz yöntemidir. Çevre mühendisliği ve çevre teknolojisi ana bilim dallarında da YSA modeli birçok çalışmada kullanılmıştır. Atıksuların arıtılması alanında; atıksu arıtma tesisinin KOİ, BOİ ve AKM ile modellenerek çıkış kalitesinin belirlenmesinde [66], deri işleme fabrikasındaki atık suların arıtma veriminin modellenmesinde [67] ve tekstil sanayisinde atık boyaların adsorpsiyon yöntemiyle arıtma veriminin incelenmesinde de kullanılmıştır [68]. Hava kirliliği alanında [69], [70], [71] ve katı atık yönetiminde de [46], [72] [73] YSA ile birçok değişken

modellenmiştir.

Katı atık depo sahalarında haftalık katı atık oluşumunun YSA ile tahmin edildiği bir çalışma da literatürde mevcuttur. Noori vd. [74]'nin yaptığı bu çalışmaya göre giriş değişkenlerinin ön işleme tabi tutulmasının olumlu etkisi olduğu ve farklı öğrenme fonksiyonlarının görünür bir etkisi olmadığı anlaşılmıştır. YSA model işletimini ise, giriş değişkenlerinin çok miktarda bilgi içermediği durumlarda, önermiştir.

MODEL SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER

Katı atık depolama alanlarında oluşan depo gazı miktarıyla üretilen enerji miktarı paralellik gösterir. Bu yüzden, depo sahalarında ayrışmayı etkileyen faktörlerin iyi bilinmesi gerekir. Bu faktörlerden en önemlilerinin, nem, oksijen, pH, alkalinite, sıcaklık, hidrojen ve nütrientler olduğu söylenebilir [35], [77]. Bu faktörlerden, nem, hava sıcaklığı, toprak sıcaklığı gibi meteorolojik olanları daha önce bir matematik modelle incelenmiştir. Özcan H.K. [5] vd.'nin yaptığı çalışmaya göre, genetik algoritma kullanarak, bir depo alanındaki metan dağılımı modellenmiştir. Meteorolojik değişkenlerden; sıcaklık, bağıl nem, basınç, güneşlenme süresi, bulutluluk rüzgar hızı ve yağışın kullanılarak; metan, karbondioksit ve oksijen miktarları ile gerçek miktarlar karşılaştırılmıştır. Üç yıllık verilerin kullanıldığı çalışmada; korelasyon katsayıları 0,72 ile 0,86 arasında değişmekteyken, yaklaşma indeksi %0,83 ile %0,87 arasında belirlenmiştir. Bu değerlerin bire yakın olması nedeniyle, bu modelin iyi bir model olduğu söylenebilir.

Bu çalışmada ise, meteorolojik faktörlerin depo gazına etkisi hem daha fazla meteorolojik değişkenle hem de ilave olarak veri analizi yapılarak YSA ile modellenmiştir. SOM ile yapılan veri analizi ve istatistiksel hesaplamalar ile verilerin birbiriyle olan ilişkileri görsel ve sayısal olarak ortaya konmuş, daha sonra yapılan modelleme ile de bu korelasyonun doğruluğu matematiksel olarak da ispatlanmıştır.

5.1 Veri Analizi Sonuçları

Ölçülen ve tahmin edilen değerlerin birbiriyle ne derece benzeştiğini anlamak için istatistiksel çalışmalar yapılmıştır. Depo gazı verilerinin açıklayıcı istatistiği Çizelge 5.1'de verilmiştir. Ayrıca, veriler arasındaki korelasyon katsayıları hesaplanmış ve Çizelge 5.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 Depo gazı verilerinin açıklayıcı istatistiği

Değişken	Ortalama	Aralık	1. Çeyrek	Medyan	3. Çeyrek
CH ₄ (%)	50.44±1.74	44.80–54.60	49,1	50,4	51,8
CO ₂ (%)	42.18±1.32	37.50–44.60	41,2	42,4	43,3
O ₂ (%)	1.01±0.39	0.26–3.35	0,75	0,98	1,24
Gaz T (°C)	28.76±8.15	7.00-43.00	22	28	36

Çizelge 5.2 Meteorolojik veriler ve depo gazı verileri için korelasyon katsayıları

	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	LFG T (°C)	Max. T (°C)	Min. T (°C)	Avg. T (°C)	5 cm Top. T (°C)	10 cm Top. T (°C)	20 cm Top. T (°C)	50 cm Top. T (°C)	100 cm Top. T (°C)
CH ₄ (%)	1.00											
CO ₂ (%)	0.82	1.00										
O ₂ (%)	-0.67	-0.76	1.00									
LFG T (°C)	-0.35	-0.14	-0.03	1.00								
Max. T (°C)	-0.31	-0.17	-0.02	0.94	1.00							
Min. T (°C)	-0.37	-0.16	0.01	0.92	0.90	1.00						
Avg. T (°C)	-0.35	-0.17	0.00	0.96	0.97	0.96	1.00					
5 cm Top. T (°C)	-0.41	-0.20	0.09	0.94	0.89	0.95	0.94	1.00				
10 cm Top. T (°C)	-0.41	-0.20	0.09	0.95	0.89	0.95	0.94	1.00	1.00			
20 cm Top. T (°C)	-0.40	-0.18	0.08	0.94	0.87	0.94	0.93	1.00	1.00	1.00		
50 cm Top. T (°C)	-0.37	-0.11	0.04	0.92	0.82	0.90	0.89	0.97	0.97	0.98	1.00	
100 cm Top. T (°C)	-0.33	-0.02	0.00	0.88	0.77	0.86	0.84	0.93	0.92	0.95	0.99	1.00

Her bir parametrenin metan gazı yüzdesine etki faktörü ise “SPSS 16.0” programının faktör analizi uygulamasıyla hesaplanmış olup Çizelge 5.3’te verilmiştir. Asal bileşen analizi (PCA) kullanılarak yapılan hesaplamada en etkili değişken yağış, nem ve CO₂ yüzdesi olup en az etkili değişken ise depo gazındaki oksijen yüzdesidir. Karbondioksit yüzdesinin metan gazı yüzdesiyle % 91 oranında benzeşmesi depo alanında bu iki gazın birbiriyle bağlantılı olduğunu göstermektedir. Bilindiği gibi üretilen karbondioksit, metanojen bakteriler tarafından metan gazına dönüştürülmektedir.

Meteorolojik verilerin ve depo gazı verilerinin birbirleri arasındaki etkileşimleri ise farklı kombinasyonlarda veri gruplarının Asal Bileşen Analizi ile değerlendirilmesi yapılmıştır. Veriler arasındaki etkileşimlere yüzde üzerinden ağırlıklar verilerek belirlenen etki faktörleri Çizelge 5.4’te verilmiştir.

Çizelge 5.3 Her bir değişkenin metan yüzdesi üzerindeki etki faktörü

Değişken	Etki Faktörü (%)
Günlük Yağış	56
Max Sıcaklık	35
Min Sıcaklık	32
Ort Sıcaklık	33
5 cm Toprak Sıcaklığı	29
10 cm Toprak Sıcaklığı	29
20 cm Toprak Sıcaklığı	30
50 cm Toprak Sıcaklığı	32
100 cm Toprak Sıc.	34
Ortalama Basınç	47
Ortalama Buhar Basıncı	33
Ortalama Nem	56
Toprak Üstü Min. Sıc.	31
CO ₂ Yüzdesi	91
Oksijen Yüzdesi	16
Soğutucu Ö. LFG S.	33

Çizelge 5.4 Tüm veriler için Asal Bileşen Analizi ile belirlenen faktör ağırlıkları

Değişken	Etken Faktör Ağırlığı			
	Bileşen 1	Bileşen 2	Bileşen 3	Bileşen 4
Günlük Yağış	-0,223	0,151	0,705	0,035
En Yüksek Sıcaklık	0,927	0,08	-0,23	-0,084
En Düşük Sıcaklık	0,969	0,069	0,014	-0,07
Ortalama Sıcaklık	0,973	0,071	-0,137	-0,065
5 cm Toprak Sıcaklığı	0,99	0,008	0,064	0,047
10 cm Toprak Sıcaklığı	0,99	0,005	0,055	0,037
20 cm Toprak Sıcaklığı	0,985	0,021	0,087	0,073
50 cm Toprak Sıcaklığı	0,957	0,071	0,148	0,146
100 cm Toprak Sıcaklığı	0,915	0,124	0,189	0,188
Ortalama Basınç	-0,142	-0,231	-0,013	0,95
Ortalama Buhar Basıncı	0,935	0,096	0,194	-0,065
Ortalama Nem	-0,378	0,044	0,723	-0,095
Toprak Üstü Min. Sıc.	0,963	0,043	0,091	-0,079
CH ₄	-0,434	0,809	-0,122	0,06
CO ₂	-0,217	0,919	0,007	0,054
Oksijen	0,081	-0,889	0,082	-0,12
Soğutucu Öncesi LFG Sıcaklığı	0,967	0,086	-0,086	0,036

Çizelge 5.4'te verilen faktör ağırlıkları ilk bileşen için; hava sıcaklıkları, toprak sıcaklıkları, ortalama buhar basıncı ve soğutucu öncesi depo gazı sıcaklıkları esas alındığında % 90'ın üzerinde birbiriyle ilişkili olduğu görülmektedir. İkinci bileşende ise metan gazı ve karbondioksit gazı yüzdelerinin % 80 oranında birbiriyle benzeştiği söylenebilir. Üçüncü bileşende yağış ve nemin birbiriyle etkileşim içinde olduğu belirlenmiştir. Son bileşende ise atmosferik basınç ile toprak sıcaklığı arasında bir benzeşme olduğu söylenebilir ancak bunun için başka varyasyonlarla analiz yapılması gerekmektedir. Ancak bu sonuçla, tahmin sonucunu etkileyen en önemli parametreler belirlenmiş olup hassasiyet analizinin yapılmasına gerek yoktur.

Çizelge 5.5'te verilen dört verili asal bileşen analizinde metan yüzdesinin diğer değişkenler üzerindeki etkisi görülmektedir. Basınç, nem ve metan yüzdesinin birbirini etkilediği ilk bileşen analizinde görülmektedir. Metan yüzdesi hem basınca hem de buhar basıncına bağlıdır. Diğer bileşende ise metan gazı yüzdesinin buhar basıncı ve nem ile de benzeştiği söylenebilir. Asal bileşen analizi ile belirlenen her bir etki faktörü ile tahmine etki eden en önemli parametreler belirlenmiş olup hassasiyet analizi yapılmasına gerek kalmamıştır.

Çizelge 5.5 Asal Bileşen Analizi ile belirlenen diğer faktör ağırlıkları

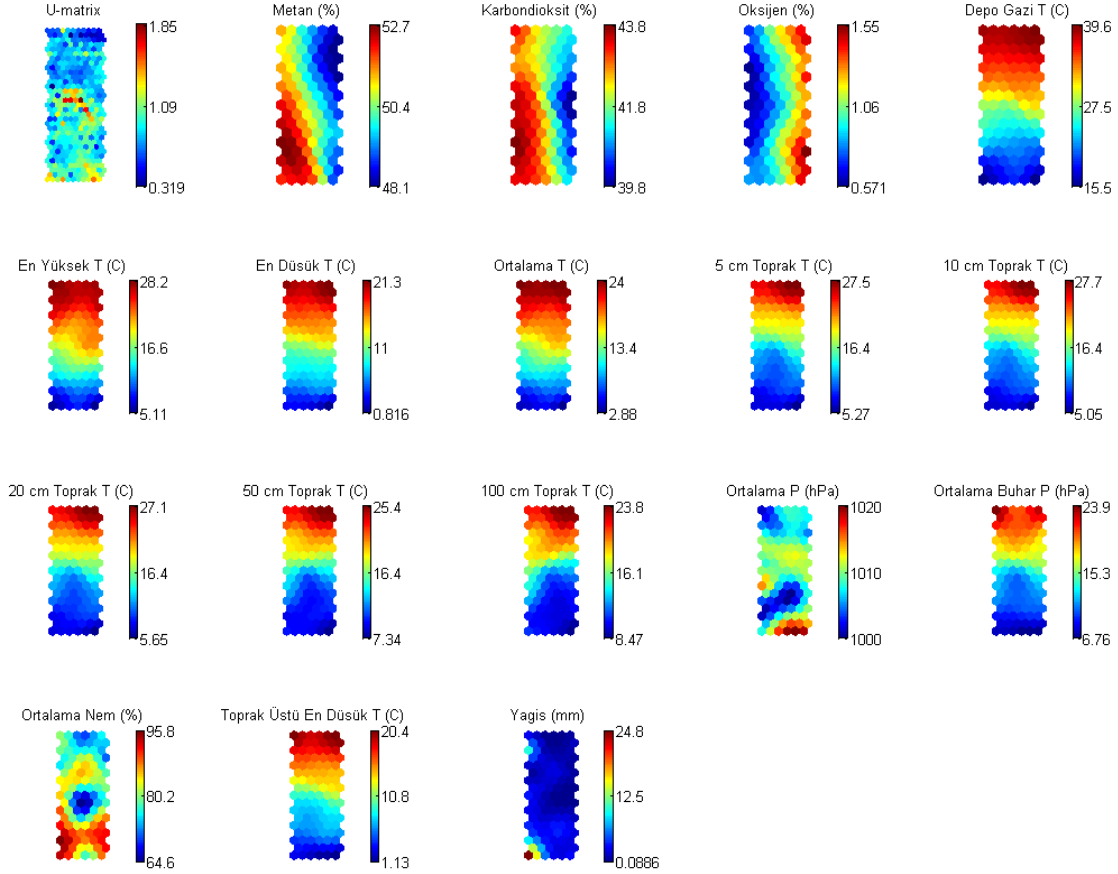
Değişken	Etkin Faktör Ağırlığı	
Ortalama Basınç	0,255	-0,883
Ortalama Buhar Basıncı	-0,804	0,212
Ortalama Nem	0,418	0,365
CH ₄	0,736	0,331

5.1.1 SOM Sonuçları

Odayeri düzenli depolama alanındaki depo gazı içeriği verileri ile Sarıyer Kireçburnu meteoroloji istasyonundan alınan verilerin SOM algoritması ile analiz edildiği grafik, Şekil 5.1'de verilmiştir.

Meteorolojik verilerden sıcaklık ve ortalama buhar basıncı verilerinin birbiriyle çok büyük oranda benzeştiği, veri kümelerinden açıkça görülmektedir. Buna ilaveten, model sonuçlarıyla da paralel olarak, depo gazı sıcaklığı ile hava ve toprak sıcaklıklarının da büyük oranda aynı kümelenmelere sahip olduğu gözlenmektedir. Bunun sebebinin sıcaklık değerlerinin depo gazı ve toprak sıcaklık değerlerini etkilemesiyle olduğu söylenebilir.

Depo gazı verilerinin ise kendi arasında benzer kümelenmeler oluşturduğu açıkça görülmektedir. Özellikle metan ve karbondioksit SOM'larının belirli bölgelerde aynı renkte kümeler oluşturduğu izlenmektedir. Depo gazı verilerinden olan oksijen yüzdesinin ise metan ve karbondioksite kıyasla aksi nispette renkli kümeler meydana getirmiş olduğu gözlenmektedir.



Şekil 5.1 Tüm verilerin SOM sonuçları

Meteorolojik verilerin ve depo gazı verilerinin birbiriyle ilişkisi olduğunu söylemek, SOM grafiklerine bakarak mümkün olabilir. Özellikle depo gazının ana bileşenlerinden olan metan ve karbondioksinin yoğun olarak olduğu alt katmanların derinlerdeki toprak sıcaklığı ile doğru orantılı olarak ilişkilendirilebileceği söylenebilir. Yağış verilerindeki kümeler söz konusu olduğunda ise, görünür küme sayısı az olmasına rağmen, sol alt kümelerde alınan yağışların metan ve karbondioksit oluşum yüzdesinin artmasına sebebiyet verdiği açıkça görülmektedir. Benzer şekilde, ortalama nem miktarının da metan gazı oluşumunda belirgin etkisi olduğu görülebilir.

5.2 YSA Sonuçları

Yapay sinir ağlarının bir uygulaması olan bu modelde, çok girdili, tek çıktılı (Multi input single output, MISO) model kullanılmıştır. Yapay sinir ağlarının meteorolojik girdi ve depo gazı çıktıları kullanılarak uygulandığı bu çalışmada, farklı girdi değişkenleri kullanılarak meteorolojik değişkenlerden hangisinin depo gazı verileri üzerinde daha etkili olduğu bulunmuştur. Farklı meteorolojik girdilerle oluşturulan modelden çıkan sonuca göre, toprak sıcaklıklarının depo gazı oranlarını belirlemede etkili rolü olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu nedenle aşağıda grafikleri ile birlikte verilen; tüm giriş değişkenleri, toprak ve hava sıcaklıkları, yalnızca toprak sıcaklıkları, yalnızca hava sıcaklıkları, yağış, toprak ve hava sıcaklıkları, toprak ve hava sıcaklıklarının çıkarılıp tüm değişkenleri ve sadece toprak sıcaklıklarının çıkarılıp tüm değişkenlerin kullanıldığı giriş verileriyle; tüm çıktı değişkenlerinin (CH_4 , CO_2 , O_2 ve depo gazı sıcaklığı) ayrı ayrı çalıştırıldığı model sonuçları oluşturulmuştur. Oluşturulan grafiklerin oldukça fazla olması sebebiyle her grafikte aynı olan bazı bileşenler için açıklamalar oluşturulmuştur. Bu grafiklerdeki eksenlerin ve bazı bileşenlerin karşılıkları Çizelge 5.6’da verilmiştir. Veri grupları için belirlenen kodlar ise Çizelge 5.7’de verilmiştir.

Çizelge 5.6 Model grafikleri açıklama tablosu

Grafik bileşeni	Karşılığı
44-56 veri aralığındaki eksen	CH_4 (%)
37-45 veri aralığındaki eksen	CO_2 (%)
0-3,5 veri aralığındaki eksen	O_2 (%)
5-45 veri aralığındaki eksen	Depo gazı sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
A	Asıl değer
T	Tahmin edilen değer
.	Veri noktası
----	A=T doğrusu
—	En iyi uyum doğrusu

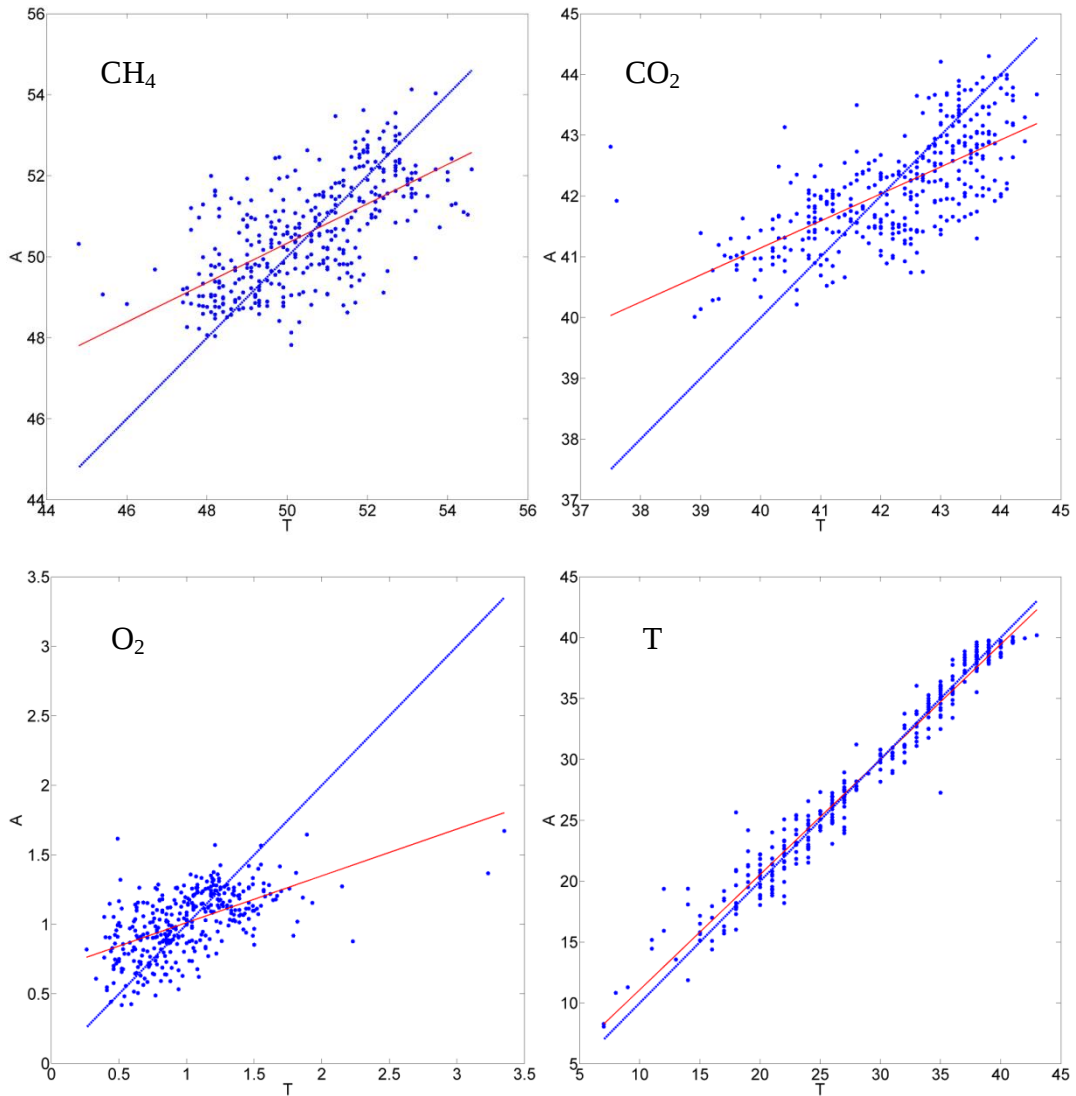
Çizelge 5.7 Girdi veri grup kodlamaları

Veri Grubu	Kod
Tüm veriler	V
Toprak sıcaklıkları	T
Hava sıcaklıkları	H

Oluşturulan YSA model grafiklerine göre depo gazı verilerinden CH_4 ve CO_2 için

makul seviyelerde korelasyon katsayıları elde edilmiştir. Oksijen için ise bu oran yedi durumdan üçünde 0,50'nin üzerindedir. Depo gazı verilerinden sonuncusu olan soğutucu öncesi depo gazı sıcaklığı için ise tüm durumlarda 0,97'nin üzerinde R değerleri elde edilmiştir. Bunun nedeni olarak meteorolojik verilerin birçoğunun sıcaklık ya da sıcaklıkla ilgili parametreler olması yüzündendir. Başka bir deyişle sıcaklık verileriyle depo gazı sıcaklığı modellenmiştir. Çalışılan 7 durum için model sonuç grafikleri Şekil 5.2'den başlayarak Şekil 5.8'e kadar verilmiştir.

Sarıyer – Kireçburnu meteoroloji istasyonundan alınan ve Çizelge 4.1'de verilen meteorolojik veriler ile Çizelge 4.3'te verilen depo gazı verileri YSA modeli kullanılarak elde edilen ilişki Şekil 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.2 Veri grubu olarak “V” kullanılarak uygulanan, sırasıyla CH₄, CO₂, O₂ yüzdeleri ve depo gazı sıcaklığı tahmin sonuçları

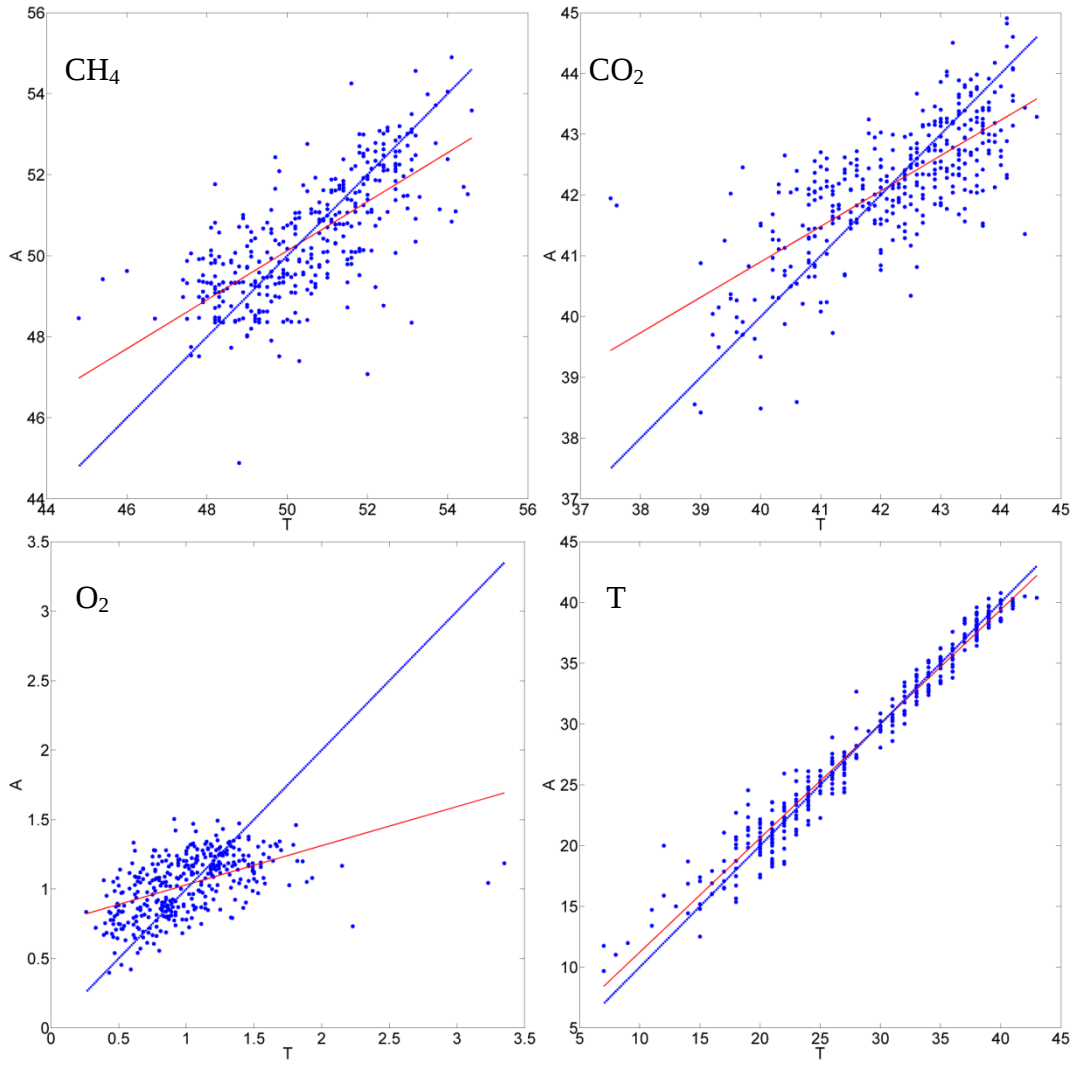
Şekil 5.2’de verilen grafikte mevcut tüm meteorolojik veriler kullanılmış olup her bir grafik için korelasyon katsayıları (R), sırasıyla: 0,64; 0,68; 0,57; 0,98; Doğru denklemleri: CH_4 : $A=0,487T+26$; CO_2 : $A=0,445T+23,4$; O_2 : $0,336T+0,677$; Depo gazı T : $A=0,945T+1,64$ olarak bulunmuştur.

Şekil 5.2’ye göre, YSA modeli için depo gazı verilerinden CH_4 ve CO_2 için makul oranlarda (sırasıyla; 0,64-0,68) korelasyon katsayıları elde edilmiştir. Buradan tüm meteorolojik verilerin kullanılması ile YSA modelinin öğrenme algoritmasının zorlandığı sonucuna ulaşılabilir. Buna yazılım dilinde “the curse of dimensionality” (boyut sorunu) [78] denilmektedir. Girdi veri sayısının her artışında tahminleme üstel olarak artar ve benzerlik arama zorlaşır.

Oksijen için ise çalışılan diğer durumlara kıyasla en yüksek korelasyon katsayısı elde edilmiştir. Bunun sebebi olarak tüm verilerin oksijen oluşumunda etkin rol aldığı gösterilebilir. Oksijen yüzdesi tahmininde korelasyon sayısının düşük olması ise depo gazındaki oksijen seviyesinin tutarsız olması, başka bir deyişle oksijen verilerinin standart sapma değerinin fazla olması gösterilebilir. Ayrıca, oksijen verilerinin, depo gazının karakteristik özelliklerinin bir göstergesi olmadığı sonucuna da ulaşılabilir.

Şekil 5.3’te verilen grafikte tüm toprak ve hava sıcaklık verileri kullanılmış olup her bir grafik için korelasyon katsayıları (R), sırasıyla: 0,71; 0,73; 0,51; 0,98; Doğru denklemleri: CH_4 : $A=0,605T+19,9$; CO_2 : $A=0,583T+17,6$ O_2 : $0,282T+0,748$; Depo gazı T : $A=0,939T+1,84$ olarak bulunmuştur.

Şekil 5.3’te verilen grafiklere göre, metan ve karbon dioksit gazı için en yüksek oranlarda korelasyon katsayıları elde edilmiştir. Bu grafiklerde toprak ve hava sıcaklıkları beraber kullanılarak depo gazı verileri modellenmiştir. Tüm derinliklerdeki toprak sıcaklıkları ile ortalama, en düşük ve en yüksek hava sıcaklıkları depo gazı oranlarını belirleyebilmek için en etkili yöntem olduğu bu veriler ışığında söylenebilir. Ayrıca, sıcaklık verilerinin depolama alanlarında çok önemli olduğu sonucuna da buradan bir kez daha ulaşılabilir.



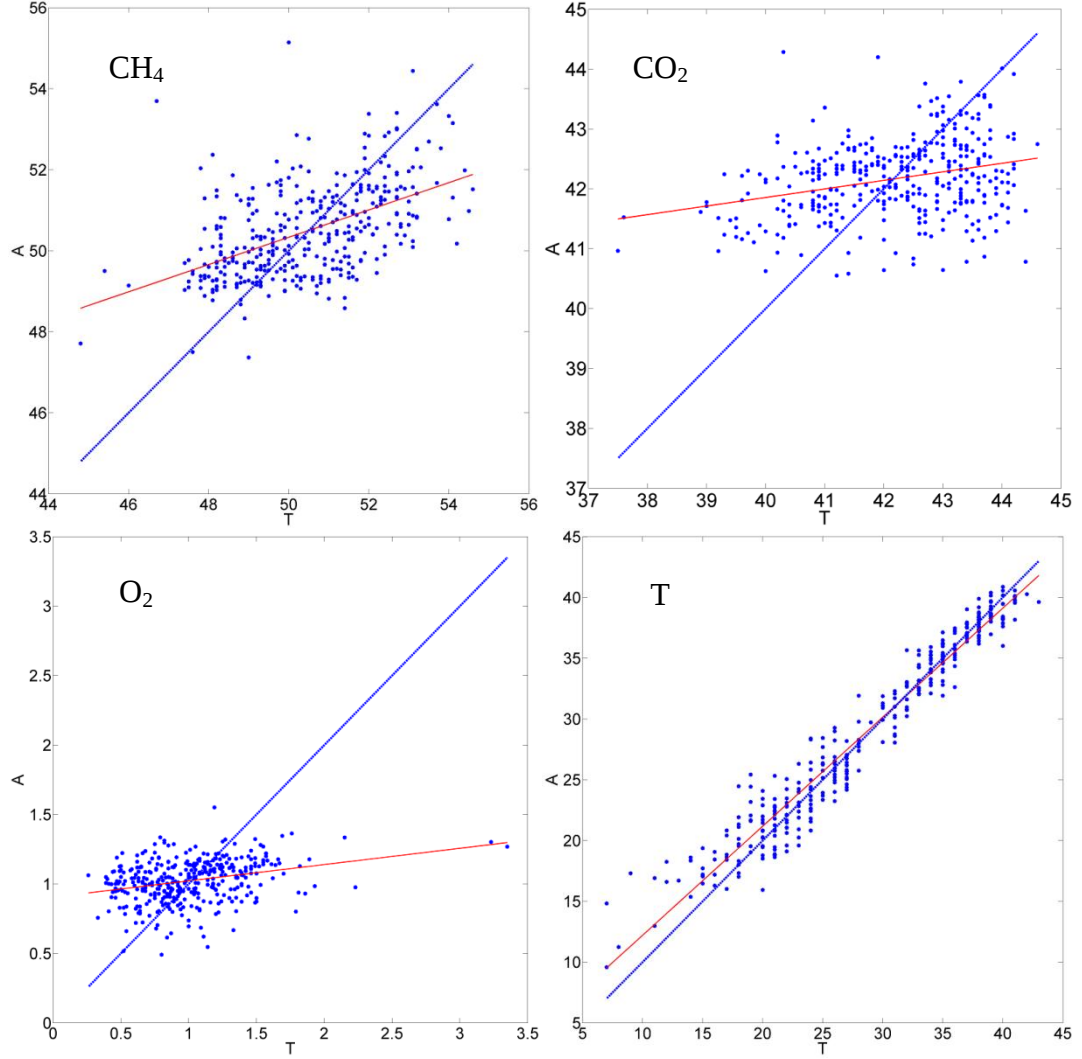
Şekil 5.3 Veri grubu olarak “T+H” kullanılarak uygulanan, sırasıyla CH₄, CO₂, O₂ ve depo gazı sıcaklığı tahmin sonuçları

Çizelge 5.8 En iyi senaryoda her bir parametrenin etki faktörü

Değişken	Etki Faktörü (%)
En Yüksek Sıcaklık	32
En Düşük Sıcaklık	30
Ortalama Sıcaklık	31
5 cm Toprak Sıcaklığı	28
10 cm Toprak Sıcaklığı	28
20 cm Toprak Sıcaklığı	29
50 cm Toprak Sıcaklığı	31
100 cm Toprak Sıcaklığı	34

En iyi tahmin sonucuna veri grubu olarak toprak ve hava sıcaklıklarının birlikte

kullanıldığı yukarıdaki grafikte ulaşılmıştır. Bu tahminde her bir değişkenin tahmine etki faktörü “SPSS 16.0” programının faktör analizi uygulamasıyla hesaplanmıştır. Çizelge 5.8’e göre en fazla etki eden parametre 100 cm derinlikteki toprak sıcaklığıdır. Bunun nedeni; depo alanında derinlere indikçe anaerobik faaliyetlerin artması ve dolayısıyla metan üretim hızının artmasıdır.

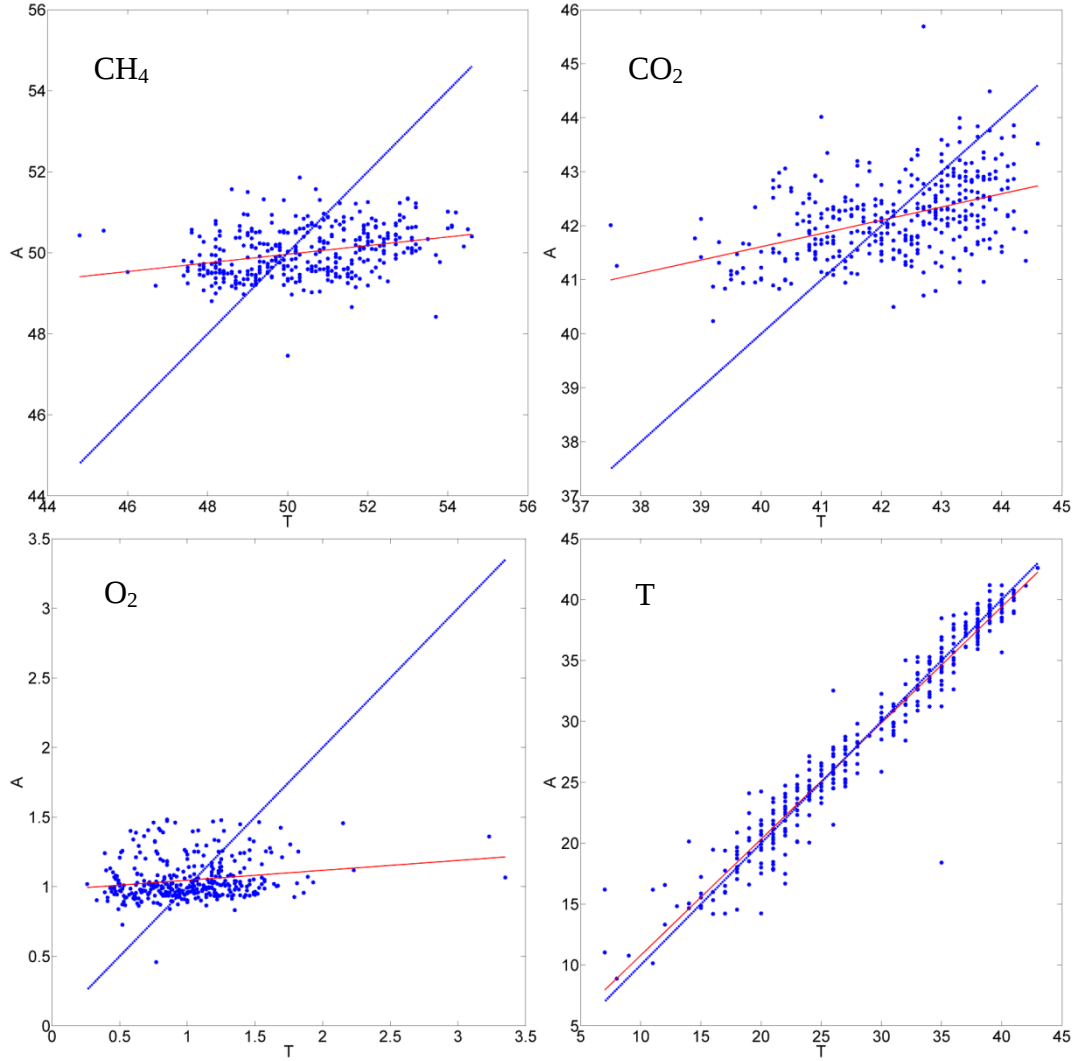


Şekil 5.4 Veri grubu olarak “V-(T+H)” kullanılarak uygulanan, sırasıyla CH₄, CO₂, O₂ ve depo gazı sıcaklığı tahmin sonuçları.

Şekil 5.4’te verilen grafikte tüm toprak ve hava sıcaklık verileri çıkarılıp kalan veriler kullanılmış olup her bir grafik için korelasyon katsayıları (R), sırasıyla: 0,51; 0,29; 0,30; 0,97; Doğru denklemleri: CH₄: $A=0,337T+33,5$; CO₂: $A=0,143T+36,1$ O₂: $A=0,117T+0,905$; Depo gazı T: $A=0,897T+3,24$ olarak bulunmuştur.

Bir önceki şekilde görülen (Şekil 5.3) toprak ve hava sıcaklıklarının depo gazı tahmininde etkili olarak kullanılabileceği sonucuna bakarak yapılan bir başka deneme

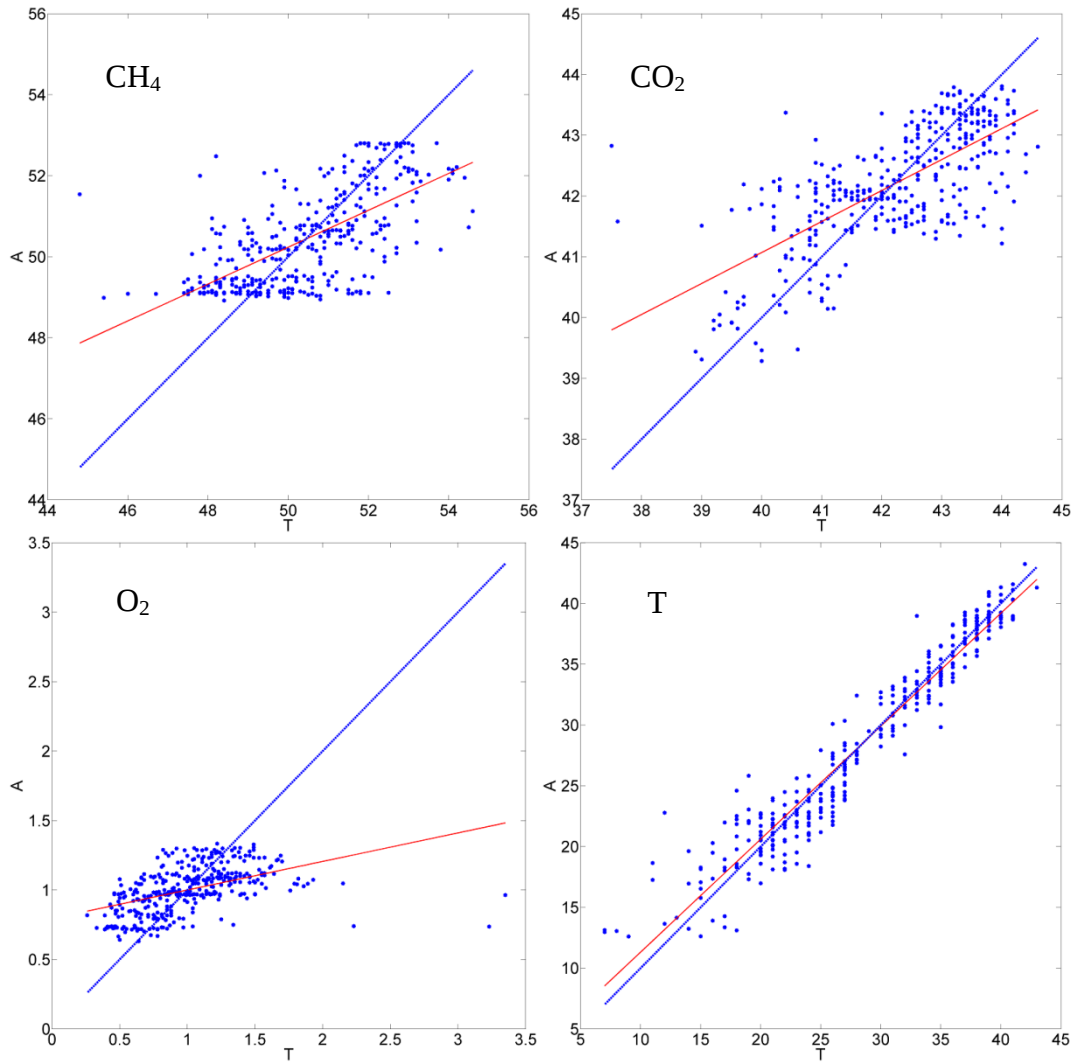
ile bu verilerin çıkarıldığında tahminin ne derece etkili olabileceğine bakılmıştır. Buna göre, Şekil 5.4'te de görüldüğü gibi bir önceki şekille tutarlı olan bu şekil ortaya çıkmıştır. Burada, tüm derinliklerdeki toprak sıcaklığı verileri ile en düşük, en yüksek ve ortalama hava sıcaklık verileri YSA girdilerinden çıkarılmış ve en düşük korelasyon katsayıları elde edilmiştir. Bu grafiklerden CO₂ için olan grafik en düşük korelasyon katsayısına sahiptir. Bunun nedeni olarak toprağın CO₂'yi hapsetme özelliği bulunması gösterilebilir.



Şekil 5.5 Veri grubu olarak “V-T” kullanılarak uygulanan, sırasıyla CH₄, CO₂, O₂ ve depo gazı sıcaklığı tahmin sonuçları

Şekil 5.5'te verilen grafikte toprak sıcaklığı verileri çıkarılıp kalan veriler kullanılmış olup her bir grafik için korelasyon katsayıları (R), sırasıyla: 0,31; 0,45; 0,19; 0,97; Doğru denklemleri: CH₄: $A=0,107T+44,6$; CO₂: $A=0,245T+31,8$ O₂: $0,071T+0,975$; Depo gazı T: $A=0,953T+1,26$ olarak bulunmuştur.

Şekil 5.5’te sadece toprak sıcaklık verilerinin çıkarılmasıyla oluşan verilerin depo gazı modellemesinde kullanılmasıyla ortaya çıkan grafikler görülmektedir. Toprak sıcaklığının depo gazı oluşumunda oynadığı görebilmek açısından bu bölümdeki son 4 şeklin doğru okunabilmesi çok önemlidir. Yine bu şekilde tüm derinliklerdeki toprak sıcaklığı verileri çıkarıldığında metan ve oksijenin çok düşük oranlarda korelasyon katsayılarına sahip olduğu görülmektedir. Karbondioksit gazı sonuçlarının ise yine, toprak sıcaklığıyla olan ilişkisi göz önünde bulundurulduğunda, en iyi korelasyon değerini verdiği görülebilir. Oksijenin modellendiği grafiğe bakıldığında ise en düşük korelasyona sahip olduğu görülmektedir. Buradan, toprak sıcaklığının O_2 oluşumunda etkili rol oynadığı sonucuna ulaşılabilir.

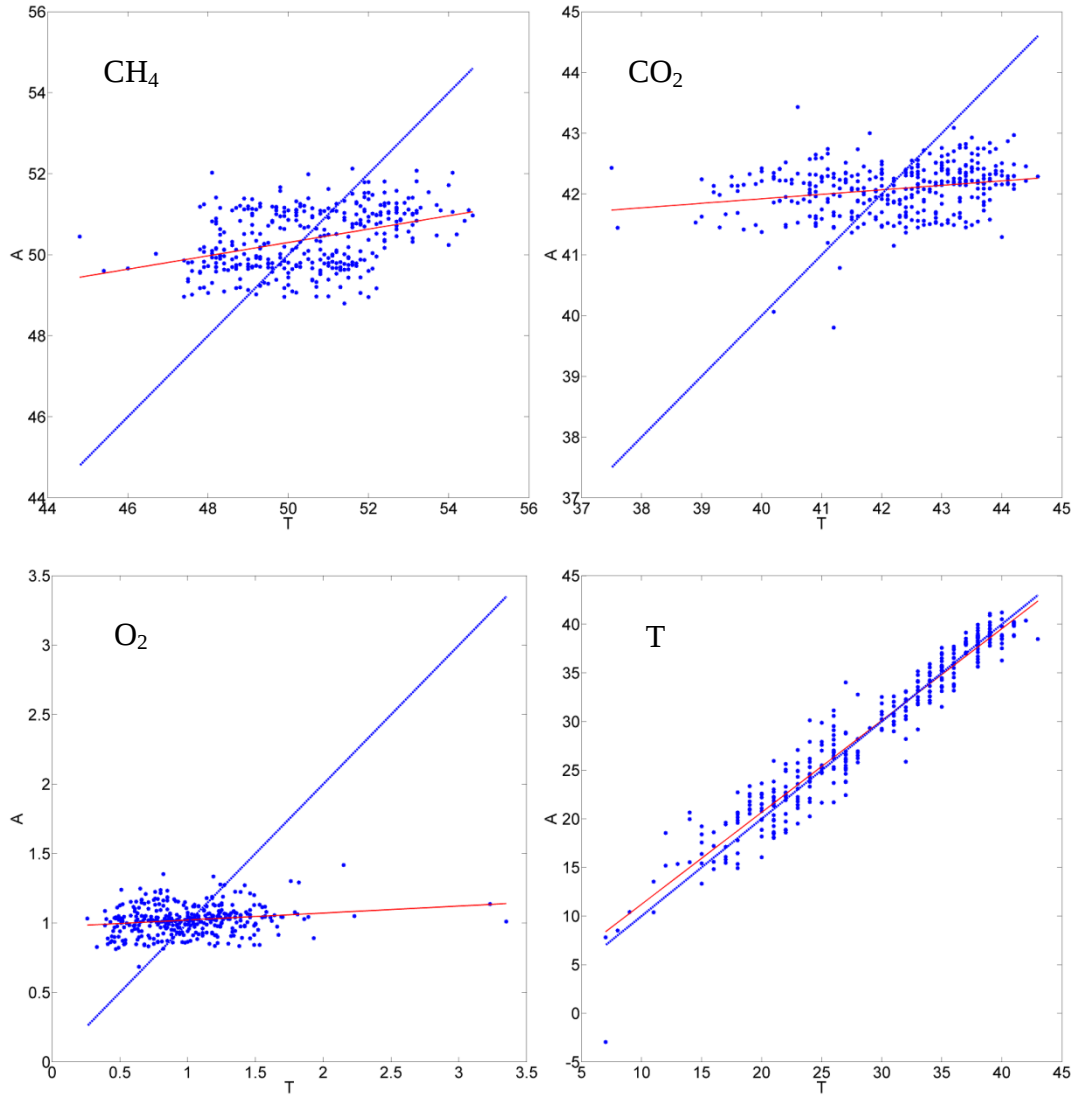


Şekil 5.6 Veri grubu olarak “T” kullanılarak uygulanan, sırasıyla CH₄, CO₂, O₂ ve depo gazı sıcaklığı tahmin sonuçları

Şekil 5.6’da verilen grafikte toprak sıcaklığı verileri kullanılmış olup her bir grafik için

korelasyon katsayıları (R), sırasıyla: 0,66; 0,70; 0,49; 0,97; Doğru denklemleri: CH_4 : $A=0,455T+27,5$; CO_2 : $A=0,51T+20,7$ O_2 : $0,21T+0,795$; Depo gazı T : $A=0,929T+2,03$ olarak bulunmuştur.

Şekil 5.6’da sadece toprak sıcaklık verileri ile yapılan YSA modeli tahmin sonuçları görülmektedir. Şekil 5.6’dan önceki model sonuçlarını doğrular nitelikte, toprak sıcaklıkları tek başına bile oldukça yüksek oranlarda korelasyon katsayılarıyla model sonucunu vermektedir. Bu denemede O_2 sonuçları diğer denemelere kıyasla yüksek korelasyona (R değeri) sahiptir.



Şekil 5.7 Veri grubu olarak “H” kullanılarak uygulanan, sırasıyla CH_4 , CO_2 , O_2 ve depo gazı sıcaklığı tahmin sonuçları

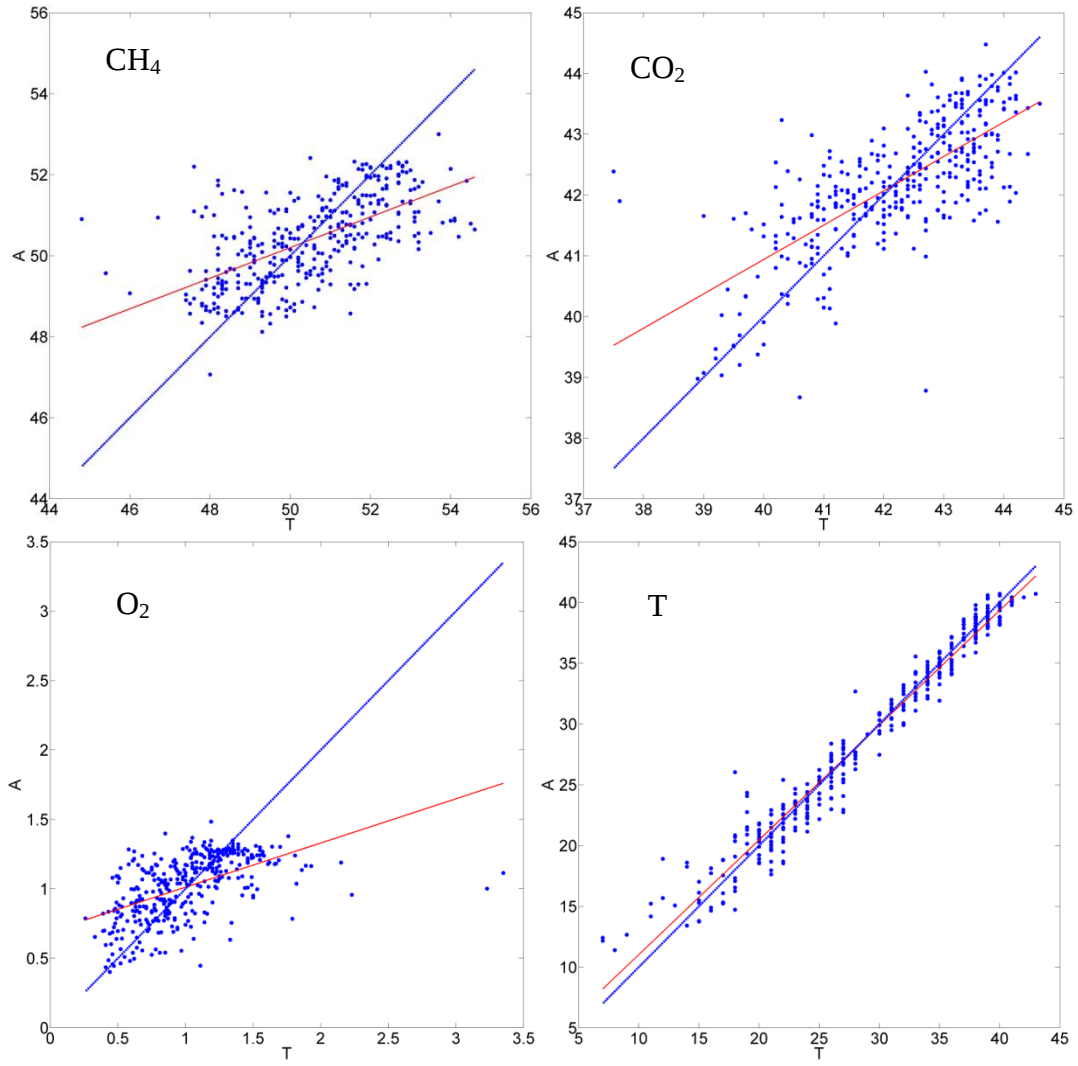
Şekil 5.7’de verilen grafikte hava sıcaklığı verileri kullanılmış olup her bir grafik için korelasyon katsayıları (R), sırasıyla: 0,39; 0,24; 0,19; 0,97; Doğru denklemleri: CH_4 :

$A=0,165T+42,1$; CO_2 : $A=0,074T+39$ O_2 : $0,050T+0,971$; *Depo gazı T*: $A=0,945T+1,77$ olarak bulunmuştur.

Şekil 5.3'te elde edilen, toprak ve hava sıcaklık verilerinin birlikte kullanılarak modellendiği, grafiklerde en yüksek oranlarda korelasyon katsayıları elde edilmişti. Şekil 5.5'te ise giriş verilerinden toprak sıcaklığı çıkarıldığında yapılan denemede korelasyon katsayılarının düştüğü görülmüştü. Bu durumda, hava sıcaklıklarının tek başına model çıktılarına ne oranda etkilediğine bakılması gerekmektedir. Buna istinaden, Şekil 5.7'de sadece hava sıcaklık verilerinin kullanıldığı model sonuçlarına göre, metan, karbondioksit ve oksijen için oldukça düşük oranlarda korelasyon katsayıları elde edilmiştir. Bu durum, depo gazının tahmin edilmesinde etkili olduğu düşünülen (toprak ve hava sıcaklığı verilerinin birlikte kullanılarak) durumun aslında toprak sıcaklığının etkisiyle ortaya çıktığı anlaşılmaktadır. Yani, toprak sıcaklığının depo gazının tahmin edilmesinde en etkili değişken olduğu sonucuna bu grafikten sonra ulaşılabilir.

Şekil 5.8'de verilen grafikte toprak ve hava sıcaklığı verileri ile birlikte yağış verileri de kullanılmış olup her bir grafik için korelasyon katsayıları (R), sırasıyla: 0,61; 0,72; 0,54; 0,98; Doğru denklemleri: CH_4 : $A=0,378T+31,3$; CO_2 : $A=0,565T+18,3$ O_2 : $0,318T+0,694$; *Depo gazı T*: $A=0,944T+1,59$ olarak bulunmuştur.

En yüksek korelasyon oranına sahip deneme olan toprak ve hava sıcaklıklarının beraber kullanıldığı modele sızıntı suyunun nem içeriğini ve dolayısıyla depo gazı oluşumunu etkileyen en önemli parametrelerden olan nem içeriğini temsil eden yağış verileri de bu duruma eklenerek korelasyon katsayısı değişim oranına bakılmıştır. Yağış verilerinin eklenmesi metan tahmin oranını düşürmüştü, CO_2 tahmininde önemli bir değişikliğe sebep olmamıştır. Bunun sebebi olarak bir yıllık verilerdeki yağışlı gün sayısının modelin öğrenmesine yetecek kadar olmaması olarak gösterilebilir. Ayrıca, Odayeri düzenli depolama alanında nem muhtevasının optimum nem içeriğinin üzerinde olması, yağışlı günlerde gaz üretimini olumsuz etkileyebildiği söylenebilir.



Şekil 5.8 Veri grubu olarak Yağış verileri ile “T+H” kullanılarak uygulanan, sırasıyla CH_4 , CO_2 , O_2 ve Depo gazı sıcaklığı tahmin sonuçları

Çizelge 5.9 Farklı giriş değişkenlerinde her bir çıkış değişkeni için R değerleri

Giriş değişkenleri	CH_4 (%)	CO_2 (%)	O_2 (%)	Soğutucu Öncesi T ($^{\circ}\text{C}$)
V	0,64	0,68	0,57	0,98
T+H	0,71	0,73	0,51	0,98
Yağış, T+H	0,61	0,72	0,54	0,98
T	0,66	0,70	0,49	0,97
H	0,39	0,24	0,19	0,97
V-(T+H)	0,51	0,29	0,30	0,97
V-T	0,31	0,45	0,19	0,97

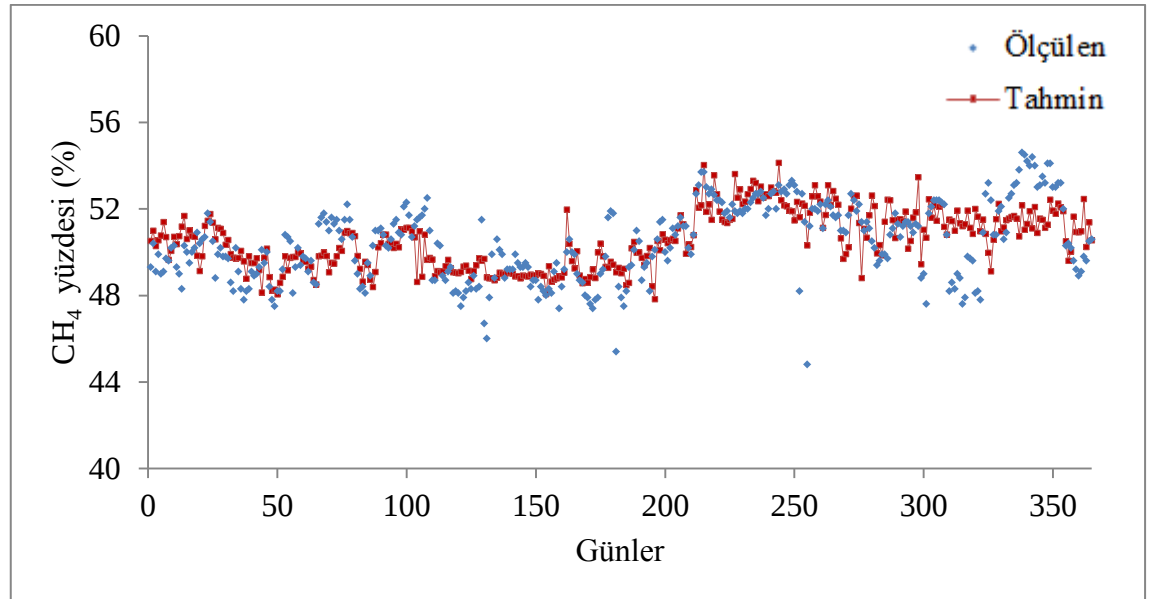
5. Bölümdeki tüm grafiklerde elde edilen korelasyon katsayıları Çizelge 5.9’da

verilmiştir. % 50'nin üzerinde korelasyon oranına sahip değerler koyu olarak gösterilmiştir. Bu çizelgeden de anlaşılacağı gibi, toprak sıcaklığının girdi olarak kullanıldığı tüm modellerde % 68'in üzerinde metan ve karbondioksit tahmini yapılmıştır. Toprak sıcaklığının çıkarıldığı veri gruplarında ise tahmin yüzdesi % 24'ten % 51'e değişen oranlarda elde edilmiştir.

5.3 Tahmin Sonuçlarının Değerlendirilmesi

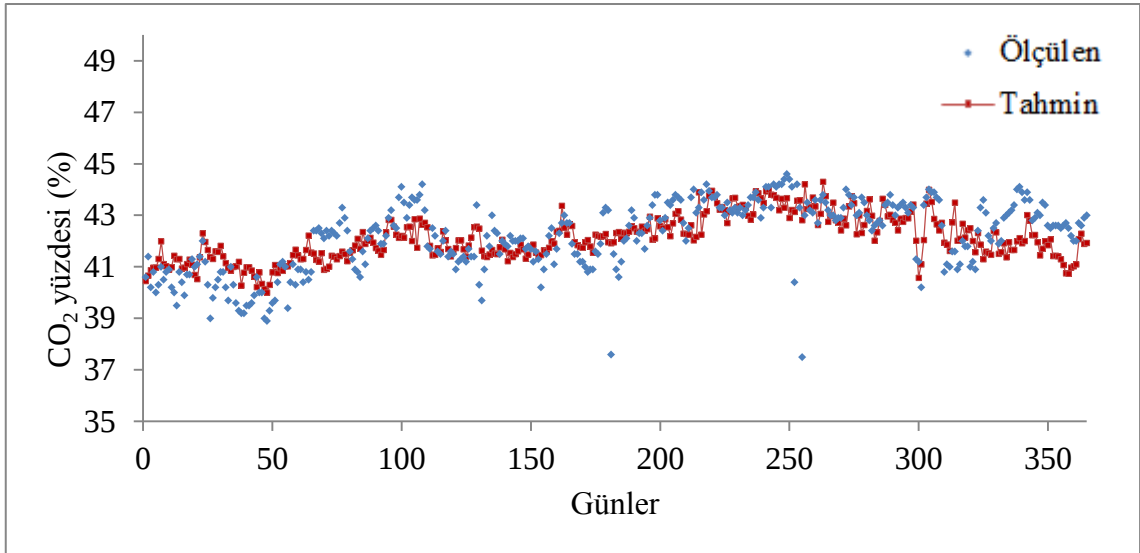
YSA modeli ile tahmin edilen depo gazı verileri ile düzenli depolama alanında ölçülen gerçek sonuçların birbiriyle örtüşüp örtüşmediğini anlamak için bu iki veri grubu “MS Excel 2010” programı kullanarak görsel olarak karşılaştırılmıştır.

Modellemesi yapılan tüm durumlar için, tahmin edilen 1 yıllık depo gazı verileri ile gerçek depo gazı verilerinin karşılaştırması aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir. “Sigmaplot for Windows Version 11.0” programı kullanılarak “Mann-Whitney” testi uygulanmış olup veriler arasında önemli bir fark olup olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

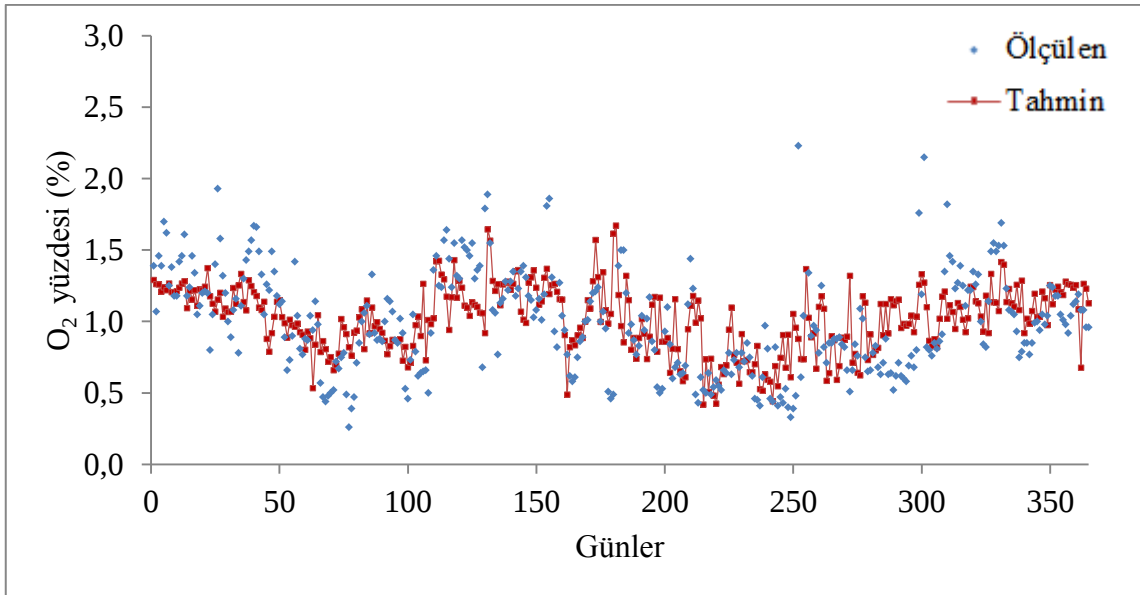


Şekil 5.9 Girdi verisi olarak “ V” ile tahmin edilen ve ölçülen CH₄ yüzdeleri

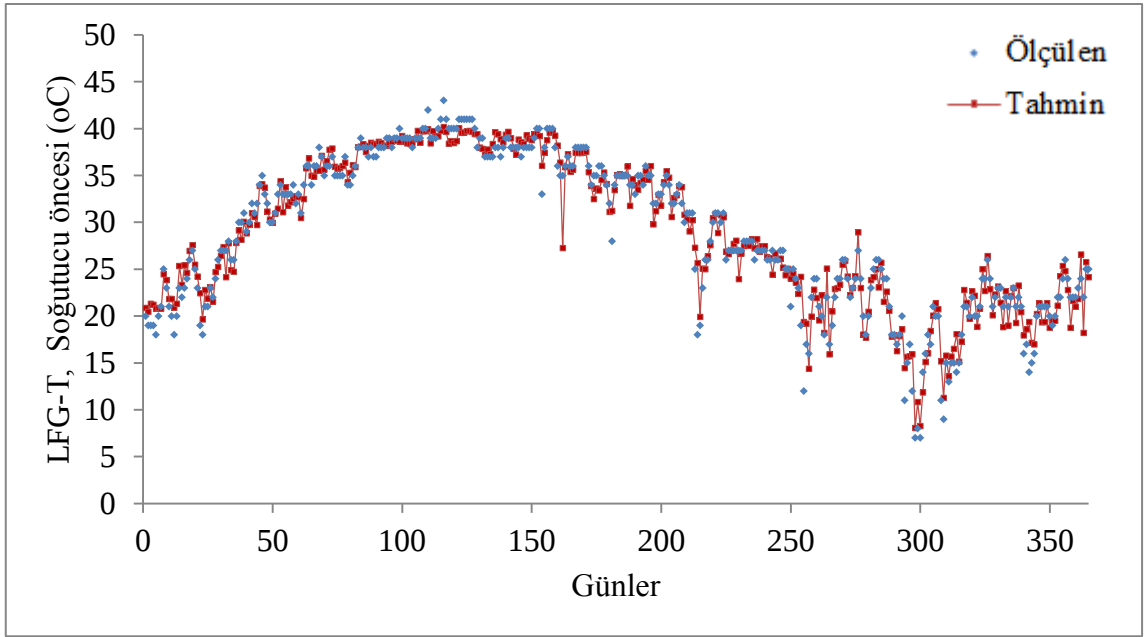
Şekil 5.9’da görülen grafik verileri kullanılarak yapılan istatistiksel analize göre, Mann-Whitney testi sonucu $p = 0,382$ çıkmış olup veriler arasında önemli bir fark olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.



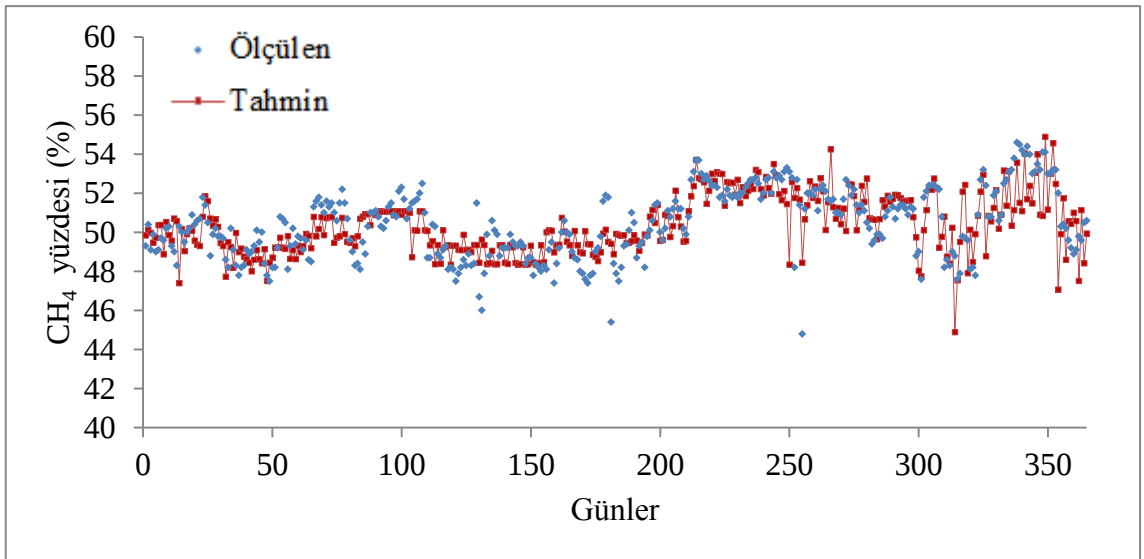
Şekil 5.10 Girdi verisi olarak “V” ile tahmin edilen ve ölçülen CO₂ yüzdeleri



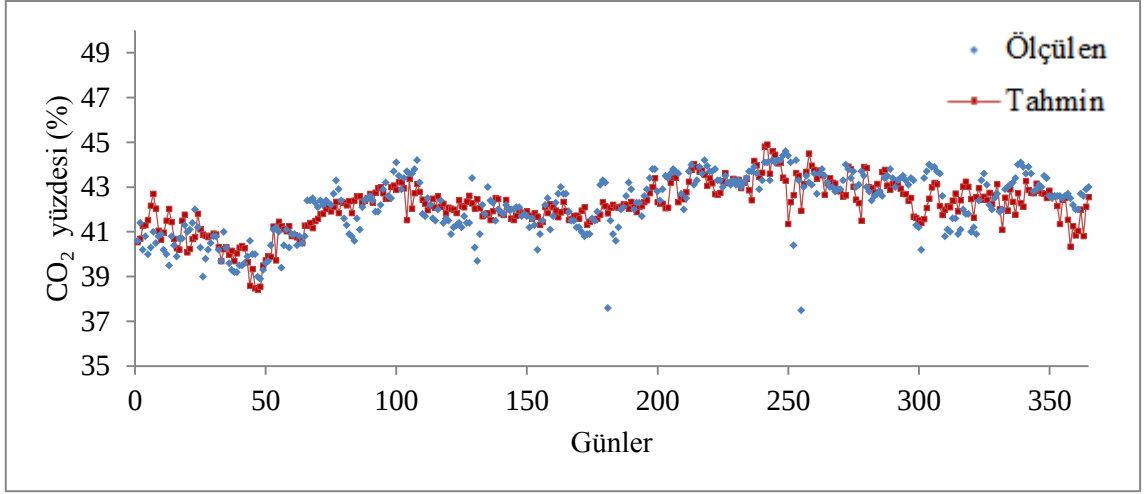
Şekil 5.11 Girdi verisi olarak “V” ile tahmin edilen ve ölçülen O₂ yüzdeleri



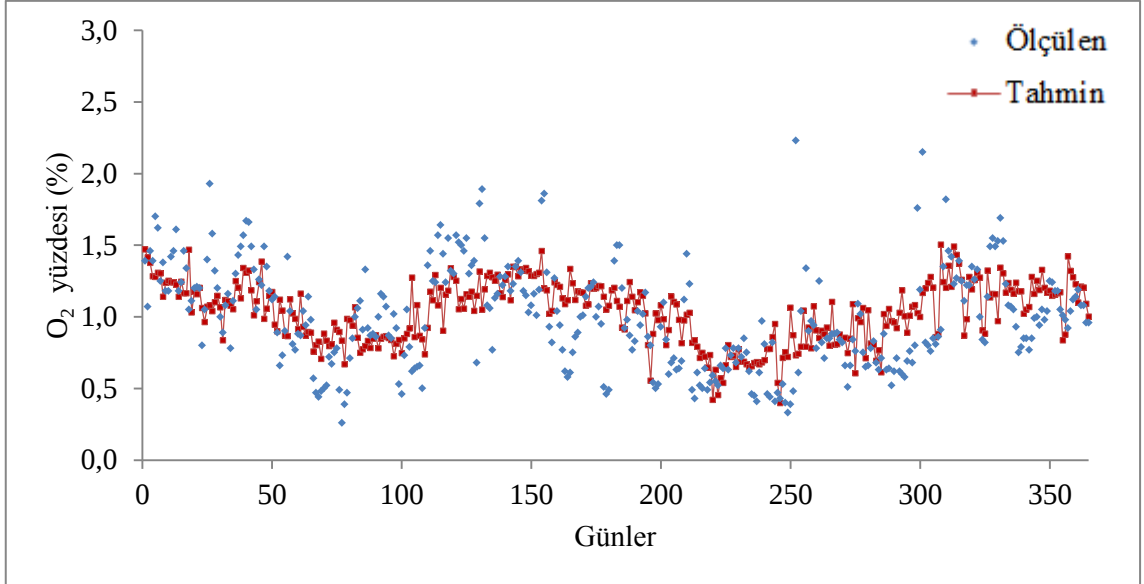
Şekil 5.12 Girdi verisi olarak “V” ile tahmin edilen ve ölçülen soğutucu öncesi depo gazı sıcaklık değerleri



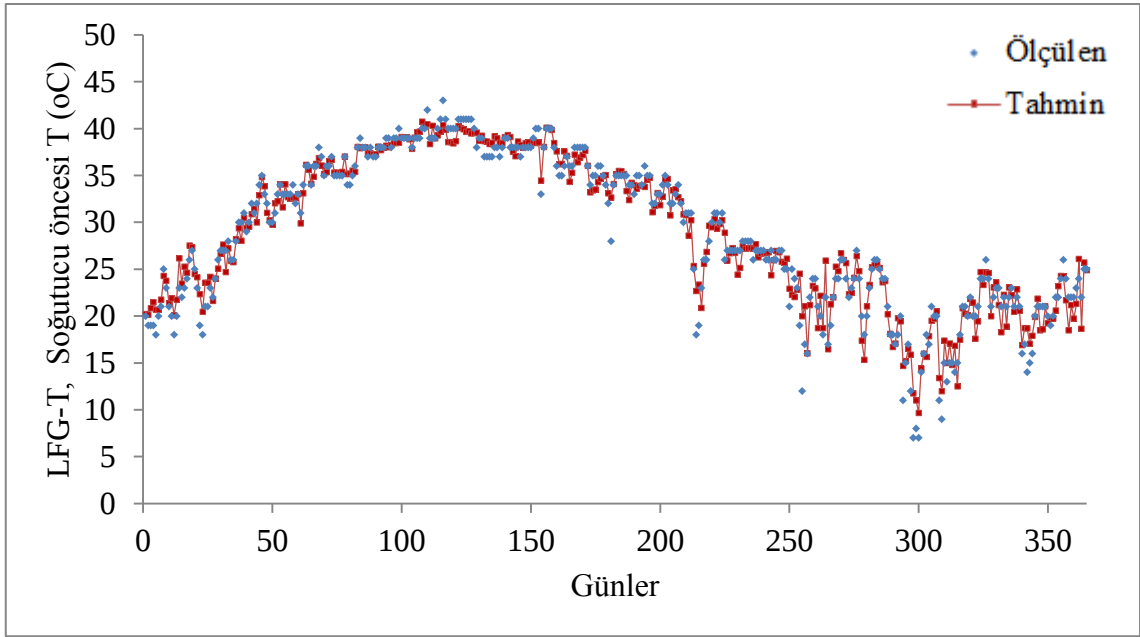
Şekil 5.13 Girdi verisi olarak “T+H” ile tahmin edilen ve ölçülen CH₄ yüzdeleri



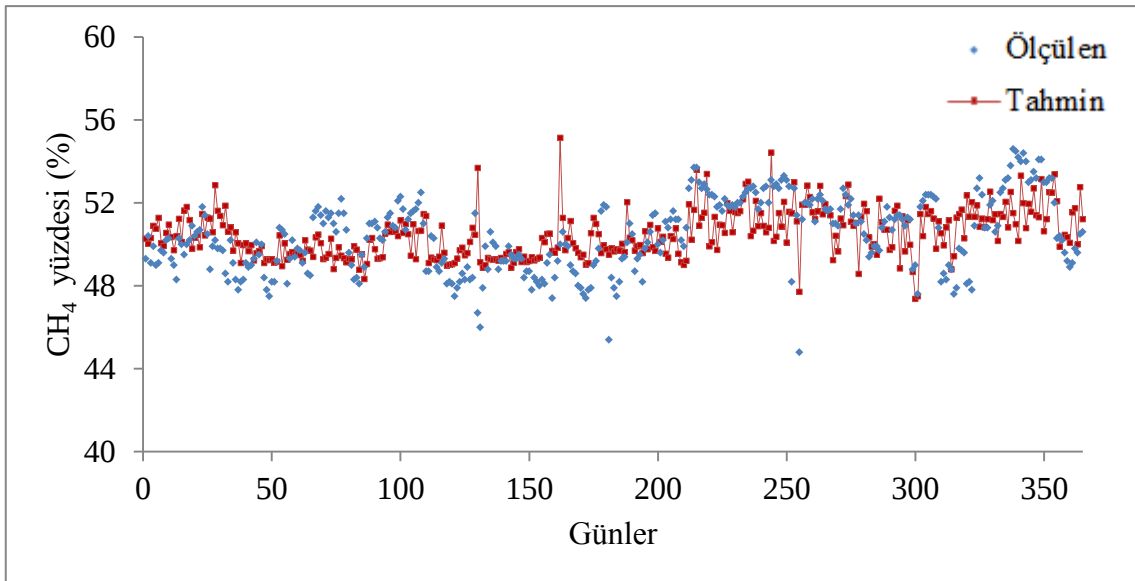
Şekil 5.14 Girdi verisi olarak “T+H” ile tahmin edilen ve ölçülen CO₂ yüzdeleri



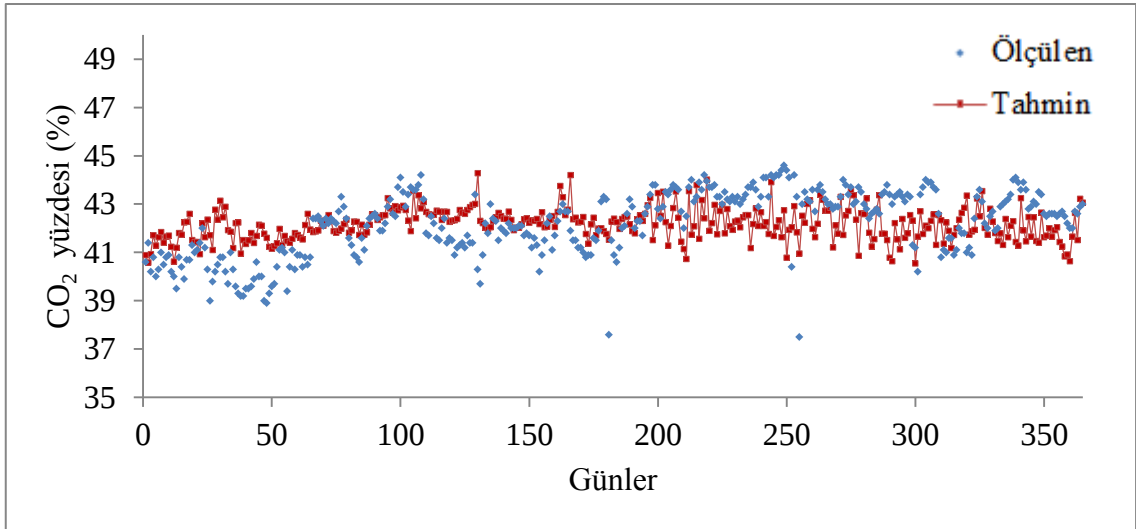
Şekil 5.15 Girdi verisi olarak “T+H” ile tahmin edilen ve ölçülen O₂ yüzdeleri



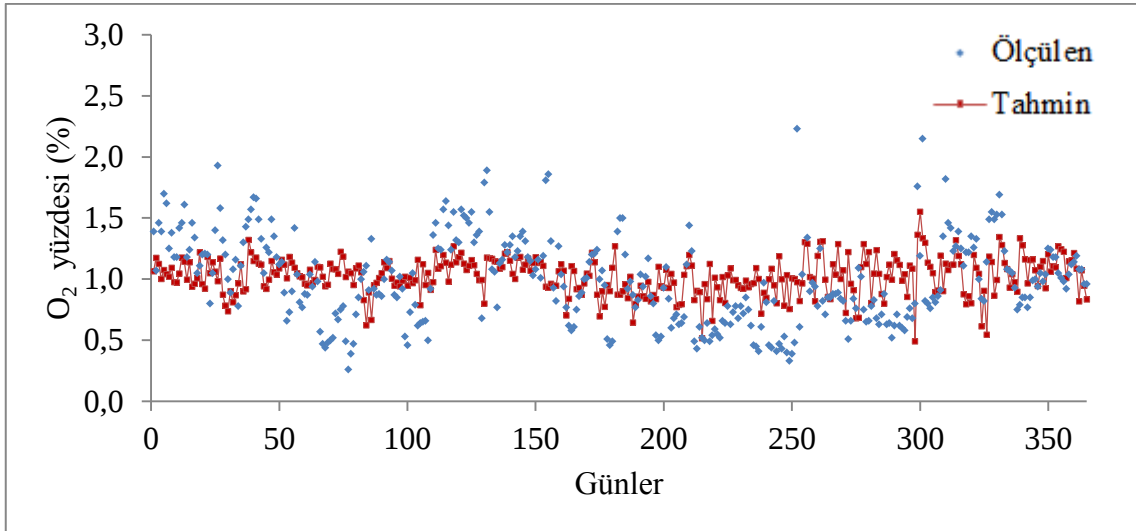
Şekil 5.16 Girdi verisi olarak “T+H” ile tahmin edilen ve ölçülen soğutucu öncesi depo gazı sıcaklık değerleri



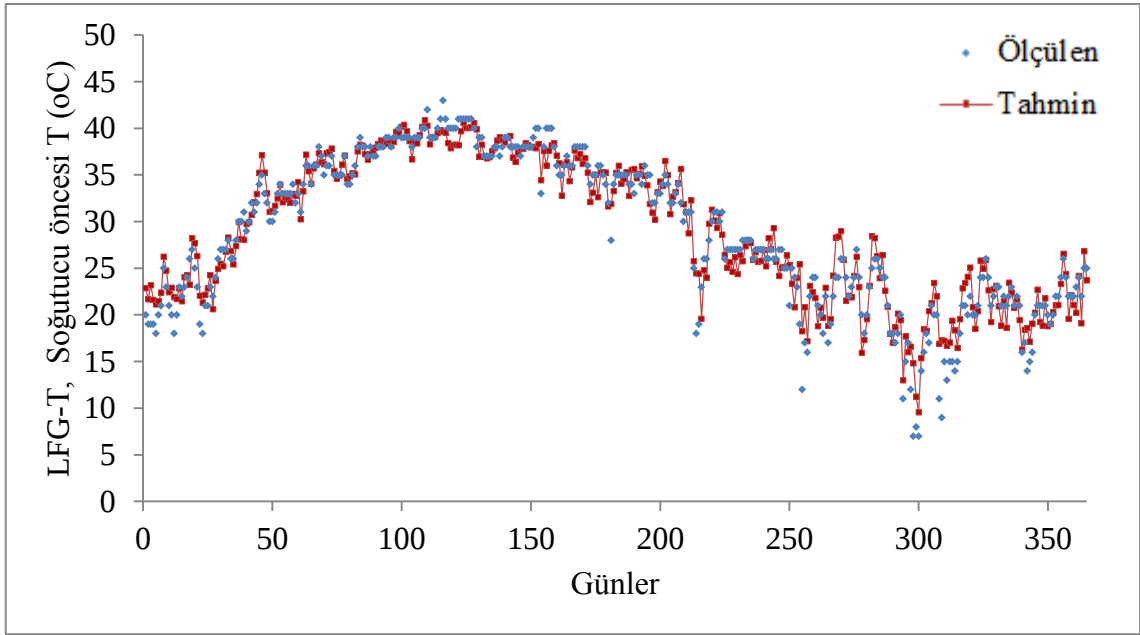
Şekil 5.17 Girdi verisi olarak “V-(T+H)” ile tahmin edilen ve ölçülen CH₄ yüzdeleri



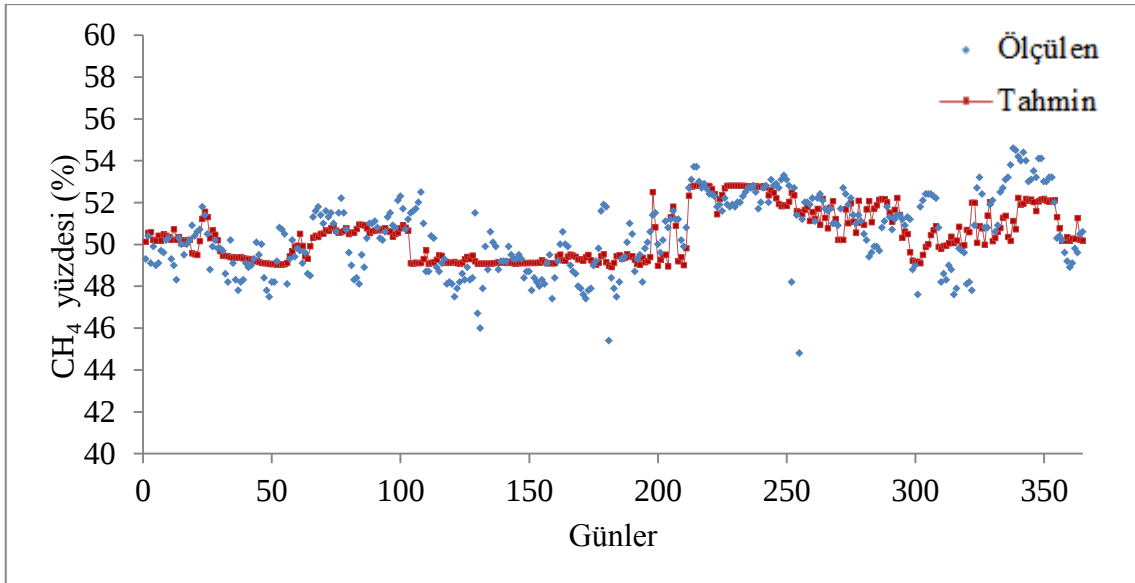
Şekil 5.18 Girdi verisi olarak “V-(T+H)” ile tahmin edilen ve ölçülen CO₂ yüzdeleri



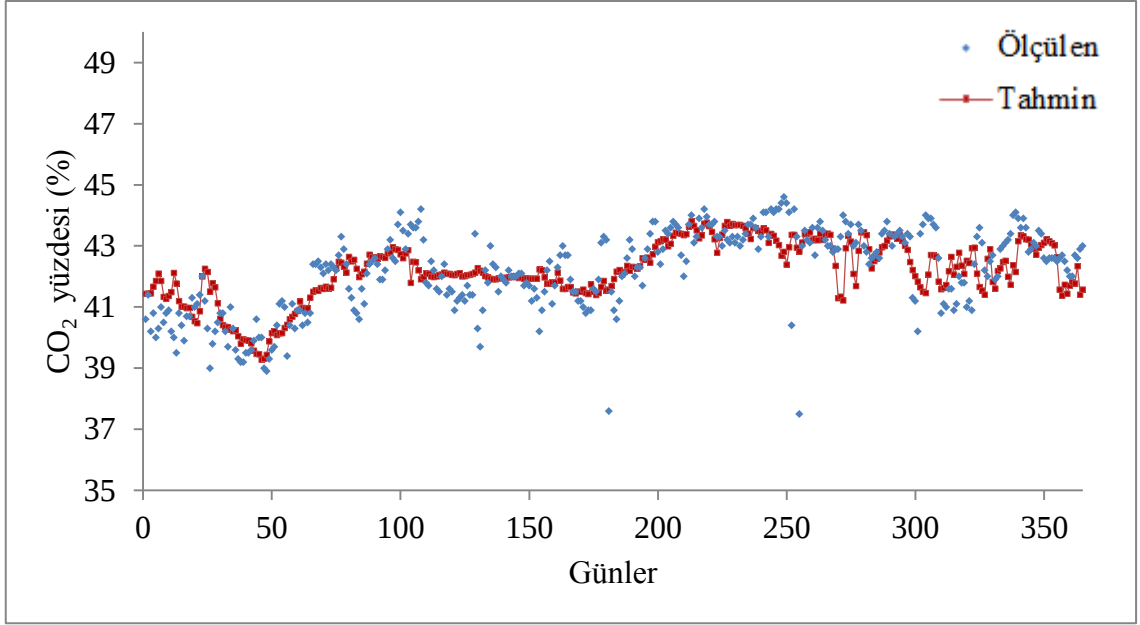
Şekil 5.19 Girdi verisi olarak “V-(T+H)” ile tahmin edilen ve ölçülen O₂ yüzdeleri



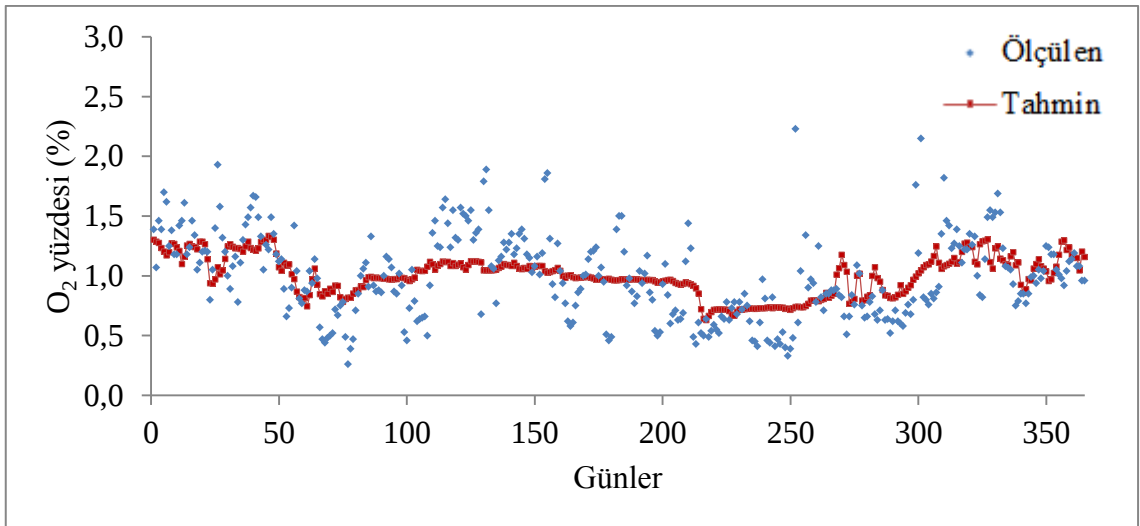
Şekil 5.20 Girdi verisi olarak “V-(T+H)” ile tahmin edilen ve ölçülen soğutucu öncesi depo gazı sıcaklık değerleri



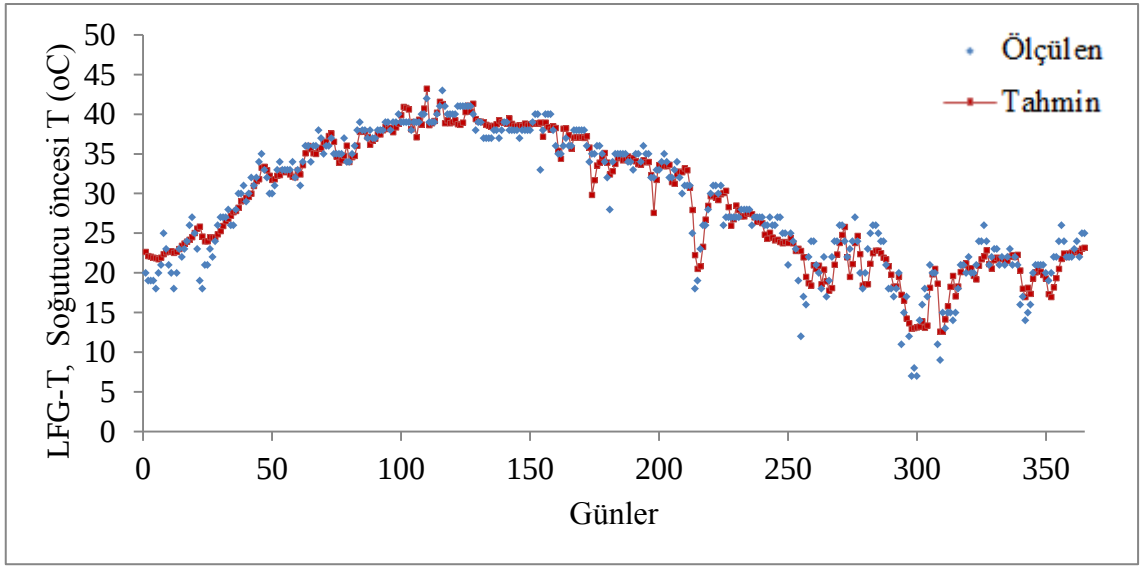
Şekil 5.21 Girdi verisi olarak “T” ile tahmin edilen ve ölçülen CH₄ gazı yüzdeleri



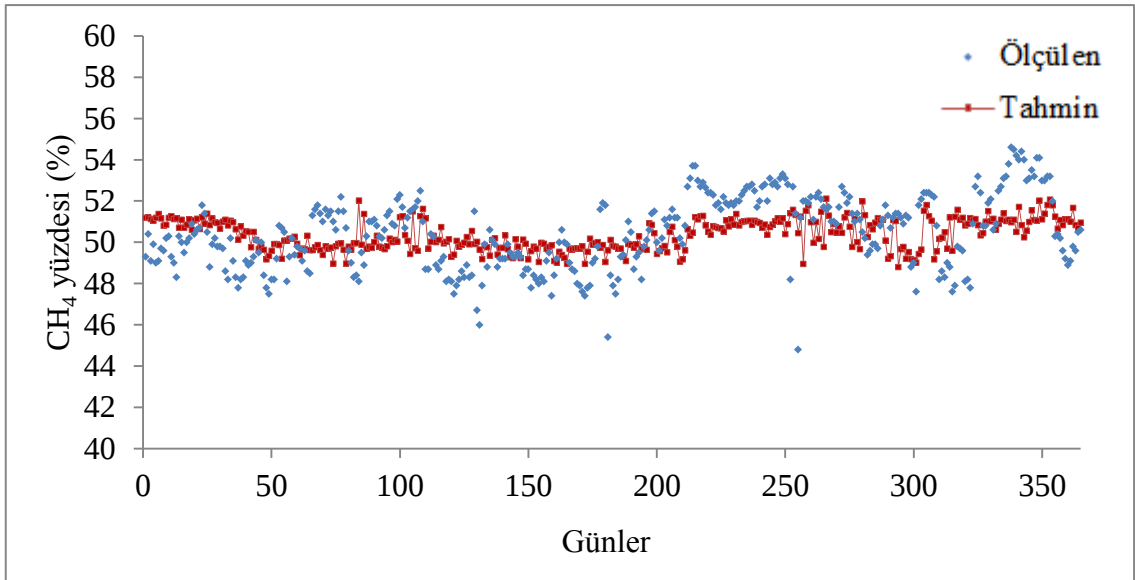
Şekil 5.22 Girdi verisi olarak “T” ile tahmin edilen ve ölçülen CO₂ gazı yüzdeleri



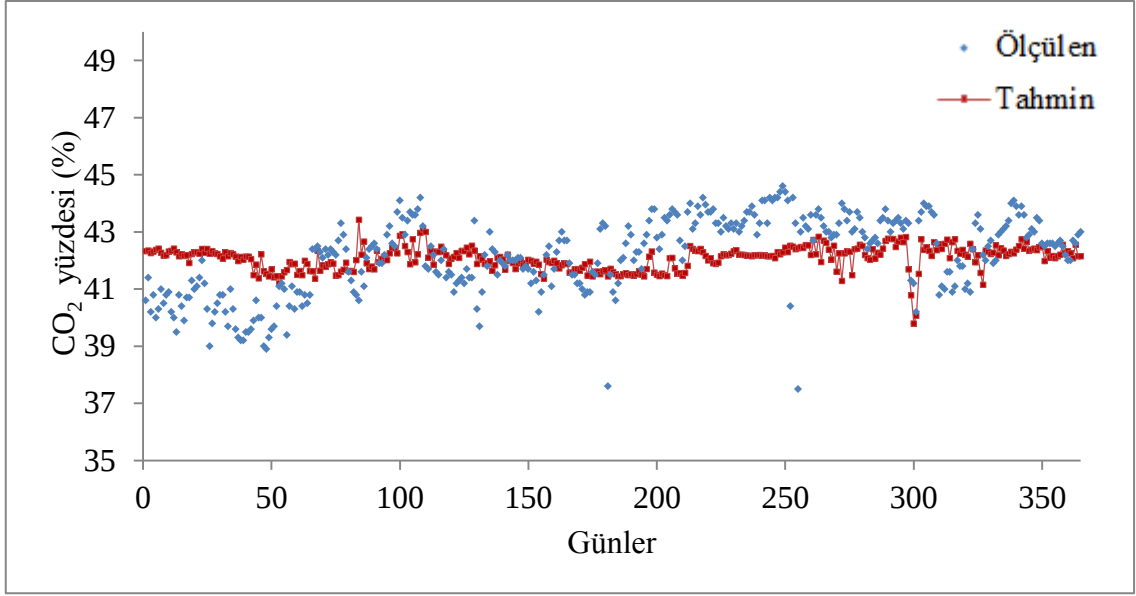
Şekil 5.23 Girdi verisi olarak “T” ile tahmin edilen ve ölçülen O₂ gazı yüzdeleri



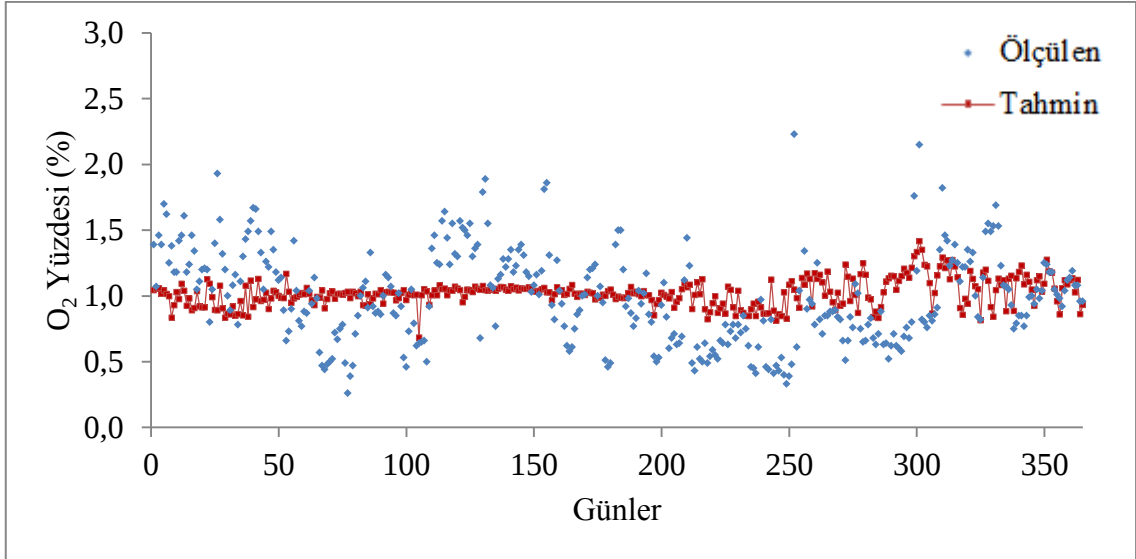
Şekil 5.24 Girdi verisi olarak “T” ile tahmin edilen ve ölçülen depo gazı sıcaklık değerleri



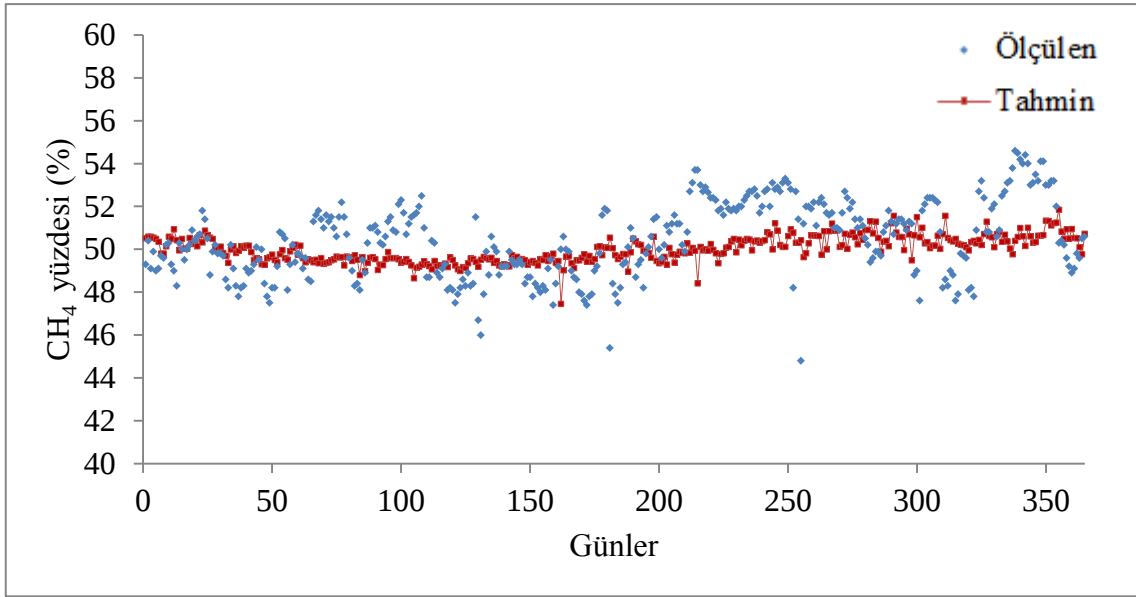
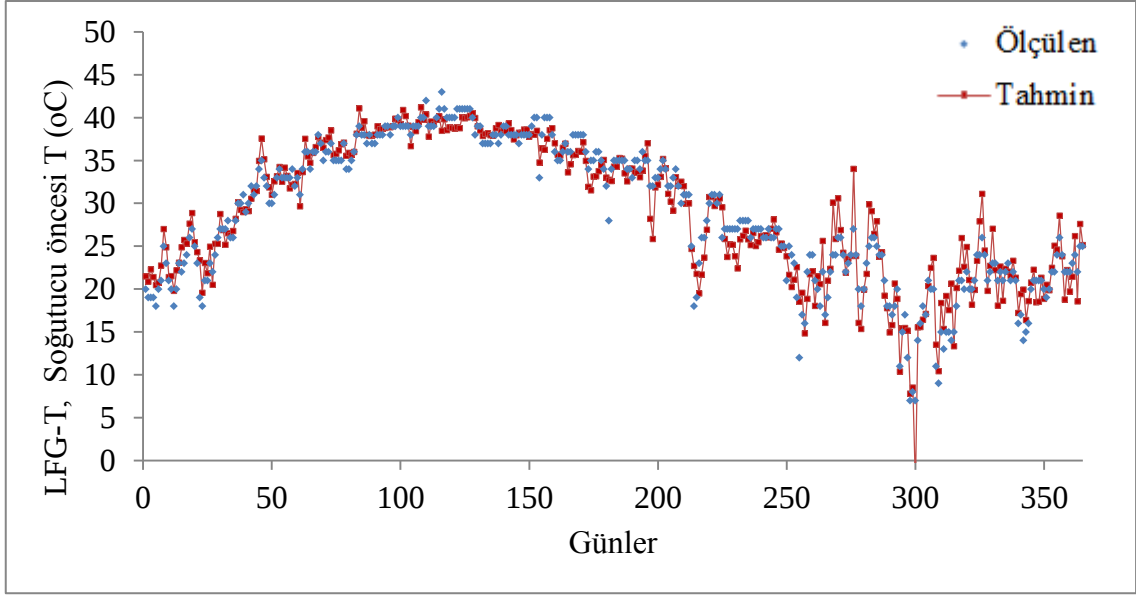
Şekil 5.25 Girdi verisi olarak “H” ile tahmin edilen ve ölçülen CH₄ gazı yüzdeleri

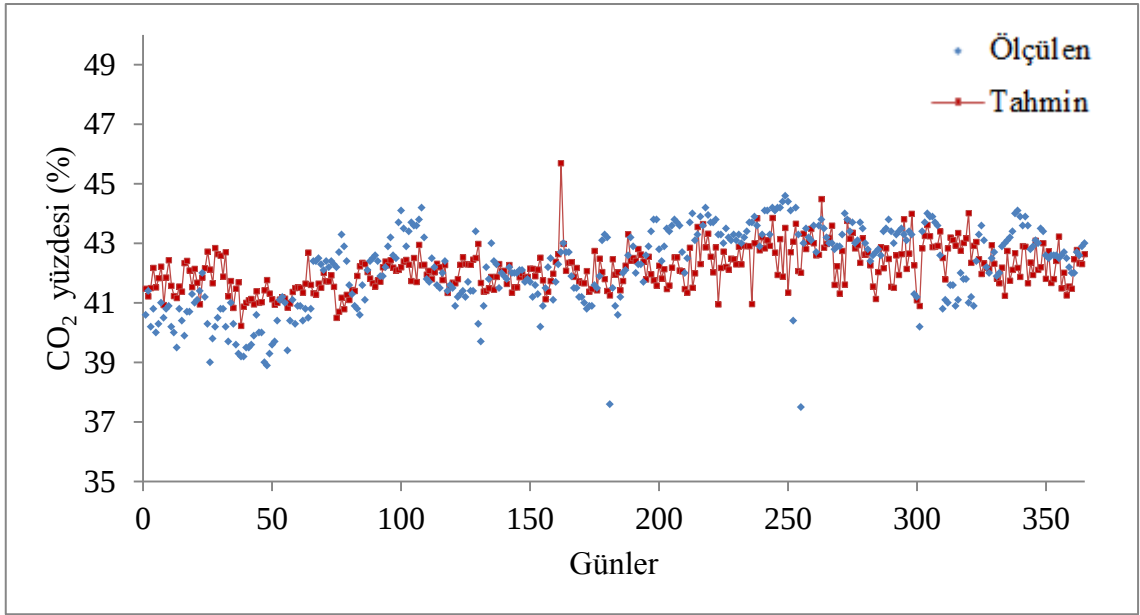


Şekil 5.26 Girdi verisi olarak “H” ile tahmin edilen ve ölçülen CO₂ gazı yüzdeleri

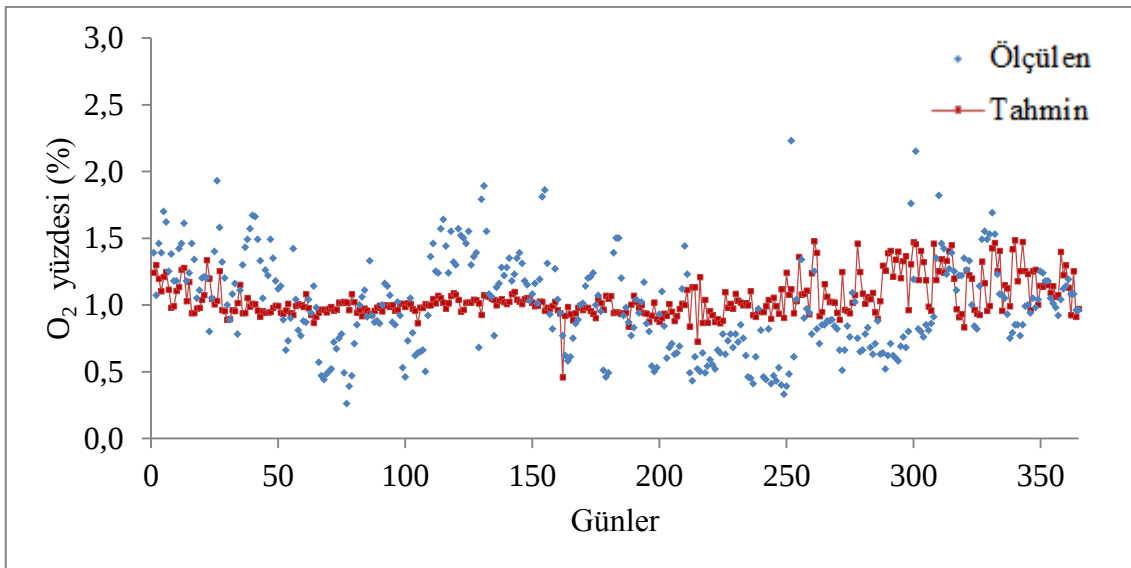


Şekil 5.27 Girdi verisi olarak “H” ile tahmin edilen ve ölçülen O₂ gazı yüzdeleri

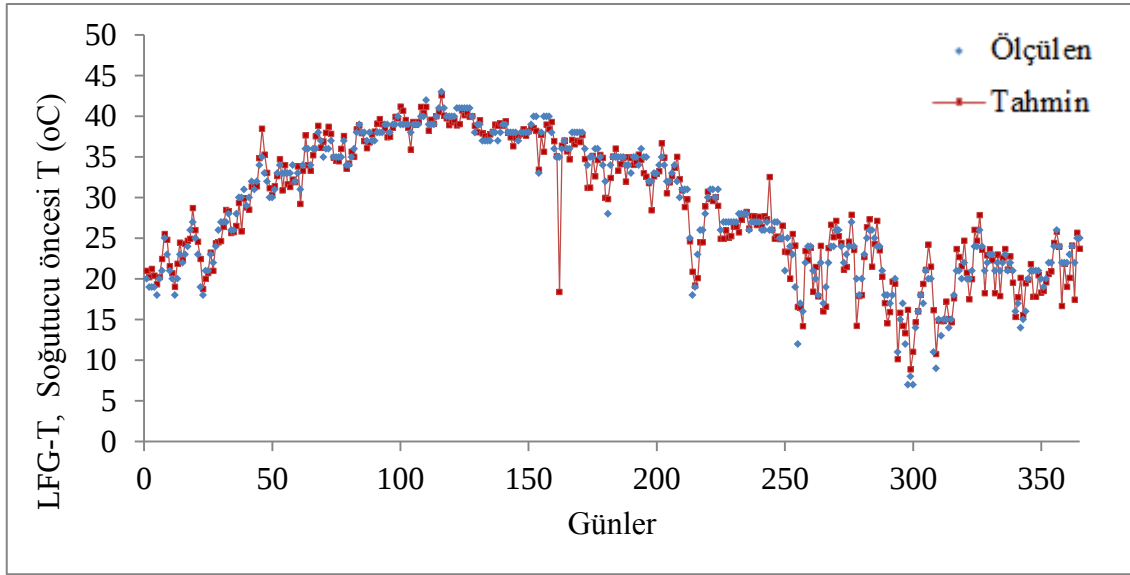




Şekil 5.30 Girdi verisi olarak “V-T” ile tahmin edilen ve ölçülen CO₂ yüzdeleri



Şekil 5.31 Girdi verisi olarak “V-T” ile tahmin edilen ve ölçülen O₂ yüzdeleri



Şekil 5.32 Girdi verisi olarak “V-T” ile tahmin edilen ve ölçülen soğutucu öncesi depo gazı sıcaklık değerleri

Verilerin parametrik olmayan Mann Whitney U sınaması [79] ile istatistiki karşılaştırılması sonucu elde edilen tüm p değerleri Çizelge 5.10’te verilmiştir. Burada da toprak sıcaklığı kullanılarak yapılan model sonuçlarının gerçek sonuçlara en yakın sonuçlar olduğu ortaya çıkmaktadır. En yüksek p değeri yine toprak sıcaklığı kullanarak yapılan modelleme ile elde edilmiştir. 0,997’lik p değeri gerçek sonuçla tahmin sonucu arasındaki fark yok denecek kadar az olduğu anlamına gelmektedir. Analiz sonuçlarına göre, veri grupları arasında anlamlı bir fark bulunmayan p değerleri koyu yazı tipi ile gösterilmiştir. Bu analizle, model tahmininin iyileştirilmesi ve doğrulanması sağlanmıştır.

Çizelge 5.10 Farklı giriş değişkenlerinde her bir çıkış değişkeni için p değerleri

Giriş değişkeni	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	Soğutucu Öncesi T (°C)
Tüm değişkenler	0,382	0,047	0,131	0,924
Toprak ve hava	0,676	0,325	0,025	0,902
Yağış, toprak ve hava	0,626	0,387	0,111	0,890
Sadece toprak	0,997	0,362	0,326	0,779
Toprak ve hava çıkarılmış	0,736	0,062	0,045	0,793
Sadece hava	0,664	0,002	0,049	0,786
Toprak çıkarılmış	0,001	0,046	0,003	0,860

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Türkiye’de ve dünyada her geçen gün daha büyük bir sorun haline gelen katı atık yönetimi konusunda yaygın olarak kullanılan yöntem düzenli depolamadır. Depolama alanlarının en faydalı yanlarından biri; atık içeriğindeki biyolojik bozunabilir çöplerin, anaerobik (oksijensiz) ortamda üretilen gazlardan, metan gazına dönüşmesi sonucu, farklı yöntemlerle, elektrik üretilmesi gibi alanlarda değerlendirilmesidir. Bu nedenle, depolama alanlarının yönetimi oldukça yüksek önem teşkil etmektedir. Depolama alanlarında katı atıkların bozunması sonucu oluşan ve depo gazı diye adlandırılan gazların da bertaraf edilmesi, enerji tesisleriyle elektriğe dönüştürülmesi ile sağlanmaktadır. Depo gazının oluşumunda ve elde edilen elektrik enerjisinin yönetiminde bu oluşumu etkileyen çeşitli faktörlerin bilinmesi de bu sürecin yönetiminde önemli bir yer tutar.

Depolama alanları, birçok değişkene bağlı olarak farklı oranlarda depo gazı salınması gibi davranışlar gösterebilmektedir. Bu değişkenlerden en önemlileri atık içeriği ve çevresel faktörlerdir (iklim gibi). Her depolama alanına giren atık içeriği farklılık gösterir. Bu yüzden sahaya özgü başka birtakım girdilerin bilinmesi sahanın verimli işletilebilmesi açısından çok önemlidir. Depo gazı oluşumuna etki eden dış faktörlerden meteorolojik faktörlerin bilinmesi ile ne oranda depo gazı oluşacağı tahmin edilebilir.

Bu çalışmada meteorolojik faktörlerin; hava sıcaklığı, toprak sıcaklığı ve yağış gibi, depo gazının oluşumunu ne derece etkilediği ve depo gazı oluşum miktarının tahmin edilebilmesinde ne derece önemli olduğu ortaya konmuştur. Bu yüzden, daha önce birçok çalışmada kullanılarak uygulanmış ve insan beyninin öğrenme fonksiyonlarıyla benzer bir algorithmada çalışan yapay sinir ağları (YSA) kullanılmıştır. Bu modelin kullanılmasından önce ise yine benzer bir algoritma ile kendini düzenleyen haritalar (SOM) oluşturan bir veri analiz yöntemi kullanılmıştır. Bu sayede verilerin birbiriyle

olan ilintileri de gözden geçirilmiş, model uygulaması öncesi bir ön çalışma yapılmıştır.

SOM (kendinden düzenlenen haritalar) modeli kullanılarak yapılan veri analiz yönteminde ise meteorolojik verilerle depo gazı verileri analiz edilmiş olup, veriler arasındaki ilişki ortaya konmuştur. Buna göre, sıcaklık verilerinin birbiriyle büyük oranda ilişkili olduğu görülmüştür. Ayrıca, depo gazı verilerinden metan ve karbondioksitin oksijenle zıt olarak veri grubu oluşturduğu belirlenmiştir. Veri gruplarının dikkatli incelenmesiyle depo gazı verilerinin belirli bölgelerinde meteorolojik verilerin de benzer renkler, öbekler gösterdiği görülebilmektedir.

YSA modeli kullanılarak yapılan bu çalışmada, meteorolojik verilerden toprak sıcaklığının depo gazı yüzdelerini tahmin etmede önemli bir rol oynadığı tespit edilmiştir. Elde edilen model sonuçlarına göre; toprak sıcaklıklarının dahil olduğu girdi gruplarında % 60,6 (yağış, toprak ve hava verilerinin girdi olarak kullanıldığı; CH₄ tahmini) ile % 72,7 (toprak ve hava sıcaklık verilerinin girdi olarak kullanıldığı) oranları arasında tahmin sonuçları elde edilmiştir. Oksijen yüzdesinin tahmin edildiği model sonuçlarında; toprak sıcaklığının çıkarıldığı veri grubu ile sadece hava sıcaklıklarının veri grubu olarak kullanıldığı durumlar için en düşük (% 19,0), tüm değişkenlerin veri grubu olarak kullanıldığı durumda ise en yüksek (% 56,9) oranda tahmin yüzdesi ortaya çıkmıştır. Soğutucu öncesi depo gazı tahmin sonuçlarında ise tüm durumlarda % 96,6'nin üzerinde tahmin sonucu elde edilmiştir.

En iyi tahmin sonuçlarının elde edildiği girdiler içinde toprak sıcaklıklarının bulunması, bu verinin, oluşacak depo gazını (metan gibi) tahmin etmek için önemli bir değişken olduğu sonucuna ulaştırmaktadır. Seçilen en iyi veri grubu, yapay sinir ağı modeli kullanılarak yapılan tahmin ile metan gazı yüzdesi % 70'in üzerinde bir oranla tahmin edilebilir. Çok yıllık veri kullanılarak ya da farklı girdiler ekleyerek yapılacak ileri düzey çalışmalarla, metan gazı miktarı yerinde tahmin edilerek tesisin daha verimli çalışması sağlanabilir. Ayrıca bu modelle, sistemin otomasyonu oluşturularak, gaz bacalarındaki basınçlar eşzamanlı kontrol edilebilir, tesis içindeki elektrik üretim kapasiteleri gaz oluşum miktarına göre ayarlanarak maliyetler düşürülebilir.

BÖLÜM 7

KAYNAKLAR

- [1] TÜİK, Belediye Atık İstatistikleri, 2010, <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=10750>, 6 Mayıs 2012.
- [2] Arslankaya E., Ataselim F. ve Varınca K., 2007, “Katı Atık Toplama-Taşıma Araçlarının Aktarma Merkezleri ve İstanbul Tırağıında Meydana Getirdikleri Yüklere Değerlendirilmesi”, Türkiye 2007, AB sürecinde Türkiye’de Katı Atık Yönetimi ve Çevre Sorunları Sempozyumu.
- [3] Akkaya E., Demir A., ve Varank G., 2011, “Odayeri Düzenli Depo Sahası Sızıntı Suyunun Karakterizasyonu”, Sigma 3, 238-251.
- [4] ESMAP, 2004 Handbook for the Preparation of Landfill Gas to Energy Projects in Latin America and the Caribbean, The World Bank, Waterloo, Ontario.
- [5] Özcan H.K., Balkaya N., Bilgili E., Demir G., Uçan O.N. ve Bayat C., 2009, “Modeling of Methane Distribution in a Landfill Using Genetic Algorithms”, Environmental Engineering Science 26: 441-450.
- [6] Fellner J. ve Brunner P.H., 2010, “Modeling of Leachate Generation from MSW Landfills by a 2-Dimensional 2-Domain Approach” Waste Management 30: 2084-2095.
- [7] Abushammala, M.F.M., Basri, N.E.A. ve Kadhum, A.A.H., Review on Landfill Gas Emission to the Atmosphere. European Journal of Scientific Research 30(3): 427-436.
- [8] T.C. Resmi Gazete, “Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliğı”, 20814, 14.03.1991, 16.
- [9] Themelis N. J. ve Ulloa P. A, 2007, “Methane generation in landfills”, Renewable Energy 32: 1243-1257.
- [10] Özkaya B. 2004, Katı Atık Depo Sahalarında Sızıntı Suyu Geri Devrinin Atıkların Ayrışması ve Sızıntı Suyu Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [11] Barlaz, M.A., Ham, R.K. ve Schaefer, D.M., 1989, "Mass balance analysis of anaerobically decomposed refuse" Journal of Environmental Engineering, ASCE, 115(6): 1088-1102.

- [12] Vaidya, R.D., 2002, Solid Waste Degradation, Compaction And Water Holding Capacity, Yüksek Lisans Tezi, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.
- [13] T.C.Resmi Gazete, Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik, (27533), 26.03.2010, 23.
- [14] Spokas K, Bogner J, Chanton J. P, Morcet M, Aran C, Graff C, Moreau-Le Golvan Y. ve Hebe I, 2006, "Methane Mass Balance at Three Landfill Sites: What Is the Efficiency of Capture by Gas Collection Systems? Waste Management 26: 516-525.
- [15] Connecticut Public Broadcasting Network, Hartford's 68-year-old Landfill is Closing, <http://www.cpbm.org/article/hartford039s-68yearold-landfill-closing>, 1 Mayıs 2012.
- [16] El-Fadel, M., Findikakis, A.N. ve Leckie, J.O., 1997, "Environmental Impacts of Solid Waste Landfilling", Journal of Environmental Management, 50: 1-25.
- [17] Gujer, W., ve Zehnder, A. J. B., 1983, "Conversion Processes in Anaerobic Digestion", Water. Science and Technology 15: 127-167.
- [18] Özcan H.K., Boyat M., Bayat C., 2005, "Katı atık depo sahası gazları ve çevresel etkileri", II. Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongresi, İstanbul.
- [19] Lisk, D.J., 1991, "Environmental Effects of Landfills", Science of the Total Environment 100: 415-468.
- [20] Nastev, M., 1998, Modelling Landfill Gas Generation and Migration in Sanitary Landfills and Geological Formations, Doktora Tezi, Département de Géologie et de Génie Géologique, Faculté Des Sciences et de Génie, Quebec City.
- [21] Earth System Research Laboratory, Full Mauna Loa CO₂ record, <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>, 6 Mayıs 2012.
- [22] EPA, 2005, Guidance For Evaluating Landfill Gas Emissions From Closed or Abandoned Facilities, 600/R-05/123a, Washington.
- [23] Özcan H.K., 2003, Kemerburgaz Çöp Depo Alanındaki Metan ve Karbondioksit Emisyonlarının Mevsimlere Göre Değişimi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [24] Kiriş A. ve Saltabaş F., 2011, "The Landfill Gas Management At Sanitary Landfill Site and Istanbul Case Study" YTÜ Sigma 3: 209-218.
- [25] Rasi S., Veijanen I., A., ve Rintala A., 2007, "Trace Compounds of Biogas From Different Biogas Production Plants", Energy 32: 1375-1380.
- [26] Houghton H., 2007, "Global Climate Change Basics, Challenges, and International Impacts", Brewer Public Library, Atmospheric & Oceanic Sciences.
- [27] Conestoga Rovers Associates 2010, "Landfill Gas Management Facilities Design Guidelines", V6X 2W2, Columbia.
- [28] EPA, 2008, Landfill Methane Utilization. 7.4, Vancouver.

- [29] Machado S.L., Carvalho M.F., Gourc J.P., Vilar O.M. ve Nascimento J.C.F., 2009, "Methane generation in tropical landfills: Simplified methods and field results", *Waste Management* 29:153–161.
- [30] Hartz, K.E., Klink, R.E. ve Ham, R.K., 1982, "Temperature Effects:Methane Generation From Landfill Samples", *Journal of Environmental Engineering Division*, 108: 629-638.
- [31] Kotze, J.P., Thiel, P.G. ve Hattingh, W.H.J., 1969, "Anaerobic Digestion II. The Characterization and Control of Anaerobic Digestion", *Water Research* 3:459-494.
- [32] Bilgili, S., 2002, Katı Atık Düzenli Depo Sahalarında Depo Gazı Oluşumunu Etkileyen Faktörlerin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [33] Henry, J.G., ve Prasad, G., 2000, "Anaerobic Treatment of Landfill Leachate by Sulfate Reduction" *Water Science and Technology* 41:239-246.
- [34] Vavilin, V.A., Vasiliev, V.B., Rytov, S.V., ve Ponomarev, A.V., 1995, "Modelling Ammonia and Hydrogen Sulfide Inhibition in Anaerobic Digestion", *Water Research* 29 (3): 827-835.
- [35] Visvanathan C., Pokhrel D. ve Cheimchaisri W., 1999, "Methanotrophic Activities in Tropical Landfill Cover Soils: Effects of Temperature, Moisture Content, and Methane Concentration, *Water Management & Research* 17: 313-323.
- [36] Börjesson G. ve Svensson B., 1997, "Seasonal and Diurnal Methane Emissions From a Landfill and Their Regulation by Methane Oxidation", *Waste Management and Research* 15: 33-54.
- [37] Tecle, D., Lee, J., ve Hasan, S., 2008, "Quantitative Analysis of Physical and Geotechnical Factors Affecting Methane Emission in Municipal Solid Waste Landfill". *Environmental Geology*: 56(6): 1135-1143.
- [38] Maurice, C., ve Lagerkvist, A., 2003, "LFG Emission Measurements in Cold Climatic Conditions: Seasonal Variations and Methane Emissions Mitigation" *Cold Regions Science and Technology* 36: 37-46.
- [39] Nastev, M., Therrien, R., Lefebvre, R. ve Gelinas, P., 2001, "Gas production and migration in landfills and geological materials". *Journal of Contaminant Hydrology* 52: 187-211.
- [40] Czepiel, P.M., Shorter, J.H., Mosher, B., Allwine, E., McManus, J.B., Harriss, R.C., Kolb, C.E. ve Lamb, B.K., 2003, "The influence of atmospheric pressure on landfill methane emissions". *Waste Management* 23: 593-598.
- [41] Eklund B., Anderson E. P., Walker B. L. ve Burrows D. B., 1998, "Characterization of Landfill Gas Composition at the Fresh Kills Municipal Solid-Waste Landfill" *Environmental Science and Technology* 32: 2233-2237.
- [42] Ham, R. K., ve M. A. Barlaz, 1989, "Measurement and Prediction of Landfill Gas Quality and Quantity" in *Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact Academic Press*: 155-158.

- [43] Afvalzorg, 2008, Methods to Ascertain Methane Emission of Landfills, http://www.afvalzorg.nl/Libraries/Publications_Methane_emissions/Paper_methods_to_ascertain_methane_emission.sflb.ashx, 3 Mart 2012.
- [44] H. Kamalan, M. Sabour ve N. Shariatmadari, 2011, "A Review on Available Landfill Gas Models". Journal of Environmental Science and Technology, 4: 79-92.
- [45] Thompson S., Sawyer J, Bonam R. ve Valdivia J.E., 2009, "Building a Better Methane Generation Model: Validating Models with Methane Recovery Rates From 35 Canadian Landfills", Waste Management 29: 2085-2091.
- [46] Özkaya B., Demir A., ve Bilgili M.S., 2007, "Neural Network Prediction Model For the Methane Fraction in Biogas From Field-Scale Landfill Bioreactors", Environmental Modelling and Software 22: 815-822.
- [47] Özcan H.K., Uçan O.N., Şahin U., Borat M. ve Bayat C., 2006, "Appling Simple Numerical Model To Predict Methane Emission From Landfill", Journal of Scientific & Industrial Research 65: 128-134.
- [48] CONEG Policy Research Center, 2007, Comparative Analysis of Landfill Gas Utilization Technologies, Washington DC, 1997.
- [49] Bove R ve Lunghi P, 2006, "Electric Power Generation from Landfill Gas Using Traditional and İnnovative Technologies", Energy Conversion & Management 47: 1391-1401.
- [50] SCS Engineers, 2002, Siloxanes in Landfill and Digester Gas Update, California.
- [51] Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü, Otomatik Gözlem İstasyonu, <http://www.dmi.gov.tr/genel/meteorolojikaletler.aspx?a=j>, 5 Ağustos 2011.
- [52] Ortadoğu Enerji, "İstanbul Çöp Gazından Enerji Projesi - Odayeri ve Kömürcüoda Tesisleri", <http://www.ortadogugrup.com.tr/dergi/tr.rar>, 27 Şubat 2012.
- [53] Ortadoğu Enerji, İstanbul Kemerburgaz-Odayeri ve Şile-Kömürcüoda düzenli çöp depolama sahalarında Çöp Gazından Elektrik Üretim Projeleri, <http://www.ortadoguenerji.com.tr/?copgazienerjisi=1>, 27 Şubat 2012.
- [54] Haykin S., (1999), Neural Networks. 2nd edition, Prentice Hall Inc., New Jersey.
- [55] Scholarpedia, Kohonen Network, http://www.scholarpedia.org/article/Kohonen_network, 6 Mayıs 2012.
- [56] Vesanto J., Himberg J., Alhoniemi E., ve Parhankangas J., SOM Toolbox for MATLAB 5, www.cis.hut.fi/somtoolbox/package/papers/techrep.ps, 6 Mayıs 2012.
- [57] Koua and Kraak International Journal of Health Geographics 2004, 3:12, <http://www.ij-healthgeographics.com/content/figures/1476-072X-3-12-7-1.jpg>, 6 Mayıs 2012.
- [58] Karaca F. ve Camcı F., 2010, "Distant Source Contributions to PM₁₀ Profile Evaluated by SOM Based Cluster Analysis of Air Mass Trajectory Sets" Atmospheric Environment 44: 892-899.

- [59] Hsu K.C. ve Li S.T, 2010, "Clustering Spatial–Temporal Precipitation Data Using Wavelet Transform and Self-Organizing Map Neural Network", *Advances in Water Resources* 33: 190-200.
- [60] Ibarra-Berastegi G., Sa´enz J., Ezcurra A., Ganzedo U., Argandona J.D., Errasti I, Fernandez-Ferrero A.ve Polanco-Martinez J., 2009, "Assessing Spatial Variability of SO₂ Field as Detected by an Air Quality Network Using Self-Organizing Maps, Cluster, and Principal Component Analysis" *Atmospheric Environment* 43: 3829-3836.
- [61] Alvarez-Guerra M., Gonzalez-Pinuela C., Andres A., Galan B. ve Viguri J.R, 2008, "Assessment of Self-Organizing Map Artificial Neural Networks For The Classification of Sediment Quality", *Environmet International* 34: 782-790.
- [62] Kalteh, A.M., Hjorth P. ve Berndtsson R, 2008, "Review of the Self-Organizing Map (SOM) Approach in Water Resources: Analysis, Modelling And Application", *Environmental Modelling and Software* 23: 835-845.
- [63] Piccinini G., 2004, "The First Computational Theory of Mind and Brain: A Close Look at Mcculloch and Pitts's "Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity", *Synthese* 141-2: 175-215.
- [64] Vikipedi Yapay Sinir Ağları,
http://tr.wikipedia.org/wiki/Yapay_sinir_a%C4%9Flar%C4%B1, 4 Mart 2012.
- [65] Drachman D., 2005. "Do We Have Brain to Spare?", *Neurology* 64 (12): 2004–5.
- [66] Hamed M. M, Khalafallah M. G. ve Hassanien E. A., 2006, "Prediction of Wastewater Treatment Plant Performance Using Artificial Neural Networks", *Environmental Modelling and Software* 19: 919-928.
- [67] Purkait M.K, Kumar V. D ve Maity D, 2009, "Treatment of Leather Plant Effluent Using NF Followed By RO and Permeate Flux Prediction Using Artificial Neural Network", *Chemical Engineering Journal* 151: 275-285.
- [68] Balcı B., Keskinan O. ve Avcı, M, 2011, "Use of BDST and an ANN Model For Prediction of Dye Adsorption Efficiency of *Eucalyptus Camaldulensis* Barks in Fixed-Bed System", *Expert Sysyems with Applications* 38: 949-956.
- [69] Kurt A., Gülbağcı B., Karaca F., ve Alagha Ö., "An Online Air Pollution Forecasting System Using Neural Networks", 2008, *Environment International* 34: 592-598.
- [70] Alawi S. M., Abdul-Wahab S.A. ve Bakheit C.S., 2008, "Combining Principal Component Regression and Artificial Neural Networks for More Accurate Predictions of Ground-Level Ozone", *Environmet Modelling & Software* 23: 396-403.
- [71] Abdul-Wahab S.A., ve Al-Alawi S.M., 2002, "Assessment and Prediction of Tropospheric Ozone Concentration Levels Using Artificial Neural Networks", [Environmental Modelling & Software](#) 17-3: 219-228.

- [72] Zoqi M. ve Ghavidel A., 2009, “Neural Network Modeling and Prediction of Methane Fraction in Biogas from Landfill Bioreactors”, Iran Journal of Health and Environment 2: 140-148.
- [73] Hashemi M., Kavak H. I., Tsotsis T.T. ve Sahimi M., 2011, “Computer Simulation of Gas Generation And Transport İn Landfills. V: Use of Artificial Neural Network and the Genetic Algorithm for Short- and Long-Term Forecasting and Planning, Chemical Engineering Science 66: 2646-2659.
- [74] Noori R. ve Zade J.G., 2008, “Prediction of Municipal Solid Waste Generation by Use of Artificial Neural Network: A Case Study of Mashhad”, [International Journal of Environmental Research](#) 2: 13-22.
- [75] Alpdoğan Y., 2007, Kendinden Düzenlenen Haritalar ile Doküman Sınıflandırma, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [76] Can Y., 2006, SOM Algoritmasıyla Parmak İzi Sınıflandırılmasının FPGA Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- [77] Farquhar G.J. ve Rovers F.A., 1973, “Gas Production During Refuse Decompositon”, Water, Air and Soil Pollution 2: 483-495.
- [78] Wikipedia, Curse of dimensionality,
http://en.wikipedia.org/wiki/Curse_of_dimensionality, 22 Ağustos 2011.
- [79] Akademik Destek, Mann-Whitney U Testi,
<http://www.akademikdestek.net/info/utesti.pdf>, 26 Mayıs 2012.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	İbrahim UYANIK
Doğum Tarihi ve Yeri	21 Haziran 1984
Yabancı Dili	İngilizce
E-posta	brhmynk@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Çevre mühendisliği	Marmara Üniversitesi	2007

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2011-2012	Harran Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2009-2010	Plazma Makina San. Tic. Ltd. Şti.	Çevre Mühendisi
2008-2009	Türk Silahlı Kuvvetleri	Piyade Asteğmen