ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

EVSEL ATIK SULARIN KİMYASAL ÇÖKTÜRME VE ELEKTROKOAGÜLASYON ARITIMINDA PARÇACIK SÜRÜSÜ TEMELLİ MODELLEME VE KONTROL YAKLAŞIMI

Ayşe TAŞKIN

KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2016

Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Ayşe TAŞKIN tarafınan hazırlanan **"Evsel Atık Suların Kimyasal Çöktürme ve Elekrokoagülasyon Arıtımında Parçacık Sürüsü Temelli Modelleme ve Kontrol Yaklaşımı"** adlı tez çalışması 28/06/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof.Dr. Zehra ZEYBEK
Ankara Üniversitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Jüri Üyeleri:
Başkan: Prof. Dr. M. Atilla MURATHAN
Gazi Üniversitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Hale HAPOĞLU
Ankara Üniversitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof.Dr.Ayla ALTINTEN
Gazi Üniversitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Doç.Dr. Asım Egemen YILMAZ
Ankara Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof.Dr. Zehra ZEYBEK
Ankara Üniversitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof.Dr. İbrahim DEMİR
Enstitü Müdürü V.

ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

28.06.2016

Ayşe TAŞKIN

ÖZET

Doktora Tezi

EVSEL ATIK SULARIN KİMYASAL ÇÖKTÜRME VE ELEKTROKOAGÜLASYON ARITIMINDA PARÇACIK SÜRÜSÜ TEMELLİ MODELLEME ve KONTROL YAKLAŞIMI

Ayşe TAŞKIN

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Kimyasal Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Zehra ZEYBEK

Bu çalışmada, evsel atıksuyu, kesikli reaktörde kimyasal çöktürme (KÇ) ve elektrokoagülasyon (EK) prosesleri ile arıtımı yapılmıştır. Arıtılan suyun Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) ve bulanıklık giderimleri ölçülerek pH, çöktürücü miktarı, akım, zaman, iletkenlik gibi arıtıma etki eden parametreler Design Expert 7.0 programı işletilerek Cevap Yüzey Yenileme (CYY) metodu ile optimize edilmiştir. Ayrıca, her iki proses için İstatistiksel sonuçlardan bulunan doğrusal olmayan modellere, Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritması uygulanarak optimum parametreler hesaplanmıştır. Bu parametreler, dizayn expert 7.0 programında bulunan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

KÇ prosesinde pH 7.2 değerinde ve 500 mg/L alüm miktarında en yüksek KOİ (% 90) ve bulanıklık (% 94) giderimi elde edilmiştir. pH 7.6 değerinde ve 500 mg/L demir klorür çöktürücü maddesi kullanıldığında en yüksek KOİ ve bulanıklık giderimi sırasıyla % 70 ve % 90'dır. Çöktürücü olarak Demir Sülfat Heptahidrat uygulandığında ise KOİ ve bulanıklık giderimleri % 30 ve % 65'dir. 1m^3 evsel atıksuda optimum dozda alüm, demir klorür ve demir sulfat heptahidrat çöktürücüleri için prosesinin işletme maliyetleri sırasıyla 4.8 \$//m^3, 5.1 \$/m^3 ve 3.8 \$/m^3'dür.

Elektrokoagülasyon prosesinde ise Alüminyum (Al) ve Demir (Fe) elektrotlar kullanılarak arıtma işlemi yapılmıştır. Al elektrot için bulunan uygun parametrelerde KOİ giderimi % 85, Fe elektrot da ise % 70'dir. Bulanıklık giderimleri ise Al elektrot kullanıldığında % 90'a kadar çıkmıştır. Fe elektrotta ise bulanıklık giderimi % 70'dir. 1L evsel atıksu için 4.9 mA/cm^2 (0.35 Amper), 20 dakika (Al) ve 4.9 mA/cm^2 (0.3 Amper) (Fe) elektrotların 20 dakikalık işletme koşullarında elektrokoagülasyon prosesinin işletme maliyeti sırasıyla 2.55 \$/m^3 ve 0.885 \$/m^3'dir.

EK ve KÇ proseslerinde, PID kullanılarak pH kontrol edilmiştir. PID kontrol edicilerin kazanç değerleri farklı yöntemlerle [Cohen-Coon, PSO ve Yer Çekimsel Arama Algoritması (YÇAA)] hesaplanmıştır. Kimyasal çöktürme işleminde, PSO ve YÇAA kullanılarak bulunan kazanç değerleri ile yapılan PID kontrolünde, pH'ın set noktasına daha hızlı ulaştığı ve hata performans kriterlerinin daha düşük olduğu gözlenmiştir. Elektrokoagülasyon prosesinde ise PID kazanç değerlerinin hesaplanmasında Cohen Coon metodu uygulandığında, PSO algoritmasına göre hata performans kriterleri daha düşük çıkmıştır.

Haziran 2016, 205 sayfa

Anahtar Kelimeler: PSO, doğrusal olmayan optimizasyon, elektrokoagülasyon, kimyasal çöktürme, evsel atıksuyu, PID

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

MUNICIPAL WASTE WATER TREATMENT BY CHEMICAL COAGULATION AND ELEKTROCOAGULATION USING PARTICLE SWARM OPTIMIZATION BASED MODELLING AND CONTROL APPROACH

Ayşe TAŞKIN

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Chemical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Zehra ZEYBEK

In this study, treatment of the domestic wastewater, was made with the purification processes by coagulation(CC) and electrocoagulation(EC) in the batch reactor. The Chemical Oxygen Demand(COD) and turbidity removal in treated wastewater was determined by measuring such as, pH, amount of coagulant, current, time, conductivity parameters affecting purification. These parameters were optimized with response surface methodology (RSM) by using the Design Expert 7.0 programme. In addition, the optimal parameters were calculated again from non-linear models finding statistical results for both processes, by applying Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm. These parameters were compared with the results of the finding from design expert 7.0 programme.

In Coagulation Process, maximum COD (90%) and turbidity (94%) removal were obtained at pH 7.2 and 500 mg/L alum coagulant dose. When iron chlorur was used as a coagulant, COD and turbidity removal were obtained as 70% and 90% respectively. If iron sulphate was used as coagulant, COD and turbidity removal were obtained as 30% and 65%. For optimum dose of alum, iron chlorur and iron sulphate coagulants

operating costs of the process were 4.8 $/m^3, 5.1 $/m^3 and 3.8 $/m^3 respectively, at 1m^3 domestic wastewater.

In electrocoagulation process, treatment was made by using Aluminium (Al) and Iron (Fe) electrodes. At the optimum parameters found for Al; the COD removal was obtained as 85% and for Fe electrode it was obtained as 70%. When Al electrode used turbidity removal rised to 90%. Turbidity removal was 70% for Fe electrode. For 1 L domestic wastewater, the operation condition of 4.9 mA/cm^2 (0.35 Amper) and 20 minutes for Al and 4.9 mA/cm^2 (0.3 Amper) 20 minutes for Fe, the electrocogulation of operating costs were 2.55 $ ve 0.885 $ respectively.

In EC and CC processes, pH was controlled by using PID. PID controller gain values were calculated by different methods; Cohen-Coon, PSO, Gravitational Algorithma (YÇAA). In coagulation process, the PID control gain values found by using PSO and YÇAA, the pH was reached to set point faster and the lower integral error criteria were observed. When Cohen Coon method was used for calculating PID gain values in electrocoagulation process, the error values were lower than PSO algorithm's.

June 2016, 205 pages

Key Words: PSO, nonlinear optimization, coagulation, electrocoagulation, domestic wastewater, PID

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Araştırmalarımın her aşamasında bilgi, önerileri ve yardımlarıyla destekleyen değerli hocam Ankara Üniversitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı Prof. Dr. Zehra ZEYBEK'e, fikirleriyle çalışmalarımı yönlendiren sayın hocalarım Ankara Universitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı öğretim üyelerinden Prof. Dr. Hale HAPOĞLU, Ankara Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı öğretim üyelerinden Doç. Dr. Asım Egemen YILMAZ'a, her türlü desteğini benden esirgemeyen Ankara Üniversitesi Kimya Anabilim Dalı öğretim üyelerinden Prof. Dr. Orhan ATAKOL'a, yardımlarıyla bana destek olan Ankara Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı öğretim üyesi Tolga ALTINÖZ ve Araştırma Görevlisi Barış SATAR ve Ankara Üniversitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı Araştırma Görevlileri Şule CAMCIOĞLU ve Baran ÖZYURT'a, deneyimleriyle bana yardımcı olan İsmal BAYRAM, Mehmet ASPİR ve Hatice BODAKÇİ'ye ve her türlü fedakarlıklarını benden esirgemeyen kayınvalideme, kayınpederime, anneme, babama, kardeşime ve sevgili eşime ve annelerini sabırla bekleyen göz bebeklerime teşekkürler ederim.

Ayşe TAŞKIN

Ankara, Haziran 2016

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK…….. i

ÖZET…… ii

ABSTRACT…… iv

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR…….. vi

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ…… xi

ŞEKİLLER DİZİNİ…….. xv

ÇİZELGELER DİZİNİ…… … xviii

1. GİRİŞ……... 1

2. KAYNAK ÖZETLERİ…….. 5

2.1 Evsel Atıksu…….....5

2.2 Kimyasal Çöktürme……..6

2.3 Elektrokoagülasyon……...8

2.4 Elektrokoagülasyon ve Kimyasal Çöktürme……10

2.5 Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)……12

2.6 PSO-PID Kontrol Edici…….. 13

3. KURAMSAL TEMELLER……...……. 15

3.1 Evsel Atıksu…… 15

3.1.2 Kirlilik derecesini belirleyen kriterler…..……. 16

3.2 Arıtma Sistemleri…..……... 23

3.2.1 Fiziksel arıtma sistemleri…….…….. 24

3.2.2 Biyolojik yöntemle arıtma sistemleri……..……... 25

3.2.3 Kimyasal yöntemle arıtma sistemleri……..……...26

3.2.3.1 Kimyasal çöktürme ……. 27

3.2.3.2 Kimyasal arıtımda ağır metallerin uzaklaştırılması …… 32

3.2.4 Elektrokimyasal arıtım sistemleri…….. 35

3.2.4.1 Yükseltgenme-indirgenme reaksiyonlarının genel prensipleri…… 35

3.2.4.2 Elektrot potansiyelleri…….……..36

3.2.4.3 Elektrokimyasal proseslerin türleri…… 39

3.2.4.4 Elektrokimyasal arıtımını etkileyen yöntemler…… 44

3.3 İstatistiksel Deney Tasarımları……. 51
3.3.1 Dizayn expert (DE) 7.0.0. paket programı…… 51
3.4 Proses Kontrol ve Proses Kontrol Sistemleri…….. 52
3.4.1 PID kontrol edici…… 53
3.4.2 PID kontrol edicilerin parametrelerini belirleme yöntemleri……. 55
3.5 Parçacık Sürü Optimizasyonu…… 56
3.5.1 Parçacık optimizasyonunda parametre kontrolü…… 60
3.6 Yer Çekimsel Arama Algoritması……. 61
4. MATERYAL VE YÖNTEM…… 65
4.1 Atıksuyun Karakteristik Özellikleri…… 67
4.2 Kimyasal Çöktürme Deney Sistemi …… 67
4.2.1 Deneylerde kullanılan çöktürücü maddeler……..…… 71
4.3 Elektrokoagülasyon……..….. 71
4.3.1 Akım yoğunluğu……... 75
4.4 Bulanıklık Ölçümü……. 75
4.5 Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)……..… 76
4.6 İşletme Maliyeti……...… 78
4.6.1 Enerji tüketimi……..….. 78
4.6.2 Elektrot maliyeti……..… 79
5. BULGULAR VE TARTIŞMA……...… 80
5.1 Kimyasal Çöktürme Deneyleri…… 80
5.1.1 Cevap yüzey yenileme metodu…… 80
5.1.2 Alüm çökelti maddesi ile yapılan kimyasal çöktürme deney sonuçları …….…… 84
5.1.3 Demir klorür çökelti maddesi ile yapılan kimyasal çöktürme deney sonuçları ……...…… 90
5.1.4 Demir sülfat heptahidrat çökelti maddesi ile yapılan kimyasal çöktürme deney sonuçları ……...…….. 90
5.1.5 Parçacık sürü optimizasyonu …….. 101
5.2 Elektrokoagülasyon…….. 102
5.2.1 Al elektrot ile yapılan elektrokoagülasyon deney sonuçları …… 105
5.2.2 Fe elektrot ile yapılan elektrokoagülasyon deney sonuçları …… 112

5.2.3 Parçacık sürü optimizasyonu …..……..……118
5.3 pH Kontrolü Deneyleri …… 119
5.3.1 Kesikli reaktörde suda yapılan pH kontrol deneyleri……..…….. 119
5.3.2 Çöktürme ile evsel atıksu arıtımı yapılan pH kontrol deneyleri ……. 126
5.3.3 Elektrokoagülasyon prosesi ile yapılan pH kontrol deneyleri ……..135
5.5 İşletme Maliyeti ……141
6. TARTIŞMA ve SONUÇ……..……143
KAYNAKLAR……...…….146
EKLER……... 153
EK 1 Parçacık Sürüsü Optimizasyonuna Örnek Problem……..…154
EK 2 Evsel Atıksuyun $AlSO_4$ ile KOİ Gideriminin
Modellenmesinin İstatistiksel Analizi……... 156
EK 3 Evsel Atıksuyun $AlSO_4$ ile Bulanıklık Gideriminin
Modellenmesinin İstatistiksel Analizi……160
EK 4 Evsel Atıksuyun $FeCl_3$ ile KOİ Gideriminin
Modellenmesinin İstatistiksel Analizi……. 163
EK 5 Evsel Atıksuyun $FeCl_3$ ile Bulanıklık Gideriminin
Modellenmesinin İstatistiksel Analizi…….. 166
EK 6 Evsel Atıksuyun $FeSO_4$ ile KOİ Giderimin
Modellenmesinin İstatistiksel Analizi……169
EK 7 Evsel Atıksuyun $FeSO_4$ ile Bulanıklık Gideriminin
Modellenmesinin İstatistiksel Analizi……172
EK 8 Evsel Atıksuyun Al Elektrot Kullanılan Elektrokoagülasyon
ile KOİ Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi…….. 175
EK 9 Evsel Atıksuyun Fe Elektrot Kullanılan Elektrokoagülasyon
ile KOİ Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi…….. 179
EK 10 Evsel Atıksuyun Al Elektrot Kullanılan Elektrokoagülasyon
ile Bulanıklık Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi…… 183
EK 11 Evsel Atıksuyun Fe Elektrot Kullanılan Elektrokoagülasyon
ile Bulanıklık Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi…… 187
EK 12 Kimyasal çöktürmede Teorik Hesaplanan Sonuçlarla
Girilen Verilerin Karşılaştırılması……191

EK 13 Elektrokoagülasyonda Teorik Hesaplanan Sonuçlarla Girilen Verilerin Karşılaştırılması…….193
EK 14 Kimyasal Çöktürme Prosesinin Optimizasyonunda Kullanılan PSO Algoritması…….. 194
EK 15 Proseslerin İşletme Maliyetleri……200
EK 16 Elektrokoagülasyon Prosesinin İşletme Maliyeti……. 202
EK 17 Ürün Birim Fiyatları…….. 204
ÖZGEÇMİŞ……. 205

SİMGELER DİZİNİ

$AgSO_4$	Gümüş Sülfat
Al	Alüminyum
$Al(OH)_3$	Alüminyum Hidroksit
$A1_2(SO_4)_3.18H_2O$	Alüm, Alüminyum Sülfat
$Ca(OH)_2$	Kalsiyum Hidroksit
Cl^-	Klor Kontrasyonu
Cu	Bakır
Fe	Demir
$FeCl_3$	Demir Klorür
$FeCl_3.6H_2O$	Demir Klorür
$FeCl_3$-PAC	Aktifleştirilmiş Karbon-Demir Klorür
$Fe(OH)_3$	Demir Hidroksit
$Fe_2(SO_4)_3.7H_2O$	Demir Sülfat Heptahidrat
H_2O_2	Hidrojen Peroksit
HCl	Hidrojen Klorür
H_2SO_4	Sülfirik Asit
$HgSO_4$	Civa Sülfat
HNO_3	Nitrik Asit
$K_2Cr_2O_7$	Potasyum Kromat
NaCl	Sodyum Klorür
NaOH	Sodyum Hidroksit
NH_4-N	Amonyak azotu
NO_3-N	Nitrat Azotu
P	Fosfat
Mn	Manganese

Kısaltmalar

A	Amper
ABS	Alkil Benzil Sülfanat
AA	Aktif Anot Yüzey Alanı
APSO	Adaptiv Parçacık Sürü Optimizasyonu
AVR	Otomatik Voltaj Düzenleyicisi
BOD	Biyolojik Oksijen İhtiyacı
CYY	Cevap Yüzey Yenileme Metodu
ÇKM	Çökebilen Katı Madde
ÇM	$Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \times 6H_2O$ Çözeltisinin Molaritesi
ÇOK	Çözülmüş Organik Karbon
D	Parçacıkların Uzaklıkları
DC	Doğru Akım
DO	Çözünmüş Oksijen
DOM	Çözülmüş Organik Materyaller
EA	Eylemsizlik Ağırlığı
EK	Elektrokoagülasyon
e(t)	Hata
F_S	Faraday sabiti
F	Yerçekimi Kuvveti
FAME	Yağ Asidi Metil Ester
FFA	Serbest Yağ Asidi
FGPI	Bulanık Mantık Oransal-İntegral
G	Yerçekimi Sabiti
GA	Genetik Algoritma
g_{best}	O Ana Kadar PSO'dan Elde Edilen En İyi Değer
J	Akım Yoğunluğu
I	Akım Şiddeti
M	Faktör Sayısı
KÇ	Kimyasal Çöktürme
KOİ	Kimyasal Oksijen İhtiyacı

LAS	Lineer Alkil Sulfanat
MA	Moleküler Ağırlığı
mA	Mini Amper
M_1, M_2	Parçacıkların Ağırlığı
MKT	Merkezi Kompozit Dizayn
n	Transfer Olan Elektron Sayısı
O&G	Yağ ve Gres
PAC	Aktifleştirilmiş Karbon
PACl	Polialüminyum Klorür
p_{best}	Her PSO Güncellemesinde Elde Edilen En İyi Değer
PE	Polielektrolitler
PID	Oransal-Integral-Türevsel Kontrol edici
PMW	Boya Üretim Atıksuyu
PSO	Parçacık Sürü Optimizasyonu
PSO-PID	Parçacık Sürü Optimizasyonu tabanlı bir oransal-integral-türev
PVC	Polivinil Klorür
$R_{gaz\ sabiti}$	Gaz Sabiti
R^2	Determinasyon Katsayısı
r(t)	Set Noktası
r_1, r_2	[0, 1] Aralığında Alınan Rastgele Sayılar
t	Zaman
t_d	Ölü Zamanı
$T_{(K)}$	Mutlak Sıcaklık (K)
THMFP	Trihalometan Formasyon Potansiyel
TOK	Toplam Organik Karbon
TSS	Askıdaki Katı Atık
U(t)	Giriş Değişkeni
VA	Şahit Çözeltisi İçin Sarf Edilen $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \times 6H_2O$ (ml)
VB	Numune Çözeltisi İçin Sarf Edilen $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \times 6H_2O$ (ml)
v_i	Hız vektörü
VSS	Askıdaki Uçucu Madde
y(t)	Çıkış Değişkeni

YÇAA	Yerçekimsel Arama Algoritması
x_i	Konum Vektörü
q	Elektrik Miktarı
W	Enerji Enerjisi
τ	Sistemin Zaman Sabiti
τ_p	Oransal Parametre
τ_I	İntegral Parametre
τ_D	Türevsel Parametre

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1 Ankara Atıksu Arıtma Tesisi'nin kirletici parametrelerinin
% ihtimal değerleri……..… 20
Şekil 3.2. Evsel atıksu arıtımında geleneksel (a) ve alternatif (b) sistem ……..… 22
Şekil 3.3 Koagülasyon Mekanizması-Kararlı Kolloidler……..……..……29
Şekil 3.4 Kollodlerin koagülant eklenmesi ile destabilizasyonu……..……..…… 30
Şekil 3.5 Polielektrolit ilavesi ile floklar arasında köprü oluşumu……..…….. 30
Şekil 3.6 Kimyasal çöktürme- floklasyon İşlemi……31
Şekil 3.7 Elektrokimyasal pilin şematik görünümü……..… 38
Şekil 3.8 Al^{+3}'ün dimerik ve polimerik hidrokompleksleri…… 40
Şekil 3.9 Elektrokoagülasyonda meydana gelen reaksiyonlar……..… 42
Şekil 3.10 PID Geri beslemeli kontrol sisteminin blog diyagramı……..……53
Şekil 3.11 Temel PSO Algoritması…….…….59
Şekil 3.12 Cisimlerin birbirlerine uyguladıkları çekim kuvvetleri…… 61
Şekil 3.13 Yerçekimi arama algoritması akış şeması…….….63
Şekil 4.1 Kimyasal Çöktürme Deney Sistemi…… 68
Şekil 4.2 Kimyasal Çöktürme Deney Sistemi…… 69
Şekil 4.3 Elektrokoagülasyon Sistemi……..… 72
Şekil 4.4 Elektrokoagülasyon Deney Sistemi ……..… 72
Şekil 4.5 Simulink Programı ……..……74
Şekil 4.6 Orbeco-Hellige, Model 975-MP spektrofotometre cihazı……..… 76
Şekil 4.7 Bioscience Inc. cihazı……..… 77
Şekil 5.1 MKT iki faktör:
(a) 4 küp noktaları, (b) eksen noktaları (c) MKT deney dizaynı…… 80
Şekil 5.2 Alüm KOİ giderimi grafikleri…… 86
Şekil 5.3 Alüm bulanıklık giderim grafikleri ……..……89
Şekil 5.4 $FeCl_3$ KOİ giderimi grafikleri ……..…… 92
Şekil 5.5 $FeCl_3$ Bulanıklık Giderimleri Grafikleri…… 95
Şekil 5.6 $FeSO_4.7H_2O$ KOİ Giderimleri Grafikleri…… 98
Şekil 5.7 $FeSO_4$ Bulanıklık giderimleri grafikleri…… 101

Şekil 5.8 Al Elektrot Kullanılarak yapılan EK KOİ sonuçlarının 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafikleri (Zaman& pH)…… 107
Şekil 5.9 Al Elektrot Kullanılarak yapılan EK KOİ sonuçlarının 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafikleri (Zaman & İletkenlik)…… 107
Şekil 5.10 Al Elektrot Kullanılarak yapılan EK KOİ sonuçlarının 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafikleri (Akım & Zaman)…….. 108
Şekil 5.11 Al Elektrot kullanılarak yapılan EK bulanıklık sonuçlarının 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafikleri (Zaman& pH)…… 110
Şekil 5.12 Al Elektrot kullanılarak yapılan EK bulanıklık sonuçlarının 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafikleri (İletkenlik& Zaman)…… 111
Şekil 5.13 Al Elektrot kullanılarak yapılan EK bulanıklık sonuçlarının 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafikleri(Akım & Zaman)…….....111
Şekil 5.14 Fe Elektrot kullanılarak yapılan EK KOİ sonuçlarının 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafikleri (pH & Zaman)……. 114
Şekil 5.15 Fe elektrot kullanılarak yapılan EK elde edilen KOİ sonuçlarının 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafikleri (İletkenlik & Zaman)…… 114
Şekil 5.16 Fe Elektrot kullanılarak yapılan EK KOİ sonuçlarının 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafikleri (Akım & Zaman)…….. 115
Şekil 5.17 Fe Elektrot kullanılarak yapılan EK bulanıklık sonuçlarının 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafikleri (Zaman& pH)……117
Şekil 5.18 Fe Elektrot kullanılarak yapılan EK bulanıklık sonuçlarının 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafikleri (İletkenlik& Zaman)…… 117
Şekil 5.19 Fe elektrot kullanılarak yapılan EK bulanıklık sonuçlarının 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafikleri (Akım & Zaman)…….. 118
Şekil 5.20 pH set=9 için Cohen Coon Katsayıları ile Suda Yapılan PID Kontrolü… 121
Şekil 5.21 pH=8 için Cohen Coon Katsayıları ile Suda Yapılan PID Kontrolü…….. 122
Şekil 5.22 Simulink pH nötürleşme modeli. ……123
Şekil 5.23 pH Set Değeri 8 için PSO'dan Bulunan PID Katsayıları ile Suda Yapılan PID Kontrolü……...124
Şekil 5.24 Set değeri 8 için Suyun Yerçekimsel Arama Algoritmasından Bulunan Katsayıları ile Suda Yapılan PID Kontrolü Sonuçları…….. 125

Şekil 5.25 Alüm Çöktürücüsü için Cohen Coon ile Evsel Atıksuda Yapılan PID Kontrolü. (pHset=7.5, 500 mg/L Alüm)…….. 126
Şekil 5.26 Alüm Çöktürücüsü için PSO Algoritması ile Evsel Atıksuda Yapılan PID Kontrolü. (pHset=7.5, 500 mg/L Alüm)…….. 127
Şekil 5.27 Alüm çöktürücü için YÇAA Katsayıları ile Evsel Atıksuda Yapılan PID Kontrolü. (pHset =7.5, 500 mg/L Alüm)…… 128
Şekil 5.28 FeCl3 çöktürücü ile Cohen Coon Katsayıları ile Evsel Atıksuda Yapılan PID Kontrolü. (pHset=10.5, 500 mg/L FeCl3)…… 129
Şekil 5.29 $FeCl_3$ çöktürücü ile PSO Algoritmasından bulunan PID Katsayıları ile Evsel Atıksuda Yapılan PID Kontrolü …….……. 130
Şekil 5.30 $FeCl_3$ çöktürücü ile Yer Çekimsel Algoritmasından bulunan PID Katsayıları ile Evsel Atıksuda Yapılan PID Kontrolü …… 131
Şekil 5.31 $FeSO_4.7H_2O$ çöktürücüsü için Cohen Coon Katsayıları ile Evsel Atıksuda Yapılan PID Kontrolü…….. 132
Şekil 5.32 Al Elektrot Kullanılan Elektrokoagülasyon Cohen Coon Katsayıları ile Yapılan PID Kontrolü…….…… 136
Şekil 5.33 Al elektrot kullanılan elektrokoagülasyon prosesinde, PSO kazanç katsayıları ile yapılan PID kontrolü …… 137
Şekil 5.34 Fe Elektrot Kullanılan Elektrokoagülasyon Cohen Coon Katsayıları ile Yapılan PID Kontrolü…… 138
Şekil 5.35 Fe elektrot kullanılan elektrokoagülasyon prosesinde, PSO kazanç katsayıları ile yapılan PID kontrolü …… 139

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Evsel atıksu birleşenleri……..… 15
Çizelge 3.2 Evsel atıksu birleşenleri ve çevreye etkileri……. 16
Çizelge 3.3 Evsel atıksuların karakteristik özellikleri…….. 21
Çizelge 3.4 Derin deniz deşarjına izin verilebilecek atıksuların özellikleri……. 23
Çizelge 3.5 Kimyasal arıtımda kullanılan kimyasal madde…….…… 32
Çizelge 4.1 Yapılan Çalışmalar…… 66
Çizelge 4.2 Atıksuyun Karakteristik Özellikleri…….. 67
Çizelge 4.3 Kimyasal Çöktürme Deney Tasarımı…… 70
Çizelge 4.4 Elektrokoagülasyon Deney Tasarımı…… 73
Çizelge 5.1 Kimyasal çöktürme deney tasarımı ve sonuçları……..… 82
Çizelge 5.2 Alüm çöktürücü maddesine ait KOİ giderim
ANOVA analiz sonuçları…… 85
Çizelge 5.3 Alüm çöktürücü maddesine ait Bulanıklık giderim
ANOVA analiz sonuçları…….. 87
Çizelge 5.4 $FeCl_3$ Çöktürücü maddesine ait
KOİ giderim ANOVA analiz sonuçları……. 91
Çizelge 5.5 $FeCl_3$ çöktürücü maddesine ait
bulanıklık giderim ANOVA analiz sonuçları……. 93
Çizelge 5.6 $FeSO_4$ Çöktürücü maddesine ait
KOİ giderim ANOVA analiz sonuçları…….……. 96
Çizelge 5.7 $FeSO_4$ Çöktürücü maddesine ait
Bulanıklık giderim ANOVA analiz sonuçları……. 99
Çizelge 5.8 Çöktürücü maddelerinin PSO programı ile optimizasyonu……. 102
Çizelge 5.9 Elektrokoagülasyon deney tasarımı ve sonuçları…… 103
Çizelge 5.10 Al Elektrot kullanılan Elektrokoagülasyon deneyinin
KOİ gideriminin ANOVA analiz sonuçları…… 106
Çizelge 5.11 Al Elektrot kullanılan Elektrokoagülasyon deneyinin
Bulanıklık gideriminin ANOVA analiz sonuçları…… 109
Çizelge 5.12 Fe Elektrot kullanılan Elektrokoagülasyon deneyinin
KOİ gideriminin ANOVA analiz sonuçları…… 113

Çizelge 5.13 Fe Elektrot kullanılan Elektrokoagülasyon deneyinin Bulanıklık gideriminin ANOVA analiz sonuçları…… 116
Çizelge 5.14 Elektrotların PSO programı ile optimizasyonu…… 119
Çizelge 5.15 Design Expert 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafiklerine göre optimum parametreler ……..……. 119
Çizelge 5.16 PID kontrol edicide kullanılan kazançlar. …… 120
Çizelge 5.17 Kimyasal Çöktürme Prosesinin Kontrolünün Hata Performans kriterleri…… 133
Çizelge 5.18 PID kontrol edicide kullanılan kazançlar. …….. 134
Çizelge 5.19 Elektrokoagülasyonda kullanılan PID Kazançları…… 135
Çizelge 5. 20 Elektrokoagülasyon Deneylerinde Elde Edilen Toplu Sonuçlar……140
Çizelge 5.21 Elektrokoagülasyon Prosesi Kontrolünün Hata Performans Kriterleri…141
Çizelge 5.22 Kimyasal Çöktürme ve Elektrokoagülasyon Sistemlerinin İşletme Maliyetleri…..... 142

1. GİRİŞ

Endüstrinin gelişmesiyle birlikte dünyada ve Türkiye'de nüfusun büyük şehirlerde yoğunlaşması, evsel atık sularının artmasına neden olmaktadır. Bunun yanında küresel ısınma, yaşam standartlarının yükselmesiyle su ihtiyacının artması, temiz su ihtiyacının karşılanmamasına neden olmaktadır.

Su yalnız içme, kullanma, endüstri ve tarımsal sulama gibi ihtiyaçların dışında, atmosferde meydana gelen bütün meterolojik olaylar için ve iklim koşullarının yumuşatılmasında büyük önem arzetmektedir (Gürü ve Yalçın 2010). Son zamanlarda yeryüzü ikliminde belirgin değişmeler olmuştur. İlerleyen zamanlarda küresel ısınmanın daha da artacağı ve buna bağlı olarak temiz su kaynaklarında tehlike boyutlarında azalmalar olacağı tahmin edilmektedir. Bu nedenle temiz suyun tükenmeyen bir kaynak olduğunu düşünmek doğru değildir.

Doğada bulunan su kaynaklarını yağmur suları, yüzey suları (göller, nehirler), yer altı suları ve deniz suları olarak dört grupta toplayabiliriz. Su kaynaklarının tümü amaca göre arıtma işlemi yapıldıktan sonra, gerek şehir içme suyu olarak gerekse endüstriyel olarak kullanılabilir (Gürü ve Yalçın 2010).

Yeryüzünde hareket halinde olan su, kullanıldıktan sonra kirlenmiş su olarak yeniden çevreye verilir. Çevre kirliliğinin artması ve kirlenmiş suların arıtılmadan doğaya bırakılması, doğada bulunan nehir, göl gibi temiz su kaynaklarını kirletmektedir. Endüstriyel atıklar, tarımda gübre ve ilaç kullanımı, evsel atıksular temiz kaynak suları kirletmektedir. Atıksularını evsel atıksuları ve sanayi atıksuları olarak iki ana başlıkta toplayabiliriz.

Çevreye bırakılan evsel atıksuları, içinde bulunan fosfor ve azot bileşiklerinin temiz sulara karışarak, değişik oranlarda ötrofikasyon oluşmasına neden olmaktadır.

Ötrofikasyon su içinde bulunan fosfor ve azot gibi bileşenlerin, su içindeki bitkilerin aşırı bir şekilde çoğalmasına ve buna bağlı olarak sudaki çözünmüş oksijenlerin kısa sürede tükenerek anaerobik bir ortam oluşmasıdır. Ötrofikasyon oluşan temiz sular içilemeyecek duruma gelirken, göllerin ve akarsuların ise içindeki canlıların yaşamasını olumsuz etkileyerek ekolojik dengeyi bozmaktadır (Gürü ve Yalçın 2010).

Atıksularını evsel atıksuları ve sanayi atıksuları olarak iki ana başlıkta toplayabiliriz. Sanayi atıksularının içindeki kimyasal maddeler boya, tekstil, petrol vb. gibi sanayilere göre değişmektedir. Fakat evsel atıksuları içerik olarak benzer özelliklere sahiptir. Bu nedenle evsel atıksularının özellikle sanayi atıksularından ayrı arıtmak arıtımı kolaylaştırmaktadır.

Evsel atık sularını gri atıksuları ve siyah atıksuları veya kanalizasyon suları olarak ikiye ayırabiliriz. Gri atıksularını ve siyah atıksularını ayrı depolamak arıtma işlemini kolaylaştırmaktadır. Gri atıksuyun arıtıldıktan sonra doğaya verilmesi mevcut olan temiz sularını kirlenmesini engelleyecektir. Bunun yanında elde edilen arıtılmış su tuvalet temizliğinde, park sulamalarında, yangın söndürme işleminde tekrar kullanılabileceğinden temiz su kullanımını azaltacaktır.

Atıksuların temiz su kaynaklarını kirletmemesi için ülkemizde yasa ve yönetmeliklerle aşağıdaki tedbirler alınmıştır (Gürü ve Yalçın 2010).

- İçme ve kullanma suyu olarak elde edilen yüzeysel sulara atıksu deşarjı yasaklanmıştır ve bu sularda balık avlanamaz, akaryakıt ile çalışan kayık, motor ve benzeri araçlar kullanılamaz.

- Evsel atıksuları, kanalizasyon suları, endüstriyel atıksuları, kimyasal atıklar ve petrol türevleri, içme ve kullanma suyu temin edilmeyen deniz, göl ve rezervuarlara doğrudan deşarj edilemez. Atıksuların kirlilik oranları,

yönetmelikte belirtilen oranlara gelinceye kadar arıtılmalı ve daha sonra deşarj edilmelidir.

- Çok tehlikeli maddeleri içeren atıksuların insan sağlığına zarar vermesi ve biyolojik arıtmayı engellemesi sebebiyle yer altı ve yer üstü sulara deşarjı yasaklanmıştır.

Atıksularının arıtılmasıyla ilgili birçok metodlar mevcuttur. Atıksuların arıtılması, fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma sistemleri olarak 3 ana gruba ayırabiliriz. Fiziksel arıtma yöntemleri sayesinde atıksu içindeki askıdaki katı maddeler uzaklaştırılabilmektedir. Kimyasal arıtmada atıksuda bulunan fosfatlar ve bazı ağır metaller giderilir. Biyolojik arıtmada ise bakteriler yardımı ile atık su içinde bulunan organik bileşikler parçalanarak arıtılır.

Kimyasal arıtma yöntemlerinden biri olan kimyasal çöktürme prosesinde, atıksuya çöktürücü (koagülant) katılması ile askıdaki katı maddeler çökeltilir. Çöktürücü olarak kullanılan başlıca kimyasal maddeler alüminyum ve demir bazlı maddelerdir. Kimyasal Çöktürme esnasında çöktürücülerin daha hızlı çökelmesini sağlamak için polielektrolit kullanılmaktadır.

Kimyasal Çöktürme'den (KÇ) önce ön çalışma olarak "jar testi" yapılır. Jar testi ile kimyasal çöktürmede atıksuya hangi aralıklarda çöktürücü eklenmesi ve hangi pH aralıklarında verimin fazla olabileceği taslak olarak belirlenmektedir. Jar testinde belirlenen aralıklarda deney tasarımı yapılarak kimyasal çöktürme deneyleri yapılır. Deney sonunda elde edilen arıtılmış numunelerin kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve bulanıklılık değerleri ölçülerek optimum hangi pH değerinde ve hangi çöktürücü miktarında eklenmesi gerektiğinde verimin fazla olacağı optimizasyon çalışmaları ile hesaplanmaktadır.

Elektrokoagülasyon arıtım sistemleri, KÇ'ye oranla daha yüksek verim elde edilmesi ve işletme kolaylığı nedeniyle gelecekte çok daha fazla kullanım alanı bulacağı tahmin edilmektedir (İlhan 2007). Elektrokoagülasyon atıksuya elektrik akımı vermek suretiyle elde edilen arıtım sistemidir. Elektrokoagülasyonda genel olarak alüminyum ve demir olmak üzere iki elektrot kullanılır. Elektrokoagülasyonda kullanılan elektrot cinsi, atıksuyun pH, iletkenlik değerleri, akım ve elektroliz zamanı elektrokoagülasyon verimini etkileyen faktörlerlerdir. Elektrokoagülasyonun en yüksek verim arıtım sağlanması amacıyla bu bağımsız değişkenlerde optimizasyon çalışması yapılmaktadır.

Kimya mühendisliğinde, matematiksel modellerin geliştirilmesi için parametre hesaplaması büyük önem taşımaktadır. Doğrusal olmayan modellerin parametrelerinin hesaplanması ve istatiksel analizi oldukça güçtür. Kimyasal Çöktürme ve elektrokoagülasyonu etkileyen bağımsız değişkenlerde elde edilen KOİ ve bulanıklık sonuçları, Design Expert 7.0 Programına aktarılarak Cevap Yüzey Yenileme (CYY) Metodu yardımı ile 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafikleri çizilebilir. Bu grafikler en yüksek verimin hangi bağımsız değişkenlerde sağlandığını göstermektedir.

Kuş ve balık sürülerinin yiyecek kaynağı bulabilmesinden esinlenerek tasarlanmış olan ve doğrusal olmayan problemlerin çözülmesinde kullanılan Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) da optimizasyon çalışmalarında önemli bir yere sahiptir. ANOVA'dan elde edilen model denklemler, Matlab 14.0'de yazılan PSO Programına aktarılarak en yüksek KOİ ve bulanıklık giderimlerinin elde edildiği optimum bağımsız değişkenler bulunmaktadır.

Arıtım esnasında optimum bağımsız değişkenlerin sabit tutulması KOİ ve bulanıklık giderimi verimi açısından önem arzetmektedir. Ölçülebilen değişken olan pH'ın arıtım esnasında sabit tutulması arıtımın verimi için kritikdir. Bu çalışmada, PID parametreleri, geleneksel yöntem olan Cohen Coon yönteminin yanında PSO algoritmaları ve Yer çekimsel Arama Algoritmaları (YÇAA) ile bulunmuştur. Herbir PID parametrelerinde, pH'ın set değeri izleme performanslarıyla karşılaştırılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1 Evsel Atıksu

March vd. (2004) tarafından, otelde grisular tuvalet temizliğinde kullanılmasını sağlayan bir sistem oluşturulabileceği belirtilmiştir. Bu sistem de filtreleme ve sedimentasyon işlemi mevcut olduğu ve son olarak hipoklorit kullanılarak dezenfeksiyon yapılabileceği bildirilmiştir. Otelde kullanılan suyun yaklaşık % 23'ünün tekrar kullanılabileceği ve oranın ekonomik olarak hesaplandığında karlı olacağı belirtilmiştir.

Feng vd. (2013) tarafından, evsel atıksuyunu Kimyasal Çöktürme, adsorpsiyon, kimyasal çöktürme-adsorpsiyon $FeCl_3$-PAC (Aktifleştirilmiş Karbon-Demir Klorür) ve adsorpsiyon-kimyasal çöktürme ($FeCl_3$-PAC) olmak üzere dört arıtım metodu kullanarak arıtılmış ve arıtımın verimliliği Çözülmüş Organik Materyallerin (ÇOM) giderim verimlerine ve Trihalometan Formasyon Potansiyeline (THMFP) göre değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre $FeCl_3$-PAC arıtımının diğerlerine göre daha iyi olduğu belirtilmiştir.

Tran vd. (2012) tarafından, çevreyi olumsuz etkileyen yüksek oranda fosfat (P) içeren evsel atık suların arıtımı elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtılmıştır. Akım yoğunluğunun, bekleme süresinin ve ilk fosfat yoğunluğunun arıtım verimine etkisi incelenmiştir. En yüksek oranda P giderimi, 38.2 mA/cm^2 akım yoğunluğunda ve 20 dakika arıtım süresinde elde edilmiştir. Elektrokoagülasyonda elektrot olarak demir kullanmıştır.

Bukhari (2008) tarafından, ön işlemden geçmemiş evsel sularını paslanmaz çelik elektrotları kullanılarak elektrokoagülasyon işlemine tabi tutulmuş ve toplam çöken katı atık, bulanıklık, biyolojik oksijen ihtiyacı (BOD) giderimleri incelenmiştir. 0.8 A

akımda ve 5 dakika arıtma süresinde toplam çöken katı atık % 95.4 oranında ortamdan giderilmiştir. 0.05 A ve 0.1 A gibi düşük akımlarda bulanıklık giderimi, ortamda toplam çöken katı atığın olması durumunda demirin bağlanması ile azaldığı belirtilmiştir. 0.8 A akımda ve 5 dakika arıtma süresinde, BOD % 99 oranında sistemden uzaklaştırılmıştır.

2.2 Kimyasal Çöktürme (KÇ)

İsmail vd. (2012) tarafından, birleştirme ünitesindeki hidrolik teknik kullanılarak evsel atık suları arıtılmıştır. Kimyasal çöktürme, floklaşma ve sedimentasyon prosesleri içeren birleştirme ünitesinde, mekanik karıştırma yerine hidrolik karıştırma kullanılmıştır. Jar testi kullanarak uygun kimyasal dozları, karıştırma zamanı ve karıştırmanın arıtım verimine etkisi araştırılmıştır. Çöktürücü olarak, alüminyum sülfat ($A1_2(SO_4)_3.18H_2O$), demir klorür ($FeCl_3.6H_2O$), demir sülfat ($Fe_2(SO_4)_3$), demir sülfat hepta hidrat ($FeSO_4.7H_2O$) ve kireç ($Ca(OH)_2$) kullanılmıştır. Ayrıca doğal çöktürücü olarak çitosan ve çitosan türevleri de kullanılmıştır. Bu çöktürücülerin çökmesini artırmak için sentetik organik polielektrolitler kullanılmıştır. KOİ, BOD, TSS ve PO_3^- giderme oranı, kullanılan $AlSO_4$ miktarları 60 mg/L'ye kadar arttıkça arttığı görülmüştür. Optimum olan 60 mg/L $AlSO_4$ dozda KOİ, BOİ, TSS ve PO_3^- giderim değerleri sırasıyla % 61, % 53, %77 ve %73 olduğu görülmüştür. 80 mg/L doza kadar demir sülfat miktarı arttıkça KOİ, BOİ, TSS ve PO_3^- giderme oranının arttığı belirtilmiştir. Demir sülfat ile birlikte demir iyonlarının kullanılması giderim verimlerini artırmıştır. 20 mg/L'ye kadar kireç miktarı arttıkça KOİ, PO_3^- giderimleri arttığı ve 20 mg/L'den daha fazla eklenmesi giderimleri etkilemediği belirtilmiştir. Tavsiye edilen pH değeri 6-9 civarında olduğu bildirilmiştir.

Ma vd. (2009) tarafından, KÇ prosesi fenton prosesi birlikte kullanılarak su bazlı mürekkep atıksu arıtılmıştır. 30 dakika da, pH 4 değerinde, 50 mg/L miktarda H_2O_2 ve 25 mg/L miktarda $FeSO_4$ ve % 92.4 KOİ giderimi ve % 86.4 renk giderimi elde edilmiştir. Bunun yanında KÇ arıtımında pH 9 değerinde, 700 mg/L PAC ve 300 mg/L $FeSO_4$ çöktürücü eklendiğinde renk giderimi veriminin arttığı gözlenmiştir. KÇ ile

fenton prosesinin birlikte kullanılması ile renk giderimi, KOİ ve toplam çöken katı madde giderimi sırasıyla %100, %93.4 ve %87.2 elde edilmiştir.

Aygün ve Yılmaz (2010) tarafından, deterjan ihtiva eden atıksu, demir klorit çöktürücü maddesi kullanarak kimyasal çöktürme-floklasyon yöntemi ile arıtılmıştır. Çökelmenin daha iyi oluşabilmesi için yardımcı çöktürücüler olan polielektrolitler ve kil mineraller (montmorillonite ve bentonite) kullanılmıştır. Atıksuyun karakteristik özelliği, organik kirleticilerin konsantrasyonu veya atıksuyun KOİ'si çok yüksek iken (24.3 g/L), BOİ çok düşük çıktığı belirtilmiştir. BOİ/KOİ oranı çok düşük çıktığından, deterjanlı atıksuyunu kimyasal arıtım ile arıtım yapılmasının uygun olduğu bildirilmiştir. Demir klorür dozu 0.5-3 g/L arasında, polielektrolitin ve kil minerallerin konsantrasyonu 5-75 mg/L ve 25-750 mg/L aralığındadır. pH 11 ve demir klorür 2 g/L dozunda en yüksek 71 % KOİ giderimi elde edilmiştir. Yardımcı çöktürücü eklenmesi uzaklaştırma verimini artırmıştır. 500 mg/L demir çöktürücü ile birlikte kil çöktürücülerle kullanılması % 84 KOİ giderimini ve polielektrolit kullanılması ise % 87 KOİ giderimi sağladığı tespit edilmiştir.

Trinh ve Kang (2011) tarafından, kimyasal çöktürme-floklasyon yöntemi kullanılarak içme suyu arıtılmıştır. Arıtılma esnasında öncelikle jar test uygulanmış. Jar testinden elde edilen numunelerin bulanıklık ve Çözülmüş Organik Karbon (ÇOK) özelliklerine göre Cevap Yüzey Yenileme Metodu (CYY) programı kullanılarak optimum çöktürücü miktarları araştırılmıştır. Polialüminyum klorür (PACl) ve alüm çöktürücüleri karşılaştırılmıştır. Arıtımın optimum koşulları, 0.11 mM PACl, pH 7.4 ve 0.15 mM alüm, pH 6.6 olarak bulunmuştur. PACl kullanıldığında % 91.4 bulanıklık giderimi ve % 31.4 ÇOK giderimi, alüm kullanıldığında %86.3 bulanıklık ve % 34.3 ÇOK giderimi elde edildiği belirtilmiştir.

AlMubaddal vd. (2009) tarafından, Polivinil klorür (PVC) fabrikasında elde edilen atıksular Kimyasal Çöktürme işlemine tabi tutulmuştur. Klor bazlı (lateks gibi) katı materyaller içeren atıksuya, $Al_2(SO_4)_3$, $FeCl_3$ and $CaCl_2$ çöktürücüler ve suda eriyebilen polielektrolitler (PE) eklenmiştir. PH 6-8 aralığında, $Al_2(SO_4)_3$ 2 ml'den 10 ml'ye kadar

farklı dozlardaki sonuçlar karşılaştırılmıştır. $Al_2(SO_4)_3$ miktarı arttıkça genel olarak bulanıklılık azaldığı ve 7.5 ml değerinde en iyi bulanıklık gideriminin elde edildiği belirtilmiştir. Aynı Şekilde % 2.5 $FeCl_3$ çözeltisinin 4 ml eklenmesi ile en iyi bulanıklık giderimi elde edildiği gözlenmiştir Alüminyum sülfat polielektrolit ile birlikte kullanıldığında daha iyi sonuç alınırken, $FeCl_3$ ve $CaCl_3$ maddelerinin polielektrolit ile kullanılması sonucu değiştirmemiştir.

2.3 Elektrokoagülasyon

Isa vd. (2014) tarafından, elektrokoagülasyon yöntemi ile atıksudan bor'u uzaklaştırılmıştır. Box-Behnken Model modelini ve Cevap Yüzey Yenileme Metodunu (CYY) kullanarak optimum koşullar araştırılmıştır. pH 6.3, akım yoğunluğu 17.4 mA/cm^2 ve 89 dakika parametrelerinde en yüksek bor uzaklaştırılması elde edilmiştir. Ayrıca bor giderimi akım ve arıtım zamanı arttıkça arttığı görülmüştür. pH 4'ten 7'ye giderken boron giderimi artarken, pH 7'den 10'a doğru bor gideriminin azaldığı gözlenmiştir.

Can (2010) tarafından, elektrokoagülasyon yöntemi ile sulu çözeltilerden arsenik ve borun giderilmesindeki parametreleri belirleme üzerine çalışılmıştır. Başlangıç pH, akım yoğunluğu, başlangıç arsenik ve bor konsantrasyonu, karıştırma hızı, elektrot malzemesi ve destek elektrolit türü ve konsantrasyonu gibi parametrelerin etkisi gözlenmiştir. Alüminyum elektrotla hem arsenik hem de bor giderimi yapılırken, demir elektrotla sadece arsenik giderimi yapılabilmiştir. Çözeltinin başlangıç pH değeri 4'de, en yüksek arsenik ve bor giderimi elde edilmiştir. Akım yoğunluğu arttıkça arsenik ve bor gideriminin arttığını görülmüştür.

Un vd. (2014) tarafından sürekli elektrokoagülasyon reaktörü tasarımı yaparak peynir atıksuyunu arıtımı yapılmıştır. Dönen demir anot geliştirilmiştir. Akım yoğunluğu, pH ve arıtım zamanı parametrelerinin KOİ'ye etkisi Cevap Yüzey Yenileme Metodu (CYY) kullanılarak araştırılmıştır. KOİ giderimi % 86.4 değerine kadar giderebilmiştir.

Bassam vd. (2012) tarafından, demir elektrot bulunan ve monopolar kesikli reaktör kullanılan elektrokoagülasyon arıtım sistemiyle, atık sulardan Cu (bakır), nikel, çinko ve manganese (Mn) giderimi araştırılmıştır. Akım yoğunluğu 2-25 mA/cm^2, ilk konsantrasyon 50- 250 mg/L aralığında ve pH (3, 6.98, 8.95) değerlerinde uygun parametreler araştırılmıştır. 250 mg/L başlangıç konsantrasyonuna sahip olan atıksudan ağır metaller uzaklaştırılabilmiştir. Ayrıca, pH 8.95 değerinin ağır metalleri uzaklaştırmak için en iyi değer olduğu belirtilmiştir. 25 mA/cm^2 akım yoğunluğunda, 49 kWh/m^3 enerji harcandığı tespit edilmiştir. Mn % 72.6 oranında, Cu (bakır), Nikel ve Çinko % 96 oranda uzaklaştırılmıştır.

Li vd. (2011) tarafından, elektrot tipi, akım yoğunluğu, elektroliz zamanı, Cl^- konsantrasyonu ve pH'ı değiştirerek atık yakma suyu elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtılmıştır. Arıtma işleminden sonra KOİ ve amonyak azotun (NH_3-N) giderimi incelenmiştir. Demir elektrot kullanılan, 4.96 mA/cm^2 akım yoğunluğu, Cl^- derişimi 2319 mg/L olan ve 90 dakika elektroliz süresinde % 49.8 KOİ ve % 38.6 NH_3-H giderimi elde edilmiştir. 30 dakika elektroliz süresinde demir elektrot kullanılarak yapılan elektrokoagülasyonda KOİ % 32.7 ve NH_3-H % 24.8 elde edilmiş ve Al elektrot kullanılarak ise % 21.3 KOİ ve % 20.8 NH_3-H giderimi sağlanmıştır. Elektroliz süresinin uzaması ile KOİ giderimi % 18.8 'den % 45'e ve NH_3-N giderimi ise % 9.4'ten % 44.1'e kadar arttırılmıştır. Elektrik enerjisinde tasarruf sağlamak için NaCl eklenmiş ve elektriksel iletkenlik arttırılmıştır. 30 dakika elektroliz süresinde, 2.98 mA/cm^2 akım yoğunluğunda 819, 1500, 2000, 2500 ve 3000 mg/L Cl^- konsantrasyonun artmasıyla KOİ giderimi % 29.8'den % 38.9'a ve NH_3-N giderimi ise % 23.5'den % 32.6'a arttığı görülmüştür. Fakat Cl^- derişiminin 2500 mg/L'den yüksek değerlerde KOİ ve NH_3-N gideriminde değişiklik görülmemiştir. Ekonomik olarak en uygun Cl^- derişimini 2000 ile 2500 mg/L değerinde olduğu bulunmuştur.

Akyol (2012) tarafından, boya üretim atıksuyu (PMW) elektrokoagülasyon ile arıtılmıştır. Optimum operasyon koşulları pH 6.95, akım yoğunluğu 35 A/m^2 ve işletim süresi 15 dakika olarak bulunmuştur. PMW'nin KOİ ve TOK giderimi Fe elektrot tipi için sırasıyla % 93, % 88 ve Al elektrot tipi için % 94 ve % 89'dür. Akım yoğunluğunu

35 A/m^2 üzerine çıkarılması KOİ ve TOK giderimini değiştirmediğini belirtmişlerdir. Optimum koşullarda Fe ve Al elektrot tipleri için işletme maliyeti 0.187 €/m^3 ve 0.129 €/m^3'tür. Al elektrotun performansının Fe elektrotundan daha iyi olduğu görülmüştür. Elektrokoagülasyon prosesinde optimum koşullarda çöken çamur miktarı demir elektrot için 9.63 kg/m^3 ve Al elektrot için ise 7.73 kg/m^3'tür.

Chavalparit ve Ongwandee (2009) göre, transesterleşme metodu ile üretilen biyodizel prosesinde, yüksek miktarda KOİ ve yağ ve gres (O&G) içeren çok büyük miktarda atıksu oluşmaktadır. Biyodizel atıksuları, farklı pH, uygulanan voltaj ve elektroliz süresi parametrelerini değiştirerek elektrokoagülasyon ile arıtılmıştır. Box-Behnken dizayn, Cevap Yüzey Yenileme (CYY) kullanılarak arıtılan atıksuyun KOİ, O&G ve toplam çöken katı maddeleri (SS) analiz edilerek optimum koşullar bulunmuştur. KOİ, O&G ve SS giderimleri sırasıyla % 55.43, % 98.42 ve % 96.59 ve 6.06 pH, 18.2 V ve 23.5 dakika elektroliz süresiniz optimum koşullar olduğu belirtilmiştir.

2.4 Elektrokoagülasyon (EK) ve Kimyasal Çöktürme (KÇ)

Can vd. (2006) tarafından, EK ve KÇ arıtım yöntemlerini kullanarak tekstil atıksu arıtılmış KOİ giderimi incelenmiştir. KÇ arıtımında Poliamide Klorür (PAC) veya alüm çöktürücü kullanılmıştır. KÇ pH 5.5 değerinde PAC ve 0.32 kg/m^3 dozajında eklendiğinde KOİ giderimi % 78 olduğu ve PAC çöktürücüsü kullanılarak yapılan KÇ, ($AlCl_3.6H_2O$) gibi alüminyum tuzu eklemekle verimin arttığı görülmüştür. Atıksu içinde Al bulunması $Al(OH)_3$ çökeltinin uzaklaştırılmasını kolaylaştırdığından, EK arıtımının performansının artırdığını ve elektrik enerji tüketimini azaldığı belirtilmiştir. Sonuç olarak 5 dakika arıtım esnasında 0.8 kg PAC/m^3 eklenmesi ile % 23 olan KOİ giderimini, % 78'e kadar yükseltmiştir. Elektrokoagülasyon arıtımda Al eklenmesi ve kimyasal çöktürmede ise PAC kimyasal maddesinin, $AlSO_4$'a göre çok daha etkili olduğu gözlenmiştir.

İlhan vd. (2008) tarafından, elektrokoagülasyon arıtımını çöktürerek arıtım ile karşılaştırılmıştır. KÇ esnasında çöktürücü olarak ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ ve $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 7H_2O$) kullanılmıştır. 348 A/m^2 akım yoğunluğu ile yapılan elektrokoagülasyon arıtımı, kimyasal KÇ yöntemine göre daha yüksek performans gösterdiği görülmüştür. EK prosesi elektrot tipleri, akım yoğunluğu, pH'ı, arıtım maliyeti ve operasyon zamanı parametrelerinin KOİ ve NH_4-N (amonyak) giderimleri araştırılmıştır. EK işleminde alüminyum elektrot ile % 56 ve demir elektrot ile % 35 oranında KOİ giderilmiştir. Demir elektrot kullanılan, 30 dakika elektroliz süresinde, 348 mA/m^2 akım yoğunluğunda yapılan elektrokoagülasyon arıtımında % 32 KOİ ve kimyasal KÇ prosesinde % 22 KOİ oranda giderim sağlanılmıştır. Al elektrot kullanılarak 631 A/m^2 akım yoğunluğunda 30 dakika elektroliz süresinde yapılan elektrokoagülasyonda % 59 KOİ ve % 14 amonyak giderilmiştir. Yukardaki sonuçlar ışığında elektrokoagülasyon işleminin KÇ göre daha iyi olduğu belirtilmiştir.

Ngamlerdpokin vd. (2011) tarafından, biyodizel atıksuları KÇ ve elektrokoagülasyon teknikleri kullanılarak arıtılmıştır. Yağ asidi metil ester (FAME veya biyodizel) ve serbest yağ asidi (FFA) farklı tip mineral asitleri kullanılarak H_2SO_4, HNO_3 ve HCl farklı pH değerlerinde (1.0-8.0) kimyasal olarak uzaklaştırılmıştır. Optimum olarak H_2SO_4 kullanıldığında ve pH 2.5-7 aralığında 24.3 ml/l FAME/FFA giderilmiştir. KOİ, $BOİ_5$ ve yağ&gres giderilme oranları sırasıyla % 38.94, % 76.32 ve % 99.36 olduğu gözlenmiştir. Asit çözeltisi ile FAME/FFA ayrıldıktan sonra Kimyasal Çöktürme ve elektrokoagülasyon arıtımı yapılmış ve her iki arıtımında etkili olduğu bulunmuştur. Kimyasal Çöktürmenin işletme maliyeti 1.11 USD/m^3 iken elektrokoagülasyonun işletme maliyeti 1.78 USD/m^3 olarak hesaplanmıştır.

Kartal vd. (2008) tarafından, Kimyasal Çöktürme ve elektrokoagülasyon yöntemleri kullanılarak zeytinyağı karasuyundan organik maddeler giderilmeye çalışılmıştır. Sönmüş kireç $Ca(OH)_2$, demir(III) klorür hepta hidrat ($FeCl_3.6H_2O$), alüminyum sülfat ($Al_2(SO_4)_3.18H_2O$) ve demir bazlı ticari çöktürücüler kullanılmıştır. Kireç koagulant kullanıldığında pH 11'de KOİ ve TOK giderimleri % 49 ve % 38, pH 7.0'de 1000 mg/L $FeCl_3$ dozunda % 44 ve % 53, pH 6.5'da $AlSO_4$ 1500 mg/L dozunda % 40 ve % 36 ve

demir bazlı ticari bir çöktürücü kullanıldığında ise % 46 ve %43 olarak bulunmuştur. Çelik elektrotlar kullanılan elektrokoagülasyon prosesinde % 60 KOİ ve % 65 TOK giderimi elde edilmiştir.

Özyonar ve Karagözoğlu (2012) tarafından, içme suyun bulanıklılığı elektrokoagülasyon ve Kimyasal Çöktürme arıtım yöntemleri ile giderilmeye çalışılmıştır. Elektrotu monopolar paralel bağlı ve elektrot olarak demir ve alüminyum elektrotları kullanılmıştır. Bulanıklık giderimine elektrot türü, başlangıç pH'ı, akım yoğunluğu ve elektroliz süresinin etkisi araştırılmıştır. Her iki elektrot türünde optimum koşullar pH 7.9, akım yoğunluğunun 10 A/m^2 ve 3 dakika elektroliz süresi olarak bulunmuştur. $Al_2(SO_4)_3.18H_2O$, $FeSO_4.7H_2O$, $FeCl_3.6H_2O$ çöktürücü maddeleri kullanılan Kimyasal Çöktürme prosesinde en uygun başlangıç pH değeri 7.9 ve çöktürücü tozu ise 20 mg Me^+/L olarak bulunmuştur. Elektrokoagülasyon prosesinin, kimyasal çöktürme prosesine göre bulanıklık giderim veriminin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

2.5 Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)

Alfi ve Modares (2011a) tarafından, Adaptiv Parçacık Sürü Optimizasyonu (APSO) algoritmasını kullanarak optimum kontrol parametreleri ve optimum sistem parametreleri hesaplanması yapılmıştır. APSO algoritmalarının daha hızlı Şekilde ve daha doğru bir Şekilde sonuca götürdüğü tespit edilmiştir.

Liu (2012) tarafından, üç boyutlu ısı kondüksiyon problemlerin zamana göre sıcaklık problemleri PSO kullanılarak araştrılmıştır. Sıcaklığı bilinen dış yüzeyden sıcaklığı bilinmeyen iç yüzeyin sıcaklık flux'ı PSO yardımıyla oluşturulmuştur.

Esmin ve Lambert-Torres (2012) tarafından, güç kaybının minumum olacak Şekilde rekongurasyon dağıtım sistemi problemlerini PSO ile optimizasyonu yapılmıştır. Lineer olmayan optimizasyon problemi formüle edilerek PSO algoritmasına uygulanmıştır.

2.6 PSO-PID Kontrol Edici

Chang ve Shih (2010) tarafından, optimum PID kontrol edicilerinin kazançları (Kp, Ki ve Kd) PSO ile araştırılmıştır. Nonlineer sistemlerde optimum PID kazançları bulmak için popülasyonda hız ve pozisyon denklemleri kullanılmıştır. Ayrıca PID kontrol edici optimizasyon problemleri minimize edilmiştir.

Kao vd. (2006) tarafından, kaydırıcılı-vuruş mekanizmaya PSO kullanılarak kendinden ayarlamalı PID kontrol edici tasarlanmıştır. PSO algoritmayı sistem mekanizmasına nasıl uygulandığı anlatılmıştır. Hızlı-ayarlamalı optimum PID kontrol edici parametrelerinin oldukça yüksek kalitede sonuç verdiğini belirtmişlerdir. PSO ilk PID parametreleri ve optimum parametrelerde kontrol edilebildiği tespit edilmiştir.

Kocaarslan ve Tiryaki (2010) tarafından, Ankara-Çayırhan Termik Santralinin birinci ve ikinci ünitelerini kapsayan bir modelin (300 MW) güç ve entalpi çıkışlarını kontrol etmek için modern kontrol yöntemleri kullanılmıştır. Parçacık Sürü Optimizasyonu tabanlı bir oransal-integral-türev (PSO-PID) kontrol edici ve kazançları bulanık mantık kuralları ile programlanan oransal-integral (FGPI) kontrol edici elektrik santralı modeli uygulanmıştır. Simulasyon sonuçları, bu çalışmada geliştirilen her iki kontrol edicinin bu modele ait güç ve entalpi çıkışlarının oturma zamanı ve aşma değeri üzerinde farklı etkilerinin olduğu görülmüştür. Parçacık sürüsü optimizasyonu yöntemini kullanmak amacıyla Matlab 7.1 programında bir yazılım geliştirilmiş ve modeli alınan termik elektrik santralının güç ve entalpi çıkışları için ayrı ayrı optimizasyon yapılmıştır. Sistem girişine birim adım uygulanmış ve Simulink modeli üzerinden Hata performans kriterleri, her iterasyonda “hata.mat” dosyasına kaydedilerek optimizasyon yazılımına girdi yapılmıştır.

Zamani vd. (2009) tarafından, otomatik voltaj düzenleyicisine (AVR) PID kontrol ediciye kesikli mertebe uygulamaları (FOPID) üzerine çalışmışlardır. Kontrol edici beş adet parametreleri belirlemektedir. FOPID model diğerlerine göre oldukça gelişmiş bir model olduğunu belirtmişlerdir.

Jadhav ve Vadirajacharya (2012) tarafından, güç kaynağının bağlantılarının yük frekansı kontrolünde PID kontrolü kullanımı üzerine çalışılmıştır. PSO kullanılarak PID optimum parametreleri bulunmuş ve sonuçlar Ziegle-Nicholas method ile bulunan PID parametrelerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. PSO parametreleri ile yapılan PID kontrol edici deneylerinde daha kısa sürede set noktasına ulaştığı sonucuna varılmıştır.

Nasri vd. (2007) tarafından, lineer DC motorun hızını kontrol etmek için PSO metodu kullanılarak PID parametreleri bulunmaya çalışılmıştır. Simulink üzerine DC motorun modellenmesi yapılmış ve MATLAB ile PSO algoritmaları bulunmuştur. Ayrıca, Genetik Algoritma (GA) ve lineer kuadratik regulator (LQR) metodları ile sonuçlar karşılaştırılmıştır. PSO algoritmaları ile yapılan PID kontrol edicinin Hata performans kriterlerinin azalmasında, set değerine daha kısa zamanda ulaşmasında ve sapma değerlerinin azalmasında çok etkili bir metod olduğu sonucuna varılmıştır.

Abdulla ve Abdulkareem (2012) tarafından, mobil robotlar için PSO metodu kullanarak optimum (oransal- integral-türevsel) PID parametreleri bulunmuştur. Mobil robotlar Simulink ve PSO algoritmaları Matlab programı kullanılmıştır. Simulasyon sonuçlarının iyi olduğu belirtilmiştir.

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1 Evsel Atıksu

Temiz su kaynaklarından elde edilen su, insani ihtiyaçların giderilmesi amacıyla kullanıldıktan sonra evsel atıksu olarak tahliye edilmektedir. Evsel atıksular evlerde kullanılan (banyo, mutfak ve tuvalet) suların toplamıdır. Evsel atıksularının yapısını incelediğimizde askıda, kollaidal ve çözünmüş halde organik ve inorganik maddeler olduğunu görebiliriz. İnsanların yaşam standartları ve kültürel alışkanlıkları atıksu bileşenlerini önemli oranda etkilemektedir.

Çizelge 3.1 Evsel atıksu birleşenleri (Gürü ve Yalçın 2010)

Kirletici Birleşenler	Konsantrasyon		
	Zayıf	Orta	Kuvvetli
Toplam Katı Maddeler, mg/L	350	720	1200
Çözünmüş Katı Maddeler, mg/L	250	500	850
Uçucu Katı Maddeler, mg/L	105	200	325
Sabit Katı Maddeler, mg/L	145	300	525
Askıdaki Katı Maddeler, mg/L	100	220	350
Çökebilen Katı Maddeler, mg/L	5	10	20
$BOİ_5$, (20^0 C), mg/L	110	220	500
Toplam Organik Karbon, mg/L	80	160	290
KOİ, mg/L	250	500	1000
Azot, Toplam, mg/L	20	40	85
Organik Azot, mg/L	8	15	35
Amonyak, (N olarak), mg/L	12	25	50
Nitrit, (N olarak), mg/L	0	0	0
Nitrat, (N olarak), mg/L	0	0	0
Fosfor, Toplam, mg/L	4	8	15
Organik Fosfor, mg/L	1	3	5
Inorganik Fosfor, mg/L	3	5	10
Klorür, mg/L	30	50	100
Sülfat, mg/L	20	30	50
Alkalinite, ($CaCO_3$ olarak), mg/L	50	100	200
Yağ, mg/L	50	100	150

Atıksu içindeki kirletici bileşen konsantrasyonu su tüketimi miktarına göre değişmektedir (Gürü ve Yalçın 2010). Genel olarak evsel atıksu bileşenleri zayıf, orta ve kuvvetli olmak üzere gruplayarak çizelge 3.1'de kısaca özetleyebiliriz.

Evsel atıksularının birleşenleri ve çevreye etkileri çizelge 3.2'de verilmiştir. Atıksuların arıtımı ve arıtılan suyun sulama, tuvalet temizliğinde vb. kullanılması su ihtiyacını karşılayacağı gibi atıksuların çevreye olumsuz etkilerini de ortadan kaldıracaktır.

Çizelge 3.2 Evsel atıksu birleşenleri ve çevreye etkileri (Erdoğan, 2005).

Bileşen		**Çevresel Etkiler**
Mikroorganizmalar	Patojen bakteriyeler, virüsler kurtlar vb.	
Biyolojik olarak ayrışabilen organik		Göl ve nehirlerde oksijeni tüketmek
Diğer organik maddeler	Deterjanlar, azot, fosfor, amonyak, fenol vb.	Toksik etki, biyokümülasyon
Besi maddeleri	Azot, fosfor, amonyak,	Ötrofikasyon, oksijen eksikliği, biyokümülasyon
Metaller	Hg, Pb, Cd, Cr, Cu, Ni	Toksik etki
Diğer organik maddeler	Asitler, bazlar	Korozyon, toksik etki
Termal etkiler	Sıcak su	Yaşam koşullarına etki
Tat koku	Hidrojen sülfür	Estetik rahatsızlık, toksik etki
Radyoaktivite		Toksik etki, biyokümülasyon

3.1.2 Kirlilik derecesini belirleyen kriterler

Atıksuların kirlilik derecesini belirlemede kiriterleri, çözünmüş oksijen, askıdaki katı maddeler, çökebilen katı maddeler (ÇKM), biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ), kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), toplam organik maddeler, azotlu bileşikler, fosforlu bileşikler, gres ve yağlar ve deterjanlar olarak sıralayabiliriz.

Çözünmüş Oksijen (DO): Oksijen suda az çözünebilen bir gaz olup ancak hava ile temas eden suda oksijen olmaktadır. Oksijen bulunan suda ancak fotosentez olayı gerçekleşir. Bakteriler ise ancak oksijen sayesinde biyolojik parçalanmayı sağlar. Suda bulunan oksijenin azalması ise sudaki biyolojik olayları durduracağından anaerobik çürüme ve kokuşma başlar. Atıksularda ise organik bileşiklerin parçalanması sonucu oksijen hızla azalır. Bu nedenle arıtma tesislerinde mikrobiyolojik parçalanma gerçekleşebilmesi için belli bir basınçta pompalanır (Gürü ve Yalçın 2010).

Askıdaki katı maddeler (SS): Su içinde çözünmemiş katı maddelerdir. Askıdaki katı maddelerin bazıları iri parçalar halindedir. İri parçalar çökebilmektedir. Toplam askıdaki katı maddeler hesaplanması, belli bir miktar atıksu alınır ve 0.45μm çaptaki porselen süzgeçten veya filtre kağıdından süzüldükten sonra kalıntı 105°C sıcaklıktaki etüvde kurutularak, toplam askıdaki katı maddeler bulunur (Gürü ve Yalçın 2010).

Çökebilen katı maddeler: Atıksu içinde bazı katı maddeler kabın dibine çökerek birikebilen maddelere denir. Çökebilen katı maddeler "imhoff konisi" kullanılarak 45 dakika içinde koni dibinde toplanan maddeler ölçülerek tayin edilir (Gürü ve Yalçın 2010).

Biokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ): Biyokimyasal oksijen ihtiyacı veya biyolojik oksijen ihtiyacı sudaki organik maddelerini mikroorganizmaların ayrıştırmak için 5 günde harcadığı oksijen miktarı $BOİ_5$ ile ifade edilmektedir. Atıksu arıtma tesislerinde suyun kirliliğini ölçmek amacıyla kullanılır. Bir suyun BOİ değerinin yüksek olması, o suyun kirliliğin o derece yüksek olduğunu gösterir. En basit organik bileşiklerin bile biyokimyasal olarak bakteriler yardımı ile parçalanması uzun zaman almaktadır. Ayrıca BOİ ölçümünde deneysel hata oranı yüksektir.

Glikozun bakteriler tarafından parçalanması;

$$C_6H_{12}O_6 + 3O_2 + \text{Bakteri} \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O \qquad (3.1)$$

Azotlu bileşiklerin nitrifikasyonu;

$$2NH_3+3O_2+\text{Bakteri} \rightarrow 2NO_2^- +2H^+ +2H_2O \quad (3.2)$$

$$2NO_2+ O_2 +2H^+ \rightarrow 2NO_3^- +2H^+ \quad (3.3)$$

Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ): Kimyasal olarak oksitlenebilen organik ve inorganik yükseltgenebilir maddelerin oksijen ihtiyacı KOİ ile belirtilir. Asit ortamda potasyum dikromat gibi kuvvetli bir kimyasal oksitleyici olan kimyasal maddeler vasıtasıyla ölçülür. Kimyasal olarak oksitlenebilen bileşikler, biyokimyasal olarak daha iyi oksitlenebileceklerinden KOİ değeri BOİ değerine göre daha büyüktür. Atıksular için $BOİ_5$/KOİ=0.4-0.8 (ortalama 0.65) alınabilir (Sinan 2010).

Bir atıksuyun kimyasal oksijen ihtiyacını belirlemek için, belli miktarda alınan atıksu numunesi sülfirik asitli ortamda belli hacimde primer standart olan potasyum dikromat ile reaksiyona girer. Organik maddelerin daha kolay parçalanmasını sağlamak için gümüş sülfat katılır. Oluşan reaksiyon aşağıda verilmiştir.

$$\text{Organik maddeler} + KCr_2O_7 \rightarrow CO_2 + H_2O + K_2Cr_2O_7 \quad (3.4)$$

Kalan dikromat miktarı molaritesi bilinen demir çözeltisi ile titre edilir.

$$Cr_2O_7^{-2} +6\ Fe^{+2} +14\ H^+ \rightarrow 2Cr^{+3} + 6\ Fe^{+3} + 7\ H_2O \quad (3.5)$$

Bulanıklık: Sudaki bulanıklık suda bulunan organik, inorganik maddelerden, mikroskobik organizmaların neden olduğu askıdaki maddelerden kaynaklanmaktadır. Bulanıklık suda ışığın saçılması veya absorbe edilmesine göre ölçülmektedir. Bulanıklık ölçüm cihazlarında, 90° C'lik açı ile yayılan ışık ile ölçülür.

1 NTU (Nefolometrik bulanıklık birimi) = 1FTU (formazin bulanıklık birimi)

Toplam Organik Madde: Atık suyun kirlilik derecesi atıksuyun yüksek sıcaklıkta yakılarak ve oluşan karbondioksiti toplayarak ölçülmesi ile tayin edilir.

$$C_xH_yO_z + O_2 \rightarrow x\ CO_2 + y/2\ H_2O \qquad (3.6)$$

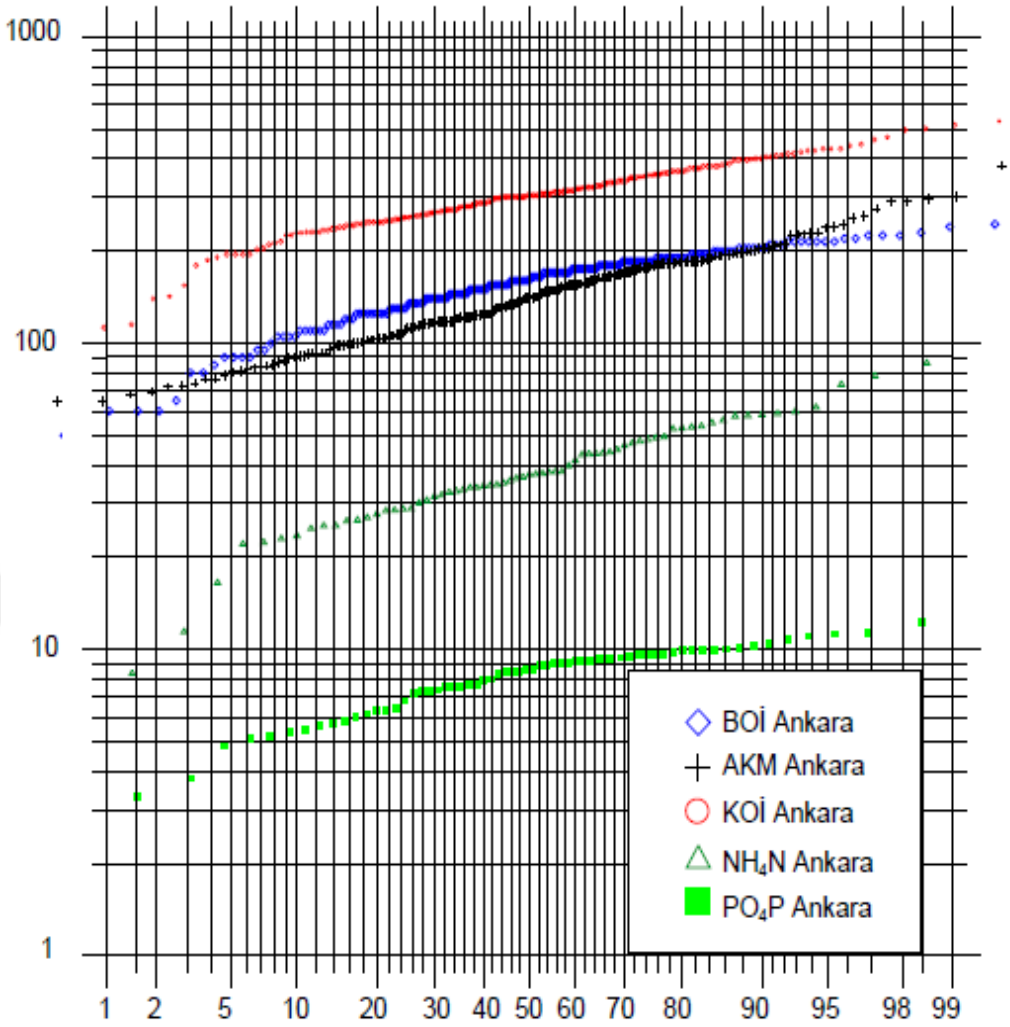
Yukardaki denklemde gördüğümüz gibi CO_2 miktarı bize karbon miktarını verecektir.

Azotlu Bileşikler: Proteinlerin temel yapısını oluşturan azot, özellikle kanalizasyon suları içeren evsel atıksularda fazla miktarda bulunur (15-20 mg/L) (Gürü ve Yalçın 2010). Mikroorganizmaların büyümesi için gerekli olan amonyak azotu (NH_4-N) ve nitrat azotu (NO_3-N) gibi besi elementleri içermektedir. Bu nedenle azot ihtiva etmeyen atıksularını biyolojik yöntemlerle arıtmak mümkün değildir.

Fosfor Bileşikleri: Evsel atıksular 4-15 mg/L oranında ortofosfat, polifosfat ve organik fosfor bileşikleri halinde fosfor bulunur. Deterjan ürünleri içeren ve dışkı atıklarındaki organik fosfor bileşikleridir. Fosforun yaklaşık %10'u askıdaki katı maddelerin içinde bulunur (Gürü ve Yalçın 2010).

Yağlar ve gresler: Katı halde bulunan yağ asitlerinin gliserin esterleri bitkisel ve hayvansal kökenli yağlardır ve kanalizasyon içeren evsel atıksularda bulunur. Mineral yağlar, petrol atıkları ve parafinleri gibi gres maddeler katı halde bulundukları için çökerler (Gürü ve Yalçın 2010).

Deterjanlar: Sülfanat grubu taşıyan organik bileşikler deterjanlar bulunmaktadır. Aromatik alkil benzil sülfanatlar (ABS) uzun süre parçalanmadan kalabildiği için kullanılması yasaktır. ABS yerine lineer alkil sulfanatlar (LAS) kullanılmaktadır. Ankara iline ait kirletici parametrelerinin % ihtimal değerleri şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1 Ankara Atıksu Arıtma Tesisi'nin kirletici parametrelerinin % ihtimal değerleri (Erdoğan 2005)

Nüfusun ve kentleşmenin artmasıyla birlikte temiz suya olan ihtiyaç artmaktadır. Bu nedenle evsel atıksularının arıtılıp tekrar kullanılması önem arzetmektedir. Evsel atıksularını grisu ve siyahsu olarak ikiye ayırabiliriz (March vd. 2004, Tarasenko 2009, Sarıoğlu 2011). Grisu banyosularını, çamaşır makinasını, bulaşık makinası sularını ve mutfak sularını içermektedir. Evsel atıksularının büyük bir kısmını oluşturan grisu daha az organik maddeler ve besinler içermektedir. Ayrıca üre, katı atık ve tuvalet kağıdı ihtiva etmemektedir (Sarıoğlu 2011). Yapılan araştırmalarda grisuyun $BOİ_5$:N:P değerleri 100:5:1 (Müllegger 2003) ve KOİ:NH_3:P değerleri 1030:2.7:1 (Jefferson 1999) olarak bulunmuştur.

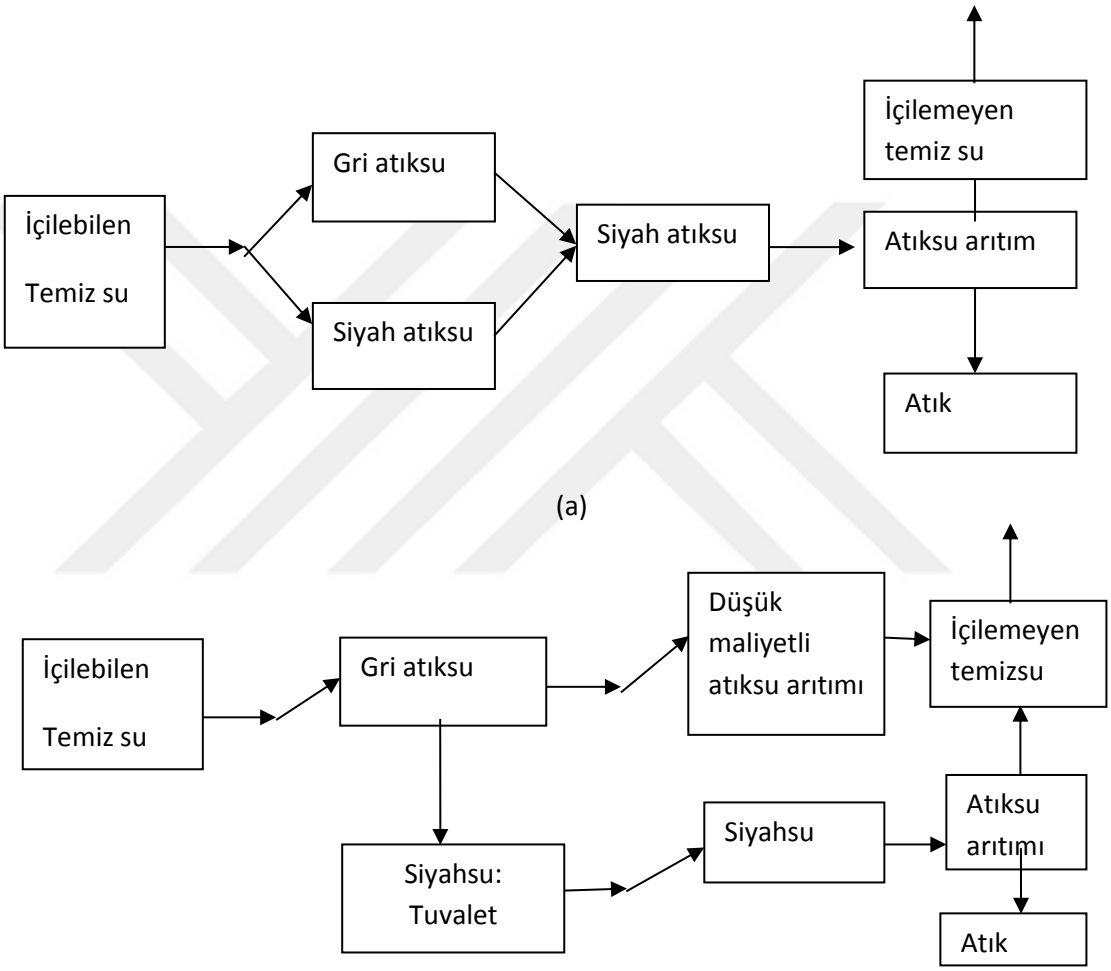
Grisular da kirlilik oranlarına göre düşük yüklü ve yüksek yüklü olmak üzere ikiye ayrılır. Yüksek yüklü atıksuları mutfaktan, çamaşır makinasından, bulaşık makinasından gelen deterjan içeren atıksularını içermektedir (Nolde 1999, Eriksson vd. 2002, Ramon vd. 2004, Sandec 2006, Sarıoğlu 2011). Düşük yüklü gri atıksuları, yüksek yüklü atıksuları ve siyah atıksulara göre daha az kirliliğe sahip banyo sularını ve lavabo sularını içermektedir (Sarıoğlu 2011).

Çizelge 3.3 Evsel atıksuların karakteristik özellikleri

	Düşük yüklü gri atıksuyu özelliği				**Yüksek yüklü gri atıksuyu özelliği**		**Siyah atıksuyu özelliği**	
	Banyo (Almeide 1999)	Yıkama suyu (Almeide 1999)	Duş suyu (Almeide 1999)	Gri atıksu Karışım Özelliği (Atasoy 2013)	Mutfakta kullanılan su (Almeide 1999)	Çamaşır makinası (Almeide 1999)	Ortalama (Sarıoğlu 2011)	Ortalama (İsmail vd. 2012)
KOİ (mg/L)	210	298	501	295	1079	1815	1206	360
BOD (mg/L)	(-)	(-)	(-)	111	(-)	(-)	(-)	140
NH_3-N (mg/L)	1.1	0.3	1.2	(-)	0.3	2	155	27.3
NO_3-N (mg/L)	4.2	6	6.3	(-)	5.8	2	(-)	(-)
PO_4-P (mg/L)	5.3	13.3	19.2	(-)	26	21	(-)	4
TSS (mg/L)	54	181	200	63	235	165	(-)	86
VSS (mg/L)	9	72	153	47	196	97	(-)	(-)
pH	(-)	(-)	(-)	7.2	(-)	(-)	8	7.4

Çizelge 3.3'te görüldüğü gibi karışık düşük yüklü gri atıksuyun KOİ değeri 295 mg/L'dir. Ayrıca üre ihtiva etmediği için düşük yüklü gri atıksuyun amonyak kontrasyon değeri 0.3 ile 1.2 mg/L gibi düşük seviyede ve fosfor konsantrasyon değeri ise 5.3 ile 21 mg/L arasındadır. Yüksek yüklü gri atıksularının ise KOİ değeri 1815 mg/L'e kadar çıkmaktadır. Siyah atıksuları kanalizasyon sularını içerdiği için daha fazla kirlidir. Özellikle NH_3-N değeri 155 mg/L değerine kadar ulaşmaktadır.

Şekil 3.2'de atıksuların arıtma yöntemleri verilmektedir. (a)'da geleneksel arıtım yönteminde gördüğümüz gibi daha az kirliliğe sahip olan gri su ile daha fazla kirliliğe sahip olan siyah su karıştıktan sonra arıtıma başlanmaktadır. Fakat alternatif olan yöntemde (b) gri atıksuyun bir kısmı tuvaletlerde kullanılmaktadır ve gri atık su ile siyah atık su birbirine karışmamaktadır.



Şekil 3.2 Evsel atıksu arıtım sistemleri (March vd. 2004)
a. Geleneksel, b. Alternatif

Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'ne göre arıtılan endüstriyel atıksuların ve evsel atıksuların derin deniz deşarjına izin verilebilecek atıksuların özellikleri çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4 Derin deniz deşarjına izin verilebilecek atıksuların özellikleri (Gürü ve Yalçın 2010)

PARAMETRE	SINIR	DÜŞÜNCELER
pH	6-9	-
Sıcaklık	35 ˚C	-
Askıda katı madde (mg/L)	350	-
Yağ ve gres (mg/L)	15	-
Yüzer maddeler	Bulunmayacaktır	-
5 günlük biyokimyasal oksijen ihtiyacı, $BOİ_5$(mg/L)	250	-
Kimyasal oksijen ihtiyacı, KOİ (mg/L)	400	-
Toplam azot (mg/L)	40	-
Toplam fosfor (mg/L)	10	-
Metilen mavisi ile reaksiyon veren yüzey aktif maddeleri(MBAS) (mg/L)	10	Biyolojik olarak parçalanması Türk Standartları Enstitüsü standartlarına uygun olmayan maddelerin boşaltımı prensip olarak yasaktır.

3.2 Arıtma Sistemleri

Atıksuların arıtılma yöntemleri fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma yöntemleri olmak üzere 3 gruba ayırabiliriz. Fiziksel arıtma ile atıksuda bulunan askıdaki katı maddeler ve yüzebilen kirleticiler uzaklaştırabiliriz. Aerobik, anaerobik ve fakültatif bakteriler yardımıyla yapılan arıtım ise biyolojik arıtımdır. Bu bakteriler yardımıyla atıksu içinde bulunan organik bileşikler parçalanır. Su içinde çözünmüş olan fosfatlar veya kolloidal olarak dağılmış tanecikler kimyasal çöktürme ile çökeltilir.

3.2.1 Fiziksel arıtma sistemleri

Atıksu içindeki yağ ve ve kaba atıklar ön işlemlerden geçirme (ızgaralar, elekler, kum tutucular, yüzdürme sistemleri vb.), sedimantasyon flotasyon (yüzdürme) ve filtrasyon gibi fiziksel yöntemler ile atıksulardan uzaklaştırılmasını sağlamaktadır. Fiziksel arıtım sistemlerinin, bazıları kimyasal ve biyolojik arıtım sistemlerinden önce veya sonra kullanılabilmektedir. Fiziksel arıtım yöntemlerden bazıları aşağıdaki gibi açıklanabilir.

Ön işlemden geçirme

Atıksuların içinde bulunan iri parçalar arıtma sisteminin girişindeki ızgaradan veya eleklerden geçirilerek tutulur. Ayrıca kum tutma sistemleri atıksu içinde bulunan kum ve çakılların arıtma tesisinden uzaklaşmasını sağlamaktadır. Böylece ön işlemden geçirilen atıksu hem atıksuyu temizlenmektedir hem de iri parçaların pompa ve vanaları tıkamasını engellemektedir.

Sedimentasyon

Su küçük bir hızla havuzdan geçirilir. Böylece içinde bulunan katı partiküllerin bir kısmı kendi ağırlıkları ile dibe çöktürülür. Sedimentasyon sistemi ile 50 μm çapındaki maddeler çöktürülür (Gürü ve Yalçın 2010).

Flotasyon

Atıksu içinde düşük yoğunlukta bulunan katı parçaların hava kabarcıkları yardımı ile sudan uzaklaştırılması amacıyla kullanılır. Bu parçaların daha iyi yüzebilmesi için aktif maddeler eklenebilir (Gürü ve Yalçın 2010).

Filtrasyon

Suyun içindeki küçük parçaların kum filtrelerinden geçirilme işlemidir. Kum filtrelerin bulunan kum 0.5-1.0 mm çapındadır (Gürü ve Yalçın 2010).

3.2.2 Biyolojik yöntemle arıtma sistemleri

Biyolojik arıtma işlemi esas alarak, atıksu içindeki çözünmüş olarak bulunan organik bileşiklerin ve askıdaki katı maddelerin bakteriler tarafından oksijen kullanılarak parçalanarak çökebilen maddelere dönüştürülmesi olayıdır. Bu arıtma yöntemi aslında organik kirleticilerin yok edilişidir.

$$\text{Organik Madde} + O_2 \xrightarrow{\text{(Bakteri)}} CO_2 + H_2O + \text{Kalıntı} \qquad (3.1)$$

Biyolojik arıtma sistemleri stabilizasyon havuzları, uzun havalandırmalı aktif çamur ve tam karıştırmalı aktif çamur yöntemi olarak gruplandırabiliriz.

Stabilizasyon havuzları

Atıksu geniş arazilerdeki sığ havuzlarda bekletilerek içinde bulunan mikroorganizmalar yardımı ile temizlenir. Fakat bu yöntemle atıksu uzun sürede arıtılır.

Uzun Havalandırmalı Aktif Çamur Yöntemi

Aktif çamur yöntemi aerobik mikroorganizmaların atıksu içine katıldığı ve havuz içinde sürekli havalandırıldığı bir yöntemdir. Sürekli havalandırma sayesinde oksijenlenen

havuzda bulunan mikroorganizmalar atıksudaki organik maddeleri oksidasyon-sentez işlemleri ile CO_2, H_2O, NH_3^- ve SO_4^- gibi son ürünlere dönüşmektedir.

Tam Karıştırmalı Aktif Çamur Yöntemi

Evsel atıksuların ve çeşitli endüstri atıksularının biyolojik arıtma işlemleri tam karıştırmalı aktif çamur yöntemi uygulanmaktadır. Bu yöntem sisteme endüstriyel atıksuları karışarak geliyor ve çok fazla toksik atık karışma ihtimali varsa diğer tam karıştırmalı aktif çamur yöntemi kullanılır (Gürü ve Yalçın 2010).

3.2.3 Kimyasal yöntemle arıtma sistemleri

Atıksuların içine karışan ağır metal iyonları çevre su kaynaklarına karışması ekolojik denge için büyük tehlike arzetmektedir. Endüstriyel atıksularında sektöre göre değişen farklı kirletici metaller ve farklı metal miktarları bulunmaktadır. Bu nedenle atıksuların arıtma yöntemi atıksu kapasitesine ve metal iyonlarının cinsine ve atıksudaki miktarına bağlıdır. Daha iyi arıtım yapılabilmesi için aynı tür atıksular bir depoda toplanıp diğer farklı atıksularla örneğin kanalizasyon atıksuları endüstriyel atıksuları karıştırılmamalıdır.

Çöktürücü maddesi eklenerek kimyasal çöktürme, kimyasal yöntem grubuna girmektedir. Kimyasal çöktürme yöntemi iyi karıştırma ünitesi mevcut arıtma tesislerinde yapılır. Bunun yanında son zamanlarda çok fazla üzerinde durulan elektrokoagülasyon arıtım yöntemi bu yönteme eklenebilir.

3.2.3.1 Kimyasal çöktürme

Sedimentasyon sayesinde daha iri tanecikler çöktürülürken çok küçük boyutlu tanecikler ve kolloidal maddeler sedimentasyon tanklarında tam olarak çöktürülemez. Bu nedenle en eski yöntemlerden biri olan kimyasal çöktürme kullanılır. Kimyasal çöktürme 1872 tarihinden itibaren $Ca(OH)_2$ kullanılarak yapılmaktadır.

Koagulasyon ve floklasyon işlemi atıksuyun içinde bulunan kirletici maddelerin uzaklaştırılması amacıyla yapılır. Ayrıca bu işlem sonunda, atıksuyun bulanıklığının, renk, bakteri ve patojen, koku ve tat yapıcı maddelerin, fosfatın, askıda katı maddelerin, metallerin giderimesi ve BOİ ve KOİ kirlilik değerlerinin düşürülmesi beklenmektedir.

Kimyasal çöktürme işleminde, arıtım üç aşamada gerçekleşir. Bu aşamalar nötralizasyon, koagülasyon ve flokülasyon (yumaklaştırma) işlemleridir. Nötrolizasyon işlemi, atıksuların uygun pH değerinin ayarlanması için eklenen asit ve baz ilavesidir. Genel olarak kullanılan bazlar sodyum hidroksit (NaOH) ve kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$'dir. Koagülasyon, atıksuya koagülant eklenmesi ile atıksuyun bünyesindeki kolloidal ve askıdaki katı maddelerle birleşerek pıhtı oluşturmaya hazır hale gelmesidir. flokülasyon aşamasında ise atıksuyun içinde oluşan küçük taneciklerin birleşmesi ve kolay çökebilen pıhtıların oluşmasıdır (Davutluoğlu 2008).

Atıksular kendiliğinden çökmeyen kolloidal maddeler içermektedir. Kolloidler, moleküllerin uç kısmında bulunan reaktif grubların ayrışması veya su ortamında bulunan iyonların tanecik yüzeyinde adsorplanması ile birincil yük olarak isimlendirilen elektriksel yüke sahiptirler. Genel olarak atıksularda bulunan kolloidlerin birincil yükü negatiftir. Atıksuların net bir elektrik yükü olmadığından, negatif yüklü kolloid parçacıklar su kütlesi içerisindeki pozitif yükler ile dengelenmektedir. Bu sebeble kolloidler birbirlerine yaklaşamazlar. Kimyasal çöktürme işleminde çöktürücü maddesi eklenerek kolloid parçacıkların birbirini itme kuvvetini nötrolize edilmesi ile kolloid stabilizasyonunun bozulması sağlanır. Katyonik olan çöktürücü maddeler atıksuya

pozitif yükü sağlayarak kolloidler üzerindeki negatif yükü (zeta potansiyelini) azaltırlar (Davutluoğlu 2008).

Genel olarak kimyasal çöktürme de kullanılan çöktürücüler, Alüminyum sülfat veya alüm ($Al_2(SO_4)_3.18H_2O$), demir (III) klorür ($FeCl_3.6H_2O$), demir sülfat (ferric sülfat $Fe_2(SO_4)_3.9H_2O$ ve ferro sulfat $FeSO_4.7H_2O$) ve sodyum alüminattır ($NaAlO_2$).

Alüminyum sülfat dodekahidrat (alüm, $Al_2(SO_4)_3.18H_2O$), suda bulunan doğal alkalinite ile reaksiyona girerek alüminyum hidroksit oluşturur.

$$Al_2(SO_4)_3 + 3Ca(HCO_3)_2 \rightarrow 2Al(OH)_3 + 3CaSO_4 + 6CO_2 \qquad (3.7)$$

Oluşan alüminyum hidroksit pelteleşerek askıdaki katı maddelerin adsorpsiyonu ile büyür ve dibe çökerler. Dipte çöken çamurlar daha sonra ortamdan uzaklaştırılır.

Genel olarak alüm çökelti maddesi ile yapılan kimyasal çöktürme işleminde en iyi sonuç pH 5-7 arasında elde edilmektedir. Alümün hidroliz reaksiyonları aşağıda verilmiştir (Davutluoğlu 2008).

$$Al^{+3} + H_2O \leftrightarrow AlOH^{+2} + H^+$$

$$Al^{+3} + 2H_2O \leftrightarrow Al(OH)_2^+ + 2H^+$$

$$Al^{+3} + 3H_2O \leftrightarrow Al(OH)_3 + 3H^+$$

$$Al^{+3} + 4H_2O \leftrightarrow Al(OH)_4^- + 4H^+$$

$$Al^{+3} + 2H_2O \leftrightarrow Al_2(OH)_4^{+4} + 2H^+$$

$$3Al^{+3} + 4H_2O \leftrightarrow Al_3(OH)_4^{+5} + 4H^+$$

$$13Al^{+3} + 24H_2O \leftrightarrow Al_{13}(OH)_{24}^{+15} + 24H^+$$

Çöktürücü olarak $FeCl_3$ eklendiğinde yeterli alkalinitenin varlığında aşağıdaki reaksiyonlar gerçekleşir.

$$2FeCl_3 + 3\,Ca(HCO_3)_2 \rightarrow 3CaCl_2 + 2Fe(HCO_3)_3 \quad (3.8)$$

$$2Fe(HCO_3)_3 \rightarrow 2\,Fe(OH)_3 + 6CO_2 \quad (3.9)$$

$$FeCl_3 + 3H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + 3HCl \quad (3.10)$$

$FeCl_3$ çöktürücüsü ile pH 4-10 arasında kimyasal çöktürme en iyi sonucu vermektedir. Demir tuzlarının hidroliz reaksiyonları aşağıda verilmiştir (Davutluoğlu 2008).

$$Fe^{+3} + H_2O \leftrightarrow FeOH^{+2} + H^+$$

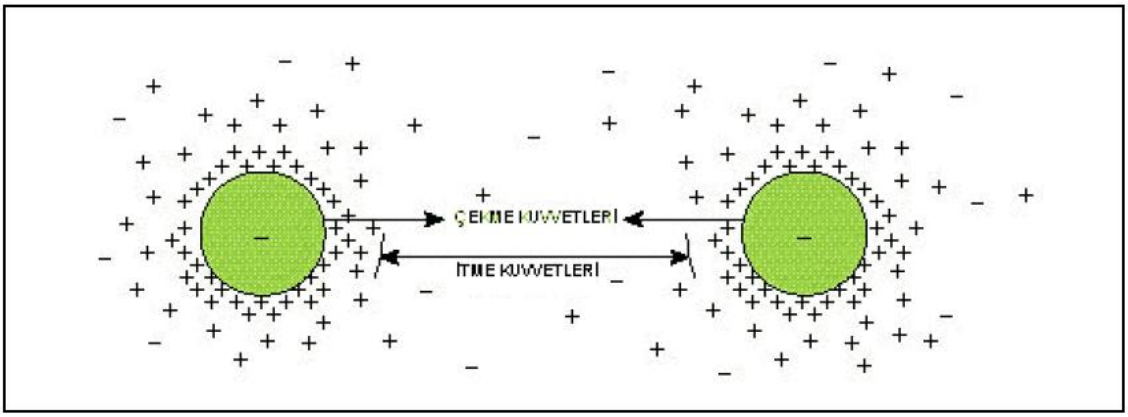
$$Fe^{+3} + 2H_2O \leftrightarrow Fe(OH)_2^{+} + 2H^+$$

$$Fe^{+3} + 3H_2O \leftrightarrow Fe(OH)_3 + 3H^+$$

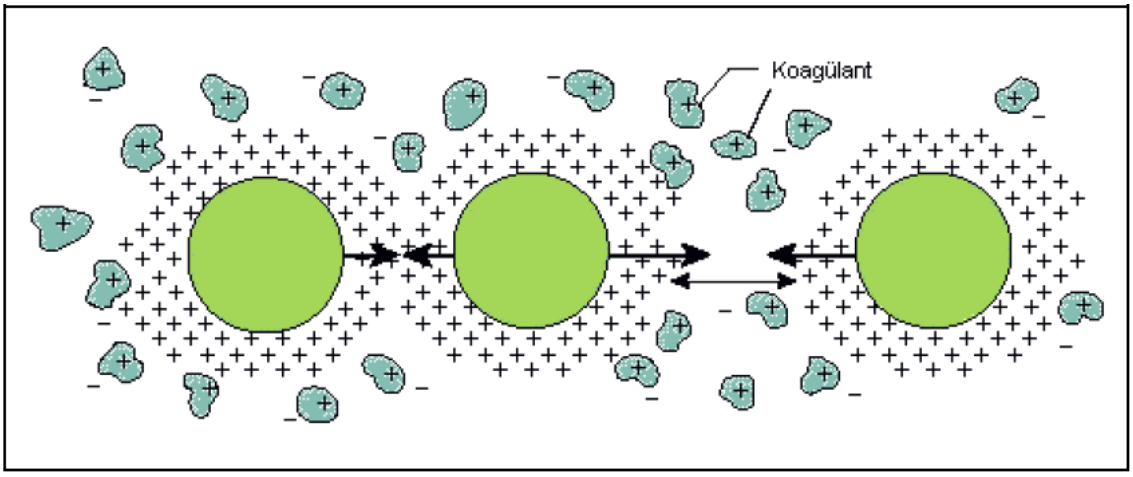
$$Fe^{+3} + 4H_2O \leftrightarrow Fe(OH)_4^{-} + 4H^+$$

$$2Fe^{+3} + 2H_2O \leftrightarrow Fe_2(OH)_2^{+4} + 2H^+$$

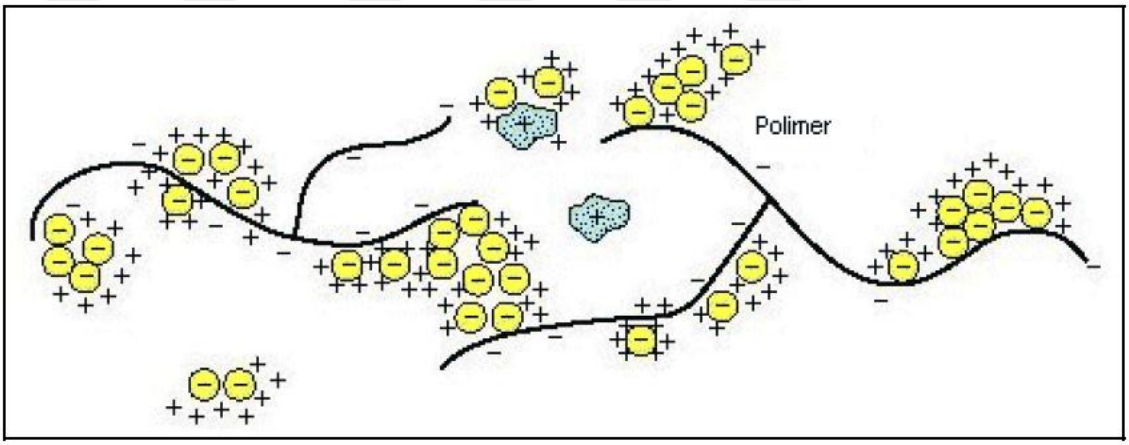
Koagülasyon mekanizması şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3 Koagülasyon Mekanizması-Kararlı Kolloidler (Davutluoğlu 2008)

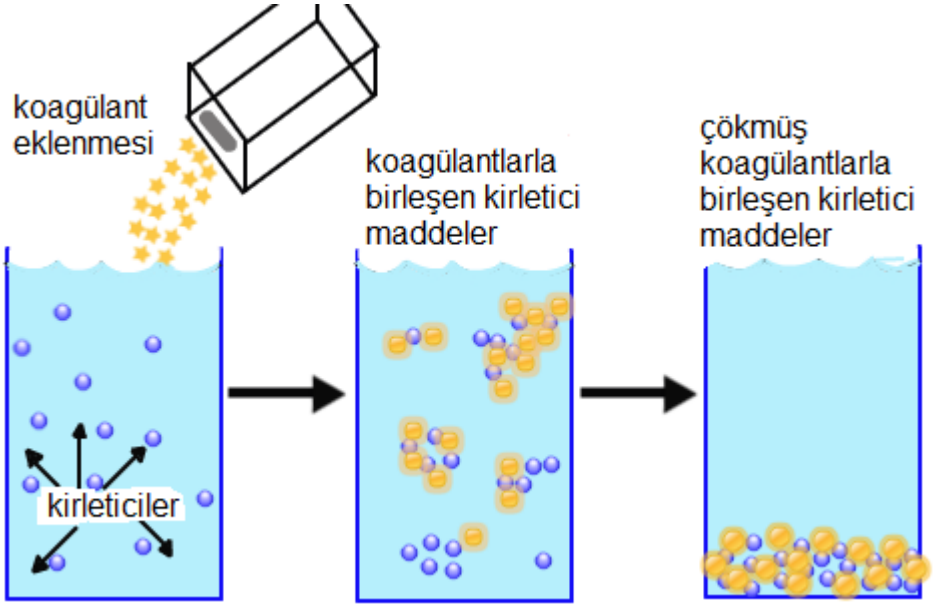


Şekil 3.4 Kollodlerin koagülant eklenmesi ile destabilizasyonu (Davutluoğlu 2008)



Şekil 3.5 Polielektrolit ilavesi ile floklar arasında köprü oluşumu (Davutluoğlu 2008)

Atıksu arıtmalarda kolay çökme sağlamak için polielektrolit maddeler kullanılır. Polielektrolitler sayesinde partiküller birbirlerine bağlanarak flokülasyon veya yumaklaşma meydana gelir. Kimyasal çöktürme mekanizmaları şekil 3.4-3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.6 Kimyasal çöktürme- flokülasyon İşlemi

Çöktürücü maddeler atıksuya ilave edildikten sonra kimyasal çöktürme ve flokulasyon işlemlerinden sonra çöktürme havuzlarına alınır. Oluşan flokların (yumakların) bir kısmı süzülür. Geri kalanlar ise atıksu durgun halde bir süre bekletildikten sonra ortamdan uzaklaştırılır. Kimyasal çöktürme-flokülasyon işlemi şekil 3.6'da verilmiştir.

Kimyasal çöktürme işleminde iyi bir arıtım sağlanarak verimin yüksek elde edilmesi amacıyla laboratuvar şartlarında jar-test deneyi gerçekleştirilir. Jar testinde belirlenen optimum çöktürücü miktarı ile arıtım gerçekleştirilir.

Jar testi: Suyun temizlenmesinde veya atıksuyun arıtılmasında kullanılacak çöktürücü miktarını belirlemek amacıyla jar testi yapılır. Böylece arıtım için en uygun miktarda çöktürücü miktarı bulunarak verimliliğin artırılması sağlanır. Jar testinde çöktürücü miktarı belirlenmesinin yanında uygun pH değerinin bulunmasını da ekleyebiliriz.

Çöktürücüın atıksuya eklenmesi esnasında çöktürücü hidrolize olur ve açığa asit çıkar. Böylece pH değeri düşer. Baz (NaOH) veya asit (HCl) eklenerek pH ayarlaması yapılır.

Jar testi sonunda elde edilen numunelerin kirleticileri (KOİ, BOD, SS vb) optimizasyon yöntemleri ile hesaplanır ve verimin en yüksek olacağı uygun çöktürücü miktarı ve pH değeri bulunur.

3.2.3.2 Kimyasal arıtımda ağır metallerin uzaklaştırılması

Ağır metal hidroksitlerin çözünürlüğü küçük olduğundan, ağır metaller kireçle hidroksit halinde çöktürülebilir. Ağır metallerin büyük bir kısmı kireçle çöktürülebir, bir kısmı da uygun kimyasallarla çökeltilir. Kimyasal arıtımda kullanılan kimyasal maddeler çizelge 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.5 Kimyasal arıtımda kullanılan kimyasal madde (Gürü ve Yalçın 2010)

Endüstri	Çökeltmede Kullanılan Kimyasal Madde	Çökeltilen Madde
Metal Kaplama ve Yüzey İşlemleri	Kireç	Ağır Metaller Asitler
Demir-Çelik	Alüminyum sülfat, kireç	Demir-mangan Asitler
Elektroliz	Hidrojen Sülfür	Çinko, nikel Kadmium
Cam yünü, İzolasyon Maddeleri	Sodyum hidroliz	Asit
Pigment Endüstrisi	Alüminyum sülfat kireç	Metal İyonları, asit
Sentetik gübre	Fosfat, alüminyum sülfat, kireç	Metal İyonları, asit
Fosforik asit	Kireç, alüminyum sülfat ve demir sulfat	Fosfat İyonu
Kağıt Endüstrisi	Bentonit, Kaolen	Lif

Bakırın giderilmesi: Bakır üretim tesislerinde, bakır ve pirinç kaplama, kağıt, petrol, tarım koruma ilaçları ve boya endüstrisi atıksularında bulunan bakır iyonu Cu^{+2}, atıksuya kireç eklenerek bakır hidroksit oluşturularak veya sülfür katılarak bakır sülfür halinde çöktürülür. Çöktürme en uygun pH 9-10 civarındadır (Gürü ve Yalçın 2010).

Kurşunun giderilmesi: Kurşun madeni tesisleri, akü ve pil fabrikaları patlayıcı maddeler, petrol rafineleri, boya tetrametil kurşun üretim tesisleri atıksularında bol miktarda kurşun iyonu bulunmaktadır. Pb^{+} ve $Pb(OH)^{+}$ iyonları şeklinde suda çözünmüş olarak bulunan kurşun iyonları, kireç, soda, sodyum hidroksit veya fosfatlar kullanılır. Kurşun hidroksit halinde çökeltme yapılması için en uygun pH değeri 9 civarıdır (Gürü ve Yalçın 2010).

Çinkonun giderilmesi: Yüksek oranda çinko iyonu taşıyan galvaniz tesisleri, metal işleme, pirinç kaplama, viskoz rayon ve metal yüzey temizleme atıksularına kireç veya sodyum hidroksit halinde pH 9 civarında çökeltilerek uzaklaştırılır. Fakat çinko amfoterik bir yapıya sahip olması nedeniyle pH 10 olması durumunda çinkata dönüşerek çözünür. pH'ın iyi kontrol edilmesi gerekir (Gürü ve Yalçın 2010).

$$Zn(OH)_2 + 2NaOH \rightarrow Na_2Zn(OH)_4 \qquad (3.2)$$

Kadmiyumun giderilmesi: Elektrolit kaplama prosesleri, pil, seramik, pigment, tekstil, boyar madde endüstrileri ile plastik katkı maddeleri gibi üretim tesislerinde kadmiyum iyonu suda bulunan kadmiyum hidroksit veya sülfür halinde çökeltilmesidir (Gürü ve Yalçın 2010).

Kromun giderilmesi: Deri ve tekstil endüstrileri, boya pigmenti, metalurji, polisaj vb. atıksularında kromat iyonu bulunur. Atıksu içine pH kontrol edilerek kükürtdioksit, sodyum bisülfit veya demir iki sülfat gibi kimyasal maddeler ile atıksu içinde (+6) değerlikli kromu (+3) değerlikli krom aline indirgemek için suya $SO_2(H_2SO_3)$ veya Fe^{+2} katılır (Gürü ve Yalçın 2010).

$$H_2Cr_2O_7+6FeSO_4+6H_2SO_4 \rightarrow Cr_2(SO_4)_3 + Fe_2(SO_4)_3+7H_2O \qquad (3.3)$$

Demir ve Manganın giderilmesi: Demir-çelik, cevher öğütme, metal işlem, otomotiv, petrokimya, gübre ve inorganik pigment üretim tesisleri atıksularında demir bulunur. Atıksularda Fe^{+2} ve Fe^{+3} tuzları pH 7 civarında demir hidroksit halinde çöktürülür (Gürü ve Yalçın 2010).

Fosfatların çöktürülmesi: Ortofosfotlar, polifosfotlar, metafosfatlar ve organik fosfor halinde bulunanmaktadır. Atıksularda bulunan fosforların yüzde 91'ini evsel atıksular ve yüzde 9'u tarım alanlarda bulunur. Evsel atıksuların içinde bulunan fosforun yüzde 50'si deterjan kullanımından kaynaklanmaktadır. İnorganik fosforun kaynağı insanlardaki protein parçalanmalarıdır (Samsunlu 2006, Solak 2013).

Biyolojik arıtma yöntemi ile fosfor uzaklaştırılması %5 civarında olduğundan, fosfor arıtımı kimyasal çöktürme ile yapılmaktadır. Kimyasal çöktürücü olarak alüminyum tuzları (alüm, şap), demir (III) tuzları ve kalsiyum hidroksit (kireç) kullanılmaktadır (Gürü ve Yalçın 2010).

$$Al_2(SO_4)_3 + 2PO_4^{-3} \rightarrow 2AlPO_4 + 3SO_4^{-2} \quad (3.4)$$

Alüminyum fosfat çökeltileri kristalden çok amorf yapıda olduğundan $Al(OH)_3$ ile birlikte çökeltilir. Çökelme olabilmesi için Al/PO_4 oranının iki katı kadar alüminyum miktarı ile mümkündür. $Al(OH)_3$'in lapa halinde çökmesi ile $Al(PO_4)$'in ince dağılmış kristallerinin de birlikte çökelmesini sağlar (Gürü ve Yalçın 2010).

Demir (III) tuzları ile fosfatlar, demir fosfatları ve demir hidroksitleri oluşturarak çökerler. Bu çökelme pH 4.5-5.0 arasında olabildiği gibidaha yüksek pH'larda da $Fe(OH)_3$ ile birlikte çökeltilebilir (Gürü ve Yalçın 2010).

$$Fe^{+3} + PO_4^{-3} \rightarrow FePO_4 \quad (3.5)$$

Fosfatların kireç ile çöktürülmesinde ortama $Ca(OH)_2$ verilerek yüksek pH 10-11 değerinde fosfat hidroksiapatit bileşiği halinde çöktürülmesidir (Gürü ve Yalçın 2010).

$$6PO_4^{-3} + 10\ Ca^{+2} + 2OH^- \rightarrow Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2 \quad (3.6)$$

3.2.4 Elektrokimyasal arıtım sistemleri

Suyun elektrot kullanılarak elektrokimyasal arıtılması 1889 yılında İngiltere'de başlamasına rağmen çözünen alüminyum ve demir elektrot kullanılarak su arıtımı patenti 1909 yılında Amerika'da alınmıştır. Elektrokimyasal arıtım prosesi, çevreye uyumlu ve çok yönlü bir arıtım prosesi olmasından dolayı tercih edilmektedir. Kolay kontrol edilebilmeleri, kimyasal madde kullanımlarının sınırlı düzeyde olması, kirliliği kısa sürede maksimum düzeyde azaltmaları, işletim kolaylığı, basit ve düşük maliyetli ekipmanlarla yapılması gibi özelliklerden dolayı kullanımları hızla yaygınlaşmaktadır (Can 2010).

3.2.4.1 Yükseltgenme-indirgenme reaksiyonlarının genel prensipleri

Elementin oksidasyon düzeyinin artırılmasına kimyasal yükseltgenme veya kimyasal oksitlenme denir. Kimyasal indirgenme ise elementlerin oksidasyon düzeyinin indirilmesi ile sağlanır. Yükseltgenme-indirgenme reaksiyonları aşağıda verilmiştir.

Örnek olarak aşağıdaki reaksiyonları verebiliriz.

$$I_2 + 2e^- \leftrightarrow 2I^- \text{ indirgenme} \quad (3.11)$$

$$2S_2O_3^{-2} \leftrightarrow S_4O_6^{-2} + 2e^- \text{ yükseltgenme} \quad (3.12)$$

Elektron alan indirgenmekte ve elektron veren ise yükseltgenmektedir. İndirgenme ve yükseltgenme reaksiyonlarına redoks reaksiyonları adı verilir.

$$I_2 + 2S_2O_3^{-2} \leftrightarrow 2I^- + S_4O_6^{-2} \quad (3.13)$$

3.2.4.2 Elektrot potansiyelleri

Reaksiyon elektrot yüzeyinde gerçekleşmesi ile elektrot ve çözelti arasında yük farklılaşmasından potansiyel farkı oluşur. Elektrot potansiyeli indirgenme veya yükseltgenme reaksiyonlarının enerjisine karşılık gelmektedir. Bu reaksiyonların elektrot potansiyeli, potansiyeli sıfır kabul edilen hidrojen iyonunun hidrojen gazına indirgenme reaksiyonuna göre hesaplanmaktadır (Vardar 2006).

$$H^+_{(ç)} + e^- \leftrightarrow 1/2H_{2(g)} \quad (3.14)$$

Hidrojen elektroda göre standart şartlarda (1 atm basınçta 25°C sıcaklıkta) belirlenmiş elektrot potansiyeline "standart elektrot potansiyeli" denilmektedir (Vardar 2006).

Pilin elektrot potansiyeli, E_{pil}, yükseltgenme ve indirgenme reaksiyonlarının potansiyelleri, $E_{yük}$ ve E_{ind} kullanılarak aşağıdaki ifadeyle hesaplanır.

$$E_{pil} = E_{yük} + E_{ind} \quad (3.15)$$

Serbest enerji kavramını kullanarak redoks reaksiyonlarının oluşabilirliği ve reaksiyon özellikleri belirlenebilmektedir. Serbest enerji değişimi (ΔG_r);

$$\Delta G_r^0 = (\sum n_i \Delta G_i^0)_{ürünler} - (\sum n_i \Delta G_i^0)_{reaktanlar} \quad (3.16)$$

formülüyle hesaplanmaktadır.

Pilin elektrot potansiyeli serbest enerji değişiminden faydalanılarak hesaplanabilir. Serbest enerji ve elektrot potansiyeli arasındaki bağlantı aşağıda verilmiştir.

$$\Delta G = - nF_S E \quad (3.17)$$

Burada, n: transfer olan elektron sayısını, F_S: Faraday sabitini (96500 coulomb/ekivalen veya 23060 kcal/volt-ekivalen) olarak ifade edilmektedir.

E değeri pozitif olan reaksiyonlarda, ΔG negatif olacağından reaksiyon kendiliğinden gerçekleşebilmektedir. Elektrot potansiyeli, E, yüksek olan elektrot potansiyeli düşük olana göre daha güçlü oksitleyicidir (Vardar 2006).

Serbest enerji ile elekrot potansiyelleri arasındaki bağıntı aşağıdaki denklem ile belirtilebilir.

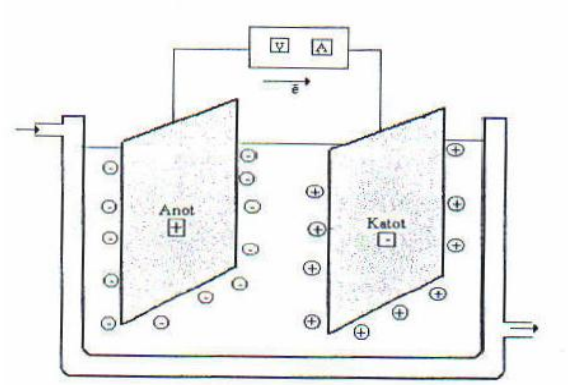
$$\Delta G = \Delta G^{\circ} + RT\ln Q \quad (3.18)$$

Burada, R: gaz sabiti, T: Mutlak sıcaklık (K), Q: reaksiyon denge sabitidir.

Denklem (3.18)'deki tüm terimler (-nF) ile bölünürse aşağıdaki Nernst denklemi elde edilir.

$$E = E^{\circ} - RT/nF \ln Q \quad (3.19)$$

Piller ve elektrotlar: Kimyasal reaksiyon sonucu elektrik akımı oluşturan pillere elektrokimyasal pil adı verilir. Tüm elektrokimyasal pillerde yükseltgenme-indirgenme reaksiyonlarına gerçekleşmektedir. Anotta bulunan elektrot, elektron vererek yükseltgenir ve katotta bulunan elektrot ise elektron alarak indirgenir. Elektrokimyasal hücrenin şematik görünüşü şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7 Elektrokimyasal pilin şematik görünümü (Vardar 2006)

Faraday Kanunu ve akım verim ilişkisi: Elektrokimyasal proseslerde temel esaslar Faraday kanunu ile belirtilmiştir. Elektrokimyasal pillerde geçen akımın miktarı, q ile akım şiddeti, I ve zaman, t arasındaki bağıntı;

$$q = \int I.dt \tag{3.20}$$

$$q = I.t \tag{3.21}$$

Burada, q: elektrik miktarını, I: akım şiddeti, t: zamanı şeklinde ifade edebiliriz.

3.2.4.3 Elektrokimyasal proseslerin türleri

Su ve atıksu arıtımında kullanılan en yaygın elektrokimyasal prosesleri elektrokoagülasyon, elektrooksidasyon ve elektroflotasyon olmak üzere sıralayabiliriz. Bu elektrokimyasal prosesler sonucunda oluşan kirleticiler, çöktürme gibi yöntemlerle ortamdan uzaklaştırılmaktadır.

Elektrokoagülasyon (EK): Elektrokimyasal proseslerin en yaygın kullanılanı olan elektrokoagülasyonda elektrot cinsi önemlidir. EK'da, genel olarak çözünebilen ve pıhtılaşma özelliğe sahip alüminyum Al^{+3}, demir Fe^{+3}, Fe^{+2} elektrotlar kullanılmaktadır. Kimyasal çöktürmede uygun kimyasal maddeler ortama eklenirken, EK'da ise kullanılan elektrot malzemesi, elektriğin etkisiyle çözünür ve çöktürücüleri oluşturur (Can 2010).

Alüminyum ve demir elektrotlar suyla reaksiyona girerler ve $Al(OH)_3$, $Fe(OH)_2$ ve $Fe(OH)_3$ gibi metal hidroksitleri oluştururlar. Düşük pH değerinde, katotta Al^{+3} ve $Al(OH)_2^{+}$ oluşur. Uygun pH değerinde ise öncelikle $Al(OH)_3$ oluşur ve sonuç olarak $Al_n(OH)_{3n}$ oluşur. pH değerine göre $Al(OH)^{+2}$, $Al_2(OH)_3^{+4}$ ve $Al(OH)_4^{-}$ gibi iyonlar da ortamda bulunmaktadır (Mollah vd. 2001).

$Al(OH)_3$ oluşma mekanizması aşağıda verilmiştir (Mollah vd. 2001).

$$Al \rightarrow Al^{+3}_{(ç)} + 3e^{-} \tag{3.22}$$

$$Al^{+3}_{(ç)} + 3H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + 3H^{+}_{(ç)} \tag{3.23}$$

$$n\ Al(OH)_3 \rightarrow Al_n(OH)_{3n} \tag{3.24}$$

Alüminyumun sulu ortamdaki oluşan kompleksleri aşağıda verilmiştir.

$Al^{+3} \leftrightarrow Al(OH)^{+2} + H^{+}$

$2Al^{+3} \leftrightarrow Al_2(OH)_2^{+4} + 2H^{+}$

$6Al^{+3} \leftrightarrow Al_6(OH)_{15}^{+3} + 15H^{+}$

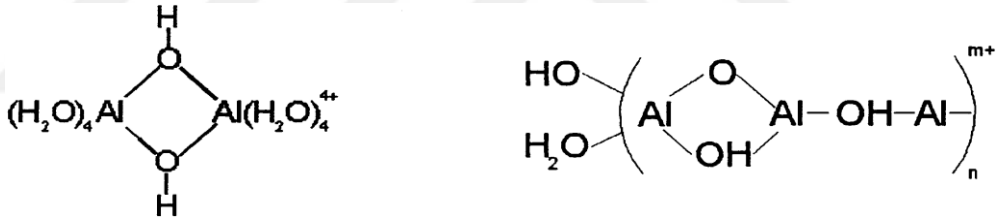
$8Al^{+3} \leftrightarrow Al_8(OH)_{20}^{+4} + 20H^{+}$

$13Al^{+3} \leftrightarrow Al_{13}(OH)_{34}^{+5} + 34H^{+}$

$Al^{+3} \leftrightarrow Al(OH)_4^{-} + 4H^{+}$

$Al(OH)_{3(k)} \leftrightarrow Al^{+3}_{(aq)} + 3OH^{-}_{(aq)}$

Al^{+3}'ün dimerik ve polimerik hidrokompleksleri şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8 Al^{+3}'ün dimerik ve polimerik hidrokompleksleri (Mollah vd. 2001)

$Fe(OH)_2$ ve $Fe(OH)_3$ metal hidroksitlerin oluşma mekanizmaları aşağıda verilmiştir.

Mekanizma 1

Anot Reaksiyonu:

$$4Fe_{(ç)} \rightarrow 4Fe^{+2}_{(ç)} + 8e^{-} \quad (3.25)$$

$$4Fe^{+2}_{(ç)} + 10\ H_2O_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow 4Fe(OH)_{3(k)} + 8H^{+}_{(ç)} \quad (3.26)$$

Katot Reaksiyonu:

$$8H^{+}_{(ç)} + 8e^{-} \rightarrow 4H_{2(g)} \quad (3.27)$$

Toplam Reaksiyon:

$$4Fe_{(k)} + 10\ H_2O_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow 4Fe(OH)_{3(k)} + 4H_{2(g)} \quad (3.28)$$

Mekanizma 2

Anot Reaksiyonu:

$$Fe_{(k)} \rightarrow Fe^{+2}_{(ç)} + 2e^{-} \quad (3.29)$$

$$Fe^{+2}_{(ç)} + 2OH^{-}_{(ç)} \rightarrow Fe(OH)_{2(k)} \quad (3.30)$$

Katot Reaksiyonu:

$$2H_2O_{(s)} + 2e^{-} \rightarrow H_{2(g)} + 2OH^{-}_{(ç)} \quad (3.31)$$

Toplam Reaksiyon aşağıdaki gibidir (Mollah vd. 2001).

$$Fe^{+2}_{(ç)} + 2H_2O_{(s)} \rightarrow Fe(OH)_{2(k)} + H_{2(g)} \quad (3.32)$$

Carl tarafından 1995 yılında ve nitrat Koparal ve arkadaşları tarafından 2002 yılında elektrokoagülasyon yöntemi kullanılarak atıksulardan çeşitli kirleticiler, örneğin ağır metaller uzaklaştırılmıştır (Feng 2011).

Demirin sulu ortamdaki oluşan kompleksleri aşağıda verilmiştir.

$$Fe^{+3} \leftrightarrow Fe(OH)^{+2} + H^{+}$$

$$Fe^{+3} \leftrightarrow Fe(OH)_2^{+} + 2H^{+}$$

$2Fe^{+3} \leftrightarrow Fe(OH)_2^{+4} + 2H^+$

$Fe^{+3} \leftrightarrow Fe(OH)_3 + 3H^+$

$Fe^{+3} \leftrightarrow Fe(OH)_4^- + 4H^+$

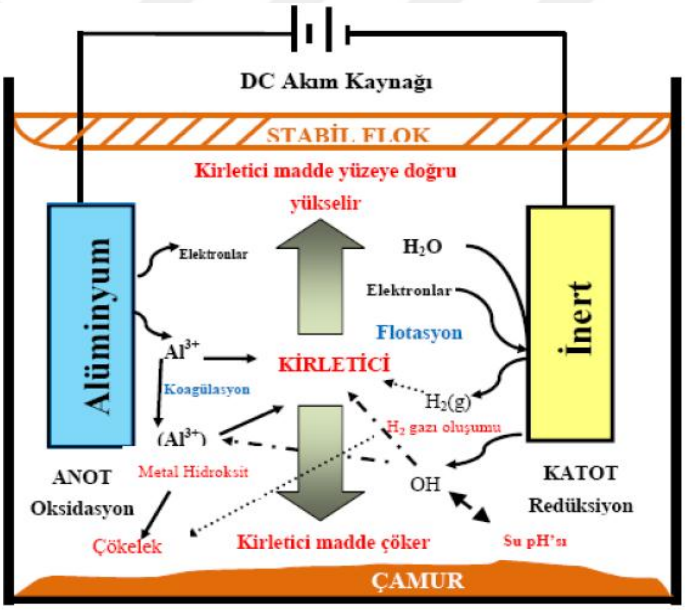
$Fe^{+2} \leftrightarrow Fe(OH)^+ + H^+$

$Fe^{+2} \leftrightarrow Fe(OH)_2 + 2H^+$

$Fe^{+2} \leftrightarrow Fe(OH)_2 + 2H^+$

$Fe^{+2} \leftrightarrow Fe(OH)_3 + 3H^+$

$Fe^{+2} \leftrightarrow Fe(OH)_4^{-2} + 4H^+$



Şekil 3.9 Elektrokoagülasyonda meydana gelen reaksiyonlar (Can 2010)

Anot tepkimeleri: Anot elektron vererek yükseltgenme reaksiyonu gerçekleşir. Anotta çözünme olur ve anyonlar anotta toplanır. oksijen çıkışı gözlenir. Şekil 3.9'da elektrokoagülasyonda meydana gelen reaksiyonlar verilmiştir.

Anotta oksijen çıkışı gözlenir:

$2H_2O \rightarrow O_2\uparrow + 4H^+ + 4e^-$

Ortamda klorür iyonu var ise anotta klor çıkışı gerçekleşir.

$2Cl^{-} \rightarrow Cl_2\ (g) \uparrow + 2e^{-}$

Katot tepkimeleri: Katot elektron vererek indirgenme reaksiyonu gerçekleşir. Katotta birikme olur ve katyonlar toplanır. Ayrıca hidrojen çıkışı gözlenir.

$2H_2O + 2e^{-} \rightarrow H_2 \uparrow + 2OH^{-}$

Ortamdaki oluşan gaz katotta indirgenir.

$O_{2(g)} \uparrow + 4H^{+} + 4\ e^{-} \rightarrow 2H_2O$

Elektrokoagülasyon arıtımı ile oluşan absorbe kapasitesi fazla olan metalhidroksitler, sudaki kirleticileri adsorbe etmektedir. Metalhidroksitler tarafından absorbe edilen kirleticiler çökeltilmekte ve sudan uzaklaşmaktırılmaktadır. (Mollah vd. 2001, İlhan vd. 2007). katottan çıkan hidrojen gazı oluşan kirletici yumaklarına yapışarak yüzdürüler.

Elektrokoagülasyon yöntemini kullanmak kimyasal kimyasal çöktürme yöntemine göre daha avantajlıdır. EK'da kolloidal parçacıkları daha iyi çöktüğünden verim yüksektir. EK'a kimyasal madde eklenmediğinden ekipmanlarının kullanımı, işletmesi ve bakımı kolaydır. EK'da oluşan floklar daha büyük olduğundan kirleticiler ortamdan daha kolay uzaklaştırılmaktadır. Ayrıca işletme, bakım maliyeti düşüktür ve yüksek sıcaklık prosesi daha az ekilemektedir (Mollah vd. 2001, İlhan vd. 2007).

Elektrooksidasyon: Elektooksidasyon yönteminde Ti/Pt-Ir, Ti/RhO_x-TiO_2, Ti/PdO-CO_3O_4, TiO_2/$TiRuO_2$, Ti/Pt, PbO_2/SnO_2, PbO_2/Ti, SnO_2, PbO_2 ve paslanmaz çelik gibi elektrotlar kullanılmaktadır. Biyolojik olarak zor parçalanabilen bileşikler elektrooksidasyon ile kolay parçalanabilen organik bileşiklere veya CO_2 ve H_2O'e

dönüştürülebilmektedir. Ayrıca, oksidasyon reaksiyonunda O_2 ve H_2 gibi gazlar da oluşmaktadır (İlhan vd. 2007).

Elektroflotasyon: Atıksu arıtımında, diğer elektrokimyasal yöntemlerle kullanılan bir diğer elektrokimyasal yöntem elektroflotasyon yöntemidir. Elektrottan çıkan gaz kabarcıkları kirleticileri absorbe eder ve yüzeye çıkarır. Elektroflotasyon gaz kabarcıkları sayesinde çok küçük konsantrasyondaki kirleticileri bile taşıyarak ortamdan uzaklaştırmaktadır. Ayrıca, elektroflotasyonda akım yoğunluğu ile kabarcık sayısı ve boyutu kontrol edilebilir. Elektroflotasyonun, flotasyondan farkı prosesin kendiliğinde oluşmasıdır. Elektroflotasyonda elektrotlarda oluşan reaksiyonlar aşağıda verilmiştir (İlhan vd. 2007).

Anot: $2H_2O \rightarrow O_2 \uparrow + 4\ H^+ + 4e^-$ (3.33)

Katot: $4H^+ + 4e^- \rightarrow 2\ H_2 \uparrow$ (3.34)

Gaz kabarcıkların boyutları küçük olmasına rağmen kirleticileri uzaklaştırmakta önemli olduğundan, gaz kabarcıklarının optimum yoğunluğunu belirlemek amacıyla bir çok optimizasyon çalışmaları yapılmaktadır (İlhan vd. 2007).

3.2.4.4 Elektrokimyasal arıtımını etkileyen yöntemler

Ayrıca akım yoğunluğu, reaktör tipi, akım, pH, iletkenlik, reaksiyon süresi, etkin elektrot yüzey alanı ve sıcaklık gibi parametreleri elektrokimyasal yöntemde verimi etkileyen faktörlerdir (İlhan vd. 2007).

Elektrot şekli ve tipi: Elektrokoagülasyon yöntemi için seçilen elektrot türleri akım ile birlikte ortamda çözünürken, elektrooksidasyon da OH^- radikalleri oluşturup herhangi

bir çözünme olmamaktadır. Elektrokoagülasyon yönteminde genellikle demir ve alüminyum elektrotlar kullanılırken, elektrooksidasyonda titan, platin, rutenyum vb.elektrotlar kullanılmaktadır. Farklı kirleticiler için uygun farklı elektrot tiplerinin olduğu yapılan çalışmalarda görülmüştür (İlhan vd. 2007). Li vd. (2011) tarafından, süzülmüş su (lechate) ile yaptığı araştırma da demir elektrotların KOİ ve NH_3-N uzaklaştırmasında daha iyi verim elde edildiği belirtilmiştir.

Ayrıca elektrotların şekli de kirleticilerin ortamdan uzaklaşmasını etkilemektedir. Düz elektrotlara göre gözenekli elektrotların daha yüksek oranda kirliliği uzaklaştırdığı tahmin edilmektedir. Fakat elektrot deliklerinin hangi boyutta daha fazla verim alınacağı konusunda daha fazla çalışmalara ihtiyaç vardır (Khandegar 2013).

Elektrotların yerleşimi: Elektrot tipi seçiminin yanı sıra elektrotların reaktör içerisinde yerleşimi de elektrokoagülasyon prosesin maliyeti açısından önemlidir (Khandegar 2013). Monopolar ve bipolar elektrot kullanılarak seri yada paralel Şekilde bağlamak suretiyle farklı giderim verimleri elde edilmektedir (İlhan vd. 2007).

Monopolar elektrotların paralel bağlanması (MP-P): Anotlar ve katotlar paralel olarak bağlanır. Paralel bağlamada, aralarında potansiyel farkın düşük olması gerekir (Khandegar 2013).

Monopolar elektrotların seri olarak bağlanması (MP-S): Monopolar elektrotlar seri olarak bağlanmıştır. Akım voltajının verilmesiyle yüksek potansiyel farklar oluşur (Khandegar 2013).

Bipolar elektrotların seri olarak bağlanması (BP-S): Dışardaki elektrotlar güç kaynağına bağlanırken, içerdeki elektrotlar herhangi elektrik bağlantısı yoktur. (Khandegar 2013).

Akım yoğunluğu: Akım yoğunluğu, elektrokimyasal arıtımını etkileyen önemli faktörlerden biridir. Akım yoğunluğunun artması ile baloncuk üretimi ve çökelti oluşma miktarı artmaktadır. Akım yoğunluğu, metalhidroksit miktarını artırdığından arıtma verimini yükseltmektedir. Fakat optimumdan fazla akım yoğunluğunun verilmesi, verimi etkilemediği gibi maliyeti ve çamur miktarını artırmaktadır (İlhan vd. 2007, Khandegar 2013).

pH değeri: Çözeltinin pH'ı EK'un verimini etkileyen en önemli parametrelerden biridir. EK'da maksimum kirletici uzaklaştırılabildiği pH değeri, EK için uygun pH değeridir. pH EK'daki metalhidroksitlerin miktarını belirlemektedir. Uygun olmayan pH değerinde, metal hidroksitlerde artışlar meydana gelecek. Metalhidroksitlerin artışı ise yumak oluşumunun azalmasına neden olacaktır (Vardar 2006). Ortamda NaCl olması durumunda meydana gelen reaksiyonlar aşağıda verilmiştir.

$$2Cl^- \rightarrow Cl_2 \tag{3.35}$$

$$Cl_2 + H_2O \rightarrow HOCl + Cl^- + H^+ \tag{3.36}$$

$$HOCl \rightarrow OCl^- + H^+ \tag{3.37}$$

Yukardaki reaksiyonlarda da gördüğümüz gibi asidik veya nötr ortamlarda kuvvetli oksidan olan HOCl oluşacaktır. Buna karşın yüksek pH değerinde (pH>11) OCl_3^- ve OCl_4^- oluşumları nedeniyle oksidasyon verimleri düşecektir (Chen 2004, Vardar 2006).

$$6HOCl + 3\,H_2O \rightarrow 2ClO_3^- + 4Cl^- + 12\,H^+ + 3/2\,O_2 + 6e^- \tag{3.38}$$

$$ClO_3^- + H_2O \rightarrow ClO_4^- + 2H^+ + 2e^- \tag{3.39}$$

Yukardaki reaksiyonlarında gördüğümüz gibi yüksek pH değerinde düşük oksidan potansiyeline sahip klorat veya perklorat oluşumu gözleneceğinden yüksek pH'larda genel olarak iyi bir arıtım sağlanamamaktadır (Vardar 2006, Rajkumar vd. 2006).

Elektrooksidasyon esnasında hidroksil radikallerin oluşması ve elektrokoagülasyon esnasında metal hidroksitlerin oluşması pH değerini değiştirmektedir. Bu nedenle elektrooksidasyon prosesinde pH giderek düşmektedir. EK'da ise asidik atıksular için pH artarken, alkali atıksularda azalma eğilimindedir. Asidik ortamlarda pH değerinin artışı CO_2 oluşması ve Al^{+3} ile diğer anyonların çökelti oluşturması olarak açıklanabilmektedir. Alkali ortamlarda ise katotta oluşan H^+ ve anotta oluşan $Al(OH)_3$ oluşumunun H^+ oluşturması pH'ı düşürdüğü tahmin edilmektedir. Bunun yanında oksijen oluşması da pH'ı düşürmektedir (Chen 2004, Vardar 2006).

Kirlilik giderimi başlangıç pH'ına bağlı olduğu kadar son durumdaki pH değerine de bağlıdır (İlhan vd. 2007). Ayrıca EC esnasında pH'ın değişmesi, kirleticilerin uzaklaştırılma oranını azaltmaktadır (Khandegar 2013).

Verma vd. (2013) tarafından, elektrokoagülasyon yöntemi ile hekzavalent krominyum uzaklaştırılmıştır. Cr(IV) uzaklaştırılırken, pH'ın etkisinin yüksek olduğu görülmüştür. pH 4 değerinde krominyum'un uzaklaşmasının verimi çok yüksek olduğu belirtilmiştir. Elektroliz zamanı arttıkça OH^- üretimi arttığı için pH'ın arttığı tespit edilmiştir (Verma vd. 2013).

Li vd. (2011) tarafından, pH değeri, elektrokoagülasyon katotunda hidrojen üretimi ve demir hidroksitlerin serbest hale geçen hidroksitleri artıracağından ham solüsyonun pH'ını ayarlamaya gerek duyulmamıştır.

Chen (2004) tarafından, alüminyum elektrot kullanıldığında pH nötr haldeyken en iyi arıtma sağlandığı belirtilmiştir.

Elektroliz Süresi: Elektroliz süresi gerekenden az olması ihtiyaç duyulan verimi sağlayamamaktadır. Elektroliz süresi arttıkça kirletici uzaklaştırma verimi de

artmaktadır. Fakat optimum elektroliz süresinden fazla elektroliz etmek, kirleticileri uzaklaştırma verimi artırmadığı gibi maliyeti artırmaktadır.

Ortamda NaCl bulunması: Çözeltinin iletkenliğinin artırmak, enerji tüketimini azaltmaktadır. Bu nedenle çözeltinin iletkenliğini artırmak, kirleticilerin uzaklaştırılmasını kolaylaştırmakta ve prosesin maliyetini düşürmektedir. Sentetik olarak çözeltinin iletkenliğini artırmak için sodyum klorür veya sodyum sülfat eklenmektedir. (Khandegar 2013).

Klorür iyonu ortamın dezenfekte olmasını sağladığından ve HCO_3^-, SO_4^{-2} gibi anyonların olumsuzluklarını engellediğinden genel olarak elektrokoagülasyon proseslerine NaCl kullanılmaktadır (Chen 2004, Vardar 2006).

Sıcaklık: Yüksek sıcaklık elektrot üzerinde birikime sebep olmaktadır. Elektrokoagülasyonda alüminyum elektrotun kullanılması halinde akım veriminin başlangıçta sıcaklık ile arttığı, yüksek sıcaklıklarda ise akım verimini düşürmektedir (Vardar 2006).

Güç Kaynağı: Elektrokoagülasyon prosesinde, anotta metal hidroksit üretimi oluşmaktadır. Bu metal hidroksit iyonları çöktürücü olarak rol oynamakta ve kirleticileri sedimentasyon ile uzaklaştırmaktadır. Doğru akım (DC) kullanımı, oksidasyondan dolayı korozyon oluşumunu artırmaktadır. Katotta oksidasyon tabakasının oluşumu ise anot ile katot arasında elektrik akımının geçişini azaltmaktadır. Böylece kirleticilerin uzaklaştırma verimini düşürmektedir (Khandegar 2013).

Alternatif akım elektrokoagülasyon tekniği, elektrotların anot ve katod sıralamasını belirli periyotlarla değiştirerek pasifleşme sorununu önlemesi ve elektrot ömrünü uzatması amacıyla tercih edilmektedir (Yılmaz 2003, Can 2010).

3.3 İstatistiksel deney tasarımları

Optimizasyon, genel olarak belli bir amaç için uygun şartlarda en iyi sonucun alınması olarak tanımlanmaktadır. Proseslerde, prosesleri etkileyen parametrelerin sınır şartlarında optimum değer belirlenmeye çalışılır. Optimum değer belirlenmeye çalışılırken istenilen faaliyetin verimi ve sistemin maliyeti uygun parametreleri belirlemede en önemli kriterlerdendir.

Deneyde giriş değişkenlerdeki değişim çıkış değişkenlerin değişmesine neden olur. Deneylerin istatistiksel planlamasında doğrusal olan ve doğrusal olmayan regresyon deneyleri şeklinde 1'inci ve 2'nci dereceden polinomlarla belirtilir (Fisher 1960).

Doğrusal Model

$$Y = b_0 + \sum_{\substack{i,J=1 \\ i<j}}^{k} b_{ij} X_i X_j \tag{3.40}$$

Doğrusal olmayan Model

$$Y = b_0 + \sum_{\substack{i,J=1 \\ i<j}}^{k} b_{ij} X_i X_j + \sum_{\substack{i,J=1 \\ i<j}}^{k} b_{ii} X_i^2 \tag{3.41}$$

Burada, bo, bi, bij ve bii deneylerin katsayılarıdır. Bu katsayıları bulabilmek için deney sayısının bilinmesi gerekir. Doğrusal modeller için yapılması gereken deney sayısı,

$$\text{Deney Sayısı} = 2^M \tag{3.42}$$

Doğrusal olmayan modeller için,

$$\text{Deney sayısı} = 2^M + 2 \times M + 1 \tag{3.43}$$

Regresyon modelin katsayıları aşağıdaki denklemle hesaplanır.

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^{N} X_{ij} y_j}{\sum_{j=1}^{N} X_{ij}^2} \tag{3.44}$$

$$\propto = \sqrt{1/2\left(\sqrt{N_M^2 + N_M(N_\propto + 1)} - N_M\right)} \tag{3.45}$$

M: faktör sayısı

$$N_M = 2^M \tag{3.46}$$

$$N_\alpha = 2M \tag{3.47}$$

$$X_1 = \frac{U_1 - U_{1,ort}}{\Delta U_1} \tag{3.48}$$

$$X_2 = \frac{U_2 - U_{2,ort}}{\Delta U_2} \tag{3.49}$$

$$U_{1,ort} = \frac{U_1^+ + U_1^-}{2} \tag{3.50}$$

$$U_{2,ort} = \frac{U_2^+ + U_2^-}{2} \tag{3.51}$$

$$\Delta U_1 = \frac{U_1^+ - U_1^-}{2} \tag{3.52}$$

$$\Delta U_2 = \frac{U_2^+ - U_2^-}{2} \tag{3.53}$$

Burada U_i^+, U_i^- ve U_{ort} sistemin gerçek değerinin sırasıyla en yüksek, en düşük ve ortalama değeridir. Doğrusal model aşağıdaki gibi yazılır.

$$y = b_0 + b_1 \frac{U_1^+ - U_1^-}{2} + b_2 \frac{U_2^+ - U_2^-}{2} + b_{12}\left(\frac{U_1^+ - U_1^-}{2}\right)\left(\frac{U_2^+ - U_2^-}{2}\right) \tag{3.54}$$

Son yıllarda birden fazla tepkimenin meydana geldiği ve birden fazla parametrenin deneyin sonuçlarını etkilendiği proseslerde optimum parametreleri belirlemek maksadıyla Dizayn Expert programında mevcut olan Cevap Yüzey Yenileme yöntemi kullanılmaktadır.

3.3.1 Dizayn Expert (DE) 7.0.0. paket programı

Dizan Expert programı deneyi etkileyen parametreleri değiştirilerek elde edilen sonuçların arasındaki ilişkiyi belirlemek maksadıyla kullanılmaktadır. Bu paket programda cevap yüzey yenileme yönteminin yanında iki düzeyli faktoriyel programa, genel faktoriyel programa, karışık tasarım teknik yöntem ve prosess etkenlerinin kombinasyoları mevcuttur. Ayrıca, üç boyutlu ve kontur grafikleri sayesinde optimum parametre aralıkları daha kolay takip edilebilmektedir.

Cevap Yüzey Yenileme Metodu: Cevap Yüzey Yenileme (CYY) tepkimeyi etkileyen birden fazla parametrenin bulunduğu durumlarda kullanılmaktadır. Bu yöntemde tepkimeyi etkileyen parametreler araştırmacı tarafından belirlenir ve bağımsız değişken olarak isimlendirilir. Parametrelerin tepkimeyi etkilemesiyle elde edilen verim ve üretim maliyeti gibi tepkimenin davranışları prosesin cevabıdır.

Genel olarak çalışmalarda, bağımsız değişkenlere bağlı olan bağımlı değişkenlerin değişimi araştırılmaktadır. Deney sonuçları ve bağımsız değişkenler programa girilerek 3 boyutlu ve 2 boyutlu kontur grafikleri elde edilmektedir. Bu grafikler sayesinde hangi bağımsız aralıklarda en iyi sonuçlar takip edilebilmektedir. Ayrıca, prosesten elde edilen cevap ile bağımsız değişken arasında matematiksel model elde etmemizi sağlamaktatır.

İstatistiksel Deney Tasarımı: Çalışmaya başlamadan önce bağımsız değişkenlerin değerlerini belirleyerek deney tasarımı yapmak iyi bir sonuç alabilmek için oldukça önemlidir. İstatistiksel deney tasarımı için iki seviyeli faktöriyel deney tasarımı

kullanılacaktır. İki faktöriyel tasarımı birinci dereceden model ve ikinci dereceden model olmak üzere iki modelden oluşmaktadır.

Koagülasyon deneyinde pH ve çöktürücü doz miktarı, elektrokoagülasyon deneyinde ise pH, iletkenlik, elektroliz zamanı ve akım bağımsız değişken olarak tanımlanmıştır. Dizayn Expert programı cevap yüzey yenileme metodu ile p-değeri, R^2, F değerleri elde edilmiştir. Ayrıca, KOİ ve bulanıklık giderimi verimleri verileri kullanarak dizayn expert programı ile denklemler elde edilir. Böylece, b_1, b_2, b_3 katsayıları bulunmuş olur.

$$Y= b_0+ b_1X_1+b_2X_2+b_3X_1X_2+b_4X_1^2+b_5X_2^2 \quad (3.55)$$

3.4 Proses Kontrol ve Proses Kontrol Sistemleri

Otomatik kontrol sistem araçları M.Ö. 250'nin ilk yıllarından itibaren kullanılmaktadır. Otomatik kontrol sistemleri ilk olarak tuvaletlerde kullanılan su seviyeleri sifon kontrol sistemleri ilk olarak kullanılmıştır. 1788 tarihinde James Watt tarafından bulunan buhar kontrolü fly-ball governor ile buhar gücünün gelişmesinde büyük bir rol oynamıştır (Seborg vd. 1979).

Günümüzde, endüstrinin nerdeyse her alanında kullanılan proses kontrol, hayatımızın vazgeçilmezi haline gelmiştir. 1970'lerden itibaren yaşanan teknolojideki büyük değişikliklerle birlikte prosess kontrol dijital teknolojide kabiliyetlerini çok artırmıştır. Yüksek performans gösteren ölçüm sistemleri ve kontrol sistemleri, dijital cihazların kullanımı ile elde edilmiştir. Çok kompleks kontrol sistemleri, geri besleme, çok değişkenli ve adaptif kontrol sistemleri bir çok üretim alanında kullanılmaktadır (Seborg vd. 1979).

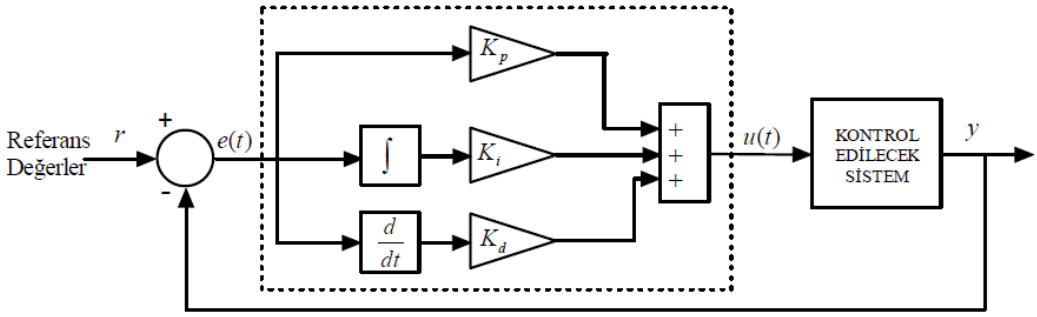
Proses kontrol bir sistemin davranışını düzenleyerek bir hedefe doğru kontrol edilmesidir. Kontrol sisteminde bir set noktası r(t) belirlenir. Giriş değişkenine U(t)

sinyal uyarıları gönderilir. Elde edilen cevap ise çıkış değişkenidir y(t). Giriş ve çıkış değişkeni kontrol edilebilir veya kontrol edilemeyen olabilir. Hedeflenen set noktasının r(t) kontrol edilmek istenen çıkış değişkenine farkı kontrol sisteminin hata e(t) değeridir.

3.4.1 PID kontrol edici

Oransal (P), integral (I) ve türevsel (D) olmak üzere 3 adet geri dönüşümlü kontrol sistemi mevcuttur. 1940'lardan beri, PID kontrol sistemleri çok geniş endüstride yer almaktadır. 1950'nin sonu 1960'lı yılların başından itibaren bilgisayar kontrol sistemleri kullanılmaya başlamıştır (Seborg vd. 1979).

Endüstride sık kullanılan PID kontrol ediciler, diğer kontrol edici algoritmalardan daha geniş alanda kullanılmaktadır. Geri beslemeli sistemlerde yapısının basit olması ve daha kullanışlı olması nedeniyle genel olarak PID kontrol sistemi seçilmektedir (Karahan 2012).



Şekil 3.10 PID Geri beslemeli kontrol sisteminin blog diyagramı (Karahan 2012)

Şekil 3.10'da verilen PID kontrol edicinin yapısı oransal (proportional), integral (integral) ve türev (derivative) olan üç kontrolörün toplamından oluşmaktadır.

i) Oransal Kontrol

$$u(t)= K_p e(t) \tag{3.56}$$

ii) İntegral Kontrol

$$u(t)=K_I\int_0^t e(t)dt \tag{3.57}$$

ii) Türevsel kontrol

$$u(t) = KD\ \frac{de(t)}{dt} \tag{3.58}$$

Geri beslemeli kontrol sisteminde kontrol edilecek çıkış değişkenin verisinin set noktası ile kontrol edilerek prosese girdinin kontrol edilmesidir.

Kontrol sisteminde e (t) hata sinyali azalması amaçlanmıştır.

$$e(t) = r(t) - y(t) \tag{3.59}$$

r (t) = Set noktası

y(t)= Ölçülen kontrol değişkeni

Kontrol sistemlerini uygulamada yalnız oransal, oransal-integral ve oransal-integral-türevsel kontrol ediciler kullanılmaktadır.

$$u(t) = Kpe(t) + Ki\int_0^t e(t)dt + Kd\frac{de(t)}{dt} \tag{3.60}$$

u (t): kontrol edilen sisteme uygulanacak olan kontrol sinyali.

Yukardaki denklemin Laplace dönüşümü alındıktan sonra elde edlen PID kontrol sisteminin transfer fonksiyonu;

$$U(s)= E(s)\ (K_p+K_I\frac{1}{s}+ K_d s) \tag{3.61}$$

U sinyali kontrol edilen sisteme gönderildikten sonra çıkış Y elde edilir. Y çıkış sinyali, set değerinden R çıkartılarak yeni hata sinyali (e) bulunur. Hata sinyali PID denetleyiciye gider. PID denetleyici de hata sinyalinin türevini ve integralini hesaplar. ITAE (Integrated of Time Weighted Absolute Error), IAE (Integrated Absolute Error), ISE (Integrated Square Error) yöntemleri olarak üç adet popüler PID performans göstergeleri vardır. ITAE, IAE ve ISE performans kriterlerinin hesaplama formülleri aşağıda verilmiştir.

$$IAE = \int_0^\infty [r(t) - y(t)]dt = \int_0^\infty [e(t)]\, dt \tag{3.62}$$

$$ISE = \int_0^\infty e^2(t)dt \tag{3.63}$$

$$ITAE = \int_0^\infty t.[r(t) - y(t)]dt = \int_0^\infty t.[e(t)]\, dt \tag{3.64}$$

3.4.2 PID Kontrol edicilerin parametrelerini belirleme yöntemleri

PID kontrol edicilerin parametrelerini belirlemek için kullanılan yöntemlerden biriside Cohen Coon yöntemidir. Cohen Coon yöntemi ile PID parametrelerinin yada kazanç değerlerinin hesaplanma şekli aşağıda açıklanmıştır.

Cohen Coon Yöntemi

1953 yılında Cohen ve Coon tarafından dizayn edilmiş olup en eski yöntemlerden birisidir. Sistemin verdiği cevaplara aşağıdaki fonksiyonun uyduğu kabul edilir.

$$G(s) = \frac{Ke^{-(\tau ds)}}{1+\tau s} \tag{3.65}$$

Prosesin yatışkın hale getirilir ve kontrol sistemi devreden çıkartılır. Daha sonra ayarlanabilen değişkene basamak etkisi verilir ve sistemin yatışkın hale gelmesi beklenir. Böylece, sistemin yatışkın hale geçme zamanının grafiği elde edilir. Elde edilen grafiğin maksimum noktasından teğet çizilir. Teğetin apsisi kestiği nokta sistemin ölü zamanı, t_d olarak gösterilir. τ, sistemin zaman sabitini gösterir. K ise ayar değişkenine basamak etkisi verildiğinde çıkış değişkenin iki yatışkın haldeki farkın basamak değişimine veya kademe değişimine bölümüdür (Cohen ve Coon 1967). Aşağıdaki denklemlerle oransal, integral ve türevsel parametreler veya kazançlar hesaplanır.

$$\tau p = \frac{1}{K}\frac{\tau}{td}\left[\frac{4}{3} + \frac{td}{4\tau}\right] \tag{3.66}$$

$$\tau_I = td\left[\frac{32+6td/\tau}{13+8td/\tau}\right] \tag{3.67}$$

$$\tau_D = t_d\left[\frac{4}{11+2td/\tau}\right] \tag{3.68}$$

PID kazançlarını hesaplamak için Cohen Coon gibi farklı metodlar kullanıldığı gibi Parçacık Sürü Optimizasyonu, Türevsel Evrim Algoritma ve Yer çekimsel Algoritmalar gibi farklı optimizasyon yöntemleri de kullanılmaktadır.

3.5 Parçacık Sürü Optimizasyonu

Popülasyon tabanlı, sürü zekası (swarm intelligance) temeline dayalı bir optimizasyon yöntemi olan Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Kennedy ve Eberhart tarafından 1995-1996 yıllarında geliştirilmiştir (Kennedy ve Eberhart 1995). PSO, kuş, balık ve

hayvan sürülerinin sosyal davranışları olan birbirileriyle bilgi paylaşarak çevrelerine adaptasyonu, yiyecek bulabilme ve avcılardan kaçabilme özelliklerinden yaralanılarak tasarlanmıştır. Genel olarak PSO doğrusal olmayan problemleri çözümünde kullanılmaktadır (Alataş 2007).

Son yıllarda, PSO genel olarak zor problemlerin çözümünü kolay, hızlı ve maliyeti etkin olarak çözebilmektedir. Optimizasyon problemlerinde, sayı programlama problemlerinde, tümleşik optimizasyon problemlerinde, küme ve sınıflama problemlerinde ve sayısal mühendislik problemlerinde kullanılır.

PSO'da bulunan her bir parçacığın pozisyonunun bilgisi çözümü ifade etmektedir. Parçacığın pozisyonunun değiştirme miktarı, parçacığın hızıdır. Her bir parçacığın pozisyon değerleri uygunluk fonksiyonuna göre değerlendirilir. Bütün parçacıklar, uygunluk fonksiyonuna göre kendi keşfettikleri en iyi pozisyon değeri ile diğer parçacıkların ulaştığı en iyi değer ile karşılaştırarak, en iyi pozisyonu bulmaya çalışırlar (Ortakçı 2011).

PSO diğer optimizasyon tekniklerine göre avantajlıdır. Ayarlanması gereken parametreler da az olduğundan daha kolay uygulanır. Parçacıklar hem kendi en iyi pozisyon değerini hem de diğer parçacıkların en iyi pozisyon değerlerini hatırlamaktadırlar. PSO’da bulunan çözüm uzayında kötü sonuçlar değiştirilmez böylece arama uzayı daraltılmaz (Ortakçı 2011). Bu nedenlerden dolayı PSO pek çok alanda başarılı bir Şekilde uygulanmaktadır.

PSO’da uzaydan seçilen bir grup parçacık pozisyonu seçilir ve güncellemelerle en uygun parçacık pozisyonu bulunur. Her bir güncellemelerde elde edilen en iyi değerlerden biri o ana kadar parçacığın elde ettiği, p_{best} değeridir. g_{best} değeri ise o ana kadar en iyi çözümü sağlayan değerdir. D adet parametreden oluşan n adet parçacık olduğunu varsayalım. Bu durumda popülasyon parçacık matrisi denklem 3.69’da verilmiştir.

$$x = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & \dots & x_{1D} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & \dots & x_{2D} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & \dots & x_{nD} \end{bmatrix}_{n \times D} \tag{3.69}$$

PSO problemde sürüdeki *i*. parçacığı için konum vektörü ($x_i = x_{i1}, x_{i2}, \dots x_{ik}, \dots x_{id}$) olsun. *i*. parçacığın p_{best} değerleri, ($P_i = p_{i1}, p_{i2}, \dots p_{ik}, \dots p_{id}$)' dir. *i* parçacığın hız vektörü ise ($v_i = v_{i1}, v_{i2}, \dots v_{ik}, \dots v_{id}$) olsun. J. Kennedy ve R.C. Eberhart tarafından oluşturulan PSO denklemi şöyle yazılabilir.

$$v_{i,j}^{(t+1)} = v_{i,j}^{(t)} + c_1 r_1 (pbest_{i,j} - x_{i,j}^{(t)}) + c_2 r_2 (gbest - x_{i,j}^{(t)}) \tag{3.70}$$

$$x_{i,j}^{(t+1)} = x_{i,j}^{(t)} + v_{i,j}^{(t+1)} \tag{3.71}$$

t= iterasyon sayısı; j=1,2,...,d;

c_1 parçacığın tecrübelerine göre, c_2 ise sürüdeki parçacıkların tecrübelerine göre hareketi yönlendirir.

Y. Shi ve R.C. Eberhart, orijinal denkleme eylemsizlik ağırlığı (EA) parametresini eklemişlerdir.

$$v_{i,j}^{(t+1)} = EAv_{i,j}^{(t)} + c_1 r_1 (pbest_{i,j} - x_{i,j}^{(t)}) + c_2 r_2 (gbest - x_{i,j}^{(t)}) \tag{3.72}$$

$$x_{i,j}^{(t+1)} = x_{i,j}^{(t)} + v_{i,j}^{(t+1)} \tag{3.73}$$

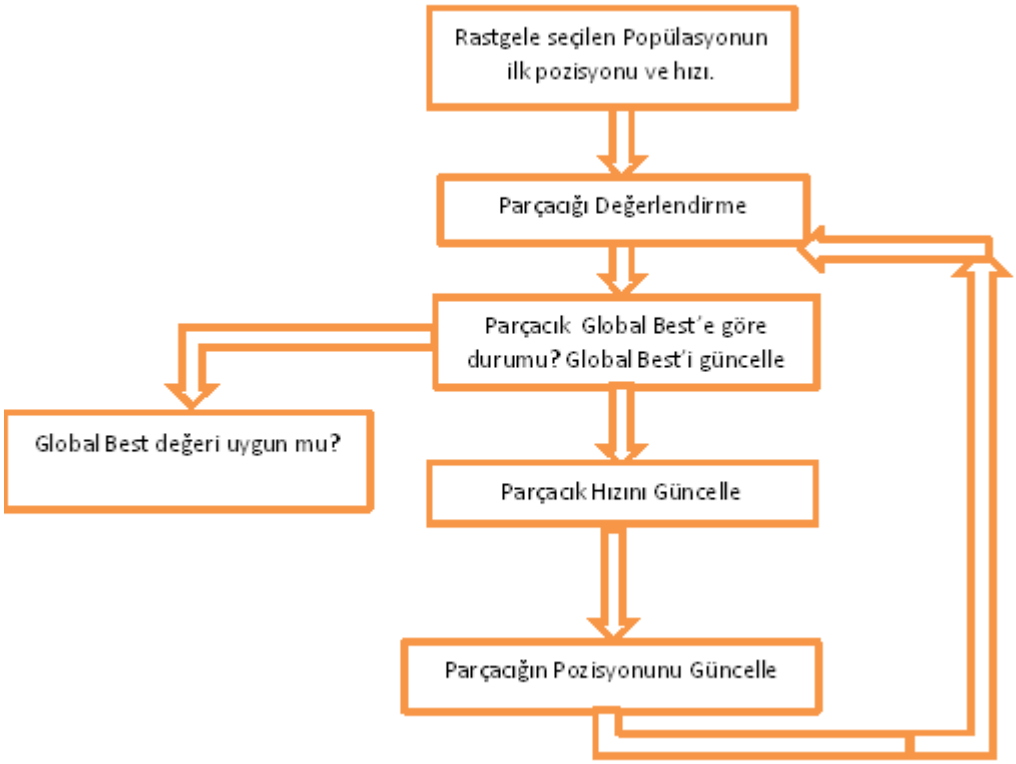
şeklinde denklemimiz yazabiliriz. Eylemsizlik global ve yerel arama yeteneğini dengelemek için kullanılır. Böylece optimal sonuca daha iterasyon yaparak ulaşabiliriz.

$$v_i(t+1) = EA(t)v_i(t) + c_1r_1(t)\,[x_{i,pbest}(t) - x_i(t)] + c_2r_2(t)\,[x_{i,gbest}(t) - x_i(t)] \quad (3.74)$$

Öğrenme faktörleri, c_1 ve c_2 genellikle 1.494 olarak seçilir. Eylemsizlik aralığı, w genellikle 0.4 ve 0.9 aralığında bir sayı seçilir. Birçok algoritmada eylemsizlik ağırlığı zamanla değeri düşürülür. Genellikle eylemsizlik ağırlığı 0.9'dan 0.4'e kadar lineer olarak azalmaktadır. Eylemsizlik ağırlığı aşağıdaki denkleme göre hesaplanır (Gaing, 2004).

$$EA = EAmax - \frac{EAmax - EAmin}{itermax} * iter \quad (3.75)$$

PSO algoritmasının temel komut dizimi şekil 3.11'de verilmiştir. Örnek hesaplamalar EK 1'de verilmiştir.



Şekil 3.11 Temel PSO algoritmasının temel komut dizimi

3.5.1 Parçacık optimizasyonunda parametre kontrolü

Başlangıç parçacık miktarı: Bir çok problem için 10 parçacık yeterlidir. Bazı zor problemler için 100 veya 200 parçacık kullanılması gerekebilir.

Parçacıkların Boyutu: Parçacıkların boyutu probleme bağlı bir değişkendir. Optimize edilecek fonksiyon kaç boyutlu ise parçacıkların boyutları da o kadar olacaktır.

Parçacık değer aralığı: Parçacık değer aralığı probleme bağlı bir parametredir. Optimize edilecek değişkenlerin değer aralığını belirtmektedir.

V_{max}: Bir parçacığın alabileceği maksimum hız değeridir. Örnek olarak [-15, 15] aralığında maksimum hız V_{max} değeri 30 dir.

Öğrenme faktörleri: Genel olarak c_1 ve c_2 değeri 1.494 olarak seçilir.

Durdurma kriteri: Belli bir adım sayısınca g_{best} değerinin değişmemesi veya uygunluk fonksiyonunun istenen düzeye ulaşması durdurma kriteri olarak kabul edilebilir.

Eylemsizlik ağırlığı ve büzülme katsayısı: Eski hız bilgisinin yeni hız bilgisine etkisini ayarlayan parametre eylemsizlik ağırlığıdır. Eylemsizlik ağırlığı, büzülme katsayısı ile çarpılarak zamanla değeri daha da küçülür. Böylece eski hız bilgisinin etkisinin daha da azalması sağlanır.

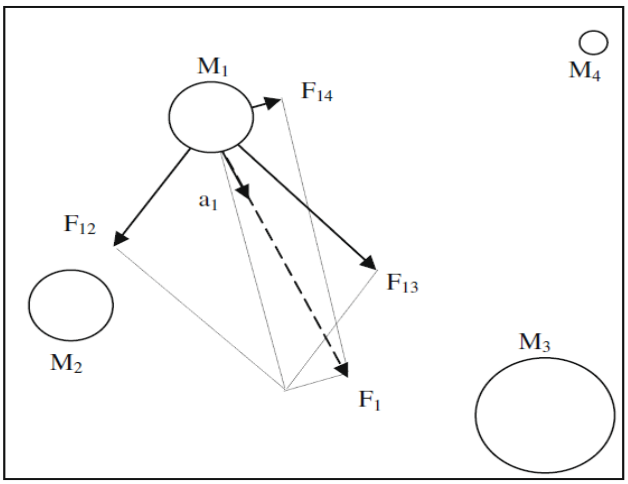
3.6 Yerçekimsel Arama Algoritması (YÇAA)

Doğadan esinlenerek oluşturulan bir çok optimizasyon yöntemlerinden biride Yer Çekimsel Arama Algoritması (YÇAA)'dır. Yer çekimi kanunundan ve kütle etkileşimden yararlanılarak ilk olarak 2009 yılında Rashedi ve arkadaşları tarafından sunulmuştur. Newton'un yer çekimi kuvveti parçacıkların birbirini uzaklığa bağlı olarak çekmesidir. Yerçekimi kuvvetinin denklemi aşağıda verilmiştir.

$$F_{ij} = G\frac{MajMpi}{D^2} \tag{3.76}$$

$$a = \frac{F}{M} \tag{3.77}$$

Denklem (3.96)'ya göre F, yerçekimi kuvveti; G, yerçekimi sabiti; M_1 ve M_2, birbirlerin D uzaklıktaki 1. ve 2. parçacıkların ağırlığıdır. Denklem 3.95'e göre M cismine F kuvveti uygulandığında elde edilen cisme ait ivmedir. Cisimlerin birbirine uyguladıkları çekim kuvvetleri şekil 3.12'de verilmiştir.



Şekil 3.12 Cisimlerin birbirlerine uyguladıkları çekim kuvvetleri (Rashedi 2009)

Ajanları nesne gibi kabul edersek ve her bir ajanların kütlelerini (N) olarak sistem olduğunu düşünelim.

$$x_i=(x_i^1, \ldots, x_i^d, \ldots x_i^n) \quad i=1,2,\ldots,N \tag{3.78}$$

X_{id}, d boyut içerisinde i ajanın pozisyonu olarak kabul edebiliriz. Belirli bir zamanında j kütlesinden i kütlesine uygulanan kuvvet hareketi aşağıda verilmiştir.

$$F_{ij}(t) = G(t)\frac{Maj(t)\times Mpi(t)}{D_{ij}(t)+\in}(xid(t) - xid(t)) \tag{3.79}$$

$$D_{ij}=\|X_i(t), X_j(t)\|_2 \tag{3.80}$$

D_{ij}, i ve j parçacığının arasındaki mesafedir.

A boyutundaki i ajanına ait uygunan toplam kuvvet aşağıda verilmiştir.

$$F_i^d(t) = rand_j \sum_{j=1, j\neq i}^{N} F_{ij}^d(t) \tag{3.81}$$

$$a_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{M_{ii}(t)} \tag{3.82}$$

t zamanda, A boyutunda i ajanına uygulanan kuvvet F_i^d'dir. M_{ii}, i ajanın ataletsel ağırlığıdır. Böylece ajanın bir sonraki hızı şu andaki hızına ivme eklenerek aşağıda hesaplanmıştır.

$$v_i^d(t+1)=rand_i\times v_i^d(t)+a_i^d(t) \tag{3.83}$$

$$x_i^d(t+1)=x_i^d(t)+v_i^d(t+1) \tag{3.84}$$

Randj, [0,1] aralığında alınan rastgele bir sayıdır.

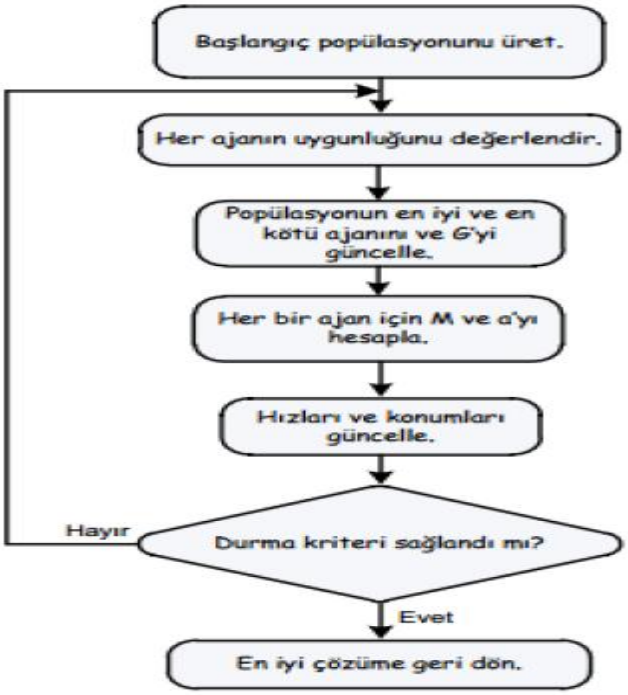
$G(t)=G(G_0,t)$ (3.85)

$M_{ai}=M_{pi}=M_{ii}=M_i$, i=1,2,…,N. (3.86)

$$M_i(t) = \frac{fit_i(t)-worst(t)}{best(t)-worst(t)} \quad (3.87)$$

$fit_i(t)$ t zamanında i ajanının uygunluk değerini vermektedir.

Başlangıçtaki yerçekimi sabiti zamanla azalacaktır. YÇAA'nın akış şeması şekil 3.13'te verilmiştir.



Şekil 3.13 Yerçekimi arama algoritması akış şeması (Güvenç ve Katırcıoğlu 2015)

Minimizasyon problemleri için worst(t) ve best(t) değerleri aşağıda verilmiştir.

$$best(t) = min_{j\in(1,\dots N)} fit_j(t) \quad (3.88)$$

$$worst(t) = max_{j\in(1,\dots N)} fit_j(t) \quad (3.89)$$

Maksimizasyon problemleri için worst(t) ve best(t) değerleri aşağıdaki denklemde hesaplanmaktadır.

best(t) = $max_{j\in(1,\ldots N)} fit_j(t)$ (3.90)

worst(t) = $min_{j\in(1,\ldots N)} fit_j(t)$ (3.91)

$$F_i^d(t) = rand_j \sum_{j\in Kbest, j\neq i}^{N} F_{ij}^d\,(t) \quad (3.92)$$

K_{best} en iyi uygunluk değeridir.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Literatürde genel olarak kimyasal çöktürme ve elektrokoagülasyon proseslerinde pH sabit tutulmadan, arıtım öncesi ve arıtım sonrası atıksuyun pH'ı belirtilerek analiz yapılmaktadır. Bu çalışmada ise farklı olarak kimyasal çöktürme ve elektrokoagülasyon proseslerinde pH sabit tutularak evsel atıksuyu arıtma işlemi yapılmıştır.

Kimyasal Çöktürmede bağımsız değişkenler olarak adlandırılan farklı pH ve çöktürücü miktarları denenerek arıtım için optimum koşullar araştırılmıştır. Kimyasal çöktürmede ilk olarak jar testi yapılmış ve uygun pH ve çöktürücü miktarları aralıkları belirlenmiştir. Bu aralıklarda istatistiksel deney tasarımı yapılarak arıtım sonrası elde edilen KOİ ve bulanıklık değerleri Design Expert (DE) Programına aktarılmış ve Cevap Yüzey Yenileme (CYY) metodu ile optimum bağımsız değişkenler bulunmuştur.

Elektrokoagülasyon prosesinde ise Fe ve Al elektrotlarla arıtım gerçekleştirilmiştir. Arıtım esnasında bağımsız değişkenler (pH, iletkenlik, akım yoğunluğu ve elektroliz zamanı) ile elde edilen arıtımın KOİ ve bulanıklık giderimleri Design Expert (DE) Programı Cevap Yüzey Yenileme (CYY) metoduna aktarılmış ve optimum bağımsız değişkenler hesaplanmıştır. Cevap Yüzey Yenileme metodundan elde edilen model denklem $Y=b_1+b_2X_1+b_3X_2+b_4X_1X_2$ PSO Algoritma Matlab 14.0 programına aktarılarak elektrokoagülasyon ve kimyasal çöktürme arıtım yöntemleri için optimum bağımsız değişkenler bulunmuş ve CYY metodundan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Kimyasal Çöktürme ve elektrokoagülasyon proseslerinde, bulunan optimum bağımsız değişkenlerde farklı yöntemlerle hesaplanan PID parametreleri ile ölçülebilen değişken olan pH kontrol edilmiştir. Kontrol esnasında ayarlanabilen değişken kimyasal çöktürme prosesinde baz (NaOH), elektrokoagülasyon prosesinde ise asit (HCl)'dir. Yapılan çalışmalar çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Yapılan çalışmalar

No	Yürütülen Çalışmalar	Amaç	Kapsam
1	Kesikli akışlı reaktörü kullanılarak gerçekleştirilen kimyasal çöktürme arıtım yöntemi çalışmaları yapılmıştır.	Kesikli akışlı reaktörde çöktürücü maddeleri ve pH değeri bağımsız değişkenlerin Kimyasal Çöktürme arıtıma etkisinin KOİ ve bulanık giderimlerine göre belirlenmiştir.	Kimyasal çöktürme arıtımının farklı pH ve çöktürücü bağımsız değişkenlerde jar testi yapılmıştır.
			Yapılan jar testinde elde edilen arıtımın KOİ ve bulanıklık giderimleri bulunmuştur.
			KOİ ve bulanıklık giderimleri Design Expert Programı yardımıyla Cevap Yüzey Yenileme Metodu ile karşılaştırılmıştır. Böylece kimyasal çöktürme için en uygun bağımsız değişkenleri (pH ve çöktürücü miktarı) bulunmuştur.
			Design Expert- Cevap Yüzey Yenileme Metodu ile bulunan doğrusal olmayan değişken modeli denklemi, parçacık sürü optimizasyon programı kullanılarak her bir çöktürücü için uygun bağımsız değişkenler bulunmuştur.
			Her bir çöktürücü maddesi için uygun bağımsız değişkenlerde farklı yöntemlerle kazançları hesaplanmış PID deneyleri yapılmıştır.
2		Kesikli akışlı reaktörde bulunan uygun bağımsız değişkenlerde işletme maliyeti hesaplanmıştır.	Bulunan uygun çöktürücü maddelerinin miktarlarının tüketilmesinde işletme maliyeti hesaplanmıştır.
3	Kesikli Akışlı Reaktörü kullanılarak alüminyum (Al) ve demir (Fe) elektrot kullanılarak gerçekleştirilen Elektrokoagülasyon arıtım yöntemi çalışmaları yapılmıştır.	Kesikli akışlı reaktörde bağımsız değişkenlerin her bir elektrot için elektrokoagülasyon arıtıma etkisinin KOİ ve bulanık giderimlerine göre belirlenmesi	KOİ ve bulanıklık giderimleri Design Expert Programı yardımıyla Cevap Yüzey Yenileme Metodu ile karşılaştırılmıştır. Böylece elektrokagülasyon için en uygun bağımsız değişkenleri(pH, akım, elektroliz zamanı ve iletkenlik) bulunmuştur.
			Design Expert- Cevap Yüzey Yenileme Metodu ile bulunan doğrusal olmayan değişken modeli denklemi, parçacık sürü optimizasyon programı kullanılarak her bir çöktürücü için uygun bağımsız değişkenler bulunmuştur.
			Her bir elektrot için uygun bağımsız değişkenlerde farklı yöntemlerle kazançları hesaplanmış PID deneyleri yapılmıştır.
4		Kesikli akışlı reaktörde bulunan uygun bağımsız değişkenlerde işletme maliyeti hesaplanmıştır.	Bulunan uygun bağımsız değişkenlerde işletme maliyeti hesaplanmıştır.

4.1 Atıksuyun Karakteristik Özellikleri

Yüksek yüklü olarak tanımlanan, çamaşır makinasından çıkan atıksular kirlilik oranı oldukça yüksek olan evsel atıksularıdır. Bu nedenle, çalışmalarda çamaşır makinasından çıkan atıksuları kullanılmıştır. Yapılan deneyler, çamaşır makinasından çıkan atıksuların kirlilik oranı aynı olması amacıyla aynı miktar deterjan ve aynı yıkama programı kullanılarak aynı çamaşırlar yıkanmıştır. Ayrıca evsel atıksuyun içinde bakterilerin oluşarak atıksuyun karakteristik özelliklerini değiştirmemesi için 2 gün içinde deneyler yapılmıştır. çizelge 4.2'de evsel atıksuya ait karakteristik özellikler verilmiştir.

Çizelge 4.2 Atıksuyun karakteristik özellikleri

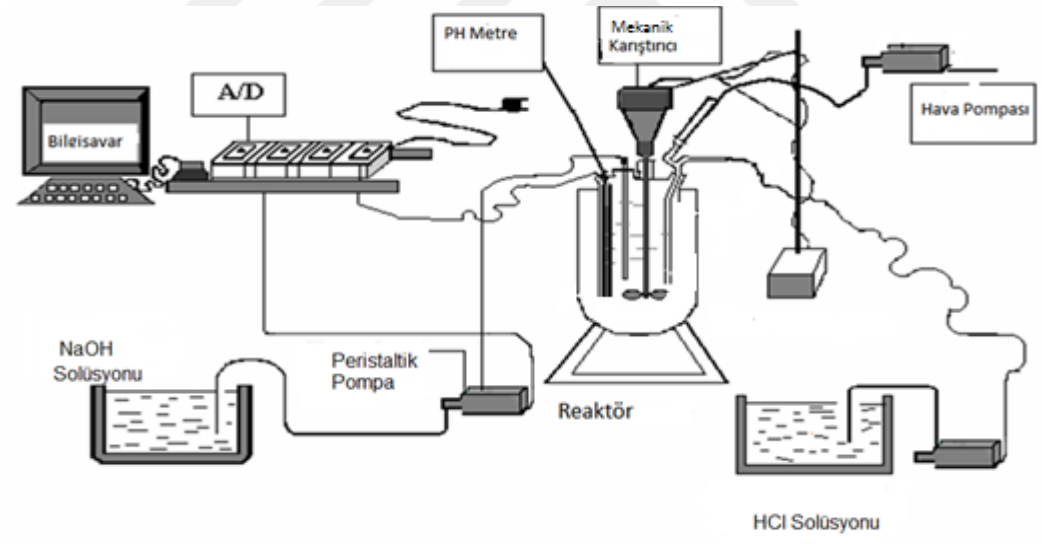
Parametreler	Değer
Bulanıklık (FTU)	55±7
KOİ (mg/L)	600±35
pH	7.6±0.2

Bu çalışmada evsel atık suların kimyasal ve elektrokimyasal arıtımında çeşitli çöktürücüler ve farklı katot ve anot denenerek pH, iletkenlik gibi parametrelerin modellenmesi ileri optimizasyon tekniği olan Parçacık Sürü Optimizasyonu tekniği kullanılarak ve Cevap Yüzey Yenileme metodu ile araştırılması amaçlanmıştır. Optimum koşullarda kimyasal çöktürme ve elektrokimyasal arıtım yapabilmek için ölçülebilen değişken olan pH kontrolü yapılmıştır.

4.2 Kimyasal Çöktürme Deney Sistemi

Sistemde IBM 586 kişisel bilgisayar bir A/D (anolog-digital) çevirici kanalı, pH sinyalini (0-14), (0-10V) voltaj olarak çevirmektedir. Deneyde 2L'lik yarı kesikli bir reaktör kullanılmış ve mekanik karıştırıcı kullanılarak karıştırma işlemi

gerçekleştirilmiştir. Sisteme bağlı iki pompa bir kontrol vanası bulunmaktadır. Etkin asit akımı olarak %10'luk HCl basamak etki verilirken nötralizasyon bazı olarak %10 NaOH çözeltisi ayarlanabilir değişken olarak reaktörü beslemektedir. Genellikle literatürde pH denetim sistemlerinde asit ve baz olmak üzere iki ayarlanabilen değişken olmasına karşılık sistemimizde iki tane A/D çeviricili pompa olmayışı ve asıl amaç arıtımda sisteme sürekli asit karakterli çöktürüyü ilave etmek olduğundan istenen set noktasına getirmede asit akımını kesip baz akımını yollamak hem amaca uygun değil hem de işletim masrafları açısından daha az enerji sarfiyatlıdır. Önerilen denetim sistemi bu eksikliği giderecek yönde çalıştırıldığında kısa sürede istenen set noktasına getirmektedir. Sonuç olarak önerilen adaptif keşifsel denetim pH sonuçları, izli ve izsiz olarak, PID denetim sonuçları ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 4.1-4.2'de kimyasal çöktürme deney sistemi verilmiştir.



Şekil 4.1 Kimyasal çöktürme deney sistemi

Şekil 4.2 Kimyasal çöktürme deney sistemi

Kimyasal çöktürme prosesi üç aşamadan oluşmaktadır. Öncelikle bağımsız değişkenlerin uygun aralığı belirlenmesi amacıyla jar testi yapılmıştır. Jar testinde, her bir çöktürücü için uygun çöktürücü miktarının ve pH değerlerinin aralıkları KOİ ve bulanıklık giderim değerlerine göre belirlenmiştir. Literatür araştırmalar ışığında 3 farklı çöktürücü kullanılmıştır; alüm [$Al_2(SO_3)$], demir klorür [$FeCl_3$], demir sülfat heptahidrattır [$FeSO_4.7H_2O$].

Kimyasal çöktürme deneyinin ikinci aşamasında ise jar testinden elde edilen çöktürücü miktarlarında ve pH değerlerinde, deney tasarımı yapılmıştır. 250 ml beherlerde bulunan çöktürücü eklenmiş evsel atıksuyuna % 10 HCl ve % 10 NaOH çözeltileri eklenerek deney tasarımındaki pH değerlerine ulaştırılmıştır. Çizelge 4.3'te kimyasal çöktürme deney tasarımı verilmiştir.

Çizelge 4.3 Kimyasal çöktürme deney tasarımı

Faktörler			Seviyeler				
		Sembol	-α (-1.414)	-1	0	1	+α (+1.414)
Alüm	Doz (mg/L)	X1	292	500	1000	1500	1700
	pH	X2	6.17	7	9	11	11.8
Demir klorür	Doz (mg/L)	X1	292	500	1000	1500	1700
	pH	X2	6.17	7	9	11	11.8
Demir sülfat heptahidrat	Doz (mg/L)	X1	292	500	1000	1500	1700
	pH	X2	6.17	7	9	11	11.8

Kimyasal Çöktürme işleminden sonra arıtılmış sulara ait ölçülen KOİ ve bulanıklık giderimleri Design Expert programına aktarılmış ve Design Expert programının 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafiklerinden yararlanılarak optimum bağımsız değişkenler bulunmuştur. Ayrıca ANOVA'dan elde edilen model denklemleri Matlab 14.0 programa dilinde yazılmış PSO algoritmasına aktarılarak tekrar optimum bağımsız değişkenler hesaplanmıştır. Her iki yöntemle bulunan optimum değerler karşılaştırılmıştır.

Kimyasal çöktürme prosesinin üçüncü aşamasında elde edilen optimum bağımsız değişkenlerde pH kontrolü yapılmıştır. Veri alma ve veri gönderme paket programı olan VISIDAQ paket programı kullanılarak, Visual Basic dilinde yazılan PID kontrol edici ile atıksuyun ölçülebilen değişkeni olan pH, kontrol edilmiştir. % 10'luk HCl çözeltisi 16.4 ml/dk sabit olarak, ayarlanabilen değişken olarak % 10'luk NaOH çözeltisi ile reaktör beslenmiştir.

4.2.1 Deneylerde kullanılan çöktürücü maddeler

Demir sülfat heptahidrat: Mol kütlesi 278.01 g/mol (CAS no 7782-63-0, EC no:231-753-5)'dür. Merck marka kullanılan demir sülfat heptahidrat, suda çözünebilir ve oda sıcaklığında mavi yeşil mono klinik kristaller halinde bulunur.

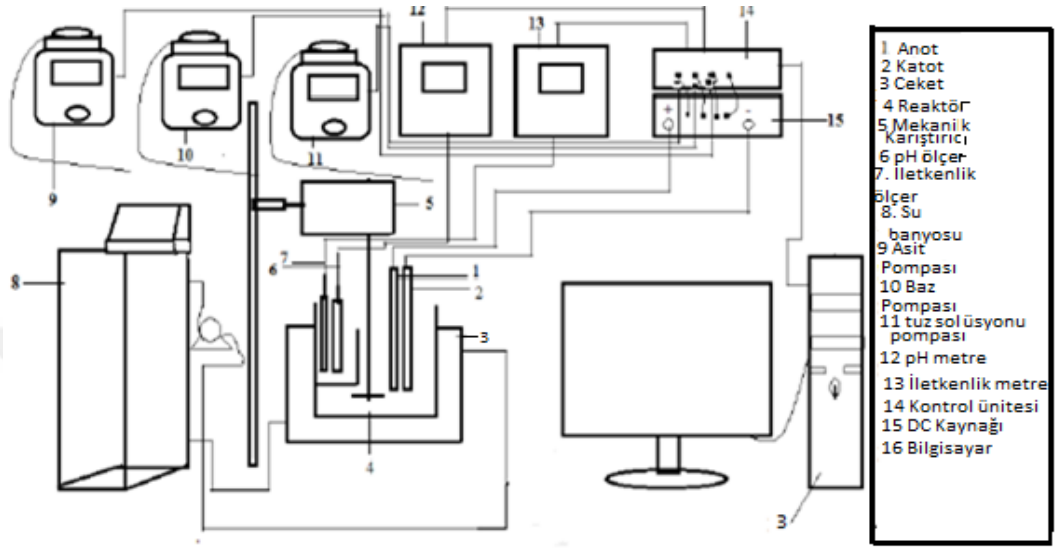
Demir klorür: Mol kütlesi 162.20 g/mol (CAS no 7705-08-0, EC no 231-729-4)'dür. Merck marka kullanılan demir klorür, endüstride atık su arıtımında kullanılmaktadır. Oda sıcaklığında yeşilimsi toz kristaller halinde bulunur.

Alüminyum Sülfat (Alüm): Mol kütlesi 342.15 g/mol (CAS no 10043-01-3, EC no 233-135-0)'dır. Sigma Aldrich marka ürün kullanılmıştır. Oda koşullarında beyaz kristaller halindedir. İçme suyu arıtımında kullanılır.

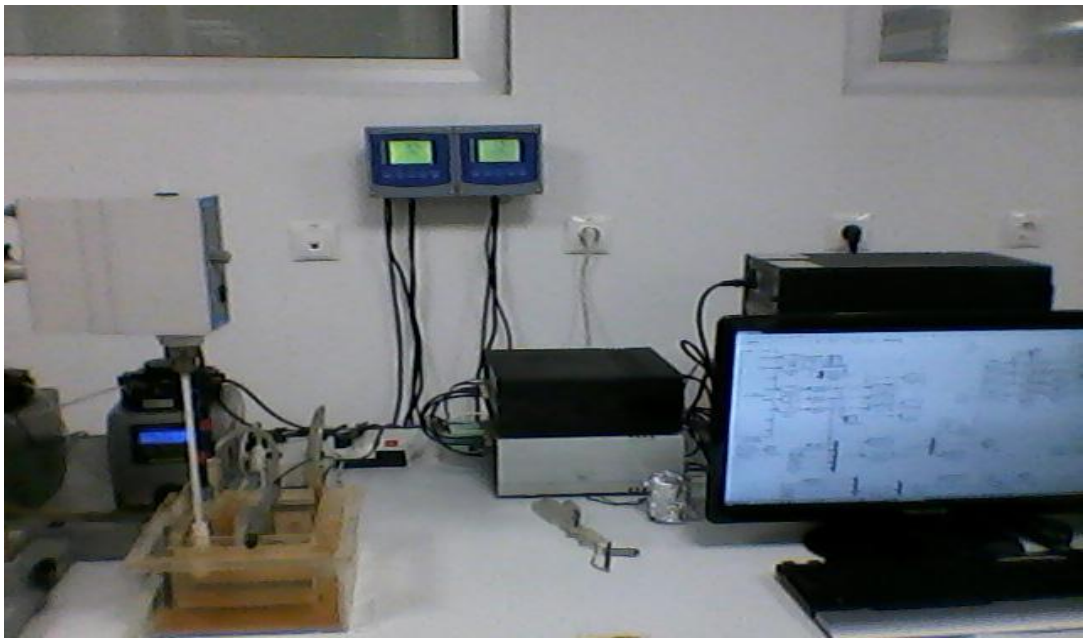
4.3 Elektrokoagülasyon Deney Sistemi

Elektrokoagülasyon prosesinde 1.5 L kapasiteli pleksi camdan yapılan ceketli bir kesikli tepkime kabı kullanılmıştır. Karıştırıcı olarak mekanik karıştırıcı kullanılmıştır. 12 mm aralıkta bulunan paralel bağlı olan 4 adet 60 mm*60 mm*2 mm boyutlarında Al ve Fe elektrotlar kullanılmaktadır. Fakat su içinde kalan her bir elektrotun yüzey alanı 30*60*2 mm olup toplam aktif yüzey alanı 3600 mm^2 dir. Elektrotlar monopolar olarak güç kaynağına bağlanmıştır. Elektrokoagülasyon optimizasyon deneylerinde ve kontrol proseslerinde 2 A, 100 V (MAY11-ESA Constant Current power supply, COMMAT Sanayi) kapasiteli doğru akım güç kaynakları ile akım ve voltaj sağlanmış ve kontrol elemanı olan (MAY11-ESA Elektrophoresis Control Unit) ile kontrol edilmiştir. Bilgisayara giden sinyaller sayesinde Matlab Simulink (Matlab 2014) ile deney tasarımda bulunan istenen akım değerlerine getirilebilmektedir. Elektrokoagülasyon reaktörünün ölçülebilen değişkeni plan pH kontrol edilmesi için Matlab Simulink (Matlab 2014) programı

kullanılmıştır. Bu programda iletkenlikte kontrol edilebilmektedir. Kimyasal endüstride kullanılan (Hoefer RCB20-PLUS) soğutma sistemi ile reaktör oda sıcaklığında tutulmuştur. Elektrokoagülasyon sistemi şekil 4.3 – 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.3 Elektrokoagülasyon sistemi



Şekil 4.4 Elektrokoagülasyon deney sistemi

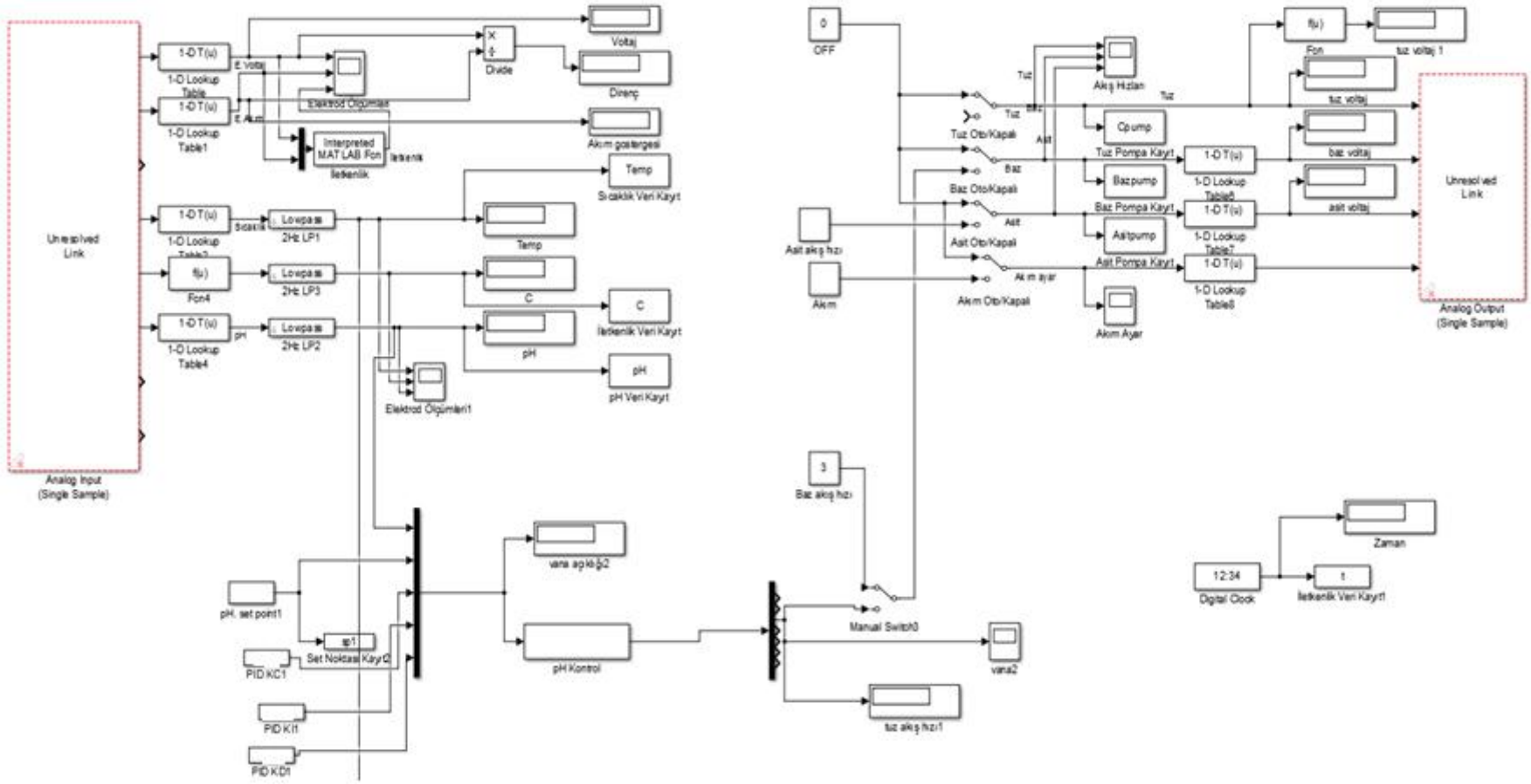
Elektrokoagülasyon prosesinde çalışmalar iki aşamada yapılmıştır. İlk aşama bağımsız değişkenlerin (pH, elektroliz zamanı, iletkenlik ve akım) optimizasyonu çalışmasıdır. Optimizasyon çalışmalarında istatistiksel analiz yapılabilmek amacıyla deney tasarımı çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4 Elektrokoagülasyon deney tasarımı

	-α	**-1**	**0**	**+1**	**+α**
Zaman (Dakika); X1	5	10	15	20	25
pH; X2	5.50	7.00	8.50	10.00	11.50
İletkenlik; (mS/cm); X3	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50
Akım (mA/cm^2); X4	3.5	7.0	10.5	14	17.5

Optimizasyon çalışmalarında elde edilen KOİ ve bulanıklık giderimleri Design Kontrol 7.0 Programına aktarılmış ve 3 boyutlu yüzey ve iki boyutlu kontur grafikleri kullanılarak optimum bağımsız değişkenler hesaplanmıştır. ANOVA'dan elde edilen model denklemleri Matlab 14.0 Programında yazılmış PSO algoritmaları kullanılarak optimimum bağımsız değişkenler bulunmuş ve CYY metodundan elde edilenler ile karşılaştırılmıştır.

Elektrokoagülasyon prosesinin ikinci aşamasında ise optimizasyon çalışması sonrası bulunan optimum değerlerde farklı metodlarla bulunmuş PID parametreleri ile ölçülebilen değişken olan pH kontrolü yapılmıştır. % 5'lik NaOH çözeltisi sabit akış değerinde sistemi beslerken, % 5'lik HCl çözeltisi ise ayarlanabilen değişken olarak sisteme verilmektedir. Elektrokoagülasyon sisteminde ayarlanabilen değişken olarak asit çözeltisi (HCl) seçilmesi, ayarlanabilen değişken olarak baz (NaOH) çözeltisi olarak seçilmesine göre daha iyi ölçülebilen değişkeni pH'ı sabit tuttuğu deneylerle tecrübe edilmiştir.



Şekil 4.5 Simulink programı

Elektrokoagülasyon deneyinde Matlab 14.0 Programı kullanılmıştır. Şekil 4.5'de Matlab Simulink programı yardımıyla sisteme verilen akım manual olarak değiştirilmiştir.

4.3.1 Akım yoğunluğu

Akım yoğunluğu birim kareye düşen akım miktarı olarak tanımlayabiliriz. Akım yoğunluğu denklem 4.1'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$J = \frac{I}{AA} \tag{4.1}$$

Eşitlikte, J; akım yoğunluğu (mA/cm^2, A/m^2), I; akım şiddeti (mA, A), AA; Aktif anot yüzey alanı (cm^2, m^2).

4.4 Bulanıklık Ölçümü

Koagülasyondan ve Elektrokoagülasyondan elde edilen numunelerin bulanıklık değerleri, Orbeco-Hellige, Model 975-MP spektrofotometre cihazıyla ölçülmüştür (Şekil 4.6).

Şekil 4.6 Orbeco-Hellige, Model 975-MP spektrofotometre cihazı

4.5 Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)

Numunenin Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) geri soğutmalı (kapalı reflux) metodu kullanılarak yapılmıştır.

Primer Standart olan $K_2Cr_2O_7$, 0.0417 M. çözelti hazırlanır. Bunun için 2 saat etüvde kurutulan 12.259 g K_2CrO_7 (potasyum bikromat) suda çözünür.

1 L H_2SO_4 çözeltisine 5.5 g $AgSO_4$ eklenerek iyice çözünebilmesi için 2 gün beklenir.

0.25 ml $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \times 6H_2O$ çözeltisini hazırlamak için 98 g. $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \times 6H_2O$ saf suda çözünür. 20 ml derişik H_2SO_4 ilave edilerek soğutulur ve 1 Litre'ye seyreltilir. Bu çözeltinin K_2CrO_7 çözeltisi ile molaritesi her deneyden önce hesaplanır.

Numunelere sülfamik asit nitrillerin olumsuz etkilerini engellemek için civa sülfat ($HgSO_4$) eklenir.

Şekil 4.7 Bioscience Inc. cihazı

Biosicience Inc. cihazı yardımıyla numununeler 2 saat 150°C ısıtılır (Şekil 4.7). Numuneler oda sıcaklığına geldikten sonra indikatör olarak Diphenylamine eklenerek, mor renginden yeşil rengine gelinceye kadar $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \times 6H_2O$ ile titre edilir.

$K_2Cr_2O_7$ 'nin Oksitlenmesi.

$$6e^- + Cr_2O^{2-}_7 + 14\,H^+ \rightarrow 2\,Cr^{+3} + 7\,H_2O \qquad (4.1)$$

Geri Titrasyon Tepkimesi

$$Cr_2O^{2-}_7 + 6\,Fe^{2+} + 14\,H^+ \rightarrow 2\,Cr^{+3} + 6Fe^{3+} + 7\,H_2O \qquad (4.2)$$

Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) Hesaplanması:

$$\text{KOİ (mg/L } O_2) = \frac{(VA - VB) \times ÇM \times 8000}{\text{Numune Hacmi (ml)}} \qquad (4.2)$$

Burada;

VA: Şahit çözeltisi için sarf edilen $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \times 6H_2O$ (ml)

VB: Numune çözeltisi için sarf edilen $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \times 6H_2O$ (ml)

ÇM: $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \times 6H_2O$ çözeltisinin molaritesi.

4.6 İşletme Maliyeti

Koagülasyon sisteminde işletme maliyeti 1 L evsel atıksuda kullanılan çöktürücü miktarına göre hesaplanmaktadır. Daha büyük ölçekli arıtım sisteminde ise kullanılan çöktürücü miktarı arıtılacak olan evsel atıksuyun miktarına göre artmaktadır. Kimyasal Çöktürmenin işletme maliyeti aşağıdaki denklemde verilmiştir.

İşletme Maliyeti = Arıtılacak Evsel Atıksuyu × Çöktürücü Birim Fiyatı (4.3)

Elektrokoagülasyon sisteminin işletme maliyeti ise 1 L evsel atıksu için kullanılan enerji miktarı ve elektrot maliyeti toplanarak hesaplanarak bulunmaktadır. Elektrot maliyetinin hesaplanması kullanılan elektrot miktarı teorik olarak hesaplanarak kullanılan elektrot maliyeti bulunmuştur.

İşletme Maliyeti = Enerji Maliyeti + Elektrot Maliyeti (4.4)

4.6.1 Enerji tüketimi

Enerji tüketimi kwatt saat (kWsa) cinsinden değeri aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

$$W(kW.saat.m^{-3}) = I.V.t/v \quad (4.5)$$

Burada,

W: Elektrik enerji,

I: akım,

V: Volt,

t: zaman(saat), v: reaktördeki toplam çözelti hacmidir.

Enerji Maliyeti = Enerji Tüketimi × Enerji Birim Fiyatı (4.6)

4.6.2 Elektrot maliyeti

Elektrot maliyeti kullanılan elektrot miktarı ile elektrot birim fiyatı çarpılarak bulunur.

Elektrot Maliyeti= Tüketilen Elektrot Miktarı × Elektrot Birim Fiyatı (4.7)

Teorik Olarak Kullanılan Elektrot Miktarının Hesaplanması

MA_{Teo}=m (MA) (4.8)

MA= Molekül Ağırlığı (Fe= 56 g, Al=27g)

$$m = \frac{It}{nF_S} \quad (4.9)$$

Burada, I: Akım şiddeti (Amper-A), t:süre (s), n: iyon yükü (Fe için +2, Al için +3),

F_S: Faraday sabiti (96485 $C.mol^{-1}$)'dir.

Yapılan deneylerde kullanılan ürün fiyatları EK 17'de verilmiştir.

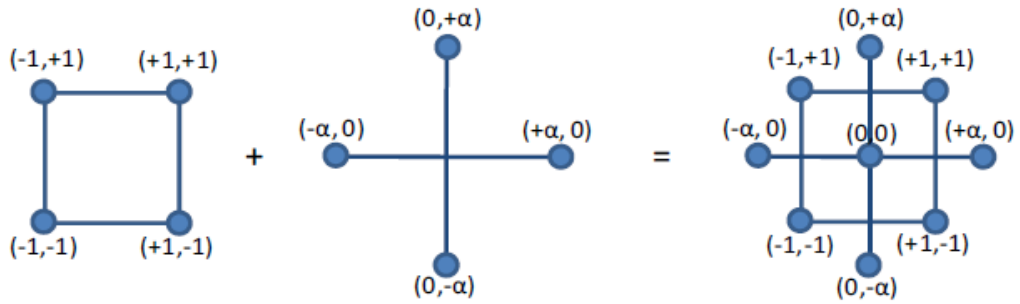
5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Evsel atıksuları, kimyasal çöktürme ve elektrokoagülasyon yöntemleri uygulanarak farklı parametreler ile arıtılmıştır. Farklı parametrelerde elde edilen numunelerin KOİ ve bulanıklık değerleri karşılaştırılmıştır. Dizayn Expert Programı ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) kullanılarak elde edilen evsel etıksu için en uygun parametrelerde, Kimyasal Çöktürme ve elektrokoagülasyon sistemlerinde pH kontrolü yapılmıştır.

5.1 Kimyasal Çöktürme Deneyleri

5.1.1 Cevap yüzey yenileme metodu

Cevap Yüzey Yenileme (CYY) metodu ilk olarak Khuri ve Cornell 1996 tarafından kullanılmıştır. Bu metod ile kimyasal çöktürme arıtımında, minumum çöktürücü miktarı ve optimum pH değeri bulabilmek için bulanıklık ve KOİ giderim verimleri incelenmiştir. Cevap Yüzey yenileme metodu ile bulanıklık ve KOİ giderimleri ile çöktürücü doz miktarları ve pH bağımsız değişkenleri arasında bağıntılar araştırılmıştır.



(a) (b) (c)

Şekil 5.1 MKT iki faktör: a. 4 küp noktaları, b. eksen noktaları c. MKT deney dizaynı (Trinh, 2011)

Merkezi Kompozit Dizayn (MKT) kullanılarak 4 kübik noktalarda, 4 eksen noktalarında ve merkezde 5 kez tekrarlanan deneyler yapılmıştır (Şekil 5.1). Bu çalışmada, iki bağımlı olmayan KOİ ve bulanıklık değerleri, çöktürücü miktarlarına (X1) ve pH değerlerine (X2) göre araştırılmıştır.

$$X1 = \frac{C(\text{Çöktürücü}) - \overline{C(\text{Çöktürücü})}}{\Delta C\ (\text{Çöktürücü})} \tag{5.1}$$

$$X2 = \frac{PH - \overline{PH}}{\Delta PH} \tag{5.2}$$

$$Y1\ (KO\text{İ}\ \%\ Giderim) = \frac{KO\text{İ}(Evsel\ Atıksu) - KO\text{İ}(numune)}{KO\text{İ}(Evsel\ Atıksu)} \tag{5.3}$$

$$Y2\ (Bulanıklık\ \%\ Giderim) = \frac{Bulanıklık(Evsel\ Atıksu) - Bulanıklık(numune)}{Bulanıklık(Evsel\ Atıksu)} \tag{5.4}$$

Alüminyum sülfat [$Al_2(SO_4)_3.18H_2O$], demir klorür [$FeCl_3$] ve demir sülfat heptahidrat [$FeSO_4.7H_2O$] çöktürücüleri kullanılarak yapılan kimyasal çöktürme deneyi tasarımı ve sonuçları çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Kimyasal Çöktürme deney tasarımı ve sonuçları

			Alüminyum Sülfat		Demir Klorür		Demir Sülfat Heptahidrat	
Nu	X_1 Çökelti Miktarı	X_2 pH	Y_1 % KOİ Giderimi	Y_2 % Bulanıklık Giderimi	Y_1 % KOİ Giderimi	Y_2 % Bulanıklık Giderimi	Y_1 % KOİ Giderimi	Y_2 % Bulanıklık Giderimi
1	+1	+1	40	89	28	80	37	30
2	-1	+1	77	89	80	94	25	90
3	+1	-1	86	99	70	21	8	62
4	-1	-1	88	98	83	92	36	65
5	0	+α	38	85	24	70	45	95
6	0	-α	87	98	77	94	9	45
7	+α	0	70	94	74	92	20	81
8	-α	0	86	96	84	97	35	94
9	0	0	86	93	68	91	27	93
10	0	0	87	91	70	92	32	90
11	0	0	86	91	69	89	29	89
12	0	0	87	91	66	88	31	88
13	0	0	85	91	70	92	30	73

Elde edilen KOİ giderim (Y1) ve bulanıklık giderim (Y2) sonuçları, Cevap Yüzey Yenileme Metodun bir bölümü olan Merkezi Kompozit Dizayn (MKT) programı kullanılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

Herbir çöktürücülerin MKT uygulamalarında elde edilen sonuçları denklem (5.5-5.10) verilmiştir. Y_1 and Y_2 ile gösterilen KOİ ve bulanıklık giderimleri X_1, X_2, X_1X_2, X_1^2 and X_2^2 modellerine bağlı olarak bulunmuştur.

KOİ giderim Y_1 (%) :

$$Y_1(AlSO_4)=+86.59-7.88*X_1-15.68*X_2-8.75*X_1X_2-3.36*X_1^2-11.84*X_2^2 \quad (5.5)$$

$$Y_1(FeCl_3)= 75.10-3.06*X_1-10.48*X_2-10.75*X_1X_2-10.42*X_1^2-14.67*X_2^2 \quad (5.6)$$

$$Y_1(FeSO_4)= 25.80+1.56*X_1-6.09*X_2-0.50*X_1X_2+0.038*X_1^2+4.79*X_2^2 \quad (5.7)$$

Bulanıklık Giderimi Y_2 (%) :

$$Y_2(AlSO_4)= +91.40-0.10*X_1-4.39*X_2-0.50*X_1X_2+1.93*X_1^2-0.073*X_2^2 \quad (5.8)$$

$$Y_2(FeCl_3)= +81.11-3.26*X_1+2.1*X_2+3.25*X_1X_2-1.12*X_1^2-4.62*X_2^2 \quad (5.9)$$

$$Y_2(FeSO_4)= +83.40-3.00*X_1+2.97*X_2-0.75*X_1X_2-5.20*X_1^2-8.45*X_2^2 \quad (5.10)$$

KOİ ve bulanıklık giderimleri CYY metodu ANOVA analizleri kullanılarak analiz edilir. Geliştirilen modelin deney sonuçlarına uyumluluğu f-değer, p-değer, uyum eksikliği, R^2 determinasyon katsayısı sonuçlarına göre değerlendirilir.

P-değeri istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını göstermektedir. P-değeri ne kadar küçükse bulguların geçerli olma olasılığı o derece artmaktadır. Modelin istatistiksel olarak anlamlı olması için 0.05 değerinden küçük olması gerekmektedir.

Deneylerden elde edilen verilerin karelerinin toplamı, modelden elde edilen verilerin karelerinin toplamına oranı, determinasyon katsayısı (R^2) olarak ifade edilir. R^2 değerinin 1'e yakın olması modelin uyumluğunu göstermektedir. Genel itibari ile R^2 değerinin 0.70 değerinden yüksek olması beklenir. Bunun yanında, R^2'nin ayarlanmış R^2'ye yakın olması gerekir. Yüksek R^2 değeri lineer, iç etkileşim ve kuadratik modelle deney sonuçlarının uyumluluk içerisinde olduğunu göstermektedir. Kimyasal çöktürme prosesinden ve elektrokoagülasyon deneyinden elde edilen bulanıklık ve KOİ bulgularının R^2 değerleri 0.79'den değerinden büyüktür.

İstatistik modelin bulgularla ne kadar uyumlu olup olmadığını yeterli hassasiyetin (Adeq. Precision-A.P.) değeri de göstermektedir. Modelin uyumlu olması için yeterli hassasiyetin 4 değerinden büyük olması gerekmektedir (Solak 2013). Kimyasal çöktürme ve elektrokoagülasyon deneylerinde tüm bulguların 4'ten büyük olduğu görülmektedir.

5.1.2 Alüm çökelti maddesi ile yapılan kimyasal çöktürme deney sonuçları

Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) giderimi

Alüm çöktürücü ile yapılan kimyasal çöktürme deneyinde KOİ giderimine göre elde edilen model denklemi aşağıda verilmiştir.

$$Y_1(KOİ)= +86.59-7.88*X_1-15.68*X_2-8.75*X_1X_2-3.36*X_1^2-11.84*X_2^2 \quad (5.5)$$

Kimyasal Oksijen İhtiyacı gideriminin ANOVA sonucunda elde edilen eşitlik ikinci derecedendir. Eşitliğin ikinci dereceden olması kuadratik etkileşim olduğunu göstermektedir. Parametrelerin lineer (doz, pH), kuadratik (doz×doz, pH×pH) ve iç etkileşim (doz×pH) olarak etkisini Fisher Test ile kontrol edebiliriz. Fisher testinde P-değerinin 0.05 değerinden küçük olması, pH'ın KOİ gideriminde çok etkili bir faktör olduğunu göstermektedir (Trinh vd. 2011).

Çizelge 5.2 Alüm çöktürücü maddesine ait KOİ giderim ANOVA analiz sonuçları

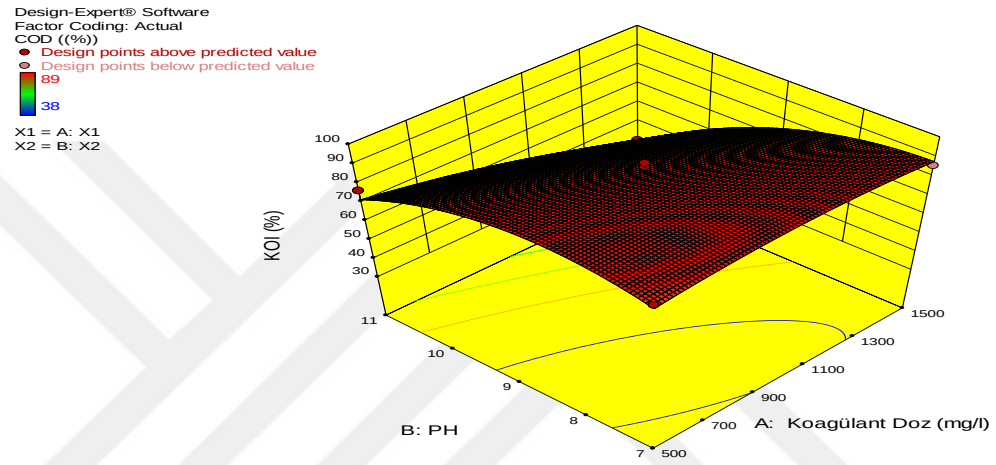
$AlSO_4$				
	Serbestlik Derecesi	**Ortalama^2**	**F-değeri**	**P-Değeri**
Model	**5**	**744.41**	**75.83**	**<0.0001 Uyumlu**
Doz	1	496.78	50.60	0.0002
pH	1	1947.68	198.40	<0.0001
Doz×pH	1	306.25	31.20	0.0008
Doz^2	1	78.81	8.03	0.0253
pH^2	1	945.73	96.34	<0.0001
Artık Değer	7	9.82		
Uyum Eksikliği	3	19.84	8.63	0.0321
Hata	4	2.3		
Yeterli hassasiyet (Adeq.Precisor)	24.396			
R^2 =0.98 $R_{ayarlanmış}^2$ =0.97				

R^2 değerinin 0.98 olması alüm çöktürücü maddesinin KOİ giderimi bulgularının CYY metodu ANOVA modeline uyumlu olduğunu göstermektedir. R^2 değerinin 1'e yakın olması bulguların istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. Ayarlanmış R^2 değerinin (0.97) ise R^2'ye yakın olması ise modelin uyumluluğunun bir diğer göstergesidir.

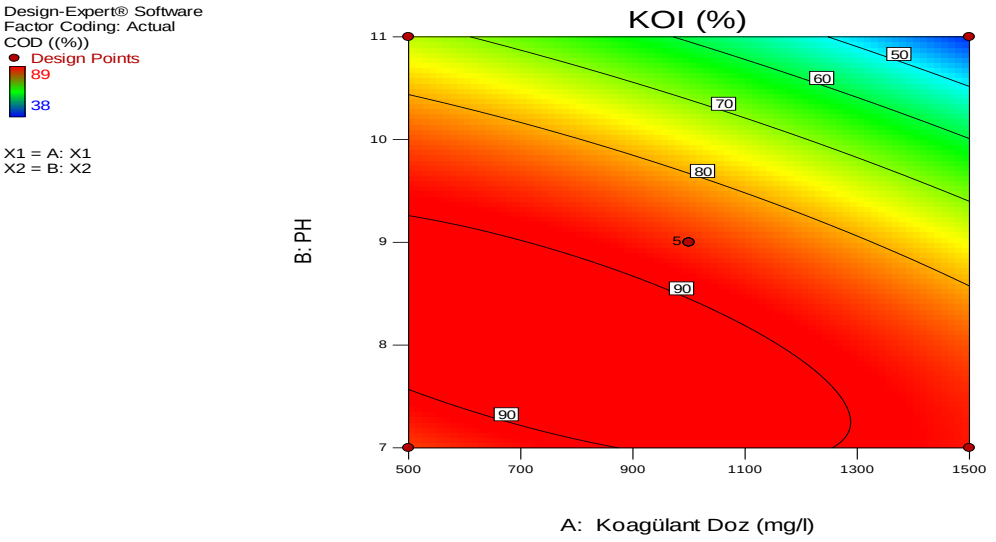
Alüm çöktürücü maddesi için yeterli hassasiyet (Adeq. Precision) değeri (24.396) 4'ten büyüktür. Ayrıca çizelge 5.2'de verilen modelin p-değeri ise <0.0001 olması modelin uyumluluğunu gösteren bir diğer kanıttır. Ayrıca EK 12 verilen Alüm çöktürücün normalite grafiği modelin uyumluluğunu göstermektedir. ANOVA'dan elde edilen p-değerleri analiz edildiğinde pH'ın lineer ve kuadratik etkisinin p-değeri <0.0001, diğer parametrelerin p-değerlerine göre daha küçüktür. Bu nedenle pH'ın lineer ve kuadratik faktörü, Alüm çöktürücü maddesinin KOİ giderimini etkileyen en önemli faktördür

diyebiliriz. Doz ve pH'ın iç etkileşiminin (doz×pH) p-değeri (0.0008<0.05) olması nedeniyle iç etkileşim faktörüde etkili bir faktördür.

Şekil 5.2 alüm çöktürücünün CYY metodundan elde edilen 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafikleri verilmiştir. pH'ın 8'de ve alüm 700 mg/L dozda KOİ gideriminin % 90 civarlarında olduğu görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 5.2 Alüm KOİ giderimi grafikleri
a. 3 boyutlu yüzey, b. 2 boyutlu kontur

Bulanıklık Giderimi

Alüm çöktürücüsüne ait bulanıklık gideriminin, CYY metodu ANOVA'ya uygulanmasından elde edilen model denkleminin ikinci dereceden olduğu görülmektedir. Bu eşitliklerin ikinci dereceden olması kuadratik etkileşim olduğunu göstermektir. Alüm çöktürücü ile yapılan kimyasal çöktürme deneyinde bulanıklık giderimi bulgularının model denklemi aşağıda verilmiştir.

$$Y_2(\text{Bulanıklık})=+91.40-0.10*X_1-4.39*X_2-0.50*X_1X_2+1.93*X_1^2-0.073*X_2^2 \quad (5.8)$$

Çizelge 5.3 Alüm çöktürücüsüne ait bulanıklık gideriminin ANOVA analiz sonuçları

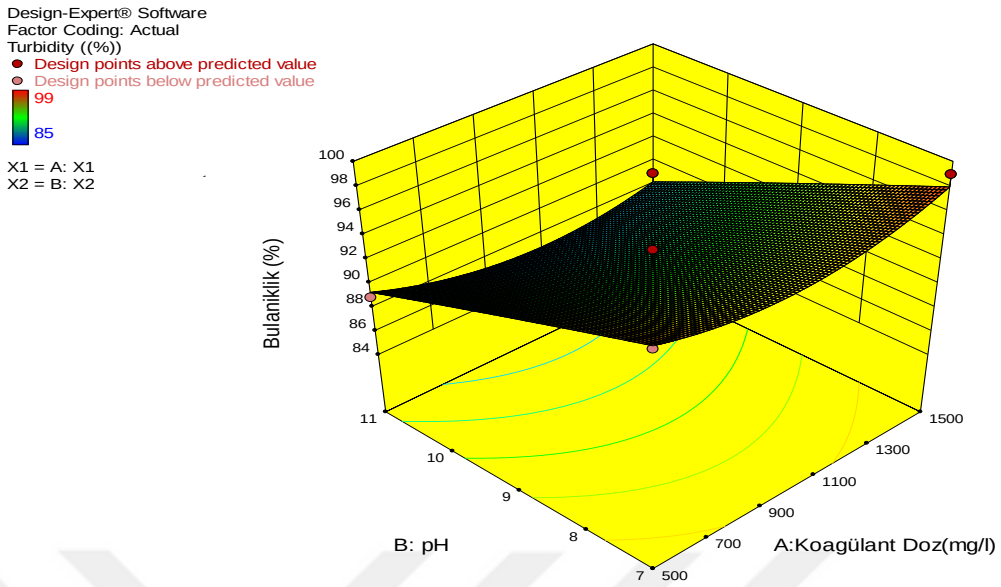
$AlSO_4$				
	Serbestlik Derecesi	Ortalama^2	F-değeri	P-Değeri
Model	5	36.1	37.68	<0.0001 Uyumlu
Doz	1	0.086	0.09	0.7735
pH	1	152.9	159.5	<0.0001
Doz×pH	1	1	1.04	0.341
Doz^2	1	25.83	26.96	0.0013
pH^2	1	0.09	0.038	0.8515
Artık Değer	7	0.96		
Uyumsuzluk	3	1.17	1.46	0.3512
Hata	4	0.8		
Yeterli hassasiyet (Adeq. Precisor)	19.454			
R^2 =0.97 $R_{ayarlanmış}^2$ =0.94				

Alüm çöktürücünün bulanıklık giderim ANOVA analiz sonuçları çizelge 5.3'te verilmiştir. R^2 değeri 0.97 olup 1'e oldukça yakındır. Ayarlanmış R^2 değeri R^2 değerine yakın bir değerdir. Yeterli hassasiyet değeri 19.454, 4 değerinden büyüktür. Modelin p-

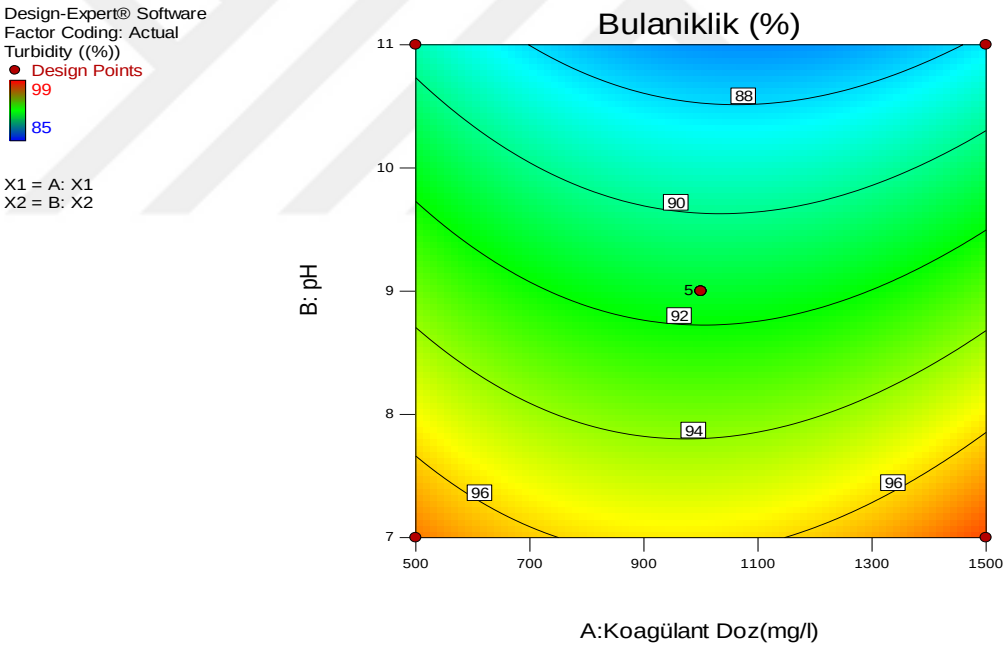
değeri <0.0001 değeri, 0.05 değerinden küçük bir değerdir. Bunun yanında, EK 12 alüm çöktürücünün bulanıklık giderim normalite grafiği, modelin alüm çöktürücünün bulanıklılık sonuçlarına uyumluluğunu göstermektedir.

Alüm çöktürücü maddesinin bulanıklık giderimlerini etkileyen parametrelerin lineer, iç etkileşim ve kuadratik etkiler çizelge 5.3'te verilmiştir. pH×pH'nin p-değeri (<0.0001) <0.05 olduğundan, pH'ın kuadratik etkisi lineer etkisine göre daha fazla olduğunu göstermektedir. İç etkileşim (pH×Doz) etkisinin (p-değeri=0.341>0.05) diğer etkilere göre daha azdır.

Şekil 5.3'te Alüm çöktürücünün 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafikleri verilmiştir. Alüm çöktürücünün % 96 oranda bulanıklık giderimleri pH 7 değerinde ve 500 mg/L alüm dozunda elde edildiği görülmüştür.



(a)



(b)

Şekil 5.3 Alüm bulanıklık giderim grafikleri
a. 3 boyutlu yüzey, b. 2 boyutlu kontur

5.1.3 Demir klorür çökelti maddesi ile yapılan kimyasal çöktürme deney sonuçları

Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) giderimi

Demir Klorür çöktürücü ile yapılan kimyasal çöktürme deneyinde KOİ giderimine göre elde edilen model denklemi aşağıda verilmiştir.

$$Y_1(KOİ)= 75.10-3.06*X_1-10.48*X_2-10.75*X_1X_2-10.42*X_1^2-14.67*X_2^2 \quad (5.6)$$

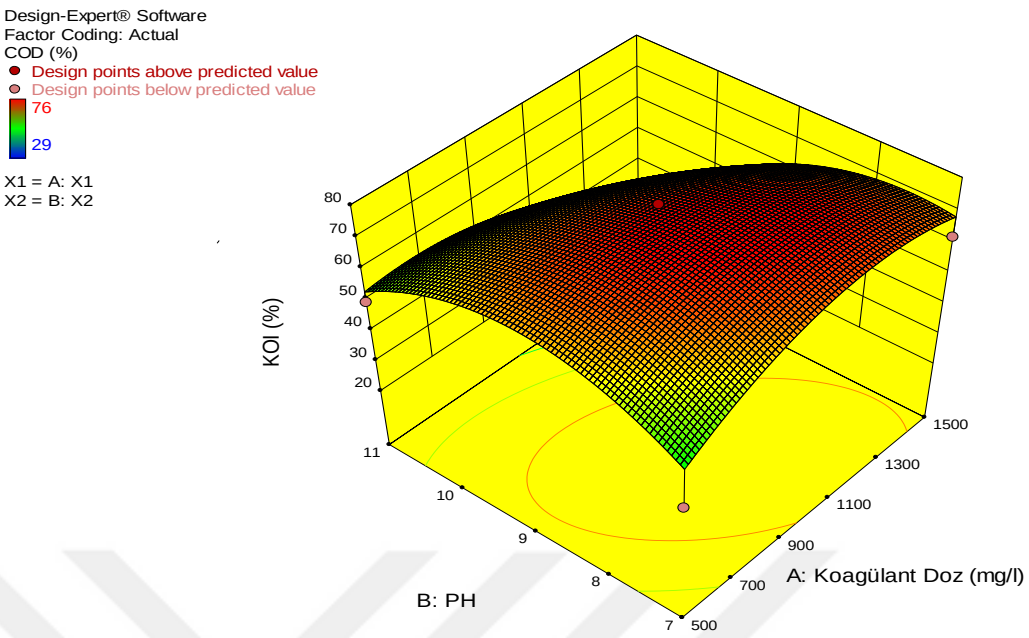
$FeCl_3$ çöktürücü maddesine ait KOİ giderim ANOVA analiz sonuçları çizelge 5.4'te verilmiştir. R^2 değerinin 0.88 olması (1 yakın değer olması) ve R^2 ayarlanmış değerin 0.80 (R^2 değerine yakın) olması modelin $FeCl_3$ çöktürücünün KOİ giderimleri bulgularının CYY modeline uyumluluğunu göstermektedir. Ayrıca, yeterli hassasiyet değeri 9.067 değer olması (4 değerinden büyük), modelin p-değeri 0.0036 olması (< 0.05) sebebiyle ve EK 12'de verilen $FeCl_3$ çöktürücü maddesinin normalite grafiği modelin uyumluluğunu göstermektedir.

$FeCl_3$ çöktürücü maddesini etkileyen parametrelerin lineer, iç etkileşim ve kuadratik etkiler incelendiğinde, pH'ın lineer ve kuadratik (pH^2) p-değerinin sırasıyla 0.0077 ve 0.0019 (<0.05) değerleridir. Bu nedenle pH'ın lineer ve kuadratik (pH^2) etkilerin diğerlerine göre daha etkili bir faktör olduğu söylenebilir.

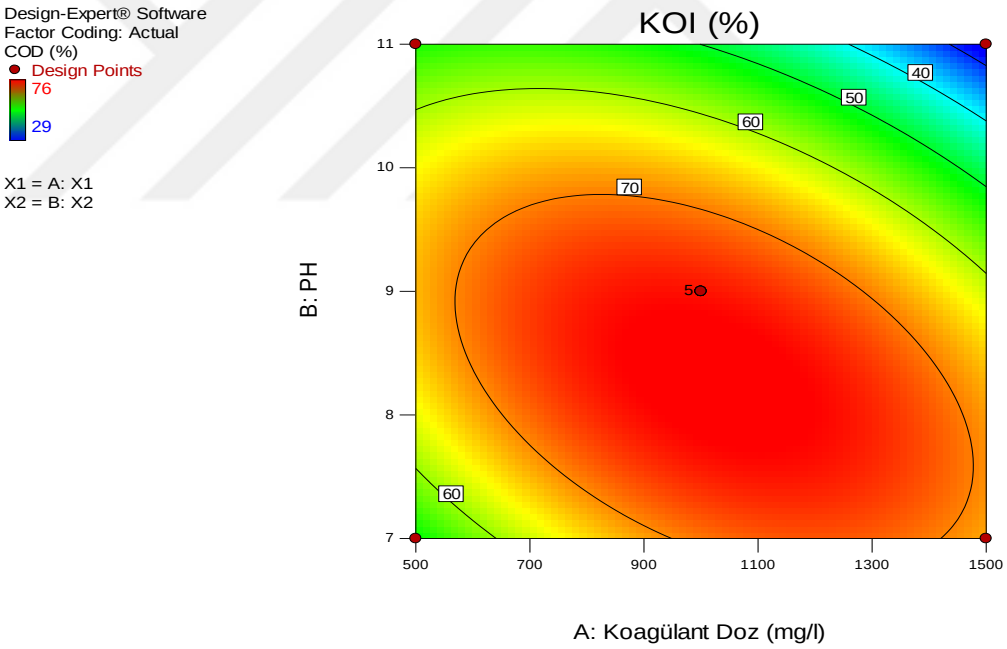
Çizelge 5.4 $FeCl_3$ çöktürücüsüne ait KOİ giderim ANOVA analiz sonuçları

$FeCl_3$				
	Serbestlik Derecesi	**Ortalama^2**	**F-Değer**	**P-Değer**
Model	**5**	**685.16**	**10.66**	**0.0036 Uyumlu**
Doz	1	74.76	1.16	0.3166
pH	1	878.04	13.66	0.0077
Doz×pH	1	462.25	7.19	0.0315
Doz^2	1	756.04	11.76	0.0110
pH^2	1	1498.13	23.31	0.0019
Artık Değer	9	64.27		
Uyum Eksikliği	5	148.90	186.12	<0.0001
Hata	4	0.8		
Yeterli hassasiyet (Adeq.Precisor)	9.067			
R^2 =0.88 $R_{ayarlanmış}^2$ =0.80				

Şekil 5.4'te $FeCl_3$ çöktürücünün 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafikleri verilmektedir. $FeCl_3$ çöktürücünün KOİ giderimi sonuçları incelendiğinde, pH 8'de ve $FeCl_3$ 900 mg/L dozda KOİ giderimi yüksek olduğu görülebilir.



(a)



(b)

Şekil 5.4 $FeCl_3$ KOİ giderimi grafikleri
a. 3 boyutlu yüzey, b. 2 boyutlu kontur

Bulanıklık Giderimi

$FeCl_3$ çöktürücüsüne ait bulanıklık gideriminin CYY metodu ANOVA'dan elde edilen model denkleminin ikinci dereceden olduğu görülmektedir. Bu eşitliklerin ikinci dereceden olması kuadratik etkileşim olduğunu göstermektir.

$$Y_2(FeCl_3)= +81.11-3.26*X_1+2.1*X_2+3.25*X_1X_2-1.12*X_1^2-4.62*X_2^2 \quad (5.9)$$

Çizelge 5.5 $FeCl_3$ çöktürücüsüne ait bulanıklık giderim ANOVA analiz sonuçları

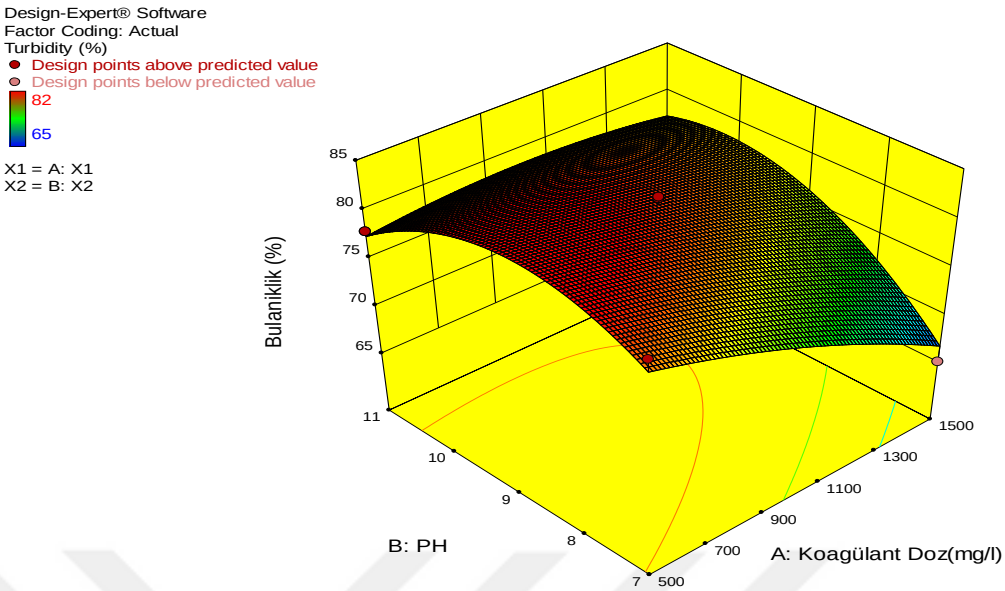
$FeCl_3$				
	Serbestlik Derecesi	Ortalama^2	F-Değer	P-Değer
Model	5	62.65	18.17	0.0007 Uyumlu
Doz	1	84.96	24.64	0.0016
pH	1	35.7	10.35	0.0147
Doz×pH	1	42.25	12.25	0.01
Doz^2	1	8.71	2.53	0.156
pH^2	1	148.43	43.04	0.0003
Artık Değer	9	3.45		
Uyum Eksikliği	5	7.32	13.45	0.0148
Hata	4	0.54		
Yeterli hassasiyet (Adeq. Precisor)	13.261			
R^2 =0.93 $R_{ayarlanmış}^2$ =0.88				

Çizelge 5.5 $FeCl_3$ çöktürücü maddesinin bulanıklılık gideriminin CYY modelinden elde edilen ANOVA sonuçları verilmiştir. $FeCl_3$ çöktürücü maddesinin bulanıklılık giderim ANOVA sonuçlarında elde edilen R^2 değeri 0.93, 1'e yakın bir değerdir. Ayarlanmış R^2 değeri 0.88, R^2 değerine yakın bir değerdir. Yeterli hassasiyet 13.261 değeri, 4'ten büyüktür. Modelin p-değeri 0.0007'dir (<0.05). EK 12'de verilen normalite grafiği ve

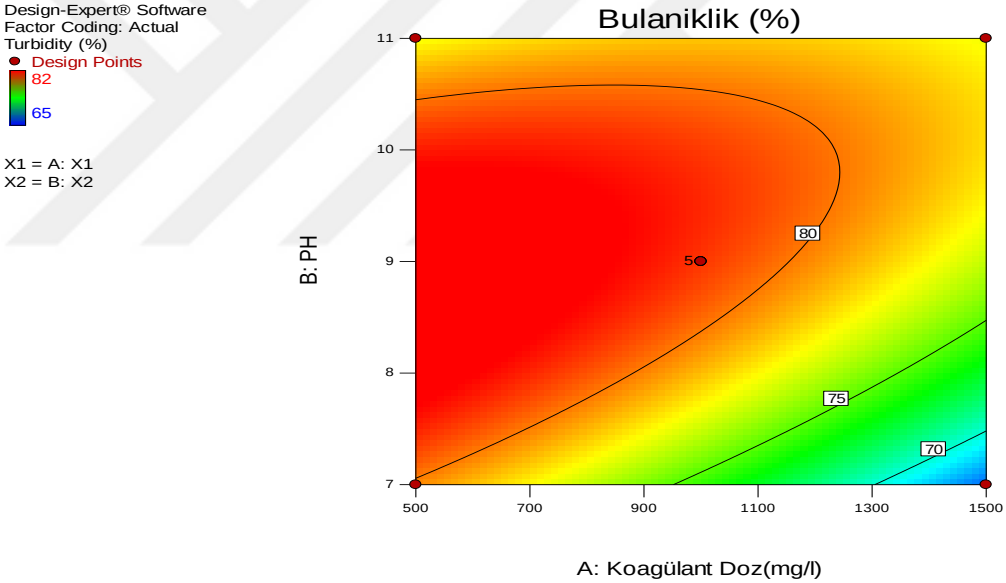
yukardaki nedenlerden dolayı $FeCl_3$ çöktürücü maddesinin bulanıklık giderimi CYY modeliyle uyumludur.

Ayrıca çizelge 5.5'te $FeCl_3$ çökelticinin lineer (doz, pH), iç etkileşim (doz×pH) ve kuadratik (doz×doz, pH×pH) faktörlerinin KOİ giderimini ne derece etkilediği görülebilir. pH×pH faktörünün p-değerinin diğer faktörlerin p-değerlerinden daha küçük olması 0.0003 ($p<0.05$), $FeCl_3$ çöktürücünün bulanıklılık giderimine pH'ın kuadratik etkisinin diğer faktörlere göre daha etkili olduğunu göstemektedir.

Şekil 5.5'de $FeCl_3$ çöktürücü maddesinin 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafikleri verilmektedir. $FeCl_3$ çöktürücü maddesine ait en yüksek bulanıklık değeri pH 9 ve 500 mg/L $FeCl_3$ dozda elde edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.5 $FeCl_3$ Bulanıklık giderim grafikleri

a. 3 boyutlu yüzey, b. 2 boyutlu kontur

5.1.4 Demir sülfat heptahidrat çökelti maddesi ile yapılan kimyasal çöktürme deney sonuçları

Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) Giderimi

$FeSO_4.7H_2O$ çöktürücü ile yapılan kimyasal çöktürme deneyinde KOİ giderimine göre elde edilen model denklemi aşağıda verilmiştir.

$$Y_1(FeSO_4)= 25.80+1.56*X_1-6.09*X_2-0.50*X_1X_2+0.038*X_1^2 +4.79* X_2^2 \quad (5.7)$$

Çizelge 5.6 $FeSO_4$ çöktürücü maddesine ait KOİ giderim ANOVA analiz sonuçları

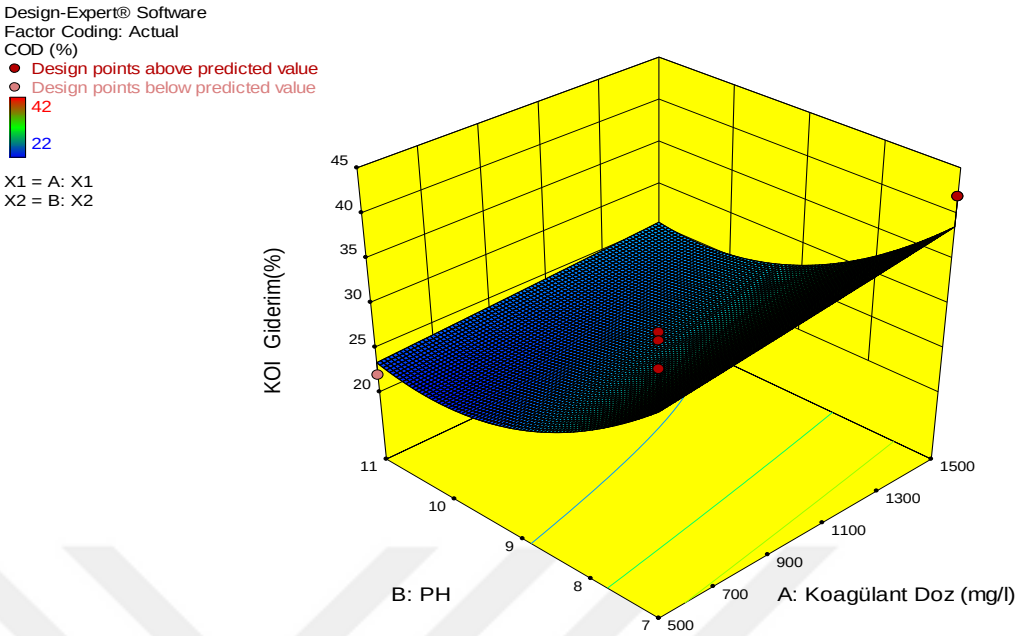
$FeSO_4$				
	Serbestlik Derecesi	**Ortalama^2**	**F-değer**	**P-değeri**
Model	**5**	**95.83**	**8.48**	**0.0070 Uyumlu**
Doz	1	19.49	1.72	0.2306
pH	1	296.80	26.25	0.0014
Doz×pH	1	1.00	0.088	0.7748
Doz^2	1	0.0098	0.0086	0.9774
pH^2	1	159.44	14.10	0.0071
Artık Değer	7	11.31		
Uyum Eksikliği	3	25.45	36.35	0.0023
Hata	4	0.70		
Yeterli hassasiyet (Adeq.Precisor)	8.981			
R^2 =0.86 $R_{ayarlanmış}^2$ =0.76				

$FeSO_4.7H_2O$ çöktürücü maddesinin KOİ giderim ANOVA analiz sonuçları çizelge 5.6'da verilmiştir. R^2 değerinin 0.86 olması ve R^2'nin ayarlanmış R^2 değerine yakın

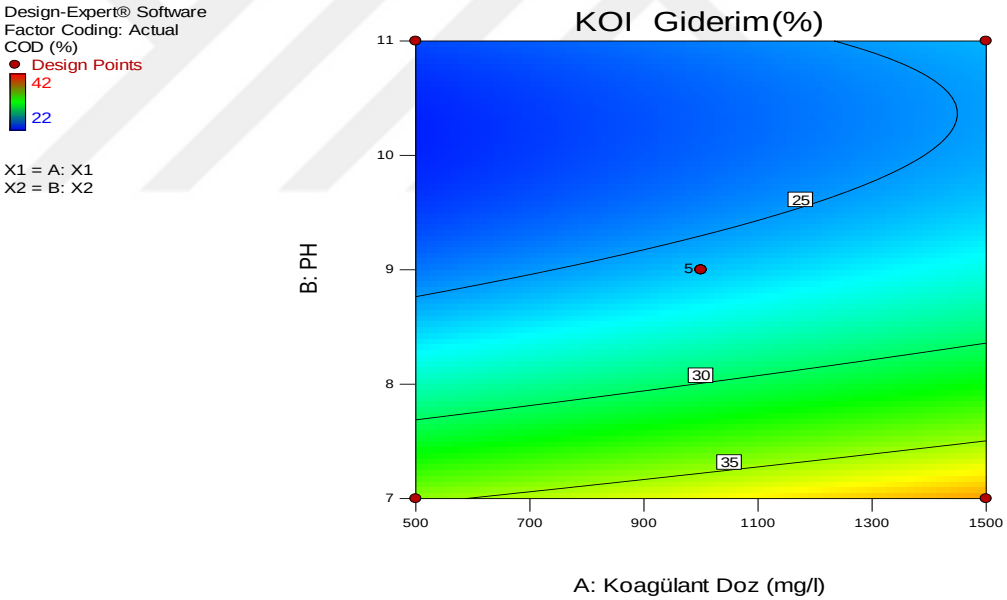
olması $FeSO_4.7H_2O$ çöktürücünün KOİ giderimleri sonuçlarının CYY modeline uygunluğunun göstergesidir. Yeterli hassasiyet değeri 8.981 (4'ten büyük) olması, p-değerinin küçük 0.007 (<0.05) olması ve EK 12'deki $FeSO_4$ çöktürücü maddesinin KOİ giderim normalite grafiği modelin uyumlu olduğunun kanıtıdır.

pH'ın lineer ve kuadratik etkinin sırasıyla 0.0014 ve 0.0071 değerlerde olması, $FeSO_4$ çöktürücü maddesinin KOİ gideriminde pH'ın lineer ve kuadratik etkilerinin diğer faktörlere göre daha etkili olduğu söylenebilir. İç etkileşim doz×pH'ın p-değeri 0.78 (>0.05) ve dozun lineer ve kuadratik etkisinin sırasıyla 0.23 ve 0.98 (>0.05) olmasından dolayı, bu faktörlerin $FeSO_4$ çöktürücü maddesinin KOİ gideriminde etkili faktörler olmadığı söylenebilir.

Şekil 5.6'da $FeSO_4.7H_2O$ çöktürücünün 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafiklerinde görüldüğü gibi $FeSO_4.7H_2O$ çöktürücünün pH 7 değerinde, 1300 mg/L doz miktarında en yüksek KOİ giderimi elde edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.6 $FeSO_4.7H_2O$ KOİ Giderimleri Grafikleri
a. 3 boyutlu yüzey, b. 2 boyutlu kontur

Bulanıklık Giderimi

$FeSO_4.7H_2O$ çöktürücüsüne ait bulanıklık gideriminin, CYY metodu ANOVA'dan elde edilen model denkleminin ikinci dereceden olduğu görülmektedir. Bu eşitliklerin ikinci dereceden olması kuadratik etkileşim olduğunu göstermektir.

$$Y_2(FeSO_4)= +83.40-3.00*X_1+2.97*X_2-0.75*X_1X_2-5.20*X_1^2-8.45*X_2^2 \quad (5.10)$$

Çizelge 5.7 $FeSO_4.7H_2O$ çöktürücünün ait bulanıklık giderim ANOVA analiz sonuçları

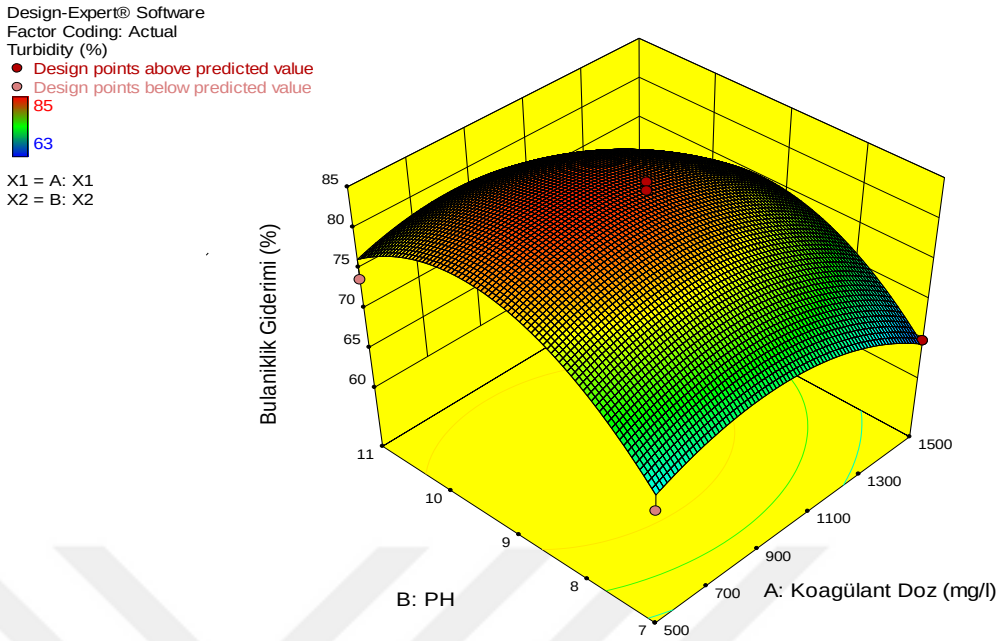
$FeSO_4.7H_2O$				
	Serbestlik Derecesi	Ortalama^2	F-değer	P-değeri
Model	5	152	40.92	<0.0001 Uyumlu
Doz	1	71.82	19.34	0.0032
PH	1	70.38	18.95	0.0033
Doz×PH	1	2.25	0.61	0.4619
Doz^2	1	188.1	50.64	0.0002
pH^2	1	496.7	133.7	<0.0001
Artık Değer	7	3.71		
Uyum Eksikliği	3	6.93	5.33	0.0698
Hata	4	1.3		
Yeterli Hassasiyet (Adeq. Precisor)	16.111			
R^2 =0.96 $R_{ayarlanmış}^2$ =0.94				

Çizelge 5.7'de $FeSO_4.7H_2O$ çöktürücüye ait bulanıklık giderimlerinin CYY ANOVA'dan elde edilmiş sonuçlar verilmiştir. Sonuçları incelediğimizde modelin $FeSO_4$ çöktürücü maddesine ait bulanıklık giderimlerine uygun olduğu belirtilebilir.

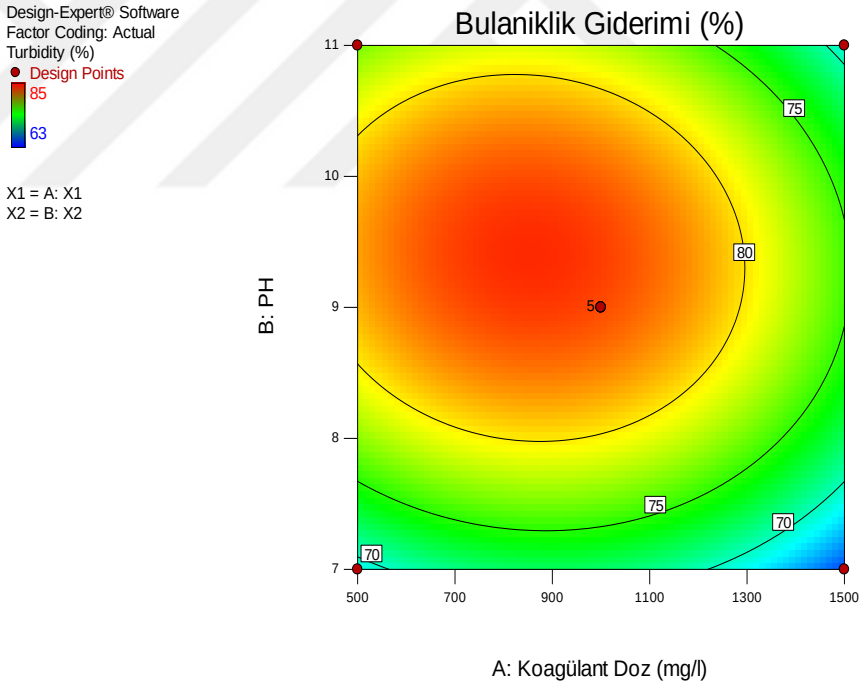
Öncelikle R^2 değeri 0.96 (1'e yakın) bir değerdir. Ayarlanmış R^2 değeri 0.94, R^2 değerine yakındır. Yeterli hassasiyet 16.111 değeri 4'ten büyük bir değerdir. Modelin p-değeri <0.0001'dir. Ayrıca lineer (doz, pH), iç etkileşim (doz×pH) ve kuadratik (doz×doz, pH×pH) etkileri karşılaştırılabilir. Doz×pH'ın p-değeri 0.4619 (>0.05) olması, iç etkileşimin etkisinin az olduğunu göstermektedir. Doz×doz ve pH×pH'nin p-değerinin sırasıyla 0.0002 ve <0.0001 olması, doz ve pH'ın kuadratik etkilerinin lineer etkilerinden daha fazla etkili faktörler olduğunu göstermektedir.

Şekil 5.7'de $FeSO_4.7H_2O$ maddelesine ait bulanıklık giderimlerinin 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafiklerini verilmektedir. $FeSO_4.7H_2O$ çöktürücü maddesinin en iyi bulanıklık giderimi pH 9'da ve $FeCl_3$ 900 mg/L dozda elde edilmiştir.

$FeSO_4.7H_2O$ çöktürücü maddesi kullanılarak yapılan Kimyasal Çöktürme deneylerinde diğer çöktürücülere göre daha düşük oranda bulanıklılık ve KOİ giderilmiştir. Bunun nedenini deterjanda bulunan Cl^- iyonunun, $FeSO_4.7H_2O$ çöktürücünün atıksudan bulanıklılığın giderilmesini engellemektedir. Bu nedenle $FeSO_4$ çöktürücü maddesi evsel atısu arıtımı için uygun değildir.



(a)



(b)

Şekil 5.7 $FeSO_4.7H_2O$ bulanıklık giderim grafikleri
a. 3 boyutlu yüzey, b. 2 boyutlu kontur

5.1.5 Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)

Cevap yüzey yenileme metodu ile elde edilen denklemler (5.5-5.12), Matlab 14.0 Programı ile hazırlanan Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritmasına (EK 14) aktarılmıştır. Her bir çöktürücü için PSO algoritmasından elde edilen optimum bağımsız değişkenler olan pH değerleri ve doz miktarları çizelge 5.8'de verilmiştir. Ayrıca, Design Expert Programı CYY metodunun çizmiş olduğu 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafiklerinin verdiği optimum bağımsız değişkenler çizelge 5.9'da verilmiştir. Her iki optimizasyon çalışması karşılaştırıldığında, PSO algoritmasından daha kesin değerler alınması nedeniyle, PSO optimizasyon problemlerinin çözümünde tercih edilebilir bir yöntemdir.

Çizelge 5.8 Çöktürücü maddelerinin PSO programı ile optimizasyonu

	Design Expert Programı CYY metodu analizi ANOVA'daki denklemler ile PSO algoritması kullanılarak elde edillen optimizasyon sonuçları				**Design Expert Programı CYY metodu analizinden elde edilen 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontür grafiklerinden elde edilen optimizasyon sonuçları**			
	KOİ		**Bulanıklık**		**KOİ**		**Bulanıklık**	
	pH	Doz (mg/L)	pH	Doz (mg/L)	pH	Doz (mg/L)	pH	Doz (mg/L)
$AlSO_4$	7.2	500.1	7.2	500.5	8	700	7	500
$FeCl_3$	7.6	500.4	10.6	500	8	900	9	500
$FeSO_4.7H_2O$	7.5	1500	8	500.2	7	1300	9	900

5.2 Elektrokoagülasyon

Evsel atıksu elektrokoagülasyon arıtımda farklı pH, elekroliz zaman, akım ve iletkenlik parametrelerinde deneyler yapılmıştır. Al ve Fe elektrotlar kullanılarak yapılan elektokoagülasyon deneyi tasarımı çizelge 5.9'da verilmiştir.

Çizelge 5.9 Elektrokoagülasyon deney tasarımı ve sonuçları

					Al Elektrot		Fe Elektrot	
	Zaman (dakika)	pH	İletkenlik (mS/cm)	Akım (mA/cm^2)	Bulanıklık (FTU)	KOİ (mg/L)	Bulanıklık (FTU)	KOİ (mg/L)
1	+1	+1	+1	+1	84.36	87.65	53	72.15
2	+1	+1	+1	-1	94.18	89.12	63.57	81.47
3	+1	+1	-1	-1	80.37	77.85	64.71	62.95
4	+1	+1	-1	+1	88.56	65.42	67.1	72.95
5	+1	-1	+1	+1	98.07	75	77.07	71.47
6	+1	-1	-1	+1	98.07	75	76.52	69.12
7	+1	-1	-1	-1	98.07	56.77	66.62	32.07
8	+1	-1	+1	-1	93.33	75	74.78	71.47
9	0	0	0	0	91.39	87.65	75.55	46.89
10	0	0	0	0	98.07	87.65	74.55	46.89
11	0	0	0	0	97.89	86.95	74.80	47.01
12	0	0	0	0	97.92	87.30	74.35	46.51
13	0	0	0	0	97.95	87.50	74.40	46.70
14	0	0	0	0	98.07	87.65	74.55	46.89
15	0	0	+α	0	98.07	90.12	73.42	61.47
16	0	0	-α	0	98.07	83.64	40.41	50.6
17	0	+α	0	0	9.57	75.3	40.11	81.47
18	0	-α	0	0	45.7	57.52	66.81	48.77
19	0	0	0	+α	97.3	75.3	68.88	58.01
20	0	0	0	-α	80.56	87.65	40.29	62.65
21	+α	0	0	0	98.07	75.8	40.09	54.42
22	-α	0	0	0	93.68	85.18	14.11	73.91
23	-1	+1	+1	+1	91.47	62.95	35.21	65.6
24	-1	+1	-1	+1	84.23	79	66.88	72.15
25	-1	-1	+1	-1	97.49	56.77	57.49	83.64
26	-1	-1	+1	+1	93.09	62.95	42.65	54.3
27	-1	+1	+1	-1	82.11	69.12	70.21	65.6
28	-1	-1	-1	+1	65.39	75.12	39.32	55.54
29	-1	-1	-1	-1	17.55	69.12	15.26	60.6
30	-1	+1	-1	-1	25.51	90.12	63.05	66.77

Cevap Yüzey Yenileme metoduna göre deney tasarımı yapılmış ve her bir elektrotta kübik noktalarda, eksen noktalarda ve merkezde olmak üzere toplam 30'ar adet deney yapılmıştır. Yapılan deneylerle optimum parametreler araştırılmıştır.

Al ve Fe elektrotlar kullanılarak elde edilen KOİ ve bulanıklık giderimleri CYY metodu ile karşılaştırılmıştır. Anova'dan elde edilen denklemler denklem (5.16-5.19)'da verilmiştir.

KOİ giderim Y_1 (%) :

Y_1(Al Elektrot) =

$$+87.65+0.75*X_1+4.63*X_2+0.10*X_3-1.06*X_4+0.065*X_1X_2-7.08*X_1X_3+0.59*X_1X_4+0.17*X_2X_3+3.85*X_2X_4-0.13*X_3X_4-2.78*X_1^2-6.30*X_2^2-1.14*X_3^2-2.53*X_4^2 \quad (5.16)$$

Y_1 (Fe Elektrot)=

$$+47.38-3.18*X_1+2.36*X_2+4.83*X_3-7.83*X_4-1.94*X_1X_2-2.40*X_1X_3+1.30*X_1X_4-3.31*X_2X_3-1.16*X_2X_4-9.95*X_3X_4+4.84*X_1^2+4.83*X_2^2-4.06*X_3^2+5.76*X_4^2 \quad (5.17)$$

Bulanıklık giderim Y_2 (%) :

Y_2 (Al Elektrot)=

$$+96.96+7.79*X_1-4.27*X_2+7.35*X_3+6.17*X_4-3.12*X_1X_2-10.41*X_1X_3-6.78*X_1X_4-1.84X_2X_3+1.14X_2X_4-7.18*X_3X_4+0.25*X_1^2-16.81*X_2^2+0.80*X_3^2-1.49*X_4^2 \quad (5.18)$$

Y_2 (Fe Elektrot) =

$$+74.558.55*X_1-0.81*X_2+3.36*X_3+1.63*X_4-7.95*X_1X_2-1.72*X_1X_3+1.62*X_1X_4-5.88*X_2X_3-3.80*X_2X_4-6.14*X_3X_4-10.14*X_1^2-3.55*X_2^2-2.69*X_3^2-3.27*X_4^2 \quad (5.19)$$

Y_1 ve Y_2 ile gösterilen KOİ ve bulanıklık giderimleri X_1, X_2, X_3, X_4, X_1X_2, X_1X_3, X_1X_4, X_3X_4, X_2X_3, X_2X_4, X_1^2, X_2^2, X_3^2, X_4^2 modellerine bağlı olarak bulunmuştur. Elde edilen denklem yada kod faktör ikinci dereceden olduğundan kuadratik etki görülmektedir.

5.2.1 Al elektrot ile yapılan elektrokoagülasyon deney sonuçları

Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) Giderimi

Al elektrot ile yapılan elektrokoagülasyon deneyinde KOİ gideriminden elde edilen model denklemi aşağıda verilmiştir.

Y_1(KOİ) =

$$+87.65+0.75*X_1+4.63*X_2+0.10*X_3-1.06*X_4+0.065*X_1X_2-7.08*X_1X_3+0.59*X_1X_4+ 0.17*X_2X_3+3.85*X_2X_4-0.13*X_3X_4-2.78* X_1^2-6.30*X_2^2-1.14*X_3^2-2.53*X_4^2 \quad (5.16)$$

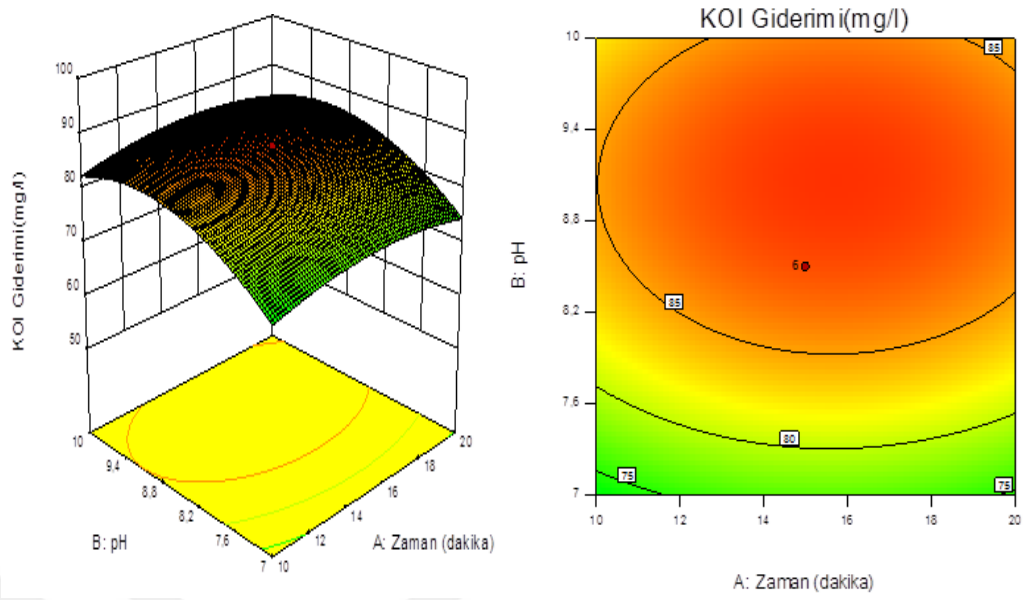
Elektrokoagülasyon'da pH, akım, elektroliz zamanı, iletkenlik parametrelerin KOİ giderime etkileri araştırılmıştır. Elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen ANOVA sonuçları lineer, iç etkileşim ve kuadratik etkilerinin olduğunu göstermektedir. Çizelge 5.10'da ANOVA'dan elde edilen sonuçlar verilmiştir.

KOİ giderimi R^2 sonuçları Al elektrot için 0.83'tür. CYY modelde R^2 değerinin 1'e yakın olması modelin uyumluluğunu göstermektedir. Bu nedenle R^2 değerinin 0.70'den büyük olması beklenir. Ayarlanmış R^2 değeri (0.68), R^2'ye çok yakın olmasada kabul edilebilir yakınlıktadır. Yeterli hassasiyet 10.431, 4'ten büyüktür. Ayrıca modelin p-değeri 0.001 (<0.05)'tir. Yukardaki belirtilen nedenlerin yanında EK 13'te bulunan normalite grafiği modelin uyumluluğunu göstermektedir.

Çizelge 5.10 Al Elektrot kullanılan elektrokoagülasyon deneyinin KOİ gideriminin ANOVA analiz sonuçları

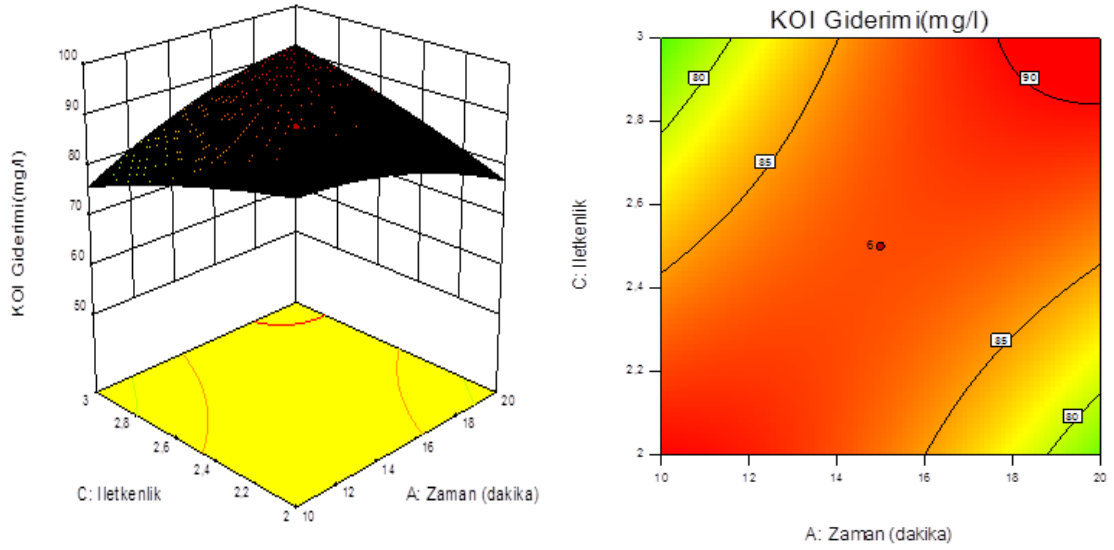
Al Elektrot				
	Serbestlik Derecesi	Ortalama^2	F-Değeri	P-Değeri
Model	14	203.03	5.6	0.001 uyumlu
A= Zaman	1	13.35	0.37	0.5529
B= pH	1	513.93	14.18	0.0019
C= İletkenlik	1	0.26	0.0073	0.933
D= Akım	1	27.05	0.75	0.4012
AB	1	0.068	0.0018	0.9661
AC	1	802.3	22.14	0.0003
AD	1	5.57	0.15	0.7005
BC	1	0.47	0.013	0.9109
BD	1	237.16	6.54	0.0218
CD	1	0.29	0.0079	0.9304
A2	1	211.38	5.83	0.029
B2	1	1087.27	30	<0.0001
C2	1	35.71	0.99	0.3366
D2	1	175.54	4.84	0.0438
Artık Değer	15	36.24		
Uyum Eksikliği	10	54.36		
Hata	5	0		
Yeterli hassasiyet (Adeq.Precisor)	10.431			
R^2= %83 $R^2_{ayarlanmış}$= % 68				

pH, akım, elektroliz zamanı ve iletkenlik parametrelerin etkileri fisher testi yöntemi ile değerlendirilebilir. pH'ın p-değerinin 0.0019 olması ve pH^2'nin p-değerinin <0.0001 olması pH'ın lineer ve kuadratik etkilerinin Al elektrotun KOİ giderimine, diğer parametrelere göre daha fazla olduğunu göstermektedir. KOİ giderimini etkileyen iç etkileşim parametreleri zaman- iletkenliktir (p-değer = 0.0003).



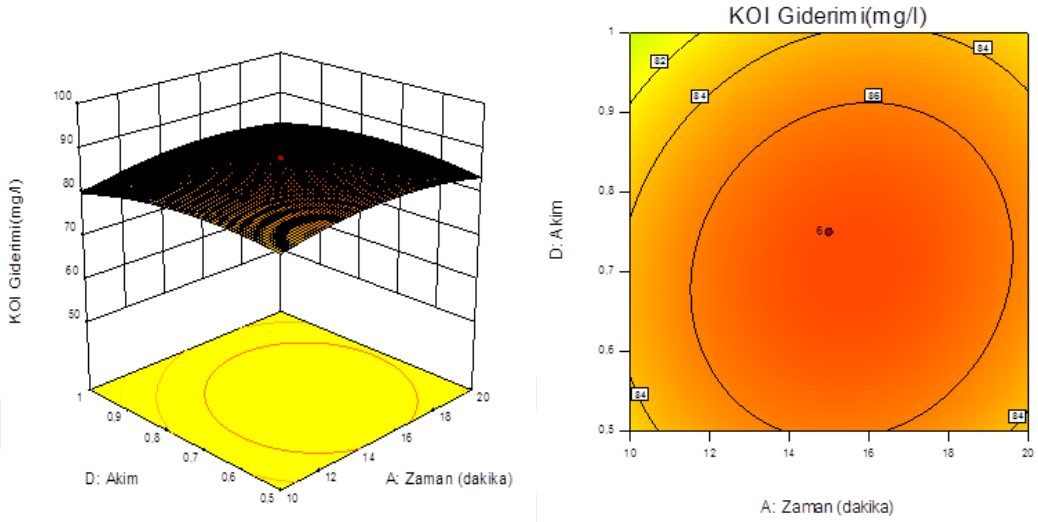
Şekil 5.8 Al Elektrot Kullanılarak yapılan EK KOİ sonuçlarının 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafikleri (Zaman& pH)

Şekil 5.8'de görüldüğü gibi 16 dakika elektroliz süresinde ve pH 8.8 değerinde en yüksek KOİ giderimi elde edilmiştir.



Şekil 5.9 Al elektrot kullanılarak yapılan EK KOİ sonuçlarının 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafikleri (Zaman & İletkenlik)

Al elektrot kullanıldığında 2.6 mS/cm iletkenlikte KOİ gideriminin en yüksek olduğu söylenebilir (Şekil 5.9).



Şekil 5.10 Al Elektrot Kullanılarak yapılan EK KOİ sonuçlarının 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafikleri (Akım & Zaman)

Şekil 5.12'de görüldüğü gibi, Al elektrot kullanılan elektrokoagülasyon deneyinden elde edilen 3 boyutlu ve 2 boyutlu kontur sonuçlarına göre 0.75 A yada 10.41 mA/cm^2 akım yoğunluğunda en yüksek KOİ giderimi elde edilmiştir.

Bulanıklık Giderimi

Al elektrot ile yapılan elektrokoagülasyon deneyinde bulanıklık gideriminden elde edilen model denklemi aşağıda verilmiştir.

Y_2 (Al Elektrot)=

$$+96.96+7.79*X_1-4.27*X_2+7.35*X_3+6.17*X_4-3.12*X_1X_2-10.41*X_1X_3-6.78*X_1X_4-1.84X_2X_3+1.14X_2X_4-7.18*X_3X_4+0.25*X_1^2-16.81*X_2^2+0.80*X_3^2-1.49*X_4^2 \quad (5.18)$$

Elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen bulanıklık giderimi CYY metodu ANOVA ile lineer, iç etkileşim ve kuadratik etkileri araştırılmıştır. Çizelge 5.11'de ANOVA sonuçları verilmiştir.

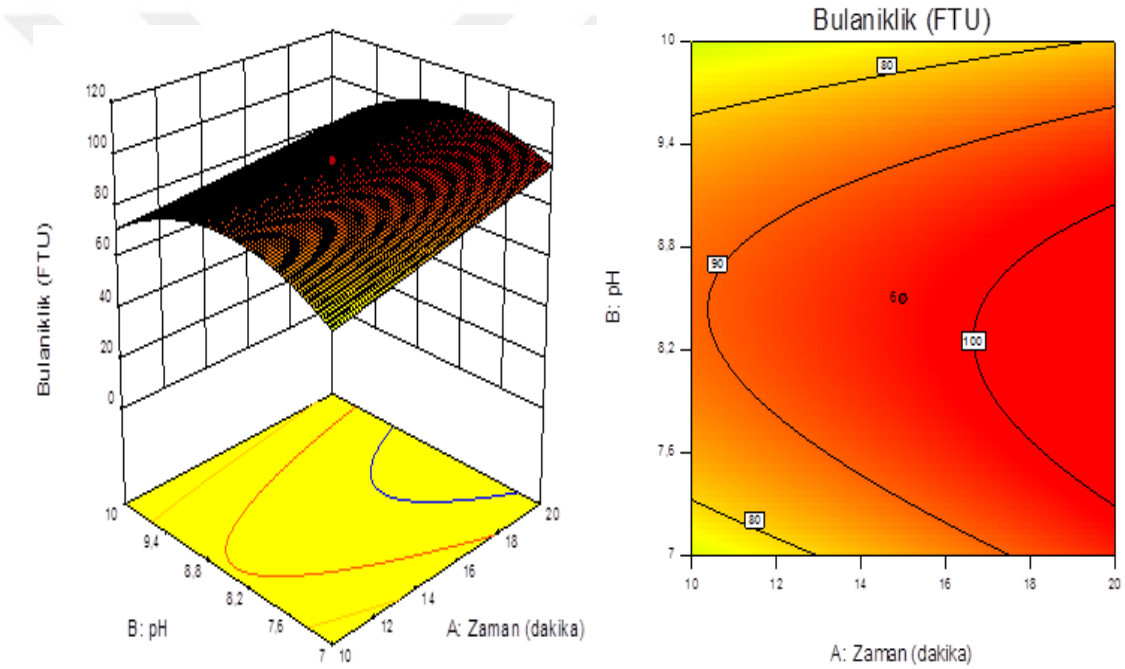
Çizelge 5.11 Al Elektrot kullanılan Elektrokoagülasyon deneyinin bulanıklık gideriminin ANOVA analiz sonuçları

	Al Elektrot			
	Serbestlik Derecesi	Ortalama^2	F-Değeri	P-Değeri
Model	14	1129.44	7	0.0003 uyumlu
A= Zaman	1	1456.26	9.03	0.0089
B= pH	1	438.02	2.72	0.1201
C= İletkenlik	1	1295.22	8.03	0.0126
D= Akım	1	914.02	5.67	0.031
AB	1	155.44	0.96	0.3418
AC	1	1734.93	10.76	0.0051
AD	1	734.55	4.55	0.0497
BC	1	54.21	0.34	0.5707
BD	1	20.86	0.13	0.7241
CD	1	824.69	5.11	0.039
A^2	1	1.7	0.011	0.9196
B^2	1	7751.72	48.07	<0.0001
C^2	1	17.34	0.11	0.7475
D^2	1	60.68	0.38	0.5488
Artık Değer	15	161.26		
Uyum Eksikliği	10	238.18	32.03	0.0007
Hata	5	7.44		
Yeterli hassasiyet (Adeq.Precisor)	10.431			
R^2= 0.87 R^2ayarlanmış= 0.74				

Al elektrot kullanılarak yapılan elektokoagülasyon bulanıklık giderimi sonuçlarının R^2 değeri 0.87'dir. Yeterli hassasiyet 10.431, 4'ten büyük bir değerdir. Ayrıca modelin

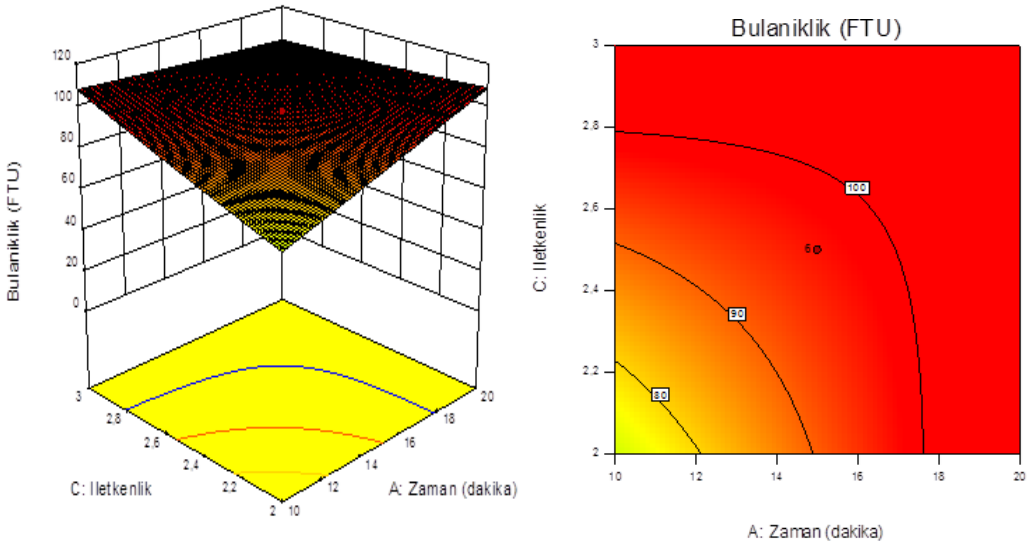
p-değeri 0.0003, 0.05'ten küçük bir değerdir. Tüm bu nedenlerden dolayı sonuçlar modele uygundur.

pH, Akım, elektroliz zamanı ve iletkenlik parametrelerinin etkileri fisher testi yöntemi ile değerlendirilebilir. pH'ın lineer (p-değeri =0.1201>0.05) etkisinin olmadığı, fakat pH^2'ın p-değeri <0.0001 olduğundan kuadratik olarak sonuçları etkilemekte olduğu söylenebilir. Zaman-iletkenlik (p-değeri= 0.0051) iç etkileşim olarak etkili bir faktördür denilebilir.



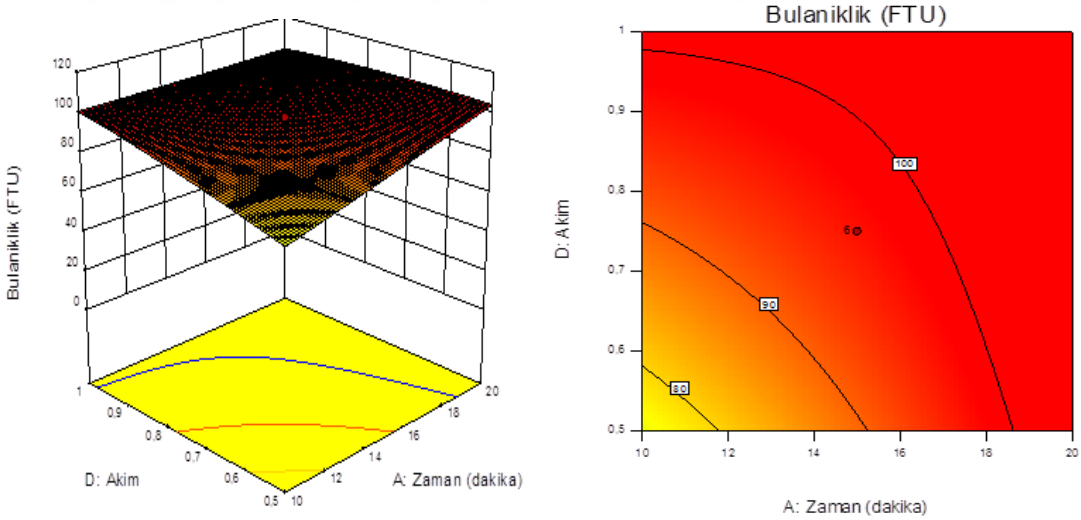
Şekil 5.11 Al Elektrot kullanılarak yapılan EK bulanıklık sonuçlarının 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafikleri (Zaman& pH)

Şekil 5.11'de görüldüğü gibi 20 dakika elektroliz zamanında 8.8 pH'da en yüksek bulanık değerleri elde edilmektedir. Al elektrot kullanıldığında % 90'ın üzerinde bulanıklık giderimi elde edilmiştir. Bu uzaklaştırma oldukça iyi bir değerdir. Ayrıca bulanıklık giderimi elektroliz zamanı arttıkça yükseldiği gözlenmiştir.



Şekil 5.12 Al Elektrot kullanılarak yapılan EK bulanıklık sonuçlarının 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafikleri (İletkenlik& Zaman)

Şekil 5.12'te görüldüğü gibi bulanıklık giderimi iletkenlik ve elektroliz zamanı arttıkça artmıştır.



Şekil 5.13 Al Elektrot kullanılarak yapılan EK bulanıklık sonuçlarının 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafikleri (Akım & Zaman)

Şekil 5.13'de Al elektrot kullanıldığında bulanıklık gideriminin akım ve elektroliz zamanın artmasıyla arttığı görülmektedir. pH 8.8 değerinde, 1.1 Amper veya 15 mA/cm^2'de, iletkenlik 1.1 mS/cm'de yüksek bulanıklık değerleri elde edilmiştir.

5.2.2 Fe elektrot ile yapılan elektrokoagülasyon deney sonuçları

Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) Giderimi

Fe elektrot ile yapılan elektrokoagülasyon deneyinde KOİ gideriminden elde edilen model denklemi aşağıda verilmiştir.

Y_1 (KOİ)=

$$+47.38-3.18*X_1+2.36*X_2+4.83*X_3-7.83*X_4-1.94*X_1X_2-2.40*X_1X_3+1.30*X_1X_4-3.31*X_2X_3-1.16*X_2X_4-9.95*X_3X_4+4.84*X_1^2+4.83*X_2^2-4.06*X_3^2+5.76*X_4^2 \quad (5.17)$$

Fe elektrot kullanılarak yapılan EK deneylerinin bulanıklık gideriminin ANOVA sonuçları çizelge 5.12 verilmiştir. Ayrıca, R^2 değeri 0.90, 1'e yakındır ve ayarlanmış R^2 değeri 0.81, R^2 değerine yakındır. Yeterli hassasiyet 10.885, 4'ten büyüktür. Bunun yanında modelin p-değeri <0.0001, 0.05 değerinden çok küçük bir değerdir. EK 13'te bulunan normalite grafiği ve yukardaki belirtilenler modelin uyumlu olduğunu göstermektedir.

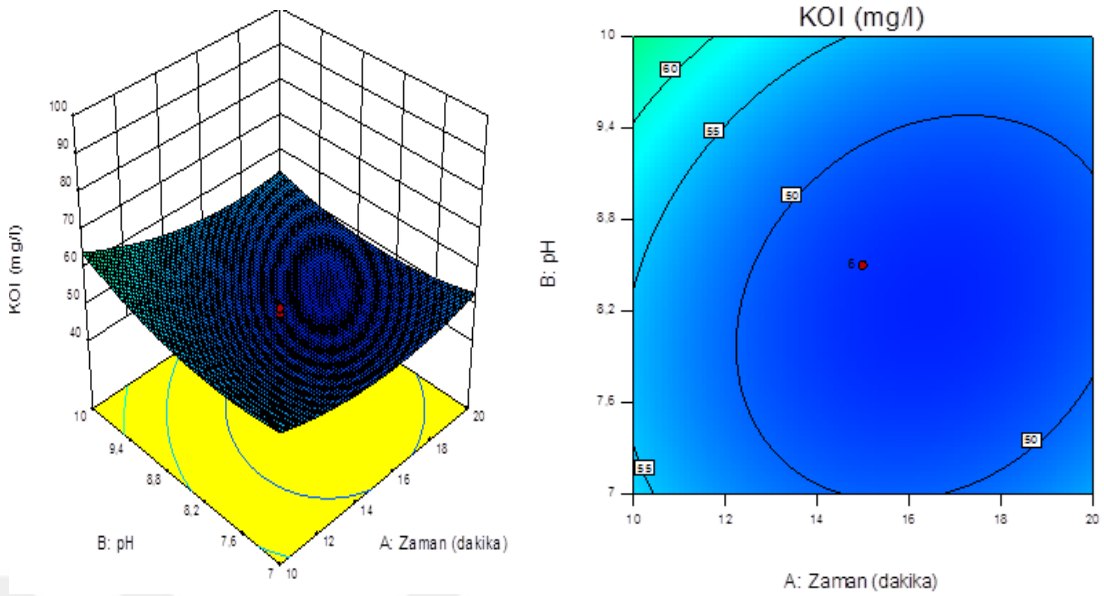
pH, akım, elektroliz zamanı ve iletkenlik parametrelerin etkilerini fisher testi yöntemi ile değerlendirdiğimizde, akımın (p-değeri = <0.0001) lineer olarak oldukça önemli bir faktör olduğu söylenebilir.

Bunun yanında iletkenlik (p-değeri = 0.0037) ve elektroliz zamanıda (p-değeri = 0.039) lineer olarak etkilemektedir. pH parametresi ise pH^2'nin p-değeri 0.0023 olması

nedeniyle kuadratik olarak etkilemektedir. Ayrıca akım, iletkenlik ve elektroliz zamanı parametrelerinin ise kuadratik etkisi yüksektir. İç etkileşim yapan parametreler ise akım-iletkenliktir.

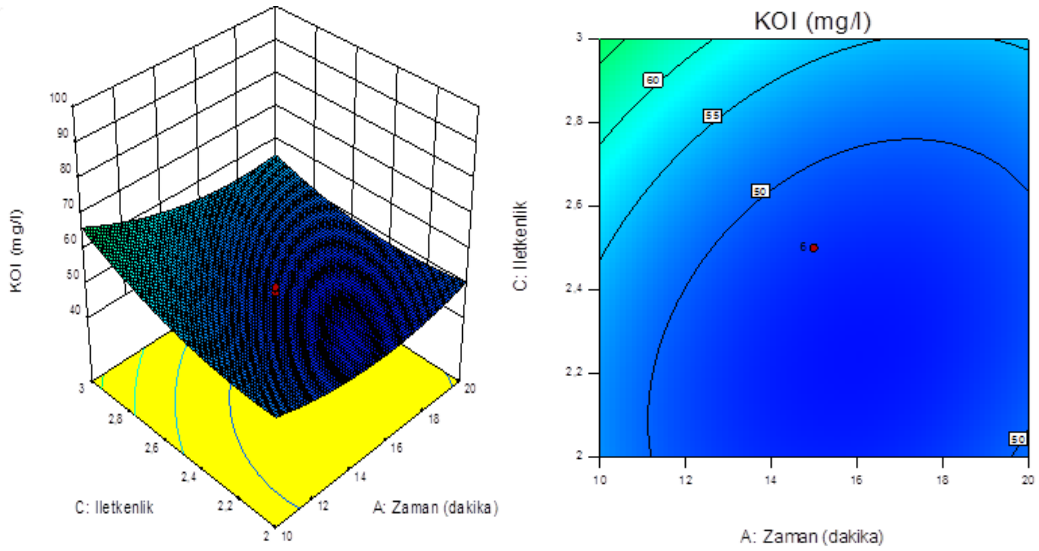
Çizelge 5.12 Fe elektrot kullanılan elektrokoagülasyon deneyinin KOİ gideriminin ANOVA analiz sonuçları

Fe Elektrot				
	Bağımsız Derece	Ortalama^2	F-Değeri	P-Değeri
Model	14	445.39	9.4	<0.0001 uyumlu
A= Zaman	1	242.44	5.11	0.039
B= pH	1	134.05	2.83	0.1133
C=İletkenlik	1	559.7	11.81	0.0037
D= Akım	1	1469.85	31.01	<0.0001
AB	1	60.06	1.27	0.278
AC	1	91.97	1.94	0.839
AD	1	27.2	0.57	0.4685
BC	1	175.56	3.7	0.0735
BD	1	21.39	0.45	0.5119
CD	1	1584.44	33.43	<0.0001
A^2	1	643.47	13.58	0.0022
B^2	1	639.49	13.49	0.0023
C^2	1	451.52	9.53	0.0075
D^2	1	908.76	19.17	0.0005
Artık Değer	15	47.4		
Uyum Eksikliği	10	70.74	97.37	<0.0001
Hata	5	0.73		
Yeterli hassasiyet (Adeq.Precisor)	10.885			
R^2= % 90 $R^2_{ayarlanmış}$= % 81				



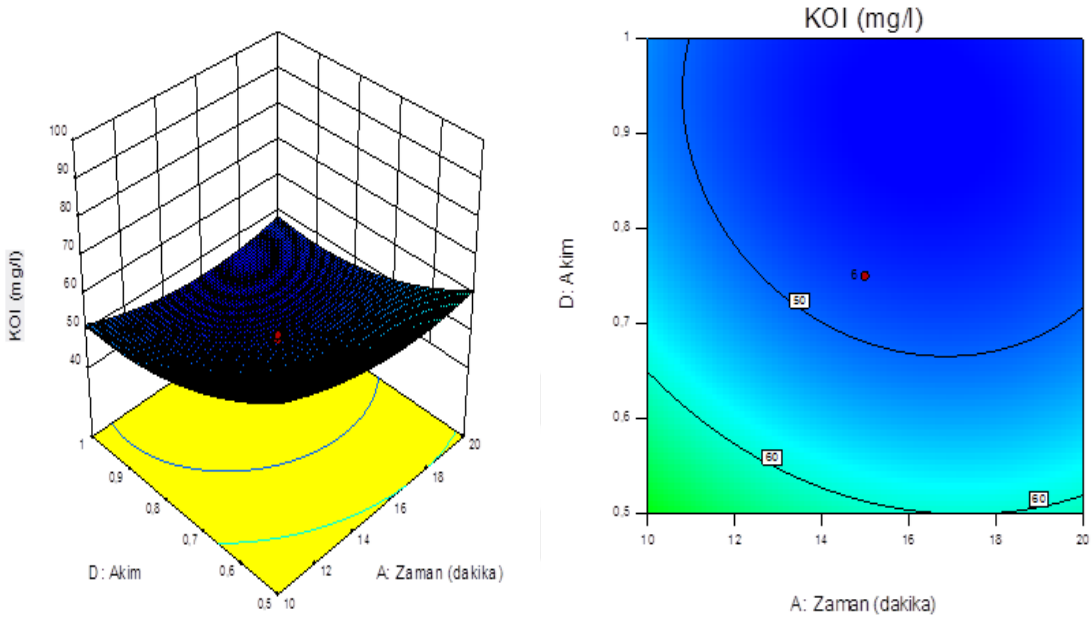
Şekil 5.14 Fe Elektrot kullanılarak yapılan EK KOİ sonuçlarının 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafikleri (pH & Zaman)

Şekil 5.14'de verildiği gibi pH 8.2 değerinde ve 10 dakika elektroliz zamanında en yüksek KOİ giderimi elde edilmiştir.



Şekil 5.15 Fe elektrot kullanılarak yapılan EK KOİ sonuçlarının 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafikleri (İletkenlik & Zaman)

Şekil 5.15'de görüldüğü gibi iletkenlik 3 mS/cm de ve 10 dakika elektroliz zamanında en yüksek KOİ giderimi elde edilmiştir.



Şekil 5.16 Fe Elektrot kullanılarak yapılan EK KOİ sonuçlarının 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafikleri (Akım & Zaman)

Şekil 5.16'da görüldüğü gibi atıksuyun düşük akımda elektrokoagülasyonunda KOİ gideriminin daha yüksek olduğu görülmektedir.

Bulanıklık Giderimi

Fe elektrot ile yapılan elektrokoagülasyon deneyinde bulanıklık gideriminden elde edilen model denklemi aşağıda verilmiştir.

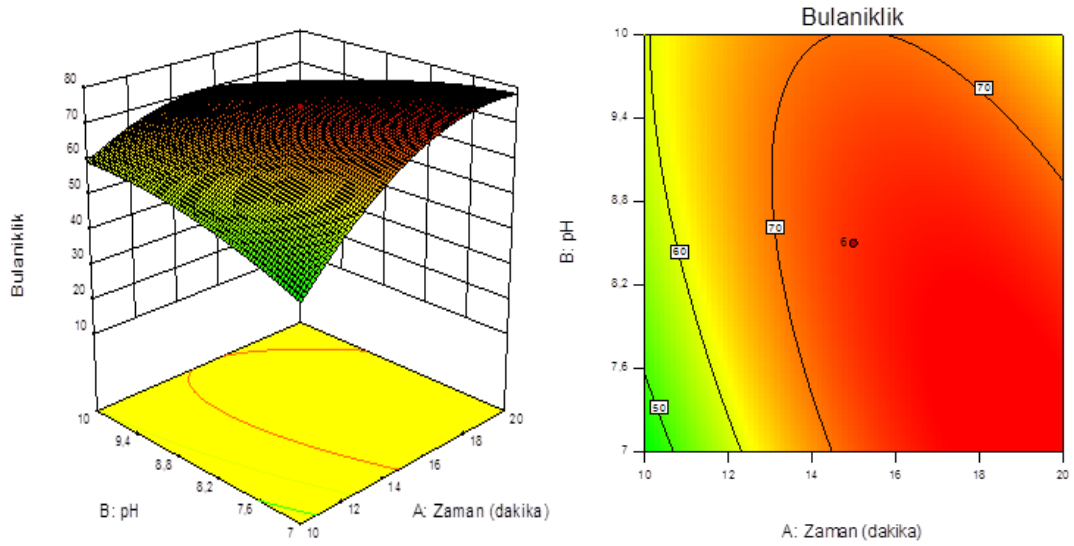
Y_2 (Bulanıklık)=

$$+74.558.55*X_1-0.81*X_2+3.36*X_3+1.63*X_4-7.95*X_1X_2-1.72*X_1X_3+1.62*X_1X_4-5.88*X_2X_3-3.80*X_2X_4-6.14*X_3X_4-10.14*X_1^2-3.55*X_2^2-2.69*X_3^2-3.27*X_4^2 \quad (5.18)$$

Fe elektrot kullanılarak yapılan EK deneylerinin bulanıklık gideriminin ANOVA sonuçları çizelge 5.13'de verilmiştir. R^2 değerleri 0.79'dur. Genel itibari ile CYY uygunluk için 0.70'den yüksek bir değer tercih edilir. Yeterli hassasiyet 7.711, 4 değerinden büyüktür. Ayrıca p-değeri 0.0059, 0.05'ten küçüktür. Tüm bu sebeplerden dolayı sonuçlar model ile uyumludur

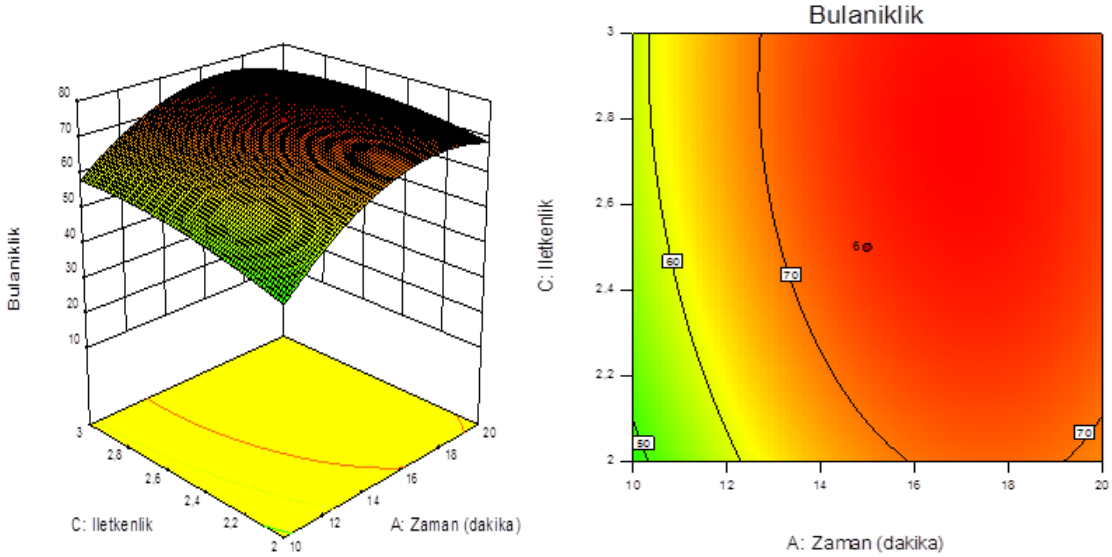
Çizelge 5.13 Fe Elektrot kullanılan elektrokoagülasyon deneyinin bulanıklık gideriminin ANOVA analiz sonuçları

	Fe Elektrot			
	Serbestlik Derecesi	Ortalama^2	F-Değeri	P-Değeri
Model	14	544.78	3.98	0.0059 uyumlu
Zaman	1	1755.49	12.84	0.0027
pH	1	15.65	0.11	0.7398
İletkenlik	1	270.28	1.98	0.1801
Akım	1	64.16	0.47	0.5038
AB	1	1011.88	7.4	0.0158
AC	1	47.54	0.35	0.5642
AD	1	42.12	0.31	0.587
BC	1	552.49	4.04	0.0627
BD	1	230.74	1.69	0.2135
CD	1	603.93	4.42	0.0529
A^2	1	2821.12	20.64	0.0004
B^2	1	345.99	2.53	0.1325
C^2	1	198.17	1.45	0.2473
D^2	1	293.37	2.15	0.1636
Artık Değer	15	136.71		
Uyum Eksikliği	10	205.06		
Hata	5	0		
Yeterli hassasiyet (Adeq.Precisor)	7.711			
R^2= %79 R^2 ayarlanmış= % 59				



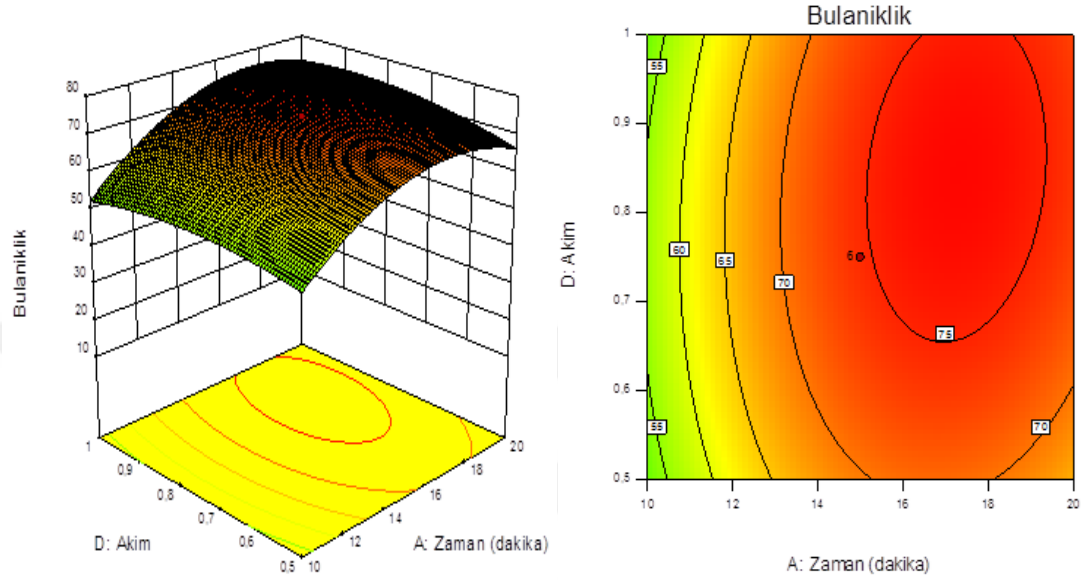
Şekil 5.17 Fe Elektrot kullanılarak yapılan EK bulanıklık sonuçlarının 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafikleri (Zaman& pH)

Şekil 5.17'de verilen grafikte görüldüğü gibi pH 8.8'da, 18 dakika elektroliz zamanında en yüksek bulanıklık giderimi elde edilmiştir.



Şekil 5.18 Fe Elektrot kullanılarak yapılan EK bulanıklık sonuçlarının 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafikleri (İletkenlik& Zaman)

Şekil 5.18'deki grafikte iletkenlik arttıkça bulanıklık gideriminin arttığı ve bulanıklık giderimi için 3 mS/cm iletkenlik ve 20 dakika elektroliz zamanının optimum koşullar olduğu söylenebilir.



Şekil 5.19 Fe elektrot kullanılarak yapılan EK bulanıklık sonuçlarının 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafikleri (Akım & Zaman)

Şekil 5.19'da görüldüğü gibi 0.8 Amper veya 11 mA/cm^2 ve 18 dakika elektroliz zamanında en iyi bulanıklık giderimi elde edilmiştir.

5.2.3 Parçacık sürü optimizasyonu (PSO)

Design Expert programı CYY metodu ile elde edilen denklemler Matlab'ta hazırlanan PSO programı yardımıyla optimize edildi. Böylece, CYY metodu ile elde edilen geniş çözüm aralığı, PSO programı ile daraltılmış oldu. PSO programı ile elde edilen sonuçlar çizelge 5.14'de verilmiştir.

Çizelge 5.14 Parçacık Sürü Optimizasyonu modeline göre optimimum parametreler

	KOİ				Bulanıklık			
	pH	Akım (mA/cm^2)	Zaman (dakika)	İletkenlik (mS/cm)	pH	Akım (mA/cm^2)	Zaman (dakika)	İletkenlik (mS/cm)
Al elektrot	9.9	4.9 (0.35 A)	20	1.9	7.2	15.3 (1.1 A)	10.4	1.9
Fe Elektrot	9.6	4.2 (0.3 A)	20	1.6	7.4	4.2 (0.3 A)	10.7	1.5

Çizelge 5.15 Design Expert 3 boyutlu yüzey ve 2 boyutlu kontur grafiklerine göre optimum parametreler

	KOİ				Bulanıklık			
	pH	Akım (mA/cm^2)	Zaman (dakika)	İletkenlik (mS/cm)	pH	Akım (mA/cm^2)	Zaman (dakika)	İletkenlik (mS/cm)
Al elektrot	9.0	10.41 (0.75 A)	16	2.6	8.8	15 (1.0 A)	20	2.8
Fe Elektrot	8.8	7 (0.5 A)	10	3.0	9.0	11.1 (0.8 A)	18	3

5.3 pH Kontrolü Deneyleri

Koagülasyon ve elektrokoagülasyon sistemleri için istatistik analizleri ve optimizasyon çalışmaları yanında, farklı metodlarla elde edilen PID parametreleri ile ölçülebilen değişken olan pH kontrolü yapılmıştır. PID parametreleri geleneksel yöntem olan Cohen Coon metodunun yanında PSO ve YÇAA algoritmaları ile de hesaplanmıştır.

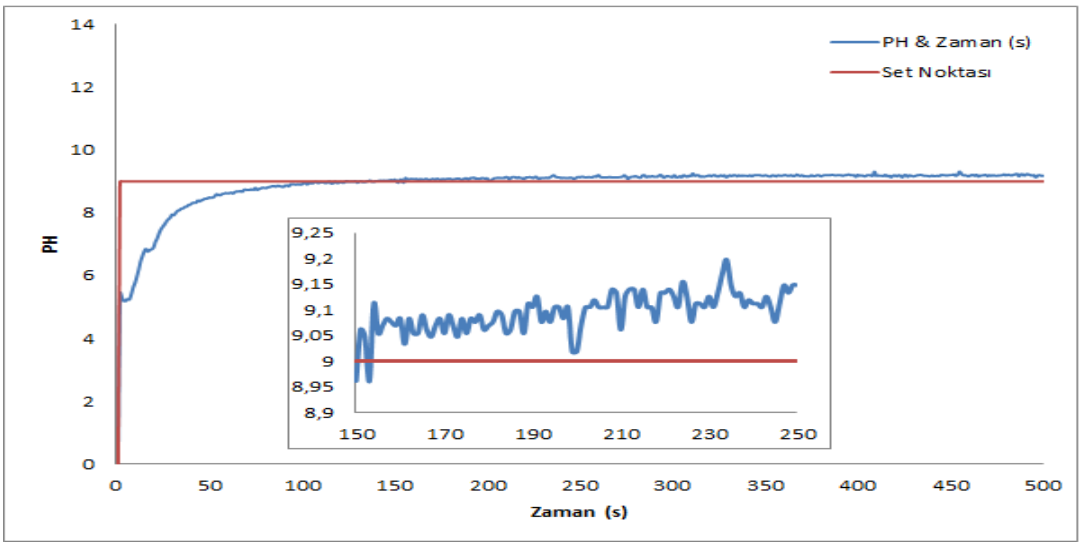
5.3.1 Kesikli reaktörde sudayapılan pH kontrol deneyleri

Kimyasal çöktürme deneylerinde, Cohen Coon ve farklı algoritmalarla hesaplanan parametreler çizelge 5.16'da verilmiştir.

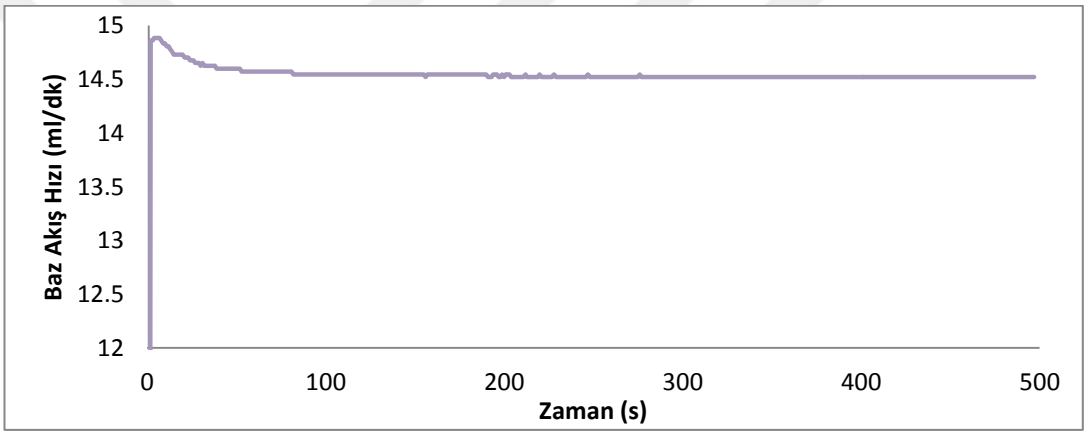
Çizelge 5.16 PID kontrol edicide kullanılan kazançlar

	Kp	Ki	Kd
Cohen Coon	0.103	16.34	2.44
PSO	0.76	10.23	4.46
YÇAA	0.4249	26.9774	1.9929

Kimyasal çöktürme deneylerinde pH kontrolü, öncelikle Cohen Coon yöntemi ile hesaplanan PID kazançları (Kp=0.103, Kı=16.34, Kd=2.44) kullanılmıştır. Kontrol esnasında asit olarak % 5'lik HCl çözeltisi kullanılmıştır. Asit akış hızı sabit tutulmuş ve 16.4 ml/dakikadır. Baz akış hızı ise PID kontrol edici ile kontrol edilmiştir. Ayarlanabilen değişken olarak ise % 5'lik NaOH çözeltisi kullanılmıştır. Sabit asit akışı ve ayarlanabilen baz akışı ile sistem sürekli beslenerek, ölçülebilen değişken olan pH kontrol edilmiştir.



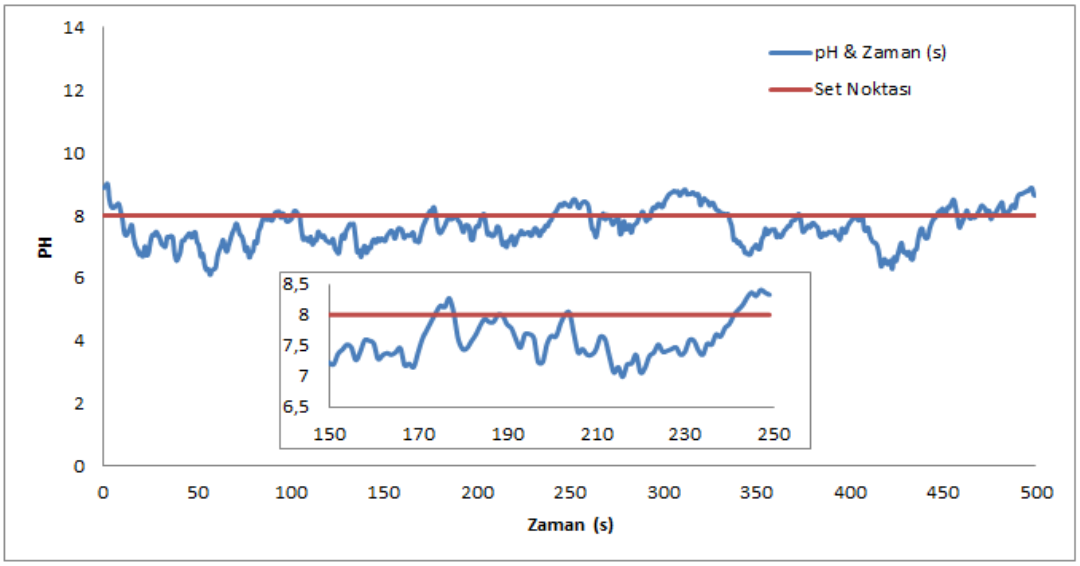
(a)



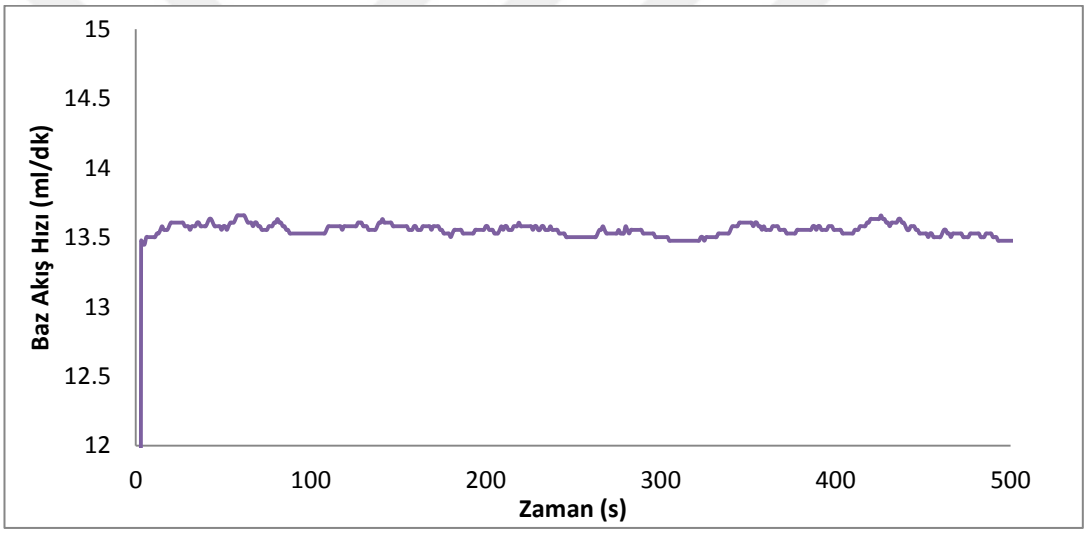
(b)

Şekil 5.20 pH set=9 için Cohen Coon katsayıları ile suda yapılan PID kontrolü
a. pH & Zaman değişimi, b. Ayarlanabilen değişkenin zamanla değişimi

Şekil 5.20'de Cohen Coon katsayıları (Kp=0.103, Kı=16.34, Kd=2,44) ile suda yapılan PID kontrolünde pH 9 set değerinde sabit tutulmuştur. Ofset değeri 0.1 olup, kabul edilebilir bir değerdir. Yaklaşık olarak 100 saniyede pH değeri set noktasına ulaşmıştır. Hata performans kriterleri IAE 155, ISE 222 ve ITAE 21830'dur.



(a)



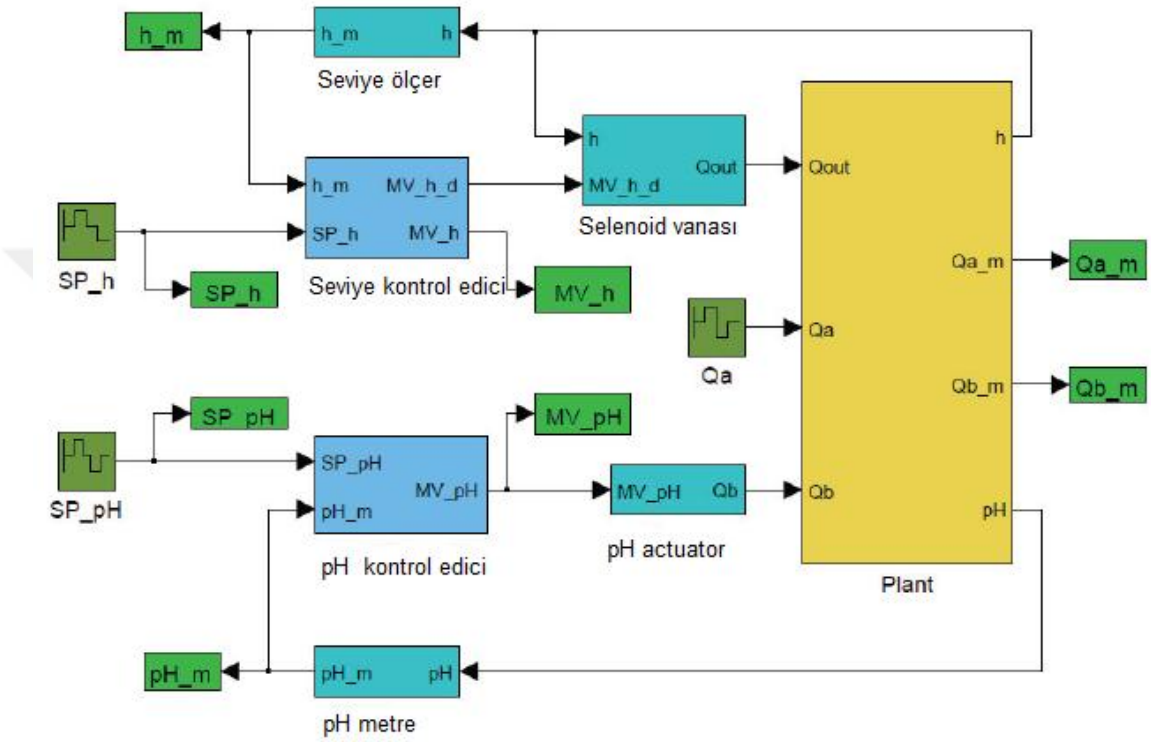
(b)

Şekil 5.21 pH=8 için Cohen Coon Katsayıları ile Suda Yapılan PID Kontrolü.
a. pH & Zaman değişimi, b. Ayarlanabilen değişkenin zamanla değişimi

Şekil 5.21'te pH değeri 9'da başlatılarak, Cohen coon katsayıları (Kp= 0.103, KI=16.34, Kd= 2.44) ile yapılan PID kontrolünde pH 8 değerinde sabit tutulmuştur. Ofset değeri 0.7'dir. En fazla 0.5 değerine kadar ofset kabul edilebilir bir değerdir. Bu nedenle farklı yöntemlerle PID kazanç katsayıları bulunmuş ve bu katsayılarla kontrol deneyleri yapılmıştır. Hata performans kriterleri IAE= 267, ISE= 212 ve ITAE= 73450'dir.

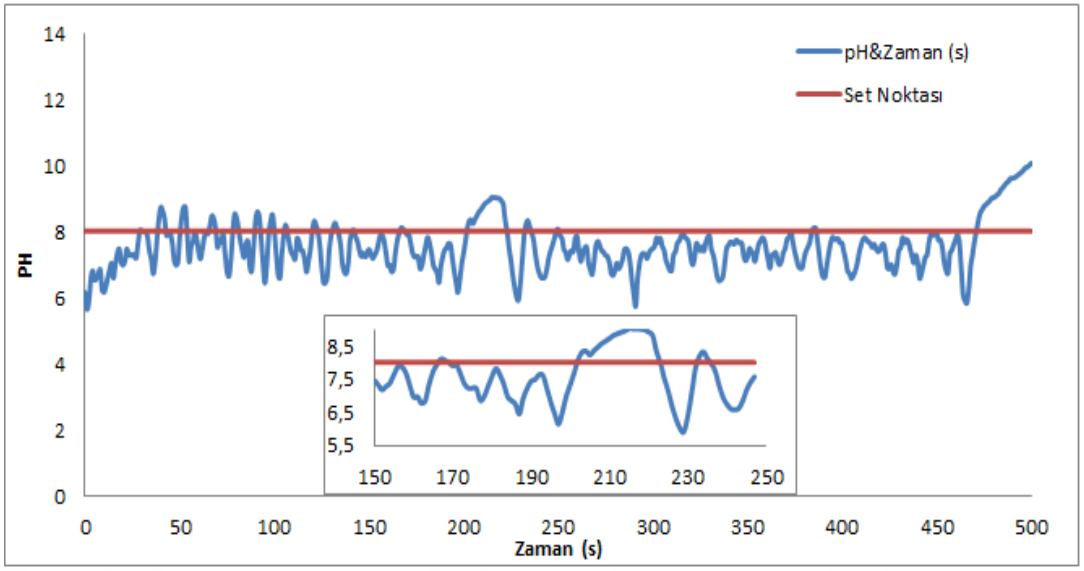
.

Cohen Coon yönteminin yanında farklı optimizasyon yöntemleri kullanılarak PID kazançları hesaplanmıştır. Bu optimizasyon yöntemlerinde pH nötürleştirme modeli kullanılarak PID kazançları bulunmuş ve bu kazançlarla pH kontrol edilmiştir. pH nötürleşme modeli şekil 5.22'te verilmiştir.

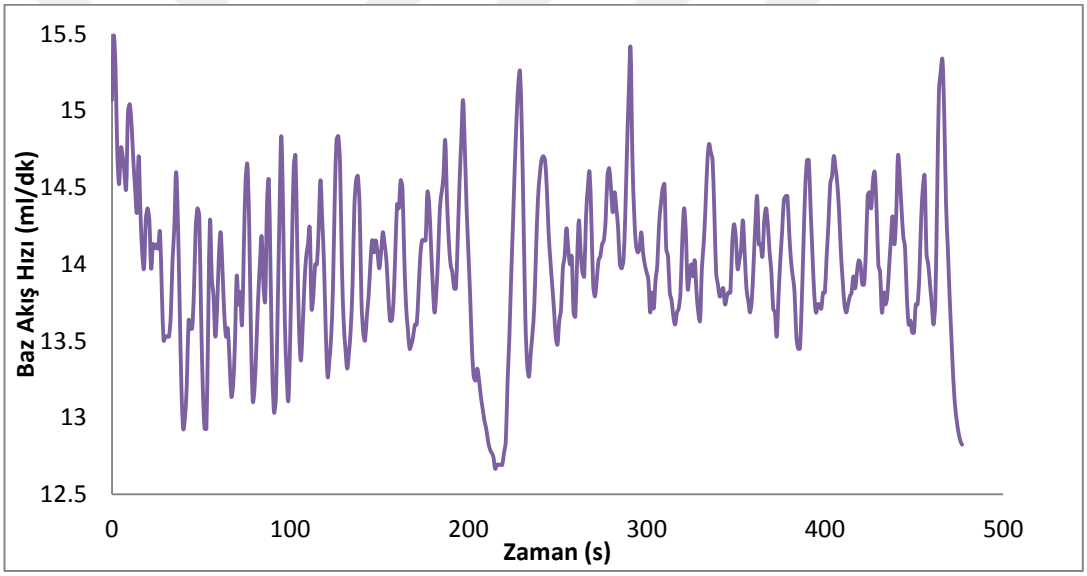


Şekil 5.22 Simulink pH nötürleşme modeli

Koagülasyon sisteminde, optimizasyon algoritmaları ile PID kazançları hesaplanırken dc motorun matematiksel modeli olarak 0.01/(0.2s + 1) seçilmiştir. Bu modele göre farklı PSO ve YÇAA algoritmalarda elde edilen sudaki ve evsel atıksudaki pH kontrolü sonuçları verilmiştir.



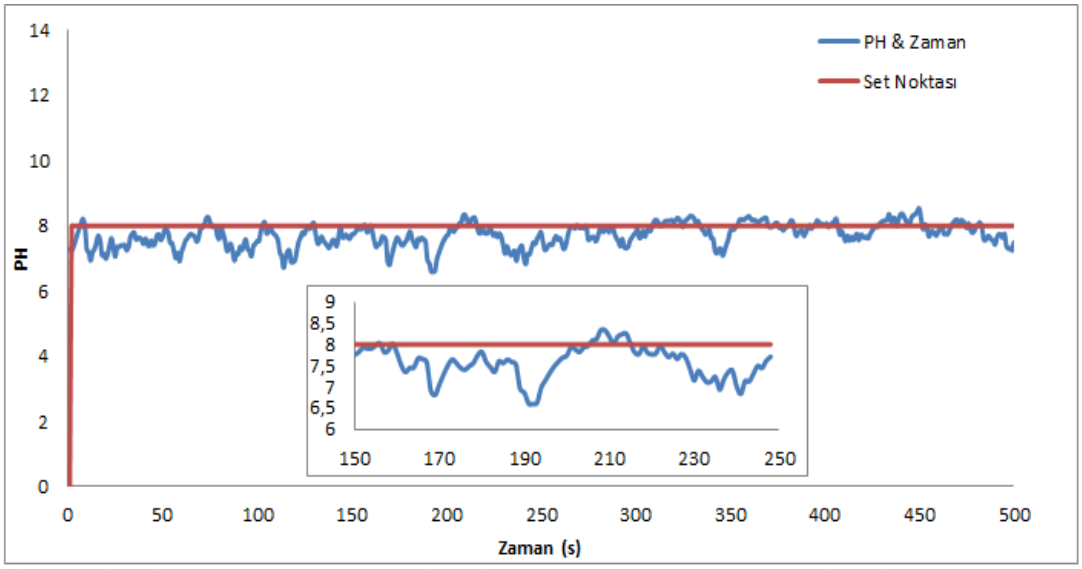
(a)



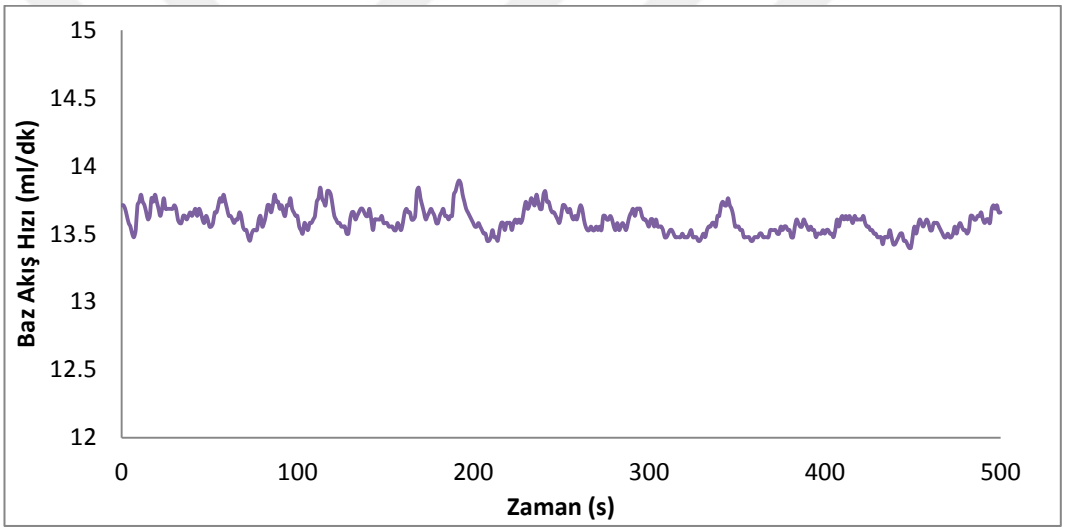
(b)

Şekil 5.23 pH=8 için PSO'dan Bulunan PID Katsayıları ile Suda Yapılan PID Kontrolü
a. pH & Zaman değişimi, b. Ayarlanabilen değişkenin zamanla değişimi

Şekil 5.23'de PSO ile bulunan PID kazanç katsayıları K_p= 0.76, K_I=10.23, K_d= 4.46'dir. Bu PID kazanç değerleri ile pH 8 set noktasında sabit tutulmuştur. Sadece 24 saniyede pH set noktasına ulaşmıştır. PSO ile bulunan PID kontrol ediciden elde edilen hata performans kriterleri diğer algoritmalara göre düşüktür (IAE= 19.365, ISE= 375.02, ITAE= 93575).



(a)

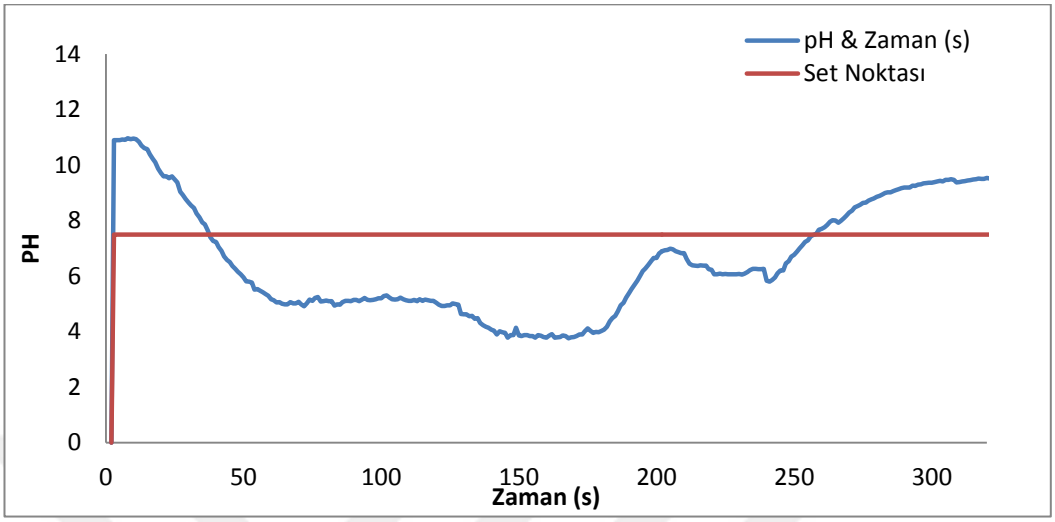


(b)

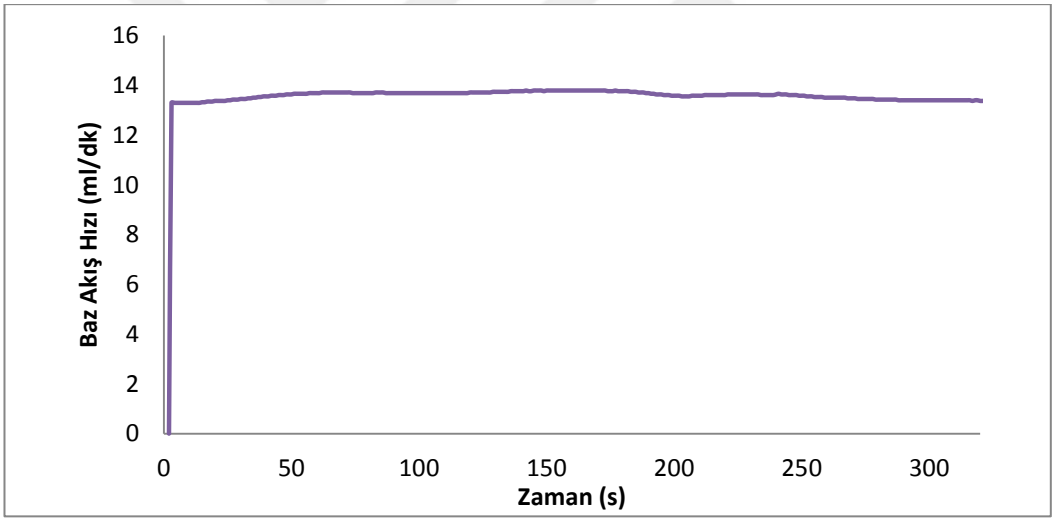
Şekil 5.24 pH=8 için suyun yerçekimsel arama algoritmasından bulunan katsayıları ile suda yapılan PID kontrolü sonuçları
a. pH & Zaman değişimi, b. Ayarlanabilen değişkenin zamanla değişimi

Şekil 5.24'de Yerçekimsel Arama Algoritması (YÇAA) ile bulunan PID kazanç katsayıları K_p= 0.4249, K_I=26.9774, K_d= 1.9929'dir. Suyun pH'ı olan 7.3 değerinde kontrol başlamıştır ve 25-30 saniyede kabul edilebilir bir ofset değerine ulaşmıştır. Hata performans kriterleri IAE = 177.01, ISE = 103.4 ve ITAE = 36126.48'dir.

5.3.2 Çöktürme ile evsel atıksu arıtımı yapılan pH kontrol deneyleri



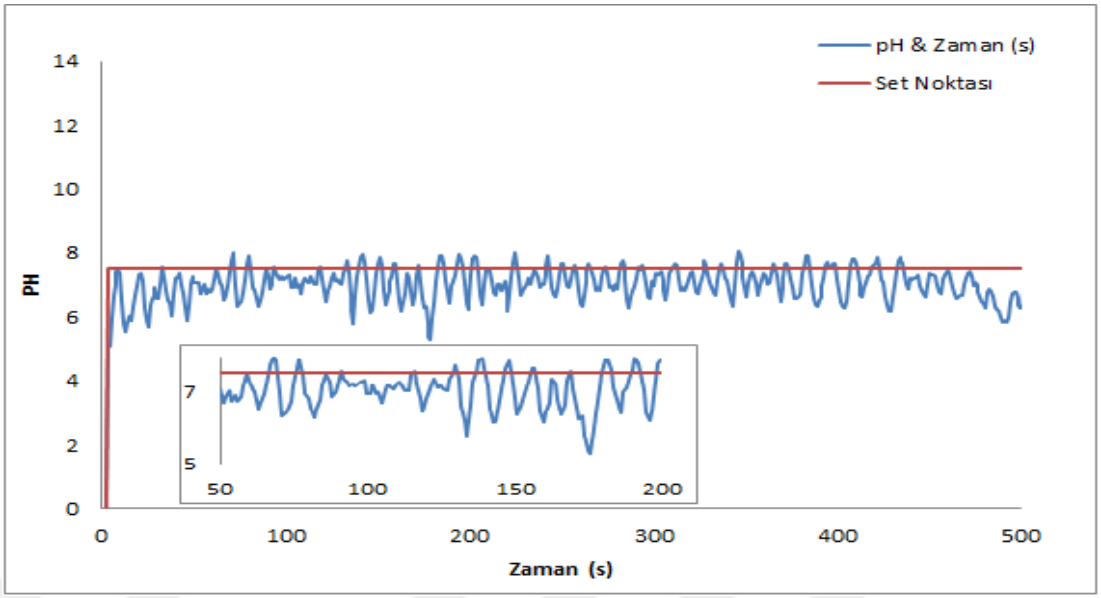
(a)



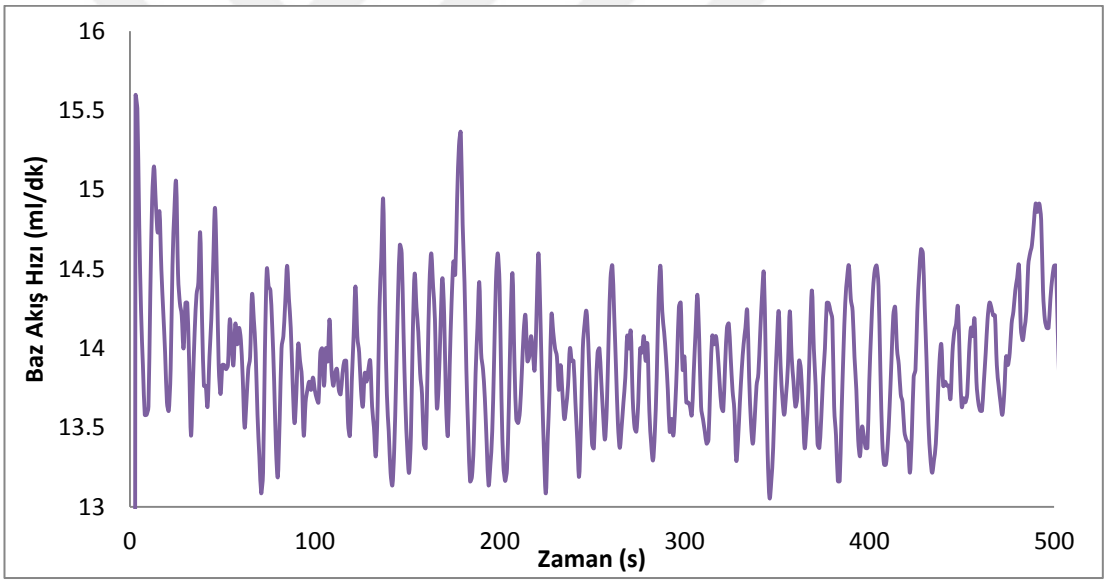
(b)

Şekil 5.25 Alüm çöktürücüsü için Cohen Coon ile evsel atıksuda yapılan PID kontrolü (pHset=7.5, 500 mg/L Alüm)
a. pH & Zaman değişimi, b. Ayarlanabilen değişkenin zamanla değişimi

Şekil 5.25'de, evsel atıksuya alüm çöktürücü maddesi eklenmiş ve Cohen Coon yöntemi ile hesaplanan PID kazançları (K_p= 0.103, K_I=16.34, K_d= 2.44) ile ölçülebilen değişken olan pH kontrol deneyi yapılmıştır. pH değerinde, set edilen noktaya göre çok yüksek oranda sapmalar meydana gelmiştir. Hata performans kriterleri ise IAE=670, ISE= 1670 ve ITAE 144952'dir.



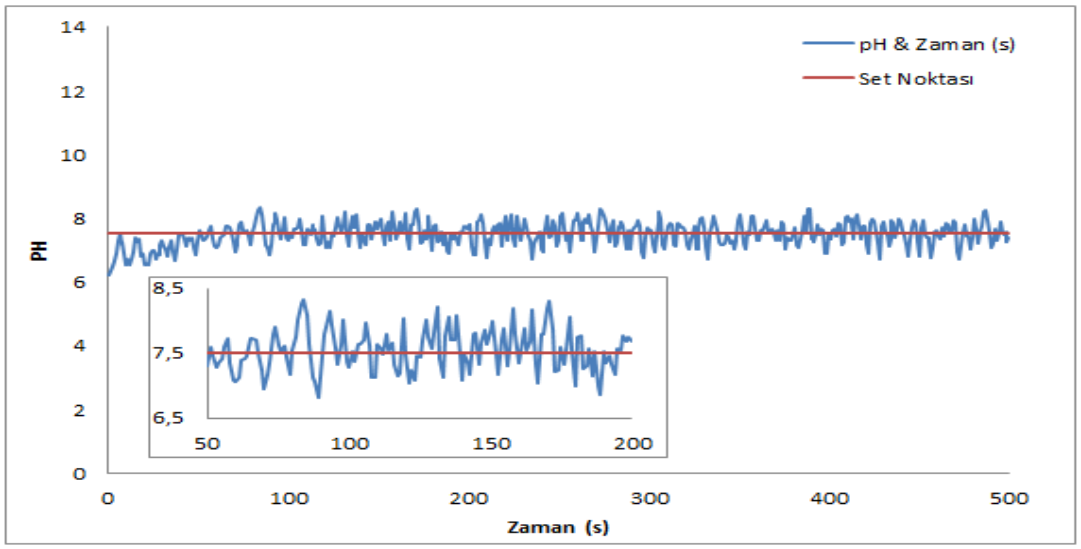
(a)



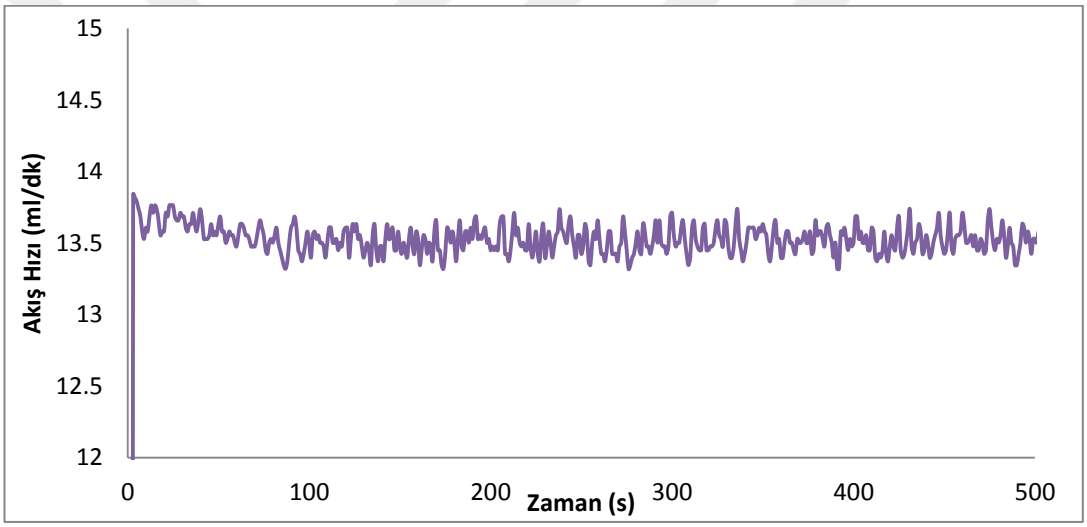
(b)

Şekil 5.26 Alüm çöktürücüsü için PSO algoritması ile evsel atıksuda yapılan PID kontrolü (pHset=7.5, 500 mg/L Alüm)
a. pH & Zaman değişimi, b. Ayarlanabilen değişkenin zamanla değişimi

PSO algoritması kullanılarak hesaplanan PID kazançları Kp=0.76, Kı= 10.23, Kd= 4.46'dır. Evsel atıksuyuna alüm çöktürücüsü (500 mg/L) eklenmiş ve Şekil 5.26'da görüldüğü gibi pH = 7.5 değerinde sabit tutulmaya çalışılmıştır. Hata performans kriterleri IAE=276, ISE=243, ITAE=66340'dur.



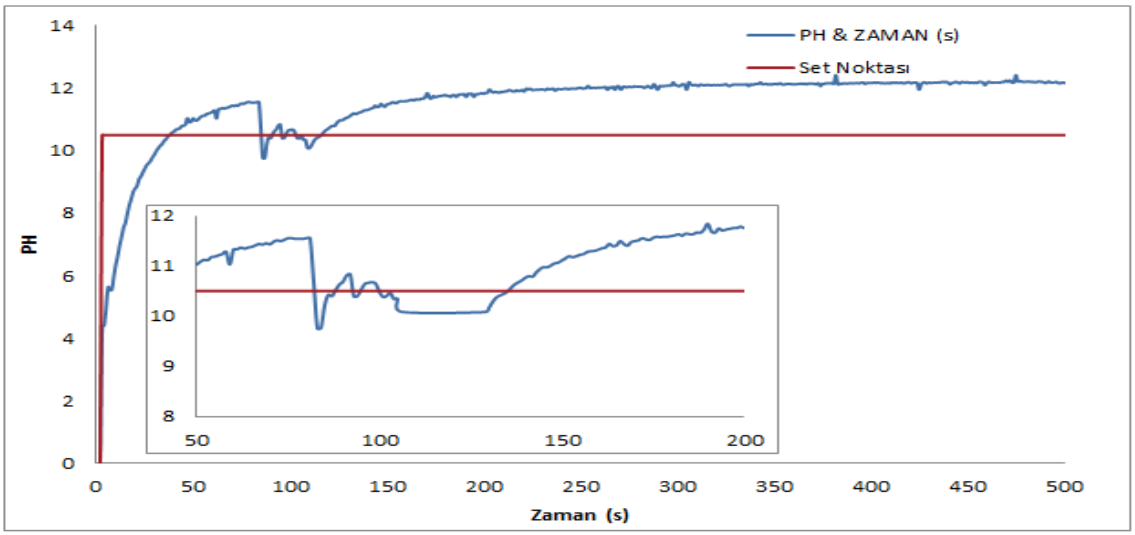
(a)



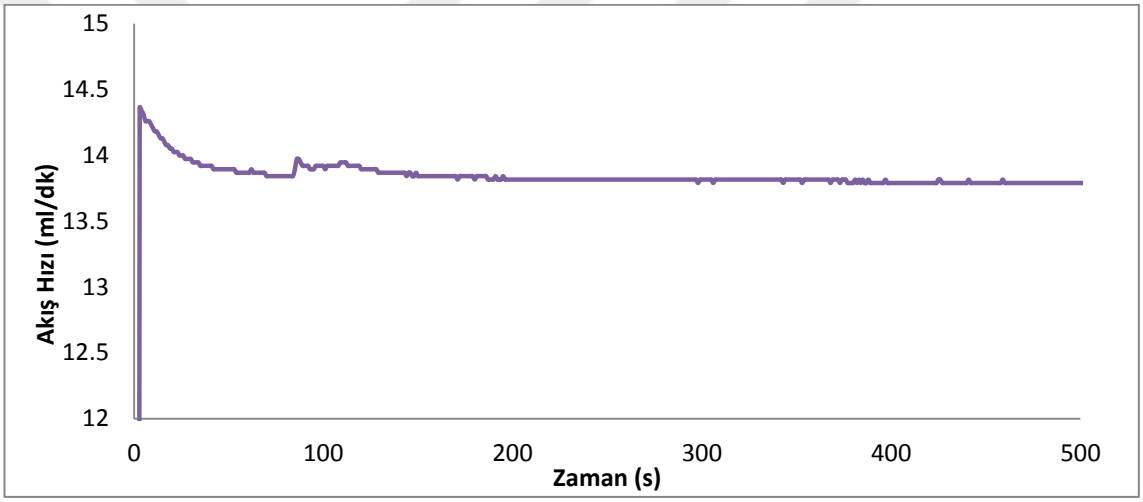
(b)

Şekil 5.27 Alüm çöktürücü için YÇAA katsayıları ile evsel atıksuda yapılan PID kontrolü (pHset =7.5, 500 mg/L Alüm)
a. pH & Zaman değişimi, b. Ayarlanabilen değişkenin zamanla değişimi

Yerçekimsel Arama algoritması kullanılarak elde edilen PID kazanç katsayıları K_p= 0.4249, K_I=26.9774, K_d= 1.9929'dir. Alüm çöktürücü maddesi (500 mg/L) kullanılarak pH 7.5 değerinde sabit tutmak için Şekil 5.27'deki kontrol deneyi yapılmıştır. 30 saniye içerisinde pH set noktasına ulaşmış ve yaklaşık 0.3 değerinde offset oluşmuştur. Bu sapma kabul edilebilir değerdir. Hata performans kriterleri oldukça düşüktür (IAE= 9, ISE=73 ve ITAE=4252).



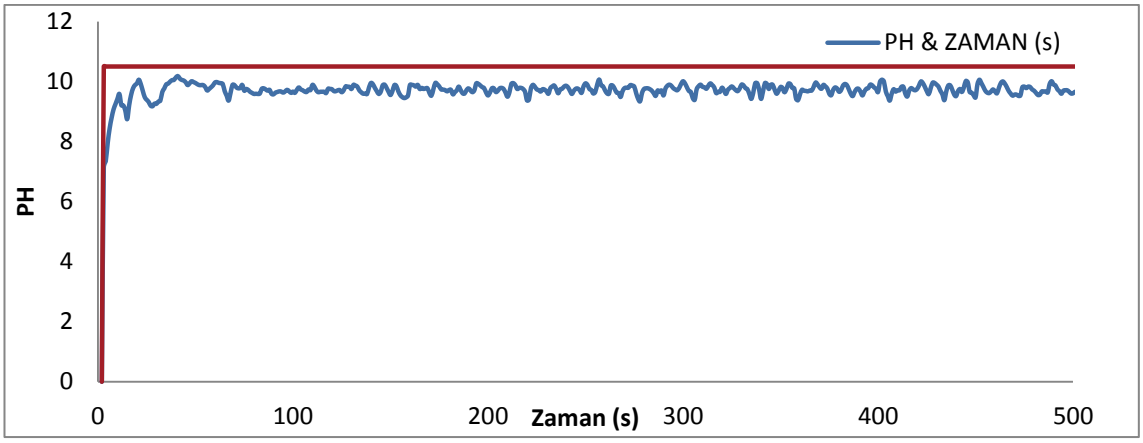
(a)



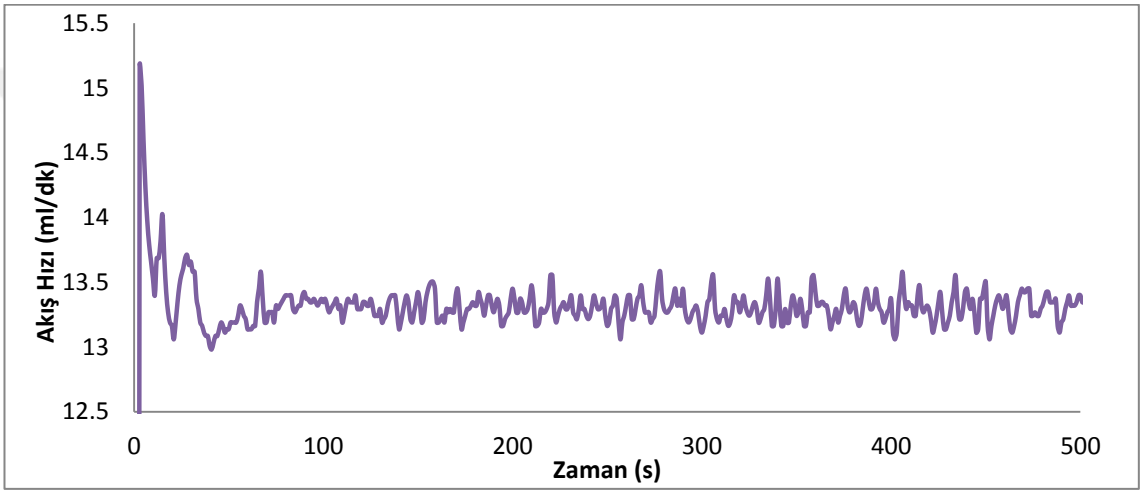
(b)

Şekil 5.28 $FeCl_3$ çöktürücü ile Cohen Coon katsayıları ile evsel atıksuda yapılan PID kontrolü (pHset=10.5, 500 mg/L $FeCl_3$)
a. pH & Zaman değişimi, b. Ayarlanabilen değişkenin zamanla değişimi

Evsel atıksuyuna $FeCl_3$ (500 mg/L) çöktürücü maddesi eklenmiştir. Şekil 5.28'de Cohen Coon katsayıları (K_p= 0.103, K_I=16.34, K_d= 2.44) kullanılarak PID kontrol edici ile ölçülebilen değişken olan pH 10.5'ta sabit tutulmaya çalışılmıştır. Hata performans kriterleri IAE= 652, ISE= 1146 ve ITAE= 184134'dür.



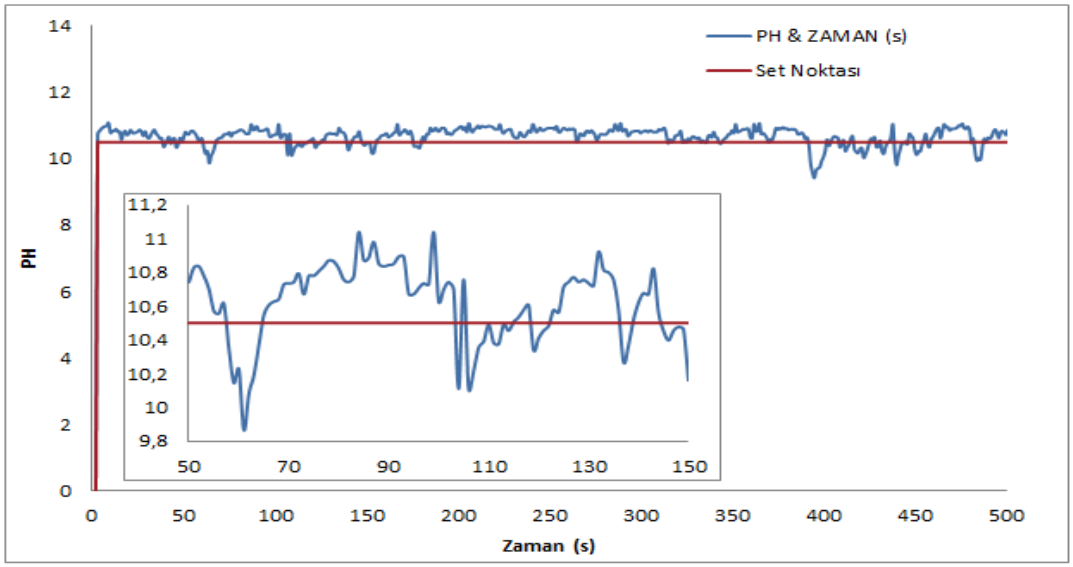
(a)



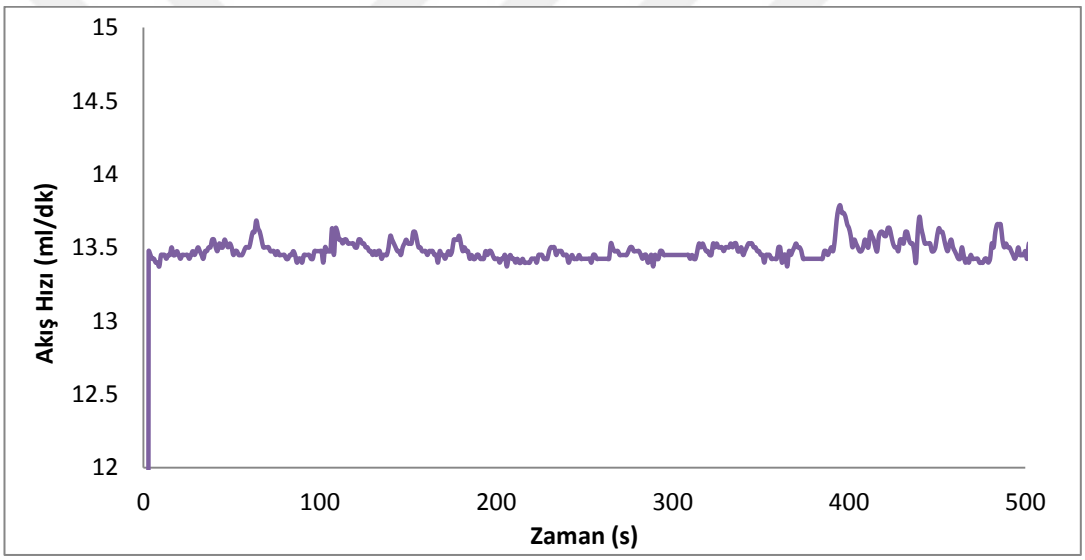
(b)

Şekil 5.29 $FeCl_3$ çöktürücü ile PSO algoritmasından bulunan PID katsayıları ile evsel atıksuda yapılan PID kontrolü (pHset=10.5, 500 mg/L $FeCl_3$)
a. pH & Zaman değişimi, b. Ayarlanabilen değişkenin zamanla değişimi

Evsel atıksuya $FeCl_3$ (500 mg/L) çöktürücü maddesi eklenmiştir. Şekil 5.29'da PSO kullanılarak hesaplanan PID katsayıları ile (Kp= 0.76, KI=10.23, Kd= 4.46) pH 10.5'te sabit tutulmaya çalışılmıştır. Kontrol deneyi başlamasından 18 saniye sonra 0.5 ofset ile set noktasında pH sabit tutulmuştur. Hata performans kriterleri IAE= 399, ISE= 348 ve ITAE= 97188'dir.



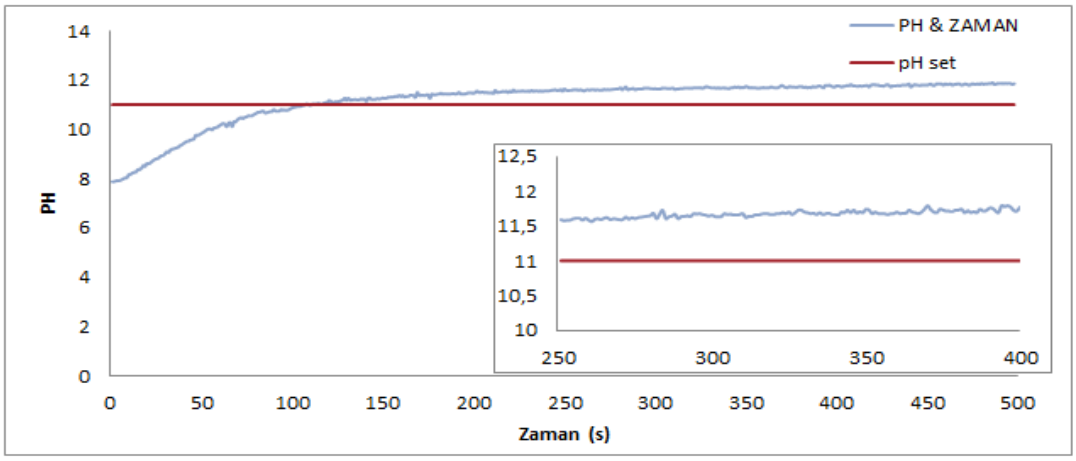
(a)



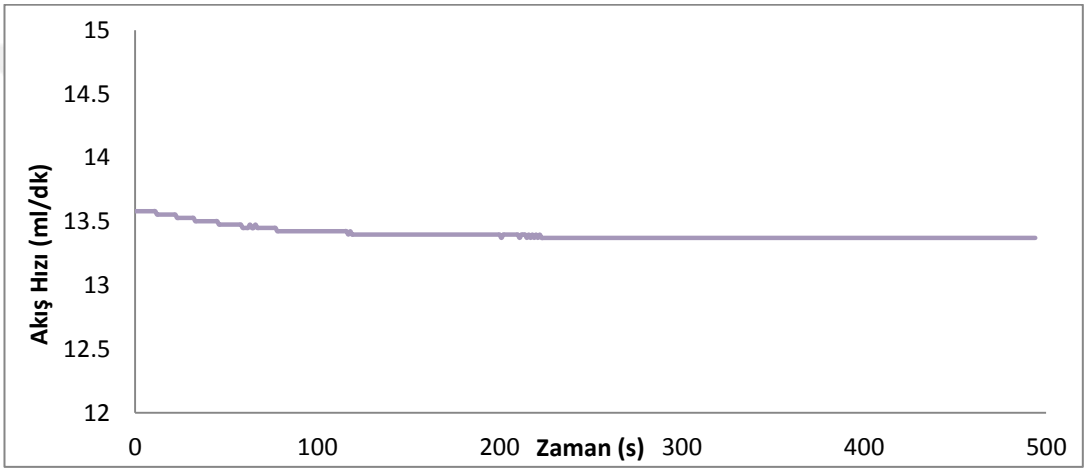
(b)

Şekil 5.30 $FeCl_3$ çöktürücü ile yer çekimsel algoritmasından bulunan PID katsayıları ile evsel atıksuda yapılan PID kontrolü (pHset=10.5, 500 mg/L $FeCl_3$)
a. pH & Zaman değişimi, b. Ayarlanabilen değişkenin zamanla değişimi

Evsel atıksuya $FeCl_3$ (500 mg/L) çöktürücü maddesi eklenmiştir. Şekil 5.30'da Yerçekimsel Arama Algoritması kullanılarak hesaplanan kazançlarla (K_p= 0.4249, K_I=26.9774, K_d= 1.9929) PID kontrol edici ile pH 10.5'ta sabit tutulmuştur. Ofset değeri 0.3 kabul edilebilir bir değerde pH 10.5'ta sabit tutulmuştur. Hata performans kriterleri IAE= 141, ISE= 50 ve ITAE= 37949'dur.



(a)



(b)

Şekil 5.31 $FeSO_4.7H_2O$ çöktürücüsü için Cohen Coon katsayıları ile evsel atıksuda yapılan PID kontrolü (pHset=11, 600 mg/l $FeSO_47H_2O$)
a. pH & Zaman değişimi, b. Ayarlanabilen değişkenin zamanla değişimi

Şekil 5.31'de evsel atıksuya $FeSO_4$ çöktürücü maddesi eklenmiş (600 mg/L) ve Cohen Coon yöntemi ile hesaplanmış kazançlarla (K_p= 0.103, K_I=16.34, K_d= 2.44) PID kontrol deneyi yapılmıştır. 100 saniye sonunda pH, set noktası olan 11 değerine ulaşmıştır. Fakat zamanla set noktasından uzaklaşma görülmüştür. Hata performans kriterleri IAE=370, ISE= 433 ve ITAE= 83452'dir.

Çizelge 5.17 Kimyasal çöktürme prosesinin kontrolünün hata performans kriterleri

	pH (Set)	IAE	ISE	ITAE
Su (Cohen Coon Katsayıları ile PID)	9	155.52	222.83	21830.68
Su (Cohen Coon Katsayıları ile PID)	8	267.44	212.98	73450.15
Su (PSO Katsayıları ile PID)	8	19.365	375.02	93575
Su (YÇAA Katsayıları ile PID)	8	177.01	103.4	36126.48
Alüm 500 mg/L (Cohen Coon Katsayıları ile PID)	7.5	670	1670	144952
Alüm 500 mg/L (PSO Katsayıları ile PID)	7.5	276	243	66340
Alüm 500 mg/L (YÇAA Katsayıları ile PID)	7.5	9	73	4252
$FeCl_3$ 500 mg/L (Cohen Coon Katsayıları ile PID)	10.5	652	1146	184134
$FeCl_3$ 500 mg/L (YÇAA Katsayıları ile PID)	10.5	141	50	37949
$FeCl_3$ 500 mg/L (PSO Katsayıları ile PID)	10.5	399	348	97187
$FeSO_4$ 600 mg/l Cohen Coon katsayıları ile PID	11	370	433	83452

Çizelge 5.17 kimyasal çöktürme işleminde farklı PID kazançlarla yapılan kontrol deneylerinin hata performans kriterleri verilmiştir. Cohen Coon metodu ve PSO ve YÇAA algoritmalarla hesaplanan PID kazançları ile kontrol sağlanmıştır. Kimyasal çöktürmede PSO ve YÇAA algoritmaları ile bulunan katsayıların hata performans kriterlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Alüm ve demir klorür çöktürücülerin kontrol deneylerinde PSO ve YÇAA hesaplanan kazançların KOİ ve bulanık giderimlerinin Cohen Coon'a göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Çizelge 5. 18 Kimyasal çöktürme deneylerinde toplu sonuçlar

	Optimizasyon Sonuçları		**Cohen Coon Katsayıları ile Yapılan PID Kontrolü**					**PSO Algoritması Katsayıları ile Yapılan PID Kontrolü**					**YÇAA Algoritması Katsayıları ile Yapılan PID Kontrolü**				
Çöktürücü	KOİ	Bulanıklık	KOİ	Bulanıklık	IAE	ISE	ITAE	KOİ	Bulanıklık	IAE	ISE	ITAE	KOİ	Bulanıklık	IAE	ISE	ITAE
Alüm	%90	%94	%57	%78	296	380	59028	%71	%96	276	243	66340	% 86	% 96	9	73	4252
$FeCl_3$	%70	%80	%47	%26	652	1146	184134	% 71	% 60	399	348	97187	%62	%79	141	50	37949
$FeSO_4.7H_2O$	%35	%80			370	433	33452										

IAE: Integrated Absolute Error, ISE Integral Standart Error, ITAE: Integrated of Time Weighted Absolute Error

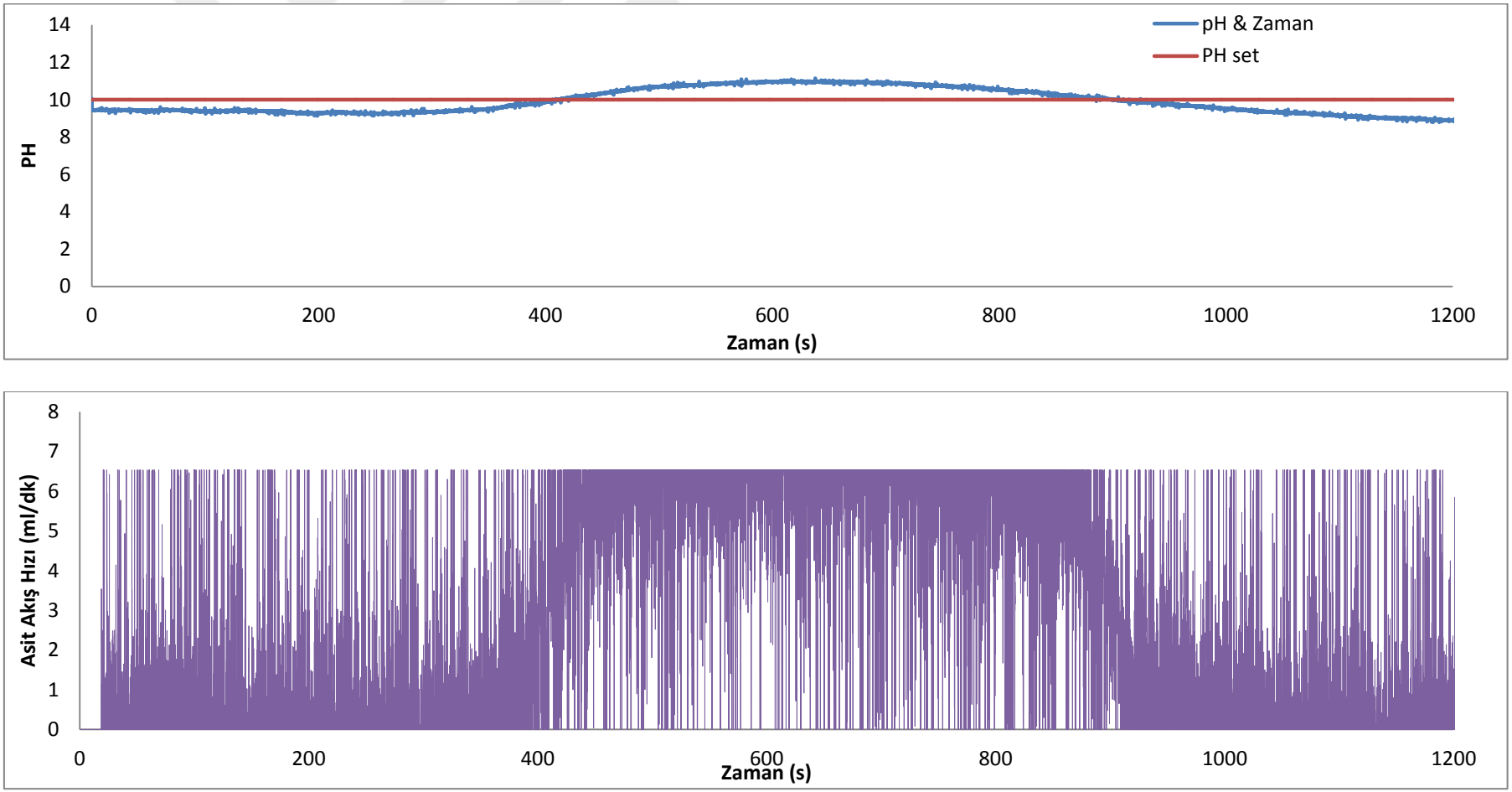
5.3.3 Elektrokoagülasyon prosesi ile yapılan pH kontrol deneyleri

Elektrokoagülasyon prosesinde ölçülebilen değişken olan pH kontrolü, öncelikle geleneksel yöntem olan Cohen Coon ile hesaplanan PID kazançları ile (Kc= 5, Kı= 0.5, Kd= 0.4) yapılmıştır. Cohen Coon yönteminin yanında PSO ve YÇAA optimizasyon algoritmaları ile PID parametreleri hesaplanmıştır. Fakat bu optimizasyon algoritmaları kullanılırken uygun bir model bulunamamıştır. PSO algoritması ile PID parametreleri hesaplanmış. Fakat YÇAA algoritmaları ile hesaplanamamıştır. Çizelge 5.19'da PID kazançları verilmiştir.

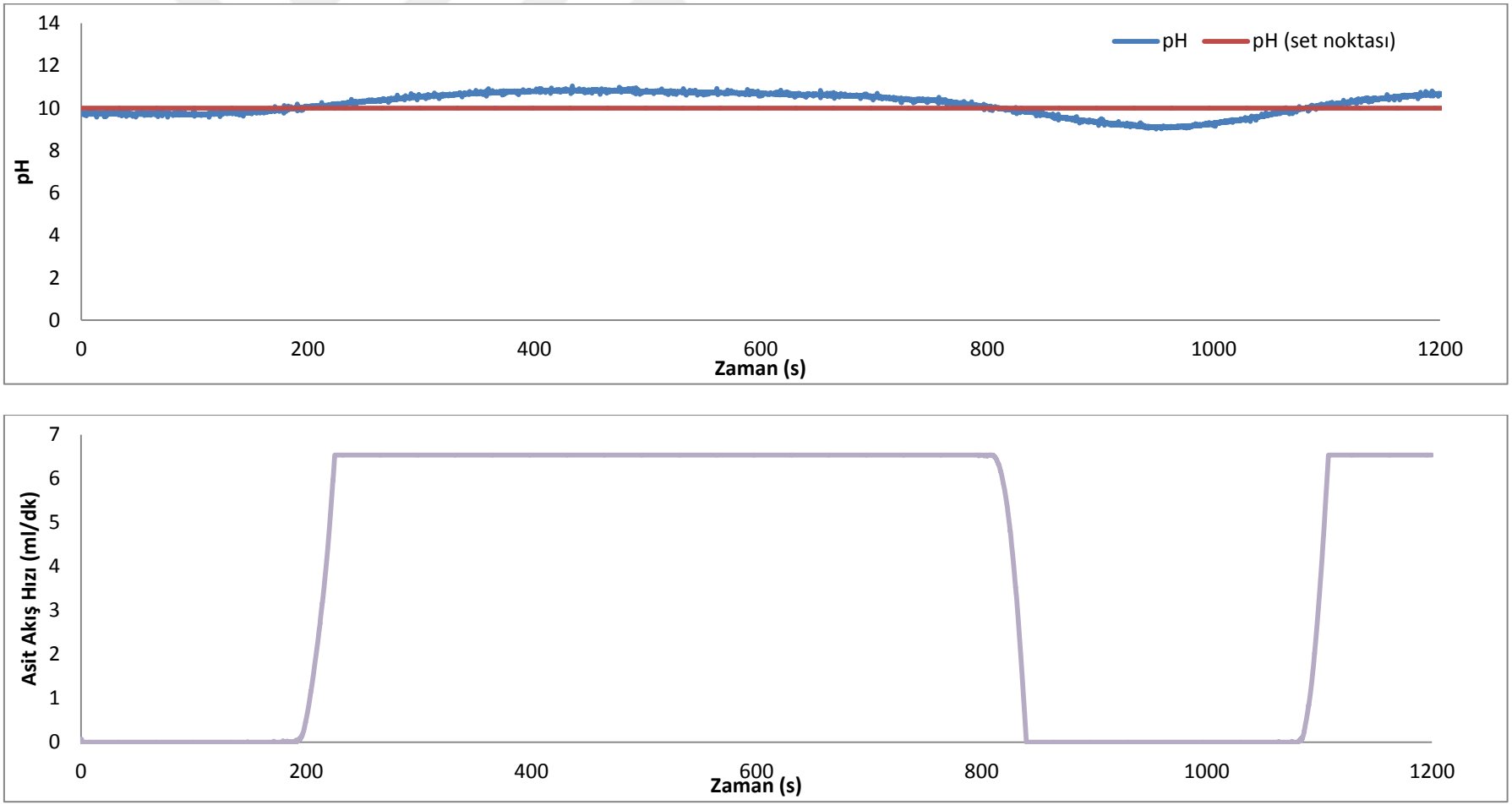
Çizelge 5.19 Elektrokoagülasyonda kullanılan PID Kazançları

	Kp	Ki	Kd
Cohen Coon	4.95	0.4	0.5
PSO	0.01	0.01	0.0563

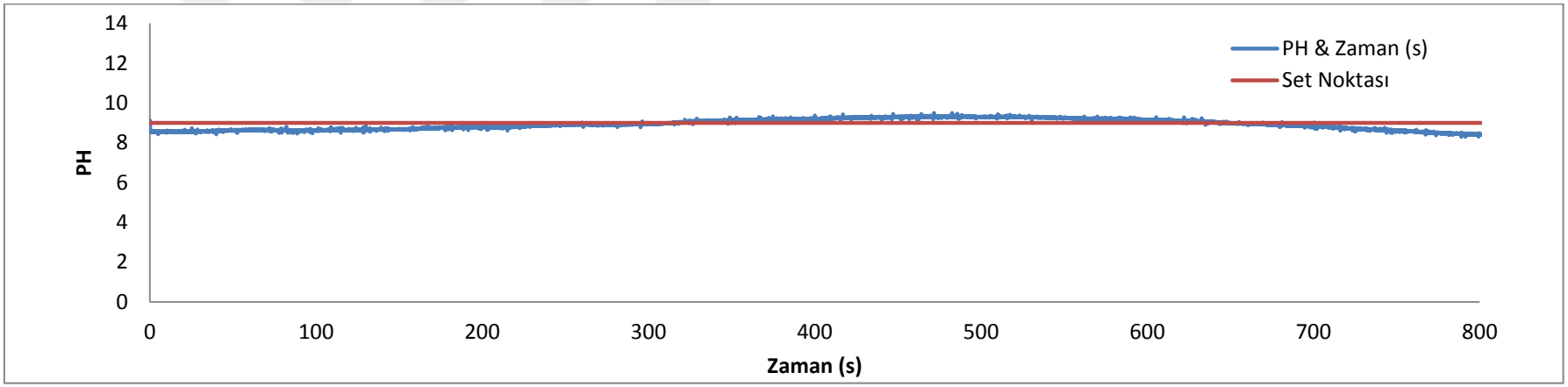
Asit olarak %5'lik HCl ve % 5'lik NaOH çözeltisi kullanılmıştır. Kontrol esnasında baz akış hızı sabit tutulmuştur. Baz akış hızı 4.36 ml/dk'dır. Ayarlanabilen değişken olarak asit kullanıldığında, baz kullanılmasına göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu nedenle asit akış hızı ayarlanabilen değişken seçilmiştir. Ölçülebilen değişken ise pH'dır. Al elektrot kullanıldığında optimum pH set değeri 10, Fe elektrot kullanıldığında ise optimum pHset değeri 9'dur. Elektrokoagülasyonda evsel atıksuyun pH değeri set noktasına getirilerek kontrol sağlanmıştır.

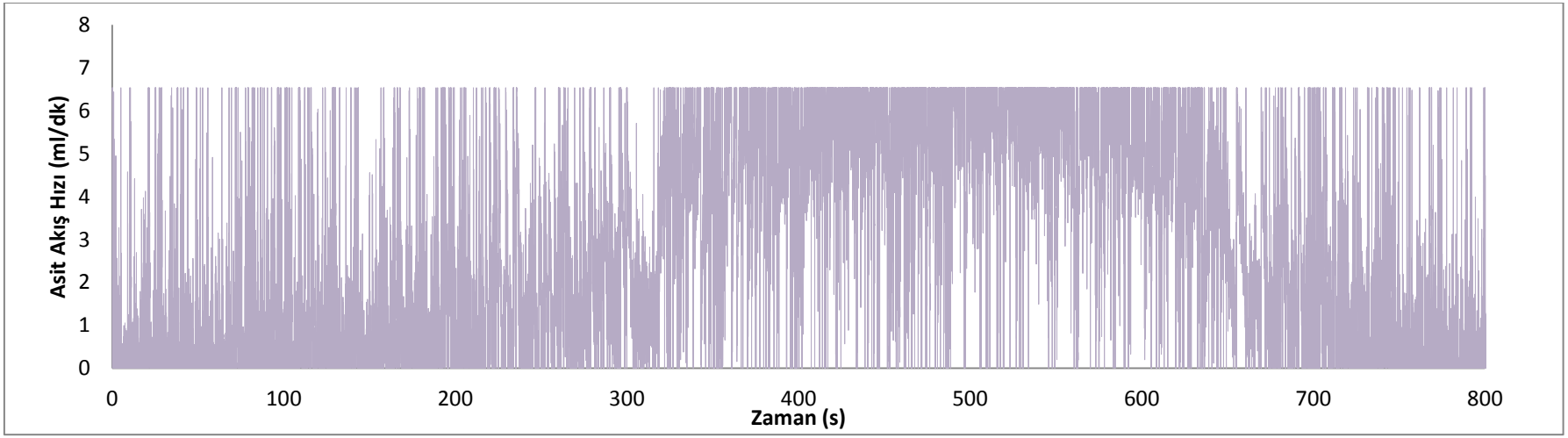


Şekil 5.32 Al elektrot kullanılan elektrokoagülasyon prosesinde, Cohen Coon kazanç katsayıları ile yapılan PID kontrolü (pHset=10)

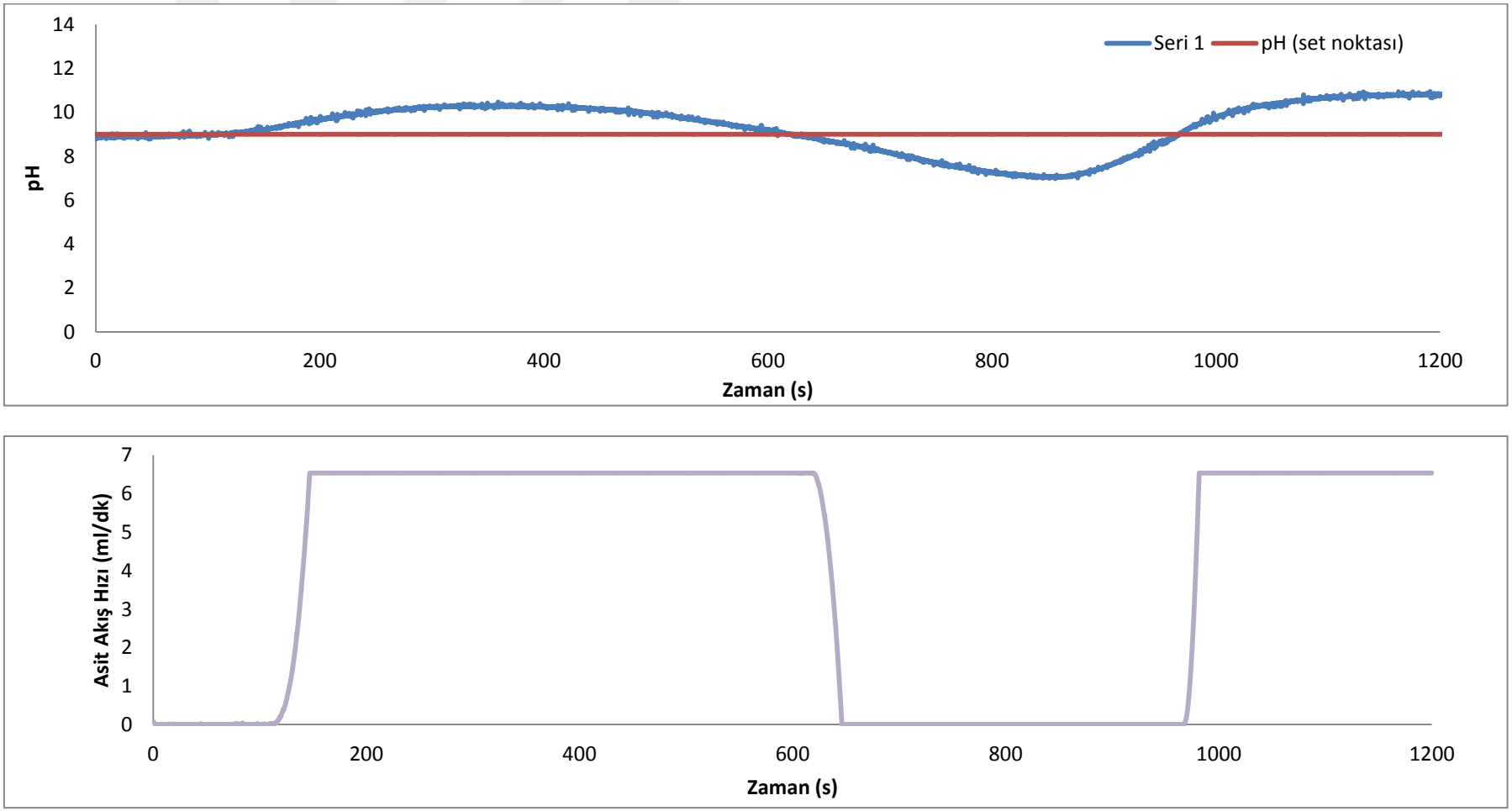


Şekil 5.33 Al elektrot kullanılan elektrokoagülasyon prosesinde, PSO kazanç katsayıları ile yapılan PID kontrolü (pHset=10)





Şekil 5.34 Fe elektrot kullanılan elektrokoagülasyon prosesinde, Cohen Coon kazanç katsayıları ile yapılan PID kontrolü (pHset=9)



Şekil 5.35 Fe elektrot kullanılan elektrokoagülasyon prosesinde, PSO kazanç katsayıları ile yapılan PID kontrolü (pHset=9)

Çizelge 5. 20 Elektrokoagülasyon deneylerinde elde edilen toplu sonuçlar

	Optimizasyon Çalışmasında		Cohen Coon Katsayıları ile Yapılan PID Kontrolü					PSO Algoritması Katsayıları ile Yapılan PID Kontrolü				
Elektrot cinsi	KOİ	Bulanıklık	KOİ	Bulanıklık	IAE	ISE	ITAE	KOİ	Bulanıklık	IAE	ISE	ITAE
Al elektrot	%84	%90	%76	%92	153	348	293646	%72	%74	11729	7325	7393807
Fe Elektrot	%50	%75	%57	%54	3317	3301	2986463	%29	%14	23022	30496	207201

IAE: Integrated Absolute Error, ISE Integral Standart Error, ITAE: Integrated of Time Weighted Absolute Error

Çizelge 5.21 Elektrokoagülasyon prosesi kontrolünün hata performans kriterleri

	pH (Set)	IAE	ISE	ITAE
Al Elektrot (Cohen Coon Kazanç Katsayıları ile PID)	10	47928	45290	293646
Al Elektrot (PSO Kazanç Katsayıları ile PID)	10	11729	7325	7393807
Fe Elektrot (Cohen Coon Kazanç Katsayıları ile PID)	9	3317	3301	2986463
Fe Elektrot (PSO Kazanç Katsayıları ile PID)	9	23022	30496	16754717

Elektrokoagülasyon deneyinin optimum parametrelerinde farklı metodlarla bulunanan kazançlarla PID kontrol deneyleri yapılmıştır.

Çizelge 5.20-5.21'de, yapılan kontrol deneylerine ait KOİ ve bulanıklık giderimleri ve hata performans kriterleri verilmiştir. En yüksek KOİ ve bulanıklık giderimleri ve en düşük hata performans kriterleri Cohen Coon metoduyla hesaplanmış PID parametreleri ile yapılan kontrol deneylerinde elde edilmiştir. Bu nedenle elektrokoagülasyon prosesinin kontrolünde PSO'nun etkisi görülmemiştir.

5.5 İşletme Maliyeti

Büyük ölçekli arıtım proseslerinin seçiminde, prosesin verimli ve az maliyetli olması önemlidir. Kimyasal çöktürme ve elektrokoagülasyon sistemlerinin işletme maliyetleri EK 15'te hesaplanmıştır.

Elektrokoagülasyon prosesinde işletme maliyeti daha çok elektrik sarfiyatından kaynaklanmaktadır ve kimyasal çöktürme prosesine göre daha az maliyetlidir. Bunun yanında elektrokoagülasyon prosesinde Al elektrot kullanılması, kimyasal çöktürme prosesinde en verimli alüm çöktürücüsü kadar KOİ ve bulanıklık giderimi

elde edilmiştir. Her iki sistemin işletme maliyetleri ve KOİ ve bulanıklık giderimleri çizelge 5.22'de verilmiştir.

Çizelge 5.22 Kimyasal çöktürme ve elektrokoagülasyon sistemlerinin işletme maliyetleri

		İşletme Maliyeti ($1m^3$ evsel Atıksuyu için)	KOİ Giderimi	Bulanıklık Giderimi
Kimyasal Çöktürme	Alüm (500mg/L)	4.8 $	90%	94%
	Demir Klorur (500mg/L)	5.1 $	70%	80%
	Demir Sülfat (500mg/L)	3.8 $	35%	80%
Elektrokoagülasyon	Al elektrot	2.55 $	84%	90%
	Fe elektrot	0.885 $	50%	75%

Kimyasal çöktürme prosesinde sonra oluşan yüksek oranda atık verimi düşürmektedir. Ayrıca, özellikle büyük ölçekli arıtım sistemlerinde atıkları bertaraf etmek oldukça güçtür ve ek bir maliyet getirmektedir. Tüm bu nedenlerden dolayı elektrokoagülasyon prosesi tercih edilebilir bir prosestir.

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Günümüzde şehirleşme ile birlikte artan evsel atıksularını arıtmak oldukça önem arzetmektedir. Suyun KOİ ve bulanıklık değerleri kirletici özelliğini gösteren en önemli parametrelerdir. Bu çalışmada evsel atıksuları kimyasal çöktürme ve elektrokoagülasyon prosesleri ile arıtılmış ve KOİ ve bulanıklık giderimleri incelenmiştir. Ayrıca kimyasal çöktürme ve elektrokoagülasyon için uygun parametrelerde kontrol deneyleri yapılmıştır. Bu kapsamda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Üç çöktürücü kullanılarak yapılan kimyasal çöktürme ve her iki elektrot kullanılarak yapılan elektrokoagülasyon proseslerinde elde edilen KOİ ve bulanıklık giderimleri, istatistik modeli olan Cevap Yüzey Yenileme (CYY) metodu ile modellenmiştir. Proseslerde elde edilen her iki giderimin analiz sonucunda R^2 değerleri 0.8-0.9 üzerinde olması nedeniyle sonuçların CYY metoduna uygun olduğu söylenebilir.

- Kimyasal çöktürme prosesinde elde edilen giderimlerin CYY metodu ile analizinde elde edilen ANOVA sonuçları, pH'ın lineer ve kuadratik etkisinin diğer parametrelere (iç etkileşim (Doz×pH) gibi) göre daha etkili bir faktör olduğunu göstermektedir. Yani pH, KOİ ve bulanıklık giderimini diğerlerine göre daha fazla etkilemektedir.

- Kimyasal çöktürme yöntemi ile arıtımda alüm, demir klorür ve demir sülfat heptahidrat çöktürücüleri kullanılmıştır. Kimyasal çöktürme prosesinde kullanılan alüm, demir klorür çöktürücülerinde yeterli düzeyde KOİ ve bulanıklık giderimi sağlanmıştır. Fakat demir sülfat heptahidrat çöktürücünün deterjanda bulunan Cl^- iyonu ile etkileşime girmesi nedeniyle etkili bir KOİ ve bulanıklık giderimi elde edilememiştir.

- Elektrokoagülasyon prosesini etkileyen parametreler pH, elektroliz zamanı, akım ve iletkenliktir. Bu parametrelerin farklı değerlerinde deneyler yapılarak CYY metodu ile analiz edilmiştir. Elektrokoagülasyon prosesinde elde edilen giderimlerin CYY metodu ile analizi sonucunda Al elektrot kullanıldığında pH'ın kuadratik etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir. Fe elektrot kullanıldığında ise akımın kuadratik etkisinin KOİ giderime daha etkin olduğu ve bulanıklık giderime ise zamanın kuadratik etkisinin daha etkili bir faktör olduğu görülmektedir.

- Elektrokoagülasyon prosesinde kullanılan Al ve Fe elektrotların KOİ ve bulanıklık giderimleri incelendiğinde, Al elektrot kullanıldığında elde edilen KOİ ve bulanıklık sonuçları Fe elektrota göre daha yüksektir. Fe elektrot olarak Fe^{+2} kullanılmış olması daha az hidroksil iyonları oluşmasına neden olmaktadır. Böylece kirletici maddeleri daha az çöktürülmektedir.

- Derin deniz deşarjına izin verilebilecek atıksuların KOİ değeri en az 400 mg/L olması gerekmektedir. Hem kimyasal çöktürme prosesinden, hemde Elektrokoagülasyon prosesinden elde edilen arıtılmış suyun KOİ değeri bu kritere uymaktadır.

- Kimyasal çöktürme prosesinde arıtım sonunda çöken madde miktarı oldukça fazla olmaktadır. Bu nedenle kimyasal çöktürme prosesinde elde edilen çamurlar çimento yapımında kullanılmaktadır. Fakat, alüm, demir klorür ve demir sulfat heptahidrat maddelerinde bulunan SO_4^- ve Cl^- maddeleri korozyana neden olduğundan çimento yapımında kullanılması uygun değildir. Bu nedenle kimyasal çöktürme prosesi sonucu oluşan atıkların bertaraf edilmesi oldukça güçtür.

- Kimyasal çöktürme prosesinde pH ve çöktürücü doz miktarı parametreleri bulunmaktadır. Elektrokoagülasyon prosesini, kimyasal çöktürme prosesine göre daha fazla parametreler etkilemektedir. Her bir parametrenin kontrolü önemlidir. Elektroliz zamanı ve akım manual olarak kontrol edilebilmektedir. İletkenlik ile pH

parametreleri kontrol edilebilen değişkenlerdir. Fakat iletkenliğin kontrolü biraz daha güçtür. Ölçülebilen değişken olan pH ise asit ve baz ile kontrolü daha kolaydır. Bu sebeble, her iki proseste pH kontrol çalışmaları yapılmıştır.

- Atıksuyun, arıtım esnasında optimum pH değerine kısa sürede gelmesi ve pH'ın kabul edilebilir bir ofsette set noktasında tutulması KOİ ve bulanıklık gideriminin sağlanması açısından önemlidir. Arıtım esnasında pH değerlerinin set noktasından sapması, KOİ ve bulanıklık giderimi verimini olumsuz etkileyecektir.

- Elektrokoagülasyon ve Kimyasal Çöktürme proseslerinin uygun parametrelerinde yapılan kontol deneylerinde PID kontrol edici kullanılmıştır. Kimyasal çöktürme deneylerinde, PSO ve YÇAA algoritmaları kullanılarak bulunan PID parametreleri ile yapılan kontrol deneylerinde pH değerini set noktasına daha hızlı getirdiği görülmüştür. Ayrıca bu algoritmalarda elde edilen performans hata kriteleri diğer kontol edicilere göre daha düşük çıkmıştır. Bu nedenle kimyasal çöktürme prosesi için endüstriyel kullanımda PSO ve YÇAA algoritmalarını kullanarak PID kontrol edici kullanılması önerilmektedir.

- Elektrokoagülasyonda ise Cohen Coon metodu ile bulunan PID parametreleri ile yapılan kontrol deneylerinde pH değeri set noktasında daha iyi tutulmuştur. PSO algoritması ile bulunan PID parametreleri ile yapılan kontrol deneylerinde ise ayarlanabilen değişken on-off çalışmıştır. Cohen Coon PID parametreleri ile ise ayarlanabilen değişken on-off olarak gürültülü çalışmıştır. Ayrıca Cohen Coon PID parametreleri ile yapılan kontrolde elde edilen performans hata kriterleri PSO PID parametreleri yapılan kontrolünkine göre daha düşüktür. Sonuç olarak elektrokoagülasyon prosesinde PSO'nun etkisi görülmemiştir.

KAYNAKLAR

Abdalla, T.Y. and Abdulkareem, A.A. 2012. PSO-based Optimum Design of PID Controller for Mobile Robot Trajectory Tracking. International Journal of Computer Applications. 47, 23.

Aji, B.A., Yavuz Y. and Koparal, A.S. 2012. Electrocoagulation of heavy metals containing model wastewater using monopolar iron electrodes. Separation and Purification Technology, 248‑254.

Akyol, A. 2012. Treatment of paint manufacturing wastewater by electrocoagulation. Desalination, 285, 91–99.

AlMubaddal, F., AlRumaihi, K. and Ajbar, A 2009. Performance optimization of coagulation/flocculation in the treatment of wastewater from a polyvinyl chloride plant. Journal of Hazardous Materials, 431–438.

Alataş, B. 2007. Kaotik haritalı parçacık sürü optimizasyonu algoritmaları geliştirme. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, 140, Elazığ.

Alfi, A. and Modares, H. 2011a. System identification and control using adaptive particle swarm optimization.Applied Mathematical Modelling, 35, 1210–1221.

Alfi, A. and Fateh, M.-M. 2011b. Intelligent identification and control using improved fuzzy particle swarm optimization. Expert Systems with Applications, 38, 12312–12317.

Altinoz, O.T. 2010. Türevsel Evrim Algoritması ve Elektronik Mühendisliği Uygulamaları, Aralık Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Seminer Notları, Ankara.

Almeida, M.C., Butler, D. and Friedler, E., 1999. At-Source Domestic Wastewater Quality, Urban Water, 1, 49-55.

Anonim. 1960. Web Sitesi: http://www.teknik.alüminyum.com.tr/docs/wk26.12, Erişim Tarihi: 22.10.2012.

Anonim. 2004. Web Sitesi: http://www.epdk.gov.tr/index.php/elektrik-piyasası/tarifeler?id=133. Erişim Tarihi:12.05.2016.

Anonim. 2007. Web Sitesi: http://atacandemircelik.com/fiyat-listeleri/guncel-demir fiyatları.html, Erişim Tarihi: 12.09.2012.

Anonim. 2012. Web Sitesi: http://www.yazilimmutfagi.com/10058/yapay-zeka/heuristic/parcacik-suru-optimizasyonu-particle-swarm-optimization, Erişim tarihi: 02.03.2013.

Anonim. 2016a. Web Sitesi: http://www.kimyaborsasi.com.tr/a/alüminyum-sulfat-13.html, Erişim tarihi: 04.05.2016.

Anonim. 2016b. Web Sitesi: http://www.kimyaborsasi.com.tr/d/demir-uc-klorur-toz-39.html, Erişim tarihi: 04.05.2016.

Anonim. 2016c. Web Sitesi: http://www.kimyaborsasi.com.tr/d/demir-sulfat-41.html, Erişim tarihi: 04.05.2016.

Aspir, M. 2015. Petrokimya Atıksuyu Arıtımında Bulanık Mantık Tabanlı Dinamik Matris Kontrol. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Kimya Mühendisliği, 81, Ankara.

Atasoy, E., Murat, S., Baban, A. and Tiris, M., 2007. Membrane Bioreactor (MBR) Treatment of Segregated Household Wastewater for Reuse. Clean, 35, 465-472.

Aygün, A. and Yılmaz, T. 2010. Improvement of coagulation-flocculation process for treatment of detergent wastewaters using coagulan aids. International Journal of Chemicaal and Environmental Engineering, 1, 2.

Bukhari A.A. 2008. Investigation of electro-coagulation treatment process for the remova of total suspended solids and turbidity from municipal wastewater. Bioresource Technology, 99, 914-921.

Can, O. T., Kobya, M., Demirbaş, E. and Bayramoğlu, M. 2006. Treatment of the textile wasteater by combined electrokoagulatioon. Chemosphere, 62, 182-187.

Can B. Z. 2010. Sulu çözeltilerden arsenik ve bor'un birlikte ve seçimli olarak elektrokoagülasyon yöntemi ile giderimi. Doktora tezi. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi, 211, Erzurum.

Canizares, P., Jimenez, C., Martinez, F., Rodrigo, M. and Saez, C. 2009. The pH as a key parameter in the choice between coagulation and electrocoagulation for the treatment of wastewater. 158-164.

Chang, W-D. and Shih, A-P. 2010. PID controller design of nonlinear systems using an improved particle swarm optimization approach. Commun Nonlinear Sci Numer Simulet, 15, 3632-3639.

Chavalparit, O. and Ongwandee, M. 2009. Optimizing electrocoagulation process for the treatment of biodiesel wastewater using response surface methodology. Journal of Environmental Sciences. 1491‑1496.

Chen, G. 2004. Electrochemical Technologies in Wastewater Treatment. Seperation and Purification Technology, 38, 11-41.

Cohen, G, H. and Coon, G.A. 1967. Automatic control of processes. International Texbook Company, Pennsylvania, 345-356.

Daneshvar, N., Sorkhabi, H.A. and Kasiri, M.B. 2004. Decolorozation of dye solution containing Acid Red 14 by electrocoagulation with a comparative investigation of different electrode connections. Journal of Hazarodus Materials, B112, 55-62.

Davutluoğlu, C. 2008. Termik Santral Bacagazı Arıtma Tesisi Katnaklı Koagülasyon Çamurunda florür Giderimi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, 57, Adana.

Eriksson, E., Auffarth, K., Henze, M. and Ledin, A. 2002. Characteristics of Grey Wastewater. Urban Water, 4, 85–104.

Erdoğan, A.O., Zengin, G.E. and Orhon, D. 2005. Türkiye'de evsel atıksu oluşum miktarları ve karakterizasyonu. İTÜ dergisi.

Esmin, A. A. and Lambert-Torres, G. 2012. Application of particle swarm optimization to optimal power systems. International Journal of Innovative Computing. Information and Control, 8, 3.

Farhadi, S., Aminzadeh, B., Torabian, A., Khatibikamal, V. and Fard, M. A. 2012. Comparison of KOİ removal from pharmaceutical wastewater by electrocoagulation, photoelectrocoagulation, peroxi-electrocoagulation and peroxi-photoelectrocoagulation processes. 35-42.

Feng, C., Li, M. and Guo, X. 2011. Environmental Remediation Technologies, Regulations and Safety: Electrochemical Technology Applied in Treatment of Wastewater and Ground Water. Newyork.

Fisher, R. A. 1960, The Design of Experiments. London: Olive and Boyd.

Gaing, Z.-L. 2004. A Particle Swarm Optimization Approach for Optimum Design of PID Controller in AVR System.

Gürü M. ve Yalçın H. 2010. Su Teknolojisi. Palme Yayınları, No: 204, 640s, ANKARA.

Güvenç, U. ve Katırcıoğlu, F. 2015. GSA Algoritmasının Değişkenlerinin İncelenmesi ve En uygun Değerlerinin Tespiti. İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi, 4, 24-35.

Hocaoglu, S. M., Atasoy E., Baban A. and Orhon D. 2013. Modeling biodegradation characteristics of grey water in membrane bioreactor. 139–146, Gebze.

İlhan, F., Kurt, U., Apaydın, Ö., Arslankaya, E, ve Gönüllü, M. T. 2007. Elektrokimyasal arıtım ve uygulamaları: katı atık sızıntı suyu çalışması. Türkay 2007 AB sürecinde Türkiye'de katı atık yönetimi ve çevre sorunları sempozyumu.

Ilhan, F., Kurt, U., Apaydin, O. M. and Gonullu, T. 2008. Treatment of leachate by electrocoagulation using alüminium and iron electrodes. Journal of Hazardous Materials, 154, 381–389.

Isa, M.H., Ezachi, E.H., Ahmed, Z., Magram, S. F. and Kutty, S. R.M. 2014. Boron removal by electrocoagulation and recovery. Water Research, 51, 113-123.

Ismail, I. M., Fawzy, A.S., Abdel-Monem, N. M., Mahmoud, M.H. and El-Halwany, M. A. 2012. Combined coagulation flocculation pre treatment unit for municipal wastewater. Journal of Advanced Research, 331–336.

Jadhav, A.M. and Vadirajacharya, K. 2012. Performance Verification PID Controller in an Interconnected Power System Using Particle Swarm Optimization. Energy Prodia 14, 2075-2080.

Jefferson, B., Laine A., Parsons S., Stephanson T. and Judd S., 1999. Technologies for Domestic Wastewater Recycling. Urban Water, 1, 285-292.

Karahan, O. 2012. Seri ve Paralel Robotlarda Parçacık Sürü Optimizasyonu ile Yörünge Kontrolörü Tasarımı. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. 281. Kocaeli.

Karcıoğlu, K. Z., Yılmaz, M. T. ve Yılmaz, A. E. 2012. Endüstriyel atıksulardan alüminyum sülfat çöktürücüı kullanılarak kimyasal Kimyasal Çöktürme yöntemi ile bor giderimi. 15-22.

Kartal, Z., Ölmez, Hancı, T. ve Aslan, A. İ. 2008. Bir zeytinyağı karasuyunun Kimyasal Çöktürme ve elektrokoagülasyon prosesleriyle kimyasal arıtılabilirliğinin incelenmesi. İTÜ Dergisi, 18, 3-12.

Kao, C.-C., Chaung C-W. and Fung, R-F, 2006, The self-tuning PID control in a slider-crank mechanism system by appling particle swarm optimization approach. Mechatronics, 16, 513-522.

Kennedy, J. and Eberhart, R. 1995. Particle swarm optimization, in Proc. of the IEEE Int. Conf. on Neural Networks, NJ, pp. 1942–1948, Piscataway.

Kocaarslan, İ. and Tiraki, H. 2010. PSO-PID ve FGPI Kontrolörlerin bir Termik Santralda Karşılaştırılması. Int.J.Eng.Research & Development, 2, 39-44.

Khandegar, V. and Saroha A. K. 2013. Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent - A review. Journal of Environmental Management, 949-963.

Labanowski, J., Pallier, V. and Feuillade-Cathalifaud, G. 2010. Study of organic matter during coagulation and elektrokoagulation processes: Application to a stabilized landfill leachate. Journal of Hazardous Materials, 179, 166-172.

Lai, C.L. and Lin S.H. 2003. Electrocoagulation of chemical mechanical polishing (CMP) wastewater from semiconductor fabrication. Chemical Engineering Journal 95, 205-211.

Li, X., Song, J., Guo, J., Wang, Z. and Feng, Q. 2011. Landfill leachate treatment using electrocoagulation. Procedia Environmental Sciences, 1159 – 1164.

Liu, F-B. 2012. Particle Swarm Optimization-based algoritms for solving inverse heat conduction problems of estimating surface heat flux. International Journal of Heat and Mass Transfer, 55, 2062-2068.

Luyben, W.L. 1990. Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineering. Mc Graw-Hill Publishing Company, 2nd edition. New York.

Ma, X.-J. and Xia, H.-L. 2009. Treatment of water-based printing ink wastewater by Fenton process combined with coagulation. Journal of Hazardous Materials, 162, 386–390.

March, J.G., Gual, M. and Orozco, F., 2004. Experiences on Greywater Re-Use for Toilet Flushing in a Hotel (Mallorca Island, Spain), Desalination, 164, 241-247.

Müllegger, E., Langergraber, G. Jung, H., Starkl, M. and Laber, J. 2003. Potentials for Greywater Treatment and Reuse in Rural Areas, IWA 2nd International Symposium on Ecological Sanitation, Germany.

Mollah, M.Y.A., Schennach, R. and Parga, J.R. 2001. Electrocoagulation (EC) – science and application. Journal of Hazardous Materials, B84, 29-41.

Nasri, M., Nezamabadi-pour, H. and Maaghfori, M., 2007. A PSO-Bsed Optimum Design of PID Controller for Linear Brushless DC Motor. World Academy of Science, Engineering and Technology 2.

Ngamlerdpokin, K., Kumjadpai, S., Preeya, Chatanon, P., Tungmanee, U., Chuenchuanchom, S., Jaruwat, P., Lertsathitphongs, P. and Hunsom, M. 2011. Remediation of biodisel wastewater by chemical-and electrocoagulation: A comparative study. Journal of Environmental Management, 92, 2454-2460.

Nolde, E. 1999. Greywater Reuse Systems for Toilet Flushing in Multi-Storey Buildings -Over Ten Years Experience in Berlin, Urban Water, 1, 275-284.

Ortakçı Y. 2011. Parçacık sürü optimizasyonu yöntemlerinin uygulamalarla karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. 78. Karabük.

Özsağlam M. Y. 2009. Parçacık sürü optimizasyonu algoritmasının gezgin satıcı problemine uygulanması ve performansının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü. 131. Konya.

Özyonar, F. ve Karagözoğlu, B. 2012. İçme sularından elektrokoagülasyon ve kimyasal Kimyasal Çöktürme ile bulanıklığın giderimi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, 1, 81-89.

Ramon, G., Green, M., Semiat, R. and Dosoretz, C., 2004. Low Strength Graywater Characterization and Treatment by Direct Membrane Filtration, Desalination, 170, 241–250.

Rajkumar, D., Song, B. J. and Kim, J. G., 2006. Electrochemical Degradation of Reactive blue 19 in Chloride Medium for the Treatment of Textile Dyeing Watewater with Identification of Intermediate Compounds, Dyes and Pigments, 71, 244-250.

Rashedi, E., Nezamabadi-pour, H. and Sarazdi, S. 2009. A gravitational search algorithm. Information Science, 179, 2232-2248.

Sarıoğlu S. 2011. Low Load Greywater and Municipal Wastewater Treatment by Membrane Bioreactor. Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Fenbilimleri Enstitüsü. 77. İstanbul.

Samsunlu, A. 2006. Atıksuların Arıtılması. Birsen Yayınevi, 644s, İstanbul.

Sandec (Water and Sanitation in Developing Countries) at Eawag (Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology) 2006. Greywater Management in Low and Middle-Income Countries, Sandec Report, 14/06.

Seborg, D. E., Edgar, T. F. and Mellichamp D.1979. Process Dynamics and Control. John Qiley &Sons. Inc.United States of America.

Solak, M. 2013. Kesikli ve Sürekli Elektrokoagülasyon Prosesleri ile Atıksulardan Fosfat Giderimi ve Prosesin Optimizasyonu. DoktoraTezi, Süleyman Demirel Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. 168. Isparta.

Sinan R.K. 2011. Evsel atıksu arıtma tesislerinde ön arıtım ve biyolojik arıtım çıkış parametrelerinin YSA ile tahmini. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. 156. Konya.

Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, 2011. 24.04.2011 tarih ve 27914 sayılı Resmi Gazete, T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, Ankara.

Tarasenko, S., 2009. Wastewater Treatment in Antarctica, M.S. Thesis, University of Canterbury.

Tran, N., Patrick, D., Blais, J. F. and Mercier, G. 2012. Phosphorus removal from spiked municipal wastewater using either electrochemical coagulation or chemical coagulation as tertiary treatment. Seperation and Purification Techonology, 95, 16-25.

Trinh, E.K., Kang and L.S. 2011. Response Surface Methodological approach to optimize the coagulation flocculation process in drinking water treatment. Chemical Engineering Research and Design, Korea, 89, 1126-1135.

Un, U. T., Kandemir, A., Erginel, N. and Ocal, S. E. 2014. Continuous elektrokoagulation of cheese whey wastewater: an application of Response Surface Methodology. Journal of Environmental Management, 146, 245-250.

Vardar B. 2006. Tekstil endüstrisinin reaktif boya banyolarının elektrokimyasal yöntemler ile arıtımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Universitesi, Fen Bilimler Enstitüsü. 224. İstanbul.

Verma, S.K., Khandegar, V. and Saroha, A.K. 2013. Removal of chromium from electroplating industry effluent using electrocoagulation. J. Hazard. Toxic. Radio. Waste 17 (2), 146-152.

Yıldız, Y.Ş. 2003. Humik maddeler içeren atık suların elektrokoagülasyon metodu ile arıtımı. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Erzurum.

Zamani, M., Karimi-Ghartemani, M., Sadati, N. and Parniani, M. 2009. Design of a fractional order PID controller for an AVR using particle swarm optimization. Control Engineering Practice, 17, 1380-1387.

Zeybek, Z. 1997. Fuzzy ve Neural Network Yöntemleri ile kimyasal Proseslerin Modellenmesi ve Kontrolü. Doktora Tezi, Ankara üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Ankara.

Zhang, F., Wang, Y., Chu, Y., Gao, B., Yue, Q., Yang, Z. and Li, Q. 2013. Reduction of organic matter and trihalomethane formation potential in reclaimed water from treated municipal wastewater by coagulation and adsorption. Chemical Engineering Journal, 223, 696-703.

Zheng, X. Plume, S. Ernst, M. Croué, J.-P. and Jekel, M. 2012. In-line coagulation prior to UF of treated domestic wastewater – foulants removal, fouling control and phosphorus removal. 129-139.

EKLER

EK 1 **Parçacık Sürüsü Optimizasyonuna Örnek Problem**

EK 2 **Evsel Atıksuyun $AlSO_4$ ile KOİ Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi**

EK 3 **Evsel Atıksuyun $AlSO_4$ ile Bulanıklık Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi**

EK 4 **Evsel Atıksuyun $FeCl_3$ ile KOİ Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi**

EK 5 **Evsel Atıksuyun $FeCl_3$ ile Bulanıklık Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi**

EK 6 **Evsel Atıksuyun $FeSO_4$ ile KOİ Giderimin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi**

EK 7 **Evsel Atıksuyun $FeSO_4$ ile Bulanıklık Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi**

EK 8 **Evsel Atıksuyun Al Elektrot Kullanılan Elektrokoagülasyon ile KOİ Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi**

EK 9 **Evsel Atıksuyun Fe Elektrot Kullanılan Elektrokoagülasyon ile KOİ Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi**

EK 10 **Evsel Atıksuyun Al Elektrot Kullanılan Elektrokoagülasyon ile Bulanıklık Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi**

EK 11 **Evsel Atıksuyun Fe Elektrot Kullanılan Elektrokoagülasyon ile Bulanıklık Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi**

EK 12 **Kimyasal çöktürmede Teorik Hesaplanan Sonuçlarla Girilen Verilerin Karşılaştırılması**

EK 13 **Elektrokoagülasyonda Teorik Hesaplanan Sonuçlarla Girilen Verilerin Karşılaştırılması**

EK 14 **Kimyasal Çöktürme Prosesinin Optimizasyonunda Kullanılan PSO Algoritması**

EK 15 **Proseslerin İşletme Maliyetleri**

EK 16 **Elektrokoagülasyon Prosesinin İşletme Maliyeti**

EK 17 **Ürün Birim Fiyatları**

EK 1 Parçacık Sürüsü Optimizasyonuna Örnek Problem

Altı kamburlu deve sırtı fonksiyonu olarak bilinen test fonksiyonunu ele alalım.

$$f(x)=4x_1^2-2.1\ x_1^4+(1/3)\ x_1^6+ x_1\ x_2-4x_2^2+4x_2^4 \quad (1)$$

$(-5\leq x_1,x_2\leq 5\ )$ için

PSO ile fonksiyonun minimum olduğu noktalarını bulalım. Bu fonksiyon x_1 ve x_2 olmak üzere iki bilinmeyenden oluşmaktadır. Yani parametre sayısı ikidir ve parçacık sayısını 10 tane alalım. Öğrenme faktörünü $c_1=c_2=1.494$ alalım.

Parçacıklar belli bir aralıkta rastgele oluşturulur ve uygunluk değerleri fonksiyona göre hesaplanır. Elde edilen en iyi değere karşılık gelen parçacık g_{best} olarak kabul edilir. Seçilen 10 parçacık değeri çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1 Birinci iterasyonda oluşturulan rastgele konum değerleri.

Parçacık	$x_{1,1}^0$	$x_{1,2}^0$	**Uygunluk Değeri**	**pbest**
P1	-3.817183	2.921165	889.595390	P1
P2	1.410128	-1.702956	21.911046	P2
P3	3.325694	-3.431836	734.660616	P3
P4	1.301208	2.746551	203.390226	P4
P5	-2.132543	1.501234	14.211384	P5
P6	-2.501235	0.742316	21.606629	P6
P7	-1.496875	2.354267	99.355398	P7
P8	-4.891342	-4.401237	4903.659686	P8
P9	-3.498976	-2.701265	539.128575	P9
P10	-3.401321	4.701624	2131.504354	P10
			Gbest	P5

EK 1 Parçacık Sürüsü Optimizasyonuna Örnek Problem (Devam)

g_{best} = P5 = [-2.132543, 1.501234]

p_{best}= [-3.817183, 2.921165]

Her parçacık için parçacık hızları, değerleri aşağıdaki denkleme uygulayarak bulabiliriz.

$$v_{i,j}^{(t+1)} = v_{i,j}^{(t)} + c_1 r_1 (pbest_{i,j} - x_{i,j}^{(t)}) + c_2 r_2 (gbest - x_{i,j}^{(t)}) \quad (2)$$

t=0 için,

$v_{1,1}^{1}$ = 0+ 2x 0.4(-3.817183- (-3.817183))+ 2x0.6 (-2.132543- (-3.817183))

$v_{1,1}^{1}$ = 2.021568

$v_{1,2}^{1}$ = 0 + 2x 0.4(2.921165- 2.921165)+ 2x0.6 (1.501234-2.921165)

$v_{1,2}^{1}$ = -1.7039

v_1^1 = [2.021568, - 1.7039] olarak bulunur. Diğer hız değerleri çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2 Birinci iterasyon için hesaplanan hız değerleri.

Parçacık	$v_{1,1}^{1}$	$v_{1,2}^{1}$	r_1	r_2
P1	2.021569	-1.703916	0.4	0.6
P2	-8.804661	7.901178	0.3	0.8
P3	-11.253401	10.150127	0.1	0.9
P4	-12.659748	-1.748048	0.7	0.8
P5	-1.684640	1.419931	0.5	0.1
P6	-0.757806	2.350214	0.4	0.4
P7	-7.990562	-4.097782	0.9	3
P8	0.644495	4.393441	0.3	0
P9	-0.089841	12.925861	1	0.2
P10	0.769744	-5.336941	0.6	0.5

EK 1 Parçacık Sürüsü Optimizasyonuna Örnek Problem (Devam)

Daha sonra parçacıkları konumu aşağıdaki gibi hesaplayabiliriz.

$x_{1,1}^{1} = x_{1,1}^{0} + v_{1,1}^{1}$

$x_{1,1}^{1} = (-3.817183) + 2.021569$

$x_{1,1}^{1} = -1.795615$

$x_{1,2}^{1} = x_{1,2}^{0} + v_{1,2}^{1}$

$x_{1,2}^{1} = 2.921165 + (-1.703916)$

$x_{1,2}^{1} = 1.217248$

$x_{1}^{1} = [-1.795615, 1.217248]$ olarak bulunur.

Parçacıkların 1. iterasyondaki konumları çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 3 Birinci iterasyon için hesaplanan konum değerleri

Parçacık	$x_{1,1}^{0}$	$v_{1,1}^{1}$	$x_{1,2}^{0}$	$v_{1,2}^{1}$	$x_{1,1}^{1}$	$x_{1,2}^{1}$
P1	-3.817	2.022	2.921	-1.704	-1.796	1.217
P2	1.410	-8.805	-1.703	7.901	-7.395	6.198
P3	3.326	-11.253	-3.432	10.150	-7.928	6.718
P4	1.301	-12.660	2.747	-1.748	-11.359	0.998
P5	-2.133	-1.685	1.501	1.420	-3.817	2.921
P6	-2.501	-0.758	0.742	2.350	-3.259	3.092
P7	-1.497	-7.991	2.354	-4.098	-9.487	-1.743
P8	-4.891	0.644	-4.401	4.393	-4.247	-0.008
P9	-3.499	-0.090	-2.701	12.926	-3.589	10.224
P10	-3.401	0.770	4.702	-5.337	-2.631	-0.635

EK 2 Evsel Atıksuyun $AlSO_4$ ile KOİ Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diagr

Response 1 COD

ANOVA for Response Surface Quadratic model

Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	3722,05	5	744,41	75,83	< 0.0001	significant
A-X1	*496,78*	*1*	*496,78*	*50,60*	*0,0002*	
B-X2	*1947,68*	*1*	*1947,68*	*198,40*	*< 0.0001*	
AB	*306,25*	*1*	*306,25*	*31,20*	*0,0008*	
A^2	*78,81*	*1*	*78,81*	*8,03*	*0,0253*	
B^2	*945,73*	*1*	*945,73*	*96,34*	*< 0.0001*	
Residual	68,72	7	9,82			
Lack of Fit	*59,52*	*3*	*19,84*	*8,63*	*0,0321*	*significant*
Pure Error	*9,20*	*4*	*2,30*			
Cor Total	3790,77	12				

The Model F-value of 75,83 implies the model is significant. There is only a 0,01% chance that an F-value this large could occur due to noise.

Values of "Prob > F" less than 0,0500 indicate model terms are significant.
In this case A, B, AB, A^2, B^2 are significant model terms.
Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant.
If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy), model reduction may improve your model.

The "Lack of Fit F-value" of 8,63 implies the Lack of Fit is significant. There is only a 3,21% chance that a "Lack of Fit F-value" this large could occur due to noise.
Significant lack of fit is bad -- we want the model to fit.

EK 2 Evsel Atıksuyun $AlSO_4$ ile KOİ Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi (Devam)

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diag

Std. Dev.	3,13	R-Squared	0,9819
Mean	77,31	Adj R-Squared	0,9689
C.V. %	4,05	Pred R-Square	0,8843
PRESS	438,49	Adeq Precisior	24,396
-2 Log Likeliho	58,54	BIC	73,93
		AICc	84,54

The "Pred R-Squared" of 0,8843 is in reasonable agreement with the "Adj R-Squared" of 0,9689; i.e. the difference is less than 0.2.

"Adeq Precision" measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 24,396 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.

Factor	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	86,59	1	1,40	83,28	89,90	
A-X1	-7,88	1	1,11	-10,50	-5,26	1,00
B-X2	-15,68	1	1,11	-18,31	-13,05	1,00
AB	-8,75	1	1,57	-12,45	-5,05	1,00
A^2	-3,36	1	1,19	-6,17	-0,56	1,02
B^2	-11,84	1	1,21	-14,69	-8,98	1,02

EK 2 Evsel Atıksuyun $AlSO_4$ ile KOİ Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi (Devam)

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diag

Final Equation in Terms of Coded Factors:

COD =
+86,59
-7,88 * A
-15,68 * B
-8,75 * AB
-3,36 * A^2
-11,84 * B^2

The equation in terms of coded factors can be used to make predictions about the response for given levels of each factor. By default, the high levels of the factors are coded as +1 and the low levels of the factors are coded as -1. The coded equation is useful for identifying the relative impact of the factors by comparing the factor coefficients.

Final Equation in Terms of Actual Factors:

COD =
-158,97806
+0,089899 * X1
+54,17367 * X2
-8,75000E-003 * X1 * X2
-1,34549E-005 * $X1^2$
-2,95914 * $X2^2$

The equation in terms of actual factors can be used to make predictions about the response for given levels of each factor. Here, the levels should be specified in the original units for each factor. This equation should not be used to determine the relative impact of each factor because the coefficients are scaled to accommodate the units of each factor and the intercept

EK 3 Evsel Atıksuyun $AlSO_4$ ile Bulanıklık Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diagnostics

ANOVA for Response Surface Quadratic model

Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	180,52	5	36,10	37,68	< 0.0001	significant
A-X1	*0,086*	*1*	*0,086*	*0,090*	*0,7735*	
B-X2	*152,91*	*1*	*152,91*	*159,56*	*< 0.0001*	
AB	*1,00*	*1*	*1,00*	*1,04*	*0,3410*	
A^2	*25,83*	*1*	*25,83*	*26,96*	*0,0013*	
B^2	*0,036*	*1*	*0,036*	*0,038*	*0,8515*	
Residual	6,71	7	0,96			
Lack of Fit	*3,51*	*3*	*1,17*	*1,46*	*0,3512*	*not significant*
Pure Error	*3,20*	*4*	*0,80*			
Cor Total	187,23	12				

The Model F-value of 37,68 implies the model is significant. There is only a 0,01% chance that an F-value this large could occur due to noise.

Values of "Prob > F" less than 0,0500 indicate model terms are significant. In this case B, A^2 are significant model terms. Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant. If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy), model reduction may improve your model.

The "Lack of Fit F-value" of 1,46 implies the Lack of Fit is not significant relative to the pure error. There is a 35,12% chance that a "Lack of Fit F-value" this large could occur due to noise. Non-significant lack of fit is good -- we want the model to fit.

EK 3 Evsel Atıksuyun $AlSO_4$ ile Bulanıklık Giderimin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi (Devam)

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Dia

Std. Dev.	0,98	R-Squared	0,9642
Mean	92,54	Adj R-Squared	0,9386
C.V. %	1,06	Pred R-Square	0,8390
PRESS	30,15	Adeq Precisior	19,454
-2 Log Likeliho	28,29	BIC	43,68
		AICc	54,29

The "Pred R-Squared" of 0,8390 is in reasonable agreement with the "Adj R-Squared" of 0,9386; i.e. the difference is less than 0.2.

"Adeq Precision" measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 19,454 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.

Factor	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	91,40	1	0,44	90,36	92,43	
A-X1	-0,10	1	0,35	-0,92	0,71	1,00
B-X2	-4,39	1	0,35	-5,22	-3,57	1,00
AB	-0,50	1	0,49	-1,66	0,66	1,00
A^2	1,93	1	0,37	1,05	2,80	1,02
B^2	-0,073	1	0,38	-0,96	0,82	1,02

EK 3 Evsel Atıksuyun $AlSO_4$ ile Bulanıklık Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi (Devam)

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diagnostics

Final Equation in Terms of Coded Factors:

Turbidity =
+91,40
-0,10 * A
-4,39 * B
-0,50 * AB
+1,93 * A^2
-0,073 * B^2

The equation in terms of coded factors can be used to make predictions about the response for given levels of each factor. By default, the high levels of the factors are coded as +1 and the low levels of the factors are coded as -1. The coded equation is useful for identifying the relative impact of the factors by comparing the factor coefficients.

Final Equation in Terms of Actual Factors:

Turbidity =
+113,09909
-0,011113 * X1
-1,36770 * X2
-5,00000E-004 * X1 * X2
+7,70299E-006 * $X1^2$
-0,018293 * $X2^2$

The equation in terms of actual factors can be used to make predictions about the response for given levels of each factor. Here, the levels should be specified in the original units for each factor. This equation should not be used to determine the relative impact of each factor because the coefficients are scaled to accommodate the units of each factor and the intercept

EK 4 Evsel Atıksuyun $FeCl_3$ ile KOİ Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diagnostics

Response 1 COD

ANOVA for Response Surface Quadratic model

Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	3425,79	5	685,16	10,66	0,0036	significant
A-X1	*74,76*	*1*	*74,76*	*1,16*	*0,3166*	
B-X2	*878,04*	*1*	*878,04*	*13,66*	*0,0077*	
AB	*462,25*	*1*	*462,25*	*7,19*	*0,0315*	
A^2	*756,04*	*1*	*756,04*	*11,76*	*0,0110*	
B^2	*1498,13*	*1*	*1498,13*	*23,31*	*0,0019*	
Residual	449,90	7	64,27			
Lack of Fit	*446,70*	*3*	*148,90*	*186,12*	*< 0.0001*	*significant*
Pure Error	*3,20*	*4*	*0,80*			
Cor Total	3875,69	12				

The Model F-value of 10,66 implies the model is significant. There is only a 0,36% chance that an F-value this large could occur due to noise.

Values of "Prob > F" less than 0,0500 indicate model terms are significant.
In this case B, AB, A^2, B^2 are significant model terms.
Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant.
If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy), model reduction may improve your model.

The "Lack of Fit F-value" of 186,12 implies the Lack of Fit is significant. There is only a 0,01% chance that a "Lack of Fit F-value" this large could occur due to noise.
Significant lack of fit is bad -- we want the model to fit.

EK 4 Evsel Atıksuyun $FeCl_3$ ile KOİ Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi (Devam)

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diagno

Std. Dev.	8,02	R-Squared	0,8839
Mean	59,65	Adj R-Squared	0,8010
C.V. %	13,44	Pred R-Square	0,1791
PRESS	3181,53	Adeq Precisior	9,067
-2 Log Likeliho	82,97	BIC	98,36
		AICc	108,97

The "Pred R-Squared" of 0,1791 is not as close to the "Adj R-Squared" of 0,8010 as one might normally expect; i.e. the difference is more than 0.2. This may indicate a large block effect or a possible problem with your model and/or data. Things to consider are model reduction, response transformation, outliers, etc. All empirical models should be tested by doing confirmation runs.

"Adeq Precision" measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 9,067 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.

Factor	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	75,10	1	3,59	66,62	83,58	
A-X1	-3,06	1	2,83	-9,76	3,65	1,00
B-X2	-10,48	1	2,83	-17,18	-3,77	1,00
AB	-10,75	1	4,01	-20,23	-1,27	1,00
A^2	-10,42	1	3,04	-17,61	-3,24	1,02
B^2	-14,67	1	3,04	-21,86	-7,49	1,02

EK 4 Evsel Atıksuyun $FeCl_3$ ile KOİ Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi (Devam)

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diagnostic

Final Equation in Terms of Coded Factors:

COD =
+75,10
-3,06 * A
-10,48 * B
-10,75 * AB
-10,42 * A^2
-14,67 * B^2

The equation in terms of coded factors can be used to make predictions about the response for given levels of each factor. By default, the high levels of the factors are coded as +1 and the low levels of the factors are coded as -1. The coded equation is useful for identifying the relative impact of the factors by comparing the factor coefficients.

Final Equation in Terms of Actual Factors:

COD =
-307,26100
+0,17404 * X1
+71,54930 * X2
-0,010750 * X1 * X2
-4,17000E-005 * $X1^2$
-3,66875 * $X2^2$

EK 5 Evsel Atıksuyun $FeCl_3$ ile Bulanıklık Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diag

ANOVA for Response Surface Quadratic model

Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	313,23	5	62,65	18,17	0,0007	significant
A-X1	*84,96*	*1*	*84,96*	*24,64*	*0,0016*	
B-X2	*35,70*	*1*	*35,70*	*10,35*	*0,0147*	
AB	*42,25*	*1*	*42,25*	*12,25*	*0,0100*	
A^2	*8,71*	*1*	*8,71*	*2,53*	*0,1560*	
B^2	*148,43*	*1*	*148,43*	*43,04*	*0,0003*	
Residual	24,14	7	3,45			
Lack of Fit	*21,96*	*3*	*7,32*	*13,45*	*0,0148*	*significant*
Pure Error	*2,18*	*4*	*0,54*			
Cor Total	337,37	12				

The Model F-value of 18,17 implies the model is significant. There is only a 0,07% chance that an F-value this large could occur due to noise.

Values of "Prob > F" less than 0,0500 indicate model terms are significant.
In this case A, B, AB, B^2 are significant model terms.
Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant.
If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy), model reduction may improve your model.

The "Lack of Fit F-value" of 13,45 implies the Lack of Fit is significant. There is only a 1,48% chance that a "Lack of Fit F-value" this large could occur due to noise.
Significant lack of fit is bad -- we want the model to fit.

EK 5 Evsel Atıksuyun $FeCl_3$ ile Bulanıklık Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi (Devam)

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diagr

Std. Dev.	1,86	R-Squared	0,9284
Mean	77,58	Adj R-Squared	0,8773
C.V. %	2,39	Pred R-Square	0,5270
PRESS	159,59	Adeq Precisior	13,261
-2 Log Likeliho	44,94	BIC	60,33
		AICc	70,94

The "Pred R-Squared" of 0,5270 is not as close to the "Adj R-Squared" of 0,8773 as one might normally expect; i.e. the difference is more than 0.2. This may indicate a large block effect or a possible problem with your model and/or data. Things to consider are model reduction, response transformation, outliers, etc. All empirical models should be tested by doing confirmation runs.

"Adeq Precision" measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 13,261 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.

Factor	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	81,11	1	0,83	79,15	83,08	
A-X1	-3,26	1	0,66	-4,81	-1,71	1,00
B-X2	2,11	1	0,66	0,56	3,66	1,00
AB	3,25	1	0,93	1,05	5,45	1,00
A^2	-1,12	1	0,70	-2,78	0,55	1,02
B^2	-4,62	1	0,70	-6,28	-2,95	1,02

EK 5 Evsel Atıksuyun $FeCl_3$ ile Bulanıklık Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi (Devam)

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diagnosti

Final Equation in Terms of Coded Factors:

Turbidity =
+81,11
-3,26 * A
+2,11 * B
+3,25 * AB
-1,12 * A^2
-4,62 * B^2

The equation in terms of coded factors can be used to make predictions about the response for given levels of each factor. By default, the high levels of the factors are coded as +1 and the low levels of the factors are coded as -1. The coded equation is useful for identifying the relative impact of the factors by comparing the factor coefficients.

Final Equation in Terms of Actual Factors:

Turbidity =
+9,35960
-0,026814 * X1
+18,59262 * X2
+3,25000E-003 * X1 * X2
-4,47680E-006 * $X1^2$
-1,15480 * $X2^2$

The equation in terms of actual factors can be used to make predictions about the response for given levels of each factor. Here, the levels should be specified in the original units for each factor. This equation should not be used to determine the relative impact of each factor

EK 6 Evsel Atıksuyun $FeSO_4$ ile KOİ Giderimin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diagnostics

ANOVA for Response Surface Quadratic model

Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	479,17	5	95,83	8,48	0,0070	significant
A-X1	*19,49*	*1*	*19,49*	*1,72*	*0,2306*	
B-X2	*296,80*	*1*	*296,80*	*26,25*	*0,0014*	
AB	*1,00*	*1*	*1,00*	*0,088*	*0,7748*	
A^2	*9,783E-003*	*1*	*9,783E-003*	*8,653E-004*	*0,9774*	
B^2	*159,44*	*1*	*159,44*	*14,10*	*0,0071*	
Residual	79,14	7	11,31			
Lack of Fit	*76,34*	*3*	*25,45*	*36,35*	*0,0023*	*significant*
Pure Error	*2,80*	*4*	*0,70*			
Cor Total	558,31	12				

The Model F-value of 8,48 implies the model is significant. There is only a 0,70% chance that an F-value this large could occur due to noise.

Values of "Prob > F" less than 0,0500 indicate model terms are significant.
In this case B, B^2 are significant model terms.
Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant.
If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy), model reduction may improve your model.

The "Lack of Fit F-value" of 36,35 implies the Lack of Fit is significant. There is only a 0,23% chance that a "Lack of Fit F-value" this large could occur due to noise.
Significant lack of fit is bad -- we want the model to fit.

EK 6 Evsel Atıksuyun $FeSO_4$ ile KOİ Giderimin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi (Devam)

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diagnostics

Std. Dev.	3,36	R-Squared	0,8583
Mean	28,77	Adj R-Squared	0,7570
C.V. %	11,69	Pred R-Square	0,0198
PRESS	547,23	Adeq Precisior	8,981
-2 Log Likeliho	60,37	BIC	75,76
		AICc	86,37

The "Pred R-Squared" of 0,0198 is not as close to the "Adj R-Squared" of 0,7570 as one might normally expect; i.e. the difference is more than 0.2. This may indicate a large block effect or a possible problem with your model and/or data. Things to consider are model reduction, response transformation, outliers, etc. All empirical models should be tested by doing confirmation runs.

"Adeq Precision" measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 8,981 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.

Factor	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	25,80	1	1,50	22,24	29,36	
A-X1	1,56	1	1,19	-1,25	4,37	1,00
B-X2	-6,09	1	1,19	-8,90	-3,28	1,00
AB	-0,50	1	1,68	-4,48	3,48	1,00
A^2	0,038	1	1,27	-2,98	3,05	1,02
B^2	4,79	1	1,27	1,77	7,80	1,02

EK 6 Evsel Atıksuyun $FeSO_4$ ile KOİ Giderimin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi (Devam)

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diagnostics

Final Equation in Terms of Coded Factors:

COD =
+25,80
+1,56 * A
-6,09 * B
-0,50 * AB
+0,038 * A^2
+4,79 * B^2

The equation in terms of coded factors can be used to make predictions about the response for given levels of each factor. By default, the high levels of the factors are coded as +1 and the low levels of the factors are coded as -1. The coded equation is useful for identifying the relative impact of the factors by comparing the factor coefficients.

Final Equation in Terms of Actual Factors:

COD =
+142,68501
+7,32132E-003 * X1
-24,08925 * X2
-5,00000E-004 * X1 * X2
+1,50000E-007 * $X1^2$
+1,19688 * $X2^2$

EK 7 Evsel Atıksuyun $FeSO_4$ ile Bulanıklık Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diagnostics

Response 2 Turbidity

ANOVA for Response Surface Quadratic model

Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	760,00	5	152,00	40,92	< 0.0001	significant
A-X1	*71,82*	*1*	*71,82*	*19,34*	*0,0032*	
B-X2	*70,38*	*1*	*70,38*	*18,95*	*0,0033*	
AB	*2,25*	*1*	*2,25*	*0,61*	*0,4619*	
A^2	*188,10*	*1*	*188,10*	*50,64*	*0,0002*	
B^2	*496,71*	*1*	*496,71*	*133,73*	*< 0.0001*	
Residual	26,00	7	3,71			
Lack of Fit	*20,80*	*3*	*6,93*	*5,33*	*0,0698*	*not significant*
Pure Error	*5,20*	*4*	*1,30*			
Cor Total	786,00	12				

The Model F-value of 40,92 implies the model is significant. There is only a 0,01% chance that an F-value this large could occur due to noise.

Values of "Prob > F" less than 0,0500 indicate model terms are significant. In this case A, B, A^2, B^2 are significant model terms. Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant. If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy), model reduction may improve your model.

The "Lack of Fit F-value" of 5,33 implies there is a 6,98% chance that a "Lack of Fit F-value" this large could occur due to noise. Lack of fit is bad -- we want the model to fit. This relatively low probability (<10%) is troubling.

EK 7 Evsel Atıksuyun $FeSO_4$ ile Bulanıklık Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi (Devam)

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diagnost

Std. Dev.	1,93	R-Squared	0,9669
Mean	75,00	Adj R-Squared	0,9433
C.V. %	2,57	Pred R-Square	0,8015
PRESS	156,03	Adeq Precisior	16,111
-2 Log Likeliho	45,90	BIC	61,29
		AICc	71,90

The "Pred R-Squared" of 0,8015 is in reasonable agreement with the "Adj R-Squared" of 0,9433; i.e. the difference is less than 0.2.

"Adeq Precision" measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 16,111 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.

Factor	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	83,40	1	0,86	81,36	85,44	
A-X1	-3,00	1	0,68	-4,61	-1,39	1,00
B-X2	2,97	1	0,68	1,35	4,58	1,00
AB	-0,75	1	0,96	-3,03	1,53	1,00
A^2	-5,20	1	0,73	-6,93	-3,47	1,02
B^2	-8,45	1	0,73	-10,18	-6,72	1,02

EK 7 Evsel Atıksuyun $FeSO_4$ ile Bulanıklık Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi (Devam)

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diagnostics

Final Equation in Terms of Coded Factors:

Turbidity =
+83,40
-3,00 * A
+2,97 * B
-0,75 * AB
-5,20 * A^2
-8,45 * B^2

The equation in terms of coded factors can be used to make predictions about the response for given levels of each factor. By default, the high levels of the factors are coded as +1 and the low levels of the factors are coded as -1. The coded equation is useful for identifying the relative impact of the factors by comparing the factor coefficients.

Final Equation in Terms of Actual Factors:

Turbidity =
-122,61682
+0,042357 * X1
+40,25800 * X2
-7,50000E-004 * X1 * X2
-2,08000E-005 * $X1^2$
-2,11250 * $X2^2$

The equation in terms of actual factors can be used to make predictions about the response for given levels of each factor. Here, the levels should be specified in the original units for each factor. This equation should not be used to determine the relative impact of each factor because the coefficients are scaled to accommodate the units of each factor and the intercept

EK 8 Evsel Atıksuyun Al Elektrot Kullanılan Elektrokoagülasyon ile KOİ Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diagnos

Response 1 turbidite

ANOVA for Response Surface Quadratic model

Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	15812,17	14	1129,44	7,00	0,0003	significant
A-Zaman	*1456,26*	*1*	*1456,26*	*9,03*	*0,0089*	
B-pH	*438,02*	*1*	*438,02*	*2,72*	*0,1201*	
C-Iletkenlik	*1295,22*	*1*	*1295,22*	*8,03*	*0,0126*	
D-Akim	*914,02*	*1*	*914,02*	*5,67*	*0,0310*	
AB	*155,44*	*1*	*155,44*	*0,96*	*0,3418*	
AC	*1734,93*	*1*	*1734,93*	*10,76*	*0,0051*	
AD	*734,55*	*1*	*734,55*	*4,55*	*0,0497*	
BC	*54,21*	*1*	*54,21*	*0,34*	*0,5707*	
BD	*20,86*	*1*	*20,86*	*0,13*	*0,7241*	
CD	*824,69*	*1*	*824,69*	*5,11*	*0,0390*	
A^2	*1,70*	*1*	*1,70*	*0,011*	*0,9196*	
B^2	*7751,72*	*1*	*7751,72*	*48,07*	*< 0.0001*	
C^2	*17,34*	*1*	*17,34*	*0,11*	*0,7475*	
D^2	*60,68*	*1*	*60,68*	*0,38*	*0,5488*	
Residual	2418,95	15	161,26			
Lack of Fit	*2381,76*	*10*	*238,18*	*32,03*	*0,0007*	*significant*
Pure Error	*37,19*	*5*	*7,44*			
Cor Total	18231,11	29				

The Model F-value of 7,00 implies the model is significant. There is only a 0,03% chance that an F-value this large could occur due to noise.

EK 8 Evsel Atıksuyun Al Elektrot Kullanılan Elektrokoagülasyon ile KOİ Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi (Devam)

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diagnostics

Std. Dev.	12,70	R-Squared	0,8673
Mean	83,15	Adj R-Squared	0,7435
C.V. %	15,27	Pred R-Square	0,2446
PRESS	13772,48	Adeq Precisior	10,431
-2 Log Likeliho	216,83	BIC	267,85
		AICc	281,12

The "Pred R-Squared" of 0,2446 is not as close to the "Adj R-Squared" of 0,7435 as one might normally expect; i.e. the difference is more than 0.2. This may indicate a large block effect or a possible problem with your model and/or data. Things to consider are model reduction, response transformation, outliers, etc. All empirical models should be tested by doing confirmation runs.

"Adeq Precision" measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 10,431 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.

Factor	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	96,96	1	5,18	85,91	108,01	
A-Zaman	7,79	1	2,59	2,26	13,31	1,00
B-pH	-4,27	1	2,59	-9,80	1,25	1,00
C-Iletkenlik	7,35	1	2,59	1,82	12,87	1,00
D-Akim	6,17	1	2,59	0,65	11,70	1,00
AB	-3,12	1	3,17	-9,88	3,65	1,00
AC	-10,41	1	3,17	-17,18	-3,65	1,00
AD	-6,78	1	3,17	-13,54	-8,839E-003	1,00
BC	-1,84	1	3,17	-8,61	4,93	1,00
BD	1,14	1	3,17	-5,62	7,91	1,00

EK 8 Evsel Atıksuyun Al Elektrot Kullanılan Elektrokoagülasyon ile KOİ Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi (Devam)

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diagnostic

Final Equation in Terms of Coded Factors:

turbidite =

+96,96

+7,79 * A

-4,27 * B

+7,35 * C

+6,17 * D

-3,12 * AB

-10,41 * AC

-6,78 * AD

-1,84 * BC

+1,14 * BD

-7,18 * CD

+0,25 * A^2

-16,81 * B^2

+0,80 * C^2

-1,49 * D^2

The equation in terms of coded factors can be used to make predictions about the response for given levels of each factor. By default, the high levels of the factors are coded as +1 and the low levels of the factors are coded as -1. The coded equation is useful for identifying the relative impact of the factors by comparing the factor coefficients.

EK 8 Evsel Atıksuyun Al Elektrot Kullanılan Elektrokoagülasyon ile KOİ Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi (Devam)

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diagnostics

Final Equation in Terms of Actual Factors:

turbidite =

-899,13662

+19,27025 * Zaman

+134,25491 * pH

+125,20583 * Iletkenlik

+259,39500 * Akim

-0,41558 * Zaman * pH

-4,16525 * Zaman * Iletkenlik

-5,42050 * Zaman * Akim

-2,45417 * pH * Iletkenlik

+3,04500 * pH * Akim

-57,43500 * Iletkenlik * Akim

+9,95417E-003 * Zaman^2

-7,47162 * pH^2

+3,18042 * Iletkenlik^2

-23,79833 * Akim^2

The equation in terms of actual factors can be used to make predictions about the response for given levels of each factor. Here, the levels should be specified in the original units for each factor. This equation should not be used to determine the relative impact of each factor because the coefficients are scaled to accommodate the units of each factor and the intercept is not at the center of the design space.

Proceed to Diagnostic Plots (the next icon in progression). Be sure to look at the:

1) Normal probability plot of the studentized residuals to check for normality of residuals.

2) Studentized residuals versus predicted values to check for constant error.

EK 9 Evsel Atıksuyun Fe Elektrot Kullanılan Elektrokoagülasyon ile KOİ Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diagnostics

Response 2 COD

ANOVA for Response Surface Quadratic model

Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	6235,46	14	445,39	9,40	< 0.0001	significant
A-Zaman	*242,44*	*1*	*242,44*	*5,11*	*0,0390*	
B-pH	*134,05*	*1*	*134,05*	*2,83*	*0,1133*	
C-Iletkenlik	*559,70*	*1*	*559,70*	*11,81*	*0,0037*	
D-Akim	*1469,85*	*1*	*1469,85*	*31,01*	*< 0.0001*	
AB	*60,06*	*1*	*60,06*	*1,27*	*0,2780*	
AC	*91,97*	*1*	*91,97*	*1,94*	*0,1839*	
AD	*27,20*	*1*	*27,20*	*0,57*	*0,4605*	
BC	*175,56*	*1*	*175,56*	*3,70*	*0,0735*	
BD	*21,39*	*1*	*21,39*	*0,45*	*0,5119*	
CD	*1584,44*	*1*	*1584,44*	*33,43*	*< 0.0001*	
A^2	*643,47*	*1*	*643,47*	*13,58*	*0,0022*	
B^2	*639,49*	*1*	*639,49*	*13,49*	*0,0023*	
C^2	*451,52*	*1*	*451,52*	*9,53*	*0,0075*	
D^2	*908,76*	*1*	*908,76*	*19,17*	*0,0005*	
Residual	711,00	15	47,40			
Lack of Fit	*707,37*	*10*	*70,74*	*97,37*	*< 0.0001*	*significant*
Pure Error	*3,63*	*5*	*0,73*			
Cor Total	6946,46	29				

The Model F-value of 9,40 implies the model is significant. There is only a 0,01% chance that an F-value this large could occur due to noise.

EK 9 Evsel Atıksuyun Fe Elektrot Kullanılan Elektrokoagülasyon ile KOİ Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi (Devam)

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diagnostics

Std. Dev.	6,88	R-Squared	0,8976
Mean	62,97	Adj R-Squared	0,8021
C.V. %	10,93	Pred R-Square	0,4127
PRESS	4079,65	Adeq Precisior	10,865
-2 Log Likeliho	180,10	BIC	231,12
		AICc	244,39

The "Pred R-Squared" of 0,4127 is not as close to the "Adj R-Squared" of 0,8021 as one might normally expect; i.e. the difference is more than 0.2. This may indicate a large block effect or a possible problem with your model and/or data. Things to consider are model reduction, response transformation, outliers, etc. All empirical models should be tested by doing confirmation runs.

"Adeq Precision" measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 10,865 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.

Factor	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	47,38	1	2,81	41,39	53,37	
A-Zaman	-3,18	1	1,41	-6,17	-0,18	1,00
B-pH	2,36	1	1,41	-0,63	5,36	1,00
C-Iletkenlik	4,83	1	1,41	1,83	7,82	1,00
D-Akim	-7,83	1	1,41	-10,82	-4,83	1,00
AB	-1,94	1	1,72	-5,61	1,73	1,00
AC	-2,40	1	1,72	-6,07	1,27	1,00
AD	1,30	1	1,72	-2,36	4,97	1,00
BC	-3,31	1	1,72	-6,98	0,36	1,00
BD	-1,16	1	1,72	-4,82	2,51	1,00

EK 9 Evsel Atıksuyun Fe Elektrot Kullanılan Elektrokoagülasyon ile KOİ Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi (Devam)

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diagnostics

Final Equation in Terms of Coded Factors:

COD =

+47,38

-3,18 * A

+2,36 * B

+4,83 * C

-7,83 * D

-1,94 * AB

-2,40 * AC

+1,30 * AD

-3,31 * BC

-1,16 * BD

-9,95 * CD

+4,84 * A^2

+4,83 * B^2

+4,06 * C^2

+5,76 * D^2

The equation in terms of coded factors can be used to make predictions about the response for given levels of each factor. By default, the high levels of the factors are coded as +1 and the low levels of the factors are coded as -1. The coded equation is useful for identifying the relative impact of the factors by comparing the factor coefficients.

EK 9 Evsel Atıksuyun Fe Elektrot Kullanılan Elektrokoagülasyon ile KOİ Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi (Devam)

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diagnost

Final Equation in Terms of Actual Factors:

COD =

+74,78574

-2,63683 * Zaman

-17,67759 * pH

+40,14667 * Iletkenlik

+40,14000 * Akim

-0,25833 * Zaman * pH

-0,95900 * Zaman * Iletkenlik

+1,04300 * Zaman * Akim

-4,41667 * pH * Iletkenlik

-3,08333 * pH * Akim

-79,61000 * Iletkenlik * Akim

+0,19374 * Zaman^2

+2,14602 * pH^2

+16,22917 * Iletkenlik^2

+92,09667 * Akim^2

The equation in terms of actual factors can be used to make predictions about the response for given levels of each factor. Here, the levels should be specified in the original units for each factor. This equation should not be used to determine the relative impact of each factor because the coefficients are scaled to accommodate the units of each factor and the intercept is not at the center of the design space.

Proceed to Diagnostic Plots (the next icon in progression). Be sure to look at the:

1) Normal probability plot of the studentized residuals to check for normality of residuals.

EK 10 Evsel Atıksuyun Al Elektrot Kullanılan Elektrokoagülasyon ile Bulanıklık Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diagnostics

Response 1 turbidite

ANOVA for Response Surface Quadratic model

Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	15812,17	14	1129,44	7,00	0,0003	significant
A-Zaman	*1456,26*	*1*	*1456,26*	*9,03*	*0,0089*	
B-pH	*438,02*	*1*	*438,02*	*2,72*	*0,1201*	
C-Iletkenlik	*1295,22*	*1*	*1295,22*	*8,03*	*0,0126*	
D-Akim	*914,02*	*1*	*914,02*	*5,67*	*0,0310*	
AB	*155,44*	*1*	*155,44*	*0,96*	*0,3418*	
AC	*1734,93*	*1*	*1734,93*	*10,76*	*0,0051*	
AD	*734,55*	*1*	*734,55*	*4,55*	*0,0497*	
BC	*54,21*	*1*	*54,21*	*0,34*	*0,5707*	
BD	*20,86*	*1*	*20,86*	*0,13*	*0,7241*	
CD	*824,69*	*1*	*824,69*	*5,11*	*0,0390*	
A^2	*1,70*	*1*	*1,70*	*0,011*	*0,9196*	
B^2	*7751,72*	*1*	*7751,72*	*48,07*	*< 0.0001*	
C^2	*17,34*	*1*	*17,34*	*0,11*	*0,7475*	
D^2	*60,68*	*1*	*60,68*	*0,38*	*0,5488*	
Residual	2418,95	15	161,26			
Lack of Fit	*2381,76*	*10*	*238,18*	*32,03*	*0,0007*	*significant*
Pure Error	*37,19*	*5*	*7,44*			
Cor Total	18231,11	29				

The Model F-value of 7,00 implies the model is significant. There is only a 0,03% chance that an F-value this large could occur due to noise.

EK 10 Evsel Atıksuyun Al Elektrot Kullanılan Elektrokoagülasyon ile Bulanıklık Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi (Devam)

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diagnostics

Std. Dev.	12,70	R-Squared	0,8673
Mean	83,15	Adj R-Squared	0,7435
C.V. %	15,27	Pred R-Square	0,2446
PRESS	13772,48	Adeq Precisior	10,431
-2 Log Likeliho	216,83	BIC	267,85
		AICc	281,12

The "Pred R-Squared" of 0,2446 is not as close to the "Adj R-Squared" of 0,7435 as one might normally expect; i.e. the difference is more than 0.2. This may indicate a large block effect or a possible problem with your model and/or data. Things to consider are model reduction, response transformation, outliers, etc. All empirical models should be tested by doing confirmation runs.

"Adeq Precision" measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 10,431 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.

Factor	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	96,96	1	5,18	85,91	108,01	
A-Zaman	7,79	1	2,59	2,26	13,31	1,00
B-pH	-4,27	1	2,59	-9,80	1,25	1,00
C-Iletkenlik	7,35	1	2,59	1,82	12,87	1,00
D-Akim	6,17	1	2,59	0,65	11,70	1,00
AB	-3,12	1	3,17	-9,88	3,65	1,00
AC	-10,41	1	3,17	-17,18	-3,65	1,00
AD	-6,78	1	3,17	-13,54	-8,839E-003	1,00
BC	-1,84	1	3,17	-8,61	4,93	1,00
BD	1,14	1	3,17	-5,62	7,91	1,00
CD	-7,18	1	3,17	-13,95	-0,41	1,00
A^2	0,25	1	2,42	-4,92	5,42	1,05

EK 10 Evsel Atıksuyun Al Elektrot Kullanılan Elektrokoagülasyon ile Bulanıklık Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi (Devam)

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diagnostics

Final Equation in Terms of Coded Factors:

turbidite =

+96,96

+7,79 * A

-4,27 * B

+7,35 * C

+6,17 * D

-3,12 * AB

-10,41 * AC

-6,78 * AD

-1,84 * BC

+1,14 * BD

-7,18 * CD

+0,25 * A^2

-16,81 * B^2

+0,80 * C^2

-1,49 * D^2

The equation in terms of coded factors can be used to make predictions about the response for given levels of each factor. By default, the high levels of the factors are coded as +1 and the low levels of the factors are coded as -1. The coded equation is useful for identifying the relative impact of the factors by comparing the factor coefficients.

Final Equation in Terms of Actual Factors:

turbidite =

-899,13662

EK 10 Evsel Atıksuyun Al Elektrot Kullanılan Elektrokoagülasyon ile Bulanıklık Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi (Devam)

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diagnostics

Final Equation in Terms of Actual Factors:

turbidite =

-899,13662

+19,27025 * Zaman

+134,25491 * pH

+125,20583 * Iletkenlik

+259,39500 * Akim

-0,41558 * Zaman * pH

-4,16525 * Zaman * Iletkenlik

-5,42050 * Zaman * Akim

-2,45417 * pH * Iletkenlik

+3,04500 * pH * Akim

-57,43500 * Iletkenlik * Akim

+9,95417E-003 * Zaman^2

-7,47162 * pH^2

+3,18042 * Iletkenlik^2

-23,79833 * Akim^2

The equation in terms of actual factors can be used to make predictions about the response for given levels of each factor. Here, the levels should be specified in the original units for each factor. This equation should not be used to determine the relative impact of each factor because the coefficients are scaled to accommodate the units of each factor and the intercept is not at the center of the design space.

EK 11 Evsel Atıksuyun Fe Elektrot Kullanılan Elektrokoagülasyon ile Bulanıklık Giderimin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diagnostics

Response 1 turbidite

ANOVA for Response Surface Quadratic model

Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	7626,88	14	544,78	3,98	0,0059	significant
A-Zaman	*1755,49*	*1*	*1755,49*	*12,84*	*0,0027*	
B-pH	*15,65*	*1*	*15,65*	*0,11*	*0,7398*	
C-Iletkenlik	*270,28*	*1*	*270,28*	*1,98*	*0,1801*	
D-Akim	*64,16*	*1*	*64,16*	*0,47*	*0,5038*	
AB	*1011,88*	*1*	*1011,88*	*7,40*	*0,0158*	
AC	*47,54*	*1*	*47,54*	*0,35*	*0,5642*	
AD	*42,12*	*1*	*42,12*	*0,31*	*0,5870*	
BC	*552,49*	*1*	*552,49*	*4,04*	*0,0627*	
BD	*230,74*	*1*	*230,74*	*1,69*	*0,2135*	
CD	*603,93*	*1*	*603,93*	*4,42*	*0,0529*	
A^2	*2821,12*	*1*	*2821,12*	*20,64*	*0,0004*	
B^2	*345,99*	*1*	*345,99*	*2,53*	*0,1325*	
C^2	*198,17*	*1*	*198,17*	*1,45*	*0,2473*	
D^2	*293,37*	*1*	*293,37*	*2,15*	*0,1636*	
Residual	2050,65	15	136,71			
Lack of Fit	*2050,65*	*10*	*205,06*			
Pure Error	*0,000*	*5*	*0,000*			
Cor Total	9677,53	29				

The Model F-value of 3,98 implies the model is significant. There is only a 0,59% chance that an F-value this large could occur due to noise.

EK 11 Evsel Atıksuyun Fe Elektrot Kullanılan Elektrokoagülasyon ile Bulanıklık Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi (Devam)

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diagnos

Std. Dev.	11,69	R-Squared	0,7881
Mean	58,83	Adj R-Squared	0,5903
C.V. %	19,88	Pred R-Square	-0,2205
PRESS	11811,73	Adeq Precisior	7,711
-2 Log Likeliho	211,88	BIC	262,90
		AICc	276,16

A negative "Pred R-Squared" implies that the overall mean is a better predictor of your response than the current model.

"Adeq Precision" measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 7,711 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.

Factor	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	74,55	1	4,77	64,38	84,72	
A-Zaman	8,55	1	2,39	3,47	13,64	1,00
B-pH	-0,81	1	2,39	-5,89	4,28	1,00
C-Iletkenlik	3,36	1	2,39	-1,73	8,44	1,00
D-Akim	1,63	1	2,39	-3,45	6,72	1,00
AB	-7,95	1	2,92	-14,18	-1,72	1,00
AC	-1,72	1	2,92	-7,95	4,51	1,00
AD	1,62	1	2,92	-4,61	7,85	1,00
BC	-5,88	1	2,92	-12,11	0,35	1,00
BD	-3,80	1	2,92	-10,03	2,43	1,00
CD	-6,14	1	2,92	-12,37	0,087	1,00
A^2	-10,14	1	2,23	-14,90	-5,38	1,05
B^2	-3,55	1	2,23	-8,31	1,21	1,05
C^2	-2,69	1	2,23	-7,45	2,07	1,05

EK 11 Evsel Atıksuyun Fe Elektrot Kullanılan Elektrokoagülasyon ile Bulanıklık Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi (Devam)

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diagnosti

Final Equation in Terms of Coded Factors:

turbidite =

+74,55

+8,55 * A

-0,81 * B

+3,36 * C

+1,63 * D

-7,95 * AB

-1,72 * AC

+1,62 * AD

-5,88 * BC

-3,80 * BD

-6,14 * CD

-10,14 * A^2

-3,55 * B^2

-2,69 * C^2

-3,27 * D^2

The equation in terms of coded factors can be used to make predictions about the response for given levels of each factor. By default, the high levels of the factors are coded as +1 and the low levels of the factors are coded as -1. The coded equation is useful for identifying the relative impact of the factors by comparing the factor coefficients.

EK 11 Evsel Atıksuyun Fe Elektrot Kullanılan Elektrokoagülasyon ile Bulanıklık Gideriminin Modellenmesinin İstatistiksel Analizi (Devam)

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diagnostics

Final Equation in Terms of Actual Factors:

turbidite =

-739,82421

+23,64358 * Zaman

+69,38398 * pH

+174,27250 * lletkenlik

+274,51167 * Akim

-1,06033 * Zaman * pH

-0,68950 * Zaman * lletkenlik

+1,29800 * Zaman * Akim

-7,83500 * pH * lletkenlik

-10,12667 * pH * Akim

-49,15000 * lletkenlik * Akim

-0,40567 * Zaman^2

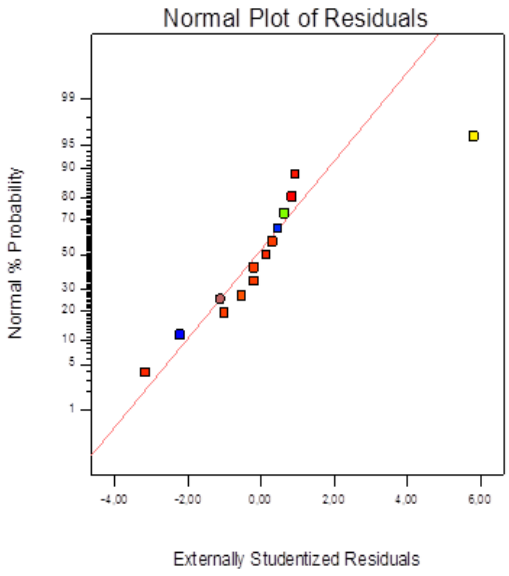
-1,57852 * pH^2

-10,75167 * lletkenlik^2

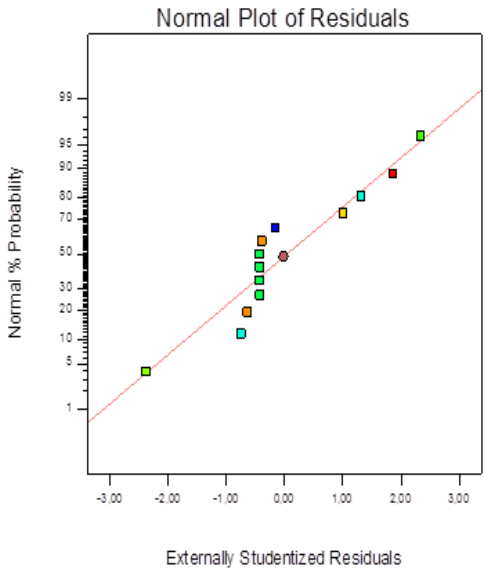
-52,32667 * Akim^2

The equation in terms of actual factors can be used to make predictions about the response for given levels of each factor. Here, the levels should be specified in the original units for each factor. This equation should not be used to determine the relative impact of each factor because the coefficients are scaled to accommodate the units of each factor and the intercept is not at the center of the design space.

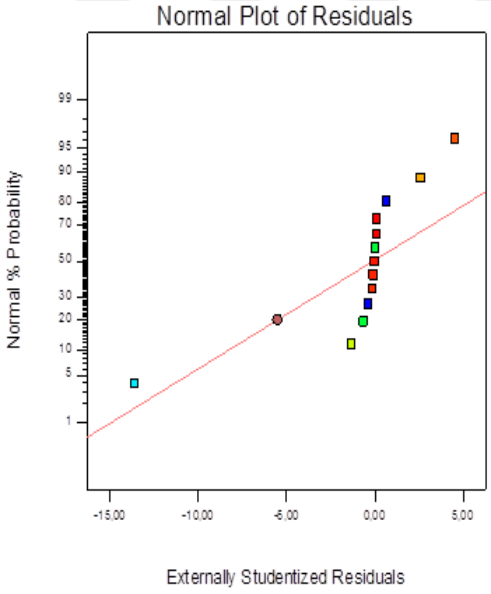
EK 12 Kimyasal Çöktürücü Prosesinde Normalite Grafikleri



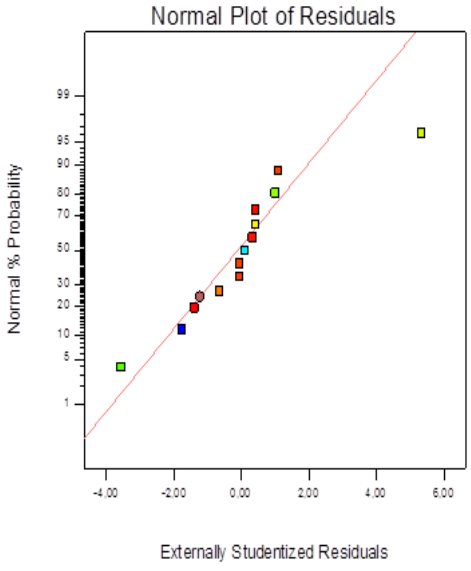
a. $AlSO_4$ (KOİ Giderimi)



b. $AlSO_4$ (Bulanıklık Giderimi)

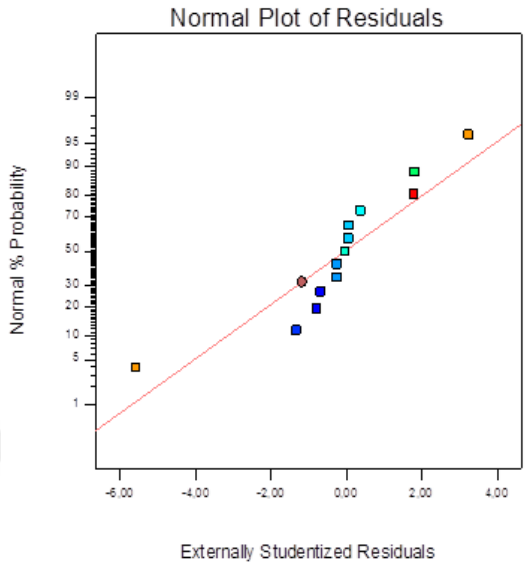


c.$FeCl_3$ (KOİ Giderimi)

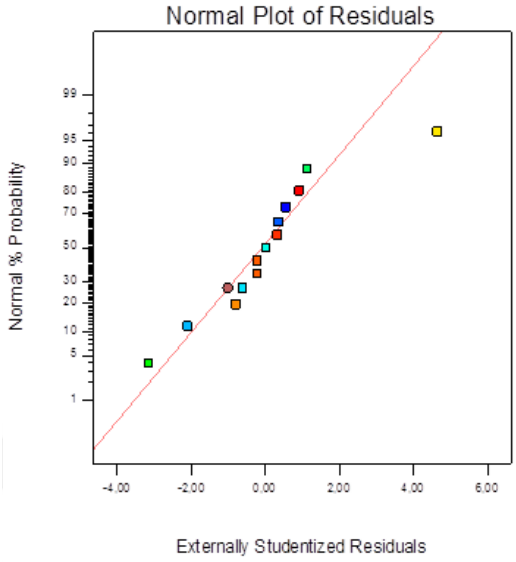


ç. $FeCl_3$ (Bulanıklık Giderimi)

EK 12 Kimyasal Çöktürücü Prosesinde Normalite Grafikleri (Devam)

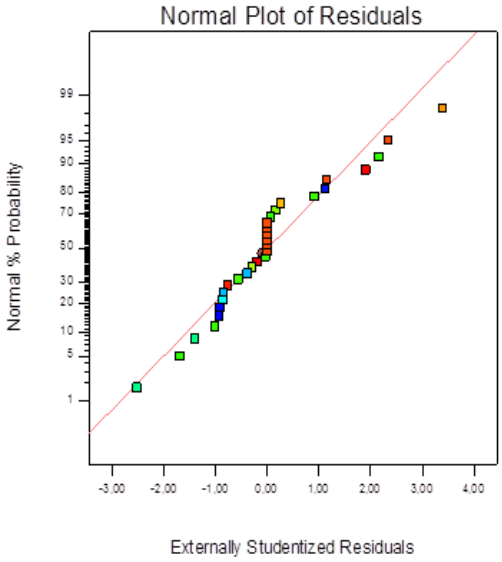


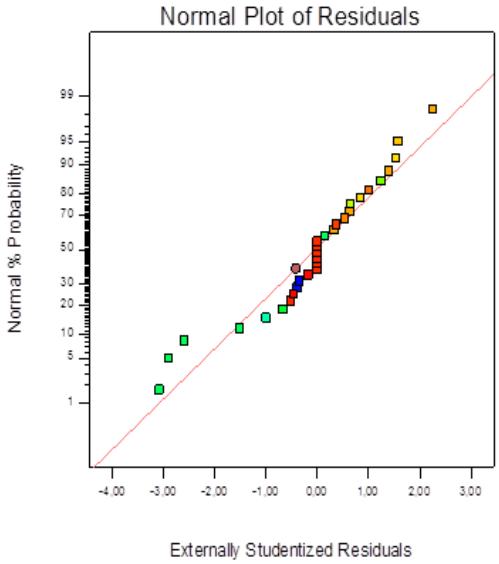
d.$FeSO_4$ (KOİ Giderimi)



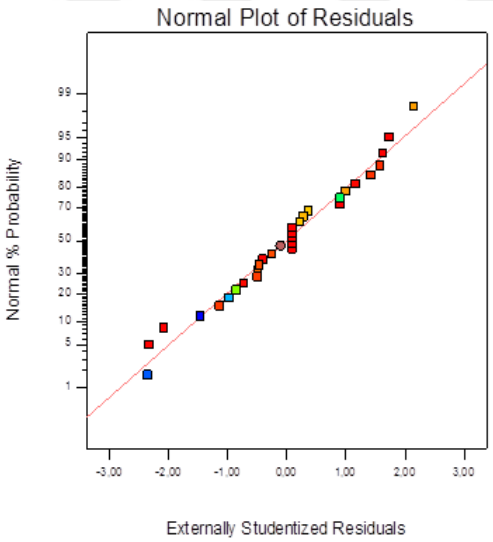
e. $FeSO_4$ (Bulanıklık Giderimi)

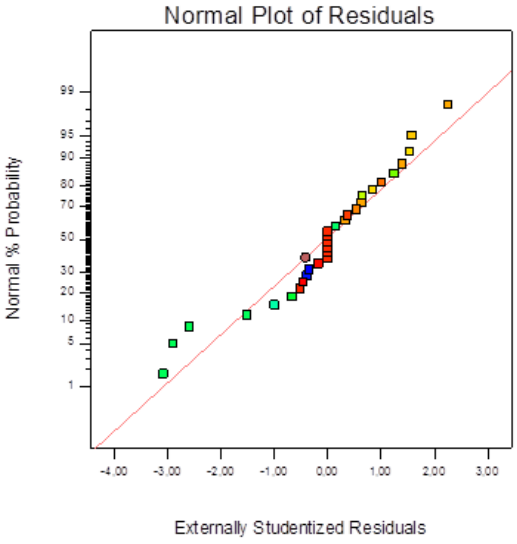
EK 13 Elektrokoagülasyonda Normalite Grafikleri





a. Al Elektrot (KOİ Giderimi) b. Fe Elektrot (KOİ Giderimi)





c. Al Elektrot (Bulanıklık Giderimi) d. Fe Elektrot (Bulanıklık Giderimi)

EK 14 Kimyasal Çöktürme Prosesinin Optimizasyonunda Kullanılan PSO Algoritması Matlab Programı

```
clear all;

close all;

clc;

%PSO Başlangıç parametrelerinin belirlenmesi

c1=1.494;

c2=1.494;

number_of_iterations = 1000;

number_of_particles = 50;

number_of_dimensions=2;

inertial_weight=linspace(0.9,0.4,number_of_iterations);

%Çözüm aralıklarının belirlenmesi

PHmax =11;

PHmin =7;

CHmax =1500;

CHmin =500;

%Parçacık hızı tolerans değeri

v_tol=[PHmax-PHmin/number_of_iterations;CHmax-
CHmin/number_of_iterations];

PositionVector = cell(number_of_particles,number_of_iterations);

Velocity_of_Nodes = cell(number_of_particles,number_of_iterations);

k=1;

%% Parçacık sürüsü optimizasyonu döngüsü başlangıcı

for i=1:number_of_particles
```

EK 14 Kimyasal Çöktürme Prosesinin Optimizasyonunda Kullanılan PSO Algoritması Matlab Programı (Devam)

```
if (k==1)

    PositionVector{i,1} = [PHmin+rand(1,1)*(PHmax-
PHmin);CHmin+rand(1,1)*(CHmax-CHmin)];

    Velocity_of_Nodes{i,k} = [v_tol(1)*unifrnd(-1,1);v_tol(2)*unifrnd(-1,1)];

    % Alüm COD Removal

    ObjectiveFunction(1,i) = 86.59-7.88*PositionVector{i,k}(1)-
15.68*PositionVector{i,k}(2)-8.75*PositionVector{i,k}(1)*PositionVector{i,k}(2)-
3.36*PositionVector{i,k}(1)*PositionVector{i,k}(1)-
11.84*PositionVector{i,k}(2)*PositionVector{i,k}(2);

    %Alüm Turbidity

    %ObjectiveFunction(1,i) =+91.40-0.10*PositionVector{i,k}(1)-
4.39*PositionVector{i,k}(2)-
0.50*PositionVector{i,k}(1)*PositionVector{i,k}(2)+1.93*PositionVector{i,k}(1)*
PositionVector{i,k}(1)-0.073*PositionVector{i,k}(2)*PositionVector{i,k}(2);

    %FeCl3 COD Removal

    %ObjectiveFunction(1,i) = 75.10-3.06*PositionVector{i,k}(1)-
10.48*PositionVector{i,k}(2)-
10.75*PositionVector{i,k}(1)*PositionVector{i,k}(2)-
10.42*PositionVector{i,k}(1)*PositionVector{i,k}(1)-
14.67*PositionVector{i,k}(2)*PositionVector{i,k}(2);

    %FeCl3 Turbidity Removal

    %ObjectiveFunction(1,i)=+81.11-
3.26*PositionVector{i,k}(1)+2.1*PositionVector{i,k}(2)+3.25*PositionVector{i,k
}(1)*PositionVector{i,k}(2)-1.12*PositionVector{i,k}(1)*PositionVector{i,k}(1)-
4.62*PositionVector{i,k}(2)*PositionVector{i,k}(2);

    %FeSO4 COD Removal
```

EK 14 Kimyasal Çöktürme Prosesinin Optimizasyonunda Kullanılan PSO Algoritması Matlab Programı (Devam)

```
    %ObjectiveFunction(1,i) =+25.80+1.56*PositionVector{i,k}(1)-
6.09*PositionVector{i,k}(2)-
0.50*PositionVector{i,k}(1)*PositionVector{i,k}(2)+0.038*PositionVector{i,k}(1)
*PositionVector{i,k}(1)+4.79*PositionVector{i,k}(2)*PositionVector{i,k}(2);

        %FeSO4 Turbidity Removal

        %ObjectiveFunction(1,i) =+83.40-
3.00*PositionVector{i,k}(1)+2.97*PositionVector{i,k}(2)-
0.75*PositionVector{i,k}(1)*PositionVector{i,k}(2)-
5.20*PositionVector{i,k}(1)*PositionVector{i,k}(1)-
8.45*PositionVector{i,k}(2)*PositionVector{i,k}(2);

end

    Personal_Best_Value = ObjectiveFunction;

    Personal_Best= PositionVector;

    [Global_Best_Value,index] = max(Personal_Best_Value) ;

    Global_Best = Personal_Best{index,1};

end

Best_Objective_Function = Global_Best_Value;

for k=2:number_of_iterations

    for i=1:number_of_particles

        r1=rand(1);

        r2=rand(1);

        Velocity_of_Nodes{i,k} = inertial_weight(k-1)*Velocity_of_Nodes{i,k-
1}+c1*r1*(Personal_Best{i,1}-PositionVector{i,k-1}+c2*r2*(Global_Best-
PositionVector{i,k-1}));

        for l=1:number_of_dimensions
```

EK 14 Kimyasal Çöktürme Prosesinin Optimizasyonunda Kullanılan PSO Algoritması Matlab Programı (Devam)

```
  if (Velocity_of_Nodes{i,k}(l)>v_tol(l))
        Velocity_of_Nodes{i,k}(l)=v_tol(l);
    elseif (Velocity_of_Nodes{i,k}(l)<-1*v_tol(l))
        Velocity_of_Nodes{i,k}(l)=-1*v_tol(l);
    end
  end
  PositionVector{i,k} = PositionVector{i,k-1} + Velocity_of_Nodes{i,k};
  farku = PositionVector{i,k}(1) - PHmax;
  if (farku>0)
    ekle = mod(farku,PHmax-PHmin);
    PositionVector{i,k}(1) = PHmin + ekle;
  end
  farka = PositionVector{i,k}(1) - PHmin;
  if (farka<0)
    cikar = mod(farka,-(PHmax-PHmin));
    PositionVector{i,k}(1) = PHmax + cikar;
  end
  farkust = PositionVector{i,k}(2) - CHmax;
  if (farkust>0)
    ekle = mod(farkust,CHmax-CHmin);
    PositionVector{i,k}(2) = CHmin + ekle;
  end
  farkalt = PositionVector{i,k}(2) - CHmin;
```

EK 14 Kimyasal Çöktürme Prosesinin Optimizasyonunda Kullanılan PSO Algoritması Matlab Programı (Devam)

```
 if (farkalt<0)
        cikar = mod(farkalt,-(CHmax-CHmin));
        PositionVector{i,k}(2) = CHmax + cikar;
    end
        %Çözülmesi istenen denklem
    % Alüm COD Removal
    New_Objective_Function(1,i) = 86.59-7.88*PositionVector{i,k}(1)-
15.68*PositionVector{i,k}(2)-8.75*PositionVector{i,k}(1)*PositionVector{i,k}(2)-
3.36*PositionVector{i,k}(1)*PositionVector{i,k}(1)-
11.84*PositionVector{i,k}(2)*PositionVector{i,k}(2);
    %Alüm Turbidity
    %New_Objective_Function(1,i) =+91.40-0.10*PositionVector{i,k}(1)-
4.39*PositionVector{i,k}(2)-
0.50*PositionVector{i,k}(1)*PositionVector{i,k}(2)+1.93*PositionVector{i,k}(1)*
PositionVector{i,k}(1)-0.073*PositionVector{i,k}(2)*PositionVector{i,k}(2);
    %FeCl3 COD Removal
    %New_Objective_Function(1,i) = 75.10-3.06*PositionVector{i,k}(1)-
10.48*PositionVector{i,k}(2)-
10.75*PositionVector{i,k}(1)*PositionVector{i,k}(2)-
10.42*PositionVector{i,k}(1)*PositionVector{i,k}(1)-
14.67*PositionVector{i,k}(2)*PositionVector{i,k}(2);
    %FeCl3 Turbidity Removal
   %New_Objective_Function(1,i)=+81.11-
3.26*PositionVector{i,k}(1)+2.1*PositionVector{i,k}(2)+3.25*PositionVector{i,k
}(1)*PositionVector{i,k}(2)-1.12*PositionVector{i,k}(1)*PositionVector{i,k}(1)-
4.62*PositionVector{i,k}(2)*PositionVector{i,k}(2);
```

EK 14 Kimyasal Çöktürme Prosesinin Optimizasyonunda Kullanılan PSO Algoritması Matlab Programı (Devam)

```
    %FeSO4 COD Removal
   %New_Objective_Function(1,i) =+25.80+1.56*PositionVector{i,k}(1)-
6.09*PositionVector{i,k}(2)-
0.50*PositionVector{i,k}(1)*PositionVector{i,k}(2)+0.038*PositionVector{i,k}(1)
*PositionVector{i,k}(1)+4.79*PositionVector{i,k}(2)*PositionVector{i,k}(2);
    %FeSO4 Turbidity Removal
    %New_Objective_Function(1,i) =+83.40-
3.00*PositionVector{i,k}(1)+2.97*PositionVector{i,k}(2)-
0.75*PositionVector{i,k}(1)*PositionVector{i,k}(2)-
5.20*PositionVector{i,k}(1)*PositionVector{i,k}(1)-
8.45*PositionVector{i,k}(2)*PositionVector{i,k}(2);
    if (New_Objective_Function(1,i)>Personal_Best_Value(1,i))
      Personal_Best_Value(1,i) = New_Objective_Function(1,i);
      Personal_Best{i,1} = PositionVector{i,k};
    end
  end
  [Global_Best_Value,index] = max(Personal_Best_Value);
  Best_Objective_Function=[Best_Objective_Function Global_Best_Value];
  Global_Best = Personal_Best{index,1};
end
%Global Best: Optimize edilmesi istenen fonksiyon için algoritmanın bulduğu
%en iyi sonuç değerlerini vermektedir.
```

EK 15 Koagülayon Prosesinin İşletme Maliyeti

Koagülasyonun işletme maliyeti aşağıdaki denklemde verilmiştir.

İşletme Maliyeti = Arıtılacak Evsel Atıksuyu × Çöktürücü Birim Fiyatı

Alüm

1 L evsel atıksuyu arıtımı için 500 mg Alüm kullanırsak,

1L evsel atıksuyu için 9.6 $/kg*1kg/1000g*1g/1000mg*500mg =0.0048 $ / 1 L

1 m^3 evsel atıksuyu için 0.0048 $ / 1L* 1000 L /m^3 = 4.8 $ / m^3

Demir Klorür

1 L evsel atıksuyu için 500 g Demir Klorür kullanırsak,

1L evsel atıksuyu için 10.25 $/kg*1kg/1000g*1g/1000mg*500mg =0.005125 $

1 m^3 evsel atıksuyu için 0.0051 $ / 1L* 1000 L /m^3 = 5.1 $ / m^3

Demir Sülfat Heptahidrat

1 L evsel atıksuyu için 500 g Demir Sülfat Heptahidrat kullanırsak,

1L evsel atıksuyu için 7.52 $/kg*1kg/1000g*1g/1000mg*500mg =0.00376 $

1 m^3 evsel atıksuyu için 0.00376 $ / 1L* 1000 L /m^3 = 3.8 $ / m^3

EK 16 Elektrokoagülasyon Prosesinin İşletme Maliyeti

Elektrokoagülasyon sisteminin işletme maliyeti ise 1 L evsel atıksu için kullanılan enerji miktarı ve elektrot maliyeti toplanarak hesaplanarak bulunmaktadır. Elektrot maliyetinin hesaplanması kullanılan elektrot miktarı teorik olarak hesaplanarak kullanılan elektrot maliyeti bulunmuştur.

İşletme Maliyeti = Enerji Maliyeti + Elektrot Maliyeti

Harcanan Elektrik Enerjisi:

E (W.saat.m-3)= V.I.t/*v*

Burada, E: Elektrik Enerjisi (Wsa), V: Volt (100 Volt), I: Akım Şiddeti, t: zaman(saat), *v*:çözelti hacmi (m^3)'dir.

Al elektrot için 1.1 A akım şiddetinde ve 20 dakikada en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Arıtılan evsel atıksuyun hacmi 1 L'dir.

E= 100* 1.1*(20/60)/(/1m^3)= 3600 Wsaat.m^{-3}

Enerji Maliyeti= E =3600 Wsaat.m^{-3}*1 kWsaat m^{-3}/1000 Wsaat.m^3*0.069$/kWsaat =2,52 $/$m^3$

Fe elektrot için 0.35 A akım şiddetinde ve 20 dakikada en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Arıtılan evsel atıksuyun hacmi 1 L'dir.

E= 100* 0.35*(20/60)/1L/1m^3=11600 Wsaat.m^{-3}

EK 16 Elektrokoagülasyon Prosesinin İşletme Maliyeti

Enerji Maliyeti =11600 Wsaat.m^3*1 kWsaat m^{-3}/1000 Wsaat.m^{-3}*0.069$/kWsaat =0.805$/m^3

Teorik olarak çözünen elektrot miktarı

M_{Ateo}= m(M_A)

M_A: Molekül Ağırlığı (demir için 56 g, alüminyum için 27 g),

M_{Ateo}: teorik olarak çözünen elektrot miktarıdır.

M=It/(nf)

Enerji Tüketimi

Enerji tüketimi watt saat (Wsa) cinsinden değeri aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

W(kW.saat.m^{-3})= I.V.t/v

Burada, W: Elektrik enerji, I: akım, V: Volt, t: zaman(saat), v: reaktördeki toplam çözelti hacmidir.

Enerji Maliyeti = Enerji Tüketimi × Enerji Birim Fiyatı

Elektrot Maliyeti

Elektrot maliyeti kullanılan elektrot miktarı ile elektrot birim fiyatı çarpılarak bulunur.

Elektrot Maliyeti= Tüketilen Elektrot Miktarı × Elektrot Birim Fiyatı

Teorik Olarak Kullanılan Elektrot Miktarının Hesaplanması

MA_{Teo}=m (MA)

MA= Molekül Ağırlığı (Fe= 56g, Al=27g)

$$m = \frac{It}{nf}$$

Burada, I: Akım şiddeti (Amper-A), t:süre (s), n: iyon yükü (Fe için +2, Al için +3), F: Faraday sabiti (96485 C.mol^{-1})'dir.

EK 16 Elektrokoagülasyon Prosesinin İşletme Maliyeti (Devam)

Al elektrot için;

m=It/(n.f)= 0.35*20*60/(3*96485)=0.00145 mol

M_{Ateo}= 0.00145*27=0.0812 g.

Elektrot Maliyeti = 0.0812gAl*3.83$/kgAl*1kgAl /1000gAl

=0.0003 $/1 Litre evsel atıksu

1 m^3 atıksuyu arıtımı için ;

0.0003 *1000 L / 1 m^3 =0,3 $ /m3

Fe elektrot için;

m=It/(n.f)= 0.3*20*60/(2*96485)=0.00186 mol

M_{Ateo}= 0.00186*56= 0.10 g. (1 L evsel atıksuyu için)

Elektrot Maliyeti = 0.10g Fe*0.8$/kgFe*1kg Fe/1000g Fe* 1000 L/ 1m^3

= 0.08 $/1 Litre evsel atıksuyu.

Toplam İşletme maliyeti = Enerji Maliyeti + Elektrot Maliyeti

Al elektrot için:

Toplam İşletme Maliyeti= 2.52+0.3 =2.55 $

Fe elektrot için:

Toplam İşletme Maliyeti= 0.805+0.088=0.885 $

EK 17 Ürün Birim Fiyatları

Al Elektrotun birim fiyatı 3.83 $/kg Al'dır.

(http://www.teknik.alüminyum.com.tr/docs/wk26.12.pdf)

Fe Elektrotun birim fiyatı 0.8 $/kg Fe'dır.

(http://www.atacandemircelik.com/fiyat-listeleri/guncel-demir fiyatları.html)

Elektrik Enerjisinin birim fiyatı 0.069$/kWsa'dır.

(http://www.epdk.gov.tr/index.php/elektrik-piyasası/tarifeler?id=133)

Alüminyum Sülfatın birim fiyatı 9.6 $/kg Alüminyum sülfat'dır.

(http://www.kimyaborsasi.com.tr/a/alüminyum-sulfat-13.html)

Demir Klorürün birim fiyatı 10.25 $/kg Demir Klorür'dır.

(http://www.kimyaborsasi.com.tr/d/demir-uc-klorur-toz-39.html)

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ayşe TAŞKIN

Doğum Yeri : Ermenek

Doğum tarihi : 1979

Medeni hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise	Adana Fen Lisesi	(1996)
Lisans	Orta Doğu Teknik Üniversitesi –Kimya Mühendisliği	(2004)
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi- Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı	(2008)

Çalıştığı Kurumlar

Yıl	**Yer**	**Görev**
2007-	5'inci Ana Bakım Merkezi K.lığı	Kimya Mühendisi
2005-2006	Sağlık Bakanlığı Proje Uygulama Birimi	Kimya Mühendisi
2004-2005	Hayat Temizlik ve Sağlık Ürünleri	Kimya Mühendisi

Hakemli Dergi

Taskin, A., Satar B., Zeybek, Z., Taskin, S. 2016. For Domestic Wastewater Treatment, Finding Optimum Condition by Particle Swarm Optimization and Experimental Design, International Journal of Environmental & Agriculture Research, 2(1), 55-66.