

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

**YAPAY ZEKÂ MODELLERİYLE TAM ÖLÇEKLİ ÇAMUR ÇÜRÜTME
REAKTÖRLERİNDEN ELDE EDİLEN BİYOGAZ ÜRETİMİNİN TAHMİNİ: YAPAY
SİNİR AĞLARI VE FUZZY LOGIC UYGULAMALARI**

KEVSER KARAKAYA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. KAAAN YETİLMEZSOY**

İSTANBUL, 2012

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAPAY ZEKÂ MODELLERİYLE TAM ÖLÇEKLİ ÇAMUR ÇÜRÜTME
REAKTÖRLERİNDEN ELDE EDİLEN BİYOGAZ ÜRETİMİNİN TAHMİNİ: YAPAY
SİNİR AĞLARI VE FUZZY LOGIC UYGULAMALARI

Kevser KARAKAYA tarafından hazırlanan tez çalışması 28/06/2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Kaan YETİLMEZSOY
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. F. İlter TÜRKDOĞAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Çiğdem YANGIN GÖMEÇ
İstanbul Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Çalışmamın bütün aşamalarını titizlikle takip edip bana emek veren bilgi, deneyim ve yardımlarını esirgemeyen, görüşleri ile yol gösteren, bu çalışmanın oluşmasında büyük katkı sahibi değerli danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Kaan YETİLMEZSOY'a tüm samimiyetimle teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezi yapabilmem için gerekli altyapıyı oluşturulmasına katkıda bulunan başta Bölüm Başkanımız Prof. Dr. Yaşar NUHOĞLU olmak üzere Yıldız Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nün saygıdeğer Öğretim Üyelerine ve Araştırma Görevlilerine şükranlarımı arz ederim.

Desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen işyeri işletme şefim Halil KİYLÜK'a ve ekibi Tülin ÖZTÜRK ile Selman GÜÇ'e ve tesis şefim Metin TAMER'e çok teşekkür ederim.

Ayrıca yüksek lisans ders aşamasında, tez çalışmamda ve bu zaman zarfında iş hayatımın her aşamasında görüş ve düşünceleri ile manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen çalışma arkadaşlarım Sinan AYDEMİR ve Seçil YİĞİTER'e teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatım boyunca sevgi ve ilgilerini üzerimden hiç eksik etmeyen beni her konuda destekleyen ve yüreklendiren babama, anneme, kardeşlerime, tüm aileme ve arkadaşlarıma minnetlerimi sunarım.

Haziran, 2012

Kevser KARAKAYA

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ.....	ix
KISALTMA LİSTESİ.....	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiv
ÖZET	xvi
ABSTRACT.....	xviii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez	5
BÖLÜM 2	
ARITMA ÇAMURU VE ÇAMUR KAYNAKLARI	7
2.1 Aritma Çamuru.....	7
2.2 Çamur Kaynakları	8
2.2.1 Ön Arıtma.....	9
2.2.2 İkincil Arıtma	9
2.2.3 Fiziksel – Kimyasal Arıtma	10
BÖLÜM 3	
HAVASIZ ARITMANIN ÖZELLİKLERİ	14
3.1 Havasız Arıtmanın Esasları	14
3.2 Mikrobiyoloji	15
3.2.1 Hidroliz	15
3.2.2 Asit Üretimi	16

3.2.2.1	Çözünebilir Karbonhidratların Fermantasyonu	16
3.2.2.2	Aminoasitlerin Fermantasyonu.....	16
3.2.2.3	Uzun Zincirli Yağ Asitlerinin Anaerobik Oksidasyonu	16
3.2.2.4	Kısa Zincirli Yağ Asitlerinin Anaerobik Oksidasyonu	17
3.2.3	Metan Üretimi	17
3.2.3.1	Asetat, Hidrojen ve Karbondioksitten Metan Üretimi	17
3.2.4	Anaerobik Mikroorganizmalar Arasındaki Karşılıklı İlişkiler	18
3.3	Çevre Koşullarının Anaerobik Süreçlere Etkisi	20
3.3.1	pH ve Alkalinite	20
3.3.2	Besin Gereksinimi	21
3.3.3	Sıcaklık.....	22
3.3.4	Zehirlilik.....	24
3.3.5	Kükürt.....	26
3.3.6	Oksijen	26
3.3.7	Amonyak	26
3.3.8	Uçucu Asitler	27
3.3.9	C/N Oranı	27
3.3.10	Alıkoyulma Süresi.....	27
3.4	Havasız Arıtma Sistemleri	28
3.4.1	Klasik Havasız Çamur Çürütücü.....	29
3.4.2	Havasız Temas Reaktörü	30
3.4.3	Havasız Filtre	30
3.4.4	Havasız Akışkan Yataklı Reaktör.....	30
3.4.5	Havasız Çamur Yataklı Reaktör	31
3.4.6	Havasız Çamur Yataklı Filtre.....	31
3.4.7	Membranlı Havasız Reaktör.....	32
3.4.8	Havasız Ardışık Kesikli Reaktör.....	32
3.4.9	Havasız Kompost Reaktörleri	32
3.4.10	İki Kademeli Havasız Arıtma Sistemleri.....	33
3.5	Arıtma Çamurlarının Çürütülmesi	35
3.5.1	Havasız Anaerobik Çamur Çürütme Süreci	35
3.5.2	Çamur Çürütücü Tipleri.....	35
3.5.3	Proses Tasarımı Ve Kontrolü	36
3.5.4	Çürütücü hacmi.....	36
3.5.4.1	Isıtma ve Sıcaklık Kontrolü	37
3.5.4.2	Çürütücü Çatısı (Kapağı).....	38
3.5.4.3	Çürütücülerin Karıştırılması	38
3.5.4.4	Gaz Üretimi ve Kullanımı.....	39
3.5.4.5	Çürümüş Çamur Suyu Özellikleri.....	40
3.5.4.6	Çamur Stabilizasyon Derecesi ve Süzülebilirliği	41
3.5.5	İşletmeye Alma ve Proses Kontrolü	41
3.5.5.1	İşletmeye Alma.....	41
3.5.5.2	Optimum Çevre Şartları	42
3.5.5.3	Köpük Oluşumu ve Kontrolü	43
3.5.5.4	İnhibitör ve Zehirli Maddeler	43
3.6	Biyogaz	44
3.6.1	Biyogazın Özellikleri	45

3.6.2	Biyogazın Kullanım Alanları.....	47
3.6.3	Biyogaz Üretiminde Kullanılan Sistemler.....	48
3.6.3.1	Kesikli (Batch) fermentasyon	48
3.6.3.2	Beslemeli- Kesikli Fermentasyon	48
3.6.3.3	Sürekli Fermentasyon	48
3.6.4	Biyogaz Üretiminin Yararı	49
3.7	Anaerobik Çamur Çürütme Konusundaki Önemli Bazı Çalışmalar	49

BÖLÜM 4

YAPAY ZEKÂ ESASLI MODELLEME ÇALIŞMALARI	53
4.1 Yapay Sinir Ağları	53
4.1.1 Yapay Sinir Ağlarının Genel Özellikleri	54
4.1.2 Yapay Sinir Ağlarının Avantaj ve Dezavantajları	55
4.1.3 Nöronun Biyolojik Yapısı ve Nöron Modelleri	57
4.1.4 Yapay Sinir Hücresinin Yapısı	59
4.1.4.1 Girdiler	60
4.1.4.2 Ağırlıklar	60
4.1.4.3 Birleştirme Fonksiyonu	60
4.1.4.4 Aktivasyon ve Transfer Fonksiyonları	61
4.1.4.5 Çıktılar	63
4.1.5 Yapay Sinir Ağlarının Yapısı	63
4.1.5.1 Giriş Tabakası	64
4.1.5.2 Gizli Tabaka	64
4.1.5.3 Çıkış Tabakası	65
4.1.6 Yapay Sinir Ağlarının Sınıflandırılması.....	66
4.1.6.1 Yapılarına Göre Yapay Sinir Ağları.....	66
4.1.6.2 Öğrenme Algoritmalarına Göre Yapay Sinir Ağları.....	67
4.1.6.3 Öğrenme Zamanlarına Göre Yapay Sinir Ağları.....	68
4.1.7 Yapay Sinir Ağlarının Çevre Mühendisliğinde Uygulamaları.....	69
4.1.7.1 Yapay Sinir Ağlarının Atık Yönetiminde Uygulamaları	69
4.2 Bulanık Mantık (Fuzzy-Logic) Modeli	74
4.2.1 Bulanık Mantık Modelinin Genel Özellikleri	74
4.2.2 Bulanık Mantığın Avantaj ve Dezavantajları	75
4.2.3 Bulanık Kümeler ve Üyelik Dereceleri.....	77
4.2.4 Üyelik Fonksiyonları (Membership functions, mfs).....	80
4.2.5 Bulanıklaştırma	81
4.2.6 Bulanık Kurallar	82
4.2.7 Durulaştırma	82
4.2.7.1 En Büyük Üyelik İlkesi.....	83
4.2.7.2 Ağırlık Merkezi	83
4.2.7.3 Ağırlıklı Ortalama Yönetimi	83
4.2.7.4 Ortalama En Büyük Üyelik.....	84
4.2.7.5 Toplamların Merkezi	84
4.2.7.6 En Büyük Alanın Merkezi	85
4.2.7.7 En Büyük İlk veya Son Üyelik Derecesi.....	85
4.2.8 Durulaştırmada Kuralların Harmanlanmasında Kullanılan ‘VE’ Operatörünün Çalışma Prensipleri.....	85

4.2.9	Bulanık Mantığın Farklı Uygulama Alanları	86
BÖLÜM 5		
MATERYAL VE METOT		89
5.1	Modelleme Çalışmasında Kullanılan Veri Seti Temini ve İşletme Koşulları	89
5.2	Model Değişkenlerinin Tanıtımı	103
5.2.1	Beslenen Çamur Debisi (p_1)	103
5.2.2	Toplam Katı Madde (TKM) (p_2)	103
5.2.3	Toplam Uçucu Katı Madde (TUKM) (p_3)	104
5.2.4	Alkalinite (p_4)	104
5.2.5	Uçucu Yağ Asidi (p_5)	104
5.2.6	Biyogaz Üretimi (t)	105
5.2.7	Model Datasının Tanımlayıcı İstatistiksel Analizi	106
5.3	Yapay Sinir Ağları	109
5.3.1	Veri Setinin Eğitim, Validasyon ve Test Setlerine Bölünmesi	109
5.3.2	Temel Bileşen Analizi (Principal Component Analysis, PCA)	110
5.3.3	Geri Yayılım Algoritmasının (BP) Seçimi	112
5.3.4	Yapay Sinir Ağları Yapısının Optimizasyonu	113
5.3.5	Hassasiyet Analizi	114
5.4	Bulanık Mantık Modeli (Fuzzy Logic)	114
5.4.1	Bulanık Çıkarım Sistemindeki Operatörlerin Seçimi	116
5.4.2	Model Datasının Bulanık Çıkarım Sisteminde (FIS) Değerlendirilmesi	117
5.4.3	Bulanık Çıkarım Sistemindeki Üyelik Fonksiyonlarının Seçimi	119
5.4.4	Model Değişkenlerinin Bulanıklaştırılması (Fuzzification)	120
5.4.5	Kural Tabanının Tanıtılması (Rule Base)	121
5.4.6	Model Değişkenlerini Durulaştırılması (Fuzzification)	122
5.5	Çoklu Regresyon Modeli	123
5.6	Tahmin sonuçlarının İstatistiksel Analizi	125
BÖLÜM 6		
MODELLEME SONUÇLARI		128
6.1	Yapay Sinir Ağları	128
6.1.1	Üretilen Biyogaz Debisi Tahmini için Geri Yayılım Algoritmasının Seçimi	128
6.1.2	Üretilen Biyogaz Debisi Tahmini Aşamasının Optimizasyonu	132
6.1.3	Hassasiyet Analizi	135
6.1.3.1	Biyogaz Üretim Tahmininde Hassasiyet Analizi	135
6.1.4	Yapay Sinir Ağları Modelinin Üretilen Biyogaz debisi için Tahmin Sonuçları	137
6.2	Bulanık Mantık Modeli (Fuzzy Logic)	138
6.2.1	Bulanık Çıkarım Sistemindeki Operatörlerin Seçimi	138
6.2.2	Model Değişkenlerinin Bulanıklaştırılması (Fuzzification)	139
6.2.3	Kural Tabanının Modele Girişi (Rule Base)	143
6.2.4	Veri setinin Durulaştırılması	144

6.2.5	Fuzzy Logic Modelinin Üretilen Biyogaz debisi için Tahmin Sonuçları	144
6.3	Çoklu Regresyon Modeline Ait Tahmin Sonuçları.....	146
6.4	Tahmin Sonuçlarının İstatistiksel Verifikasyonu	151
BÖLÜM 7		
	SONUÇ VE ÖNERİLER	156
	KAYNAKLAR	160
EK-A		
	TAM ÖLÇEKLİ ANAEROBİK ÇAMUR ÇÜRÜTME PROSESİNDEN ELDE EDİLEN DENEYSEL VE ÖLÇÜM VERİLERİ	168
EK-B		
	GİRİDİ VE ÇIKTI DEĞİŞKENLERİ İÇİN TRAPEZ FONKSİYONU KURAL TABANI	178
EK-C		
	TAM ÖLÇEKLİ ANAEROBİK ÇAMUR ÇÜRÜTME PROSESİNDE ÜRETİLEN BİYOGAZ DEBİSİ TAHMİN MODELLEMELERİN ÇALIŞMA SONUÇLARI	188
EK-D		
	İSKİ TUZLA BİYOLOJİK VE İLERİ BİYOLOJİK ATIKSU ARTMA TESİSİ AKIŞ DİYAGRAMI..	199
EK-E		
	İSKİ TUZLA BİYOLOJİK ve İLERİ BİYOLOJİK ATIKSU ARITMA TESİSİNDE BULUNAN ANAEROBİK ÇAMUR ÇÜRÜTME ÜNİTESİNE AİT DENEYSEL VERİLERİN KULLANIMI KONUSUNDA HAZIRLANAN PROTOKOL	201
	ÖZGEÇMİŞ	206

SİMGE LİSTESİ

R^2	Determinasyon Katsayısı
R_a^2	Ayarlanmış Çoklu Determinasyon Katsayısı
R	Korelasyon Katsayısı
MAE	Ortalama Mutlak Hata
RMSE	Ortalama Karesel Hata Karekökü
$RMSE_s$	Sistemik RMSE
$RMSE_u$	Sistemik Olmayan RMSE
MSE	Ortalama Karesel Hata
IA	Uyum İndeksi
FA2	İki Faktörü
FV	Fraksiyonel Varyans
PSE	Sistemik Hata Oranı
mfs	Üyelik Fonksiyonu
P_x	Üretilen Net Biyokütle
Y	Biyokütle Dönüşüm Oranı
p	Girdi değişkeni
t	Çıktı Değişkeni
O	Gözlenen (DeneySEL)
P	Tahmin edilen (Model)
k_d	İçsel Solunum Hız Sabiti
Q	Çamur Debisi
S_0	Beslenen Çamurun BOİ değeri
θ_c	Çamur Yaşı
Q_{CH4}	Üretilen Metan
Y_a	DeneySEL Veri
Y_p	Tahmin Değeri
n	Gözlem Sayısı
p	Çoklu Regresyon Modelindeki Değişken Sayısı
m	Ortalama
reg	Regresyon

KISALTMA LİSTESİ

YSA	Yapay Sinir Ağları
FLM	Fuzzy Logic Model (Bulanık Mantık Modeli)
ÇRM	Çoklu Regresyon Modeli
FIS	Fuzzy Inference System (Bulanık Çıkarım Sistemi)
BP-ANN	Back-Propagation Artificial Neural Network (Geri Beslemeli Yapay Sinir Ağları)
BP	Geri Yayılım Algoritması
GRNN	General Regression Neural Network (Genel Regresyon Sinir Ağı)
MLP	Çok Katmanlı Algılayıcı
PCA	Principal Component Analysis (Temel Bileşim Analizi, TBA)
MISO	Multiple Inputs Single Output (Çok Girdili Tek Çıktılı)
İSKİ	İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi
HTR	Havasız Temas Reaktörü
HF	Havasız Filtre
HAYR	Havasız Akışkan Yataklı Reaktör
HÇYR	Havasız Çamur Yatağı
MHR	Membranlı Havasız Reaktör
FBR	Akışkan Yataklı Reaktör
CMADs	Tam Karışımli Anaerobik Çürütücü
UYA	Uçucu Yağ Asiti
TKM	Toplam Katı Madde
TUKM	Toplam Uçucu Katı Madde
BOİ ₅	Biyolojik Oksijen İhtiyacı
KOİ	Kimyasal Oksijen İhtiyacı
AKM	Askıda Katı Madde
TKN	Toplam Kjeldahl Azotu
TN	Toplam Azot
Org-N	Organik Azot
NH ₄ -N	Amonyum Azotu
NO ₃ -N	Nitrat Azotu
TAN	Toplam Amonyak Azotu
TP	Toplam Fosfor
UKM	Uçucu Katı Madde
KM	Katı Madde
ORP	Oksidasyon Redüksiyon Potansiyeli

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 3.1 Eysel çamurların çürütülmesi esnasında organik maddelerin metana dönüşümü [4]	18
Şekil 3.2 Havasız reaktör tipleri [15]	29
Şekil 4.1 Basit bir nöronun yapısı [39]	58
Şekil 4.2 Yapay nöronun genel yapısı [41]	59
Şekil 4.3 Yapay nöronun detaylı yapısı [41]	60
Şekil 4.4 En çok kullanılan aktivasyon ve transfer fonksiyonları	62
Şekil 4.5 Transfer fonksiyonunun çalışma yapısı [41]	63
Şekil 4.6 YSA'nın genel yapısı [41]	64
Şekil 4.7 Gizli tabakası tek katmanlı YSA [39]	65
Şekil 4.8 Gizli tabakası çok katmanlı YSA [41]	65
Şekil 4.9 İleri beslemeli ve geri beslemeli ağ yapıları [41]	67
Şekil 4.10 Klasik sistem [62]	78
Şekil 4.11 Bulanık mantığın temel elemanları [62]	78
Şekil 4.12 Klasik mantık [62]	80
Şekil 4.13 Bulanık mantık [62]	80
Şekil 4.14 En büyük üyelik ilkesi durulaştırması [63]	83
Şekil 4.15 Centroid yöntemi durulaştırması [63]	83
Şekil 4.16 Ağırlıklı ortalama [63]	84
Şekil 4.17 Ortalama en büyük üyelik durulaştırması [63]	84
Şekil 4.18 En büyük alanın merkezi [63]	85
Şekil 4.19 VE bağlacı ile bağlanan kuralın kullanıldığı örnek [63]	86
Şekil 5.1 İSKİ Tuzla biyolojik ve ileri biyolojik atıksu arıtma tesisi	89
Şekil 5.2 İSKİ Tuzla biyolojik ve ileri biyolojik atıksu arıtma tesisi akış diyagramı	92
Şekil 5.3 Ön çöktürme havuzları	93
Şekil 5.4 Strain pressler	93
Şekil 5.5 Çamur yoğunlaştırma havuzları	94
Şekil 5.6 Biyolojik arıtma, havalandırma havuzu	95
Şekil 5.7 İleri biyolojik arıtma anaerobik biyofosfor havuzu	95
Şekil 5.8 İleri biyolojik arıtma, proses havuzları membran difüzörleri	96
Şekil 5.9 Son çöktürme havuzları	97
Şekil 5.10 Mekanik yoğunlaştırıcılar	98
Şekil 5.11 Anaerobik çamur çürütme ünitesi	99
Şekil 5.12 Biyogaz depolama tankları ve biyogaz tankları içerisindeki neopren balon	99
Şekil 5.13 Anaerobik çamur çürütme akış şeması	100
Şekil 5.14 Mekanik çamur susuzlaştırıcılar ve çamur keki	100

Şekil 5.15	Pedal tip çamur kurutucu ve oluşturulan kuru ürün	101
Şekil 5.16	Kojenerasyon ünitesi.....	101
Şekil 5.17	Kojenerasyon ünitesi akış diyagramı.....	102
Şekil 5.18	Modellemede kullanılan beslenen çamur debisi değerlerinin yıllara göre dağılımı.....	107
Şekil 5.19	Modellemede kullanılan toplam katı madde (TKM) değerlerinin yıllara göre dağılımı.....	107
Şekil 5.20	Modellemede kullanılan toplam uçucu katı madde (TUKM) değerlerinin yıllara göre dağılımı.....	108
Şekil 5.21	Modellemede kullanılan alkalinite değerlerinin yıllara göre dağılımı	108
Şekil 5.22	Modellemede kullanılan uçucu yağ asiti (UYA) değerlerinin yıllara göre dağılımı.....	109
Şekil 5.23	Modellemede kullanılan üretilen biyogaz debisi değerlerinin yıllara göre dağılımı.....	109
Şekil 5.24	Temel bileşen analiz (PCA) şeması [69]	111
Şekil 5.25	Bulanık mantık mekanizması	115
Şekil 5.26	Bulanık mantık modelinin adımları	116
Şekil 5.27	Bulanık mantık modelinin MATLAB® V7.9.0.529 üzerinde operatör seçimi	117
Şekil 5.28	Ağırlık merkezi durulaştırma yöntemi	119
Şekil 5.29	Bulanık mantık modelinin MATLAB® V7.9.0.529 üzerinde üyelik fonksiyonu seçimi	120
Şekil 5.30	Bulanık mantık modelinin MATLAB® V7.9.0.529 üzerinde üyelik fonksiyonu seçimi	122
Şekil 5.31	Bulanık mantık modelinin MATLAB® V7.9.0.529 üzerinde durulaştırma ..	123
Şekil 5.32	Çoklu regresyon modelinin örnek girdi parametre sayısının DataFit® programına girişi	124
Şekil 5.33	Çoklu regresyon modelinin örnek girdi ve çıktı değerlerinin DataFit® programına girişi	124
Şekil 5.34	Çoklu regresyon modelinin DataFit® programında sonuçları.....	125
Şekil 6.1	Modelin çalıştırılması	129
Şekil 6.2	YSA modelinde üretilen biyogaz debisi tahmini performansının trainscg geri yayılım algoritması için MATLAB® Versiyon 7.9.0.529 MSE esaslı ekranındaki grafiği (gizli katmanda 10 nörona göre).....	131
Şekil 6.3	YSA'da üretilen biyogaz debisi tahmininin tüm alt setlerinin MATLAB® Versiyon 7.9.0.529 ekranındaki regresyon grafikleri	131
Şekil 6.4	YSA modelinde üretilen biyogaz debisi tahmini performansının trainscg geri yayılım algoritması için MATLAB® Versiyon 7.9.0.529 MSE esaslı ekranındaki grafiği (gizli katmanda 14 nörona göre)	133
Şekil 6.5	YSA'da üretilen biyogaz debisi tahmininin tüm alt setlerinin MATLAB® V7.9.0.529 ekranındaki regresyon grafikleri (gizli katmanda 14 nörona göre)	133
Şekil 6.6	Üretilen biyogaz debisi tahmin aşamasında MSE değerlerine karşılık gelen nöron değerleri	134
Şekil 6.7	YSA modelinin işlem şeması.....	134
Şekil 6.8	Biyogaz için 2'li kombinasyondan başlayarak MSE-korelasyon grafiği.....	136

Şekil 6.9	Üretilen biyogaz debisinin ölçülen değerleri ile yapay sinir ağları modelinin korelasyon grafiği.....	137
Şekil 6.10	Üretilen biyogaz debisinin ölçülen değerleri ile yapay sinir ağları model sonuçlarının mukayesesi	138
Şekil 6.11	Üretilen biyogaz debisinin ölçülen değerleri ile yapay sinir ağları model sonuçlarının bakiye hata grafiği	138
Şekil 6.12	Bulanık çıkarım sistemi	139
Şekil 6.13	Girdi ve çıktı değişkenlerinin üyelik fonksiyonlarının aralıklarının belirlenmesi.....	140
Şekil 6.14	Beslenen çamur debisi için 10'lu trapez üyelik fonksiyonları	140
Şekil 6.15	TKM için 10'lu trapez üyelik fonksiyonları	140
Şekil 6.16	TUKM için 10'lu trapez üyelik fonksiyonları.....	141
Şekil 6.17	Alkalinite için 10'lu trapez üyelik fonksiyonları	141
Şekil 6.18	UYA için 10'lu trapez üyelik fonksiyonları.....	141
Şekil 6.19	Üretilen biyogaz debisi için 20'li trapez üyelik fonksiyonları	141
Şekil 6.20	IF-THEN kural yapısının uygulanması	143
Şekil 6.21	Bulanık çıktıların durulaştırılması.....	144
Şekil 6.22	Üretilen biyogaz debisinin ölçülen değerleri ile fuzzy logic modelinin korelasyon grafiği.....	145
Şekil 6.23	Üretilen biyogaz debisinin ölçülen değerleri ile fuzzy logic model sonuçlarının mukayesesi	145
Şekil 6.24	Üretilen biyogaz debisinin ölçülen değerleri ile fuzzy logic model sonuçlarının bakiye hata grafiği	146
Şekil 6.25	Çoklu regresyon modelinde veri setinin DataFit® üzerinde uygulanması .	147
Şekil 6.26	Çoklu regresyon modelinde veri setinin DataFit® programında sonuçları	147
Şekil 6.27	Üretilen biyogaz debisinin ölçülen değerleri ile çoklu regresyon modelinin korelasyon grafiği.....	150
Şekil 6.28	Üretilen biyogaz debisinin ölçülen değerleri ile çoklu regresyon model sonuçlarının mukayesesi	151
Şekil 6.29	Üretilen biyogaz debisinin ölçülen değerleri ile çoklu regresyon model sonuçlarının bakiye hata grafiği	151
Şekil 6.30	Üretilen biyogaz debisinin ölçülen değerleri ile model çalışmaları sonuçlarının mukayesesi	154
Şekil 6.31	Üretilen biyogaz debisinin ölçülen değerleri ile model çalışmaları sonuçlarının bakiye hata grafiği	155

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	Arıtma sisteminden kaynaklanan çamur ve katı atıkların özellikleri [2] . 11
Çizelge 3.1	Başlıca anaerobik mikroorganizma grupları [4] 15
Çizelge 3.2	Bazı maddelerin anaerobik işlemi durdurucu derişimleri [21] 25
Çizelge 3.3	Anaerobik süreçler için optimum çevre koşulları [15] 28
Çizelge 3.4	Havasız arıtma sistemlerinin organik yük ve verim bakımından mukayesesi [15]..... 29
Çizelge 3.5	Tek ve iki kademeli işletmenin karşılaştırılması [15]..... 33
Çizelge 3.6	Yaygın kullanılan havasız arıtma sistemlerinin karşılaştırılması [15] 34
Çizelge 3.7	HÇYR, HF ve HAYR sistemlerinin başlıca işletme sorunları [15] 34
Çizelge 3.8	Çamur çürütücüler için tasarım kriterleri [15] 37
Çizelge 3.9	Havasız çamur çürütücü çıkış suyu özellikleri [4] 40
Çizelge 3.10	Anaerobik mikroorganizmalar için optimum çevre şartları [4]..... 42
Çizelge 3.11	Katı madde oranı %4,5 olan evsel atıksu arıtma tesisi çamurunun çürütüldüğü bir çürütücü için inhibitör madde zehirlilik sınır konsantrasyonları [24] 44
Çizelge 3.12	Biyogazın bileşimi [27]..... 45
Çizelge 3.13	Bazı atıkların metan gazı yüzdeleri [28] 46
Çizelge 3.14	Bazı yakıt türlerinin biyogaz ile karşılaştırılması [28] 47
Çizelge 4.1	Bilgisayar ve insan beyni arasındaki çalışma sistemlerinin karşılaştırılması 53
Çizelge 4.3	Yapay sinir ağlarının mimarisi ve yapı elemanları [40] 57
Çizelge 4.4	Klasik mantık - bulanık mantık arasındaki temel farklılıklar [62] 74
Çizelge 4.5	Bulanık denetim uygulamaları [63] 87
Çizelge 5.1	İSKİ Tuzla biyolojik ve ileri biyolojik atıku arıtma tesisi; biyolojik ve ileri biyolojik proje değereri ile tesisin nihai durumu 90
Çizelge 5.2	İSKİ Tuzla biyolojik ve ileri biyolojik atıku arıtma tesisi dizayn parametreleri 91
Çizelge 5.3	Atık ve hammadde kaynaklarına göre biyogaz ve metan oranları [62] 105
Çizelge 5.4	Model datasının tanımlayıcı istatistiksel analizi..... 106
Çizelge 5.5	Mukayese maksatlı kullanılan istatistiksel performans indikatörleri.... 126
Çizelge 6.1	10 Nöronlu hidden layerda 11 geri yayılım algoritmasının üretilen biyogaz debisi i tahmini için karşılaştırılması 129
Çizelge 6.2	trainrp ve trainscg geri yayılım algoritmalarının detaylı karşılaştırılması 130
Çizelge 6.3	Üretilen biyogaz debisi tahmini için optimum nöron sayısı..... 132

Çizelge 6.4	Üretilen biyogaz debisi tahmininde girdi değişkenlerinin optimum model performansına katkıları(gizli katmanda 14 nörona göre) 135
Çizelge 6.5	Üretilen biyogaz debisi tahmin değişkenlerinin MSE azalma yüzdeleri 136
Çizelge 6.6	Girdi ve çıktı verilerine ait üyelik fonksiyonları ve değişken aralıkları .. 142
Çizelge 6.7	Üretilen biyogaz debisi tahmininde deneysel sonuçlarla en iyi uyum sağlayan çoklu regresyon modelinin (eksponansiyel model) katsayıları ve modele ait bazı istatistiksel sonuçlar 146
Çizelge 6.8	Biyogaz üretiminin tahmininde Datafit® ile elde edilen çoklu regresyon modelleri ve regresyon analizinde hesaplanan bazı istatistiksel değerler 148
Çizelge 6.9	Biyogaz üretiminin tahmininde deneysel sonuçlarla en iyi uyum sağlayan çoklu regresyon modeli (eksponansiyel model) için tanımlayıcı bakiye hataların istatistikleri..... 149
Çizelge 6.10	Mukayese maksatlı kullanılan istatistiksel performans indikatörleri.... 152

**YAPAY ZEKÂ MODELLERİYLE TAM ÖLÇEKLİ ÇAMUR ÇÜRÜTME
REAKTÖRLERİNDEN ELDE EDİLEN BİYOGAZ ÜRETİMİNİN TAHMİNİ: YAPAY
SİNİR AĞLARI VE FUZZY LOGIC UYGULAMALARI**

Kevser KARAKAYA

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Kaan YETİLMEZSOY

Tam ölçekli bir anaerobik çamur çürütme prosesinde üretilen biyogaz debisinin tahmini için yapay zekâ esaslı modelleme teknikleri (yapay sinir ağları (YSA) ve bulanık mantık) ve çoklu regresyon metodu kullanılarak modelleme çalışmaları yapılmıştır. Çalışma kapsamında; beslenen çamur debisi, toplam katı madde (TKM) muhtevası, toplam uçucu katı madde (TUKM) muhtevası, alkalinite ve uçucu yağ asidi (UYA) konsantrasyonu olmak üzere beş bağımsız girdi değişkeni ile modelleme yapılmıştır.

YSA tabanlı olarak gerçekleştirilen birinci modelleme çalışmasında, MATLAB® V7.9.0.529 (R2009b, Lisans No: 161051) paket programı kullanılmıştır. Temel bileşen analizini (PCA) takiben 11 farklı geri yayılım (BP) algoritması kendi içerisinde ortalama karesel hata (MSE) değerleri bazında mukayese edilmiş ve scaled conjugate gradient algoritması en iyi eğitim algoritması olarak belirlenmiştir. Seçilen eğitim algoritması (trainscg) için üretilen biyogaz debisi tahmininde gizli katmanda kullanılacak optimize nöron sayısı 14 olarak bulunmuştur. Optimize edilen üç katmanlı YSA modeli (5:14:1) için determinasyon katsayısı (R^2) 0.6496 olarak elde edilmiştir.

Bu çalışma kapsamındaki ikinci yapay zekâ esaslı modelleme çalışmasında, tam ölçekli anaerobik çamur çürütme prosesinden üretilen biyogaz debisinin tahmini için bulanık mantık (fuzzy logic) tekniği ile modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, MATLAB® V7.9 yazılım programında mevcut “Bulanık Mantık Modülü” (Fuzzy Logic Toolbox) kullanılarak bir “Bulanık Çıkarım Sistemi” (Fuzzy Inference System - FIS)

oluşturulmuştur. Bu maksatla, bir MISO (çoklu girdili, tekli çıktılı) modeli geliştirilmiş ve beş girdi değişkeni yapay zekâ yaklaşımı ile bulanıklaştırılmıştır. Girdi ve çıktı değişkenleri için sırasıyla on ve yirmi seviyeli trapez üyelik fonksiyonları ile bulanık altkümeler oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında, Mamdani tipi bir bulanık çıkarım sistemi kullanılarak EĞER-İSE (IF-THEN) formatında toplam 394 adet kural yazılmıştır. Seçilen üyelik fonksiyonu için Bulanık Çıkarım Sistemindeki (FIS) OR, AND, IMPLICATION, AGGREGATION ve DEFUZZIFICATION metodlarında, literatürde en çok kullanılan (prod, max, prod, sum, centroid) FIS operatörleri esas alınmış ve en uygun FIS yapısı belirlenmiştir.

Yapılan çalışmada, bulanık mantık tahmininden çıkan sonuçlar, yapay sinir ağlarından ve üçüncü modelleme çalışması kapsamında oluşturulan çoklu regresyon modelinden elde edilen çıktı sonuçları ($R^2 = 0.5665$) ile farklı istatistiksel performans indikatörleri için karşılaştırılmıştır. Tam ölçekli anaerobik çamur çürütme prosesinden elde edilen veriler için gerçekleştirilen tüm modelleme sonuçlarına göre, önerilen MISO türü bulanık mantık tabanlı modelinin yapay sinir ağları ve çoklu regresyon modellerine kıyasla potansiyel üretilen biyogaz debisi tahmininde daha az sapma ve çok daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiş ve söz konusu çıktı parametresi için determinasyon katsayısı (R^2) 0.8765 olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tam ölçekli anaerobik çamur çürütme prosesi, biyogaz, yapay sinir ağları, bulanık mantık, regresyon modeli, modelleme

**ARTIFICIAL INTELLIGENCE-BASED MODELING FOR PREDICTION OF
BIOGAS PRODUCTION RATE FROM FULL-SCALE ANAEROBIC SLUDGE
DIGESTION REACTORS: NEURAL NETWORKS AND FUZZY LOGIC
APPLICATIONS**

Kevser KARAKAYA

Department of Environmental Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Assist. Prof. Dr. Kaan YETİLMEZSOY

In this study, artificial intelligence-based prognostic methods (i.e. artificial neural networks (ANN) and fuzzy-logic) and a multiple regression-based analysis were conducted to predict biogas production rate from a full-scale sludge digestion process. In the scope of the present work, five process-related parameters such as influent sludge flow rate, total solids (TS) content, total volatile solid (VS) content, alkalinity and volatile fatty acids (VFA) concentration were considered as the independent input variables of the proposed models.

In the first part of this study, an ANN-based modeling study was performed by using MATLAB® V7.9.0.529 (R2009b, License No: 161051) software. Following to principal component analysis (PCA), a benchmark comparison of 11 back-propagation (BP) algorithms was employed by means of their respective mean squared errors (MSE), and scaled conjugate gradient algorithm was found as the best of 11 BP algorithms. According to the selected training algorithm (trainscg), the number of neurons at the hidden layer was optimized as 14, and the coefficient of determination (R^2) was obtained as 0.6496 for the optimal three-layer ANN structure (5:14:1).

In the second part of the present study, a fuzzy-logic-based methodology was conducted to predict biogas production rate from the full-scale sludge digestion process. In this part, a "Fuzzy Logic Module" (Fuzzy Logic Toolbox) was created by

using a "Fuzzy Inference System" (FIS) within the framework of MATLAB® V7.9.0.529 software. For this purpose, a MISO (multiple inputs single output) type fuzzy-logic model was developed and five input variables were fuzzified in a knowledge-based manner. Trapezoidal membership functions with ten and twenty levels were implemented for the fuzzy subsets, and a Mamdani-type fuzzy inference system was used to implement a total of 394 rules in IF-THEN format. The most widely used methods in the literature, prod, max, prod, sum, centroid, were employed as the inference operators for IMPLICATION, AGGREGATION and DEFUZZIFICATION methods conducted in this study.

Fuzzy logic predicted results were compared with the outputs of both ANN-based model and a polynomial multiple regression-based model (the third part of the present work) derived in this study. Findings of this study clearly indicated that, compared to ANN model and conventional multiple regression approach, the proposed MISO fuzzy-logic-based model produced smaller deviations and exhibited a superior predictive performance on forecasting both COD removal efficiency and biogas production rates with satisfactory determination coefficient (R^2) about 0.8765.

Key words: Full-scale anaerobic sludge digestion process, biogas, artificial neural networks, fuzzy logic, regression model, modeling

1.1 Literatür Özeti

Atıksu arıtımı sonucu oluşan sıvı ya da yarı katı halde, kokulu, uygulanan arıtma işlemine bağlı olarak ağırlıkça %0.25 ile %12 katı madde içeren atıklar, arıtma çamuru olarak isimlendirilir. Arıtma çamuru, arıtılmamış atıksu içinde önemli miktarlarda bulunan ve ona kokulu karakterini veren maddeleri içermekte olup, arıtma ile giderilen maddelere ve bünyesindeki su muhtevasına bağlı olarak büyük hacimlerde oluşmaktadır. Ayrıca, biyolojik arıtmada oluşan ve uzaklaştırılması gereken çamur, ham atıksu içerisindeki organik maddelerin bileşimi halinde, fakat başka bir yapıda, bozunma ve kokuşma eğilimindedir. Bu nedenlerden dolayı, arıtma çamurunun işlenmesi ve bertarafı konusu, atıksu arıtımı ile uğraşan mühendislerin karşılaştığı en kompleks problemlerden biridir.

Atıksu arıtma tesislerinde ortaya çıkan ham (primer, birincil) ve biyolojik fazla aktif çamurlar anaerobik (havasız) ortamda çürütülürler. Havasız çürüme süreci, anaerobik koşullarda faaliyet gösteren mikroorganizmalar vasıtasıyla gerçekleştirilir. Organik çamurların havasız ayrışma süreci; hidroliz, asit üretimi ve metan üretimi olmak üzere genel olarak üç ardışık safhada gerçekleştirilir. Hidroliz safhasında, çözünmemiş yapıdaki kompleks organik maddeler hücre dışı enzimler vasıtası ile daha basit yapıdaki organik maddelere indirgenir. İkinci safhada, karbonhidrat, yağlar ve proteinlerden oluşan organik maddeler asit bakterilerince uçucu yağ asitlerine dönüştürülür. Metan üretimi safhasında ise metan bakterilerince ikinci safhanın son ürünü olan asetik asidin parçalanması veya CO_2 ile H_2 'in sentezi yoluyla metan ve karbondioksit üretilir.

Anaerobik çamur çürütücülerin tasarım ve işletmesinde göz önünde tutulacak en önemli kontrol parametreleri; çürütücü hacmi, ısıtma ve sıcaklık kontrolü, karıştırma, gaz üretimi ve kullanımı, reaktör kapak tipi, çıkış suyu kalitesi ve çürümüş çamurların özellikleridir. Kontrollü bir havasız çürütme işleminden geçen evsel arıtma tesisi çamurları; kararlı, kokusuz, patojen organizma konsantrasyonu düşük ve araziye serilebilecek özelliktedir. Bu açıdan, atıksu arıtma tesislerinde ortaya çıkan arıtma çamurlarının anaerobik sistemlerde çürütülmesinin, hem çevre kirliliğinin kontrolü hem de tesisin kendi içerisinde yenilenebilir bir enerji kaynağının geliştirilmesi açısından oldukça önemli potansiyel faydalar sağlayacağı aşikârdır. Her ne kadar anaerobik arıtma sistemlerinin yüksek organik kirliliğe sahip atıkların bertarafındaki avantajları literatürde vurgulansa da, bu sistemler; hidrodinamik şartlara, farklı işletme koşullarına ve reaktör türlerine bağlı olarak oldukça karmaşık bir davranış sergilemektedir. Bu açıdan anaerobik arıtma sistemleri; pH, sıcaklık, alkalinite, toplam ve uçucu katı madde, beslenen atık debisi, uçucu yağ asitleri gibi temel fizikokimyasal parametrelerin yanında, prosesteki biyokütle aktivitesinin önemli bir göstergesi olan biyogaz üretimi açısından sürekli ve dikkatli bir şekilde izlenmesi gereken biyolojik proseslerdir.

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında, tam ölçekli anaerobik çamur çürütme prosesinden elde edilen biyogaz üretiminin iyi eğitilmiş bir yapay zekâ modeli (YSA modeli veya bulanık mantık (fuzzy logic) modeli) ve çoklu regresyon modeli ile tahminine yönelik olarak bilgisayar esaslı araştırmalar yapılmıştır. Tesisten elde edilen yaklaşık 4 senelik (Ocak 2008 - Temmuz 2011) deneysel veriler için biyogaz üretiminin tahmininde, YSA, fuzzy logic ve çoklu regresyon modellerinin performansları mukayese edilmiştir ve söz konusu tam ölçekli arıtma tesisinin anaerobik çamur çürütme ünitesi için en uygun yapay zekâ modeli ortaya konmuştur. Elde edilen sonuçlara bağlı olarak bu modellerin birbirine göre avantaj ve dezavantajları belirlenmiş ve optimum model yapısı önerilmiştir.

Bu çalışmada, YSA modellemesinin gerçekleştirilmesi için MATLAB® Versiyon 7.9.0.529 (R2009b, Lisans No: 161051) yazılım programıyla gerçekleştirilmiştir. Benzer şekilde, fuzzy logic modellemesinin gerçekleştirilmesi için MATLAB® Versiyon 7.9.0.529 yazılım

programında mevcut “Bulanık Mantık Modülü” (Fuzzy Logic Toolbox) kullanılarak bir “Bulanık Çıkarım Sistemi” (Fuzzy Inference System - FIS) kullanılmıştır.

Bu çalışma kapsamında önerilen yapay zekâ esaslı modellerin tam ölçekli atıksu arıtma tesisine anaerobik çamur çürütme prosesine adapte edilmesi durumunda;

- Tam ölçekli tesiste bulunan kojenarasyon ünitesindeki türbinlerden elektrik enerjisi üretimi esnasında oluşan atık ısı kullanılarak doymuş buhar eldesiyle (buhar kazanlarında) termal çamur kurutma ünitesinde ne kadar çamur kurutulacağı önceden tahmin edilecek ve sistemden çekilecek fazla çamurun miktarı belirlenmiş olacaktır.
- Tesiste test aşamasında olan desülfürizasyon ünitesinden geçirilecek biyogazın miktarı da tahmin edilecektir.
- İdari binanın ısınmasında gerekli olan biyogaz miktarının yeterli olup olmadığı konusunda önceden bilgi sahibi olunup, söz konusu işletme ek yakıt programını belirleyecektir.
- Gün içerisinde türbinlerde yakıt olarak kullanılan doğal gaz ile karışacak olan biyogaz hacmi de belirlenmiş olacaktır.
- Başarılı bir model performansı ile muhtemel hataların önceden tespiti sağlanabileceği gibi, prosesin işletme maliyetinin düşürülmesi yönünde elde edilecek potansiyel faydaların, yapay zekâ esaslı proses kontrolü tekniğinin kullanılmasını yaygınlaştıracacağı da düşünülmektedir.

Bu çalışmada, YSA modellemesi kapsamında gerçekleştirilen araştırmalar ve alt hedefler aşağıda belirtilmiştir:

- Arıtma çamurlarının anaerobik çürütülmesine yönelik en güncel bilimsel çalışmalar irdelenmiş ve derlenmiş olup, bu alana yönelik bir veri tabanı oluşturulmuştur.
- Çevre Mühendisliği’nde YSA esaslı en güncel tahmin modelleme çalışmaları irdelenmiş ve derlenmiş olup, konu ile ilgili mevcut öneriler ve bu alandaki literatür boşluğu değerlendirilmiştir.

- Arıtma çamurlarının anaerobik çürütülmesinde tam ölçekli anaerobik çamur çürütme sisteminden elde edilen deneysel bulgular ve sistemin özellikleri irdelenmiştir.
- Tam ölçekli anaerobik çamur çürütme sisteminden elde edilen yaklaşık 4 senelik (2008-2011) deneysel bulgular ve literatürdeki veriler ışığında, bu çalışmada uygulanan YSA modelinin potansiyel girdi değişkenleri değerlendirilmiştir ve en uygun girdi-çıkı yapısı seçilmiştir.
- Bir önceki kademede belirlenen girdi-çıkı yapısı ile çok sayıda farklı eğitim algoritmasının (training algorithm) mukayesesi yapılmıştır ve en uygun eğitim algoritması belirlenmiştir.
- En uygun eğitim algoritması için farklı aktivasyon ve transfer fonksiyonlarının kombinasyonları ele alınmış ve böylece uygun model yapısı belirlenmiştir.
- Seçilen aktivasyon ve transfer fonksiyonları için ele alınan en uygun eğitim algoritmasının kendi içinde ortalama karesel hata (mean squared error, MSE) esaslı bir hata analizi yapılmış ve YSA modelinin gizli katmanındaki (hidden layer) optimum nöron sayısı belirlenmiştir.
- Önceki kademeler doğrultusunda bu çalışmada uygulanan en uygun YSA modelinden elde edilen tahmin neticeleri ile deneysel bulgular çok sayıda istatistiksel parametre (R^2 , R , Ra^2 , MAE, MSE, RMSE, $RMSE_U$, $RMSE_S$, FA2, IA, PSE, FV, vb.) için mukayese edilmiş ve tahmin sonuçlarının validasyonu/verifikasyonu yapılmıştır.

Bu çalışmada diğer bir adımı olan, fuzzy logic (bulanık mantık) modellemesi kapsamında gerçekleştirilen araştırmalar ve alt hedefler aşağıda belirtilmiştir:

- Çevre Mühendisliği'nde bulanık mantık esaslı en güncel tahmin modelleme çalışmaları irdelenmiş ve derlenmiş olup, konu ile ilgili mevcut öneriler ve bu alandaki literatür boşluğu değerlendirilmiştir.
- Belirlenen girdi-çıkı yapısı ile farklı üyelik fonksiyonlarının (membership functions, *mfs*) mukayesesi yapılmış ve en uygun üyelik fonksiyonu yapısı belirlenmiştir.
- Seçilen üyelik fonksiyonu için Bulanık Çıkarım Sistemindeki (FIS) OR, AND, IMPLICATION, AGGREGATION ve DEFUZZIFICATION metotlarında kullanılan

operatörlerin (*min, max, prod, probor, sum, centroid*) bir optimizasyonu yapılmış ve en uygun FIS yapısı belirlenmiştir.

- Seçilen üyelik fonksiyonu ve FIS yapısı için model değişkenleri arasındaki ilişkileri tanımlayan uygun bir kural tabanı (Rule Base) oluşturulmuş ve böylece nümerik veriler dilsel (logic) değerlere dönüştürülmüştür.
- Önceki kademeler doğrultusunda bu çalışmada uygulanan bulanık mantık modelinden elde edilen tahmin neticeleri ile deneysel bulgular YSA modelinde olduğu gibi çok sayıda istatistiksel parametre için mukayese edilmiş ve tahmin sonuçlarının validasyonu/verifikasyonu yapılmıştır.
- Çalışma kapsamında ayrıca DataFit® V8.1.69 (Copyright© 1995-2005 Oakdale Engineering, PA, RC167) yazılım programı ile çoklu regresyon analizi çalışması gerçekleştirilmiş ve önerilen tahmin modellerin kendi içinde ayrıca bir mukayesesi de yapılmıştır.

1.3 Hipotez

Anaerobik arıtma sistemleri giriş pH değeri, organik ve hidrolik yükleme oranları, toksik madde konsantrasyonu, şok yüklemeler gibi bir çok proses şartından kolayca etkilenmekte olduğundan, procesten sağlanacak biyogaz üretimi de uygulanan proses koşullarına ve girdilerine oldukça bağımlılık göstermektedir. Bu maksatla, çok sayıda sistem faktörünün arasındaki bu kompleks ve non-lineer ilişkinin prosesi temsil edici bir yapay zekâ esaslı tahmin modeli ile araştırılmasına yönelik modelleme çalışmalarının, değişen proses şartlarının daha hızlı ve daha hassas analizi açısından oldukça önemli olduğu düşünülmektedir.

Özellikle öğrenme kapasitelerindeki başarıları, çabukluğu, tahmin yetenekleri, girdi-çıkı ilişkisini kavrayabilecek non-lineer karakteristikleri ve kompleks bir matematiksel denklem yapısına ihtiyaç göstermemeleri sebebiyle yapay sinir ağları (YSA) ve bulanık mantık (fuzzy-logic) gibi yapay zekâ esaslı tahmin modelleme tekniklerinin son yıllarda pek çok mühendislik alanında başarıyla uygulandığı görülmektedir. Literatürde, her ne kadar anaerobik arıtma prosesleri biyokimyasal açıdan oldukça kapsamlı olarak incelenmiş olsa dahi, literatürde proses parametreleri arasındaki ilişkileri farklı

matematiksel modeller ile araştıran çalışmaların oldukça yetersiz olduğu görülmektedir. Bunun yanında, arıtma çamurlarından elde edilen biyogaz üretiminin tahminine yönelik yapay zekâ esaslı modelleme çalışmaları açısından önemli bir literatür boşluğu olduğu düşünülmektedir. Önceki modelleme çalışmaları incelendiğinde, bu çalışmaların çok büyük bir kısmının laboratuvar ölçeğinde kaldığı görülmektedir. Bu maksatla, tam ölçekli bir tesisten elde edilen verilere dayanarak gerçekleştirilmiş olan bu tez çalışmasının bu anlamda da gerçek ölçekli tesisler için önemli bir katkı sağlayacağı tahmin edilmektedir. Literatürdeki bu bilimsel boşluk göz önüne alındığında, tahmin modellemesi alanında en çok uygulanan yapay zekâ modellerinden olan yapay sinir ağları esaslı kara kutu (black box) ,bulanık mantık (fuzzy logic) esaslı gri kutu (gray box) modelleme ve çoklu regresyon tekniklerinin spesifik bir anaerobik arıtma sistemine (tam ölçekli tam karışimli anaerobik çamur çürütme) uygulanması konusundaki araştırmalar bu tez çalışmasının esasını teşkil etmektedir.

ARITMA ÇAMURU VE ÇAMUR KAYNAKLARI

2.1 Arıtma Çamuru

Atıksuların işlendiği arıtma tesislerinde, kendiliğinden çöken, sıvı veya katı halde kokulu, uygulanan işleme bağlı olarak ağırlıkça %2,25 ile %12 katı madde içeren atıklar 'ham arıtma çamuru' veya kısaca 'ham çamur' olarak isimlendirilir. Ham çamurlar stabilize edilerek ekolojik yönden kullanıma uygun hale getirildikten sonra 'işlenmiş arıtma çamuru' veya kısaca 'arıtma çamuru' olarak tanımlanmaktadır [1].

Arıtma ile giderilen maddelere bağlı olarak büyük hacimlerde çamur oluşumunun yanı sıra çamurun işlenmesi ve bertarafı konusu, atıksu arıtımı ile uğraşan mühendisin karşılaştığı en kompleks problemlerden biridir. Çamur problemi komplekstir, çünkü;

- Arıtılmamış atıksu içinde önemli miktarlarda bulunan ve ona kokulu karakterini veren maddeleri içerir.
- Biyolojik arıtmadan oluşan ve uzaklaşması gereken çamur, ham atıksu içerisinde ki organik maddelerin bileşimi halinde, fakat başka bir yapıda, bozunma ve kokuşma eğilimindedir. Çamurun sadece küçük bir kısmı katı madde, önemli bir kısmı sudur, bu nedenle büyük hacimler işgal eder.
- Arıtma tipine ve amacına göre arıtma çamurlarının cinsleri farklılık gösterir. (Çökelebilen katı maddelerin oluşturduğu ön çökeltim çamurları, kimyasal arıtma ve koagülasyon sonucu oluşan kimyasal çamurlar, biyolojik arıtma işlemleri sonucu oluşan biyolojik çamurlar ve içme suyu arıtma işlemleri sonucu oluşan çamurlar gibi)

Atık bünyesinde kirlilik oluşturan maddeleri üç grup altında toplanmaktadır:

- Çökelebilen katı maddeler
- Askıda katı maddeler
- Çözünmüş katı maddeler

Çökelebilen katı maddeler ızgara, kum tutucu ve ön çökeltim havuzlarında tutulurlar. Özellikle ızgaralarda tutulan kaba nitelikte çökelebilen katı maddeler evsel katı atık niteliğinde olduğundan herhangi bir işleme gerek duyulmadan kentsel katı atıklarla birlikte uzaklaştırılırlar. Kendiliğinden çökelebilen katı maddeler ise ön çökeltim havuzlarında tutularak su ortamından uzaklaştırılırlar. Bunların organik madde içeriği %60 ile %80 arasındadır, su muhtevası oldukça yüksektir [1].

Mekanik arıtma işlemleri ile giderilemeyen askıda ve çözünmüş haldeki katı maddeler ise ya kimyasal yumaklaştırma işlemleri ile veya yüzdürülerek su ortamından uzaklaştırılırlar. Çözünmüş organik maddeler ise biyolojik arıtmada bakteri bünyesinde tutularak canlı hücrelere yani biyomasa dönüştürülür. Oluşan biyolojik çamur son çökeltim havuzlarında çökelti olarak sudan ayrılır. Son çökeltim işlemleri sonucu oluşan arıtma çamurlarının su muhtevası ve organik madde içeriği oldukça yüksektir.

Mekanik ve biyolojik yöntemlerle giderilemeyen çözünmüş haldeki organik maddeler (azot ve fosfor) veya metal tuzları kimyasal madde ilavesi ile yapılan kimyasal yumaklaştırma işlemi ile sudan ayrılır [1].

2.2 Çamur Kaynakları

Atıksu arıtma tesisleri, evsel ve endüstriyel nitelikli atıksuların alıcı ortamlara doğrudan deşarj edilmesi halinde doğal çevremizde oluşabilecek olumsuz etkileri azaltma için tasarımlanır. Farklı atıksu karakteristiklerinden dolayı, her atıksuyun arıtımı için uygulanan arıtma işlemleri de farklı olacaktır. Genel olarak kentsel atıksu arıtımında üç temel arıtma sistemi uygulanmaktadır [1].

2.2.1 Ön Arıtma

Arıtma tesislerinde değişik tipte ve hacimde çamurlar oluşmaktadır. Bir arıtma tesisinde çamur ilk olarak ön arıtma denilen safhada oluşmaktadır. Ön arıtmada suda bulunan katı maddeler ızgaralar, kum tutucular ve ön çökeltim tankları vasıtasıyla %40-50 oranında giderilmektedir. Bu çamura birincil çamurda denilebilir. Birincil çamur katı organik madde içermektedir.

Ham ön çökeltim çamurunun su içeriği oldukça yüksektir. Bu çamur genellikle çürütülür ve çürük ön çökeltim çamuru olarak bilinir. Çürütücülerde oluşan üst sıvı (supernatant) arıtma tesisi başına geri döndürülür. Çürütücü üst suyu, yüksek katı madde konsantrasyonuna sahiptir ve bu katı maddelerin arıtma sistemi girişine geri döndürülmesi bazı işletme problemlerine neden olabilir.

Anaerobik çürütme ile uçucu katı maddelerin %50 'si giderilir, koku azaltılır ve önemli oranda patojen giderimi sağlanır, çürümüş çamur doğrudan araziye verilebilir, kurutma yataklarında suyu alınabilir veya mekanik olarak suyu alındıktan sonra nihai bertarafı yapılır [1].

2.2.2 İkincil Arıtma

İkincil arıtmada esas, çözünebilir nitelikteki organik maddelerin biyokimyasal oksidasyonu yani BOİ giderimidir. BOİ, biyokimyasal yollarla giderilir; fakat fiziksel ve kimyasal arıtma işlemleri de bu amaç için kullanılabilir. En yaygın kullanılan ikincil arıtma tesisleri aktif çamur sistemleridir. Oksijen açığını yaratan materyali gideren biyomas, sıvı içinde süspanse halde bulunur. Karışık sıvı içine hava difüzörler, yüzeysel havalandırıcılar veya farklı başka yöntemlerle verilir. Havalandırma tankındaki biyomas kültürü son çökeltim havuzunda çökeltmek zorundadır ve bir kısmı yeniden kullanılmak üzere tesis başına gönderilir. Aktif çamur sisteminde oluşan mikroorganizma miktarı sistem için gerekli olan miktarı aşarsa, bu durumda fazla katı maddelerin sistemden atılması gerekir. Bu atık biyolojik materyal atık aktif çamur olarak bilinir ve arıtma tesisi için gerçek problemlerden birisidir.

Damlatmalı filtreler de yaygın olarak kullanılan biyolojik arıtma yöntemidir. Filtre yataklarından kopan katı partiküller son çökeltim havuzunda arıtılmış sudan ayrılır. Bu çamur filtre humusu olarak bilinir ve miktarı azdır. Filtre humusu ve atık aktif çamur genellikle ham ön çökeltim çamuru ile karıştırılır ve anaerobik çürütücülerde çürütülür. Sonuç materyal karışık çürük çamur olarak isimlendirilir ve nihai bertaraftan önce suyunu almak gereklidir [1].

Anaerobik çürütücüye alternatif olarak, atık aktif çamur aerobik olarak çürütülür. Atık aktif çamur ayrı bir tank içine alınır ve birkaç gün süre ile havalandırılır. Böylece çamur içindeki uçucu katı maddeler biyolojik olarak stabilize olur. Sonuçta oluşan çamur aerobik çamur adını alır.

2.2.3 Fiziksel – Kimyasal Arıtma

Üçüncül çamur ise daha ileri teknolojiler gerektiren kimyasal arıtma, nitrifikasyon – denitrifikasyon, fosfor giderimi ve filtrasyon kısımlarında oluşan çamurdur.

Çamurların, depolanabilmesi ve yeniden kullanılabilmesi için çok iyi arıtılması ve stabilize edilmesi çok önemlidir. Çamurdaki su miktarının azaltılması, patojen denilen insan sağlığını tehdit edici organizmaların uzaklaştırılması, kokunun kontrol edilmesi ve katı madde miktarı çamur içerisinde ve stabilizasyonunda başlıca hedefler olmalıdır [1].

Çevre mühendisliğinde ilave bir çamur kaynağı da içme suyu arıtma tesisi çamurlarıdır. Arıtma tesisinde pıhtılaşma ve yumaklaştırma için yaygın olarak kullanılan alüminyum sülfat (alüm) atık alüm çamuru olarak bilinen çamuru oluşturur.

Arıtma çamurlarının işlenmesi ve bertarafında önemli konu arıtma işlemleri sonucu oluşan çamur ve katı maddelerin karakterinin bilinmesidir. Çamurun özellikleri, çamur ve katı maddenin kaynağına ve uygulanan arıtma işlemine bağlı olarak değişir. Su ve atıksu arıtma tesislerinde oluşan arıtma çamurlarının bazı fiziksel özellikleri Çizelge 2.1’de özetlenmektedir.

Çizelge 2.1 Arıtma sisteminden kaynaklanan çamur ve katı atıkların özellikleri [2]

KATI MADDE VEYA ÇAMUR	ÖZELLİKLERİ
Izgara Atıkları	Izgara çubukları arasında tutulabilecek büyüklükteki bütün organik ve inorganik maddeleri kapsar. Organik madde içeriği atıksu toplama sistemi türü ve mevsimlere göre değişir.
Kum Tutucu Atıkları	Yüksek hızlarda çökelebilen inorganik katı maddelerden oluşur. İşletme koşullarına bağlı olarak, özellikle yağ ve gres gibi önemli miktarlarda organik madde içerebilir.
Köpük, Yağ ve Gres	Köpük, ön ve son çökeltim havuzu yüzeyinden sıyrılan yüzebilir nitelikli maddelerden oluşur. Gres, bitkisel ve mineral yağla, hayvansal yağlar, sabun, yiyecek atıkları, meyve ve sebze atıkları, saç, kağıt, paçavra, sigara izmaritleri, plastik vb. maddeler içerebilir. Köpüğün özgül ağırlığı 1.0 'den küçüktür, genellikle 0.95 civarındadır.
Kimyasal Çökeltim Çamurları	Metal tuzlarının kimyasal çökmesi sonucu oluşan çamurlar, genellikle koyu renklidir, hatta çok miktarda demir içeriyorsa yüzeyi kırmızımtıraktır. Kireç çamurları gri – kahverengidir. Kimyasal çamurların hissedilebilir bir kokusu olmakla birlikte ön çökeltim çamuru kadar kötü değildir. Kimyasal çamur sümüksü yapıdadır, demir ve alüminyum hidratlar çamura jelatinimsi yapı verirler. Çamur tank içerisinde uzun süre kalırsa, ön çökeltim çamuruna benzer şekilde fakat daha yavaş bozunmaya başlar. Önemli miktarlarda gaz çıkışı olabilir, uzun depolama süresine bağlı olarak çamur yoğunluğu artar.

Çizelge 2.1 (Devamı) Arıtma sisteminden kaynaklanan çamur ve katı atıkların özellikleri
[2]

Ön Çökeltim Çamuru	Ön çökeltim çamurları genellikle gri – kahve renkli, kötü kokuludur. Uygun işletme koşullarında kolayca çürütülebilir.
Aktif Çamur	Aktif çamur genellikle kahverengi, floklu görünümündedir. Rengi koyuysa septik koşullar başlamış demektir. Renk açıksa yeterince havalanmamış olabilir. İyi koşullardaki çamur, toprak kokusundadır. Hızla septik olma eğilimindedir ve istenmeyen kokular yayabilir. Tek başına veya ön çökeltim çamuru ile karıştırılarak çürütülebilir.
Aerobik Çürümüş Çamur	Aerobik olarak çürümüş çamurun rengi açık kahverenginden koyu kahveye değişir ve floklu görünümündedir. Aerobik çürümüş çamurun kokusu rahatsız edici değildir, küf kokusu ile tanınır. İyi çürümüş aerobik çamur, kuruma yataklarında kolayca suyunu verir.
Anaerobik Çürümüş Çamur	Anaerobik çürümüş çamurun rengi koyu kahve renkten siyaha doğrudur ve önemli miktarda gaz içerir. Tamamen çürüdüğünde rahatsız edici değildir, kokusu belirsizdir, yanık lastik ve sıcak katran kokusu hissedilir. Kum yatak üzerine ince bir tabaka halinde serildiğinde, katı maddeler geride temiz bir su bırakarak çıkan gaz ile birlikte kum yatak yüzeyine taşınır. Çamur kururken gaz açığa çıkar, bahçe toprağı kokusunda çok kırılgan bir yüzey oluşur.

Çizelge 2.1 (Devamı) Arıtma sisteminden kaynaklanan çamur ve katı atıkların özellikleri
[2]

Damlatmalı Filtre Çamuru	Damlatmalı filtre humusu, floklu yapıda, taze olduğu zaman kokusuzdur. Genellikle diğer çamurlara göre daha yavaş bozunur. Filtre humusunda kurtçuklar fazla ise çabucak zararsız hale gelir. Damlatmalı filtre çamuru kolayca çürür.
Kompostlanmış Çamur	Kompostlanmış çamurun rengi koyu kahve ile siyah arasındadır, fakat kompostlaştırma işlemi sırasında eski kompost ve odun talaşı kullanılmışsa, rengi değişebilir. İyi kompostlanmış çamurun kokusu rahatsız edici değildir, bahçe tipi toprak şartlandırıcısı olarak ticari amaçlı kullanılabilir.
Septik Tank Çamuru	Septik tank çamurları siyah renklidir. Çamur uzun depolamaya rağmen iyi çürümemiş ise hidrojen sülfür ve diğer gaz çıkışlarından dolayı kokusu rahatsız edicidir. İnce tabakalar halinde serilirse, kurutma yataklarında kurutulabilir, fakat iyi çürütülmemişse drene olurken hissedilebilir koku beklenir.
Atık Alüm Çamuru	Gri – sarı renkte, kokusuzdur. Kurutma yataklarında suyunu almak zordur.

HAVASIZ ARITMANIN ÖZELLİKLERİ

3.1 Havasız Arıtmanın Esasları

Havasız arıtma, kompleks ve askıdaki organik maddelerin havasız ortamda ayrışması esnasında meydana gelen seri ve paralel çok adımlı biyokimyasal reaksiyonlardan oluşan biyolojik bir prosestir. Bu proseste ilk adımda polisakkaritler, karbonhidratlar, protein ve lipidler gibi polimerik yapıdaki kompleks maddeler hücre dışı enzimler vasıtasıyla daha küçük boyutta ve hücre zarından geçebilecek çözünabilir ürünlere dönüşürler. Nispeten basit ve çözünabilir yapıdaki bu bileşikler fermentasyon veya anaerobik oksidasyonla kısa zincirli yağ asitlerine, alkollere, karbondioksite, hidrojene ve amonyağa dönüşürler. Asetat dışındaki kısa zincirli yağ asitleri de asetata, hidrojen gazına ve karbondioksite dönüşürler. Prosesin son safhasında asetatin parçalanması veya H_2 ile CO_2 'nin sentezi yoluyla CH_4 üretimi gerçekleştirilir [3].

Kompleks bir atığın havasız arıtımındaki reaksiyon hızı, çözünmez halde olan fakat biyolojik olarak ayrışabilen moleküllerin parçalanma hızının yanı sıra reaktördeki bakteri tipine ve atığın özelliklerinin bir fonksiyonu olan besi maddesi dönüşüm verimi ile reaktörün pH ve sıcaklığına bağlıdır. Yapılan çalışmalar havasız arıtmada açığa çıkan metanın yaklaşık %70'inin CH_3COOH , %30'unun $H_2 + CO_2$ yoluyla üretildiğini göstermektedir.

3.2 Mikrobiyoloji

Havasız arıtma farklı mikroorganizma gruplarının rol aldığı oldukça kompleks bir biyokimyasal süreçtir. Bununla birlikte genelde başlıca 2 grup bakterinin, asit bakterileri ve metan bakterileri, esas görevi üstlendiği bilinmektedir. Bu iki grup da kendi arasında her biri ikiye alt gruba ayrılmaktadır. Çizelge 3.1’de başlıca anaerobik mikroorganizma grupları verilmektedir [4].

Çizelge 3.1 Başlıca anaerobik mikroorganizma grupları [4]

Asit Bakterileri	Bütirik ve propiyonik asit üretenler
	Asetik asit üretenler
Metan Bakterileri	Asetik asit kullananlar
	Hidrojen kullananlar

Havasız reaktörlerde, genetik özellikleri tam olarak tespit edilemeyen çok heterojen mikroorganizma grupları kolektif olarak görev yapmaktadır [4]. Kompleks organik maddelerin havasız ayrışması en genel halde üç safhalı bir proses halinde ele alınabilir [4].

- Yüksek molekül ağırlıklı katı ve çözünmüş organik maddelerin analizi,
- Düşük molekül ağırlıklı organik maddelerin asit bakterilerince muhtelif uçucu yağ asitleri ve müteakiben de asetik asite dönüştürülmesi,
- Asetik asit, H₂ ve CO₂’den metan üretimi.

Havasız ayrışma süreci esnasında açığa çıkan enerji mikroorganizmalarca hücre yenilenmesi ve biyokütle sentezinde kullanılır.

3.2.1 Hidroliz

Hidroliz, hücre dışı enzimlerce gerçekleştirilen oldukça yavaş bir süreçtir. Reaksiyon hızını etkileyen en önemli faktörler pH, sıcaklık ve çamur yaşıdır. Yağlar çok yavaş hidrolize olduğundan önemli nispette yağ ve diğer yavaş hidrolize olan maddeler ihtiva eden atıkların havasız arıtımında hidroliz hız sınırlayıcı bir faktör olabilmektedir [4].

Özellikle bazı selülozlu atıkların havasız arıtımında da hız sınırlayıcı rol oynar. Lignin de oldukça kompleks bir maddedir ve rasgele moleküler yapısı dolayısı ile anaerobik şartlarda hiç hidrolize olmaz veya reaksiyon hızı çok düşük olur.

3.2.2 Asit Üretimi

Asit üretimi safhasında hidroliz ürünleri asetik asit veya reaktördeki işletme şartlarının kararlı olması halinde, propiyonik, butirik, izobutirik, valerik ve izo valerik asit gibi ikiden fazla karbonlu yağ asitlerine dönüştürülür. Kararlı havasız süreçlerdeki yağ asitleri konsantrasyonu oldukça düşük seviyelerde bulunur (100-300 mg HAc/l). Havasız reaktörlerin işletmeye alma safhasında uçucu asit konsantrasyonunun 1000-1500 mg HAc/l'yi geçmemesi arzu edilir [4].

3.2.2.1 Çözünebilir Karbonhidratların Fermantasyonu

Metan bakterilerinin olmadığı ortamda anaerobik bakteriler vasıtasıyla karbonhidratların fermantasyonunun başlıca ürünleri, etanol, H₂ ve CO₂'dir. Bununla birlikte H₂ kullanan bakterilerin bulunması durumunda etanolde indirgenme ve asetat üretiminde bir artış gözlenir [3].

3.2.2.2 Aminoasitlerin Fermantasyonu

Aminoasitlerin fermantasyonu redoks reaksiyonlarını da içeren oldukça karmaşık bir prosestir. İndirgenme reaksiyonunda, havasız bakteriler tarafından kullanılan başlıca elektron alıcısı aminoasitler, keto asitler ve doymamış asitlerle protonlardır. Aminoasitlerin fermantasyonunun son ürünleri, kısa zincirli yağ asitleri, suksinat asit ve hidrojen gazıdır [3].

3.2.2.3 Uzun Zincirli Yağ Asitlerinin Anaerobik Oksidasyonu

Yağlar suda çözünmeyen ancak, organik çözücülerde çözünebilir heterojen organik bileşiklerdir. Yağ asitlerinin genel formülleri CH₃ (CH₂)_n COOH olup β oksidasyonu ile ayrıştırılırlar. β oksidasyonu ile asidin –COOH kökünden asetil grupları ardışık olarak

koparılarak asetik asit ve H_2 'e dönüştürülür. Anaerobik β oksidasyonu yolu ile doymuş ve 14 ve 18 karbonlu yağ asitleri önce asetata müteakiben de CO_2 ve CH_4 'e dönüştürülürler.

Evsel arıtma çamurları genellikle yüksek miktarda lipid ve serbest yağ asitleri içerirler. Uzun zincirli yağ asitlerinin fermentasyonu sonucu oluşan kısa zincirli yağ asitleri ya sadece asetik asit ya da asetik asit ve propiyonik asittir [3].

3.2.2.4 Kısa Zincirli Yağ Asitlerinin Anaerobik Oksidasyonu

Kısa zincirli yağ asitlerinin anaerobik oksidasyonunun başlıca ürünleri asetat ve hidrojen gazıdır. Esas karbon ürünü asetat olduğundan bu reaksiyonlar asetojenesis olarak adlandırılırlar. Kısa zincirli asitlerin ayrışmasının başarılı olması için sistemde üretilen hidrojen gazının etkili şekilde giderimi gereklidir.

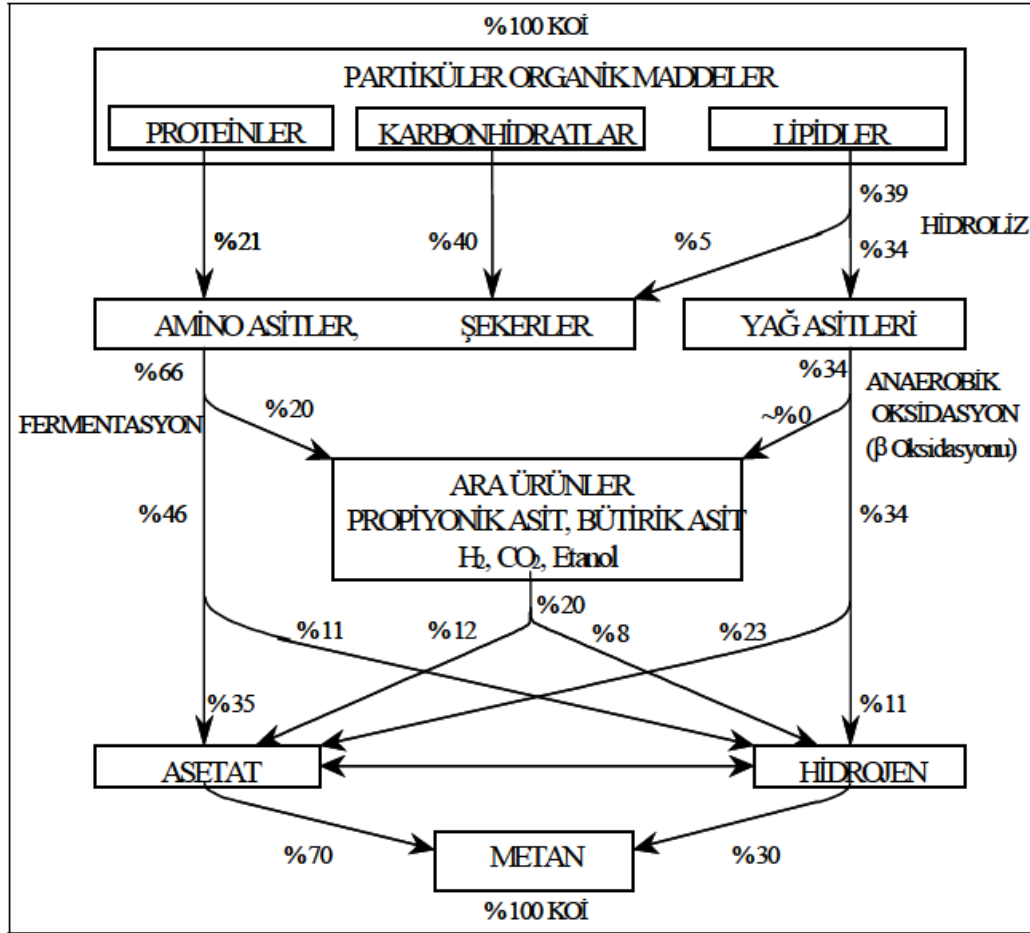
3.2.3 Metan Üretimi

3.2.3.1 Asetat, Hidrojen ve Karbondioksitten Metan Üretimi

Asetat, metan üreten bakteriler için en önemli besin kaynağıdır. Evsel çamurların çürütüldüğü reaktörlerde metan üretiminin % 65–70'i asetat metil grubunun indirgenmesi sonucu elde edilir. Şekil 3.1 'de evsel çamurların çürütülmesi esnasında organik maddelerin metana dönüşümü verilmektedir.

Hidrojen kullanan metan bakterileri H_2 ve CO_2 kullanarak CH_4 üretirler [3]. H_2 ve CO_2 'den metan üreten bakteriler, asetik asit kullanan bakterilere göre çok daha hızlı bir şekilde çoğalmaktadırlar. Dolayısı ile ortamda yeterli H_2 ve CO_2 olduğu ve H_2 kısmi basıncı da uygun olduğu sürece bu yolla CH_4 üretimi devam eder.

Metan üretimi yavaş bir süreçtir ve genellikle havasız arıtmada hız sınırlayıcı safha olarak kabul edilmektedir. Ancak metan üretimi safhasının her zaman hız sınırlayıcı olması söz konusu değildir, bazen hidroliz safhası daha kritik olabilir.

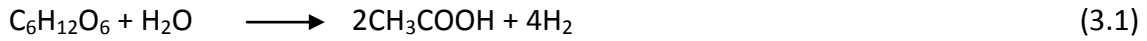


Şekil 3.1 Evsel çamurların çürütülmesi esnasında organik maddelerin metana dönüşümü [4]

3.2.4 Anaerobik Mikroorganizmalar Arasındaki Karşılıklı İlişkiler

Havasız arıtma alanındaki mevcut bilgiler, 3 grup bakterinin kolektif çalışması gerektiğini ortaya koymaktadır (Şekil 3.1). Asetat kullanan metan bakterileri fermentasyon bakterileri ile müşterek çalışarak asetik asit konsantrasyonunu ve pH'ı kontrol eder. Asetat kullanan metan bakterilerinin çoğalma hızları nispeten yavaş (minimum ikilenme hızları 2/3 gün, $T=35^{\circ}\text{C}$ de), buna mukabil fermentasyon bakterilerinin ise oldukça hızlıdır (2-3 saat, $T=35^{\circ}\text{C}$ de). Dolayısıyla organik yükün artması durumunda asit üretimi istenen şekilde gerçekleşebildiği halde, metan üretimi aynı hızla cereyan etmeyebilir ve reaktörde aşırı uçucu asit birikimi ile karşılaşılabilir. Havasız reaktörlerde arıtma sürecinin durumu biyogazdaki H_2 konsantrasyonu izlenmek suretiyle hassas bir şekilde açıklanabilmektedir. Gaz fazındaki H_2 konsantrasyonunun artması halinde hidrojen kullanan bakterilerce CO_2 ve H_2 'den CH_4 üretimi azalmaktadır.

Bu en basit şekilde glikozun şok yükler halinde beslenmesi sonucu havasız reaktörlerde oluşan aşağıdaki reaksiyonla izah edilebilir:



Sisteme glikoz ani olarak verildiğinde, fermantasyon (asit) bakterileri bu şok yüke kısa sürede uyum göstererek yukarıdaki reaksiyona göre asetik asit üretirler. Bu durum pH'ı düşürür ve metan bakterilerinin rol oynadığı reaksiyonların hızını yavaşlatarak ortamda H₂ birikmesine yol açar. Reaktörde H₂ konsantrasyonunun artması;

- Toplam asit üretim hızının düşmesine yol açar. Bu halde sistemin kararlı hale dönebilmesi için ilave zamana ihtiyaç duyulur.
- Bütirik ve propiyonik asit konsantrasyonlarının artmasına sebep olur. Bu da asetik asit üretimini ve asetat kullanan metan bakterilerinin CH₄ üretmelerini engeller.
- Hidrojen konsantrasyonunun daha artması propiyonik asit üretimini hızlandırır ve reaktörde pH daha da düşer.

Kompleks organik maddelerin metana dönüştürülmesi söz konusu üç bakteri grubunun müşterek çalışmasını gerekli kılmakla birlikte hidrojen üreten ve hidrojen kullanan bakterilerin özel önemleri vardır. Hidrojen üreten ve kullanan bakteriler için hidrojenin kısmi basıncı ile serbest enerji seviyesi arasındaki ilişki konunun önemini daha net bir şekilde açıklamaktadır. Buna göre propiyonik asidin asetik asit ve hidrojene parçalanabilmesi için ortamdaki H₂'nin kısmi basıncının 10⁻⁴ atmosferi (100 mg/l) asması gerekmektedir. Bu düşük basınç ortamında hidrojen kullanan metan bakterileri için gerekli enerji kısmi basıncın 1 atm olması haline göre önemli ölçüde azaltılmış olmakta ve sonuç olarak reaksiyon kolaylaştırılmaktadır. Diğer bir deyişle birim hacim H₂'i kullanmak için gerekli bakteri miktarı daha da azalmaktadır. Bu yüzden H₂ kullanan metan bakterilerinin maksimum hızla faaliyeti için H₂ kısmi basıncının 10⁻⁴ ~ 10⁻⁶ atm aralığında tutulması büyük önem taşır.

3.3 Çevre Koşullarının Anaerobik Süreçlere Etkisi

Her mikrobiyal etkinlik gibi anaerobik dönüşüm işlemi de çevre koşullarına bağlı olarak işler. Özellikle anaerobik dönüşüm işlemi gibi birden fazla farklı mikroorganizma grubunun ortak ve birbirine bağımlı etkinliği sonucu gerçekleşen biyolojik süreçler için çevre koşullarının önemi daha da artmaktadır. Optimal mikrobiyal etkinliğe ulaşabilmesi için optimal çevre koşullarının yaratılması gereği de göz önüne alındığında, yukarıda özetlenen üç aşamalı dönüşüm işlemini gerçekleştiren anaerobik mikroorganizmaları etkileyen başlıca çevresel koşullar ana hatlarıyla aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

3.3.1 pH ve Alkalinite

Metan bakterileri için optimum pH aralığı 6,5 - 8,2'dir. Buna karşılık anaerobik sistemlerde baskın grup olan asit bakterileri 5,5 - 6,5 pH aralığında yaşamaktadırlar. Bundan dolayı, anaerobik sistemlerde pH her iki grubun yaşayabileceği optimum aralık olan 6,5 - 7,5 aralığında tutulmaktadır [5].

Anaerobik süreçler için uygun pH aralığı, bu süreçlerde etkili olan mikroorganizmalara göre değişir [6]. pH, mikroorganizmaların yaşaması ve substratın suda çözünürlüğü üzerinde etkilidir. Ancak anaerobik sistemlerde birbirine bağlı, farklı türlerden mikroorganizmaların bulunmasından dolayı sistemi optimum bir pH aralığında tutmak gerekmektedir [5]. Sistemin iki kademeli olması halinde her kademenin uygun pH'da işletilmesi verimi artırır. Metan bakterileri pH'nın düşmesinden daha çok etkilenirler ve metan üretim hızı azalır. Eğer sistemde birçok yükleme olursa pH'nın çok iyi izlenmesi ve kontrolü gereklidir. pH'nın 6,2'nin altına düşmesi metan üretimini büyük ölçüde düşürmektedir [7]. Reaktördeki bikarbonat alkalinite düzeyi 500 mg/L'nin altına düşerse ve üretilen gazın yaklaşık olarak %38'i CO₂'den oluşuyorsa, sistemin pH'sı 6'nın altına düşer ve metanojenik bakteriler, dolayısıyla tüm sistem, toksik etki altında kalır [7].

Anaerobik sistemlerde, sistemin başlangıç pH'ı alıkonma süresinin beşinci gününe kadar değişmemekte, beşinci günden sonra sistemde oluşan organik asitlerden dolayı

hızlı bir düşüş göstermektedir. Fermantasyonun beşinci ile on yedinci günleri arasında pH'da küçük dalgalanmalar görülmektedir. Bunun nedeni, fermantasyonun on yedinci günden sonra organik asitlerin metana dönüşmesiyle pH'ın yükselmesi ve asit oluşumu ile pH'ın düşüşüdür. Sistemde metan üretiminin başlamasıyla, oluşan organik asitler sistemde beklemeden metana dönüşmekte ve pH bundan sonraki aşamada başlangıç pH'ına yaklaşmakta ve küçük dalgalanmalarla belirli pH aralığında sabit kalmaktadır [8].

Lay vd. [9], arıtma çamurunun kararlı hale getirilmesi için uygulanan anaerobik işlemde, pH ve nem içeriğinin etkilerinin araştırıldığı çalışma ile metan üretim veriminin (ml/g kurumadde. d), tüm nem içeriklerinde ve pH 7 de maksimum olduğunu rapor edilmektedir.

3.3.2 Besin Gereksinimi

Bütün biyolojik sistemlerde mikroorganizmaların üreme ve yaşamaları için gerekli temel besin elementleri (C, N, P, K) ve diğer iz elementlerin bulunması gerekmektedir [10].

Anaerobik mikroorganizmaların azot ve fosfor gibi makro nutrientlerin yanında demir, nikel, kobalt gibi mikro nutrientlere de ihtiyaç duyduğu bilinmektedir [6].

Genellikle KOİ:N:P ya da KOİ:N besin ihtiyacının belirlenmesinde kullanılır. N:P oranı literatürde 7 olarak verilmiştir [11]. Teorik minimum KOİ:N oranı 350:7, yüksek yüklü sistemlerde ise 400:7 olarak bulunmuştur. Asetik asiti metan ve karbondioksit döndüren bakterilerin büyüme için demire ihtiyacı vardır.

Kalsiyum, sodyum, potasyum, magnezyumun ise düşük derişimler de sisteme yararlı olduğu da bilinmektedir [11].

Hayvansal atıklarda, besin maddeleri yeterli derişim ve uygun besin maddesi oranlarında bulunmaktadır. Ancak bazı tarımsal atıklarda (saman, ot, vb.) bu elementlerden bazıları yeterli miktarlarda bulunmamaktadır. Bundan dolayı anaerobik sistemlerde, besin element derişimleri kullanılan hammaddeye göre ayarlanmalıdır [10].

3.3.3 Sıcaklık

Sıcaklık; biyolojik sistemlerde, mikroorganizmaların büyüme hızına, mikroorganizma üretim hızına ve substrat tüketim hızına etkili olduğundan anaerobik sistemlerde en önemli parametrelerden biridir [12].

Çalışmalardan ve verilerden de anlaşılacağı gibi anaerobik sistemlerle çalışılırken, maksimum biyogaz ve metan üretim verimi için sistemdeki mikroorganizmaların yaşaması için gerekli optimum sıcaklığın ayarlanması gerekmektedir [13]. Anaerobik süreçler mezofilik ve termofilik olarak çalıştırılmakta ise de genellikle mezofilik olarak işletilmektedir [14]. Bu optimum sıcaklık aralıkları ise mezofilik mikroorganizmalar için 30-40 °C, termofilik mikroorganizmalar için 55-60 °C 'dir [13].

Artan sıcaklıkla beraber anaerobik mikroorganizmaların substrat giderim ve içsel solunum hızları da artar ve bu nedenle termofilik anaerob mikroorganizmaların substrat giderim hızı ve hücre büyüme hızı mezofilik mikroorganizmalara göre daha yüksektir. Ancak net mikroorganizma sentez oranının daha düşük olması nedeniyle termofilik sistemlerin işleme alınması çok daha yavaştır. Ayrıca termofilik sistemler, organik yükteki ve substrat içeriğindeki değişimlere ve çevresel parametrelerdeki değişikliklere karşı çok daha duyarlıdır. Sıcaklığın 20 °C'nin altına düşmesi ile anaerobik mikroorganizmalar etkinliklerini önemli ölçüde yitirirler [14]. Ekonomik açıdan, bu sıcaklıkların seçimi atığın organik yükü ve böylece de arıtmada üretilecek metanın miktarına bağlıdır. Termofilik sıcaklıklarda (50 - 60 °C) yüksek hacimsel yüklemeler uygulanabilmesinin yanında (20 kg KOİ/m³gün kadar) daha kararlı ve hijyenik bir son ürün ortaya çıkar.

Metan gazı üretimi sıcaklık arttıkça artar; Henze ve Harremoes'a göre [11], 50 - 60 °C'de üretilen metan gazı miktarı 35 °C'den % 25 ile % 50 daha fazla olmaktadır. Bunun yanında 54 °C'de uygulanan organik yük miktarının, 38 °C'de işletilen bir sisteme göre 2 - 4 katı fazla olduğu gözlenmiştir. Ancak reaksiyon hızının termofilik sistemlerde daha fazla olması her zaman bu sistemleri üstün duruma getirmez. Çünkü yüksek sıcaklığı sağlamak için kullanılan ekstra enerji giderlerini dengeleyemez. Bu nedenle termofilik

sistemler çoğu zaman ekonomik değildir. Bu sistemlerin kullanılması, 55 °C'nin üstünde bir sıcaklıkla gelen atıksular dışında doğru değildir [15].

Anaerobik işlemlerde sistem sıcaklığı, kullanılacak hammadde ile yapılan deneylerden elde edilecek optimum koşullar göz önünde bulundurularak belirlenmeli, sistem bu koşullara göre oluşturulmalı ve sistemin söz konusu sıcaklığı ısı yalıtımı veya ısıtma ile korunmalıdır [5].

Desai vd. [16], sıcaklığın ve alıkoyulma süresinin organik maddelerin anaerobik fermentasyonuna etkisinin araştırıldığı çalışmada, uygulanan tüm alıkoyulma sürelerinde, 40 ve 60 °C sıcaklıklarda biyogaz üretim verimi ve KOİ giderim verimlerinin maksimum olduğu rapor edilmiştir. Ancak 60 °C'de yapılacak çalışmaların ısıtma gereksiniminden dolayı ve 40 °C'den yüksek sıcaklıklarda üretilen biyogazdaki metan içeriğinin azalmasından dolayı, anaerobik işlemin 30-40 °C arasındaki sıcaklıklarda yapılmasının uygun olacağı belirtilmiştir.

Van Den Berg [12], sıcaklığın asetatın metana dönüşümüne etkisinin araştırıldığı çalışmada 15-45 °C arasında değişik sıcaklıklarda yapılan deneylerde, alıştırma (log) fazı sonunda maksimum biyokütle derişiminin (100 mg/l), maksimum asetat dönüşüm hızının (0,08 mmol asetat/m_gkurukütle.d) ve dönüşen asetat kütle başına üretilen maksimum kuru mikroorganizma kütlelerinin (1,0-1,1 mgbiyokütle/molasetat), 35 °C'de gerçekleştiği rapor edilmiştir.

Ahn vd. [17], kağıt hamuru üretiminden çıkan atıksuyun anaerobik işleminde, sıcaklık değişimlerinin metan üretime etkileri, birisi termofilik (55 °C), diğeri mezofilik (35 °C) iki adet UFAF reaktörde 488 günlük alıkoyulma süresinde araştırılmıştır.

Reaktörler; 1,95 kg KOİ/m³.gün organik besleme hızında ve sıcaklık değişimlerinin reaktör performansına etkilerinin anlaşılabilmesi için 448. günden sonra, mezofilik reaktörün sıcaklığı 448-458 günler arası oda sıcaklığına (18-24 °C) daha sonra 15 gün 35 °C'de, 476. günden sonra 5 gün 45 °C'de, 5 gün 55 °C'de ve son 12 gün tekrar 35 °C'de, termofilik reaktör ise 448 - 458 günler arası 45 °C'de, daha sonra 5 gün 35 °C'de, 5 gün 55 °C'de, 476-486 günler arası 65 °C'de, ve son 12 gün tekrar 55 °C'de çalıştırılmıştır.

Çalışma sonucunda, reaktörlerde sıcaklık düşüşlerinde biyogaz üretim miktarlarında azalma, düşük KOİ giderimi, çıkışta yüksek AKM ve reaktörlerde UYA birikimi gözlenmiştir. Reaktörlerin sıcaklıkları optimum sıcaklığa getirildiğinde ise mikroorganizmaların birkaç günde tekrar ortama alıştıkları, termofilik mikroorganizmaların sıcaklık değişimlerine, mezofilik mikroorganizmalardan daha çabuk uyum sağladıkları belirtilmiştir. Biyogaz üretim miktarının ise sıcaklık artış ve azalmalarında azaldığı, sıcaklığın tekrar optimum sıcaklıklara getirilmesi ile maksimuma ulaştığı belirtilmiştir.

3.3.4 Zehirlilik

Atıksularda organik ve inorganik zararlı maddelerin belirli derişimlerin üzerinde bulunması mikroorganizmaların etkinliklerinin yavaşlamasına veya durmasına neden olmaktadır. Anaerobik bakteriler birçok zehirli maddeye alışıp dayanabilmekte hatta parçalayabilmektedir. Anaerobik sistemlerde arıtımı mümkün olmayan bazı bileşiklerin belirli bir alıştırma devresinden sonra anaerobik süreçlerde giderilmesi mümkün olabilmektedir [7]. Tüm anaerobik mikroorganizmalar arasında metanojenler zehirliliğe karşı en duyarlı gruptur. Ancak metanojenlerin birçok toksik maddeyi belli düzeylere kadar dayanabildiği ve bu maddelere alışabildiği bilinmektedir. Ayrıca birçok zehirli maddenin, belirli derişimlerin altında, anaerobik olarak arıtılabilir olması, zehirli etkileri de azaltmaktadır. Düşük derişimlerde anaerobik sistemlere olumlu etkileri olan birçok katyon (sodyum, potasyum, kalsiyum, magnezyum, amonyum) yüksek derişimlerde zehirli etkiye sahiptir [14].

Eismann vd [18], domuz gübresinin anaerobik fermentasyonunda fosfinin inhibisyon etkilerinin araştırıldığı çalışmada, logaritmik derişim-etki korelasyonunda 150 ppm fosfinin biyogaz üretimini % 50 azalttığı, asetat ve yeast extract ile yapılan çalışmalarda ise 1000 ppm'e kadar fosfin derişiminde biyolojik aktivitede düşüş olmadığı belirlenmiş ve gaz fosfinin özellikle hayvan gübrelerindeki maddelerin parçalanmasına yol açan mikroorganizmalar üzerine etkili olduğu belirlenmiştir.

G. Zayed vd. [19], peyniraltı suyunun anaerobik sabit yataklı reaktörde anaerobik arıtımında bakır(II) klorür (CuCl_2), çinko klorür (ZnCl_2) ve nikel klorürün (NiCl_2) toksik etkilerinin araştırıldığı çalışmada 10 mg CuCl_2/L , 40 mg ZnCl_2/L ve 60 mg NiCl_2/L derişimlerde bu metal iyonlarının bulunması durumunda metan üretim veriminin % 50 azaldığı belirlenmiştir. Çalışmada, ayrıca, metal tuzları ile birlikte eşmolar sülfür eklenmesiyle metal katyonlarının metal sülfürler halinde çökmesi sonucu metal katyonlarının toksisitesini engellediği, sülfür iyonlarının ortamda bulunması halinde, 60 mg NiCl_2/L 'ye kadar NiCl_2 derişiminin toksik etki göstermediği belirlenmiştir.

Vijayaraghavan vd [20], tabakhane atıksularının (1,5 ile 16,5 gKOİ/L) yukarı akışlı anaerobik kontak filtre reaktörde anaerobik arıtımında tanin, sülfür ve krom(III)'ün reaktör performansı, KOİ giderimi ve biyogaz üretim verimine etkileri araştırılmıştır. Çalışma, 36, 48 ve 60 saatlik hidrolik alıkonma sürelerinde yürütölmüş ve çalışma sonunda taninin 914 mg/L ve üzerindeki derişimlerde reaktörde biyokimyasal olayları durdurduğu ve kütlece % 70 ve üzeri tanin derişiminin anaerobik mikrobiyal üremeyi durdurduğu belirlenmiştir. Sülfür ve krom(III)'ün ise sırasıyla 180 mg/L ve 140 mg/L derişimlerinin üzerinde toksik etki yaptığı belirlenmiştir.

Çizelge 3.2 Bazı maddelerin anaerobik işlemleri durdurucu derişimleri [21]

MADDE	TOKSİSİTE DERİŞİMLERİ (mg/l)
NH_4^+ , NH_3	1500 – 2000
H_2S , HS^- , S^{2-}	100-150
Na^+	3500 - 6000
K^+	2500 - 5000
Ca^+	2500 - 5000
CN^-	0,5 - 1
Alkil benzen sülfonat	500 - 700
Mg^{+2}	1000 – 1500
Cr^{+3}	150 – 400

Çizelge 3.2 (Devamı) Bazı maddelerin anaerobik işlemi durdurucu derişimleri [21]

Cr⁺⁶	3
Zn⁺²	1
Ni⁺²	2
Cu⁺²	0,5
S⁻²	200

3.3.5 Kükürt

Birçok sanayi atıksuları yüksek derişimlerde SO_4^{-2} ve SO_3^{-2} içermektedir. Anaerobik koşullarda sülfat, sülfat gideren bakteriler tarafından biyokimyasal tepkimeler sonucunda H_2S 'e dönüşürler. Metan bakterileri ile sülfat bakterileri aynı enerji kaynaklarını (asetik asit ve hidrojen) kullanırlar. Sülfat gideren bakteriler enerjetik olarak daha avantajlı olduklarından, elektron akışını sülfat giderimine çevirerek metan üretiminin düşmesine neden olurlar. Sülfatın en önemli etkilerinden birisi de oluşan H_2S 'in yüksek derişimlerde anaerobik arıtımı inhibe etmesidir [7].

3.3.6 Oksijen

Anaerobik arıtmada sistemin kararlılığının sağlanması için ortamda kesinlikle serbest oksijenin bulunmaması gerekir. Bu nedenle oksijen NO_3 , H_2O_2 , SO_4^{-2} vb. gibi maddelerde olduğu gibi bağlı olsa bile anaerobik arıtım sistemlerinin verimlerine olumsuz etki yapmaktadır [7].

3.3.7 Amonyak

Protein ve amino asit gibi maddelerin anaerobik ayrışması sonucu NH_4^+ da açığa çıkar. Azotça zengin sanayi atıksularında problem oluşturur. Anaerobik reaksiyonlar sonucu organik maddenin yapısındaki organik azot, amonyağa dönüşmektedir. Amonyak, sistemde ortamın pH' na bağlı olarak NH_4^+ iyonu şeklinde veya iyonlaşmış yapıda bulunabilir.



Bu denge düşük H^+ iyonu derişimlerinde NH_3 lehinde değişmektedir. İyonlaşmamış NH_3 anaerobik mikroorganizmalar için zehirli etkiye sahiptir. Kritik derişim 100-200 mg/l'dir [7].

3.3.8 Uçucu Asitler

Asit üretimi basamağında oluşan uçucu asitlerin derişimlerinin yükselmesi sistemde inhibisyona neden olur. Toplam uçucu asit derişimi (TUA) değeri 1000-1500 mg/l 'yi aşmamalıdır. Güvenli bir işletme için sistemin yüklemesi TUA/Alkalinite oranı 0,1'i geçmemelidir. İyi işleyen bir sistemde uçucu yağ asitlerinin derişimi 500 mg/l'yi aşmamalı ve normalde 250 mg/l'den daha az olmalıdır. Propiyonik asit derişiminin artması asetik asit üreten bakterilerin etkilendiğinin işaretidir [15].

3.3.9 C/N Oranı

Biyogaz üretiminde kullanılacak hammaddedeki C/N oranı en önemli faktörlerden biridir. Organik maddede karbon; karbondhidrat şeklinde, azot da; protein, nitrat veya amonyak şeklindedir. Anaerobik bakteriler karbonu enerji kaynağı olarak, azotu ise yeni hücrelerin oluşumunda yapı malzemesi olarak kullanırlar. C/N oranının 30/1 olması istenir. Karbon azota oranla 25-30 kat daha fazla kullanılır. Madde bu orana sahip değilse diğer organik maddelerle karıştırılarak istenen C/N oranı sağlanır. Organik madde azot bakımından zengin ise (C/N oranı 10/1 veya daha az) arıtım sırasında NH_3 oluşur. Bundan dolayı da özellikle yüksek pH' larda toksik etkiye yol açar. Azotun çok az olması halinde ise (C/N oranı 50/1 veya daha yüksek) azot eksikliği ve yetersiz tampon kapasitesi oluşur [22].

3.3.10 Alıkoyulma Süresi

Maddenin alıkoyulma süresi, anaerobik sistemlerde uçucu organik maddelerin reaktörde kaldığı süredir. Uçucu madde alıkoyulma süresi ve hidrolik alıkonma süresi olmak üzere iki türlü kullanımı vardır. Uçucu madde alıkoyulma süresi (SRT) sistemdeki

mikroorganizmaların uçucu maddeyi dönüştürmek için kullandıkları süredir ve sistemdeki uçucu madde kütlesinin, sistemden çıkan uçucu maddenin kütleli hızına oranıdır. SRT, anaerobik sistemlerde 2-6 gün arasında değişmektedir.

Hidrolik alıkoyulma süresi (HRT) ise reaktör hacminin sisteme verilen maddenin hacimsel hızına oranıdır. Anaerobik sistemlerde geri dönüşüm olmadığında ve genellikle organik maddeler sulu çözeltiye yada sulu karışımlar halinde beslendiğinden SRT, HRT ye eşittir. Hem SRT hem de HRT organik maddelerin yeteri kadar parçalanması ve optimum gaz üretim veriminin sağlanmasına, bu da sıcaklığa bağlıdır. HRT, anaerobik sistemlerde sıcaklığa da bağlı olarak 10-31 gün arasında değişmektedir [10].

Çizelge 3.3 Anaerobik süreçler için optimum çevre koşulları [15]

PARAMETRE	OPTİMUM KOŞULLAR
Aritılan atığın bileşimi	Karbon, temel (N, P) ve iz elementler bakımından dengeli olmalı, O ₂ , NO ₃ , H ₂ O ₂ , SO ₄ gibi oksitleyici maddeler, toksik ve inhibitör elementler içermemeli.
KOİ/N/P	300/5/1
pH	6,5 - 8,2
Sıcaklık	25 - 40 (35-37) °C; 50 – 60 (55) °C
Alkalinite	1000 - 4000 (2000) mg/l CaCO ₃
TUA	< 1000-1500 mg/l Asetik asit
TUA/Alkalinite	< 0,1

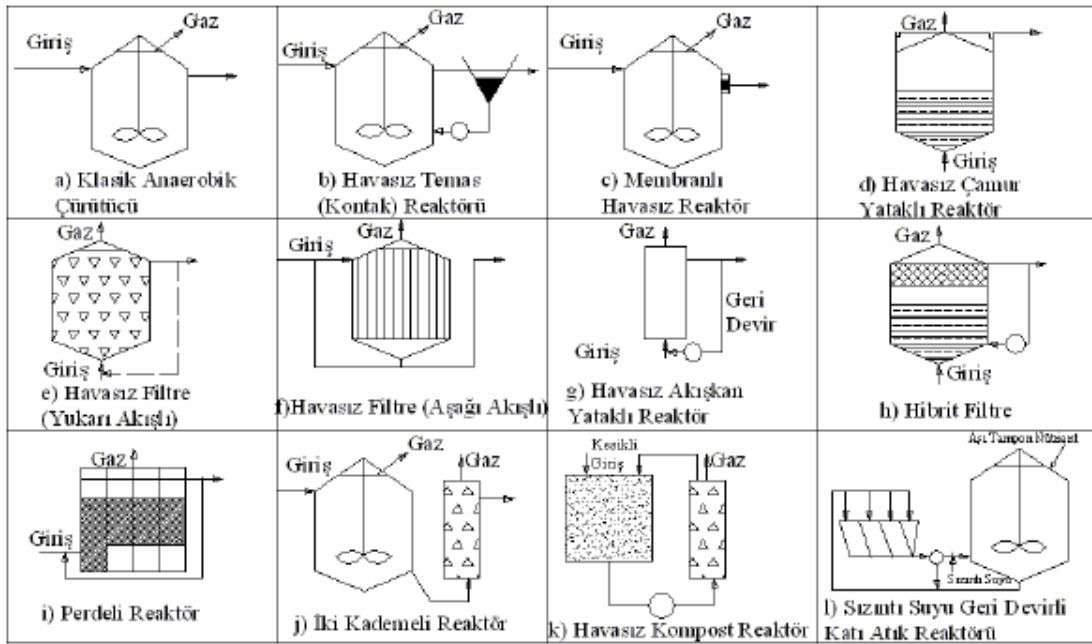
3.4 Havasız Arıtma Sistemleri

Hacimsel organik yükün olabildiğince arttırılarak, havasız reaktör hacminin küçültülmesi ve karşılaşılan problemlerin giderilmesi maksadı ile çeşitli havasız arıtma sistemleri geliştirilmiştir. Havasız arıtma alanında uygulanmakta olan başlıca reaktör tipleri Şekil 3.2’de, organik yük ve KOİ giderme verimleri bakımından genel mukayeseleri ise Çizelge 3.4’de verilmiştir. Bu sistemlerin temel karakteristikleri detaya inilmeksizin aşağıda verilmiştir [4].

Çizelge 3.4 Havasız arıtma sistemlerinin organik yük ve verim bakımından mukayesesi [15]

REAKTÖR TİPİ	ORGANİK YÜK	KOİ GİDERME
	kg KOİ/m ³ -gün	verimi %
Havasız temas reaktörü (HTR)	1-6 (3-5)	80-95
Havasız filtre (HF)	1-18 (7-10)	80-95
Havasız akışkan yataklı reaktör (HAYR)	1-60 (15-30)	80-90
Havasız çamur yatağı (HÇYR)	5-15 (10-15)	85-95
Membranlı havasız reaktör (MHR)	1-30 (15)	85-95

*Parantez içindeki rakamlar, kurulu tesislerdeki uygulanmış yüklerdir.



Şekil 3.2 Havasız reaktör tipleri [15]

3.4.1 Klasik Havasız Çamur Çürütücü

Tam karışım ve geri devirsiz bir reaktördür (Şekil 3.2.a). Çamur yaşı, hidrolik bekleme süresine eşittir. Yavaş çoğalan metan bakterilerinin yıkanmasının önlenmesi için çamur yaşının 10 günden az olmaması gerekir. Pratikte bu süre 15-20 gün alınır. Hacminin çok büyük olması ve çıkıştaki askıda katı madde konsantrasyonunun yüksek

oluşu gibi mahzurları dolayısıyla, klasik havasız çürütücü arıtma çamurlarının çürütülmesi dışında endüstriyel atıksu arıtımında pek kullanılmamaktadır.

3.4.2 Havasız Temas Reaktörü

Bu prosesin klasik havasız çürütücüden yegane farkı çöktürme tankı ve geri devir düzeni ilave edilmiş olmasıdır (Şekil 3.2.b). Bu suretle çamur yaşı arttırılarak sistemin arıtma veriminin yükseltilmesi ve hacminin azaltılması sağlanmaktadır. Bu sistemin uygulamadaki en mühim sorunu anaerobik çamurların çöktürülmesindeki zorluklardır. Sistemdeki askıda katı madde cinsinden çamur konsantrasyonunun 12.000 mg/l'yi aşması halinde çökelmede ciddi sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple maksimum organik yükün günde 5 kg KOİ/m³'ü aşmaması gerekmektedir.

3.4.3 Havasız Filtre

Havasız filtre, içerisinde kırma tas veya plastik dolgu maddesi bulunan ve tabandan beslenen düşey akışlı bir anaerobik reaktördür (Şekil 3.2.e-f). Dolgu malzemesi bakterilerin tutunması için büyük bir yüzey sağlar. Havasız filtrelerdeki mevcut biyokütlenin yaklaşık %60'ını filtre malzemesinin boşluklarında biriken biyokütle oluşturmaktadır ve organik madde giderimi ekseriyetle bu mikroorganizmalar tarafından giderilmektedir. Çeşitli inhibitörler karşısında biyokütle kaybı sınırlı olup, sistemin yeni durumlara intibakı kolay olabilmektedir. Ancak sistemde biyofilm oluşumu uzun zaman almakta, yüksek miktarda askıda katı madde içeren sularda çabucak tıkanıklık meydana gelmektedir. Sistemin diğer bir dezavantajı ise sentetik dolgu malzemesinin pahalı oluşudur.

3.4.4 Havasız Akışkan Yataklı Reaktör

Biyokütle akışkan haldeki 0,1-0,6 mm çaplı kum, antrasit, aktif karbon gibi ince tanecikli yatak malzemesi yüzeyinde tutunur (Şekil 3.2.g). Akışkan haldeki yatak malzemesinin özgül yüzeyi 2000-5000 m²/m³ gibi yüksek değerlere, biyokütle konsantrasyonları da 30.000 mg/l'nin üzerine çıkabilmektedir. Çok yüksek organik yükler (40-60 kg KOİ/m³-gün) uygulanabilen ve hidrolik bekletme süresi 1,5-3 saate indirilebilen bu sistemin en

büyük mahzuru, yatağı akışkan halde tutmak için yaptırılan geri devir sebebiyle terfi maliyetinin bir miktar yüksek olmasıdır.

3.4.5 Havasız Çamur Yataklı Reaktör

Havasız filtrelerdeki sentetik filtre malzemesinin pahalılığı ile askıdaki katı maddelerle tıkanma, büyük debilerdeki aşırı yük ve biyokütle kaybı gibi mahzurları taşımayan ve içerisinde yatak malzemesi bulunmayan bir sistemdir (Şekil 3.2.d). Arıtma, reaktörün alt kısmındaki çamur yatağı ile bunun üst kesimindeki çamur örtüsüne gerçekleştirilmektedir. Beslenen atığın organik madde muhtevasına bağlı olarak, kuvvetli atıklarda çamur yatağı, seyreltik atıklarda ise çamur örtüsü arıtmada ağırlıklı rol oynamaktadırlar. Evsel atıksularda da uygun olan bu sistemle 40.000 mg/l'nin üzerinde biyokütle konsantrasyonuna ulaşılabilir.

Ağır aktif granüler çamur yatağına sahip olması sayesinde bekletme süresinin 3-4 saat gibi değerler alması halinde dahi biyokütle kaybı olmaksızın sistem işletilebilmektedir. Yüksek verimi ve basitliği sebebiyle dünyada en yaygın uygulama alanı bulan sistemdir.

3.4.6 Havasız Çamur Yataklı Filtre

Havasız çamur yataklı filtre, alt kısım havasız çamur yatağı üst kısmı ise havasız filtre olarak teşkil edilen bir reaktördür (Şekil 3.2.h). Filtre kısmının hacmi toplam hacmin %50-70'i arasında değişir. Bu kısımdaki dolgu yüksekliği de 2 m'den az tutulmamalıdır. Bu tip reaktörlerde arıtmanın çok büyük bir kısmı alt kısımdaki havasız çamur yatağında gerçekleştirilir. Üstteki filtre ise genellikle adeta bir lamelli çökeltici gibi katı/sıvı ayrımını sağlar ve reaktörden biyokütle kaçışını azaltır.

Ancak, dolgu malzemesi içinden geçen biyogaz türbülansa sebep olmakta bu sebeple çökeltme beklenen seviyede gerçekleşmemektedir. Bu yüzden dolgulu kısmın reaktör dışında teşkil edilmesinin daha faydalı olacağı belirtilmektedir. Bu halde havasız çamur yataklı reaktör çıkışında teşkil edilecek bir yukarı akışlı havasız filtrede ayrıca hidrolik bekletme süresinin 2 saat olması yeterlidir. Havasız çamur yataklı filtrenin 5-10 kg KOİ/m³-gün'lük organik yüklerde başarıyla çalışan birçok kurulu örneği bulunmaktadır.

3.4.7 Membranlı Havasız Reaktör

Ana kısmı tam karışimli anaerobik bir reaktörden oluşan bu sistemde katı madde ayırımında çökeltme yerine bir ultrafiltrasyon birimi kullanılmaktadır (Şekil 3.2.c). Ultrafiltrasyon birikimindeki gözenekli sentetik membran üzerinden akarken suyu alınan biyokütle hemen sisteme geri döndürülmekte ve böylece çamur yası istenildiği kadar arttırılabilmektedir. Genelde KOİ değeri 10.000 mg/l'nin üzerindeki çok konsantre ve debisi nispeten küçük endüstriyel atıklar için uygun olan bu tür sistemlerle, aşı çamuruna fazlaca bağımlı olmaksızın 1-2 hafta sonunda 10-15 kg KOİ/m³-gün'lük organik yüklemelere ulaşılabilir.

3.4.8 Havasız Ardışık Kesikli Reaktör

Havasız ardışık kesikli reaktörde; doldurma, arıtma, çökeltme ve boşaltma devrelerini ihtiva eden kesikli bir işletme uygulanır. Reaktör hacmi, sürekli beslenen reaktörlere göre bir miktar büyük tutularak mükemmel çökeltme özelliği olan granüler biyokütle ile yüksek verimde havasız arıtma sağlanabilir. Çökeltme süresi tipik olarak 30 dak. civarındadır. Havasız ardışık kesikli reaktörde uçucu asit konsantrasyonu genelde çok düşüktür. Bunun en önemli sebebi, sistemde düşük Ks seviyesinde çoğalabilen metan bakterilerinin selektif olarak gelişmesidir. Havasız ardışık kesikli reaktörler önemli uygulama potansiyeli olan ve işletilmesi kolay bir sistem olarak görülmektedir.

3.4.9 Havasız Kompost Reaktörleri

Havasız kompost reaktörleri katı madde oranı %20-35 olan organik katı atık ve/veya arıtma tesisi çamurlarının mezofilik veya termofilik işletme şartlarında havasız olarak kompostlaştırıldığı sistemlerdir (Şekil 3.2.k). Özellikle son 10 yıldan bu yana organik kısmı ayrı toplanan evsel katı atıklar ile arıtma çamurları ve zirai atıkların karışımıyla oluşturulan organik katı atıkların 3-4 haftalık hidrolik bekleme süresi sonunda zirai gübre değeri yüksek kompost haline dönüştürülmesi mümkün olmaktadır. Bu sistemde elde edilen kompost, bakteriyolojik emniyet açısından en az 2 haftalık bir havalı kompostlaştırmaya tabi tutularak olgunlaştırıldıktan sonra kullanılmaktadır.

3.4.10 İki Kademeli Havasız Arıtma Sistemleri

Havasız arıtma sistemleri, asit ve metan üretiminin tek bir reaktörde meydana geldiği Tek Kademeli Reaktör şeklinde uygulanmak yerine bu iki safhanın, ayrıldığı 2 kademeli, (asit reaktörü – metan reaktörü), reaktörler tarzında da kullanılabilmekte olup son yıllardaki eğilim bu ikinci yöndedir. Faz ayırımına gitmek suretiyle havasız arıtmada organik yükün %50'ye yakın oranda arttırılması mümkündür. Asit reaktörünün metan reaktörü ile aynı tip bir sistem olması da gerekmez. Böyle bir uygulama ile toplam hacimde de %30-40 oranında bir küçülme sağlanabilmektedir. Tam karışımli bir havasız tank veya derin havasız lagün rahatlıkla asit reaktörü olarak kullanılabilir (Şekil 3.2.j). Havasız reaktörlerin tek veya iki kademeli işletme hallerinin karşılaştırılması Çizelge 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.5 Tek ve iki kademeli işletmenin karşılaştırılması [15]

	TEK KADEMELİ	İKİ KADEMELİ
Avantajları	• Daha az yatırım maliyeti • İşletme ve kontrol kolaylığı	• Daha hızlı işletmeye alma • Prosesin daha kararlı olması • Arıtma veriminin daha yüksek oluşu • Katı organik maddelerin daha iyi parçalanması
Dezavantajları	• Daha uzun sürede işletmeye alma • Daha kararsız proses • Organik yük değişimlerine daha hassas oluşu	• Daha yüksek yatırım maliyeti • Kontrolün daha zor oluşu • Dikkatli pH kontrolü gerekliliği

Günümüzde yaygın olarak kullanılan 3 ana sistem olan havasız çamur yataklı reaktör (HÇYR), havasız filtre (HF) ve havasız akışkan yataklı reaktörün (HAYR) proses davranışları bakımından karşılaştırılması Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6 Yaygın kullanılan havasız arıtma sistemlerinin karşılaştırılması [15]

KARAKTERİSTİK DAVRANIŞ	HÇYR	HF	HAYR
İşletmeye Alma	-	-	-
Biyokütle (çamur) Gelişimi	++	+	++
Sıvı Fanın Karışımı	-	+ (+)	++
Hidrolik Şoklara Karşı Koyma	-	++	++
Organik Şoklara Karşı Koyma	+	+	+
Askıda Katılara Duyarsızlık	-	+	++
Tıkanmaya Uyarsızlık	++	-	++
Biyokütle Yüzme Riski	-	+	+
Reaktörün Kontrol İhtiyacı	+	+	-

-: yetersiz, +: iyi, ++: çok iyi

Arıtma uygulamaları esnasında bu üç sistemde yaşanan en önemli işletme sorunları Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.7 HÇYR, HF ve HAYR sistemlerinin başlıca işletme sorunları [15]

HÇYR	HF	HAYR
• Yatak genişlemesinin kontrol gücü • Değişken giriş suyu özelliklerine bağlı proses stabilitesi sorunu • Şok yüklerde biyokütle kaybı • İnert (inorganik) katı madde birikimi • Biyokütle yüzmesi (kaçması)	• Giriş akımının üniform dağıtma zorluğu • Yatakta tıkanma • Filtrenin periyodik olarak geri yıkanma gereği • İnert katı madde birikimi • Çıkışta AKM ayırma ihtiyacı	• Yatak genişlemesinin kontrol gücü • Giriş akımının üniform dağıtma zorluğu • Biyopartikül kaçı • Akışkanlaşma özelliklerinin değişkenliği • Biyofilm kopması • Vanalarda arıza • Sürekli geri devir mecburiyeti

3.5 Arıtma Çamurlarının Çürütülmesi

3.5.1 Havasız Anaerobik Çamur Çürütme Süreci

Atıksu arıtma tesislerinde ortaya çıkan ham (birincil) ve biyolojik fazla çamurlar havasız ortamda çürütülürler. Havasız çürüme süreci anaerobik bakterilerce gerçekleştirilir. Organik çamurların havasız ayrışma süreci başlıca üç safhada gerçekleştirilir: Hidroliz, Asit Üretimi ve Metan Üretimi. Hidroliz safhasında çözünmemiş yapıdaki kompleks organik maddeler hücre dışı enzimler vasıtası ile daha basit yapıda organik maddelere dönüştürülür. İkinci safhada, karbonhidrat, yağlar ve proteinlerden oluşan organik maddeler asit bakterilerince uçucu yağ asitlerine dönüştürülür. Metan üretimi safhasında metan bakterilerince ikinci safhanın son ürünü olan asetik asidin parçalanması veya karbondioksit ile hidrojenin sentezi yoluyla metan ve karbondioksit üretilir.

Havasız çürütme işleminden geçen evsel arıtma tesisi çamurları kararlı, kokusuz, patojen organizma konsantrasyonu düşük ve araziye serilebilecek özelliktedir. Havasız çamur çürütme yönteminin başlıca mahzurları, yüksek ilk yatırım maliyeti, işletme güçlükleri ve çıkış suyu kirlilik yükünün fazla oluşudur. Havasız arıtma süreci esas itibarıyla pH, atığın bileşimi ve sıcaklığa bağlıdır. Yüksek organik yüklerde metan üretimi durur, anaerobik reaktörlerde asit birikimi olur ve çıkan gazda CO₂ yüzdesi artar. İyi işletilen çamur çürütücülerde pH=6,7 – 7,4, uçucu asit konsantrasyonu 1000 Hac/l'den ve CO₂ yüzdesi %35'den azdır. Metan bakterileri mezofilik ve termofilik sıcaklık kademelerinde oldukça aktiftirler.

3.5.2 Çamur Çürütücü Tipleri

Havasız çamur çürütücüler başlıca iki tiptir: düşük hızlı ve yüksek hızlı çürütücüler. Düşük hızlı çürütücülerde ısıtma ve karıştırma uygulanmaz. Hidrolik bekleme süresi yörenin iklimine bağlı olarak 30-60 gün arasında değişir. Yüksek hızlı çürütücülerde ise havasız ayrışma sürecini hızlandırmak gayesi ile ısıtma ve karıştırma uygulanır. Bu tip çürütücüler genellikle seri bağlı 2 reaktör tarzında tertip edilir. İkinci reaktör sıvı/katı ayırımını (çökeltme) gerçekleştirir ve çamur yaşının kontrolüne imkân verir.

3.5.3 Proses Tasarımı Ve Kontrolü

Mezofilik havasız çamur çürütücülerin tasarım ve işletmesinde göz önünde tutulacak en önemli kontrol parametreleri çürütücü hacmi, ısıtma ve sıcaklık kontrolü, karıştırma, gaz üretimi ve kullanımı, reaktör kapak tipi, çıkış suyu kalitesi ve çürümüş çamurların özellikleridir [4].

3.5.4 Çürütücü hacmi

Çürütme süresi, düşük hızlı (ısıtmasız) çürütücülerde 30-60 gün, yüksek hızlı çürütücülerde ise 10-20 gün alınır. Çürütücü tasarımında esas alınan hacimsel çamur yükleri, diğer tasarım kriterleri ile birlikte Çizelge 3.8’de verilmiştir. Çürütücü hacmi, eşdeğer nüfus başına 120 g KM/gün olarak da alınabilir. Havasız çürüme esnasında organik katıların hacmi azalır ve belli miktar çürümüş su arıtma tesisi başına verilir. Böylece çürütücülerde kalan çamurun hacmi üstel olarak azalır. Gerekli çürütücü hacmi;

$$V = \left(Q_x - \frac{2}{3}(Q_g - Q_\phi) \right) \theta \quad (3.1)$$

ifadesiyle hesaplanabilir [4]. Burada;

V: Çürütücü hacmi (m³)

Q_g: Giren karışık çamur (m³/gün)

Q_φ: Çekilen (atılan) çürümüş çamur (m³/gün)

θ: Çürüme süresi (gün)

Çizelge 3.8 Çamur çürütücüler için tasarım kriterleri [15]

PARAMETRE	DÜŞÜK HIZLI	YÜKSEK HIZLI
Çamur yaşı (gün)	30-60	10-20
Çamur yükü (kg UKM/m ³ -gün)	0.64-1.60	2.40-6.41
Hacim Kriterleri	Ham çamur (ilk çürütme çamuru (m ³ /N)	0.03-0.04
	Ham +aktif çamur (m ³ /N)	0.06-0.08
	Ham + damlatmalı filtre çamuru (m ³ /N)	0.08-0.14
	Beslenen ham + aktif çamur (%KM)	2-4
	Atılan ham + aktif çamur (%KM)	4-6

3.5.4.1 Isıtma ve Sıcaklık Kontrolü

Havasız çamur çürütme sürecinin optimum şartlarda sürdürülebilmesi için, mezofilik ve termofilik çürütücülerdeki sıcaklıklar sırasıyla 35 °C ve 55 °C civarında tutulmalıdır. Bu yüzden reaktör sıcaklığının belli bir değerde muhafazası için beslenen çamur ve reaktör muhtevasının ısıtılması gerekir. Sağlanan toplam ısı çürütücülerdeki ısı kayıplarını karşılamalıdır. Çamur çürütücüler, duvar, çatı, temel, boru vb. kısımlardan ısı kaybederler. Isıtma sisteminin tasarımı için gerekli ısı kaybı hesapları yapılmalıdır. Çürütücülerin ısıtılması için dahili ısı değiştiriciler, buhar enjeksiyonu ve harici ısı değiştiriciler kullanılabilir. Bunların kısa bir değerlendirmesi aşağıda yapılmıştır:

Dahili ısı değiştiriciler: Bu tür ısı değiştiriciler daha çok eski dönemlerde kullanılmıştır. Isıtıcı yüzeyinin çamur ile kaplanması dolayısıyla ısı transferi kapasitesi önemli ölçüde sınırlanmaktadır. Isıtıcı borular üzerindeki eklemeyi önlemek için borularda dolan suyun sıcaklığı 45-55 °C olmalıdır.

Buhar enjeksiyonlu ısıtma: Çürütücü içine buhar pompalanarak ısıtma sağlanır. En önemli üstünlüğü, ayrı bir ısı değiştirici kullanılmamasıdır.

Harici ısı değiştiriciler: Çamur çürütücülerde ısıtma maksadıyla genellikle 3 tip ısı değiştirici kullanılır; su banyolu, ceket borulu ve spiral borulu. Tıkanma problemi olmayan spiral borulu ısı değiştiriciler daha pahalı olmalarına rağmen tercih

edilmektedir. Sıcak su veya buhar çoğu kere çürütücü gazıyla ısıtılan bir kazandan sağlanır. Bu tip kazanlarda yakılan gazın ısı değerinin %80'i geri kazanılabilir.

3.5.4.2 Çürütücü Çatısı (Kapağı)

Çamur çürütücü çatısı sabit veya yüzer tipte olabilir. Sabit çatılı çürütücüler daha ucuzdur ve tankta sabit bir su seviyesini muhafaza etmek üzere tasarlanırlar. Çürümüş çamurun aniden deşarjı sonunda sık sık tanka dışarıdan hava girer ve çürütücü gazını patlayıcı bir karışım haline getirir. Çürütücü gazı havada hacimsel olarak %5-20 oranına ulaştığında patlama riski söz konusudur.

Ayrıca çürütücüdeki sıvı seviyesinin yükselmesi halinde de sistem hasar görebilir. Yüzer çatılı çürütücüler daha pahalı ancak çamur besleme ve boşaltma faaliyetlerinden etkilenmeyen, gazın tehlike riskini azaltan ve kalıcı köpük oluşumunun kontrol edildiği tesislerdir. Genelde 2 tip yüzer kapak tasarımı vardır:

Kubbe şeklinde ve yüzer kafes çatı şeklinde. Her iki tip çatıda çürütücü sıvısı üzerinde doğrudan yüzer ve 2~3 m'lik bir düşey hareket serbestliğine sahiptir.

3.5.4.3 Çürütücülerin Karıştırılması

Çamur çürütücülerin optimum verimle işletilebilmesi için yeterince karıştırılması gerekir. Karıştırma ile,

- Çamur ile aktif mikroorganizma biyokütlesinin iyice teması
- Çürütücü muhteviyatının homojenliği
- Çürütücüde açığa çıkan metabolik ürünlerin ve beslenen çamurdaki toksik kimyasalların seyreltilmesi
- Üst kısımda köpük oluşumunun önlenmesi sağlanır.

Çürütücülerin karıştırılmasında, harici çamur sirkülasyon pompaları, dahili mekanik karıştırıcılar ve dahili basınçlı gazla karıştırma teknikleri uygulanabilir.

3.5.4.4 Gaz Üretimi ve Kullanımı

Çamur çürütme süreci esnasında üretilen biyogaz önemli bir enerji kaynağıdır. Çürütücü gazı %60-70 CH₄, %25-30 CO₂ ve az miktarda H₂, N₂, H₂S ve diğer gazlar ihtiva eder. Bu gazın ısı değeri 21.000 – 25.000 kJ/m³, yoğunluğu ise havanınkinin %86'sıdır. Çürütücü gazı, ısıtma ve motorların tahrikinde kullanılır. Üretilen biyogaz içindeki CH₄ miktarı, havasız arıtmanın kinetiğinden hareketle aşağıdaki ifadeler yardımıyla hesaplanabilir:

Çürütücüde oluşan aktif biyokütle miktarı, P_x:

$$P_x = \frac{Y.Q.E.S_0.10^{-3}}{1 + k_d.\theta_c} \quad (3.3)$$

olmak üzere oluşan CH₄ miktarı ise,

$$Q_{CH_4} = 0,35. \{ [E.Q.S_0.10^{-3} - 1,42.P_x] \} \quad (3.4)$$

P_x: Çürütücüde üretilen net biyokütle (kg KM/gün)

Y: Biyokütleyle dönüşüm oranı (evsel atıksu arıtma tesisi çamurlarında Y=0,04 – 0,1 mg KM/mg BOİ kullanılan)

E: Çamur çürütme verimi (0,6-0,9)

Q: Çamur debisi (m³/gün)

S₀: Beslenen çamurun BOİu değeri (g/m³)

k_d: İçsel solunum hız sabiti (evsel AAT çamuru için, 0,02-0,04 gün⁻¹)

θ_c: Çamur yaşı (gün)

Q_{CH₄}: Üretilen metan (m³/gün)

0,35: 1 kg BOİ_u'nın CH₄ değeri

1,42: 1 kg UKM'nin BOİ_u değeri

Bununla birlikte çürütücüler ilk beslendiği an skatole, indole, merkaptanlar ve hidrojen sülfür gibi çeşitli sayılarda azot ve sülfür maddelerini içeren aşırı kokulu gazlar üretirler ve çürütücü başlangıç aşamasının ilk fazları sırasında, gazın çoğu CO₂ ve H₂S'dir. Bu bileşim yanmaz ve bu yüzden genellikle atmosfere sızar. Metan formasyonu başlayıp, metan içeriği yaklaşık %60'a ulaştığı zaman gaz yanmaya hazır demektir. Sistemde metan üretimi baskın olmalı ve %65-70 metan ve %30-35 CO₂ hacimlerinde gaz üretmelidir. Çürütücü gazının metan içeriği %50 ise gaz yanabilme özelliğine sahiptir ancak metan içeriği %62'e ulaşana kadar yakıt olarak kullanılmaz. Çürütücüden elde edilen gaz, ısıtma ya da çürütücülerin ısıtılması amaçlı kullanılabilir [23].

3.5.4.5 Çürümüş Çamur Suyu Özellikleri

Çürütücü suyu kalitesi, çürütücünün tek veya iki kademeli oluşu, karıştırma durumu ve katı maddelerin ne oranda ayrıldığı v.b. parametrelere göre değişir. Bu sıvı atıksu arıtma tesisine geri döndürülür ve arıtma tesisine önemli oranda ilave kirlilik yükü verir. Yoğunlaştırılmış ham çamur ve biyolojik aktif çamur karışımının çürütüldüğü bir çürütücünün tipik çıkış suyu özellikleri Çizelge 3.9'da verilmiştir [4].

Çizelge 3.9 Havasız çamur çürütücü çıkış suyu özellikleri [4]

Parametre	Konsantrasyon (mg/l)
Toplam katı madde	3000-15000
BOİ ₅	1000-10000
KOİ	3000-30000
NH ₄	400-1000
Toplam P	300-1000

3.5.4.6 Çamur Stabilizasyon Derecesi ve Süzülebilirliği

Çamur çürütücü hacmi 37 °C 'lık bir sıcaklık ve 20 günlük çürüme süresine göre boyutlandırılır. Çürüme süresi, belli bir sıcaklıkta %90 stabilizasyon için gerekli süre olarak alınır. Çürütme süresi arttıkça çamurun stabilizasyon derecesi de artar. Arıtma tesisi çamurlarının stabilizasyon derecesi, çürümüş çamurun BOI_5/KOI oranı yerine UKM ve yağ gres muhtevaları izlenmek suretiyle de izlenebilir. Bu aynı zamanda çamurun suyunu daha çabuk bırakması, yani kapiler emme süresinin ya da özgül direncin azalması sonucunu doğurur.

3.5.5 İşletmeye Alma ve Proses Kontrolü

3.5.5.1 İşletmeye Alma

Çürütücüye en yakın ve benzer bir çamur çürütme tesisinden aşı ilave edilmelidir. Genellikle çürütücü hacminin %10~20 oranında aşı çamuru sağlanır. Aşı çamurunun doldurulmasını takiben normal çamur beslemesinin %20-25'i oranında ham çamur beslemesine başlanılır. Reaktör, pH, gaz üretimi ve uçucu asit seviyesi izlenerek beslenen debi arttırılır. Bu dönemde gerekli pH ve tampon alkalinitenin temini için kireç veya NaOH ilavesi yapılır. Genelde 30 gün sonunda işletmeye alma dönemi sona erer ve arıtma tesisinin günlük çamurunun tamamı çürütücüye verebilecek seviyeye ulaşır. Çamur çürütücülerin işletmeye alınmasında izlenecek adımlar aşağıda toplu olarak verilmiştir.

- Çürütücü hacminin %10~20'si miktarında aşı çamuru, başka bir kurulu çürütücüden temin edilerek çürütme tankına boşaltılır.
- Çürütücünün kalan hacmi evsel atıksu ile doldurulur.
- Çürütücü iyice karıştırılıp ısıtıldıktan sonra, normal günlük besleme debisinin %20-25'ine eşit bir miktarda çamur beslemesi başlatılır ve debi tedricen arttırılır.
- Beslenen çamur debisi (kg UKM/gün), UKM, Toplam Uçucu Asit/Alkalinite ve pH, sıcaklık, gaz debisi ve CO_2 oranı izlenir.
- TUA/Alkalinite $\geq 0,8$ ve $pH < 6,5$ ise kireç veya Na_2CO_3 ile müdahale edilir.

- Çamur yükü < 1 kg UKM/m³-gün tutulduğu takdirde 30-40 gün sonra oldukça kararlı işletme şartlarına ulaşır.

3.5.5.2 Optimum Çevre Şartları

Havasız arıtmayı gerçekleştiren mikroorganizma topluluğunun kapasitesinden azami yararlanabilmek için reaktörde optimum çevre şartlarının sağlanması gerekir. Çizelge 3.10'da anaerobik mikroorganizmalar için optimum çevre şartları verilmektedir.

Çizelge 3.10 Anaerobik mikroorganizmalar için optimum çevre şartları [4]

PARAMETRE	OPTİMUM ŞARTLAR
Arıtılan Atığın Bileşimi	Karbon, temel (N,P) ve iz elementler bakımından dengeli olmalı, O ₂ , NO ₃ , H ₂ O ₂ , SO ₄ gibi oksitleyici maddeler, toksik ve inhibitör elementler ihtiva etmemeli.
KOİ/N/P	300/5/1
pH	6.5-8.2
Sıcaklık	25-40 (35-37) °C □ 50-60 (55) °C
Alkalinite	1000-4000 (2000) mg/l CaCO ₃
Toplam Uçucu Asit	<1000-1500 mg/l asetik asit olarak
Toplam Uçucu Asit/Alkalinite	<0.1

Havasız bir reaktörün bozulmaya başladığı, uçucu asit konsantrasyonunun ani artışı ile kendini belli eder. Uçucu asit artışının nedeni ise şok yükler, besi maddesi eksikliği ve sisteme inhibitör maddelerin karışması olabilir. Uçucu asitlerin en az problemlisi asetik asit en çok problemlisi ise propiyonattır. Sistem alıştırılsa bile 3000 mg/l'nin üzerindeki propiyonik asit konsantrasyonlarında metan bakterileri belli ölçüde inhibe olmaktadır.

Havasız şartlarda sülfat ve kükürdün diğer okside olmuş bileşikleri kolayca (H₂S ve HS⁻e) indirgenirler. Mikrobiyolojik faaliyetler sonucu katyonik yapılarına bağlı olarak çözünebilir veya çözünemez forma getirilebilirler. Etal süflitlerin çoğu gibi tuzlar çözünmez forma getirilebilirlerse sistem üzerindeki etkileri ihmal edilebilir. Demir

ilavesi ile çözültiden S^{2-} iyonları giderilerek sülfid inhibisyonu belli ölçüde kontrol altına alınabilir [3].

Mikrobiyolojik faaliyetleri durduran ya da yavaşlatan zararlı maddelerin işletmeye alma esnasında da dikkatlice kontrolü gereklidir.

3.5.5.3 Köpük Oluşumu ve Kontrolü

Fazla miktarda gaz çıkışı çürütücülerde kaçınılmaz olarak kalıcı köpük tabakasına yol açabilir. Belirli bir sebebi olmaksızın çürütücü sıvısı üzerindeki köpük tabakası kalınlığı artarak gaz depolama tankı yüzer kapağı kenarlarından dışa kaçabilir ve hatta gaz borularına kaçabilir. Hidrolik kalış süresinin 10 günden küçük olduğu hallerde de köpük sorunu yaşanmaktadır. Çürütücü üst kısmındaki kararlı köpük tabakasını ortadan kaldırmak üzere mekanik karıştırma ve bu kısma köpük söndürücülü su püskürtme gibi tedbirlere başvurulmaktadır. Köpük, çürütme tankının iyi bir şekilde işletilmesini engelleyecek derinlikte birikmeye başlar ve biriken köpük miktarı daha da artarak gaz borusunun içine girer ve gaz çıkışını engeller. Bu konuyla ilgili detaylı bir çalışma yapılmamasına rağmen, köpük genelde, gaz üretiminin kuvvetli olduğu dönemlerde ((a) işletmeye alma dönemlerinde, (b) inhibisyona uğramış reaktörü inhibisyona neden olan etkenlerden arındırdıktan sonraki dönemlerde, (c) reaktör yükünün hızlı bir şekilde arttırılması dönemlerinde) baş gösterir. Mosey ve Foulkes [26], göre köpük, yağların enzimatik hidrolizi ile reaktör içerisinde oluşan ve doğal sabunlar olarak da bilinen uzun zincirli yağ asitlerinin reaktörde birikmesi sonucu oluşmaktadır. Böyle bir durumla karşılaşıldığında köpüğün ortadan kalkması için yapılacak tek şey reaktörün birkaç gün ham çamur ilave edilmeden dinlenmeye alınmasıdır.

3.5.5.4 İnhibitör ve Zehirli Maddeler

Çamur çürütücülerin organik maddeleri ayrıştırma verimleri, sisteme beslenen çamur içindeki çeşitli inhibitör maddeler sebebiyle belli ölçüde değişim gösterebilir. Çamur çürütme sürecini belirgin oranda inhibe eden ve pratikte sık rastlanan inhibitör maddelerin zehirlilik esikleri Çizelge 3.11’de verilmiştir [24].

Çizelge 3.11 Katı madde oranı %4,5 olan evsel atıksu arıtma tesisi çamurunun çürütüldüğü bir çürütücü için inhibitör madde zehirlilik sınır konsantrasyonları [24]

MADDE	ZEHİRLİLİK EŞİĞİ (mg/l)
Anyonik deterjanlar	900
Metilen klorür, CH ₂ Cl ₂	1000
Kloroform, CHCl ₃	0.5-1.0
Karbon tetra klorür, CCl ₄	2-10
1,1,1-trikloroetan	2,25
Monoklorobenzen	900
Ortodiklorobenzen	900
Peradiklorobenzen	1300*
Pentakloro fenol	1-2
Siyanür	3-30**
Zn	590***
Ni	530***
Pb	1800***
Cd	1000***
Cu	850***

* atıksu arıtma tesisi girişindeki konsantrasyon

** başlangıçta çok zehirli ancak zamanla anaerobik bakteriler alışabilir

*** zehirlilik etkisi metal sülfürü oluşumuna bağlı olarak değişir.

3.6 Biyogaz

Biyogaz çok amaçlı olarak kullanılabilen, temiz bir enerji kaynağıdır. Başlıca hayvan dışkıları olmak üzere özel olarak yetiştirilen bazı bitkilerden, tarımsal atıklardan ve her türlü organik atıktan uygun bakteriler ile anaerobik arıtım sonunda elde edilen ve bileşiminde metan ve karbondioksit bulunan yanıcı bir gaz karışımıdır. Atık içindeki organik madde; metan, karbondioksit, hidrojen sülfür, azot, hidrojen ve amonyaka dönüşür [25, 26].

3.6.1 Biyogazın Özellikleri

Biyogaz; organik bazlı atıkların oksijensiz ortamda fermentasyonu sonucu ortaya çıkan renksiz- kokusuz, havadan hafif, parlak mavi bir alevle yanan ve bileşiminde organik maddelerin bileşimine bağlı olarak yaklaşık; %40-70 metan, %30-60 karbondioksit, %0-3 hidrojen sülfür ile çok az miktarda azot ve hidrojen bulunan bir gaz karışımıdır [11]. Yoğunluğu 0,83 g/L, oktan sayısı yaklaşık olarak 110, yanma sıcaklığı 700 °C, alev sıcaklığı 870 °C olan bir gazdır. Biyogazın bileşimi, elde edildiği organik maddenin cinsine ve fermentasyon şekline bağlı olarak değişir [26]. Buna göre, tipik bir biyogazın bileşimi Çizelge 3.12’de ki gibidir.

Çizelge 3.12 Biyogazın bileşimi [27]

GAZIN CİNSİ	YÜZDE BİLEŞİMİ
Metan (CH ₄)	54-80
Karbondioksit (CO ₂)	20-45
Azot (N ₂)	0-1
Karbondioksit (CO)	0,1
Oksijen (O ₂)	0,1
Hidrojen Sülfür (H ₂ S)	Az Miktarda

Biyogazın en önemli bileşeni olan metan gazının ısı değeri ortalama 8900 kcal/m³, tür. Bileşimindeki metan oranına bağlı olarak biyogazın ısı değeri ise yaklaşık olarak 4700-5700 kcal/m³ arasında değişmektedir. Biyogaz bileşiminde %50’den daha az metan olması verimli bir yanma için uygun olamamaktadır. Ayrıca, düşük fermentasyon sıcaklığı biyogaz içindeki metan oranının yüksek olmasını sağlar fakat biyogaz çıkış miktarını azaltır. Bunun tersi biyogaz çıkış miktarını artırsa da yanma veriminin düşük olmasına neden olur. Bazı atıkların metan gazı yüzdeleri Çizelge 3.13’de verilmiştir.

Çizelge 3.13 Bazı atıkların metan gazı yüzdeleri [28]

ATIKLAR	METAN GAZI MİKTARI (%)
Çimen	70
Domuz gübresi	67
Siğır gübresi	65
Deniz yosunu	63
Tavuk gübresi	60
Saman	59
Yaprak	58
Su sazi	52
Yemek atığı	50

Üretimi en yaygın olarak, konutlardan ve hayvan üretme çiftliklerinden kaynaklanan organik atıklardan yapılmaktadır. Aslında mikroorganizmalar tarafından parçalanabilen her türlü organik maddeden elde edilebilir. Bu organik hammadde; canlı hayvan atıkları, ekin fazlalıkları veya bitkisel yağ kalıntılarından, konutlardaki organik asit toplama bidonlarına kadar çok değişik kaynaklardan sağlanabilir.

Nitekim yakın geçmiş yıllarda Avrupa’da birkaç yüz biyogaz santrali işletmeye alınmış olup, bu santrallerde sanayi ve konut atıkları sindirilmektedir. Fosil yakıt bağımlılığının yol açtığı çevre ve insan sağlığı hasarlarıyla ilgili tartışmalarla birlikte seçenek arayışları da yoğunlaşmaktadır. Bilinen maddeler dışında sindirim yöntemlerindeki ilerlemeler sonucu, ot dahi sindirilebilir hale gelmiş durumdadır. Fakat hammaddesi ne olursa olsun, eldesi aynı ve anaerobik fermentasyon sürecine dayalıdır [25]. Bazı yakıt türlerinin biyogaz ile karşılaştırılması Çizelge 3.14’de verilmiştir.

Çizelge 3.14 Bazı yakıt türlerinin biyogaz ile karşılaştırılması [28]

YAKIT TÜRÜ	BİRİMİ	ENERJİ DEĞERİ (MJ)	YANMA VERİMİ (%)	KULLANILABİLİR ENERJİ (MJ)	BİYOĞAZ ENERJİ EŞDEĞERİ
Biyogaz	m ³	20	60	11,8	1 m ³
Elektrik	kWh	3.6	70	2.5	4.7 kWh
Gazyağı	L	38	50	19	0.62 L
Bütan	kg	46	60	27.3	0.43 kg
Kömür	kg	29	28	8.1	1.46 kg

3.6.2 Biyogazın Kullanım Alanları

Biyogaz genellikle;

- Doğrudan yanma ile
- Alkole dönüştürülerek
- Metan gazına dönüştürülerek kullanılır [26].

Biyogaz, donanımda yapılacak ufak tefek uygulamalarla; Likit Petrol Gazı (LPG), propan veya doğalgazın kullanıldığı tüm işlerde kullanılabilir. Ancak, içerdiği hidrojen sülfür yanma sırasında kükürtdioksit, bu da daha sonra su buharlarının varlığında sülfürik aside dönüşür. Sülfürik asitse korozyon özelliği nedeniyle motorları ve kazanları çürütebilir. Dolayısıyla biyogazın her türlü kullanım donanımı, korozyonu önlemek amacıyla fermentörden ayrı bir odaya yerleştirilmelidir. Gücünü biyogazdan alan donanımın sürekli çalışma halinde olması, su yoğunlaşması ve sülfürik asit oluşumunu engelleyecek kadar yüksek sıcaklıkta kalmalarını sağlar. Bu da korozyonu geciktirir. Biyogaz hava ile yaklaşık 1/7 oranında karıştığı zaman tam yanma gerçekleşmektedir. Isıtma amacıyla gaz yakıtlarla çalışan fırın ve ocaklardan yararlanılabileceği gibi termosifon ve şofbenler de biyogazla çalıştırılarak kullanılabilir.

Biyogaz, hem doğrudan yanma ile hem de elektrik enerjisine çevrilerek kullanılabilir. Biyogazın doğrudan aydınlatmada kullanımında sıvılaştırılmış petrol gazları ile çalışan lambalardan yararlanılmaktadır. Biyogaz, benzinle çalışan

motorlarda hiçbir katkı maddesine gerek kalmadan doğrudan kullanılabilirdiği gibi içerisindeki metan gazı saflaştırılarak da kullanılabilir [25, 28].

İnsan emeği ile elde edilen biyogazın büyük bir ekonomik değeri vardır. Bu gaz, köylerde yemek pişirmek, aydınlanmak, elektrik enerjisi elde etmek ve makineler çalıştırmak için ucuz bir enerji kaynağı olup, ülkenin kömür, elektrik ve petrolden büyük çapta tasarruf etmesine ve endüstriyel gelişmesine katkıda bulunur. Ayrıca gübrenin etkinliğini artırır, gübre kaynağını genişletir, tarımsal üretimi artırır ve zararlıların yumurtasını yok etmesi bakımından da çevre sağlığını iyileştirir [29].

3.6.3 Biyogaz Üretiminde Kullanılan Sistemler

3.6.3.1 Kesikli (Batch) fermentasyon

Tesisin üretim tankı hayvansal veya bitkisel atıkla doldurulmakta ve alıkoyma süresi kadar bekletilerek biyogazın oluşumu tamamlanmaktadır. Kullanılan organik maddeye ve sistem sıcaklığına bağlı olarak bekleme süresi değişmektedir. Bu süre sonunda tesisin fermentörü (reaktörü) tamamen boşaltılmakta ve yeniden doldurulmaktadır.

3.6.3.2 Beslemeli- Kesikli Fermentasyon

Burada fermentör başlangıçta belirli oranda organik madde ile doldurulmakta ve geri kalan hacim fermentasyon süresine bölünerek günlük miktarlarla tamamlanmaktadır. Belirli fermentasyon süresi sonunda fermentör tamamen boşaltılarak yeniden doldurulmaktadır.

3.6.3.3 Sürekli Fermentasyon

Bu fermentasyon biçiminde fermentörden gaz çıkışı başladığında günlük olarak besleme yapılır. Sisteme aktarılan karışım kadar gazı alınmış çökelti sistemden dışarıya alınır. Organik madde fermentöre her gün belirli miktarlarda verilmekte, alıkoyma süresi kadar bekletilmekte ve aynı oranlarda fermente olmuş materyal günlük olarak

fermentörden alınmaktadır. Böylece günlük beslemelerle sürekli biyogaz üretimi sağlanmaktadır [28].

3.6.4 Biyogaz Üretiminin Yararı

Hayvansal ve bitkisel organik atık/artık maddeler, çoğunlukla ya doğrudan doğruya yakılmakta veya tarım topraklarına gübre olarak verilmektedir. Bu tür atıkların özellikle yakılarak ısı üretiminde kullanılması daha yaygın olarak görülmektedir. Bu şekilde istenilen özellikte ısı üretilemediği gibi, ısı üretiminden sonra atıkların gübre olarak kullanılması da mümkün olmamaktadır. Biyogaz teknolojisi ise organik kökenli atık/artık maddelerden hem enerji eldesine hem de atıkların toprağa kazandırılmasına imkan vermektedir.

3.7 Anaerobik Çamur Çürütme Konusundaki Önemli Bazı Çalışmalar

Bashi ve Matin [30], metanojenlerin sodyum inhibisyonu ve mezofilik kendi kontrolünde (35 °C) tam karışimli anaerobik çürütücü (CMAD_s) araştırmıştır. CMAD_s 0,5 mg/l KOİ yüklemesi ile başlanıp kademeli olarak 1,8 mg/l kadar yükseltilmiştir. Sodyum konsantrasyonu yaklaşık 8600 mg/l civarında iken KOİ giderimi yaklaşık %38 ve metan üretimi yaklaşık %16 azalmıştır. Benzer şekilde uçucu yağ aside 300 mg/l den 3500 mg/l yükselmiştir. İnhibiyonun en fazla olduğu zaman potasyum ve magnezyum eklenmiş ve kısa bir süre sonra normal değerlerine dönmüş. Metanojenler için sodyum toksisite azaltılmasında potasyum ve magnezyumun birlikte kullanılması etkili olduğu görülmüştür.

Potasyum ve magnezyum, 60 günlük bir süre sonra kullanılmaya başlanmış. KOİ giderme verimi ve metan üretimi azalmaya, uçucu yağ asiti konsantrasyonu artmaya devam etmiştir. İki antagonistlerin eklenmesi ile % KOİ gideriminde dik azalma ve uçucu yağ asiti konsantrasyonunda hızlı artış ilk 30 gün içerisinde meydana gelmiştir. Potasyum konsantrasyonu 1200 mg/l 'den 750 mg/l 'e hızla azaldığında ve magnezyum 150 mg/l civarında tutulduğunda, gelişme görülmüş. En hızlı gelişme 120 -150 günler periyodu sırasında KOİ giderim verimi yaklaşık %62 den yaklaşık %82 'e yükselmiş, toplam uçucu yağ asiti konsantrasyonu yaklaşık 1700 g/l 'den 430 mg/l 'e düşmüş ve

metan üretimi %48 den %57 gelmiştir. Son olarak optimum konsantrasyonlar 167 mg/l magnezyum ve 245 mg/l potasyum olarak bulunmuştur.

Bashir ve Matin [31], Metanojenlerin sodyum inhibisyonu ve mezofilik kendi kontrolünde (35 °C) tam karışimli anaerobik çürütücü (CMAD_s) araştırmıştır. CMAD_s 0,5 mg/l COD yüklemesi ile başlanıp kademeli olarak 1,8 mg/l yükseltilmiştir. Sodyum konsantrasyonu yaklaşık 9000 mg/l civarında iken KOİ giderimi yaklaşık %30 ve metan üretimi yaklaşık %25 azalmıştır. Benzer şekilde uçucu yağ aside 285 mg/l den 2350 mg/l yükselmiştir. İnhibiyonun en fazla olduğu bu zamanda kalsiyum ve magnezyum eklenmiş. KOİ giderim verimi %90 ve metan üretimi %62 yükselmiş ve uçucu yağ asiti konsantrasyonu yaklaşık 300 mg/l 'e düşmüştür. Metanojenler için sodyum toksisite azaltılmasında kalsiyum ve magnezyumun birlikte kullanılması etkili olduğu görülmüştür.

Sodyum konsantrasyonu 8000 mg/l iken 200 mg/l kalsiyum ve 325 mg/l magnezyum eklenmiştir. Reaktör B 'de KOİ giderim verimi %66 'dan %90 'a ve metan üretimi %40 'dan %62 'e yükselmiştir. Uçucu yağ asiti 2350 mg/l 'den 325 mg/l 'ye düşmüştür.

Bashir ve Matin [32], yaptığı çalışmada, potasyum konsantrasyonu yaklaşık 12500 mg/ l civarında iken KOİ giderimi yaklaşık %30 ve metan üretimi yaklaşık %20 azalmıştır. Benzer şekilde uçucu yağ aside 300 mg/l den 3000 mg/l yükselmiştir. Potasyum inhibisyonunun en fazla olduğu zaman sodyum eklenmiş ve kısa bir süre sonra KOİ giderimi %95 ve metan üretimi %64 olan normal değerlerine dönmüştür ve UYA konsantrasyonunda kayda değer düşmüştür. Sodyum metan için potasyum toksisitesini azaltmada çok etkili olduğu ancak sodyum optimum konsantrasyonunun 564 mg/l olduğu bulunmuştur.

Sung ve Liu [33], çalışmasında, değişik pH değerleri ve termofilik aceticlastic metanojenler üzerinde çalışma koşulları altında toplam amonyak azotu (TAN) açısından amonyak inhibisyonu etkileri araştırılmış. Toplam amonyak azotu 0, 1, 3, 5 ve 6 g/l konsantrasyonlarında 5 aşamada beslenmiştir. Yüksek TAN konsantrasyonu uygulanmasında KOİ giderim verimi düşmüştür. TAN konsantrasyonu 4,92 g/l uygulandığında %39, 5,77 g/l uygulandığında %64 metan üretimi düşmüş ve KOİ

giderimide düşüş gözlenmiş. TAN konsantrasyonu 3,05 den 5,77 g/l 'e yükseldiğinde metan inhibisyonu gerçekleşmiştir. TAN konsantrasyonu 8 – 13 g/l aralığında % 100 inhibisyona sebep olmuştur. Reaktörde Uçucu yağ asit birikimi 2730 mg/l 'e yükselmiştir. UYA artışında pH ve alkalitenin düşmesine sebep olmuştur.

Siegert ve Banks [34], çalışmasında, kesikli anaerobik reaktör deneylerinde 1 g/l 'den 20 g/l 'e kadar sentetik karışık uçucu yağ asiti konsantrasyonu ekleyerek selüloz ve glikoz birincil substrat bozulması izlenmiştir. Reaktöre UYA karışımı eklenmesinde ve eklenmemesinde gerçekleşen durumlar karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır. Mezofilik (35 °C) reaktöre kanalizasyon orijinli aktif çürütülmüş çamur aşılanmış ve biyogaz üretimi, gaz içeriği, UYA konsantrasyonu, glukoz içeriği ve selülotik enzimler izlenmiştir. Glukoz giderimi ilk ve son örneklerde ölçülmüştür. UYA 2 g/l 'e eşit ve yüksek olduğunda hücrel aktivitenin inhibisyonuna sebep olmuştur. UYA konsantrasyonu 4 g/l üzerinde glikoz fermentasyonunu hafif inhibe etmiştir. UYA konsantrasyonu ilk 6 g/l üzerinde kullanıldığında biyogaz üretiminde ve metan karbondioksit oranı üzerinde etkisi belirgin olmuştur. Birincil substrat olarak kağıt kombinasyonunda, biyogaz üretimi UYA 1 g/l üzerinde iken yarıya inmiş buda hidroliz prosesinin inhibisyonunu göstermiştir.

Altaş [35] çalışmasında, yukarı akışlı anaerobik çamur reaktöründen granül çamur örneklerin metan üretim aktivitesi üzerinde çinko, krom, nikel ve kadmiyumun inhibisyon etkisi çalışmıştır. Ağır metaller anaerobik granül çamurdan metan üretimi üzerinde negative etkiye sahiptir Metan üretimi ağır metalin tipine ve konsantrasyonuna göre etkilenmiştir. Ağır metal konsantrasyonları 32 mg/l üzerinde artması ile metan üreten granül çamurun metal verimini düşürmüştür. Dört ağır metalin inhibisyon etkisi şu şekildedir; $Zn > Cr > Ni > Cd$. Ağır metallerin bireysel IC_{50} değerleri için Zn; 7,5 mg/l, Cr; 27 mg/l, Ni; 35 mg/l, Cd; 36 mg/l 'dir. Metan üretim potansiyeli değeri, 128 mg/l ağır metal için $Ni (44,82 \pm 0.67) > Cd (28,73 \pm 0.11) > Cr (15.52 \pm 1.63) > Zn (0.65 \pm 0.00)$.

Colussi vd. [36] yaptığı çalışmada, bira endüstrisinden ağır metal içeren akımların yukarı akışlı anaerobik çamur yataklı reaktörde işletim etkinliği değerlendirmiştir. Anaerobik aktivite üzerine Cu, Ni ve Cr iyonlarının etkileri metan üretim hızı ve KOI

giderim ölçümleri ile incelendi. 3000 mg/l KOİ ve 50 mg/l ağır metal konsantrasyonu ile etanol ve sodyum asetat çözeltisi sürekli beslenerek endüstriyel yukarı akışlı anaerobik çamur yataklı reaktör çamur biyokütle işlevi oldu. Deneysel sonuçlar, bakır için yüksek nikel ve krom için hafif biyokütle hassasiyeti göstermiştir. İnhibisyon testleri ağır metal toksisitesini $Cu \gg Ni > Cr$ şeklinde olduğunu göstermiştir. Cu %69, Ni %18 ve Cr %11 inhibisyona sebep olmuştur.

Jeong vd. [37] yaptığı çalışmada, atık aktif çamur kullanılarak anaerobik çamur çürütmede sülfat gideren bakterilerin ve metan üreten bakterilerin karakteristiklerine KOİ/sülfat oranının etkisini incelemiştir. Düşük sülfat konsantrasyonunda ve yüksek KOİ/sülfat oranında metan üretim hızı artmıştır. Değişik KOİ/sülfat oranlarında metan üretim hızları hesaplanmış ve KOİ/sülfat oranı 11,6 'nın üzerinde olduğunda metan üretim hızı %60 azalmıştır. KOİ/sülfat oranı düştüğünde hidrojen sülfürün arttığı buda metan üreten bakterilerin inhibisyonunu göstermektedir.

YAPAY ZEKÂ ESASLI MODELLEME ÇALIŞMALARI**4.1 Yapay Sinir Ağları**

Yapay sinir ağları (YSA), insan beyninin en önemli özelliklerinden olan öğrenme yolu vasıtası ile yeni bilgiler türetebilme, bu yeni bilgileri oluşturabilme ve keşfedebilme gibi yetenekleri, herhangi bir yardım almadan otomatik olarak gerçekleştirebilen yani tüm canlılarda bulunan sinir sisteminin çalışmasını elektronik ortama taşımayı hedef haline getiren bir bilgisayar programıdır. Yapay sinir ağları insanlarda olduğu gibi öğrenme, hatırlama ve öğrenilmiş olunan bilgilerin güncellenmesi gibi yeteneklere sahip olabilecek şekilde tasarlanmıştır [38].

Öğrenme, hatırlama ve güncelleme gibi yeteneklere sahip olunması istenilen yapay sinir ağları üzerinde ki ilk çalışmalar insan beyninden esinlenerek gerçekleştirildiği için öncelikle insan beynini oluşturan nöronların modellenmesi ve bilgisayar sistemlerinde uygulanması şeklinde çalışmalar yapılmıştır. Bu konuda ki çalışmaların ardından bilgisayar sistemlerinin de zamanla gelişme göstermesi üzerine yapay sinir ağları ile yapılan çalışmaların kapsamı ve kullanılabilirliği gelişmiştir.

Çizelge 4.1 Bilgisayar ve insan beyni arasındaki çalışma sistemlerinin karşılaştırılması

BİLGİSAYAR	İNSAN BEYNİ
Sayısal	Analog
Seri	Paralel
Komut kümeli	Bilgiye Adapte Olma

Çizelge 4.2 (Devamı) Bilgisayar ve insan beyni arasındaki çalışma sistemlerinin karşılaştırılması

Yanlış Hesaplamalar Sonucu Etkiler	Birimlerin Ana İşlemlere Etkisi Azdır
Giriş Verilerindeki Hatalar Sonucu Etkiler	Giriş Verilerindeki Hatalara Herzaman Duyarlı Değildir

4.1.1 Yapay Sinir Ağlarının Genel Özellikleri

Yapay sinir ağları genel olarak canlı beyninin yapısını bilgisayar ortamında simule ederek aşağıdaki işlemleri gerçekleştirebilir:

- Öğrenme
- İlişkilendirme
- Sınıflandırma
- Genelleme
- Tahmin
- Özellik belirleme
- Optimizasyon [39]

YSA'larda sistemin paralelliği ve toplamsal işlevin yapısal olarak dağılımı söz konusudur. YSA'lar birçok nörondan meydana gelir ve bu nöronlar eş zamanlı olarak çalışarak karmaşık işlevleri yerine getirir. Diğer bir deyişle karmaşık işlevler birçok nöronun eş zamanlı çalışması ile meydana getirilir. Süreç içerisinde bu nöronlardan her hangi biri işlevini yitirse dahi sistem güven sınırları içerisinde çalışmasına devam edebilir.

Bir diğer özellik ise genelleme yeteneği, diğer bir deyişle ağ yapısının, eğitim esnasında kullanılan nümerik bilgilerden eşleştirmeyi betimleyen kaba özellikleri çıkarması ve böylelikle eğitim sırasında kullanılmayan girdiler için de, anlamlı yanıtlar üretebilmesidir.

Ayrıca ağ fonksiyonları non-lineer olabilmektedir. Yapı üzerinde dağılmış belli tipteki non-lineer alt birimler özellikle, istenen eşleştirmenin denetim ya da tanımlama işlemlerinde olduğu gibi non-lineer olması durumunda işlevin doğru biçimde yerine getirilebilmesini matematiksel olarak olası kılarlar.

Sayısal ortamda tasarlanan YSA'ların, donanımsal gerçekleştirilebilirlikleri söz konusudur. Bu özellik belkide YSA'ların günlük hayatta daha da fazla yaşamımızın içine gireceğinin veya girebileceğinin göstergesidir [40].

4.1.2 Yapay Sinir Ağlarının Avantaj ve Dezavantajları

Yapay sinir ağları modelinin avantajları ve dezavantajları hakkında aşağıda açıklama yapılmıştır [39], [40], [41].

Avantajları;

- YSA'lar işlevleri gereği bilgisayarların öğrenmesini sağlamaktadırlar. Söz konusu durumlara hâkim olarak, olaylara mantıklı bir açıdan yaklaşıp en uygun kararı verebilmektedirler.
- Sahip olunan bilgileri, sistemleri yapısındaki çok çeşitli veri işleme metotları ile çalıştırdıkları için geleneksel metotlara nazaran çok daha az bakiye hata oluştururlar.
- Kullanılan ya da elde edilen bilgilerin tamamı sistemde saklanmaktadır. Geleneksel programlardaki veri tabanı ya da dosyalama düzeneklerinden ziyade ağ bağlantılarında muhafaza edilir. Nöronların bir kaçının işlevini yitirmiş olması durumunda anlamlı bilgilerin kaybolması durumu söz konusu değildir.
- Sisteme tanıtılan örnekler, YSA'nın örnekleri ağa tanıtılarak istenen çıktılar doğrultusunda ağın eğitilmiş olması ile sonuçlanmaktadır. Sistemin başarılı olması seçilen veri setiyle alakalı olup, sisteme iyi tanıtılmaması durumunda elde edilen çıkış verilerinin de yanlış olmasına yol açabilir.
- YSA'lar sisteme tanıtılan veri setleri ile eğitimleri sırasında tanıtılan örneklendirmelerden genellemeler çıkararak yeni örnekler hakkında bilgi üretebilirler.

- YSA'ların algılamaya yönelik olaylarda ki başarıları, yapılan çalışmalar dâhilinde kanıtlanmıştır.
- Sisteme tanıtılan örnekler halinde verilen örüntüler YSA'lar tarafından diğer örnekler ile ilişkilendirilebilir ve yeni örneklendirmelerinde hangi sete ne şekilde dâhil olabileceği konusunda karar verebilme yetileri mevcuttur.
- Sistemin on-line olarak öğrenebilme ve kendilerini eğitebilme yetenekleri mevcuttur. Eksik bilgi ile çalışabilmekte ve çıktı üretebilmektedirler. Bu ve benzeri durumlarda performans kaybı yaşanmaz. Ancak performans kaybının önemi eksik bilgiye göre değişiklik gösterir. Sisteme tanıtılan veri setinde ki unsurların önem dereceleri de eğitim sırasında tanıtılır.
- YSA'ları eksik bilgi ve veri kaybında dahi çalışabilmeleri, hatalara karşı toleransını gösterir.
- YSA'lar zamanla ağlar da oluşabilecek problemlerden dolayı yavaş ve göreceli bir bozulmaya uğrarlar. Bu bozulma dereceli bir şekilde (graceful degradation) gerçekleşir. Sistemde birden çökme gerçekleşmez.
- YSA'ların sahip olduğu bağlantıların tek başına bir anlamı yoktur. Sistemde bilgiler ağa dağıtılmış bir şekildedir ve hücrelerin bağlantı, ağırlık dereceleri o ağın bilgisini göstermektedir.

Dezavantajları;

- Bu sistemlerin en önemli sorunu donanım gereksinimidir. YSA'lar paralel işlem yapabilme yeteneğine sahiptir ve bu yüzden paralel çalışan işlemciler ile performans gösterirler.
- YSA'larda uygun veri setinin belirlenebilmesi için herhangi bir kural yoktur. Uygun olan ağ yapısının bulunması deneyim ve deneme yanılma yolları ile belirlenebilmektedir.
- YSA'ların öğrenme katsayısı, hücre sayısı ve katman sayısı gibi parametrelerin belirlenmesinde belirli kurallar yoktur. Belirli kuralların olmaması ile birlikte her bir veri seti için farklı yaklaşımlar söz konusu olabilir.
- Sisteme öğretilmesi gereken durumun gösterilmesi de bazı sorunlara yol açabilmektedir. YSA'lar nümerik bilgilerle çalışmakta ve sisteme veriler

tanıtılmadan önce hepsinin nümerik değere çevrilmesi gerekmektedir. Bu esnada oluşabilecek aksilikler sistemin verimini etkilemekte bu da doğrudan kullanıcının kabiliyetine bağlı olmaktadır.

- YSA'lar da problemlerin çözümü sonrasında gerçekleşen olayların nasıl ve neden olduğu ile ilgili bilgi edinilemediğinden, sistemin davranışlarının açıklanması konusunda sıkıntılar yaşanmaktadır.

Geleneksel algoritmalar ile YSA'ların mukayesesi ile ilgili birkaç madde Çizelge 4.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 Yapay sinir ağlarının mimarisi ve yapı elemanları [40]

GELENEKSEL ALGORİTMALAR	YAPAY SİNİR AĞLARI
Çıkışlar, koyulan kurallara girişlerin uygulanması ile elde edilir.	Öğrenme esnasında giriş çıkış bilgileri verilerek, kurallar koyulur.
Hesaplama; merkezi, eş zamanlı ve ardışıktır.	Hesaplama; toplu, eş zamansız ve öğrenmeden sonra paraleldir.
Bellek paketlenmiş ve hazır bilgi depolanmıştır.	Bellek ayrılmış ve ağa yayılmıştır. Dâhilidir.
Hata toleransı yoktur.	Hata toleransı vardır.
Nisbeten hızlıdır.	Yavaş ve donanıma bağımlıdır.
Bilgiler ve algoritmalar kesindir.	Deneyimden yararlanır.

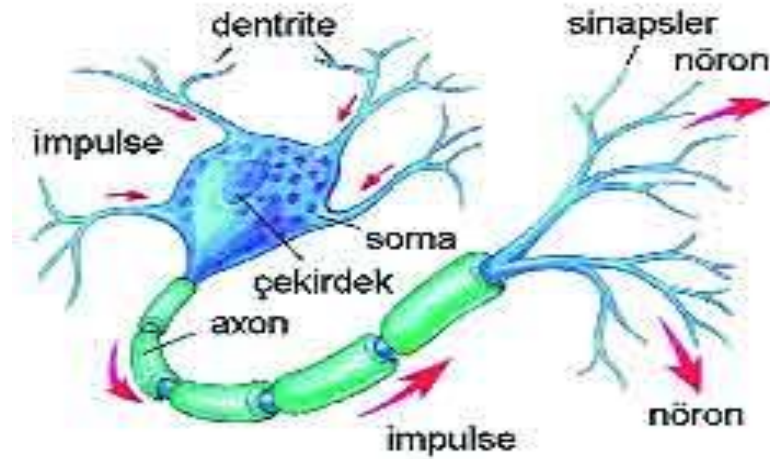
Yapay sinir ağları insanların biyolojik sinir sistemi yapısından yola çıkılarak geliştirilen bir sistem olduğu için yapay sinir ağlarının çalışmasını anlayabilmek adına öncelikle biyolojik sinir sisteminin yapısına bakmak gerekir. Biyolojik sinir sisteminin yapı taşı olan sinir hücreleri nöronlar, yapay sinir ağlarının da yapı taşıdır.

4.1.3 Nöronun Biyolojik Yapısı ve Nöron Modelleri

İnsanlar da elde edilen bilgilerin işleme olayı beyin de gerçekleşmektedir. Cerebral Cortex denilen "beyin" sahip olunan en karmaşık sinir ağlarına sahiptir. Sinir sisteminin en basit yapısı nöronlardır. Beyinde yaklaşık olarak 10^{10} sinir hücresi vardır ve hücre başına bağlantı sayısı ise 10^4 mertebesinde. Beynin sahip olduğu çalışma frekansı

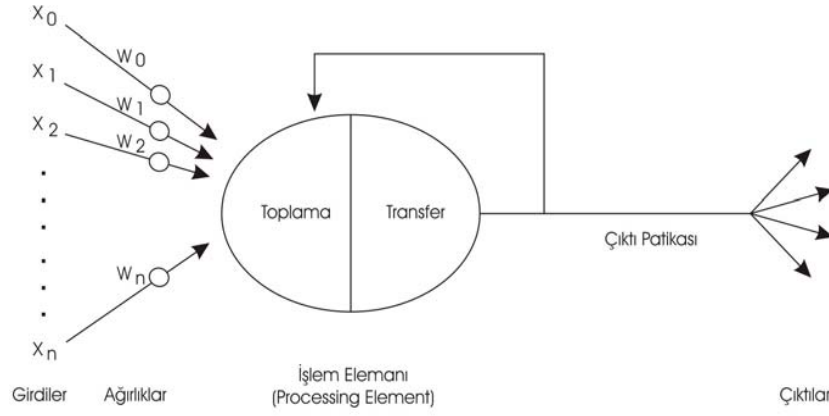
100 Hz olup, fiziksel boyutları ise 1.3 kg ve 0.15 m²' dir. Vücudun değişik yerleri ile bilgi alışverişi yapan ise nöron hücresidir.

Biyolojik sinir sistemlerinin temel elemanı olan nöronlar 4 bölümde oluşmakta olup, bunlar sırası ile; dendrit, akson, çekirdek ve bağlantılardır. Dendritler sinir hücrelerinin ucunda yer alıp, ağaç kökü gibi bir görüntüye sahiptirler. Dendritler temel olarak bağlı oldukları nöron veya duyu organlarından aldıkları sinyalleri çekirdeğe iletme görevini gerçekleştirirler. Çekirdek de dendrit vasıtasıyla gelen sinyalleri bir araya toplayıp aksonlara iletir. Toplanan tüm bu sinyaller akson vasıtası ile işlenerek nöronun diğer ucunda bulunan bağlantılara gönderilir ve bu bağlantılar üretilmiş olunan bu yeni sinyalleri bir diğer nörona ileterek görevini tamamlamış olur. Şekil 4.1'de basit bir nöronun yapısına ilişkin resim verilmiştir.



Şekil 4.1 Basit bir nöronun yapısı [39]

Yapay sinir ağlarının, insan sinir sisteminden esinlenerek yapıldığından bahsetmiştik. Nöronların yapısı ve sistematığı ile ilgili verilen bu bilgiler doğrultusunda yapay sinir ağlarında basit bir nöronun işleyişi Şekil 4.2'de ki gibidir.



Şekil 4.2 Yapay nöronun genel yapısı [41]

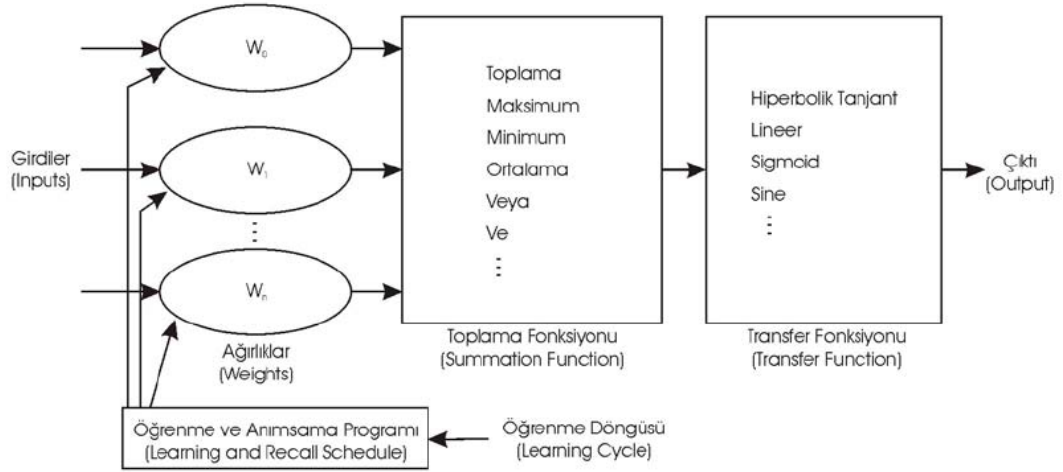
4.1.4 Yapay Sinir Hücresinin Yapısı

Önceki başlıklarda açıklandığı üzere yapay sinir hücreleri biyolojik sinir hücrelerinin yapısı ile benzerlik gösterebilmektedir ve nöronlar sinir sisteminde olduğu gibi aralarında bağ kurarak yapay sinir ağlarını oluşturabilmektedirler. Sinir sisteminde gerçekleşen giriş sinyallerinin alınması, alınan sinyallerin toplanıp işlenmesi ve çıktıların iletilmesi şeklindeki faaliyetler yapay sinir ağlarında da gerçekleşmektedir [39], [40], [41].

Bir yapay sinir hücresi 5 bölümden oluşmaktadır;

- Girdiler (inputs)
- Ağırlıklar
- Birleştirme fonksiyonu
- Aktivasyon fonksiyonu
- Çıktılar (outputs)

Bu bölümlerin detaylı gösterimi ile birlikte yapay sinir ağları akım şeması Şekil 4.3’de gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Yapay nöronun detaylı yapısı [41]

4.1.4.1 Girdiler

Yapay sinir ağlarına dışarıdan verilen bilgilerdir. Nöronlar tarafından alınan bilgiler biyolojik sinir hücrelerinde olduğu gibi bir araya gelebilmek üzere nöron çekirdeğine gönderilirler.

4.1.4.2 Ağırlıklar

Ağırlıklar, hücreler arasındaki bağlantıların sayısal değerini belirtmektedir. Bir hücre üzerine gelen bilginin sistem içerisindeki değerini ve hücre üzerindeki etkisini gösterir. Yapay sinir hücresine gelen bilgiler nöronlar üzerinden çekirdeğe ulaşmadan önce sahip oldukları bağlantıların ağırlık değeri ile çarpılarak çekirdeğe iletilir. Bu şekilde giriş verilerinin elde edilmek istenen çıktı değerine olan etkisi ayarlanabilir. Bu ağırlık değerleri pozitif, negatif veya sıfır olabilir. Ağırlık değeri sıfır olan giriş verilerinin çıkış üzerinde herhangi bir etkisi olmamaktadır.

4.1.4.3 Birleştirme Fonksiyonu

Birleştirme fonksiyonu, nöronlara gelen net bilgilerin hesaplanmasını sağlayan fonksiyondur. Yapay sinir hücreleri sahip oldukları ağırlıklarla çarpılarak gelen girdileri toplayıp hücrelerin kendilerine ait net girdisini hesaplayan bir fonksiyondur. Birleştirme

fonksiyonun toplama fonksiyonu olarak da literatürde karşımıza çıkabilmektedir. Denklem 4.1’de görülen eşitlik birleştirme fonksiyonuna örnektir.

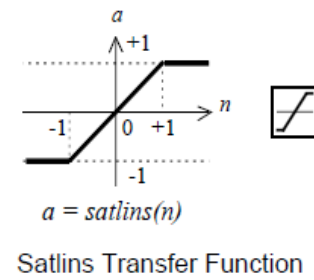
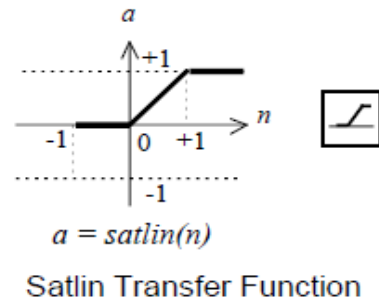
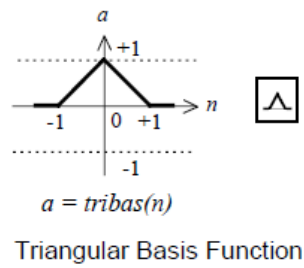
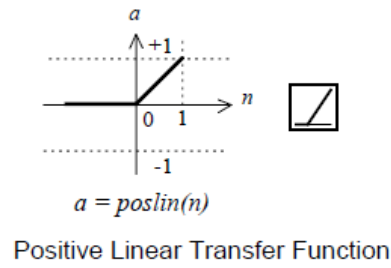
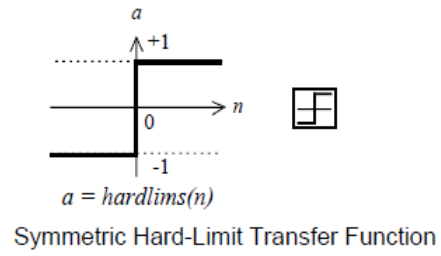
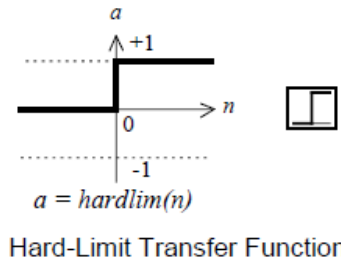
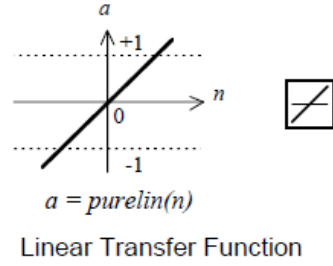
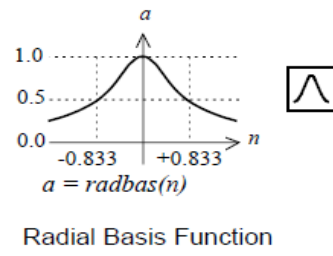
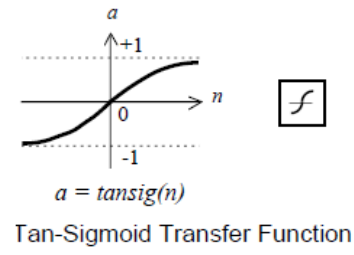
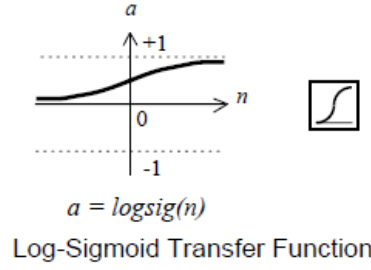
$$NET = \sum_{i=1}^N X_i W_i \quad (4.1)$$

4.1.4.4 Aktivasyon ve Transfer Fonksiyonları

Yapay sinir ağlarında, birleştirme (toplama) fonksiyonundan çıkan net toplamın sistemden elde edilmek istenen çıktı verilerini oluşturmasından önce transfer fonksiyonuna iletilmesi gerekmektedir. Transfer fonksiyonu genel olarak doğrusal olmayan fonksiyonlar arasından seçilir. Yapay sinir ağlarının doğrusal olmama özelliği transfer fonksiyonlarının doğrusal olmamasından kaynaklanmaktadır. Doğrusal olan fonksiyonların seçilmemesinin sebebi ise doğrusal fonksiyonlarda çıktının girdi ile doğru orantılı olmasıdır. Bu durum, ilk YSA denemelerinin başarısızlıkla sonuçlanmasına sebep olmuştur [42].

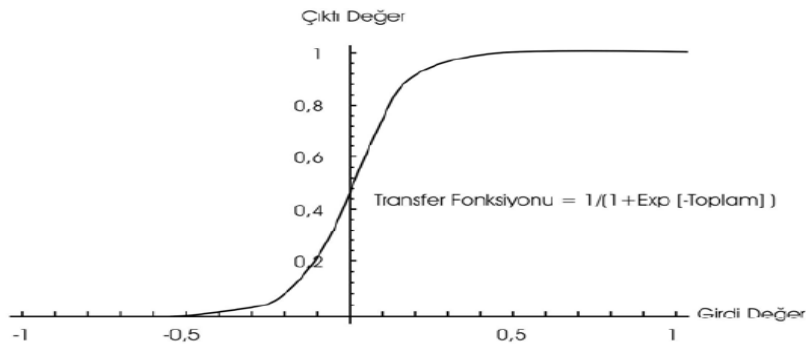
Transfer fonksiyonları seçiminde dikkat edilmesi gereken bir diğer konu ise seçilen fonksiyonun türevinin kolay hesaplanabilir olmasıdır. Özellikle geri beslemeli ağlarda aktivasyon fonksiyonunun türevi de görev aldığı için hesaplamaların kullanılabilir olmasından dolayı, hesaplaması kolay bir fonksiyonun seçilmesi gerekmektedir.

Genellikle kullanılan transfer fonksiyonları eşik, sigmoid, hiperbolik tanjant vb. fonksiyonlardır. Bu fonksiyonlar arasında en çok kullanılanlar Şekil 4.4’de örneklenmiştir.



Şekil 4.4 En çok kullanılan aktivasyon ve transfer fonksiyonları

Transfer fonksiyonundan elde edilen sonuç genelde işlem elemanının çıktısı olur. Transfer fonksiyonunun çalışma yapısı Şekil 4.5’de sigmoid fonksiyon kullanılarak örneklenmektedir. Sigmoid transfer fonksiyonu, toplama fonksiyonundan gelen ve Şekil 4.5’de gösterilen değerleri alır ve sıfır (0) ile bir (1) arasında bir değere dönüştürür. Sıfır (0) ile bir (1) arasındaki bu değer, transfer fonksiyonunun ve dolayısıyla işlem elemanının çıktısıdır. Elde edilen bu çıktı sonuç şeklinde dış ortama veya yeni bir girdi olarak başka bir nörona iletilir.



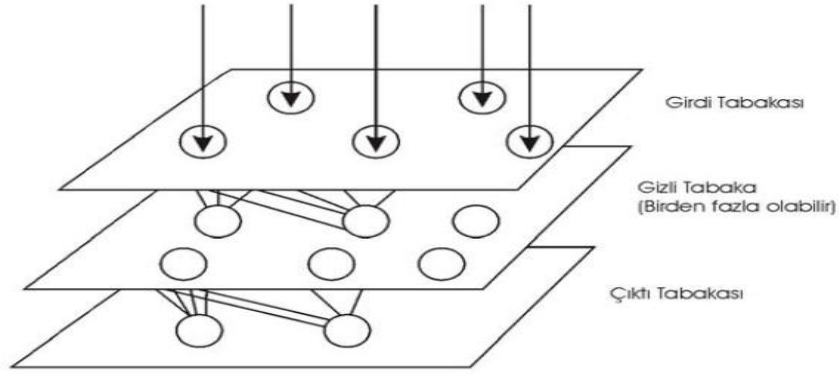
Şekil 4.5 Transfer fonksiyonunun çalışma yapısı [41]

4.1.4.5 Çıktılar

Transfer fonksiyonundan elde edilen değerler nöronların çıktı (output) değerini belirtmektedir. Bu değer yapay sinir ağ sisteminin genel çıktısı olarak kullanılabilir ya da sistem içerisinde tekrardan başka bir giriş (input) değeri olarak kullanılabilir. Çıktı değerleri bir ya da daha fazla sayıda olabilir.

4.1.5 Yapay Sinir Ağlarının Yapısı

Yapay sinir ağları yapısı, yapay sinir hücrelerinin birbirine bağlanması ile oluşum gösteren yapılardır. Bu sistemde nöronların birbiri ile etkileşime geçtiği ve bağlantı kurduğu 3 ana bölüm bulunmaktadır. Bu bölümler; giriş, ara ve çıkış katmanları olarak adlandırılmakta ve yapay sinir ağlarının yapısını oluşturmaktadır. Şekil 4.6’da YSA’nın genel yapısı şematize edilmiştir ve bu katmanlar alt konu başlıklarında sırasıyla incelenmiştir.



Şekil 4.6 YSA'nın genel yapısı [41]

4.1.5.1 Giriş Tabakası

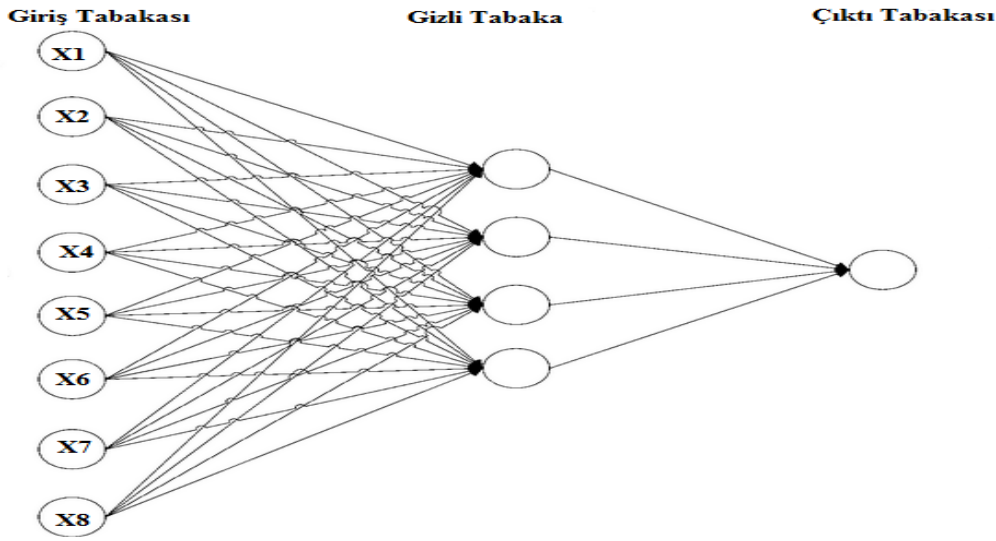
Yapay sinir ağlarında tüm işlemlerin başlatılabilmesi için giriş tabakasında kullanılmak istenen veri setinin sisteme girişinin yapıldığı, tanıtıldığı katmandır. Bu katmanda sisteme tanıtılmak istenildiği giriş değeri kadar nöron bulunur ve tüm bu nöronlar herhangi bir işleme uğramadan bir sonraki katmadan iletilir.

4.1.5.2 Gizli Tabaka

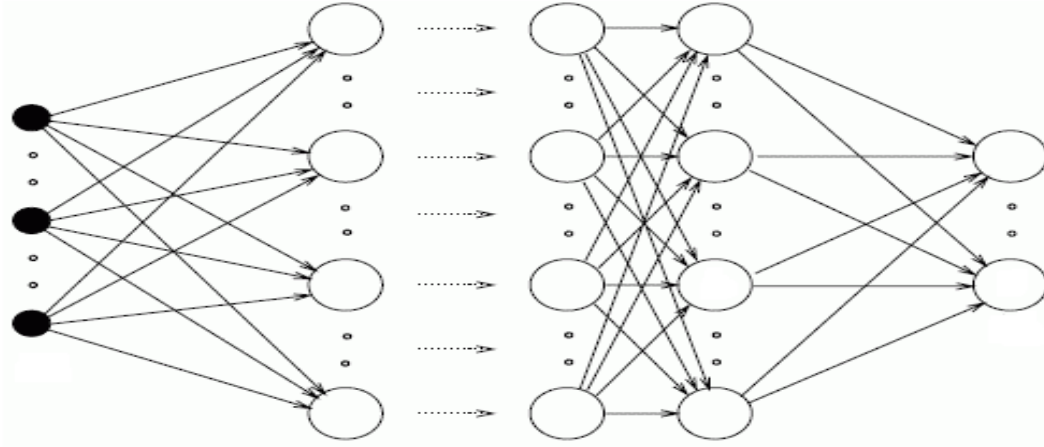
Giriş katmanında sisteme tanıtılan veri setinden çıkan bilgiler bu katmana gelir. Ara katman sayısı yapay sinir ağları arasında değişkenlik gösterebilir. Bazı yapay sinir ağlarında ara katman bulunmazken bazı sistemlerde 1, bazılarında ise çoklu katmanlar gözlenebilir. Ara katmanda bulunan nöron sayıları sistemde giriş yapan verilerin sayısı ya da sistemden elde edilmek istenen çıkış verisi sayısından bağımsızdır. Birden fazla ara katmana sahip olan yapay sinir ağlarında bu katmanların sahip oldukları nöron sayıları da değişkenlik gösterebilir. Ara katmanların ve bu katmanlardaki nöronların sayısının artması hesaplama karmaşıklığına ve işlem süresini arttırmasına rağmen yapay sinir ağlarının daha karmaşık problemlerin çözümünde de kullanılabilmesini sağlar.

Yapay sinir ağlarında sisteme girilen veri seti ve sistemden elde edilen çıkış değerleri bilinmektedir ancak bu iki katman arasında bulunan gizli tabakada gerçekleştirilen işlemler bilinmediği için bu tabaka gizli tabaka ismini almıştır. Şekil 4.7'de tek katmanlı

bir gizli tabakaya sahip yapay sinir ağı görülmekte iken şekil 4.8’da görülen yapay sinir ağında gizli tabakasında 1’den fazla katmana sahip olan bir sistem görülmektedir.



Şekil 4.7 Gizli tabakası tek katmanlı YSA [39]



Şekil 4.8 Gizli tabakası çok katmanlı YSA [41]

4.1.5.3 Çıkış Tabakası

Çıktı tabakası yapay sinir ağlarındaki son tabaka olup, girdi katmanında sisteme tanıtılan veri setinden gelen bilgileri işleyerek karşılığında çıktıları üreten tabakadır. Bu katmanda üretilen çıkış verileri direk olarak kullanılabilir ya da geri beslemeli ağlarda çıktı tabakasından elde edilen veriler kullanılarak ağ için yeni ağırlık değerleri hesaplanabilir.

4.1.6 Yapay Sinir Ağlarının Sınıflandırılması

Yapay sinir ağları işleyiş olarak birbirine benzemesine rağmen, ağın mimarisi, öğrenme yöntemi ve bağlantı yapıları gibi kriterler'den ötürü farklılık gösterebilmektedir. Genel olarak YSA'lar üç ana kritere göre sınıflandırılmaktadır.

Yapay sinir ağları genel olarak şu başlıklar altında sınıflandırılmaktadır;

- Yapılarına göre
- Öğrenme algoritmalarına göre
- Öğrenme zamanına göre

4.1.6.1 Yapılarına Göre Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları sahip oldukları nöronların birbirine bağlandıkları şekillere göre ileri ve geri beslemeli olarak ikiye ayrılırlar. Yapılarına göre yapay sinir ağları ilerleyen alt başlıklarda irdelenmiştir.

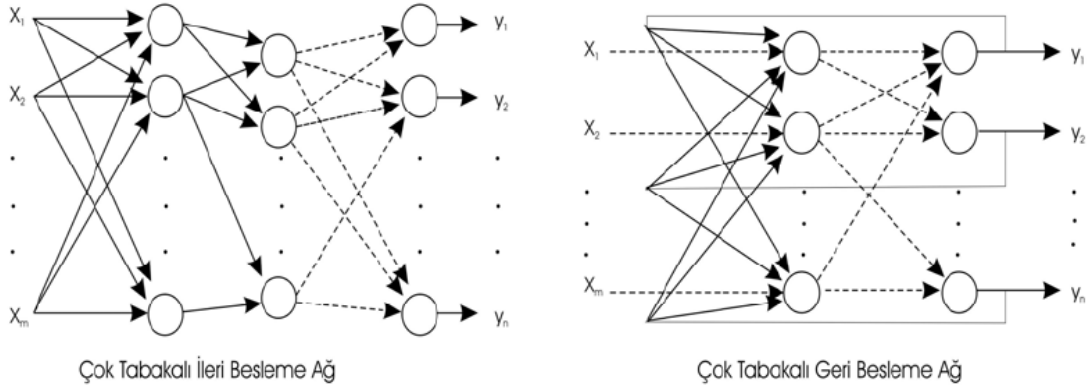
İleri Beslemeli Yapay Sinir Ağları

İleri beslemeli yapay sinir ağların da işlem elemanları arasındaki bağlantılar bir döngü oluşturmaz ve bu ağlar giriş verisine genellikle hızlı bir şekilde karşılık üretirler. Nöronlar girişten çıkışa doğru düzenli katmanlar şeklinde olup bir katmandan sadece kendinden sonraki katmanlara bağ bulunmaktadır. Yapay sinir ağına gelen bilgiler giriş katmanına daha sonra sırasıyla ara katmanlardan ve çıkış katmanından işlenerek geçer ve daha sonra çıkış verisi elde edilir.

Geri Beslemeli Yapay Sinir Ağları

Geri beslemeli yapay sinir ağlarında bağlantılar döngüsel biçimde yer alırlar. Geri beslemeli ağların ileri beslemeli ağlardan farkı, bir nöronun çıktısının sadece kendinden sonra gelen nöron katmanına girdi olarak verilmeyip ayrıca kendinden önceki katmanda veya kendi katmanında bulunan herhangi bir nörona da girdi olarak tanıtılabilesidir.

Geri beslemeli yapay sinir ağı, sahip oldukları döngü sebebiyle girdinin karşılığını yavaş bir şekilde oluştururlar. Bu yüzden, bu tür ağların eğitime süreci daha uzun olmaktadır [39], [41]. Şekil 4.9’da yapay sinir ağlarında ileri ve geri beslemeli ağ yapılarının şematizesi gösterilmektedir.



Şekil 4.9 İleri beslemeli ve geri beslemeli ağ yapıları [41]

4.1.6.2 Öğrenme Algoritmalarına Göre Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağlarının Sisteme tanıtılan giriş verilerine göre çıktı üretebilmesinin yolu ağın öğrenme kapasitesi ile alakalıdır. Bu öğrenme işleminin de birden fazla yöntemi vardır. Yapay sinir ağları öğrenme algoritmalarına göre danışmanlı, danışmansız ve takviyeli öğrenme olarak üçe ayrılır.

Danışmanlı Öğrenme

Yapay sinir ağlarında danışmanlı öğrenme de sisteme tanıtılan giriş değerlerinden elde edilmesi hedeflenen çıkış verileri de sisteme tanıtılır. Ağ tanıtılan bu giriş verileri için istenen sonucu bulabilmek amacıyla kendi ağırlık atamalarını günceller. Ağ’dan elde edilen çıktılar ile bulunması istenilen değerler arasındaki hata payı hesaplanarak, ağın bu hata payına göre yeni ağırlık ataması gerçekleşir.

Hata payı hesaplaması ise, sistemden elde edilen tüm çıktılar ile bulunulması beklenen çıktılar arasındaki fark hesaplanıp, bu farka göre tüm nöronlara düşen hata payı bulunur. Bu işlem ardından her nöron kendisine gelen ağırlıkları güncelleyerek işleme

devam eder. Bu işlem, istenilen verilere en yakın değer elde edilene kadar devam eder [39], [41].

Danışmansız Öğrenme

Yapay sinir ağlarında danışmansız öğrenme işlemi sisteme sadece örnek verilerin tanıtılması ile gerçekleştirilir. Sisteme herhangi bir çıktı bilgisi verilmediği için sistem girişte tanıtılan veriler doğrultusunda her bir veriyi kendi arasında sınıflandırarak kendi kurallarını oluşturur. Son olarak ağ bağlantı ağırlıklarını aynı özellikte olan dokuları ayırabilecek şekilde düzenleyerek öğrenme işlemini tamamlar[39], [41].

Destekleyici Öğrenme

Destekleyici öğrenme yaklaşımında, sistem ağın her bir iterasyon sonucunda elde ettiği verileri iyi ya da kötü olarak kategorize etmesiyle gerçekleşir. Bu veriler doğrultusunda ağ kendini yeniden düzenler ve bu şekilde ağ kendini elde ettiği bu bilgiler ile hem eğiterek hemde işlemlerden çıkardığı sonuçlar ile döngüyü devam ettirerek sürekli bir işleme tabi tutar [39], [41].

4.1.6.3 Öğrenme Zamanlarına Göre Yapay Sinir Ağları

Statik Öğrenme

Yapay sinir ağlarında statik öğrenme kuralı ile çalışan sistemler de ağ kullanılmadan önce eğitimi gerçekleştirilmektedir. Eğitim tamamlandıktan sonra ağ istenildiği gibi kullanılabilir. Ancak kullanım sırasında ağ üzerindeki ağırlık atamalarında herhangi bir değişiklik yapılamaz.

Dinamik Öğrenme

Yapay sinir ağlarında dinamik öğrenme kuralı, sistemin çalışmakta olduğu süre boyunca öğrenmesini öngörerek tasarlanmış olduğu öğrenme şeklidir. Ağ'da sinir eğitim aşaması bittikten sonra da, daha sonra ki kullanımlarda elde edilen çıktı verilerinin onaylanmasına göre ağırlıklar değiştirilerek çalışmalar devam ettirilir.

4.1.7 Yapay Sinir Ağlarının Çevre Mühendisliğinde Uygulamaları

Çevre Mühendisliği alanında yapılan çalışmaların yapay zekâ ile desteklenmesi son yılların popüler konuları arasında yer almaktadır. Yapılan geniş kapsamlı araştırmalar sonucunda çevre mühendisliği alanında gerçekleştirilen çalışmalar içerisinde, yapay zeka ile tahmin modellemesi yapılan çalışmaların %55.7'si su ve atıksu alanında, %30.8'i hava kirliliği alanında ve %13.5'i de katı atıklar alanında ortaya çıkan sorunların çözülümü yönündedir [43]. İlerleyen konu başlıklarında bu konularda gerçekleştirilen en güncel çalışmalar özetlenmiştir.

4.1.7.1 Yapay Sinir Ağlarının Atık Yönetiminde Uygulamaları

Kentsel atık yönetim sistemlerinde, atıkların düzgün bir şekilde depolanması ve bu alanların dizaynı ile planlaması için atık miktarına yönelik kesin bilgiler gerekmektedir. Ancak üretilen atığın miktarının tahmin edilmesi parametrelerin çeşitli sebeplerden ötürü farklılık göstermesinden ötürü doğru bir şekilde öngörülememektedir. Zade ve Noori [44], Mashhad'da üretilen atığın miktarı ile ilgili, ileri beslemeli yapay sinir ağları ile bir model geliştirmişlerdir. Jahandideh vd. [45], yapay sinir ağları ve çoklu lineer regresyon analizi tahmin modellerini kullanarak, hastane atıklarının toplam miktarını tahmin etmiş ve atıkları keskin, bulaşıcı ve genel olarak sınıflandırabilmişlerdir. Yapay sinir ağları ve diğer modeller atık yönetimi ve arıtımı gibi konularda yapılan çalışmalarda son zamanlarda fazlasıyla ihtiyaç duyulan bir konu haline gelmiştir.

Su ve Atıksu Arıtımı

Yabunaka vd. [46], yeni bir uygulama olan BP-ANN modeli ile Japonya da'ki Kasumigaura Gölü'nde oluşan yosun miktarını tahmin etmişlerdir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda YSA modelinin seçilen su kalitesi parametreleri ile oluşum gösteren algler arasındaki ilişkiyi iyi bir şekilde kavrayıp bu doğrultuda etkili bir sonuç verdiğini görülmüştür.

Karul vd. [47], 3 katmanlı Levenberg-Marquardt ileri beslemeli algoritma kullanarak, Keban Barajı rezervuarı, Mogan ve Eymir göllerinde ötrofikasyon prosesi için tahminde

bulunmuşlardır. Keban Barajı'nın karışık ve alışılmışın dışında olan doğal yapısına rağmen ölçülen ve tahmin edilen değerler arasında iyi bir korelasyon katsayısı elde etmişlerdir. Mogan ve Eymir gölleri için ise, ölçülen ve yapay sinir ağları tarafından tahmin edilen değerler arasındaki uyum max. $R = 0.95$ 'lik korelasyon katsayısı ile iyi bir sonuç göstermiştir. Yapılan bu model çalışması ile YSA modellerinin çok kompleks yapıda ki ya da non-lineer davranışlar gösteren veriler ile de uygun sonuçlar gösterebileceği kanıtlanmıştır.

Hamed vd. [48], Mısır'da bulunan ve ortalama $1 \text{ milyon m}^3/\text{gün}$ 'lük debiye sahip olan, Kahire atıksu arıtma tesisinde YSA temelli 2 model geliştirerek tesisin performansını tahmin etmeye çalışmışlardır. Çalışma kapsamında 10 ay boyunca arıtma tesisinin farklı aşamalarında BOİ ve askıda katı madde konsantrasyonlarını kayıt altında tutmuşlardır. Çalışma sonucunda YSA modeli atıksu arıtma tesisi performansını tahmin etmede etkili ve güçlü bir sistem olduğu belirlenmiştir.

Onkal-Engin vd. [49] tarafından yapılan bir başka çalışmada ise YSA modeli BP algoritması ile kokulu kanalizasyon örneklerinin, BOİ değerleri ile ilişkilendirilmesi amaçlanmıştır. Sonuç olarak YSA modelinin atıksu arıtma tesisinin farklı bölgelerinden toplanan örneklerin sınıflandırılmasında başarılı olduğunu görülmüştür.

YSA ile yapılan bir başka çalışma ise Yetilmezsoy ve Sapci-Zengin [50] tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada seyreltilmiş pamuk endüstrisi atıksuyunun, yukarı akışlı anaerobik çamur yataklı reaktörde işletimi sırasında KOİ giderim verimi tahmin edilmeye çalışılmıştır. YSA modelinde 3 katmanlı (9:12:1) model uygulanmış ve tanjant sigmoid (tansig) transfer fonksiyonu ile gizli katmanda 12 nöron ile çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlarda YSA modelinin KOİ giderim verimlerini hassas ve etkili bir şekilde tahmin ettiği ve 9 farklı parametre ile yapılan çalışmada 0.83 'lük tatmin edici bir korelasyon elde edildiği görülmüştür.

Karaca ve Özkaya [51] tarafından yönetilen bir çalışmada, Yapay Sinir Ağları – Sızıntı Suyu Debisi Tahmini (NN-LEAP) isimli çalışmada YSA modeli kullanılarak, kentsel katı atık deponi sahasında oluşan günlük sızıntı debisinin kontrolü amaçlanmıştır. Katı atık deponi sahasında ki sızıntı suyu debisini yaklaşık olarak $R = 0.95$ 'lik bir korelasyon

katsayısı ve 0.00168'lik bir ortalama karesel hata (MSE) ile tahmin etmiştir. Çalışma sonucunda YSA ile yapılan bu modellemenin atık deponi sahasında ki sızıntı suyu debisinin kontrolü ve günlük deşarj miktarını iyi bir şekilde tahmin ettiğini görülmüştür.

Benzer konularda yapılan çalışmalardan birinde ise Al-Mutari vd. [52], YSA temelli bir model kullanarak, stabilizasyon prosesi ve çıkış atık suyunun biyolojik aktivitesi ilişkilendirilmeye çalışılmış (Hawalli Atıksu arıtma tesisi, Kuveyt) ve BP ve genel regresyon analiz algoritmaları ile mikrofauna türlerinin dağılımı incelenmiştir. Bu çalışma da, verilerin stabilizasyon prosesinde ki mikrofauna dağılımı YSA kullanılarak modellenmiştir ve çıkış atıksu değerinin biyolojik aktivitesi tahmin edilmeye çalışılmıştır. Çalışmacılar sistemin yapısını geri dağılımlı yapay sinir ağları (BPNN) kullanarak 4 adımda modellemişlerdir. Çalışmanın optimizasyon kısmında, geri dağılımlı YSA modeli ile optimum yapıyı bulabilmek için sistem 6 farklı şekilde eğitilerek çalıştırılmıştır. Çalışma sonucunda genetik uyarlamalı genel regresyon sinir ağlarının (GRNN) kullanımının çalışma için daha avantajlı ve uygun bir model olduğu tespit edilmiştir.

Özkaya vd. [53] tarafından yapılan bir başka çalışmada, YSA modeli ile İstanbul Sarıyer'de bulunan Odayeri düzenli çöp depolama sahasın'a kurulan arazi ölçekli biyoreaktörlerden elde edilen gaz içerisinde ki metan parçalanmasını tahmin etmeye çalışmışlardır. Çalışmadan alınan sonuçlarda YSA modelinin kayda değer bir ölçüde ($R=0.96$) metan parçalanmasını tahmin ettiğini ve sisteme eş zamanlı etki eden çoklu faktörlerin anlaşılması yönünde de iyi sonuçlar gösterdiği belirtilmiştir.

Özkaya vd.'nin [54] bir başka çalışmasında akışkan yataklı reaktörde (FBR) biyolojik Fe^{+2} oksidasyonunun performansı ve biyoyıkama sırasında biriken Fe^{+3} kontrolü, geri beslemeli yapay sinir ağları ile tahmin edilmeye çalışılmıştır. Çalışma sonucunda ölçülen ve YSA tarafından tahmin edilen konsantrasyon değerlerinin birbiriyle uyum gösterdiği görülmüştür.

İncelenilmiş olunan çalışmalardan görüldüğü üzere su ve atıksu arıtımında YSA modelleri başarıyla uygulanabilmektedir. Ek olarak bu modellerin uygulanabilirliği kolay olup, çoklu değişkenlerin kullanıldığı sistemlerde nonlineer ilişkilerin belirtilmesine

ihtiyaç yoktur. Su ve atıksu ortamlarında kompleks biyokimyasal reaksiyonları tanımlayabilmektedir [43].

Hava Kirliliği

Hava kirliliği son 10 yıl içerisinde dünyanın birçok ülkesinde en önemli ve kritik çevre kirliliklerinden biri haline gelmiştir. Populasyon artışı, hızlı endüstriyelleşme, araç trafiğinin yoğunluğu, evsel ısınma, elektrik üretimi, antropojenik aktiviteler ve doğal kaynaklar gibi sebeplerden ötürü yüksek seviyelere ulaşan hava kirliliği yaşam kalitesini etkilemektedir. Özellikle bazı bölgelerde havadaki kirlilik konsantrasyonunun artması sonucu, solunum yolları ile ilgili akut ve kronik hastalıklar baş göstermiştir. Bu hastalıklar arasında, kardiyovasküler hastalıklar, bronkospazm, akciğer ödemi, pnomoni, akut bronşit hastalıkları ve akciğer kanseri yer almaktadır. Son yıllarda halkın sağlığına bu denli zarar veren çevre problemlerinden ötürü bu sorunla mücadele edilmesi önem kazanmıştır [43].

Hava kirliliği konusunda matematiksel modellerin önem arz etmesi hem dizayn ve işletimi açısından hemde büyük boyutlandırma değerlerinde çalışabilmek açısından avantaj sağlamaktadır. Bu dataları kullanarak, hava kirliliği kontrol ve uyarı modellemeleri geliştirilmesinin yanı sıra gelecek emisyon senaryoları ile ilgili tahminlerde de bulunulabilmektedir [43].

Akkoyunlu ve arkadaşlarının [55], yaptığı bir çalışmada hava kirliliğinin daha sağlam, güvenilir ve kaliteli yollarla kontrolü için yapay zekâ esaslı modeller gibi dinamik tekniklere ihtiyaç olduğu belirtilmiştir. Bu tür modellerle, anahtar parametrelerin kesinleştirilmesi ve çoklu girdiler ile çıktılar arasında varolan non-lineer ilişkilerin tahmin edilmesi gerçekleştirilebilmektedir.

Son 10 yılda hava kirliliği üzerine yapılan çalışmaların çoğunda YSA tabanlı tahmin modelleri etkili bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bu araştırmalarda, çalışmacıların çoğu farklı türlerde YSA modelleri denemişlerdir ve sonuçlar çoklu regresyon analizi ile öngörülen değerler ile kıyaslanmıştır. Örneğin Yetilmezsoy tarafından yapılan bir çalışmada [56], hava siklonlarda optimum gövde çapı'nın hesaplanmasında, gaz debisi,

partikül yoğunluğu, sıcaklık, K_a ve K_b olarak adlandırılan siklon dizaynında önem arz eden 2 farklı parametre de seçilerek, 5 farklı değişken ve 505 farklı yapay senaryo ile tahmin edilmeye çalışıldığı yapay sinir ağları modeli ve yeni bir empirik model denenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen optimum çap, ampirik model çalışmasında 1.3 cm, yapay sinir ağları çalışmasında ise 0.0022 cm olarak tahmin edilmiştir. İki çalışmada da kullanılabilir sonuçlar elde edilmiş olup, YSA modelinin daha pratik, hızlı ve uygulanabilir olduğu görülmüş ve optimum gövde çapı tahmininde daha iyi bir tahmin yaptığı tespit edilmiştir.

Agirre-Basurko vd. [57], 2 adet çoklu katmanlı geri yayımlı (MLP) model ve bir adet'te çoklu lineer regresyon analiz modeli ile İspanya, Bilbao'da ki ozon (O_3) ve azotdioksit (N_2O) seviyelerini tahmin etmeye çalışmışlardır. Yapılan çalışmada, trafik'te yer alan değişkenler modeli geliştirebilmek adına kullanılmıştır. Sonuçlar MLP tabanlı modelin, çoklu lineer regresyon analizi modeline kıyasla, kirletici konsantrasyonunu daha üstün bir performansla tahmin ettiğini göstermiştir.

Hava kirliliği temelli bir başka çalışmada, Nunnari vd. [58], çeşitli stokastik teknikler ile bir noktada ki SO_2 konsantrasyonlarını YSA, fuzzy logic ve bazı genel teknikler ile ölçerek karşılaştırmasını gerçekleştirmiştir. YSA modelinin bazı kritik bölümlerde daha iyi bir tahmin yapması neticesinde, hava kalite kontrolünde uyarıcı sistem olarak YSA yaklaşımını modelin uygulama olarak kullanılmasını tavsiye etmişlerdir.

Çeşitli meteorolojik koşullar altında gerçekleşen atmosferik kirliliklerin yayılım ve taşınım mekanizmaları karmaşık olmasına rağmen, hava kirliliği kontrolünün kontrol altına alınması ile ilgili çalışmalarda tahmin modelleri ile yapılan çalışmalara devam edilmektedir. Yapay zekâ temelli gerçekleştirilen çalışmaların uygun bir şekilde dizaynı ve hesaplanması gerçekleştirilebilirse, bu yöntemlerin hava kalite yönetimi ve hava kirliliğinin kontrolü gibi önem arz eden konularda önemli bir rol oynayabileceği düşünülmüştür [43].

4.2 Bulanik Mantik (Fuzzy-Logic) Modeli

Bulanik ilkeler hakkında ilk bilgiler, Lotfi Zadeh [59], tarafından literatüre kazandırılmıştır. Önceleri bulanıklaştırmanın kesin olan bilimsel ilkelere uymadığı ve hatta bilime karşı geldiği ileri sürülmesine rağmen, 1975 yılında Mamdani ve Assilian [60] tarafından yapılan bir kontrol uygulaması, bulanik kavram ve sistemlerin dikkat kazanmasına neden olmuştur. Bulanik modelleme, örnek bir veri seti ile tanımlanan ve içeriği kesin olarak bilinmeyen bir sistemin davranışını tahmin etmekte ve açıklamaktadır. Klasik matematiğe dayanan sistem modellemesi, eksik tanımlanmış ve belirsiz sistemler için pek uygun değildir. Bunun aksine, bulanik mantık sistemi, hassas nicel analizler kullanmadan insan bilgisinin ve yaklaşım süreçlerinin nitel taraflarını modelleyebilmektedir.

Son yıllarda, popüler konular arasında ön sıralarda yer alan bulanik küme, mantık ve sistemler hemen hemen her mühendislik dalında uygulanır hale gelmiştir [61]. Bulanik mantığın en geçerli olduğu iki durumdan ilki, incelenen olayın karmaşık olması ve bununla ilgili yeterli bilginin bulunmaması halinde kişilerin görüş ve yargılarına yer vermesidir. İkincisi ise insan muhakemesine, kavrayışlarına ve karar vermesine gereksinim gösteren hallerdir [62].

Çizelge 4.3 Klasik mantık - bulanik mantık arasındaki temel farklılıklar [62]

KLASİK MANTIK	BULANIK MANTIK
A <u>veya</u> A Değil	A <u>ve</u> A Değil
Kesin	Kısmi
Hepsi veya Hiçbiri	Belirli Derecelerde
0 veya 1	0 ve 1 Arasında Süreklilik
İkili Birimler	Bulanik Birimler

4.2.1 Bulanik Mantık Modelinin Genel Özellikleri

Zadeh'e göre bulanik mantık çoklu değerliliktir (multi-variable). Klasik mantığın 0 – 1 önermelerine karşılık bulanik mantık, üç veya daha fazla sayıda önerme oluşturur [62].

Bulanık mantığın başlıca özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- “doğru” , ”çok doğru” , ”az çok doğru” v.b. gibi sözel olarak ifade edilen (linguistik-dilsel-değişkenli) doğruluk derecelerine sahip olması,
- Geçerliliği kesin değil fakat yaklaşık olan çıkarım kurallarına sahip olması,
- Her kavramın bir derecesinin olması,
- Her mantıksal sistemin bulanıklaştırılabilmesi,
- Bulanık mantıkta bilginin, bulanık kısıtlara ait değişkenlerin esnekliği veya denkliliğiyle yorumlanabilmesi şeklindedir.

4.2.2 Bulanık Mantığın Avantaj ve Dezavantajları

Bulanık mantıktan yola çıkılarak kullanılan bulanık denetleyicilerle ilgili başlıca üstünlükler, zayıf noktalar ve eleştiriler aşağıda açıklanmıştır [63].

Avantajlar;

- Günlük hayatta olduğu gibi belirsiz, zamanla değişen, karmaşık, iyi tanımlanmamış sistemlerin denetimine basit çözümler getirir.
- Sistem basit bir matematiksel modelle tanımlanabilen bir sistemse o zaman geleneksel bir denetim yeterli olacaktır. Ama karmaşık bir sisteme geleneksel bir mantık uygulamak hem çok zor hem de yüksek maliyetlidir. Buna karşılık bulanık mantık denetimi geleneksel mantığa göre sistemi daha iyi analiz edebileceği gibi aynı zamanda da ekonomiktir.
- Bulanık mantıkta işaretlerin bir ön işleme tabi tutulmaları ve oldukça geniş bir alana yayılan değerlerin az sayıda üyelik fonksiyonlarına indirgenmeleri nedeni ile bulanık denetim genellikle daha küçük bir yazılımla daha hızlı bir şekilde sonuçlanır.
- Söz edilen az sayıda değerler üzerinde uygulanacak kural sayısı da az olduğundan sonuca ulaşmak daha da çabuklaşacaktır.
- Bu durum geleneksel bilgisayar ortamında böyledir. Özel geliştirilmiş bir donanımla sonuca daha da hızlı ulaşmak olasıdır. Örneğin Sanyo-Fisher firması mühendisleri, video kayıt cihazında kullanmayı düşündükleri mikro bilgisayarın yetersiz

kalmasından dolayı, bulanık denetim kullanmaya karar vermişlerdir. Bulanık denetim yazılım boyutlarının daha küçük olmasını sağladığından, dış bellek kullanımına gerek kalmamıştır.

- Bulanık mantık denetiminin sağladığı bir diğer avantaj ise doğrudan kullanıcı girişlerine ve kullanıcının deneyimlerinden yararlanabilmesine olanak sağlamasıdır.
- Bilindiği gibi otomatik vites değişimi motorun belli hızlara ulaşması sonucunda otomatik olarak gerçekleşir. Buna karşılık manuel vitesli bir arabada ise sürücü, yol, yük ve kendi araba kullanış tarzına göre belli durumlarda vites değiştirir. Subaru tarafından üretilen justy tipi otomobilde kullanılan aktarım organının değiştirilmesi, bir kayışın konumunun bulanık mantık kullanılarak değiştirilmesi ile sağlanır. Böylece arabanın ivmesi ve performansı sürekli olarak ayarlanır hale gelir. Subaru, bu otomobilde kullandığı bulanık mantık üyelik fonksiyonlarını, otomobili test şoförlerine kullandırarak ve onlardan ivme ve performans açısından en iyi aktarım oranını öğrenerek ayarlamıştır. Bu konuda Honda ve Nissan da benzer çalışmalar yapmışlardır.

Dezavantajlar;

- Bulanık denetimde kullanılan kurallar deneyime çok bağlıdır.
- Üyelik fonksiyonlarının seçiminde belirli bir yöntem yoktur. En uygun fonksiyon deneme ile bulunur. Bu da oldukça uzun bir zaman alabilir.
- Denetlenen sistemin bir kararlılık analizi yapılamaz ve sistemin nasıl cevap vereceği önceden kestirilemez. Yapılacak tek şey benzetim çalışmasıdır.

Eleştiriler;

- Bulanık denetleyicilere yönelik çeşitli eleştiriler de getirilmiştir. Bunlardan birkaçı aşağıda sıralanmıştır;
- Bulanık mantık denetleyicilerinin süreç hakkında daha fazla bilgiye ve algılayıcıya ihtiyaç duyması, dolayısıyla hem pahalı hem de daha az güvenilir olmasıdır. Bu her zaman doğru değildir. Örnek vermek gerekirse Mitsubishi tarafından üretilen klimada, geleneksel denetleyiciye göre daha az algılayıcı kullanılmıştır

- Bulanık mantık denetleyicilerinin geleneksel denetleyicilere kıyasla gösterdiği yüksek performans doğrusal olmayan denetleyici aracılığı ile de sağlanabilir. Bu doğru olabilir ama büyük bir ihtimalle doğrusal olmayan denetleyici, bulanık denetleyicide olduğu gibi daha küçük kapasiteli bir işlemci ile gerçekleştiremeyecektir.

4.2.3 Bulanık Kümeler ve Üyelik Dereceleri

Aristo mantığına göre çalışan ve şimdiye kadar alışlagelen klasik küme kavramında, bir kümeye giren öğelerin oraya ait oluşları durumunda üyelik dereceleri 1'e, ait olmamaları durumunda ise 0'a eşit varsayılmıştır. İkisi arasında hiçbir üyelik derecesi düşünülemez. Hâlbuki bulanık kümeler kavramında 0 ile 1 arasında değişen, değişik üyelik derecelerinden söz etmek mümkündür. Bu şekilde tanımlanan üyelik derecelerinin her bir bulanık söz için üç temel özelliği sağlaması gerekir:

- Bulanık küme normaldir, yani kümede bulunan elemanlardan en az bir tanesinin en büyük üyelik derecesi olan 1'e sahip olması gerekir.
- Bulanık küme monotondur, yani üyelik derecesi 1'e eşit olan öğeye yakın sağda ve soldaki öğelerin üyelik dereceleri de 1'e yakın olmalıdır.
- Üyelik derecesi 1'e eşit olan öğeden sağa ve sola eşit mesafe hareket edildiği zaman bulunan öğelerin üyelik derecelerinin birbirine eşit olmasıdır ki, buna da bulanık kümenin simetriklik özelliği adı verilir.

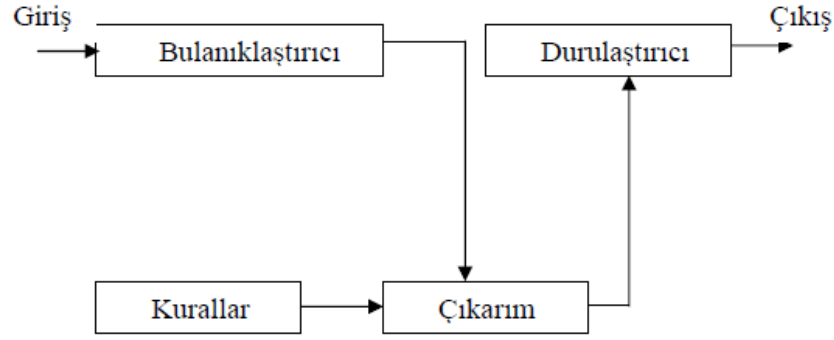
Klasik kümelerle bulanık kümelerin arasındaki önemli farklardan bir tanesi, klasik kümelerin sadece bir tane dikdörtgen üyelik derecesi bulunmasına karşılık, bulanık kümenin yukarıdaki üç şarttan ilk ikisini mutlaka sağlayacak biçimde çok değişik üyelik derecesi fonksiyonlarına sahip olmasıdır. Yani bulanık küme üyelik derecesi fonksiyonlarının mutlaka simetrik olması özelliğini sağlamasına gerek yoktur [62].

Genellikle bilinen matematik, kavramsal sistemlerin hemen hepsi Şekil 4.10'da görülen üç ayrı birimden ibarettir. Bunlar giriş, bu girişi çıkışa dönüştüren ve "sistem davranışı" olarak isimlendirilen bir kutu ve buradan çıkış kısımlarıdır. Bu birimlerin hepsinde çıkış veya işlemler yapılmaktadır.



Şekil 4.10 Klasik sistem [62]

Bulanık sistemlerin bu klasik tasarımdan farkı sistem davranışı kısmının dörde ayrılarak Şekil 4.11’de gösterildiği gibi kendi aralarında bağlantılı dört birimin olmasıdır.



Şekil 4.11 Bulanık mantığın temel elemanları [62]

Girdi (input) değerleri çoğunlukla kesin değerlerdir. Bulanıklaştırıcının (fuzzificator) görevi, bulanık kümeler (burada girdiler bulanık üyelik fonksiyonları tarafından tanımlanan bulanık değişkenlerdir) içine kesin sayıları haritalamaktır. Kurallar (Rules) “Eğer-İse” kurallarının oluşturduğu bulanık mantığı esas alır [62].

Genel olarak bulanık kurallar aşağıdaki formdadır;

Kural 1: Eğer $x = a_1$ ve $y = b_1$ İse $z = n_1$

Kural 2: Eğer $x = a_2$ ve $y = b_2$ İse $z = n_2$

Burada x ve y , öncül kısımdaki girdi değişkenlerince tanımlanan koşullar, z ise soncul kısımdaki çıktı değişkenlerince tanımlanan sonuçlardır [62].

Klasik uzman sistemlerde, kurallar insan deneyimlerinden çıkarılır. Bulanık kural tabanlı sistemlerde, kural tabanı insan deneyimlerinin yardımıyla şekillendirilir. Bulanık kural tabanında kullanılan insan deneyimlerinden elde edilen sözel (linguistic) bilgi ve ölçümlerden elde edilen sayısal bilgi birleştirildiğinde ilginç bir durum ortaya çıkar. Bu durumda, kurallar ilk adımda sayısal verilerden çıkarılır.

Sonraki adımda ise, bulanık kural tabanı insan deneyimlerinden elde edilen kurallar ile birleştirilebilir. Bulanık mantığın Çıkarım (inference) makinesi, bulanık kümeler içine haritalanır. Durulaştırma (defuzzification) esnasında, çıktı değişkeni için bir değer seçilir. Literatürde birçok farklı durulaştırma yöntemi mevcuttur [62]. Seçilen sonuç değeri çoğunlukla ya en yüksek üyelik derecesine sahip değer ya da ağırlık merkezi değeridir.

Genel olarak bir bulanık mantık işlemi, veri tabanı, bulanıklaştırma, çıkarım motoru, kural tabanı, durulaştırma ve çıktı işlemlerinden meydana gelmektedir.

Genel Bilgi Tabanı Birimi: İncelenecek olan olayın girdi değişkenlerini ve bunlar hakkındaki tüm bilgileri içerir. Buna veri tabanı veya kısaca giriş adı da verilir. Genel veri tabanı denilmesinin nedeni, buradaki bilgilerin sayısal ve/veya sözel olabilmesidir.

Bulanık Kural Tabanı Birimi: Veri tabanındaki girişleri çıkış değişkenlerine bağlayan mantıksal, EĞER-İSE türünde yazılabilen bütün kuralları içerir. Bu kuralların yazılmasında sadece girdi verileri ile çıktılar arasında olabilecek tüm aralık (bulanık küme) bağlantıları düşünülür. Böylece, her bir kural girdi uzayının bir parçasını çıktı uzayına mantıksal olarak bağlar. İşte bu bağlamların tümü kural tabanını oluşturur.

Bulanık Çıkarım Motoru Birimi: Bulanık kural tabanında giriş ve çıkış bulanık kümeleri arasında kurulmuş olan parça ilişkilerin hepsini bir arada toplayarak sistemin bir çıkışlı davranmasını temin eden işlemler topluluğunu içeren bir mekanizmadır. Bu motor her bir kuralın çıkarımlarını bir araya toplayarak tüm sistemin girdileri altında nasıl bir çıktı vereceğinin belirlenmesine yarar.

Durulaştırma Birimi: Bulanık çıkarım motorunun bulanık küme çıkışları üzerinde ölçek değişikliği yapılarak gerçek sayılara dönüştürdüğü birimdir.

Çıktı Birimi: Bilgi ve bulanık kural tabanlarının bulanık çıkarım motoru vasıtasıyla etkileşimi sonucunda elde edilen çıktı değerlerinin topluluğunu belirtir [62].

4.2.4 Üyelik Fonksiyonları (Membership functions, mfs)

Göz önünde tutulan bir bulanık kelime veya ifadenin temsil ettiği sayısal aralık, o ifade hakkında bilgi sahibi olan kişiler tarafından belirlenebilir. Zadeh bulanık mantık kavramında, Aristo' nun 1 veya 0, var veya yok gibi iki kesin ve ayrı durum içeren klasik küme mantığının yerine insan düşüncesine daha yatkın olarak belirli değer aralıklarını sözel ifadelerle tanımlayarak, kümeler arası geçişe esneklik kazandırmış ve gerçek yaşamdakine benzetmiştir [62]. Bu durum basitçe şu şekilde açıklanabilir. Örneğin, Şekil 4.12'de görülen klasik küme teorisinde sıcaklık eğer 16°C ise soğuktur. Fakat Şekil 4.13'de ki bulanık küme teorisinde ise 16°C sıcaklık için "sıcaktır" veya "soğuktur" diye kesin çizgilerle ayrılmış yargılar kullanılamaz. Çünkü 16°C sıcaklık değerinin belli bir derecede sıcak kümesine ve belli bir derecede soğuk kümesine üyeliği bulunmaktadır. Şekil 4.13'de ki küme mantığı insanın düşünme yeteneğine daha uyumlu bir yapıdadır [62].



Şekil 4.12 Klasik mantık [62]



Şekil 4.13 Bulanık mantık [62]

Üyelik fonksiyonlarının belirlenmesinde kullanılan başlıca yöntemler;

- Sezgi,
- Çıkarım
- Derecelendirme,
- Açılı bulanık kümeler,
- Yapay sinir ağları,
- Genetik algoritmalar,
- Çıkarımcı muhakeme

gibi değişik yaklaşımlardır [62].

Sezgi yöntemi, fazlaca teknik bilgi gerektirmemektedir. Burada her kişinin kendi anlayış, görüş ve olaya bakışları önemli rol oynar. Derecelendirme yönteminde, bir bulanık değişkene anketler, soruşturmalar veya seçimler sonucunda üyelik derecelerinin atanmasına çalışılır. Her zaman verilen iki seçenek arasındaki tercihler sayılır veya bu tercihlere verilen puanlandırmalarla işlem görülür. Açılı üyelik dereceleri koordinat bakımından alışlagelmiş bulanık kümelerden farklı olup, her 2π aralığında kendisini tekrarlamaktadır. Üyelik fonksiyonlarının atanması ile ilgili olarak özellikle yapay sinir ağları ve genetik algoritmalar gibi yöntemler de sıkça kullanılmaktadır [62].

4.2.5 Bulanıklaştırma

Pratikte genel olarak klasik küme şeklinde beliren değişim aralıklarının bulanıklaştırılması, bulanık küme, mantık ve sistem işlemleri için gereklidir. Bunun için, bir aralıkta bulunabilecek tüm öğelerin hepsinin, 1'e eşit üyelik derecesine sahip olacak yerde, 0 ile 1 arasında değişik değerlere sahip olması düşünülür. Böylece, bazı öğelerin belirsizlik içerdikleri kabul edilmekte ve bu belirsizliğin sayısal olmayan durumlardan kaynaklanması halinde bulanıklık durumundan bahsedilmektedir [62].

Bulanıklaştırma, verilen nümerik ayrık giriş parametrelerinin, bulanık işlem mekanizmasında değerlendirilmesi için bulanık kümelere dönüştürülmesi işlemidir.

Literatürde, birçok bulanıklaştırma şekli mevcut olup, bunlardan en çok kullanılanları; üçgen, yamuk veya Gauss biçimli üyelik fonksiyonları ile temsil edilenlerdir [62].

4.2.6 Bulanık Kurallar

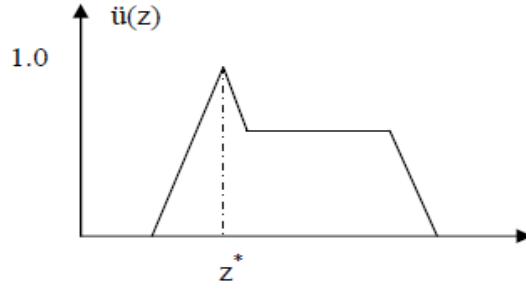
Bilgi işlemlerinin makineler tarafından algılanma yolu olan yapay zekâ alanında, bilgi işlemi için kullanılan yollardan bir tanesi de, bilgiyi insan dilindeki gibi bir ifade ile temsil etmektir. Bu en yaygın olarak kullanılan insan bilgisini işleme yöntemidir. Böyle bir ifadede EĞER-İSE (IF-THEN) ile ayrılmış olan iki kısım bulunur. Bunlardan EĞER ile İSE arasında bulunan kısma öncül veya ön koşul (premise part or the antecedent part), İSE den sonraki kısma ise soncul veya çıkarım (consequent part) adı verilir [62]. EĞER öncül İSE çıkarım; bu tür yapısı olan ifadelerle “EĞER-İSE kural tabanlı” biçim adı verilir. Bu ifade bilinen bazı bilgilerin kullanılması ile bunların ışığında faydalı olan diğerlerinin çıkarılması anlamına gelir. Bu tür bilgiler, insanın kendi kişisel deneyimlerinden hareketle çıkardığı, yerine göre çok nesnel (objektif) olmayan sığ bilgilerdir. Bunun karşısında, “derin bilgiler” in sözel olarak kolayca çıkarılması mümkün değildir. Örneğin Kepler yasaları ve Newton kurallarının gelişerek oluşmasında yılların gözlem, deneyim ve birikimleri vardır. Kural tabanlı bilgilerin uzmanlar tarafından verilen bilgilerden farklı tarafı uzmanlardan başka kaynaklardan da yararlanarak yazılabilmektedir [62]. Kural tabanlı olan bilgilerin gerek öncül gerekse de çıkarım olan son kısımları ayrı ayrı bulanıklaştırılarak işlemler yapılır.

4.2.7 Durulaştırma

Pratik uygulamalarda, özellikle teknik plan proje ve tasarımlarda, kesin olarak sayısal veriye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, bulanık sistemlerin çıktılarının uygulamalarda doğrudan kullanılması mümkün olmamaktadır. Bu durumda, bulanık çıktıların durulaştırılması gerekir. Durulaştırma işlemi, bulanıklaştırma işleminin tersi olup, bulanık çıktıların sayılara dönüştürülmesidir. Durulaştırma işlemi için pek çok farklı yöntem kullanılmaktadır [63].

4.2.7.1 En Büyük Üyelik İlkesi

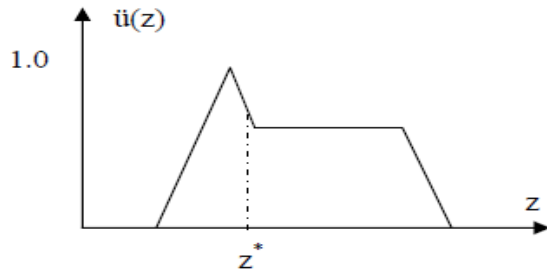
Bunun diğ er bir adı da yükseklik yöntemidir. Kullanılabilmesi için tepeleri olan çıkarım bulanık kümelerine gerek vardır. Şekil 4.14’de bu durulaştırma işlemi gösterilmektedir.



Şekil 4.14 En büyük üyelik ilkesi durulaştırması [63]

4.2.7.2 Ağırlık Merkezi

Durulaştırma işlemlerinde, en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Şekil 4.15’de bu yöntem kullanılarak yapılan durulaştırma işlemi gösterilmiştir.

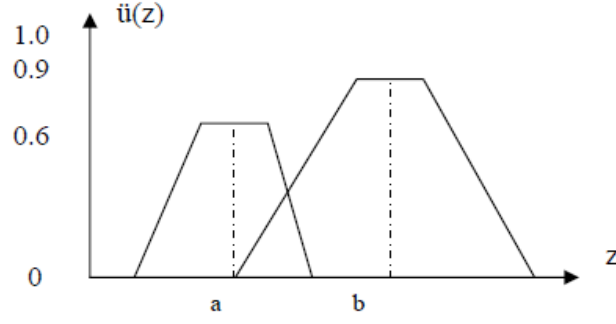


Şekil 4.15 Centroid yöntemi durulaştırması [63]

4.2.7.3 Ağırlıklı Ortalama Yönetimi

Bu yöntemin kullanılabilmesi için simetrik üyelik fonksiyonunun bulunması gerekir.  rneğ in, Şekil 4.16’da görülen bulanık kümenin ağırlıklı ortalaması (durulaştırılmış değeri):

$$z^* = \frac{a(0,6) + b(0,9)}{0,6 + 0,9} \quad (4.2)$$

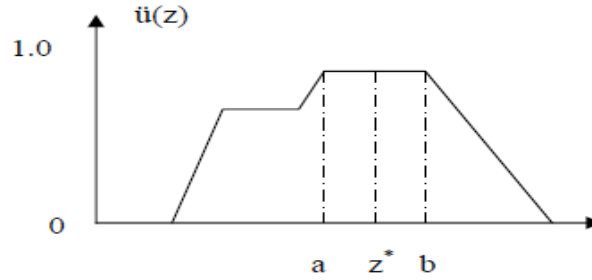


Şekil 4.16 Ağırlıklı ortalama [63]

4.2.7.4 Ortalama En Büyük Üyelik

En büyük üyelik ilkesine oldukça yakındır. Ancak en büyük üyelik değeri birden fazla olduğu durumlarda kullanılmaktadır. Yöntemin matematik ifadesi Şekil 4.17’de ki gibidir.

$$z^* = (a+b)/2 \quad (4.3)$$



Şekil 4.17 Ortalama en büyük üyelik durulaştırması [63]

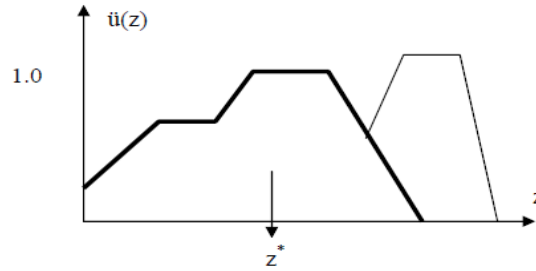
4.2.7.5 Toplamların Merkezi

Durulaştırma işlemlerinde en hızlı olan yöntemdir. Bu yöntemde iki bulanık kümenin birleşimi yerine onların cebirsel toplamaları kullanılır. Bunun bir sakıncası, örtüşen kısımların iki defa toplama girmesidir. Bu durum, bir bakıma hesaplama tarzı ağırlıklı ortalama durulaştırmasına benzer. Ancak bu yöntemde ağırlıklar, ilgili üyelik fonksiyonlarının alanlarıdır. Ağırlıklı ortalama yönteminde ise bu, üyelik derecesidir.

4.2.7.6 En Büyük Alanın Merkezi

Eğer çıkış bulanık kümesi en azından iki tane dış bükey alt bulanık kümeyi içeriyorsa, bu bulanık kümelerin en büyük alanlısının ağırlık merkezi durulaştırma işleminde kullanılır.

Şekil 4.18 durulaştırma işlemini gösterir.



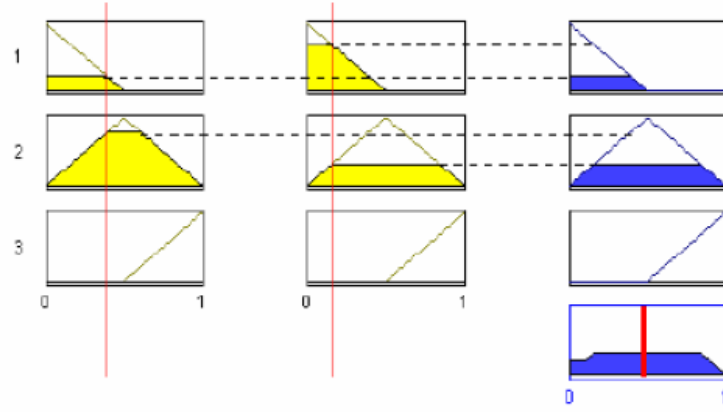
Şekil 4.18 En büyük alanın merkezi [63]

4.2.7.7 En Büyük İlk veya Son Üyelik Derecesi

Bu yöntem, tüm çıktıların birleşimi olarak ortaya çıkan bulanık kümede, en büyük üyelik derecesine sahip olan en küçük bulanık küme değerini seçmek esasına dayanır [63].

4.2.8 Durulaştırmada Kuralların Harmanlanmasında Kullanılan 'VE' Operatörünün Çalışma Prensibi

İki tane girdisi ve bir tane çıktısı olan bir sistemi ele alacak olursak ve kurallar arası harmanlamanın VE bağlacı ile yapılmış olduğunu varsayarsak bu durumda En Büyük-En Küçük (EB-EK) kuralı gereğince her iki girdinin üyelik derecelerinden küçük olanın üyelik derecesi çıktının üyelik derecesi olacaktır. Bahsedilen durum Şekil 4.19'da görülmektedir.



Şekil 4.19 VE bağlacı ile bağlanan kuralın kullanıldığı örnek [63]

4.2.9 Bulanık Mantığın Farklı Uygulama Alanları

Günümüzde hemen hemen her alanda uygulama imkânı bulan bulanık mantık, özellikle sanayi alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Japonya’da bulanık mantık tekniği özellikle bulaşık makineleri, çamaşır makineleri, elektrik süpürgeleri, video kameralara uygulanmıştır.

Bulanık mantık uygulamaları ilk olarak çimento sektöründe kullanılmaya başlanmıştır. Bu sektörde kireç taşı ve kil 1000-1400 derece sıcaklıkta reaksiyona girmektedir. Fırın içindeki sıcaklık ve oksijen oranı çimentonun kalitesini doğrudan etkilemektedir. Sadece bu konuda uzman operatörler istenilen limitler dâhilinde ürün elde edebilmektedirler. Ancak vardiyalı bir sistemle çalışan bu fabrikada çok sayıda operatör bulunmakta ve her operatörün uzmanlıklarının farklı olması nedeniyle farklı niteliklerde ve verimlilikte ürün elde edilmektedir. İstenilen kalitede ürün sadece bu işte yıllardır çalışan uzmanlar tarafından sağlanabilmektedir. Çimento üretimi bulanık bir yapıya sahiptir ve süreç kontrolünü bulanık kurallar sağlamaktadır. Örneğin, “ısıyı 10 derece yükselt” veya “5 derece azalt” gibi kesin kurallar değil “biraz azalt”, “biraz yükselt” gibi bulanık terimlerle ifade edilen kurallarla kontrol edilmektedir. Danimarka’da bu sürecin kontrolü için uzman operatörlerin kullandığı 50-60 pratik kuraldan hareketle bir mikro kontrolör oluşturulmuş ve sonuç olarak sabit ürün kalitesi ve yakıtta büyük tasarruf elde edilmiştir.

Daha sonraları bulanık mantık, insansız uçakların kontrolünde, tren frenleme sistemlerinde, ABS (otomatik fren sistemi) ve ASC (otomatik vites kontrolü) kontrolünde kullanılmıştır. Çizelge 4.5’de pratikteki bulanık mantık uygulamalarından bazı örnekler verilmiştir.

Çizelge 4.4 Bulanık denetim uygulamaları [63]

ÜRÜN	FİRMA	BULANIK MANTIĞIN İŞLEVİ
Asansör Denetimi	Fujitec –Toshiba Mitsubishi, Hitachi	Yolcu trafiğini değerlendirir. Böylece bekleme zamanı azalır.
SLR Fotoğraf Makinesi	Sanyo –Fisher Canon, Minolta	Ekranda birkaç obje olması durumunda en iyi fokusu ve aydınlatmayı belirler
Video Kayıt Cihazı	Panasonic	Cihazın elle tutulması nedeniyle çekim sırasında oluşan sarsıntıları ortadan kaldırır.
Çamaşır Makinesi	Matsushita	Çamaşırın kirliliğini, ağırlığını, kumaş cinsini sezer, ona göre yıkama programını seçer.
Elektrik Süpürgesi	Matsushita	Yerin durumun ve kirliliğini sezer ve motor gücünü uygun ayarlar.
Su Isıtıcısı	Matsushita	Isıtmayı kullanılan suyun miktar ve sıcaklığına göre ayarlar.
Klima	Mitsubishi	Ortam koşullarını değerlendirerek en iyi çalışma durumunu algılar, odaya birisi girerse soğutmayı arttırır.
ABS Fren Sistemi	Nissan	Tekerleklerin kilitlenmeden frenlenmesini sağlar.
Çelik Endüstrisi	Nippon Steel	Geleneksel denetleyicilerin yerini alır.

Çizelge 4.5. (Devamı) Bulanık denetim uygulamaları [63]

Sendai Metro Sistemi	Hitachi	Hızlanma ve yavaşlamayı ayarlayarak rahat bir yolculuk sağlanmasının yanı sıra durma konumunu iyi ayarlar, güçten tasarruf sağlar.
Çimento Sanayi	Mitsubishi Chem	Değirmende ısı ve oksijen oranı denetimi yapar.
Televizyon	Sony	Ekran kontrastını, parlaklığını ve rengini ayarlar.
El Bilgisayarı	Sony	El yazısı ile veri ve komut girişine olarak tanır.

MATERYAL VE METOT

5.1 Modelleme Çalışmasında Kullanılan Veri Seti Temini ve İşletme Koşulları

Türkiye’de 1960 yıllarından sonra Marmara Denizi, yoğun olarak sanayileşen ve nüfus yoğunluğu artan İzmit Körfezi’nin endüstriyel ve evsel atıksuları ile kirlenmiştir. Bu nedenle İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSKİ) 23 Mayıs 1984 Tarihli ve 3900 Sayılı kuruluş kanunuyla çevre kirliliğinin giderimi ve denetim altına alınması yetkisi ile DAMOC projesinde planlanan; Tuzla, Pendik, Kartal ve Maltepe Dragos bölgelerinden kaynaklanan atıksular 4500 mm lik atıksu kolektör hatları ile toplanarak 31 Ekim 1998 tarihinde devreye alınan Tuzla Biyolojik ve İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi’ne (Şekil 5.1) gelmektedir. Tesisin akış diyagramı EK-D ‘de verilmiştir.



Şekil 5.1 İSKİ Tuzla biyolojik ve ileri biyolojik atıksu arıtma tesisi

İSKİ Tuzla Biyolojik ve İleri Biyolojik Atıksu arıtma Tesisinin kurulumu ile aşağıdaki hususlar hedeflenmiştir;

- Marmara denizini kirleten, Tuzla çevresine ait atıksular tesiste biyolojik ve ileri biyolojik giderim yöntemi ile arıtılması,
- Tesiste proses gereği oluşan arıtma çamuru, 300 ton/gün kapasitedeki termal çamur kurutucular ile kurutularak 75 ton/gün 'e düşürülerek bertaraf için az hacime ihtiyaç duyulmasına ve kurutulan atık çamurun ek yakıt olarak değerlendirilmesi,
- Anaerobik çamur çürütme prosesi ile çamur stabilizasyonu sağlayarak biyogaz üretilmesi,
- Gaz türbinleri ile tesiste üretilen biyogaz ile doğalgazın belli oranlarda karıştırılıp elektrik enerjisi üretilmesi ve açığa çıkan atık ısı ile çamur kurutma prosesinde çamurun kurutulması için gerekli ısının sağlanması,
- Atıksudan kaynaklanan koku probleminin Ozon ile Koku Giderim ünitesinde giderilmesidir.

Tuzla Biyolojik ve İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi, havzasında hali hazırda bulunan ve gelecekteki nüfus artışı da göz önüne alınarak 3 aşamalı modüler sistemde planlanmıştır. Birinci aşamada 6 modül (4 modül biyolojik-2 modül ileri biyolojik olup) inşa edilmiş olup, her türlü mekanik, elektrik, elektronik techizatlarla donatılmıştır ve proses gereği ek ünitelerde yapılmıştır.

Çizelge 5.1 İSKİ Tuzla biyolojik ve ileri biyolojik atıku arıtma tesisi; biyolojik ve ileri biyolojik proje değerleri ile tesisin nihai durumu

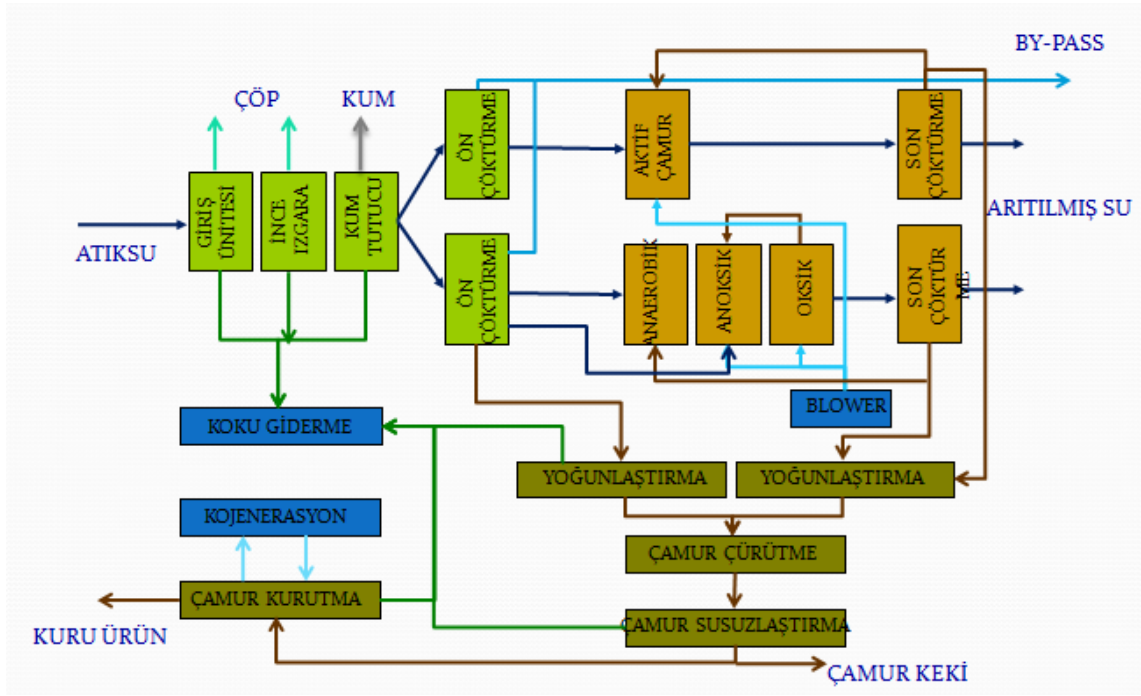
	BİYOLOJİK	İLERİ BİYOLOJİK	NİHAİ
Proje debisi, m³/gün	150000	100000	
Eşdeğer nüfus, kişi	1000000	500000	
İşletmeye başlama yılı	1998	2009	
Nihai debi, m³/gün			500000
Nihai eşdeğer nüfus, kişi			2500000
Tesis alanı, m²			550000

Çizelge 5.2 İSKİ Tuzla biyolojik ve ileri biyolojik atıku arıtma tesisi dizayn parametreleri

PARAMETRELER	BİYOLOJİK		İLERİ BİYOLOJİK	
	Giriş	Çıkış	Giriş	Çıkış
	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)
Askıda Katı Madde (AKM)	333	30	620	35
Biyolojik Oksijen İhtiyacı (BOİ)	250	20	360	25
Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)	-	-	700	125
Toplam Kjeldahl Azotu (TKN)	-	-	50	2
Toplam Azot (TN)	-	-	-	10
Organik Azot (org-N)	-	-	20	2
Amonyum Azotu (NH₄-N)	-	-	30	-
Nitrat Azotu (NO₃-N)	-	-	0	8
Toplam Fosfor (TP)	-	-	8	3

Tuzla Sahil Tünel Kollektörü ve Kemiklidere Tuzla Tünel Kollektörü ile tesise -8,47 m kotunda Tuzla, Pendik, Kartal ve Maltepe Dragos bölgelerinden kaynaklanan atıksular, iki adet 2600 mm 'lik giriş şaftlarından tesise giriş yapmaktadır. Atıksu ilk olarak içerisindeki kaba maddelerin, pompa ve diğer teçhizatlar zarar vermesini önlemek için taş tutucu ve kaba ızgaradan geçirilmektedir. Giriş yapısında tutulan taşlar kepçeli taş tutma vinciyle atıksudan uzaklaştırmaktadır. dört adet mekanik temizlemeli ve tırmıklı, çubuk aralığı 5 cm olan kaba ızgaralarda tutulan çöpler, konveyör bantlar ile konteynerlere boşaltılmaktadır. Kaba ızgaradan geçen atıksular -8.47 kotundan, dört adet kapasitesi 1465 lt/sn, bir adet kapasitesi 1450 lt/sn ve iki adet kapasitesi 750 lt/sn olan pompalar ile +12.86 kotuna terfi ettirilmektedir. Terfi merkezinde yedi adet ana atıksu pompası olup bu pompalar sıralı olarak çalıştırılmaktadır.

Terfi ettirilen atıksular, çubuk aralığı 10 mm olan toplam altı adet ince ızgaradan geçirilir. Tırmıklar, zincir baklarına monte edilmiş her biri dört taraktan müteşekkil paletlerle sürekli çalıştırılmaktadır. İnce ızgaralarda tutulan ve konveyör banda boşaltılan çöpler, burgulu pres de sıkıştırılarak konteynıra boşaltılmaktadır.



Şekil 5.2 İSKİ Tuzla biyolojik ve ileri biyolojik atıku arıtma tesisi akış diyagramı

Havalandırılmalı kum tutuculara gelen, ızgaralardan geçirilmiş atıksu içindeki kum vs. inorganik malzemeler, yatay hızı 0.1 m/sn olacak şekilde havuz tabanına çökeltilmektedir. Her havuz üzerinde çalışan bir adet gezer köprüye monteli dalgıç pompalar ile havuz tabanından emilen kum sudan ayrılmak üzere kum bunkerlerine gönderilmektedir. Havuzların köpük haznesinde biriken köpük ve yağ köpük pompaları ile döner tambur ızgaradan geçirilmektedir. Kum tutucu savaklardan geçen atıksu venturi kanallarından geçerken debi ölçümü yapılmaktadır. Mekanik tasfiye sürecinin son kademesi ön çöktürme havuzlarıdır. Dikdörtgen kesitli ön çöktürme havuzlarında (Şekil 5.3) takriben 2 saat bekletilen atıksudan ayrılarak havuz dibine biriken çökebilen katı maddeler, çamur sıyrıcı köprüler ile havuzların menba tarafındaki çamur hunilerine toplanmaktadır. Çamur, hunilere bağlı emici boru hatları vasıtasıyla, pompalar ile önce strainpresslere sonra çamur yoğunlaştırma dekantörlerine iletilmektedir. Böylece ön çöktürme havuzlarında çökebilen katı maddelerini bırakan atıksu fiziki olarak arıtılmış olup, biyolojik arıtmaya hazır hale getirilmiştir. Ön çöktürme havuzlarında takriben %60-65 AKM ve %30-35 BOI₅ giderimi sağlanmaktadır.



Şekil 5.3 Ön çöktürme havuzları

Ön çöktürme havuzlarında biriken çamur % 2-3 katı madde ihtiva etmektedir. Ön çöktürmeden çekilen çamur öğütücüden geçirilerek, inorganik maddelerinden ayrıştırılabilmesi için strain presse (Şekil 5.4) gelmektedir. Strain presse giren arıtma çamuru, 1.2 bar lık basınçla öncelikle elek aralığı 5 mm olan, arkasından da elek aralığı 2 mm olan elekten geçer ve inorganik maddelerinden ayrışır.



Şekil 5.4 Strain pressler

Strainpressten geçen çamur iki şekilde yoğunlaştırılmaktadır. Bu metodlar, Arıtma çamuru ya mekanik yoğunlaştırıcılara gönderilip, % 0.1 katyonik polielektrolit ilavesiyle % 5-6 yoğunluğa getirilerek anaerobik çamur çürütme tanklarına gönderilir ya da üç adet 530 m³ lük çamur yoğunlaştırma havuzlarında (Şekil 5.5) yaklaşık 26 saat bekledikten sonra % 5-6 yoğunluğa getirilerek, pompalar vasıtası ile anaerobik çamur çürütme tanklarına gönderilmektedir.



Şekil 5.5 Çamur yoğunlaştırma havuzları

Fiziksel arıtmanın son aşaması olan ön çöktürme havuzlarından sonra atıksu, biyolojik ve ileri biyolojik arıtma kademelerine yönlendirilir.

Biyolojik arıtma prosesinde, ön çöktürme havuzlarından geçen atıksular 900 mm çaplı çelik borular ile dört adet havalandırma havuzlarına (Şekil 5.6) alınır. Toplam 14160 adet 24.5 mm çaplı ince kabarcıklı seramik difüzörler havuz tabanına yerleştirilmiştir. Dört adet turbo blower ile atmosferden emilen hava basınçlandırılarak havalandırma havuzlarına gönderilir. Aktif çamur, koloidal ve çözünmüş maddelerin mikroorganizmalar vasıtasıyla çökebilir biyolojik floklara dönüştürüldüğü procestir. Bu proseste havalandırma havuzu içindeki karışık sıvıda mikroorganizmaların askıda tutulması esastır. Çökeltim özelliği arttırılan biyolojik yumaklar, biyolojik üniteyi takiben Çökeltme havuzuna gecer. Arıtılan su, sistemi terk ederken, çöken çamurun bir kısmı havalandırma havuzunda istenen mikroorganizma konsantrasyonunu korumak üzere geri devrettirilir, fazla çamur ise çamur işleme ünitelerine gönderilerek uzaklaştırılır. Atıksu içerisinde bulunan karbon, mikroorganizmaların okside etmesi ile sudan uzaklaştırılır.



Şekil 5.6 Biyolojik arıtma, havandırma havuzu

İleri biyolojik arıtmada, ön çöktürmeden gelen atıksu ve son çöktürme havuzlarından gelen geri devir çamuru ilk olarak iki adet 3000 m³ lük anaerobik biyofosfor havuzlarına (Şekil 5.7) alınarak biyolojik fosfor giderimine başlanmıştır. Havuzda anaerobik şartların devamlılığını izlemek amacıyla, her bir havuza yerleştirilen redoks metrelerle, oksidasyon redüksiyon potansiyeli (ORP) ölçülmektedir. Anaerobik Havuzda ölçülen ORP değeri anaerobik koşulun sağlanması için -150 mV 'dan küçük değerlerde tutulmaktadır. Fosfor salınımının gerçekleşmesi için, giriş suyundaki kolay ayrışabilir çözülmüş organik karbonun hücre içinde depolanması gerekmektedir; elektron alıcısı bulunduğu mikro organizma faaliyetlerinin devamı için depo karbonu kullanılacak ve yeniden ATP üretimi için aşırı fosfor depolaması gerçekleştirilerek atıksudan fosforu uzaklaştırmaktadır.



Şekil 5.7 İleri biyolojik arıtma anaerobik biyofosfor havuzu

Anoksik ve oksik proses havuzlarında nitrifikasyon ve denitrifikasyon gerçekleşerek azot giderimi sağlanmaktadır. Toplam 10040 adet 9" lik ince kabarcıklı membran difüzörler proses havuzlarının (şekil 5.8) tabanına yerleştirilmiştir. Dört adet turbo blower ile atmosferden emilen hava basınçlandırılarak havalandırma havuzlarına gönderilir. Nitrifikasyon prosesi iki kademedede gerçekleştirilmektedir ve bu proses boyunca iki ayrı mikroorganizma türü faaliyet göstermektedir. İlk aşamada ortamda mevcut amonyak iyonları, Nitrosomonas bakterileri tarafından nitrite (NO_2^-); oluşan bu nitrit de nitrobacter türü bakteriler tarafından nitrata (NO_3^-) dönüştürölürler. Nitrifikasyonun gerçekleştiği proses havuzunda ölçölen ORP değeri oksik koşulun sağlanması için 50 mV üstünde tutulmaktadır ve çözönmüş oksijen değerinin 1.5-2 mg/l 'de civarında olmamasına dikkat edilmektedir.

Denitrifikasyon, nitrifikasyon prosesinin tam tersi bir işlem olup; anoksik şartlarda NO_3^- azotunun, azot gazı (N_2) haline dönüşmesi işlemi olarak tanımlanır. Bu proses iki kademededen oluşmaktadır ve Pseudomonas, Alcaligenesi Achromobacter, Arthrobacter adıyla bilinen bakteri türleri görev almaktadır. Birinci kademesinde mikroorganizmalar, nitrati elektron alıcısı olarak kullanır ve gereksinim duydukları enerjiyi organik karbon bileşiklerinden sağlayarak nitrat iyonları nitrite indirgerler. İkinci aşamada ise, nitrit iyonları azot gazına kadar indirgenmektedir. Denitrifikasyonun gerçekleştiği proses havuzunda ölçölen ORP değeri anoksik koşulun sağlanması için; -150mV<...<-30 mV arasında tutulmaktadır ve çözönmüş oksijen değerinin 0,1 mg/l 'den yüksek olmamasına dikkat edilmektedir.



şekil 5.8 İleri biyolojik arıtma, proses havuzları membran difüzörleri

Proses havuzlarında çökmeyi ve çökelmeyle oluşacak ölü bölgeler nedeniyle hacim kayıplarını önlemek ve istenilen akım karakteristiğini sağlamak amacıyla, havuz tabanında 0,3 m/s hız sağlayacak şekilde dalgıç mikserler bulunmaktadır.

Havalandırma ve Proses havuzlarından savaklanarak çıkan atıksu 10 mm çaplı 151 adet orifis ile son çöktürme havuzuna (Şekil 5.9) girmektedir. Altı adet son çöktürme havuzlarında dibe çöken aktif çamur, her bir havuzda bulunan üç adet gezer köprü üzerinde bulunan dalgıç pompalar ile tabandan emilmektedir. Havalandırma havuzlarındaki mikroorganizma konsantrasyonunu sabit tutmak amacı ile çamurun büyük bir kısmı tekrar havalandırma havuzlarına geri devrettirilir.



Şekil 5.9 Son çöktürme havuzları

Son çöktürmeden alınan % 0,1 - 1 katı madde ihtiva eden fazla aktif çamur, beş adet mekanik yoğunlaştırıcılardan (Şekil 5.10) geçirilerek katı madde içeriği % 5 e çıkarılarak anaerobik çamur çürütme tanklarına gönderilmektedir. Atıksu arıtılmış olarak çıkış savaklarından geçirilerek fontdüktül borular ile deşarj yapısına sevk edilir.



Şekil 5.10 Mekanik yoğunlaştırıcılar

Ön çökeltmeden gelen yoğunlaştırılmış birincil çamur ile son çökeltmeden gelen yoğunlaştırılmış aktif çamur, birincil anaerobik çürütme tanklarına (Şekil 5.11) alınmaktadır. Tanklara giren ham çamurun ısıtılması ve tank içerisindeki çürümüş çamurun sıcaklığının 35 -36 °C sabit tutulması için oniki adet spiral tip eşanjörler bulunmaktadır. Primer tanklarda bulunan çamur sirkülasyon pompaları ile tankın içinden alınan çamur, eşanjörlere verilerek ısıtılır ve ısıtılan çamur tanka geri verilmektedir. Bu esnada çıkan metan gazı (CH_4) tank içinde gaz sirkülasyon kompresörleri ile tankın karışımını sağlamaktadır. Her bir primer tankta iki adet 110 m³/h kapasiteli çamur sirkülasyon pompası ve iki adet eşanjör bulunmaktadır. Ayrıca eşanjöre gelen çamur, içinde hiçbir katı parçacık bulunmaması için primer tanklarda öğütücülerden geçirilip eşanjöre alınır. Altı adet primer tanklarda 20 gün bekletilerek stabilize olan çamurdan, çürüme esnasında çıkan metan gazı ise gaz depolama tanklarında depolanmaktadır. Üretilen biyogaz; kojenerasyon ünitesinde, idari binanın ısıtılmasında, anaerobik prosesin karıştırılması için gaz sirkülasyon kompresörlerinde ve gerektiğinde kojenerasyon ünitesinde buhar kazanlarında kullanılır.



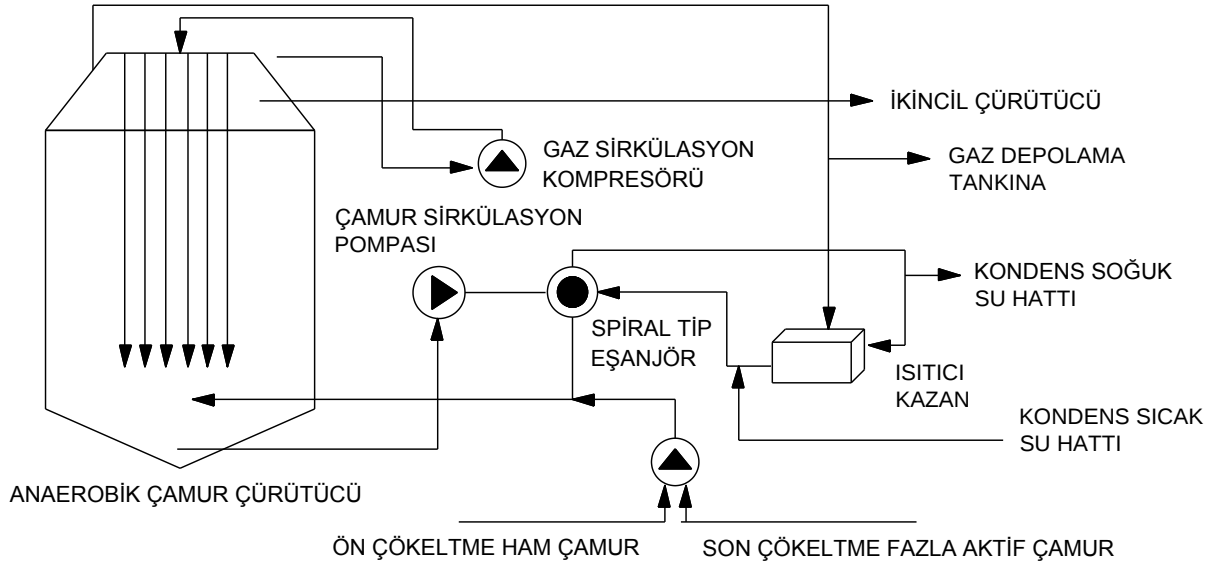
Şekil 5.11 Anaerobik çamur çürütme ünitesi

Fazla biyogaz alev kesicilerden geçerek iki adet 1600 m³ hacmindeki gaz depolama tankında (Şekil 5.12) depolanır. Üretilen biyogaz miktarı depolama tankı hacminin üzerinde olduğu takdirde fazla biyogaz, gaz yakma ünitesinde yakılır. Tank içindeki mezofilik iki tür bakterilerin (asit bakterileri ve metan bakterileri) faaliyetleri sonucu üretilen biyogazın metan ve karbondioksit bileşimine, primer tanklarda bulunan biyogaz analizörü ile bakılmaktadır.



Şekil 5.12 Biyogaz depolama tankları ve biyogaz tankları içerisindeki neopren balon

Primer tanklara alınarak ısıtma, karıştırma ve mikroorganizmaların faaliyetleri sonucu %6 'lık çürüyen çamur % 4 yoğunluğa indirgenerek, primer taşkan hattından 8300 m³ hacimli seconder tanklara cazibe ile gitmektedir. Seconder tanklarda depolanarak 10 gün dinlendirilen çamurun suyu alınarak % 4-5 yoğunluğunda çamur susuzlaştırma ünitesine gönderilmektedir.



Şekil 5.13 Anaerobik çamur çürütme akış şeması

Anaerobik tanklarda arıtma çamuru yapışkan ve kokulu bir karışımdan, kısmen kokusuz, insan sağlığına zararsız hale getirilir.

Sekonder tanklardan alınan % 5-6 katı madde ihtiva eden çürütülmüş çamur, mekanik çamur susuzlaştırıcılardan (Şekil 5.14) geçirilerek % 0.2-0.3 katyonik polielektrolit ilavesiyle % 25 yoğunluğa getirilerek çamur keki çamur kurutma ünitesine gönderilir.



Şekil 5.14 Mekanik çamur susuzlaştırıcılar ve çamur keki

Mekanik çamur susuzlaştırmadan gelen %25 lik çamur keki (Şekil 5.14), kurutma ünitesinde bulunan iki adet 150 m³ hacimli çamur silolarına alınır, çamur silolarından pompalar vasıtasıyla alınarak, üç adet pedallı tip kurutucuya (Şekil 5.15) verilir. Kurutucularda çamurdaki katı muhtevası oranı %25 den %90 'a çıkarılarak kuru ürün (Şekil 5.15) oluşturulur. Oluşturulan kuru ürün üstü kapalı kamyonlarla çimento sanayiye götürülür ve çimento sanayide 3000 kcal/kg ek yakıt olarak kullanılmaktadır.

Böylece %25 'lik çamur kekinin, ekonomik açıdan taşınması ve depolanması sorunu ortadan kalkmıştır. Kurutma için gereken ısı ise kojenerasyon ünitesinde doğalgaz ve biyogaz kullanılarak elektrik enerji üretimi esnasında açığa çıkan atık ısı kullanılarak elde edilmiştir.



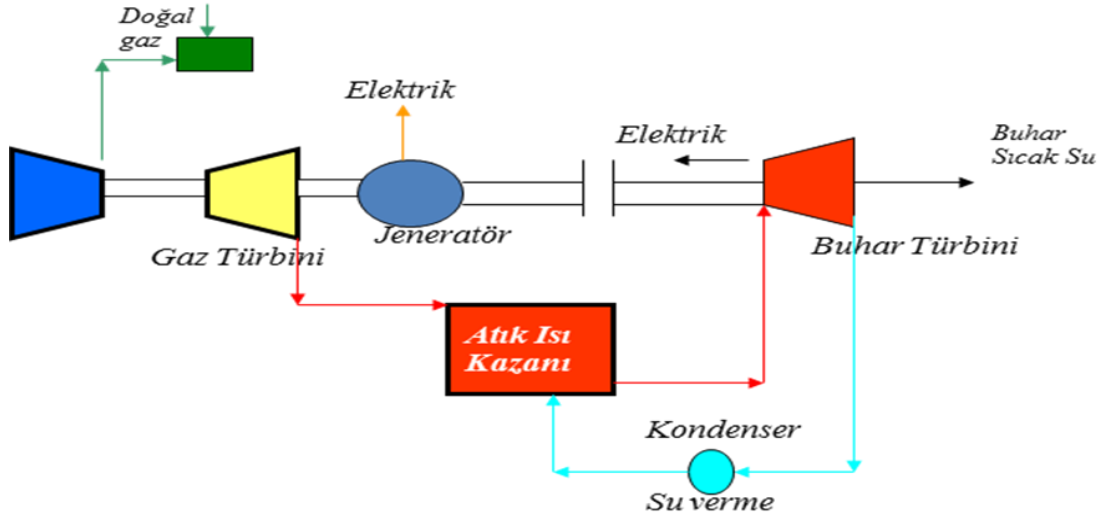
Şekil 5.15 Pedal tip çamur kurutucu ve oluşturulan kuru ürün

Kojenerasyon ünitesinde (Şekil 5.16) üretilen 4,6 MW enerji, tesisin elektrik ihtiyacını karşılamakta ve elde edilen atık buhar kurutma ünitesinde kullanılmaktadır.



Şekil 5.16 Kojenerasyon ünitesi

Kojenerasyon ünitesinde; jeneratörü tahrik eden gaz türbini, gaz motoru ve dizel motoru olmak üzere üç farklı motor kullanılmaktadır.



Şekil 5.17 Kojenerasyon ünitesi akış diyagramı

Gaz türbini, havayı sıkıştırıp, gaz yakıtı yakarak elektrik jeneratörünü döndüren sistemdir. Gaz türbininden çıkan egzoz gazları, sıcaklığı çok fazla olduğundan, atık ısı kazanında değerlendirilip yüksek verimde ısı enerjisi elde etmede kullanılmaktadır.

Atık ısı kazanları, gaz türbinlerinin egzoz çıkışlarına monte edilmiştir. Atık ısı kazanlarından buhar elde edilmektedir. Atık ısı kazanı çıkışında montajlanan ekonomizerler, anaerobik çamur çürütmeye giden eşanjör sularını ısıtmakta ve kazan besleme suyunu buhara dönüştürmektedir. Oluşan buhar da amaca uygun olarak tesisde gerekli yerlerde; idari binanın ısıtılması, çamur kurutma ünitesi ve primer tankları ısıtmada değerlendirilmektedir.

Tesis genel ünitelerden toplanan 260000 m³/h kirli hava fanları ile emilerek iki adet yıkama kulesine gönderilmektedir. Atmosferden alınan havanın nemi tutularak, yüksek basınça maruz bırakılır ve ozon jeneratörü sayesinde ozon üretilir. Temiz su ile karışan ozon, yıkama kulesine giren kirli havaya püskürtülerek kirli hava yıkanır ve yıkama kulesi bacasından temiz hava dışarı verilmektedir. Havadaki kirleticilerde suya geçerek tekrar tesisin giriş ünitesine verilir ve arıtılır. pH'sı düşen suyun, pH'sını yükseltmek için sodyum hidroksit kullanılıyor.

5.2 Model Değişkenlerinin Tanıtımı

Bu çalışma kapsamında, tam ölçekli anaerobik çamur çürütme prosesinde üretilen biyogaz debisi tahmininin yapay sinir ağları, fuzzy logic ve çoklu regresyon teknikleri ile modellenmesinde, spesifik model girdileri (beslenen çamur debisi, toplam katı madde (TKM), toplam uçucu katı madde (TUKM), alkalinite, uçucu yağ asidi (UYA) konsantrasyonu) seçilmiş ve bunların YSA, fuzzy logic ve çoklu regresyon metodunun yapısına dâhil edilme gerekçeleri alt başlıklarda izah edilmiştir.

5.2.1 Beslenen Çamur Debisi (p_1)

Çamurun kuru madde içeriği ve bekleme süresine bağımlı olarak anaerobik çamur çürütme reaktörlerine beslenen çamur miktarı belirlenmektedir. Çamur besleme miktarının artması ile üretilen biyogaz miktarı da artmaktadır. Sisteme beslenecek çamur debisi anaerobik fermentasyonda bilinmesi gereken en önemli özelliklerden biridir. Ancak genel olarak çamur beslemesi debisi arttıkça uçucu katı madde giderimi de düşmektedir. Anaerobik fermentasyon sırasında yaklaşık %40-50 uçucu katı madde giderilir. Çamur besleme debisi çok yüksek olursa, ortamın pH değeri düşer ve inhibasyon meydana gelir. Bunun nedeni metan bakterilerinin H_2 'i yeterli hızda uzaklaştıramaması sonucunda asit bakterilerinin baskın hale gelmesi ve uçucu organik asit üretiminin artarak asit birikiminin oluşmasıdır. Bu da sistemin dengesinin bozulmasına neden olur. Anaerobik çamur çürütme prosesinin biyogaz üretim verimliliğinin arttırılması için beslenen çamur debisi kontrollü bir şekilde yapılmalıdır.

5.2.2 Toplam Katı Madde (TKM) (p_2)

Toplam katı madde çok düşük olduğunda, materyal içerisindeki katının çökmesi söz konusudur. Bu oran çok yüksek olursa gaz çıkışının engellenmesiyle karşılaşılır. Besleme materyalinin %8-13 arasında TKM' ye sahip olması, biyogaz üretimi için uygun olmaktadır. Yüksek katı miktarlarında asetik asit birikmesi yüzünden inhibasyon meydana gelir. Bu nedenle, prosese beslenen çamurun TKM 'sinin kontrolü önemli bir parametredir.

5.2.3 Toplam Uçucu Katı Madde (TUKM) (p₃)

Evsel atıksularda, endüstriyel atıksularda ve çamur numunelerinde yapılan katı madde analizlerinden en önemli husus mevcut organik maddenin ölçülmesidir. Anaerobik çamur çürütme prosesinde beslenen çamurun toplam uçucu katı madde tayini yapılarak sisteme organik madde yüklemesi belirlenir. Organik madde yüklemesi üretilen biyogaz miktarının belirlenmesinde önemli bir parametredir.

5.2.4 Alkalinite (p₄)

Bir atıksuyun alkalinitesi, o suyun asitleri nötraledebilme kapasitesi olarak tanımlanır. Alkalinite, pH değerlerine karşı suların gösterdiği direncin bir ölçüsü olması nedeni ile incelenen atıksuyun tampon kapasitesini yansıtmaktadır [64]. Ayrıca, alkalinite sıvıların pH değişimlerine olan dayanma kabiliyeti olarak da açıklanabilmektedir. Alkalinite, sıvı ortamlara asit ilavesi yapıldığında karbonatların hidroksit iyonlarına katkı sağlamasını sağlar ve bu durum asitleri nötrale eder. Bu şekilde gerçekleşen olaya alkalinitenin tampon etkisi adı verilmektedir [65]. Alkalinite, sadece pH düzenlemede değil, metan üretiminde CO₂ tamponlayıcı bir özellik de sağlamaktadır. Genel olarak, alkalinite ilavesinde bakteriyel aktiviteyi bozmadan dengeli istenen eşitlik değerine yavaşça kaydıran tek kimyasal olan sodyum bikarbonat kullanılmaktadır [65].

5.2.5 Uçucu Yağ Asidi (p₅)

Havasız arıtmada uçucu yağ asit (UYA) konsantrasyonundaki önemli değişiklikler, reaktördeki asidojenik ve metanojenik popülasyonlar arasındaki stabilitenin bozulmasına sebep olmaktadır [66]. Reaktörde UYA konsantrasyonundaki artış sebebiyle pH değeri düşmektedir. Bu durumun uzun süreli devam etmesi halinde ise metanojenik popülasyon inhibe olmakta, asidojenik bakteriler reaktör içerisinde baskın popülasyon olmaktadır. Ancak reaktörde yeterli tamponlama kapasitesi bulunması halinde metanojenik popülasyon üzerindeki zararlı etkiler ortadan kalkmaktadır [67]. Sistemde UYA konsantrasyonunun artması doğrudan KOİ giderimini azalttığından, etkin

bir arıtma verimi ve metan üretimi açısından reaktördeki UYA konsantrasyonunun mutlaka kontrol edilmesi gerekmektedir.

5.2.6 Biyogaz Üretimi (t)

Biyogaz eldesi temel olarak organik maddelerin ayrıştırılmasına dayandığı için temel substrat kaynağı olarak bitkisel atıklar ya da hayvansal gübreler kullanılabilir. Kullanılan hayvansal gübrelerin biyogaza dönüşüm sırasında fermante olarak daha yararlı hale geçmesi sebebiyle dünyada temel materyal olarak kullanılmaktadır [68].

Çizelge 5.3 Atık ve hammadde kaynaklarına göre biyogaz ve metan oranları [62]

ATIK KAYNAĞI	BİYOĞAZ VERİMİ (l/kg)
Sığır Gübresi	90-310
Kanatlı Gübresi	310-620
Domuz Gübresi	340-550
Buğday Samanı	200-300
Çavdar Samanı	200-300
Arpa Samanı	290-310
Mısır Sapları ve Artıkları	380-460
Keten & Kenevir	360
Çimen	280-550
Sebze Artıkları	330-360
Ziraat Artıkları	310-430
Yerfıstığı Kabuğu	365
Dökülmüş Ağaç Yaprakları	210-290
Algler	420-500
Atıksu Çamuru	310-800

Herhangi bir anaerobik sistemde, prosesin verimliliği genel olarak biyogaz veya metan üretim oranı ile temsil edilmektedir. Biyogaz reaktörleri işletiminde dikkat edilmesi gereken en önemli adım, atık içerisinde bulunan organik maddelerin biyolojik parçalanması sonucu oluşan metan üretiminin maksimize olabilmesi için sürekli olarak

kontrolünün yapılmasıdır. Biyogaz ürünleri ve metan içeriğinin azalması anaerobik çürütücü sistemlerde kararsız proses koşullarının potansiyel indikatörleridir. Sistemin kararlılığı metan içeriğinin dikkatli bir şekilde kontrolüyle sağlanabilmektedir. Gaz üretim oranı, anaerobik biyokütle aktivitesinin önemli bir ölçüsü olarak ifade edilebilir [65].

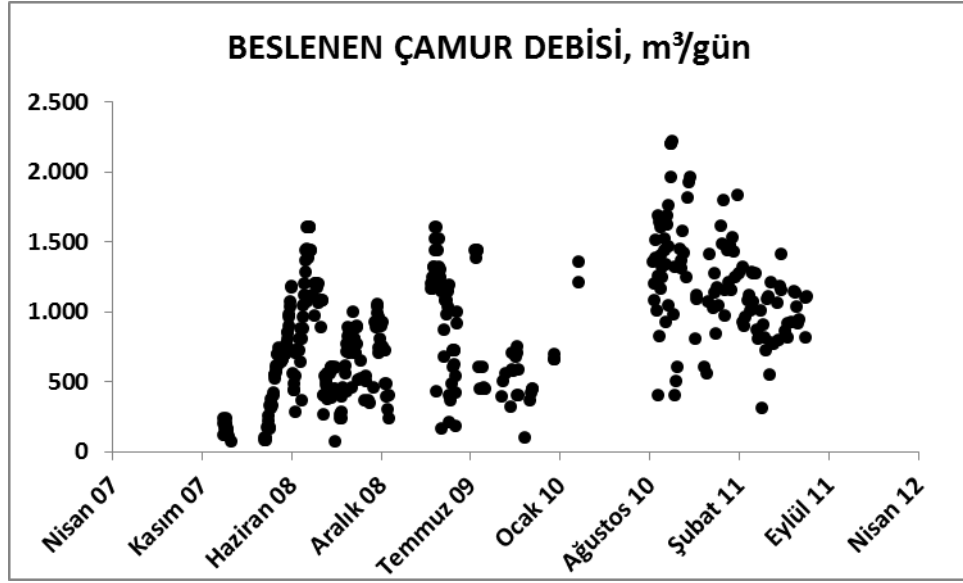
5.2.7 Model Datasının Tanımlayıcı İstatistiksel Analizi

Tam ölçekli anaerobik çamur çürütme prosesinde üreyen biyogaz debisi tahmin modellemesinde, 5 girdi (input) ve 1 çıktı (output) değerlerini kapsayan toplam 394 adet kararlı hal versini (EK-A) içeren laboratuvar şartlarında analiz sonuçları ve saha debi ölçümleri sonuçları kullanılmıştır. Girdi parametreleri olarak beslenen çamur debisi, toplam katı madde, toplam uçucu madde, alkalinite ve uçucu yağ asidi; çıkış parametresi olarak da üretilen biyogaz debisi kullanılmıştır.

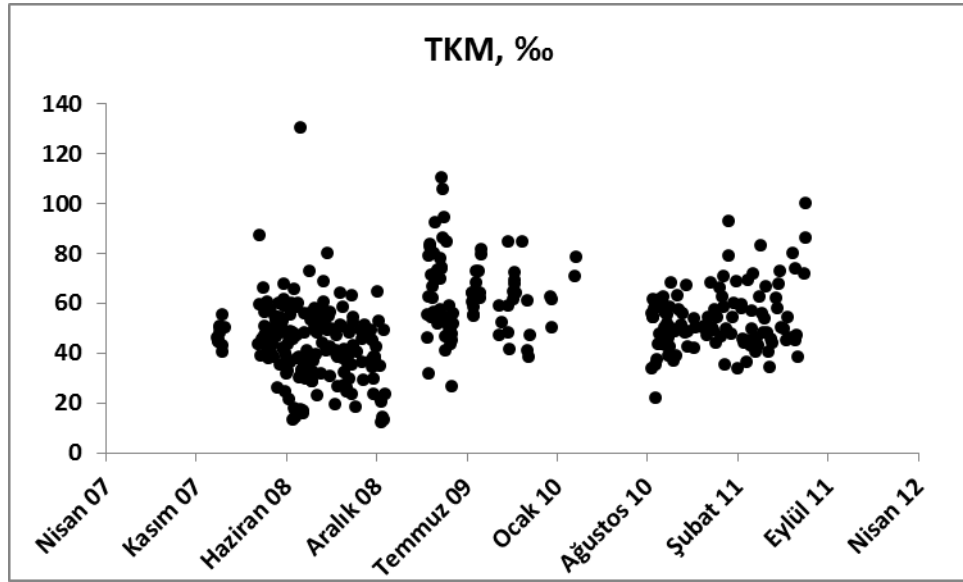
Çizelge 5.4 Model datasının tanımlayıcı istatistiksel analizi

PARAMETRE	BİRİM	SAYI	max. Değer	min. Değer	Ortalama	Standart Sapma
Beslenen Çamur Debisi	m ³ /gün	394	2220	70	871	434
TKM	‰	394	130.08	12.27	50.78	16.19
TUKM	‰	394	67.51	4.17	23.94	7.92
Alkalinite	mg/l CaCO ₃	394	3061.11	226	924.71	345.82
UYA	mg/l CH ₃ COOH	394	1835.34	35.77	392.28	210.87
Biyogaz	Nm ³ /gün	394	21393	608	6983	3954

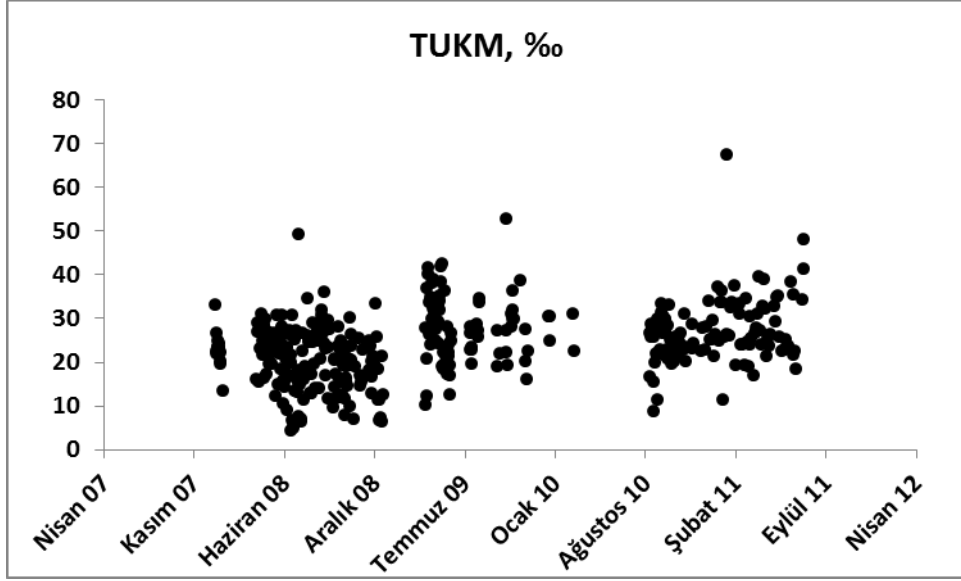
Modelleme çalışmalarında kullanılan girdi ve çıktı parametrelerinin dört yıllık verisi (Ocak 2008 - Temmuz 2011) grafik üzerinde yıllara dağılımı Şekil 5.18, 5.19, 5.20, 5.21, 5.22, 5.23 'de verilmiştir.



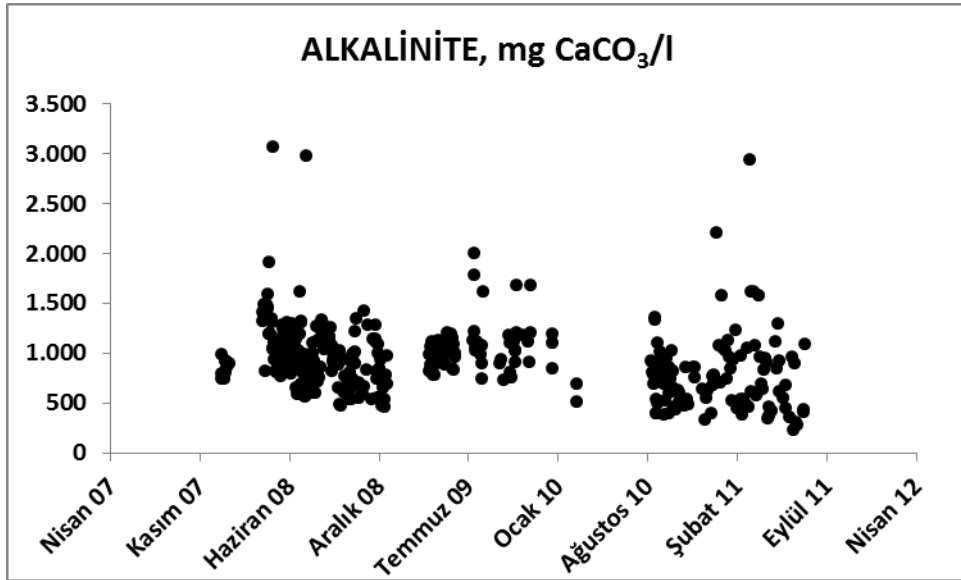
Şekil 5.18 Modellemede kullanılan beslenen çamur debisi değerlerinin yıllara göre dağılımı



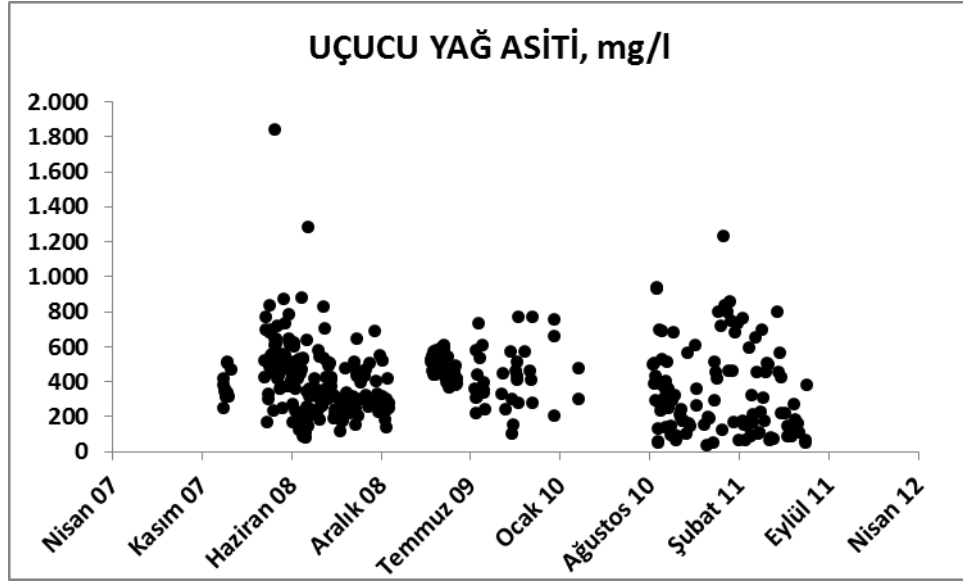
Şekil 5.19 Modellemede kullanılan toplam katı madde (TKM) değerlerinin yıllara göre dağılımı



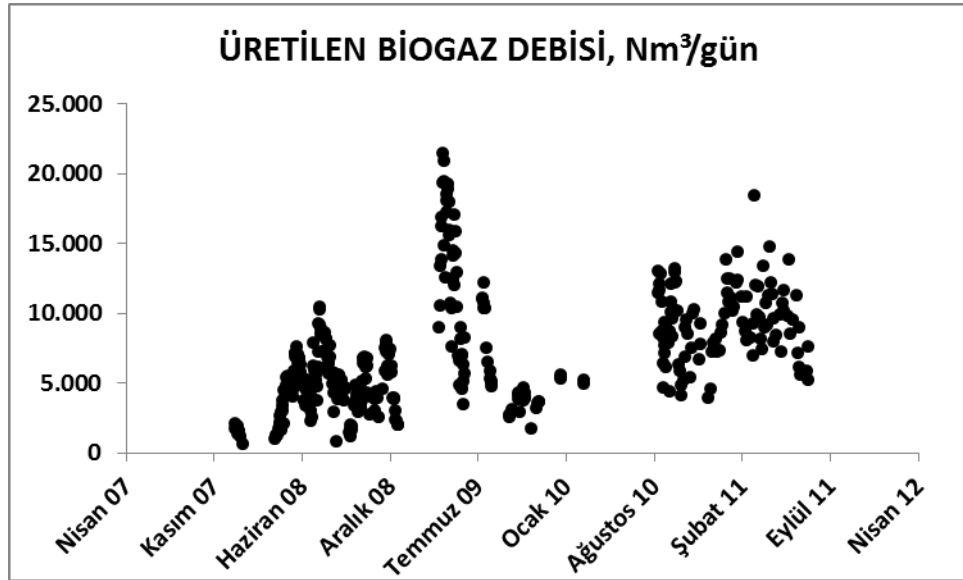
Şekil 5.20 Modellemede kullanılan toplam uçucu katı madde (TUKM) değerlerinin yıllara göre dağılımı



Şekil 5.21 Modellemede kullanılan alkalinite değerlerinin yıllara göre dağılımı



Şekil 5.22 Modellemede kullanılan uçucu yağ asiti (UYA) değerlerinin yıllara göre dağılımı



Şekil 5.23 Modellemede kullanılan üretilen biyogaz debisi değerlerinin yıllara göre dağılımı

5.3 Yapay Sinir Ağları

5.3.1 Veri Setinin Eğitim, Validasyon ve Test Setlerine Bölünmesi

YSA'da kullanılan veri setinin eğitim, validasyon ve test alt setlerine bölünmesinde kullanıcı tarafından çalıştırılan MATLAB® Versiyon 7.9.0.529 (R2009b, Lisans No: 161051) esaslı algoritma kullanılmıştır. Veri seti sisteme tanıtıldıktan sonra program

tarafından belirlenen alt setlere rastgele veri atanması yapılmış olup, validasyon ve test alt setlerine eşit sayıda, eğitim alt setine ise bu iki grubun iki katı kadar veri sağlanmıştır.

Rastgele yerleştirmeler neticesinde alt setlere program tarafından atanan veri sayısı;

- Eğitim alt setinde: 197
- Validasyon alt setinde: 98
- Test alt setinde: 99'dür.

Yapılan çalışmalarda veriler girdi (p) ve çıktı ya da hedef (t) matrislerine ayrılmıştır. Kullanılan veriler her bir bölümün çalışma alanına rastgele bir şekilde seçilerek yerleştirilmiştir. Eğitim seti, ağ içerisindeki çoğunluğu temsil edebilecek şekilde bir çift girdi/hedef veriyi eğiterek iyi bir tahmin sonucu elde etmeye olanak sağlar. YSA'nın bu özelliği elde edilen yeni çıktı verisinin, doğru çıktı verisi ile benzerliğe sahip olmasını sağlar. Eğitim fonksiyonu hesaplamalar için bir döngü oluşturmaktadır. Eğitim fonksiyonu her bir döngüde girdilerin dizilimini, çıktı değerlerinin hesaplanmasını, her bir girdi vektörü ve dizili girdiler arasında temsil edilen vektör için hata oranı ve ağa adaptasyon olunumunu gerçekleştirir [50].

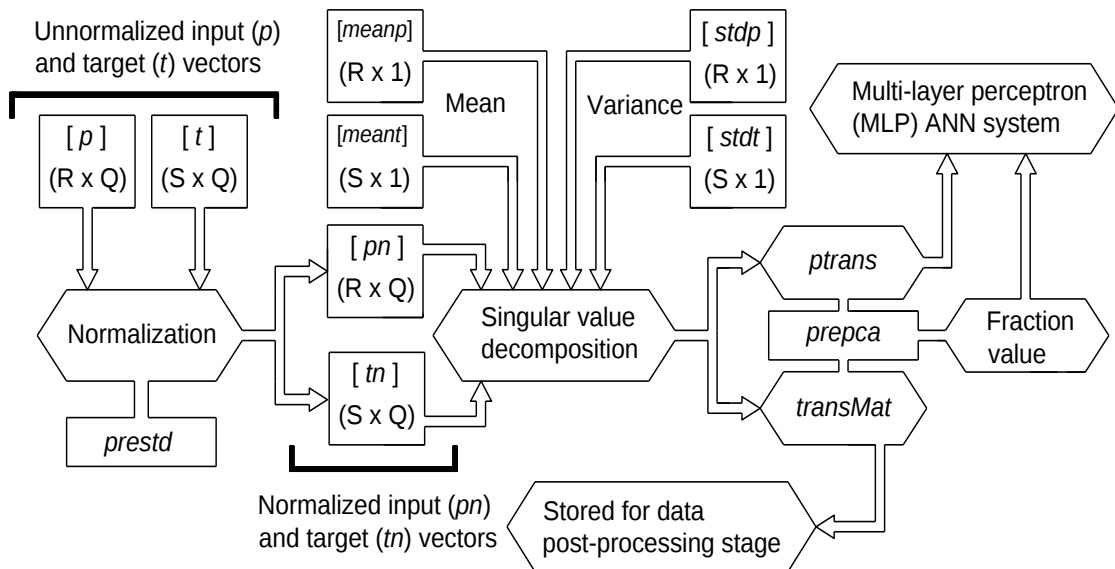
5.3.2 Temel Bileşen Analizi (Principal Component Analysis, PCA)

Temel bileşen analizinde (TBA) ilk adım veri setini çalışma alanına yüklemektir. Çalışmada, p ve t matrislerinde verilen ağın orijinal girdi ve çıktı (hedef) değerleri *prestd* algoritma kodu kullanılarak normalize edilir. Normalize edilmiş girdi ve çıktı'lar (hedef) yani p_n ve t_n , sıfır anlamlılık, birim standart sapma ve dağılım kazanırlar. Orijinal girdi ve çıktıların (hedef) anlamlılık (*meanp*, *meant*) ve standart sapma (*stdp*, *stdt*) değerleri ağ eğitilmeden önce tanımlanmaktadır. Daha sonra, girdi vektörlerinin dönüşümünü belirleyen vektörler (*ptrans*) ve temel bileşen dönüşüm matrisleri (*transmat*) belirlenir. Tüm bu vektörler ileri de elde edilecek olunan girdi değerlerinin dönüşümlerinde kullanılmıştır.

Bazı durumlarda, girdi değerlerinin boyutları büyük olabilmekte ancak vektörlerin bileşenleri fazlasıyla birbiri ile ilişki içinde olabilmektedir. Böyle durumlarda girdi vektörlerinin boyutlarını azaltmak ağ için yararlı olmaktadır. Bu prosedürü etkili bir şekilde gerçekleştirebilen sistem temel bileşen analizi olarak adlandırılmaktadır. Mohamad-Saleh ve Holey [69] tarafından elde edilen bulgular doğrultusunda, sisteme tanıtılan veri setindeki değerlerin elimine edilmesi ve kolay şekilde ilişkilendirilmesi tahmin performansını arttırmakta ve çok katmanlı geriye yayımlı algoritmali YSA sistemlerde eğitim zamanını azalttığı tespit edilmiştir. Bunların dışında TBA'nın üç etkisi bulunmaktadır:

- Girdi vektörlerinin bileşenlerinin analizi,
- Elde edilen sonuçların temel bileşen şeklinde verilmesi (çeşitlilik miktarı fazla olur),
- Veri setinde bulunan ve sisteme en az katkıda bulunan bileşenlerin elimine edilmesidir.

Yukarıda bahsedilen durumlar göz önünde bulundurulduğunda; TBA, her bir bölüme ayrıştırılacak olunan dataların ve parametrelerin, sisteme katkısı göz önüne alınarak en etkili şekilde belirlenmesini sağlamaktadır [50]. Şekil 5.24'de, bu çalışmada gerçekleştirilen temel bileşen analizi (PCA) gösterilmiştir.



Şekil 5.24 Temel bileşen analiz (PCA) şeması [69]

5.3.3 Geri Yayılım Algoritmasının (BP) Seçimi

Geri besleme ağlarının geliştirilmesi, sinir ağlarına olan ilginin yeniden artmasında önemli bir rol oynamıştır. Bir ağı bir fonksiyona yaklaşıncaya kadar eğitmek için girdi vektörleri ve karşılıklı hedef vektörleri kullanılır, girdi vektörleri belirli çıktı vektörleri ile ilişkilendirilir ya da girdi vektörleri uygun bir metot yardımı ile tasnif edilir. Bu genelleme özelliği bir girdi veya hedef eş setleri ile temsil edilen ağı eğitilmesini ve düzgün sonuçlar elde edilmesini mümkün kılar. Son katmandan başlanarak hassaslıklar hesaplanır ve ağı boyunca ilk katmana doğru geriye dönük besleme yapılır [71]. Geri beslemeli ağlar, ortalama karesel hatayı asgari seviyelere düşürmek için belirli bir gradyan metodu kullanan çok katmanlı ileri besleme ağlarıdır ve geri besleme algoritmasının konumu ortalama karesel hatanın gradyanı ile birlikte gradyan metodu sağlar. Kâğıt üzerinde ANN'lar, üç adet katmandan oluşur: girdi katmanı, gizli katman ve çıktı katmanı.

Ma vd. [73] geri besleme ağlarının kullanımının özellikle etkileşimli tahminlere uyarlanmasına uygun hale getiren belirli faydaları olduğunu belirtmiştir. Bunlar;

- Bir yığın halindeki veri setlerini işleyebilir ve tahmin sonuçlarını hızlı bir şekilde elde edebilir.
- Herhangi bir girdi verisinin istenen çıktıları bilen bir eğitmen yardımı ile eğitebilen bir sistemdir.
- Geri besleme ağlarının çıktıları olasılıklardan oluştuğuna göre, ilişkilerinin bir derecesi olarak değerlendirilebilir.

Bu nedenle, ANN türleri içerisinde geri besleme ağları en basit ve en çok kullanılan ağı modellerinden birisi olarak değerlendirilmektedir [73]. Geri besleme ağlarının öğrenme süreci, veri akışının ileri hesaplaması ve hata sinyallerinin geri beslemesi olmak üzere iki ana iterasyon basamağından oluşur. İleri hesaplama yapılırken, özgün veriler girdi katmanından çıktı katmanına doğru ilerleyerek gizli işleme katmanından ve sadece bir sonraki katmanın nöronlarını etkileyen katman nöronlarından geçerler. Geri besleme ağlarının diğer ağı türlerinden ayrılan temel avantajlarından birisi; çıktı katmanından elde edilen sonuç istenilen değerde değilse, geri besleme süreci başlar ve hata ileri

hesaplamanın aksi yönünde ağ boyunca geriye dönük olarak yayılır [73], [74]. Geri beslemedeki hata sinyaline göre ağ bütün katmanları birbirine bağlayan ağı değiştirerek en uygun ağırlık setini arar ve doğru ağ çıktıları verir. Bu nedenle, bu iki basamağın iterasyon ile yapılması sonucunda ağ çıktısı ile istenen çıktı arasındaki hata delta kuralı kullanılarak azami seviyeye düşürülür [73].

Verilen problemin çözümünde hangi eğitim algoritmasının en hızlı sonucu vereceğini tahmin etmek oldukça güçtür. Bu durum problemin karmaşıklığı ve eğitim setinin içerisindeki verilerin miktarı da dâhil olmak üzere pek çok faktöre bağlıdır [69], [75].

5.3.4 Yapay Sinir Ağları Yapısının Optimizasyonu

Almasri vd. [76] yaptıkları çalışmada, YSA tabanlı modellerde sinir ağları sisteminin optimizasyonu en önemli adımlardan biri olduğunu belirtmiştir.. Bu işlem sistemin performansı açısından önemli bir role sahiptir. Bu yüzden, optimizasyon işlemi nöron sayısı ve ortalama hatanın karesi (MSE) değerleri arasında gerçekleştirilmektedir.

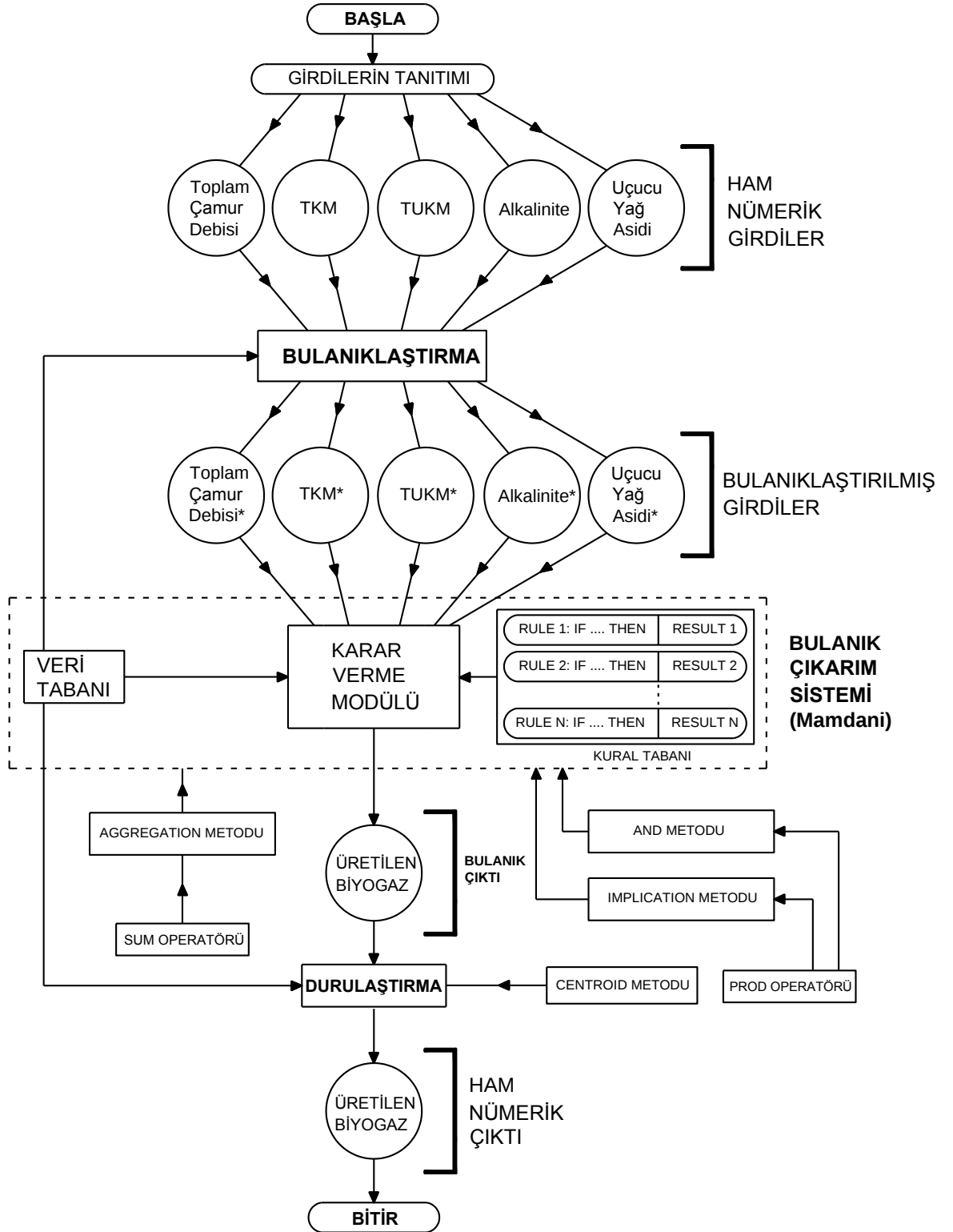
YSA'lar gizli katmanlarında bulunan nöron sayılarına karşı hassastır. Çok az nöron sistemde alt seviye uyumsuzluk (underfitting) durumuna sebep olabilmektedir. Bunun aksine, çok fazla nöron da sistemin üst seviye uyumsuzluğuna (overfitting) olmasına sebep olabilmektedir. Ancak bazı durumlarda tüm eğitim verileri sisteme tam bir uyum gösterebilir ancak böyle bir durumda da elde edilen eğrinin çok fazla dalgalanma oluşturduğu tespit edilmiştir. Böyle durumlarda eğitim setindeki hata payı çok küçük olmakta ancak yeni veri seti sisteme tanıtıldığında elde edilen hata payı daha büyük olmuştur. Sinir ağları eğitilmiş örnekleri hafızada tutabilmesine rağmen, yeni verilerin tanıtıldığı durumlarda genelleme yapamamaktadır. Bu durum Bayesian kuralı ile eğitilerek (algoritma kodu, *trainbr*) LMA'nın modifikasyonu ile ya da diğer eğitim tekniklerinden herhangi birinde erken durdurma (early stopping) tekniği ile engellenebilir [69].

5.3.5 Hassasiyet Analizi

YSA modellerinde değişkenlerin tahmin modeline olan etki değerini belirleyebilmek amacı ile hassasiyet analizi yapılmaktadır. Hassasiyet analizi yapılırken sisteme tanıtılan girdi verilerinin farklı kombinasyonlarının sistem performansına katkıları incelenerek gerek görüldüğünde her hangi bir etkiye sahip olmayan girdi değerleri elenir [77].

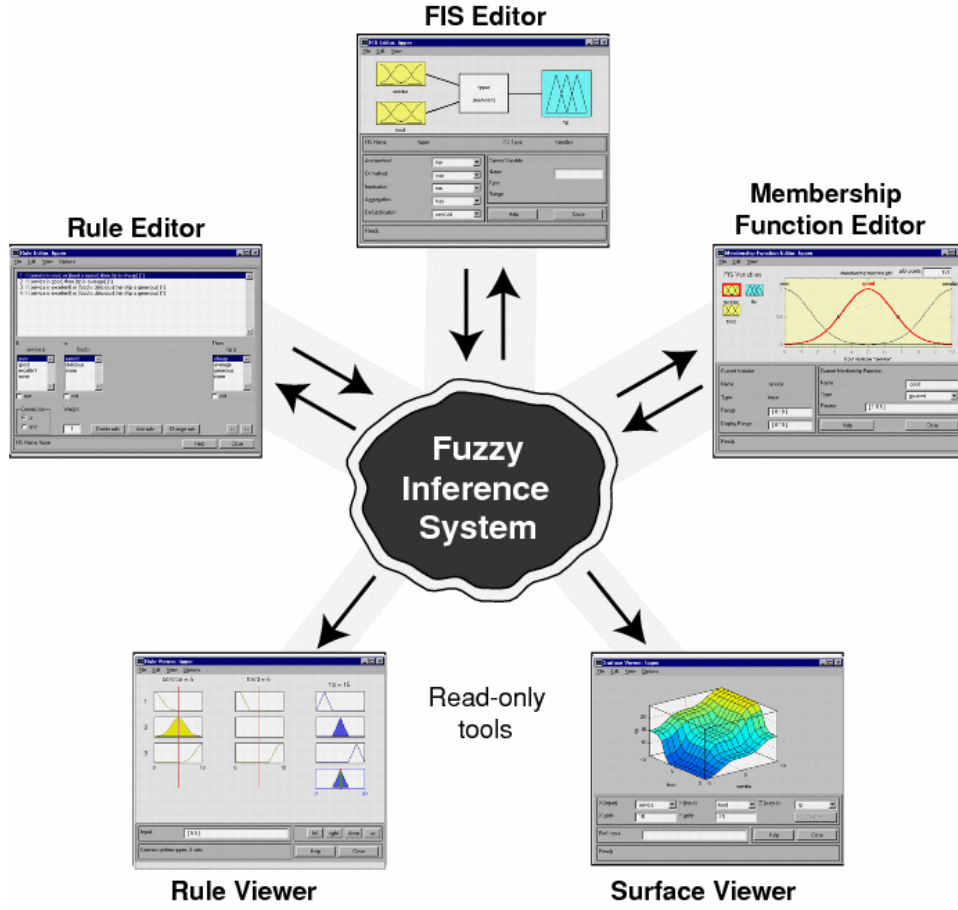
5.4 Bulanık Mantık Modeli (Fuzzy Logic)

Bulanık mantık modelinin çalıştırılmasında ilk olarak veri setinin girdi ve çıktı parametreleri belirlenir ve veri seti bulanıklaştırılır. Bulanıklaştırılmış veri setinin kural tabanı oluşturulur ve sisteme girilir. Kural tabanının oluşturulması ile oluşturulan bulanık çıktılar durulaştırılarak sözel ifadelerden sayısal hale dönüştürülerek model çıktıları elde edilmiş olunur. şekil 5.25’de bulanık mantık mekanizması gösterilmiştir.



Şekil 5.25 Bulanık mantık mekanizması

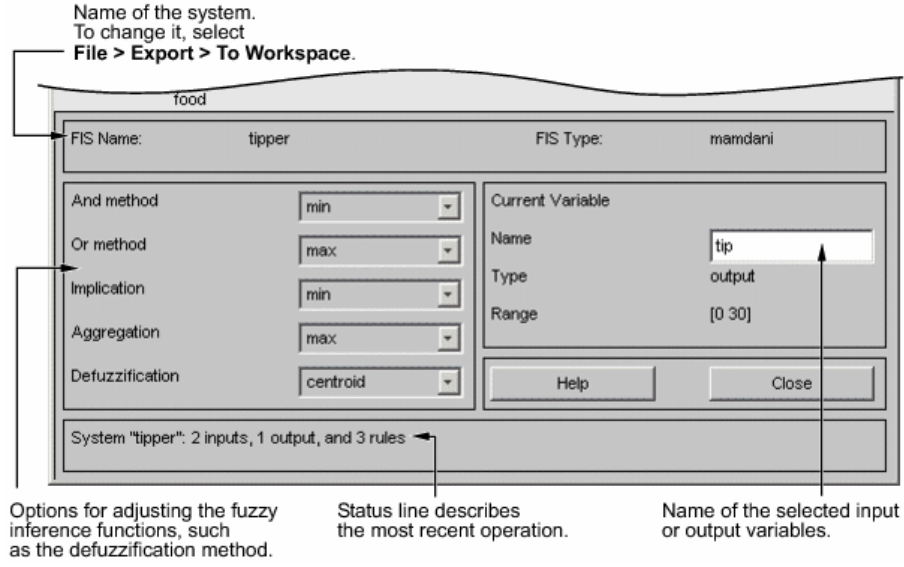
Şekil 5.26’da bulanık mantık modelinin MATLAB® Versiyon 7.9.0.529 (R2009b, Lisans No: 161051) üzerinde fuzzy komutu ile çalıştırıldığı adımlar gösterilmiştir.



Şekil 5.26 Bulanık mantık modelinin adımları

5.4.1 Bulanık Çıkarım Sistemindeki Operatörlerin Seçimi

Bulanık Çıkarım Sistemi (Fuzzy Inference System = FIS) Ebrahim Mamdani (1975) tarafından önerilen türde (Mamdani's type) olup, bulanık çıkarım sistemi (FIS) modülünde sırasıyla; AND Metod (Ve), OR Metod (Veya), Implication (Karıştırma), Aggregation (Birleştirme) ve Defuzzification (durulaştırma) bölümlerinde hangi operatörün kullanıldığı seçilmiştir. Şekil 5.27'de bulanık mantık modelinin MATLAB® Versiyon 7.9.0.529 (R2009b, Lisans No: 161051) üzerinde operatör seçiminin nasıl yapıldığı gösterilmiştir.



Şekil 5.27 Bulanık mantık modelinin MATLAB® V7.9.0.529 üzerinde operatör seçimi

5.4.2 Model Datasının Bulanık Çıkarım Sisteminde (FIS) Değerlendirilmesi

Bulanık mantık modeli [78] gerçek dünya uygulamalarındaki mevcut tutarsızlık ve belirsizlikten kaynaklanan kesin olmayan olayları tanımlamak için sunulmuştur. Biswas vd. [78] bulanık mantığın, davranışları iyi anlaşılamayan karmaşık sistemlerin modellenmesi için son derece yararlı bir araç haline geldiğini belirtmiştir. Bir çevresel proste, değişkenler arasındaki nitel karmaşık ilişkiler göz önüne alındığında, bulanık mantık yöntemi geleneksel yöntemlerde kullanılan karmaşık denklemler yerine dilsel açısından nispeten basit matematiksel bir avantaja sahiptir. Bulanık mantık tabanlı bir modelde karmaşık ampirik formüller ve yorucu matematiksel ifadeler gerek olmadığından, bu teknik tahmin modellemesinde şeffaf ve sistematik bir analiz sağlamaktadır [50].

Genel bir bulanık sistemin temelde dört bileşenden oluşur: Bulanıklaştırma, bulanık kural tabanı, bulanık çıkarım sistemi ve durulaştırma.

Daha önce de ifade edildiği gibi bulanıklaştırma adımında, sayısal giriş ve çıkış değişkenleri, dilbilgisi terimlerine ya da bazı özel sıfatlara (örneğin, yüksek, büyük, küçük, vb düşük gibi) dönüştürülür. Bir veya daha fazla birkaç üyelik fonksiyonlarının karşılık gelen derece fonksiyonları belirlenir [50]. Ölçülen giriş parametreleri, belirli bulanık üyelik fonksiyonları içinde tanımlanmış olmalıdır.

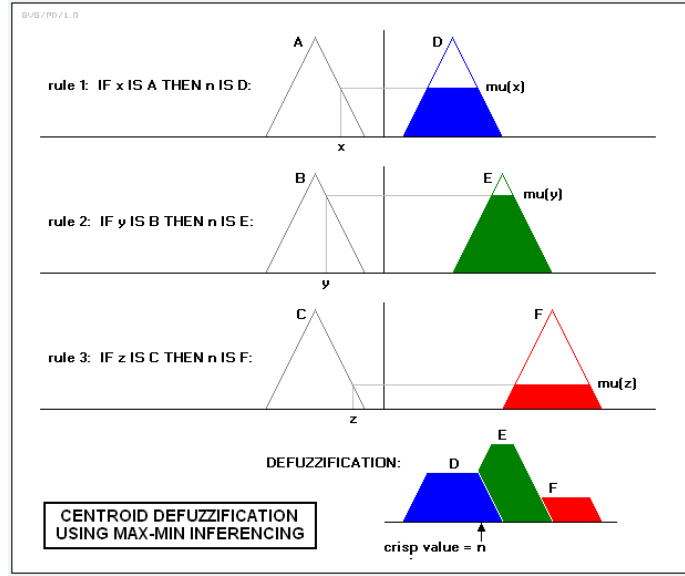
Bulanık kural tabanı, giriş ve çıkışları arasındaki olası tüm bulanık ilişkilerin dâhil olduğu kuralları içerir. Bulanık küme teorisinde, hiçbir matematiksel denklem ve model parametresi yoktur ve bu nedenle, tüm belirsizlikler, doğrusal olmayan ilişkiler ve model komplikasyonlar-tablolar, “EĞER-İSE” yapısı şeklinde açıklayıcı bulanık çıkarım işlemine dâhildir [79].

Bulanık çıkarım sistemi, bulanık kural tabanı önceden tanımlanmış tüm bulanık kuralları dikkate alır ve çıktılar için giriş seti dönüşümünün nasıl olduğunu öğrenir [32]. Bu adım, temel olarak minimizasyon (min) ve prod (ürün) olmak üzere, iki çeşit çıkarım operatörü ile yapılmaktadır [79].

Bu çalışmada, bulanık kural tabanında bulanık kümelerde girdi ve çıktı arasındaki bütün ilişkilerin belirlenmesinde daha iyi bir performans göstermesi nedeniyle prod tekniği kullanılmıştır. Ayrıca, Türkdogan-Aydinol ve Yetilmezsoy (2010) [65] tarafından yapılan benzer çalışmada olduğu gibi bulanık çıkarım sisteminde (sum) operatörü kullanılmıştır.

Durulaştırma adımında, bulanık çıkarımda edilen dilsel sonuçlar verilen kural tabanı kullanılarak bir gerçek sayısal çıkışa (gerçek değere) çevrilir [80]. Literatürde, birçok durulaştırma yönetemi, ağırlık merkezi (COG veya centroid) (Şekil 5.28), alan, açıortay, max. değer, en sağda olan, en solda olan değer, ortalama gibi birçok durulaştırma yöntemleri belirtilmiştir. Durulaştırma aşamasında, çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen ve en çok kullanılan durulaştırma tekniği olan COG yöntemine (Şekil 5.28) başvurulmuştur [82]. Bu yöntem aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$y_{i \text{ d}} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{y_i} y_i}{\sum_{i=1}^n \mu_{y_i}} \quad (3.4)$$

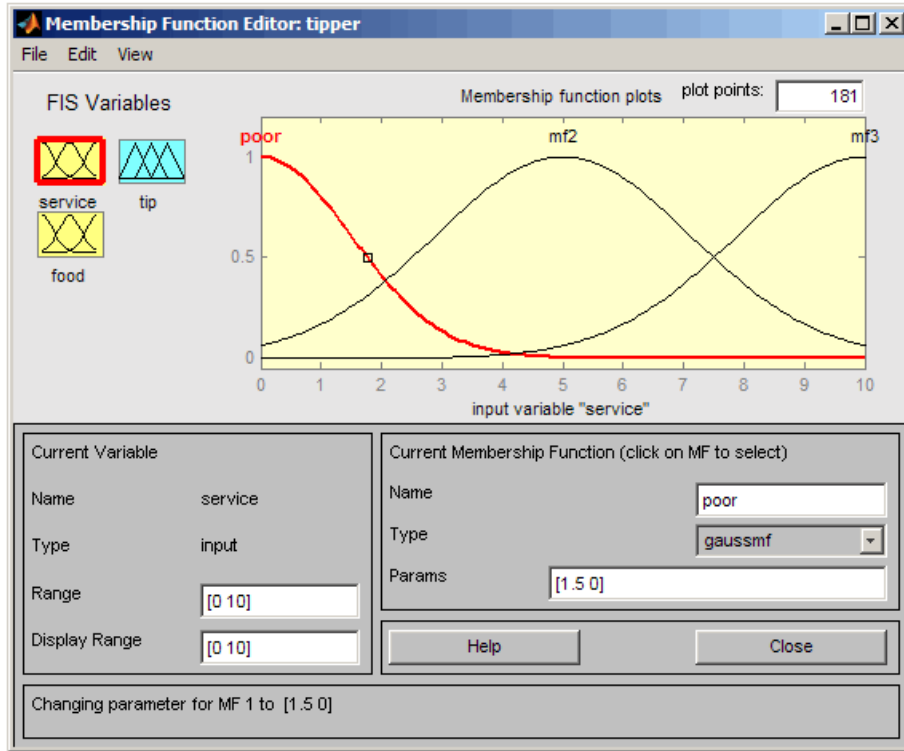


Şekil 5.28 Ağırlık merkezi durulaştırma yöntemi

5.4.3 Bulanık Çıkarım Sistemindeki Üyelik Fonksiyonlarının Seçimi

Bulanık mantıkta belirsizlik durumları, durumu temsil eden elemanlar kümesine uygun üyelik fonksiyonları verilerek tanımlanmıştır. Her eleman için 0 ile 1 arasında değişim (en yüksek seviye) değerine üyelik derecesi adı verilmektedir [82]. Bulanık tabanlı modellerde, bulanık kümelerin üyelik fonksiyonlarının şekli, çalışılan sistemin özelliğine göre, trapez, çan şeklinde, sigmoid, üçgen veya başka uygun formda olabilmektedir [83], [84]. Şekil 5.29 'da bulanık mantık modelinin MATLAB® Versiyon 7.9.0.529 (R2009b, Lisans No: 161051) üzerinde üyelik fonksiyonu seçiminin nasıl yapıldığı gösterilmiştir. Bunların arasında, üçgen ve trapez şeklinde üyelik fonksiyonları bulanık küme teorisinin güncel uygulamalarında, hem tasarım ve uygulama kolaylıkları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, trapez şekilli üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Trapez şekilli üyelik fonksiyonu; x , a , b , c , d , gibi şu dört skaler parametrelere bağlıdır [79]:

$$\mu_x = \mu_{x;a,b,c,d} = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases} \quad (3.5)$$



Şekil 5.29 Bulanık mantık modelinin MATLAB® V7.9.0.529 üzerinde üyelik fonksiyonu seçimi

5.4.4 Model Değişkenlerinin Bulanıklaştırılması (Fuzzification)

Tam ölçekli anaerobik çamur çürütme prosesinde üretilen biyogaz debisi tahmin modellemesi çalışması için, Fuzzy Logic Toolbox, MATLAB® V7.9.0.529 çerçevesinde mevcut Bulanık Çıkarım Sistemini (FIS) oluşturmak ve düzenlemek için kullanılmıştır. Girdi ve çıktı değişkenleri, FIS Editör kullanılarak inşa edilmiş ve trapez üyelik fonksiyonları (*trapmf*) ile bulanıklaştırılmıştır.

Çalışma kapsamında oluşturulan bulanık mantık modeli, beş girdi (beslenen çamur debisi, toplam katı madde, toplam uçucu katı madde, alkalinite, uçucu yağ asiti) ve bir çıktı (üretilen biyogaz debisi) yapısından oluşan MISO modelidir. Modelleme için tam ölçekli anaerobik çamur çürütme prosesinin laboratuvar analiz değerleri, beslenen çamur ve üretilen biyogaz ölçüm miktarlarının 394 adet veri seti (EK-A) kullanılmıştır.

5.4.5 Kural Tabanının Tanıtılması (Rule Base)

Bulanık mantığın amacı girdi ve çıktı değişkenleri (veya eylemler ve sonuçları) arasındaki ilişkileri tanımlamak ve model parametrelerini tahmin etmek olduğundan bu nedenle, bazı çıkarımları “EĞER-İSE” şeklinde “kurallar” olarak belirtilen mantıksal ifadelerle tanımlanamaya ihtiyaç vardır [79].

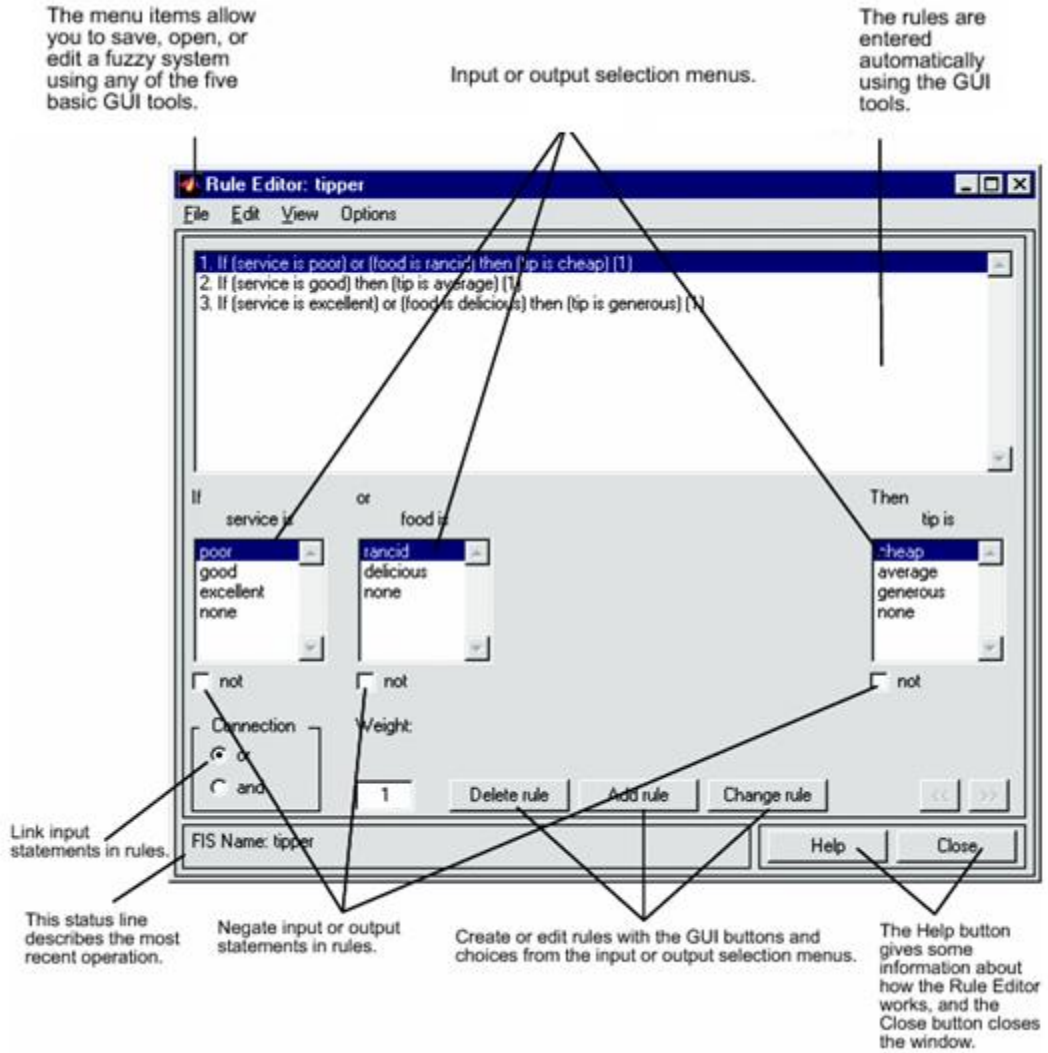
Bu çalışmada, geliştirilen bulanık küme kategorileri için orta, düşük, yüksek, vs gibi bir tanım yerine, mevcut üyelik fonksiyonları kuralların işlemini basitleştirmek için A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O, P, R, S, T, U olarak tanımlanmıştır. Her bir girdi / çıktı matrisi ölçülen tam ölçekli anaerobik çamur çürütme prosesindeki verilere göre MATLAB®V 7.0 nümerik bilgisayar ortamında kodlanmıştır. Örneğin, aralıkları ve kodları (EK-B) de verilen, beslenen çamur debisi= 1440, TKM= 60.21, TUKM= 22.69, alkalinite= 1992, UYA= 214.79, üretilen biyogaz debisi=12184 sırasıyla G, D, C, F, B, L olarak kodlanmıştır.

Kural tabanı yazılırken, bulanık kısımlara (yani herhangi iki kategorinin tam kesişim bölgesine) tekabül eden sayısal veriler tanımlanırken, üyelik (μ) olarak herhangi birinin trapez üyelik fonksiyonu seçilmiştir. Kesişim noktasının sağında veya solunda kalan bölgeler için üyelik derecesi en yüksek olan kategoriler kural tabanına dahil edilmiştir.

Çizelge 5.4’de verilen aralıklara göre, bazı deneysel veriler bazı bulanık kategorilerden trapez üyelik fonksiyonlarının kesiştiği bölgelerde kaldığı görülmüştür. Bu durum söz konusu olduğunda kesiştiği bölgenin herhangi birinin trapez üyelik fonksiyonu seçilmiştir. Örneğin, yukarıdaki deneysel verilerden belenen çamur debisi 1600 olması durumunda G ve H trapez üyelik fonksiyonu için iki kural yazmak yerine kesişim noktasının herhangi birinin üyelik fonksiyonu dikkate alınarak toplam 394 adet kural, bulanık “EĞER-İSE” kural editörü ile kurulmuştur.

Çalışma kapsamında, herbir girdi değişkeni için on düzeyli trapez üyelik fonksiyonu ve çıktı değişkeni için yirmi düzeyli trapez üyelik fonksiyonu oluşturulmuştur. EK-B ‘de MATLAB®V7.0 nümerik ortamı üzerine kurulmuş toplam 394 adet kural tabanı gösterilmiştir. Şekil 5.30’da bulanık mantık modelinin MATLAB® Versiyon 7.9.0.529

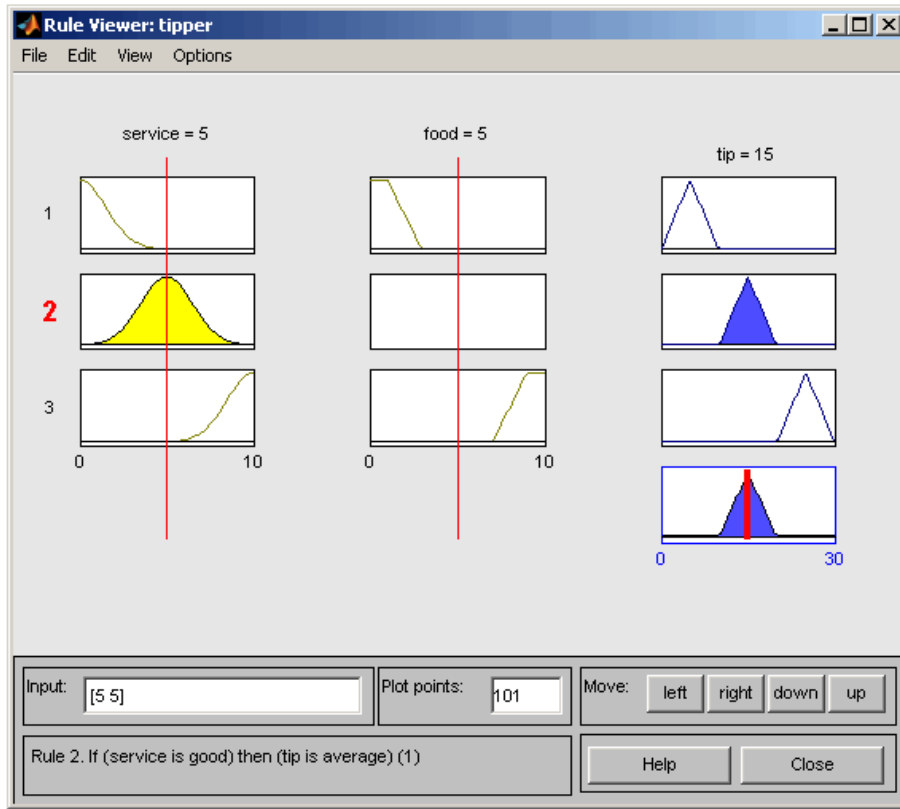
(R2009b, Lisans No: 161051) üzerinde EĞER-İSE kural yapısı seçiminin nasıl yapıldığı gösterilmiştir.



Şekil 5.30 Bulanık mantık modelinin MATLAB® V7.9.0.529 üzerinde üyelik fonksiyonu seçimi

5.4.6 Model Değişkenlerini Durulaştırılması (Fuzzification)

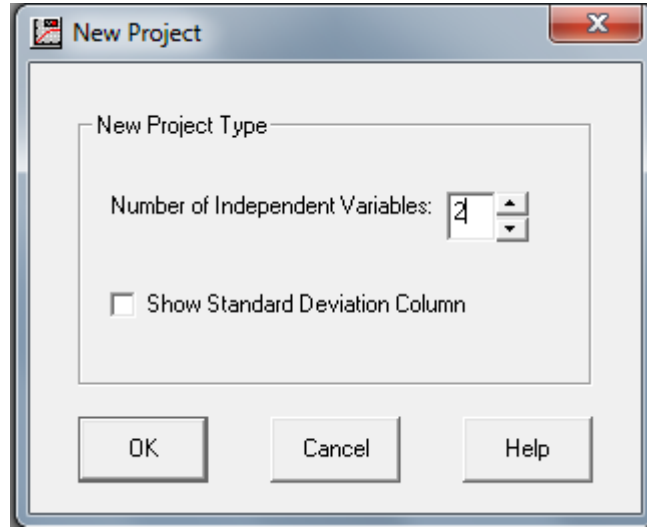
Bulanıklaştırma işlemi sonucu oluşan bulanık çıktılar durulaştırma işlemi ile sözel ifadelerden sayısal değerlere dönüştürülmüştür. Şekil 5.31’da bulanık mantık modelinin MATLAB® Versiyon 7.9.0.529 (R2009b, Lisans No: 161051) üzerinde bulanık çıktıların nasıl durulaştırıldığı gösterilmiştir.



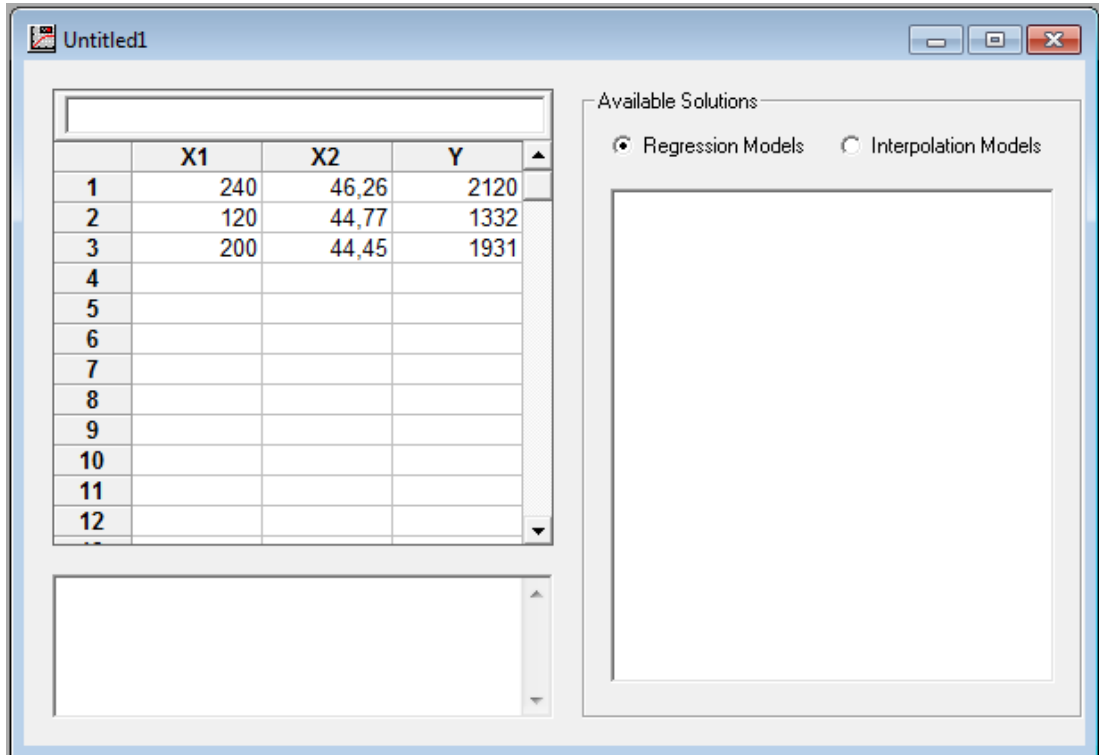
Şekil 5.31 Bulanık mantık modelinin MATLAB® V7.9.0.529 üzerinde durulaştırma

5.5 Çoklu Regresyon Modeli

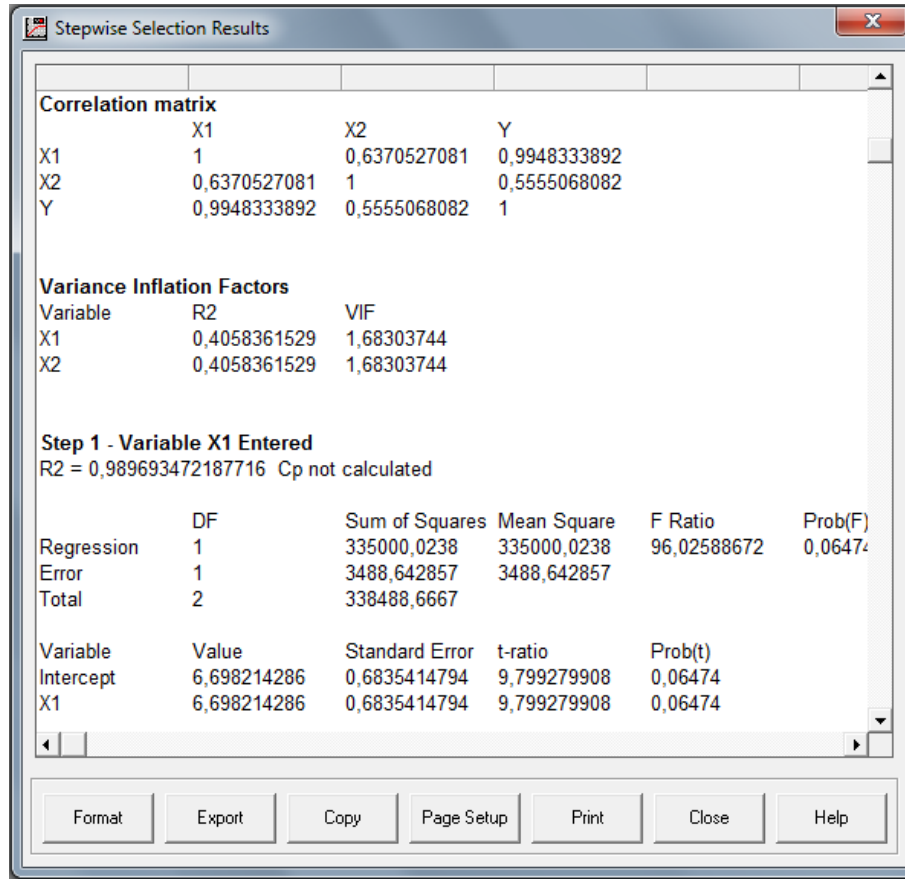
Bu bölümde, deneysel veriler ayrıca 298 adet iki boyutlu (2D) ve 242 adet üç boyutlu (3D) çoklu regresyon modeli içeren DataFit® bilimsel yazılım (Copyright© 1995-2005 Oakdale Engineering V8.1.69) tarafından değerlendirilmiş ve sonuçları bulanık mantık tahminleri ve deneysel değerler ile karşılaştırılmıştır. Çoklu regresyon modelinde kullanılan paket programda, Levenberg-Marquardt yöntemi kullanılmıştır. Regresyon modelleri çözülürken, elde edilen modeller en uygundan başlayarak kendi içinde otomatik olarak sıralanmıştır. Deneysel veriler, açık veri kaynağı olarak kullanılan Microsoft® Excel veritabanı bağlantısından alınmış ve regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte t -oranları ve karşılık gelen p değerleri ile regresyon katsayılarının ve model değişkenlerinin önemi değerlendirilmiştir. Model performansını daha iyi gözlemlemek için tanımlayıcı istatistiksel hatalar da hesaplanmıştır [70].



Şekil 5.32 Çoklu regresyon modelinin örnek girdi parametre sayısının DataFit® programına girişi



Şekil 5.33 Çoklu regresyon modelinin örnek girdi ve çıktı değerlerinin DataFit® programına girişi



Şekil 5.34 Çoklu regresyon modelinin DataFit® programında sonuçları

5.6 Tahmin sonuçlarının İstatistiksel Analizi

Model sonuçlarının doğrulanması model geliştirmenin önemli bir parçası olup, görsel ve sayısal yöntemler ile elde edilebilmektedir. Görsel yöntemler, model performansını sezgisel olarak yakalayabilmesine rağmen, sayısal yöntemler, bilimsel bir şekilde model geliştirmek ve karşılaştırmak için çok daha sağlam bir zemin sağlamaktadır [50],[85].

Karşılaştırma amacıyla; determinasyon katsayısı (R^2), korelasyon katsayısı (R), ortalama mutlak hata (MAE), ortalama karesel hata karekökü (RMSE), sistematik ve sistematik olmayan RMSE (sırasıyla $RMSE_s$ ve $RMSE_u$), ortalama karesel hata (MSE), uyum indeksi (IA), iki faktörü (FA2), fraksiyonel varyans (FV), sistematik hata oranı (PSE) ve kesişim noktası gözlenen değerler ve modelin tahmin performans değerleri arasında (a) ve eğim (b) ($y = bx + a$) gibi çeşitli istatistiksel göstergeler model performans tahminini tanımlamak için yardımcı araçlar olarak kullanılabilir [65].

Determinasyon katsayısı (R^2), tahmin modeli için gözlenen toplam değişimin (total variations) ne kadarının model tarafından açıklanıp açıklanamayacağını belirten ve model performansı hakkında önemli bir bilgi sağlayan bir istatistiksel göstergedir. Ayrıca, RMSE yapay zekâ tabanlı modelleri ile en sık kullanılan göstergelerden biri olup, sistematik ($RMSE_s$) ve sistematik olmayan ($RMSE_u$) RMSE olarak bileşenlerine ayrılabilir. $RMSE_s$, modele bağlı hata (lineer sapma) kısmını anlatmaktadır. Bu nedenle, düşük bir değer iyi bir model anlamına gelir. $RMSE_u$, model tarafından elde edilemeyen rastgele belirlenen hata bölümünü açıklamaktadır. MAE, sayısal ölçüm sonuçlarının en basit olanıdır. Bu sadece tahmin verileri üzerinden alınan mutlak hataların ortalamasıdır.

Uyum indeksi (IA), 0 - 1 aralığında sınırlı bir boyutsuz bağıl ölçü olarak kabul edilir. Bu nedenle, modeller arasında çapraz kıyaslamalar yapmak için idealdir [69]. İkinci faktörü, FA2, 0,5 - 2 aralığında oranı O / P (gözlenen / beklenen) değerleri arasındaki tahmin sonuçlarının yüzdesini verir. FV ise tahmin edilen varyans ve gözlenen varyans arasındaki farkın karşılaştırılması olarak sağlayan başka bir normalizasyon ölçüsüdür [85].

FV = 0 olan bir modelin varyansı gözlenen değerlerin varyansına eşittir. Yukarıda ifade edilen istatistiksel performans indikatörlerine ilişkin detaylı tanımlar ve matematiksel hesaplamalar çeşitli çalışmalarda bulunabilir [50],[69], [86].

Çizelge 5.5 Mukayese maksatlı kullanılan istatistiksel performans indikatörleri

PERFORMANS İNDİKATÖRÜ	MATEMATİKSEL İFADELER
Lineer regresyon katsayısı ve sabiti	$P_{i \text{ reg}} = a + bO_i$ $b = \frac{n \sum_{i=1}^n O_i P_i - \sum O_i \sum P_i}{n \sum O_i^2 - (\sum O_i)^2} \quad a = \frac{\sum P_i - b \sum O_i}{n}$
Determinasyon katsayısı	$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)(Y_i - Y_m) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - P_m)^2}$

Çizelge 5.5 (Devamı) Mukayese maksatlı kullanılan istatistiksel performans indikatörleri

Ortalama mutlak hata	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i - O_i $
Ortalama karesel hata	$RMSE = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right)^{0.5}$
Sistemik ortalama karesel hata	$RMSE_S = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [P_{i \text{ reg}} - O_i]^2 \right)^{0.5}$
Unsistemik ortalama karesel hata	$RMSE_U = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [P_{i \text{ reg}} - P_i]^2 \right)^{0.5}$
Sistemik hata oranı	$PSE = \frac{RMSE_S^2}{RMSE_U^2}$
Uyumluluk indeksi	$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n P_i - O_m + O_i - O_m }^2$
Fraksiyonel varyans	$FV = \frac{2 \sigma_o - \sigma_p}{\sigma_o + \sigma_p}$ $\sigma_o = \sqrt{\frac{\sum (O_i - O_m)^2}{n-1}} \quad \sigma_p = \sqrt{\frac{\sum (P_i - P_m)^2}{n-1}}$
2'nin faktörü	$0.5 \leq FA2 = \left(\frac{O_i}{P_i} \right) \leq 2$

MODELLEME SONUÇLARI

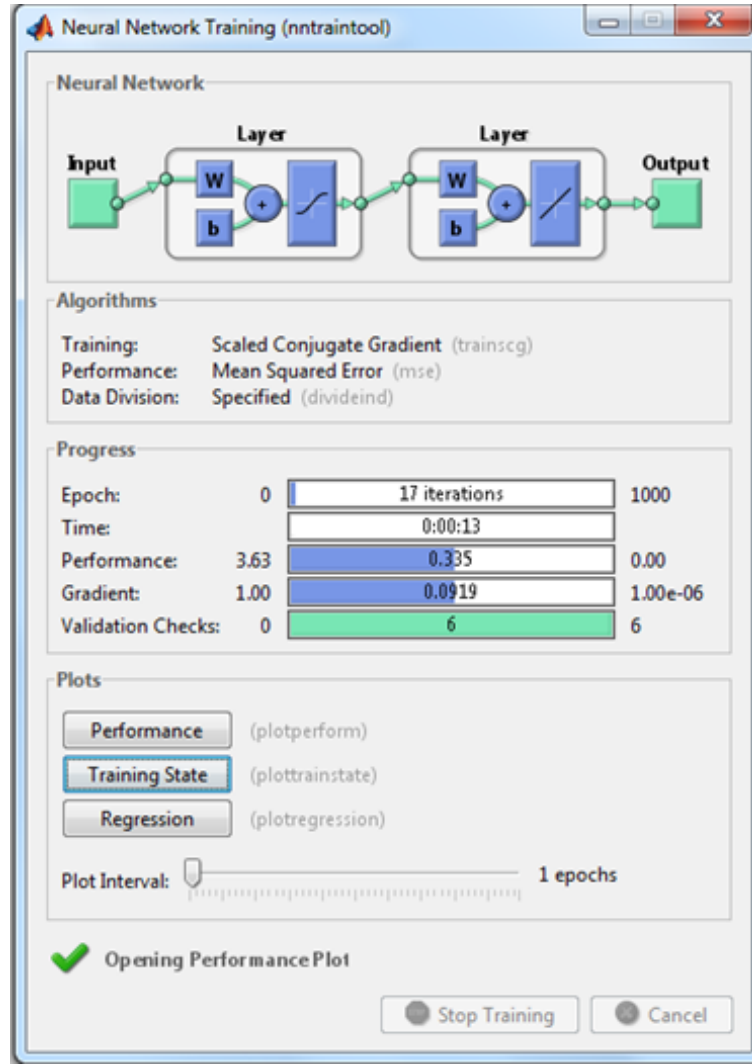
Bu bölümde, tam ölçekli anaerobik çamur çürütme prosesinden üretilen biyogaz debisi çıkış parametresinin (output) tahmininde kullanılan modelleme çalışmaları olan YSA, Fuzzy Logic ve çoklu regresyon modellerinde bulunan sonuçlar verilmiştir.

6.1 Yapay Sinir Ağları

6.1.1 Üretilen Biyogaz Debisi Tahmini için Geri Yayılım Algoritmasının Seçimi

Geri yayılım algoritması seçiminde model ile uygunluğun sağlanabilmesi önemli bir husustur. Yapılan birçok çalışma sonucunda elde edilen eğitim algoritmalarından Çevre Mühendisliği dataları ile uygunluk gösteren algoritma seçilip model çalıştırılmıştır. Aşağıda üretilen biyogaz debisi için geri yayılım algoritmalarının seçimi hakkında bilgiler verilmiştir.

Tam ölçekli anaerobik çamur çürütme prosesinde üretilen biyogaz debisi için geri yayılım algoritması seçimi YSA modeline ait gizli katmanda 10 nöron sayısı olarak seçilip model çalıştırılmıştır. Modelin çalıştırılması Şekil 6.1’de gösterilmiştir. Sistem için gereken bütün kodlar MATLAB® Versiyon 7.9.0.529 (R2009b, Lisans No: 161051) programına girildikten sonra Çevre Mühendisliği alanında yaygın olarak kullanılan 11 algoritmanın herbiri için model çalıştırılarak en yüksek korelasyon ve en düşük hata payını veren fonksiyon belirlenmiştir. Bu algoritmaların sonuçlarının karşılaştırılması çizelge 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1 Modelin çalıştırılması

Çizelge 6.1 10 Nöronlu hidden layerda 11 geri yayılım algoritmasının üretilen biyogaz debisi i tahmini için karşılaştırılması

Fonksiyon	R (eğitim)	R (validasyon)	R (test)	R (tüm)	MSE (hata)	İterasyon Sayısı
trainrp	0.851	0.776	0.745	0.804	0.4349	20
traincgf	0.468	0.735	0.750	0.208	0.4932	10
traincgp	0.475	0.793	0.750	0.343	0.3758	17
traincgb	0.098	0.781	0.747	0.173	0.4350	6
trainlm	0.877	0.669	0.721	0.785	0.5796	9
trainscg	0.842	0.772	0.758	0.801	0.4266	20
trainbfg	0.577	0.719	0.778	0.211	0.4380	11

Çizelge 6.1 10 (Devamı) Nöronlu hidden layerda 11 geri yayılım algoritmasının üretilen biyogaz debisi tahmini için karşılaştırılması

<i>trainoss</i>	0.151	0.805	0.760	0.345	0.3918	12
<i>traingd</i>	0.789	0.733	0.76	0.766	0.5170	1000
<i>traingdx</i>	0.756	0.724	0.660	0.723	0.5553	27
<i>traingdm</i>	0.826	0.779	0.774	0.798	0.4478	665

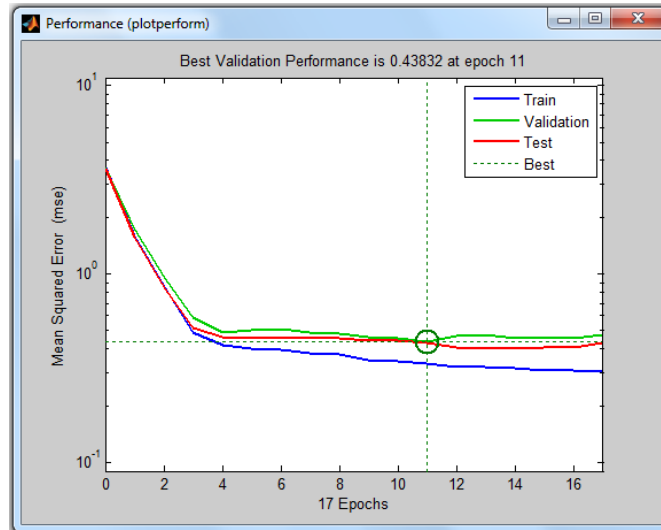
Geri yayılım algoritmalarının herbiri 10 nöronlu hidden layerda çalıştırıldığında; korelasyon katsayısı en yüksek (0.804) olan *trainrp* (resilient backpropagation algorithm, RPROP) geri yayılım algoritmasında ve en düşük ortalama karesel hata (MSE) (0.4266) olan *trainscg* (Scaled conjugate gradient) geri yayılım algoritması olarak bulunmuştur. Bu iki geri yayılım algoritmasından hangisinin modelde daha başarılı olduğunun belirlenmesi için regresyon analizleri yeniden yapılarak karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında, *trainrp* ve *trainscg* geri yayılım algoritması için yeniden yapılan regresyon analizleri Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2 *trainrp* ve *trainscg* geri yayılım algoritmalarının detaylı karşılaştırılması

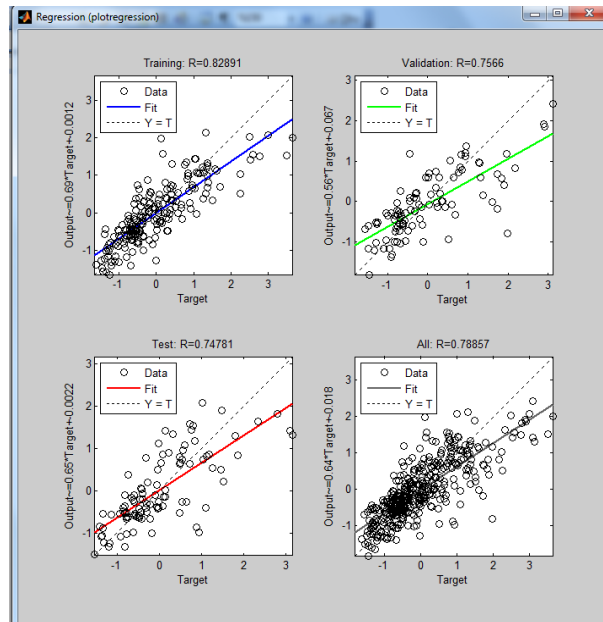
FONKSİYON	YSA SETLERİ	R	MSE
<i>trainrp</i>	Tüm Regresyon Performansı	0.797	0.4935
	Eğitim	0.856	
	Validasyon	0.746	
	Test	0.735	
<i>trainscg</i>	Tüm Regresyon Performansı	0.789	0.4383
	Eğitim	0.829	
	Validasyon	0.757	
	Test	0.748	

Geri yayılım algoritması olan *trainrp* ve *trainscg* için yeniden yapılan regresyon analizleri sonucu tam ölçekli anaerobik çamur çürütme prosesinden üretilen biyogaz debisinin tahmininde model, *trainscg* geri yayılım algoritmasında daha başarılı olduğu görülmüştür. Sonuçlar incelendiğinde *trainscg* geri yayılım algoritması, *trainrp* geri

yayılım algoritmasına göre daha yüksek bir test performansı ve bununla birlikte MSE bazında daha düşük bir hata değeri verdiği için tam ölçekli anaerobik çamur çürütme prosesinden üretilen biyogaz debisinin tahmininde daha başarılı bir grafik çizmiştir. Geri yayılım algoritması olan *trainscg*, MATLAB® Versiyon 7.9.0.529 programında çalıştırılmasından elde edilen sonuçlar Şekil 6.2 ve 6.3’de gösterilmiştir.



Şekil 6.2 YSA modelinde üretilen biyogaz debisi tahmini performansının *trainscg* geri yayılım algoritması için MATLAB® Versiyon 7.9.0.529 MSE esaslı ekranındaki grafiği (gizli katmanda 10 nörona göre)



Şekil 6.3 YSA’da üretilen biyogaz debisi tahmininin tüm alt setlerinin MATLAB® Versiyon 7.9.0.529 ekranındaki regresyon grafikleri

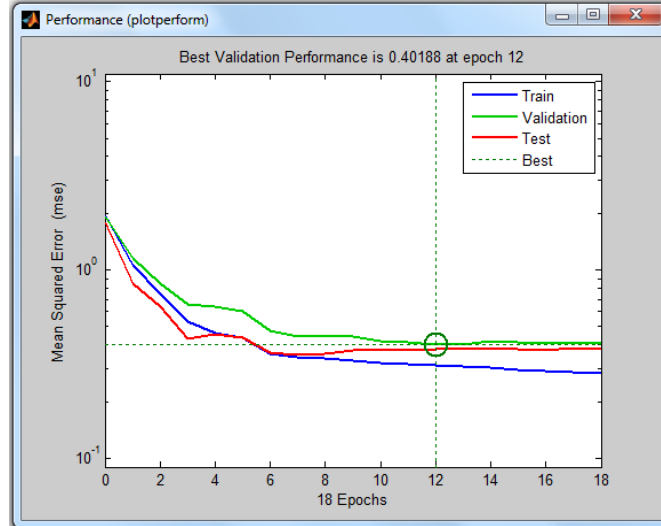
6.1.2 Üretilen Biyogaz Debisi Tahmini Aşamasının Optimizasyonu

Tam ölçekli anaerobik çamur çürütme prosesinde üretilen biyogaz debisinin tahmininde geri yayılım algoritması olarak *trainscg* algoritmasının kullanımı uygun bulunmuştur. Geri yayılım algoritması olan *trainscg* algoritması ile nöron sayısı en az 2'den başlayarak optimum nöron sayısının belirlenene kadar nöron sayısı arttırıp işleme devam edilmiştir. Nöron sayısının değişimine göre ortalama karesel hata (MSE) sonuçları Çizelge 6.3'de verilmiştir.

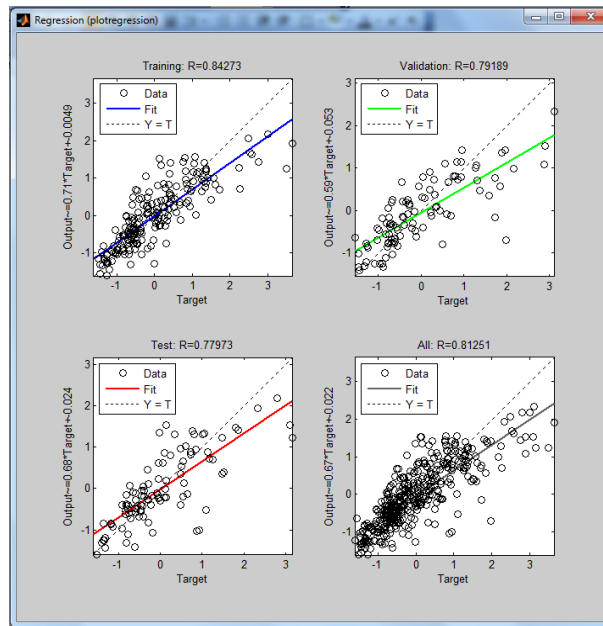
Çizelge 6.3 Üretilen biyogaz debisi tahmini için optimum nöron sayısı

NÖRON SAYISI	MSE (Ortalama Karesel Hata)
2	0.5182
3	0.4632
4	0.5155
5	0.4855
6	0.4620
7	0.5026
8	0.5429
9	0.4449
10	0.4383
11	0.4379
12	0.4630
13	0.4187
14	0.4019
15	0.4663
20	0.4926
25	0.4631
30	0.4572
35	0.5077

Geri yayılım algoritması olan *trainscg* algoritması için optimum nöron sayısı 14 olarak bulunmuştur. Üretilen biyogaz debisi tahmininde optimum nöron sayısına göre performans grafiği Şekil 6.4’de verilmiştir.



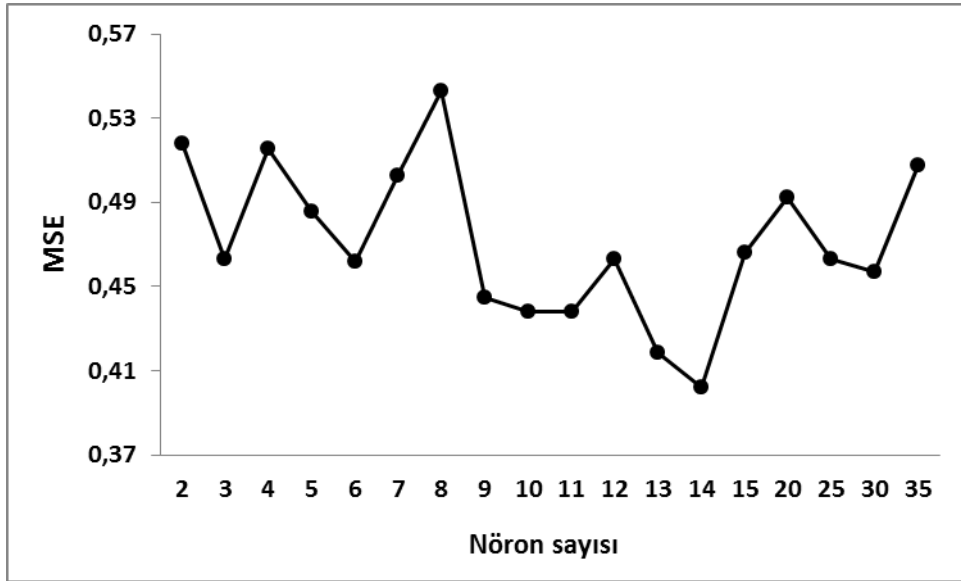
Şekil 6.4 YSA modelinde üretilen biyogaz debisi tahmini performansının *trainscg* geri yayılım algoritması için MATLAB® Versiyon 7.9.0.529 MSE esaslı ekranındaki grafiği (gizli katmanda 14 nörona göre)



Şekil 6.5 YSA’da üretilen biyogaz debisi tahmininin tüm alt setlerinin MATLAB® V7.9.0.529 ekranındaki regresyon grafikleri (gizli katmanda 14 nörona göre)

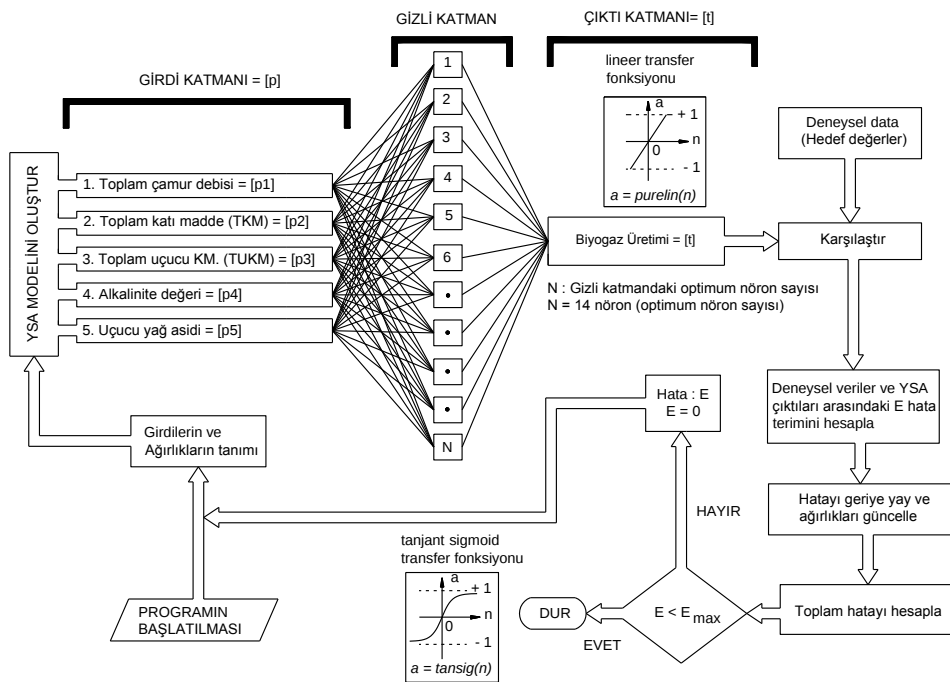
Nöron sayısının değişimine göre ortalama karesel hata (MSE) sonuçları ile çizilen grafik Şekil 6.6’da verilmiştir. Üretilen biyogaz debisi tahmini sırasında gizli katmanda kullanılan optimum nöron sayısı 14 olarak tespit edilmiştir. Geri yayılım algoritması

olan *trainscg* algoritmasında 14 nöronlu regresyon analiz sonuçları ise; $R = 0.812$ ve $Y = 0.67X + 0.022$ olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.6 Üretilen biyogaz debisi tahmin aşamasında MSE değerlerine karşılık gelen nöron değerleri

Bu aşamaya kadar elde edilen bilgiler doğrultusunda tam ölçekli anaerobik çamur çürütücüde üretilen biyogaz tahmininde kullanılacak YSA sisteminin işleyiş şeması Şekil 6.7’de verilmiştir.



Şekil 6.7 YSA modelinin işlem şeması

6.1.3 Hassasiyet Analizi

Hassasiyet analizi, YSA içerisinde kullanılan teker teker ya da 2'li, 3'lü ve 4'lü vs. şeklindeki kombinasyonlar ile sisteme tanıtılarak parametrelerin modele katkısını ölçebilmeye dayanan bir analizdir. Bu çalışmada girdi değişkenlerinin sayısı verilerimiz 1'den 5'e kadar kombine edilerek hassasiyetleri ölçülmüştür. Alt başlıklarda üretilen biyogaz debisi için hassasiyet analiz sonuçları verilmiştir.

6.1.3.1 Biyogaz Üretim Tahmininde Hassasiyet Analizi

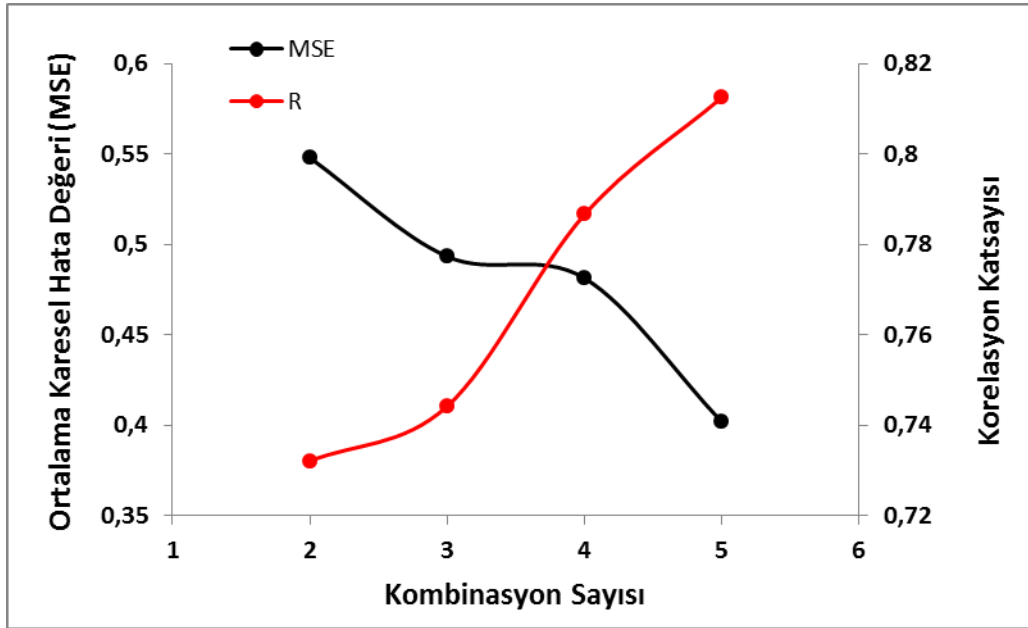
Bu çalışmada tahmin edilmesi hedeflenen üretilen biyogaz debisi değerleri için sisteme tanıtılan girdi değişkenlerinin hassasiyet analizi çizelge 6.4'de görülmektedir.

Çizelge 6.4 Üretilen biyogaz debisi tahmininde girdi değişkenlerinin optimum model performansına katkıları(gizli katmanda 14 nörona göre)

Kombinasyon	MSE	R	İterasyon	Gradyan	En iyi lineer eşitlik
	(Ortalama Karesel Hata)	(Tüm)	sayısı	değeri	
p_1	>10000	0.6779	>100	0.015	$Y=4.5 \times 10^{-11}X+7000$
$p_1 + p_2$	0.5480	0.7321	7	0.151	$Y=0.55X+0.0034$
$p_1 + p_2 + p_3$	0.4934	0.7442	4	0.119	$Y=0.58X+0.0056$
$p_1 + p_2 + p_3 + p_4$	0.4814	0.7866	15	0.092	$Y=0.66X+0.0099$
$p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5$	0.4019	0.8125	12	0.122	$Y=0.67X+0.022$

Modele öncelikle tek değişken tanıtılmış ve ortalama karesel hata payı belirlenmiştir. Bir sonraki aşamada ikinci değişkenin eklenmesi ile ortalama karesel hata payı azalmış ve korelasyon katsayısı artış göstermiştir. Her bir değişken eklendiğinde beklenen sonuç ortalama karesel hatanın düşmesi ve korelasyon katsayısının artış göstermesi yönündedir. Çizelge 6.4'de görüldüğü üzere her bir değişken modele girdiğinde istenilen düşüş ve çıkışlar elde edilmiştir. Hassasiyet analizi sonuçları, sisteme girdi olarak tanıtılan verilerin bir kez daha model için uygun olduğunu göstermiştir.

Şekil 6.8’de ortalama karesel hata değeri azaldıkça, korelasyon katsayısının artışı üretilen biyogaz debisi tahmininde elde edilen değerler için gösterilmektedir.



Şekil 6.8 Biyogaz için 2’li kombinasyondan başlayarak MSE-korelasyon grafiği

Üretilen biyogaz tahmini için kullanılan parametrelerin hassasiyet analizi sonucundan da görüldüğü gibi model için uygun olduğu ve eklenen her bir parametrenin MSE’yi azaltıp korelasyonu arttırdığı tespit edilmiştir. Çizelge 6.5’de, kullanılan değişkenlerin modele eklendiğinde ortalama karesel hata (MSE) değerindeki azalma yüzdeleri verilmiştir.

Çizelge 6.5 Üretilen biyogaz debisi tahmin değişkenlerinin MSE azalma yüzdeleri

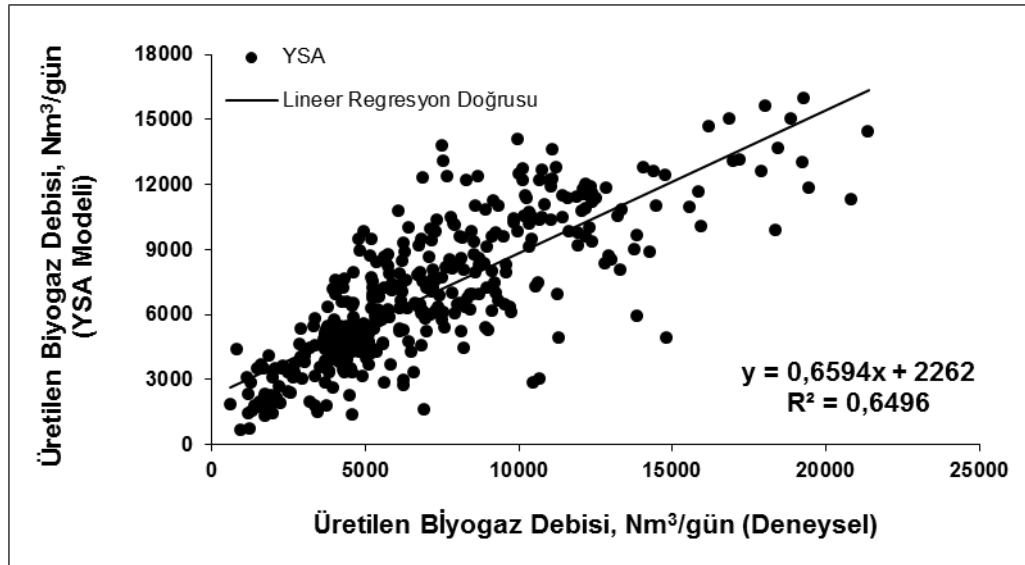
GİRDİLER	MSE	MSE Azalma Yüzdesi
p_1+p_2	0.5480	-
$p_1+p_2+p_3$	0.4934	% 9.96
$p_1+p_2+p_3+p_4$	0.4814	% 2.43
$p_1+p_2+p_3+p_4+p_5$	0.4019	% 16.51

P_1 girdisi tek olarak hassasiyet analizine uygulandığında oldukça yüksek MSE değeri (>10000) vermiştir. Bu nedenle MSE azalma yüzdesi azalma hesabına p_1 girdisi dahil edilmemiştir. Çizelge 6.5’de görüldüğü gibi hassasiyet analizinde p_2 girdisi eklendiğinde

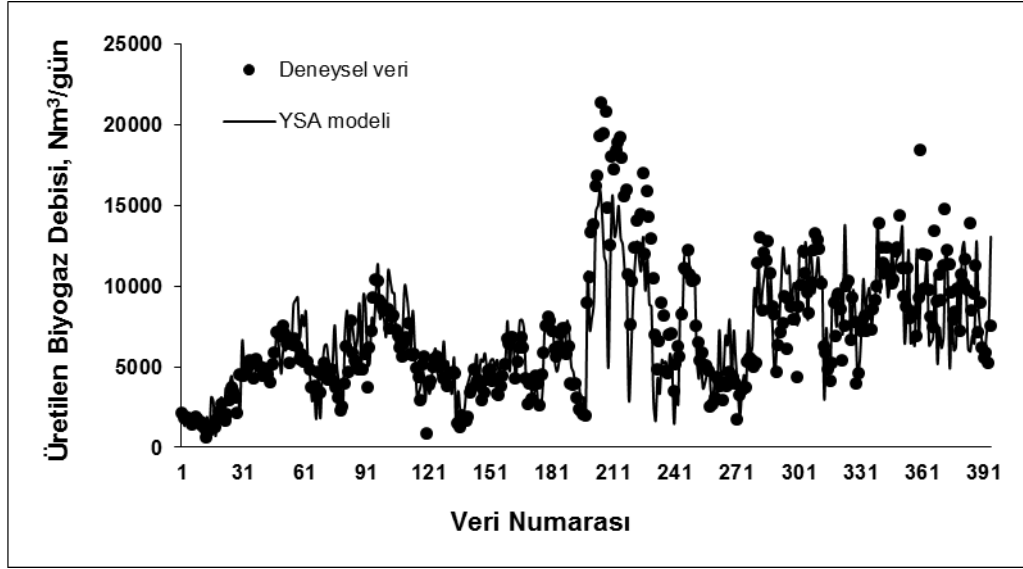
ortalama karesel hata değerinin büyük oranda azaldığı görülmektedir. Sonuç olarak Çizelge 6.5’den anlaşılacağı üzere herbir değişkenin modele eklenmesi ile hata payı azalmaktadır. Üretilen biyogaz debisi için hassasiyet analizi sonucunda tüm girdi değişkenlerinin model için uygun olduğu bir kez daha kanıtlanmıştır.

6.1.4 Yapay Sinir Ağları Modelinin Üretilen Biyogaz debisi için Tahmin Sonuçları

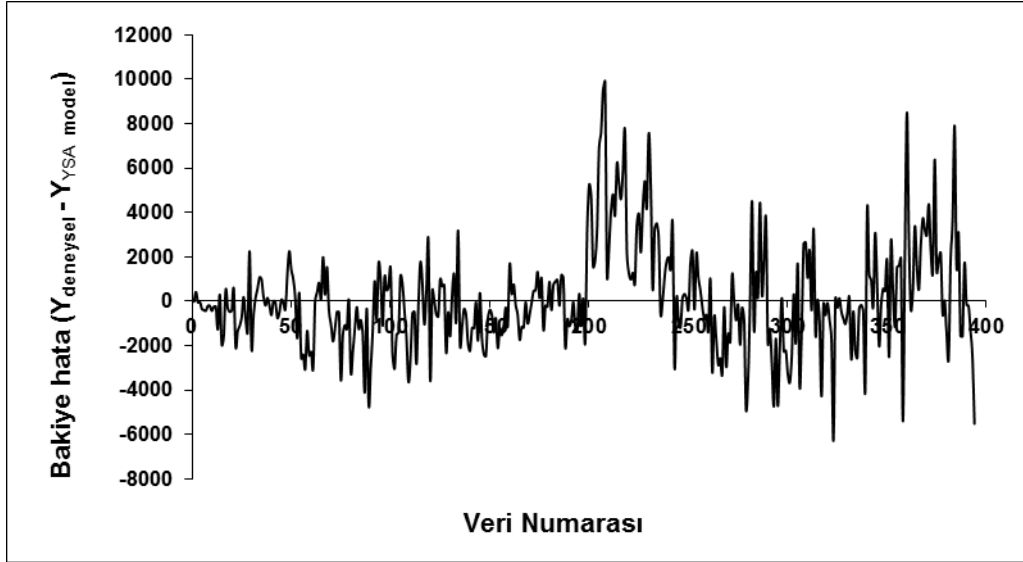
Tam ölçekli anaerobik çamur çürütme prosesinde laboratuvar ve ölçüm veri seti ile oluşturulan yapay sinir ağları modeli çalışmasında üretilen biyogaz debisi tahmini için model performansı ve deneysel veriler ile mukayesesi Şekil 6.9 ve Şekil 6.10’da grafikler yardımıya özetlenmiştir. Şekil 6.9’da görüldüğü gibi yapay sinir ağları modeli çalışması sonucunda R^2 değeri 0.6496 bulunmuştur. Şekil 6.11’de bakiye hata grafiği incelendiğinde bakiye hatanın $-6000 < \dots < 10000$ arasında salınım gösterdiği bulunmuştur.



Şekil 6.9 Üretilen biyogaz debisinin ölçülen değerleri ile yapay sinir ağları modelinin korelasyon grafiği



Şekil 6.10 Üretilen biyogaz debisinin ölçülen değerleri ile yapay sinir ağı modeli sonuçlarının mukayesesi



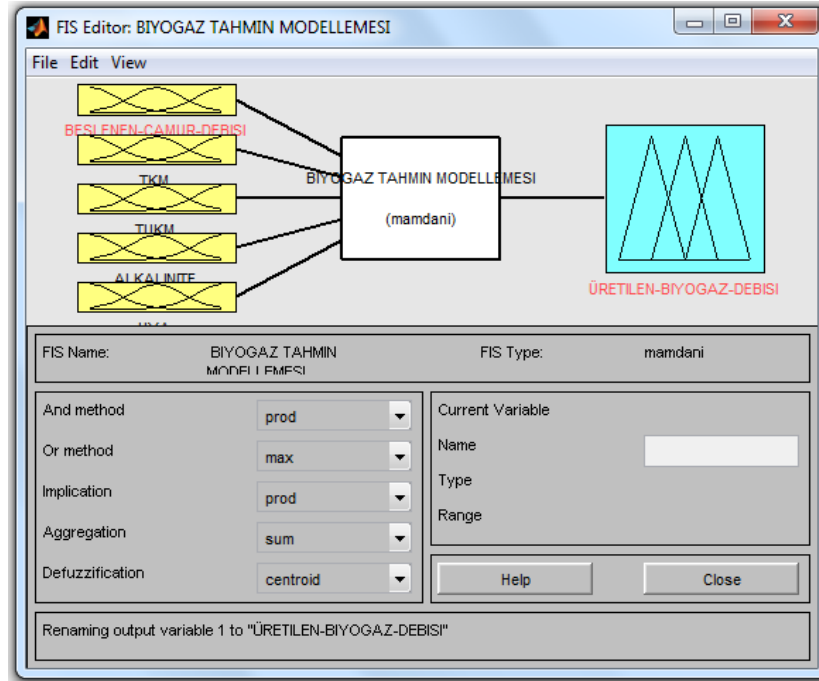
Şekil 6.11 Üretilen biyogaz debisinin ölçülen değerleri ile yapay sinir ağı modeli sonuçlarının bakiye hata grafiği

6.2 Bulanık Mantık Modeli (Fuzzy Logic)

6.2.1 Bulanık Çıkarım Sistemindeki Operatörlerin Seçimi

Bulanık Çıkarım Sistemi (Fuzzy Inference System = FIS) Ebrahim Mamdani (1975) tarafından önerilen türde (Mamdani's type) olup, bulanık çıkarım sistemi (FIS) modülünde sırasıyla; AND Metod (Ve) = prod, OR Metod (Veya) = max, Implication (Karıştırma) = prod, Aggregation (Birleştirme) = sum, Defuzzification (durulaştırma) =

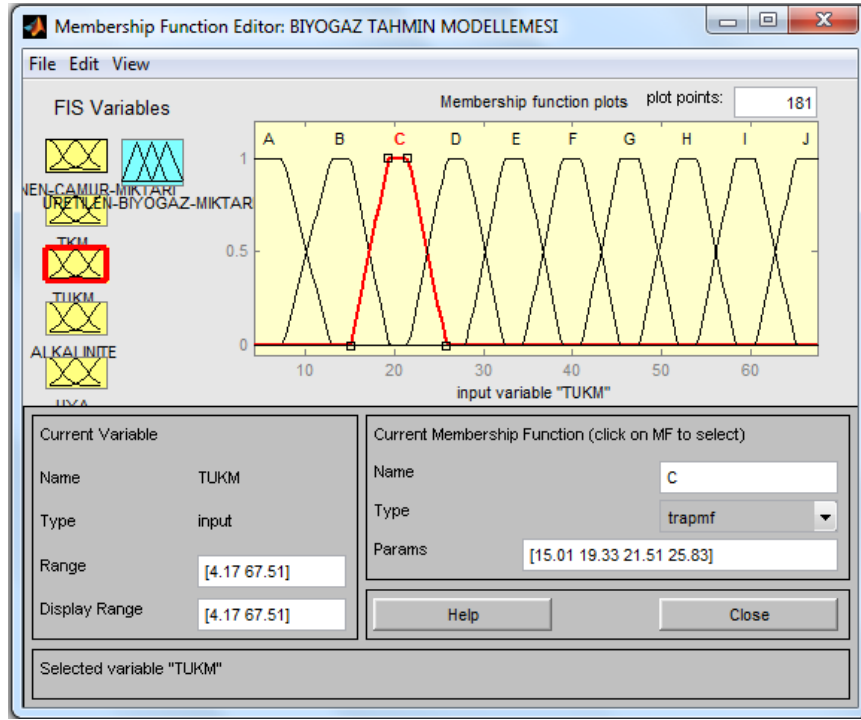
centroid (COG) operatörleri kullanılmıştır. Yukarıdaki bilgilere göre bu çalışmadaki bulanık model mekanizması Şekil 6.12’de gösterilmiştir. Kural tabanının yazımında esas alınan 394 adet kararlı hal sonucu EK-A’da verilmiştir.



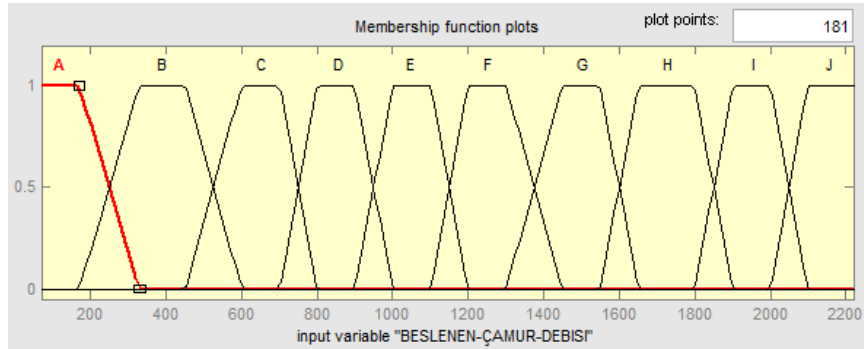
Şekil 6.12 Bulanık çıkarım sistemi

6.2.2 Model Değişkenlerinin Bulanıklaştırılması (Fuzzification)

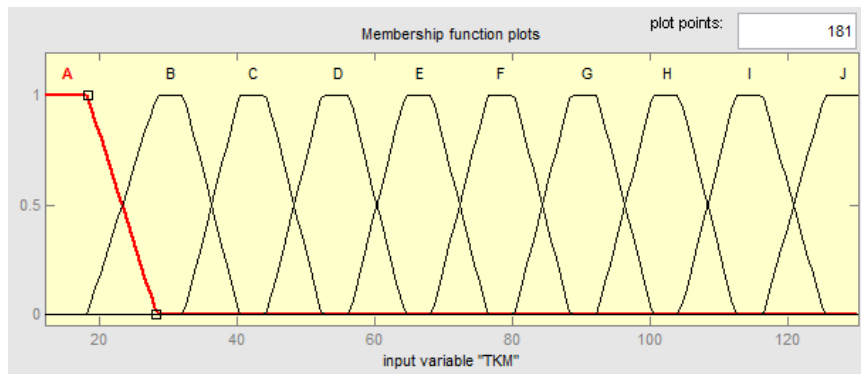
Tam ölçekli anaerobik çamur çürütme prosesinde üretilen biyogaz tahmin modelinde herbir girdi (beslenen çamur debisi, toplam katı madde, toplam uçucu katı madde, alkalinite, uçucu yağ asiti) değişkeni için 10 adet trapez üyelik fonksiyonu (trapmf) kullanılmış ve bunlar A, B, C, D, E, F, G, H, I, J şeklinde katagorize edilmiştir. Modelde çıktı (üretilen biyogaz debisi) değişkeni için 20 adet trapez üyelik fonksiyonu (trapmf) kullanılmıştır ve bunlar A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O, P, R, S, T, U şeklinde katagorize edilmiştir. Girdi ve çıktı parametrelerinin üyelik fonksiyonlarının oluşturulmasında değişken aralıkları Çizelge 6.6’da verilmiştir. Değişken aralıklarına göre girdi ve çıktı değişkenlerin katagorize edilmesi model üstünde Şekil 6.13’de gösterilmiştir. Girdi ve çıktı parametrelerine ait üyelik fonksiyonları Şekil 6.14, 6.15, 6.16, 6.17, 6.18, 6.19’da sırasıyla gösterilmiştir.



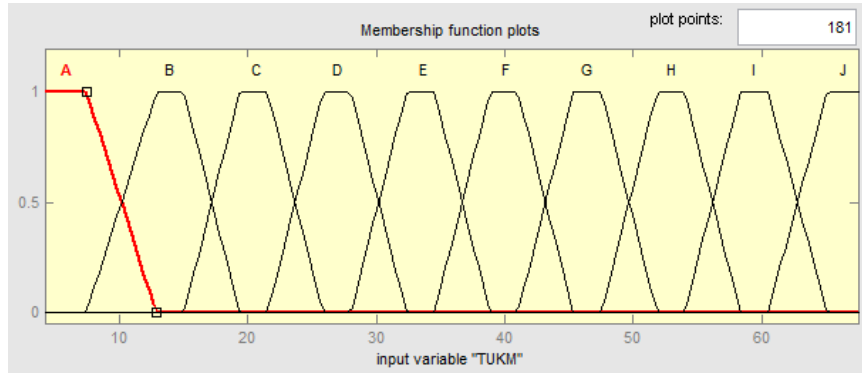
Şekil 6.13 Girdi ve çıktı değişkenlerinin üyelik fonksiyonlarının aralıklarının belirlenmesi



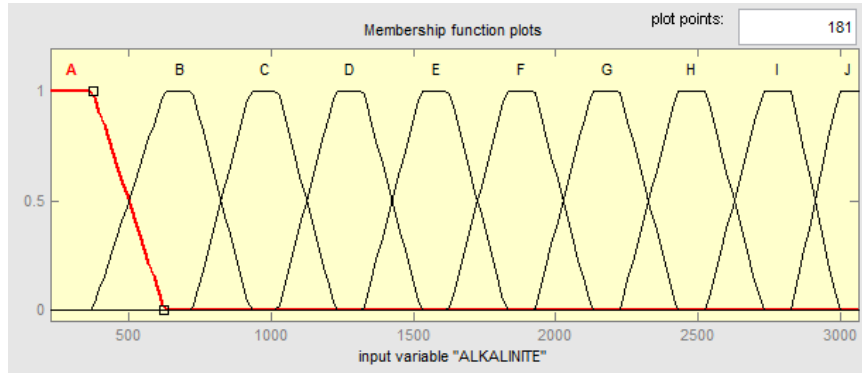
Şekil 6.14 Beslenen çamur debisi için 10'lu trapez üyelik fonksiyonları



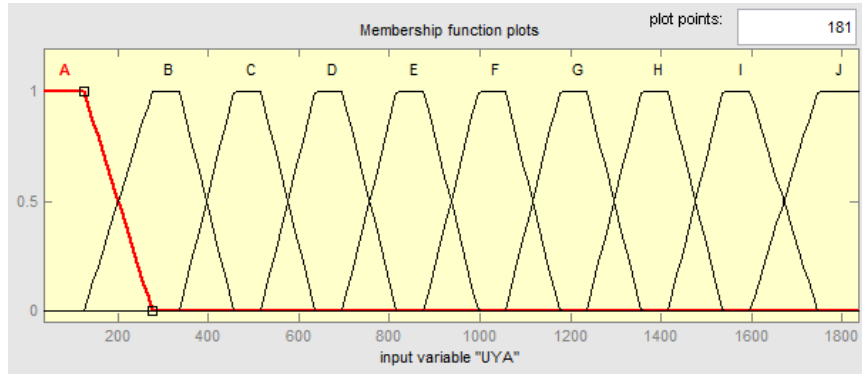
Şekil 6.15 TKM için 10'lu trapez üyelik fonksiyonları



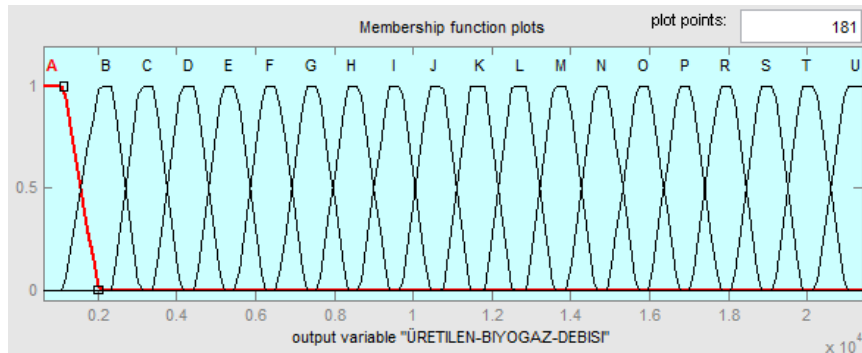
Şekil 6.16 TUKM için 10'lu trapez üyelik fonksiyonları



Şekil 6.17 Alkalinite için 10'lu trapez üyelik fonksiyonları



Şekil 6.18 UYA için 10'lu trapez üyelik fonksiyonları



Şekil 6.19 Üretilen biyogaz debisi için 20'li trapez üyelik fonksiyonları

Çizelge 6.6 Girdi ve çıktı verilerine ait üyelik fonksiyonları ve değişken aralıkları

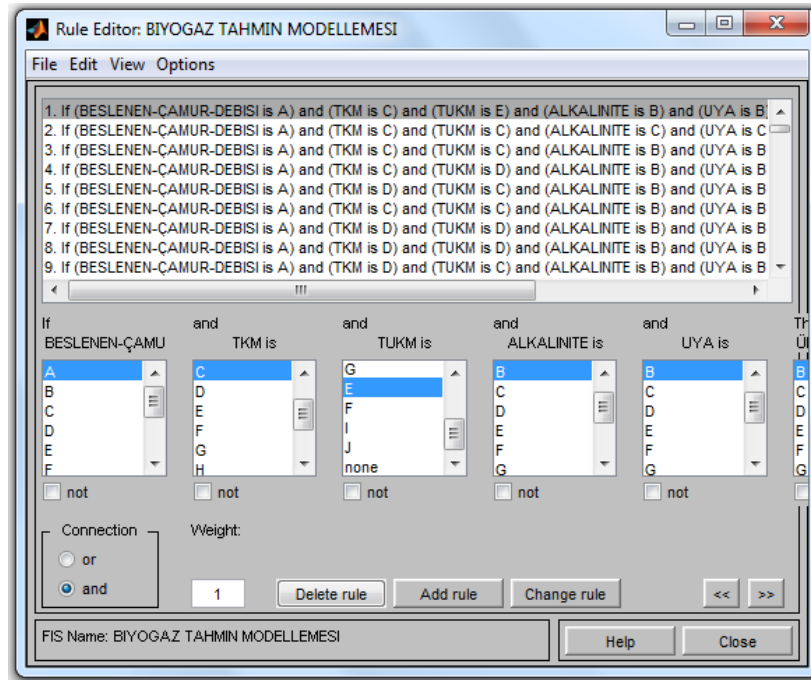
ÜYELİK FONKSİYONLARI	GİRDİ DEĞİŞKENLERİ					ÇIKTI DEĞİŞKENİ
	BESLENEN ÇAMUR DEBİSİ	TKM	TUKM	ALKALİNİTE	UYA	ÜRETİLEN BİYOGAZ DEBİSİ
A	[-190 -30 170 330]	[-3.73 6.27 18.27 28.27]	[-4.49 0.92 7.42 12.83]	[-174 76 376 626]	[-204.20 -54.23 125.77 275.77]	[-792 83 1133 2008]
B	[170 330 450 600]	[18.27 28.27 32.27 40.27]	[7.42 12.83 15.01 19.33]	[376 626 726 926]	[125.77 275.77 335.77 455.77]	[1133 2008 2358 3058]
C	[450 600 700 800]	[32.27 40.27 44.27 52.27]	[15.01 19.33 21.51 25.83]	[726 926 1026 1226]	[335.77 455.77 515.77 635.77]	[2358 3058 3408 4108]
D	[700 800 900 1000]	[44.27 52.27 56.27 64.27]	[21.51 25.83 28.01 32.33]	[1026 1226 1326 1526]	[515.77 635.77 695.77 815.77]	[3408 4108 4458 5158]
E	[900 1000 1100 1200]	[56.27 64.27 68.27 76.27]	[28.01 32.33 34.51 38.83]	[1326 1526 1626 1826]	[695.77 815.77 875.77 995.77]	[4458 5158 5508 6208]
F	[1100 1200 1300 1450]	[68.27 76.27 80.27 88.27]	[34.51 38.83 41.01 45.33]	[1626 1826 1926 2126]	[875.77 995.77 1055.77 1175.77]	[5508 6208 6558 7258]
G	[1300 1450 1550 1650]	[80.27 88.27 92.27 100.27]	[41.01 45.33 47.51 51.83]	[1926 2126 2226 2426]	[1055.77 1175.77 1235.77 1355.77]	[6558 7258 7608 8308]
H	[1550 1650 1800 1900]	[92.27 100.27 104.27 112.27]	[47.51 51.83 54.01 58.33]	[2226 2426 2526 2726]	[1235.77 1355.77 1415.77 1535.77]	[7608 8308 8658 9358]
I	[1800 1900 2000 2100]	[104.27 112.27 116.27 125.17]	[54.01 58.33 60.51 65.09]	[2526 2726 2826 2993]	[1415.77 1535.77 1595.77 1745.55]	[8658 9358 9708 10408]
J	[2000 2100 2340 2440]	[116.27 125.17 134.99 143.89]	[60.51 65.09 69.93 74.51]	[2826 2993 3129.22 3296.22]	[1595.77 1745.55 1925.13 2074.91]	[9708 10408 10758 11458]
K	-	-	-	-	-	[10758 11458 11808 12508]
L	-	-	-	-	-	[11808 12508 12858 13558]
M	-	-	-	-	-	[12858 13558 13908 14608]
N	-	-	-	-	-	[13908 14608 14958 15658]
O	-	-	-	-	-	[14958 15658 16008 16708]
P	-	-	-	-	-	[16008 16708 17058 17758]

Çizelge 6.6 (Devamı) Girdi ve çıktı verilerine ait üyelik fonksiyonları ve değişken aralıkları

R	-	-	-	-	-	[17058 17758 18108 18808]
S	-	-	-	-	-	[18108 18808 19158 19858]
T	-	-	-	-	-	[19158 19858 20208 20975]
U	-	-	-	-	-	[20208 20975 21811 22578]

6.2.3 Kural Tabanının Modele Girişi (Rule Base)

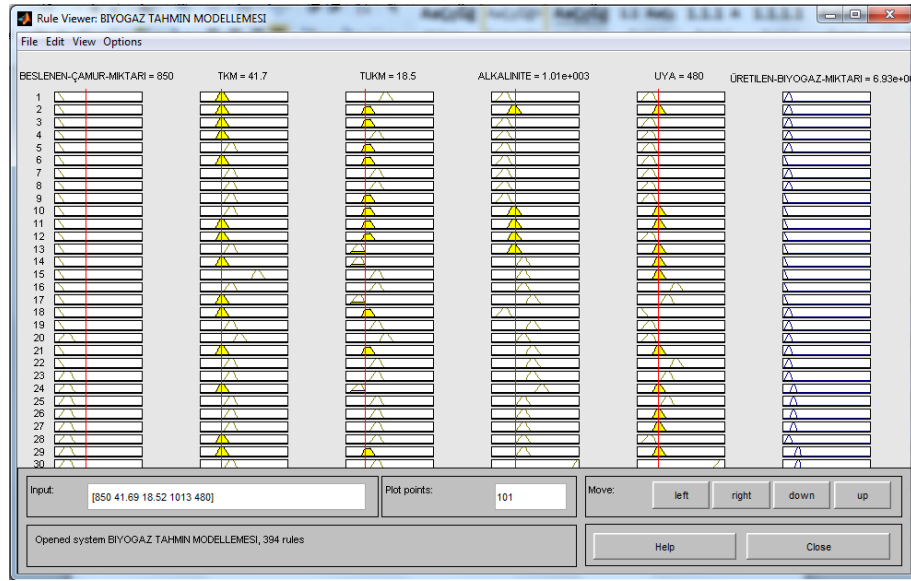
Girdi ve çıktı parametrelerinin bulanıklaştırma safhasında sözelleştirilmiştir. Bu değişkenlerin modelde kural tabanına girişleri yapılarak tahmin sonuçları bulunmuştur. MATLAB® Versiyon 7.9.0.529 (R2009b, Lisans No: 161051) nümerik ortamı üzerinde kural tabanının oluşturulması Şekil 6.20’de gösterilmiştir. Tam ölçekli anaerobik çamur çürütme prosesinden alınan veriler ile oluşturulan kural tabanı sözel ifadeleri EK-B ‘de verilmiştir.



Şekil 6.20 IF-THEN kural yapısının uygulanması

6.2.4 Veri setinin Durulaştırılması

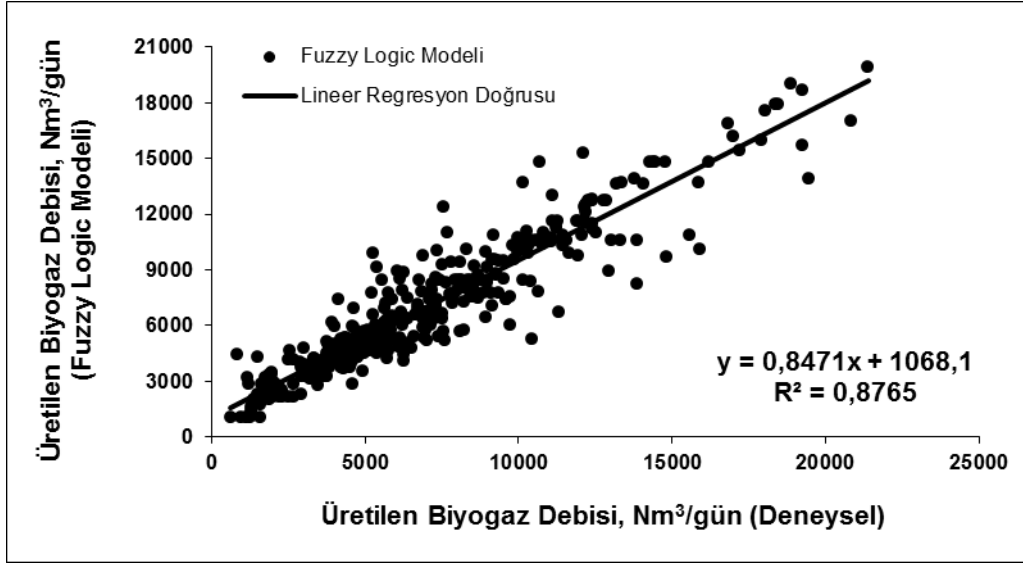
Bulanıklaştırma işlemi sonucu bulunan bulanık çıktıların sayısal verilere dönüştürülmesi için durulaştırma işlemi yapılmıştır. Tam ölçekli anaerobik çamur çürütme prosesinden alınan veri seti ile yazılan kural tabanı ile durulaştırıcı aşamasında verilerin model tahminleri bulunmuştur. MATLAB® Versiyon 7.9.0.529 nümerik ortamı üzerinde durulaştırma aşaması Şekil 6.21’de gösterilmiştir. Bulanık çıktıların sayısal sonuçları EK-C’de verilmiştir.



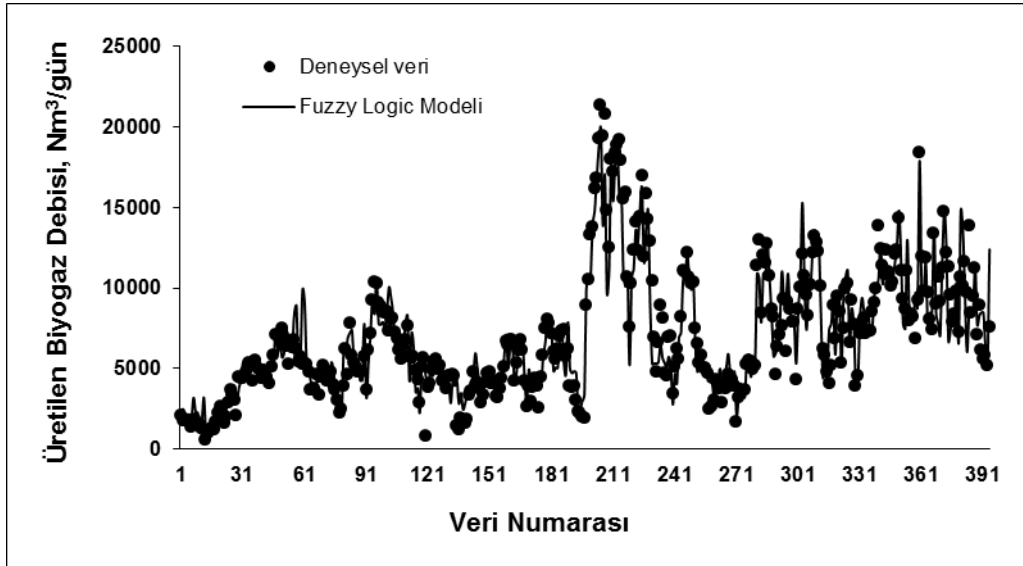
Şekil 6.21 Bulanık çıktıların durulaştırılması

6.2.5 Fuzzy Logic Modelinin Üretilen Biyogaz debisi için Tahmin Sonuçları

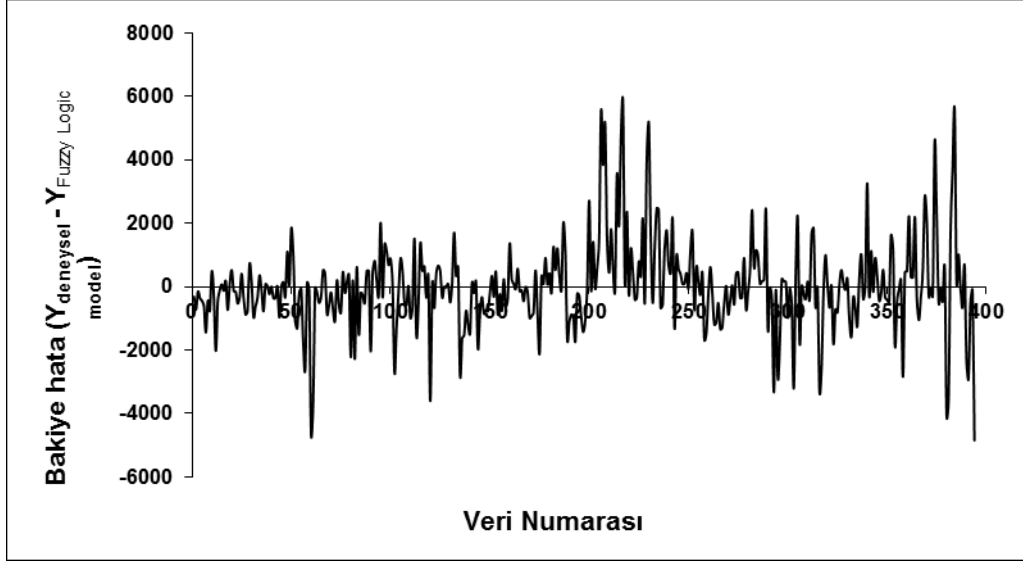
Tam ölçekli anaerobik çamur çürütme prosesinde laboratuvar ve ölçüm veri seti ile oluşturulan fuzzy logic modeli çalışmasında üretilen biyogaz debisi tahmini için model performansı ve deneysel veriler ile mukayesesi Şekil 6.22 ve Şekil 6.23’de grafikler yardımıya özetlenmiştir. Şekil 6.22’de görüldüğü gibi fuzzy logic modeli çalışması sonucunda R^2 değeri 0.8765 bulunmuştur. Bu sonuç ile modelin yüksek bir performan gösterdiği anlaşılmıştır. Şekil 6.24’de bakiye hata grafiği incelendiğinde bakiye hatanın -5000<...<6000 arasında salınım gösterdiği bulunmuştur.



Şekil 6.22 Üretilen biyogaz debisinin ölçülen değerleri ile fuzzy logic modelinin korelasyon grafiği



Şekil 6.23 Üretilen biyogaz debisinin ölçülen değerleri ile fuzzy logic model sonuçlarının mukayesesi



Şekil 6.24 Üretilen biyogaz debisinin ölçülen değerleri ile fuzzy logic model sonuçlarının bakiye hata grafiği

6.3 Çoklu Regresyon Modeline Ait Tahmin Sonuçları

DataFit® programında üretilen biyogaz debisi tahmini için yapılan çalışma neticesinde program, 1 eksponansiyel ve 2 lineer denklemden oluşan 3 farklı model sonucu vermiştir. Çizelge 6.7’de veri seti için DataFit® tarafından uygun görülen bu denklemler sıralanmaktadır. Çizelge 6.8’de görüldüğü gibi determinasyon katsayısı (R^2) ve ayarlanmış çoklu determinasyon katsayısı (R_a^2) değerlerinin birbirine yakın olması modelleme çalışmasında kullanılan veri sayısının yeterli olduğunu göstermektedir.

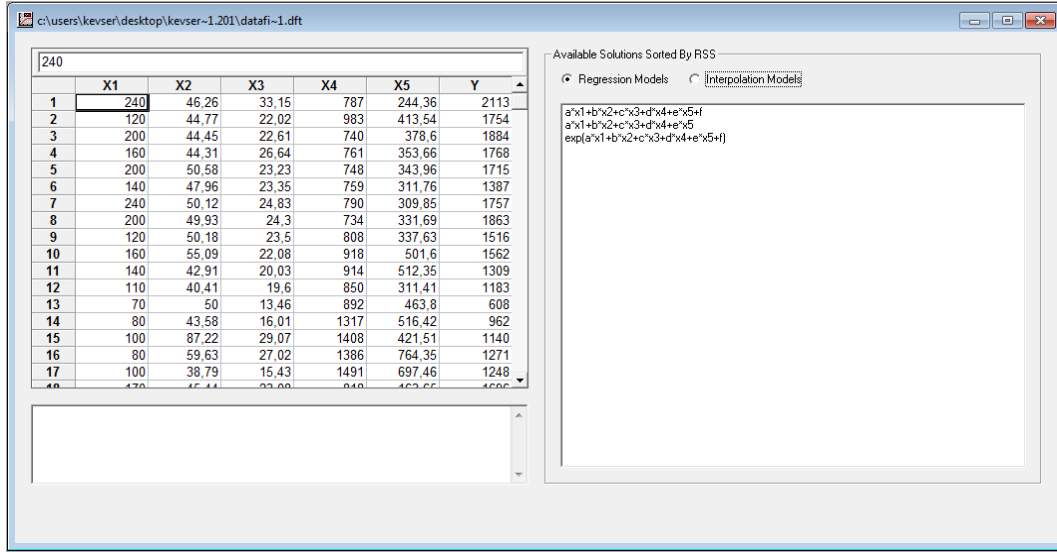
Çizelge 6.7 Üretilen biyogaz debisi tahmininde deneysel sonuçlarla en iyi uyum sağlayan çoklu regresyon modelinin (eksponansiyel model) katsayıları ve modele ait bazı istatistiksel sonuçlar

Katsayılar ve sabit terim (<i>i</i>)	Girdi değişkenleri	Standart Hata	<i>t</i> Oranı	<i>p</i> Değeri
$a = 6.099$	$x_1 = \text{Beslenen Çamur Debisi (m}^3/\text{gün)}$	0.313	19.52	0.0
$b = 36.663$	$x_2 = \text{TKM (\%)}_0$	18.295	2.004	0.046
$c = 57.747$	$x_3 = \text{TUKM (\%)}_0$	36.786	1.569	0.1173
$d = 0.551$	$x_4 = \text{Alkalinite (mg CaCO}_3/\text{l)}$	0.521	1.058	0.2908
$e = 1.070$	$x_5 = \text{Uçucu Yağ Asiti (mg/L)}$	0.853	1.255	0.2101

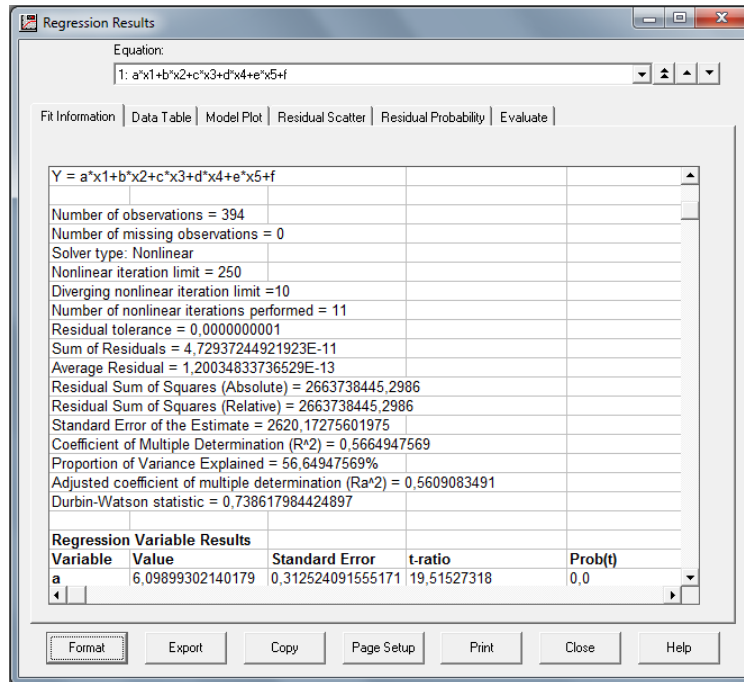
Çizelge 6.7 (Devamı) Üretilen biyogaz debisi tahmininde deneysel sonuçlarla en iyi uyum sağlayan çoklu regresyon modelinin (eksponansiyel model) katsayıları ve modele ait bazı istatistiksel sonuçlar

$f = -2502.98$	Sabit terim	595.59	-4.202	0.00003
----------------	-------------	--------	--------	---------

Çoklu regresyon modelinin DataFit® üzerinde veri setinin uygulaması ve sonuçları sırasıyla Şekil 6.25 ve Şekil 6.26'da gösterilmiştir.



Şekil 6.25 Çoklu regresyon modelinde veri setinin DataFit® üzerinde uygulanması



Şekil 6.26 Çoklu regresyon modelinde veri setinin DataFit® programında sonuçları

Çizelge 6.8 Biyogaz üretiminin tahmininde Datafit® ile elde edilen çoklu regresyon modelleri ve regresyon analizinde hesaplanan bazı istatistiksel değerler

Sıra	Model	SEE	SR	AR	RSS	R^2	R_a^2	NNI
1	$a*x_1+b*x_2+c*x_3+d*x_4+e*x_5+f$	2620.173	4.73×10^{-11}	1.2×10^{-13}	2663738445	0.5665	0.5609	11
2	$a*x_1+b*x_2+c*x_3+d*x_4+e*x_5$	2675.7	-48441.31	-122.95	2784986082	0.5468	0.5421	4
3	$exp(a*x_1+b*x_2+c*x_3+d*x_4+e*x_5+f)$	2732.07	-25563.18	-64.88	2896112297	0.5287	0.5226	8

SEE: Tahmindeki standart hata

SR: Hataların toplamı

AR: Ortalama bakiye hata

RSS: Hataların kareleri toplamı

R^2 : Determinasyon katsayısı

R_a^2 : Ayarlanmış çoklu determinasyon katsayısı

NNI: Uygulanan non-lineer iterasyon sayısı

Çizelge 6.8’de DataFit® tarafından verilen sonuçlar arasında en yüksek korelasyona sahip olan lineer ampirik denklemin katsayılarının ve modele ait bazı istatistiksel verilerin sonuçlarını göstermektedir. Çizelge 6.7’de t oranı ve p değeri üzerinden model hakkında yorum yapılması mümkündür. Elde edilen sonuçlarda t oranının yüksek ve p değerinin düşük olduğu değişkenler, model için etkin girdileri göstermektedir.

Çizelge 6.9’da üretilen biyogaz debisi tahmini için DataFit®’te tahmini yapılan verilerin deneysel sonuçları için en yüksek korelasyonu sağlayan Çizelge 6.8’de ki 1. denklem’in tanımlayıcı bakiye hata istatistiklerini göstermektedir.

Çizelge 6.9 Biyogaz üretiminin tahmininde deneysel sonuçlarla en iyi uyum sağlayan çoklu regresyon modeli (eksponansiyel model) için tanımlayıcı bakiye hataların istatistikleri

Bakiye hata istatistiği	Hesaplama	Regresyon sonuçları
Hata Toleransı	$Y_a - Y_p$	1×10^{-10}
Hataların Toplamı	$\sum_{i=1}^n Y_a - Y_p$	4.73×10^{-11}
Ortalama Hata	$\frac{\sum_{i=1}^n Y_a - Y_p}{n}$	1.2×10^{-13}
Hataların Toplamı (mutlak)	$SSE = \sum_{i=1}^n Y_a - Y_p^2$	2663738445.2986
Tahmindeki Standart Hata	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Y_a - Y_p^2}{n - p}} = \sqrt{\frac{SSE}{n - p}}$	2620.173

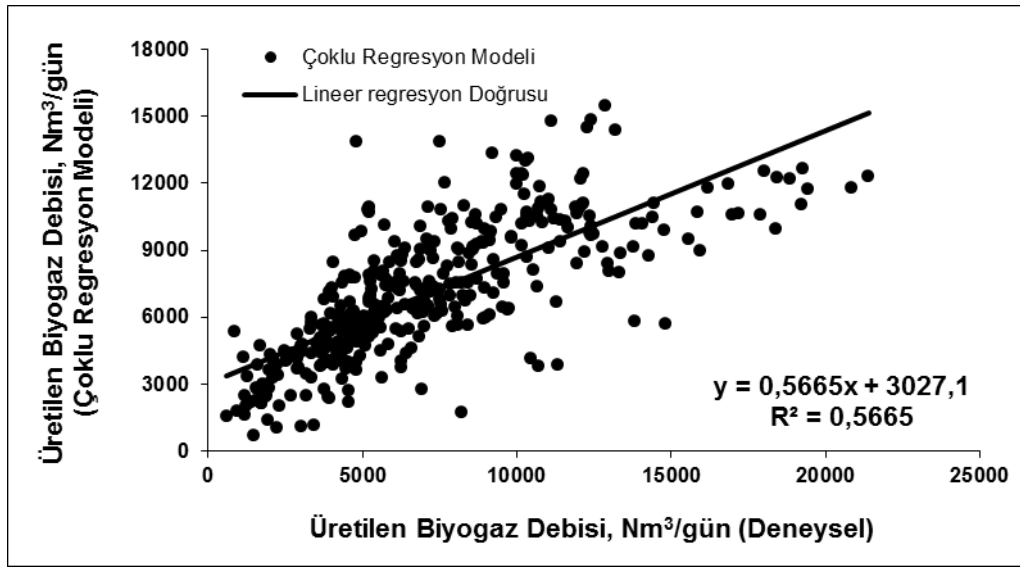
Y_a : Deneysel veri

Y_p : Tahmin değeri

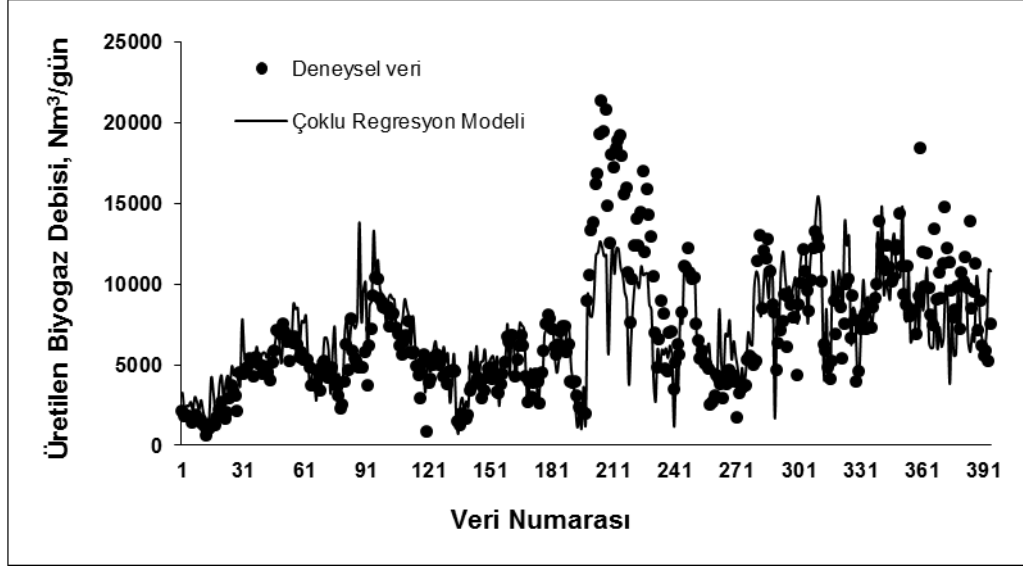
n: Gözlem sayısı

p : Çoklu regresyon modelindeki değişken sayısı

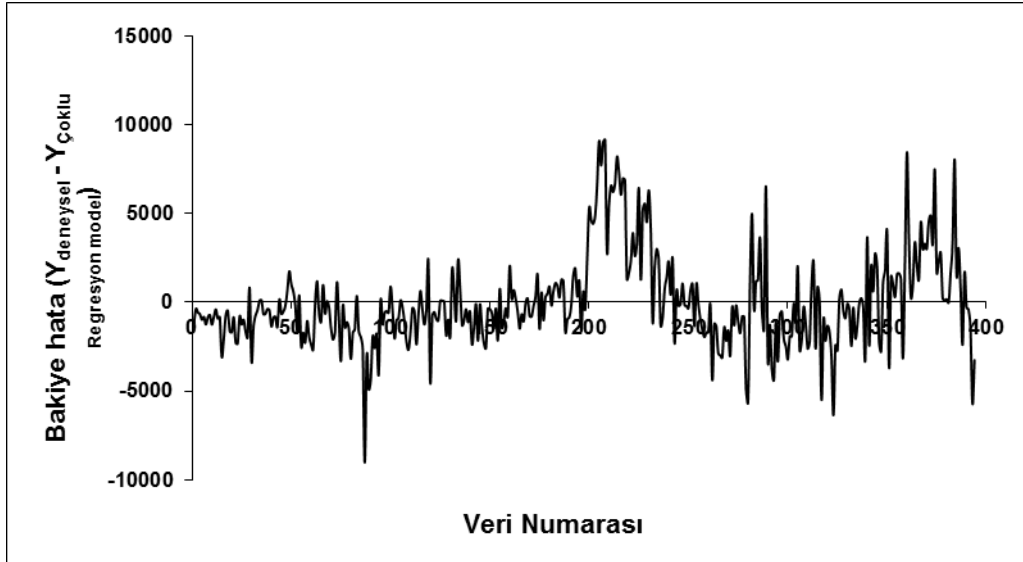
Tam ölçekli anaerobik çamur çürütme prosesinde laboratuvar ve ölçüm veri seti ile oluşturulan çoklu regresyon modeli çalışmasında üretilen biyogaz debisi tahmini için model performansı ve deneysel veriler ile mukayesesi Şekil 6.27 ve Şekil 6.28’de grafikler yardımıyla özetlenmiştir. Şekil 6.27’de görüldüğü gibi çoklu regresyon modeli çalışması sonucunda R^2 değeri 0.5665 bulunmuştur. Bu sonuç ile modelin yüksek bir performans göstermediği anlaşılmıştır. Şekil 6.29’da bakiye hata grafiği incelendiğinde bakiye hatanın -10000<...<10000 arasında salınım göstermesi modelin hata payının yüksek olduğunu göstermiştir.



Şekil 6.27 Üretilen biyogaz debisinin ölçülen değerleri ile çoklu regresyon modelinin korelasyon grafiği



Şekil 6.28 Üretilen biyogaz debisinin ölçülen değerleri ile çoklu regresyon model sonuçlarının mukayesesi



Şekil 6.29 Üretilen biyogaz debisinin ölçülen değerleri ile çoklu regresyon model sonuçlarının bakiye hata grafiği

6.4 Tahmin Sonuçlarının İstatistiksel Verifikasyonu

Çizelge 6.10'da çıktı değişkeni olan üretilen biyogaz debisi için; yapay sinir ağları, fuzzy logic ve çoklu regresyon modellerine ait performans indisleri hesaplanmış ve mukayese edilmiştir. Modelleme sonuçları EK-C'de verimiştir.

Çizelge 6.10 Mukayese maksatlı kullanılan istatistiksel performans indikatörleri

Performans indikatörü	Matematiksel ifadeler ^a	Tahmin Modelleri ^b		
		YSA	FLM	ÇRM
Determinasyon Katsayisi	$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)(Y_i - Y_m) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_m)^2}$	0.6496	0.8765	0.5665
Ortalama Mutlak Hata	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i - O_i $	1671.860	922.6320	1869.1885
Ortalama Karesel Hata	$RMSE = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right)^{0.5}$	2341.0859	1393.3398	2600.1456
Sistemik Ortalama Karesel Hata	$RMSE_S = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [P_{i \text{ reg}} - O_i]^2 \right)^{0.5}$	1350.0933	603.8208	1711.9441
Unsistemik Ortalama Karesel Hata	$RMSE_U = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [P_{i \text{ reg}} - P_i]^2 \right)^{0.5}$	1912.7234	1255.7020	1957.0216
Sistemik Hata Orani	$PSE = \frac{RMSE_S^2}{RMSE_U^2}$	0.498	0.231	0.765
Uyumluluk indeksi	$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n P_i - O_m + O_i - O_m ^2}$	0.8861	0.9648	0.8458
Fraksiyonel Varyans	$FV = \frac{2 \sigma_o - \sigma_p}{\sigma_o + \sigma_p}$ $\sigma_o = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2}{n-1}}$ $\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - P_m)^2}{n-1}}$	0.2	0.0999	0.2822

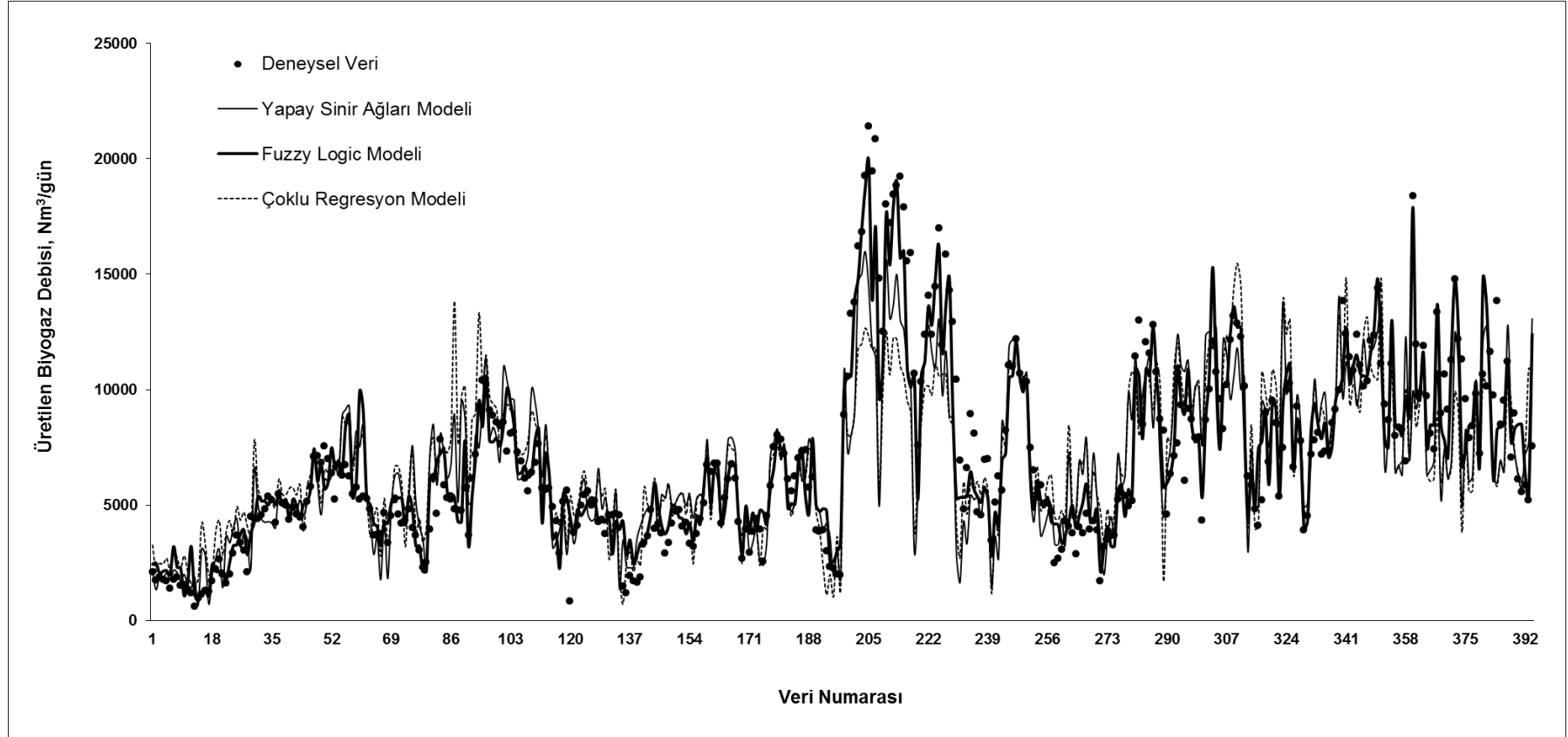
Çizelge 6.10 (Devamı) Mukayese maksatlı kullanılan istatistiksel performans indikatörleri

2'nin faktörü	$0.5 \leq FA2 = \left(\frac{O_i}{P_i} \right) \leq 2$	1.0461	0.9889	1.0140
----------------------	--	--------	--------	--------

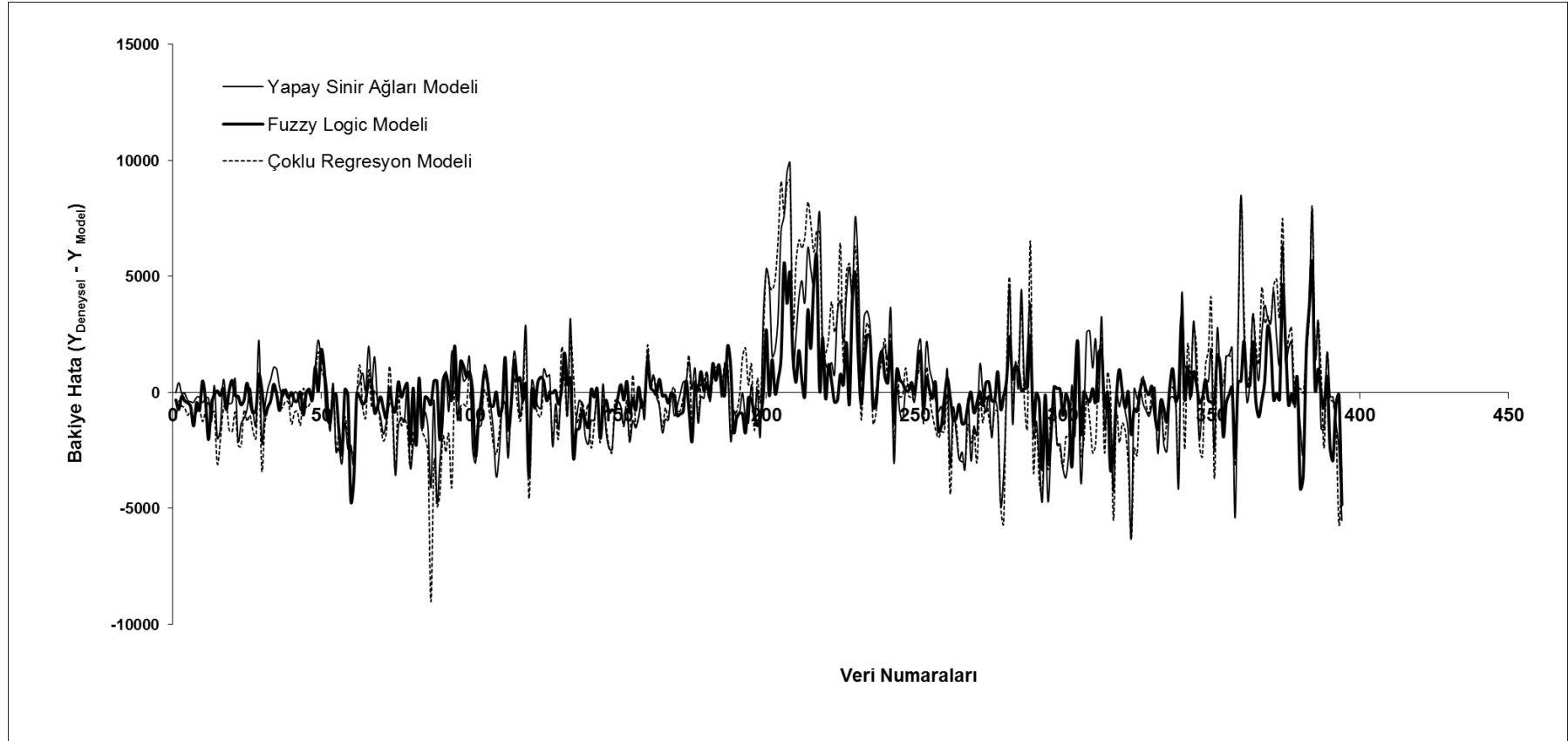
^a *O*, *P*, *m* ve *reg* indisleri sırasıyla gözlenen (deneysel), tahmin edilen (model), ortalama ve regresyon ifadelerini göstermektedir.

^b YSA, FLM ve ÇRM sırasıyla yapay sinir ağları, fuzzy logic modeli (bulanık mantık modeli) ve çoklu regresyon modeli ifadelerini göstermektedir.

Tam ölçekli anaerobik çamur çürütme prosesinde laboratuvar ve ölçüm veri seti ile oluşturulan yapay sinir ağları, fuzzy logic ve çoklu regresyon modellemeleri ile üretilen biyogaz debisi tahmini çalışmalarında model performansları Şekil 6.30'da grafik yardımıyla özetlenmiştir. Grafikde anlaşılabileceği gibi bütün modelleme çalışmaları içinden deneysel sonuçlar ile en iyi uyumu ve performansı sağlayan model sonuçları fuzzy logic modelinden elde edilmiştir. Şekil 6.31'de bakiye hata grafiği incelendiğinde bakiye hatanın salınımının en az olduğu çalışma fuzzy logic modeli olduğu görülmüştür.



Şekil 6.30 Üretilen biyogaz debisinin ölçülen değerleri ile model çalışmaları sonuçlarının mukayesesi



Şekil 6.31 Üretilen biyogaz debisinin ölçülen değerleri ile model çalışmaları sonuçlarının bakiye hata grafiği

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, İSKİ Tuzla Biyolojik ve İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi anaerobik çamur çürütme prosesinden üretilen biyogaz debisinin tahmini için yapay sinir ağları, bulanık mantık ve çoklu regresyon modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Modelleme çalışmalarında tam ölçekli anaerobik çamur çürütme prosesinin deneysel ve ölçülen dört yıllık (Ocak 2008 – Temmuz 2011) veri seti kullanılmıştır.

Yapay Sinir Ağları modelleme çalışma kapsamında; temel bileşen analizi (principal component analysis, PCA) yapılmış ve PCA çalışması sonucunda tüm değişkenlerin modele katkılarından dolayı değerlendirilmeye alınması gerektiği belirlenmiştir. Model için geri yayılım algoritması (back propagation) seçimi üretilen biyogaz debisi için yapılmıştır. Yapılan işlemler sonucunda üretilen biyogaz debisi, 0.789 korelasyon (R) sağlayan *trainscg* geri yayılım algoritması seçilmiştir. Yapay sinir ağları sisteminin optimizasyonu aşamasında ise üretilen biyogaz debisi tahmininde gizli tabakalar da (hidden layer) kullanılacak optimum nöron sayısı elde edilmiştir. Optimizasyon sonucunda üretilen biyogaz debisi, 0.4019 ortalama karesel hata (MSE) ile 14 nöron, gizli katmandaki nöron sayıları optimize edilmiştir. Hassasiyet analizi (sensitivity analysis) aşamasına gelindiğinde ise girdi olarak sisteme tanıtılan tüm parametrelerin YSA modeline katkıları belirlenmiş ve katkı yüzdeleri hesaplanmıştır. Üretilen biyogaz debisi için yapılan hassasiyet analizinde, ilk veri sisteme girildiğinde ortalama karesel hata (MSE) değeri $>10^4$ iken diğer 4 parametre analize katıldıkça ortalama karesel hata değeri önemli derecede düşüş göstermiş ve son olarak 0.4019 değerini almıştır.

Bu çalışma kapsamında ayrıca biyogaz üretiminin fuzzy logic (bulanık mantık) tekniği ile modellenmesi araştırılmıştır. Çalışmada, MATLAB® Versiyon 7.9.0.529 (R2009b, Lisans No: 161051) yazılım programında mevcut “Bulanık Mantık Modülü” (Fuzzy Logic Toolbox) kullanılarak bir “Bulanık Çıkarım Sistemi” (Fuzzy Inference System - FIS) oluşturulmuş ve bir MISO (çoklu girdili, tek çıktılı) modeli geliştirilmiştir. Fuzzy Logic modellemesi kapsamında beş girdi değişkeni (beslenen çamur debisi, toplam katı madde (TKM), toplam uçucu katı madde (TUKM), alkalinite, uçucu yağ asiti (UYA)) yapay zekâ yaklaşımı ile bulanıklaştırılmıştır. Girdi değişkenleri ve çıktı değişkeni için sırasıyla onlu ve yirmili trapez üyelik fonksiyonları ile bulanık altkümeler oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında, Mamdani tipi bulanık çıkarım sistemi kullanılarak IF-THEN (EĞER-İSE) formatında toplam 394 adet kural tabanı yazılmıştır. Seçilen trapez üyelik fonksiyonu için Bulanık Çıkarım Sistemindeki (FIS) OR, AND, IMPLICATION, AGGREGATION ve DEFUZZIFICATION metodlarında, literatürde en çok kullanılan (*prod*, *max*, *prod*, *sum*, *centroid*) FIS operatörleri alınmış ve en uygun FIS yapısı belirlenmiştir. Fuzzy Logic modellemesi kapsamında, biyogaz üretiminin tahmininde kullanılan trapez üyelik fonksiyonları ve yazılan kural tabanı için determinasyon katsayısı (R^2) yaklaşık 0.88 olarak belirlenmiştir. Bu değer tam ölçekli anaerobik çamur çürütme prosesi için oldukça başarılı kabul edilmektedir. Bulanık mantık yönteminin uygulanabilirliği oldukça basit olup, karmaşık reaksiyonları tanımlamaya, matematiksel ve biyokimyasal eşitliklere gerek yoktur. Çıktı değişkeninin (üretilen biyogaz debisi) bulanıklaştırılmasında 20 seviyeli trapez fonksiyonu kullanılması durumunda mevcut veri seti için daha hassas aralıklar oluşturulmuştur. Bununla birlikte, başka türde üyelik fonksiyonlarının (üçgen, çan şekilli, Gauss, vb.) ve bunların farklı kombinasyonlarının kullanılması halinde bulanık mantık modelinin tahmin performansının daha iyi seviyelere getirileceği düşünülmektedir.

YSA tekniği ve Fuzzy logic modeli ile yapay zekâ esaslı modelleme çalışmaları yapıldıktan sonra, DataFit® V8.1.69 (Copyright© 1995-2005 Oakdale Engineering, PA, RC167) ile çoklu regresyon analizli esaslı bir çalışma daha gerçekleştirilerek tahmin sonuçlarının kendi içerisinde mukayesesi yapılmıştır. Yapılan çoklu regresyon çalışması neticesinde, üretilen biyogaz debisi biri eksponansiyel olmak üzere 3 adet

matematiksel formülasyon elde edilmiştir. Bu 3 denklem arasından 0.5665 değerindeki korelasyon katsayısı ile lineer ampirik denklem model için uygun bulunmuştur.

Ancak DataFit® ile gerçekleştirilen çoklu regresyon analizi neticesinde elde edilen model sonuçları, YSA ve Fuzzy Logic tarafından elde edilen sonuçlarla kıyaslandığında, üretilen biyogaz debisi tahmin sonuçlarında Fuzzy logic ve YSA performansının DataFit®'ten çok daha uygun olduğu spesifik istatistiksel analizler doğrultusunda tespit edilmiştir. Fakat, istatistiksel verilerin uygunluğu dışında modelin pratik uygulamalarda kullanılabilirliği DataFit®'ten elde edilen multi parametrelili regresyon denklemi YSA ve Fuzzy Logic modelleri kadar kullanışlı olmayıp, güncel veriler karşısında yeniden bir model kurulması zorunluluğu ve değişen veriler karşısında YSA ve Fuzzy logic kadar dinamik olmaması gibi sebeplerden ötürü, üretilen biyogaz debisi tahmininde yapay zekâ modellerinin çok daha avantajlı olduğu görülmüştür.

Gerçekleştirilen bu çalışmada yapay zekâ esaslı modellerin (YSA ve Fuzzy Logic) dinamik bir yapıya sahip olduğu ve sisteme tanıtılan her tür yeni bilgi için çok kısa zamanda kendini güncelleyebildiği görülmüştür. Yapay zekâ esaslı modellerin aksine, konvansiyonel çoklu regresyon esaslı tahmin modeli daha sabit bir yapıya sahip olduğu için yeni veriler karşısında yeni bir model kurulması gerektiğini göstermiştir. DataFit® kompleks ve yüksek mertebeli matematiksel formülasyonlara sahip olmasına rağmen, yapay zekâ esaslı modelleme teknikleri bu konuda uygulamada konvansiyonel yöntemlere nazaran daha avantajlı metotlardır. Geliştirilen tahmin modellerinin pratikteki uygulanabilirliğini arttırmak maksadıyla değişken sayısının azaltılması da düşünülebilir. Ancak değişken sayısının azaltılmasında, modelin prosesi temsil edici özelliğinin geri planda kalmamasına özen gösterilmelidir.

Bu çalışma kapsamında en yüksek tahmin performansını gösteren Fuzzy Logic esaslı bir yapay zekâ modelinin gerçek ölçekli atıksu arıtma tesisine adapte edilmesine yönelik çalışmalar yapılması halinde, tam ölçekli tesiste bulunan kojenarasyon ünitesindeki türbinlerden elektrik enerjisi üretimi esnasında oluşan atık ısı kullanılarak doymuş buhar eldesiyle (buhar kazanlarında) termal çamur kurutma ünitesinde ne kadar çamur kurutulacağı önceden tahmin edilmesi mümkün olacak ve sistemden çekilecek fazla

çamurun miktarı da önceden belirlenmiş olacaktır. Ayrıca, tesiste devreye alınma aşamasında olan desülfürizasyon ünitesinden geçirilecek biyogazın miktarı da tahmin edilecektir. Bunun yanında, idari binanın ısınmasında gerekli olan biyogaz miktarının yeterli olup olmadığı konusunda önceden bilgi sahibi olunup, söz konusu işletme için ek yakıt programını belirlenecektir. Ayrıca, gün içerisinde türbinlerde yakıt olarak kullanılan doğal gaz ile karışacak olan biyogaz hacmi de önceden belirlenmiş olacaktır. Başarılı bir model performansı ile muhtemel hataların da önceden tespiti sağlanabileceği gibi, prosesin işletme maliyetinin düşürülmesi yönünde elde edilecek potansiyel faydaların, yapay zeka esaslı proses kontrolü tekniğinin kullanılmasını diğer tam ölçekli atıksu arıtma tesislerinde yaygın hale getireceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Filibeli, A., (1998). Arıtma Çamurlarının İşlenmesi, D.E.Ü Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, 2. Baskı, 72-92.
- [2] Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, G., Burton, F.L. ve Stensel, H.D, (2003). Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, 4th Ed., McGraw Hill Inc., New York, USA.
- [3] Ubay, G., (1983). Evsel Atıksuların Havasız Biyolojik Arıtımı Üzerine Bir Araştırma, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] Öztürk, İ., (1999). “Anaerobik Biyoteknoloji ve Atık Arıtımındaki Uygulamaları”, Su Vakfı Yayınları, İstanbul.
- [5] Gökçay, C.F., Duran, M.M. ve Demirer, G.N., (2001). “Anaerobik Biyoteknoloji Teorik Altyapı ve Uygulamalar”, IV. Ulusal Çevre Müh. Kongresi, İçel, 7-10 Kasım.
- [6] Ferry, J.G., (1993). “Methanogenesis, Ecology, Physiology, Biochemistry and Genetics”, Chapman & Hall, New York, 25 -33.
- [7] Aydemir, D., (2003). Peyniraltı Suyunun Anaerobik Arıtımı ve Biyogaz Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 12-14, 27-29, 31-43.
- [8] Speece, R.E., (1996). “Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewater”, Arche Press, Tennessee, 34-67.
- [9] Lay, J.J., Li, Y.Y. ve Noike, T., (1997). “Influences of pH and Moisture Content on the Methane Production in High-Solid Sludge Digestion”, Water Research, 31(6):1518-1524.
- [10] Lapp, H.M., Schulte, D.D., Sparling, A.B. ve Buchanan, L.C., (1975). “Methane Production from Animal Wastes. 1. Fundamental Considerations”, Canadian Agr. Eng., 17(2):97-102.

- [11] Ayvaz, Z., (2000). "Atıksu Arıtma Çamurlarının Değerlendirilmesi", Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü, İzmir, 9 (35): 3-12.
- [12] Van Den Berg, L., (1977). "Effect of Temperature on Growth and Activity of a Methanogenic Culture Utilizing Acetate", Canad. J. of Microb. 23(7):151-158.
- [13] Lin, C.Y., Noike, T., Sato, K. ve Matsumoto, J., (1987). "Temperature Characteristics of The Methanogenesis Process in Anaerobic Digestion", Water Science and Technology, 19: 299-310.
- [14] Duran, M. ve Demirer, G.N., (1997). "Atıksu Arıtımı ve Anaerobik Biyoteknoloji", Atıksu Arıtma Sistemleri Semineri Notları, TMMOB Çevre Mühendisleri Odası, Ankara Şubesi, 19-23.
- [15] Uğurlu, A., (1995). "Anaerobik Arıtma Sistemleri", Çevre ve Mühendis, Ankara, 3(6): 19-22.
- [16] Desai, M., Patel, V. ve Madamvar, D., (1994). "Effect of Temperature and Retention Time on Biomethanation of Cheese Whey-Poultry Waste-Cattle Dung", Environmental Pollution, 83: 311-315.
- [17] Ahn, J.H. ve Forster, C.F., (2002). "The Effect of Temperature Variations on The Performance of Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Filters Treating a Simulated Papermill Wastewater", Process Biochemistry, 37: 589-594.
- [18] Eismann, F., Glindemann, D., Bergmann, A. ve Kusch, P., (1997). "Effect of Free Phosphine on Anaerobic Digestion", Water Research, 31(11):2771-2774.
- [19] Zayed, G. ve Winter, J., (2000). "Short Contribution: Inhibition Of Methane Production From Whey By Heavy Metals-Protective Effect of Sulfide", Applied Microbiology and Biotechnology Abstract, 53(6):726-731.
- [20] Vijayaraghavan, K., ve Murthy, D.V.S., (1997). "Effect of Toxic Substances in Anaerobic Treatment of Tannery Wastewaters", Bioprocess Engineering Abstract, 16(3):151-155.
- [21] Filibeli, A., Büyükkamacı, N. ve Ayol, A., (2000). "Anaerobik Arıtma", DEÜ, Müh. Fak. Yayınları, İzmir, 280:21-46.
- [22] Tüzüm, A.P., (2003). Yemek Atıklarının Anaerobik Arıtımı ve Biyogaz Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 14-43, 44-52.
- [23] Atilla, B., (2002). Biyolojik Arıtma Çamurlarının Anaerobik Çürütülmesi ve Üst Suyun MAP Çöktürmesi ile Arıtımı, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [24] Mosey, F.E., ve Foulkes, M., (1984). "Control of the Anaerobic Digestion Process in Sewage Sludge Stabilization and Disinfection", Ed. A.M.Bruce.
- [25] Akturman, F., (2003). "Atıksu Arıtımı ve Arıtma Teknikleri", Bilim ve Teknik, 428: 42-52.
- [26] Bayrakçıken, H., (1997). Biyogaz Üretim Sistemi Tasarımı ve Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 20-24.
- [27] Eryılmaz H., (1981). "Biyogaz Üretiminde Türkiye Koşullarına En Uygun Üreteç Tipinin Tespiti", T.C. Köy İşleri ve Kooperatifler Bakanlığı Toprak su Genel Müdürlüğü Merkez Toprak su Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü yayınları, Ankara, 21.
- [28] Karataş, A., (2006). Tavuk Gübresinin Anaerobik Parçalanması için Uygun Koşulların Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 3-7, 21-23, 27-28.
- [29] Gökçay, C., Demirer, G.N., Ergüder, T.H. ve Tezel, U., (2002). "Anaerobik Arıtımı Teorik Altyapı ve Uygulamaları Eğitim Semineri Notları", TMMOB Çevre Mühendisleri Odası, Ankara Şubesi, 47-55.
- [30] Bashir B.H. ve Matin A, (2004). "Effect of Potassium and Magnesium on Sodium Toxicity in Anaerobic Treatment Processes", EJEAFChE, 4, 827-834.
- [31] Bashir B.H. ve Matin A., (2004). "Combined Effect of Calcium and Sodium on Potassium Toxicity in Anaerobic Treatment Processes", EJEAFChE, 3, 670–676.
- [32] Bashir B.H. ve Matin A., (2005). "Reduction of Potassium Toxicity by Using Sodium in a Completely Mixed Anaerobic Digester", EJEAFChE, 4, 851–857.
- [33] Sung, S., ve Liu, T., (2003). "Ammonia Inhibition on Thermophilic Anaerobic Digestion", Chemosphere, 53, 43-52.
- [34] Siegert I. ve Banks C., (2005). "The Effect of Volatile Fatty Acid Additions on the Anaerobic Digestion of Cellulose and Glucose in Batch Reactors", Process Biochemistry, 40, 3412-3418.
- [35] Altaş, (2008). "Inhibitory Effect of Heavy Metals on Methane-Producing Anaerobic Granular Sludge", Journal of Hazardous Materials, 162, 1551-1556.
- [36] Colussi, I. ve ark., (2009). "Start-Up Procedures and Analysis of Heavy Metals Inhibition on Methanogenic Activity in Egsb Reactor", Bioresource Technology, 100, 6290-6294.

- [37] Jeong T.Y. ve ark., (2008), "Effect of COD/sulfate Ratios on Batch Anaerobic Digestion Using Waste Activated Sludge", Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 14, 693-697.
- [38] Temizel, İ., (2012). Melas Atık Sularının Arıtımında Yukarı Akışlı Havasız Çamur Yataklı Reaktör (YAHÇYR) Sisteminden Elde Edilen Biyogaz ve Metan Üretimlerinin Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [39] Kakıcı, A., (2009). Yapay Sinir Ağlarına Giriş, www.ahmetkakici.com, 18 Ocak 2011.
- [40] Yapay Sinir Ağları, (2010). Yapay Sinir Ağlarına Genel Bakış, www.yapay-sinir-aglari.uzerine.com, 30 Ağustos 2011.
- [41] Yurtoğlu, H., (2005). Yapay Sinir Ağları Metodolojisi ile Öngörü Modellemesi: Bazı Makroekonomik Değişkenler için Türkiye Örneği, Uzmanlık Tezi, Devlet Planlama Teşkilatı, Ankara.
- [42] Minsky, M.L. ve Papert, S.A., (1969). "Perceptrons", Cambridge, MA: MIT Press.
- [43] Yetilmezsoy, K., Özkaya, B. ve Çakmakçı, M., (2011). "Artificial Intelligence-Based Prediction Models for Environmental Engineering", Neural Network World, 193-218.
- [44] Zade, J.G. ve Noori, R., (2008). "Prediction Of Municipal Solid Waste Generation By Use Of Artificial Neural Network: A Case Study Of Mashhad", International Journal of Environmental Research, 13-22.
- [45] Jahandideh, S., Jahandideh, S., Asadabadi, E.B., Askarian, M., Movamedi. M., Mehdi, M., Hosseini, S. ve Jahandideh, M., (2009). "The Use of Artificial Neural Networks and Multiple Linear Regression to Predict Rate of Medical Waste Generation", Waste Management, 29: 2874-2879.
- [46] Yabanuka. K., Hosomi, M. ve Murakami, A., (1997). "Novel Application of a Back- Propagation Artificial Neural Network Model Formulated to Predict Algal Bloom", Water Science Technology, 36: 89-97.
- [47] Karul, C., Soyupak, S., Çilesiz, A.F., Akbay, N. ve Germen, E., (2000). "Case Studies On The Use Of Neural Networks in Eutrophication Modeling", Ecological Modelling, 134: 145-152.
- [48] Hamed, M., Khalafallah, M.G. ve Hassanien, E.A., (2004). "Prediction of Wastewater Treatment Plant Performance Using Artificial Neural Networks", Environmental Modelling Software, 19: 919-928.

- [49] Onkal Engin, G., Demir, I. ve Engin, S.N., (2005). "Determination of the Relationship Between Sewage Odour and BOD by Neural Networks", *Enviromental Modelling Software*, 21: 1190-1197.
- [50] Yetilmezsoy, K. ve Sapci Zengin, Z., (2009). "Stochastic Modeling Applications for the Prediction of COD Removal Efficiency of UASB Reactors Treating Diluted Real Cotton Textile Wastewater", *Stochastic Enviromental Researches and Risk Assessment*, 23: 13-26.
- [51] Karaca, F. ve Özkaya, B., (2006). "A Neural Network- Based Model for Controlling Leachate Flow-Rate in a Municipal Solid Waste Landfill Site", *Enviromental Modelling Software*, 21: 1190-1197.
- [52] Al Mutairi, N., Kartam, N., Koushki, P. ve Al-Mutairi, M., (2004). "Modelling and Predicting Biological Performance of Contact Stabilization Process Using Neural Networks", *Journal of Computing in Civil Engineering*, 18: 341-349.
- [53] Özkaya, B., Demir, A. ve Bilgili, M.S., (2007). "Neural Network Prediction Model for the Methane Fraction in Biogaz from Field-Scale Landfill Bioreactors", *Enviromental Modelling Software*, 22: 815-822.
- [54] Özkaya, B., Şahinkaya, E., Nurmi, P., Kaksonen, A.H. ve Puhakka, J.A., (2008). "Biologically Fe^{+2} Oxidizing Fluidized Bed Reactor Performance and Controlling of Fe^{+3} Recycle During Heap Bioleaching: An Artificial Neural Network- Based Model", *Bioproc. Biosyst. Eng.*, 31: 111-117.
- [55] Akkoyunlu, A., Yetilmezsoy, K., Erturk, F. ve Öztemel, E., (2010). "A Neural Network- Based Approach for the Prediction of Urban SO_2 Concentrations in the İstanbul Metropolitan Area", *International J. Enviromental Pol.*, 40: 301-321.
- [56] Yetilmezsoy, K., (2006). "Determination of Optimum Body Diameter of Air Cyclones Using a New Empirical Model and a Neural Network Approach", *Environ. Eng. Sci.*, 28: 680-690.
- [57] Agirre Basurko, E., Ibarra- Berastegi, G. ve Madariaga, I., (2006). "Regression and Multilayer Perceptron- Based Models to Forecast Hourly O_3 and NO_2 Levels in the Bilboa Area", *Environ. Model. Soft.*, 21: 430-446.7
- [58] Noori, R., Hoshyaripour, G., Ashrafi, K. ve Araabi, B. N., (2010). "Uncertainty Analysis of Developed ANN and ANFIS Models in Prediction of Carbon Monoxide Daily Concentrations", *Atmos. Environ.*, 44: 476-482.
- [59] Zadeh, L.A., (1965). "Fuzzy sets. Inf. Control", 8: 338-353.
- [60] Mamdani, E.H. ve Assilian, S., (1975). "An experiment in Linguistic Synthesis of Fuzzy Controllers", *Int. J. Man-Mach. Stud.*, 7: 1-13.

- [61] Özger, M. ve Şen, Z., (2007). "Prediction of Wave Parameters by Using Fuzzy Logic Approach", Ocean Eng., 34: 460-469.
- [62] Güneş, M., (1997). "Klasik Mantığa Alternatif: Bulanık Mantık(Fuzzy Logic) ve İşletme Problemlerine Uygulaması", III. Ulusal Ekonometri ve İstatistik Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 29-30 Mayıs.
- [63] Şen, Z., (2007). "Mühendislikte Bulanık Mantık ve Modelleme Prensipleri", 191, Su Vakfı Yayınları, Türkiye.
- [64] Ülkü, A.B, (2006). Anaerobik Arıtma Sisteminin Modellenmesi ve Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Gebze İleri teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- [65] Türkdoğan Aydınol, F.İ. ve Yetilmezsoy, K., (2010). "A Fuzzy- Logic- Based Model to Predict Biogas and Methane Production Rates in a Pilot- Scale Mesophilic UASB Reactor Treating Molasses Wastewater", Journal of Hazardous Materials, 182: 460-471.
- [66] Lahav, O. ve Loewenthal, R.E., (2000). "Rapid communication Measurement of VFA in Anaerobic Digestion: The Five- Point Titration Method Revisited", Water SA, 26: 389- 393.
- [67] Florencio, L., Field, A. ve Lettinga, G., (1997). "High- Rate Anaerobic Treatment Of Alcoholic Wastewaters", Brazilian Journal of Chemical Engineering, 14(4): 409- 416.
- [68] Özger, M. ve Şen, Z., (2007). "Prediction of wave parameters by using fuzzy logic approach", Ocean Eng., 34:460-469.
- [69] Akkoyunlu, A., Yetilmezsoy, K., Ertürk, F. ve Öztemel, E., (2010). "A neural Network- Based Approach for the Prediction of Urban SO₂ Concentrations in İstanbul Metropolitan Area", Int. J. Enviroment and Pollution, 40: 4.
- [70] Mohamad Saleh, J. ve Hoyle, B.S., (2008). "Improved Neural Network Performance Using Principal Component Analysis on Matlab", Int., J. The Computer, The İnternet and Management, 16: 1-8.
- [71] Hagan, M.T., Demuth, H.B. ve Beale, M.H., (1996). "Neural Network Design", PWS Publishing Company, Boston, MA.
- [72] Ma, Z., Zhou, C., Lu, L., Ma, Y., Sun, P. ve Cui, Y., (2007). "Predicting Protein-Protein İnteractions Based on BP Neural Network", İnternational Conference on Bioinformatics and Biomedicine Workshops, (BIBMW), California, USA, 3-7.

- [73] Cai, M., Yin, Y. ve Xie, M., (2009). "Prediction of Hourly Air Pollutant Concentrations Near Urban Arterials Using Artificial Neural Network Approach", *Transport. Res. Part D*, 14: 32-41.
- [74] Liu, Z. ve Meng, X., (2009). "Integration of Improved BPNN Algorithm and Multistage Dynamic Fuzzy Judgement and its Application ESMP Evaluation", *J. Computers*, 4: 69-76.
- [75] Yetilmezsoy, K. ve Saral, A. (2007). "Stochastic Modeling Approaches Based on Neural Network and Linear- Nonlinear Regression Techniques for the Determination of Single Droplet Collection Efficiency of Countercurrent Spray Towers", *Environ. Model. Assess*, 12: 13-26.
- [76] Almasri, M.N. ve Kaluarachchi, J.J., (2005). "Modular Neural Networks to Predict the Nitrate Distribution in Ground Water Using the Onground Nitrogen Loading and Recharge Data", *Environ. Model. Soft.*, 18: 388-398.
- [77] Yetilmezsoy, K. ve Demirel, S., (2007). "Artificial Neural Network (ANN) Approach for Modeling of Pb (II) Adsorption From Aqueous Solution by Antep Pistachio (Pistacia Vera L.) Shells", *Science Direct*, 153: 1288- 1300.
- [78] Biswas, J., Chowdhury, R. ve Bhattacharya, P., (2007). "Mathematical Modeling for the Prediction of Biogas Generation Characteristics of an Anaerobic Digester Based on Food/Vegetable Residues", *Biomass Bioener.*, 31:80-86.
- [79] Yetilmezsoy, K. (2011). "Fuzzy-logic modeling of Fenton's oxidation of anaerobically pretreated poultry manure wastewater", *Environmental Science and Pollution Research*, DOI 10.1007/s11356-011-0726-7.
- [80] Narnoli, S.K. ve Mehrotra, I., (1997). "Sludge Blanket of UASB Reactor: Mathematical Simulation", *Water Res.*, 31(4): 715-726.
- [81] Costello, D.J., Greenfield, P.F. ve Lee, P.L., (1991). "Dynamic Modeling of A Singlestage High-Rate Anaerobic Reactor, I. Model derivation", *Water Res.*, 25(7): 847-858.
- [82] Çakmakçı, M., (2007). "Adaptive Neuro-Fuzzy Modelling of Anaerobic Digestion of Primary Sedimentation Sludge", *Bioproc. Biosys. Eng.*, 30: 349-357.
- [83] Zhang, B., Zhao, H., Zhou, S., Shi, C., Wanga, C. ve Ni, J., (2009). "A Novel UASB–Mfc–Baf Integrated System for High Strength Molasses Wastewater Treatment and Bioelectricity Generation", *Bioresour. Technol.*, 100: 5687-5693.

- [84] Bıykoğlu, A., Akçayol, M.A., Özdemir, V. ve Sivrioğlu, M., (2005). "Temperature Prediction in A Coal Fired Boiler With A Fixed Bed By Fuzzy Logic Based on Numerical Solution", Energy Conver. Manag., 46: 151-166.
- [85] Murnleitner, E., Becker, T.M. ve Delgado, A., (2002). "State Detection And Control of Overloads in the Anaerobic Wastewater treatment Using Fuzzy Logic", Water Res., 36: 201-211.
- [86] Metternicht, G. ve Gonzalez, S., (2005). "FUERO: Foundations of a Fuzzy exploratory Model for Soil Erosion Hazard Prediction", Environ. Model. Soft., 20: 715-728.

**TAM ÖLÇEKLİ ANAEROBİK ÇAMUR ÇÜRÜTME PROSESİNDEN ELDE EDİLEN
DENEYSEL VE ÖLÇÜM VERİLERİ**

VERİ NUMARASI	BESLENEN ÇAMUR DEBİSİ	BESLENEN ÇAMURUNUN ÖZELLİKLERİ (KARIŞIK ÇAMUR (PRİMER+AKTİF))				ÜRETİLEN BİYOĞAZ DEBİSİ
		TKM	TUKM	ALKALİNİTE	UÇUCU	
					YAĞ ASİTİ	
	<i>m³/gün</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>mg CaCO₃/l</i>	<i>mg/l</i>	<i>Nm³/gün</i>
1	240	46,26	33,15	787,00	244,36	2113
2	120	44,77	22,02	983,00	413,54	1754
3	200	44,45	22,61	740,00	378,60	1884
4	160	44,31	26,64	761,00	353,66	1768
5	200	50,58	23,23	748,00	343,96	1715
6	140	47,96	23,35	759,00	311,76	1387
7	240	50,12	24,83	790,00	309,85	1757
8	200	49,93	24,30	734,00	331,69	1863
9	120	50,18	23,50	808,00	337,63	1516
10	160	55,09	22,08	918,00	501,60	1562
11	140	42,91	20,03	914,00	512,35	1309
12	110	40,41	19,60	850,00	311,41	1183
13	70	50,00	13,46	892,00	463,80	608
14	80	43,58	16,01	1317,00	516,42	962
15	100	87,22	29,07	1408,00	421,51	1140
16	80	59,63	27,02	1386,00	764,35	1271
17	100	38,79	15,43	1491,00	697,46	1248
18	170	45,44	23,08	818,00	163,65	1696
19	220	58,74	29,15	1481,00	325,07	2217
20	250	65,85	31,08	1423,00	297,12	2649
21	160	46,99	21,73	1593,00	478,41	1998
22	170	56,29	27,31	1454,00	831,08	1599
23	330	50,69	24,87	1450,00	676,35	2009

24	340	43,10	16,41	1910,00	495,66	2902
25	370	58,28	28,30	1195,56	695,23	3686
26	310	57,94	27,64	1189,00	547,95	3368
27	329	60,18	29,92	1193,00	558,21	3039
28	400	48,06	24,30	1308,00	230,66	2090
29	420	37,87	17,31	1343,00	449,15	4488
30	520	57,44	23,80	3061,11	1835,34	4429
31	550	57,14	26,90	1044,00	646,19	4402
32	550	49,41	24,43	1041,00	609,60	4558
33	570	46,63	22,70	1117,00	610,18	4828
34	590	48,44	23,53	931,00	492,92	5367
35	610	39,75	19,69	1104,00	645,12	5217
36	610	39,01	19,49	1025,00	529,16	4242
37	690	46,26	23,33	1100,00	718,63	5478
38	690	43,62	21,86	815,56	415,10	5094
39	740	38,25	19,49	810,00	427,11	4995
40	640	54,66	25,62	847,00	356,25	4371
41	640	52,53	24,93	883,33	469,30	4895
42	650	46,71	22,72	822,00	465,49	4613
43	660	53,35	26,67	819,00	373,73	4480
44	660	26,21	12,25	765,00	245,72	4049
45	660	47,51	23,35	1047,78	552,56	5143
46	690	53,02	26,01	1143,33	514,57	5812
47	690	59,98	30,73	1281,25	867,99	7112
48	690	50,84	25,05	1237,50	729,50	7132
49	690	35,42	14,84	1171,25	546,42	6839
50	740	54,06	25,85	891,00	521,65	7546
51	770	50,00	22,02	996,00	504,68	7006
52	800	52,51	24,48	802,00	372,15	6392
53	850	49,36	23,02	954,00	486,25	5243
54	850	41,69	18,52	1013,00	479,99	6735
55	900	67,70	30,68	1301,00	785,34	6300
56	960	61,50	28,06	988,00	644,39	6752
57	980	58,97	27,88	1113,00	628,81	6254
58	1030	24,26	10,37	1051,00	619,49	5464
59	1070	39,93	15,73	1218,00	603,95	5769
60	1180	31,77	14,42	887,00	408,95	5247
61	1170	38,43	18,10	880,00	446,15	5380
62	720	43,33	20,81	857,00	268,95	5294
63	560	32,55	15,98	790,00	162,75	4823
64	440	46,32	22,09	1219,00	514,58	3698
65	480	46,34	23,26	1293,00	601,96	3724
66	440	21,57	9,13	1118,00	620,62	3757

67	540	55,54	26,83	965,00	354,23	4660
68	280	48,44	20,38	1160,00	463,05	3353
69	700	36,29	16,96	873,00	233,81	4519
70	720	59,70	26,39	1060,00	448,20	5217
71	720	59,55	27,21	1047,00	430,61	4583
72	720	48,27	21,50	1035,00	412,96	4207
73	720	13,09	4,17	654,00	215,78	4334
74	720	45,37	19,73	1133,00	469,97	4814
75	720	65,42	30,61	1283,00	529,03	4019
76	800	17,77	6,58	591,00	119,84	3686
77	880	14,24	4,92	1025,00	187,67	3035
78	640	16,84	6,14	985,00	444,94	2277
79	360	46,95	13,29	1618,00	876,14	2510
80	800	58,41	25,16	1191,11	464,93	3941
81	880	59,84	27,20	1319,00	534,69	6224
82	960	37,66	16,38	694,79	82,69	4642
83	1040	38,00	16,61	1307,00	527,55	7838
84	1120	38,44	18,03	905,00	223,96	5875
85	1200	30,05	13,09	809,00	140,56	5324
86	1280	30,62	15,22	801,00	138,43	5232
87	1360	130,08	49,29	583,00	104,58	4823
88	1440	17,18	7,59	576,00	78,74	4778
89	1450	33,09	15,60	985,00	634,07	4773
90	1600	32,52	14,91	813,00	339,95	5739
91	1070	16,61	6,85	560,00	253,09	3694
92	1600	15,82	6,26	663,00	141,68	6143
93	1380	37,47	18,15	815,00	197,98	7205
94	1600	48,11	22,54	2968,75	1277,91	9231
95	1600	34,70	17,51	653,26	357,33	10411
96	1600	55,94	26,67	586,00	314,53	10262
97	1600	29,52	11,41	637,00	335,03	9122
98	1440	36,90	17,73	822,00	242,21	8869
99	1440	34,77	16,17	782,29	225,06	8579
100	1120	41,05	18,96	733,33	207,10	8439
101	970	72,50	34,46	1094,00	333,15	8576
102	1200	55,82	26,15	992,00	418,24	7328
103	1200	54,22	24,52	922,22	355,99	8099
104	1200	53,23	24,82	890,00	334,63	8153
105	1200	28,35	12,93	603,00	226,80	7277
106	1200	28,35	12,93	603,00	226,80	6890
107	1170	31,94	12,76	744,44	314,41	6158
108	1200	36,62	17,19	814,00	237,45	5615
109	1060	57,84	28,89	1263,33	580,15	6400

110	1080	50,36	24,65	1130,00	541,08	6830
111	1080	49,28	25,68	710,53	183,54	7641
112	890	39,25	19,65	758,00	293,43	5731
113	1080	48,15	24,70	861,00	258,19	5663
114	1080	22,98	13,99	854,00	261,25	5732
115	400	50,81	26,21	1109,78	323,50	4914
116	400	53,23	26,54	1211,11	536,66	4294
117	260	52,63	26,52	1329,17	826,18	2915
118	540	51,32	24,80	1286,00	699,58	5144
119	470	31,55	13,93	1061,00	353,57	5639
120	500	57,88	29,16	1035,00	420,84	841
121	370	56,02	27,29	1185,00	508,79	3821
122	560	43,92	20,59	1160,00	294,94	4118
123	560	60,56	30,73	1167,00	336,53	4977
124	560	68,68	31,99	1208,70	488,72	5434
125	560	52,46	26,57	1112,00	502,78	5601
126	380	54,34	36,04	1101,00	372,12	4983
127	600	41,05	24,34	1169,00	425,72	5194
128	600	79,74	16,99	1157,00	405,45	4260
129	600	49,31	23,13	1252,08	321,99	4360
130	590	54,55	28,83	1077,00	321,06	3764
131	450	30,73	11,52	819,00	189,86	4576
132	450	42,42	23,32	994,90	238,04	4576
133	600	56,12	29,42	930,00	217,17	4616
134	70	49,57	27,55	913,00	312,78	4560
135	240	19,11	9,70	655,00	118,53	1480
136	260	40,94	20,75	882,00	188,60	1190
137	280	47,20	20,57	970,00	283,00	1951
138	240	39,22	14,36	1022,00	295,56	1720
139	390	38,42	17,34	483,00	176,41	1629
140	460	26,57	11,75	472,00	174,46	1876
141	560	64,00	28,00	630,00	474,69	3352
142	610	51,43	23,74	612,00	207,86	3643
143	710	39,26	16,08	637,00	332,41	4800
144	770	50,92	22,95	769,79	329,81	3995
145	430	58,59	24,96	602,00	226,86	4175
146	820	37,63	12,04	668,00	220,17	3781
147	890	26,92	12,44	610,00	231,63	2902
148	840	41,32	20,14	657,61	271,41	3362
149	720	32,18	15,34	648,00	218,78	4194
150	700	40,98	21,65	589,00	246,05	4726
151	780	40,50	19,51	570,00	226,21	4807
152	800	40,88	19,15	541,00	243,76	4067

153	800	24,37	11,70	654,00	260,44	4228
154	780	39,03	19,47	651,00	268,50	3323
155	460	25,86	7,77	914,00	231,29	3209
156	760	38,93	16,20	804,00	235,44	3769
157	800	38,80	19,11	531,00	268,01	4413
158	800	35,33	15,55	947,00	302,80	5089
159	1000	48,04	23,25	920,00	309,72	6729
160	700	29,83	14,45	745,00	260,08	6434
161	800	48,92	23,30	957,78	511,41	6797
162	800	40,86	20,72	986,73	479,78	6817
163	700	23,69	9,91	1001,00	244,32	4213
164	890	35,31	19,15	657,14	154,31	5320
165	770	63,00	30,24	1211,00	641,16	6124
166	890	54,19	26,26	1014,00	427,39	6779
167	900	52,31	23,71	889,80	448,23	6164
168	510	43,00	20,32	1346,00	204,68	4276
169	520	18,25	6,97	542,00	396,05	2688
170	650	40,42	18,83	706,00	301,89	3962
171	360	49,14	25,47	582,00	432,99	2953
172	500	45,52	16,90	658,00	467,71	3844
173	540	36,04	14,54	1423,00	318,14	4410
174	360	29,00	15,38	825,00	257,78	3940
175	350	51,26	22,66	1273,00	506,00	2559
176	460	46,37	23,32	535,00	299,29	4521
177	920	36,75	18,11	1136,00	685,18	5845
178	890	49,24	24,89	1132,00	399,11	7523
179	990	45,04	23,73	1278,00	279,79	8043
180	1030	34,01	16,90	1110,00	329,54	7851
181	1050	38,28	20,15	1137,00	293,73	7226
182	960	23,56	12,71	549,00	222,25	6111
183	700	29,58	16,61	741,00	273,47	5598
184	740	37,90	19,95	823,00	292,06	6244
185	900	38,37	21,22	992,00	546,95	7021
186	800	42,52	21,06	1087,00	275,79	7327
187	900	35,11	19,55	840,00	291,01	7391
188	750	64,46	33,48	936,00	521,51	5780
189	920	52,91	25,62	555,00	311,19	6207
190	720	34,71	18,49	469,00	235,06	3909
191	720	21,86	11,48	648,00	221,40	3850
192	480	20,49	11,22	682,00	179,91	3907
193	390	12,27	6,78	452,00	136,29	3022
194	480	14,31	7,29	535,00	299,29	2312
195	300	13,24	6,23	780,00	418,16	2252

196	400	48,91	21,29	692,00	276,48	2004
197	240	23,48	12,61	971,00	248,79	1952
198	1160	55,28	27,87	980,00	529,30	8919
199	1200	46,02	10,28	811,67	511,65	10555
200	1240	31,57	12,18	879,31	545,83	13310
201	1160	62,37	20,66	1066,07	462,83	13775
202	1320	79,08	36,85	1090,74	569,37	16213
203	1320	82,62	40,03	1114,29	436,41	16844
204	1440	83,38	41,46	775,00	467,77	19272
205	1520	71,44	33,70	794,00	493,48	21393
206	1600	54,51	26,43	882,14	436,64	19450
207	1600	61,93	23,85	776,67	456,90	20842
208	430	66,73	34,73	880,36	577,47	14832
209	1200	56,17	29,79	1022,00	526,72	12512
210	1440	79,92	37,95	990,00	533,94	18043
211	1240	71,46	33,54	901,85	493,45	17211
212	1520	68,92	32,20	1016,00	490,31	18454
213	1320	92,42	38,94	925,00	458,53	18861
214	1300	69,98	32,39	1128,00	514,93	19244
215	1240	70,92	31,47	986,00	528,93	17909
216	1200	55,57	27,53	946,00	499,88	15558
217	1140	51,49	24,77	996,00	591,36	15930
218	160	73,00	28,11	936,00	484,73	10691
219	680	57,29	24,39	934,00	584,67	7591
220	870	77,73	32,73	916,00	575,27	10333
221	1170	69,55	29,38	960,00	609,34	12398
222	1130	73,77	35,08	1000,00	469,07	14079
223	1080	74,10	32,00	1024,00	537,10	12387
224	1080	110,34	33,86	1048,33	422,65	14463
225	1080	86,28	38,31	1096,43	475,04	16990
226	980	105,66	41,77	876,79	394,75	11945
227	1030	94,55	42,35	992,59	405,17	15853
228	1140	54,28	18,96	1092,00	543,42	14286
229	1190	40,89	19,30	1057,41	425,49	12936
230	400	54,50	18,25	1196,00	458,21	10451
231	210	46,77	22,07	1054,00	361,88	6929
232	360	84,33	36,39	1128,85	430,82	4815
233	480	51,89	21,44	1066,07	425,31	6595
234	720	50,30	18,37	1194,44	441,38	8930
235	720	47,89	17,08	1016,07	414,32	8111
236	600	59,00	28,03	1096,30	447,42	4706
237	620	48,77	22,28	1080,77	448,94	4555
238	720	49,66	23,83	1150,00	445,28	6951

239	720	43,64	21,35	841,07	379,18	7005
240	180	26,78	12,50	830,00	379,18	3457
241	540	47,33	19,38	1086,67	415,91	5114
242	420	45,21	16,99	965,00	489,07	6258
243	1000	51,88	24,95	993,33	417,28	5629
244	910	55,59	26,55	963,33	384,10	8235
245	1440	63,84	28,16	1120,00	357,82	11057
246	1380	64,24	26,48	1779,00	304,09	10998
247	1440	60,21	22,69	1992,00	214,79	12184
248	1440	58,53	19,59	1214,00	580,56	10696
249	1440	55,51	22,78	1029,00	313,51	10333
250	1440	54,85	23,29	1056,00	435,31	10347
251	600	72,88	27,49	1113,00	728,63	7497
252	450	68,15	27,30	1088,00	533,16	6515
253	600	72,95	28,64	980,00	602,85	5329
254	450	61,96	25,86	737,00	349,89	5854
255	450	64,10	27,10	1079,00	394,49	5054
256	455	81,32	33,63	896,00	337,47	5074
257	450	79,27	34,60	1613,00	240,76	4717
258	390	58,87	27,28	895,00	329,65	2500
259	500	47,01	19,09	933,00	445,51	2683
260	560	52,42	21,93	732,00	237,24	3067
261	320	59,00	27,28	1180,00	572,15	4310
262	700	84,56	52,78	802,00	98,97	4078
263	580	47,94	22,32	1098,00	296,13	3795
264	575	41,64	19,31	758,00	154,21	2881
265	680	64,58	31,05	1118,00	460,39	4047
266	700	61,46	28,19	1021,00	511,02	3770
267	750	72,07	36,26	903,00	407,96	4624
268	400	69,16	31,74	1024,00	432,03	3942
269	580	67,83	29,90	1677,00	278,85	4299
270	400	64,22	29,82	1208,00	764,80	3914
271	100	84,70	38,74	1180,00	572,15	1695
272	360	40,68	20,01	1118,00	460,39	3191
273	420	61,06	27,47	903,00	407,96	3517
274	450	38,52	16,12	1677,00	278,85	3644
275	450	47,31	22,44	1208,00	764,80	3683
276	660	62,48	30,50	1103,00	750,30	5253
277	690	50,13	24,73	1188,00	655,71	5538
278	660	61,49	30,45	841,00	204,26	5401
279	1210	70,77	30,87	510,00	295,58	4963
280	1350	78,50	22,55	688,00	473,74	5180
281	1350	55,99	26,53	917,00	493,78	11433

282	1200	33,75	16,51	909,00	504,78	13015
283	1080	61,19	28,77	805,00	387,73	8477
284	1510	54,30	25,82	684,00	287,48	12051
285	1380	54,19	26,52	780,00	431,30	11584
286	1010	57,84	28,19	1350,00	933,80	12793
287	1360	59,37	25,70	1331,67	930,56	10774
288	1680	35,15	15,33	398,00	58,18	8705
289	405	21,70	8,66	533,00	131,30	8224
290	1250	37,15	19,94	389,00	50,86	4607
291	820	59,90	27,25	1103,00	695,10	6354
292	1640	43,51	21,93	492,11	279,95	7119
293	1600	60,51	28,49	892,86	389,07	7670
294	1400	58,32	28,85	721,00	232,67	9344
295	1160	61,43	29,83	802,00	385,29	6070
296	1240	58,84	27,37	914,00	525,49	9169
297	1320	47,53	11,28	1012,00	687,57	8722
298	1440	43,85	22,57	718,00	361,57	7900
299	1520	43,40	22,66	705,00	307,20	7931
300	920	59,15	33,29	376,00	138,34	4337
301	1340	62,61	31,36	694,00	399,82	8686
302	1620	56,32	29,02	773,00	368,69	10024
303	1680	50,19	26,69	907,00	507,53	12093
304	1620	57,49	30,80	521,00	294,90	10767
305	1040	43,17	21,60	942,00	345,14	9590
306	1460	55,35	29,82	852,00	355,94	8305
307	1760	51,47	26,90	749,00	249,33	10215
308	1960	38,92	21,28	399,00	92,27	12172
309	2200	45,82	22,69	599,00	145,62	13213
310	2200	58,13	28,45	860,29	288,99	12864
311	2220	42,42	20,82	746,25	293,50	12297
312	980	67,95	33,19	1025,71	681,09	10163
313	400	49,68	25,28	815,00	322,10	6267
314	1320	36,79	19,42	647,37	94,11	5873
315	500	48,71	22,83	452,22	60,97	4822
316	600	39,02	20,25	426,04	85,57	4120
317	1450	62,84	25,86	623,26	211,51	5206
318	1360	57,12	25,18	604,44	238,39	8967
319	1310	49,40	21,72	513,04	186,09	6872
320	1570	51,00	24,57	531,11	175,78	9524
321	1420	55,95	26,71	514,44	173,88	8541
322	1240	48,14	22,72	464,89	100,06	5377
323	1810	67,19	31,05	852,33	560,87	7499
324	1920	42,69	20,26	530,61	159,43	9985

325	1960	48,52	23,47	480,43	142,42	10283
326	800	42,01	22,96	855,56	605,27	6629
327	1085	53,90	28,70	753,33	360,56	9263
328	1114	49,93	24,27	857,61	259,09	7765
329	600	50,10	22,53	631,52	153,09	3914
330	560	50,72	27,77	333,33	35,77	4528
331	1070	47,27	22,80	546,74	195,44	7186
332	1410	54,41	28,16	629,07	189,77	7815
333	1020	67,89	34,03	398,61	48,95	8143
334	1270	49,94	25,21	675,58	287,70	7184
335	1130	49,04	25,15	761,63	511,48	7310
336	840	57,44	29,61	776,19	449,42	7311
337	1170	44,19	21,43	732,61	412,40	8566
338	1040	54,28	26,32	2201,22	797,23	9131
339	1610	65,92	37,24	1070,00	716,83	9985
340	1480	46,46	24,97	704,65	120,97	13858
341	1790	62,72	33,78	1574,39	1226,66	12406
342	970	70,56	33,77	1045,00	803,74	11424
343	1150	58,26	36,15	1065,38	832,12	10833
344	1440	35,35	11,31	1017,05	798,90	12400
345	1210	49,69	25,77	743,48	457,42	11046
346	1470	79,14	26,29	1126,92	858,64	10157
347	1150	92,84	67,51	954,65	743,94	10377
348	1530	47,49	25,96	839,58	459,59	12132
349	1430	54,15	32,61	521,25	166,17	12363
350	1240	60,05	33,65	934,09	678,64	14389
351	1830	68,63	37,50	1227,38	731,21	11112
352	1270	33,97	19,17	446,00	65,73	9362
353	920	59,25	33,32	538,46	174,20	8697
354	1320	58,06	30,91	965,91	763,24	11115
355	900	45,59	24,01	378,89	150,13	8002
356	960	44,13	23,96	540,00	64,32	8351
357	1080	36,52	19,21	487,00	147,26	8257
358	1120	68,92	34,53	1045,45	594,17	6897
359	1010	44,86	24,51	461,22	85,97	9276
360	1280	43,12	18,91	2931,91	316,96	18387
361	1070	56,64	30,42	613,64	167,05	11951
362	1270	49,59	24,05	1619,15	207,80	9840
363	1270	71,51	25,49	1613,75	653,78	11900
364	870	40,19	16,99	1076,25	450,48	9715
365	800	46,17	26,58	571,74	99,67	8100
366	820	43,22	27,71	593,75	109,17	7428
367	1010	62,35	31,13	1578,05	223,76	13364

368	310	82,97	39,52	961,45	697,49	8990
369	905	55,91	27,26	691,30	306,45	10658
370	810	47,89	24,06	633,71	175,03	9141
371	720	53,93	32,63	829,55	449,26	11281
372	1090	66,80	38,94	946,51	503,14	14776
373	1110	47,92	32,26	910,47	499,25	12201
374	550	40,52	21,33	340,63	60,73	11315
375	1210	34,48	25,29	455,21	67,35	9600
376	780	45,28	23,68	364,58	78,41	7912
377	770	43,96	26,35	425,00	71,59	8423
378	1060	62,04	32,81	1117,39	794,14	9830
379	795	58,02	29,37	844,90	453,68	7232
380	1180	67,77	34,72	1290,43	563,39	10675
381	1150	72,89	35,04	915,71	425,19	10157
382	1410	49,91	25,83	613,33	217,41	11655
383	860	49,59	22,54	550,00	218,39	9743
384	810	45,11	22,81	443,00	142,09	13845
385	910	54,37	25,04	676,60	84,22	8493
386	920	46,29	23,80	354,00	84,53	9534
387	1140	79,85	38,33	959,72	269,77	11226
388	1130	74,00	35,52	226,00	179,10	7078
389	1030	45,01	21,61	892,50	110,47	8974
390	910	46,88	22,50	308,33	162,40	6132
391	940	38,19	18,33	277,17	109,25	5562
392	810	71,55	34,34	430,00	63,43	5870
393	1100	99,82	47,91	410,00	48,98	5207
394	1110	86,02	41,29	1088,30	380,23	7551

GİRİDİ VE ÇIKTI DEĞİŞKENLERİ İÇİN TRAPEZ FONKSİYONU KURAL TABANI

VERİ NUMARASI	BESLENEN ÇAMUR DEBİSİ	KARIŞIK ÇAMUR (PRİMER+AKTİF) (BESLENEN ÇAMURUN ÖZELLİKLERİ)				ÜRETİLEN BİOGAZ DEBİSİ
		TKM	TUKM	ALKALİNİTE	UÇUCU	
					YAĞ ASİTİ	
	m³/gün	%o	%o	mg CaCO₃/l	mg/l	Nm³/gün
1	A	C	E	B	B	B
2	A	C	C	C	C	B
3	A	C	C	B	B	B
4	A	C	D	B	B	B
5	A	D	C	B	B	B
6	A	C	C	B	B	A
7	A	D	D	B	B	B
8	A	D	D	B	B	B
9	A	D	C	B	B	A
10	A	D	C	C	C	A
11	A	C	C	C	C	A
12	A	C	C	C	B	A
13	A	D	B	C	C	A
14	A	C	B	D	C	A
15	A	G	D	D	C	A
16	A	D	D	D	E	A
17	A	C	B	E	D	A
18	A	C	C	B	A	B
19	A	D	D	E	B	B
20	A,B	E	E	D	B	B
21	A	C	C	E	C	B
22	A	D	D	E	E	B
23	B	D	D	E	D	B
24	B	C	B	F	C	C
25	B	D	D	D	D	C

26	B	D	D	D	C	C
27	B	D	D	D	C	C
28	B	C	D	D	B	B
29	B	C	C	D	C	D
30	B	D	D	J	J	D
31	C	D	D	C	D	D
32	C	D	D	C	D	D
33	C	C	C	C	D	E
34	C	D	C	C	C	E
35	C	C	C	C	D	E
36	C	C	C	C	C	D
37	C	C	C	C	D	E
38	C	C	C	B	C	E
39	C	C	C	B	C	E
40	C	D	D	C	B	D
41	C	D	D	C	C	E
42	C	C	C	B	C	D
43	C	D	D	B	B	D
44	C	B	B	B	B	D
45	C	C	C	C	C	E
46	C	D	D	D	C	E
47	C	D	E	D	E	G
48	C	D	D	D	D	G
49	C	B	B	D	C	F
50	C	D	D	C	C	G
51	D	D	C	C	C	G
52	D	D	D	B	B	F
53	D	D	C	C	C	E
54	D	C	C	C	C	F
55	D	E	E	D	E	F
56	E	E	D	C	D	F
57	E	D	D	C	D	F
58	E	B	B	C	D	E
59	E	C	B	D	D	E
60	F	B	B	C	C	E
61	F	C	C	C	C	E
62	C	C	C	C	B	E
63	C	B	B	B	A	E
64	B	C	C	D	C	C
65	B	C	C	D	D	C
66	B	A	A	C	D	C
67	C	D	D	C	B	D
68	B	D	C	D	C	C

69	C	C	B	C	B	D
70	C	D	D	C	C	E
71	C	D	D	C	C	D
72	C	C, D	C	C	C	D
73	C	A	A	B	B	D
74	C	C	C	D	C	E
75	C	E	E	D	C	D
76	D	A	A	B	A	C
77	D	A	A	C	A	C
78	C	A	A	C	C	B
79	B	C	B	E	E	B
80	D	D	D	D	C	D
81	D	D	D	D	C	F
82	E	C	B	C	A	D
83	E	C	B	D	C	G
84	E	C	C	C	B	F
85	F	B	B	B	A	E
86	F	B	B	B	A	E
87	F	J	G	B	A	E
88	G	A	A	B	A	D
89	G	B	B	C	D	D
90	G, H	B	B	B	B	E
91	E	A	A	B	B	C
92	G, H	A	A	B	A	F
93	G	C	C	B	A	G
94	G, H	C	C	J	G	I
95	G, H	B	C	B	B	J
96	G, H	D	D	B	B	J
97	G, H	B	B	B	B	I
98	G	C	C	B	B	H
99	G	B	B	B	B	H
100	E	C	C	B	B	H
101	E	F	E	C	B	H
102	F	D	D	C	C	G
103	F	D	D	C	B	H
104	F	D	D	C	B	H
105	F	B	B	B	B	G
106	F	B	B	B	B	F
107	F	B	B	B	B	F
108	F	C	C	B	B	E
109	E	D	D	D	D	F
110	E	D	D	C	C	F
111	E	D	D	B	A	G

112	D	C	C	B	B	E
113	E	C	D	C	B	E
114	E	A	B	C	B	E
115	B	D	D	C	B	E
116	B	D	D	D	C	D
117	B	D	D	D	E	C
118	C	D	D	D	D	E
119	B	B	B	C	B	E
120	B	D	D	C	C	A
121	B	D	D	D	C	D
122	C	C	C	D	B	D
123	C	E	E	D	B	E
124	C	E	E	D	C	E
125	C	D	D	C	C	E
126	B	D	E	C	B	E
127	C	C	D	D	C	E
128	C	F	B	D	C	D
129	C	D	C	D	B	D
130	C	D	D	C	B	D
131	B	B	B	B	A	D
132	B	C	C	C	B	D
133	C	D	D	C	B	D
134	A	D	D	C	B	D
135	A	A	A	B	A	A
136	B	C	C	C	A	A
137	B	C	C	C	B	B
138	A	C	B	C	B	B
139	B	C	C	A	A	B
140	B	B	B	A	A	B
141	C	E	D	B	C	C
142	C	D	D	B	B	C
143	C	C	B	B	B	D
144	D	D	C	B	B	D
145	B	D	D	B	B	D
146	D	C	B	B	B	D
147	D	B	B	B	B	C
148	D	C	C	B	B	C
149	C	B	B	B	B	D
150	C	C	C	B	B	D
151	D	C	C	B	B	D
152	D	C	C	B	B	D
153	D	B	B	B	B	D
154	D	C	C	B	B	C

155	B	B	A	C	B	C
156	D	C	B	B	B	D
157	D	C	C	B	B	D
158	D	B	B	C	B	E
159	E	C	C	C	B	F
160	C	B	B	B	B	F
161	D	D	C	C	C	F
162	D	C	C	C	C	F
163	C	B	A	C	B	D
164	D	B	C	B	A	E
165	D	E	E	D	D	F
166	D	D	D	C	C	F
167	D	D	D	C	C	F
168	B	C	C	D	B	D
169	B	A	A	B	C	C
170	C	C	C	B	B	D
171	B	D	D	B	C	C
172	B	C	B	B	C	D
173	C	B	B	D	B	D
174	B	B	B	B	B	D
175	B	D	C	D	C	B
176	B	C	C	B	B	D
177	D	C	C	D	D	E
178	D	D	D	D	C	G
179	E	C	D	D	B	H
180	E	B	B	C	B	G
181	E	C	C	D	B	G
182	E	B	B	B	B	F
183	C	B	B	B	B	E
184	C	C	C	B	B	F
185	D	C	C	C	C	G
186	D	C	C	C	B	G
187	D	B	C	C	B	G
188	C, D	E	E	C	C	E
189	D	D	D	B	B	F
190	C	B	C	A	B	D
191	C	A	B	B	B	D
192	B	A	B	B	A	D
193	B	A	A	A	A	C
194	B	A	A	B	B	B
195	B	A	A	B	C	B
196	B	D	C	B	B	B
197	A	B	B	C	B	B

198	F	D	D	C	C	H
199	F	C	B	B	C	J
200	F	B	B	C	C	M
201	F	E	C	C	C	M
202	F	F	F	C	C	O
203	F	F	F	C	C	P
204	G	F	F	B	C	S
205	G	E	E	B	C	U
206	G, H	D	D	C	C	S
207	G, H	E	D	B	C	U
208	B	E	E	C	D	N
209	F	D	D	C	C	L
210	G	F	F	C	C	R
211	F	E	E	C	C	P
212	G	E	E	C	C	R
213	F	G	F	C	C	S
214	F	E	E	D	C	S
215	F	E	E	C	C	R
216	F	D	D	C	C	O
217	E	D	D	C	D	O
218	A	F	D	C	C	J
219	C	D	D	C	D	G
220	D	F	E	C	C	J
221	F	E	D	C	D	L
222	E	F	E	C	C	M
223	E	F	E	C	C	L
224	E	I	E	C	C	N
225	E	G	F	C	C	P
226	E	H	F	C	B	K
227	E	G	F	C	C	O
228	E	D	C	C	C	N
229	F	C	C	C	C	L
230	B	D	C	D	C	J
231	A	C	C	C	B	G
232	B	G	E	D	C	E
233	B	D	C	C	C	F
234	C	D	C	D	C	H
235	C	C	B	C	C	H
236	C	D	D	C	C	D
237	C	D	C	C	C	D
238	C	D	D	D	C	G
239	C	C	C	C	B	G
240	A	B	B	C	B	C

241	C	C	C	C	C	E
242	B	C	B	C	C	F
243	E	D	D	C	C	E
244	D	D	D	C	B	H
245	G	E	D	C	B	J
246	G	E	D	F	B	J
247	G	D	C	F	B	L
248	G	D	C	D	D	J
249	G	D	C	C	B	J
250	G	D	C	C	C	J
251	C	F	D	C	D	G
252	B	E	D	C	C	F
253	C	F	D	C	D	E
254	B	E	D	B	B	E
255	B	E	D	C	B	E
256	B	F	E	C	B	E
257	B	F	E	E	B	D
258	B	D	D	C	B	B
259	B	C	C	C	C	B
260	C	D	C	B	B	C
261	B	D	D	D	C	D
262	C	G	H	B	A	D
263	C	C	C	C	B	D
264	C	C	C	B	A	C
265	C	E	E	C	C	D
266	C	E	D	C	C	D
267	C, D	E	E	C	C	D
268	B	E	E	C	C	D
269	C	E	D	E	B	D
270	B	E	D	D	E	D
271	A	F	F	D	C	B
272	B	C	C	C	C	C
273	B	E	D	C	C	C
274	B	C	B	E	B	C
275	B	C	C	D	E	C
276	C	E	E	C	D	E
277	C	D	D	D	D	E
278	C	E	E	C	B	E
279	F	E	E	B	B	E
280	F	F	C	B	C	E
281	F	D	D	C	C	K
282	F	B	B	C	C	L
283	E	E	D	B	B	H

284	G	D	D	B	B	K
285	G	D	D	B	C	K
286	E	D	D	D	E	L
287	F	D	D	D	E	J
288	H	B	B	A	A	H
289	B	A	A	B	A	H
290	F	C	C	A	A	D
291	D	D	D	C	D	F
292	H	C	C	A	B	G
293	G, H	E	D	C	B	G
294	G	D	D	B	B	I
295	F	E	D	B	B	F
296	F	D	D	C	C	I
297	F	C	B	C	D	H
298	G	C	C	B	B	G
299	G	C	C	B	B	G
300	D	D	E	A	A	D
301	F	E	E	B	C	H
302	H	D	D	B	B	I
303	H	D	D	C	C	K
304	H	D	E	B	B	J
305	E	C	C	C	B	I
306	G	D	D	C	B	H
307	H	D	D	B	B	J
308	I	C	C	A	A	L
309	J	C	C	B	A	M
310	J	D	D	C	B	L
311	J	C	C	B	B	L
312	E	E	E	C	D	J
313	B	D	D	B	B	F
314	F	C	C	B	A	F
315	B	D	C	A	A	E
316	C	C	C	A	A	D
317	G	E	D	B	B	E
318	F	D	D	B	B	H
319	F	D	C	B	A	F
320	G	D	D	B	A	I
321	G	D	D	B	A	H
322	F	C	C	A	A	E
323	H	E	E	C	C	G
324	I	C	C	B	A	I
325	I	D	C	A	A	J
326	D	C	C	C	D	F

327	E	D	D	B	B	I
328	E	D	D	C	B	G
329	C	D	C	B	A	D
330	C	D	D	A	A	D
331	E	C	C	B	A	G
332	G	D	D	B	A	G
333	E	E	E	A	A	H
334	F	D	D	B	B	G
335	E	D	D	B	C	G
336	D	D	D	B	C	G
337	F	C	C	B	C	H
338	E	D	D	G	E	I
339	H	E	F	C	D	I
340	G	C	D	B	A	M
341	H	E	E	E	G	L
342	E	E	E	C	E	K
343	E	D	E	C	E	J
344	G	B	B	C	E	L
345	F	D	D	B	C	J
346	G	F	D	D	E	J
347	E, F	G	J	C	D	J
348	G	C	D	C	C	K
349	G	D	E	B	A	L
350	F	D	E	C	D	N
351	H	E	F	D	D	K
352	F	B	C	A	A	I
353	D	D	E	B	A	H
354	F	D	E	C	E	K
355	D	C	D	A	A	H
356	E	C	D	B	A	H
357	E	C	C	A	A	H
358	E	E	E	C	D	F
359	E	C	D	A	A	I
360	F	C	C	J	B	R
361	E	D	E	B	A	K
362	F	D	D	E	B	I
363	F	E	D	E	D	K
364	D	C	B	C	C	I
365	D	C	D	B	A	H
366	D	C	D	B	A	G
367	E	E	E	E	B	M
368	B	F	F	C	D	H
369	D	D	D	B	B	J

370	D	C	D	B	A	I
371	C	D	E	C	C	K
372	E	E	F	C	C	N
373	E	C	E	C	C	L
374	C	C	C	A	A	K
375	E	B	D	A	A	I
376	D	C	D	A	A	G
377	D	C	D	A	A	H
378	E	E	E	C	E	I
379	D	D	D	C	C	G
380	F	E	E	D	C	J
381	E, F	F	E	C	C	J
382	G	D	D	B	B	K
383	D	D	C	B	B	I
384	D	C	C	A	A	M
385	D	D	D	B	A	H
386	D	C	D	A	A	I
387	E	F	F	C	B	K
388	E	F	E	A	A	G
389	E	C	C	C	A	H
390	D	C	C	A	A	F
391	D	C	C	A	A	E
392	D	E	E	A	A	F
393	E	H	G	A	A	E
394	E	G	F	C	B	G

**TAM ÖLÇEKLİ ANAEROBİK ÇAMUR ÇÜRÜTME PROSESİNDE ÜRETİLEN
BİYOGAZ DEBİSİ TAHMİN MODELLEMELERİN ÇALIŞMA SONUÇLARI**

VERİ NUMARASI	ÜRETİLEN BİYOGAZ DEBİSİ (ÖLÇÜLEN)	MODEL ÇALIŞMALARİ SONUÇLARI		
		YAPAY SİNİR AĞLARI	FUZZY LOGIC	ÇOKLU REGRESYON
		Nm ³ /gün	Nm ³ /gün	Nm ³ /gün
1	2113	2120,53	2430,00	3266,00
2	1754	1332,68	2480,00	2125,79
3	1884	1931,85	2040,00	2464,85
4	1768	1803,66	2130,00	2433,34
5	1715	2058,20	2160,00	2692,72
6	1387	1781,36	1990,00	2209,24
7	1757	2178,11	3200,00	2998,82
8	1863	2069,83	2310,00	2709,83
9	1516	1721,24	2270,00	2231,99
10	1562	1990,17	1070,00	2810,05
11	1309	1556,21	1620,00	2132,44
12	1183	1419,74	3210,00	1582,65
13	608	1870,84	1070,00	1521,97
14	962	660,86	1070,00	1785,18
15	1140	3096,97	1070,00	4209,79
16	1271	2823,95	1400,00	3312,80
17	1248	710,50	1070,00	1987,65
18	1696	2003,35	2430,00	2158,17
19	2217	2693,97	2130,00	3839,10
20	2649	3062,75	2130,00	4332,33
21	1998	1423,21	2130,00	2839,70
22	1599	3651,92	1760,00	3864,87

23	2009	3358,45	2540,00	4326,66
24	2902	4013,15	3230,00	3680,70
25	3686	4406,67	3280,00	4927,08
26	3368	3174,81	3730,00	4349,29
27	3039	3805,05	3920,00	4692,14
28	2090	3481,75	2850,00	4068,97
29	4488	2237,86	3770,00	3666,86
30	4429	6578,36	4280,00	7798,89
31	4402	5044,71	5360,00	5766,31
32	4558	4402,49	5180,00	5299,45
33	4828	4257,10	5170,00	5262,08
34	5367	4282,31	5010,00	5270,41
35	5217	4216,31	5330,00	5110,22
36	4242	4015,66	5020,00	4903,91
37	5478	5660,40	5400,00	6123,50
38	5094	4938,24	5080,00	5460,29
39	4995	5181,63	5230,00	5441,30
40	4371	4983,29	4370,00	5731,54
41	4895	4885,61	5250,00	5754,62
42	4613	4668,20	4970,00	5436,77
43	4480	5224,99	4470,00	5869,42
44	4049	4549,91	5020,00	3874,93
45	5143	5072,43	5140,00	5780,99
46	5812	5876,91	5670,00	6331,52
47	7112	7477,68	7430,00	7313,52
48	7132	5977,99	6030,00	6478,08
49	6839	4577,26	6790,00	5090,69
50	7546	6122,40	5700,00	6534,01
51	7006	6001,71	5970,00	6386,60
52	6392	6263,34	7480,00	6554,97
53	5243	6908,66	6560,00	6865,95
54	6735	6347,40	6930,00	6350,67
55	6300	8871,49	6380,00	8796,86
56	6752	9142,52	8450,00	8460,97
57	6254	9313,01	8890,00	8531,95
58	5464	6800,00	5330,00	6509,08
59	5769	8202,00	5880,00	7712,38
60	5247	7520,73	9920,00	7617,46
61	5380	8415,68	9110,00	8049,12
62	5294	5307,40	5330,00	5438,36
63	4823	4408,11	5020,00	3637,81

64	3698	2863,67	4210,00	4376,44
65	3724	3629,42	4050,00	4822,98
66	3757	1763,29	3230,00	2778,54
67	4660	4350,72	4260,00	5286,59
68	3353	1814,95	4220,00	3291,93
69	4519	4968,39	5100,00	4807,15
70	5217	6262,21	5400,00	6664,41
71	4583	6379,47	5300,00	6680,28
72	4207	5429,15	5290,00	5911,49
73	4334	4807,13	4130,00	3200,09
74	4814	5306,57	5390,00	5817,94
75	4019	7584,25	4830,00	7327,12
76	3686	5173,03	3230,00	3861,37
77	3035	4105,01	3230,00	4435,58
78	2277	3528,24	2130,00	3390,98
79	2510	2465,84	2130,00	4010,18
80	3941	7152,98	6160,00	7124,11
81	6224	8491,06	6030,00	7927,35
82	4642	5861,73	6920,00	6149,73
83	7838	8097,04	7220,00	7476,69
84	5875	7129,81	7390,00	7516,41
85	5324	6162,12	5520,00	7269,33
86	5232	6733,40	5500,00	7894,46
87	4823	8930,08	5330,00	13840,02
88	4778	5112,81	4280,00	7749,17
89	4773	9472,84	4280,00	9675,67
90	5739	8744,00	7780,00	10120,23
91	3694	5062,69	3230,00	5606,74
92	6143	5231,88	5330,00	8713,62
93	7205	8023,13	7040,00	8996,15
94	9231	7487,44	9530,00	13323,42
95	10411	9445,66	8400,00	10280,94
96	10262	11359,21	10600,00	11505,77
97	9122	8003,82	7780,00	9705,95
98	8869	8373,98	7740,00	9368,14
99	8579	7911,71	7900,00	9159,74
100	8439	6954,07	7560,00	7553,24
101	8576	10973,82	8480,00	9020,02
102	7328	10369,03	10060,00	9366,31
103	8099	9603,88	9390,00	9108,46
104	8153	9541,18	8380,00	9048,88

105	7277	6134,54	6390,00	7176,66
106	6890	6134,54	6390,00	7176,66
107	6158	6608,67	6690,00	7287,15
108	5615	7249,93	6200,00	7853,44
109	6400	10023,54	6380,00	9067,45
110	6830	9446,22	7830,00	8555,11
111	7641	8192,08	8300,00	7961,30
112	5731	6208,24	4220,00	6230,32
113	5663	8488,00	7210,00	8026,03
114	5732	5966,28	6330,00	6484,19
115	4914	3159,08	3540,00	4270,33
116	4294	3428,07	3790,00	4662,08
117	2915	3955,58	2280,00	4160,00
118	5144	4721,50	5490,00	5561,07
119	5639	2852,92	5300,00	3287,34
120	841	4411,91	4450,00	5372,81
121	3821	3324,59	3720,00	4580,50
122	4118	4098,58	4790,00	4666,11
123	4977	5566,30	4540,00	5910,10
124	5434	6119,35	4770,00	6466,44
125	5601	4605,94	5110,00	5520,59
126	4983	4311,51	5330,00	4892,63
127	5194	4450,73	5200,00	5166,34
128	4260	6585,81	4280,00	6132,08
129	4360	4853,63	4280,00	5334,01
130	3764	5329,51	4260,00	5696,89
131	4576	4266,24	4460,00	2687,63
132	4576	3351,37	2870,00	3946,06
133	4616	5563,14	4280,00	5657,36
134	4560	1372,26	3940,00	2169,76
135	1480	3479,17	4290,00	709,07
136	1190	2329,05	2830,00	2469,49
137	1951	2287,44	3490,00	2960,09
138	1720	2304,67	2480,00	2107,03
139	1629	3533,69	2840,00	2740,32
140	1876	4104,04	3360,00	2401,85
141	3352	4548,38	3230,00	5730,79
142	3643	4845,87	3840,00	5033,35
143	4800	4848,42	4640,00	4901,82
144	3995	5765,48	5960,00	6162,29
145	4175	3801,00	5000,00	4283,32

146	3781	5440,32	4110,00	5176,57
147	2902	5304,84	3750,00	5214,27
148	3362	5833,81	4100,00	5950,71
149	4194	4954,73	4970,00	4544,92
150	4726	5107,79	4930,00	5106,66
151	4807	5421,85	4470,00	5421,70
152	4067	5466,11	4390,00	5539,65
153	4228	4986,22	3750,00	4584,21
154	3323	5423,40	4200,00	5455,37
155	3209	4426,46	3440,00	2450,18
156	3769	5294,72	4530,00	5189,74
157	4413	5452,25	4180,00	5481,53
158	5089	5367,30	5720,00	5415,02
159	6729	7841,36	7120,00	7538,00
160	6434	4744,74	5070,00	4383,01
161	6797	6451,33	6580,00	6590,05
162	6817	6060,54	6730,00	6127,65
163	4213	4379,33	4280,00	4019,81
164	5320	5930,36	4750,00	5852,54
165	6124	7858,62	6270,00	7602,37
166	6779	7926,83	6890,00	7444,12
167	6164	7349,63	6620,00	7242,85
168	4276	4319,60	4280,00	4317,63
169	2688	3676,10	2860,00	2462,47
170	3962	4555,53	4950,00	4742,53
171	2953	3019,95	3880,00	3749,02
172	3844	3380,82	4660,00	4054,29
173	4410	3907,60	3900,00	4075,50
174	3940	2608,82	4760,00	2374,21
175	2559	2405,00	4670,00	4062,11
176	4521	3486,50	4190,00	3964,21
177	5845	7139,58	5760,00	6860,18
178	7523	7706,49	6620,00	7218,22
179	8043	8281,45	7970,00	7559,81
180	7851	6970,96	7430,00	6965,73
181	7226	7618,92	7430,00	7408,47
182	6111	5360,40	4860,00	5489,98
183	5598	4705,32	5070,00	4510,71
184	6244	5275,50	5040,00	5317,62
185	7021	7212,55	6690,00	6749,93
186	7327	6128,54	7430,00	6044,98

187	7391	6337,98	5380,00	6176,31
188	5780	7861,42	4640,00	7441,52
189	6207	7022,75	7890,00	7166,09
190	3909	5030,27	5010,00	4738,45
191	3850	4703,16	4730,00	3946,46
192	3907	3942,19	4840,00	2391,77
193	3022	4188,94	4760,00	1111,77
194	2312	3610,91	2530,00	1985,10
195	2252	1912,23	2550,00	1048,99
196	2004	3114,99	2990,00	3636,19
197	1952	1831,85	3380,00	1350,76
198	8919	10796,80	10000,00	9314,15
199	10555	7298,74	10600,00	8091,28
200	13310	8034,49	10600,00	7989,01
201	13775	9012,93	13900,00	9133,97
202	16213	14650,94	14800,00	11785,00
203	16844	14995,45	16900,00	11969,05
204	19272	15980,53	18700,00	12658,13
205	21393	14440,41	19900,00	12298,17
206	19450	11852,36	13900,00	11733,25
207	20842	11327,76	17000,00	11819,92
208	14832	4938,51	9680,00	5674,52
209	12512	11374,71	11000,00	9721,98
210	18043	15622,30	17600,00	12517,80
211	17211	13119,56	15400,00	10641,29
212	18454	13635,09	17900,00	12238,00
213	18861	14992,93	19000,00	12184,86
214	19244	13013,29	15700,00	11034,07
215	17909	12599,93	16000,00	10586,27
216	15558	10947,98	10900,00	9498,90
217	15930	10051,02	10100,00	8949,45
218	10691	3000,72	10600,00	3806,74
219	7591	5407,03	5230,00	6293,31
220	10333	9089,83	10600,00	8663,14
221	12398	11415,72	11200,00	10060,18
222	14079	12796,03	13600,00	10171,97
223	12387	11605,72	12800,00	9787,29
224	14463	10980,29	14800,00	11114,24
225	16990	13042,58	16200,00	10571,67
226	11945	9740,30	11600,00	10665,22
227	15853	11673,51	13700,00	10671,25

228	14286	8868,29	14800,00	8717,77
229	12936	8726,21	8920,00	8406,15
230	10451	2877,08	5290,00	4137,63
231	6929	1638,36	5330,00	2734,71
232	4815	4283,74	5330,00	5968,55
233	6595	3323,71	5400,00	4607,31
234	8930	5414,25	6450,00	5923,38
235	8111	5237,43	5680,00	5633,35
236	4706	5306,55	5370,00	6020,73
237	4555	4509,69	5120,00	5428,68
238	6951	5820,61	5740,00	6194,92
239	7005	5206,01	5230,00	5590,14
240	3457	1467,96	2780,00	1161,40
241	5114	3657,61	4680,00	4688,39
242	6258	2716,40	4100,00	3752,10
243	5629	8628,24	6950,00	7932,47
244	8235	8059,66	7250,00	7559,93
245	11057	11887,62	10500,00	11245,97
246	10998	12167,23	10600,00	11103,01
247	12184	12005,23	12100,00	11124,02
248	10696	10366,78	10600,00	10846,59
249	10333	10201,22	9900,00	10532,36
250	10347	10712,45	10400,00	10682,86
251	7497	5760,36	6380,00	6808,64
252	6515	4258,28	4800,00	5486,40
253	5329	5692,04	6060,00	6669,74
254	5854	3680,14	5220,00	4786,85
255	5054	3998,64	4920,00	5172,97
256	5074	4587,72	5330,00	6050,08
257	4717	4992,24	4280,00	6291,70
258	2500	3305,07	4180,00	4454,96
259	2683	3300,80	4140,00	4363,03
260	3067	4415,32	3340,00	4757,70
261	4310	3300,68	3690,00	4449,30
262	4078	7275,53	4280,00	8461,91
263	3795	4457,58	4990,00	5002,51
264	2881	4633,68	4010,00	4228,10
265	4047	6915,34	4560,00	6913,45
266	3770	6341,41	5110,00	6756,68
267	4624	7902,03	5910,00	7741,34
268	3942	4198,83	4450,00	5331,38

269	4299	7241,07	4280,00	6469,75
270	3914	5359,35	4790,00	5496,92
271	1695	3520,70	2130,00	4711,53
272	3191	1976,56	3150,00	3448,01
273	3517	3537,28	4080,00	4817,42
274	3644	4498,95	3230,00	3806,55
275	3683	3838,76	3230,00	4755,73
276	5253	7205,19	5600,00	6984,80
277	5538	5821,00	5880,00	6327,33
278	5401	6240,70	4500,00	6216,84
279	4963	9840,89	5680,00	9851,28
280	5180	8716,13	5330,00	10796,81
281	11433	11449,39	10900,00	10348,90
282	13015	8501,78	10600,00	8047,42
283	8477	9795,09	7870,00	8846,98
284	12051	10742,70	10900,00	10872,65
285	11584	11340,74	10600,00	10322,98
286	12793	8345,88	12700,00	9148,37
287	10774	10460,80	10600,00	11181,76
288	8705	6924,40	8480,00	10198,70
289	8224	4470,07	5780,00	1696,80
290	4607	6512,34	5960,00	7902,88
291	6354	7588,28	6380,00	7619,28
292	7119	9957,70	7510,00	10931,58
293	7670	12390,51	11000,00	12027,17
294	9344	11024,97	9450,00	10485,82
295	6070	10787,31	8960,00	9400,65
296	9169	11240,43	10900,00	9863,30
297	8722	8571,68	8480,00	9234,88
298	7900	10160,38	7730,00	9972,95
299	7931	10141,98	7780,00	10384,21
300	4337	7615,56	5320,00	7554,19
301	8686	12348,01	8740,00	10586,17
302	10024	12502,14	10600,00	11938,32
303	12093	11773,53	15300,00	12167,38
304	10767	12659,22	10400,00	11866,27
305	9590	7908,39	7410,00	7558,16
306	8305	12166,92	10100,00	11002,97
307	10215	11498,71	10200,00	12350,96
308	12172	9584,28	12400,00	12425,27
309	13213	10550,87	13600,00	14390,65

310	12864	11802,86	12700,00	15471,93
311	12297	9996,36	12700,00	14519,37
312	10163	10558,74	8480,00	9175,72
313	6267	2996,42	4430,00	4011,39
314	5873	7387,81	6520,00	8475,13
315	4822	4752,53	4870,00	3964,97
316	4120	4976,35	7440,00	4082,54
317	5206	9479,42	7760,00	10707,35
318	8967	9085,82	9140,00	9927,88
319	6872	7489,72	5880,00	9033,78
320	9524	9595,49	9460,00	10841,67
321	8541	9372,13	9200,00	10220,66
322	5377	7128,12	5350,00	8499,80
323	7499	13769,40	9310,00	13862,28
324	9985	9844,87	10700,00	12404,98
325	10283	10569,49	11100,00	13002,22
326	6629	6489,39	6550,00	6361,27
327	9263	9737,72	8740,00	8548,63
328	7765	8538,87	7660,00	8272,93
329	3914	4932,56	4010,00	4805,84
330	4528	5045,31	4280,00	4597,43
331	7186	7030,04	8220,00	7582,86
332	7815	10442,70	9400,00	10267,07
333	8143	8594,26	8480,00	8444,02
334	7184	9429,10	7870,00	9209,42
335	7310	9843,22	8560,00	8606,03
336	7311	7602,70	7070,00	7344,42
337	8566	8735,21	7550,00	8335,31
338	9131	9598,25	9530,00	9415,32
339	9985	14052,50	9990,00	13240,18
340	13858	9668,35	10600,00	10186,29
341	12406	11190,36	12700,00	14844,34
342	11424	10470,62	10300,00	9385,82
343	10833	11087,36	11000,00	10211,73
344	12400	9322,91	11500,00	9643,90
345	11046	10340,49	10700,00	9085,72
346	10157	12180,76	10600,00	12421,82
347	10377	10568,28	10600,00	13135,10
348	12132	11557,51	11600,00	11022,94
349	12363	11892,55	12700,00	10551,86
350	14389	12569,26	14800,00	10445,31

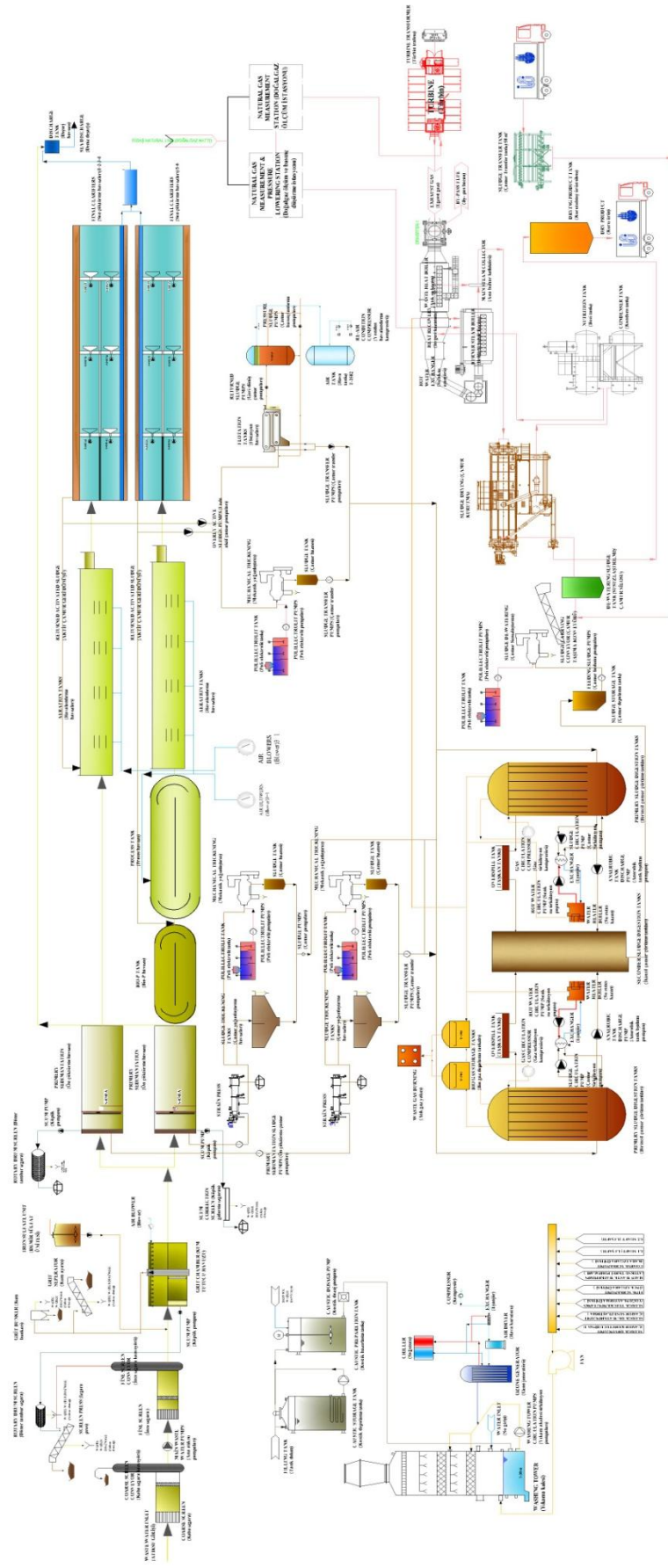
351	11112	13618,41	11600,00	14798,37
352	9362	6627,23	7740,00	7911,11
353	8697	8271,98	7500,00	7687,43
354	11115	12242,62	13000,00	10810,13
355	8002	6471,34	8470,00	6413,39
356	8351	6750,76	8440,00	6719,76
357	8257	6324,28	8040,00	6957,95
358	6897	12298,33	9740,00	10060,34
359	9276	6960,81	8820,00	7063,04
360	18387	9878,55	17900,00	9930,22
361	11951	9165,21	9730,00	8372,86
362	9840	10221,93	9530,00	9563,60
363	11900	11421,73	11600,00	10924,83
364	9715	6332,30	7520,00	6332,54
365	8100	6524,84	8480,00	6025,33
366	7428	6893,49	8480,00	6126,70
367	13364	10808,78	13700,00	8848,98
368	8990	5247,40	8480,00	5987,78
369	10658	7439,88	7810,00	7349,27
370	9141	6166,08	7090,00	6118,65
371	11281	6905,12	11600,00	6687,46
372	14776	12429,40	14800,00	9902,39
373	12201	10903,78	12500,00	8922,42
374	11315	4929,41	6720,00	3821,34
375	9600	8272,50	7390,00	7924,08
376	7912	6021,55	8430,00	5566,44
377	8423	6241,90	8480,00	5637,20
378	9830	10417,50	10300,00	9596,51
379	7232	7200,44	6640,00	7119,76
380	10675	12159,50	14800,00	10497,03
381	10157	12735,88	13700,00	10165,99
382	11655	9821,04	9900,00	9988,46
383	9743	6104,05	6060,00	6398,48
384	13845	5951,22	8270,00	5804,28
385	8493	6950,82	8370,00	6949,12
386	9534	6468,61	8520,00	6464,98
387	11226	12775,41	11300,00	10408,02
388	7078	8652,01	7730,00	9469,24
389	8974	7247,69	8300,00	7286,74
390	6132	6281,65	8490,00	6408,76
391	5562	5757,95	8480,00	5958,28

392	5870	7198,63	6380,00	7348,10
393	5207	7718,32	5330,00	10910,40
394	7551	13066,20	12400,00	10811,23

EK-D

**İSKİ TUZLA BİYOLOJİK VE İLERİ BİYOLOJİK ATIKSU ARTMA TESİSİ AKIŞ
DİYAGRAMI**

İSKİ TUZLA BIOLOGICAL and ADVANCED BIOLOGICAL WASTE WATER TREATMENT PLANT (İSKİ TUZLA BİYOLOJİK ve İLERİ BİYOLOJİK ATIKSU ARITMA TESİSİ)



**İSKİ TUZLA BİYOLOJİK ve İLERİ BİYOLOJİK ATIKSU ARITMA TESİSİNDE
BULUNAN ANAEROBİK ÇAMUR ÇÜRÜTME ÜNİTESİNE AİT DENEYSEL
VERİLERİN KULLANIMI KONUSUNDA HAZIRLANAN PROTOKOL**



T. C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
İnşaat Fakültesi
Çevre Mühendisliği Bölümü

Sayı: B.30.2.YIL-0.17.00.00-03/ 1158
Konu:

Tarih: 22.12.2011

İSTANBUL BÜYÜKŞEHİR BELEDİYE BAŞKANLIĞI
İSTANBUL SU VE KANALİZASYON İDARESİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜ

İlgi: 09.12.2011 tarih ve 510601 sayılı yazınız

Bölümümüz öğretim üyelerinden Yrd.Doç.Dr. Kaan YETİLMEZSOY danışmanlığında yüksek lisans tez çalışması yapan Anabilim Dalımız öğrencisi Kevser KARAKAYA'nın talep etmiş olduğu Tuzla Biyolojik ve İleri Biyolojik Arıtma Tesisinde bulunan tam ölçekli anaerobik çamur çürütme ünitesine ait deneysel verilerin kullanımı konusunda hazırlanan protokol, tez danışmanı Yrd.Doç.Dr. Kaan YETİLMEZSOY tarafından imzalanarak ekte verilmiştir.

Gereği için bilgilerinize arz/rica ederim.

Saygılarımla,

Prof.Dr. Yaşar NUHOĞLU
Bölüm Başkanı

Eki:

- Protokol (2 sayfa).

**İSKİ ATIKSU ARITMA DAİRE BAŞKANLIĞI İLE YILDIZ TEKNİK
ÜNİVERSİTESİ İNŞAAT FAKÜLTESİ ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ
ARASINDA VERİ KULLANIMINA AİT PROTOKOL**

Konu : Veri Kullanımı

Amaç : Tuzla Biyolojik ve İleri Biyolojik Arıtma Tesisinde bulunan tam ölçekli anaerobik çamur çürütme ünitesine ait deneysel verilerin, Çevre Müh. Kevser KARAKAYA'nın "Yapay Zeka Modelleriyle Tam Ölçekli Çamur Çürütme Reaktörlerinden Elde Edilen Biyogaz Üretiminin Tahmini: Yapay Sinir Ağları ve Fuzzy Logic Uygulamaları" konulu yüksek lisans tezinde, kullanılmak üzere talebi

Kullanılacak Verilerin Tarihi: 2008 Ocak- 2011 Ekim tarihleri arasındaki tam ölçekli anaerobik çamur çürütme ünitesine ait deneysel veriler

Haberleşme tebligat adresleri

İSKİ: Atıksu Arıtma Daire Başkanlığı Yeşilköy/İSTANBUL

YTÜ: Yrd.Doç.Dr.Kaan YETİLMEZSOY, YTÜ İnşaat Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, 34229, Davutpaşa, Esenler, İstanbul

Mücbir Sebep Halleri

Taraflar mücbir sebep ortaya çıktığı takdirde, mücbir sebep devam ettiği sürece iş bu protokolden doğan yükümlülüklerden sorumlu tutulamazlar, ancak mücbir sebebin sürmesi halinde taraflar karşı tarafa yazılı olarak bildirmek suretiyle protokolü fes edebilir.

Protokol Feshi:

Taraflar herhangi bir sebep göstermeksizin bir ay önceden ihbarda bulunmak koşuluyla protokolü her zaman sona erdirmeye hakkına sahiptir.

Gizlilik:

Taraflar iş bu protokol dolayısıyla sahip olduğu bilgileri her koşulda saklamakla mükelleftir, edindikleri bilgileri üçüncü şahıslar için paylaşamayacağını kabul ve taahhüt eder. Bu mükellefiyet protokol taraflarının çalışanları ve alt çalışanları içinde aynı şekilde geçerlidir.

Bilgilerin Paylaşımı:

Tesis verilerinin bilimsel amaçlı her türlü makale, yazı ve doküman olarak çoğaltılması ve yayınlanması için İSKİ ' den ayrıca onay alınması gerekmektedir.

Yüklenicinin protokol hükümlerine uygun davranması gerekmektedir. Protokol hükümlerine uygun davranılmaması durumunda İSKİ tek tarafı olarak protokolü fes eder ve bu fesih işleminden dolayı proje yürütücüsü herhangi bir maddi veya manevi hak ve mağduriyet talep edemez.

Yasa ve Yönetmeliklere Uygunluk:

Veriyi kullanan kişi faaliyeti sırasında İSKİ'nin bağlı olduğu yasa, yönetmeliklere ve yürürlükteki yasalara, iş güvenliği ve sağlığı kurallarına uygun hareket etmekte mükelleftir. Bu konuda İSKİ' nin herhangi bir yükümlülüğü olmayacaktır.

Güvenlik:

Güvenlik açısından veri alan kişinin tesis ziyaretlerinde ziyaret saati ve şahıs ismi belirleyip idareye bildirmesi gerekmektedir. İSKİ'nin güvenlik ve iş güvenliği kurallarının uygun hareket edilecektir. Aksi durumlarda İSKİ sorumluluk yüklenmeyecektir.

Veriyi Alacak Kişi/kişiler: Yrd.Doç.Dr. Kaan YETİLMEZSOY, Kevser KARAKAYA
Veriyi Alacak Kişi/kişilerin iletişim bilgileri: YTÜ İnşaat Fakültesi Çevre Mühendisliği
Bölümü,34229, Davutpaşa,Esenler,İstanbul

Maliyetler:

Protokol şartlarında değişiklik ancak yazılı müracaat olduğu takdirde geçerlidir, ihtilaf halinde İstanbul Mahkemeleri yetkilidir. Bu protokol iki sayfadan ibaret olup, taraflarca tam okunup anlaşıldıktan sonra iki nüsha olarak imza altına alınmış ve taraflara teslim edilmiştir.

İSKİ
Atıksu Arıtma Qhire Başkanı
Osman YILDIZ

Talep Sahibi
Tez Danışmanı
Yrd.Doç.Dr. Kaan YETİLMEZSOY
21.12.2011

T.C.
İSTANBUL BÜYÜKŞEHİR BELEDİYE BAŞKANLIĞI
İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü



ayn : M.34.0.İBB.5.01.04.13.00-804.01- *5106/1*
Konu :Veri Kullanımı

..... / / 2011

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
İNŞAAT FAKÜLTESİ
(Çevre Mühendisliği Bölüm Başkanlığına)

Davutpaşa Yerleşkesi 34220
Davutpaşa/Esenler/İSTANBUL

20.10.2011 tarihli yazınızda, Çevre Müh. Kevser KARAKAYA'nın "Yapay Zeka Modelleriyle Tam Ölçekli Çamur Çürütme Reaktörlerinden Elde Edilen Biyogaz Üretiminin Tahmini: Yapay Sinir Ağları ve Fuzzy Logic Uygulamaları" konulu yüksek lisans tezinde kullanılmak üzere, Tuzla Biyolojik ve İleri Biyolojik Arıtma Tesisinde bulunan tam ölçekli anaerobik çamur çürütme ünitesine ait deneysel verilerin tezde kullanımı için izin talep edilmiştir.

Bu kapsamda, tez danışmanı tarafından, ekteki protokolün doldurulup imzalanması halinde belirtilen verilerin kullanımına izin verilecektir.

Gereğini bilgilerinize arz/rica ederiz.


Osman YILDIZ
Atıksu Arıtma Dairesi Başkanı


Selami TAŞER
Genel Müdür Yardımcısı V.

Ek: Protokol evrakı

İSKİ Nispete Alibeyköy Caddesi 34406 Kağıthane-İSTANBUL Ayrıntılı bilgi için irtibat:
Telefon : (0 212) 589 97 14 Fax: (0 212) 589 85 19
e-posta : yatik@iski.gov.tr Elektronik Ağ : www.iski.gov.tr

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Kevser KARAKAYA

Doğum Tarihi ve Yeri : 01 Nisan 1985

Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Çevre Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2012
Lisans	Çevre Mühendisliği	Uludağ Üniversitesi	2007
Lise	Fen Bilimleri	Özel Pendik Fazilet Lisesi	2002

İŞ TECRÜBESİ

Çalışma Zamanı	Firma/Kurum	Görev
Ağustos 2006 - ...	İstanbul Büyükşehir Belediyesi kurumu olan İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi'ne hizmet veren özel bir firma	İşletme Mühendisi
Temmuz 2006	İSKİ Paşaköy İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi	İşletme Stajeri
Haziran 2006	İSKİ Tuzla Biyolojik ve İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi	İşletme Stajeri