

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**KAĞIT ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMLE
ARITILMASI**

Şule CAMCIOĞLU

KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2016**

Her hakkı saklıdır

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.

10.03.2016

Şule CAMCIOĞLU

ÖZET

Doktora Tezi

KAĞIT ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMLERLE ARITILMASI

Şule CAMCIOĞLU

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hale HAPOĞLU

Elektrokoagülasyonla atık su arıtımı elektrot yerleşimi ve malzemesi, akım şiddeti, arıtım süresi, pH, sıcaklık ve elektriksel iletkenlik gibi pek çok faktörden etkilenmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda optimizasyon uygulamaları faktörlerin başlangıç değerleri ayarlanarak gerçekleştirilmiştir. Elektrokoagülasyon prosesinin işletme parametrelerinin zamanla değiştiği göz önünde bulundurulduğunda bu durum yanıltıcı sonuçlar ortaya çıkarmaktadır. Bu amaçla, yapılan çalışmada işletme parametreleri olan elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın MIMO PID, GPC, GMV kontrolleri gerçekleştirilmiş, performans kriterleri değerlendirilerek en uygun kontrol yöntemi GMV olarak belirlenmiştir. Elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın kontrol edilmediği durumda yapılan arıtım çalışmasında KOİ, renk, bulanıklık ve AKM giderimleri ile enerji tüketimi sırasıyla % 34.58, % 96.56, % 99.23, % 96.43 ve 128.25 kWh/kg KOİ bulunmuştur. Kontrolsüz koşullarda yapılan arıtım çalışması ile karşılaştırıldığında pH'nın SISO kontrolü sonucunda KOİ gideriminde % 9.12 artış, elektriksel iletkenliğin SISO kontrolü sonucunda enerji tüketiminde % 33.81 oranında düşüş sağlanmıştır. İşletme parametrelerinin MIMO GMV kontrollü arıtım çalışması, kontrolsüz arıtım çalışması ile kıyaslandığında KOİ gideriminde % 9.96 artış, enerji tüketiminde % 37.49 oranında düşüş elde edilmiştir. İşletme parametrelerinin kontrol edildiği durumda sisteme 6 faktör 5 seviyeden oluşan MBT uygulanmıştır. KOİ, bulanıklık, renk, AKM giderimleri ile enerji tüketiminin cevap olarak alındığı CYY çalışmasında en yüksek kirletici giderimleri ve en düşük enerji tüketimi hedefine erişmek amacıyla deneysel tasarımı yapılan 6 faktör olan elektrot materyali, elektriksel iletkenlik, pH, sıcaklık, akım şiddeti ve arıtım süresinin en uygun değerleri, çoklu regresyon ile elde edilen matematiksel modeller kullanılarak sırasıyla alüminyum elektrot, 2.72 mS/cm, 5.82, 22.5°C, 1.22 A, 10.8 dakika olarak elde edilmiştir. En uygun işletme koşullarında gerçekleştirilen çalışmada kontrollü durumda KOİ, renk, bulanıklık, AKM giderimleri ve enerji tüketimi sırasıyla % 42.21, % 100, % 98.61, % 97.06 ve 8.82 kWh/kg KOİ olarak bulunmuştur. Geleneksel ve ileri kontrol yöntemlerinin kağıt endüstrisi atık sularının elektrokoagülasyonla arıtımına uygulanması ile kontrollü koşullarda CYY ile en uygun işletme parametrelerinin belirlenmesi literatürde ilk kez bu tez çalışmasında gerçekleştirilmiş, kontrollü koşullarda yapılan çalışmada kontrolün uygulanmadığı duruma göre kirletici giderimlerinde artış, enerji tüketiminde düşüş sağlanmıştır.

Mart 2016, 263 sayfa

Anahtar Kelimeler: Elektrokoagülasyon, atık su arıtımı, proses kontrol, merkezi bileşik tasarım, cevap yüzey yöntemi, optimizasyon

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

PAPER INDUSTRY WASTEWATER TREATMENT BY MEANS OF ELECTROCHEMICAL METHOD

Şule CAMCIOĞLU

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

Supervisor: Prof. Dr. Hale HAPOĞLU

Wastewater treatment by means of electrocoagulation is influenced by many factors such as electrode layout and material, current intensity, treatment time, pH, temperature and electrical conductivity. Optimization studies in literature were performed with adjustment of initial values of the factors. Considering the variations of operating parameters with time, these applications may reveal misleading results. In this study MIMO PID, GPC and GMV controls of electrical conductivity, pH and temperature were performed, GMV was chosen as the optimum controller by evaluation of performance criteria. COD, color, turbidity and TSS removal and energy consumption are obtained as 34.58 %, 96.56 %, 99.23 %, 96.43 % and 128.25 kWh/kg COD respectively while electrical conductivity, pH and temperature were not controlled. In comparison with uncontrolled case SISO control of pH increased COD removal by 9.12 %. In addition to that, SISO control of electrical conductivity decreased energy consumption by 33.81 %. MIMO GMV control increased COD removal by 9.96 % and decreased energy consumption by 37.49 % compared with uncontrolled case. A CCD of 6 factors with 5 levels was applied to the system under controlled conditions. In order to reach maximum pollutant removal and minimum energy consumption goal via RSM, optimum operating conditions of electrode material, electrical conductivity, pH, temperature, current intensity and treatment time were obtained using mathematical models fitted with multiple regression as aluminum, 2.72 mS/cm, 5.82, 22.5°C, 1.22 A, 10.8 min respectively for COD, color, turbidity, TSS removal efficiencies and energy consumption responses. COD, color, turbidity, TSS removal efficiencies and energy consumption were found as 42.21 %, 100 %, 98.61 %, 97.06 % and 8.82 kWh/kg COD respectively at optimum operation conditions under control. Application of both conventional and advanced control methods to paper industry wastewater treatment by means of electrocoagulation and determination of optimum operational parameters using RSM under controlled conditions are practised for the first time in the literature. Improved pollutant removal and reduced energy consumption are achieved under controlled conditions.

March 2016, 263 pages

Key Words: Electrocoagulation, wastewater treatment, process control, central composite design, response surface methodology, optimization

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

2007 yılında yüksek lisans çalışmamla başlayan bu uzun yolculukta doktora çalışmamı da engin bilgi birikimi ve deneyimleri ile zenginleştiren, karşılaştığım sorunlarda desteğini ve sıcacık yaklaşımını bir an bile esirgemeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Hale HAPOĞLU'na (Ankara Üniversitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı) teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım boyunca paylaştığı bilgi ve deneyimleri ile desteğini hissettiren, çalışmamı farklı bir disiplin çerçevesinde değerlendirmemi sağlayan değerli hocam TİK jüri üyesi Doç. Dr. Kamran POLAT'a (Ankara Üniversitesi Kimya Anabilim Dalı), farklı bakış açıları ve bilgi birikimi ile ufkumu genişleten, ihtiyaç duyduğumda kapısını çalarak kendisine her konuda danışabileceğimi içten hissettiren değerli hocam TİK jüri üyesi Yrd. Doç. Dr. Suna ERTUNÇ'a (Ankara Üniversitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı) çok teşekkür ederim.

Çalışmalarımın başlangıcında tam da atık su temininin bir çıkmaza dönüştüğünü düşünürken yardımlarıyla tezime büyük katkı sağlayan Kemal UYAR'a ve deneysel çalışmalarım sırasında ihtiyaç duyduğum her an hiç tereddüt etmeden verdiği lojistik destek için Bahadır ÖZYURT'a çok teşekkür ederim.

Doktora çalışmam süresince bana başarı bursu ile maddi destek veren TÜBİTAK BİDEB'e çok teşekkür ederim. Bu doktora çalışması Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü tarafından 12A4240002 ve 14L0443005 numaralı projeler kapsamında desteklenmiştir. Bu destek için Ankara Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü'ne çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince karşılaştığım bütün zorluklarda beni cesaretlendiren, umutsuzluğa düştüğüm en sıkıntılı zamanlarda bile çalışmayı keyifli hale getiren, enerjisi ile en yoğun dönemlerde dahi zevkli çalışma ortamının oluşması için uğraşan, desteğini, güvenini ve fedakarlıklarını asla unutamayacağım Arş. Gör. Baran ÖZYURT'a (Ankara Üniversitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı) çok teşekkür ederim.

Hayatımın her döneminde desteklerini ve güvenlerini derinden hissettiğim, sevinçlerimde benden çok sevinen, üzüntülerime ortak olarak sıkıntılarımı hafifleten, her zaman olduğu gibi bu çalışmam esnasında da bana sevgileriyle moral veren, bu gün bu konuma gelebilmemdeki emeklerini asla ödeyemeyeceğim canım annem, canım babam, canım ablam ve canım enişteme sonsuz teşekkür ederim.

Şule CAMCIOĞLU
Ankara, Mart 2016

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI	
ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iv
SİMGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ..	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ÖZETLERİ	5
2.1 Kağıt Endüstrisi Atık Sularının Kaynak, Miktar ve Özellikleri	5
2.1.1 Hammadde hazırlamadan kaynaklanan atık sular	6
2.1.2 Kağıt hamuru üretiminden kaynaklanan atık sular.....	7
2.1.3 Ağartma işleminden kaynaklanan atık sular	7
2.1.4 Kağıt-karton üretiminden kaynaklanan atık sular.....	8
2.2 Kağıt Endüstrisi Atık Sularındaki Kirlilik Parametreleri.....	8
2.2.1 Biyokimyasal oksijen ihtiyacı.....	8
2.2.2 Kimyasal oksijen ihtiyacı.....	10
2.2.3 Bulanıklık.....	12
2.2.4 Renk.....	13
2.2.5 Askıda katı maddeler	13
2.3 Kağıt Endüstrisi Atık Sularının Alıcı Ortama Deşarj Standartları.....	13
2.4 Elektrokoagülasyon Yöntemi ile Atık Su Arıtımı	16
2.4.1 Elektrokoagülasyonu etkileyen parametreler	19
2.4.1.1 Elektrokoagülasyon üzerine akım yoğunluğunun etkisi	19
2.4.1.2 Elektrokoagülasyon üzerine destek elektrolit derişiminin etkisi.....	19
2.4.1.3 Elektrokoagülasyon üzerine pH'nin etkisi	20
2.4.1.4 Elektrokoagülasyon üzerine sıcaklığın etkisi	23
2.4.1.5 Elektrokoagülasyon üzerine sürenin etkisi.....	24
2.4.2 Elektrokoagülasyonun değerlendirilmesinde kullanılan genel kavramlar	24
2.4.3 Elektrot bağlantı şekilleri	25
2.5 Sistem Tanımlama.....	27
2.5.1 Sistem modelleri	27
2.5.2 Sinyal ve sistem modellerinin birleştirilmesi	28
2.5.3 Model parametrelerinin en küçük kareler yöntemi ile hesaplanması	32
2.5.4 Model parametrelerinin yinelemeli en küçük kareler yöntemi ile hesaplanması.....	35
2.6 Dijital PID Kontrol Ediciler	38
2.7 Kutup Yerleştirme	40
2.8 Genelleştirilmiş Minimum Varyans Kontrol.....	42
2.9 Genelleştirilmiş Öngörmeli Kontrol.....	49
2.9.1 GPC kontrol tasarım parametrelerinin seçilmesi	56
2.10 Kontrol Edici Performans Kriterleri	57

2.11 Simulinkte S-Function Yazımı ve Kontrol Algoritmalarının Oluşturulması.....	58
2.12 Cevap Yüzey Yöntemi.....	59
2.12.1 Cevap yüzey yöntemi teorisi ve basamakları	59
2.12.2 Deneyisel tasarımın seçimi.....	60
2.12.3 Verilerin matematiksel ve istatistiksel olarak değerlendirilmesi.....	61
2.12.4 Modelin uygunluğunun değerlendirilmesi.....	62
2.12.5 En uygun koşulların belirlenmesi.....	65
2.12.6 Merkezi bileşik deney tasarımı	67
2.13 MINITAB 17 Yazılımı Kullanım Basamakları	68
2.13.1 MINITAB 17 yazılımı ile deney tasarımı yapılması ve elde edilen sonuçların değerlendirilmesi.....	68
2.13.2 MINITAB 17 yazılımı ile sonuçların çizimi	73
2.13.3 MINITAB 17 yazılımı ile parametrelerin en uygun değerlerinin bulunması	77
2.14 Kesikli Reaktörde Tepkime Kinetiğinin İncelenmesi	79
2.15 Kaynak Araştırması.....	81
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	88
3.1 Materyal.....	88
3.1.1 Deney Sistemi.....	88
3.1.2 Tasarlanan simulink modeli.....	90
3.1.3 Kullanılan kağıt endüstrisi atık suyunun özellikleri.....	94
3.2 Yöntem	94
3.2.1 Dinamik çalışmalar	94
3.2.2 Sistem tanımlama çalışmaları	95
3.2.3 Kontrol çalışmaları	95
3.2.3.1 Kutup yerleştirme ile PID parametrelerinin belirlenmesi	96
3.2.4 Optimizasyon çalışmaları	96
3.2.5 Kinetik çalışmaları	98
3.3 Analizler	98
3.3.1 Kimyasal oksijen ihtiyacı.....	98
3.3.2 Renk.....	101
3.3.3 Bulanıklık.....	102
3.3.4 Askıda katı madde	102
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	103
4.1 Kalibrasyon Çalışmaları.....	103
4.1.1 Elektriksel iletkenlik ve pH ölçer kalibrasyonları	103
4.1.2 Sıcaklık ölçer kalibrasyonu	104
4.1.3 Pompa kalibrasyonları	104
4.2 Kontrolsüz Koşulda Arıtım Çalışması	105
4.3 Dinamik ve Sistem Tanımlama Çalışmaları.....	107
4.3.1 Elektriksel iletkenlik, sıcaklık ve pH'nin dinamik analizi	107
4.3.2 Elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklık için sistem modelinin belirlenmesi.....	109
4.4 Kontrol Çalışmaları	112
4.4.1 PID kontrol çalışmaları	112
4.4.1.1 Kutup yerleştirme ile en uygun kontrol edici parametrelerinin belirlenmesi.....	112

4.4.1.2 Elektriksel iletkenliğin PID kontrolü	113
4.4.1.3 Sıcaklığın PID kontrolü	114
4.4.1.4 pH'nin PID kontrolü	117
4.4.2 GPC kontrol çalışmaları	119
4.4.2.1 Elektriksel iletkenliğin GPC kontrolü	119
4.4.2.2 pH'nin GPC kontrolü	121
4.4.2.3 Sıcaklığın GPC kontrolü	122
4.4.3 GMV kontrol çalışmaları	125
4.4.3.1 Elektriksel iletkenliğin GMV kontrolü	125
4.4.3.2 pH'nin GMV kontrolü	127
4.4.3.3 Sıcaklığın GMV kontrolü	129
4.4.3.4 Elektriksel iletkenliğin adaptif GMV kontrolü	129
4.4.3.5 pH'nin adaptif GMV kontrolü	131
4.4.4 En uygun kontrol edicinin belirlenmesi	133
4.4.5 SISO ve MIMO kontrol çalışmalarının karşılaştırılması	144
4.4.6 Değişken set noktasında kontrol edici etkinliğinin incelenmesi	149
4.5 Cevap Yüzey Yöntemi ile En Uygun İşletim Koşullarının Belirlenmesi	151
4.5.1 Karıştırma hızının kirletici giderimine etkisi	152
4.5.2 Merkezi bileşik tasarım yöntemi ile deneylerin planlanması	153
4.5.3 Alüminyum elektrotlar ile yapılan merkezi bileşik tasarım çalışmalarının sonuçları	154
4.5.3.1 KOİ gideriminin istatistiksel analizi	154
4.5.3.2 Renk gideriminin istatistiksel analizi	158
4.5.3.3 Bulanıklık gideriminin istatistiksel analizi	160
4.5.3.4 AKM gideriminin istatistiksel analizi	162
4.5.3.5 Enerji tüketiminin istatistiksel analizi	165
4.5.4 Demir elektrotlar ile yapılan merkezi bileşik tasarım çalışmalarının sonuçları	167
4.5.4.1 KOİ gideriminin istatistiksel analizi	167
4.5.4.2 Renk gideriminin istatistiksel analizi	170
4.5.4.3 Bulanıklık gideriminin istatistiksel analizi	172
4.5.4.4 AKM gideriminin istatistiksel analizi	175
4.5.4.5 Enerji tüketimi istatistiksel analizi	177
4.5.5 En uygun işletim koşullarının belirlenmesi	180
4.5.6 En uygun işletim koşullarında kontrollü ve kontrolsüz arıtım çalışmaları	182
4.6 Reaksiyon Kinetiğinin İncelenmesi	188
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	192
KAYNAKLAR	202
EKLER	209
EK 1 PID pH kontrol algoritması	210
EK 2 GPC pH kontrol algoritması	213
EK 3 GMV pH kontrol algoritması	221
EK 4 Adaptif GMV pH kontrol algoritması	226
EK 5 % 95 güven seviyesi için F dağılımı çizelgesi	243
EK 6 YEKK algoritması	244
EK 7 Kutup yerleştirme arayüz programı	246

EK 8 Alüminyum elektrotlarla yapılan optimizasyon çalışmalarında KOİ giderimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri.....	250
EK 9 Alüminyum elektrotlarla yapılan optimizasyon çalışmalarında renk giderimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri	251
EK 10 Alüminyum elektrotlarla yapılan optimizasyon çalışmalarında bulanıklık giderimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri	252
EK 11 Alüminyum elektrotlarla yapılan optimizasyon çalışmalarında AKM giderimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri.....	253
EK 12 Alüminyum elektrotlarla yapılan optimizasyon çalışmalarında enerji tüketimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri.....	254
EK 13 Demir elektrotlarla yapılan optimizasyon çalışmalarında KOİ giderimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri.....	255
EK 14 Demir elektrotlarla yapılan optimizasyon çalışmalarında renk giderimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri.....	256
EK 15 Demir elektrotlarla yapılan optimizasyon çalışmalarında bulanıklık giderimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri.....	257
EK 16 Demir elektrotlarla yapılan optimizasyon çalışmalarında AKM giderimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri.....	258
EK 17 Demir elektrotlarla yapılan optimizasyon çalışmalarında enerji tüketimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri.....	259
ÖZGEÇMİŞ.....	260

SİMGELER DİZİNİ

A, B, C	Kesikli zaman girdi-çıkı modelinde yer alan polinomlar
D, E, F	Kesikli zaman girdi-çıkı modelinde yer alan polinomlar
G, H, P	Kesikli zaman girdi-çıkı modelinde yer alan polinomlar
Q, R, S	Kesikli zaman girdi-çıkı modelinde yer alan polinomlar
A/D	Analog-dijital çevirici
C_i	i bileşeninin derişimi
c_p	Merkez noktadaki tekrar deneyi sayısı
d	Ofset
D/A	Dijital-analog çevirici
e(t)	Gürültü
E_A	Aktivasyon enerjisi
F	Faraday sabiti
I	Akım şiddeti
IAE	Hata mutlak değeri integrali
ISE	Hata karesi integrali
ITAE	Zaman ağırlıklı mutlak hata integrali
ITSE	Zaman ağırlıklı hata karesi integrali
J	Maliyet fonksiyonu
k	Tepkime hız sabiti
K	Denge sabiti
K_c	Kontrol kazancı
k_0	Arrhenius sabiti
$KO\dot{I}_0$	Başlangıç $KO\dot{I}$ değeri
$KO\dot{I}_t$	t anında $KO\dot{I}$ değeri
m	Tasarımdaki toplam seviye sayısı
m_{teorik}	Anot elektrottaki teorik çözünme miktarı
$m_{deneyisel}$	Anot elektrottaki deneysel çözünme miktarı
M	Metal veya hidroksit iyonunun moleküler ağırlığı
MS_{lof}	Uyum eksikliğinin kareleri ortalaması
MS_{pe}	Saf hatanın kareler ortalaması
MS_{reg}	Regresyonun kareler ortalaması
MS_{res}	Artıkların kareler ortalaması
n	Deney sayısı
n_a, n_b	ARMAX model mertebesi
N_1	Minimum tahmin ufku
N_2	Maksimum tahmin ufku
N_U	Kontrol ufku
p	Parametre sayısı
P(t)	Kovaryans matris
r(t)	Set noktası
r_i	i bileşeninin tepkime hızı
R	Fark işleci
R^2	Kararılık katsayısı
R_g	İdeal gaz sabiti
R(t)	Zamanla değışen ofset

S_{elektrot}	Etkin elektrot yüzey alanı
$s(t)$	Sisteme etki eden sinyal
SS_{lof}	Uyum eksikliğine bağlı kareler toplamı
SS_{pe}	Saf hataya bağlı kareler toplamı
SS_{reg}	Regresyona bağlı kareler toplamı
SS_{res}	Artıklardan kaynaklanan kareler toplamı
SS_{top}	Tüm sapmaların kareleri toplamı
t	Zaman
T	Karakteristik eşitlik
$u(t)$	Ayarlanabilen değişken
$v(t)$	Ölçülebilen kaynaktan gelen sinyal
V_{lof}	Uyum eksikliğinden kaynaklı değişim
V_{pe}	Saf hataya bağlı değişim
V_{reg}	Regresyondan kaynaklı değişim
V_{res}	Artığa bağlı değişim
V_m	Ortalama potansiyel farkı
V_E	Elektrolit hacmi
x	Faktör
$x(t)$	Ara değişken
y	Cevap
$\bar{y}$	Cevapların ortalaması
$\bar{y}_i$	Aynı deney koşullarında tekrarlanan cevapların ortalaması
y_{ij}	Bağımsız seviyedeki tekrar deneylerinin değeri
$\hat{y}_i$	i seviyesi için model tarafından tahmin edilen değer
$\hat{y}(t)$	Modelden elde edilen çıkış değişkeni
Y	Çıkış değişkeni vektörü
z	Aktarılan elektron sayısı

Kısaltmalar

AKM	Askıda Katı Madde
ANOVA	Değişim Analizi
ARIMA	Auto Regressive Integrated Moving Average
ARIMAX	Auto Regressive Integrated Moving Average with eXogenous
ARMA	Auto Regressive Moving Average
ARMAX	Auto Regressive Moving Average with eXogenous
BOİ ₅	Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı
CYY	Cevap Yüzey Yöntemi
EKK	En Küçük Kareler Yöntemi
GMV	Genelleştirilmiş Minimum Varyans
GPC	Genelleştirilmiş Öngörmeli Kontrol
KHP	Potasyum Hidrojen Ftalat
KOİ	Kimyasal Oksijen İhtiyacı
MBT	Merkezi Bileşik Tasarım
MIMO	Çok Girdili-Çok Çıktılı Sistem

MV	Minimum Varyans
PID	Oransal-İntegral-Türevsel Kontrol
SISO	Tek Girdili-Tek Çıktılı Sistem
STPID	Kendinden Ayarlamalı Oransal-İntegral-Türevsel Kontrol
YEKK	Yinelemeli En Küçük Kareler Yöntemi
ZSF	Zehirlilik Seyreltme Faktörü

Yunan Harfleri

Δ	Fark işleci
φ	Veri vektörü
φ^T	Veri vektörünün devriği
θ	Parametre vektörü
θ^T	Parametre vektörünün devriği
ϕ	Ardışık veri vektörü
ϕ^T	Ardışık veri vektörü
$\hat{\theta}$	Tahmin edilen parametre matrisi
$\varepsilon(t)$	Hata değişkeni
τ_I	İntegral zaman sabiti
τ_D	Türevsel zaman sabiti
Δt	Örnekleme zamanı
Ξ	Beklenti
λ	Kontrol ağırlık faktörü
β	RSM parametre vektörü
β_0	Sabit terim
β_i	Doğrusal parametrelerin katsayıları
β_{ij}	Etkileşimli parametrelerin katsayıları
β_{ii}	İkinci mertebeden parametrelerin katsayıları
ϵ	Deneylerle ilişkili artık

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	Elektrokoagülasyonun oluşum mekanizması.....	17
Şekil 2.2	Sulu ortamda oluşan alüminyum kompleksleri ve pH ilişkisi (Koby vd. 2008)	22
Şekil 2.3	Sulu ortamda oluşan demir kompleksleri ve pH ilişkisi (Koby vd. 2008)	23
Şekil 2.4	Elektrot bağlantı şekilleri (Mollah vd. 2001).....	26
Şekil 2.5	Sistem yalancı-çıkışının blok diyagramı (Özyurt 2012).....	43
Şekil 2.6	Model öngörmeli kontrol yöntemi (Boyacıoğlu 2013).....	50
Şekil 2.7	İki değişkenli optimizasyona ait ikinci mertebeden model kullanılarak oluşturulan yüzey cevap profilleri.....	66
Şekil 2.8	Optimizasyon için MBT.....	67
Şekil 2.9	MINITAB 17 giriş penceresi ve deney tasarım sekmeleri.....	68
Şekil 2.10	MBT seçenekleri	69
Şekil 2.11	Sonuç tablosu seçim menüsü	69
Şekil 2.12	Faktör seviyesi belirleme menüsü.....	69
Şekil 2.13	Tasarım ekranı.....	70
Şekil 2.14	Tasarım ekranına cevapların işlenmesi ve analizi.....	70
Şekil 2.15	Sonuçların birimlerinin seçimi.....	71
Şekil 2.16	Model terimlerinin seçimi	71
Şekil 2.17	Güven seviyesinin seçimi.....	72
Şekil 2.18	Analiz sonuçlarının gösteriminin seçilmesi	72
Şekil 2.19	Örnek ANOVA tablosu görünümü	73
Şekil 2.20	Grafik çizim menüsünün seçimi	74
Şekil 2.21	Çizilecek grafik türünün seçimi	74
Şekil 2.22	Grafik gösterimlerinin ayarlanması	75
Şekil 2.23	Kontur grafiklerinin görüntü ayarları.....	75
Şekil 2.24	Faktörlerin sabit değerlerinin seçimi.....	76
Şekil 2.25	Örnek kontur ve yüzey grafikleri görünümü.....	76
Şekil 2.26	Optimizasyon menüsünün seçimi	77
Şekil 2.27	Optimizasyon yapılacak cevapların seçimi.....	77
Şekil 2.28	Optimizasyon hedeflerinin belirlenmesi	78
Şekil 2.29	Optimizasyon sonuçları.....	78
Şekil 2.30	Hız denkleminin deney verilerine uygunluğunun test edilmesi.....	80
Şekil 2.31	Arrhenius ilişkisine göre tepkimenin sıcaklığa bağlılığı.....	81
Şekil 3.1	Elektrokoagülasyon deney sistemi.....	89
Şekil 3.2	Deney sisteminin şematik gösterimi	90
Şekil 3.3	Elektrokoagülasyon yöntemi ile atık su arıtımı için tasarlanan simulink modeli.....	93
Şekil 3.4	Kutup yerleştirme ara yüzü	97
Şekil 3.5	KOI analizi kalibrasyon doğrusu	100
Şekil 3.6	Renk analizi kalibrasyon doğrusu	101
Şekil 4.1	Elektriksel iletkenlik değerine karşı bilgisayar sinyali değişimi	103
Şekil 4.2	pH değerine karşı bilgisayar sinyali değişimi	103
Şekil 4.3	Destek elektrolit pompası için gösterge değerine karşı bilgisayar sinyali değişimi	104

Şekil 4.4	Asit pompası için gösterge değerine karşı bilgisayar sinyali değişimi	105
Şekil 4.5	Baz pompası için gösterge değerine karşı bilgisayar sinyali değişimi.....	105
Şekil 4.6	Elektrokoagülasyon yöntemi ile atık su arıtımında kontrolsüz durumda elektriksel iletkenlik, sıcaklık, pH ve potansiyel farkının değişimi	106
Şekil 4.7	Destek elektrolit akış hızına 0 mL/dk'dan 4.4 mL/dk'ya basamak etki verildiğinde elektriksel iletkenliğin zamanla değişimi	108
Şekil 4.8	Soğutma suyu vana konumuna 0'dan 1'e basamak etki verildiğinde sıcaklığın zamanla değişimi	108
Şekil 4.9	Asit ve baz akış hızlarına basamak etki verildiğinde pH'nin zamanla değişimi	109
Şekil 4.10	Basamak etki ile elektriksel iletkenliğin değişimi kullanılarak YEKK ile model parametrelerinin belirlenmesi	110
Şekil 4.11	Basamak etki ile sıcaklığın değişimi kullanılarak YEKK ile model parametrelerinin belirlenmesi.....	110
Şekil 4.12	Pulse ve basamak etki ile pH'nin değişimi kullanılarak YEKK ile model parametrelerinin belirlenmesi.....	111
Şekil 4.13	Sistemin kutupları	113
Şekil 4.14	İletkenliğin PID kontrolü	115
Şekil 4.15	Sıcaklığın PID kontrolü	116
Şekil 4.16	pH'nin PID kontrolü	118
Şekil 4.17	İletkenliğin GPC kontrolü	120
Şekil 4.18	pH'nin GPC kontrolü	123
Şekil 4.19	Sıcaklığın GPC kontrolü	124
Şekil 4.20	İletkenliğin GMV kontrolü	126
Şekil 4.21	pH'nin GMV kontrolü	128
Şekil 4.22	Sıcaklığın GMV kontrolü.....	130
Şekil 4.23	İletkenliğin adaptif GMV kontrolü	132
Şekil 4.24	İletkenliğin adaptif GMV kontrolünde parametrelerin zamanla değişimi	133
Şekil 4.25	pH'nin adaptif GMV kontrolü	134
Şekil 4.26	pH'nin adaptif GMV kontrolünde parametrelerin zamanla değişimi	135
Şekil 4.27	Kontrolsüz durumda arıtım çalışması	137
Şekil 4.28	Elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın PID kontrolü	138
Şekil 4.29	Elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın GPC kontrolü.....	139
Şekil 4.30	Elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın GMV kontrolü	140
Şekil 4.31	Elektriksel iletkenlik ve pH'nin adaptif GMV kontrolü	141
Şekil 4.32	SISO GMV elektriksel iletkenlik kontrolü	145
Şekil 4.33	SISO GMV pH kontrolü	146
Şekil 4.34	SISO GMV sıcaklık kontrolü.....	147
Şekil 4.35	pH'nin değişken set noktalı PID kontrolü.....	150
Şekil 4.36	pH'nin değişken set noktalı GPC kontrolü	150
Şekil 4.37	pH'nin değişken set noktalı GMV kontrolü.....	151
Şekil 4.38	pH'nin değişken set noktalı adaptif GMV kontrolü.....	151
Şekil 4.39	Karıştırma hızının kirletici giderimine etkisi	153
Şekil 4.40	Alüminyum elektrotlarla KOİ giderimi için deney sonuçları ve modelden tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması	158

Şekil 4.41 Alüminyum elektrotlarla renk giderimi için deney sonuçları ve modelden tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması	160
Şekil 4.42 Alüminyum elektrotlarla bulanıklık giderimi için deney sonuçları ve modelden tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması	162
Şekil 4.43 Alüminyum elektrotlarla AKM giderimi için deney sonuçları ve modelden tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması	164
Şekil 4.44 Alüminyum elektrotlarla enerji tüketimi için deney sonuçları ve modelden tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması	167
Şekil 4.45 Demir elektrotlarla KOİ giderimi için deney sonuçları ve modelden tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması	171
Şekil 4.46 Demir elektrotlarla renk giderimi için deney sonuçları ve modelden tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması	173
Şekil 4.47 Demir elektrotlarla bulanıklık giderimi için deney sonuçları ve modelden tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması	175
Şekil 4.48 Demir elektrotlarla AKM giderimi için deney sonuçları ve modelden tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması	177
Şekil 4.49 Demir elektrotlarla enerji tüketimi için deney sonuçları ve modelden tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması	180
Şekil 4.50 Alüminyum elektrotlarla yapılan çalışmaya ait optimizasyon sonuçları	181
Şekil 4.51 Demir elektrotlarla yapılan çalışmaya ait optimizasyon sonuçları	182
Şekil 4.52 Alüminyum elektrotlar ile en uygun işletim koşullarında gerçekleştirilen kontrollü arıtım çalışması	185
Şekil 4.53 Alüminyum elektrotlar ile en uygun işletim koşullarında gerçekleştirilen kontrolsüz arıtım çalışması	186
Şekil 4.54 Demir elektrotlar ile en uygun işletim koşullarında gerçekleştirilen kontrollü arıtım çalışması	187
Şekil 4.55 Demir elektrotlar ile en uygun işletim koşullarında gerçekleştirilen kontrolsüz arıtım çalışması	188
Şekil 4.56 En uygun işletme koşulları ve farklı sıcaklıklarda KOİ değerlerinin zamanla değişimi	189
Şekil 4.57 Farklı sıcaklıklar için yalancı birinci mertebeden tepkime hızı varsayımı	190
Şekil 4.58 Farklı sıcaklıklar için yalancı ikinci mertebeden tepkime hızı varsayımı	190
Şekil 4.59 Yalancı ikinci mertebe tepkime hız sabitinin sıcaklıkla değişimi	191

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1	Kağıt hamuru ve kağıt endüstrisinde çeşitli kaynaklardan gelen kirlilikler (Pokhrel ve Viraraghavan 2004).....	5
Çizelge 2.2	Kağıt endüstrisinde çeşitli üretim kademeleri için su kullanımı ve kirlilik yükleri (Leblebici 1995).....	6
Çizelge 2.3	Yarı selüloz üretimi atık suları deşarj standartları	14
Çizelge 2.4	Hurda kağıt, saman ve kağıttan ağartılmamış selüloz üretimi atık suları deşarj standartları	14
Çizelge 2.5	Ağartılmış selüloz üretimi atık suları deşarj standartları	14
Çizelge 2.6	Saf selüloz üretimi atık suları deşarj standartları	14
Çizelge 2.7	Nişasta katkısız kağıt atık suları deşarj standartları	15
Çizelge 2.8	Nişasta katkılı kağıt atık suları deşarj standartları	15
Çizelge 2.9	Saf selülozdan elde edilen çok ince dokulu kağıt atık suları deşarj standartları.....	15
Çizelge 2.10	Yüzey kaplamalı, dolgulu kağıt atık suları deşarj standartları.....	15
Çizelge 2.11	% 5 ten fazla odun lifleri ihtiva eden ancak kırıntı kağıt yüzdesi yüksek olmayan kağıt atık suları deşarj standartları	15
Çizelge 2.12	Kırıntı kağıttan imal edilen kağıt atık suları deşarj standartları.....	15
Çizelge 2.13	Parşömen kağıdı atık suları deşarj standartları	16
Çizelge 2.14	Çoklu regresyon kullanılarak deneysel verilerin matematiksel modele uydurulması için ANOVA	63
Çizelge 3.1	Çalışılan kağıt endüstrisi atık suyunun özellikleri	94
Çizelge 4.1	Elektriksel iletkenlik, sıcaklık ve pH için ARMAX model parametreleri	111
Çizelge 4.2	Sıcaklık, elektriksel iletkenlik ve pH için sistemin kutupları ve kontrol edici parametreleri	112
Çizelge 4.3	Elektriksel iletkenlik için gerçekleştirilen GPC çalışmaları sonucunda elde edilen performans kriteri değerleri.....	119
Çizelge 4.4	pH için gerçekleştirilen GPC çalışmaları sonucunda elde edilen performans kriteri değerleri	121
Çizelge 4.5	Sıcaklık için gerçekleştirilen GPC çalışmaları sonucunda elde edilen performans kriteri değerleri.....	122
Çizelge 4.6	Elektriksel iletkenlik için gerçekleştirilen GMV kontrol çalışmaları sonucunda elde edilen performans kriteri değerleri	125
Çizelge 4.7	pH için gerçekleştirilen GMV kontrol çalışmaları sonucunda elde edilen performans kriteri değerleri	127
Çizelge 4.8	Sıcaklık için gerçekleştirilen GMV kontrol çalışmaları sonucunda elde edilen performans kriteri değerleri.....	129
Çizelge 4.9	pH için gerçekleştirilen adaptif GMV kontrol çalışmaları sonucunda elde edilen performans kriteri değerleri.....	131
Çizelge 4.10	Elektriksel iletkenlik kontrolü için performans kriterleri	142
Çizelge 4.11	pH kontrolü için performans kriterleri	142
Çizelge 4.12	Sıcaklık kontrolü için performans kriterleri.....	142
Çizelge 4.13	Elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklık kontrolleri için kirlilik giderimleri ve enerji tüketimleri	143
Çizelge 4.14	SISO GMV çalışmaları için performans kriterleri.....	147

Çizelge 4.15 SISO GMV çalışmaları için kirlilik giderimleri ve enerji tüketimleri	148
Çizelge 4.16 pH'nin değişken set noktalı kontrol çalışmaları için performans kriterleri.....	149
Çizelge 4.17 MBT ile yapılan deney planında elektrokoagülasyon prosesinin işletim aralıkları	153
Çizelge 4.18 Alüminyum elektrotlar için MBT ve cevapları.....	155
Çizelge 4.19 Alüminyum elektrotlarla KOİ giderimi için tahmin edilen model katsayıları ve bu katsayıların F ve P değerleri	156
Çizelge 4.20 Alüminyum elektrotlarla KOİ giderimi için ANOVA	157
Çizelge 4.21 Alüminyum elektrotlarla renk giderimi için tahmin edilen model katsayıları ve bu katsayıların F ve P değerleri	159
Çizelge 4.22 Alüminyum elektrotlarla renk giderimi için ANOVA	159
Çizelge 4.23 Alüminyum elektrotlarla bulanıklık giderimi için tahmin edilen model katsayıları ve bu katsayıların F ve P değerleri	161
Çizelge 4.24 Alüminyum elektrotlarla bulanıklık giderimi için ANOVA.....	162
Çizelge 4.25 Alüminyum elektrotlarla AKM giderimi için tahmin edilen model katsayıları ve bu katsayıların F ve P değerleri	163
Çizelge 4.26 Alüminyum elektrotlarla AKM giderimi için ANOVA.....	164
Çizelge 4.27 Alüminyum elektrotlarla enerji tüketimi için tahmin edilen model katsayıları ve bu katsayıların F ve P değerleri	166
Çizelge 4.28 Alüminyum elektrotlarla enerji tüketimi için ANOVA	166
Çizelge 4.29 Demir elektrotlar için MBT ve cevapları.....	168
Çizelge 4.30 Demir elektrotlarla KOİ giderimi için tahmin edilen model katsayıları ve bu katsayıların F ve P değerleri	169
Çizelge 4.31 Demir elektrotlarla KOİ giderimi için ANOVA	170
Çizelge 4.32 Demir elektrotlarla renk giderimi için tahmin edilen model katsayıları ve bu katsayıların F ve P değerleri	172
Çizelge 4.33 Demir elektrotlarla renk giderimi için ANOVA	172
Çizelge 4.34 Demir elektrotlarla bulanıklık giderimi için tahmin edilen model katsayıları ve bu katsayıların F ve P değerleri	174
Çizelge 4.35 Demir elektrotlarla bulanıklık giderimi için ANOVA	174
Çizelge 4.36 Demir elektrotlarla AKM giderimi için tahmin edilen model katsayıları ve bu katsayıların F ve P değerleri.....	176
Çizelge 4.37 Demir elektrotlarla AKM giderimi için ANOVA.....	177
Çizelge 4.38 Demir elektrotlarla enerji tüketimi için tahmin edilen model katsayıları ve bu katsayıların F ve P değerleri	179
Çizelge 4.39 Demir elektrotlarla enerji tüketimi için ANOVA	179
Çizelge 4.40 Alüminyum elektrotlar ile en uygun işletim koşullarında gerçekleştirilen arıtım çalışmalarından elde edilen kirlilik giderimleri ve enerji tüketimleri	183
Çizelge 4.41 Demir elektrotlar ile en uygun işletim koşullarında gerçekleştirilen arıtım çalışmalarından elde edilen kirlilik giderimleri ve enerji tüketimleri	184
Çizelge 4.42 Yalancı birinci ve ikinci mertebeden tepkime hızı varsayımları için farklı sıcaklıklarda tepkime hız sabitleri ve kararlılık katsayıları	190

1. GİRİŞ

Kağıt endüstrisinde üretim ile birlikte açığa çıkan su miktarı ve kirlilik yükü diğer endüstri kollarına oranla oldukça fazladır. Kağıt endüstrisi atık sularının arıtımında en çok kullanılan yöntemler adsorpsiyon (Das ve Patnaik 2000, Shawwa vd. 2001), kimyasal oksidasyon (Verenich vd. 2000, Hassan ve Hawkyard 2002) ve biyokimyasal (Rajeshwari vd. 2000, Raj vd. 2007) yöntemlerdir. Düşük biyobozunurluğu sebebiyle kağıt endüstrisi atık sularının biyokimyasal yöntemlerle etkin bir şekilde arıtılması mümkün olamamaktadır. Diğer taraftan kimyasal yöntemlerde, ayrıca arıtılması gereken önemli miktarda çamur oluşmaktadır. Kağıt endüstrisi atık sularında askıda katı maddelerin (AKM) ve kolloidal parçacıkların varlığı nedeniyle oluşan bulanıklık filtrasyon ve dinlendirme (Terrazas vd. 2010) gibi geleneksel yöntemlerle giderilememektedir. Bu dezavantajlardan dolayı kağıt endüstrisi atık sularının arıtımında elektrokimyasal yöntemlerin kullanımına olan ilgi artmaktadır. Elektrokoagülasyon yönteminin renk ve kolloidal parçacıkların giderilmesinde etkili olduğu kanıtlanmıştır (Hernandez vd. 2009). Geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında elektrokoagülasyon yönteminde oluşan elektrik alan yüklü en küçük kolloidal parçacıkları harekete geçirmekte ve çökme olasılıklarını arttırarak bu kirleticilerin giderimini sağlamaktadır (Mollah vd. 2004, Terrazas vd. 2010). Elektrokoagülasyon yöntemi metal elektrotların anodik çözünmesi ve eşanlı oluşan hidroksil iyonları ve hidrojen gazı ile kirleticilerin giderilmesine dayanmaktadır. Bu yöntemde kimyasal çöktürücü veya yüzdürücü eklemeksizin daha az çamur oluşturarak yüksek giderim verimi elde edilmektedir (Kalyani vd. 2009).

Elektrokoagülasyon yöntemiyle atık su arıtımı karmaşık bir süreç olup elektrot yerleşimi ve malzemesi, akım şiddeti, elektroliz süresi, pH, sıcaklık ve elektriksel iletkenlik gibi pek çok faktörden etkilenmektedir (El-Ashtoukhy vd. 2009, Zaied ve Bellakhal 2009, Sridhar vd. 2011). Sıcaklık, kirlilik giderim verimini tepkime hızları, metal hidroksitlerin çözünürlükleri, elektriksel iletkenlik ve gaz kabarcıklarının veya kolloidal parçacıkların hareketleri açısından etkilemektedir (Phalakornkule vd. 2010). Metal hidroksitlerin çökebilirliği düşük sıcaklıklarda artmakta ve bu da daha iyi bir giderim sağlamaktadır (Katal ve Pahlavanzadeh 2011). Elektriksel iletkenlik, çözeltideki iyon derişimi ve sıcaklığa bağlıdır (Mc Cleskey vd. 2012). Ohm yasasına göre elektriksel iletkenliğin

yüksek değerleri sabit akım koşulunda direnci, potansiyel farkını ve elektrokoagülasyon prosesinin enerji tüketimini düşürmektedir (Terrazas vd. 2010). Elektrokoagülasyon prosesinde atık suya daldırılmış metal elektrotlar uygulanan doğru akım ile çözelti içine çözünmekte ve bu çözünürlük çözeltinin pH'sinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Çözünen metal iyonları, uygun pH'lerde askıda katıların düzenini bozan ve onları kümeletiren veya çözünmüş kirleticileri adsorplayan ve çöktüren türler ve metal hidroksitler oluşturmaktadır (Canizares vd. 2005, Merzouk vd. 2009). 2-3 gibi düşük pH'lerde Al^{3+} ve $Al(OH)^{+2}$ gibi katyonik monomer türler baskın olmaktadır. pH 4 ile 9 arasında elektrotların çözünmesiyle oluşan Al^{3+} ve OH^- iyonları, $Al(OH)^{+2}$, $Al(OH)_2^{2+}$ gibi monomer ve $Al_6(OH)_{15}^{3+}$, $Al_7(OH)_{17}^{4+}$, $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$ gibi polimer türler oluşturarak en son olarak kompleks çökme kinetiği ile çözünmeyen amorf yapıdaki $Al(OH)_3(k)$ 'e dönüşmektedir (Bayramoglu vd. 2004). pH 10'dan yüksek olduğunda ise $Al(OH)_4^-$ monomer anyonunun derişimi artmaktadır (Alinsafi vd. 2005).

Elektrokoagülasyon yöntemi ile kağıt endüstrisi atık sularının arıtımında işletim süresince pH değerinin 1-2 birim arttığı bilinmektedir. Buna bağlı olarak sudaki çözünürlüğü yüksek iyonik bileşiklerin oluşumu giderim verimlerinde düşüşe sebep olmaktadır. Elektrokoagülasyon prosesi boyunca sıcaklıkta meydana gelen artış sudaki iyonların çözünürlüğünü arttırmakta, çöktürücü miktarını ise azaltmaktadır. Bu etkiler göz önüne alındığında arıtım süresince pH ve sıcaklığın en uygun değerlerinde tutulması bir gereklilik haline gelmektedir. Bu parametrelerin arıtım boyunca en uygun değerlerinde tutulmak amacıyla kontrol edilmesi sadece yüksek giderim verimleri sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda maliyeti düşürmekte ve güvenli işletim koşulları yaratmaktadır. Sağladığı avantajlara rağmen elektrokoagülasyon prosesinde kontrol uygulamaları hakkında yapılan çalışmaların sayısı azdır. Camcioglu vd. (2015) arıtım esnasında pH kontrol uygulamasının kağıt endüstrisi atık sularından elektrokoagülasyon yöntemi ile bulanıklık gideriminde kontrolsüz duruma göre artış sağladığını belirtmişlerdir. Demirci vd. (2015) tekstil atık sularının arıtımında pH ve iletkenliğin bulanık kontrolünü gerçekleştirmiş ve kontrolsüz duruma göre bulanıklık, renk ve KOİ giderim verimlerinde sırasıyla % 15.7, % 15.3, % 9.7 artış elde etmişlerdir.

Bu çalışmada, Zonguldak'taki 80000 ton/yıl kraft kağıt üretim kapasiteli, selüloz üretiminin de yapıldığı bir kağıt üretimi fabrikasından temin edilen kağıt endüstrisi atık sularının kesikli sistemde elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımı incelenmiştir. İletkenlik, pH ve sıcaklık parametreleri kontrol edilen değişkenler; sırasıyla destek elektrolit, asit ve baz akış hızları ve soğutma suyu akış hızı ayarlanabilen değişkenler olarak seçilmiştir. Kontrol edilen değişkenlerin dinamik analizleri sırasıyla ayarlanabilen değişkenlere basamak ve pulse etkiler verilerek gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel veriler ve yinelemeli en küçük kareler (YEKK) tahmin yöntemi kullanılarak auto regressive moving average with eXogenous (ARMAX) model parametreleri belirlenmiştir. Kontrol edilen değişkenlerin MATLAB™'da kodlanan kontrol algoritmaları kullanılarak 3 farklı yöntem ile sabit akım koşulunda tek girdili-tek çıktılı (SISO) ve çok girdili-çok çıktılı (MIMO) kontrolleri gerçekleştirilmiş, Oransal-İntegral-Türevsel (PID) kontrol edici parametreleri kutup yerleştirme yaklaşımı, Genelleştirilmiş Öngörmeli Kontrol (GPC) ve Genelleştirilmiş Minimum Varyans (GMV) kontrol parametreleri ise deneme yanılma yöntemi kullanılarak bulunmuştur. Algoritmalar, elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklık sensörlerinden alınan ölçüm sinyalleri kullanılarak ayarlanabilen değişken hareketlerinin hesaplanması ve eş anlı olarak kontrol edici çıkış sinyallerinin belirlenerek destek elektrolit, asit, baz çözelti besleme pompalarının dönme hızı ve soğutma suyu vanasının ayarlanması için gerekli sinyalleri aktarma özelliğine sahip olarak tasarlanan gerçek zamanlı bir Simulink programına yerleştirilmiştir. Parametrelerin kontrol edildiği durumda sisteme 6 faktör, 5 seviyeden oluşan merkezi bileşik tasarım (MBT) deneyleri uygulanmıştır. Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), renk, bulanıklık ve AKM giderimleri ile kg KOİ giderimi başına enerji tüketimi verilerinin cevap olarak alındığı durum için cevap yüzey yöntemi (CYY) kullanılarak en yüksek kirletici giderimleri ve en düşük enerji tüketimi hedefine erişmek için deneysel tasarımı yapılan 6 faktör olan elektriksel iletkenlik, pH, sıcaklık, süre, akım şiddeti ve elektrot materyalinin en uygun değerleri elde edilmiştir. Elektrokoagülasyon süresince giderim verimleri üzerinde sabit elektriksel iletkenlik, pH, sıcaklık ve akım şiddeti parametrelerinin etkilerinin belirlenmesi amacıyla işletme parametrelerinin en uygun değerlerinde kontrollü ve kontrolsüz deneyler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar KOİ, renk, bulanıklık ve AKM giderim verimleri ile enerji tüketimleri açısından karşılaştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında elde edilen deneysel sonuçlar MIMO kontrolün SISO kontrol ile

karşılaştırıldığında KOİ, renk, bulanıklık ve AKM giderim verimlerini arttırdığını; kontrolsüz durum ile karşılaştırıldığında ise enerji tüketimini azalttığını göstermiştir. Literatürde günümüze kadar yapılan çalışmalarda CYY uygulamaları faktörlerin başlangıç değerleri ayarlanarak gerçekleştirilmiştir. Elektrokoagülasyon prosesinin işletme parametrelerinin zamanla önemli ölçüde değişmesi göz önünde bulundurulduğunda bu durum yanıltıcı sonuçlar ortaya çıkarmaktadır. Geleneksel ve ileri kontrol yöntemlerinin kağıt endüstrisi atık sularının elektrokoagülasyonla arıtımına uygulanması ile kontrollü koşullarda CYY ile en uygun işletme parametrelerinin belirlenmesi literatürde ilk kez bu tez çalışmasında gerçekleştirilmiş, elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın kontrol edilerek arıtım süresince sabit tutulmasıyla yapılan çalışmada kontrolün uygulanmadığı duruma göre kirletici giderimlerinde artış, enerji tüketiminde düşüş sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, arıtım performansındaki artış ve işletme maliyetindeki düşüş ile yöntemin endüstriye uygulanabilirliğini daha cazip hale getirmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ÖZETLERİ

2.1 Kağıt Endüstrisi Atık Sularının Kaynak, Miktar ve Özellikleri

Kağıt hamuru ve kağıt üretimi gerek su kullanımı gerekse kirletici etkileri bakımından çevre kirlenmesine yol açan en önemli endüstrilerden biri durumundadır. Bu endüstride birim üretim başına su kullanımı, açığa çıkan su miktarları ve kirlilik yükü diğer endüstri kollarına oranla oldukça fazladır. Kağıt hamuru ve kağıt üretiminden kaynaklanan kirlenme büyük ölçüde üretimde kullanılan hammaddeler ve katkı maddeleri ile üretim prosesine bağlıdır (Leblebici 1995).

Kağıt hamuru ve kağıt üretiminde suyun kullanıldığı prosesler genel olarak hammadde hazırlama, kağıt hamuru üretimi, kağıt hamurunun ağartılması ve kağıt üretimi olup bu basamaklarda oluşan kirlilikler çizelge 2.1’de gösterilmiştir (Leblebici 1995).

Çizelge 2.1 Kağıt hamuru ve kağıt endüstrisinde çeşitli kaynaklardan gelen kirlilikler (Pokhrel ve Viraraghavan 2004)

Hammadde hazırlanması	Atık su askıda katılar, biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ ₅), kum, çakıl ve lifleri içermektedir.
Piştirme kazanı	Siyah likör lignin ve piştirme kimyasallarını içermektedir. Atık suda reçineler, yağ asitleri, renk, BOİ ₅ , KOİ, uçucu organik bileşenler (alkoller, fenoller, metanol, aseton, kloroform vb) bulunmaktadır.
Hamurun yıkanması	Atık sular yüksek pH, BOİ ₅ , KOİ ve askıda katılar içermekte olup koyu renklidir.
Hamurun ağartılması	Atık sular çözünmüş lignin, karbonhidrat, renk, KOİ, adsorplanabilir organik halojenler, klorat gibi anorganik klor bileşikler, dioksinler, furanlar, klorofenoller gibi organoklor bileşikler, aseton, metil klorür, karbondisülfür, kloroform, klorometan, triklorometan gibi UOB içermektedir.
Kağıt üretimi	Atık sular parçacıklı atıklar, organik bileşikler, anorganik boyalar, KOİ, aseton vb. içerir.

Bu proseslerde su aşağıdaki maksatlarla kullanılmaktadır (Leblebici 1995).

1. Taşıyıcı olarak (Odun su vasıtasıyla taşınmaktadır.)
2. Temizleyici olarak (Lignin vb. maddeleri kağıt hamurundan ayırırlar.)
3. Çözücü veya karıştırıcı olarak (kimyasal çözeltinin hazırlanması)

Kağıt endüstrisinde çeşitli üretim kademeleri için su kullanımı ve kirlilik yükleri çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Kağıt endüstrisinde çeşitli üretim kademeleri için su kullanımı ve kirlilik yükleri (Leblebici 1995)

Parametre	Odun hazırlama	Kağıt hamuru üretimi	Ağartma	Kağıt üretimi
Debi (m ³ /ton)	1-4	50-150	115-230	40-80
BOİ ₅ (mg/l)	60-250	1000-3500	500-1500	100-2500
AKM (mg/l)	500-2400	75-350	50-75	500-1000
Renk	50	100-1000	-	-
pH	-	7.6-9.5	4.5-8	-

2.1.1 Hammadde hazırlamadan kaynaklanan atık sular

Kağıt hamuru ve kağıt endüstrisinde kabuk soyma genellikle tamburlu sistemle gerçekleştirilir. Kabukların daha hızlı sökülebilmesi için suyla ıslatılmaları gerekir. Ancak son yıllarda tamburlu sistemlerde kuru yöntem kullanılmaya başlanmıştır. Islak yöntemle kabuk giderme prosesinde kabuk ve kıymıklar yanında tanen maddesi dışında askıda maddeler, azotlu ve fosforlu bileşikler de suda çözünmek suretiyle kirli renkli ve kokulu bir atık su oluştururlar. Buna mukabil kuru yöntemde kirlilik yükü ıslak sisteme göre daha düşüktür (Leblebici 1995).

2.1.2 Kağıt hamuru üretiminden kaynaklanan atık sular

Kağıt hamuru hazırlama atık suları siyah su, kağıt yapma kısmı atık suları ise beyaz su olarak adlandırılır. Kağıt hamuru atık suları pişirme, yıkama, ağartma, kalınlaştırma, elyaflarına ayırma işlemlerinden gelir. Bu atıklar sülfite sıvısı, ince hamur, ağartma için kullanılan kimyasal maddeler, merkaptanlar, sodyum sülfite, karbonat, hidroksiller, kağıt, kazein, kil, boyalar, yağ-gres ve elyaflar içermektedir. Kağıt yapımında meydana gelen kirliliğin büyük kısmı kağıt hamuru hazırlama proseslerinden oluşur (Şengül 1991).

Hammaddedeki selülozun saflaştırılması ile ilgili olarak ligninin alkali ortamda pişirilerek ayrılması sırasında, kullanılan yöntemle göre; değişik koyulukta kahverengi-kırmızı renkte atık sular ortaya çıkmaktadır. Geri kazanma tesislerinde kimyasalların bir kısmı geri kazanılır, ancak buna rağmen bu atık sular çoğunlukla içerdikleri lignin bileşikleri nedeniyle koyu renklidirler. Renkli maddelerin yanı sıra bir miktar da hemiselüloz, selüloz ve odun karbonhidratları içerirler. Genel olarak nötralize edildiklerinde toksik karakterde olmayan bu atık sular renk ve içerdikleri yüksek organik madde yükü nedeniyle doğaya doğrudan verilemezler (Anonim 2000).

2.1.3 Ağartma işleminden kaynaklanan atık sular

Odun hamurlaştırdıktan sonra imal edilecek kağıdın kullanılma maksadına göre ağartma işlemine gerek duyulur. Bu renk genellikle ligninden, reçineden veya yıkama işleminin yetersizliğinden dolayı pişirme likörünün hamurdan iyi ayrılamamış olmasından ileri gelmektedir (Leblebici 1995).

Ağartma yapılan tesislerde kağıt hamuru üretiminden kaynaklanan atık sulara pişirmeden gelen kirlilik yükünün yanı sıra kağıt hamurunun klor ile ağartılması sırasında ortaya çıkan uçuk saman renkli, düşük pH'li, yüksek miktarlarda organik madde içeren atık sular da katılmaktadır. Bu atık sular özellikle içerdikleri toksik, kanserojen ve mutajen klorlu organik bileşikler nedeniyle çevre açısından önemli bir problem teşkil etmektedir (Anonim 2004a).

Kimyasal selüloz üretiminde kullanılan en yaygın yöntem sülfat pişirmesidir. Fakat sülfat pişirmesi sonucunda elde edilen kağıt hamurunun klorla beyazlatılması sırasında ortaya çıkan klorlanmış organik maddeler, fenoller, furanlar ve dioksinler çevreye zarar vermektedir. Bu nedenle son yıllarda beyazlatma prosesinin çevreye dost kimyasallar kullanılarak yapılması için çalışmalar sürdürülmektedir.

2.1.4 Kağıt-karton üretiminden kaynaklanan atık sular

Kağıt makinesi atıkları eleklerden, duşlardan, kağıt makinesinden karıştırma tanklarından geçen sulardan oluşur. Kağıt yapımında çeşitli dolgu maddeleri kullanıldığından bunlar da atık sulara karışmaktadır. Kağıt hamurunun kağıt haline dönüştürüldüğü kağıt makinesinden; AKM miktarı yüksek, organik madde miktarı düşük, beyaz renkli atık su çıkmaktadır. Beyaz renk özellikle selüloz liflerinden ve dolgu maddesi olarak kullanılan kalsit ve kaolinden gelmektedir. Doğa üzerinde etkileri daha ziyade görsel ve içerdikleri organikler açısından alıcı ortamda mikroorganizmaların üremesini hızlandırmaları bakımından önemlidir (Şengül 1991, Anonim 2000).

2.2 Kağıt Endüstrisi Atık Sularındaki Kirlilik Parametreleri

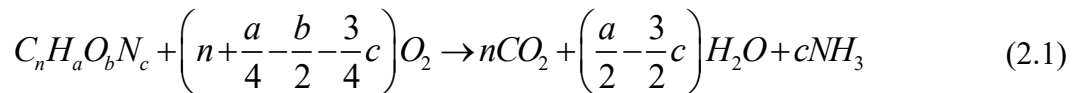
Kağıt endüstrisinden kaynaklanan atık suların arıtımında seçilen parametreler, bu parametrelerin özellikleri ve etkileri aşağıda özetlenmiştir.

2.2.1 Biyokimyasal oksijen ihtiyacı

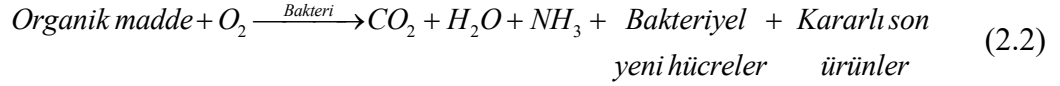
Biyokimyasal oksijen ihtiyacı, belirli bir sürede (5 gün) ve belirli bir sıcaklıkta (20 °C) aerobik bakteriler tarafından parçalanabilen organik maddeler için tüketilen oksijen miktarıdır (Eaton vd. 2005). “BOİ₅ kavramı, aerobik organotrofik mikroorganizmalar için elverişli bir organik karbon kaynağı içeren bir suyun kirlenme potansiyelinin, bu sudan alınmış bir numunede mikroorganizmaların gelişmeleri sırasında kullandıkları oksijenin ölçülmesiyle belirlenmesine dayanır. Organik maddenin ölçüsü olarak biyokimyasal oksidasyon sırasında harcanan oksijen ele alınır. Sarf edilen oksijenin fazlalığı, sudaki

organik madde miktarının fazla olduğunu gösterir. BOİ₅ biyolojik olarak ayrışabilmeleri koşuluyla organik maddeler arasındaki farkları belirlemez, toplamı hakkında bilgi verir” (Samsunlu 2013). Evsel ve endüstriyel atık suların kirlilik derecelerinin belirlenmesinde, arıtma tesislerinin tasarımı ve veriminin hesabında BOİ₅ testi sıklıkla kullanılmaktadır.

“Oksijenin sudaki limitli çözünürlüğü nedeniyle (20 °C’de 9 mg/L) çok kirli sularda test sırasında kapta yeterli çözünmüş oksijen kalmasını temin için bu tip numunelerin seyreltilmesi gerekir. Seyreltme, örnekteki oksijen miktarının organik maddelere yetmesini sağlayacak şekilde yapılır. Deney sonunda örnekteki organik maddeler oksijenin tamamını tüketmemelidir. Sonuçtaki çözünmüş oksijen derişimi en az 1 mg/L olmalıdır” (Avcı 2007). “Bu test biyolojik bir test olduğundan işlem esnasında çevresel koşulların canlı organizmaların yaşamsal fonksiyonlarını yapabilmelerine olanak verecek şekilde uygun olması gerekmektedir. Bakteriyel büyüme için gerekli tüm besin maddeleri ortamda bulunmalıdır. Bu nedenle belli miktarda atık su, hazırlanan seyreltme suyu ile seyreltilir. Seyreltme suyu, fosfor tamponu, magnezyum sülfat, kalsiyum klorür, demir (III) klorür içerir ve çözünmüş oksijen ile doymuş haldedir. Eğer atık su numunesinde atık organik maddeleri okside etmek üzere gerekli mikroorganizmalar yoksa ortama mikroorganizmalar ilave edilir. Atık su organik madde temin eder ve seyreltme suyu gerekli besin elementlerini ve çözünmüş oksijeni sağlar. BOİ₅ testinde genel tepkime, organik madde ve çözünmüş oksijenin bakteriler tarafından alınıp karbondioksit ve bakteri nüfusunda artış olmasını sağlayan üremenin olduğu metabolizma tepkimesidir. BOİ₅ şişesindeki çözünmüş oksijenin azalması doğrudan doğruya ayrışabilen organik madde miktarı ile ilgilidir. Evsel atık sular gibi doğal olarak mikroorganizmaların mevcut olduğu hallerde, dışarıdan ayrıca mikroorganizma eklemeye gerek yoktur. Oluşan genel tepkime şu şekildedir” (Samsunlu 2013):



Bu tepkime aşağıdaki şekilde de verilebilir.



“BOİ₅ deneyleri genellikle 20 °C ve 5 gün süreli olarak yapılır ve BOİ₅ olarak verilir. Beş gün içinde suda bulunan organik bileşiklerin biyokimyasal olarak parçalanması tamamlanmaz. En basit yapıdaki organik bileşiklerin bile biyokimyasal olarak bakteriler yardımıyla parçalanması çok uzun zaman alır. Su içindeki bütün organik bileşiklerin mikroorganizmalar tarafından tamamen kullanılarak parçalanması için harcanan oksijen miktarı nihai BOİ olarak bilinir” (Yalçın ve Gürü 2010). “Evsel ve endüstriyel atık sularla yapılan araştırmalarda 5 günlük BOİ₅ değerinin, nihai BOİ değerinin % 70-80 kadar olduğu bulunmuş ve bu sonuç yeterli olarak kabul edilerek testte 5 günlük inkübasyon periyodu seçilmiştir” (Samsunlu 2013).

“Karbonlu maddelerin oksijen ihtiyacı zamanla azalan bir hızla ilerler, çünkü biyolojik aktivite yararlanılabilir gıda temini azaldıkça azalır. Nitrifiye bakteriler çoğunlukla arıtılmamış evsel atık sularda bağlı olarak düşük sayıda bulunurlar. 8-10 günlük bir süreye kadar sayıları belli bir oksijen tüketimine neden olamayacak kadar düşüktür. 8-10 günden sonra bu bakteriler gelişim gösterip atık suda ek bir oksijen tüketimine neden olurlar. Arıtma tesisi çıkış sularından ve nehir sularından alınan numuneler oldukça yoğun şekilde nitrifiye bakterileri içerdiiğinden yukarıda verilen süreden önce nitrifikasyon olayı meydana gelebilir. Bu durumda nitrifikasyon bakterilerinin faaliyetleri, bazı spesifik inhibe edici maddeler (metilen mavisi, allil tiyoüre veya 2-kloro-6-triklorometil piridin) kullanılarak durdurulmalıdır” (Samsunlu 2013).

2.2.2 Kimyasal oksijen ihtiyacı

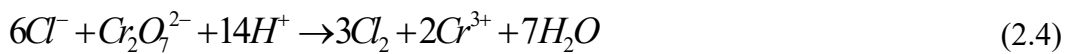
KOİ, atık sudaki organik maddelerin redoks tepkimeleri ile oksitlenmeleri için gerekli olan oksijen miktarıdır. “KOİ, evsel ve endüstriyel atık suların kirlilik derecesini belirlemede kullanılan önemli bir parametredir. Biyokimyasal oksidasyonun bazı organik

maddelerde çok hızlı cereyan etmesine karşılık diğer bazı maddelerde çok yavaş olması mümkündür. Buna karşılık kimyasal oksidasyonda maddenin biyolojik olarak ayrışıp ayrışmadığına ve ayrışma hızına bakılmaksızın bütün organik maddeler oksitlenir. Örneğin biyolojik olarak çok kolay ayrışan glikoz ve oldukça yavaş ayrışan lignin kimyasal olarak tamamen okside edilirler. Sonuç olarak KOİ değerleri daima BOİ₅ değerlerinden yüksektir” (Samsunlu 2013). Oksidasyon ortamında karbonlu organik maddeler CO₂ ve H₂O’ya, azotlu organik maddeler ise NH₃’e dönüşürler (Avcı 2007).

KOİ testinde numunenin, derişik asit ortamında kuvvetli bir oksitleyici ile geri akış sağlanarak 2 saat 150 °C’de muamele edilerek oksitlenmesi sağlanır. Dikromat iyonu (Cr₂O₇²⁻) yüksek oksitleme kapasitesi, kolay kullanımı, yüksek dayanım süresi, saf halde bulunabilirliği ve ekonomik olması gibi özellikleri ile oksitleyici madde olarak kullanılmakta olup bu testlerde kromik iyonuna (Cr³⁺) indirgenmektedir (Eaton vd. 2005). “Sülfürik asit içerisinde bulunan gümüş sülfat (Ag₂SO₄) katalizör görevi yapar. Gümüş sülfatın katılmaması halinde hem tepkime yavaşlar hem de uzun zincirli alifatik gruplar, heterosiklik aromatikler, uçucu organikler gibi bazı maddeler oksitlenemediği için ölçüm dışında kalabilir” (Samsunlu 2013). KOİ testinde numunede klor bulunması durumunda klorür oluşur. Klorür, gümüş klorür çökmesine neden olacak şekilde gümüş iyonu ile tepkimeye girmekte ve gümüşün katalitik aktivitesini kısıtlamaktadır (Eaton vd. 2005).



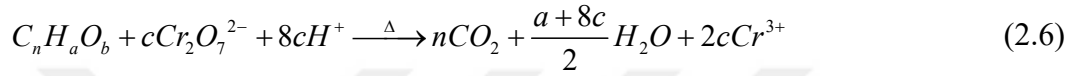
Bu etkileşim, dikromat iyonunun yükseltgeme eylemini kısıtlama eğilimi gösterdiği için olumsuzdur. Bununla birlikte KOİ analizi için parçalama prosedürü altında klorür, bromür veya iyodür, dikromatla element şeklinde halojen ve kromik iyonu oluşturmak üzere tepkimeye girebilirler. Bu durum KOİ miktarı ölçümünde artış yönünde hataya sebep olur (Eaton vd. 2005).



Geri akış prosedüründen önce civa sülfatla (HgSO₄) kompleks oluşturarak, klorürün varlığı sebebiyle karşılaşılan zorlukların, tamamının olmasa da, büyük ölçüde üstesinden gelinmektedir (Eaton vd. 2005, Samsunlu 2013).



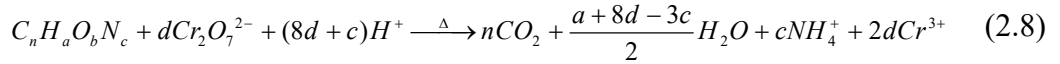
KOİ testinde organik maddenin oksidasyonu aşağıdaki tepkime ile ifade edilir.



Burada,

$$c = \frac{2}{3}n + \frac{a}{6} - \frac{b}{3} \quad (2.7)$$

Organik maddenin azotlu olması durumunda aşağıdaki tepkime geçerlidir.



Burada

$$d = \frac{2}{3}n + \frac{a}{6} - \frac{b}{3} - \frac{c}{2} \quad (2.9)$$

2.2.3 Bulanıklık

Suların bulanık olması içinden geçen ışığı askıda maddelerin engellemesinden kaynaklanmaktadır. Bulanıklığın nedeni ise su içinde askıda bulunan kil, silis, organik maddeler, mikroorganizmalar, çökebilir haldeki kalsiyum karbonat, alüminyum hidroksit, demir hidroksit veya benzer maddelerden ileri gelir. Bulanıklığın derecesi bu

maddelerin tanecik büyüklük dağılımlarına ve tanecik miktarlarına bağlıdır (Samsunlu 2013).

2.2.4 Renk

Sular, içinde bulunan çözünmüş veya askıda maddelerin türüne bağlı olarak az veya çok renkli olabilirler. Örneğin hümik asit, tanen, lignin, askıda katılar, özellikle kil, alg, demir ve manganez oksitler gibi kolloid büyüklüğündeki parçacıklar sulara renkli bir görüntü vermektedirler. Endüstriyel atık sular renk oluşumuna neden olan lignin, tanen, boya, organik ve inorganik kimyasalları içerebilirler. Bu tip maddeler içeren atık sular, alıcı ortamlara verilmesi halinde uzak mesafelere kadar etkili olabilen bir renklenmeye neden olacağından renkli endüstriyel atık suların alıcı ortamlara deşarj edilmeden önce renk gideriminin yapılması gerekmektedir (Eaton vd. 2005, Samsunlu 2013).

2.2.5 Askıda katı maddeler

Su içinde askıda kalan başka bir deyişle filtreden geçemeyen çok küçük çaplı organik ve inorganik katı maddelere AKM denir. AKM doğal sularda ışık geçirgenliğini azaltarak ve dip birikintilerine yol açarak su canlılarını olumsuz etkilemekte, kanallarda ve arıtma sistemlerinde birikim ve tıkanma sorunlarına yol açmaktadır (Eaton vd. 2005, Yalçın ve Gürü 2010, Samsunlu 2013).

2.3 Kağıt Endüstrisi Atık Sularının Alıcı Ortama Deşarj Standartları

Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği ülkemizde su kalite kontrolüne yönelik yasal ve teknik esasları bir ana yönetmelik ve bu yönetmeliğe bağlı tebliğler şeklinde düzenlemiştir. Bu yönetmelikte kağıt endüstrisi atık suları 11 gruba ayrılmış olup çizelgelerde bu atık sulara ait deşarj standartları verilmiştir (Çizelge 2.3-2.13, <http://mevzuat.basbakanlik.gov.tr>, 2016).

Çizelge 2.3 Yarı selüloz üretimi atık suları deşarj standartları

Parametre	Birim	Anlık numune	Kompozit numune 24 saatlik
Debi	(m ³ /t)	-	100
KOİ	(mg/L)	-	800
AKM	(mg/L)	-	50
Çökebilir katı madde	(mL/L)	3	-
Balık biyodeneyi (ZSF)	-	-	8

Çizelge 2.4 Hurda kağıt, saman ve kağıttan ağartılmamış selüloz üretimi atık suları deşarj standartları

Parametre	Birim	Anlık numune	Kompozit numune 24 saatlik
Debi	(m ³ /t)	-	150
KOİ	(mg/L)	-	870
AKM	(mg/L)	-	80
Çökebilir katı madde	(mL/L)	4.5	-
Balık biyodeneyi (ZSF)	-	-	8

Çizelge 2.5 Ağartılmış selüloz üretimi atık suları deşarj standartları

Parametre	Birim	Anlık numune	Kompozit numune 24 saatlik
Debi	(m ³ /t)	-	200
KOİ	(mg/L)	-	1000
AKM	(mg/L)	-	50
Çökebilir katı madde	(mL/L)	6	-
Balık biyodeneyi (ZSF)	-	-	8

Çizelge 2.6 Saf selüloz üretimi atık suları deşarj standartları

Parametre	Birim	Anlık numune	Kompozit numune 24 saatlik
Debi	(m ³ /t)	-	230
KOİ	(mg/L)	-	1500
AKM	(mg/L)	-	50
Çökebilir katı madde	(mL/L)	7	-
Balık biyodeneyi (ZSF)	-	-	8

Çizelge 2.7 Nişasta katkısız kağıt atık suları deşarj standartları

Parametre	Birim	Anlık numune	Kompozit numune 24 saatlik
KOİ	(mg/L)	-	100
Çökebilir katı madde	(mL/L)	0.5	-

Çizelge 2.8 Nişasta katkılı kağıt atık suları deşarj standartları

Parametre	Birim	Anlık numune	Kompozit numune 24 saatlik
KOİ	(mg/L)	-	100
Çökebilir katı madde	(mL/L)	0.5	-

Çizelge 2.9 Saf selülozdan elde edilen çok ince dokulu kağıt atık suları deşarj standartları

Parametre	Birim	Anlık numune	Kompozit numune 24 saatlik
KOİ	(mg/L)	-	120
Çökebilir katı madde	(mL/L)	0.5	-

Çizelge 2.10 Yüzey kaplamalı, dolgulu kağıt atık suları deşarj standartları

Parametre	Birim	Anlık numune	Kompozit numune 24 saatlik
KOİ	(mg/L)	-	75
Çökebilir katı madde	(mL/L)	0.5	-

Çizelge 2.11 % 5 ten fazla odun lifleri ihtiva eden ancak kırpıntı kağıt yüzdesi yüksek olmayan kağıt atık suları deşarj standartları

Parametre	Birim	Anlık numune	Kompozit numune 24 saatlik
KOİ	(mg/L)	-	100
Çökebilir katı madde	(mL/L)	0.5	-

Çizelge 2.12 Kırpıntı kağıttan imal edilen kağıt atık suları deşarj standartları

Parametre	Birim	Anlık numune	Kompozit numune 24 saatlik
KOİ	(mg/L)	-	120
Çökebilir katı madde	(mL/L)	0.5	-

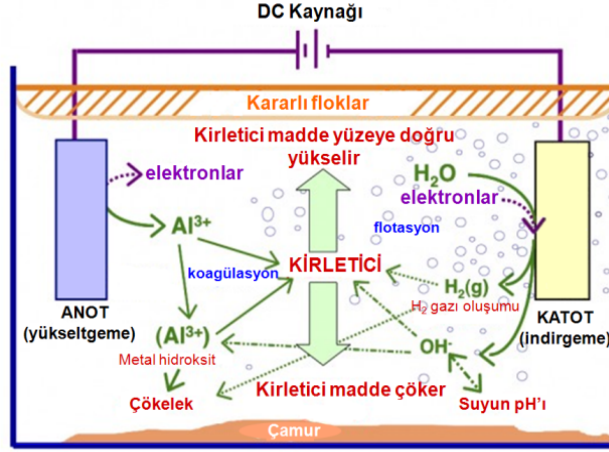
Çizelge 2.13 Parşömen kağıdı atık suları deşarj standartları

Parametre	Birim	Anlık numune	Kompozit numune 24 saatlik
KOİ	(mg/L)	-	100
Çökebilir katı madde	(mL/L)	0.5	-

2.4 Elektrokoagülasyon Yöntemi ile Atık Su Arıtımı

Elektrokoagülasyon, elektroliz sonucu anodun çözünmesi ve katotta oluşan hidroksil iyonları ile arıtılması istenen atık suyun içerisinde metal hidroksit floklarının oluşturulmasına dayanan bir prosestir (Şekil 2.1). Elektrokoagülasyonda anot olarak demir veya alüminyum elektrotlar kullanılması halinde bu elektrotlar çözünerek çözeltiye Al^{3+} , Fe^{2+} ve Fe^{3+} iyonları vermekte olup bu iyonlar sudaki hidroksil iyonları (OH^-) ile birleşerek çok az çözünen $Al(OH)_3$, $Fe(OH)_2$ ve $Fe(OH)_3$ gibi metal hidroksitler oluşturmaktadır (Koby vd. 2008). Elektrokoagülasyon genel olarak aşağıda belirtilen altı ana basamaktan meydana gelmektedir.

- 1) Zıt yüklü elektroda göç (elektroforez) ve yük nötralizasyonuna göre kümelenme
- 2) Katyon veya hidroksil iyonunun kirleticiler ile çökelek oluşturması
- 3) Metalik katyonun kirleticiyle bağlanma özelliğini sağlayan yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip metal hidroksit oluşturmak için OH^- iyonları ile etkileşime girmesi
- 4) Oluşan hidroksitlerin daha büyük kafes yapıları oluşturması ve suda sürüklenmesi
- 5) Kirleticilerin daha az zehirli türlere yükseltgenmesi
- 6) Elektroliz esnasında katotta oluşan O_2 ve H_2 gaz kabarcıklarına tutunmayla (adhezyon), elektroflotasyonla veya çöktürmeyle giderme (Katal vd. 2011).



Şekil 2.1 Elektrokoagülasyonun oluşum mekanizması

Elektrokoagülasyonun mekanizması ortamın kimyasal özelliğine ve iletkenliğine bağlıdır. Ayrıca pH, ortamdaki kolloidal parçacıkların boyutu ve kimyasal türlerin derişimi gibi özellikler de elektrokoagülasyon prosesi üzerine etki etmektedir (Mollah vd. 2001).

Elektrokoagülasyonda alüminyum ve demir ekonomik olmaları sebebiyle en çok tercih edilen elektrot materyalleridir. Alüminyum anodun elektrolitik çözeltideki ürünleri düşük pH'de katyonik tek moleküllü Al^{3+} ve $Al(OH)_2^+$ gibi türlerdir ki bunlar uygun pH değerinde önce $Al(OH)_3$ 'e ve sonuçta aşağıda verilen tepkimelere göre $Al_n(OH)_{3n}$ 'e polimerleşirler (Mollah vd. 2001).

Anot:



Katot:

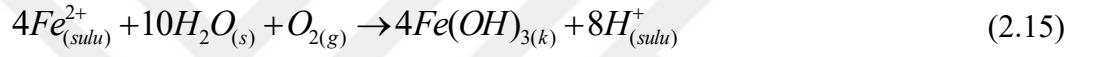


Bununla birlikte sulu ortamın pH değerine bağılı olarak $Al(OH)^{2+}$, $Al_2(OH)_2^{4+}$ ve $Al(OH)_4^-$ gibi diğler iyonik türler sistemde mevcut olabilir (Mollah vd. 2001).

Elektrolitik sistemde demirin yükseltgenmesi sonucu demir hidroksit ($Fe(OH)_n$) oluşmaktadır ($n = 2, 3$). $Fe(OH)_n$ 'in oluşması için aşağıda verilen iki mekanizma ileri sürülmüştür (Mollah vd. 2001).

- Mekanizma 1

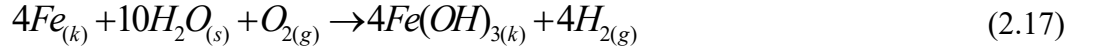
Anot:



Katot:



Toplam:



- Mekanizma 2

Anot:



Katot:



Toplam:



2.4.1 Elektrokoagülasyonu etkileyen parametreler

Elektrokoagülasyon yöntemiyle atık su arıtımı akım yoğunluğu, elektrolit derişimi, pH, sıcaklık ve elektroliz süresi gibi pek çok faktörden etkilenmektedir. Bu faktörlerin etkileri aşağıda detaylı olarak incelenmiştir.

2.4.1.1 Elektrokoagülasyon üzerine akım yoğunluğunun etkisi

Elektrokoagülasyon prosesinde akım yoğunluğu arttıkça çözünen anot miktarı artmakta ve yüksek akım yoğunluklarında önemli miktarda anot materyalinin çözünmesi atık sudan giderilen kirletici miktarını arttırmaktadır. Belirli bir akım yoğunluğundan sonra atık sudan kirleticilerin giderilmesinde çok fazla bir değişim gözlenmemektedir. Çok yüksek şiddette akım uygulandığında elektrik enerjisinin suyun ısınmasına sebep olması söz konusu olmaktadır. Elektrokoagülasyon sırasında, atık suyun ısınması gibi olumsuz olabilecek etkilerin ortaya çıkmasını önlemek amacıyla en uygun akım yoğunluğunun belirlenmesi gerekmektedir (Chen 2004, Kobya vd. 2008).

Elektrokoagülasyon prosesinde sadece çözünen metal miktarı değil, aynı zamanda elektrokoagülasyonun arıtım verimini etkileyecek gaz kabarcıklarının (H_2) oluşum hızı ve flokların büyüklüğü de akım yoğunluğuna bağlıdır. Akım yoğunluğunun artması gaz kabarcıklarının sayısını arttırırken, boyutlarının azalmasına neden olmakta; sonuçta yukarı doğru daha fazla miktarda sürüklenme ve kirleticilerin daha hızlı giderimi gözlenmektedir (Khosla 1991).

2.4.1.2 Elektrokoagülasyon üzerine destek elektrolit derişiminin etkisi

Elektrokimyasal prosesler elektrot yüzeyinden çözeltiye ve çözelti içinde iyon aktarım tepkimelerine dayanmaktadır. Elektrokoagülasyon prosesinde elektrolit derişiminin artmasıyla atık su iletkenliğinin değişimi enerji tüketimini etkilemektedir. Atık su iletkenliği arttıkça Ohm yasası gereği elektron akımının gerçekleşeceği bölgede direnç

azalmakta ve böylece potansiyel farkı dolayısıyla da enerji tüketimi azalmaktadır (Kobya vd. 2008).

Klorür iyonlarının elektrik yükünü taşıma konusundaki iyonik katkısının yanında suda bulunan kalsiyum ve magnezyum içerikli bileşenlerin ayrışması sonucu oluşan bikarbonat (HCO_3^-) ve sülfat (SO_4^{2-}) gibi anyonların yan etkilerini önemli ölçüde azalttığı gözlenmiştir. HCO_3^- veya SO_4^{2-} iyonlarının varlığı Ca^{2+} ve Mg^{2+} iyonlarının elektrot yüzeyinde tutunarak yalıtkan bir tabaka oluşturmaya sebep olmaktadır. Bu yalıtkan tabaka elektrotlar arasındaki potansiyel farkını önemli ölçüde artırır ve akım veriminde büyük miktarda azalmaya neden olur. Bu nedenle bu anyonların var olması durumunda su arıtımında normal bir elektrokoagülasyon sürecinin gerçekleşmesi için ortamda % 20 oranında Cl^- iyonunun bulunması gerekmektedir (Chen 2004).

2.4.1.3 Elektrokoagülasyon üzerine pH'nin etkisi

Elektrokoagülasyon yönteminde atık suyun pH'sinin oluşturduğu etki, akım verimi ve metal hidroksitlerin çözünürlükleri ile ifade edilebilmektedir. Genel olarak metallerin akım verimleri asidik veya bazik koşullarda nötr koşullara göre daha yüksektir.

Elektrokoagülasyon süresince pH'yi etkileyen tepkimeler aşağıda verildiği gibidir.

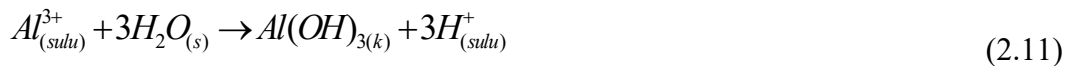
Alüminyum anot için:



Bazik koşullarda:



Asidik koşullarda:



Oksijen oluşum tepkimesi:



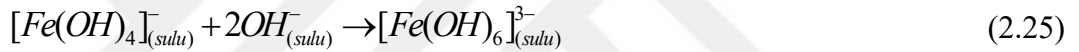
Katotta gerçekleşen tepkime:



Yüksek pH'de:



Demir elektrot için yüksek pH'de:



Ortamda klor iyonları olması durumunda gerçekleşen tepkimeler:

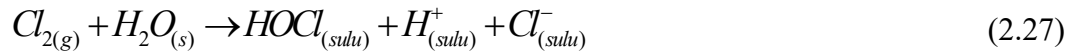
Anot:



Katot:



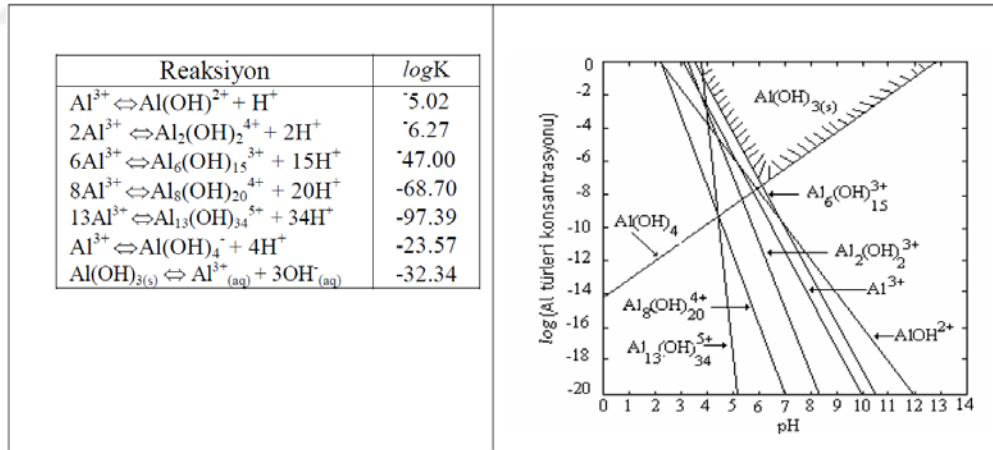
Yığın:



Elektrokoagülasyon ile arıtmadan sonra atık su pH'si asidik atık için artarken bazik atık için azalmaktadır. Bazik koşullar altında OH^- iyonlarının (2.21) tepkimesiyle harcanması, H^+ iyonlarının (2.12), (2.27) ve (2.28) tepkimeleri ile salınması pH'yi düşürücü yönde

etki yapar. Asidik koşullar altında hidrojen oluşum tepkimesine bağlı olarak pH artışı gerçekleşmektedir. Ayrıca ortamda klor iyonları olması durumunda gerçekleşen (2.27) ve (2.28) tepkimeleri de asidik koşullar altında sola kayarak pH artışına katkıda bulunmaktadır. Bununla birlikte katotta hidrojen oluşumunun yanında asidik koşullarda anotta $\text{Al}(\text{OH})_3$ oluşumu ortama pH'nin düşmesine neden olan H^+ iyonlarını salmaktadır. Bunlara ek olarak pH'nin düşmesine neden olan (2.12) numaralı oksijen oluşum tepkimesi meydana gelmektedir (Chen vd. 2000, Chen 2004).

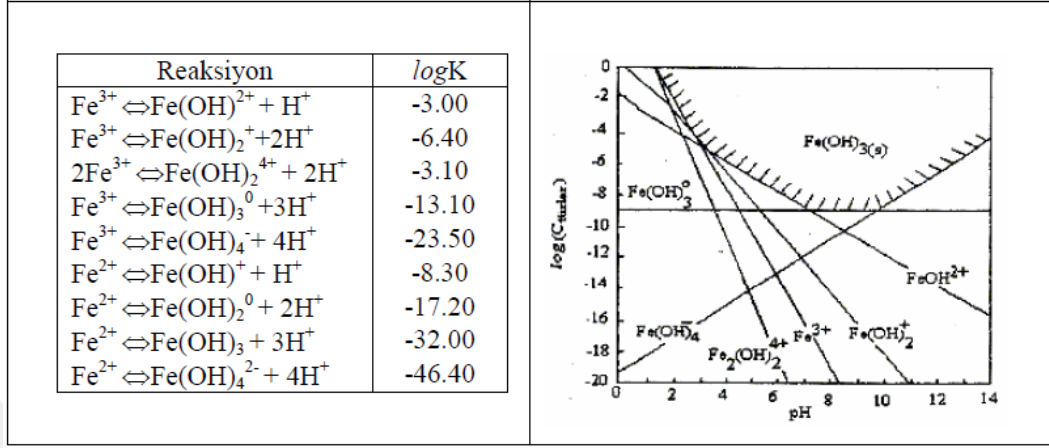
“Sulu ortamda Al^{3+} 'nin oluşturduğu hidroksil kompleksleri ve bu komplekslerin oluşum sabitleri şekil 2.2’de verilmiştir. Şekilde gösterilen tepkimelerden de görüleceği gibi sudaki hidroksil iyonları elektrotlardan çözünmüş olan Al^{3+} iyonları ile birleşerek ortamın pH değerine göre komplekslerin oluşumuna yol açacaktır. Alüminyum anodun elektrolitik çözeltideki ürünleri düşük pH’de katyonik tek moleküllü Al^{3+} ve $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ gibi türlerdir ki bunlar uygun pH değerlerinde önce $\text{Al}(\text{OH})_3$ ’e ve sonuçta $\text{Al}_n(\text{OH})_{3n}$ ’e polimerleşirler.” (Koby vd. 2008)



Şekil 2.2 Sulu ortamda oluşan alüminyum kompleksleri ve pH ilişkisi (Koby vd. 2008)

“Demir anodun elektrolitik çözeltideki ürünleri düşük pH’de anyonik $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ gibi türlerdir ki bunlar uygun pH değerlerinde önce $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ’e, sonuçta $\text{Fe}_n(\text{OH})_{2n-3n}$ ’e polimerleşirler. Sulu ortamda Fe^{3+} ’in oluşturduğu hidroksil kompleksleri ve bu komplekslerin oluşum sabitleri şekil 2.3’te verilmiştir. Şekilden hidroksil iyonları

elektrotlardan çözünmüş olan Fe^{3+} iyonları ile birleşerek ortamın pH değerine göre Fe-hidroksi komplekslerinin oluştuğu görülmektedir” (Koby vd. 2008).



Şekil 2.3 Sulu ortamda oluşan demir kompleksleri ve pH ilişkisi (Koby vd. 2008)

2.4.1.4 Elektrokoagülasyon üzerine sıcaklığın etkisi

Sıcaklık elektrokoagülasyon sisteminde kirliliklerin giderilmesinde negatif etkiye sahiptir. Atık su sıcaklığındaki artış metal hidroksitlerin çözünürlüğünü arttırmakta, bu nedenle düşük sıcaklıklarda metal hidroksitlerin çökmesinin daha iyi olduğu gözlenmektedir (Katal vd. 2011).

Sıcaklığın iletkenlik üzerine önemli etkisi vardır. Sıcaklık arttıkça çözeltinin viskozitesi azalır yani akışkanlığı artar. Böylece iyonlar çözelti içinde daha kolay hareket eder. Bunun sonucu olarak iletkenlikte artış olur. Ancak sıcaklık daha da artarsa bu defa iyon hareketlerinde görülen artış iyonların birbiri ile şiddetle çarpışmasına neden olur. Bu durum iyon hareketlerini güçleştirir. Bu ise iletkenliği azaltacak yönde etki yapar. Bu iki etki sonucu iletkenlikte artış olduğu halde yüksek sıcaklıklarda yeniden azalış görülür (Yalçın ve Gürü 2010).

2.4.1.5 Elektrokoagülasyon üzerine sürenin etkisi

Elektrokoagülasyonla atık su arıtımında metal ve hidroksil iyonlarının etkili olduğu bilinmektedir. Belirli bir sürede bir elektrokoagülasyon reaktörü içerisinde oluşturulan alüminyum hidroksit iyonlarının miktarı (m_{teorik}) elektrik akımına bağlıdır. Bu durum aşağıdaki eşitlikle tanımlanır.

$$m_{teorik} = \frac{ItM}{zF} \quad (2.29)$$

Burada I akım şiddeti (A), t zaman (s), M metal veya hidroksit iyonunun moleküler ağırlığı ($g \text{ mol}^{-1}$), z tepkimede aktarılan elektron sayısı, F Faraday sabitidir (96486 C mol^{-1}). Eşitlikte yer alan parametreler düşük maliyetli bir giderim için düşük seviyelerde tutulmalıdır. Elektroliz süresi ve akım yoğunluğu bu anlamda en etkili parametreler olup giderim verimi ve düşük maliyet açısından optimize edilmelidirler (Zaied vd. 2009).

2.4.2 Elektrokoagülasyonun değerlendirilmesinde kullanılan genel kavramlar

Elektrokoagülasyon yöntemi ile atık su arıtımının değerlendirilmesi amacıyla kullanılmak üzere akım yoğunluğu (Daneshvar vd. 2007), akım verimi (Daneshvar vd. 2006) ve enerji tüketimi (Körbahti ve Taşyürek 2016) eşitlikleri sırasıyla eşitlik (2.30)-(2.32)'de verilmiştir.

$$akım \text{ yoğunluğu } (A / m^2) = \frac{I}{2S_{elektrot}} \quad (2.30)$$

Burada I akım şiddeti, S etkin elektrot yüzey alanıdır.

$$akım \text{ verimi} = \frac{m_{deneysel}}{m_{teorik}} \times 100 \quad (2.31)$$

Burada m_{deneysel} anot elektrottaki deneysel olarak gözlemlenen çözünme miktarı, m_{teorik} eşitlik (2.29) ile tanımlanan anot elektrottaki teorik çözünme miktarıdır.

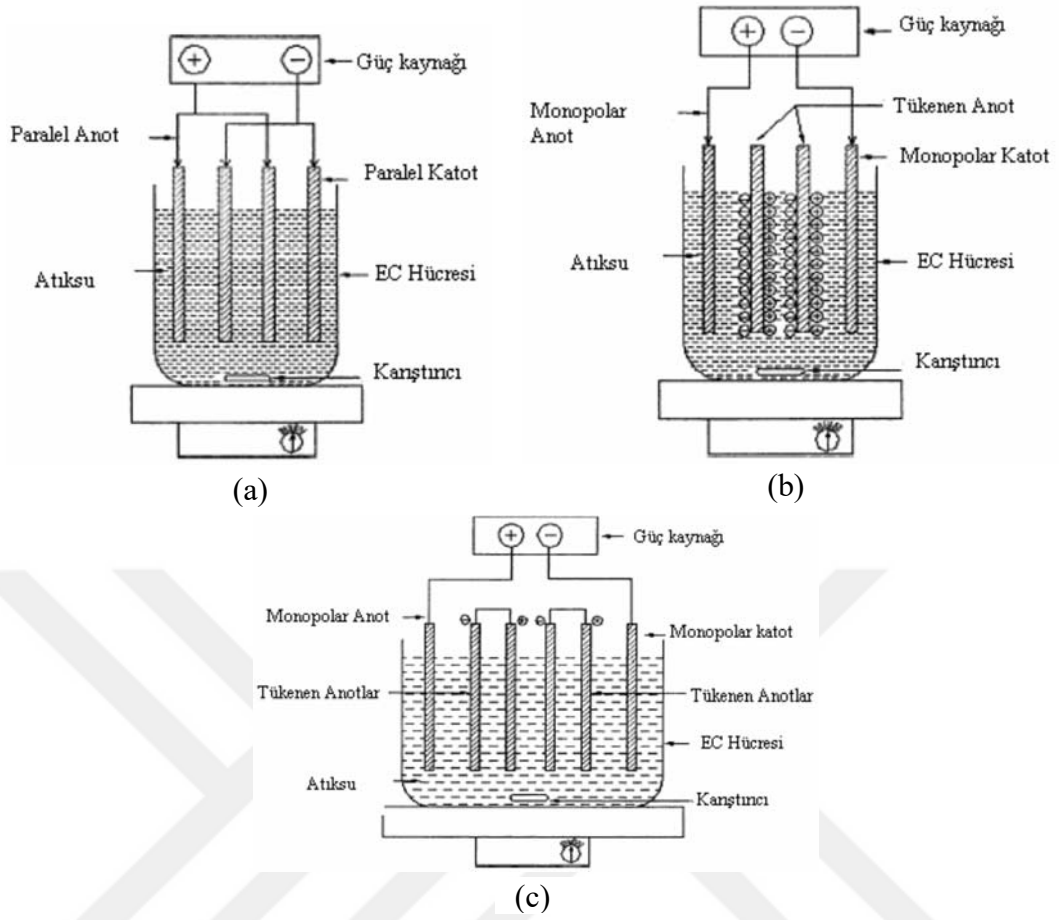
$$\text{enerji tüketimi}(kWh / kg KOI) = \frac{IV_m t}{(KOI_0 - KOI_t)V_E} \quad (2.32)$$

Burada I akım şiddeti, V_m ortalama potansiyel farkı, t tepkime süresi, KOI_0 ve KOI_t başlangıç ve son KOI değerleri, V_E elektrolit hacmi olarak tanımlanmıştır.

2.4.3 Elektrot bağlantı şekilleri

En basit bir EC reaktörü, bir elektrolit içine daldırılmış bir anot ve bir katottan oluşmaktadır. Anot ve katot elektrotlar paralel veya seri bağlanmak suretiyle tek kutuplu (monopolar) elektrokimyasal reaktörler oluşturulabilir (Mollah vd. 2004).

Çift anot ve katottan ibaret paralel bağlı bir monopolar elektrokoagülasyon reaktörü şekil 2.4.a'da görülmektedir. Şekilden de görüleceği gibi iki adet iletken metal plaka paralel elektrotları oluşturmaktadır. Bu elektrotlar bir güç kaynağına bağlanmaktadır. Elektrotların paralel çift kutuplu (bipolar) bağlanması ile oluşturulan elektrokoagülasyon reaktörü şekil 2.4.b'de verilmiştir. Bir güç kaynağına bağlı monopolar anot ve katot elektrot arasına birbiri ile bağlantısı olmayan çözünen anot elektrotlar yerleştirilmiştir. Bu EC reaktör şekli, prosesin kullanım ve işletim kolaylığı amacıyla düzenlenmiştir. EC reaktöründeki sıvı çözeltiye elektrik akımı uygulandığında, ortadaki çözünen bağımsız anot elektrotların bir yüzü anot diğer yüzü katot gibi davranmaktadır. Böylece elektrokimyasal arıtım esnasında elektrotların pozitif tarafında anodik negatif tarafında ise katodik reaksiyonlar oluşacaktır (Mollah vd. 2001).



Şekil 2.4 Elektrot bağlantı şekilleri (Mollah vd. 2001)

a. Monopolar paralel, b. Bipolar paralel, c. Monopolar seri

Monopolar elektrotların seri bağlanması ile şekil 2.4.c’de gösterilen elektrokoagülasyon reaktörü ortaya çıkmaktadır. Bu düzenekte her bir tükenen veya çözünen anot elektrot çiftleri birbirine bağlanmaktadır. Diğer taraftan ise monopolar anot ve katot elektrotlar bir güç kaynağına bağlıdır. İçteki çözünen anot elektrotların en dıştaki monopolar anot veya katot elektrotlar ile bir bağlantısı bulunmamaktadır. Seri bağlı EC’da ortama verilecek akımın geçmesi için daha yüksek bir potansiyel fark uygulamak gerekmektedir. Çünkü seri bağlı EC reaktörlerinde direnç daha yüksektir. Bu yüzden reaktör içinde her yerde akım aynı değerdedir (Mollah vd. 2004).

2.5 Sistem Tanımlama

Bir sistemde çalışılmadan önce sistemin alt ve üst limitlerinin belirlenmesi, karşılaşılabilecek olası durumlar karşısında yapılacaklar konusunda bilgi sahibi olunması gibi sebeplerle o sistemin çok iyi bilinmesi gerekir. Amaç sistemi kontrol etmek ise öncelikle giriş değişkenleri ile çıkış değişkenleri arasındaki bağıntıların elde edilmesi ve sistemin modelinin oluşturulması gerekir. Sistemlerin modellenmesinde kütle enerji denklıklarının veya deneysel çalışmalar sonucu elde edilecek girdi çıktı ilişkisi verilerinin kullanılması mümkündür. Ancak karmaşık sistemlerde kütle enerji denklemleri kullanılarak bir model elde edilmesi zor olduğu gibi bazı durumlarda sistemi tam anlamıyla tanımlayabilmek için de yetersiz kalabilmektedir. Bu gibi durumlarda modellerin deneysel çalışmalar sonucu elde edilecek girdi çıktı verilerinden sistem tanımlama yöntemleri kullanılarak oluşturulması daha kullanışlı olmaktadır (Özyurt 2012, Boyacıoğlu 2013).

Sistem tanımlama, sistemin giriş değişkenine basamak, kare, rastgele vb. bir etki verilmesi ve bunun sonucunda çıkış değişkeni verilerinin elde edilerek modelin belirlenmesi olarak tanımlanabilir. Giriş-çıkış verileri kullanılarak elde edilen parametrik modeldeki bilinmeyen parametreler uygun bir yöntemle bulunur. Daha sonra model deneysel veriler ile karşılaştırılarak uygunluğu test edilir.

2.5.1 Sistem modelleri

Doğrusal kesikli zaman bir açık hat sistem için sistem modeli, $u(t)$ giriş değişkeni ve $x(t)$ çıkış değişkeni olmak üzere eşitlik (2.33)'te gürültüsüz fark eşitliği şeklinde yazılabilir.

$$x(t) + a_1 x(t-1) + \dots + a_{n_a} x(t-n_a) = b_0 u(t) + b_1 u(t-1) + \dots + b_{n_b} u(t-n_b) \quad (2.33)$$

Geri kaydırma işleci aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$z^{-i}x(t)=x(t-i) \quad (2.34)$$

Burada $x(t)$, t anındaki x değerini, $x(t-1)$, $\Delta t = 1$ için $(t - \Delta t)$ anındaki x değerini ve $x(t-i)$ ise $(t - i*\Delta t)$ anındaki x değerini ifade etmektedir. Eşitlik (2.33) kesikli zaman iletim fonksiyonu şeklinde tanımlanabilir.

$$x(t) = \frac{B}{A}u(t) \quad (2.35)$$

Burada A ve B polinomları, z^{-1} 'de kaydırma işleci olarak yazılabilir.

$$A=1+a_1z^{-1}+...+a_{n_a}z^{-n_a} \quad (2.36)$$

$$B=b_0+b_1z^{-1}+...+b_{n_b}z^{-n_b} \quad (2.37)$$

A ve B polinomlarının kökleri sırasıyla sistemin kutupları ve sıfırlarıdır. Eğer sistemin kutup veya sıfırlarından biri z düzleminde birim çemberin dışında kalırsa sistem sırasıyla kararsız veya minimum olmayan fazdadır (Hapoğlu 1993).

2.5.2 Sinyal ve sistem modellerinin birleştirilmesi

Kendinden ayarlamalı bir sistemde bozucu etkiler çok çeşitli şekillerde ortaya çıkabilmektedir. Bozucu sinyal $s(t)$ kontrol sisteminin bir parçası olabilmekte ve genellikle kontrol edilen prosesin çıkışında ek bozucu etken olarak muamele edilmektedir. Bu durumda kendinden ayarlamalı kontrol edici bu bozucu etkiyi yok etme yönünde girişimde bulunacaktır. Bu tür sinyaller iki grupta toplanabilir.

- Tanımlı sinyaller

a. Ofset: En basit tanımlı sinyal ofsettir. Eşitlik (2.38)'de ofset r_0 = sabit olarak tanımlanmıştır.

$$s(t) = r_0 \quad (2.38)$$

b. Zamanla değişen ofset: Sabit ofsetin zamana bağlı bir polinom şeklinde verildiği genelleştirilmiş şeklidir.

$$s(t) = R(t) = r_0 + r_1 t + \dots + r_{n_r} t^{n_r} \quad (2.39)$$

R(t) polinomunun A polinomu tarafından filtrelenmesi ile aşağıdaki eşitlik yazılır.

$$s(t) = \frac{R(t)}{A} \quad (2.40)$$

c. Ölçülebilir sinyal: Ölçülebilir bir kaynaktan gelen sinyal $v(t)$ kesikli zaman aktarım fonksiyonu şeklinde aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$s(t) = \frac{D}{A} v(t) \quad (2.41)$$

Burada

$$D = d_0 + d_1 z^{-1} + \dots + d_{n_d} z^{-n_d} \quad (2.42)$$

$$A = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{n_a} z^{-n_a} \quad (2.36)$$

olarak verilmektedir.

- Rastgele sinyaller

Genel olarak sabit bir rastgele sinyal kaynağı aşağıdaki gibi gösterilmektedir.

$$s(t) = \frac{C}{A} e(t) \quad (2.43)$$

Burada

$$C = 1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + \dots + c_{n_c} z^{-n_c} \quad (2.44)$$

$$A = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{n_a} z^{-n_a} \quad (2.36)$$

Eşitlik (2.43) Auto Regressive Moving Average (ARMA) model olarak ifade edilmektedir. Sabit gürültü modeli eşitlik (2.43)'ün rastgele bozan etkenleri tanımlamada tatmin edici olmadığı durumlarda rastgele gürültü modeli eşitlik (2.45) veya eşitlik (2.46)'daki gibi tanımlanır.

$$s(t) = s(t-1) + \frac{C}{A} e(t) \quad (2.45)$$

$$s(t) = \frac{C}{\Delta A} e(t) \quad (2.46)$$

Burada $\Delta = 1 - z^{-1}$ fark işlemcisidir. Bu artış varsayımı gürültü modeline integratör ilavesini gerektirmektedir ve Auto Regressive Integrated Moving Average (ARIMA) sistem olarak tanımlanmaktadır.

Tanımlı ve rastgele sinyal eşitlikleri tüm bozan etken eşitliğinin oluşturulması için toplanır.

$$s(t) = \frac{R(t)}{A} + \frac{D}{A}v(t) + \frac{C}{A}e(t) \quad (2.47)$$

Tüm sistem çıktısı aşağıdaki gibi yazılır.

$$y(t) = x(t) + s(t) \quad (2.48)$$

$$y(t) = \frac{B}{A}u(t-1) + \frac{R(t)}{A} + \frac{D}{A}v(t) + \frac{C}{A}e(t) \quad (2.49)$$

“Eşitlik (2.49)’daki terimlerin tümü modelde yer almayabilir. Bu terimlerin oluşmasındaki nedenler özetlenecek olursa $R(t) = r_0$ sabit ofset durumu olup prosesin kendi yapısından veya ölçüm cihazlarından kaynaklanmaktadır. $v(t)$ ölçülebilen fakat kontrol edilemeyen bir sinyaldir. $e(t)$ ise sistemin ölçülebilen çıktısını bozan bütün rastgele düzensizliklerdir” (Özyurt 2012).

$R(t)$ ve $v(t)$ ’nin proseste olmadığı varsayımı ile model yapısı son durumda eşitlik (2.50)’deki gibi olmaktadır.

$$y(t) = \frac{B}{A}u(t-1) + \frac{C}{A}e(t) \quad (2.50)$$

Bu model eşitliği fark eşitliği olarak da yazılabilir.

$$y(t) + a_1y(t-1) + \dots + a_{n_a}y(t-n_a) = b_0u(t-1) + \dots + b_{n_b}u(t-n_b) + e(t) + c_1e(t-1) + \dots + c_{n_c}e(t-n_c) \quad (2.51)$$

Bu model ARMA tipi sinyale bir kontrol girdisi eklenerek elde edilmiş olup sistemin ARMAX modeli olarak isimlendirilmektedir. Bazı durumlarda daha iyi çıktı tanımlaması yapmak için integre edilmiş gürültü kullanılmakta ve eşitlik (2.52) ile tanımlanan Auto

Regressive Integrated Moving Average with eXogenous (ARIMAX) model oluşturulmaktadır (Özyurt 2012).

$$y(t) = \frac{B}{A}u(t-1) + \frac{C}{\Delta A}e(t) \quad (2.52)$$

2.5.3 Model parametrelerinin en küçük kareler yöntemi ile hesaplanması

Eşitlik (2.50) matris şeklinde yazılır, veri vektörü ile parametre vektörünün devrikleri sırasıyla (φ^T) ve (θ^T) eşitlik (2.53) ve eşitlik (2.54) ile tanımlanır ve çıkış değişkenini bu vektörlere bağlayan eşitlik elde edilir (Eşitlik 2.55).

$$\varphi^T = [-y(t-1), \dots, -y(t-n_a), u(t-1), \dots, u(t-n_b), e(t-1), \dots, e(t-n_c)] \quad (2.53)$$

$$\theta^T = [a_1, \dots, a_{n_a}, b_0, \dots, b_{n_b}, c_1, \dots, c_{n_c}] \quad (2.54)$$

$$y(t) = \varphi^T(t)\theta + e(t) \quad (2.55)$$

Eşitlik (2.55) ile tanımlanan terimler bakımından doğrusal modelde $y(1), y(2), \dots, y(N)$ ve $\varphi(1), \varphi(2), \dots, \varphi(N)$ şeklinde N adet ölçüm değeri olduğundan aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

$$\begin{aligned} y(1) &= \varphi^T(1)\theta + e(1) \\ y(2) &= \varphi^T(2)\theta + e(2) \\ &\vdots \\ y(N) &= \varphi^T(N)\theta + e(N) \end{aligned} \quad (2.56)$$

Eşitlik (2.56) vektörler cinsinden ifade edilir ve yerlerine yazılır.

$$Y = \begin{bmatrix} y(1) \\ y(2) \\ \vdots \\ y(N) \end{bmatrix}, \quad \phi = \begin{bmatrix} \phi^T(1) \\ \phi^T(2) \\ \vdots \\ \phi^T(N) \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} e(1) \\ e(2) \\ \vdots \\ e(N) \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

$$Y = \phi \theta + E \quad (2.58)$$

Tahmin edilen parametre matrisi ($\hat{\theta}$), modelden elde edilen çıkış değişkeni ($\hat{y}(t)$) olmak üzere eşitlik (2.59)'da verildiği gibi yazılır.

$$\hat{y}(t) = \phi^T(t) \hat{\theta} \quad (2.59)$$

Ölçülen çıkış değişkeni ile modelden hesaplanan çıkış değişkeninin farkı tahmin hatası ($\varepsilon(t)$) olarak tanımlanır (Eşitlik (2.60)).

$$\varepsilon(t) = y(t) - \hat{y}(t) = y(t) - \phi^T(t) \hat{\theta} \quad (2.60)$$

Tahmin hatası eşitliği N adet ölçüm için düzenlenir ve eşitlik (2.61) elde edilir.

$$\begin{aligned} \varepsilon(1) &= y(1) - \hat{y}(1) = y(1) - \phi^T(1) \hat{\theta} \\ \varepsilon(2) &= y(2) - \hat{y}(2) = y(2) - \phi^T(2) \hat{\theta} \\ &\vdots \\ \varepsilon(N) &= y(N) - \hat{y}(N) = y(N) - \phi^T(N) \hat{\theta} \end{aligned} \quad (2.61)$$

Eşitlik (2.61) vektörler olarak yazılır.

$$\varepsilon(t) = Y - \phi \hat{\theta} \quad (2.62)$$

Yukarıdaki eşitlikteki $\hat{\theta}$ (tahmin edilen parametre matrisi)'nin EKK yöntemi ile hesaplanması için eşitlik (2.63) ile verilen maliyet fonksiyonunun minimum yapılması gerekir (Özyurt 2012, Boyacıoğlu 2013).

$$J = \sum_{t=1}^N \varepsilon^2(t) = \varepsilon^T \varepsilon = \|\varepsilon\|^2 \quad (2.63)$$

Eşitlik (2.62)'deki ε değeri eşitlik (2.63)'te yerine yazılır ve düzenlenir.

$$J = (Y - \phi \hat{\theta})^T (Y - \phi \hat{\theta}) = Y^T Y - \phi^T \hat{\theta}^T Y - (Y^T \phi \hat{\theta} + \phi^T \phi \hat{\theta}^T \hat{\theta}) \quad (2.64)$$

Eşitlik (2.64)'ü minimum yapan $\hat{\theta}$ değerinin bulunması için türev alınır, sıfıra eşitlenir, düzenlenir ve EKK yöntemi ile hesaplanan tahmin edilen parametre vektörü bulunur (Özyurt 2012).

$$\frac{\partial J}{\partial \hat{\theta}} = -2\phi^T (Y - \phi \hat{\theta}) = 0 \quad (2.65)$$

$$\hat{\theta} = (\phi^T \phi)^{-1} \phi^T Y \quad (2.66)$$

Eşitlik (2.66) aşağıdaki şekilde de tanımlanmaktadır.

$$\hat{\theta} = \left[\sum_{t=1}^N \phi(t) \phi^T(t) \right]^{-1} \sum_{t=1}^N \phi(t) y(t) \quad (2.67)$$

EKK yaygın kullanılan bir yöntem olmasına karşın parametre hesabının gerçek zamanlı yapılmamasından dolayı kendinden ayarlamalı ve öngörmeli kontrol yöntemleri için uygun değildir. Bu tür kontrol yöntemlerinde verilerin ve parametrelerin her t anında çözülerek yenilenmesi gerekir. Bu şekilde bir çözüm YEKK yöntemi ile yapılmaktadır (Özyurt 2012, Boyacıoğlu 2013).

2.5.4 Model parametrelerinin yinelemeli en küçük kareler yöntemi ile hesaplanması

“YEKK yöntemi ile gerçek zamanlı parametre tahmini yapmak mümkün olup zamanla değişen model parametrelerinin hesaplanması için oluşturulan gerçek zaman algoritmalarına kolaylıkla uygulanabilir” (Boyacıoğlu 2013).

YEKK yönteminde geçmiş verilere dayanan model parametreleri ($\hat{\theta}(t-1)$) ve yeni giriş-çıkış değişkeni parametreleri kullanılarak tahmin edilen çıkış değişkeninin yeni değeri ($\hat{y}(t)$) hesaplanır. Hesaplanan bu tahmin değeri ile gerçek değer ($y(t)$) karşılaştırılır ve hata ($\varepsilon(t)$) bulunur. Bir önceki adımda hesaplanmış olan model parametreleri ($\hat{\theta}(t-1)$) yeni hesaplanan model parametreleri ($\hat{\theta}(t)$) ile güncellenir (Wellstead ve Zarrop 1991). Eşitlik (2.66) herhangi bir t anı için yazılırsa parametre hesabı eşitliği aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\hat{\theta}(t) = (\phi^T(t)\phi(t))^{-1} \phi^T(t)Y(t) \quad (2.68)$$

Eşitlik (2.68)’deki terimler vektörlerle ifade edilir.

$$Y(t) = \begin{bmatrix} y(1) \\ y(2) \\ \vdots \\ y(t) \end{bmatrix}, \quad \phi(t) = \begin{bmatrix} \phi^T(1) \\ \phi^T(2) \\ \vdots \\ \phi^T(t) \end{bmatrix} \quad (2.69)$$

Eşitlik (2.68) bir sonraki örnekleme zamanı ($t+1$) için yazılacak olursa parametre hesabı eşitliği aşağıdaki gibi yazılır.

$$\hat{\theta}(t+1) = (\phi^T(t+1)\phi(t+1))^{-1} \phi^T(t+1)Y(t+1) \quad (2.70)$$

Eşitlik (2.70)'de yer alan $\phi(t+1)$ ve $Y(t+1)$ vektör olarak ifade edilir.

$$\phi(t+1) = \begin{bmatrix} \phi(t) \\ \varphi^T(t+1) \end{bmatrix}, \quad Y(t+1) = \begin{bmatrix} Y(t) \\ y(t+1) \end{bmatrix} \quad (2.71)$$

Bu eşitlikler kullanılarak eşitlik (2.70)'deki terimler güncellenir.

$$\begin{aligned} \phi^T(t+1)\phi(t+1) &= \begin{bmatrix} \phi^T(t) & \varphi(t+1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi(t) \\ \varphi^T(t+1) \end{bmatrix} \\ &= \phi^T(t)\phi(t) + \varphi(t+1)\varphi^T(t+1) \end{aligned} \quad (2.72)$$

$$\begin{aligned} \phi^T(t+1)Y(t+1) &= \begin{bmatrix} \phi^T(t) & \varphi(t+1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y(t) \\ y(t+1) \end{bmatrix} \\ &= \phi^T(t)Y(t) + \varphi(t+1)y(t+1) \end{aligned} \quad (2.73)$$

Kovaryans matris ($P(t)$) tanımlanır ve eşitlik (2.72)'de yerine yazılır.

$$P(t) = [\phi^T(t)\phi(t)]^{-1} \quad (2.74)$$

$$P(t+1)^{-1} = P(t)^{-1} + \varphi(t+1)\varphi^T(t+1) \quad (2.75)$$

Kovaryans matris tanımı kullanılarak eşitlik (2.68) ve (2.70) yeniden yazılır.

$$\hat{\theta}(t+1) = P(t+1)\phi^T(t+1)Y(t+1) \quad (2.76)$$

$$\hat{\theta}(t) = P(t)\phi^T(t)Y(t) \quad (2.77)$$

Eşitlik (2.73)'teki $\phi^T(t+1)Y(t+1)$ ifadesi eşitlik (2.76)'da yerine yazılır ve düzenlenir.

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(t+1) &= P(t+1) [\phi^T(t)Y(t) + \varphi(t+1)y(t+1)] \\ &= P(t+1)\phi^T(t)Y(t) + P(t+1)\varphi(t+1)y(t+1) \end{aligned} \quad (2.78)$$

Eşitlik (2.77) kullanılarak eşitlik (2.79) elde edilir.

$$\phi^T(t)Y(t) = P^{-1}(t)\hat{\theta}(t) \quad (2.79)$$

Eşitlik (2.75)'ten aşağıdaki ifade elde edilir (Eşitlik (2.80)), eşitlik (2.79)'da yerine yazılır ve düzenlenir.

$$P(t)^{-1} = P(t+1)^{-1} - \phi(t+1)\phi^T(t+1) \quad (2.80)$$

$$\phi^T(t)Y(t) = P(t+1)^{-1}\hat{\theta}(t) - \phi(t+1)\phi^T(t+1)\hat{\theta}(t) \quad (2.81)$$

Eşitlik (2.78)'deki $\phi^T(t)Y(t)$ ifadesi yerine eşitlik (2.81) yazılır.

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(t+1) &= P(t+1) \left[P(t+1)^{-1}\hat{\theta}(t) - \phi(t+1)\phi^T(t+1)\hat{\theta}(t) \right] + P(t+1)\phi(t+1)y(t+1) \\ &= \hat{\theta}(t) + P(t+1)\phi(t+1) \left[y(t+1) - \phi^T(t+1)\hat{\theta}(t) \right] \end{aligned} \quad (2.82)$$

Yukarıdaki eşitlikte yer alan (t+1) anındaki tahmin hatası eşitlik (2.83)'te tanımlanarak (t+1) anında hesaplanan parametre vektörü bulunur (Eşitlik (2.84)).

$$\varepsilon(t+1) = y(t+1) - \phi^T(t+1)\hat{\theta}(t) \quad (2.83)$$

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + P(t+1)\phi(t+1)\varepsilon(t+1) \quad (2.84)$$

Eşitlik (2.75) ile tanımlanan P(t+1) matrisini hesaplamak için ihtiyaç duyulan matris, $A = P(t)^{-1}$, $B = \phi(t+1)$, $C=1$ ve $D = \phi^T(t+1)$ alınarak, ters alma kuralı (Eşitlik (2.85)) uygulanır ve kovaryans matrisin yeni değerini veren eşitlik (2.86) elde edilir.

$$(A+BCD)^{-1} = A^{-1} - A^{-1}B(C^{-1} + DA^{-1}B)^{-1}DA^{-1} \quad (2.85)$$

$$P(t+1) = P(t) - \frac{P(t)\varphi(t+1)\varphi^T(t+1)P(t)}{1 + \varphi^T(t+1)P(t)\varphi(t+1)} \quad (2.86)$$

“YEKK algoritması eşitlik (2.83), (2.84) ve (2.86)’dan oluşmakta olup kullanılan algoritma aşağıda verilmiştir.

t+1 anında

- 1) Yeni veriler kullanılarak $\varphi(t+1)$ vektörü oluşturulur.
- 2) Eşitlik (2.83)’ten $\varepsilon(t+1)$ hesaplanır.
- 3) Eşitlik (2.86)’dan $P(t+1)$ hesaplanır.
- 4) Eşitlik (2.84) ile $\hat{\theta}(t+1)$ parametre vektörü güncelleştirilir.
- 5) Bir sonraki örnekleme zamanına kadar beklenir ve ilk adıma geri dönülür” (Özyurt 2012, Boyacıoğlu 2013).

2.6 Dijital PID Kontrol Ediciler

Prosesler en iyi olarak diferansiyel denklemlerle sürekli (analog) sistemler olarak tanımlanır. Böyle sistemlerde giriş değişkenleri ve çıkış değişkenleri sürekli.

Dijital bir geri beslemeli kontrol stratejisi izleneceği zaman kontrol edicinin giriş ve çıkışları analog sinyallerden çok örneklenmiş dijital sinyaller olmalıdır. Böylece ölçerden gelen analog sinyal örneklenir ve analog-dijital (A/D) çevirici kullanılarak periyodik olarak dijital bir sinyale çevrilir. Daha sonra dijital bir kontrol algoritması kullanılarak yine dijital bir sinyal olan kontrol edici çıktısı hesaplanabilir. Kontrol edici çıktısı son kontrol elemanına gönderilmeden önce bu dijital sinyal bir dijital-analog (D/A) çevirici ile analog sinyale çevrilmelidir. Alternatif olarak dijital sinyal kontrol edici çıktısındaki değişimi temsil eden bir pulse serisine çevrilebilir. Bu pulsalar pozisyonunu değiştirmek üzere giriş sinyalleri olarak doğrudan son kontrol elemanına gönderilir (Seborg vd. 2010).

$$u(t) = u_0 + K_c \left[\varepsilon(t) + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t \varepsilon(t) dt + \tau_D \frac{d\varepsilon}{dt} \right] \quad (2.87)$$

İdeal bir PID kontrol edicinin dijital biçimini türetmek için eşitlik (2.87)'nin integral ve türev terimleri kesikli zaman eşdeğerleri ile değiştirilmelidir. İntegrale yamuk kuralı, türeve birinci mertebe fark yaklaşımı yapılırsa eşitlik (2.88) elde edilir. Bu eşitlik PID kontrol algoritmasının pozisyon formu olup yapılan çalışma süresince elde edilen bütün hata değerlerinin toplanması ile gerçek kontrol edici çıktısı hesaplanmaktadır.

$$u(n) = u_0 + K_c \left[\varepsilon(n) + \frac{\Delta t}{\tau_I} \sum_{k=1}^n \varepsilon(k) + \frac{\tau_D}{\Delta t} (\varepsilon(n) - \varepsilon(n-1)) \right] \quad (2.88)$$

Burada u_0 başlangıç zamanındaki ($t=0$) ayarlanabilen değişken, $u(n)$ n. örnekleme anındaki kontrol edici çıktısı ($n=1, 2, \dots$), $\varepsilon(n)$ n. örnekleme anında set noktası ile ölçülen değer arasındaki fark (hata) olarak ifade edilmektedir.

Kontrol edici çıktısındaki değişimin hesaplandığı alternatif bir yaklaşımın yapılması da mümkündür. PID kontrol edicinin hız formu adı verilen bu yaklaşım eşitlik (2.88) ile elde edilmiş pozisyon formunun değerinin ($t-1$) örnekleme anındaki değeri ile arasındaki farkın alınması ile türetilebilir. Pozisyon formunun değerinin ($t-1$) örnekleme anındaki değeri eşitlik (2.89) ile, PID kontrol edicinin hız formu ise eşitlik (2.90) ile verilmiştir.

$$u(t-1) = u_0 + K_c \left[\varepsilon(t-1) + \frac{\Delta t}{\tau_I} \sum_{k=1}^{t-1} \varepsilon(k) + \frac{\tau_D}{\Delta t} (\varepsilon(t-1) - \varepsilon(t-2)) \right] \quad (2.89)$$

$$\begin{aligned} \Delta u(t) &= u(t) - u(t-1) \\ &= K_c \left[(\varepsilon(t) - \varepsilon(t-1)) + \frac{\Delta t}{\tau_I} \varepsilon(t) + \frac{\tau_D}{\Delta t} (\varepsilon(t) - 2\varepsilon(t-1) + \varepsilon(t-2)) \right] \end{aligned} \quad (2.90)$$

Hız formunda kontrol edici çıktısının her örnekleme anında değişen değeri hesaplanmaktadır. Pozisyon formunda ise hataların toplamına bağlı olarak değişen değerler kontrol edici çıktısı olmaktadır (Karacan vd. 1997).

2.7 Kutup Yerleştirme

Kesikli zaman PID kontrol algoritması eşitlik (2.91)'de verilmiştir.

$$u(t) = \frac{S}{R}(r(t) - y(t)) \quad (2.91)$$

Burada $r(t)$ set noktasını göstermektedir. S polinomu ve katsayıları eşitlik (2.92)-(2.95)'te verilmiştir.

$$S = s_0 + s_1 z^{-1} + s_2 z^{-2} \quad (2.92)$$

$$s_0 = K_c \left(1 + \frac{\Delta t}{2\tau_I} + \frac{\tau_D}{\Delta t} \right) \quad (2.93)$$

$$s_1 = K_c \left(\frac{\Delta t}{2\tau_I} - 1 - \frac{2\tau_D}{\Delta t} \right) \quad (2.94)$$

$$s_2 = \frac{K_c \tau_D}{\Delta t} \quad (2.95)$$

$$R = (1 - z^{-1}) \quad (2.96)$$

Burada;

$$u(t) = \frac{(r(t) - y(t))(s_0 + s_1 z^{-1} + s_2 z^{-2})}{(1 - z^{-1})} \quad (2.97)$$

K_C , τ_I ve τ_D sistem tasarımcısı tarafından seçilerek eşitlik (2.92)–(2.95)'te yerine konur.

$$y(t) = \frac{B}{A}u(t-1) + \frac{C}{A}e(t) \quad (2.50)$$

Eşitlik (2.50) sistemi temsil eden ARMAX modeli olup eşitlik (2.97) ve (2.50)'in birleştirilmesiyle elde edilen sistemin kapalı hat eşitliği eşitlik (2.98)'de verildiği gibidir (Karacan vd. 1997, Ozkan vd. 1998, Karagöz vd. 2000).

$$y(t) = \frac{z^{-1}BS}{AR + z^{-1}BS}r(t) + \frac{RC}{AR + z^{-1}BS}e(t) \quad (2.98)$$

Kapalı hat özellikleri kutupların karakteristik eşitliğe yerleştirilmesi ile değişmektedir. Örnek olarak eşitlik (2.98)'in paydası bir T polinomu ile ifade edilmiş olup aşağıda verilmiştir.

$$T = AR + z^{-1}BS \quad (2.99)$$

T polinomunun katsayıları eşitlik (2.100)-(2.103) ile tanımlanmıştır.

$$t_0 = 1 \quad (2.100)$$

$$t_1 = (s_0b_0) + a_1 - 1 \quad (2.101)$$

$$t_2 = (s_1b_0) + a_2 - a_1 \quad (2.102)$$

$$t_3 = (s_2b_0) - a_2 \quad (2.103)$$

A ve B polinomlarının katsayıları YEKK algoritması ile kestirilmiştir. Minimum depolamaya ihtiyaç duyarak kestirilen parametreleri sürekli güncellemesi yinelemeli algoritmaları gerçek zamanlı parametre kestirimi için uygun bir yöntem olarak göstermektedir (Ertunc vd. 2009, Akay vd. 2011). T polinomunun kökleri sistem yanıtının karakterine hızlı bir bakış sunma avantajına sahiptir. Yanıtın doğası sadece T polinomunun köklerine bağlıdır. Köklerin tamamı gerçektir yanıt salınımsızdır. Köklerden ikisi karmaşık ve negatif gerçektir kısımlara sahipse yanıt, salınımlı davranış gösteren ve sönümlenen sinus terimleri içerir. Eğer köklerden ikisi karmaşık ve pozitif gerçektir kısımlara sahipse yanıt büyüyen bir sinus dalgasıdır (Coughanowr ve Koppel 1965).

Yapılan çalışmada uygulanan kutup yerleştirme işleminin algoritması aşağıda verilmiştir:

- 1) Sisteme bir basamak etki verilerek sistem yanıtını elde edilir.
- 2) ARMAX modeldeki A ve B polinomları YEKK ile kestirilir.
- 3) K_C , τ_I ve τ_D 'ye değerler verilerek eşitlik (2.93)-(2.95)'te yerine yazılır.
- 4) Eşitlik (2.101)-(2.103) ile t_1 , t_2 ve t_3 hesaplanır.
- 5) T polinomunun kökleri belirlenir ve çizilir.
- 6) Kökler karmaşık ise (1)'e geri dönülür.

2.8 Genelleştirilmiş Minimum Varyans Kontrol

Minimum Varyans Tekniği (MV) Aström ve Wittenmark tarafından tanımlanmış bir girdi – çıktı modeli için set noktası ile ölçülen değer arasındaki fark olarak tanımlanan aşağıdaki maliyet fonksiyonunu minimize etmek üzere ortaya konmuştur.

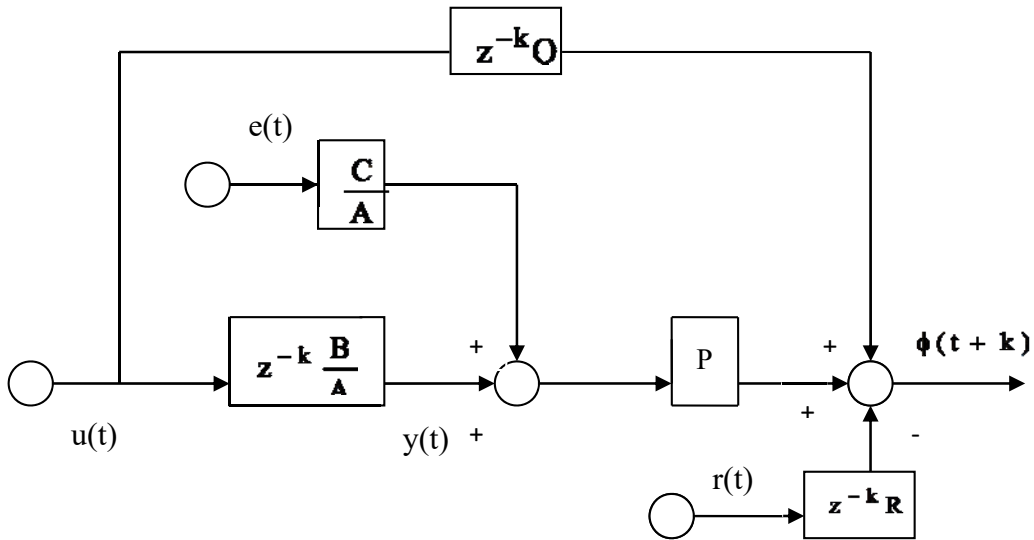
$$J(u,t) = \Xi\{(y(t+k) - r(t+k))^2\} \quad (2.104)$$

Burada y ile çıktı değişkeni, r ile set noktası ve u ile ayarlanabilen değişken (çıkıtı) ifade edilmekte olup Ξ beklenti, k ise varsayılan zaman gecikmesidir (Ertunç vd. 2003, Özyurt 2012). Bu maliyet fonksiyonunu t anında uygun bir kontrol çıktısı olarak tanımlanabilecek olan $u(t)$ 'nin seçimi ile minimize edebilmek mümkündür. Bir sonraki örnekleme zaman adımı $(t+\Delta t)$ y ile r arasında yeni bir durum ortaya çıkmaktadır ve bu durumda u 'nun da yeni bir değer alması gerekecektir. Eğer varsayılan zaman gecikmesi, gerçek sistemde karşılaşılabilecek zaman gecikmesinden daha küçükse bu durumda kontrol çıktısı, gerçek sistemdeki zaman gecikmesi ile birlikte sisteme aktarılmadan önce, gürültü elemanlarını gidermeye çalışacaktır. Bunun sonucunda büyük geri besleme kazançları üreterek sistemi kararsız hale getirecek gerçekleştirilemez bir kontrol edici ortaya çıkmış olacaktır. Diğer taraftan varsayılan zaman gecikmesi gerçek sistemin zaman gecikmesinden daha büyükse bu durumda da sisteme müdahale için en yüksek aktarım hızı sağlanamadığından en düşük olası gürültü değeri elde edilemeyecektir (Ertunç vd. 2003).

MV tekniğinde karşılaşılan güçlükleri ortadan kaldırmak üzere Clarke ve Gawthrop (1975), Aström ve Wittenmark'ın (1973) MV algoritmasının kontrol maliyetini kullanarak geliştirilmiş şekli olan GMV yöntemini ortaya koymuşlardır (Karagöz vd. 2000, Özyurt 2012). GMV kontrol kanunu bir – adım ileri optimum kontrol stratejisidir. Bu tekniğin maliyet fonksiyonu aşağıdaki eşitlikle ifade edilmektedir.

$$J(u,t) = \Xi \{ (y(t+k) - r(t+k))^2 + \lambda (u(t))^2 \} \quad (2.105)$$

Gerçek sistemin kutup ve sıfırlarından birisi birim çemberin dışında ise sistem kararsızdır ve minimum olmayan faz özelliği gösterir. Bu tip kontrol edici tasarımı sistemi içten kararlı hale getirebilmekle birlikte, kararlılık seçilen λ değerlerine bağlıdır. GMV algoritmasının iyi bir set noktası takip karakteristiği vardır ve minimum olmayan faz sistemlerini kontrol etme yeteneğine sahiptir. Eğer varsayılan zaman gecikmesi geliştirilmiş sistem içerisinde uygulanırsa bu durumda kontrol sinyali geliştirilmiş çıktı $\phi(t)$ 'yi, uygun şekilde telafi eder ve şekil 2.5'te gösterildiği üzere ileri beslemeli yola gerekli şekilde yön vermiş olur (Karagöz vd. 2000, Ertunç vd. 2003).



Şekil 2.5 Sistem yalancı-çıkıtısının blok diyagramı (Özyurt 2012)

Ancak eşitlik (2.105)'in kullanımıyla da sıfırdan farklı set noktası varlığında sıfır yatışkın hale ulaşamadığından modifiye edilmesi gerekmiştir (Özyurt 2012).

$$J(u,t) = \Xi\{(y(t+k)-r(t+k))^2 + \lambda(\Delta u(t))^2\} \quad (2.106)$$

Bu maliyet fonksiyonunu kullanan GMV tekniği, istenen amaca oldukça yakın kalmak için minimum bir çıktı değişimini sürdürürken, λ 'yı mümkün olduğunca küçük alarak kapalı hat kararlılığını korumaya dayanır. Bu maliyet fonksiyonu genel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Özyurt 2012).

$$J(u,t) = \Xi\{\phi^2(t+k)\} \quad (2.107)$$

GMV yaklaşımı eşitlik (2.107) ile genel olarak ifade edilen maliyet fonksiyonunu minimize etmek üzere aşağıdaki eşitlikle verilen bir $\phi(t+k)$ sistem yalancı çıktısını kullanır (Özyurt 2012).

$$\phi(t+k) = Py(t+k) + Qu(t) - Rr(t) \quad (2.108)$$

Burada $r(t)$ set noktası, P, Q ve R geri kaydırma işlecinde (z^{-k}) iletim fonksiyonlarıdır (Ertunç vd. 2003).

Şekil 2.5'teki akım şemasından görüldüğü gibi $\phi(t+k)$ sistem yalancı çıktısı, bir ileri besleme terimi (Q) ve çıktı ile set noktasının filtrelenmesini (P, R) içermektedir. GMV algoritması Q ileri besleme polinomunu kullanarak sinyal aktarımından önce çıktı gürültü giderim problemini önlemektedir. Yalancı çıktı $\phi(t+k)$ 'yı elde etmek üzere $y(t+k)$ ile ifade edilen sistem çıktısının tanımlanması gerekmektedir. Bu da doğrusal bir girdi-çıkı modeli olarak tanımlanan sistem modelinin oluşturulmasını gerektirir.

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_{n_a} y(t-n_a) = b_0 u(t-k) + b_1 u(t-k-1) + \dots + b_{n_b} u(t-k-n_b) \quad (2.109)$$

Bu model kesikli transfer fonksiyonu olarak ifade edilebilir.

$$y(t) = \frac{B}{A}u(t-k) \quad (2.110)$$

Burada A ve B polinomları, sırasıyla sistemin kutupları ve sıfırlarıdır. Eşitlik (2.110) ile verilen sistem modelinde sistem çıktısı $y(t)$ yük etkisi içermemektedir. Ancak prosesin kontrol edilen değişkeni üzerinde etkili olan rastgele yükler de sistem modelinde yer almalıdır. Buna göre rastgele yük ifadesini de içeren ARMAX sistem modeli eşitlik (2.111)'de ifade edilmiştir (Özyurt 2012).

$$y(t) = \frac{B}{A}u(t-k) + \frac{C}{A}e(t) \quad (2.111)$$

Yalancı-çıkıtı ifadesinde (Eşitlik (2.108)), $y(t+k)$ sistem çıktısı yerine eşitlik (2.111)'den değeri yazılırsa yalancı-çıkıtı ifadesi aşağıdaki şekli alır.

$$\phi(t+k) = P \left[\frac{B}{A}u(t) + \frac{C}{A}e(t+k) \right] + Qu(t) - Rr(t) \quad (2.112)$$

Düzenlenerek,

$$\phi(t+k) = \frac{PB+QA}{A}u(t) + \frac{PC}{A}e(t+k) - Rr(t) \quad (2.113)$$

elde edilir. Buna göre minimize edilecek maliyet fonksiyonu eşitlik (2.107)'deki yalancı çıktının değişimi olacaktır (Karagöz vd. 2000, Özyurt 2012).

GMV kontrol algoritması sistemi parçalara ayırmaktadır. Bunun için öncelikle hata terimi geçmişteki, şimdiki ve gelecekteki verileri içerecek şekilde parçalara ayrılarak düzenlenir.

$$\frac{PC}{A}e(t+k) = Ee(t+k) + z^{-k} \frac{G}{A}e(t) \quad (2.114)$$

Eşitlik (2.114)'ün her iki tarafı A polinomu ile çarpılır ve düzenlenerek eşitlik (2.115) elde edilir (Özyurt 2012).

$$PC = AE + z^{-k}G \quad (2.115)$$

Polinomlar aşağıdaki gibi yazılır (Karagöz vd. 2000).

$$A = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{n_a} z^{-n_a} \quad (2.36)$$

$$B = b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_{n_b} z^{-n_b} \quad (2.37)$$

$$C = 1 + c_1 z^{-1} + \dots + c_{n_c} z^{-n_c} \quad (2.44)$$

$$E = 1 + e_1 z^{-1} + \dots + e_{k-1} z^{-(k-1)} \quad (2.116)$$

$$G = g_0 + g_1 z^{-1} + \dots + g_{n_g} z^{-n_g} \quad (2.117)$$

$$P = 1 + p_1 z^{-1} + \dots + p_{n_p} z^{-n_p} \quad (2.118)$$

Eşitlik (2.115)'te yer alan AE ifadesinin, ofseti de içeren geliştirilmiş ARMAX modelinden elde edilen değeri eşitlik (2.119)'da verilmiştir.

$$Ay(t+k) = Bu(t) + Ce(t+k) + d \quad (2.119)$$

Eşitlik (2.119)'un her iki tarafı E polinomu ile çarpılır.

$$AEy(t+k) = BEu(t) + CEe(t+k) + Ed \quad (2.120)$$

Eşitlik (2.120), eşitlik (2.115)'te yerine yazılarak eşitlik (2.121) elde edilir.

$$PCy(t+k) = BEu(t) + CEe(t+k) + Ed + Gy(t) \quad (2.121)$$

Eşitlik (2.121)'in her iki tarafı C ile bölünür.

$$Py(t+k) = \frac{BE}{C}u(t) + Ee(t+k) + \frac{Ed}{C} + \frac{G}{C}y(t) \quad (2.122)$$

Eşitlik (2.121), sistem yalancı çıktısı ifadesinde (Eşitlik (2.108)) yerine yazılır.

$$\phi(t+k) = \frac{BE}{C}u(t) + Ee(t+k) + \frac{Ed}{C} + \frac{G}{C}y(t) + Qu(t) - Rr(t) \quad (2.123)$$

Düzenlenerek eşitlik (2.124) elde edilir (Özyurt 2012).

$$\phi(t+k) = \frac{1}{C}[(BE + QC)u(t) + Gy(t) - CRr(t) + Ed] + Ee(t+k) \quad (2.124)$$

$\phi(t+k)$ ifadesi iki bağımsız terimin toplamıdır. İlk terim aşağıdaki gibi ifade edilebilir ve t anına kadar olan verilerden belirlenen en iyi $\phi(t+k)$ tahminini yansıtmaktadır.

$$\phi(t+k|_t) = \frac{1}{C}[(BE + QC)u(t) + Gy(t) - CRr(t) + Ed] \quad (2.125)$$

İkinci terim ise gürültü kaynaklarından, $e(t+1)$, $e(t+2)$, ..., $e(t+k)$, kaynaklı çıktı tahmin hatasıdır. Daha önceden ifade edilmiş olduğu gibi ikinci kaynak kontrol sinyali $u(t)$ ile giderilememektedir (Karagöz vd. 2000, Ertunç vd. 2003).

$$Ee(t+k) = \phi(t+k) + \phi(t+k|_t) \quad (2.126)$$

Tahmin edilen çıktıyı sifıra eşitleyerek J minimize edilmektedir (Ertunç vd. 2003).

$$\phi(t+k|_t)=0 \quad (2.127)$$

$$\frac{[(BE + QC)u(t) + Gy(t) - CRr(t) + Ed]}{C} = 0 \quad (2.128)$$

Burada

$$F = BE + QC \quad (2.129)$$

$$H = CR \quad (2.130)$$

olarak tanımlanmaktadır.

Bu durum kontrol yasasını vermektedir.

$$Fu(t) + Gy(t) - Hr(t) + Ed = 0 \quad (2.131)$$

GMV kontrol kanunu giriş değişkenini aşağıdaki şekilde ifade etmektedir (Özyurt 2012, Ertunç vd. 2003).

$$u(t) = \frac{Hr(t) - Gy(t) - Ed}{F} \quad (2.132)$$

GMV algoritmasının uygulamasındaki adımlar aşağıdaki gibi özetlenebilir (Karagöz vd. 2000, Ertunç vd. 2003).

- 1) Sisteme etki uygulanır ve sistem çıktısı elde edilir.
- 2) YEKK algoritmasını uygulayarak Eşitlik (2.131)'den F, G, H tahmin edilir.
- 3) Kontrol sinyalini değerlendirmek için Eşitlik (2.132) kullanılır.
- 4) Kontrol sinyali uygulanır.
- 5) Sistem çıktısı elde edilir.
- 6) Algoritma adaptif ise 2. adıma dönlür.

2.9 Genelleştirilmiş Öngörmeli Kontrol

GPC kontrol algoritması ilk olarak 1987 yılında Clarke vd. tarafından bulunmuştur. GPC kontrolü, minimum olmayan faz sistemleri, açık hat kararsız sistemler, değişken veya bilinmeyen ölü zamanlar, bilinmeyen sistem dereceleri gibi güçlüklerin üstesinden geldiği ifade edilmektedir (Boyacıoğlu 2013).

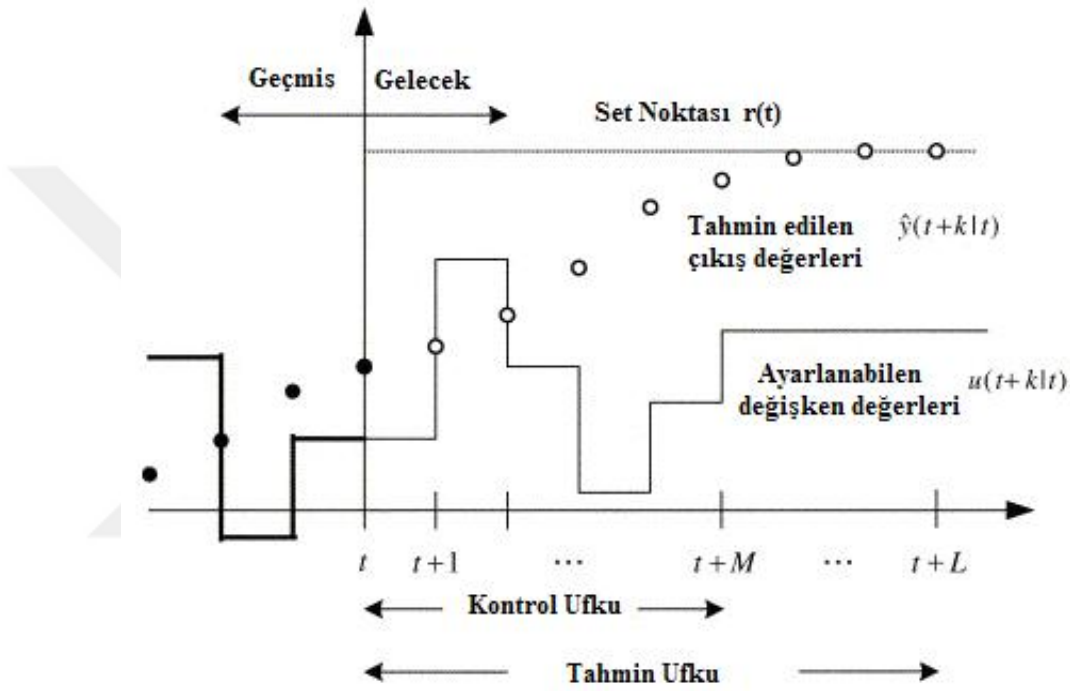
GPC kullanarak değişken parametrelili, değişken ölü zamanlı sistemlerin kararlı olarak kontrolünü sağlamak, sistem tanımlama için yeterli girdi/çıkış verisi olması şartıyla, mümkündür. Bu durum aynı anda açık hat kararsız, minimum olmayan faz sistemleri ve parametrelerle aşırı ifade edilmiş modele sahip sistemler için geçerlidir. Doğrudan kendinden ayarlamalı kontrol yöntemi GMV model derece değişimleri ile ilgili olarak bakıldığında gürbüzdür ancak sistem ölü zaman değişimlerine sahipse yetersiz bir performans ortaya koyar. Dolaylı kutup yerleştirme yöntemi Kendinden Ayarlamalı Oransal-İntegral-Türevsel kontrol edici (STPID) değişken ölü zamanlı sistemleri kontrol eder ancak model derecesi yüksek olanlar için başarılı değildir (Ozkan vd. 1998).

GPC algoritmasını oluşturmak için sistem modelinin aşağıdaki ARIMAX modeli cinsinden ifade edildiği varsayılmıştır:

$$Ay(t) = Bu(t-1) + \frac{C}{\Delta} e(t) \quad (2.133)$$

Eşitlik (2.133)'te $u(t)$ ayarlanabilen değişken, $y(t)$ kontrol edilen değişkeni ifade etmektedir. Δ operatörünün $(1-z^{-1})$ görevi kontrol edicide gürültüyü integre ederek ofseti yok eden integral hareketini sağlamaktır (Clarke vd. 1987, Boyacıoğlu 2013). Gürültü $e(t)$ gelişigüzel veya sistemin yapısına bağlı olabilir. $(C/\Delta)e(t)$, $y(t)$ 'nin gelecek değerini etkiler. Buradaki gürültüye gelişigüzel yürüyen gürültü ya da integrali alınmış beyaz gürültü denir. Bu model gerçekçi bir model olmayabilir fakat ofseti kaldırması bakımından iyi bir modeldir (Erçek 2010).

GPC tasarımı ileriye yönelik olarak bir nokta değil bir aralık kestirilmektedir (Şekil 2.6). Bu aralık seçilirken zaman gecikmesinden büyük olmasına dikkat edilmelidir. Böylece sistemin zaman gecikmesindeki değişimlerin kontrol etkinliğini etkilemesi engellenmiş olur. Bu aralıkta N tane tahmin yapılmakta ve bunlar bir maliyet işlevinde birleştirilerek eşitlik (2.134)'te verilen maliyet fonksiyonu minimize olacak şekilde GPC tasarımı yapılmaktadır (Boyacıoğlu 2013).



Şekil 2.6 Model öngörmeli kontrol yöntemi (Boyacıoğlu 2013)

$$J(N_1, N_2, N_U) = \Xi \left\{ \sum_{j=N_1}^{N_2} [y(t+j) - r(t+j)]^2 + \lambda \sum_{j=1}^{N_U} [\Delta u(t+j-1)]^2 \right\} \quad (2.134)$$

Burada N_1 minimum tahmin ufku, N_2 maksimum tahmin ufku ve N_U kontrol ufkudur. $r(t)$ sinyali sistem çıktısının takip etmesi için seçilen referans sinyalıdır. Pozitif sabit λ kontrol ağırlık faktörünü ifade etmektedir (Boyacıoğlu 2013). Beklenti (Ξ), eşitlik (2.134)'te seçilen kontrol değerlerinin t anı da dahil olmak üzere o ana kadar elde edilen verilerden tahmin edildiğini ifade etmek için kullanılmıştır (Bursalı vd. 2001, Boyacıoğlu 2013).

Eşitlik (2.134)'ü minimize ederek çözmek amacıyla kontrol hareketlerinin gelecekteki ve t anındaki değerlerine bağlı olarak $j = N_1, \dots, N_2$ için çıktının j adım ileri $y(t+j)$ tahminlerinin hesaplanması gerekmektedir. j adım ileri çıktı tahminini hesaplamak için sistemi aşağıdaki gibi bölümlere ayırarak ARIMAX modelinden elde edilen Diophantine eşitliklerinin çözülmesi gerekmektedir (Clarke vd. 1987, Bursalı vd. 2001, Boyacıoğlu 2013).

Eşitlik (2.133)'ün her iki tarafı A polinomu ile bölünür.

$$y(t) = \frac{B}{A} u(t-1) + \frac{C}{A\Delta} e(t) \quad (2.52)$$

Buradaki üçüncü terim j adım ileri tahmin için eşitlik (2.135)'teki gibi yazılabilir.

$$\frac{C}{A\Delta} e(t+j) = E_j e(t+j) + z^{-j} \frac{F_j}{A\Delta} e(t+j) \quad (2.135)$$

Burada $E_j e(t+j)$ gelecekteki verileri, $(F_j/\Delta A)e(t)$ geçmişteki verileri ifade etmektedir. E_j değeri t anındaki bilinmeyen tüm verileri içermektedir (Ozkan vd. 1998). Eşitlik (2.135) aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$C = E_j A \Delta + z^{-j} F_j \quad (2.136)$$

Burada E ve F polinomları aşağıdaki eşitliklerdeki gibi ifade edilir.

$$E_j = 1 + e_1 z^{-1} + e_2 z^{-2} + \dots + e_{j-1} z^{-j+1} \quad (2.137)$$

$$F_j = 1 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2} + \dots + f_{j-1} z^{-j+1} \quad (2.138)$$

Eşitlik (2.136), eşitlik (2.52)'de yerine yazılır, t yerine t + j konur ve düzenlenir.

$$y(t+j) = \frac{B}{A}u(t+j-1) + E_j e(t+j) + \frac{F_j}{A\Delta} e(t) \quad (2.139)$$

Eşitlik (2.133)'ten $e(t)$ ifadesi çekilerek eşitlik (2.139)'da yerine yazılır.

$$e(t) = \frac{A\Delta y(t) - B\Delta u(t-1)}{C} \quad (2.140)$$

$$y(t+j) = \frac{B}{A}u(t+j-1) + E_j e(t+j) + \frac{F_j}{C} y(t) - \frac{F_j B}{AC} u(t-1) \quad (2.141)$$

Ayarlanabilen değişkene ait terimler düzenlenir ve eşitlik (2.141)'de yerine yazılır.

$$\begin{aligned} \frac{z^{+j}B}{A}u(t-1) - \frac{F_j B}{AC}u(t-1) &= \frac{z^{+j}B}{AC}(C - F_j z^{-j})u(t-1) \\ &= \frac{z^{+j}B}{AC}(C - (C - E_j A\Delta))u(t-1) = \frac{E_j \Delta z^{+j}B}{C}u(t-1) \end{aligned} \quad (2.142)$$

$$y(t+j) = \frac{F_j}{C} y(t) + \frac{E_j B}{C} \Delta u(t+j-1) + E_j e(t+j) \quad (2.143)$$

Eşitliğin sağındaki birinci ve ikinci terim mevcut verilerden hesaplanmaktadır. Üçüncü terim ise t zamanındaki ölçüm sinyallerinden bağımsız olan gelecekteki yükleri ifade etmektedir. $y(t+j)$ 'nin minimum değişim tahmini son terimi sıfır yaparak elde edilmekte olup $\hat{y}$ tahmin edilen kontrol değişkeni olmak üzere eşitlik (2.143)'ü aşağıdaki gibi göstermek mümkündür (Ozkan vd. 1998, Erçek 2010, Boyacıoğlu 2013).

$$\hat{y}(t+j) = \hat{y}(t+j) + E_j e(t+j) \quad (2.144)$$

$$\hat{y}(t+j) = \frac{F_j}{C} y(t) + \frac{E_j B}{C} \Delta u(t+j-1) \quad (2.145)$$

Burada $\hat{y}(t+j)$ t anında bilinen sinyal değerleri ve aynı zamanda daha sonra hesaplanacak olan gelecek kontrol girdileridir. Eşitliğin sağındaki ikinci terim hem

geçmiş hem de gelecek verileri içermektedir. Geçmiş ve gelecek kontrol değerlerini ayırmak için ikinci Diophantine eşitliği uygulanır (Ozkan vd. 1998, Erçek 2010, Boyacıoğlu 2013).

$$\frac{E_j B}{C} \Delta u(t+j-1) = G_j \Delta u(t+j-1) + \frac{H_j}{C} \Delta u(t-1) \quad (2.146)$$

Burada G polinomu aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$G = 1 + g_1 z^{-1} + g_2 z^{-2} + \dots + g_{j-1} z^{-j+1} \quad (2.147)$$

Eşitlik (2.146), eşitlik (2.145)'te yerine yazılarak Eşitlik (2.148) elde edilir.

$$\hat{y}(t+j) = G_j \Delta u(t+j-1) + \frac{H_j}{C} \Delta u(t-1) + \frac{F_j}{C} y(t) \quad (2.148)$$

Eşitliğin sağındaki ilk terim gelecek verileri, ikinci ve üçüncü terim ise geçmiş ve şu andaki verileri göstermektedir. Eşitlik (2.148) vektör formuna getirilirse, birinci terim eşitlik (2.149)'daki gibi ifade edilir (Boyacıoğlu 2013).

$$G_j \Delta u(t+j-1) = \underline{g_j} \underline{\Delta u_j} \quad (2.149)$$

Burada;

$$\underline{g_j} = [g_{j-1} \ g_{j-2} \ \dots \ g_1 \ g_0] \quad (2.150)$$

$$\underline{\Delta u_j} = [\Delta u(t) \ \Delta u(t+1) \ \dots \ \Delta u(t+j-1)]^T \quad (2.151)$$

olarak verilmiştir. Benzer şekilde eşitlik (2.148)'in ikinci ve üçüncü terimi eşitlik (2.152)'deki gibi tanımlanır (Boyacıoğlu 2013).

$$f_j = \frac{H_j}{C} \Delta u(t-1) + \frac{F_j}{C} y(t) \quad (2.152)$$

Eşitlik (2.148), eşitlik (2.153)'te olduğu gibi vektörel formda yazılabilir (Clarke vd. 1987, Boyacıoğlu 2013).

$$\hat{y}(t+j) = \underline{g}_j \underline{\Delta u}_j + f_j \quad (2.153)$$

$N_1 = 1$, $N_2 = N$, ve $N_u = N$ alınarak, tanımlanan vektörler $N \times 1$ boyutunda yazılır (Clarke vd. 1987, Boyacıoğlu 2013).

$$\underline{\hat{y}} = [\hat{y}(t+1) \ \hat{y}(t+2) \ \dots \ \hat{y}(t+N)]^T \quad (2.154)$$

$$\underline{r} = [r(t+1) \ r(t+2) \ \dots \ r(t+N)]^T \quad (2.155)$$

$$\underline{\Delta u} = [\Delta u(t) \ \Delta u(t+1) \ \dots \ \Delta u(t+N-1)]^T \quad (2.156)$$

$$\underline{f} = [f_1 \ f_2 \ \dots \ f_N]^T \quad (2.157)$$

Böylece aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$\underline{\hat{y}} = G \underline{\Delta u} + \underline{f} \quad (2.158)$$

Burada G , sistem modelinin impuls yanıt parametreleri, g_i , matrisidir ($N_1 = 1$, $g_i = B/A$). N_2 ve N_u seçimine bağlı olarak G , N_2 satır ve N_u kolondan oluşan bir alt üçgen matristir.

$$G = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ g_1 & g_0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot & & \cdot \\ \cdot & & & & \cdot & \cdot \\ g_{N_2-1} & g_{N_2-2} & \cdot & \cdot & \cdot & g_{N_2-N_U} \end{bmatrix} \quad (2.159)$$

Eşitlik (2.134)'te verilen maliyet fonksiyonu vektörler cinsinden yazılarak eşitlik (2.160) elde edilir.

$$\begin{aligned} J(1, N, N) &= (\hat{\underline{y}} - \underline{r})^T (\hat{\underline{y}} - \underline{r}) + \lambda \Delta u^T \Delta u \\ &= (G \underline{\Delta u} + \underline{f} - \underline{r})^T (G \underline{\Delta u} + \underline{f} - \underline{r}) + \lambda \Delta u^T \Delta u \end{aligned} \quad (2.160)$$

GPC kontrol yönteminde amaç, maliyet fonksiyonunu minimize etmektir. Bu durum eşitlik (2.160)'ı minimum yapacak $\underline{u}$ vektörünün bulunması ile mümkündür. Matematiksel olarak, bir denklemin teğetinin eğiminin sıfır olduğu yer o denklemin minimum olduğu noktadır. Buna göre eşitlik (2.160)'ın türevi alınıp sıfıra eşitlenir (Boyacıoğlu 2013).

$$\frac{dJ}{d\underline{\Delta u}} = 2(G \underline{\Delta u} + \underline{f} - \underline{r})^T G + \lambda 2 \underline{\Delta u}^T = 0 \quad (2.161)$$

Kontrol hareketindeki gelecek değişimler aşağıdaki gibi olur.

$$\underline{\Delta u} = (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T (\underline{r} - \underline{f}) \quad (2.162)$$

Ayarlanabilen değişken olarak $\underline{\Delta u}$ vektörünün ilk elemanı $\Delta u(t)$ prosese uygulanır. Bu çözümden sonra $t + 1$ zamanı için elde edilen veriler kullanılarak gelecek basamak için yeni kontrol sinyali hesaplanır. Buna geriye çekmeli ufuk kontrol stratejisi denir. Burada

kontrol sinyali $\Delta u(t)$ eşitlik (2.163)'ten hesaplanır (Hapoğlu 1993, Erçek 2010, Boyacıoğlu 2013).

$$\Delta u(t) = [1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0] (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T (\underline{r} - \underline{f}) \quad (2.163)$$

Bu durumda GPC kontrol kanunu aşağıdaki gibi elde edilir.

$$u(t) = u(t-1) + (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T (\underline{r} - \underline{f}) \quad (2.164)$$

Eşitlik (2.164)'teki kontrol kazancı (Eşitlik (2.165)) sabit kalmakta, sadece $\underline{f}$ ve $\underline{w}$ vektörleri her örnekleme zamanı için yeniden hesaplanmaktadır (Erçek 2010, Boyacıoğlu 2013).

$$K_c = (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T \quad (2.165)$$

Bu durumda eşitlik (2.164) aşağıdaki gibi gösterilir.

$$u(t) = u(t-1) + K_c (\underline{r} - \underline{f}) \quad (2.166)$$

2.9.1 GPC kontrol tasarım parametrelerinin seçilmesi

Bu bölümde GPC tasarımında kullanılan N_1 , N_2 , λ ve N_U parametrelerinin seçimi hakkında bilgi verilmiştir (Boyacıoğlu 2013).

Minimum Tahmin Ufku, N_1 : Zaman gecikmesi biliniyorsa, N_1 zaman gecikimine eşit alınır çünkü N_1 'i zaman gecikiminden daha küçük yapmak gereksiz hesaplamalar yapmak anlamına gelir. Zaman gecikmesi hakkında hiçbir bilgi yoksa $N_1 = 1$ alınır. N_1 değeri genelde bir tasarım parametresi olarak kullanılmaz (Bursalı vd. 2001, Erçek 2010, Boyacıoğlu 2013).

Maksimum Tahmin Ufku, N_2 : Minimum olmayan faz sistemlerde sistem çıktısının yön değişikliğini (negatif ve pozitif yanıt) içine alacak şekilde seçilmelidir. Sistem cevabı üzerinde etkisi fazla olmamakla birlikte, proses yükselme zamanına yakın olacak şekilde, yeterince büyük seçilmelidir (Bursalı vd. 2001, Erçek 2010, Boyacıoğlu 2013).

Kontrol Ufku, N_U : Basit bir sistemde $N_U = 1$ yapmak genelde kabul edilebilir bir kontrol sağlamaktadır. N_U 'nin arttırılması kontrolün daha aktif olmasına neden olur. Bu aktiflik bir noktaya kadardır. Bundan sonraki N_U değerinin arttırılması kompleks sistemler için uygundur. N_U en azından kararlı olmayan veya sönümlü köklerin sayısına eşit alındığında iyi kontrol gerçekleştirilir (Erçek 2010, Boyacıoğlu 2013).

Kontrol Ağırlık Faktörü, λ : Kontrol aktivitesi üzerinde en etkin ayar parametresidir. λ büyüdükçe sistem tepkisi yavaşlar. Küçük seçildiği durumda sistem daha hızlı tepki verir. Eğer λ büyükse ve açık hat sistem kararsız ise, kapalı hat sistem de kararsız hale gelir. λ 'yı küçük bir değer şeklinde ayarlamak salınımlı davranış gösteren sistemlerde kabul edilebilir bir kontrol elde edebilmek için gereklidir (Bursalı vd. 2001, Boyacıoğlu 2013).

2.10 Kontrol Edici Performans Kriterleri

Kontrol edici ayarlama ilişkileri, basit bir proses modeli için ve belirli yük etkisi veya set noktası değişimi için kapalı devre yanıtı optimize etmek üzere geliştirilmişlerdir. Optimum ayarlar integral hata kriterini minimize eder. Hata karesi integrali (ISE), hata mutlak değeri integrali (IAE), zaman ağırlıklı mutlak hata integrali (ITAE), zaman ağırlıklı hata karesi integrali (ITSE) olmak üzere dört integral hata kriteri aşağıda verilmiştir. Burada hata sinyali $\varepsilon(t)$ set noktası ve kontrol edilen değişkenin ölçülen değeri arasındaki farktır.

$$ISE = \int_0^{\infty} \varepsilon^2(t) dt \quad (2.167)$$

$$IAE = \int_0^{\infty} |\varepsilon(t)| dt \quad (2.168)$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t \cdot |\varepsilon(t)| dt \quad (2.169)$$

$$ITSE = \int_0^{\infty} t \cdot \varepsilon^2(t) dt \quad (2.170)$$

ITAE kriteri uzun süre boyunca devam eden hataları vurgularken ISE kriteri büyük hataları vurgular. IAE kriteri büyük ve küçük olmak üzere bütün hataları aynı şekilde vurgular. ISE performans katsayısı, IAE gibi hatanın mutlak değeri ile işlem yapan diğer performans katsayılarına göre matematiksel işlemlerde daha kolay kullanıldığından optimum kontrol teorisinde daha sık tercih edilmektedir (Coughanowr ve LeBlanc 2009, Tapan ve Erdoğan 2012).

2.11 Simulinkte S-Function Yazımı ve Kontrol Algoritmalarının Oluşturulması

Yapılan çalışmada elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın kontrol edilmesi amacıyla kontrol algoritmalarının oluşturulması kontrol sisteminin tasarlanmasındaki en önemli basamaktır. Simulink'te bir kontrol edici tasarlamak için öncelikle algoritmanın kodlanabileceği ve gerçek zamanlı olarak veri alışverişinin gerçekleştirilebileceği bir fonksiyon bloğu kullanılmalıdır. Bu blok simulink kitaplığından kullanıcı tanımlı fonksiyonlar sekmesinden s-function seçeneği kullanılarak edinilmektedir. Daha sonra MATLAB™ komut penceresine “open sfuntmpl” yazılarak gerçek zamanlı veri akışını sağlayan alt fonksiyonlardan oluşan algoritma şablonu açılır. pH'nin PID, GPC, GMV ve adaptif GMV kontrolü için oluşturulan algoritmalar EK 1-4'te verilmiştir.

Yaratılan bloktan kodlanacak olan algoritma şablonu çağırılır. Bu programda öncelikle mdlInitializeSizes sekmesinde bloğa giren ve bloktan çıkan sinyallerin sayıları ve başlangıç değerleri belirlenmektedir. sizes.NumDiscStates değeri kaç adet kesikli zaman sinyalinin kullanılacağını, sizes.NumOutputs değeri kaç adet sinyalin bloktan çıkacağını ve ayrıca algoritmada döndürüleceğini, sizes.NumInputs değeri bloğa girecek olan sinyallerin sayısını belirlemekte kullanılmaktadır.

Bu işlemler gerçekleştirildikten sonra mdlUpdate sekmesinde her bir zaman adımında döndürülecek olan kontrol edici algoritmaları kodlanmıştır. Algoritmanın ilk satırları bir önceki zaman adımında kullanılan ve hesaplanan değerlerin alınabilmesi amacıyla " $\text{değer}(n-1) = x(n)$ " şeklinde oluşturulmalıdır. Kontrol algoritması bloğuna $t(n)$ anında giren sinyaller giriş sırasına göre $u(n)$ olarak tanımlanmalıdır. Algoritma oluşturulduktan sonra dikkat edilmesi gereken bir diğer husus da algortmada her bir zaman adımında döngü içerisinde kullanılacak olan değerlerin " $\text{sys}(n) = \text{model çıktısı}$ " olacak şekilde kodlanması gereğidir. Aksi takdirde önceki zaman adımlarına ait olan değerler algortmada kullanılamayacaktır.

Kontrol algoritması kodlandıktan sonra mdlOutputs sekmesinde oluşturulan algoritmanın ürettiği çıktılar " $\text{sys}(n) = x(n)$ " olacak şekilde düzenlendikten sonra algoritma son halini almaktadır.

Son olarak mdlGetTimeOfNextVarHit sekmesinde örnekleme zamanı sampleTime oluşturulan kontrol edici modelinin örnekleme zamanı olarak girilmelidir. Kesikli zaman kullanılan kontrol çalışmalarında örnekleme zamanı önemli bir ayar parametresidir. Yapılan çalışmada örnekleme zamanı 0.5 s olarak seçilmiştir.

2.12 Cevap Yüzey Yöntemi

2.12.1 Cevap yüzey yöntemi teorisi ve basamakları

CYY deneysel tasarımıyla ilişkili olarak elde edilen deney verilerinin ampirik bir modele uydurulmasını sağlayan bir grup matematik ve istatistiksel tekniklerden meydana gelir. Bu amaç doğrultusunda sistemi açıklayan doğrusal veya ikinci mertebe polinom fonksiyonları kullanılır.

CYY'de öncelikle çalışmanın amacına ve araştırmacının tecrübelerine bağlı gözlem çalışmaları ve deneysel bölgenin sınırlamaları ile sistem üzerinde büyük etkileri olan bağımsız değişkenlerin seçimi yapılmaktadır. Uygulanacak deneysel tasarım yöntemi

seçildikten sonra deneysel matrise dayalı deneyler gerçekleştirilmektedir. Polinom fonksiyonunun elde edilen deney verilerine uydurulacağı matematik-istatistiksel işlemler yapılarak optimum bölgeye erişmek için bir değişiklik yapılması gerekliliği veya olasılığının incelenmesinin ardından çalışılan her bir değişkenin en uygun değerlerinin belirlenmesi amacıyla optimizasyon işlemi yapılmaktadır (Bezerra vd. 2008).

2.12.2 Deneysel tasarımın seçimi

CYY’de kullanılabilecek en basit model doğrusal bir fonksiyondur. Bunun uygulanabilir olması için elde edilen cevapların aşağıdaki denkleme iyi bir şekilde oturması gereklidir.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \epsilon \quad (2.171)$$

Burada k bağımsız değişken sayısı, β_0 sabit terim, β_i doğrusal parametrelerin katsayıları, x_i bağımsız değişkenler, ϵ ise deneylerle ilişkili artıktır. Gözlenen bazı cevaplarda diğer faktörlerin etkileri veya karşılıklı etkileşimleri de söz konusudur ve ikinci mertebe model kullanılması gerekebilmektedir. Bu durumda aşağıdaki gibi bir model denklemini tanımlanır.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{1 \leq i \leq j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (2.172)$$

Burada β_{ij} etkileşimli parametrelerin katsayılarını göstermektedir. Minimum, maksimum gibi bir kritik noktanın belirlenmesinde polinom fonksiyonunun Eşitlik (2.173)’te görüldüğü gibi ikinci derece terimler içermesi gerekmektedir.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{1 \leq i \leq j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (2.173)$$

Burada β_{ii} ikinci mertebeden parametrelerin katsayılarını göstermektedir. Eşitlik (2.173)'teki parametrelerin belirlenmesi için en çok bilinen ikinci mertebe simetrik tasarımlar üç seviyeli faktöriyel tasarım, Box-Behnken tasarım, MBT veya D-Optimum deney tasarımıdır. Bu tasarımlar deney noktalarının seçimi, bağımsız değişkenlerin seviyeleri, deney sayıları ve deney kalıpları açısından farklılık göstermektedir (Bezerra vd. 2008).

2.12.3 Verilerin matematiksel ve istatistiksel olarak değerlendirilmesi

Seçilen deneysel tasarımdaki her bir deneysel noktaya ait verilerin elde edilmesinin ardından çalışılan değerlere ait cevapların davranışını açıklayan bir matematiksel denklemin oturtulması gerekmektedir. Diğer bir deyişle yukarıdaki denklemlerdeki β parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Matris gösterimiyle bu denklemler aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}}_y = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdot & \cdot & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdot & \cdot & x_{2k} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdot & \cdot & x_{nk} \end{bmatrix}}_X \underbrace{\begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \beta_k \end{bmatrix}}_{\beta} + \underbrace{\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \epsilon_n \end{bmatrix}}_{\epsilon} \quad (2.174)$$

Burada y cevap vektörü, X deneysel tasarım matrisi, β model parametrelerine ait vektör, ϵ artıklar olarak simgelenmektedir.

Eşitlik (2.173), EKK yöntemi kullanılarak çözülmektedir. EKK elde edilmiş deney verilerine matematiksel modeli mümkün olan en az artıkla uydurmak için kullanılan çoklu regresyon tekniğidir. Bu yöntemde artıkların karelerinin toplamını en aza indirmek ve parametreleri tahmin etmek amaçlanmaktadır. β parametrelerinin tahmininde, β parametreleri setinin genelleştirilmiş çözümü artıkların karelerinin toplamı en aza indirildiğinde aşağıdaki gibi verilir.

$$\beta=(X^T X)^{-1} X^T y \quad (2.175)$$

Burada X^T , X matrisinin devriğini ifade etmektedir. Eşitlik (2.175) deney etkinlik alanındaki cevabın davranışını tanımlayan cevap yüzeylerinin oluşturulmasında kullanılır (Bezerra vd. 2008).

2.12.4 Modelin uygunluğunun değerlendirilmesi

Fonksiyonun verilere oturtulmasıyla elde edilen matematiksel model çalışılan deneysel bölgeyi tatmin edici bir şekilde açıklayamayabilir. Oturtulan modelin uygunluğunu değerlendirmenin daha güvenilir bir yolu değişim analizi (ANOVA) yapmaktır. ANOVA’da, uygulama etkilerinin anlamlı olup olmadığına karar vermede kullanılan ölçüt gerçekte uygulamalar veya numune cevaplarındaki farklılıklardır.

ANOVA’da veri setindeki değişimlerin değerlendirilmesi dağılımın incelenmesiyle yapılabilir. Her bir gözlemin (y_i) ya da tekrarların (y_{ij}) sapmalarının (d_i) değerlendirilmesi, ortalama ($\bar{y}$) veya sapmanın karesi ile aşağıdaki eşitlikteki gibi ilişkilendirilerek yapılabilir.

$$d_i^2 = (y_{ij} - \bar{y})^2 \quad (2.176)$$

Ortalama ile ilişkili olarak yapılan tüm gözlemlerdeki sapmaların kareleri toplamı kareler toplamı (SS_{top}) olarak adlandırılır. Bu toplam, regresyona bağlı kareler toplamı (SS_{reg}) ve model tarafından yaratılan artıklardan kaynaklanan kareler toplamından (SS_{res}) oluşmaktadır.

$$SS_{top} = SS_{reg} + SS_{res} \quad (2.177)$$

Merkez noktanın tekrar deneyleri yapıldıkça tekrarlarla ilişkili saf hatayı kestirmek mümkündür. Bu durumda artıklar için kareler toplamı, saf hataya bağlı kareler toplamı (SS_{pe}) ve uyum eksikliğine bağlı kareler toplamından (SS_{lof}) meydana gelmektedir.

$$SS_{res} = SS_{pe} + SS_{lof} \quad (2.178)$$

Her bir değişim kaynağının kareler toplamının (SS_{top} , SS_{reg} , SS_{res} , SS_{pe} , SS_{lof}) kendisine ait serbestlik derecesine (s.d.) bölünmesi ile kareler ortalaması (MS) terimi elde edilir. ANOVA’da kullanılan eşitlikler çizelge 2.14’te verilmiştir.

Çizelge 2.14 Çoklu regresyon kullanılarak deneysel verilerin matematiksel modele uydurulması için ANOVA

Değişim kaynağı	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Kareler ortalaması
Regresyon	$SS_{reg} = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (\hat{y}_i - \bar{y})^2$	$p - 1$	$MS_{reg} = \frac{SS_{reg}}{p - 1}$
Artık	$SS_{res} = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (y_{ij} - \hat{y}_i)^2$	$n - p$	$MS_{res} = \frac{SS_{res}}{n - p}$
Uyum eksikliği	$SS_{lof} = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2$	$m - p$	$MS_{lof} = \frac{SS_{lof}}{m - p}$
Saf hata	$SS_{pe} = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$	$n - m$	$MS_{pe} = \frac{SS_{pe}}{n - m}$
Toplam	$SS_{top} = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (y_{ij} - \bar{y})^2$	$n - 1$	

Burada n deney sayısı, m tasarımdaki toplam seviye sayısı, p modeldeki parametre sayısı, $\hat{y}_i$ i seviyesi için model tarafından tahmin edilen değer, $\bar{y}$ cevapların ortalaması, y_{ij} her bir bağımsız seviyedeki tekrar deneylerinin değeri, $\bar{y}_i$ aynı deney koşullarında tekrarlanan cevapların ortalaması olarak ifade edilmektedir.

Regresyonun anlamlılığı regresyonun kareler ortalaması (MS_{reg}) ile artıkların kareler ortalaması (MS_{res}) oranı ve bu oranın Fisher dağılımı (F testi) ile karşılaştırılmasıyla

değerlendirilir. Bu karşılaştırma yapılırken regresyondan kaynaklı değişim (v_{reg}) ve artığa bağlı değişimin (v_{res}) serbestlik dereceleri hesaba katılmalıdır.

$$\frac{MS_{reg}}{MS_{res}} \approx F_{v_{reg}, v_{res}} \quad (2.179)$$

İstatistiksel olarak bu oran için anlamlı değer tablodan okunan F değerinden daha yüksek olmalıdır. Bu değer matematiksel modelin deneysel verilerle uyumlu olduğunun bir göstergesidir. % 95 güven seviyesi için F tablosu EK 5'te verilmiştir.

Modeli değerlendirmenin diğer bir yolu uyum eksikliği testidir. Eğer matematiksel model deneysel verilerle uyum içindeyse uyum eksikliğinin kareleri ortalaması (MS_{lof}) sadece sistemin doğasından kaynaklanan rastgele hataları yansıtmalıdır. Ek olarak MS_{pe} de bu rastgele hataların bir tahminidir. Eğer bu iki değer arasında istatistiksel bir fark varsa F dağılımını kullanmak mümkün olup regresyonun anlamlılığı bu yolla doğrulanabilir.

$$\frac{MS_{lof}}{MS_{pe}} \approx F_{v_{lof}, v_{pe}} \quad (2.180)$$

Burada v_{lof} uyum eksikliğinden kaynaklı değişimin ve v_{pe} saf hataya bağlı değişimin serbestlik dereceleridir. Eğer bu oran F tablolarındaki değerden daha yüksekse bu uyum eksikliğine dair bir kanıttır ve modelin geliştirilmesi gerektiği sonucuna varılır. Uyum eksikliği testinin uygulanabilmesi için deneysel tasarım en azından merkez noktada tekrarları olacak şekilde düzenlenmelidir.

Kısaca modelin deneysel verilerle uyumlu olması anlamlı bir regresyon ve anlamlı olmayan bir uyum eksikliği ile ifade edilebilmektedir.

Regresyon kareler toplamının kareler toplamına oranı kararlılık katsayısı (R^2) olarak adlandırılır ve bu değer 0-1 arasında değişir. Bu katsayının 0 olması faktörlerin

değerlerdeki değişimi açıklamaması anlamına karşılık gelirken katsayının 1 olması faktörlerin verileri tam olarak açıkladığı anlamına karşılık gelmektedir. Oldukça büyük R^2 değerinin elde edilmesi modelin çok iyi oturduğu yönünde bir görüşün oluşmasına sebep olabilir ancak bu görüşün doğru olması şart değildir. Ayrıca modele daha fazla terimin ilave edilmesi R^2 değerlerinin artmasına sebep olabilir ancak bu modelin anlamlı olarak daha iyi oturduğu anlamına gelmez. Bu sebeple R^2 değerleri yalnız başına faktörlerin etkinliğinin değerlendirilmesinde kullanılmamalıdır (Bezerra vd. 2008).

2.12.5 En uygun koşulların belirlenmesi

Doğrusal modellerle oluşturulan yüzeylerin optimum koşulları elde etmek için yeterli olmadığı durumda deney çalışma bölgesi genişletilmelidir. Ancak deney bölgesi fiziksel veya enstrümental sebeplerden dolayı genişletilemiyorsa çalışılan alanda görsel değerlendirme yapılarak en iyi işletim koşulu bulunmalıdır.

İkinci mertebeden modeller için kritik nokta maksimum ve minimum olarak sınıflandırılabilir. Matematiksel fonksiyonun birinci türevi sıfıra eşitlenerek cevap yüzeyi tanımlanır ve kritik noktanın koordinatlarını hesaplamak mümkündür.

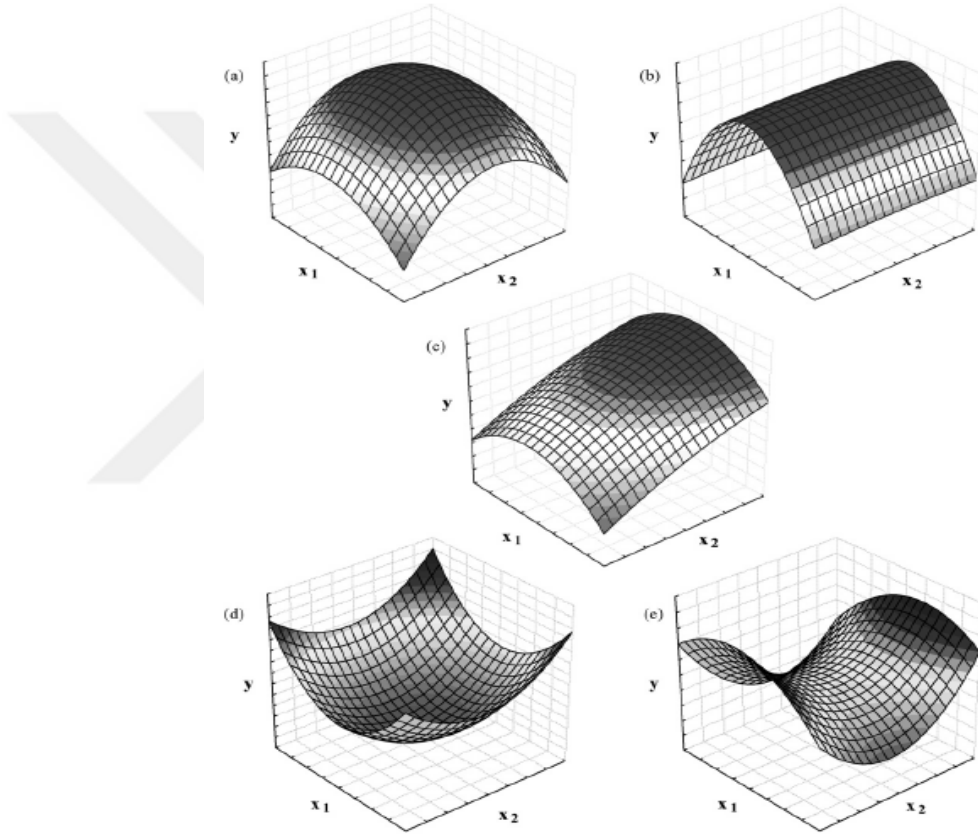
$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_1x_2 \quad (2.181)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x_1} = b_1 + 2b_{11}x_1 + b_{12}x_2 = 0 \quad (2.182)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x_2} = b_2 + 2b_{22}x_2 + b_{12}x_1 = 0 \quad (2.183)$$

Buradan kritik noktanın koordinatının belirlenmesi için eşitlik (2.182) ve (2.183) ile verilen denklem setinin çözülerek x_1 ve x_2 değerlerinin bulunması gerekmektedir.

Öngörülen modelin görselleştirilmesi cevap yüzeyinin çizimi ile elde edilebilir. Eğer üç veya daha fazla değişken varsa grafikler ancak bir veya daha fazla değişkenin sabit tutulabilmesi durumunda görselleştirilebilir. Şekil 2.7 ikinci mertebeden bir cevap yüzeyinde iki değişkenin optimizasyonu için bazı profilleri göstermektedir. Şekil 2.7.a, b’de maksimum nokta deneysel bölgenin içinde yer almaktadır. Şekil 2.7.b’de değişkenlerden birinin seviyelerindeki değişimin çalışılan sistem üzerinde herhangi bir etkiye sahip olmadığı durum gösterilmektedir.



Şekil 2.7 İki değişkenli optimizasyona ait ikinci mertebeden model kullanılarak oluşturulan yüzey cevap profilleri

a. Maksimum, b. Plato, c. Deney bölgesinin dışında maksimum değer, d. Minimum, e. Eyer yüzeyler

Şekil 2.7.c’de maksimum nokta deneysel bölgenin dışındadır ve bu durumda deneysel bölgenin genişletilmesi gerekmektedir. Şekil 2.7.d minimum noktayı göstermekte olup şekil 2.7.e kritik bir nokta olan eyer noktasını yansıtmaktadır. Eyer noktası bağıl

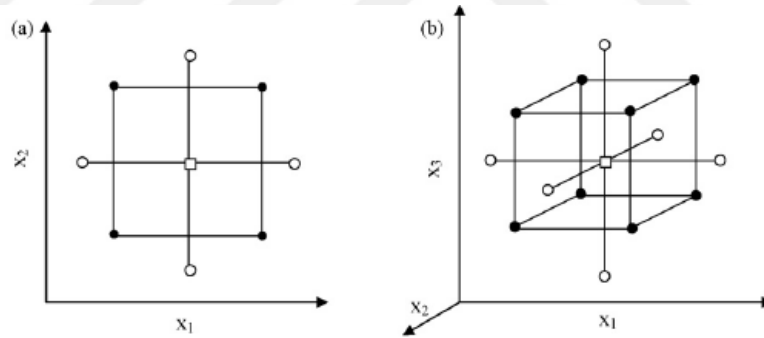
maksimum ve bağıl minimum noktaları arasında bir bükülme noktasıdır ve optimum değer olarak değerlendirilmez (Bezerra vd. 2008).

2.12.6 Merkezi bileşik deney tasarımı

Bu deney tasarımı aşağıdaki kısımlardan oluşmaktadır.

1. Tam veya kesirli faktöriyel tasarım
2. Genellikle deney noktalarının merkezden α kadar uzakta olduğu yıldız tasarım şeklinde ek tasarım
3. Merkez nokta

Şekil 2.8 iki ve üç değişkenin optimizasyonu için tam MBT'yi göstermektedir.



Şekil 2.8 Optimizasyon için MBT

a. 2 değişkenli ($\alpha=1.41$), b. 3 değişkenli ($\alpha=1.68$)

(●) faktöriyel tasarım noktaları (o) eksenel noktalar (□) merkez noktalar

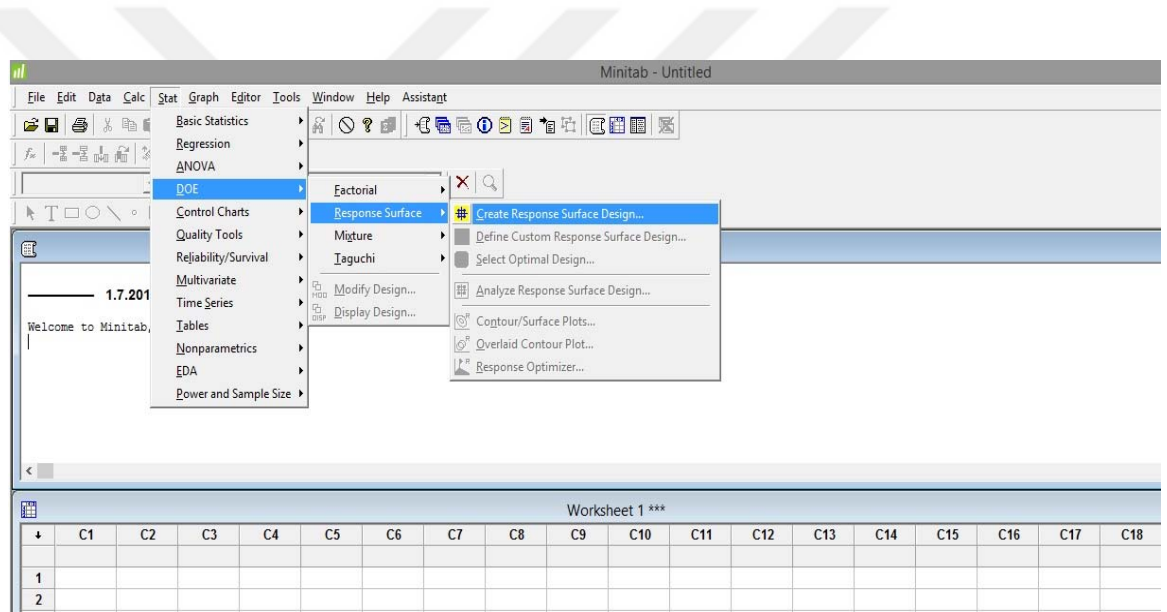
Bu tasarım yöntemine göre gereken deney sayısı $N = 2^k + 2*k + c_p$ ile hesaplanır. Burada k faktör sayısı, c_p ise merkez noktadaki tekrar sayısıdır. α değerleri değişken sayısına bağlıdır ve $\alpha = 2^{k/4}$ ile hesaplanır. Tüm faktörler $-\alpha$, minimum (-1), merkez nokta (0), maksimum (+1) ve $+\alpha$ seviyelerinde çalışılır (Bezerra vd. 2008).

2.13 MINITAB 17 Yazılımı Kullanım Basamakları

2.13.1 MINITAB 17 yazılımı ile deney tasarımı yapılması ve elde edilen sonuçların değerlendirilmesi

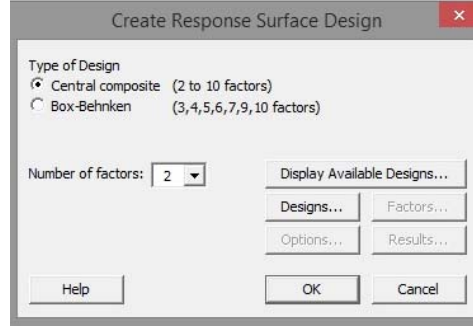
Bu bölümde MINITAB 17 yazılımında deney tasarımı yapmak ve model oluşturmak için izlenecek adımlar anlatılmıştır.

Yazılımda Stat sekmesinde yer alan deney tasarımlarından (DOE) istenen yöntem (Response Surface) seçilir ve deney tasarımı oluşturulmaya başlanır (Şekil 2.9).



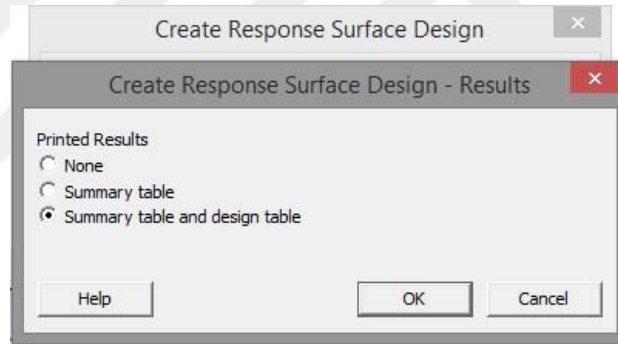
Şekil 2.9 MINITAB 17 giriş penceresi ve deney tasarım sekmeleri

CYY ile deney tasarımı oluşturulmak istendiğinde açılacak pencereden o yönetime ait tasarımlar içinden seçim yapılarak (Central composite) etkili parametre sayısı girilir (Şekil 2.10). Yapılması mümkün olan deney tasarımlarının incelenebileceği Display Available Designs bölümünde deney tasarımı ve faktör sayısına bağlı olarak değişen deney sayıları verilmiştir. Designs kısmından merkez nokta sayısı, alfa değeri, tekrar deneyi sayısı gibi bilgilerin girilmesinin ardından Factors, Options ve Results sekmeleri aktif hale gelmektedir.

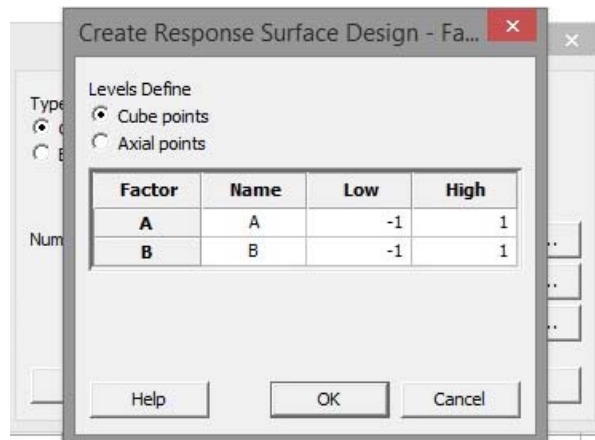


Şekil 2.10 MBT seçenekleri

Results kısmından sonuçların görüntülenmesinde verilecek çizelgeler (sonuç çizelgesi, tasarım çizelgesi) seçilebilmektedir (Şekil 2.11). Factors kısmında ise faktörler isimlendirilebilmekte, en düşük ve en yüksek değerleri girilebilmektedir (Şekil 2.12). Bu işlemlerin yapılmasının ardından deney tasarımı ekrana gelecektir.



Şekil 2.11 Sonuç tablosu seçim menüsü



Şekil 2.12 Faktör seviyesi belirleme menüsü

The image shows the Minitab Design screen. The Session window displays a list of 13 runs. The Worksheet window displays a table with 18 columns (C1 to C18) and 13 rows of data.

#	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18
StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	pH	Sıcaklık													
1	4	1	1	1	11.0000	30.0000												
2	10	2	0	1	7.5000	22.5000												
3	8	3	-1	1	7.5000	33.1066												
4	5	4	-1	1	2.5503	22.5000												
5	9	5	0	1	7.5000	22.5000												
6	11	6	0	1	7.5000	22.5000												
7	7	7	-1	1	7.5000	11.8934												
8	3	8	1	1	4.0000	30.0000												

Şekil 2.13 Tasarım ekranı

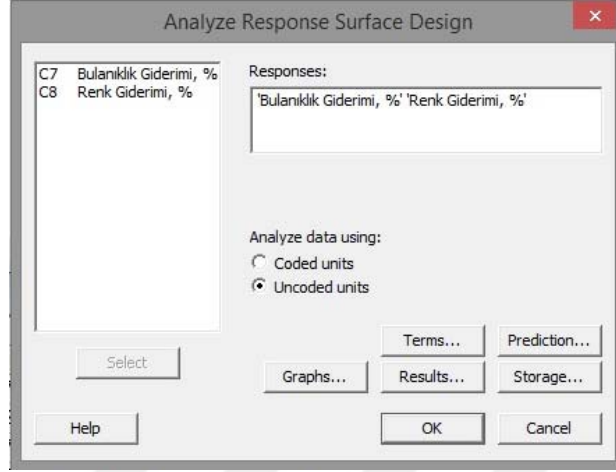
Tasarım ekranında faktörlerin yanındaki kolonlara deneylerden elde edilen cevap veya cevaplar yazılır (Şekil 2.13). CYT ile yapılan çalışmaların analizi için Stat sekmesinden sırasıyla DOE, Response Surface ve Analyze Response Surface seçenekleri seçilir (Şekil 2.14).

The image shows the Minitab Design screen with the Stat menu open. The path Stat > DOE > Response Surface > Analyze Response Surface Design... is highlighted. The Worksheet window displays a table with 10 columns (C1 to C10) and 10 rows of data.

#	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	pH	Sıcaklık	Bulanıklık Giderimi, %	Renk Giderimi, %			
1	12	1	0	2	7.5000	22.5000	100.000	100.000		
2	9	2	-1	2	12.4497	22.5000	14.204	10.329		
3	13	3	0	2	7.5000	22.5000	99.988	100.000		
4	14	4	0	2	7.5000	22.5000	98.120	98.329		
5	10	5	-1	2	7.5000	11.8934	98.676	99.225		
6	8	6	-1	2	2.5503	22.5000	74.676	76.429		
7	11	7	-1	2	7.5000	33.1066	99.338	99.168		
8	2	8	1	1	11.0000	15.0000	50.179	43.441		
9	6	9	0	1	7.5000	22.5000	100.000	99.520		
10	3	10	1	1	4.0000	30.0000	0.000	0.000		

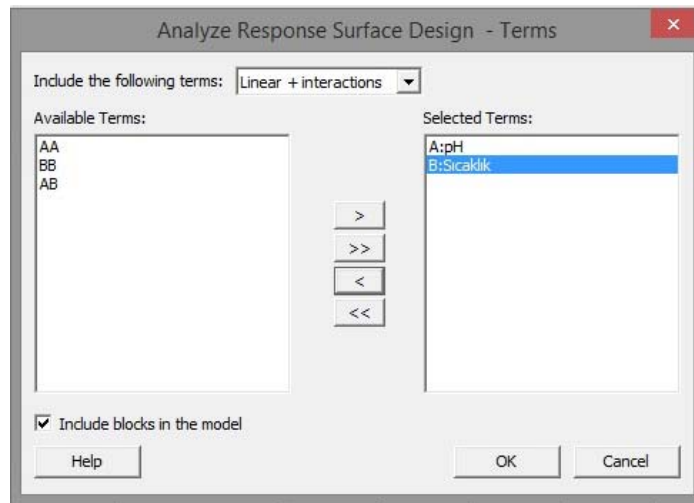
Şekil 2.14 Tasarım ekranına cevapların işlenmesi ve analizi

Açılan pencerede faktörlerin gerçek değerleri ile çalışılmışsa uncoded units, +1, -1 gibi kodlanmış değerleri ile çalışılmışsa coded units seçeneği seçilir (Şekil 2.15).



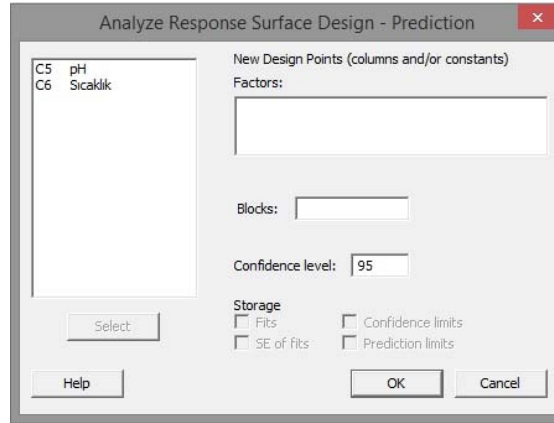
Şekil 2.15 Sonuçların birimlerinin seçimi

Terms sekmesinden doğrusal terimler, terimlerin kareleri, terimler arası etkileşimler veya tüm terimler seçeneklerinden biri seçilir. Seçilen terim grubu Selected Terms kutusunda görüntülendikten sonra Available Terms kutusu ve oklar kullanılarak istenmeyen terimlerin çıkarılabileceği veya farklı gruptan terim eklenebileceği şekilde düzenlenebilmektedir (Şekil 2.16).



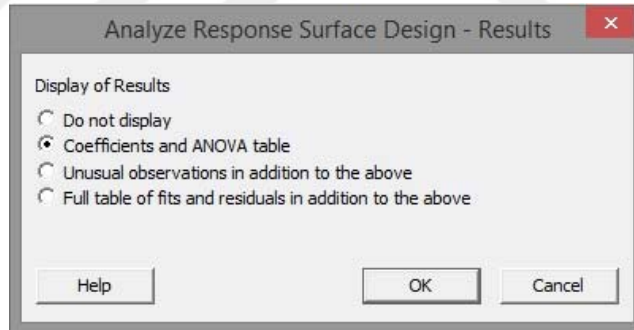
Şekil 2.16 Model terimlerinin seçimi

Prediction sekmesinden analizin yapılması istenen güven seviyesi (Confidence level) ayarlanmaktadır (Şekil 2.17). Bu değer kimya ve kimya mühendisliği uygulamalarında yaygın olarak 0.95 olarak alınmaktadır.



Şekil 2.17 Güven seviyesinin seçimi

Results sekmesinden analiz sonuçlarının verilme şekli seçilebilmektedir (Şekil 2.18).



Şekil 2.18 Analiz sonuçlarının gösteriminin seçilmesi

ANOVA çizelgesinde yer alan F testi istatistiği (F) ve hesaplanan test istatistiğinin olasılık değeri (P) göz önünde bulundurularak seçilmiş modeldeki etkili ve etkisiz terimler belirlenebilmektedir. Etkisiz olduğuna karar verilen terimler çıkarılarak işlemler tekrar edilir. Etkili olduğu kesinleştirilen terimler kullanılarak yapılan analiz sonucunda elde edilen regresyon katsayıları ve cevapları, faktörlere ait terimlere bağlayan model oluşturulmaktadır. Aşağıda tipik ANOVA sonuç gösterimi verilmiştir (Şekil 2.19).

Response Surface Regression: Bulanıklık Giderimi, % versus Block; pH; Sıcaklık

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for Bulanıklık Giderimi, %

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	32,8766	103,442	0,318	0,760
Block	-8,0920	5,572	-1,452	0,190
pH	24,5444	13,135	1,869	0,104
Sıcaklık	-0,6189	6,893	-0,090	0,931
pH*pH	-2,8118	0,626	-4,490	0,003
Sıcaklık*Sıcaklık	-0,1273	0,136	-0,933	0,382
pH*Sıcaklık	0,7042	0,397	1,773	0,119

S = 20,8488 PRESS = 29500,3
R-Sq = 79,80% R-Sq(pred) = 0,00% R-Sq(adj) = 62,49%

Analysis of Variance for Bulanıklık Giderimi, %

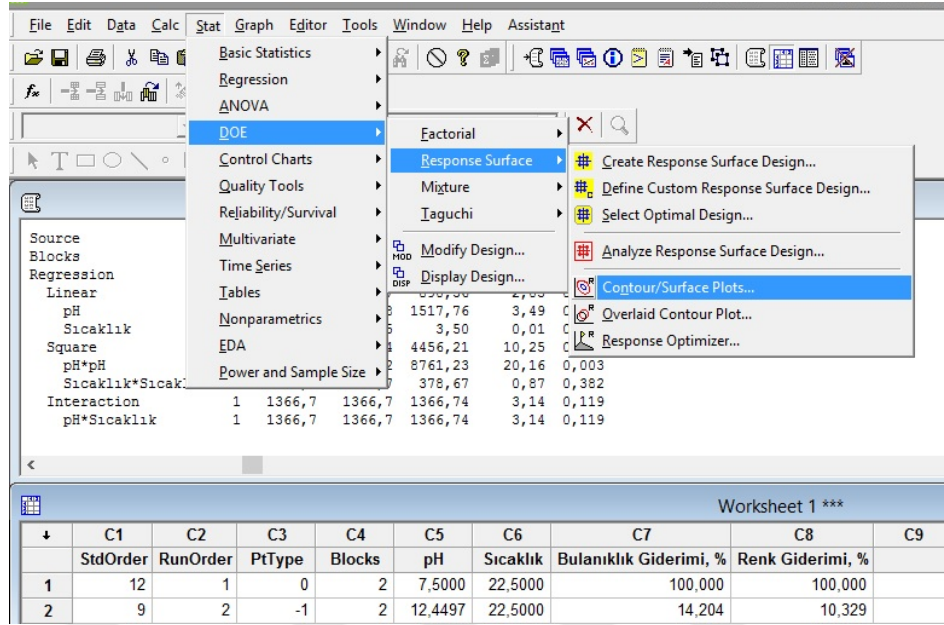
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Blocks	1	916,7	916,7	916,73	2,11	0,190
Regression	5	11104,2	11104,2	2220,83	5,11	0,027
Linear	2	825,0	1780,7	890,36	2,05	0,199
pH	1	313,4	1517,8	1517,76	3,49	0,104
Sıcaklık	1	511,6	3,5	3,50	0,01	0,931
Square	2	8912,4	8912,4	4456,21	10,25	0,008
pH*pH	1	8533,7	8761,2	8761,23	20,16	0,003
Sıcaklık*Sıcaklık	1	378,7	378,7	378,67	0,87	0,382
Interaction	1	1366,7	1366,7	1366,74	3,14	0,119
pH*Sıcaklık	1	1366,7	1366,7	1366,74	3,14	0,119
Residual Error	7	3042,7	3042,7	434,67		
Lack-of-Fit	3	3039,2	3039,2	1013,08	1163,83	0,000
Pure Error	4	3,5	3,5	0,87		
Total	13	15063,6				

Şekil 2.19 Örnek ANOVA tablosu görünümü

2.13.2 MINITAB 17 yazılımı ile sonuçların çizimi

MINITAB 17 yazılımında cevap yüzeylerinin çizilmesi için izlenecek adımlar aşağıda anlatılmıştır.

Yazılımda Stat sekmesinde yer alan deney tasarımlarından (DOE) kullanılan yöntem (Response Surface) seçildikten sonra grafik çizimine (Contour/Surface Plots) gidilir (Şekil 2.20).



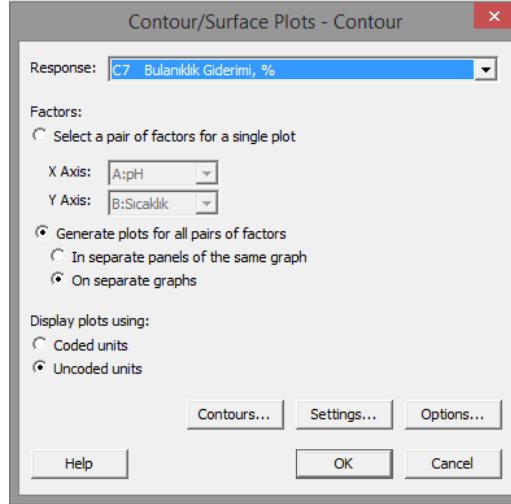
Şekil 2.20 Grafik çizim menüsünün seçimi

Çizilecek grafik türüne (Contour veya Surface) karar verildikten sonra Setup ile grafiklere ait özellikler belirlenir (Şekil 2.21). Kontur ve yüzey grafiklerinde Setup içindeki özellikler benzer olduğundan anlatım kontur grafikleri üzerinden devam edecektir.



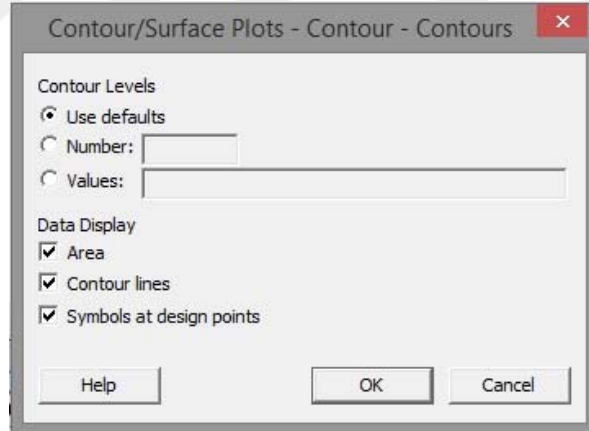
Şekil 2.21 Çizilecek grafik türünün seçimi

Grafiği çizilecek cevap (Response) ve eksenlerde olması istenen faktörler (Factors), sayısı ikiden fazla ise aralarından seçim yapılarak, belirlenir. Grafiklerin çizileceği değerlerin gerçek veya kodlanmış olduğu bilgisi girilir (Şekil 2.22).



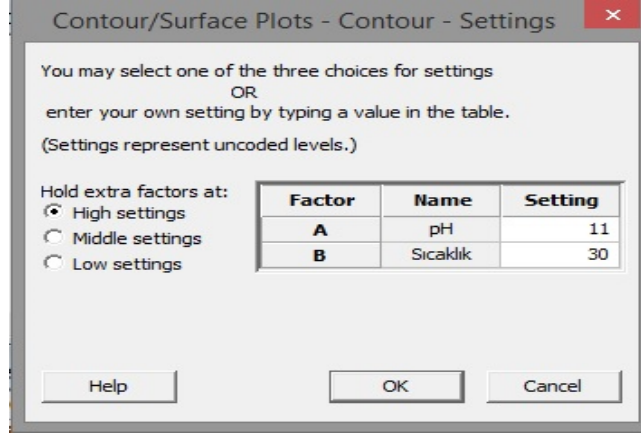
Şekil 2.22 Grafik gösterimlerinin ayarlanması

Contours sekmesinden konturların seviyeleri varsayılan olarak ayarlanabileceği gibi sayı veya değer girerek de belirlenebilir. Data display sekmesinden konturları içleri boyalı çizgiler veya kontur çizgileri olması seçilebilir (Şekil 2.23).



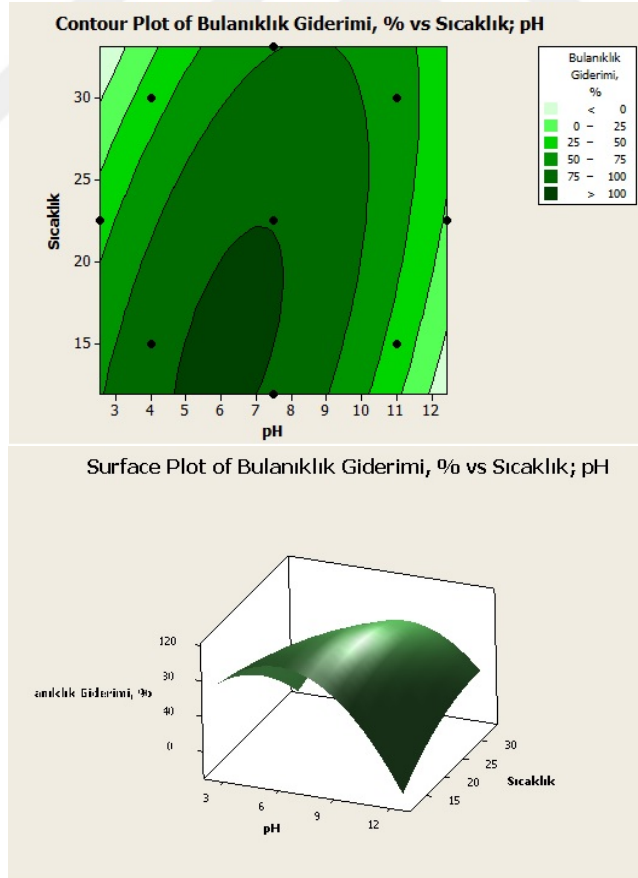
Şekil 2.23 Kontur grafiklerinin görüntü ayarları

Settings sekmesinden yapılacak seçim ile tasarımda üç veya daha fazla faktör bulunması durumunda cevap yüzeylerinin çizimde yer almayan faktörlerin hangi değerlerinde sabit iken çizileceği belirlenmektedir (Şekil 2.24).



Şekil 2.24 Faktörlerin sabit değerlerinin seçimi

Aşağıda kontur ve yüzey grafikleri görülmektedir (Şekil 2.25). Grafiklerdeki yüzeyler veya çizgiler seçilip sağ tıklanarak Edit Surface, Edit Area, Edit Contour Lines seçeneklerinden uygun olan biri ile şekilsel olarak düzenlenebilmektedir.

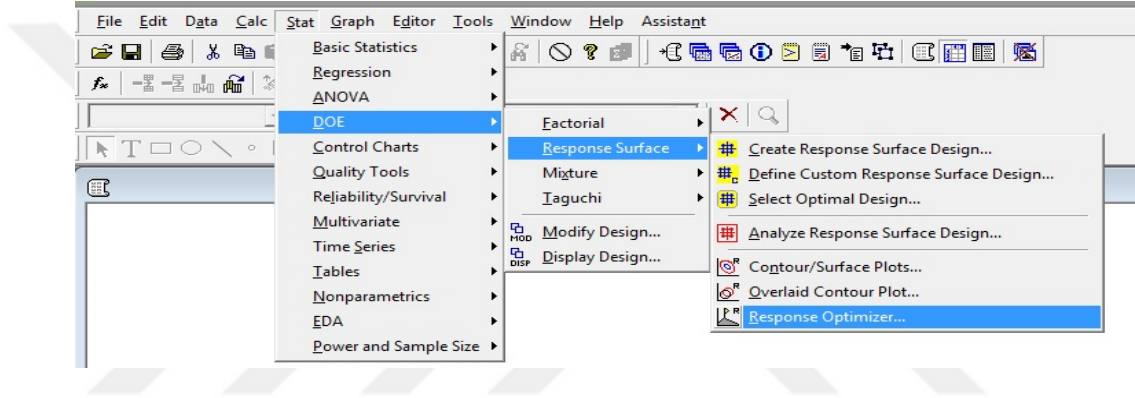


Şekil 2.25 Örnek kontur ve yüzey grafikleri görünümü

2.13.3 MINITAB 17 yazılımı ile parametrelerin en uygun değerlerinin bulunması

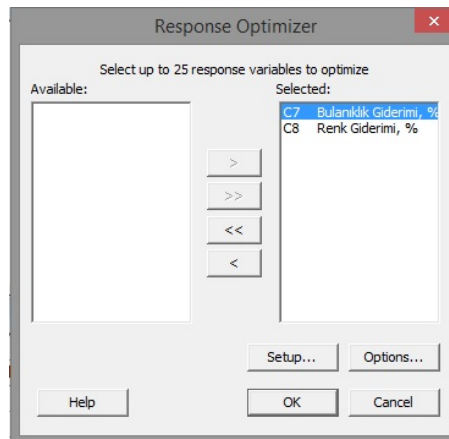
Minitab 17 yazılımında optimum değerlerin bulunması için izlenecek adımlar aşağıda anlatılmıştır.

Yazılımda Stat sekmesinde yer alan deney tasarımlarından (DOE) kullanılan yöntem (Response Surface) seçildikten sonra optimizasyon için Response Optimizer sekmesine gidilir (Şekil 2.26).



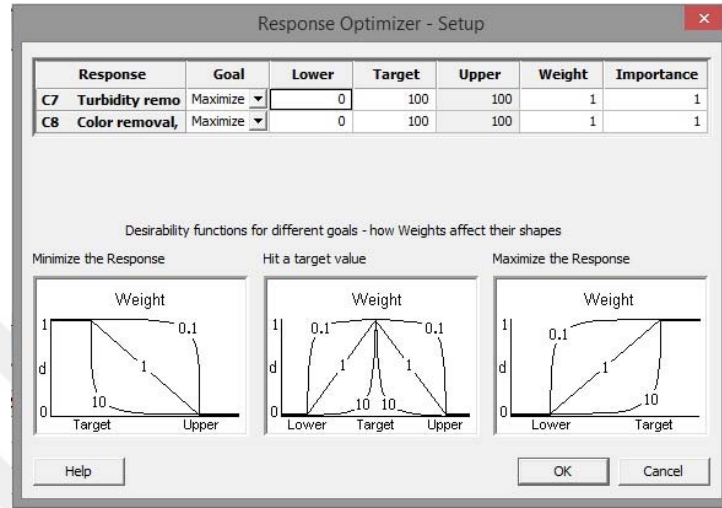
Şekil 2.26 Optimizasyon menüsünün seçimi

Açılan pencereden optimizasyonu yapılacak cevap seçilir (Şekil 2.27).



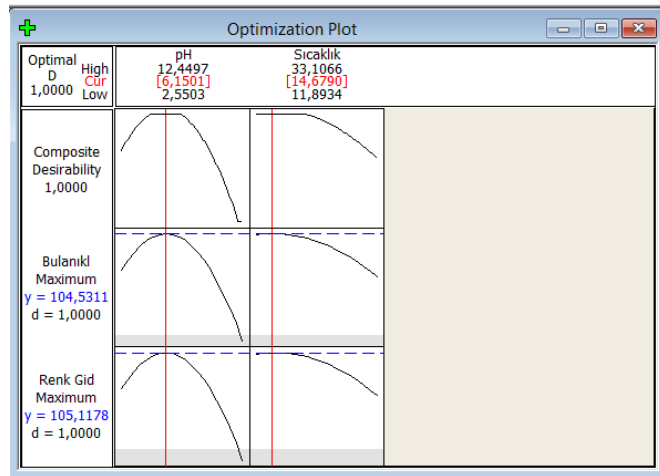
Şekil 2.27 Optimizasyon yapılacak cevapların seçimi

Setup sekmesinden optimizasyon için hedef (goal) olarak minimum, maksimum veya hedef değeri seçeneklerinden biri seçilir ve seçilen hedeflenen sayısal değerler (lower, target, upper) yazılır. Aşağıdaki şekilde hedef olarak % 100 renk ve bulanıklık gideriminin seçildiği durum verilmiştir (Şekil 2.28).



Şekil 2.28 Optimizasyon hedeflerinin belirlenmesi

Elde edilen optimum sonuçlar köşeli parantez içinde gösterilmiş ve bu sonuçlara ait cevap değerleri (y) aşağıda verilmiştir (Şekil 2.29). Amaca uygunluk (desirability, d) optimizasyon için belirlenen hedefe ne kadar yakın olunduğunun bir ölçüsü olup 0 ile 1 arasında değişmektedir.



Şekil 2.29 Optimizasyon sonuçları

2.14 Kesikli Reaktörde Tepkime Kinetiğinin İncelenmesi

Sabit hacimli bir reaktörde i bileşeninin tepkime hızı bileşenin derişiminin değışim hızına bağılı olacak şekilde eşitlik (2.184)'te verilmiştir.

$$r_i = \frac{dC_i}{dt} \quad (2.184)$$

İntegral yöntem deneysel verilerden tepkime hızının belirlenmesi için kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntemde hız denklemi varsayımı yapılmasının ardından denklemin integrali alınarak zamana karşı derişim terimi grafiğre geçirilir. Önerilen hız denklemi deneysel verilerle uyum içindeyse elde edilen grafik doğıru şeklinde olmalıdır. Yeterince düzgün bir doğıru elde edilemediğı durumda yeni bir hız denklemi önerilerek uygunluğı kontrol edilir.

Eşitlik (2.185)'te tersinmez tek moleküllü bir tepkime verilmiştir. Bu tepkime için birinci mertebe hız denklemi varsayımı yapılp, bu varsayımın integrali alındığında sırasıyla eşitlik (2.186) - (2.187) elde edilir.



$$-r_A = -\frac{dC_A}{dt} = kC_A \quad (2.186)$$

$$-\ln \frac{C_A}{C_{A_0}} = kt \quad (2.187)$$

Eşitlik (2.187) zamana karşı $\ln (C_A/C_{A_0})$ şeklinde grafiğre geçirildiğinde şekil 2.30.a'da görüldüğü gibi bir doğıru elde edilir. Eğer deneysel verilerin doğırudan daha çok bir eğriye uygun olduğı düşünülürse önerilen hız denklemi değıştirilir.

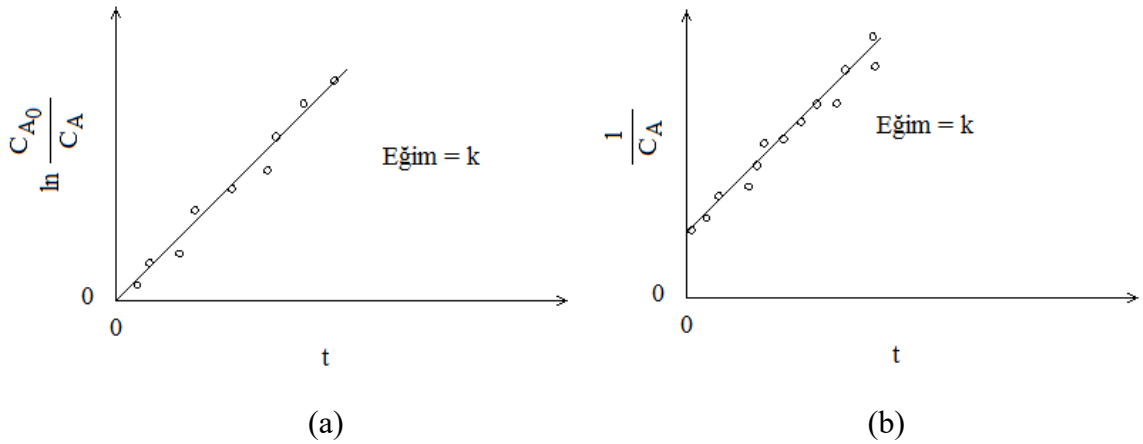
Eşitlik (2.188)'de tersinmez iki moleküllü bir tepkime verilmiştir. Bu tepkime için ikinci mertebe hız denklemi varsayımı yapıp bu varsayımın integrali alındığında sırasıyla eşitlik (2.189) - (2.190) elde edilir.



$$-r_A = -\frac{dC_A}{dt} = kC_A^2 \quad (2.189)$$

$$\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A_0}} = kt \quad (2.190)$$

Eşitlik (2.190) zamana karşı $1/C_A$ şeklinde grafiğe geçirildiğinde şekil 2.30.b'de verilen doğru elde edilir. Deneysel verilerin hız denkleminde uymadığı düşünülürse önerilen hız denkleminde değiştirilir.



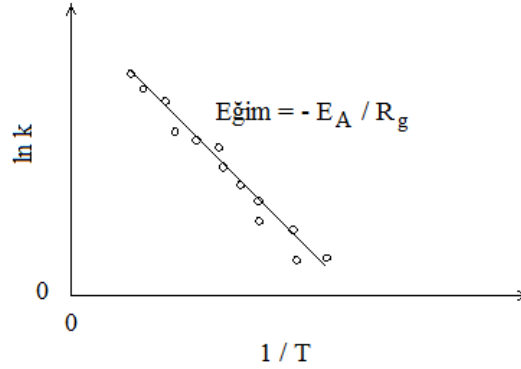
Şekil 2.30 Hız denkleminin deney verilerine uygunluğunun test edilmesi

a. Birinci mertebe, b. İkinci mertebe

Tepkime hızının belli sıcaklıkta derişime bağılılığının belirlenmesinin ardından hız sabitinin sıcaklıkla değişimi eşitlik (2.191)'de verilen Arrhenius ilişkisinin doğrusallaştırılmasıyla elde edilen eşitlik (2.192)'de yer alan deneysel $1/T$ değerlerinin $\ln k$ değerlerine karşı çizilmesiyle incelenir (Şekil 2.31, Levenspiel 1990).

$$k = k_0 e^{-E_A/R_g T} , \quad E_A = \left[\frac{J}{mol} \right] \quad (2.191)$$

$$\ln k = \ln k_0 - \frac{E_A}{R_g T} \quad (2.192)$$



Şekil 2.31 Arrhenius ilişkisine göre tepkimenin sıcaklığa bağlılığı

2.15 Kaynak Araştırması

Uğurlu vd. (2008), yaptıkları çalışmada kağıt hamuru atık sularının elektrokimyasal yöntemle arıtılabilirliği hakkında deneysel incelemelerde bulunmuşlardır. Akım şiddeti, elektrot türü (Al ve Fe) ve elektroliz süresi gibi çeşitli deneysel parametrelerin kağıt hamuru atık sularından elektrokimyasal yöntemle lignin ve fenol giderimindeki etkilerini araştırmışlardır. Lignin, fenol, BOİ₅ ve KOİ giderimleri akım şiddetinin artmasıyla artmaktadır. Al elektrot KOİ giderimi hariç tüm giderim değerlerinde Fe elektroda göre daha yüksek verim sağlamıştır. Bununla beraber BOİ₅ giderimi için gereken arıtım süresi KOİ giderimi için gereken süreden daha fazladır. Her iki elektrot için kirliliklerin gideriminde elektroliz süresi, voltaj ve akım yoğunluğu gibi değişkenlerin optimum değerleri sırasıyla 2 dk, 12 V, 4.8 mA/cm² bulunmuştur. Al elektrot kullanıldığında 7.5 dk sonra prosesin giderim verimleri % 80 lignin, % 98 fenol, % 70 BOİ₅ ve % 75 KOİ'dir. Fe elektrot kullanıldığında giderim verimleri sırasıyla % 92, % 93, %80 ve % 55'tir.

Kalyani vd. (2009), yaptıkları çalışmada kağıt hamuru ve kağıt atık sularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımını incelemişlerdir. Çalışmada kağıt hamuru ve kağıt endüstrisi atık sularının arıtımında elektroliz süresinin, uygulanan akım yoğunluğunun, başlangıç pH'sinin, başlangıç destek elektrolit derişiminin ve elektrot malzemesinin elektrokoagülasyon yönteminin verimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. KOİ ve renk giderim yüzdesinin elektroliz süresiyle arttığı, başlangıç atık su derişimindeki artışla azaldığı görülmüştür. Başlangıç atık su derişimi 3200 mg/l'den 6400 mg/l'ye çıkarıldığında KOİ giderim yüzdesi % 91'den % 53'e düşmektedir. Maksimum KOİ ve renk giderim yüzdesi Fe elektrot için başlangıç elektrolit pH'si 7 olduğunda elde edilmiştir. Akım yoğunluğu 5 mA/cm²'den 10 mA/cm²'ye arttırıldığında KOİ ve renk giderim yüzdesinin sırasıyla % 55 ve % 60'tan sırasıyla % 85 ve %95'e yükseldiği gözlenmiştir. Akım yoğunluğunun 10 mA/cm²'den daha büyük bir değere arttırılması KOİ ve renk giderim veriminde önemli bir artış sağlanmamaktadır. Destek elektrolit derişiminin 200 ppm değerinde 600 ppm değerine arttırılmasıyla KOİ ve renk giderim verimleri sırasıyla % 80 ve % 85'ten % 95 ve % 98 değerlerine yükselmiştir.

Khansorthong ve Hunsom (2009), çalışmalarında kağıt hamuru ve kağıt atık sularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımında kesikli ve sürekli sistemleri kullanarak renk ve KOİ giderimi için optimum koşulları bulmayı hedeflenmişlerdir. 6 adet demir elektrodun paralel bağlı olarak kullanıldığı deneysel çalışmalarda polielektrolit çeşidi, akım yoğunluğu, başlangıç pH'si ve atık suyun sirkülasyon hızının etkisi incelenmiştir. Sonuçlar polielektrolitin kirliliklerin gideriminde etkisinin olmadığını göstermiştir. Kesikli sistemde yapılan çalışmada optimum koşullar 20.7 A/m² akım yoğunluğu, 7.58 başlangıç pH'si, 2.6 l/min sirkülasyon hızı ve 45 dakika elektroliz süresi olarak bulunmuş ve bu koşullarda % 97 renk, % 87.8 KOİ, % 91.2 BOİ₅, % 89.8 AKM ve % 37.5 toplam çözünmüş katı giderimi ile 1.2 kWh/m³ enerji tüketimi ve 0.29 USD/m³ işletme maliyeti elde edilmiştir. Sürekli sistemde yapılan çalışmalarda ise kesikli sistemde bulunan optimum koşullarda ve 66.67 ml/dk besleme hızında çalışılmış ve renk, KOİ, AKM ve çözünmüş katı madde giderimlerinin atık su deşarj standartlarına uygun olduğu ifade edilmiştir.

Soloman vd. (2009), yaptıkları çalışmada kağıt ve kağıt hamuru atık suyunun elektrokimyasal ön arıtım ve sonrasında biyolojik yöntemle arıtımını incelemişlerdir. Maksimum biyobozunurluk için optimum işletme koşulları CYY kullanılarak bulunmuştur. 112.9 A/m² akım yoğunluğu ve 7.3 pH değerlerinde yapılan 6.9 dakikalık çalışmanın biyobozunurluk değerini 0.11'den 0.46'ya çıkardığı belirtilmiştir. Bu işletme koşullarında % 55 KOİ ve % 87 renk giderimi elde edilmiş olup enerji tüketimi 1.19kWh/kg COD ve akım verimi % 144.38 olarak bulunmuştur.

Zaied ve Bellakhal (2009), yaptıkları çalışmada kağıt endüstrisi siyah likör atık suyunun elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımında elektroliz süresi, akım yoğunluğu, elektrot malzemesi ve başlangıç pH'sinin KOİ, fenol ve renk giderimi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Optimum işletme koşulları elektrot malzemesi Al, başlangıç pH'si 7, elektroliz süresi 50 dakika, akım yoğunluğu 14 mA/cm² olarak bulunmuş, bu koşullarda % 98 KOİ, % 92 fenol ve % 99 renk giderimi elde edilmiştir.

Terrazas vd. (2010), yaptıkları çalışmada elektrokoagülasyon prosesini bulanıklık giderimi açısından değerlendirmiş, akım yoğunluğu ve elektrotlar arası mesafenin yönteme etkisini incelemişlerdir. 300 ml'lik küçük ölçekli çalışmalarında akım yoğunluğu arttıkça giderim veriminin az da olsa bir gelişme gösterdiği gözlemlenmiştir. Fakat hücre voltajında ve dolayısıyla enerji tüketiminde artış gerçekleşmiştir. 4.5 ml'lik büyük ölçekli çalışmalarında anot ve katot arası mesafenin etkisi de incelenmiş olup bu amaçla elektrot tabakaları arasında 1 cm, 2 cm, 3 cm uzaklıklar dikkate alınmış ve bulanıklık giderim yüzdesinin mesafenin artışıyla azaldığı görülmüştür.

Katal ve Pahlavanzadeh (2011), yaptıkları çalışmada kağıt hamuru atık sularından renk, KOİ ve fenol gideriminde elektrokoagülasyon yönteminin verimini incelemiş, bu kapsamda akım yoğunluğu, başlangıç pH'si ve sıcaklığın giderim performansına etkisini araştırmışlardır. 10-110 mA/cm² aralığındaki farklı akım yoğunlukları Al ve Fe elektrotların anot ve/veya katot materyali olarak kullanıldığı dört farklı kombinasyonu ile incelenmiş, optimum akım yoğunluğu ve elektrokoagülasyon süresi sırasıyla 70 mA/cm² ve 30 dk olarak belirlenmiştir. Maksimum renk giderimi anot ve katot materyali olarak

Al-Al elektrotlar kullanıldığı durumda, maksimum fenol ve KOİ giderimi anot ve katot materyali olarak Fe-Fe elektrotların kullanıldığı durumda sağlanmıştır. Çok düşük ve çok yüksek pH'lerde giderim verimi çok düşük olduğundan en uygun başlangıç pH'si 5-7 aralığı olarak tespit edilmiştir. 30 dakikalık elektroliz süresinin, sıcaklık artışının metal hidroksit çözünürlüğünü arttırması nedeniyle renk, fenol ve KOİ gideriminde negatif etkiye sahip olduğu gözlenmiş ve en uygun başlangıç arıtım sıcaklığı 20 °C olarak bulunmuştur. En uygun koşullarda gerçekleştirilen arıtım çalışmalarında KOİ, renk ve fenol giderimleri sırasıyla % 90, % 98 ve % 97 olarak elde edilmiştir.

Bellebia vd. (2011) çalışmalarında karton ve kağıt atık sularının birleştirilmiş elektrokoagülasyon ve adsorpsiyon prosesleri ile arıtımında KOİ ve bulanıklık giderimini incelemişlerdir. Elektrokoagülasyon yöntemi ile yapılan ön arıtımda Al ve Fe elektrotlar, adsorpsiyon yöntemi ile yapılan arıtımda ise aktif karbon kullanılmış olup çalışmalarda elektroliz süresi, akım yoğunluğu, başlangıç pH'si, adsorpsiyon süresi, karıştırma ve aktif karbon miktarının etkileri araştırılmıştır. Elektrokoagülasyon yönteminde optimum pH Al elektrot için 5.29, Fe elektrot için 7.21, optimum akım yoğunluğu ve işletme süresi sırasıyla 4.41 mA/cm² ve 10 dakika olarak bulunmuş, bu koşullarda Al elektrot ile sırasıyla % 75.37 ve % 99.93, Fe elektrot ile sırasıyla % 78.76 ve % 99.92 KOİ ve bulanık giderimi elde edilmiştir. Elektrokoagülasyon ve adsorpsiyon yöntemlerinin ardışık uygulandığı çalışmada optimum değerler 3.21 pH, 300 rpm karıştırma hızı, ve Al elektrot için 120 dakika, Fe elektrot için 180 dakika süre olarak bulunmuş, bu değerlerde 0.7 g/L aktif karbon kullanılarak yapılan çalışmalarda KOİ giderimleri Al ve Fe elektrotlar için sırasıyla % 98.97, % 93.97 şeklinde elde edilmiştir.

Sridhar vd. (2011), çalışmalarında kağıt hamuru ve kağıt atık sularının arıtımında CYY'lerden Box-Behnken tasarımını kullanarak akım yoğunluğu, başlangıç pH'si, elektrolit derişimi ve elektroliz süresinin renk, KOİ ve BOİ₅ giderimi üzerindeki etkilerini ifade etmek amacıyla model oluşturmuşlardır. Al elektrotların kullanıldığı kesikli elektrokoagülasyon sisteminde R² değerleri renk, KOİ ve BOİ₅ için sırasıyla 0.987, 0.990 ve 0.991 bulunmuş, elde edilen modellerin deneysel verilerle uyumlu olduğu ifade edilmiştir.

Sridhar vd. (2011), yaptıkları çalışmada kağıt hamuru ağartma atık sularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımını incelemişler bu amaçla Al elektrotlar kullanarak akım yoğunluğu, başlangıç pH'si, NaCl derişimi ve karıştırma hızının renk, KOİ ve BOİ₅ giderimi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Deneysel çalışmalardan maksimum renk, KOİ, BOİ₅ giderimi için optimum koşullar olarak 15 mA/cm² akım yoğunluğu, 7 başlangıç pH'si, 1 g/l NaCl, 100 rpm karıştırma hızı, 28 °C sıcaklık ve 3 cm elektrot mesafesi elde edilmiştir. Enerji tüketiminin artan karıştırma hızı ve NaCl derişimi ile azaldığı sonucuna varılmıştır. Optimum koşullar altında renk, KOİ ve BOİ₅ giderimi sırasıyla % 94, % 90 ve % 87, işletme maliyeti 1.56 US dolar/m³ bulunmuştur. Enerji tüketimi hesaplanmış ve 10.1 ile 12.9 kWh/m³ arasında değiştiği gözlenmiştir.

Vepsäläinen vd. (2011a) yaptıkları çalışmada ağaç reçinesi ve bakır ile reçine asitleri kullanılarak hazırlanan sentetik atık su ve kağıt hamuru endüstrisi atık sularından reçine asitleri ve bakırın, demir elektrotlar ve monopolar paralel bağlantı şeklinin uygulandığı elektrokoagülasyon prosesiyle giderilmesinde istatistiksel deneysel tasarım ve kısmi EKK modelleme yöntemlerini kullanarak başlangıç pH'si, akım şiddeti ve arıtım süresinin etkisini incelemişlerdir. Başlangıç pH'si 4-8, akım şiddeti 1-3 A, arıtım süresi 60-360 s aralığında çalışılmış olup, reçine asit derişimi 125 mg/l olan sentetik atık suyun kullanıldığı durumda başlangıç pH'sinin 5 olarak ayarlandığı 60 s süren arıtım ve 1.2 µm cam elyaf filtrasyonu sonucunda reçine asitlerinin giderim oranını % 97 olarak belirlemişlerdir. Bunun yanı sıra 60 s süren arıtımda 2A akım şiddeti kullanılması durumunda % 72-97 bakır giderimi sağlanmış, atık suyun *Pseudokirchneriella subcapita* türü algler üzerindeki zehirli etkilerinin tamamen ortadan kaldırıldığı belirtilmiştir. Kağıt hamuru endüstrisi atık sularının kullanıldığı durumda başlangıç pH'sinin 6, akım şiddetinin 2A, arıtım süresinin 360 s olduğu arıtım çalışmasında en yüksek renk ve zehirlilik giderimi elde edilmiş olup, elektrokoagülasyon yönteminin kullanılması esnasında ortama oksitleyici madde ilavesinin ve arıtım sonrasında dinlendirme ve filtrasyon gibi ayırma işlemlerinin uygulanmasının kağıt hamuru üretimi atık sularındaki kirleticilerin daha etkin bir şekilde giderimini sağlayacağı vurgulanmıştır.

Vepsäläinen vd. (2011b) kağıt hamuru ve kağıt atık sularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımını çözünmüş sülfid iyonlarının çökmesi açısından incelemişlerdir. Yöntemin

sülfitlerden kaynaklanan koku gideriminde uygunluğunun belirlenmesi amacıyla elektrokoagülasyon prosesinden önce ve sonra çözünmüş organik karbon ve fosfor analizi yapılmıştır. Çalışmada monopolar bağlı 4 adet Fe elektrot kullanılarak oluşturulan Fe^{2+} iyonlarının çözünmüş sülfid iyonlarını etkili bir şekilde çöktürdüğü görülmüştür. Arıtım çalışmalarında 10-60 C/L elektrik yükü uygulandığında elektrik tüketimi 4-8 C/mg S^{2-} , demir tüketimi 1.1-2.2 mg/mg S^{2-} olarak bulunmuştur. 60 C/L elektrik yükü uygulandığında % 88 çözünmüş sülfid ve % 40 fosfor giderimi sağlanmıştır. Sülfidlerin çöktürülmesi amacıyla yapılan bu çalışmada çözünmüş organik karbon gideriminin çok az olduğu belirtilmiştir. Elde edilen veriler değerlendirildiğinde elektrokoagülasyon yönteminin kağıt hamuru ve kağıt atık sularında sülfitlerden kaynaklanan kokunun gideriminde ekonomik olarak uygulanabilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Zodi vd. (2011) iki adet Al veya iki adet Fe elektrodun paralel bağlandığı kesikli elektrokoagülasyon sisteminde 90 dakika süre ile çalışmışlardır. Bu çalışmada 100 A/m² ve 150 A/m² olmak üzere iki farklı akım yoğunluğunda Al elektrot kullanıldığında sırasıyla % 38 ve % 46 çözünmüş organik karbon giderimi, % 47 ve % 68 KOİ giderimi; Fe elektrot kullanıldığında sırasıyla % 24 ve % 31 çözünmüş organik karbon giderimi, % 32 ve % 41 KOİ giderimi elde etmişlerdir. Arsenik, organik olmayan mikro kirletici olarak seçilmiş ve yapılan çalışmanın sonunda değeri 3.8 µg/L'den Al elektrot kullanımı ile 0.4 µg/L'ye, Fe elektrot kullanımı ile 0.5 µg/L'ye düşürülmüştür.

Al-Shannag vd. (2012) yaptıkları çalışmada kağıt endüstrisi atık suyunun koagülasyon yöntemi, elektrokoagülasyon yöntemi ve bu iki yöntemin birlikte uygulandığı yöntemle arıtımında AKM ve KOİ giderimini araştırmışlardır. Elektrokoagülasyon deneyleri Fe elektrotlar, koagülasyon deneyleri $Fe_2(SO_4)_3$ veya $CaCO_3$ kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Koagülant türü, başlangıç pH'si, akım yoğunluğu, sirkülasyon hızı ve elektrokoagülasyon süresinin AKM ve KOİ giderimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan koagülasyon çalışmalarında $Fe_2(SO_4)_3$ ve $CaCO_3$ kullanıldığında sırasıyla % 36, % 25 KOİ ve % 21, % 15 AKM giderimi bulunduğu ifade edilmiştir. Elektrokoagülasyon yönteminde optimum koşullar 0.87 L/dk sirkülasyon hızı, 60 A/m² akım yoğunluğu, 30 dakika elektrokoagülasyon süresi ve pH 7.5 olarak bulunmuş, bu koşullarda yapılan çalışmada % 82 KOİ, % 78 AKM giderimi elde edilmiştir. Elektrokoagülasyon ve koagülasyonun

birlikte uygulandığı yöntemle arıtımda ise 60 A/m², 5.2 L/dk, 7.5 pH koşullarında 30 dakika sonunda elde edilen giderim yüzdeleri Fe₂(SO₄)₃ ve CaCO₃ için sırasıyla % 93, % 91 AKM ve % 97, % 93 KOİ olarak verilmiştir.

Demirci vd. (2015) yaptıkları çalışmada elektrokoagülasyon yöntemi ile tekstil endüstrisi atık sularının arıtımında elektriksel iletkenlik ve pH parametrelerini bulanık mantık ile kontrol etmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla NaCl ve H₂SO₄ çözeltisi akış hızları ayarlanabilen değişkenler olarak seçilmiş ve çalışmalar 4 adet alüminyum elektrodun monopolar bağlandığı sistemde 1 saat süre ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar kontrol yapılmayan durumda % 75.7 bulanıklık, % 72.8 renk ve % 66.2 KOİ gideriminin sağlandığını, pH ve iletkenliğin bulanık kontrolü ile bu değerlerin sırasıyla % 91.4, % 88.1, % 75.9'a yükseldiğini göstermiştir. Yapılan çalışmada kontrolün yapılmadığı durumla kıyaslandığında işletme maliyeti ve enerji tüketiminin bulanık kontrol uygulaması ile azaltıldığı ifade edilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Materyal

3.1.1 Deney Sistemi

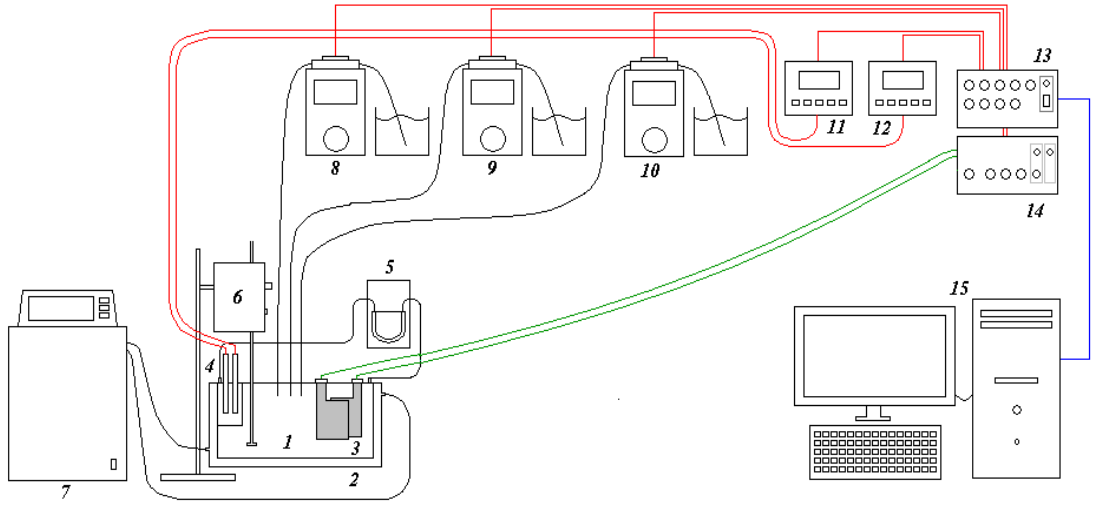
Kağıt endüstrisi atık sularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımında kontrol etkinliğinin ve işletme parametrelerinin kontrol edilmesinin giderim verimlerine etkilerinin gözlenmesi amacıyla kontrol çalışmaları, en uygun işletim parametrelerinin elde edilmesi amacıyla optimizasyon çalışmaları ve tepkime kinetiğinin belirlenmesi amacıyla kinetik çalışmaları yapılmıştır. Şekil 3.1’de verilen sistemde elektrokoagülasyon deneyleri için korozyona dayanıklı plexiglass malzemeden yapılmış dikdörtgen kesitli 2 litre hacimli elektrokoagülasyon reaktörü ve bu reaktör içine 1 cm aralıklarla yerleştirilmiş 60 mm x 60 mm x 3 mm boyutlarında Al veya Fe elektrotlar görülmektedir. Elektrokoagülasyon reaktöründe gerçekleştirilen çalışmaların sabit akım koşullarında sürdürülebilmesi için 0-2 A aralığında çalışan dijital doğru akım güç kaynağı (MAY 11-PS Constant Current Power Supply) kullanılmıştır. Çalışmalarda kullanılacak destek elektrolit, asit ve baz ilgili tanklardan peristaltik pompalar (Longer Pump LEAD-2) vasıtasıyla reaktöre beslenmektedir. Elektrokoagülasyon çalışmalarında reaktör içinde meydana gelmesi muhtemel sıcaklık yükselmelerini önlemek ve sıcaklığı istenen değerde sabit tutmak amacıyla sistemde ısıtmalı-soğutmalı su sirkülatörü (Hoefer RCB 20-PLUS) yer almaktadır. Sirkülatörden sağlanan sabit sıcaklıktaki su, bir on-off vana yardımıyla reaktör etrafındaki ceketten geçirilmektedir.

Çalışmalarda reaktör içinde derişim ve sıcaklığın homojen dağılımının sağlanabilmesi için 150-2000 rpm aralığında çalışan bir karıştırıcı (MTOPS MS3020) kullanılmaktadır. Atık su arıtımı esnasında ortamın pH, sıcaklık ve iletkenliğinin ölçülmesi amacıyla reaktöre daldırılmak üzere pH ve elektriksel iletkenlik ölçerler bulunmakta olup sıcaklık ölçümü pH ölçere yerleştirilmiş bir termočift aracılığıyla yapılmakta ve yapılan ölçümler göstergeler (Mettler-Toledo M200 Easy) yardımıyla izlenebilmektedir.



Şekil 3.1 Elektrokoagülasyon deney sistemi

pH, elektriksel iletkenlik ve sıcaklık ölçümlerinin reaktör içinde meydana gelen yük dağılımlarından etkilenmesini önlemek amacıyla ilgili ölçerlerin reaktör içinde ayrılmış bir bölmede tutulması düşünülmüş olup bu bölmeye numune akışı bir pompa (ASPEN STANDARD PUMP) aracılığıyla yapılmakta, bu bölgeyi terk eden numune tekrar reaktör içine beslenmektedir. Bu ölçerlerden alınan sinyaller MAY 11-ESA Electrophoresis Control Unit marka proses kontrol ünitesindeki çevirici modüllerden geçirilerek Universal Serial Bus iletişim protokolü kullanan veri transfer edici vasıtasıyla MATLAB™/Simulink'te tasarlanan kontrol ediciye iletilmekte, kontrol edici tarafından yapılan hesaplamalar sonucunda kontrol ediciden alınan sinyaller aynı MAY 11-ESA Electrophoresis Control Unit marka modüller vasıtasıyla ilgili peristaltik pompaya gönderilmekte ve akış hızları ayarlanmaktadır. Deney sisteminin şematik gösterimi şekil 3.2'de verilmiştir. Deneysel çalışmalarda sisteme 1 L kağıt endüstrisi atık suyu beslenmiş, 6 adet elektrot 3'ü anot 3'ü katotta olmak üzere monopolar paralel bağlanmıştır. Çalışmada elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklık parametreleri kontrol edilen değişkenler; sırasıyla destek elektrolit, asit ve baz akış hızları ve soğutma suyu akış hızı ayarlanabilen değişkenler olarak seçilmiştir. Elektriksel iletkenlik ve pH'nin dinamik analiz ve kontrol çalışmalarında destek elektrolit, asit ve baz çözeltileri olarak sırasıyla 0.04 M NaCl, 0.1 M HCl ve 0.1 M NaOH kullanılmıştır.



Şekil 3.2 Deney sisteminin şematik gösterimi

1: elektrokoagülasyon reaktörü, 2: elektrokoagülasyon reaktörü ısıtma-soğutma ceket, 3: elektrotlar, 4: pH, elektriksel iletkenlik, sıcaklık ölçer, 5: reaktör içinde ölçümlerin yapıldığı bölmeye numune sirkülasyon pompası, 6: karıştırıcı, 7: su sirkülatörü, 8: asit pompası, 9: baz pompası, 10: destek elektrolit pompası, 11: pH ve sıcaklık göstergesi, 12: elektriksel iletkenlik göstergesi, 13: kontrol birimi, 14: güç kaynağı, 15: bilgisayar

Elektrokoagülasyon ile atık su arıtımını gerçekleştirmek, giriş ve çıkış değişkenlerini gözlemlemek, elektrokimyasal reaktörde dinamik analiz ve kontrol çalışmalarını gerçekleştirmek üzere gerçek zamanlı MATLAB™/Simulink modeli ve PID, GMV, GPC, adaptif GMV kontrol edici programları tasarlanmıştır. Tasarlanan modellerde örnekleme zamanı olarak 0.5 s kullanılmıştır.

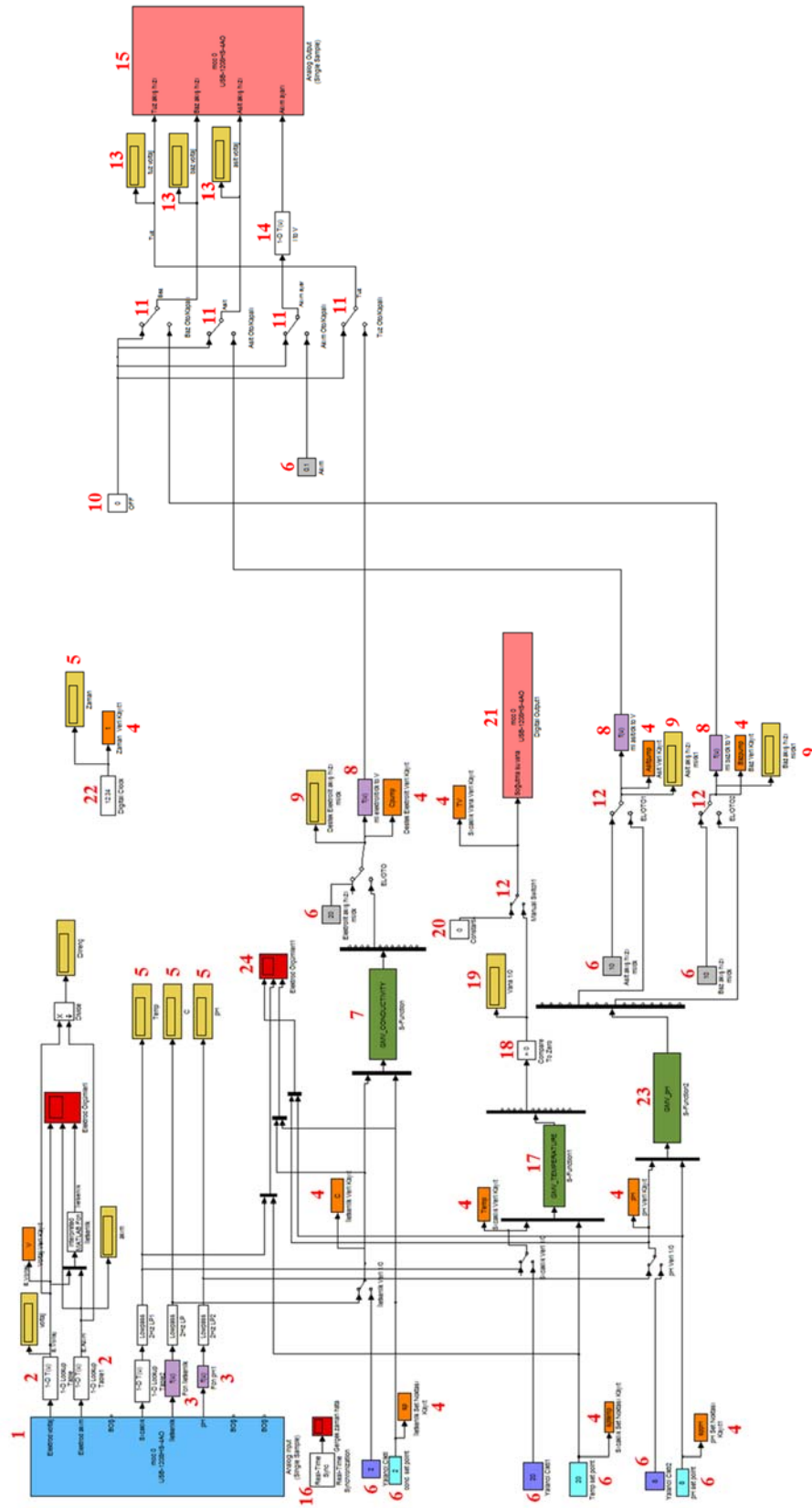
3.1.2 Tasarlanan simulink modeli

Elektrokimyasal reaktör içine daldırılmış olan elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklık probu ile ölçülen değerler, taşıyıcı arayüz modülleri ile bilgisayara iletilir. Bilgisayara ulaşan sinyaller, MATLAB™ programında yazılmış olan algoritma tarafından hesaplamalarda kullanılır ve ayar değişkenleri olan destek elektrolit, asit ve baz pompaları ile soğutma suyu vanasına iletilmek üzere sinyal üretilir. İlgili ayarlanabilen değişken, gelen sinyal değerine göre hareket ederek kontrol edilen değişkende yapılması istenen değişimini sağlar.

Elektrokimyasal reaktörde elektrokoagülasyonun gerçekleştirilebileceği giriş ve çıkış değişkenlerinin görüntülenebileceği, bu çıkış değişkenlerinin dinamik analiz ve kontrol çalışmalarının gerçekleştirilebileceği çok yönlü bir MATLAB™/Simulink modeli ve bu modelde kullanılmak üzere PID, GMV, GPC kontrol edici programları tasarlanmıştır. Tasarlanan simulink modeli şekil 3.3'te verilmiştir.

Şekil 3.3'te 1 numara ile verilen Analog Input bloğu, ölçerler vasıtasıyla prosesten alınan çıkış değişkenleri olan elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklık ölçümlerinin A/D çevirici modüllerden toplanarak mA biriminde sinyaller olarak Simulink'e iletildiği ve bilgisayara bağlı olan proses kontrol ünitesine özel olarak Simulink'te tanımlanan bir bloktur. 2 numaralı 1-D lookup table bloğu gelen ölçüm sinyallerinden istenen ölçülen değere ait iki nokta kalibrasyonu yapıldıktan sonra bu iki nokta arasında interpolasyon yaparak ara değerlerin bulunmasını sağlamaktadır. 3 numaralı Fcn bloğu mA biriminde gelen elektriksel iletkenlik ve pH sinyallerini elektriksel iletkenlik için mS/cm birimine çeviren, pH için birimsiz olan kalibrasyon denklemlerini içermektedir. 4 numara ile gösterilen veri kayıt blokları yapılan çalışmalarda giriş ve çıkış değişkenlerinin zamanla değişimlerinin grafiklerinin çizilebilmesi ve deney verilerinin saklanabilmesi amacıyla oluşturulmuş olup çalışma bitiminde verilerin MATLAB™'ın çalışma bölgesinde (Workspace) depolanmasını sağlamaktadır. 5 numaralı bloklar gelen ölçüm sinyallerinin kalibrasyon denklemlerinden geçirilmiş ve gürültüye karşı filtrelenmiş değerlerinin görüntülenebilmesi amacıyla oluşturulmuş göstergelerdir. 6 numara ile gösterilen bloklar çalışma esnasında sisteme sabit olarak gönderilmesi istenen değerlerin el ile girilmesine olanak sağlar. Bu bloklar ile sistemde çıkış değişkeni için istenen set noktası, yalancı çıktı, elektrokoagülasyon çalışmaları için sisteme verilmesi istenen akım değeri, elektriksel iletkenlik ve pH'nin dinamik analizlerinin yapılmasına olanak sağlayacak mL/dk biriminde destek elektrolit ve asit, baz akış hızlarının değerleri girilebilmektedir. 7 numara iletkenliğin kontrol edilmesi amacıyla kodlanmış olan kontrol edici algoritmasının yazıldığı S-Function bloğudur. 8 numaralı Fcn blokları algoritma tarafından hesaplanan ya da el ile girilmiş mL/dk birimindeki akış hızlarını volt birimine çevirme görevini yapmaktadırlar. 9 numaralı blok algoritma tarafından hesaplanarak pompaya gönderilmesi istenen akış hızı değerini göstermektedir. 10 numaralı blok sabit 0 volt çıktı üretmekte olup asit, baz, destek elektrolit pompaları ile elektrik akımını

kapatmakta kullanılmaktadır. 11 numara ile gösterilen anahtarlar pompaların açık veya kapalı olma durumunu seçmekte kullanılmaktadır. 12 numara ile gösterilen anahtar elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklık için açık hat veya kapalı hat çalışma seçimini yapmak amacıyla kullanılmaktadır. 13 numara ile gösterilen göstergeler modüller aracılığıyla pompalara gönderilen volt birimindeki sinyallerin görüntülenmesini sağlamaktadır. 14 numara ile gösterilen 1-D Lookup Table bloğu sisteme gönderilmesi istenen akım değerini D/A çevirici modül aracılığıyla güç kaynağına ileterek istenen akım değerinin yaratılmasını sağlayacak olan volt değerine çevirmektedir. 15 numara ile gösterilen analog output bloğu bilgisayarda (Simulink) istenilen akış hızı ve akım değerlerinin girilip kalibrasyon denklemleri ile gerekli olan volt değerlerine çevrildikten sonra bu değerlerin iletildiği proses kontrol ünitesi ve dolayısıyla giriş değişkenlerinin arasındaki iletişimi sağlamaktadır. 16 numaralı Real-Time Synchronization bloğu ise yapılan hesaplamaların gerçek zamanlı olarak yürütülmesini sağlamakta yani benzetim zaman adımlarını gerçek zamana dönüştürmekte ve çok sayıda veri kaybı olması durumunda benzetimi durdurmaktadır. 17 numaralı blok reaktör sıcaklığının kontrol edilmesi için tarafımızdan kodlanmış olan ilgili kontrol ediciye ait algoritmanın yazıldığı S-Function bloğudur. Çalışılan sistemde sıcaklığın kontrol edilmesi için kullanılan ayar değişkeni olan soğutma suyu akış hızı on/off vana yardımıyla ayarlanmakta olup, vanaya sinyalleri ileten modül mantıksal değerler olan 1 ve 0 değerleri ile çalışmaktadır. Burada 1 değeri ile vana açılmakta 0 değeri ile ise vana kapatılmaktadır. Bu nedenle kontrol algoritmasının hesapladığı matematiksel değerler mantıksal değerlere çevrilmelidir. Bu amaçla eklenen 18 numaralı compare to zero bloğu kontrol edici algoritmasının hesapladığı ayar değişkeni değerlerini sıfır ile karşılaştırarak sıfırdan büyük değerleri 1, sıfırdan küçük değerleri ise 0 olarak alarak vananın açılıp kapatılması için gerekli olan dönüştürme işini gerçekleştirmektedir. 19 numaralı gösterge bloğu yapılan çalışma süresince vananın açık ya da kapalı olduğu durumları görüntülemek amacıyla kullanılmaktadır. 20 numaralı blok istenen değerlerin el ile girildiği sabit sayı bloğu olup yapılan tasarımda soğutma suyu vanasını kapatmak amacıyla bir kapatma düğmesi olarak kullanılmaktadır. 21 numara ile gösterilen digital output bloğu algoritma tarafından karar verilen istenilen ayar değişkeni değişimi olan soğutma suyu vanasının açık ya da kapalı



olması durumlarını vanaya iletmek amacıyla sıcaklık değerlerinin iletildiği proses kontrol ünitesi ile bilgisayar (Simulink) arasındaki iletişimi sağlamaktadır. 22 numaralı blok zamanın kaydedilmesi ve zamana karşı değişim grafiklerinin çizilmesi amacıyla kullanılmaktadır. 23 numara pH'nin kontrol edilmesi amacıyla tarafımızdan kodlanmış olan kontrol edici algoritmasının yazıldığı S-function bloğudur. 24 numaralı blok elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın ölçüm değerleri ile set noktası değerlerinin zamanla değişiminin gerçek zamanlı çizimi amacıyla kullanılmaktadır.

3.1.3 Kullanılan kağıt endüstrisi atık suyunun özellikleri

Yapılan çalışmalarda kağıt endüstrisinden temin edilen endüstriyel atık suyun elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımı gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan kağıt endüstrisi atık suyu Zonguldak'taki 80.000 ton/yıl kraft kağıt üretim kapasiteli, selüloz üretiminin de yapıldığı bir kağıt üretimi fabrikasından temin edilmiş olup özellikleri çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Çalışılan kağıt endüstrisi atık suyunun özellikleri

Parametre	Birim	Değer
pH	-	8.14
Elektriksel iletkenlik	(mS/cm)	1.92
Cl ⁻	(mg/L)	101.69
SO ₄ ²⁻	(mg/L)	276.00
Renk	(CU)	895.20
KOİ	(mg/L)	641.22
Bulanıklık	(NTU)	66.05
AKM	(mg/L)	59.00

3.2 Yöntem

3.2.1 Dinamik çalışmalar

Sistem dinamiklerinin incelenmesi amacıyla yapılan çalışmalarda kontrol edilen değişkenler olan elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklık için sırasıyla ayarlanabilen

değişkenler olarak seçilen destek elektrolit, asit ve baz çözeltisi akış hızları ile soğutma suyu vana konumuna basamak ve pulse etkiler verilmiştir. Elektriksel iletkenlikteki değişimler elektrokoagülasyon işleminin uygulandığı deneysel çalışmada destek elektrolit çözeltisi akış hızına 4.4 mL/dk değerinde basamak etki verilerek incelenmiştir. pH'deki değişimlerin incelenmesi için elektrokoagülasyon işleminin uygulandığı çalışmada 250. saniyede sisteme 5 mL/dk akış hızı ile 0.1 M HCl gönderilmiş, pH yatışkın koşula ulaştıktan sonra asit beslemesi kesilerek 5 mL/dk akış hızında 0.1 M NaOH gönderilmiştir. Sıcaklıktaki değişimler ise elektrokoagülasyon işleminin uygulandığı başka bir deneysel çalışmada reaktör etrafındaki ceketten geçen 10 °C'deki soğutma suyunun kapalı konumdaki vanasının açık konuma getirilmesi ile incelenmiştir. Bu çalışmaların sonuçları Bölüm 4'te ayrıntılı olarak verilmiştir.

3.2.2 Sistem tanımlama çalışmaları

Elektrokoagülasyon reaktörünün işletme parametreleri olan elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığı tanımlayan en uygun modellerin belirlenmesi amacıyla dinamik çalışmalardan elde edilen veriler MATLABTM'da yazılan YEKK algoritmasında ayrı ayrı kullanılarak ARMAX model parametreleri elde edilmiştir. Yazılan algoritma EK 6'da, bu çalışmaların sonuçları Bölüm 4'te ayrıntılı olarak verilmiştir.

3.2.3 Kontrol çalışmaları

Sistemi matematiksel olarak en iyi ifade eden modelin sistem tanımlama çalışmaları ile bulunmasının ardından elde edilen modeller ve MATLABTM'da kodlanan PID, GPC, GMV, adaptif GMV algoritmaları kullanılarak elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklık parametreleri için deneysel kontrol çalışmaları gerçekleştirilmiş, kontrol edici performansları ISE, IAE, ITSE, ITAE kriterlerinden faydalanılarak karşılaştırılmıştır. Kullanılan algoritmalar sırasıyla EK 1 - 4'te verilmiştir. Kontrol çalışmaları 1A sabit akım, 600 devir/dk karıştırma hızı, 2 mS/cm elektriksel iletkenlik, 20 °C sıcaklık ve pH 8 set noktalarında gerçekleştirilmiş, reaktör etrafındaki ceketten geçirilen soğutma suyunun sıcaklığı 12.5 °C olarak ayarlanmıştır. Kontrol edilen değişkenler olan elektriksel iletkenlik

ve pH'nin başlangıç değerleri sırasıyla doymuş NaCl, 0.5 M HCl ile 0.5 M NaOH çözeltileri kullanılarak ayarlanmıştır. Çalışmalarda elektriksel iletkenlik kontrolü için 0.04 M NaCl çözeltisi akış hızı, pH kontrolü için 0.1 M HCl çözeltisi akış hızı ile 0.1 M NaOH çözeltisi akış hızı ve sıcaklık kontrolü için soğutma suyu vana konumu ayarlanabilen değişkenler olarak seçilmiştir. Kontrol çalışmaları 45 dakika süre ile gerçekleştirilmiş olup arıtım öncesi 20 mL, arıtım sonunda 250 mL atık su örneği alınarak 4 °C'de 24 saat dinlendirmenin ardından KOİ, renk, bulanıklık ve AKM analizleri yapılmış ve giderim verimleri hesaplanmıştır. Çalışmalar sırasında bilgisayarda depolanan voltajın zamanla değişimi verileri kullanılarak giderilen KOİ başına enerji tüketimleri hesaplanmıştır. Çalışmalardan elde edilen sonuçlar Bölüm 4'te ayrıntılı olarak verilmiştir.

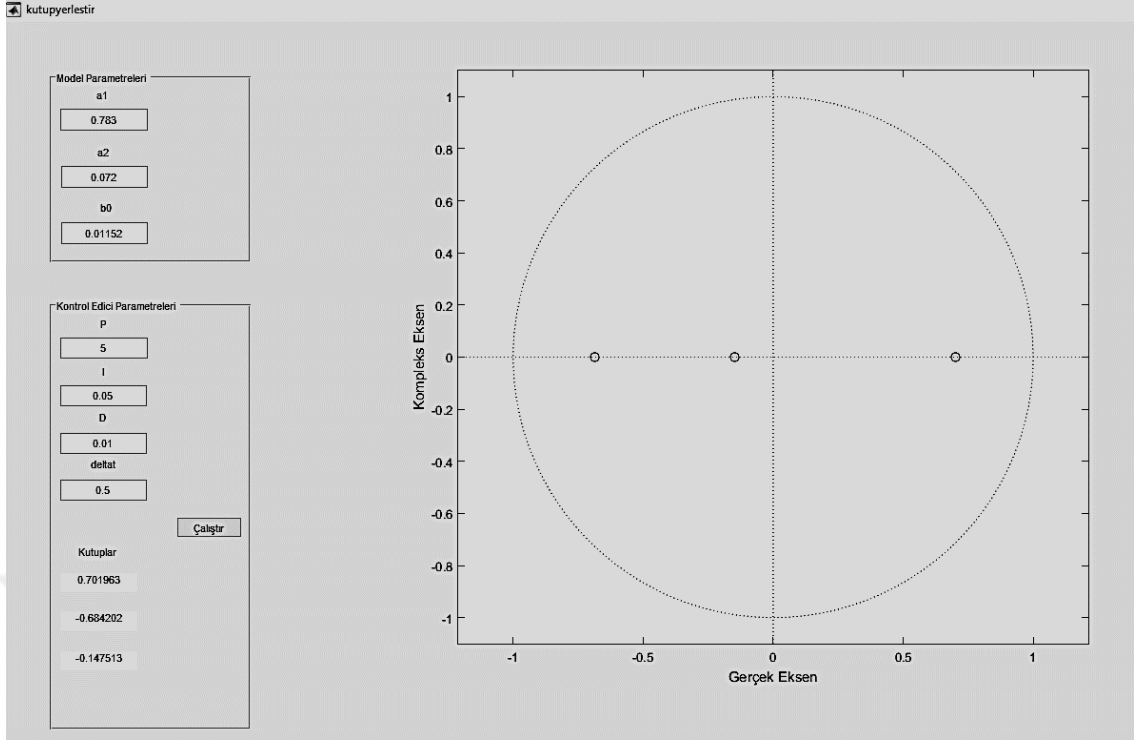
3.2.3.1 Kutup yerleştirme ile PID parametrelerinin belirlenmesi

Elektriksel iletkenlik, sıcaklık ve pH parametrelerinin kontrol edilerek istenen değerde tutulması amacıyla ilk olarak PID kontrol çalışmaları yapılmıştır. Çalışmada öncelikle kutup yerleştirme yöntemi ile her bir işletim parametresi için en uygun PID parametreleri belirlenmiştir. MATLAB™'da guide komutuyla açılan menüden dış görünüşü özelleştirilen, Eşitlik (2.93)-(2.103) kullanılarak EK 7'de verilen kodlar ile şekil 3.4'te gösterilen ara yüz tasarlanmıştır.

İletkenlik, sıcaklık ve pH parametrelerinin sistem tanımlama çalışmaları ile elde edilen model parametreleri ara yüzde ayrı ayrı yerlerine yazıldıktan sonra kutup noktalarının birim çember içinde kalmasını sağlayan PID parametreleri K_c , τ_i , τ_D için denemeler yapılarak üç işletim parametresi için en uygun kontrol edici parametreleri bulunmuştur.

3.2.4 Optimizasyon çalışmaları

Elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklık parametrelerinin PID, GMV, GPC ve adaptif GMV algoritmaları kullanılarak kontrol çalışmalarının yapılmasının ardından performans



Şekil 3.4 Kutup yerleştirme ara yüzü

kriteri değerleri göz önüne alınarak GMV en uygun kontrol edici olarak seçilmiş ve bu algoritma kullanılarak kontrollü koşullar altında optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Optimizasyon çalışmalarında uygulanan deneysel tasarım matrisi MINITAB 17 istatistik yazılımında CYY'lerden MBT kullanılarak oluşturulmuştur. Akım şiddeti, pH, elektriksel iletkenlik, sıcaklık ve süre olmak üzere 5 adet faktörden oluşan deney tasarımı bu faktörlerin 5 seviye olarak Al ve Fe elektrotlar için ayrı ayrı çalışıldığı toplam 64 adet deneysel çalışmayı içermektedir. KOİ, bulanıklık, renk, AKM giderim verimleri ile giderilen KOİ başına enerji tüketimi değerleri MBT yönteminin cevapları olarak seçilmiştir. Elektriksel iletkenlik ve pH'nin başlangıç değerleri sırasıyla doymuş NaCl ve 0.5 M HCl ile 0.5 M NaOH çözeltileri kullanılarak ayarlanmıştır. Her bir çalışmada 6 adet monopolar paralel bağlı elektrodun kullanıldığı arıtım öncesinde 20 mL, arıtım sonunda ise 250 mL atık su örneği alınarak 4 °C'de 24 saat dinlendirmenin ardından KOİ, renk, bulanıklık ve AKM analizleri yapılmış ve giderim verimleri hesaplanmıştır. Çalışmalar sırasında bilgisayarda depolanan voltajın zamanla değişimi verileri kullanılarak giderilen KOİ başına enerji tüketimleri hesaplanmıştır. Deneysel çalışmalar sonunda kullanılan elektrotlar saf su ile yıkanmış, 105 °C'deki etüvde 90 dakika süre ile kurutmanın ardından

desikatörde bekletilmiş ve tartılarak elektrot tüketimi ve akım verimi değerleri hesaplanmıştır. Deneysel çalışmalar tamamlandıktan sonra cevaplar MINITAB 17'deki tasarım matrisine işlenerek faktörler ve cevaplar arasındaki ilişkilerin belirlenmesi için modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiş, ANOVA yapılarak elde edilen sonuçların istatistiksel açıdan anlamlı olup olmadığı incelenmiştir. Elde edilen anlamlı modeller kullanılarak cevap yüzey ve kontur çizimleri yapılmış, elde edilen sonuçlar irdelenmiş ve kg KOİ giderimi başına en düşük enerji tüketimi ile en yüksek KOİ, renk, bulanıklık ve AKM giderim verimi elde etme hedefini gerçekleştirmek için optimizasyon çalışması yapılarak en uygun elektrot materyali, akım şiddeti, pH, elektriksel iletkenlik, sıcaklık ve süre işletme parametreleri belirlenmiştir.

3.2.5 Kinetik çalışmaları

Elektrokoagülasyon yöntemi ile kağıt endüstrisi atık sularının arıtımında kirlilik parametresi olan KOİ gideriminin kinetiğinin incelenmesi amacıyla en uygun işletme parametrelerinde kontrollü koşullarda çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla altı adet monopolar paralel bağlı alüminyum elektrot kullanılarak 2.72 mS/cm elektriksel iletkenlik, 5.82 pH, 1.22 A akım şiddeti koşullarında 17.5 °C, 22.5 °C, 27.5 °C, 32.5 °C, 37.5 °C sıcaklıklarda 30 dakika süre ile yapılan deneysel çalışmalarda 0, 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20, 25 ve 30. dakikalarda 10 mL'lik örnekler alınmış, 4 °C'de 24 saat dinlendirmenin ardından KOİ analizleri yapılmıştır. KOİ'nin zamanla değişimi integral metot kullanılarak irdelenmiş, 1. ve 2. mertebe tepkime hız modeli varsayımları ile, tepkime mertebesi, hız sabiti ve aktivasyon enerjisi parametreleri belirlenmiş, tepkime hız ifadesi elde edilmiştir.

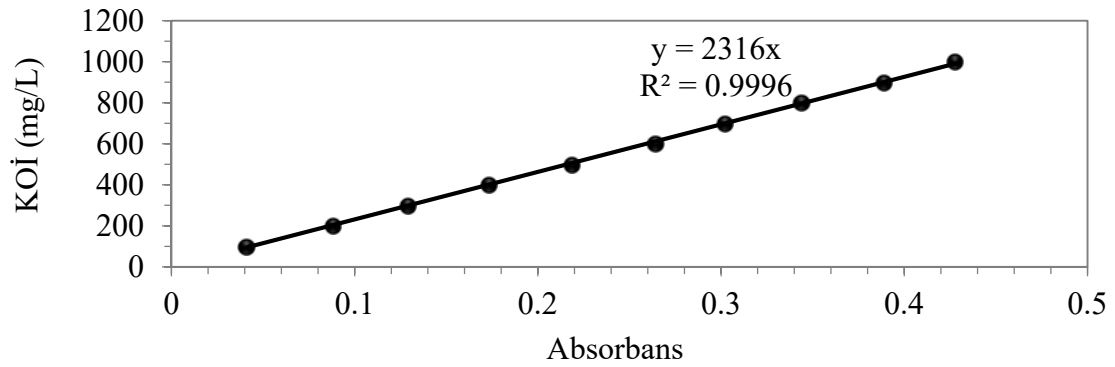
3.3 Analizler

3.3.1 Kimyasal oksijen ihtiyacı

Yapılan arıtım çalışmalarında alınan örneklerin KOİ analizi için Standart Methods 5220 D kapalı geri akış kolorimetrik yöntem kullanılmıştır. Kapalı geri akış yöntemi daha az miktarda tehlikeli atık oluşturmaktadır ancak tekrarlanabilir sonuçların elde edilebilmesi

için AKM içeren örneklerin homojenleştirilmesini gerektirmektedir. 2000 mg Cl⁻ /L'den daha büyük değerlerdeki örnekler için testi kullanmak uygun olmamaktadır. Gerekirse uygun Cl⁻ derişimi elde etmek üzere saf suyla seyreltme ya da HgSO₄ ile ön muamele işlemleri yapılmalıdır. Alınan örnekler cam şişelerde saklanmalı ve numune alımı ile analiz arasında 1 günden fazla gecikme önlenemiyorsa örnek derişik H₂SO₄ kullanarak pH≤2'ye asitleştirerek muhafaza edilmelidir. Kirliliğin önlenmesi için ilk kullanımdan önce kültür tüpleri ve kapaklarının % 20'lik H₂SO₄ ile yıkanması gerekmektedir. Analizde kullanılacak reaktiflerden yüksek KOİ aralığı (100 - 900 mg/L) parçalama çözeltisinin hazırlanması için 500 mL distile suya önceden 150 °C'de 2 saat kurutulmuş 10.216 g potasyum dikromat (K₂Cr₂O₇), 167 mL derişik H₂SO₄ ve 33.3 g civa sülfat (HgSO₄) eklenmiş, çözölüp oda sıcaklığına soğutulmuş ve 1000 mL'ye seyreltilmiştir. Sülfürik asit reaktifi için derişik H₂SO₄'e 5.5 g Ag₂SO₄/kg H₂SO₄ oranında kristal veya toz gümüş sülfat (Ag₂SO₄) eklenmiş, 1-2 dakika çözünmesini beklenerek karıştırılmıştır. Kalibrasyon doğrusunun oluşturulması için potasyum hidrojen ftalat (KHP) standartları hazırlanmıştır. Bu amaçla 110 °C'de sabit ağırlığa gelecek şekilde kurutulmuş KHP'nin 425 mg'ı distile suda çözölmüş ve 500 mL'ye seyreltilmiştir. Hazırlanan çözelti 1000 mg /L teorik KOİ değerine sahiptir. 16x100 mm ebatlarındaki parçalama tüplerine, hazırlanan potasyum ftalat çözeltisinin seyreltilmesiyle oluşturulan ve KOİ değeri 100 ile 1000 mg/L arasında değişen 10 adet KHP standardından 2.5 ml hacminde konmuş, her bir tüpe daha sonra 1.5 mL parçalama çözeltisi eklenmiştir. Tüplere son olarak 3.5 mL sülfürik asit reaktifi dikkatle eklenmiş, kapakları sıkıca kapatılmış ve karışmanın sağlanması için birkaç defa ters çevrilmişlerdir. 150 °C'ye ısıtılmış termoreaktöre (Velp ECO-16) yerleştirilen tüplerin bu sıcaklıkta 2 saat süre ile bekletilerek numunelerin parçalanması sağlanmıştır. Bu sürenin sonunda tüpler yoğunlaşan buharlarla karışmanın sağlanması için birkaç defa ters çevrilmiş ve çökelti oluşumunu önlemek için yavaşça oda sıcaklığına soğutulmuştur. Tüplerin ışıık yolunun açık olduğundan emin olunduktan sonra spektrofotometrede (PG Instruments T60V) ölçüm yapılmıştır. Bir örneğin parçalanması kromun altı değerlikli durumundan üç değerlikli duruma değişimi ile sonuçlanmaktadır. Her iki krom çeşidi de renklidir ve spektrumun görünür bölgesinde absorplamaktadırlar. Dikromat iyonu (Cr₂O₇²⁻) 400 nm bölgesinde kuvvetli absorplarken kromik iyonu (Cr³⁺) absorpsiyonu bu bölgede daha azdır. Kromik iyonu (Cr³⁺) 600 nm bölgesinde kuvvetli absorplarken bu bölgede dikromat iyonu absorpsiyonu yaklaşık sıfırdır. 100-900 mg/L arasındaki KOİ değerleri için 600 nm

bölgesinde, 90 mg/L veya daha düşük KOİ değerleri için 420 nm bölgesinde çalışılması uygundur. Çalışılan numunelerin KOİ değerleri 90 mg/L'den daha yüksek olduğu için 600 nm bölgesinde çalışılmıştır. 600 nm'de referans çözelti olarak örnek yerine distile suyun kullanıldığı dikromat içeren parçalanmamış kör kullanılmıştır. Bu dalga boyunda parçalanmış körün ve standartların absorbans değerleri ölçülmüş, parçalanmış kör absorbansı ile parçalanmış standart absorbansı arasındaki fark her bir standardın KOİ değerine karşı çizilerek şekil 3.5'te verilen kalibrasyon doğrusu elde edilmiştir.



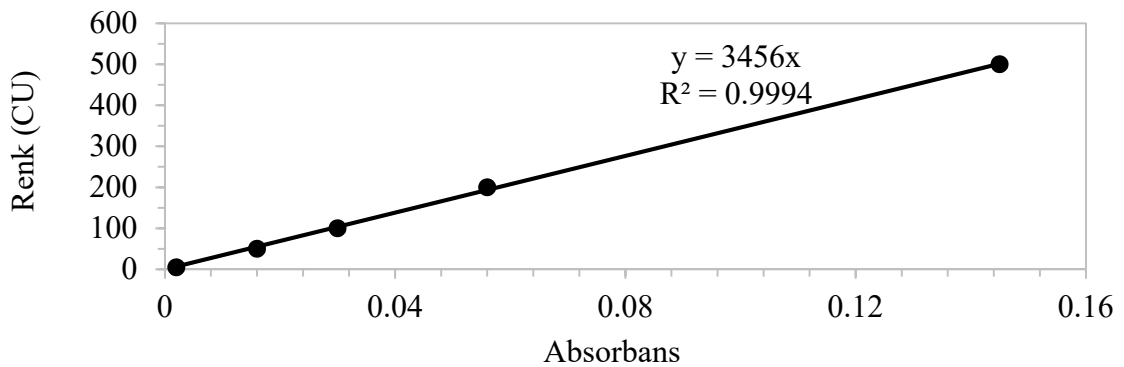
Şekil 3.5 KOİ analizi kalibrasyon doğrusu

Alınan örneklerin KOİ analizinin yapılması için parçalama tüplerine sırasıyla 2.5 mL örnek, 1.5 mL parçalama çözeltisi ve 3.5 mL sülfürik asit reaktifi konmuş, kapakları sıkıca kapatılmış ve karışmanın sağlanması için birkaç defa ters çevrilmişlerdir. 150 °C'ye ısıtılmış termoreaktöre yerleştirilen tüplerin bu sıcaklıkta 2 saat süre ile parçalanması sağlanmıştır. Bu sürenin sonunda tüpler yoğunlaşan buharlarla karışmanın sağlanması için birkaç defa ters çevrilmiş ve çökelti oluşumunu önlemek için yavaşça oda sıcaklığına soğutulmuştur. Tüplerin ışık yolunun açık olduğundan emin olunduktan sonra spektrofotometrede 600 nm'de absorbans ölçümü yapılmıştır. 600 nm'de referans çözelti olarak örnek yerine distile suyun kullanıldığı dikromat içeren parçalanmamış kör kullanılmıştır. Parçalanmış örnek ve parçalanmış körün absorbanslarının arasındaki fark alınarak ve bu değer kalibrasyon denkleminde yerine konarak örneğin KOİ değeri hesaplanmıştır.

3.3.2 Renk

Yapılan arıtım çalışmalarında alınan örneklerin renk analizi için Standart Methods 2120 C spektrofotometrik-tek dalga boyu yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde renk, uygun dalga boyunda platin-kobalt standart çözeltileri ile spektrofotometrik olarak belirlenmektedir. Spektrofotometrik yöntemin dalga boyunda ışığı absorplayan veya saçan kolloidal ve askıda parçacıkların bulunmasından kaynaklanan girişimlerin ortadan kaldırılması için renk ölçümünden önce parçacıkların giderilmesi gerekmektedir. Kalibrasyon doğrusunun oluşturulması için 300 mL suda 100 mL derişik HCl ile 1.246 g potasyum heksakloroplatinat (K_2PtCl_6) ve 1 g kristal kobalt klorür heksahidrat ($CoCl_2 \cdot 6H_2O$) çözülmüş ve 1000 mL'ye seyreltilerek stok çözelti hazırlanmıştır. Bu stok çözelti 500 renk birimi (CU) renge sahiptir. Standartlar renk birimleri 5, 50, 100, 200, 500 CU olacak şekilde 100 mL'lik balon jojelere 1.0, 10.0, 20.0, 40.0 ve 100 mL stok renk standardının su ile seyreltilmesiyle hazırlanmıştır. Spektrofotometrede (PG Instruments T60V) 456 nm'de kör olarak saf su kullanılarak cam küvetlerde, her renk standardı için absorbans değeri okunmuş ve şekil 3.6'daki kalibrasyon doğrusu elde edilmiştir.

Alınan örneklerin renk analizinin yapılması için spektrofotometrede 456 nm'de kör olarak saf su kullanılarak cam küvetlerde absorbans değerleri okunmuş, absorbans okumaları kalibrasyon denkleminde yerine konarak örneklerin renk değeri belirlenmiştir.



Şekil 3.6 Renk analizi kalibrasyon doğrusu

3.3.3 Bulanıklık

Yapılan arıtım çalışmalarında alınan örneklerin bulanıklık analizi için Aqualytic marka AL250T-IR model türbidimetre kullanılmıştır. Türbidimetre ile birlikte verilen 0, 20, 200, 800 NTU bulanıklık değerlerine sahip kalibrasyon çözeltileri ile cihaz 4 noktalı kalibre edilmiş, analizler alınan örneklerden cihazın numune şişesine 10 mL doldurmak suretiyle gerçekleştirilmiştir.

3.3.4 Askıda katı madde

Yapılan arıtım çalışmalarında alınan örneklerin AKM analizi için Standart Methods 2540 D 105 °C’de kurutulmuş toplam askıda katı yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde iyi karıştırılmış örnek, vakumlu süzme düzeneği kullanılarak önceden tartılmış 47 mm çapında 1.2 µm gözenek yapısına sahip bağlayıcısız cam elyaf filtreden geçirilmekte ve filtrede kalan artık 103-105 °C’de sabit ağırlığa gelene kadar kurutulmaktadır. Cam elyaf filtre diski tartıldıktan sonra süzme düzeneğine az miktarda distile su ile ıslatılarak yerleştirilmiş, üzerine 100 mL hacimde örnek dökülmüştür. Süzme tamamlandıktan sonra yaklaşık 3 dakika daha vakum yapmaya devam edilmiştir. Filtre, süzme düzeneğinden dikkatle ayrılarak alüminyum tartma kabına yerleştirilmiş ve en az 1 saat 105 °C sıcaklıktaki etüvde (Memmert UN 55) kurutulmuş, sıcaklığını dengelemek için desikatörde soğutulmuş ve tartılmıştır. Tartım sonunda aşağıdaki eşitlik kullanılarak AKM değeri hesaplanmıştır.

$$mg \text{ toplam askıda katı} / L = \frac{(A - B) * 1000}{\text{örnek hacmi, mL}} \quad (3.1)$$

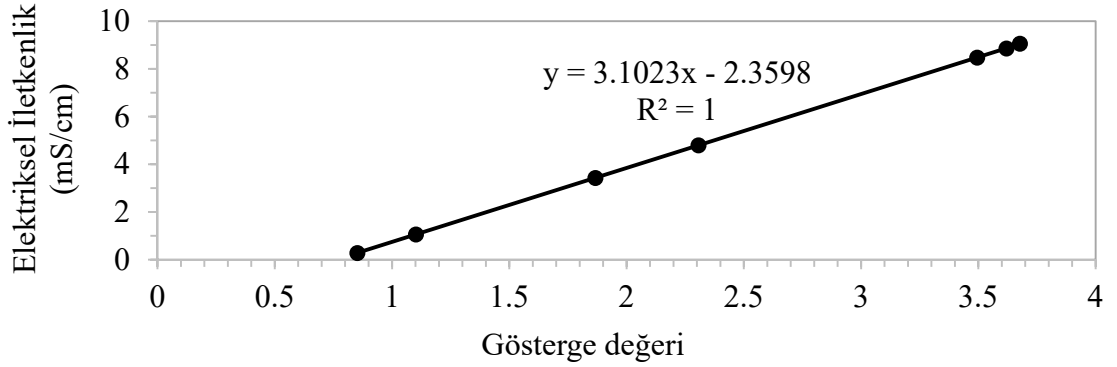
Burada A filtrenin ve kurutulan artığın toplam ağırlığı, B süzme öncesi filtrenin ağırlığı olarak tanımlanmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

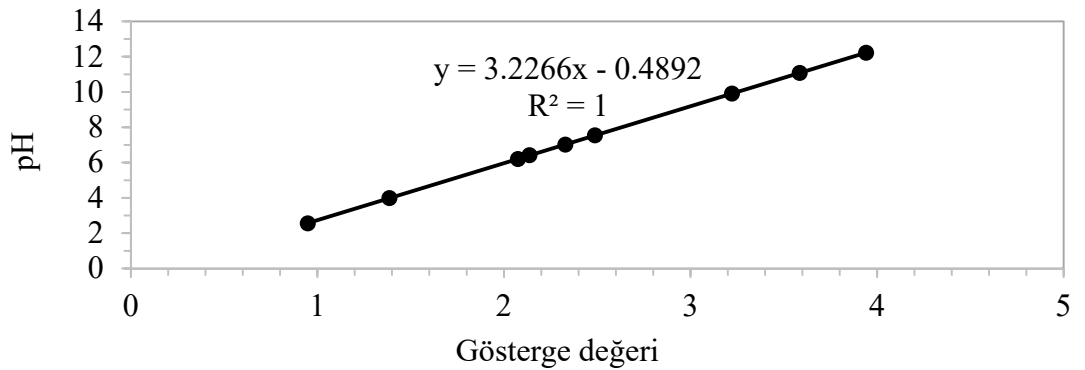
4.1 Kalibrasyon Çalışmaları

4.1.1 Elektriksel iletkenlik ve pH ölçer kalibrasyonları

Çalışmalarda kullanılan elektriksel iletkenlik ve pH ölçerin gösterge değerleri ve bilgisayar sinyali değerleri arasındaki ilişkiyi bulmak amacıyla kalibrasyon doğruları oluşturulmuştur. Elektriksel iletkenlik ölçer için oluşturulan kalibrasyon doğrusu şekil 4.1’de, pH için oluşturulan kalibrasyon doğrusu şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.1 Elektriksel iletkenlik değerine karşı bilgisayar sinyali değişimi



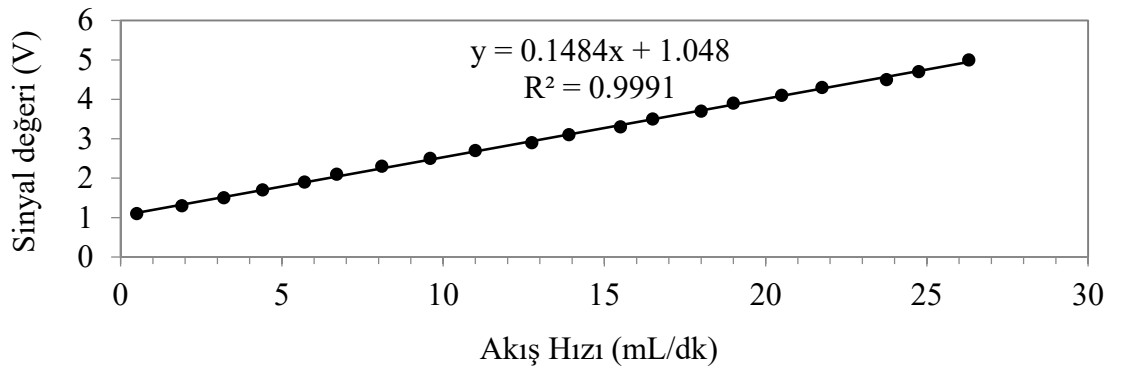
Şekil 4.2 pH değerine karşı bilgisayar sinyali değişimi

4.1.2 Sıcaklık ölçer kalibrasyonu

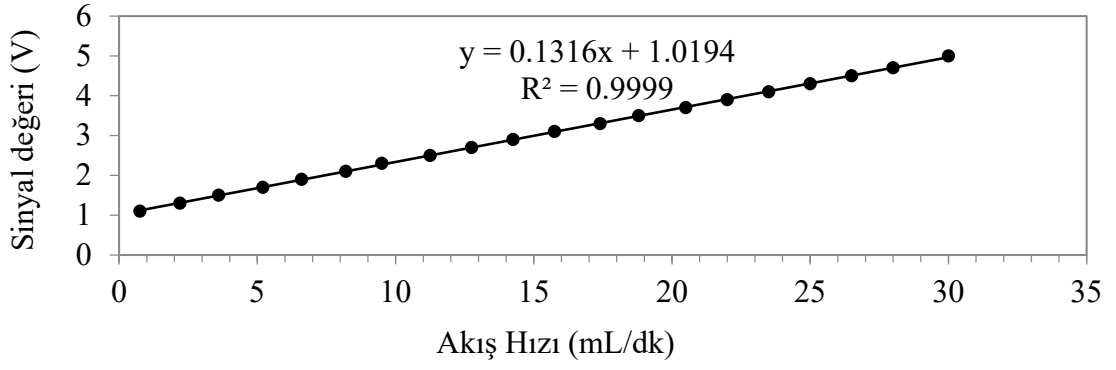
Simulinkte yer alan ve gelen ölçüm sinyallerinden istenen ölçülen değere ait iki nokta kalibrasyonu yapıldıktan sonra bu iki nokta arasında interpolasyon yaparak ara değerlerin bulunmasını sağlayan 1-D lookup table bloğu kullanılarak sıcaklık ölçer ile bilgisayar arasında kalibrasyon yapılmıştır. Bu bloğun ayar ekranında sıcaklık için breakpoints: [1.138 2.541], table data: [18.4 49.9] değerleri girilmiştir. Burada table data okunan sıcaklık değerini, breakpoints ise okunan değere karşılık ölçerin ürettiği mV mertebesindeki sinyalleri ifade etmektedir.

4.1.3 Pompa kalibrasyonları

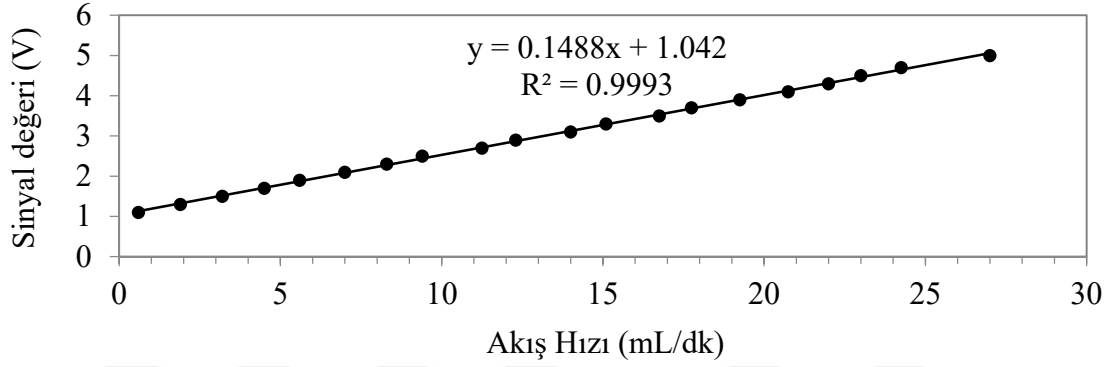
Dinamik analiz, kontrol, optimizasyon ve kinetik çalışmalarında kullanılan destek elektrolit, asit ve baz çözeltisi pompalarının bilgisayar sinyali değerlerine karşılık ortaya koyduğu akış hızı değerlerinin bulunması amacıyla kalibrasyon doğruları oluşturulmuştur. Destek elektrolit, asit ve baz pompası ile bilgisayar sinyali arasındaki ilişki için oluşturulan kalibrasyon doğruları sırasıyla şekil 4.3 - 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.3 Destek elektrolit pompası için gösterge değerine karşı bilgisayar sinyali değişimi



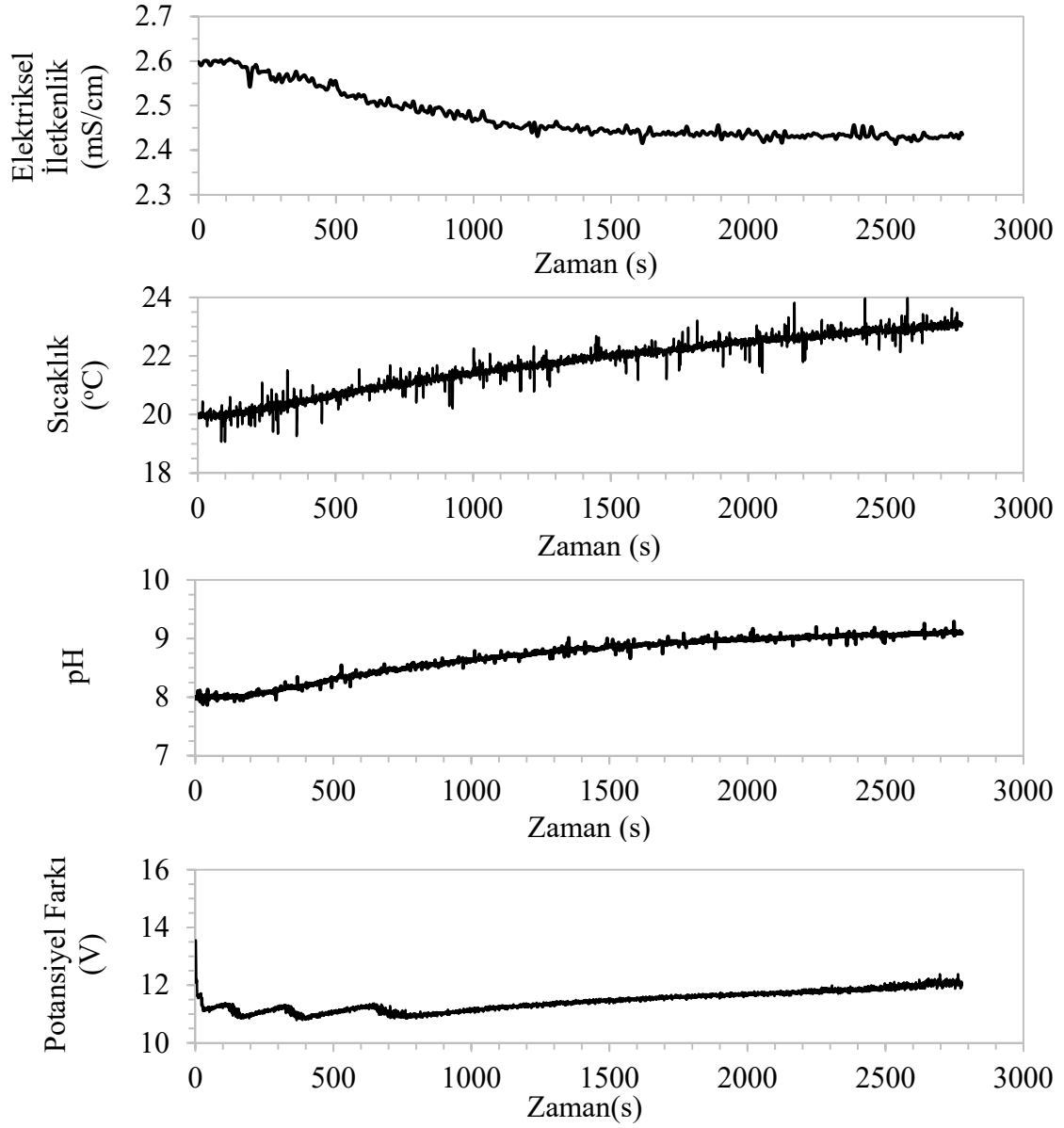
Şekil 4.4 Asit pompası için gösterge değerine karşı bilgisayar sinyali değişimi



Şekil 4.5 Baz pompası için gösterge değerine karşı bilgisayar sinyali değişimi

4.2 Kontrolsüz Koşulda Arıtım Çalışması

Kağıt endüstrisi atık sularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımında açık hat işletim ile prosesin 45 dakika işletim süresi boyunca elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklık parametrelerinin değişimini incelemek amacıyla gerçekleştirilen çalışma şekil 4.6'da verilmiştir. 600 devir/dk karıştırma hızı, 1 A sabit akım koşullarında gerçekleştirilen bu çalışmada atık suyun başlangıç elektriksel iletkenliği ve pH'si doğal değerlerine yakın olacak şekilde 2.6 mS/cm ve 8'e, başlangıç sıcaklığı 20 °C'ye ayarlanmıştır.



Şekil 4.6 Elektrokoagülasyon yöntemi ile atık su arıtımında kontrolsüz durumda elektriksel iletkenlik, sıcaklık, pH ve potansiyel farkının değişimi

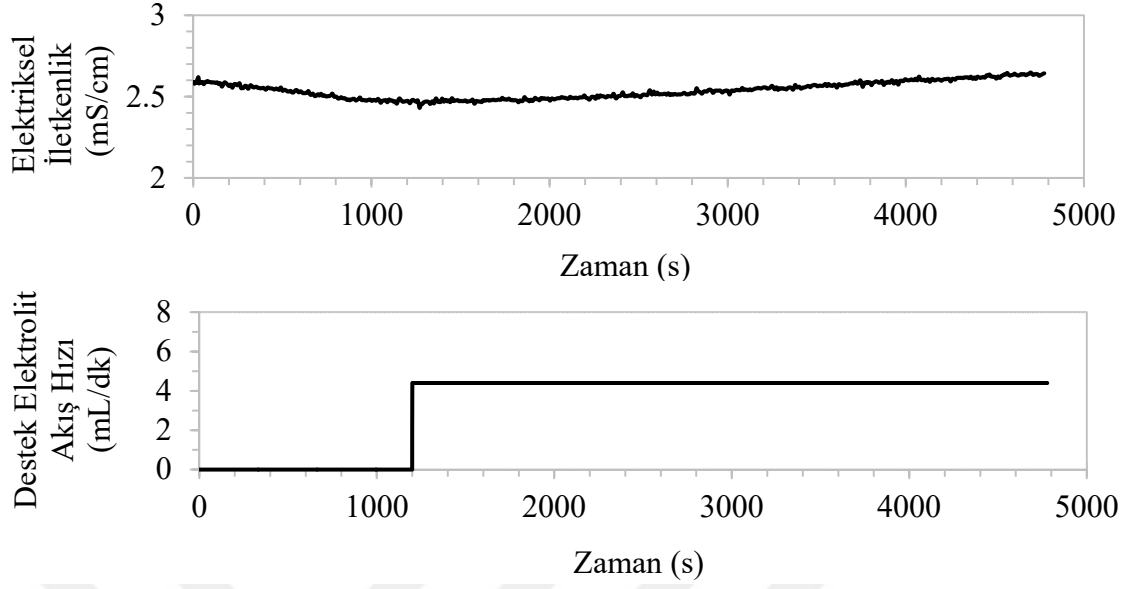
Şekil 4.6’da görüldüğü gibi arıtım süresince pH yaklaşık 1 birim, sıcaklık 4 °C artmış ve elektriksel iletkenlik 0.2 mS/cm azalmıştır. Elektriksel iletkenlikteki azalmayla birlikte arıtım süresince işletim maliyeti, enerji tüketimi ve sabit akım koşulu için potansiyel farkı artmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kağıt endüstrisi atık sularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımında elektriksel iletkenlik, sıcaklık ve pH’nin kontrol edilmesi uygun görülmüştür.

4.3 Dinamik ve Sistem Tanımlama Çalışmaları

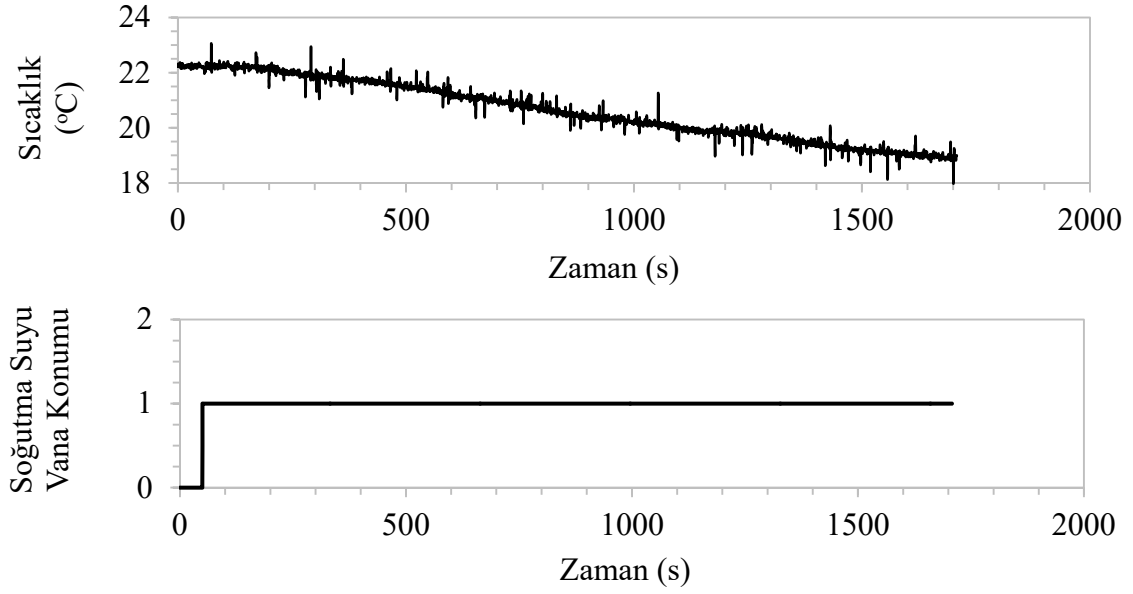
4.3.1 Elektriksel iletkenlik, sıcaklık ve pH'nin dinamik analizi

Kağıt endüstrisi atık sularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtım verimini etkileyen işletme parametrelerinden olan elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın arıtım süresince kontrol edilerek en uygun değerlerinde tutulması amacıyla ilk olarak bu parametrelerde meydana gelen değişimleri modelleme çalışması yapılmıştır. Bu kapsamda elektriksel iletkenlik kontrolü için destek elektrolit akış hızı, pH kontrolü için asit ve baz akış hızları, sıcaklık kontrolü için soğutma suyu vana konumu ayarlanabilen değişkenler olarak seçilmiştir.

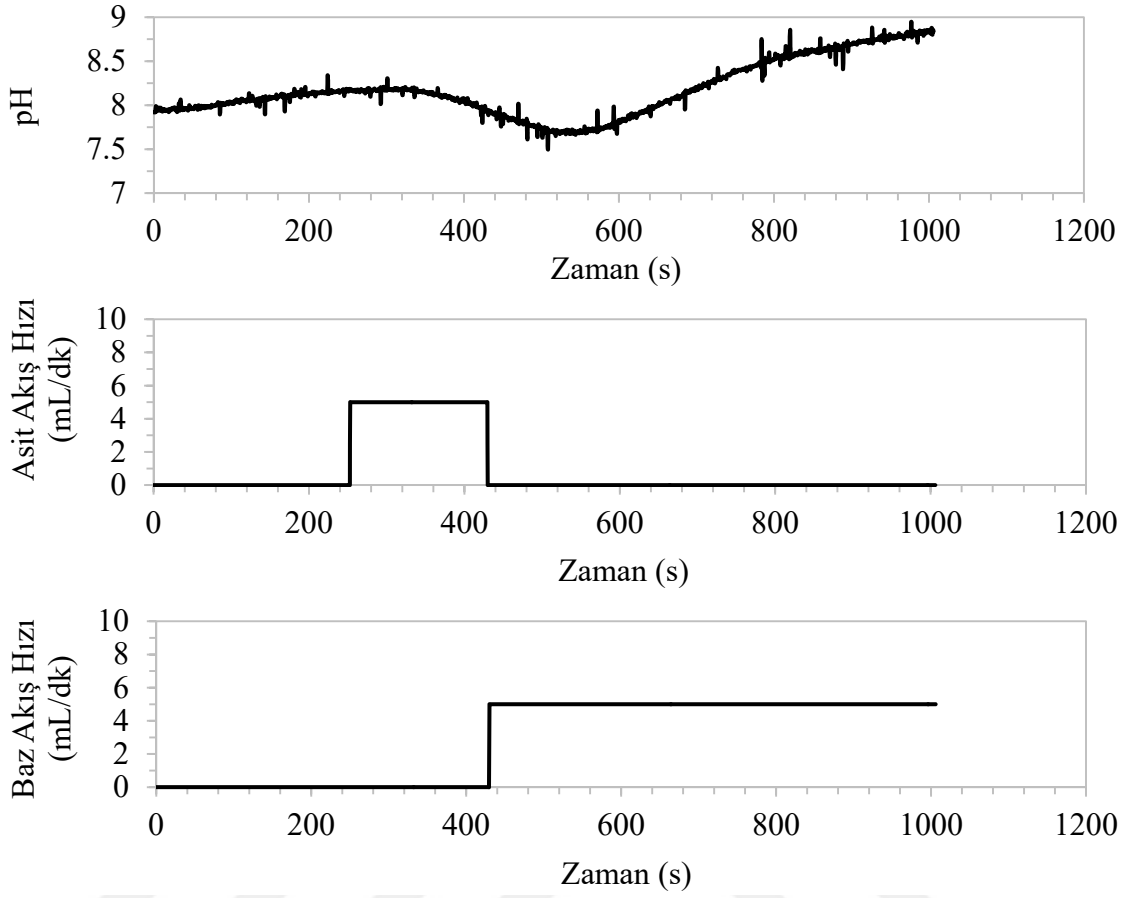
Dinamik çalışmalar MATLABTM/Simulink'te tasarlanan modelde ilgili pompalara ve vanaya pulse ve basamak etkilerin verilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Elektriksel iletkenlikteki değişimler 600 devir/dk karıştırma hızı, 1 A sabit akım altında elektrokoagülasyon işleminin uygulandığı deneysel çalışmada destek elektrolit çözeltisi akış hızına 0 mL/dk'dan 4.4 mL/dk değerine basamak etki verilerek incelenmiş ve sonuçları şekil 4.7'de verilmiştir. Çalışmada elektriksel iletkenliğin yaklaşık 60 dakikalık işletimde 2.47 mS/cm'den 2.64 mS/cm değerine yükseldiği gözlenmiştir. Sıcaklıktaki değişimler 600 devir/dk karıştırma hızı, 1 A sabit akım altında elektrokoagülasyon işleminin uygulandığı başka bir deneysel çalışmada reaktör etrafındaki ceketten geçen 12.5 °C'deki soğutma suyunun kapalı konumdaki vanasının açık konuma getirilmesiyle incelenmiş, deney esnasında reaktöre destek elektrolit beslemesi yapılmamıştır. Çalışmada sıcaklığın yaklaşık 30 dakikalık işletimde 22.2 °C'den 19.2 °C'ye düştüğü gözlenmiş, sıcaklığın dinamik analiz sonuçları şekil 4.8'de verilmiştir. pH'deki değişimlerin incelenmesi için 600 devir/dk karıştırma hızı, 1 A sabit akım altında elektrokoagülasyon işleminin uygulandığı çalışmada 250. saniyede sisteme 0 mL/dk'dan 5 mL/dk'ya basamak etki verilerek 0.1 M HCl gönderilmiş, pH yatışkın koşula ulaştıktan sonra asit beslemesi kesilerek 0 mL/dk'dan 5 mL/dk'ya basamak etki verilerek 0.1 M NaOH gönderilmiştir. pH ilk 250 saniyede 7.93'ten 8.15'e yükselmiş, asit akış hızına verilen 3 dakikalık pulse etkiyle pH'nin 8.15'ten 7.71'e düştüğü, baz akış hızına verilen 10 dakikalık basamak etkiyle pH'nin 7.71'den 8.80'e yükseldiği görülmüştür.



Şekil 4.7 Destek elektrolit akış hızına 0 mL/dk'dan 4.4 mL/dk'ya basamak etki verildiğinde elektriksel iletkenliğin zamanla değişimi



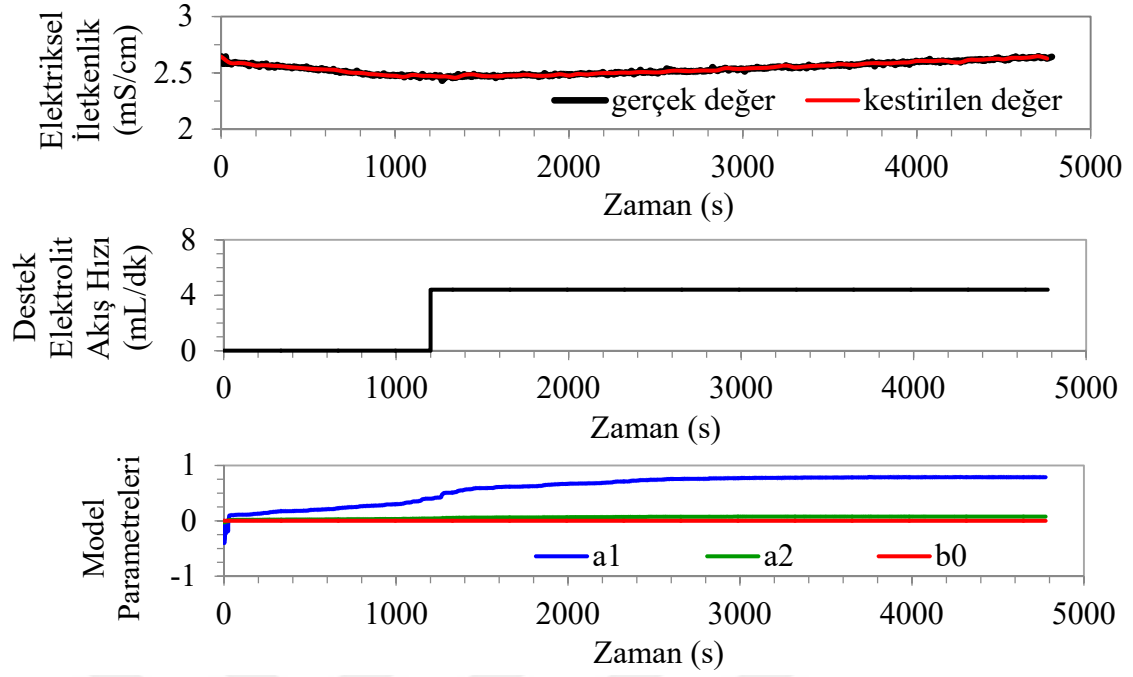
Şekil 4.8 Soğutma suyu vana konumuna 0'dan 1'e basamak etki verildiğinde sıcaklığın zamanla değişimi



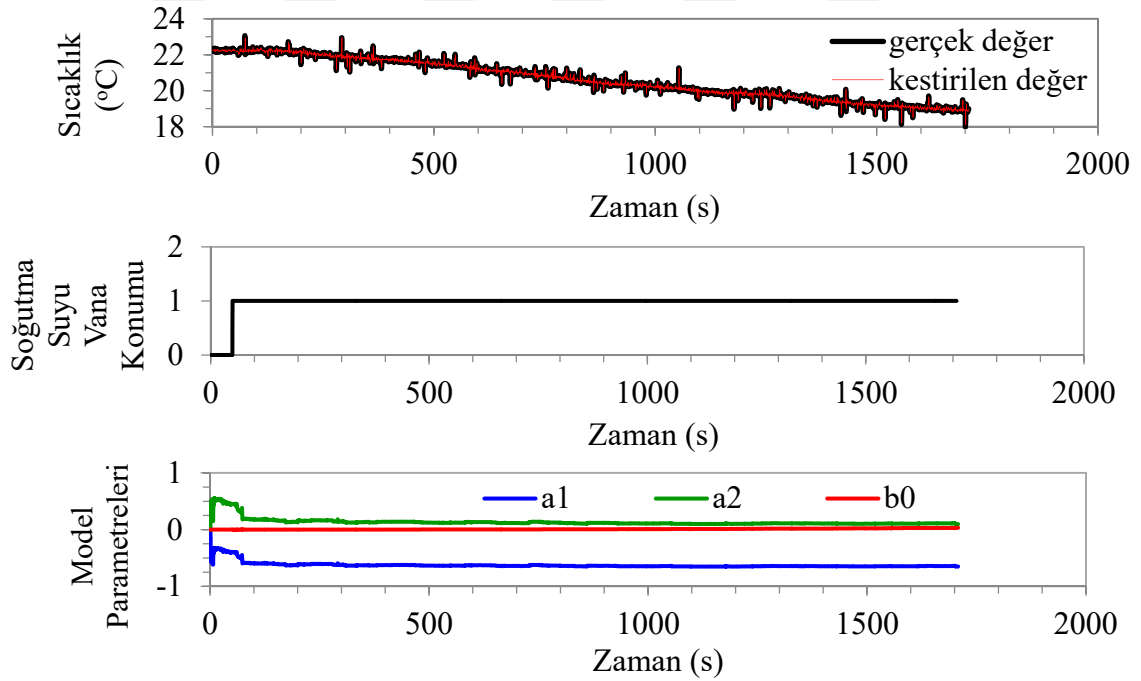
Şekil 4.9 Asit ve baz akış hızlarına basamak etki verildiğinde pH'nin zamanla değişimi

4.3.2 Elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklık için sistem modelinin belirlenmesi

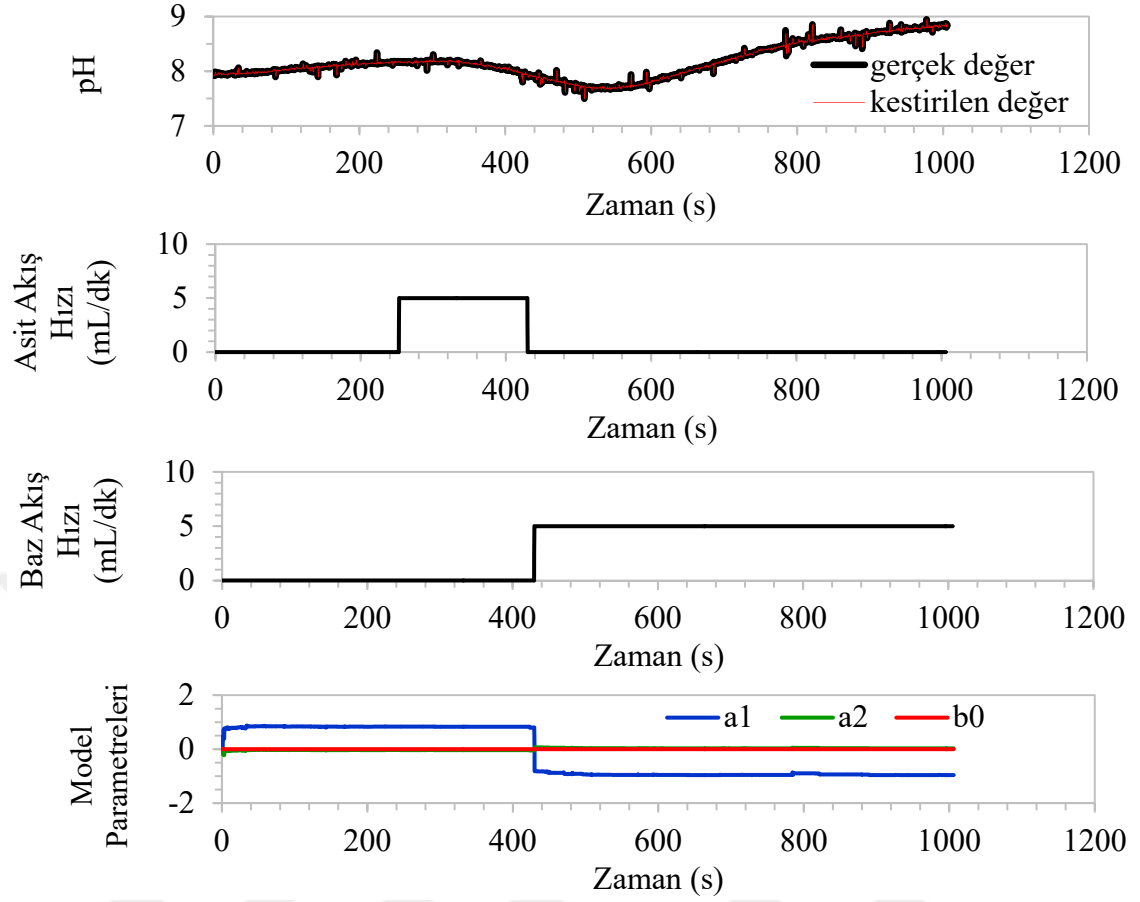
Elektriksel iletkenlik, sıcaklık ve pH için yapılan dinamik çalışmalardan elde edilen veriler MATLAB™'da kodlanan YEKK algoritmasında ayrı ayrı kullanılmış ve çıkış değişkenlerinin zamanla değişimi, çıkış değişkenlerinin kestirilen değerleri ve model parametrelerinin zaman adımıyla değişimleri sırasıyla şekil 4.10 - 4.12'de verilmiştir. Çalışmalarda kovaryans matrisin başlangıç değeri 1000, unutma çarpanı 0.99 model mertebesi çıkış değişkenine göre 2, giriş değişkenine göre 1. mertebeden seçilmiştir.



Şekil 4.10 Basamak etki ile elektriksel iletkenliğin değişimi kullanılarak YEKK ile model parametrelerinin belirlenmesi



Şekil 4.11 Basamak etki ile sıcaklığın değişimi kullanılarak YEKK ile model parametrelerinin belirlenmesi



Şekil 4.12 Pulse ve basamak etki ile pH'nin değişimi kullanılarak YEKK ile model parametrelerinin belirlenmesi

Elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklık için model parametrelerinin zamanla değişimleri incelenerek ARMAX model parametreleri elde edilmiş ve çizelge 4.1'de verilmiştir. Yapılan çalışmalarda elektriksel iletkenlik, sıcaklık ve pH için ISE değerleri sırasıyla 0.0013, 0.0019, 0.0009 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.1 Elektriksel iletkenlik, sıcaklık ve pH için ARMAX model parametreleri

Model parametreleri		a ₁	a ₂	b ₀
Elektriksel iletkenlik		0.783	0.072	0.01152
Sıcaklık		-0.6424	0.1	0.03325
pH	Asit	0.8297	-0.03538	0.0000293
	Baz	-0.9367	0.0367	0.0002312

4.4 Kontrol Çalışmaları

4.4.1 PID kontrol çalışmaları

4.4.1.1 Kutup yerleştirme ile en uygun kontrol edici parametrelerinin belirlenmesi

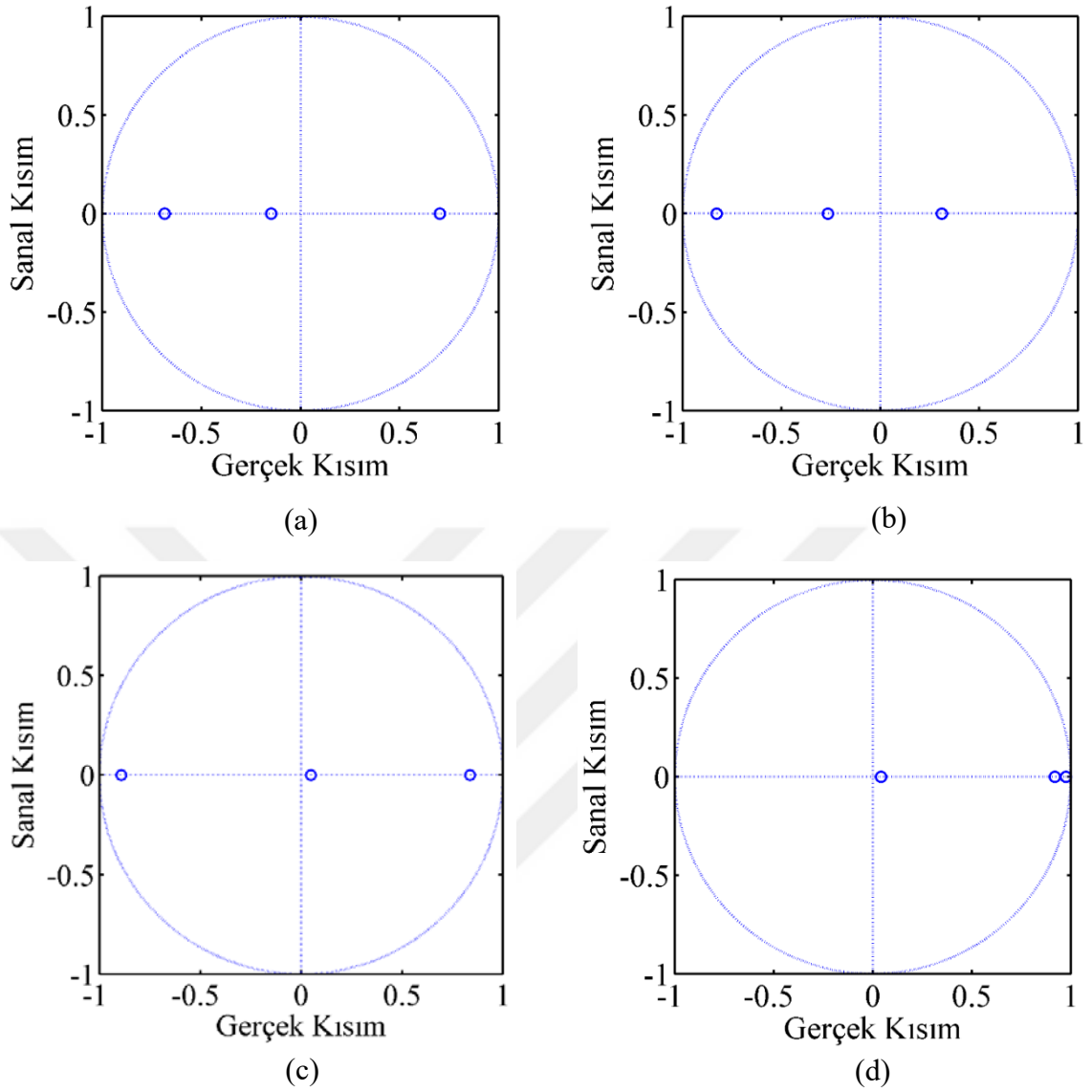
Kağıt endüstrisi atık sularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımında elektriksel iletkenlik, sıcaklık ve pH parametrelerinin kontrol edilerek istenen değerde tutulması amacıyla ilk olarak PID kontrol çalışmaları yapılmıştır. Bu amaçla öncelikle kutup yerleştirme yöntemi ile her bir işletim parametresi için en uygun PID parametreleri belirlenmiştir.

Elektriksel iletkenlik, sıcaklık ve pH parametrelerinin bir önceki bölümde elde edilen model parametreleri kullanılarak kutup noktalarının birim çember içinde kalmasını sağlayan en uygun PID parametrelerini belirlemek için K_c , τ_I , τ_D değerleri ile denemeler yapılmış, üç işletim parametresi için en uygun kontrol edici parametrelerinin kullanılması ile bulunan kutuplar ve en uygun PID kontrol edici parametreleri çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 Sıcaklık, elektriksel iletkenlik ve pH için sistemin kutupları ve kontrol edici parametreleri

		K_c	τ_I (s)	τ_D (s)	Kutuplar		
Elektriksel iletkenlik		5	0.05	0.01	0.701963	-0.684202	-0.147513
Sıcaklık		48	0.5	0.01	-0.828502	0.310029	-0.265047
pH	Asit	1000	0.05	0.01	-0.8915	0.8373	0.0482
	Baz	1	0.06	0.4	0.9750	0.9196	0.0407

Bulunan kutupların birim çemberdeki yerleşimleri şekil 4.13’te verilmiştir. Elde edilen sonuçlar elektriksel iletkenlik, sıcaklık ve pH sistemlerinin karakteristik eşitliklerinin köklerinin gerçek ve kapalı devre yanıtlarının salınımsız olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.13 Sistemin kutupları

a. Elektriksel iletkenlik, b. Sıcaklık, c. pH asit, d. pH baz

4.4.1.2 Elektriksel iletkenliğin PID kontrolü

Kağıt endüstrisi atık sularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımında elektriksel iletkenliğin kontrol edilerek istenen değerde sabit tutulması amacıyla Bölüm 4.4.1.1’de bulunan kontrol edici parametreleri MATLAB™/Simulink’te tasarlanan gerçek zamanlı sistem modelinde kullanılarak PID kontrol çalışması gerçekleştirilmiştir. 1 A sabit akım koşulu altında 600 devir/dk karıştırma hızı ve 45 dakika süre ile yapılan çalışmada kontrol

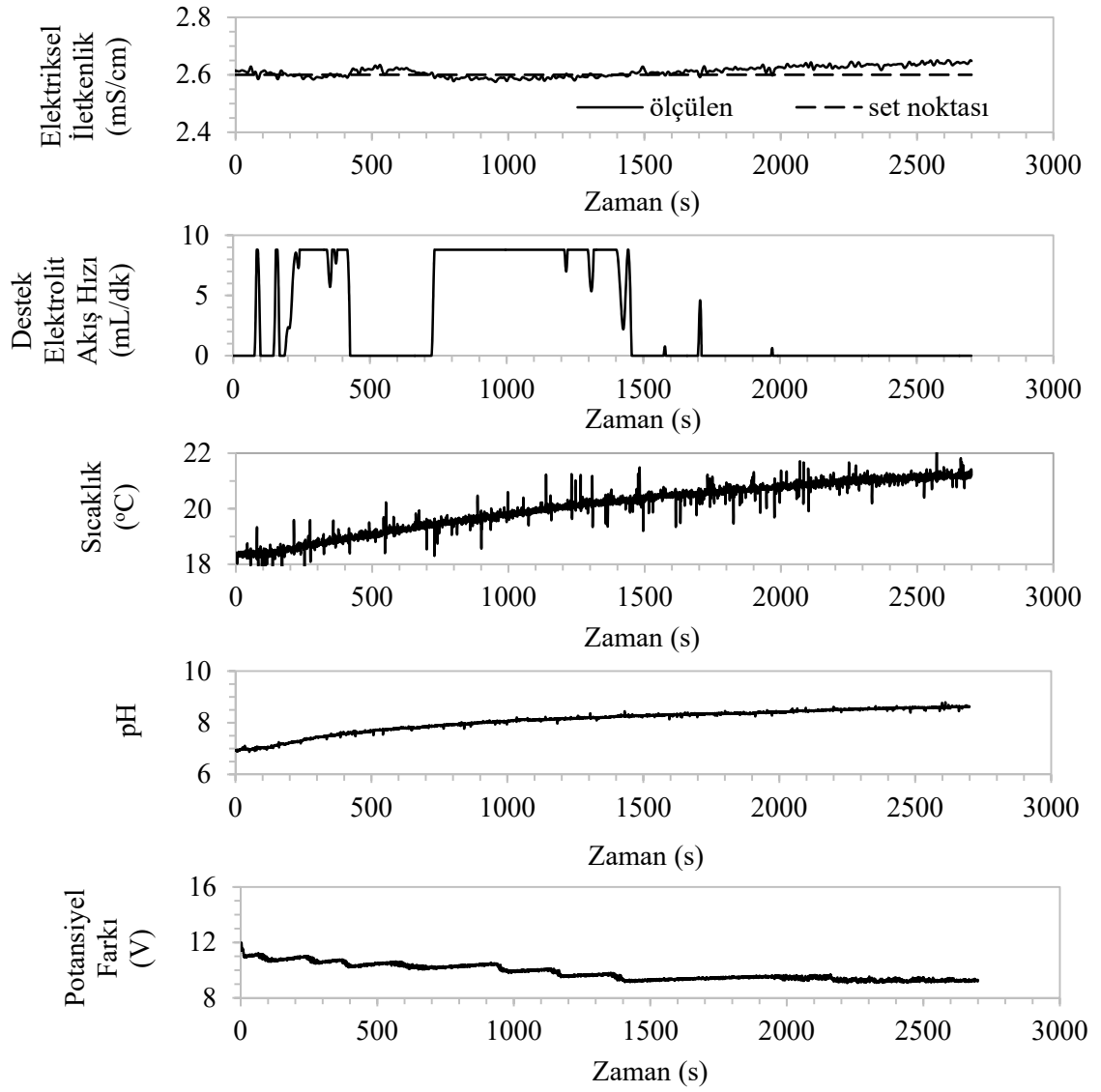
edilen değişken olan elektriksel iletkenliğin set noktası atık suyun doğal değerine yakın olacak şekilde 2.6 mS/cm değerine ayarlanmış, 0.04 M NaCl destek elektrolit çözeltisi akış hızı ayarlanabilen değişken olarak seçilmiştir. Elde edilen sonuçlar şekil 4.14'te verilmiştir.

Yapılan kontrol çalışmasına ait ISE, IAE, ITAE ve ITSE değerleri sırasıyla 2.49, 93.89, 5.07×10^5 , 15.56 olarak hesaplanmıştır. Atık suyun kontrol uygulanmadan arıtıldığı durumda elektriksel iletkenlikte 0.2 mS/cm değerinde düşüş gerçekteşmiş olup kontrolün uygulandığı bu çalışmada elektriksel iletkenlik sabit tutulmuş, sabit akım koşulunda potansiyel farkının zamanla değişimi grafiği incelendiğinde kontrollü durumda kontrolsüz duruma göre azalma olduğu görölmüştür. Ortalama potansiyel farkı elektriksel iletkenliğin kontrol edildiği arıtım çalışmasında 9.84 V, kontrolsüz arıtım çalışmasında 11.44 V olarak hesaplanmıştır. Bu durum elektriksel iletkenliğin enerji tüketimi üzerindeki etkisini yansıtmaktadır.

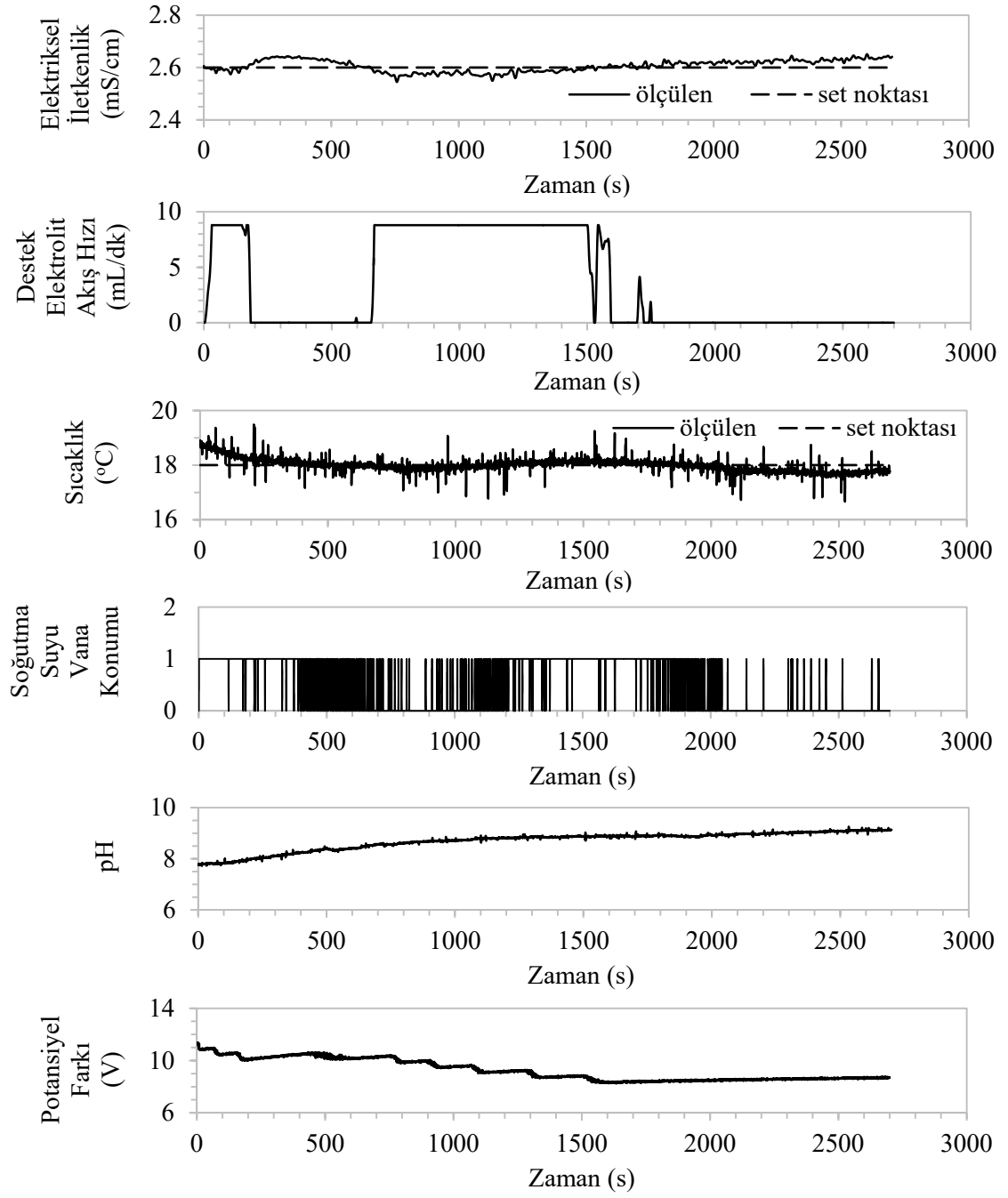
4.4.1.3 Sıcaklığın PID kontrolü

Kağıt endüstrisi atık sularının elektrokoagölasyon yöntemi ile arıtımında sıcaklığın kontrol edilerek istenen değerde sabit tutulması amacıyla Bölüm 4.4.1.1'de bulunan kontrol edici parametreleri MATLAB™/Simulink'te tasarlanan gerçekte zamanlı sistem modelinde kullanılarak PID kontrol çalışması gerçekteştirilmiştir. 1 A sabit akım koşulu altında 600 devir/dk karıştırma hızı ve 45 dakika süre ile yapılan çalışmada kontrol edilen değişken olan sıcaklığın set noktası 18 °C, reaktör etrafındaki ceketten geçen soğutma suyunun sıcaklığı 12.5 °C olarak ayarlanmış, soğutma suyunun aç-kapa şeklindeki vana konumu ayarlanabilen değişken olarak seçilmiştir. Çalışmada işletme parametrelerinin birbirleri üzerinde oluşturabilecekleri etkileri ortadan kaldırmak için elektriksel iletkenlik PID kontrol edici ile kontrol edilmiştir. Elde edilen sonuçlar şekil 4.15'te verilmiştir.

Yapılan sıcaklık kontrol çalışmasına ait ISE, IAE, ITAE ve ITSE değerleri sırasıyla 324.59, 953.62, 5.15×10^6 , 6.98×10^5 olarak hesaplanmıştır. Sabit akımda yürütölen elektriksel iletkenlik ve sıcaklık kontrollü bu çalışmada potansiyel farkı değişiminin kontrolsüz arıtımın yapıldığı durumla kıyaslandığında azalma eğiliminde olduğu görölmüştür.



Şekil 4.14 İletkenliğin PID kontrolü

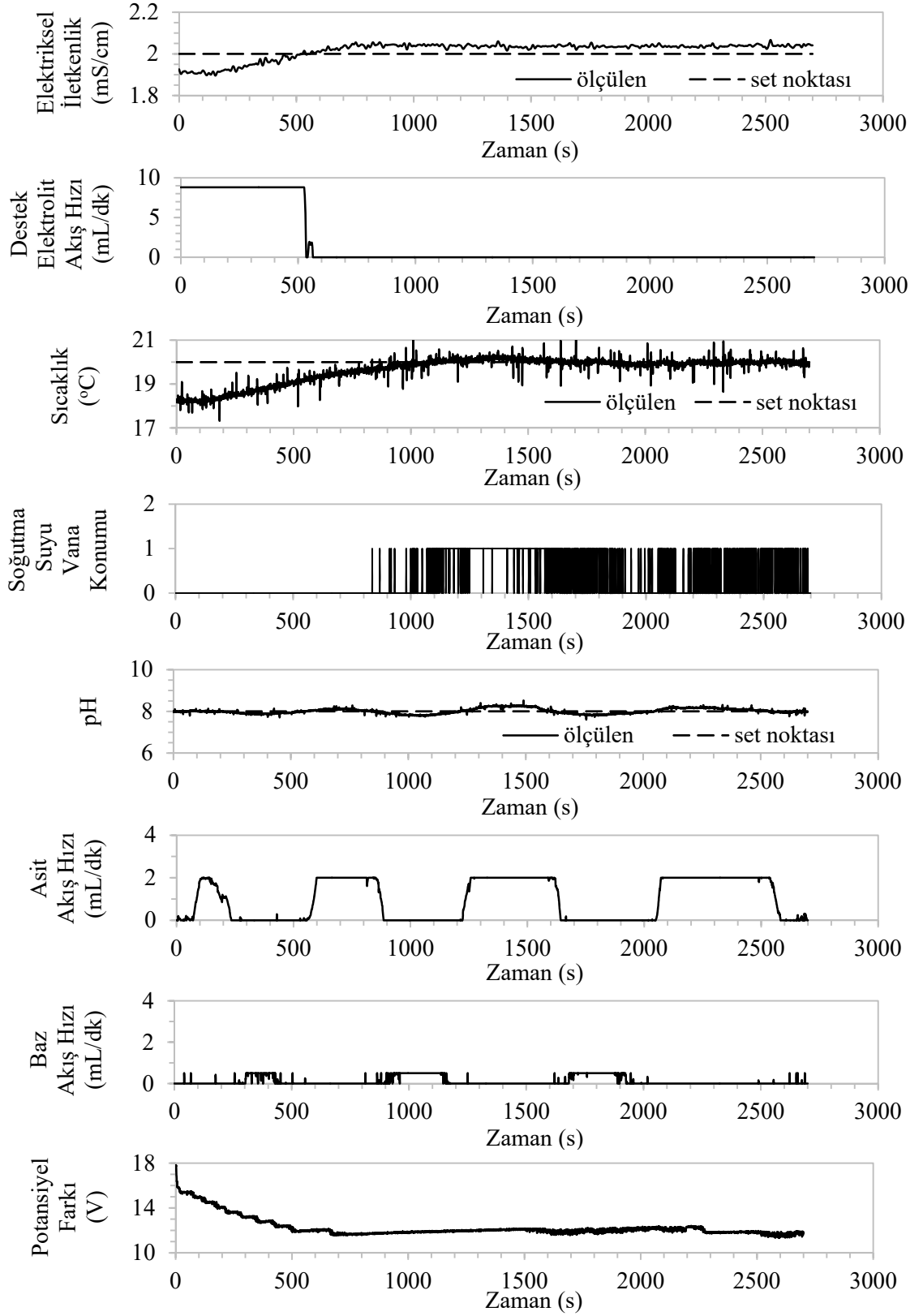


Şekil 4.15 Sıcaklığın PID kontrolü

4.4.1.4 pH'nin PID kontrolü

Kağıt endüstrisi atık sularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımında pH'nin kontrol edilerek istenen değerde sabit tutulması amacıyla Bölüm 4.4.1.1'de bulunan kontrol edici parametreleri MATLABTM/Simulink'te tasarlanan gerçek zamanlı sistem modelinde kullanılarak PID kontrol çalışması gerçekleştirilmiştir. 1 A sabit akım koşulu altında 600 devir/dk karıştırma hızı ve 45 dakika süre ile yapılan çalışmada kontrol edilen değişken olan pH'nin set noktası atık suyun doğal değerine yakın olacak şekilde 8 değerine ayarlanmış, 0.1 M HCl çözeltisi akış hızı ve 0.1 M NaOH çözeltisi akış hızı ayarlanabilen değişkenler olarak seçilerek koordineli kontrol çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada işletme parametrelerinin birbirleri üzerinde oluşturabilecekleri etkileri ortadan kaldırmak için elektriksel iletkenlik ve sıcaklık PID kontrol edici ile kontrol edilmiştir. Elde edilen sonuçlar şekil 4.16'da verilmiştir.

Yapılan pH kontrol çalışmasına ait ISE, IAE, ITAE ve ITSE değerleri sırasıyla 86.64, 559.37, 3.02×10^6 , 1.83×10^7 olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada potansiyel farkının zamanla değişiminin azalma eğiliminde olduğu görülmüştür. Elektriksel iletkenlik ve sıcaklık kontrol edicilerinin yapılan çalışmada set noktasını başarıyla yakalamış olmaları ve bu durumun pH kontrolü üzerinde olumsuz bir etki yaratmamış olması MIMO kontrolün amacına uygun bir şekilde gerçekleştirilebildiğini göstermektedir. Elektriksel iletkenlik kontrolünde 0.03 mS/cm değerinde bir ofset görülmüş olup, bu durum gerek ofset değerinin çok düşük olması gerekse tez kapsamında yapılacak arıtım çalışmalarında elektriksel iletkenliğin set noktasına basamak etki verilmesine gerek duyulmaması sebebiyle kabul edilebilir bulunmuş olup MIMO kontrol için bağlı kazanç analizine gerek görülmemiştir.



Şekil 4.16 pH'nin PID kontrolü

4.4.2 GPC kontrol çalışmaları

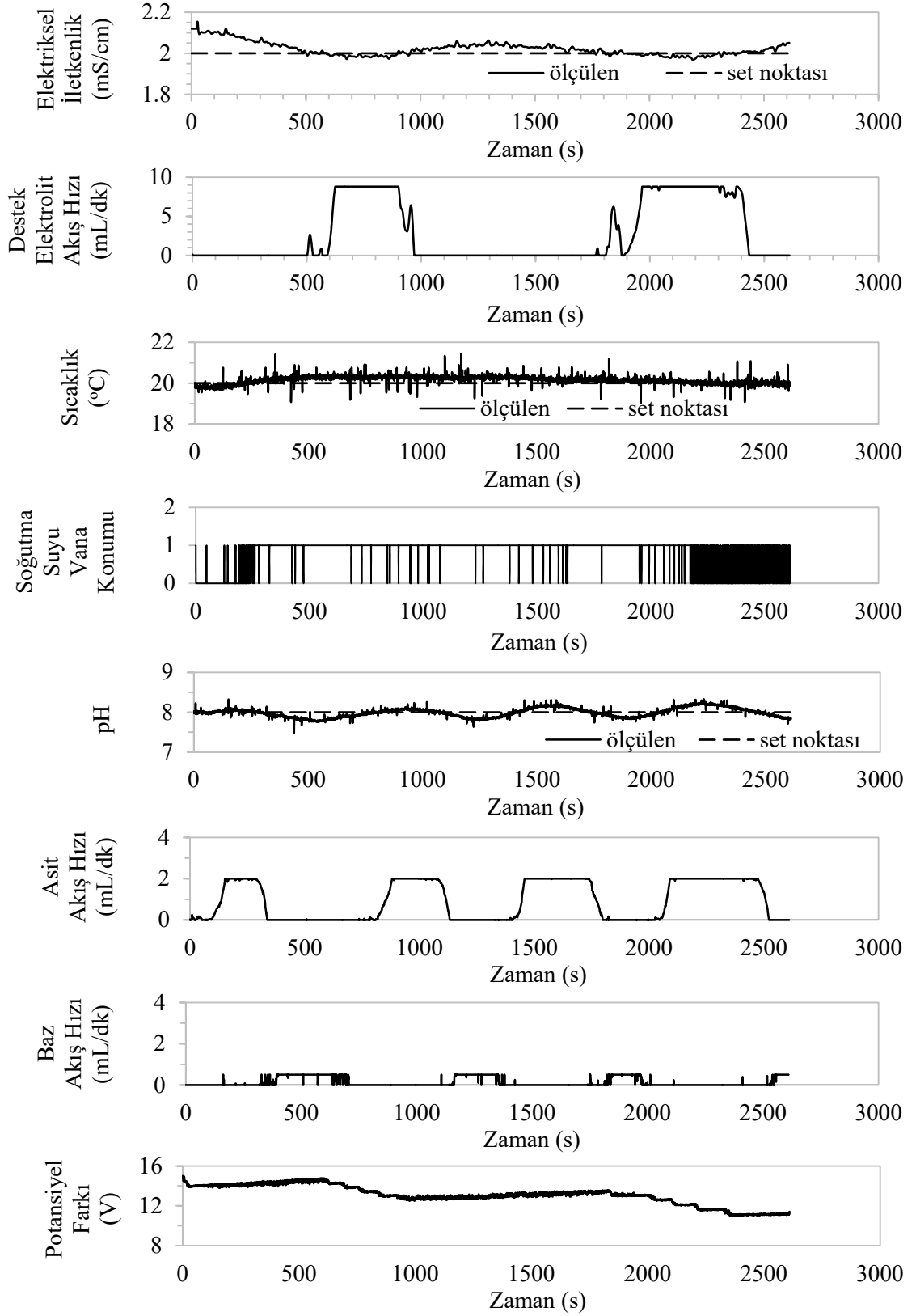
4.4.2.1 Elektriksel iletkenliğin GPC kontrolü

Kağıt endüstrisi atık sularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımında elektriksel iletkenliğin kontrol edilerek istenen değerde sabit tutulması amacıyla MATLABTM/Simulink'te tasarlanan gerçek zamanlı sistem modelinde GPC algoritması kullanılarak elektriksel iletkenlik kontrol çalışmaları gerçekleştirilmiştir. 1 A sabit akım koşulu altında 600 devir/dk karıştırma hızı ve 45 dakika süre ile yapılan çalışmalarda kontrol edilen değişken olan elektriksel iletkenliğin set noktası atık suyun doğal değerine yakın olacak şekilde 2 mS/cm değerine ayarlanmış, 0.04 M NaCl destek elektrolit çözeltisi akış hızı ayarlanabilen değişken olarak seçilmiştir. Çalışmalarda sıcaklık ve pH, elektriksel iletkenlik üzerinde yük etkisi oluşturmamaları için, PID kontrol edici ile kontrol edilmiştir. Çizelge 4.3'te λ , N_2 ve N_U parametreleri ile elektriksel iletkenliğin GPC kontrolü için yapılan çalışmalar sonucu elde edilen performans kriteri değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.3 Elektriksel iletkenlik için gerçekleştirilen GPC çalışmaları sonucunda elde edilen performans kriteri değerleri

Deney no	λ	N_2	N_U	ISE	IAE	ITAE ($\times 10^{-6}$)	ITSE ($\times 10^{-3}$)
1	0.0008	2	1	19.66	217.58	1.18	1.91
2	0.0005	2	1	8.02	147.12	0.77	0.30
3	0.0005	8	1	252.43	1141.49	5.96	66.68
4	0.0005	4	1	51.60	482.40	2.52	4.20
5	0.0005	2	2	7.71	141.59	0.77	0.36

Çizelge 4.3'te yer alan veriler ve her deney için çizilmiş olan grafikler incelenmiş ve GPC ile elektriksel iletkenlik kontrolü çalışmalarında λ , N_2 ve N_U parametreleri için en uygun değerler sırasıyla 0.0005, 2 ve 2 olarak seçilmiştir. 5 numaralı deneye ait bu parametrelerle gerçekleştirilen çalışmanın sonuçları şekil 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.17 İletkenliğin GPC kontrolü

4.4.2.2 pH'nin GPC kontrolü

Kağıt endüstrisi atık sularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımında pH'nin kontrol edilerek istenen değerde sabit tutulması amacıyla MATLAB™/Simulink'te tasarlanan gerçek zamanlı sistem modelinde GPC algoritması kullanılarak pH kontrol çalışmaları gerçekleştirilmiştir. 1 A sabit akım koşulu altında 600 devir/dk karıştırma hızı ve 45 dakika süre ile yapılan çalışmalarda kontrol edilen değişken olan pH'nin set noktası atık suyun doğal pH değerine yakın olacak şekilde 8 değerine ayarlanmış, 0.1 M HCl çözeltisi akış hızı ve 0.1 M NaOH çözeltisi akış hızı ayarlanabilen değişkenler olarak seçilerek koordineli kontrol gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda elektriksel iletkenlik ve sıcaklık, pH üzerinde yük etkisi oluşturmamaları için, sırasıyla GPC ve PID kontrol ediciler ile kontrol edilmiştir. Burada λ_A , N_{2A} ve N_{UA} asit akış hızını ayarlayan kontrol edicinin, λ_B , N_{2B} ve N_{UB} ise baz akış hızını ayarlayan kontrol edicinin parametreleridir. Çizelge 4.4'te λ , N_2 ve N_U parametreleri ile pH'nin GPC kontrolü için yapılan çalışmalar sonucu elde edilen performans kriteri değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.4 pH için gerçekleştirilen GPC çalışmaları sonucunda elde edilen performans kriteri değerleri

Deney no	λ_A	λ_B	N_{2A}	N_{2B}	N_{UA}	N_{UB}	ISE	IAE	ITAE ($\times 10^{-6}$)	ITSE ($\times 10^{-4}$)
1	0.000005	0.00005	2	2	1	1	146.69	766.81	4.14	4.41
2	0.000005	0.000005	2	2	1	1	118.60	671.64	3.63	3.11
3	0.00005	0.00001	2	2	1	1	102.74	597.76	3.23	2.70
4	0.0005	0.0005	2	2	1	1	194.70	900.45	4.86	6.72
5	0.00005	0.0005	2	2	1	1	117.23	665.83	3.60	2.96
6	0.000005	0.0005	2	2	1	1	116.29	635.16	3.43	3.56
7	0.000005	0.0001	2	2	1	1	98.74	627.41	3.39	1.88
8	0.00005	0.00001	2	3	1	1	88.41	527.21	2.85	2.65
9	0.00005	0.00001	3	3	1	1	118.83	635.09	3.43	3.35
10	0.00005	0.00001	3	2	1	1	128.79	703.95	3.80	3.51
11	0.00005	0.00001	2	2	2	2	138.14	722.93	3.90	4.07
12	0.00005	0.000005	2	2	1	1	113.37	668.25	3.61	2.64
13	0.00005	0.00001	2	2	1	1	67.50	498.44	2.69	1.05
14	0.00001	0.00001	2	2	1	1	95.82	600.21	3.24	1.97
15	0.000001	0.000001	2	2	1	1	51.93	453.78	2.45	0.576
16	0.0000001	0.0000001	2	2	1	1	83.87	563.74	3.04	1.58

Çizelge 4.4'te yer alan veriler ve her deney için çizilmiş olan grafikler incelenmiş ve GPC ile pH kontrolü çalışmalarında λ_A , λ_B , N_{2A} , N_{2B} ve N_{UA} , N_{UB} parametreleri için en uygun değerler sırasıyla 0.000001, 0.000001, 2, 2 ve 1, 1 olarak seçilmiştir. 15 numaralı deneye ait bu parametrelerle gerçekleştirilen çalışmanın sonuçları şekil 4.18'de verilmiştir.

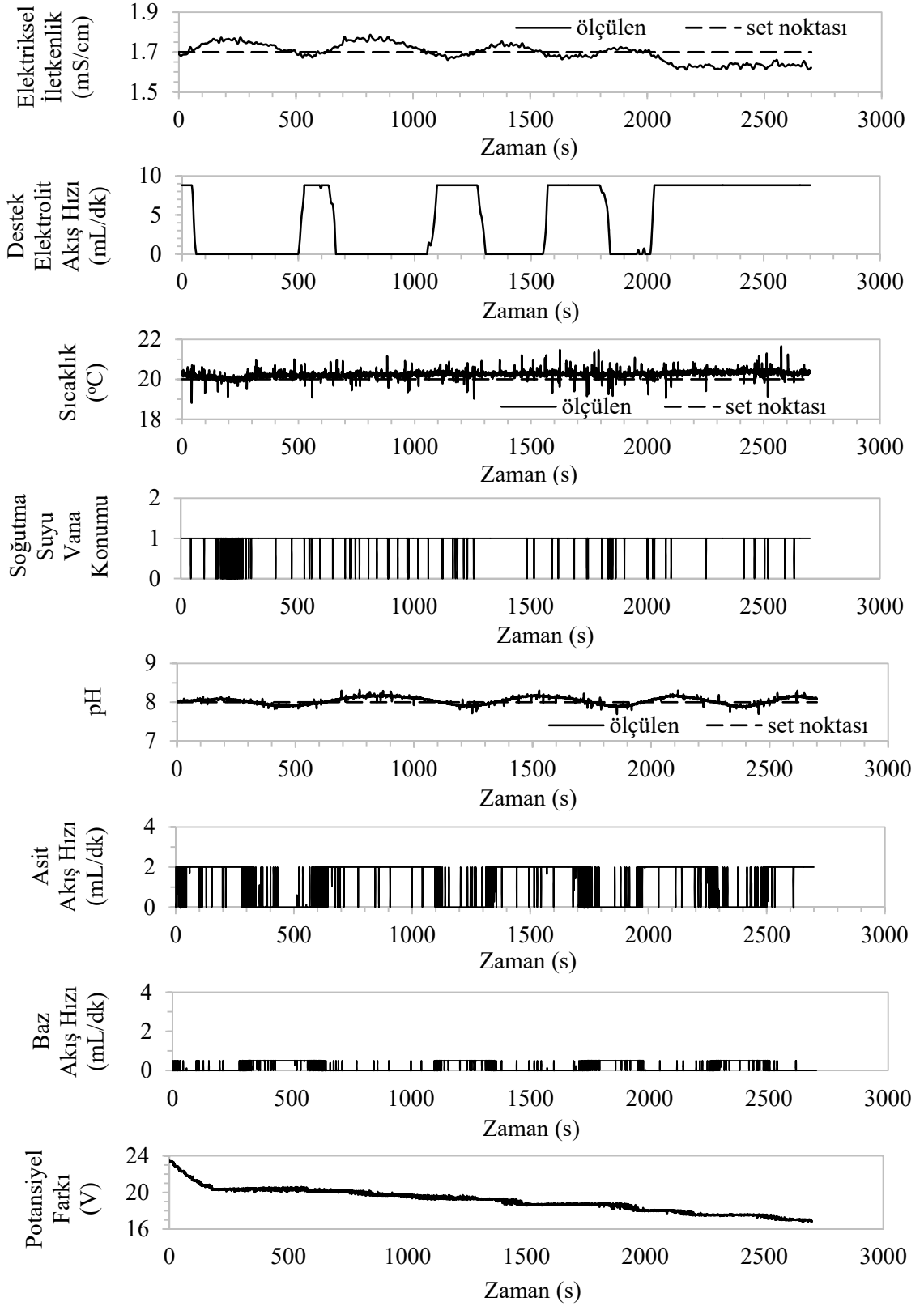
4.4.2.3 Sıcaklığın GPC kontrolü

Kağıt endüstrisi atık sularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımında sıcaklığın kontrol edilerek istenen değerde sabit tutulması amacıyla MATLABTM/Simulink'te tasarlanan gerçek zamanlı sistem modelinde GPC algoritması kullanılarak sıcaklık kontrol çalışmaları gerçekleştirilmiştir. 1 A sabit akım koşulu altında 600 devir/dk karıştırma hızı ve 45 dakika süre ile yapılan çalışmalarda kontrol edilen değişken olan sıcaklığın set noktası 20 °C, reaktör etrafındaki ceketten geçen soğutma suyunun sıcaklığı 12.5 °C olarak ayarlanmış, soğutma suyunun aç-kapa şeklindeki vana konumu ayarlanabilen değişken olarak seçilmiştir. Çalışmalarda elektriksel iletkenlik ve pH, sıcaklık üzerinde yük etkisi oluşturmamaları için GPC kontrol edici ile kontrol edilmiştir. Çizelge 4.5'te λ , N_2 ve N_U parametreleri ile sıcaklığın GPC kontrolü için yapılan çalışmalar sonucu elde edilen performans kriteri değerleri verilmiştir.

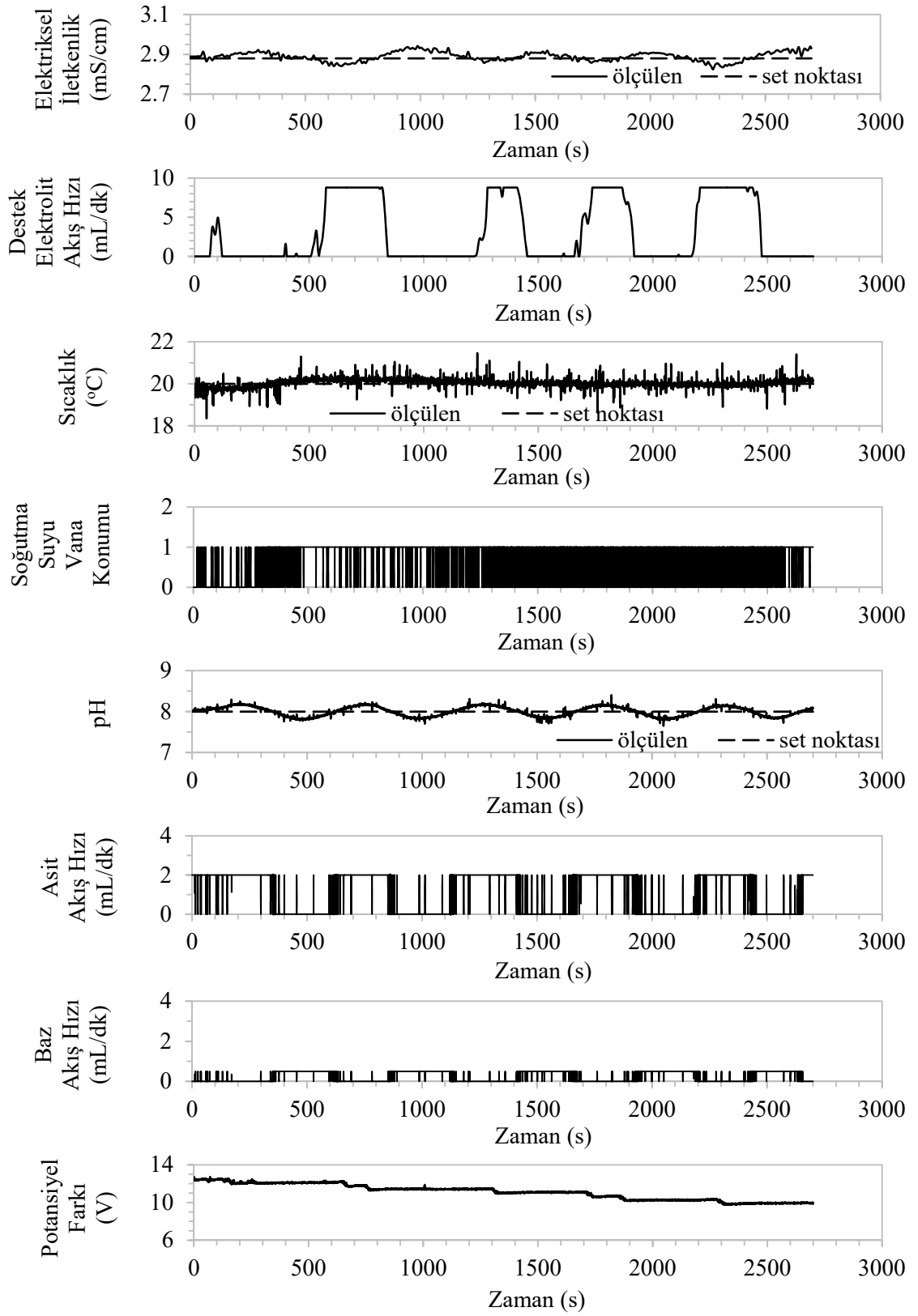
Çizelge 4.5 Sıcaklık için gerçekleştirilen GPC çalışmaları sonucunda elde edilen performans kriteri değerleri

Deney no	λ	N_2	N_U	ISE	IAE	ITAE ($\times 10^{-6}$)	ITSE ($\times 10^{-5}$)
1	0.0001	2	1	366.92	1122.72	6.06	9.79
2	0.00001	2	1	240.61	778.59	4.21	6.13

Çizelge 4.5'te yer alan veriler ve her deney için çizilmiş olan grafikler incelenmiş ve GPC ile sıcaklık kontrolü çalışmalarında λ , N_2 ve N_U parametreleri için en uygun değerler sırasıyla 0.00001, 2 ve 1 olarak seçilmiştir. 2 numaralı deneye ait bu parametrelerle gerçekleştirilen çalışmanın sonuçları şekil 4.19'da verilmiştir.



Şekil 4.18 pH'nin GPC kontrolü



Şekil 4.19 Sıcaklığın GPC kontrolü

4.4.3 GMV kontrol çalışmaları

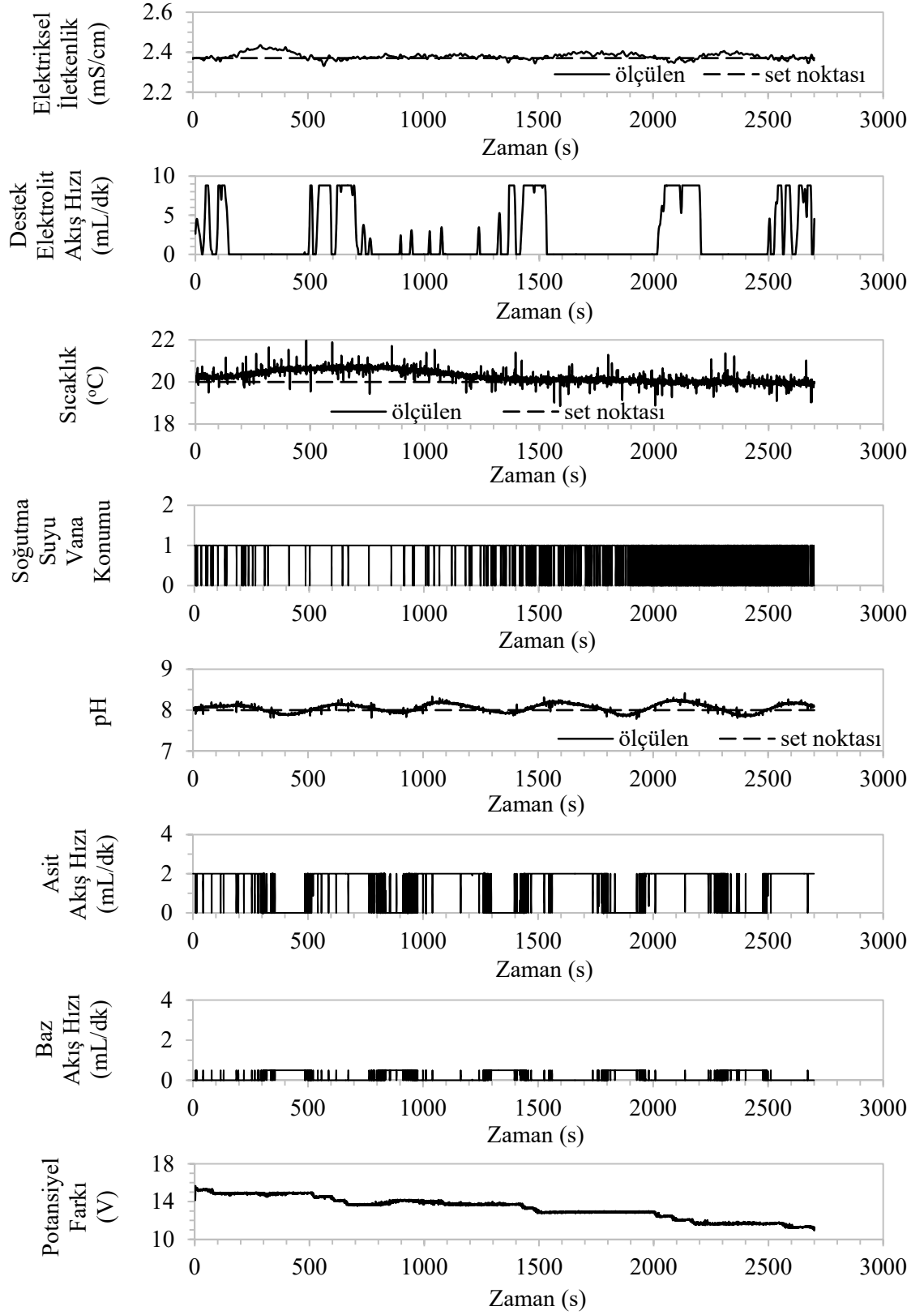
4.4.3.1 Elektriksel iletkenliğin GMV kontrolü

Kağıt endüstrisi atık sularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımında elektriksel iletkenliğin kontrol edilerek istenen değerde sabit tutulması amacıyla MATLABTM/Simulink'te tasarlanan gerçek zamanlı sistem modelinde GMV algoritması kullanılarak elektriksel iletkenlik kontrol çalışmaları gerçekleştirilmiştir. 1 A sabit akım koşulu altında 600 devir/dk karıştırma hızı ve 45 dakika süre ile yapılan çalışmalarda kontrol edilen değişken olan elektriksel iletkenliğin set noktası atık suyun doğal değerine yakın olacak şekilde 2.37 mS/cm değerine ayarlanmış, 0.04 M NaCl destek elektrolit çözeltisi akış hızı ayarlanabilen değişken olarak seçilmiştir. Çalışmalarda pH ve sıcaklık, elektriksel iletkenlik üzerinde yük etkisi oluşturmamaları için, GPC kontrol edici ile kontrol edilmiştir. Çizelge 4.6'da λ parametresi ile elektriksel iletkenliğin GMV kontrolü için yapılan çalışmalar sonucu elde edilen performans kriteri değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.6 Elektriksel iletkenlik için gerçekleştirilen GMV kontrol çalışmaları sonucunda elde edilen performans kriteri değerleri

Deney no	λ	ISE	IAE	ITAE ($\times 10^{-5}$)	ITSE
1	0.0005	2.14	89.37	4.83	10.0543
2	0.00005	1.91	75.85	4.10	14.1053
3	0.000005	5.42	142.33	7.68	62.8714

Çizelge 4.6'da yer alan veriler ve her deney için çizilmiş olan grafikler incelenmiş ve GMV kontrol ile elektriksel iletkenlik kontrolü çalışmalarında λ parametresi için en uygun değer 0.00005 olarak seçilmiştir. 2 numaralı deneye ait bu parametre ile gerçekleştirilen çalışmanın sonuçları şekil 4.20'de verilmiştir.



Şekil 4.20 İletkenliğin GMV kontrolü

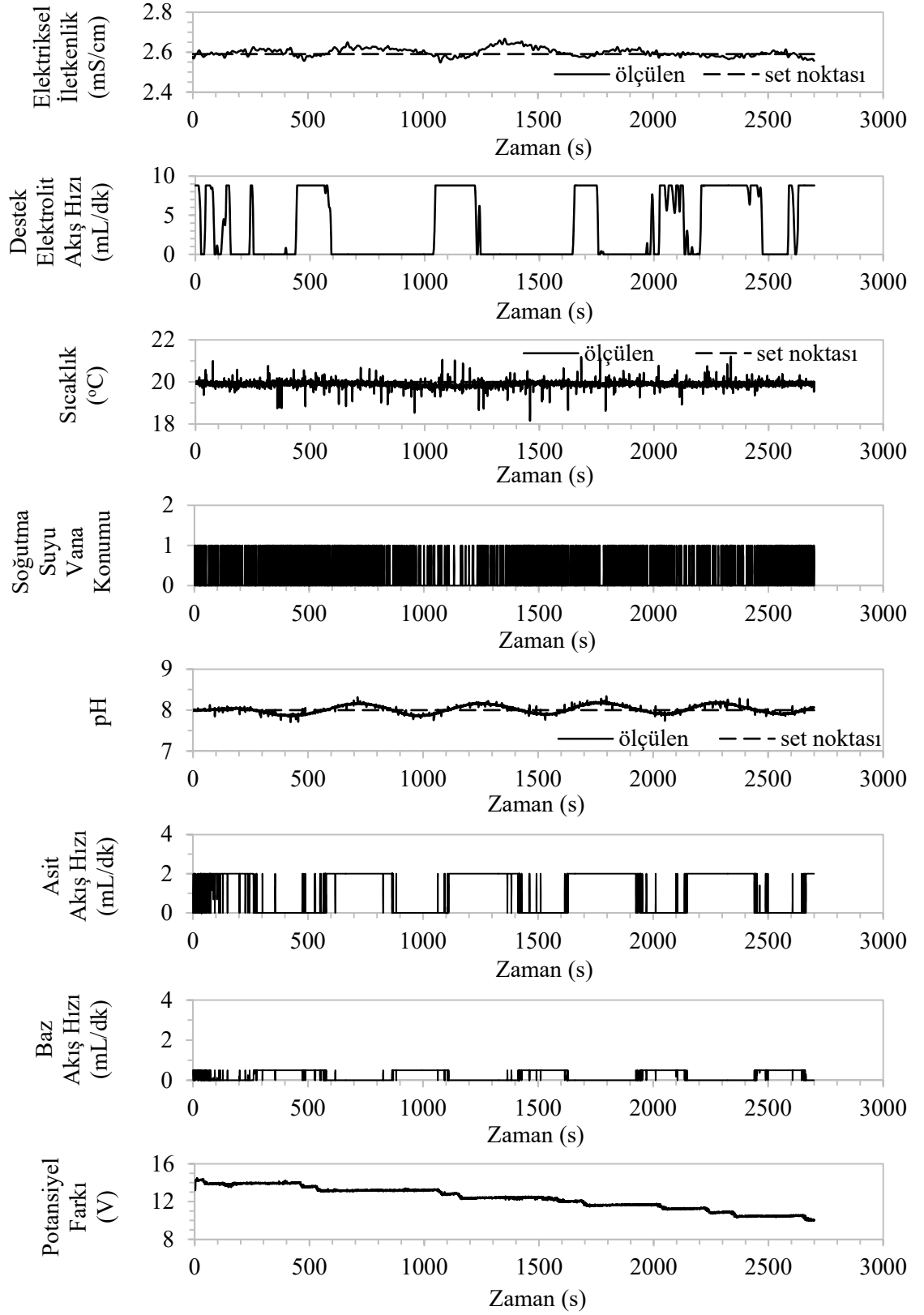
4.4.3.2 pH'nin GMV kontrolü

Kağıt endüstrisi atık sularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımında pH'nin kontrol edilerek istenen değerde sabit tutulması amacıyla MATLABTM/Simulink'te tasarlanan gerçek zamanlı sistem modelinde GMV algoritması kullanılarak pH kontrol çalışmaları gerçekleştirilmiştir. 1 A sabit akım koşulu altında 600 devir/dk karıştırma hızı ve 45 dakika süre ile yapılan çalışmalarda kontrol edilen değişken olan pH'nin set noktası 8 değerine ayarlanmış, 0.1 M HCl çözeltisi akış hızı ve 0.1 M NaOH çözeltisi akış hızı ayarlanabilen değişkenler olarak seçilerek koordineli kontrol gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda elektriksel iletkenlik ve sıcaklık, pH üzerinde yük etkisi oluşturmamaları için, sırasıyla GMV ve GPC kontrol edici ile kontrol edilmiştir. Çizelge 4.7'de λ parametresi ile pH'nin GMV kontrolü için yapılan çalışmalar sonucu elde edilen performans kriteri değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.7 pH için gerçekleştirilen GMV kontrol çalışmaları sonucunda elde edilen performans kriteri değerleri

Deney no	λ_A	λ_B	ISE	IAE	ITAE ($\times 10^{-6}$)	ITSE ($\times 10^{-3}$)
1	0.0001	0.0001	59.78	485.42	2.62	7.23
2	0.00001	0.00001	80.37	567.38	3.06	13.32
3	0.000001	0.000001	72.34	535.46	2.89	10.92
4	0.0000001	0.0000001	52.58	447.25	2.41	6.03

Çizelge 4.7'de yer alan veriler ve her deney için çizilmiş olan grafikler incelenmiş ve GMV kontrol ile pH kontrolü çalışmalarında λ_A ve λ_B parametreleri için en uygun değerler sırasıyla 0.0000001, 0.0000001 olarak seçilmiştir. 4 numaralı deneye ait bu parametrelerle gerçekleştirilen çalışmanın sonuçları şekil 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.21 pH'nin GMV kontrolü

4.4.3.3 Sıcaklığın GMV kontrolü

Kağıt endüstrisi atık sularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımında sıcaklığın kontrol edilerek istenen değerde sabit tutulması amacıyla MATLABTM/Simulink'te tasarlanan gerçek zamanlı sistem modelinde GMV algoritması kullanılarak sıcaklık kontrol çalışmaları gerçekleştirilmiştir. 1 A sabit akım koşulu altında 600 devir/dk karıştırma hızı ve 45 dakika süre ile yapılan çalışmalarda kontrol edilen değişken olan sıcaklığın set noktası 20 °C, reaktör etrafındaki ceketten geçen soğutma suyunun sıcaklığı 12.5 °C olarak ayarlanmış, soğutma suyunun aç-kapa şeklindeki vana konumu ayarlanabilen değişken olarak seçilmiştir. Çalışmalarda elektriksel iletkenlik ve pH, sıcaklık üzerinde yük etkisi oluşturmamaları için, GMV kontrol edici ile kontrol edilmiştir. Çizelge 4.8'de λ parametresi ile sıcaklığın GMV kontrolü için yapılan çalışmalar sonucu elde edilen performans kriteri değerleri verilmiştir.

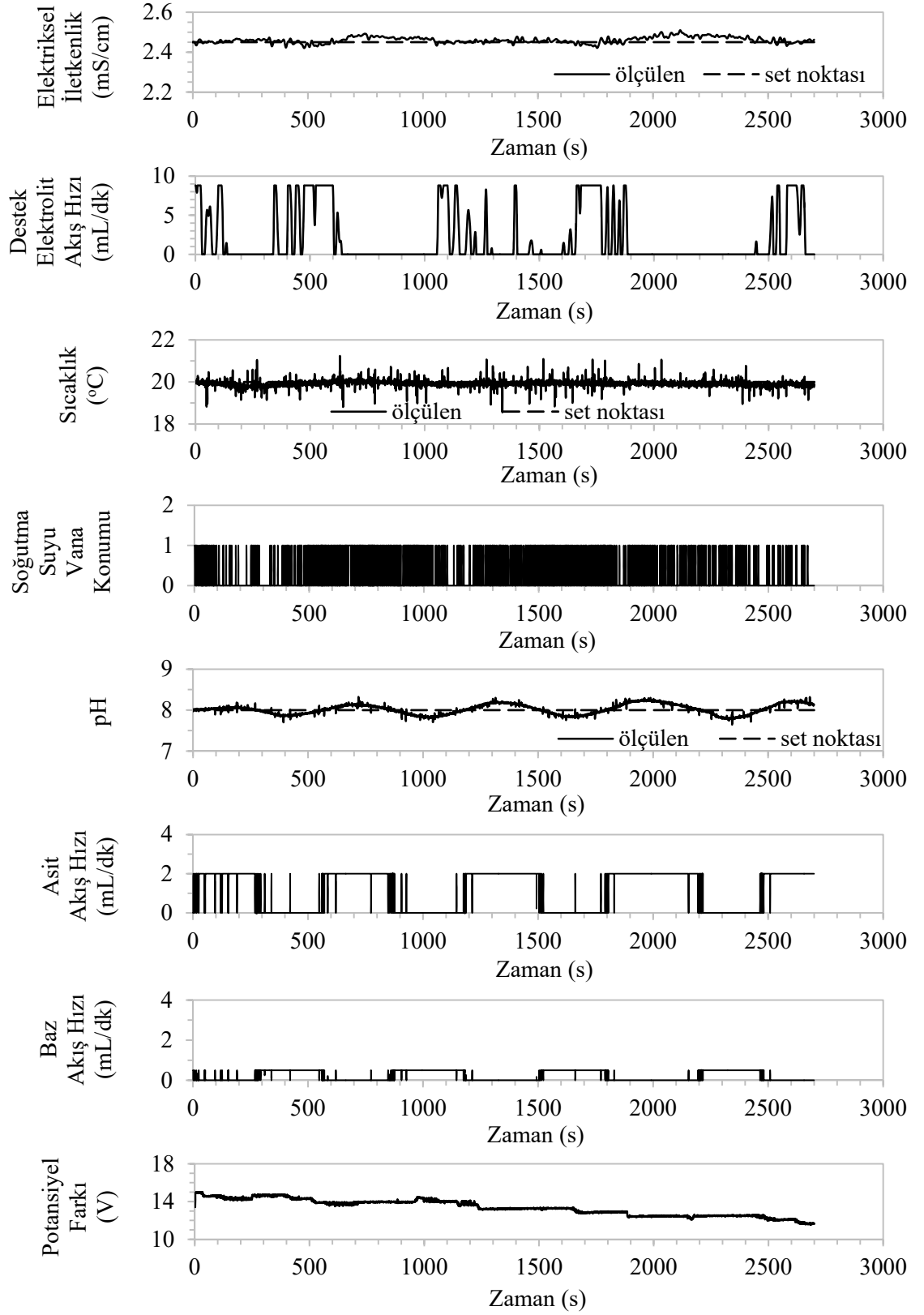
Çizelge 4.8 Sıcaklık için gerçekleştirilen GMV kontrol çalışmaları sonucunda elde edilen performans kriteri değerleri

Deney no	λ	ISE	IAE	ITAE ($\times 10^{-6}$)	ITSE ($\times 10^{-5}$)
1	0.0001	196.33	686.87	3.71	4.68
2	0.00001	176.73	658.06	3.55	3.96

Çizelge 4.8'de yer alan veriler ve her deney için çizilmiş olan grafikler incelenmiş ve GMV kontrol ile sıcaklık kontrolü çalışmalarında λ parametresi için en uygun değer 0.00001 olarak seçilmiştir. 2 numaralı deneye ait bu parametre ile gerçekleştirilen çalışmanın sonuçları şekil 4.22'de verilmiştir.

4.4.3.4 Elektriksel iletkenliğin adaptif GMV kontrolü

Kağıt endüstrisi atık sularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımında elektriksel iletkenliğin kontrol edilerek istenen değerde sabit tutulması amacıyla MATLABTM/Simulink'te tasarlanan gerçek zamanlı sistem modelinde adaptif GMV



Şekil 4.22 Sıcaklığın GMV kontrolü

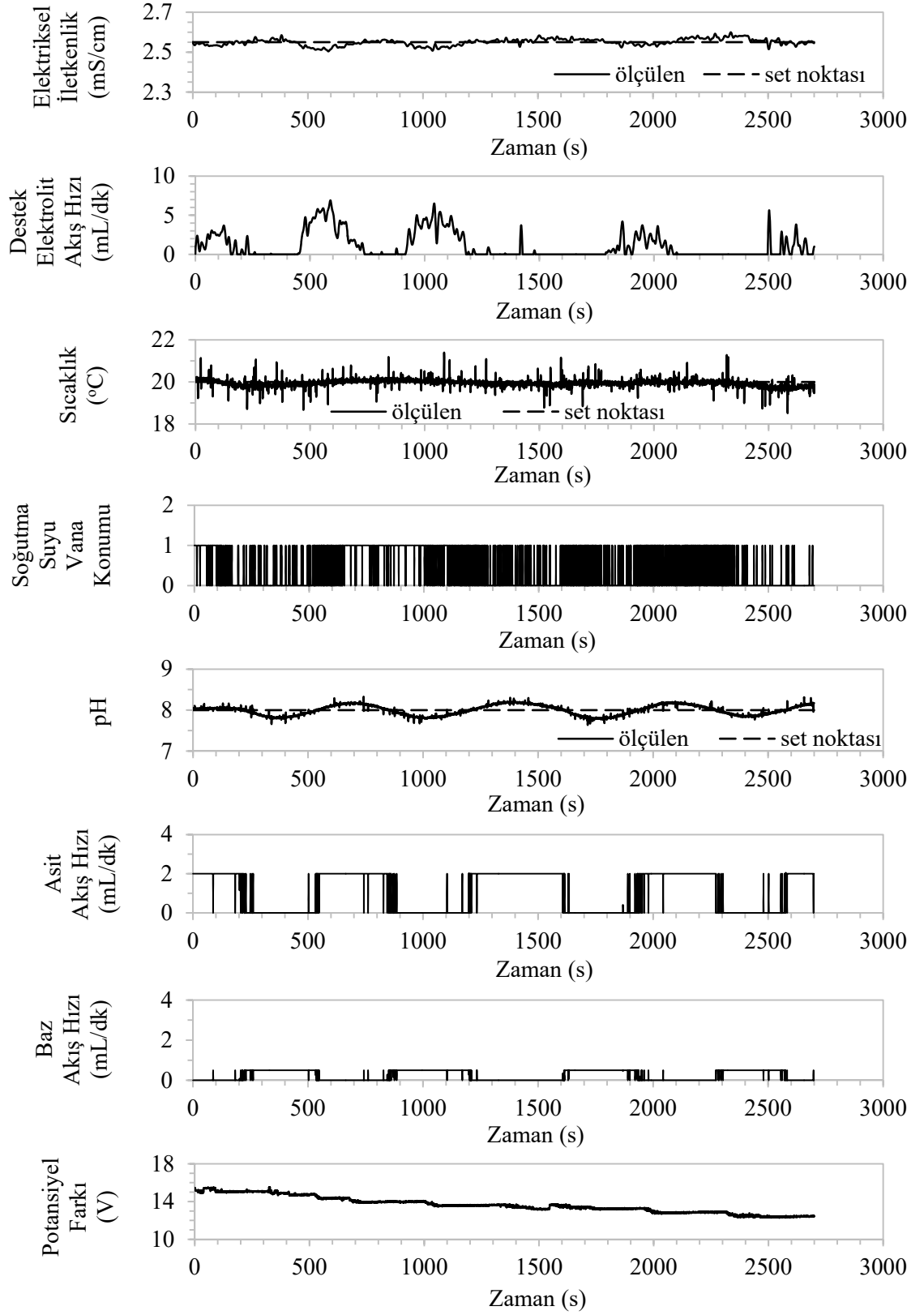
algoritması kullanılarak elektriksel iletkenlik kontrol çalışması gerçekleştirilmiştir. 1 A sabit akım koşulu altında 600 devir/dk karıştırma hızı ve 45 dakika süre ile yapılan çalışmada kontrol edilen değişken olan elektriksel iletkenliğin set noktası atık suyun doğal değerine yakın olacak şekilde 2.55 mS/cm değerine ayarlanmış, 0.04 M NaCl destek elektrolit çözeltisi akış hızı ayarlanabilen değişken olarak seçilmiştir. Çalışmalarda pH ve sıcaklık, elektriksel iletkenlik üzerinde yük etkisi oluşturmamaları için, GMV kontrol edici ile kontrol edilmiştir. Adaptif GMV parametreleri olan P, Q ve R'nin sırasıyla 5, 1, 5 değerlerine ayarlandığı çalışmada elektriksel iletkenlik kontrolü için ISE, IAE, ITAE ve ITSE değerleri sırasıyla 1.53, 72.57, 3.92×10^5 ve 6.35 hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar şekil 4.23-4.24'te verilmiştir.

4.4.3.5 pH'nin adaptif GMV kontrolü

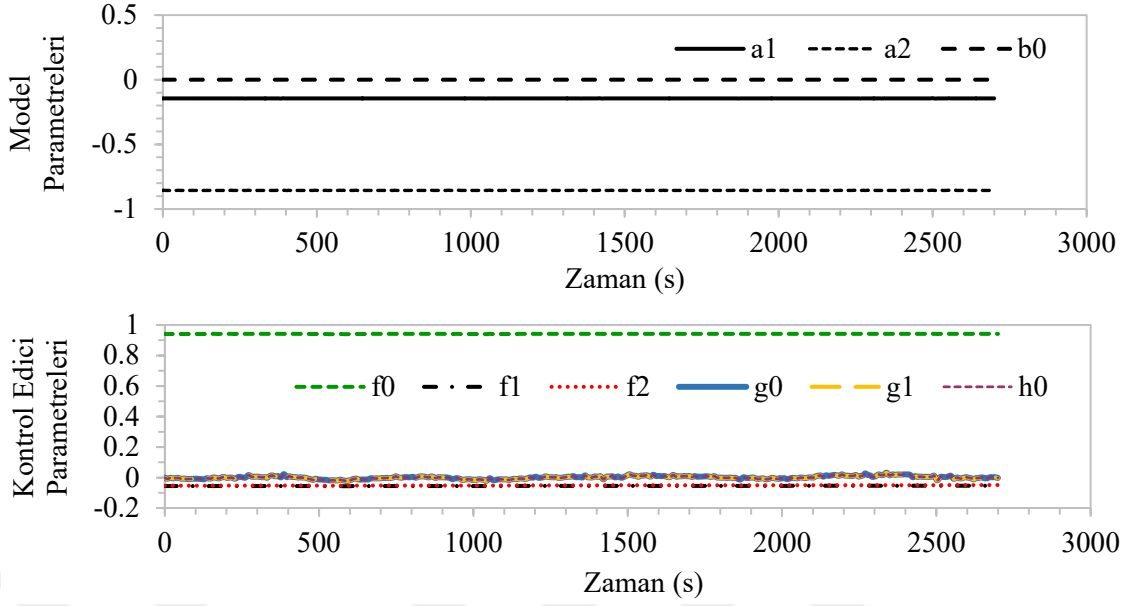
Kağıt endüstrisi atık sularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımında pH'nin kontrol edilerek istenen değerde sabit tutulması amacıyla MATLABTM/Simulink'te tasarlanan gerçek zamanlı sistem modelinde adaptif GMV algoritması kullanılarak pH kontrol çalışmaları gerçekleştirilmiştir. 1 A sabit akım koşulu altında 600 devir/dk karıştırma hızı ve 45 dakika süre ile yapılan çalışmalarda kontrol edilen değişken olan pH'nin set noktası 8 değerine ayarlanmış, 0.1 M HCl çözeltisi akış hızı ve 0.1 M NaOH çözeltisi akış hızı ayarlanabilen değişkenler olarak seçilerek koordineli kontrol gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda elektriksel iletkenlik ve sıcaklık, pH üzerinde yük etkisi oluşturmamaları için, GMV kontrol edici ile kontrol edilmiştir. Çizelge 4.9'da pH'nin adaptif GMV kontrolü için yapılan çalışmalar sonucu elde edilen performans kriteri değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.9 pH için gerçekleştirilen adaptif GMV kontrol çalışmaları sonucunda elde edilen performans kriteri değerleri

Deney no	P _A	P _B	Q _A	Q _B	R _A	R _B	ISE	IAE	ITAE (x10 ⁻⁶)	ITSE (x10 ⁻⁵)
1	1	1	1	0.8	1	1	261.28	1084.30	6.04	1.06
2	2	2	1	0.8	2	2	64.26	533.12	2.99	0.0754
3	5	5	1	0.8	5	5	642.51	1626.55	9.04	9.41



Şekil 4.23 İletkenliğin adaptif GMV kontrolü

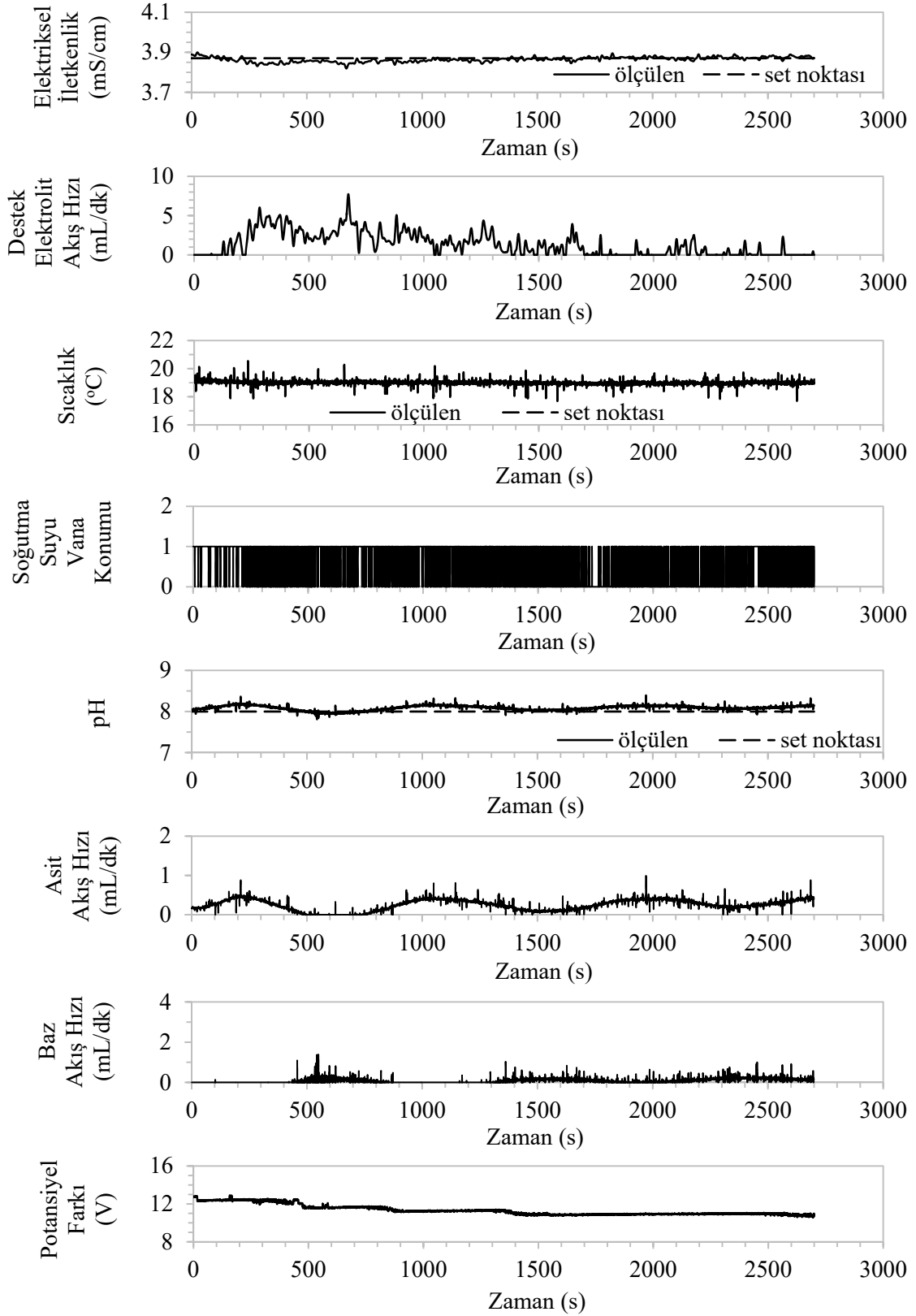


Şekil 4.24 İletkenliğin adaptif GMV kontrolünde parametrelerin zamanla değişimi

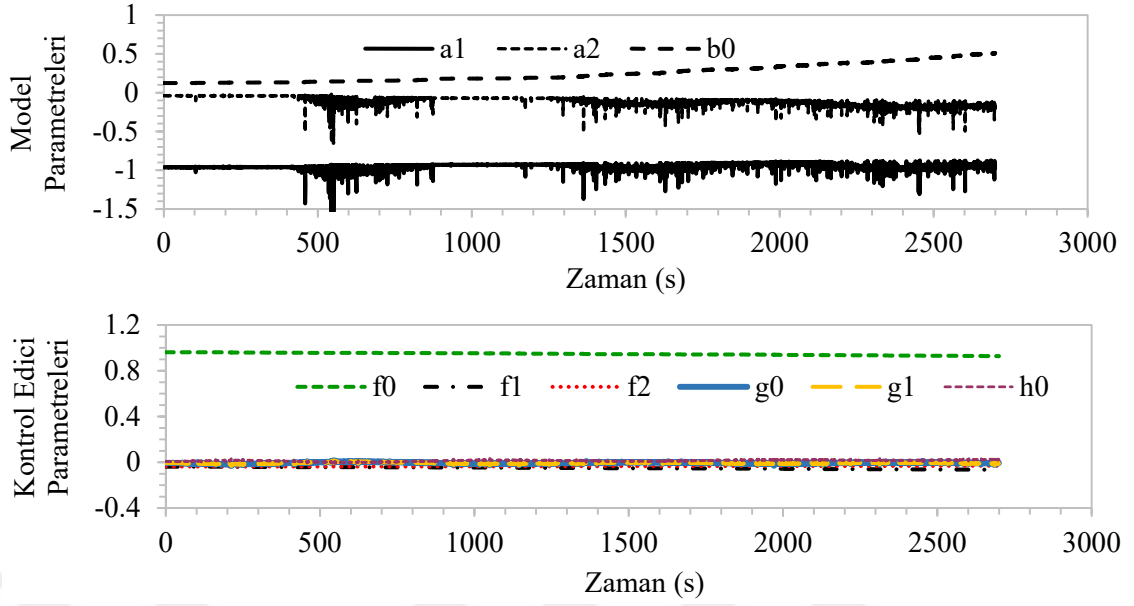
Çizelge 4.9’da yer alan veriler ve her deney için çizilmiş olan grafikler incelenmiş ve adaptif GMV kontrol ile pH kontrolü çalışmalarında P_A , P_B , Q_A , Q_B , R_A , R_B parametreleri için en uygun değerler sırasıyla 2, 2, 1, 0.8, 2, 2 olarak seçilmiştir. 2 numaralı deneye ait bu parametreler ile gerçekleştirilen çalışmanın sonuçları şekil 4.25-4.26’da verilmiştir.

4.4.4 En uygun kontrol edicinin belirlenmesi

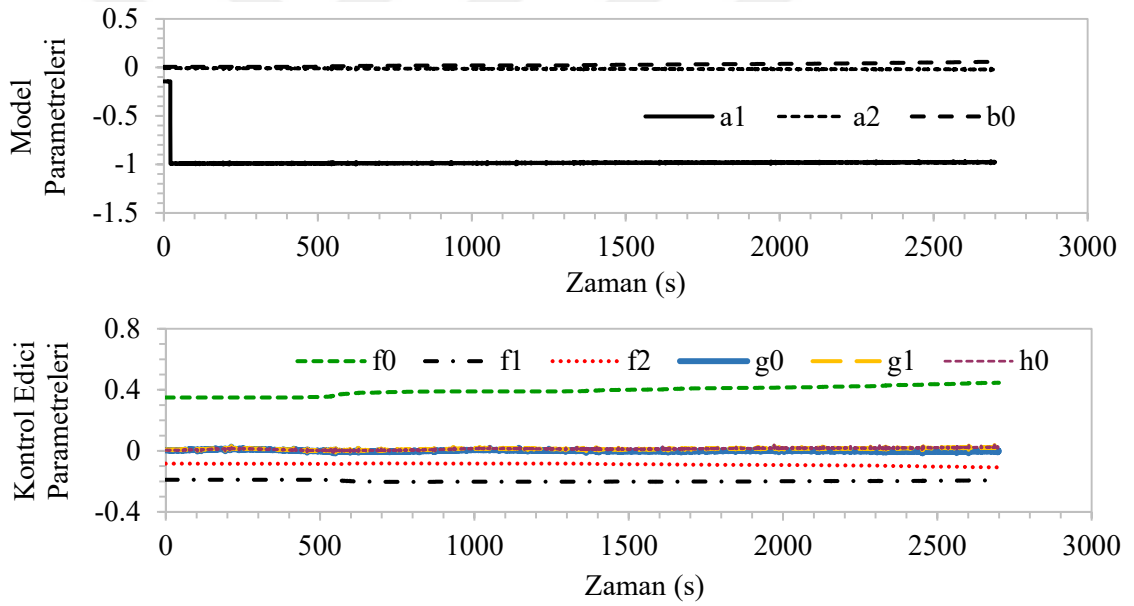
Kağıt endüstrisi atık sularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımında elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın kontrol edilerek istenen değerde sabit tutulması amacıyla MATLAB™/Simulink’te tasarlanan gerçek zamanlı sistem modelinde PID, GPC ve GMV algoritmaları kullanılarak kontrol çalışmaları gerçekleştirilmiş ve bu kontrol ediciler için en uygun parametreler elde edilmiştir. Bu çalışmalar farklı zamanlarda birbirine yakın ama birebir aynı olmayan özelliklere sahip kağıt endüstrisi atık suları temin edilerek yapıldığından kirlilik giderimleri açısından kıyaslanmalarının uygun olmayacağı düşünülmüştür. Çalışmanın bu bölümünde MIMO kontrol çalışmaları PID, GPC ve GMV kontrol ediciler için en uygun kontrol edici parametreleri kullanılarak aynı özelliklere sahip kağıt endüstrisi atık suyu için tekrarlanmış, sonuçlar birbirleri ve kontrolsüz koşullarda tekrar edilen arıtım çalışması ile karşılaştırılarak performans kriterleri ile KOİ, renk,



Şekil 4.25 pH'nin adaptif GMV kontrolü



(a)



(b)

Şekil 4.26 pH'nin adaptif GMV kontrolünde parametrelerin zamanla değişimi

a. Asit, b. Baz

bulanıklık, AKM giderim yüzdeleri ve enerji tüketimleri açısından incelenmiştir. 600 devir/dk karıştırma hızı, 1 A sabit akım koşulunda 45 dakika süre ile gerçekleştirilen çalışmalarda elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın başlangıç değerleri ve set noktaları sırasıyla 2 mS/cm, 8 ve 20 °C olarak ayarlanmıştır.

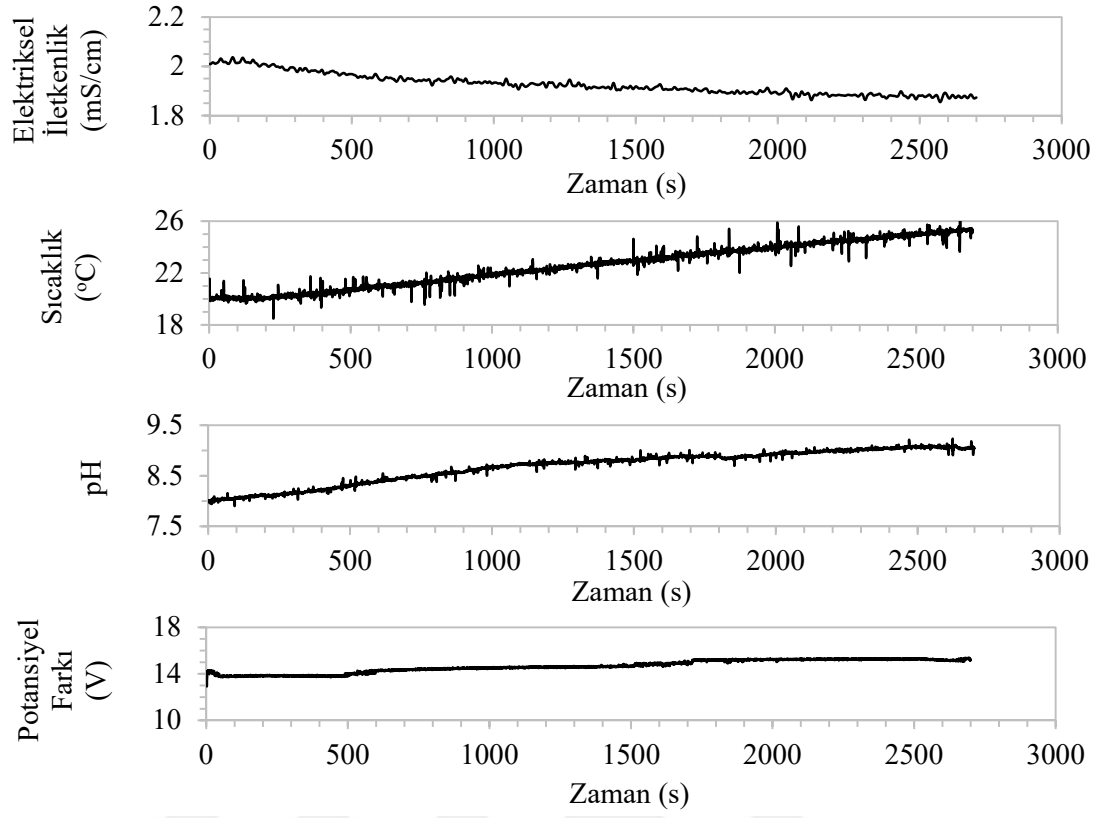
Kontrolsüz kořullarda gerçekleřtirilen çalıřmada elektriksel iletkenliėin 2 mS/cm'den 1.87 mS/cm deėerine dūřtūėu, sıcaklıėın 20 °C'den 25.3 °C'ye yūkseldiėi, pH'nin 8'den 9.05 deėerine yūkseldiėi gōzlenmiřtir. Çalıřmada KOİ, renk, bulanıklık, AKM giderimi ve enerji tūketimi sırasıyla % 34.58, % 96.56, % 99.23, % 96.43 ve 128.25 kWh/kg KOİ olarak hesaplanmıřtır. Yapılan çalıřmanın sonuçları řekil 4.27'de verilmiřtir.

Bōlūm 4.4.1'de bulunan kontrol edici parametreleri K_c , τ_i , τ_D sırasıyla elektriksel iletkenlik için 5, 0.05, 0.01, pH kontrolūnde asit akış hızı ayarlanabilen değişkeni için 1000, 0.05, 0.01, baz akış hızı ayarlanabilen değişkeni için 1, 0.06, 0.4 ve sıcaklık için 48, 0.5, 0.01 olacak şekilde PID kontrol algoritmalarında yerlerine yazılmış, yapılan kontrol çalışmasının sonuçları şekil 4.28'de verilmiştir.

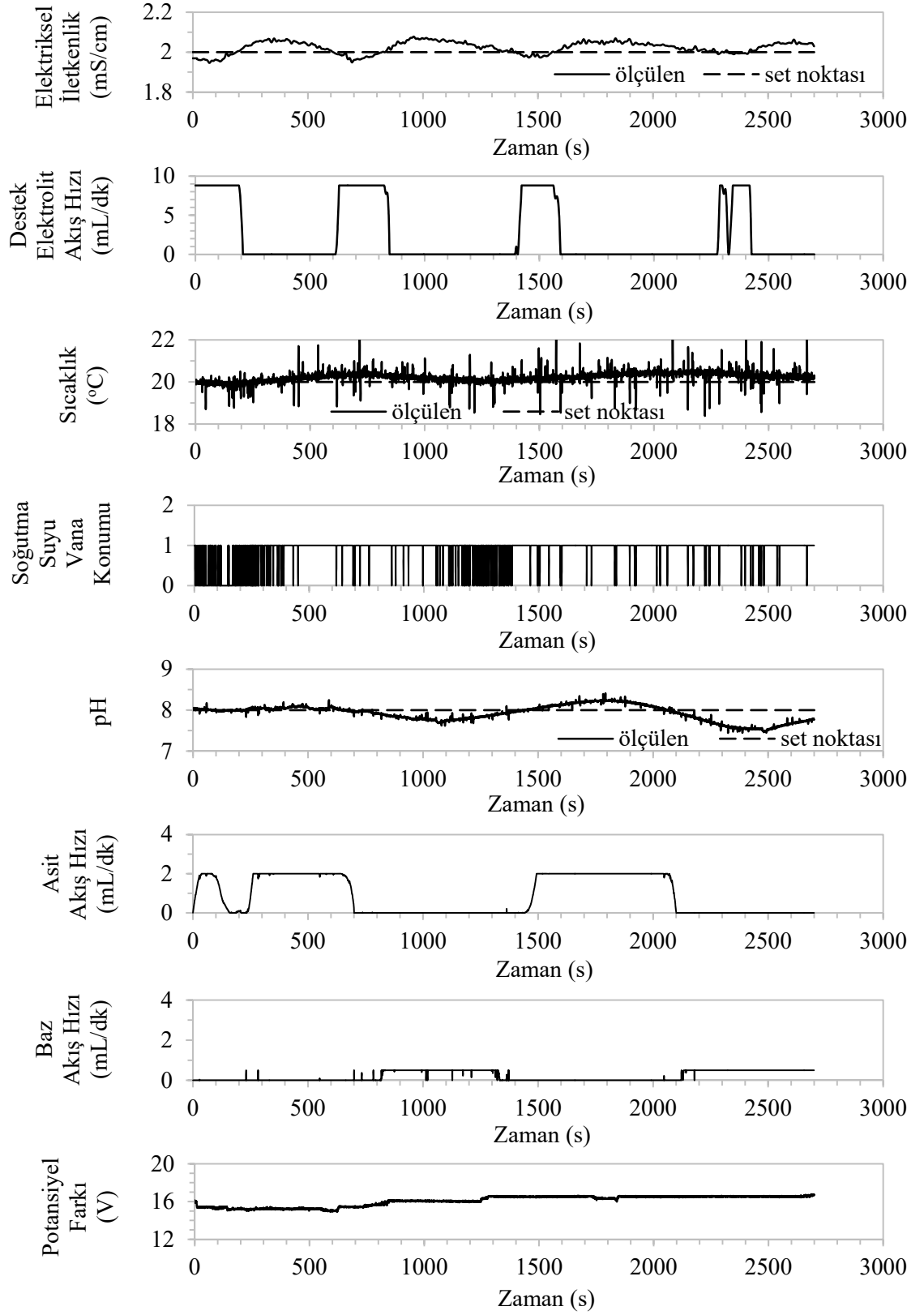
Bōlūm 4.4.2'de bulunan kontrol edici parametreleri λ , N_2 , N_u sırasıyla elektriksel iletkenlik için 0.0005, 2, 2, pH kontrolūnde asit akış hızı ayarlanabilen değişkeni için 0.000001, 2, 1, baz akış hızı ayarlanabilen değişkeni için 0.000001, 2, 1 ve sıcaklık için 0.00001, 2, 1 olacak şekilde GPC kontrol algoritmalarında yerlerine yazılmış, yapılan kontrol çalışmasının sonuçları şekil 4.29'da verilmiştir.

Bōlūm 4.4.3'te bulunan kontrol edici parametresi λ sırasıyla elektriksel iletkenlik için 0.00005, pH kontrolūnde asit akış hızı ayarlanabilen değişkeni için 0.0000001, baz akış hızı ayarlanabilen değişkeni için 0.0000001 ve sıcaklık için 0.00001 olacak şekilde GMV kontrol algoritmalarında yerlerine yazılmış, yapılan kontrol çalışmasının sonuçları şekil 4.30'da verilmiştir.

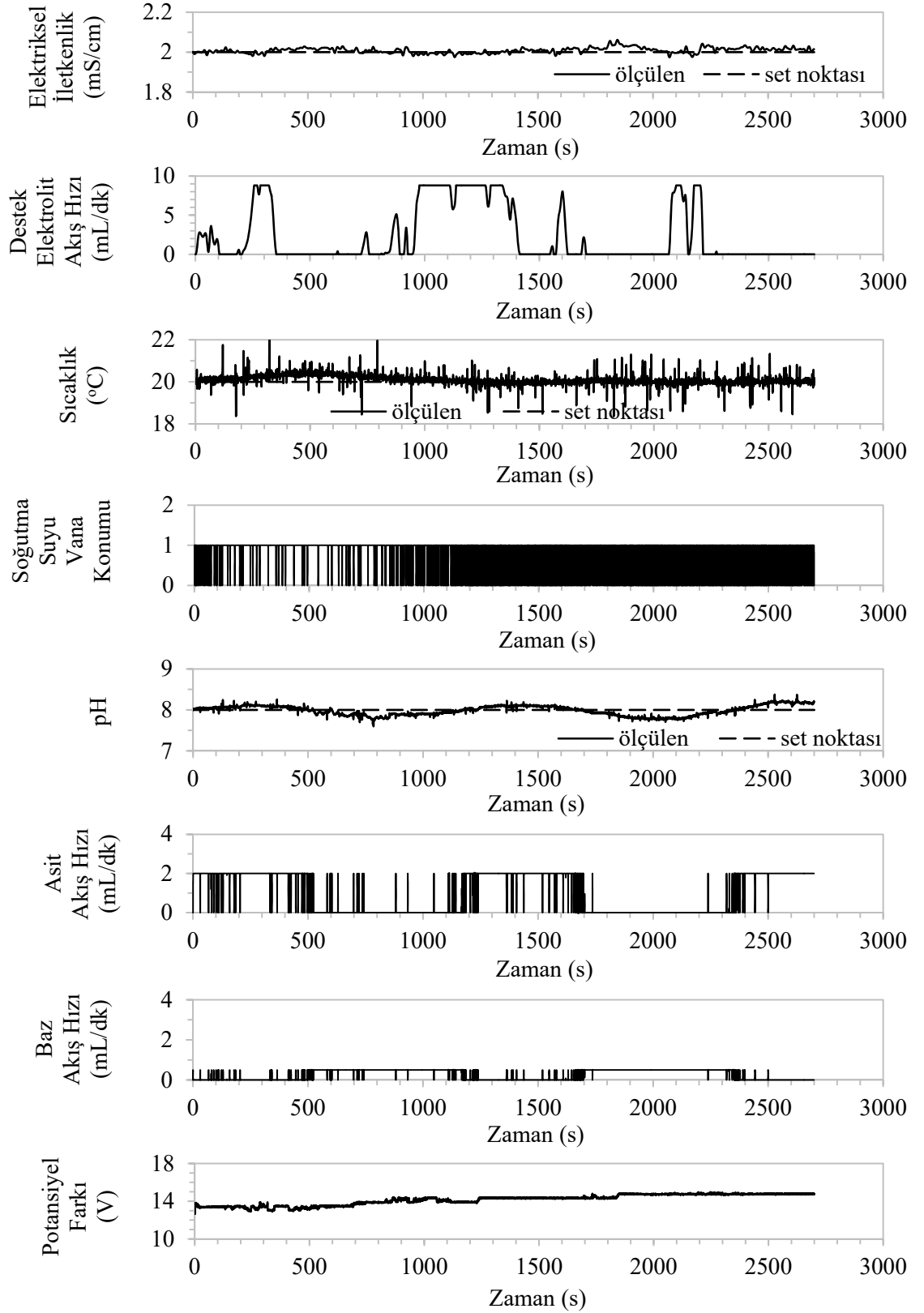
Bōlūm 4.4.3'te bulunan kontrol edici parametreleri P, Q, R sırasıyla elektriksel iletkenlik için 5, 1, 5, pH kontrolūnde asit akış hızı ayarlanabilen değişkeni için 2, 1, 2, baz akış hızı ayarlanabilen değişkeni için 2, 0.8, 2 olacak şekilde adaptif GMV kontrol algoritmalarında yerlerine yazılmış, yapılan kontrol çalışmasının sonuçları şekil 4.31'de verilmiştir. Bu çalışmada sıcaklık GMV kontrol edici ile kontrol edilmiştir.



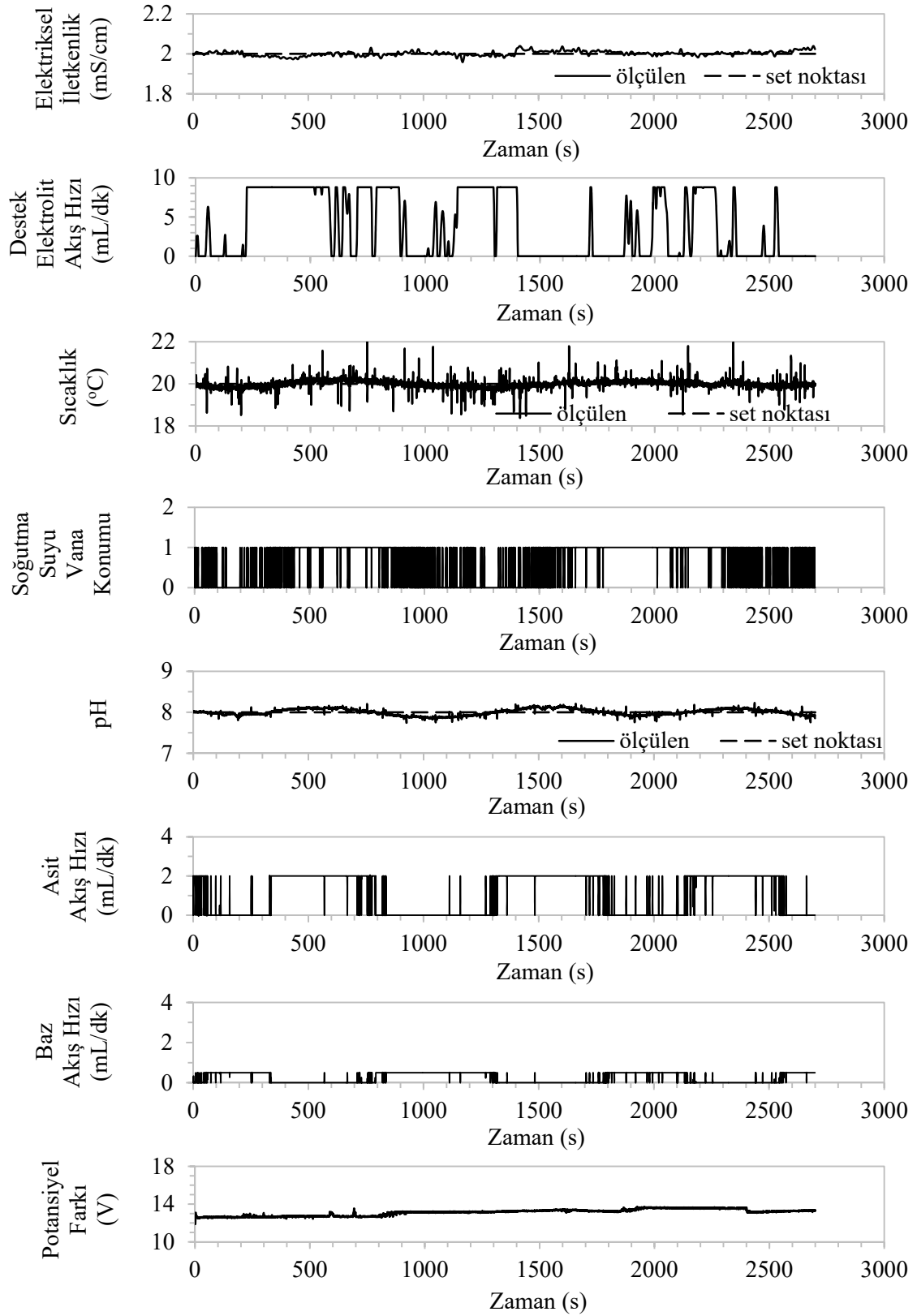
Şekil 4.27 Kontrolsüz durumda arıtım çalışması



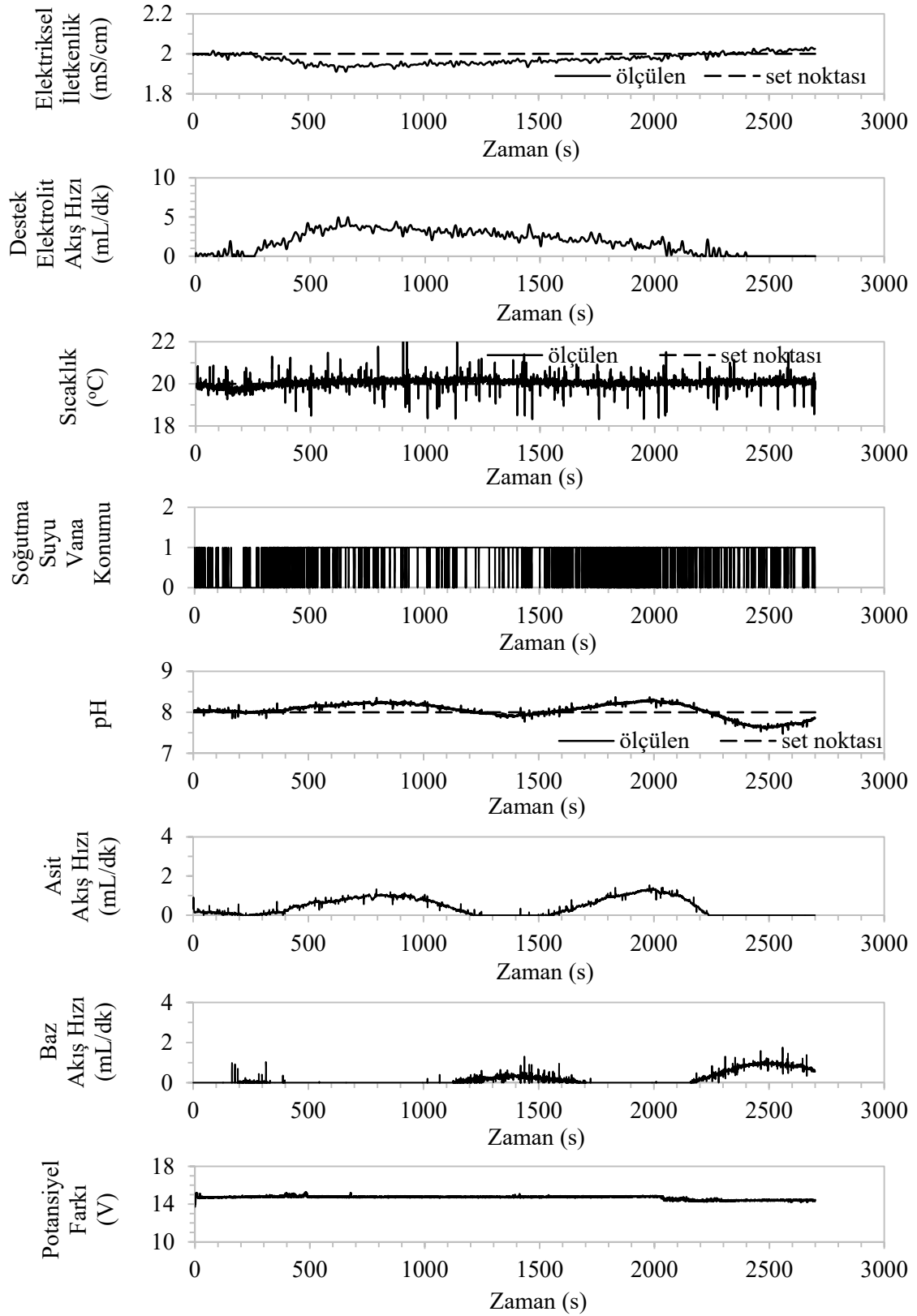
Şekil 4.28 Elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın PID kontrolü



Şekil 4.29 Elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın GPC kontrolü



Şekil 4.30 Elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın GMV kontrolü



Şekil 4.31 Elektriksel iletkenlik ve pH'nin adaptif GMV kontrolü

Şekil 4.28-4.31’de verilen çalışmaların sonuçları elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklık kontrolleri için performans kriterleri açısından değerlendirilmiş, hesaplanan değerler çizelge 4.10-12’de verilmiştir.

Çizelge 4.10 Elektriksel iletkenlik kontrolü için performans kriterleri

Kontrol Edici	ISE	IAE	ITAE ($\times 10^{-5}$)	ITSE
PID	7.87	177.36	9.58	113.40
GPC	1.44	71.13	3.84	6.80
GMV	0.80	52.24	2.82	2.13
Adaptif GMV	7.33	165.55	8.94	112.84

Çizelge 4.11 pH kontrolü için performans kriterleri

Kontrol Edici	ISE	IAE	ITAE ($\times 10^{-6}$)	ITSE ($\times 10^{-4}$)
PID	228.10	854.04	4.61	15.44
GPC	79.23	561.86	3.03	1.35
GMV	32.69	358.97	1.94	0.23
Adaptif GMV	167.89	777.17	4.20	6.27

Çizelge 4.12 Sıcaklık kontrolü için performans kriterleri

Kontrol Edici	ISE	IAE	ITAE ($\times 10^{-6}$)	ITSE ($\times 10^{-6}$)
PID	655.71	1457.05	7.87	2.97
GPC	377.94	901.14	4.87	1.70
GMV	308.50	805.54	4.35	1.71

Elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklık için yapılan MIMO PID, GPC ve GMV çalışmalarının performans kriterleri incelendiğinde üç işletim parametresi için en küçük ISE, IAE, ITAE ve ITSE değerlerinin GMV kontrol edici kullanıldığında elde edildiği görülmüştür.

Şekil 4.28-4.31’de verilen çalışmaların sonuçları elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklık kontrolleri için kirlilik giderimleri ve enerji tüketimleri açısından da değerlendirilmiş, KOİ, renk, bulanıklık, AKM giderim yüzdeleri ile giderilen kg KOİ başına enerji tüketimi değerleri hesaplanarak çizelge 4.13’te verilmiştir.

Çizelge 4.13 Elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklık kontrolleri için kirlilik giderimleri ve enerji tüketimleri

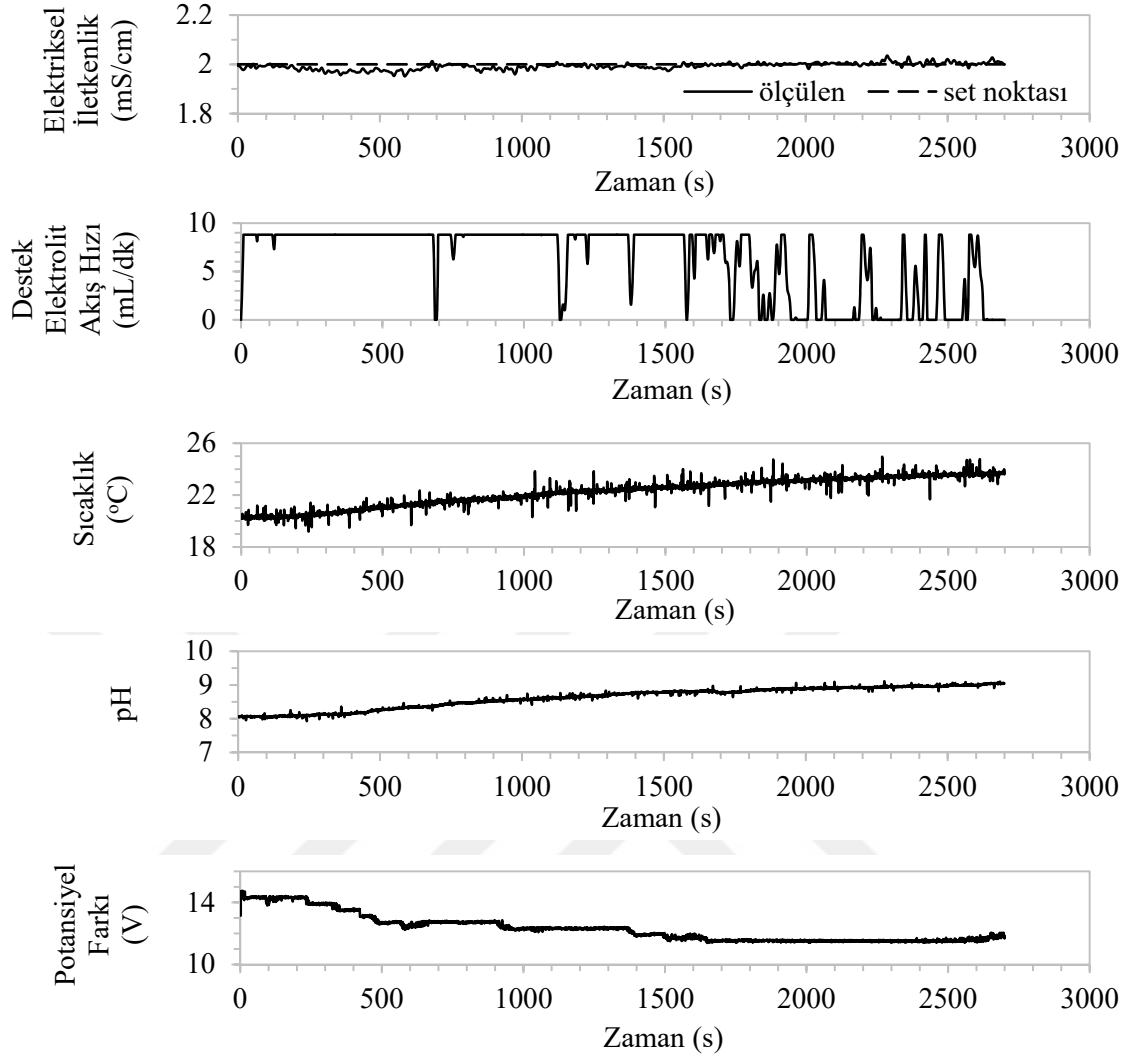
Kontrol Edici	KOİ giderimi (%)	Renk giderimi (%)	Bulanıklık giderimi (%)	AKM giderimi (%)	Enerji tüketimi (kWh/kg KOİ)
PID	37.82	97.71	99.17	97.62	115.62
GPC	43.70	98.47	99.65	100	88.18
GMV	44.54	98.47	99.65	100	80.17
Adaptif GMV	42.86	97.92	99.24	96.43	93.30

Çizelge 4.13'te verilen kontrollü koşullarda yapılan arıtım çalışmalarının sonuçları kontrolsüz koşullarda gerçekleştirilen çalışmanın sonuçları ile kıyaslandığında GMV kontrol uygulamasının KOİ giderimini % 9.96 arttırdığı, diğer kirlilik parametrelerinin gideriminde ise anlamlı bir değişim yaratmadığı gözlenmiştir. Renk, bulanıklık ve AKM'nin yüksek oranda giderilebilmesi elektrokoagülasyon yönteminin diğer arıtım yöntemlerine kıyasla başlıca avantajıdır. Gerek kontrollü gerekse kontrolsüz çalışmalarda bu giderimler son derece yüksek oranda (>% 96) gerçekleştirilmiş olup, kontrol işleminin bu kirlleticilerin giderimi üzerinde herhangi bir olumlu etkisi gözlenmemiştir. Kontrolsüz çalışma ile kıyaslandığında kontrol ve kontrol yönteminin enerji tüketimi üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür. GMV kontrol edicinin kullanıldığı durumda KOİ giderimi başına enerji tüketimi kontrolsüz çalışmaya kıyasla % 37.49 oranında, PID kontrol edicinin kullanıldığı duruma kıyasla ise % 30.66 oranında azaltılmıştır. Elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklık için yapılan MIMO PID, GPC ve GMV çalışmaları KOİ, renk, bulanıklık, AKM giderimleri ve enerji tüketimleri açısından incelendiğinde üç işletim parametresi için en yüksek kirlilik giderimi ve en düşük enerji tüketimi değerlerinin GMV kontrol edici kullanıldığında elde edildiği görülmüştür.

Elde edilen sonuçlar GPC ve GMV kontrol edicilerin performans kriterlerinin, kirletici giderimlerinin ve enerji tüketimlerinin diğer kontrol edicilere göre birbirlerine daha yakın olduğunu göstermiştir. Bu bölümde anlatılan çalışmaların ışığında GMV kontrol edici aradaki küçük fark da göz önünde bulundurularak kontrollü arıtım koşullarında optimizasyon çalışmasında kullanılmak üzere en uygun kontrol edici olarak seçilmiştir.

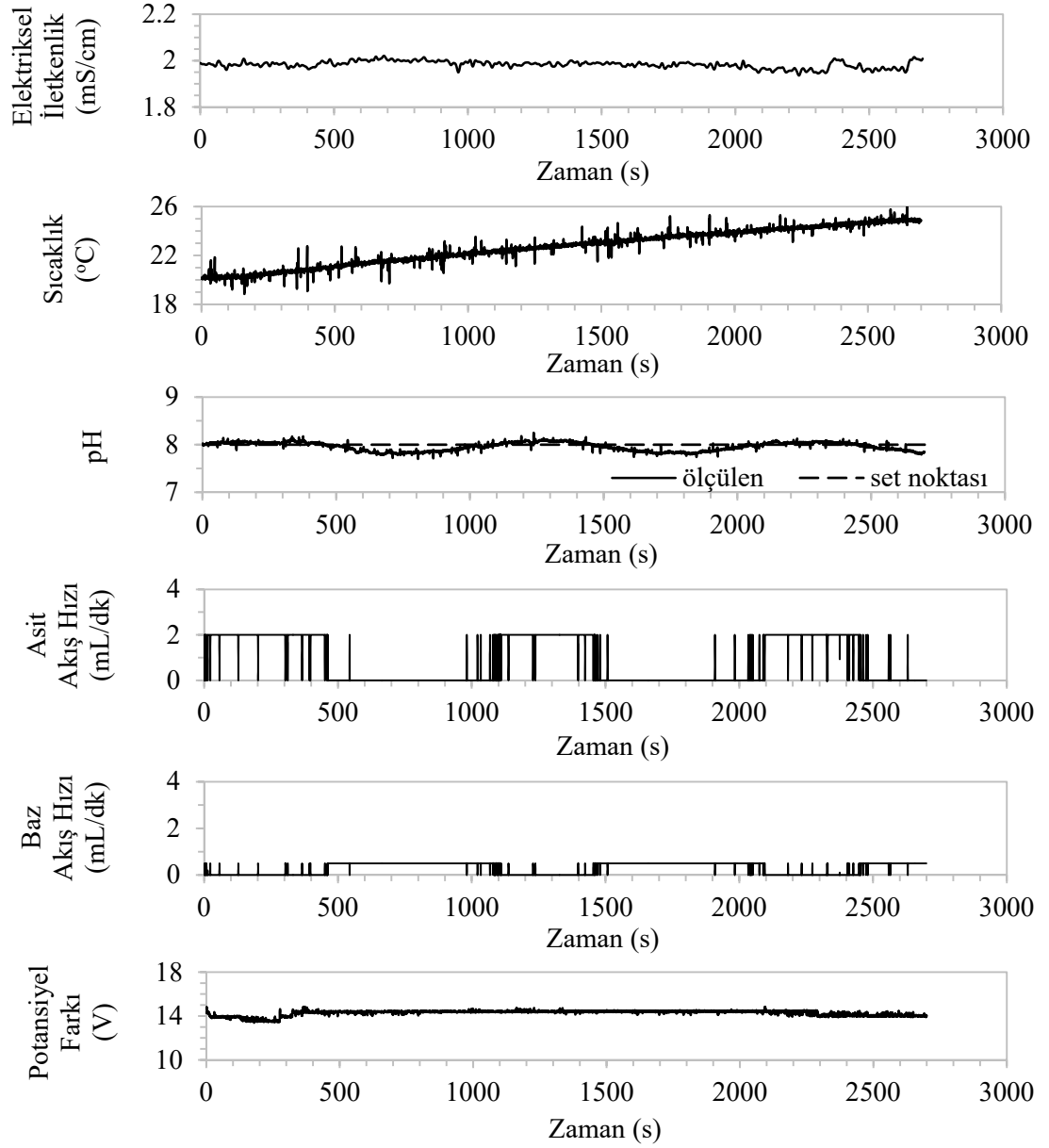
4.4.5 SISO ve MIMO kontrol çalışmalarının karşılaştırılması

Kağıt endüstrisi atık sularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımında elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın kontrol edilerek istenen değerde sabit tutulması amacıyla MATLABTM/Simulink'te tasarlanan gerçek zamanlı sistem modelinde PID, GPC ve GMV algoritmaları kullanılarak kontrol çalışmaları gerçekleştirilmiş, performans kriterleri, kirlilik giderimleri ve enerji tüketimleri göz önünde bulundurularak GMV kontrol edici en uygun kontrol yöntemi olarak seçilmiştir. Bu bölümde, Bölüm 4.4.4'te verilen elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın MIMO GMV kontrolü çalışmasının sonuçları GMV kontrol edici ile gerçekleştirilen SISO elektriksel iletkenlik, SISO pH ve SISO sıcaklık çalışmaları ile karşılaştırılmış, SISO ve MIMO kontrolün arıtım üzerindeki etkileri incelenmiştir. 600 devir/dk karıştırma hızı, 1A sabit akım koşullarında 45 dakika süre ile gerçekleştirilen çalışmalardan set noktası 2 mS/cm olarak ayarlanan SISO elektriksel iletkenlik kontrolü çalışmasının sonuçları şekil 4.32'de, set noktası 8 olarak ayarlanan SISO pH kontrolü çalışmasının sonuçları şekil 4.33'te ve set noktası 20 °C olarak ayarlanan SISO sıcaklık kontrolü çalışmasının sonuçları şekil 4.34'te verilmiştir.



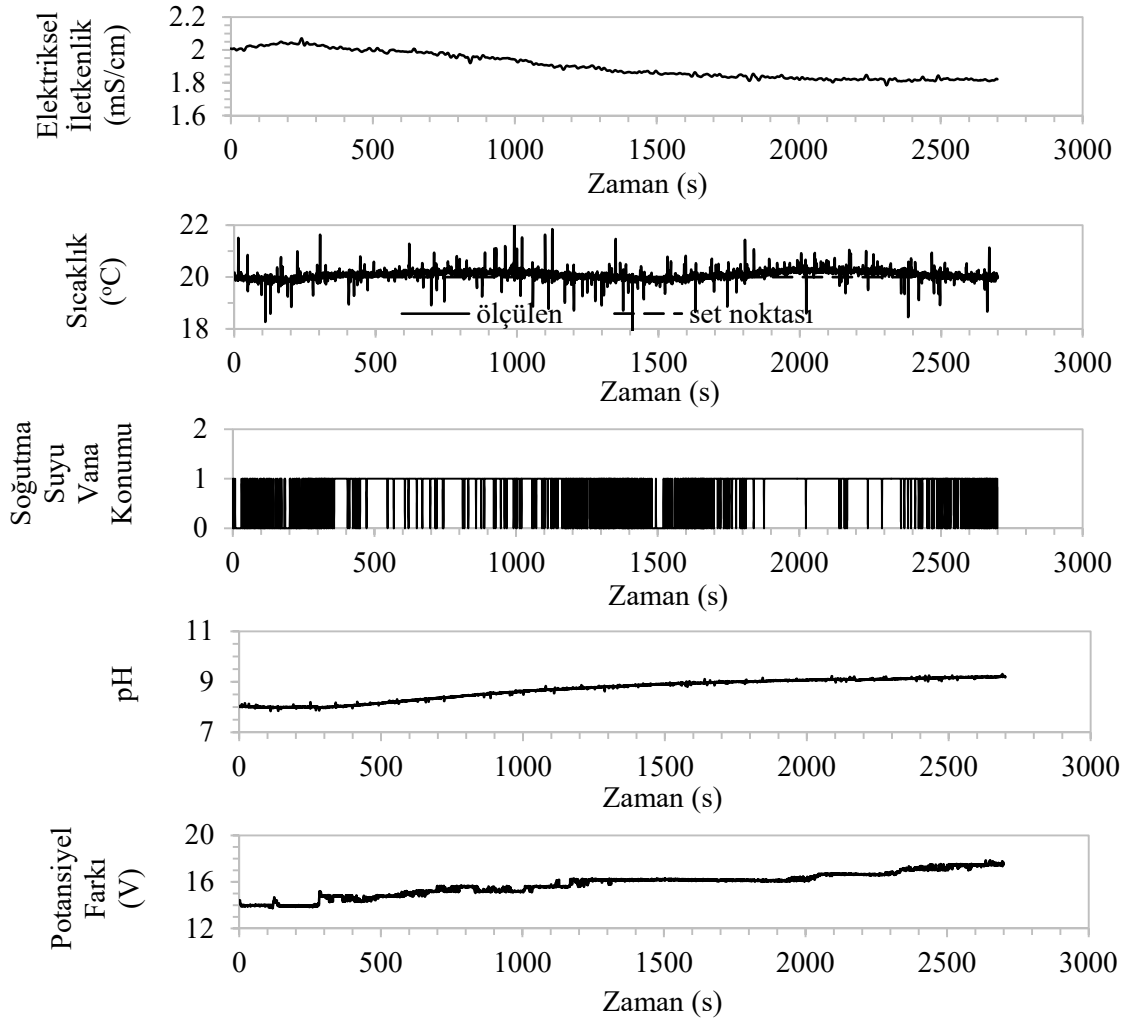
Şekil 4.32 SISO GMV elektriksel iletkenlik kontrolü

Elektriksel iletkenliğin 2 mS/cm değerinde kontrolünün gerçekleştirildiği çalışmada sıcaklık 20 °C’den 23.6 °C’ye, pH 8’den 9.05 değerine yükselmiştir (Şekil 4.32).



Şekil 4.33 SISO GMV pH kontrolü

pH'nin 8 değerinde kontrolünün gerçekleştirildiği çalışmada sıcaklık 20 °C'den 24.8 °C'ye yükselmiş, elektriksel iletkenlik 2 mS/cm'den 1.95 mS/cm değerine düşmüştür. Sonuçtan görüleceği üzere pH kontrolü elektrokoagülasyon süresince elektriksel iletkenlikte meydana gelen düşüşü önemli ölçüde azaltıcı yönde etki göstermektedir (Şekil 4.33).



Şekil 4.34 SISO GMV sıcaklık kontrolü

Sıcaklığın 20 °C’de kontrolünün gerçekleştirildiği çalışmada pH 8’den 9.18 değerine yükselmiş, elektriksel iletkenlik 2’den 1.82 değerine düşmüştür (Şekil 4.34). Şekil 4.32-4.34’te verilen çalışmaların sonuçları performans kriterleri açısından değerlendirilmiş, hesaplanan değerler çizelge 4.14’te verilmiştir.

Çizelge 4.14 SISO GMV çalışmaları için performans kriterleri

Kontrol Edilen Değişken	ISE	IAE	ITAE ($\times 10^{-5}$)	ITSE ($\times 10^{-2}$)
Elektriksel iletkenlik	1.24	61.86	3.34	0.05
pH	52.84	441.73	23.85	65.89
Sıcaklık	316.51	857.23	46.28	15414.11

Çizelge 4.14’te elde edilen sonuçlar, çizelge 4.10-4.12’de verilen elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın MIMO GMV kontrolü çalışmasında elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında elektriksel iletkenlik ve sıcaklık kontrollerinin SISO ve MIMO çalışmalarda oldukça yakın sonuçlar verdiği, MIMO kontrolün SISO kontrole göre pH kontrol performansını artırıcı etki gösterdiği görülmüştür. Şekil 4.32 - 4.34’te verilen çalışmaların sonuçları kirlilik giderimleri ve enerji tüketimleri açısından da değerlendirilmiş, KOİ, renk, bulanıklık, AKM giderim yüzdeleri ile giderilen kg KOİ başına enerji tüketimi değerleri hesaplanarak çizelge 4.15’te verilmiştir.

Çizelge 4.15 SISO GMV çalışmaları için kirlilik giderimleri ve enerji tüketimleri

Kontrol Edilen Değişken	KOİ giderimi (%)	Renk giderimi (%)	Bulanıklık giderimi (%)	AKM giderimi (%)	Enerji tüketimi (kWh/kg KOİ)
Elektriksel iletkenlik	39.50	100	99.27	98.81	84.89
pH	43.70	100	99.61	100	88.93
Sıcaklık	38.65	99.62	98.86	100	111.24

Elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın MIMO GMV kontrolü çalışmasında KOİ, renk, bulanıklık, AKM giderimleri ve enerji tüketiminin sırasıyla % 44.54, % 98.47, % 99.65, % 100 ve 80.17 kWh/kg KOİ, olarak hesaplandığı Bölüm 4.4.4’te verilmişti. Bu değerler çizelge 4.15’te verilen SISO GMV çalışmalarının sonuçları ile kıyaslandığında MIMO GMV kontrol uygulanmasının SISO elektriksel iletkenlik ve SISO sıcaklık kontrolü çalışmalarına göre KOİ giderimini yaklaşık % 5.5 arttırırken renk, bulanıklık, AKM giderimlerinde değişiklik yaratmadığı, kirlilik gideriminde oldukça yakın sonuçların elde edildiği SISO pH kontrol çalışmasına göre ise enerji tüketimini ise % 9.85 oranında azalttığı sonucuna varılmıştır. SISO GMV elektriksel iletkenlik kontrolü çalışmasında hesaplanan KOİ giderimi ve enerji tüketimi değeri kontrolsüz koşullarda yapılan arıtım çalışmasında hesaplanan giderim ve enerji tüketimi ile kıyaslandığında tek başına elektriksel iletkenliğin kontrol edilmesinin KOİ giderimini % 4.92 arttırdığı, enerji tüketimini % 33.81 oranında azalttığı görülmüştür. SISO GMV pH kontrolü çalışmasında hesaplanan KOİ giderimi ve enerji tüketimi, kontrolsüz koşullarda yapılan arıtım çalışmasında hesaplanan KOİ giderimi ve enerji tüketimi ile kıyaslandığında tek başına pH’nin kontrol edilmesinin KOİ giderimini % 9.12 arttırdığı, enerji tüketimini ise % 30.66

oranında azalttığı görülmüştür. SISO GMV sıcaklık kontrolünün kontrolsüz durumda yapılan arıtım çalışmasına göre KOİ giderimini % 4.07 arttırdığı, enerji tüketimi değerini ise % 13.26 oranında azalttığı görülmüştür. Bunun yanı sıra elektriksel iletkenliğin pH üzerinde herhangi bir etkisi bulunmadığı için SISO GMV pH kontrol çalışmasına göre MIMO GMV kontrol çalışmasında pH kontrolünün daha iyi performans göstermesi de sıcaklık kontrolü ile ilişkilendirilmiştir. Bu bölümde yapılan çalışmalarda elektriksel iletkenliğin enerji tüketimi ve pH'nin KOİ giderimi üzerindeki önemli etkileri vurgulandığı ve sıcaklığın pH üzerindeki etkisi bilindiğinden bu üç işletme parametresinin arıtım çalışmalarında aynı anda kontrol edilmesinin kirlilik giderimleri ve enerji tüketimi açısından gerekli olduğu sonucuna varılmıştır.

4.4.6 Değişken set noktasında kontrol edici etkinliğinin incelenmesi

Bu bölümde yapılan çalışmalarda pH kontrolü için hem PID, GPC ve GMV kontrol edicilerin gürbüzlüğünün test edilmesi, hem de elektrokoagülasyon prosesi süresince kontrol edicinin davranışının incelenmesi amacıyla değişken set noktaları kullanılmıştır. 135 dakika süre ile gerçekleştirilen ve pH set noktasına 0.5 birimlik pozitif ve negatif basamak etkilerin uygulandığı çalışmanın sonuçları Şekil 4.35-4.38'de verilmiştir.

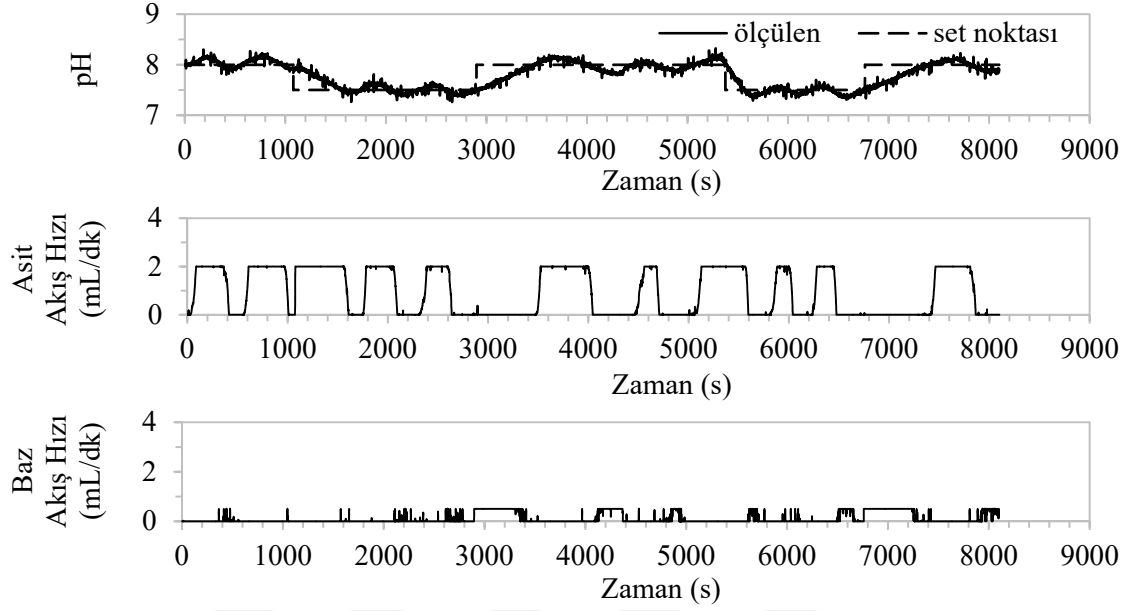
Şekil 4.35-4.38'de verilen çalışmaların sonuçları performans kriterleri açısından değerlendirilmiş, hesaplanan değerler çizelge 4.16'da verilmiştir.

Çizelge 4.16 pH'nin değişken set noktalı kontrol çalışmaları için performans kriterleri

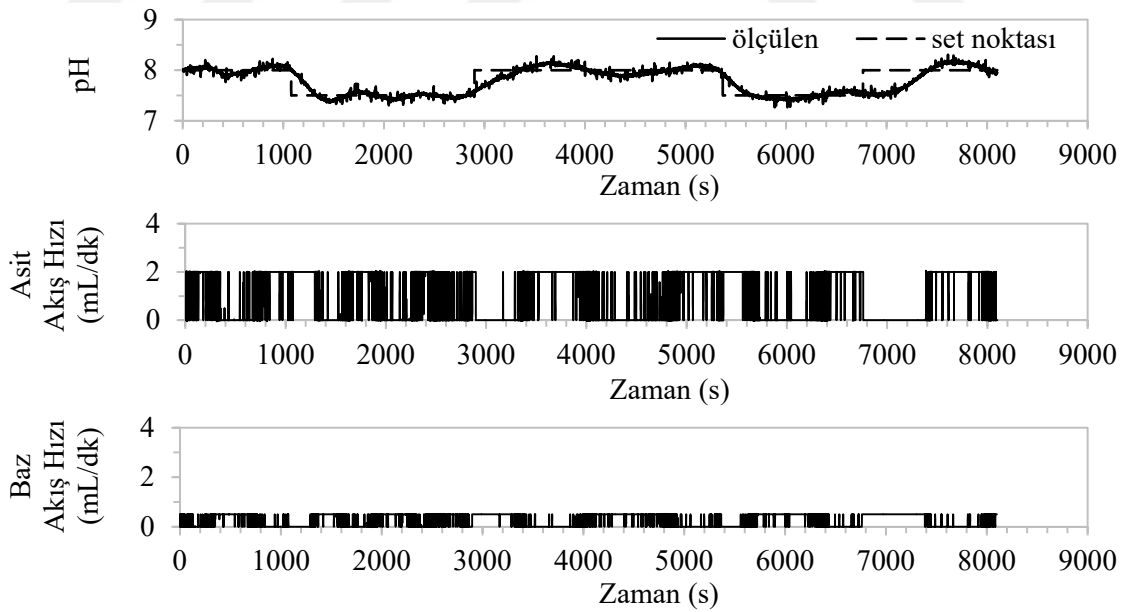
Kontrol Edici	ISE	IAE ($\times 10^{-3}$)	ITAE ($\times 10^{-7}$)	ITSE ($\times 10^{-5}$)
PID	425.63	1.86	3.01	8.96
GPC	376.96	1.65	2.68	8.54
GMV	388.33	1.72	2.79	9.31
Adaptif GMV	836.89	2.48	4.01	31.97

Değişken set noktaları ile kontrol edicilerin gürbüzlüğünün test edilmesi amacıyla yapılan bu çalışmalarda gerek çizilen grafikler incelendiğinde gerekse çizelge 4.16'da verilen

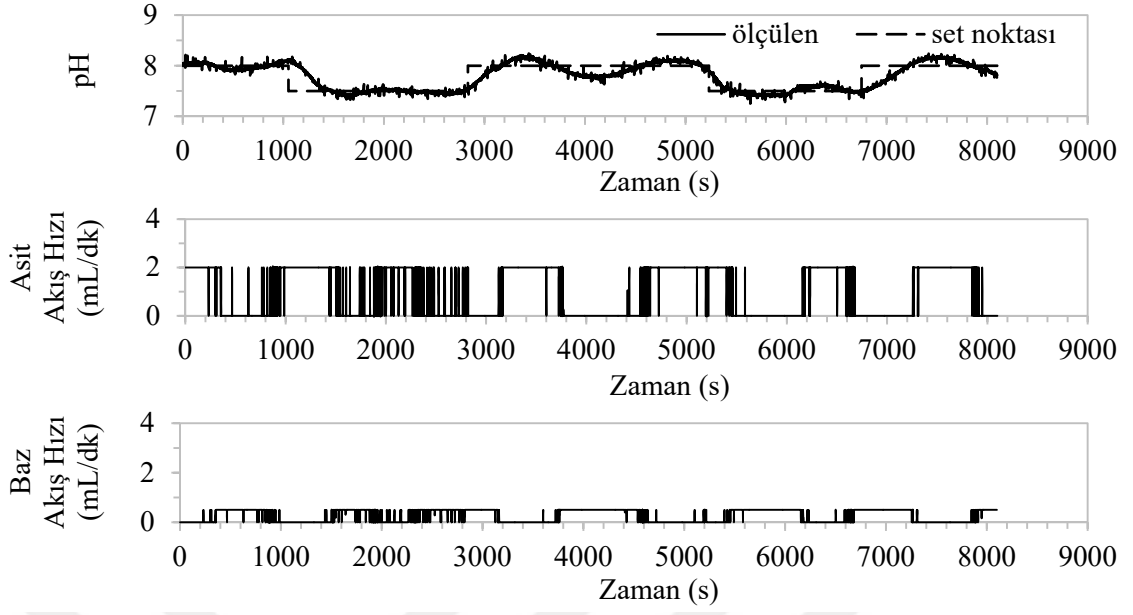
performans kriterleri dikkate alındığında elde edilen sonuçların deneysel kontrol çalışması açısından başarılı olduğu sonucuna varılmıştır.



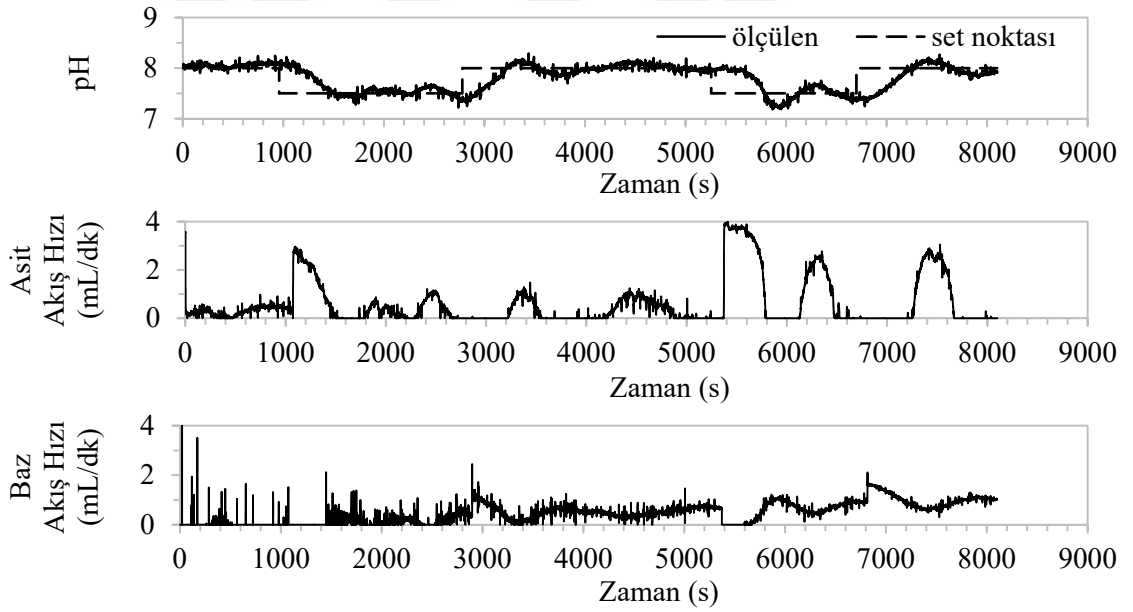
Şekil 4.35 pH'nin değişken set noktalı PID kontrolü



Şekil 4.36 pH'nin değişken set noktalı GPC kontrolü



Şekil 4.37 pH'nin değişken set noktalı GMV kontrolü



Şekil 4.38 pH'nin değişken set noktalı adaptif GMV kontrolü

4.5 Cevap Yüzey Yöntemi ile En Uygun İşletim Koşullarının Belirlenmesi

Elektrokoagülasyon prosesi ile kağıt endüstrisi atık sularının arıtımında sistem cevabını tahmin ederek kirlilik giderimleri ve enerji tüketimi değerlerini bulabilmek için uygun bir model denklemi elde etmek ve sonrasında bağımsız değişkenlerin en uygun değerlerini

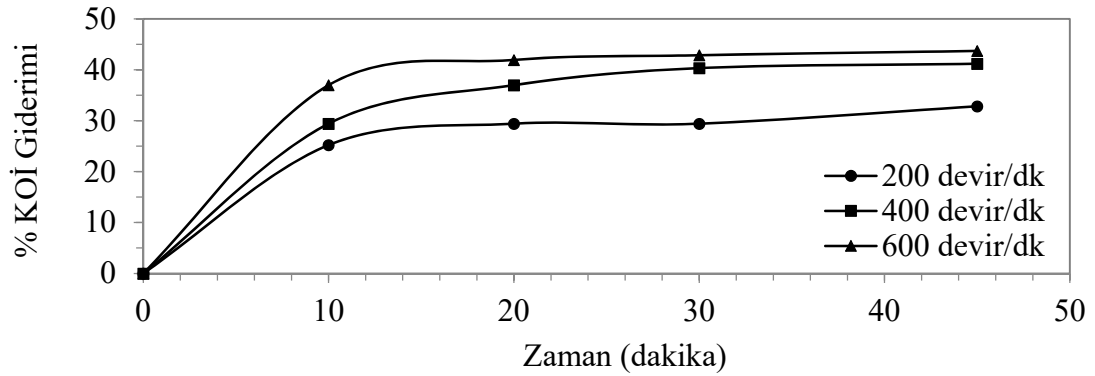
belirlemek amacıyla CYY kullanılarak optimizasyon çalışması yapılmıştır. Çalışmalarda elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklık başlangıçta deney tasarımında belirtilen koşullara ayarlanmış, GMV kontrol ediciler aracılığıyla arıtım süresince bu değerlerde sabit tutulmuştur.

4.5.1 Karıştırma hızının kirletici giderimine etkisi

Elektrokoagülasyon prosesi ile kağıt endüstrisi atık sularının arıtımında elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın kontrolü çalışmalarının ardından en uygun işletim koşullarının belirlenmesi amacıyla CYY kullanılarak optimizasyon çalışması yapılmadan önce karıştırma hızının kirletici giderimine etkisi incelenmiştir. El-Ashtoukhy vd. (2009) ve Sridhar vd. (2011) karıştırma hızının elektrokoagülasyonla kirletici gideriminde etkin bir işletme parametresi olduğunu, kirletici giderimlerinin difüzyon kontrollü olduğunu, karıştırma hızının belirli bir değere kadar artışının difüzyona direnç gösteren film tabakası kalınlığını azaltarak kirletici giderim verimlerini arttırdığını, daha yüksek hızlarda ise değiştirmedığını belirlemişlerdir.

Bu bilgiler ışığında deney sisteminin izin verdiği sınırlar dahilinde çalışılacak en uygun karıştırma hızının belirlenmesi için 1 A sabit akım, 20 °C sıcaklık, 2 mS/cm elektriksel iletkenlik ve pH 8 işletme koşullarında 45 dakika süresince alüminyum elektrotlar kullanılarak 200, 400 ve 600 devir/dk karıştırma hızlarında arıtım çalışmaları gerçekleştirilmiş, belirli aralıklarla numuneler alınarak sonuçlar KOİ giderimi açısından değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmanın sonuçları şekil 4.39’da verilmiştir.

Sonuçlardan görüleceği üzere 15 dakikalık işletim süresinde KOİ giderimi durgunluk fazına geçmekte ve karıştırma hızının 200 devir/dk’dan 600 devir/dk’ya çıkarılması durumunda KOİ giderimi % 10.9 artmaktadır. Karıştırma hızının 400 devir/dk’dan 600 devir/dk’ya arttırılması ile KOİ giderimi % 2.5 artmaktadır. Bu sonuç karıştırma hızının 600 devir/dk’dan büyük değerlerinde KOİ gideriminde anlamlı bir artış sağlanamayacağını ve en uygun işletim koşullarının belirleneceği çalışmalarda karıştırma hızı olarak 600 devir/dk kullanılmasının uygun olacağını göstermektedir.



Şekil 4.39 Karıştırma hızının kirletici giderimine etkisi

4.5.2 Merkezi bileşik tasarım yöntemi ile deneylerin planlanması

Optimizasyon çalışmalarında uygulanan deneysel tasarım matrisi MINITAB 17 istatistik yazılımında CYY'lerden MBT kullanılarak oluşturulmuştur. Akım şiddeti, pH, elektriksel iletkenlik, sıcaklık ve süre olmak üzere 5 adet faktörden oluşan deney tasarımı bu faktörlerin 5 seviye olarak Al ve Fe elektrotlar için ayrı ayrı çalışıldığı toplam 64 adet deneysel çalışmayı içermektedir. Çalışmaya ait deneysel tasarım aralıkları çizelge 4.17'de verilmiştir.

Çizelge 4.17 MBT ile yapılan deney planında elektrokoagülasyon prosesinin işletim aralıkları

Faktör		Deneysel tasarım aralığı				
		-2	-1	0	+1	+2
x ₁	Elektriksel iletkenlik (mS/cm)	2.300	2.500	2.800	3.500	4.200
x ₂	pH	3	5.250	7.500	9.750	12
x ₃	Sıcaklık (°C)	10	20	30	40	50
x ₄	Süre (dakika)	5	15	25	35	45
x ₅	Akım şiddeti (A)	0.500	0.825	1.150	1.475	1.800

4.5.3 Alüminyum elektrotlar ile yapılan merkezi bileşik tasarım çalışmalarının sonuçları

MBT yönteminin cevapları olarak seçilen KOİ, renk, bulanıklık, AKM giderim verimleri ve enerji tüketimi değerleri ile faktörler arasındaki ilişkinin belirlenmesi amacıyla oluşturulan 10 faktöriyel, 16 eksenel ve merkez noktada yapılan 6 tekrardan oluşan toplam 32 deneye ait deneysel tasarım matrisi ve cevapları çizelge 4.18’de verilmiştir.

4.5.3.1 KOİ gideriminin istatistiksel analizi

Bu bölümde çizelge 4.18’de verilen, sabit akımda, 600 devir/dk karıştırma hızında, elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın kontrol edilmesiyle gerçekleştirilen MBT çalışmalarının KOİ giderimi cevabına ait MINITAB 17 yazılımından elde edilen sonuçlar incelenmiştir. MINITAB 17 yazılımının çoklu regresyon yöntemi kullanılarak deney verilerine ikinci mertebeden polinom denklemi uydurulmuş ve denklemin katsayıları bulunmuştur. KOİ giderimi için kodlanmamış değişkenler cinsinden elde edilen ikinci mertebeden polinom denklemi eşitlik (4.1)’de, denklemdaki katsayılar ve bu katsayıların standart hataları ile F ve P değerleri çizelge 4.19’da verilmiştir.

$$\begin{aligned} y_{1,Al} = & 45.1 - 0.20x_1 - 2.54x_2 - 0.411x_3 - 1.479x_4 + 64.6x_5 \\ & - 1.057x_1^2 - 0.453x_2^2 + 0.00669x_3^2 + 0.01246x_4^2 - 5.45x_5^2 \\ & + 1.600x_1x_2 - 0.119x_1x_3 + 0.302x_1x_4 - 9.20x_1x_5 + 0.0617x_2x_3 \\ & + 0.0386x_2x_4 - 1.370x_2x_5 + 0.00081x_3x_4 - 0.134x_3x_5 - 0.265x_4x_5 \end{aligned} \quad (4.1)$$

Modeldeki terimlerin önem ve etkileri katsayılarının P değerlerine bakılarak değerlendirilmiştir. Küçük P değerleri (% 95 güven seviyesinde 0.05’ten küçük) modeldeki katsayıların anlamlı olduğunun göstergesi iken 0.05’ten büyük P değerleri modeldeki katsayıların istatistiksel olarak anlamlı olduğuna dair bir kanıt olmadığını ifade etmektedir (Amani-Ghadim vd. 2013, Rai vd. 2016). Bu bilgiler ışığında çizelge 4.19 incelendiğinde x_1 , x_2 , x_4 , x_2^2 , x_4^2 , x_1x_2 , x_1x_4 , x_1x_5 , x_2x_3 terimlerinin KOİ gideriminde etkili olduğu

görülmüş, diğer terimlerin KOİ giderimini önemli ölçüde etkilemediği sonucuna varılmıştır.

Çizelge 4.18 Alüminyum elektrotlar için MBT ve cevapları

Deney no	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	Y _{1,AI}	Y _{2,AI}	Y _{3,AI}	Y _{4,AI}	Y _{5,AI}
	E. iletkenlik (mS/cm)	pH	Sıcaklık (°C)	Süre (dk)	Akım şiddeti (A)	KOİ giderimi (%)	Renk giderimi (%)	Bulanıklık giderimi (%)	AKM giderimi (%)	Enerji tüketimi (kWh/kg KOİ)
1	2.8	7.50	50	25	1.150	37.84	76.78	78.58	94.12	17.56
2	3.5	5.25	40	15	1.475	38.56	91.75	96.62	94.12	16.66
3	3.5	5.25	20	35	1.475	45.04	94.33	95.25	86.24	39.68
4	2.8	7.50	30	25	1.150	35.86	93.81	97.32	92.16	23.73
5	3.0	5.25	20	35	0.825	43.6	96.39	96.96	93.18	15.67
6	3.5	9.75	40	35	1.475	29.55	55.55	65.29	88.24	45.55
7	3.5	9.75	20	35	0.825	32.76	82.81	86.97	84.85	17.61
8	2.8	7.50	30	25	1.150	35.84	93.69	95.86	90.19	22.54
9	3.5	9.75	20	15	1.475	25.19	78.08	82.60	65.29	28.73
10	2.8	7.50	30	25	1.150	35.81	93.43	97.93	93.14	22.24
11	2.5	9.75	40	15	1.475	29.55	55.15	55.92	68.18	25.33
12	2.5	5.25	40	15	0.825	40.84	94.33	94.51	85.29	5.80
13	4.2	7.50	30	25	1.150	33.35	93.30	96.75	94.12	21.09
14	3.8	3.00	30	25	1.150	31.47	70.34	70.48	70.59	21.11
15	2.8	7.50	30	5	1.150	40.72	88.6	91.29	80.53	3.71
16	2.8	7.50	30	45	1.150	38.56	94.33	95.26	94.06	38.58
17	2.8	7.50	30	25	0.500	29.03	88.80	94.14	85.35	6.23
18	2.8	7.50	30	25	1.150	35.71	94.72	96.64	92.65	22.69
19	3.5	5.25	40	35	0.825	40.72	90.85	96.82	80.59	12.29
20	2.8	5.25	20	15	1.475	50.45	88.14	90.84	92.18	16.51
21	6.4	12.00	30	25	1.150	20.19	41.65	51.23	37.06	37.85
22	2.8	7.50	30	25	1.150	35.91	92.27	96.94	94.12	23.41
23	2.5	5.25	40	35	1.475	44.58	94.39	96.82	80.59	37.00
24	2.3	7.50	30	25	1.150	37.37	89.18	96.74	94.12	23.33
25	2.5	9.75	40	35	0.825	28.11	60.12	61.01	94.12	20.75
26	2.5	9.75	20	15	0.825	22.31	80.21	85.92	74.29	13.35
27	3.5	9.75	40	15	0.825	26.67	59.28	76.23	70.59	7.89
28	2.8	7.50	10	25	1.150	36.83	92.78	94.97	91.09	27.57
29	2.5	9.75	20	35	1.475	27.04	82.94	83.89	75.50	74.98
30	3.5	5.25	20	15	0.825	40.2	96.48	97.19	98.06	6.40
31	2.8	7.50	30	25	1.80	35.68	92.78	96.50	86.76	56.65
32	2.8	7.50	30	25	1.150	35.89	92.27	97.12	94.12	22.69

Çizelge 4.19 Alüminyum elektrotlarla KOİ giderimi için tahmin edilen model katsayıları ve bu katsayıların F ve P değerleri

Terim	Katsayı		Standart hata	F	P
	Kodlanmış	Kodlanmamış			
Sabit	32.55	45.1	1.48		0.000
X ₁	-8.12	-0.20	3.63	5.00	0.047
X ₂	-5.30	-2.54	2.34	5.13	0.045
X ₃	-3.89	-0.411	2.86	1.85	0.201
X ₄	9.18	-1.479	2.86	10.33	0.008
X ₅	-5.63	64.5	2.86	3.89	0.074
X ₁ ²	-4.51	-1.057	3.00	2.25	0.161
X ₂ ²	-9.18	-0.453	2.28	16.15	0.002
X ₃ ²	2.68	0.00669	1.46	3.37	0.094
X ₄ ²	4.98	0.01246	1.46	11.66	0.006
X ₅ ²	-2.30	-5.45	1.46	2.49	0.143
X ₁ X ₂	14.87	1.600	3.63	16.78	0.002
X ₁ X ₃	-4.90	-0.119	4.21	1.36	0.269
X ₁ X ₄	12.47	0.302	4.19	8.84	0.013
X ₁ X ₅	-12.35	-9.20	4.19	8.66	0.013
X ₂ X ₃	5.55	0.0617	1.94	8.19	0.015
X ₂ X ₄	3.47	0.0386	1.94	3.22	0.100
X ₂ X ₅	-4.01	-1.370	1.94	4.29	0.063
X ₃ X ₄	0.32	0.00081	1.94	0.03	0.871
X ₃ X ₅	-1.75	-0.134	1.94	0.82	0.386
X ₄ X ₅	-3.44	-0.265	1.94	3.14	0.104

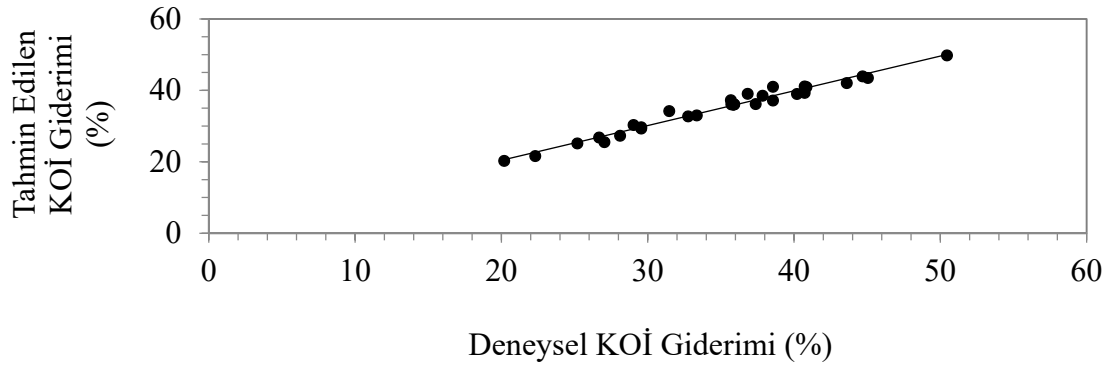
Modelin uygunluğunun değerlendirilmesi amacıyla ANOVA sonuçları çizelge 4.20’de verilmiştir. ANOVA, modelden kaynaklanan değişimlerin hatadaki değişimlerle karşılaştırıldığında anlamlı olup olmadığının ifade edilebilmesi amacıyla sonuçların değişimini modeldeki ve hatadaki değişimler olmak üzere iki alt bölüme ayırmaktadır. Karşılaştırma, modelin ve hatanın kareler ortalaması oranı olan F testi ile yapılmaktadır. Modelin deneysel sonuçları iyi tanımladığı durumda F değerinin, istenen güven seviyesinde modelin serbestlik derecesine göre F dağılımı tablosundan okunan değerden yüksek olması gerekmektedir. F değerine karşılık gelen P değeri de F değerinin yeterince yüksek olup olmadığı hakkında bilgi vermektedir. Başka bir deyişle güven seviyesinden küçük P değerleri modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir (Khataee vd. 2010a, Khataee vd. 2010b, Amani-Ghadim vd. 2013).

Çizelge 4.20 Alüminyum elektrotlarla KOİ giderimi için ANOVA

Değişimin kaynağı	Serbestlik derecesi	Düz. Kareler toplamı	Düz. Kareler ortalaması	F	P
Model	20	1412.83	70.64	19.42	0.000
Hata	11	40.01	3.64		
Toplam	31	1452.84			

Çizelge 4.20’de yer alan F değeri, % 95 güven seviyesinde F dağılımı tablosundan okunan değerden ($F_{0.05 (20, 11)} = 2.65$) yüksek ve P değeri de 0.05’ten düşük olduğu için elde edilen modelin deney sonuçlarına iyi uyduğu ve istatistiksel olarak anlamlı olduğu sonucu doğrulanmıştır.

Modelin uygunluğu kararlılık katsayısı R^2 açısından da incelenmiştir. Kararlılık katsayısı tahmin edilen değerlerin değişiminin ne kadarının deneysel değerlerle ifade edilebildiğinin bir göstergesidir. Eşitlik (4.1)’den tahmin edilen değerler, deneysel değerlerle karşılaştırıldığında R^2 değeri 0.9725 olarak bulunmuştur. Bu değer KOİ giderimindeki değişimlerin % 97.25’inin model tarafından açıklanabildiğini, sadece % 2.75’inin modelle açıklanamadığını göstermektedir. Modelden tahmin edilen sonuçlar ile deney sonuçlarının karşılaştırması şekil 4.40’ta verilmiştir. Düzeltilmiş kararlılık katsayısı da model ve deneysel verilerin uygunluğunun bir göstergesi olup farklı sayıda bağımsız değişken içeren modellerin kıyaslanması için daha uygundur. Düzeltilmiş kararlılık katsayısı, R^2 değerini örnek miktarı ve modeldeki terimlerin sayısı açısından düzeltmektedir. Modelde çok sayıda terim varsa ve örnek miktarı çok büyük değilse düzeltilmiş R^2 , R^2 değerinden küçük olabilir (Liu ve Chiou 2005). Bu çalışmada 0.9224 olarak bulunan düzeltilmiş R^2 değerinin, R^2 değerine yakın olduğu görülmüştür. Bulunan model kullanılarak, KOİ giderimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri, diğer faktörler orta nokta değerlerinde sabit tutularak çizilmiş ve EK 8’de verilmiştir.



Şekil 4.40 Alüminyum elektrotlarla KOİ giderimi için deney sonuçları ve modelden tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması

4.5.3.2 Renk gideriminin istatistiksel analizi

Bu bölümde çizelge 4.18’de verilen, sabit akımda, 600 devir/dk karıştırma hızında, elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın kontrol edilmesiyle gerçekleştirilen MBT çalışmalarının renk giderimi cevabına ait MINITAB 17 yazılımından elde edilen sonuçlar incelenmiştir. MINITAB 17 yazılımının çoklu regresyon yöntemi kullanılarak deney verilerine ikinci mertebeden polinom denklemi uydurulmuş ve denklemin katsayıları bulunmuştur. Renk giderimi için kodlanmamış değişkenler cinsinden elde edilen ikinci mertebeden polinom denklemi eşitlik (4.2)’de, denklemdaki katsayılar ve bu katsayıların standart hataları ile F ve P değerleri çizelge 4.21’de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 y_{2,Al} = & -67.7 + 8.54x_1 + 32.56x_2 + 3.105x_3 + 0.550x_4 - 2.1x_5 \\
 & + 0.66x_1^2 - 2.083x_2^2 - 0.01635x_3^2 + 0.00036x_4^2 - 1.26x_5^2 \\
 & + 0.326x_1x_2 - 0.228x_1x_3 - 0.203x_1x_4 - 2.29x_1x_5 - 0.2526x_2x_3 \\
 & + 0.0077x_2x_4 - 0.05x_2x_5 - 0.00864x_3x_4 + 0.102x_3x_5 + 0.293x_4x_5
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Çizelge 4.21 incelendiğinde x_2 , x_3 , x_2^2 , x_3^2 , x_2x_3 terimlerinin P değerlerinin sırasıyla 0.000, 0.003, 0.000, 0.017, 0.000 olduğu görülmüş, değerlerin % 95 güven seviyesinde 0.05’ten küçük olması nedeniyle bu terimlerin renk gideriminde etkili olduğu, diğer terimlerin renk giderimini önemli ölçüde etkilemediği sonucuna varılmıştır. Modelin uygunluğunun değerlendirilmesi amacıyla ANOVA sonuçları çizelge 4.22’de verilmiştir. Çizelge 4.22’de

yer alan F değeri, % 95 güven seviyesinde F dağılımı tablosundan okunan değerden ($F_{0.05}(20, 11) = 2.65$) yüksek ve P değeri de 0.05'ten düşük olduğu için elde edilen modelin deney sonuçlarına iyi uyduğu ve istatistiksel olarak anlamlı olduğu sonucu doğrulanmıştır.

Çizelge 4.21 Alüminyum elektrotlarla renk giderimi için tahmin edilen model katsayıları ve bu katsayıların F ve P değerleri

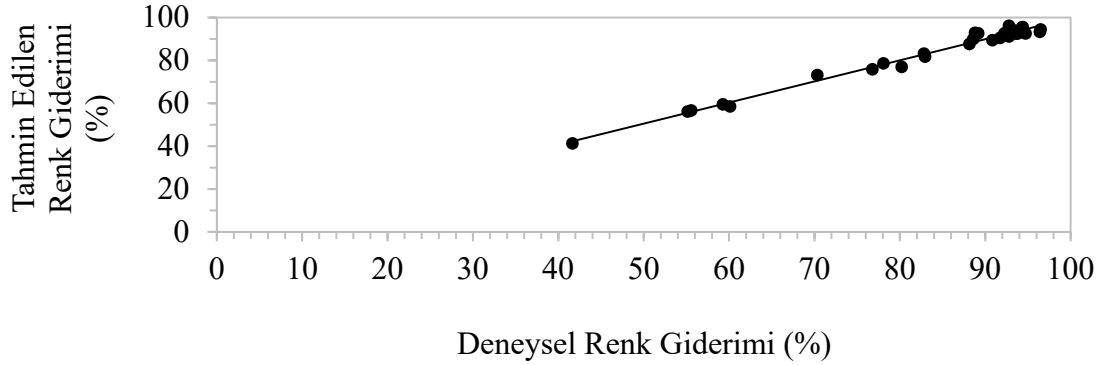
Terim	Katsayı		Standart hata	F	P
	Kodlanmış	Kodlanmamış			
Sabit	94.39	-67.7	2.36		0.000
X ₁	4.45	8.54	5.78	0.59	0.457
X ₂	-21.20	32.56	3.73	32.33	0.000
X ₃	-17.09	3.105	4.56	14.07	0.003
X ₄	-3.47	0.550	4.55	0.58	0.462
X ₅	-3.14	-2.1	4.55	0.48	0.505
X ₁ ²	2.81	0.66	4.78	0.35	0.568
X ₂ ²	-42.17	-2.083	3.64	134.43	0.000
X ₃ ²	-6.54	-0.01635	2.32	7.92	0.017
X ₄ ²	0.14	0.00036	2.32	0.00	0.952
X ₅ ²	-0.53	-1.26	2.32	0.05	0.823
X ₁ X ₂	3.03	0.326	5.78	0.27	0.610
X ₁ X ₃	-9.41	-0.228	6.71	1.97	0.188
X ₁ X ₄	-8.37	-0.203	6.68	1.57	0.236
X ₁ X ₅	-3.07	-2.29	6.68	0.21	0.655
X ₂ X ₃	-22.73	-0.2526	3.09	54.07	0.000
X ₂ X ₄	0.69	0.0077	3.08	0.05	0.826
X ₂ X ₅	-0.15	-0.05	3.08	0.00	0.962
X ₃ X ₄	-3.46	-0.00864	3.08	1.26	0.286
X ₃ X ₅	1.33	0.102	3.08	0.19	0.674
X ₄ X ₅	3.81	0.293	3.09	1.52	0.244

Çizelge 4.22 Alüminyum elektrotlarla renk giderimi için ANOVA

Değişimin kaynağı	Serbestlik derecesi	Düz. Kareler toplamı	Düz. Kareler ortalaması	F	P
Model	20	6509.58	325.48	35.27	0.000
Hata	11	101.52	9.23		
Toplam	31	6611.11			

Eşitlik (4.2)'den tahmin edilen değerler, deneysel değerlerle karşılaştırıldığında R² değeri 0.9846 olarak bulunmuştur. Bu değer renk giderimindeki değişimlerin % 98.46'sının model tarafından açıklanabildiğini, sadece % 1.54'ünün modelle açıklanamadığını

göstermektedir. Modelden tahmin edilen sonuçlar ile deney sonuçlarının karşılaştırması şekil 4.41’de verilmiştir. Çalışmada 0.9567 olarak bulunan düzeltilmiş R^2 değerinin, R^2 değerine yakın olduğu görülmüştür. Bulunan model kullanılarak, renk giderimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri, diğer faktörler orta nokta değerlerinde sabit tutularak çizilmiş ve EK 9’da verilmiştir.



Şekil 4.41 Alüminyum elektrotlarla renk giderimi için deney sonuçları ve modelden tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması

4.5.3.3 Bulanıklık gideriminin istatistiksel analizi

Bu bölümde çizelge 4.18’de verilen, sabit akımda, 600 devir/dk karıştırma hızında, elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın kontrol edilmesiyle gerçekleştirilen MBT çalışmalarının bulanıklık giderimi cevabına ait MINITAB 17 yazılımından elde edilen sonuçlar incelenmiştir. MINITAB 17 yazılımının çoklu regresyon yöntemi kullanılarak deney verilerine ikinci mertebeden polinom denklemi uydurulmuş ve denklemin katsayıları bulunmuştur. Bulanıklık giderimi için kodlanmamış değişkenler cinsinden elde edilen ikinci mertebeden polinom denklemi eşitlik (4.3)’te, denklemdaki katsayılar ve bu katsayıların standart hataları ile F ve P değerleri çizelge 4.23’te verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 y_{3,Al} = & -46.2 + 6.00x_1 + 29.23x_2 + 2.006x_3 + 0.920x_4 + 7.7x_5 \\
 & -1.86x_1^2 - 1.957x_2^2 - 0.02178x_3^2 - 0.00553x_4^2 - 0.39x_5^2 \\
 & + 1.627x_1x_2 + 0.243x_1x_3 - 0.242x_1x_4 - 4.64x_1x_5 - 0.2323x_2x_3 \\
 & - 0.0319x_2x_4 - 1.30x_2x_5 - 0.00696x_3x_4 + 0.035x_3x_5 + 0.491x_4x_5
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

Çizelge 4.23 Alüminyum elektrotlarla bulanıklık giderimi için tahmin edilen model katsayıları ve bu katsayıların F ve P değerleri

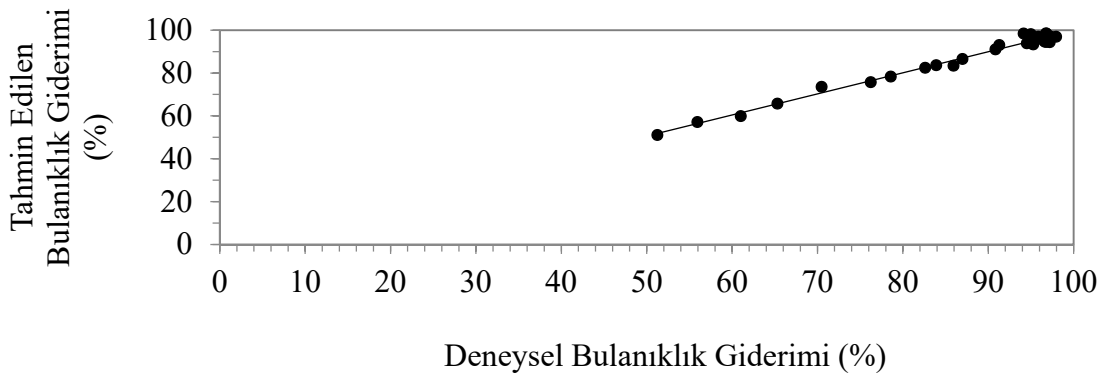
Terim	Katsayı		Standart hata	F	P
	Kodlanmış	Kodlanmamış			
Sabit	98.31	-46.2	2.25		0.000
X ₁	-4.11	6.00	5.50	0.56	0.471
X ₂	-10.60	29.23	3.55	8.94	0.012
X ₃	-2.48	2.006	4.33	0.33	0.579
X ₄	-5.69	0.920	4.33	1.73	0.215
X ₅	-6.27	7.7	4.33	2.10	0.175
X ₁ ²	-7.95	-1.86	4.55	3.05	0.108
X ₂ ²	-39.64	-1.957	3.46	131.22	0.000
X ₃ ²	-8.71	-0.02178	2.21	15.52	0.002
X ₄ ²	-2.21	-0.00553	2.21	1.00	0.339
X ₅ ²	-0.17	-0.39	2.21	0.01	0.942
X ₁ X ₂	15.12	1.627	5.50	7.55	0.019
X ₁ X ₃	10.05	0.243	6.38	2.48	0.143
X ₁ X ₄	-9.98	-0.242	6.36	2.46	0.145
X ₁ X ₅	-6.22	-4.54	6.36	0.96	0.349
X ₂ X ₃	-20.90	-0.2323	2.94	50.54	0.000
X ₂ X ₄	-2.87	-0.0319	2.93	0.96	0.349
X ₂ X ₅	-3.80	-1.30	2.93	1.68	0.222
X ₃ X ₄	-2.79	-0.00696	2.93	0.90	0.363
X ₃ X ₅	0.46	0.035	2.93	0.02	0.879
X ₄ X ₅	6.38	0.491	2.94	4.71	0.053

Çizelge 4.23 incelendiğinde x_2 , x_2^2 , x_3^2 , x_1x_2 , x_2x_3 terimlerinin P değerlerinin sırasıyla 0.012, 0.000, 0.002, 0.019, 0.000 olduğu görülmüş, değerlerin % 95 güven seviyesinde 0.05'ten küçük olması nedeniyle bu terimlerin bulanıklık gideriminde etkili olduğu, diğer terimlerin bulanıklık giderimini önemli ölçüde etkilemediği sonucuna varılmıştır. Modelin uygunluğunun değerlendirilmesi amacıyla ANOVA sonuçları çizelge 4.24'de verilmiştir. Çizelge 4.24'de yer alan F değeri, % 95 güven seviyesinde F dağılımı tablosundan okunan değerden ($F_{0.05}(20, 11) = 2.65$) yüksek ve P değeri de 0.05'ten düşük olduğu için elde edilen modelin deney sonuçlarına iyi uyduğu ve istatistiksel olarak anlamlı olduğu sonucu doğrulanmıştır.

Çizelge 4.24 Alüminyum elektrotlarla bulanıklık giderimi için ANOVA

Değişimin kaynağı	Serbestlik derecesi	Düz. Kareler toplamı	Düz. Kareler ortalaması	F	P
Model	20	5475.88	273.79	32.78	0.000
Hata	11	91.87	8.35		
Toplam	31	5567.75			

Eşitlik (4.3)'ten tahmin edilen değerler, deneysel değerlerle karşılaştırıldığında R^2 değeri 0.9835 olarak bulunmuştur. Bu değer bulanıklık giderimindeki değişimlerin % 98.35'inin model tarafından açıklanabildiğini, sadece % 1.65'inin modelle açıklanamadığını göstermektedir. Modelden tahmin edilen sonuçlar ile deney sonuçlarının karşılaştırması şekil 4.42'de verilmiştir. Çalışmada 0.9535 olarak bulunan düzeltilmiş R^2 değerinin, R^2 değerine yakın olduğu görülmüştür. Bulunan model kullanılarak, bulanıklık giderimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri, diğer faktörler orta nokta değerlerinde sabit tutularak çizilmiş ve EK 10'da verilmiştir.



Şekil 4.42 Alüminyum elektrotlarla bulanıklık giderimi için deney sonuçları ve modelden tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması

4.5.3.4 AKM gideriminin istatistiksel analizi

Bu bölümde çizelge 4.18'de verilen, sabit akımda, 600 devir/dk karıştırma hızında, elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın kontrol edilmesiyle gerçekleştirilen MBT çalışmalarının AKM giderimi cevabına ait MINITAB 17 yazılımından elde edilen sonuçlar incelenmiştir. MINITAB 17 yazılımının çoklu regresyon yöntemi kullanılarak deney

verilerine ikinci mertebeden polinom denklemi uydurulmuş ve denklemin katsayıları bulunmuştur. AKM giderimi için kodlanmamış değişkenler cinsinden elde edilen ikinci mertebeden polinom denklemi eşitlik (4.4)'te, denklemdeki katsayılar ve bu katsayıların standart hataları ile F ve P değerleri çizelge 4.25'te verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 y_{4,Al} = & 76.2 + 2.67x_1 + 15.24x_2 - 2.076x_3 - 0.500x_4 - 0.9x_5 \\
 & - 0.67x_1^2 - 1.630x_2^2 + 0.00184x_3^2 - 0.01144x_4^2 - 13.77x_5^2 \\
 & - 0.524x_1x_2 - 0.008x_1x_3 - 0.164x_1x_4 + 9.18x_1x_5 + 0.1365x_2x_3 \\
 & + 0.2505x_2x_4 - 1.66x_2x_5 + 0.00760x_3x_4 + 0.672x_3x_5 - 0.242x_4x_5
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

Çizelge 4.25 Alüminyum elektrotlarla AKM giderimi için tahmin edilen model katsayıları ve bu katsayıların F ve P değerleri

Terim	Katsayı		Standart hata	F	P
	Kodlanmış	Kodlanmamış			
Sabit	93.36	76.2	2.42		0.000
x ₁	-1.80	2.67	5.91	0.09	0.766
x ₂	-13.57	15.24	3.81	12.67	0.004
x ₃	-0.29	-2.076	4.56	0.00	0.952
x ₄	0.89	-0.500	4.55	0.04	0.852
x ₅	5.72	-0.9	4.55	1.51	0.244
x ₁ ²	-2.87	-0.67	4.89	0.34	0.569
x ₂ ²	-33.00	-1.630	3.72	78.75	0.000
x ₃ ²	0.73	0.00184	2.38	0.10	0.763
x ₄ ²	-4.58	-0.01144	2.38	3.71	0.080
x ₅ ²	-5.82	-13.77	2.38	5.99	0.032
x ₁ x ₂	-4.87	-0.524	5.91	0.68	0.428
x ₁ x ₃	-0.34	-0.008	6.86	0.00	0.961
x ₁ x ₄	-6.79	-0.164	6.83	0.99	0.342
x ₁ x ₅	12.33	9.18	6.83	3.26	0.099
x ₂ x ₃	12.29	0.1365	3.16	15.12	0.003
x ₂ x ₄	22.54	0.2505	3.15	51.15	0.000
x ₂ x ₅	-4.85	-1.66	3.15	2.37	0.152
x ₃ x ₄	3.04	0.00760	3.15	0.93	0.355
x ₃ x ₅	8.74	0.672	3.15	7.69	0.018
x ₄ x ₅	-3.15	-0.242	3.16	0.99	0.341

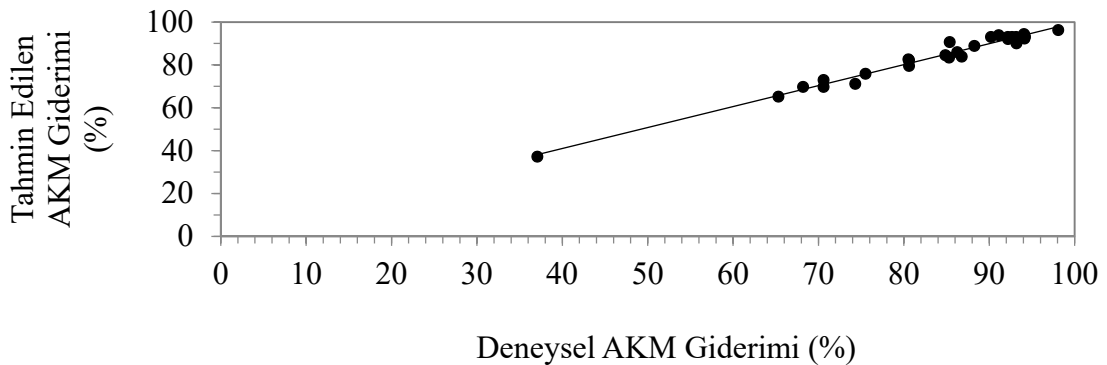
Çizelge 4.25 incelendiğinde x₂, x₂², x₅², x₂x₃, x₂x₄, x₃x₅ terimlerinin P değerlerinin sırasıyla 0.004, 0.000, 0.032, 0.003, 0.000, 0.018 olduğu görülmüş, değerlerin % 95 güven seviyesinde 0.05'ten küçük olması nedeniyle bu terimlerin AKM gideriminde etkili

olduğu, diğer terimlerin AKM giderimini önemli ölçüde etkilemediği sonucuna varılmıştır. Modelin uygunluğunun değerlendirilmesi amacıyla ANOVA sonuçları çizelge 4.26’da verilmiştir. Çizelge 4.26’da yer alan F değeri, % 95 güven seviyesinde F dağılımı tablosundan okunan değerden ($F_{0.05 (20, 11)} = 2.65$) yüksek ve P değeri de 0.05’ten düşük olduğu için elde edilen modelin deney sonuçlarına iyi uyduğu ve istatistiksel olarak anlamlı olduğu sonucu doğrulanmıştır.

Çizelge 4.26 Alüminyum elektrotlarla AKM giderimi için ANOVA

Değişimin kaynağı	Serbestlik derecesi	Düz. Kareler toplamı	Düz. Kareler ortalaması	F	P
Model	20	4750.79	237.54	24.53	0.000
Hata	11	106.11	9.65		
Toplam	31	4856.90			

Eşitlik (4.4)’ten tahmin edilen değerler, deneysel değerlerle karşılaştırıldığında R^2 değeri 0.9782 olarak bulunmuştur. Bu değer AKM giderimindeki değişimlerin % 97.82’sinin model tarafından açıklanabildiğini, sadece % 2.18’inin modelle açıklanamadığını göstermektedir. Modelden tahmin edilen sonuçlar ile deney sonuçlarının karşılaştırması şekil 4.43’te verilmiştir. Çalışmada 0.9384 olarak bulunan düzeltilmiş R^2 değerinin, R^2 değerine yakın olduğu görülmüştür. Bulunan model kullanılarak, AKM giderimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri, diğer faktörler orta nokta değerlerinde sabit tutularak çizilmiş ve EK 11’de verilmiştir.



Şekil 4.43 Alüminyum elektrotlarla AKM giderimi için deney sonuçları ve modelden tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması

4.5.3.5 Enerji tüketiminin istatistiksel analizi

Bu bölümde çizelge 4.18’de verilen, sabit akımda, 600 devir/dk karıştırma hızında, elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın kontrol edilmesiyle gerçekleştirilen MBT çalışmalarının enerji tüketimi cevabına ait MINITAB 17 yazılımından elde edilen sonuçlar incelenmiştir. MINITAB 17 yazılımının çoklu regresyon yöntemi kullanılarak deney verilerine ikinci mertebeden polinom denklemi uydurulmuş ve denklemin katsayıları bulunmuştur. Enerji tüketimi için kodlanmamış değişkenler cinsinden elde edilen ikinci mertebeden polinom denklemi eşitlik (4.5)’te, denklemdeki katsayılar ve bu katsayıların standart hataları ile F ve P değerleri çizelge 4.27’de verilmiştir.

$$\begin{aligned} y_{5,Al} = & 13.0 - 8.01x_1 + 0.69x_2 + 0.415x_3 + 0.648x_4 - 44.9x_5 \\ & + 3.866x_1^2 + 0.162x_2^2 - 0.00098x_3^2 - 0.00451x_4^2 + 20.08x_5^2 \\ & - 1.731x_1x_2 + 0.2892x_1x_3 - 0.3744x_1x_4 - 5.13x_1x_5 - 0.0660x_2x_3 \\ & + 0.0606x_2x_4 + 4.084x_2x_5 - 0.01597x_3x_4 - 0.511x_3x_5 + 1.389x_4x_5 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Çizelge 4.27 incelendiğinde x_1 , x_4 , x_5 , x_1^2 , x_5^2 , x_1x_2 , x_1x_3 , x_1x_4 , x_2x_3 , x_2x_4 , x_2x_5 , x_3x_4 , x_3x_5 , x_4x_5 terimlerinin P değerlerinin sırasıyla 0.006, 0.021, 0.000, 0.000, 0.000, 0.001, 0.014, 0.003, 0.009, 0.015, 0.000, 0.006, 0.005, 0.000 olduğu görülmüş, değerlerin % 95 güven seviyesinde 0.05’ten küçük olması nedeniyle bu terimlerin enerji tüketiminde etkili olduğu, diğer terimlerin enerji tüketimini önemli ölçüde etkilemediği sonucuna varılmıştır. Modelin uygunluğunun değerlendirilmesi amacıyla ANOVA sonuçları çizelge 4.28’de verilmiştir. Çizelge 4.28’de yer alan F değeri, % 95 güven seviyesinde F dağılımı tablosundan okunan değerden ($F_{0.05} (20, 11) = 2.65$) yüksek ve P değeri de 0.05’ten düşük olduğu için elde edilen modelin deney sonuçlarına iyi uyduğu ve istatistiksel olarak anlamlı olduğu sonucu doğrulanmıştır.

Çizelge 4.27 Alüminyum elektrotlarla enerji tüketimi için tahmin edilen model katsayıları ve bu katsayıların F ve P değerleri

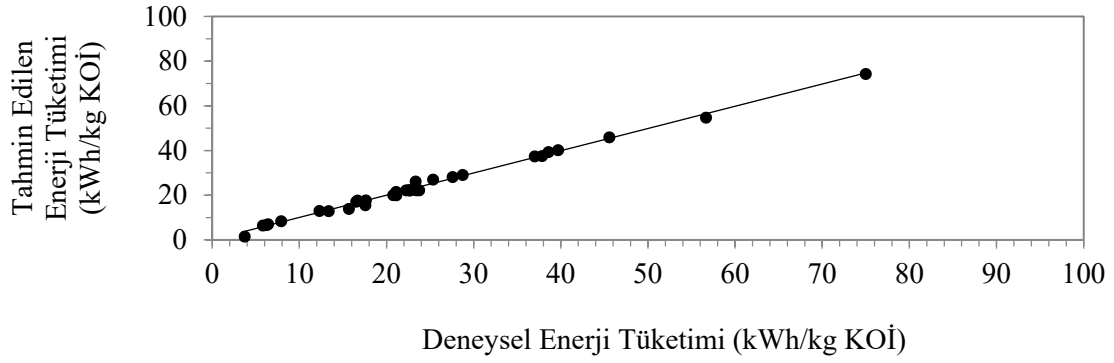
Terim	Katsayı		Standart hata	F	P
	Kodlanmış	Kodlanmamış			
Sabit	22.28	13.0	1.45		0.000
X ₁	12.13	-8.01	3.54	11.73	0.006
X ₂	-0.61	0.69	2.28	0.07	0.793
X ₃	2.50	0.415	2.79	0.81	0.388
X ₄	7.50	0.648	2.78	7.26	0.021
X ₅	18.94	-44.9	2.78	46.31	0.000
X ₁ ²	16.49	3.866	2.93	31.75	0.000
X ₂ ²	3.28	0.162	2.23	2.17	0.169
X ₃ ²	-0.39	-0.00098	1.42	0.08	0.787
X ₄ ²	-1.81	-0.00451	1.42	1.61	0.230
X ₅ ²	8.48	20.08	1.42	35.56	0.000
X ₁ X ₂	-16.09	-1.731	3.54	20.66	0.001
X ₁ X ₃	11.94	0.2892	4.10	8.47	0.014
X ₁ X ₄	-15.46	-0.3744	4.09	14.30	0.003
X ₁ X ₅	-6.88	-5.13	4.09	2.83	0.120
X ₂ X ₃	-5.94	-0.0660	1.89	9.86	0.009
X ₂ X ₄	5.46	0.0606	1.89	8.36	0.015
X ₂ X ₅	11.95	4.084	1.89	40.07	0.000
X ₃ X ₄	-6.39	-0.01597	1.89	11.46	0.006
X ₃ X ₅	-6.64	-0.511	1.89	12.39	0.005
X ₄ X ₅	18.05	1.389	1.89	91.05	0.000

Çizelge 4.28 Alüminyum elektrotlarla enerji tüketimi için ANOVA

Değişimin kaynağı	Serbestlik derecesi	Düz. Kareler toplamı	Düz. Kareler ortalaması	F	P
Model	20	7121.66	356.08	102.99	0.000
Hata	11	38.03	3.46		
Toplam	31	7159.69			

Eşitlik (4.5)'ten tahmin edilen değerler, deneysel değerlerle karşılaştırıldığında R^2 değeri 0.9947 olarak bulunmuştur. Bu değer enerji tüketimindeki değişimlerin % 99.47'sinin model tarafından açıklanabildiğini, sadece % 0.53'ünün modelle açıklanamadığını göstermektedir. Modelden tahmin edilen sonuçlar ile deney sonuçlarının karşılaştırması şekil 4.44'te verilmiştir. Çalışmada 0.9850 olarak bulunan düzeltilmiş R^2 değerinin, R^2 değerine yakın olduğu görülmüştür. Bulunan model kullanılarak, enerji tüketimi için

faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri, diğer faktörler orta nokta değerlerinde sabit tutularak çizilmiş ve EK 12’de verilmiştir.



Şekil 4.44 Alüminyum elektrotlarla enerji tüketimi için deney sonuçları ve modelden tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması

4.5.4 Demir elektrotlar ile yapılan merkezi bileşik tasarım çalışmalarının sonuçları

MBT yönteminin cevapları olarak seçilen KOİ, renk, bulanıklık, AKM giderim verimleri ve enerji tüketimi değerleri ile faktörler arasındaki ilişkinin belirlenmesi amacıyla oluşturulan 10 faktöriyel, 16 eksenel ve merkez noktada yapılan 6 tekrardan oluşan toplam 32 deneye ait deneysel tasarım matrisi ve cevapları çizelge 4.29’da verilmiştir.

4.5.4.1 KOİ gideriminin istatistiksel analizi

Bu bölümde çizelge 4.29’da verilen, sabit akımda, 600 devir/dk karıştırma hızında, elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın kontrol edilmesiyle gerçekleştirilen MBT çalışmalarının KOİ giderimi cevabına ait MINITAB 17 yazılımından elde edilen sonuçlar incelenmiştir. MINITAB 17 yazılımının çoklu regresyon yöntemi kullanılarak deney verilerine ikinci mertebeden polinom denklemi uydurulmuş ve denklemin katsayıları bulunmuştur. KOİ giderimi için kodlanmamış değişkenler cinsinden elde edilen ikinci mertebeden polinom denklemi eşitlik (4.6)’da, denklemdaki katsayılar ve bu katsayıların standart hataları ile F ve P değerleri çizelge 4.30’da verilmiştir.

Çizelge 4.29 Demir elektrotlar için MBT ve cevapları

Deneý no	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅
	E. İletkenlik (mS/cm)	pH	Sıcaklık (°C)	Süre (dk)	Akım şiddeti (A)	KOİ giderimi (%)	Renk giderimi (%)	Bulanıklık giderimi (%)	AKM giderimi (%)	Enerji tüketimi (kWh/ kg KOİ)
1	4.2	7.50	30	25	1.150	29.69	68.23	70.29	71.00	23.43
2	4.0	5.25	20	35	1.475	35.99	85.32	90.23	73.00	46.28
3	2.8	7.50	30	25	1.800	34.91	64.04	68.22	75.74	54.28
4	3.0	5.25	40	35	1.475	30.99	81.20	85.37	74.24	46.55
5	3.0	5.25	20	15	1.475	47.29	84.10	88.75	72.65	16.13
6	2.8	7.50	50	25	1.150	28.47	65.21	69.16	75.35	23.94
7	3.5	9.75	20	35	0.825	27.59	76.24	82.61	89.03	20.91
8	3.5	9.75	20	15	1.475	32.79	73.51	78.92	89.12	23.88
9	2.8	7.50	30	25	1.150	32.58	65.81	69.18	73.12	27.67
10	2.5	9.75	20	15	0.825	30.99	76.32	79.95	85.29	10.22
11	3.0	9.75	20	35	1.475	35.72	73.94	77.74	87.53	63.26
12	2.8	7.50	30	25	1.150	32.79	65.69	69.53	73.47	26.97
13	2.8	7.50	30	25	1.150	32.37	64.93	68.34	73.59	28.09
14	2.3	7.50	30	25	1.150	32.43	60.47	65.29	73.29	27.36
15	3.5	9.75	40	15	0.825	32.43	73.71	77.81	90.24	8.70
16	2.8	7.50	30	5	1.150	31.75	68.17	73.67	69.94	5.40
17	2.5	9.75	40	15	1.475	30.27	70.29	74.76	92.00	25.71
18	4.0	3.00	30	25	1.150	33.39	85.96	90.63	69.35	20.92
19	2.8	7.50	30	25	1.150	32.07	65.74	69.89	73.65	26.07
20	2.8	7.50	30	45	1.150	32.59	62.23	68.32	72.76	47.28
21	3.5	5.25	20	15	0.825	29.91	87.18	90.26	69.71	8.08
22	3.0	5.25	40	15	0.825	26.78	82.56	86.67	71.71	8.62
23	2.8	7.50	10	25	1.150	36.63	70.29	74.41	69.85	29.55
24	2.8	7.50	30	25	1.150	33.17	64.18	67.65	73.65	26.66
25	2.8	7.50	30	25	0.500	30.68	71.12	77.19	73.35	5.90
26	3.5	5.25	40	35	0.825	27.75	84.87	88.43	72.41	17.59
27	3.0	5.25	20	35	0.825	31.71	87.69	92.79	70.24	18.98
28	2.5	9.75	40	35	0.825	35.68	74.38	79.86	92.00	18.05
29	3.5	5.25	40	15	1.475	27.03	79.08	84.49	73.59	21.81
30	2.8	7.50	30	25	1.150	33.51	65.03	69.64	73.24	23.78
31	6.4	12.00	30	25	1.150	25.04	15.98	13.70	40.00	28.46
32	3.5	9.75	40	35	1.475	38.04	71.56	75.37	89.12	37.84

$$\begin{aligned}
y_{1,Fe} = & 110.3 - 12.80x_1 - 10.52x_2 - 1.499x_3 - 1.038x_4 + 31.6x_5 \\
& - 1.623x_1^2 + 0.3046x_2^2 - 0.00171x_3^2 - 0.00266x_4^2 - 1.04x_5^2 \\
& + 0.740x_1x_2 + 0.2628x_1x_3 + 0.1762x_1x_4 + 2.62x_1x_5 + 0.1395x_2x_3 \\
& + 0.0427x_2x_4 - 1.419x_2x_5 + 0.01356x_3x_4 - 0.653x_3x_5 - 0.038x_4x_5
\end{aligned} \tag{4.6}$$

Çizelge 4.30 Demir elektrotlarla KOİ giderimi için tahmin edilen model katsayıları ve bu katsayıların F ve P değerleri

Terim	Katsayı		Standart hata	F	P
	Kodlanmış	Kodlanmamış			
Sabit	25.97	110.3	1.30		0.000
x ₁	-15.88	-12.80	3.35	22.41	0.001
x ₂	4.73	-10.52	1.75	7.35	0.020
x ₃	4.58	-1.499	2.30	4.13	0.067
x ₄	6.32	-1.038	2.30	7.55	0.019
x ₅	6.50	31.6	2.30	7.97	0.017
x ₁ ²	-8.89	-1.623	2.69	10.95	0.007
x ₂ ²	6.17	0.3046	1.66	13.78	0.003
x ₃ ²	-0.686	-0.00171	0.976	0.49	0.497
x ₄ ²	-1.066	-0.00266	0.976	1.19	0.298
x ₅ ²	-0.441	-1.04	0.976	0.20	0.661
x ₁ x ₂	7.79	0.740	2.94	7.02	0.023
x ₁ x ₃	12.30	0.2628	3.45	12.69	0.004
x ₁ x ₄	8.25	0.1762	3.45	5.70	0.036
x ₁ x ₅	3.98	2.62	3.45	1.33	0.273
x ₂ x ₃	12.56	0.1395	1.33	89.40	0.000
x ₂ x ₄	3.84	0.0427	1.33	8.36	0.015
x ₂ x ₅	-4.15	-1.419	1.33	9.77	0.010
x ₃ x ₄	5.43	0.01356	1.31	17.08	0.002
x ₃ x ₅	-8.48	-0.653	1.31	41.77	0.000
x ₄ x ₅	-0.50	-0.038	1.31	0.15	0.711

Çizelge 4.30 incelendiğinde x₁, x₂, x₄, x₅, x₁², x₂², x₁x₂, x₁x₃, x₁x₄, x₂x₃, x₂x₄, x₂x₅, x₃x₄, x₃x₅ terimlerinin P değerlerinin sırasıyla 0.001, 0.020, 0.019, 0.017, 0.007, 0.003, 0.023, 0.004, 0.036, 0.000, 0.015, 0.010, 0.002, 0.000 olduğu görülmüş, değerlerin % 95 güven seviyesinde 0.05'ten küçük olması nedeniyle bu terimlerin KOİ gideriminde etkili olduğu, diğer terimlerin KOİ giderimini önemli ölçüde etkilemediği sonucuna varılmıştır. Modelin uygunluğunun değerlendirilmesi amacıyla ANOVA sonuçları çizelge 4.31'de verilmiştir. Çizelge 4.31'de yer alan F değeri, % 95 güven seviyesinde F dağılımı tablosundan okunan değerden (F_{0.05 (20, 11)} = 2.65) yüksek ve P değeri de 0.05'ten düşük olduğu için elde edilen

modelin deney sonuçlarına iyi uyduğu ve istatistiksel olarak anlamlı olduğu sonucu doğrulanmıştır.

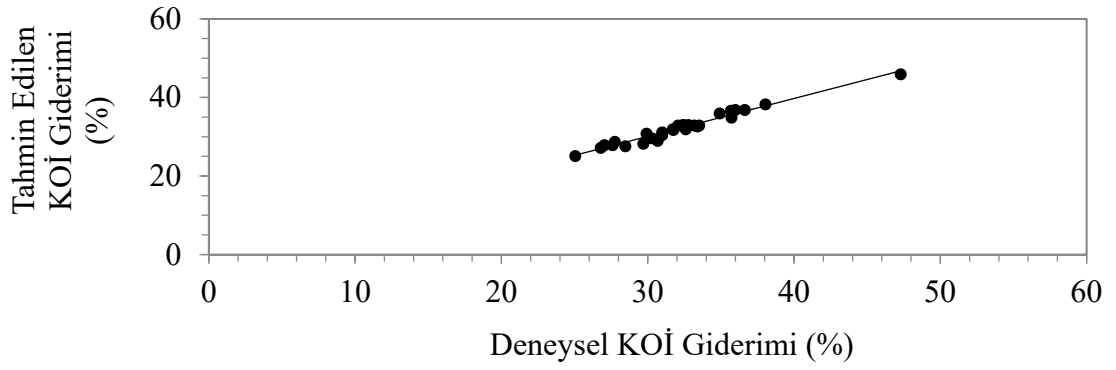
Çizelge 4.31 Demir elektrotlarla KOİ giderimi için ANOVA

Değişimin kaynağı	Serbestlik derecesi	Düz. Kareler toplamı	Düz. Kareler ortalaması	F	P
Model	20	498.344	24.92	15.58	0.000
Hata	11	17.593	1.60		
Toplam	31	515.938			

Eşitlik (4.6)'dan tahmin edilen değerler, deneysel değerlerle karşılaştırıldığında R^2 değeri 0.9659 olarak bulunmuştur. Bu değer KOİ giderimindeki değişimlerin % 96.59'unun model tarafından açıklanabildiğini, sadece % 3.41'inin modelle açıklanamadığını göstermektedir. Modelden tahmin edilen sonuçlar ile deney sonuçlarının karşılaştırması şekil 4.45'te verilmiştir. Çalışmada 0.9039 olarak bulunan düzeltilmiş R^2 değerinin, R^2 değerine yakın olduğu görülmüştür. Bulunan model kullanılarak, KOİ giderimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri, diğer faktörler orta nokta değerlerinde sabit tutularak çizilmiş ve EK 13'te verilmiştir.

4.5.4.2 Renk gideriminin istatistiksel analizi

Bu bölümde çizelge 4.29'da verilen, sabit akımda, 600 devir/dk karıştırma hızında, elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın kontrol edilmesiyle gerçekleştirilen MBT çalışmalarının renk giderimi cevabına ait MINITAB 17 yazılımından elde edilen sonuçlar incelenmiştir. MINITAB 17 yazılımının çoklu regresyon yöntemi kullanılarak deney verilerine ikinci mertebeden polinom denklemi uydurulmuş ve denklemin katsayıları bulunmuştur. Renk giderimi için kodlanmamış değişkenler cinsinden elde edilen ikinci mertebeden polinom denklemi eşitlik (4.7)'de, denklemdaki katsayılar ve bu katsayıların standart hataları ile F ve P değerleri çizelge 4.32'de verilmiştir.



Şekil 4.45 Demir elektrotlarla KOİ giderimi için deney sonuçları ve modelden tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması

$$\begin{aligned}
 y_{2,Fe} = & 133.7 + 44.6x_1 - 19.75x_2 - 0.76x_3 - 1.36x_4 - 49.0x_5 \\
 & - 8.28x_1^2 + 1.123x_2^2 + 0.0142x_3^2 + 0.0078x_4^2 + 13.0x_5^2 \\
 & + 0.42x_1x_2 - 0.201x_1x_3 + 0.316x_1x_4 + 5.7x_1x_5 + 0.0325x_2x_3 \\
 & - 0.0188x_2x_4 - 0.36x_2x_5 + 0.0062x_3x_4 + 0.004x_3x_5 - 0.072x_4x_5
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

Çizelge 4.32 incelendiğinde x_1 , x_1^2 , x_2^2 terimlerinin P değerlerinin sırasıyla 0.011, 0.003, 0.010 olduğu görülmüş, değerlerin % 95 güven seviyesinde 0.05'ten küçük olması nedeniyle bu terimlerin renk gideriminde etkili olduğu, diğer terimlerin renk giderimini önemli ölçüde etkilemediği sonucuna varılmıştır. Modelin uygunluğunun değerlendirilmesi amacıyla ANOVA sonuçları çizelge 4.33'te verilmiştir. Çizelge 4.33'te yer alan F değeri, % 95 güven seviyesinde F dağılımı tablosundan okunan değerden ($F_{0.05}(20, 11) = 2.65$) yüksek ve P değeri de 0.05'ten düşük olduğu için elde edilen modelin deney sonuçlarına iyi uyduğu ve istatistiksel olarak anlamlı olduğu sonucu doğrulanmıştır.

Eşitlik (4.7)'den tahmin edilen değerler, deneysel değerlerle karşılaştırıldığında R^2 değeri 0.9339 olarak bulunmuştur. Bu değer renk giderimindeki değişimlerin % 93.39'unun model tarafından açıklanabildiğini, sadece % 6.61'inin modelle açıklanamadığını göstermektedir. Modelden tahmin edilen sonuçlar ile deney sonuçlarının karşılaştırması şekil 4.46'da verilmiştir. Çalışmada 0.8137 olarak bulunan düzeltilmiş R^2 değerinin, R^2 değerine yakın olduğu görülmüştür. Bulunan model kullanılarak, renk giderimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri, diğer faktörler orta nokta değerlerinde sabit tutularak çizilmiş ve EK 14'te verilmiştir.

Çizelge 4.32 Demir elektrotlarla renk giderimi için tahmin edilen model katsayıları ve bu katsayıların F ve P değerleri

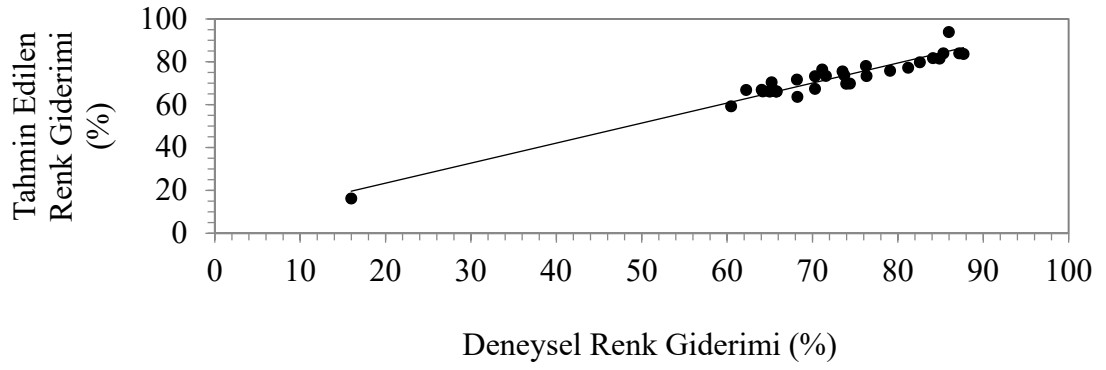
Terim	Katsayı		Standart hata	F	P
	Kodlanmış	Kodlanmamış			
Sabit	57.60	133.7	5.78		0.000
X ₁	-45.6	44.5	14.9	9.41	0.011
X ₂	-4.12	-19.75	7.74	0.28	0.606
X ₃	-8.5	-0.76	10.2	0.70	0.421
X ₄	8.7	-1.36	10.2	0.73	0.410
X ₅	1.8	-49.0	10.2	0.03	0.861
X ₁ ²	-45.3	-8.28	11.9	14.48	0.003
X ₂ ²	22.74	1.123	7.37	9.52	0.010
X ₃ ²	5.67	0.0142	4.33	1.72	0.217
X ₄ ²	3.12	0.0078	4.33	0.52	0.486
X ₅ ²	5.50	13.0	4.33	1.62	0.230
X ₁ X ₂	4.4	0.42	13.0	0.11	0.744
X ₁ X ₃	-9.4	-0.201	15.3	0.38	0.552
X ₁ X ₄	14.8	0.316	15.3	0.93	0.355
X ₁ X ₅	8.7	5.7	15.3	0.32	0.580
X ₂ X ₃	2.93	0.0325	5.89	0.25	0.629
X ₂ X ₄	-1.69	-0.0188	5.89	0.08	0.779
X ₂ X ₅	-1.06	-0.36	5.89	0.03	0.861
X ₃ X ₄	2.49	0.0062	5.82	0.18	0.678
X ₃ X ₅	0.06	0.004	5.82	0.00	0.992
X ₄ X ₅	-0.93	-0.072	5.82	0.03	0.876

Çizelge 4.33 Demir elektrotlarla renk giderimi için ANOVA

Değişimin kaynağı	Serbestlik derecesi	Düz. Kareler toplamı	Düz. Kareler ortalaması	F	P
Model	20	4889.93	244.50	7.77	0.001
Hata	11	346.17	31.47		
Toplam	31	5236.10			

4.5.4.3 Bulanıklık gideriminin istatistiksel analizi

Bu bölümde çizelge 4.29’da verilen, sabit akımda, 600 devir/dk karıştırma hızında, elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın kontrol edilmesiyle gerçekleştirilen MBT çalışmalarının bulanıklık giderimi cevabına ait MINITAB 17 yazılımından elde edilen sonuçlar incelenmiştir.



Şekil 4.46 Demir elektrotlarla renk giderimi için deney sonuçları ve modelden tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması

MINITAB 17 yazılımının çoklu regresyon yöntemi kullanılarak deney verilerine ikinci mertebeden polinom denklemi uydurulmuş ve denklemin katsayıları bulunmuştur. Bulanıklık giderimi için kodlanmamış değişkenler cinsinden elde edilen ikinci mertebeden polinom denklemi eşitlik (4.8)'de, denklemdeki katsayılar ve bu katsayıların standart hataları ile F ve P değerleri çizelge 4.34'te verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 y_{3,Fe} = & 135.9 + 46.9x_1 - 20.66x_2 - 0.48x_3 - 1.22x_4 - 55.5x_5 \\
 & - 8.99x_1^2 + 1.197x_2^2 + 0.01369x_3^2 + 0.01171x_4^2 + 15.14x_5^2 \\
 & + 0.52x_1x_2 - 0.258x_1x_3 + 0.302x_1x_4 + 8.29x_1x_5 + 0.0296x_2x_3 \\
 & - 0.0184x_2x_4 - 0.76x_2x_5 + 0.0028x_3x_4 + 0.022x_3x_5 - 0.232x_4x_5
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

Çizelge 4.34 incelendiğinde x_1 , x_1^2 , x_2^2 terimlerinin P değerlerinin sırasıyla 0.003, 0.001, 0.004 olduğu görülmüş, değerlerin % 95 güven seviyesinde 0.05'ten küçük olması nedeniyle bu terimlerin bulanıklık gideriminde etkili olduğu, diğer terimlerin bulanıklık giderimini önemli ölçüde etkilemediği sonucuna varılmıştır. Modelin uygunluğunun değerlendirilmesi amacıyla ANOVA sonuçları çizelge 4.35'te verilmiştir. Çizelge 4.35'te yer alan F değeri, % 95 güven seviyesinde F dağılımı tablosundan okunan değerden ($F_{0.05}(20, 11) = 2.65$) yüksek ve P değeri de 0.05'ten düşük olduğu için elde edilen modelin deney sonuçlarına iyi uyduğu ve istatistiksel olarak anlamlı olduğu sonucu doğrulanmıştır.

Çizelge 4.34 Demir elektrotlarla bulanıklık giderimi için tahmin edilen model katsayıları ve bu katsayıların F ve P değerleri

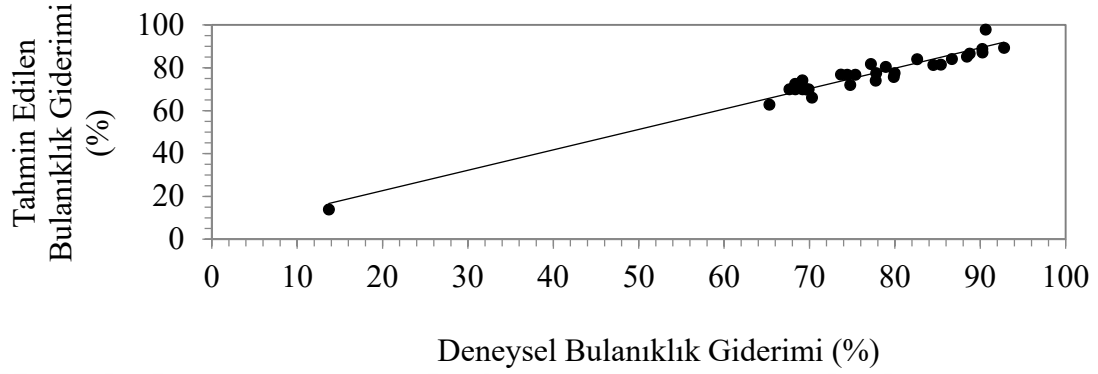
Terim	Katsayı		Standart hata	F	P
	Kodlanmış	Kodlanmamış			
Sabit	59.30	135.9	5.32		0.000
x ₁	-51.5	46.9	13.7	14.15	0.003
x ₂	-3.43	-20.66	7.13	0.23	0.640
x ₃	-10.44	-0.48	9.40	1.23	0.290
x ₄	8.57	-1.22	9.40	0.83	0.381
x ₅	4.14	-55.5	9.40	0.19	0.668
x ₁ ²	-49.2	-8.99	11.0	20.16	0.001
x ₂ ²	24.23	1.197	6.79	12.76	0.004
x ₃ ²	5.48	0.01369	3.99	1.89	0.197
x ₄ ²	4.59	0.01171	3.99	1.38	0.265
x ₅ ²	6.40	15.14	3.99	2.57	0.137
x ₁ x ₂	5.5	0.52	12.0	0.21	0.655
x ₁ x ₃	-12.1	-0.258	14.1	0.73	0.410
x ₁ x ₄	14.2	0.302	14.1	1.01	0.337
x ₁ x ₅	12.6	8.29	14.1	0.80	0.391
x ₂ x ₃	2.66	0.0296	5.42	0.24	0.633
x ₂ x ₄	-1.66	-0.0184	5.42	0.09	0.765
x ₂ x ₅	-2.23	-0.76	5.42	0.17	0.689
x ₃ x ₄	1.11	0.0028	5.36	0.04	0.840
x ₃ x ₅	0.29	0.022	5.36	0.00	0.958
x ₄ x ₅	-3.02	-0.232	5.36	0.32	0.585

Çizelge 4.35 Demir elektrotlarla bulanıklık giderimi için ANOVA

Değişimin kaynağı	Serbestlik derecesi	Düz. Kareler toplamı	Düz. Kareler ortalaması	F	P
Model	20	5783.76	289.19	10.84	0.000
Hata	11	293.41	26.67		
Toplam	31	6077.17			

Eşitlik (4.8)'den tahmin edilen değerler, deneysel değerlerle karşılaştırıldığında R² değeri 0.9517 olarak bulunmuştur. Bu değer bulanıklık giderimindeki değişimlerin % 95.17'sinin model tarafından açıklanabildiğini, sadece % 4.83'ünün modelle açıklanamadığını göstermektedir. Modelden tahmin edilen sonuçlar ile deney sonuçlarının karşılaştırması şekil 4.47'de verilmiştir. Çalışmada 0.8639 olarak bulunan düzeltilmiş R² değerinin, R² değerine yakın olduğu görülmüştür. Bulunan model kullanılarak, bulanıklık giderimi için

faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri, diğer faktörler orta nokta değerlerinde sabit tutularak çizilmiş ve EK 15’te verilmiştir.



Şekil 4.47 Demir elektrotlarla bulanıklık giderimi için deney sonuçları ve modelden tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması

4.5.4.4 AKM gideriminin istatistiksel analizi

Bu bölümde çizelge 4.29’da verilen, sabit akımda, 600 devir/dk karıştırma hızında, elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın kontrol edilmesiyle gerçekleştirilen MBT çalışmalarının AKM giderimi cevabına ait MINITAB 17 yazılımından elde edilen sonuçlar incelenmiştir. MINITAB 17 yazılımının çoklu regresyon yöntemi kullanılarak deney verilerine ikinci mertebeden polinom denklemi uydurulmuş ve denklemin katsayıları bulunmuştur. AKM giderimi için kodlanmamış değişkenler cinsinden elde edilen ikinci mertebeden polinom denklemi eşitlik (4.9)’da, denklemdaki katsayılar ve bu katsayıların standart hataları ile F ve P değerleri çizelge 4.36’da verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 y_{4,Fe} = & -11.0 + 50.64x_1 - 7.72x_2 + 0.741x_3 + 0.356x_4 - 0.2x_5 \\
 & - 6.78x_1^2 + 0.939x_2^2 + 0.00062x_3^2 - 0.00250x_4^2 + 5.19x_5^2 \\
 & - 0.333x_1x_2 - 0.235x_1x_3 + 0.043x_1x_4 + 1.46x_1x_5 + 0.0205x_2x_3 \\
 & - 0.0177x_2x_4 - 1.14x_2x_5 - 0.00049x_3x_4 - 0.064x_3x_5 - 0.163x_4x_5
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

Çizelge 4.36 Demir elektrotlarla AKM giderimi için tahmin edilen model katsayıları ve bu katsayıların F ve P değerleri

Terim	Katsayı		Standart hata	F	P
	Kodlanmış	Kodlanmamış			
Sabit	63.39	-11.0	2.90		0.000
x ₁	-42.58	50.64	7.46	32.54	0.000
x ₂	16.66	-7.72	3.88	18.38	0.001
x ₃	-4.59	0.741	5.12	0.80	0.389
x ₄	1.82	0.356	5.12	0.13	0.729
x ₅	2.51	-0.2	5.12	0.24	0.634
x ₁ ²	-37.15	-6.78	5.98	38.64	0.000
x ₂ ²	19.01	0.939	3.70	26.42	0.000
x ₃ ²	0.25	0.00062	2.17	0.01	0.911
x ₄ ²	-1.00	-0.00250	2.17	0.21	0.654
x ₅ ²	2.19	5.19	2.17	1.02	0.334
x ₁ x ₂	-3.51	-0.333	6.54	0.29	0.602
x ₁ x ₃	-11.02	-0.235	7.68	2.06	0.179
x ₁ x ₄	2.00	0.043	7.68	0.07	0.800
x ₁ x ₅	2.21	1.46	7.68	0.08	0.779
x ₂ x ₃	1.84	0.0205	2.95	0.39	0.546
x ₂ x ₄	-1.60	-0.0177	2.95	0.29	0.600
x ₂ x ₅	-3.32	-1.14	2.95	1.26	0.285
x ₃ x ₄	-0.19	-0.00049	2.92	0.00	0.948
x ₃ x ₅	-0.83	-0.064	2.92	0.08	0.781
x ₄ x ₅	-2.11	-0.163	2.92	0.52	0.484

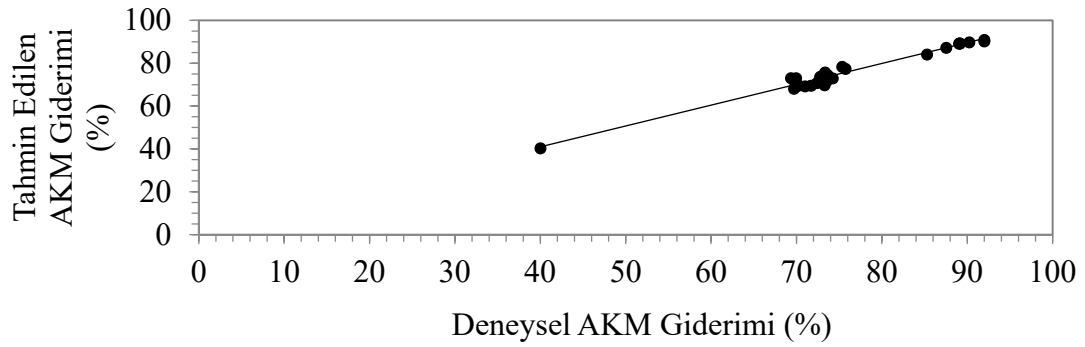
Çizelge 4.36 incelendiğinde x₁, x₂, x₁², x₂² terimlerinin P değerlerinin sırasıyla 0.000, 0.001, 0.000, 0.000 olduğu görülmüş, değerlerin % 95 güven seviyesinde 0.05'ten küçük olması nedeniyle bu terimlerin AKM gideriminde etkili olduğu, diğer terimlerin AKM giderimini önemli ölçüde etkilemediği sonucuna varılmıştır. Modelin uygunluğunun değerlendirilmesi amacıyla ANOVA sonuçları çizelge 4.37'de verilmiştir. Çizelge 4.37'de yer alan F değeri, % 95 güven seviyesinde F dağılımı tablosundan okunan değerden (F_{0.05}(20, 11) = 2.65) yüksek ve P değeri de 0.05'ten düşük olduğu için elde edilen modelin deney sonuçlarına iyi uyduğu ve istatistiksel olarak anlamlı olduğu sonucu doğrulanmıştır.

Eşitlik (4.9)'dan tahmin edilen değerler, deneysel değerlerle karşılaştırıldığında R² değeri 0.9717 olarak bulunmuştur. Bu değer AKM giderimindeki değişimlerin % 97.17'sinin model tarafından açıklanabildiğini, sadece % 2.83'ünün modelle açıklanamadığını göstermektedir.

Çizelge 4.37 Demir elektrotlarla AKM giderimi için ANOVA

Değişimin kaynağı	Serbestlik derecesi	Düz. Kareler toplamı	Düz. Kareler ortalaması	F	P
Model	20	2996.00	149.80	18.92	0.000
Hata	11	87.12	7.92		
Toplam	31	3083.12			

Modelden tahmin edilen sonuçlar ile deney sonuçlarının karşılaştırması şekil 4.48’de verilmiştir. Çalışmada 0.9204 olarak bulunan düzeltilmiş R^2 değerinin, R^2 değerine yakın olduğu görülmüştür. Bulunan model kullanılarak, AKM giderimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri, diğer faktörler orta nokta değerlerinde sabit tutularak çizilmiş ve EK 16’da verilmiştir.



Şekil 4.48 Demir elektrotlarla AKM giderimi için deney sonuçları ve modelden tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması

4.5.4.5 Enerji tüketimi istatistiksel analizi

Bu bölümde çizelge 4.29’da verilen, sabit akımda, 600 devir/dk karıştırma hızında, elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın kontrol edilmesiyle gerçekleştirilen MBT çalışmalarının enerji tüketimi cevabına ait MINITAB 17 yazılımından elde edilen sonuçlar incelenmiştir. MINITAB 17 yazılımının çoklu regresyon yöntemi kullanılarak deney verilerine ikinci mertebeden polinom denklemi uydurulmuş ve denklemin katsayıları bulunmuştur. Enerji tüketimi için kodlanmamış değişkenler cinsinden elde edilen ikinci

mertebeden polinom denklemi eşitlik (4.10)'da, denklemdaki katsayılar ve bu katsayıların standart hataları ile F ve P değerleri çizelge 4.38'de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 y_{5,Fe} = & -106.9 + 9.72x_1 + 11.67x_2 + 1.572x_3 + 1.396x_4 + 10.3x_5 \\
 & + 3.663x_1^2 - 0.297x_2^2 + 0.00196x_3^2 + 0.00096x_4^2 + 9.78x_5^2 \\
 & - 1.388x_1x_2 - 0.038x_1x_3 - 0.440x_1x_4 - 11.82x_1x_5 - 0.1128x_2x_3 \\
 & - 0.0145x_2x_4 + 1.232x_2x_5 - 0.02420x_3x_4 - 0.270x_3x_5 + 1.494x_4x_5
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

Çizelge 4.38 incelendiğinde x_1 , x_2 , x_5 , x_1^2 , x_2^2 , x_5^2 , x_1x_2 , x_1x_4 , x_1x_5 , x_2x_3 , x_3x_4 , x_4x_5 terimlerinin P değerlerinin sırasıyla 0.007, 0.028, 0.007, 0.000, 0.033, 0.016, 0.006, 0.002, 0.005, 0.000, 0.000, 0.000 olduğu görülmüş, değerlerin % 95 güven seviyesinde 0.05'ten küçük olması nedeniyle bu terimlerin enerji tüketiminde etkili olduğu, diğer terimlerin enerji tüketimini önemli ölçüde etkilemediği sonucuna varılmıştır. Modelin uygunluğunun değerlendirilmesi amacıyla ANOVA sonuçları çizelge 4.39'da verilmiştir. Çizelge 4.39'da yer alan F değeri, % 95 güven seviyesinde F dağılımı tablosundan okunan değerden ($F_{0.05(20, 11)} = 2.65$) yüksek ve P değeri de 0.05'ten düşük olduğu için elde edilen modelin deney sonuçlarına iyi uyduğu ve istatistiksel olarak anlamlı olduğu sonucu doğrulanmıştır.

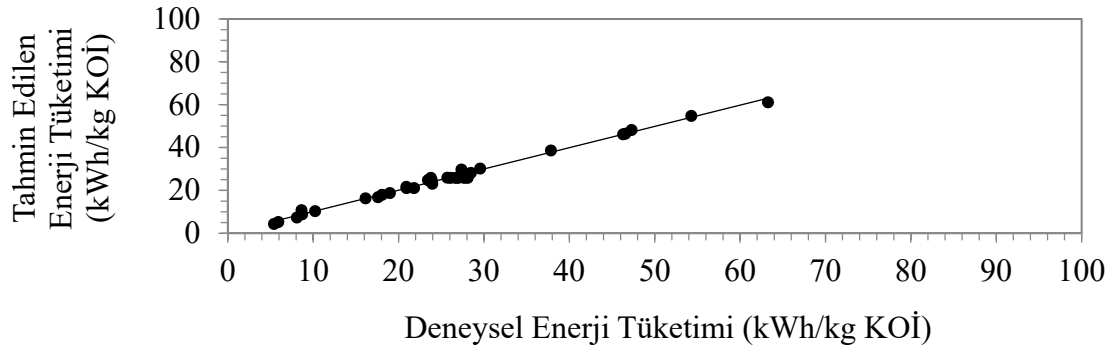
Eşitlik (4.10)'dan tahmin edilen değerler, deneysel değerlerle karşılaştırıldığında R^2 değeri 0.9936 olarak bulunmuştur. Bu değer enerji tüketimindeki değişimlerin % 99.36'sının model tarafından açıklanabildiğini, sadece % 0.64'ünün modelle açıklanamadığını göstermektedir. Modelden tahmin edilen sonuçlar ile deney sonuçlarının karşılaştırması şekil 4.49'da verilmiştir. Çalışmada 0.9819 olarak bulunan düzeltilmiş R^2 değerinin, R^2 değerine yakın olduğu görülmüştür. Bulunan model kullanılarak, KOİ giderimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri, diğer faktörler orta nokta değerlerinde sabit tutularak çizilmiş ve EK 17'de verilmiştir.

Çizelge 4.38 Demir elektrotlarla enerji tüketimi için tahmin edilen model katsayıları ve bu katsayıların F ve P değerleri

Terim	Katsayı		Standart hata	F	P
	Kodlanmış	Kodlanmamış			
Sabit	26.96	-106.9	1.93		0.000
x ₁	16.57	9.72	4.96	11.14	0.007
x ₂	-6.56	11.67	2.58	6.45	0.028
x ₃	-4.88	1.572	3.41	2.06	0.179
x ₄	6.39	1.396	3.41	3.52	0.088
x ₅	11.19	10.3	3.41	10.80	0.007
x ₁ ²	20.06	3.663	3.97	25.47	0.000
x ₂ ²	-6.01	-0.297	2.46	5.98	0.033
x ₃ ²	0.79	0.00196	1.44	0.30	0.597
x ₄ ²	0.38	0.00096	1.44	0.07	0.795
x ₅ ²	4.13	9.78	1.44	8.17	0.016
x ₁ x ₂	-14.52	-1.388	4.35	11.30	0.006
x ₁ x ₃	-1.77	-0.038	5.11	0.12	0.736
x ₁ x ₄	-20.57	-0.440	5.11	16.21	0.002
x ₁ x ₅	-17.98	-11.82	5.11	12.37	0.005
x ₂ x ₃	-10.15	-0.1128	1.97	26.68	0.000
x ₂ x ₄	-1.30	-0.0145	1.97	0.44	0.521
x ₂ x ₅	3.60	1.232	1.97	3.36	0.094
x ₃ x ₄	-9.68	-0.02420	1.94	24.82	0.000
x ₃ x ₅	-3.52	-0.270	1.94	3.27	0.098
x ₄ x ₅	19.42	1.494	1.94	99.95	0.000

Çizelge 4.39 Demir elektrotlarla enerji tüketimi için ANOVA

Değişimin kaynağı	Serbestlik derecesi	Düz. Kareler toplamı	Düz. Kareler ortalaması	F	P
Model	20	5969.34	298.467	85.21	0.000
Hata	11	38.53	3.503		
Toplam	31	6007.87			



Şekil 4.49 Demir elektrotlarla enerji tüketimi için deney sonuçları ve modelden tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması

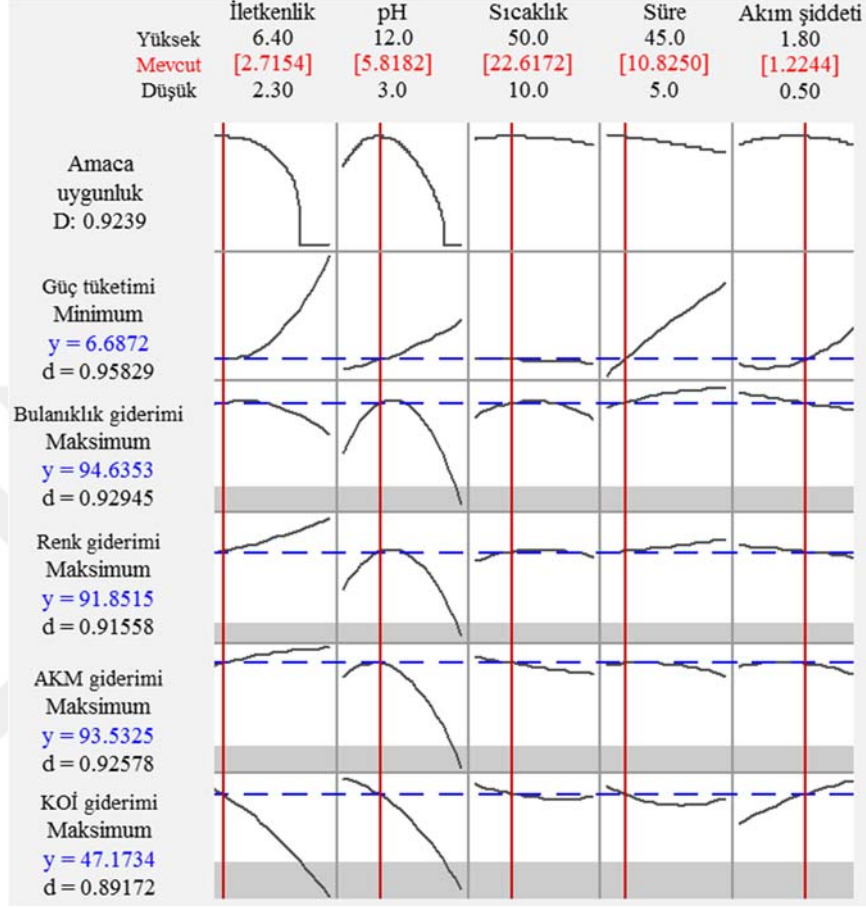
4.5.5 En uygun işletim koşullarının belirlenmesi

Elektrokoagülasyon prosesi ile kağıt endüstrisi atık sularının arıtımında sistemin cevabını tahmin ederek kirlilik giderimleri ve enerji tüketimi değerlerini bulabilmek amacıyla işletme parametrelerinden elektriksel iletkenlik, sıcaklık ve pH'nin kontrol edildiği koşullarda alüminyum ve demir elektrotların kullanıldığı iki ayrı durum için model denklemleri elde edilmiş ve bu denklemlerin uygunluğu bir önceki bölümde incelenmiştir. Bu bölümde CYY'nin faktörleri olan işletme parametrelerinin en uygun değerlerini belirlemek amacıyla yapılan optimizasyon çalışmaları anlatılmıştır.

Kağıt endüstrisi atık sularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımında KOİ, renk, bulanıklık, AKM giderim yüzdelelerini en yüksek seviyeye çıkarmak, enerji tüketimini en düşük seviyeye indirmek amacıyla alüminyum ve demir elektrotların kullanılmasıyla yapılan çalışmalardan elde edilen model denklemleri ve MINITAB 17 yazılımı kullanılarak optimizasyon çalışmaları yapılmış ve faktörlerin cevaplar üzerindeki etkilerini içeren optimizasyon sonuçları şekil 4.50-4.51'de verilmiştir.

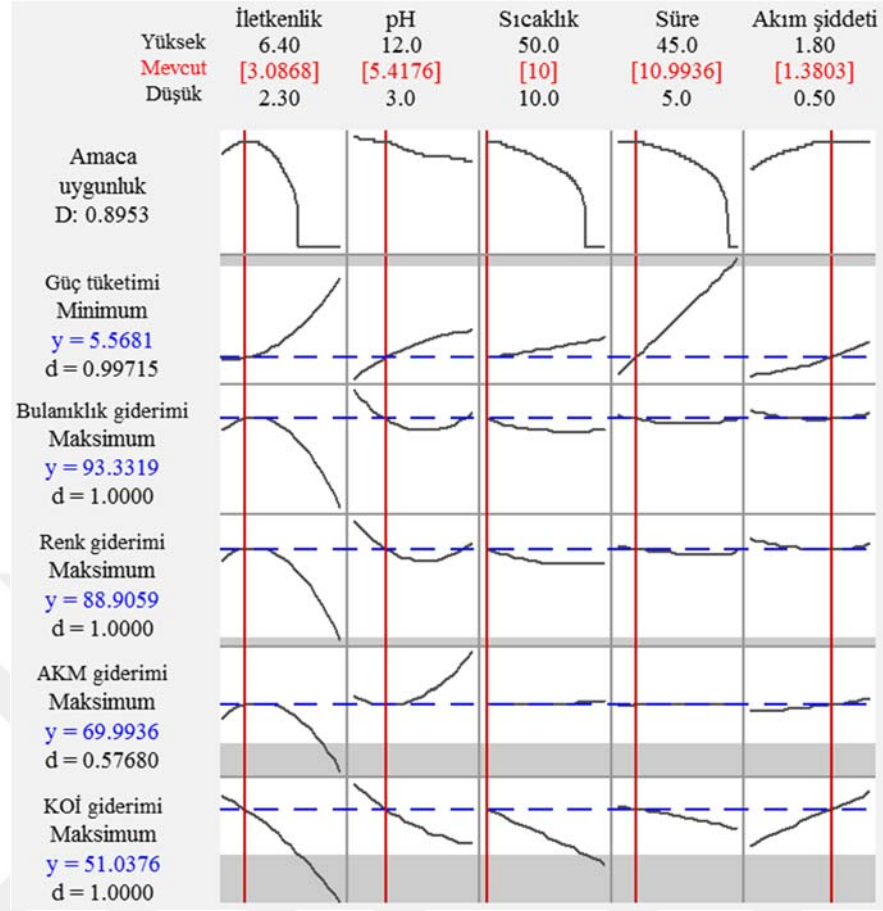
Alüminyum elektrotlar kullanılarak yapılan optimizasyon çalışmasında elektriksel iletkenlik, pH, sıcaklık, süre ve akım şiddeti için en uygun değerler sırasıyla 2.72 mS/cm, 5.82, 22.62 °C, 10.83 dakika ve 1.22 A olarak bulunmuştur. Amaca uygunluğun 0.9239 bulunduğu bu çalışmada en uygun işletme parametresi değerleriyle çalışıldığında % 47.17

KOİ, % 91.85 renk, % 94.54 bulanıklık, % 93.53 AKM giderimi ve 6.69 kWh/kg KOİ enerji tüketimi hedeflenmektedir.



Şekil 4.50 Alüminyum elektrotlarla yapılan çalışmaya ait optimizasyon sonuçları

Demir elektrotlar kullanılarak yapılan optimizasyon çalışmasında elektriksel iletkenlik, pH, sıcaklık, süre ve akım şiddeti için en uygun değerler sırasıyla 3.09 mS/cm, 5.42, 10 °C, 10.99 dakika ve 1.38 A olarak bulunmuştur. Amaca uygunluğun 0.8953 bulunduğu bu çalışmada en uygun işletme parametresi değerleriyle çalışıldığında % 51.04 KOİ, % 88.91 renk, % 93.33 bulanıklık, % 69.99 AKM giderimi ve 5.57 kWh/kg KOİ enerji tüketimi hedeflenmektedir.



Şekil 4.51 Demir elektrotlarla yapılan çalışmaya ait optimizasyon sonuçları

4.5.6 En uygun işletim koşullarında kontrollü ve kontrolsüz arıtım çalışmaları

Elektrokoagülasyon prosesi ile kağıt endüstrisi atık sularının arıtımında işletme parametrelerinden elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın kontrol edildiği koşullarda alüminyum ve demir elektrotların kullanıldığı iki ayrı durum için yapılan çalışmalar sonucunda elektriksel iletkenlik, pH, sıcaklık, süre ve akım şiddeti için en uygun değerler önceki bölümde elde edilmişti. Bu bölümde alüminyum ve demir elektrotlar için en uygun işletme parametrelerinde gerçekleştirilen kontrollü ve kontrolsüz arıtım çalışmaları ve bu çalışmaların sonuçlarına yer verilmiştir.

600 devir/dk karıştırma hızında alüminyum elektrotlar ile elektriksel iletkenlik, pH, sıcaklık, süre ve akım şiddetinin sırasıyla en uygun değerleri olan 2.72 mS/cm, 5.82, 22.62 °C, 10.83 dakika ve 1.22 A koşullarında, elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın GMV

kontrol edicilerle kontrol edilmesiyle yapılan çalışma şekil 4.52’de, elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın kontrol edilmediği çalışma şekil 4.53’te verilmiştir. En uygun koşullarda yapılacak kontrollü arıtım çalışmasında MINITAB 17 yazılımı optimizasyon programı tarafından hedeflenen ve çalışmalarda elde edilen KOİ, renk, bulanıklık, AKM giderimleri ve enerji tüketimleri çizelge 4.40’ta verilmiştir.

Çizelge 4.40 Alüminyum elektrotlar ile en uygun işletim koşullarında gerçekleştirilen arıtım çalışmalarından elde edilen kirlilik giderimleri ve enerji tüketimleri

Arıtım çalışması	KOİ giderimi (%)	Renk Giderimi (%)	Bulanıklık giderimi (%)	AKM giderimi (%)	Enerji tüketimi (kWh/kg KOİ)
Hedeflenen	47.17	91.85	94.54	93.53	6.69
Kontrollü	42.21	100	98.61	97.06	8.82
Kontrolsüz	28.84	99.48	99.10	94.12	13.08

Çizelge 4.40 incelendiğinde, kontrollü arıtım çalışmasında elde edilen KOİ giderimi ve enerji tüketiminin hedeflenen değerlere sırasıyla % 90 ve % 76 oranında uyduğu, renk, bulanıklık ve AKM giderimlerinde hedeflenen değerlerin üstüne çıkıldığı görülmüştür. Sonuçlar kağıt endüstrisi atık sularının elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtımı için alüminyum elektrotlarla yapılan optimizasyon çalışmasının başarılı olduğunu göstermiştir. En uygun işletme koşullarında yapılan kontrollü ve kontrolsüz arıtım çalışmaları karşılaştırıldığında kontrollü çalışmada KOİ gideriminde artış, enerji tüketiminde düşüş görülmüş olup renk, bulanıklık, AKM giderimlerinde önemli bir değişim gözlenmemiştir. Yapılan çalışmada akım verimi % 127.03 olarak hesaplanmıştır.

600 devir/dk karıştırma hızında demir elektrotlar ile elektriksel iletkenlik, pH, sıcaklık, süre ve akım şiddetinin sırasıyla en uygun değerleri olan 3.09 mS/cm, 5.42, 10 °C, 10.99 dakika ve 1.38 A koşullarında, elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın GMV kontrol edicilerle kontrol edilmesiyle yapılan çalışma şekil 4.54’te, elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın kontrol edilmediği çalışma şekil 4.55’te verilmiştir. En uygun koşullarda yapılacak kontrollü arıtım çalışmasında MINITAB 17 yazılımı optimizasyon programı tarafından hedeflenen ve çalışmalarda elde edilen KOİ, renk, bulanıklık, AKM giderimleri ve enerji tüketimleri çizelge 4.41’de verilmiştir.

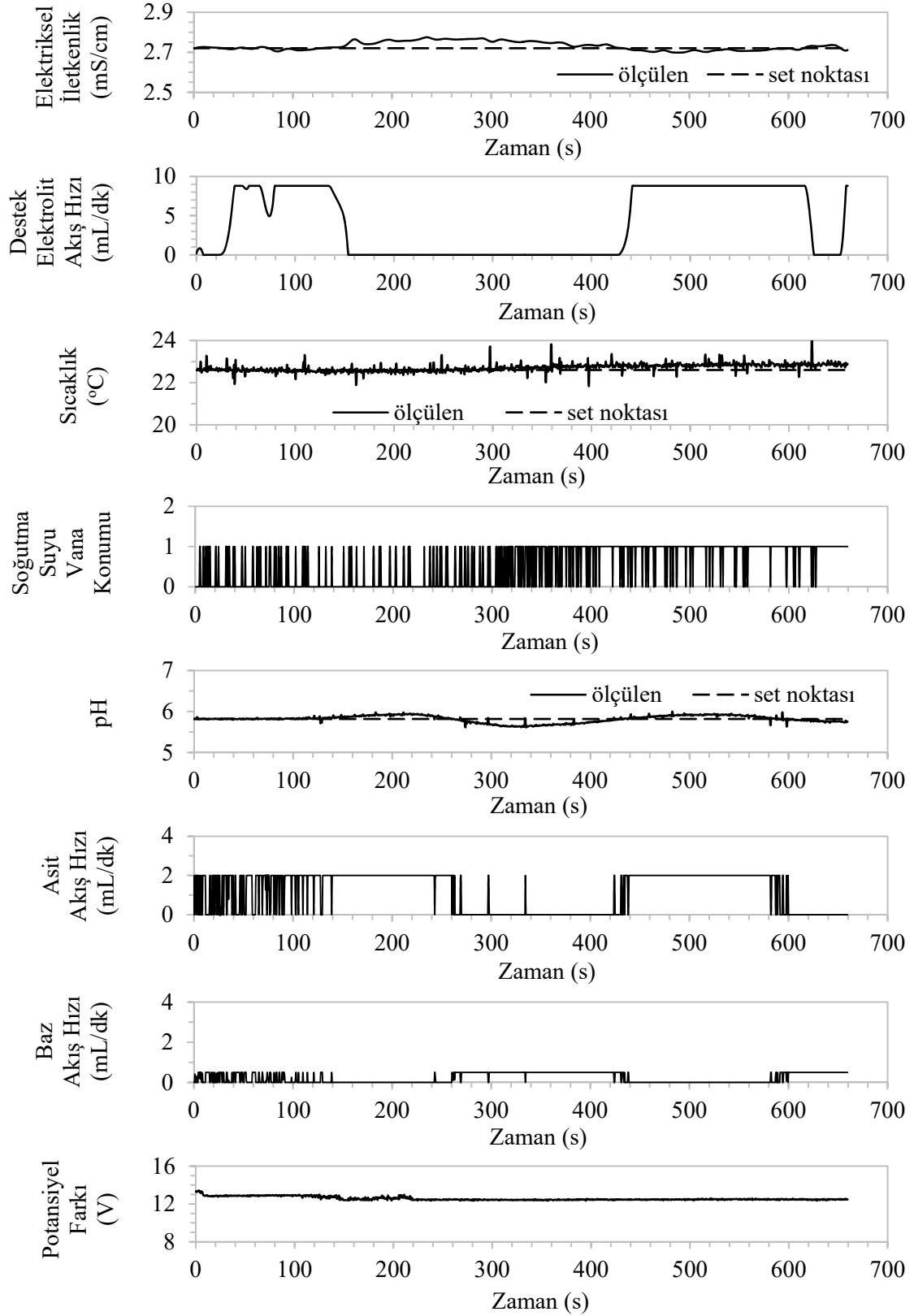
Çizelge 4.41 Demir elektrotlar ile en uygun işletim koşullarında gerçekleştirilen arıtım çalışmalarından elde edilen kirlilik giderimleri ve enerji tüketimleri

Arıtım çalışması	KOİ giderimi (%)	Renk Giderimi (%)	Bulanıklık giderimi (%)	AKM giderimi (%)	Enerji tüketimi (kWh/kg KOİ)
Hedeflenen	51.04	88.91	93.33	69.99	5.57
Kontrollü	30.29	80.93	83.52	76.47	14.58
Kontrolsüz	29.57	15.98	0	58.82	16.39

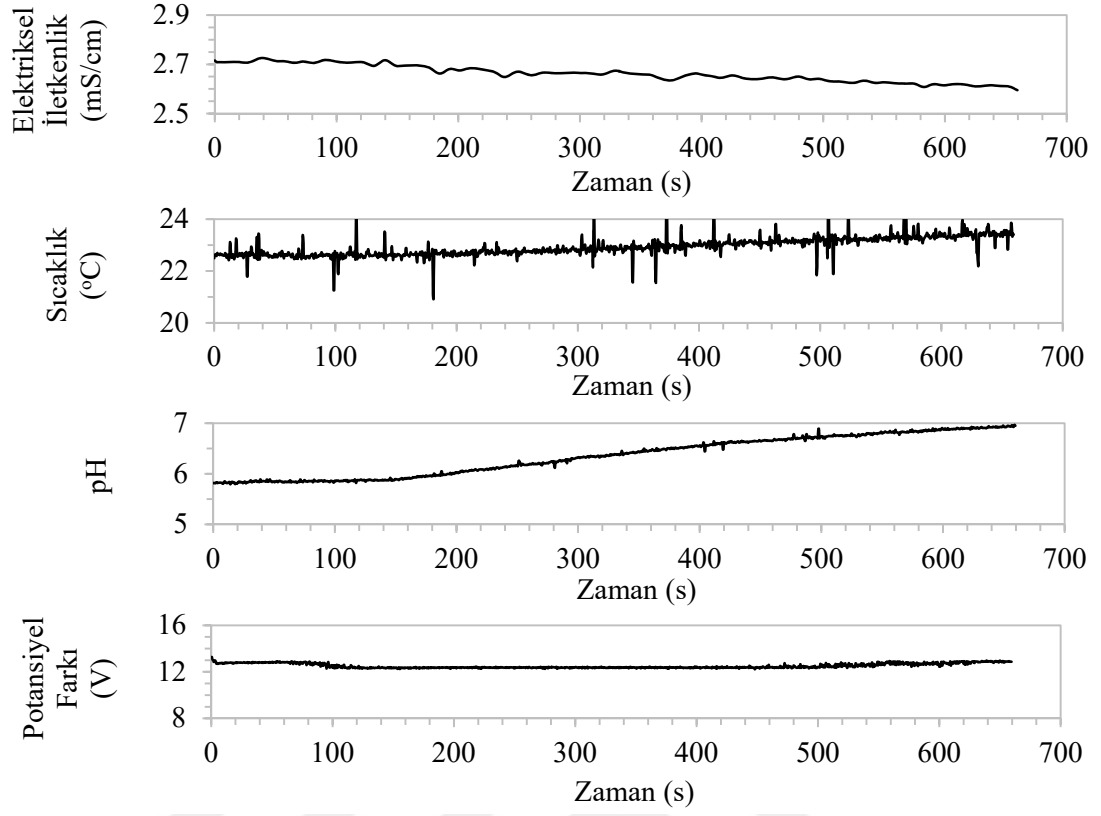
Çizelge 4.41 incelendiğinde, kontrollü arıtım çalışmasında elde edilen KOİ, renk, bulanıklık giderimi ve enerji tüketiminin hedeflenen değerlere sırasıyla % 59, % 91, % 90 ve % 38 oranında uyduğu, AKM gideriminde hedeflenen değer üstüne çıkıldığı görülmüştür. Sonuçlar kağıt endüstrisi atık sularının elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtımı için demir elektrotlarla yapılan optimizasyon çalışmasının kabul edilebilir olduğunu göstermiştir. En uygun işletme koşullarında yapılan kontrollü ve kontrolsüz arıtım çalışmaları karşılaştırıldığında kontrollü çalışmada renk, bulanıklık, AKM giderimlerinde artış görülmüş olup KOİ giderimi ve enerji tüketiminde önemli bir değişim gözlenmemiştir. Yapılan çalışmada akım verimi % 56.54 olarak hesaplanmıştır.

Alüminyum ve demir elektrotlar kullanılarak kontrollü en uygun işletim koşullarında gerçekleştirilen arıtım çalışmalarının sonuçları karşılaştırıldığında alüminyum elektrotlar kullanılarak elde edilen KOİ, renk, bulanıklık, AKM giderimlerinin demir elektrotlar kullanılarak elde edilen kirlletici giderimlerinden sırasıyla % 11.92, % 19.07, % 15.09, % 20.59 daha fazla, giderilen kg KOİ başına enerji tüketiminin ise % 39.92 oranında daha az olduğu görülmektedir.

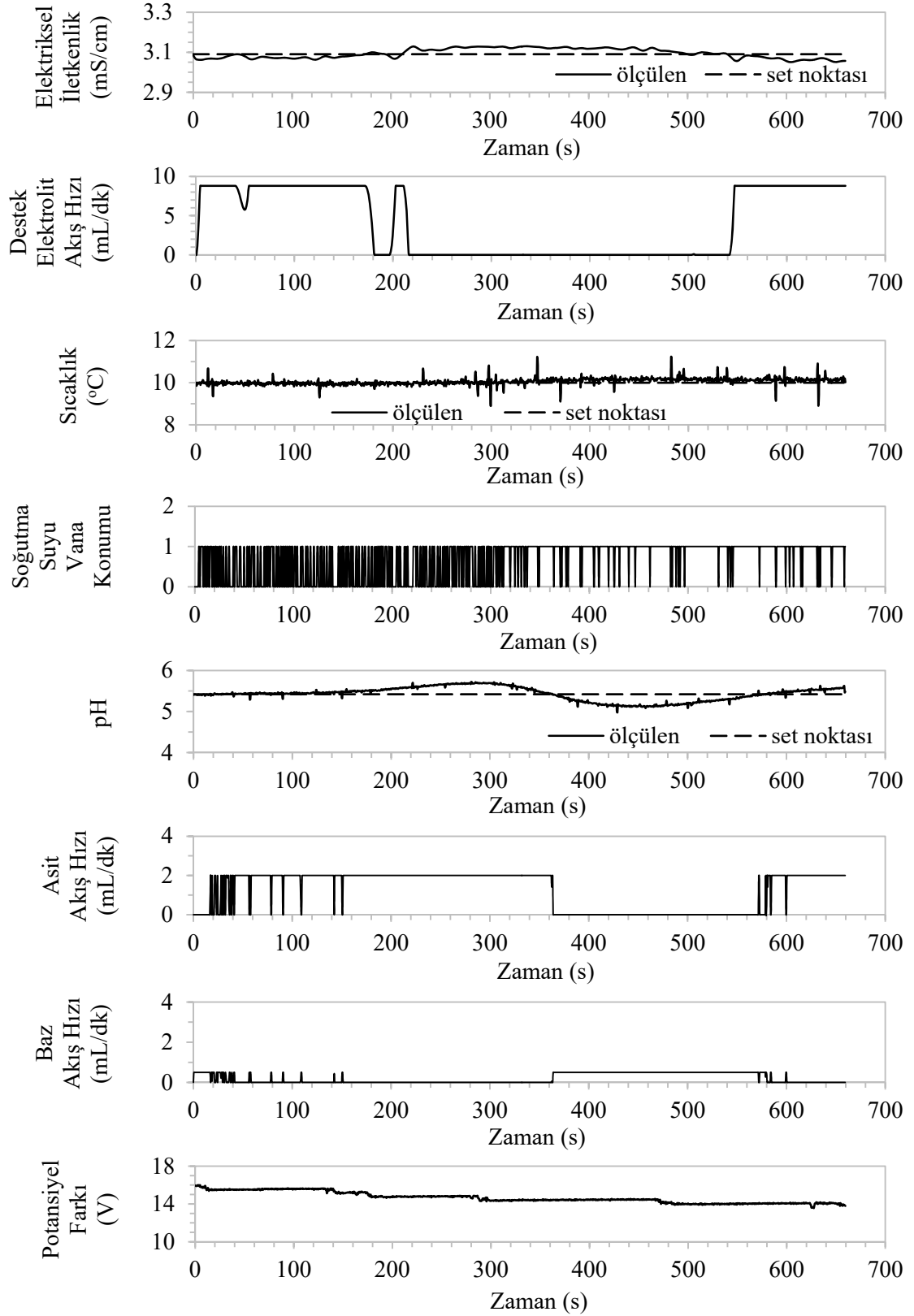
Bu sonuçlar ışığında kağıt endüstrisi atık sularının elektrokoagülasyonla arıtımında alüminyum elektrotların kullanımının daha uygun olduğu belirlenmiştir. Alüminyum elektrotlar kullanılarak en uygun koşullarda gerçekleştirilen arıtım çalışması sonucunda elde edilen arıtılmış suyun KOİ, renk, bulanıklık ve AKM değerleri sırasıyla 370.56 mg/L, 0 CU, 0.92 NTU, 1.74 mg/L'dir.



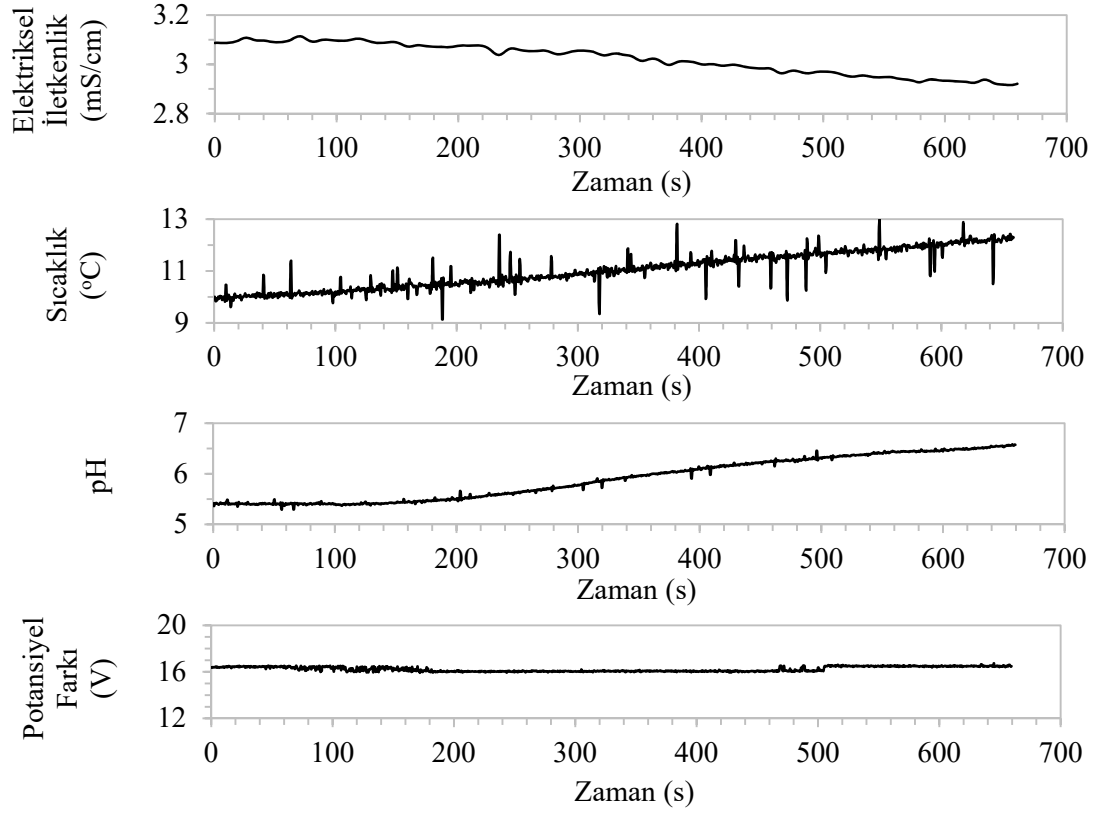
Şekil 4.52 Alüminyum elektrotlar ile en uygun işletim koşullarında gerçekleştirilen kontrollü arıtım çalışması



Şekil 4.53 Alüminyum elektrotlar ile en uygun işletim koşullarında gerçekleştirilen kontrolsüz arıtım çalışması



Şekil 4.54 Demir elektrotlar ile en uygun işletim koşullarında gerçekleştirilen kontrollü arıtım çalışması



Şekil 4.55 Demir elektrotlar ile en uygun işletim koşullarında gerçekleştirilen kontrolsüz arıtım çalışması

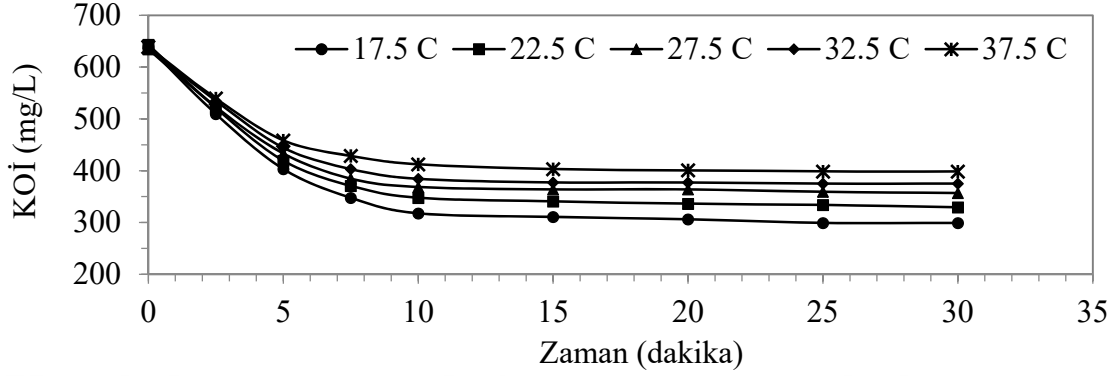
4.6 Reaksiyon Kinetiğinin İncelenmesi

Bu bölümde kağıt endüstrisi atık sularının elektrokimyasal yöntemle arıtılması esnasında gerçekleşen tepkimenin hız ifadesini belirlemek amacıyla çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Tepkime hızı, endüstriyel atık suların karmaşık bileşiminden dolayı eşitlik (2.186)'dan uyarlanarak eşitlik (4.11)'de verildiği gibi kirlilik parametrelerinden olan KOİ derişimine bağlı olarak ifade edilebilmektedir (Körbahti 2003).

$$-\frac{d[KOI]}{dt} = k[KOI]^n \quad (4.11)$$

Alüminyum elektrotlar kullanılarak bulunan en uygun işletme koşulları olan 2.72 mS/cm elektriksel iletkenlik, 5.82 pH, 10.83 dakika süre ve 1.22 A akım şiddetinde ve 17.5 °C, 22.5 °C, 27.5 °C, 32.5 °C, 37.5 °C sıcaklıklarında elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın

kontrol edildiği çalışmalardan elde edilen KOİ (mg/L) değerlerinin zamanla değişimi şekil 4.56’da verilmiştir.



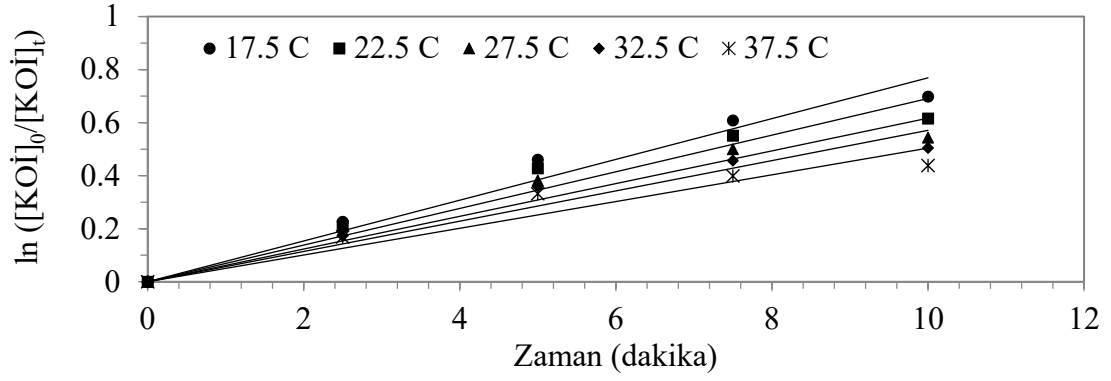
Şekil 4.56 En uygun işletme koşulları ve farklı sıcaklıklarda KOİ değerlerinin zamanla değişimi

Literatürde yapılan çalışmalarda elektrokoagülasyon yöntemi ile atık su arıtımında gerçekleşen tepkimenin yalancı birinci (n=1) veya ikinci mertebe (n=2) olduğu ifade edilmiştir (Kobya vd. 2006, Kongjao vd. 2008, Uğurlu vd. 2008, Wang ve Chou 2009, Chou vd. 2010). Eşitlik (4.11) yalancı birinci ve ikinci mertebe tepkimeler için doğrusallaştırıldığında sırasıyla eşitlik (4.12)-(4.13) elde edilmektedir.

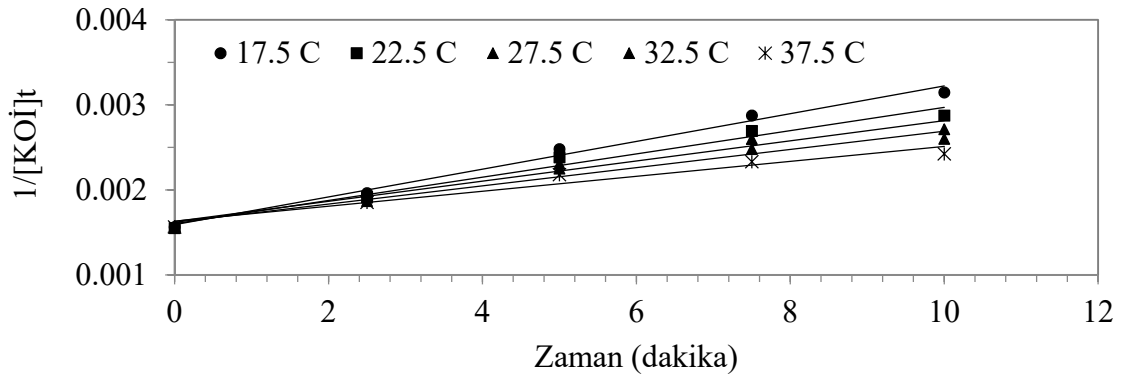
$$\ln \frac{[KOİ]_0}{[KOİ]_t} = kt \quad (4.12)$$

$$\frac{1}{[KOİ]_t} - \frac{1}{[KOİ]_0} = kt \quad (4.13)$$

Eşitlik (4.12) için zamana karşı $\ln ([KOİ]_0 / [KOİ]_t)$, eşitlik (4.13) için zamana karşı $1/[KOİ]_t$ grafikleri çizilerek şekil 4.57-4.58’de verilmiştir. Şekil 4.57-4.58’de yer alan doğruların eğimlerinden hesaplanan hız sabiti değerleri ile doğruların kararlılık katsayıları çizelge 4.42’de verilmiştir.



Şekil 4.57 Farklı sıcaklıklar için yalancı birinci mertebeden tepkime hızı varsayımı



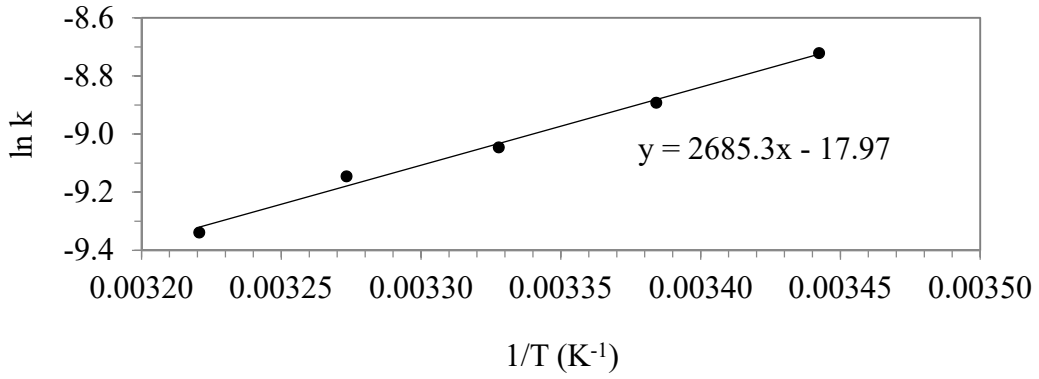
Şekil 4.58 Farklı sıcaklıklar için yalancı ikinci mertebeden tepkime hızı varsayımı

Çizelge 4.42 Yalancı birinci ve ikinci mertebeden tepkime hızı varsayımları için farklı sıcaklıklarda tepkime hız sabitleri ve kararlılık katsayıları

Sıcaklık (°C)	Yalancı 1.mertebe model		Yalancı 2. mertebe model	
	$k \times 10^2 \text{ (min}^{-1}\text{)}$	R^2	$k \times 10^4 \text{ (Lmg}^{-1}\text{min}^{-1}\text{)}$	R^2
17.5	7.69	0.9606	1.63	0.9900
22.5	6.91	0.9415	1.38	0.9790
27.5	6.17	0.9336	1.18	0.9688
32.5	5.71	0.9338	1.07	0.9684
37.5	5.04	0.9012	0.88	0.9534

Çizelge 4.42 incelendiğinde kararlılık katsayılarının ikinci mertebe tepkime hızı varsayımı için daha yüksek olduğu görülmüş ve elektrokoagülasyon yöntemi ile kağıt endüstrisi atık sularının kontrollü koşullarda yapılan arıtım çalışmasında KOİ giderim hızının yalancı ikinci mertebe olması varsayımının daha uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Farklı sıcaklıklarda yapılan arıtım çalışmalarından hesaplanan hız sabitleri için eşitlik 2.192 ve

şekil 2.31’de belirtildiği üzere (1/T, ln k) grafiği çizilmiş, elde edilen doğrunun eğiminden aktivasyon enerjisi -22.33 kJ/mol, kaymasından Arrhenius sabiti 1.57×10^{-8} dakika⁻¹ bulunmuştur (Şekil 4.59).



Şekil 4.59 Yalancı ikinci mertebe tepkime hız sabitinin sıcaklıkla değişimi

Yapılan çalışma sonucunda KOİ giderim hızının sıcaklık arttıkça azaldığı görülmektedir. Bu bulgu şekil 4.50’de verilen optimizasyon sonuçlarında sıcaklık faktörünün KOİ giderimine etkisini gösteren ana etki çizimi ile de uyumludur. Eşitlik 2.191’deki k değeri ve çalışma sonucunda bulunan kinetik sabitler eşitlik 4.11’de yerine yazılırsa aşağıda eşitlik 4.14’te verilen hız ifadesi elde edilmiş olur.

$$-r_{KOI} = 1.57 \times 10^{-8} e^{\left(\frac{22330}{8.314T}\right)} [KOI]^2 \quad (4.14)$$

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu tez kapsamında Zonguldak'taki 80000 ton/yıl Kraft kağıt üretim kapasiteli, selüloz üretiminin de yapıldığı bir tesisten temin edilen kağıt endüstrisi atık sularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımında kontrol etkinliğinin ve işletme parametrelerinin kontrol edilmesinin giderim verimlerine etkilerinin gözlenmesi amacıyla kontrol çalışmaları, en uygun işletim parametrelerinin elde edilmesi amacıyla optimizasyon çalışmaları ve tepkime kinetiğinin belirlenmesi amacıyla kinetik çalışmaları yapılmıştır.

Açık hat işletim ile prosesin 45 dakika işletim süresi boyunca elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklık parametrelerinin değişimini incelemek amacıyla gerçekleştirilen çalışmada 600 devir/dk karıştırma hızı, 1 A sabit akım koşullarında atık suyun elektriksel iletkenliği 0.2 mS/cm düşmüş, sabit akım koşulunu sağlamak için gerekli potansiyel farkı artarak sistemin enerji tüketimini arttırmış, pH'si 1 birim yükselerek sudaki çözünürlüğü yüksek iyonik bileşiklerin oluşumuna neden olarak giderim verimlerinde düşüşe sebep olmuş, sıcaklığı 4°C yükselerek elektriksel iletkenlik ve sıcaklık üzerinde yük etkisi oluşturmuş, metal hidroksitlerin çözünürlüklerini arttırarak kirlilik giderim verimine olumsuz etki yaratmıştır. Çalışmada KOİ, renk, bulanıklık, AKM giderimi ve enerji tüketimi sırasıyla % 34.58, % 96.56, % 99.23, % 96.43 ve 128.25 kWh/kg KOİ olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kağıt endüstrisi atık sularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımında elektriksel iletkenlik, sıcaklık ve pH'nin kontrol edilmesi uygun görülmüştür. İletkenlik, pH ve sıcaklık parametreleri kontrol edilen değişkenler; sırasıyla 0.04 M NaCl destek elektrolit, 0.1 M HCl asit ve 0.1 M NaOH baz akış hızları ve 12.5 °C'de soğutma suyu akış hızı ayarlanabilen değişkenler olarak seçilmiştir.

Kontrol edilen değişkenlerin ayarlanabilen değişkenlerle değişimlerinin modellenebilmesi amacıyla dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Elektriksel iletkenlikteki değişimler elektrokoagülasyon işleminin uygulandığı deneysel çalışmada destek elektrolit olarak kullanılan 0.04 M NaCl çözeltisi akış hızına 0 mL/dk'dan 4.4 mL/dk değerine basamak etki verilerek incelenmiş ve elektriksel iletkenliğin yaklaşık 60 dakikalık işletimde 2.47 mS/cm'den 2.64 mS/cm değerine yükseldiği gözlenmiştir. Sıcaklıktaki değişimler 600 devir/dk karıştırma hızı, 1 A sabit akım altında elektrokoagülasyon işleminin uygulandığı

başka bir deneysel çalışmada reaktör etrafındaki ceketten geçen 12.5 °C'deki soğutma suyunun kapalı konumdaki vanasının açık konuma getirilmesiyle incelenmiş, çalışmada sıcaklığın yaklaşık 30 dakikalık işletimde 22.2 °C'den 19.2 °C'ye düştüğü gözlenmiştir. pH'deki değişimlerin incelenmesi için 600 devir/dk karıştırma hızı, 1 A sabit akım altında elektrokoagülasyon işleminin uygulandığı çalışmada 250. saniyede sisteme 0 mL/dk'dan 5 mL/dk'ya pulse etki verilerek 0.1 M HCl gönderilmiş, pH yatışkın koşula ulaştıktan sonra asit beslemesi kesilerek 0 mL/dk'dan 5 mL/dk'ya basamak etki verilerek 0.1 M NaOH gönderilmiştir. pH ilk 250 saniyede 7.93'ten 8.15'e yükselmiş, asit akış hızına verilen 3 dakikalık pulse etkiyle pH'nin 8.15'ten 7.71'e düştüğü, baz akış hızına verilen 10 dakikalık basamak etkiyle pH'nin 7.71'den 8.80'e yükseldiği görülmüştür.

Elektriksel iletkenlik, sıcaklık ve pH için yapılan dinamik çalışmalardan elde edilen veriler MATLAB™'da kodlanan YEKK algoritmasında ayrı ayrı kullanılmış, kovaryans matrisin başlangıç değeri 1000, unutma çarpanı 0.99 model mertebesi çıkış değişkenine göre 2, giriş değişkenine göre 1. mertebeden seçilmiş ve yapılan modelleme çalışmalarında elektriksel iletkenlik, sıcaklık ve pH için ISE değerleri sırasıyla 0.0013, 0.0019, 0.0009 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler modelleme çalışmasının başarıyla gerçekleştirildiğini ve elde edilen model parametrelerinin sistemi tanımlamakta kullanılabileceğini göstermektedir.

Kontrol edilen değişkenlerin MATLAB™'da kodlanan kontrol algoritmaları kullanılarak sabit akım koşulunda SISO ve MIMO kontrolleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan tüm kontrol çalışmaları 600 devir/dk karıştırma hızı, 1 A sabit akım altında 45 dakika süre ile gerçekleştirilmiştir. Set noktaları elektriksel iletkenlik için 2 mS/cm, pH için 8, sıcaklık için 20 °C olarak seçilmiştir.

Elektriksel iletkenlik, sıcaklık ve pH parametrelerinin kontrol edilerek istenen değerde tutulması amacıyla ilk olarak PID kontrol çalışmaları yapılmış, kutup yerleştirme yöntemi ile her bir işletim parametresi için en uygun PID parametreleri belirlenmiştir. K_c , τ_I , τ_D değerleri elektriksel iletkenlik için sırasıyla 5, 0.05, 0.01, sıcaklık için 48, 0.05, 0.01, koordineli pH kontrolünde asit akış hızı ayarı için 1000, 0.05, 0.01, baz akış hızı ayarı için 1, 0.06, 0.4 olarak bulunmuştur. Bulunan kutupların birim çemberdeki yerleşimleri

elektriksel iletkenlik, sıcaklık ve pH sistemlerinin karakteristik eşitliklerinin köklerinin gerçek ve kapalı devre yanıtlarının salınımsız olduğunu göstermektedir. Performans kriterleri ISE, IAE, ITAE, ITSE yapılan çalışmalarda sırasıyla elektriksel iletkenlik kontrolü için 7.87, 177.36, 9.58×10^5 ve 113.40, sıcaklık kontrolü için 655.71, 1457.05, 7.87×10^6 , 2.97×10^6 , koordineli pH kontrolü için 228.10, 854.04, 4.61×10^6 , 15.44×10^4 olarak hesaplanmıştır. Çalışmada KOİ, renk, bulanıklık, AKM giderimi ve enerji tüketimi sırasıyla % 37.82, % 97.71, % 99.17, % 97.62 ve 115.62 kWh/kg KOİ olarak hesaplanmıştır. pH kontrol çalışmalarında elektriksel iletkenlik ve sıcaklık kontrol edicilerinin set noktalarını başarıyla yakalamış olmaları ve bu durumun pH kontrolü üzerinde olumsuz bir etki yaratmamış olması MIMO kontrolün amacına uygun bir şekilde gerçekleştirilebildiğini göstermektedir.

Yapılan GPC kontrol çalışmalarında kontrol edici parametreleri λ , N_2 , N_U 'nun ve performans kriterleri ISE, IAE, ITAE, ITSE'nin en uygun değerleri sırasıyla elektriksel iletkenlik için kontrol edici parametreleri olarak 0.0005, 2, 2, performans kriterleri olarak 1.44, 71.13, 3.84×10^5 , 6.80, koordineli pH kontrolünde asit ve baz akış hızı ayarlanabilen değişkenleri için kontrol edici parametreleri olarak 0.000001, 2, 1, performans kriterleri olarak 79.23, 561.86, 3.03×10^6 , 1.35×10^4 , ve sıcaklık için kontrol edici parametreleri olarak 0.00001, 2, 1, performans kriterleri olarak 377.94, 901.14, 4.87×10^6 , 1.70×10^6 olarak bulunmuştur. Çalışmada KOİ, renk, bulanıklık, AKM giderimi ve enerji tüketimi sırasıyla % 43.70, % 98.47, % 99.65, % 100 ve 88.18 kWh/kg KOİ olarak hesaplanmıştır.

Yapılan GMV kontrol çalışmalarında kontrol edici parametresi λ ve performans kriterleri ISE, IAE, ITAE, ITSE'nin en uygun değerleri sırasıyla elektriksel iletkenlik için kontrol edici parametresi olarak 0.00005 performans kriterleri olarak 0.80, 52.24, 2.82×10^5 , 2.13, koordineli pH kontrolünde asit ve baz akış hızı ayarlanabilen değişkenleri için kontrol edici parametresi olarak 0.0000001, performans kriterleri olarak 32.69, 358.97, 1.94×10^6 , 0.23×10^4 , ve sıcaklık için kontrol edici parametresi olarak 0.00001, performans kriterleri olarak 308.50, 805.54, 4.35×10^6 , 1.71×10^6 olarak bulunmuştur. Çalışmada KOİ, renk, bulanıklık, AKM giderimi ve enerji tüketimi sırasıyla % 44.54, % 98.47, % 99.65, % 100 ve 80.17 kWh/kg KOİ olarak hesaplanmıştır.

Yapılan adaptif GMV kontrol çalışmalarında parametreler P, Q, R'nin ve performans kriterleri ISE, IAE, ITAE, ITSE'nin en uygun değerleri sırasıyla elektriksel iletkenlik için kontrol edici parametreleri olarak 5, 1, 5, performans kriterleri olarak 7.33, 165.55, 8.94×10^5 , 112.84, koordineli pH kontrolünde asit akış hızı ayarlanabilen değişkeni için kontrol edici parametreleri olarak 2, 1, 2, baz akış hızı ayarlanabilen değişkeni için kontrol edici parametreleri olarak 2, 0.8, 2, performans kriterleri olarak 167.89, 777.17, 4.20×10^6 , 6.27×10^4 olarak bulunmuş, sıcaklık GMV kontrol edici ile kontrol edilmiştir. Çalışmada KOİ, renk, bulanıklık, AKM giderimi ve enerji tüketimi sırasıyla % 42.86, % 97.92, % 99.24, % 96.43 ve 93.30 kWh/kg KOİ olarak hesaplanmıştır.

Elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklık için yapılan MIMO PID, GPC, GMV ve adaptif GMV çalışmalarının performans kriterleri incelendiğinde üç işletim parametresi için en küçük ISE, IAE, ITAE ve ITSE değerlerinin GMV kontrol edici kullanıldığında elde edildiği görülmüştür. Kontrollü koşullarda yapılan arıtım çalışmalarının sonuçları kontrolsüz koşullarda gerçekleştirilen çalışmanın sonuçları ile kıyaslandığında kontrol uygulamasının KOİ giderimini % 9.96 arttırdığı, diğer kirlilik parametrelerinin gideriminde ise anlamlı bir değişim yaratmadığı gözlenmiştir. Gerek kontrollü gerekse kontrolsüz çalışmalarda bu giderimler son derece yüksek oranda ($>96\%$) gerçekleştirilmiş olup, kontrol işleminin bu kirleticilerin giderimi üzerinde herhangi bir olumlu etkisi gözlenmemiştir. Kontrolsüz çalışma ile kıyaslandığında kontrol ve kontrol yönteminin enerji tüketimi üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür. GMV kontrol edicinin kullanıldığı durumda KOİ giderimi başına enerji tüketimi kontrolsüz çalışmaya kıyasla % 37.49 oranında, PID kontrol edicinin kullanıldığı duruma kıyasla ise % 30.66 oranında azaltılmıştır. Elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklık için yapılan MIMO PID, GPC, GMV ve adaptif GMV çalışmaları KOİ, renk, bulanıklık, AKM giderimleri ve enerji tüketimleri açısından incelendiğinde üç işletim parametresi için en yüksek kirlilik giderimi ve en düşük enerji tüketimi değerlerinin GMV kontrol edici kullanıldığında elde edildiği görülmüştür. Bu sonuçlar GPC ve GMV kontrol edicilerin performans kriterlerinin, kirleticilerinde giderimlerinin ve enerji tüketimlerinin diğer kontrol edicilere göre birbirlerine daha yakın olduğunu göstermiştir. GMV kontrol edici kontrollü arıtım koşullarında optimizasyon çalışmasında kullanılmak üzere en uygun kontrol edici olarak seçilmiştir.

pH kontrolü için hem PID, GPC, GMV ve adaptif GMV kontrol edicilerin gürbüzlüğünün test edilmesi, hem de elektrokoagülasyon prosesi süresince kontrol edicinin davranışının incelenmesi amacıyla değişken set noktaları kullanılmıştır. 135 dakika süre ile gerçekleştirilen ve pH set noktasına 0.5 birimlik pozitif ve negatif basamak etkilerin uygulandığı çalışmada ISE, IAE, ITAE ve ITSE performans kriterlerinin en düşük değerlerine GPC kontrol edici ile erişilmiş olup bu değerler sırasıyla 376.96, 1.65×10^3 , 2.68×10^7 , 8.54×10^5 olarak hesaplanmış ve elde edilen sonuçların deneysel kontrol çalışması açısından başarılı olduğu sonucuna varılmıştır.

Elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın MIMO GMV kontrolü çalışmasının sonuçları GMV kontrol edici ile gerçekleştirilen SISO elektriksel iletkenlik, SISO pH ve SISO sıcaklık çalışmaları ile karşılaştırılmış, SISO ve MIMO kontrolün arıtım üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Elektriksel iletkenliğin 2 mS/cm değerinde SISO GMV kontrolünün gerçekleştirildiği çalışmada sıcaklık 20 °C'den 23.6 °C'ye, pH 8'den 9.05 değerine yükselmiştir. Çalışmada KOİ, renk, bulanıklık, AKM giderimi ve enerji tüketimi sırasıyla % 39.50, % 100, % 99.27, % 98.81 ve 84.89 kWh/kg KOİ olarak elde edilmiştir. ISE, IAE, ITAE ve ITSE performans kriterleri sırasıyla 1.24, 61.86, 3.34×10^5 ve 5 olarak hesaplanmıştır.

pH'nin 8 değerinde SISO GMV kontrolünün gerçekleştirildiği çalışmada sıcaklık 20 °C'den 24.8 °C'ye yükselmiş, elektriksel iletkenlik 2 mS/cm'den 1.95 mS/cm değerine düşmüştür. pH kontrolünün elektrokoagülasyon süresince elektriksel iletkenlikte meydana gelen düşüşü önemli ölçüde azaltıcı yönde etki gösterdiği sonucuna varılmıştır. Çalışmada KOİ, renk, bulanıklık, AKM giderimi ve enerji tüketimi sırasıyla % 43.70, % 100, % 99.61, % 100 ve 88.93 kWh/kg KOİ olarak elde edilmiştir. ISE, IAE, ITAE ve ITSE performans kriterleri sırasıyla 52.84, 441.73, 23.85×10^5 ve 6589 olarak hesaplanmıştır.

Sıcaklığın 20 °C'de SISO GMV kontrolünün gerçekleştirildiği çalışmada pH 8'den 9.18 değerine yükselmiş, elektriksel iletkenlik 2'den 1.82 değerine düşmüştür. Çalışmada KOİ, renk, bulanıklık, AKM giderimi ve enerji tüketimi sırasıyla % 38.65, % 99.62, % 98.86, %

100 ve 111.24 kWh/kg KOİ olarak elde edilmiştir. ISE, IAE, ITAE ve ITSE performans kriterleri sırasıyla 316.51, 857.23, 46.28×10^5 ve 1541411 olarak hesaplanmıştır.

MIMO GMV kontrol çalışmasında elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında elektriksel iletkenlik ve sıcaklık kontrollerinin SISO ve MIMO çalışmalarda oldukça yakın sonuçlar verdiği, MIMO kontrolün SISO kontrole göre pH kontrol performansını artırıcı etki gösterdiği görülmüştür. SISO GMV çalışmalarının sonuçları ile kıyaslandığında MIMO GMV kontrol uygulanmasının SISO elektriksel iletkenlik ve SISO sıcaklık kontrolü çalışmalarına göre KOİ giderimini yaklaşık % 5.5 artırırken renk, bulanıklık, AKM giderimlerinde değişiklik yaratmadığı, kirlilik gideriminde oldukça yakın sonuçların elde edildiği SISO pH kontrol çalışmasına göre ise enerji tüketimini % 9.85 oranında azalttığı sonucuna varılmıştır. SISO GMV elektriksel iletkenlik kontrolü çalışmasında hesaplanan KOİ giderimi ve enerji tüketimi değeri kontrolsüz koşullarda yapılan arıtım çalışmasında hesaplanan giderim ve enerji tüketimi ile kıyaslandığında tek başına elektriksel iletkenliğin kontrol edilmesinin KOİ giderimini % 4.92 arttırdığı, enerji tüketimini % 33.81 oranında azalttığı görülmüştür. SISO GMV pH kontrolü çalışmasında hesaplanan KOİ giderimi ve enerji tüketimi, kontrolsüz koşullarda yapılan arıtım çalışmasında hesaplanan KOİ giderimi ve enerji tüketimi ile kıyaslandığında tek başına pH'nin kontrol edilmesinin KOİ giderimini % 9.12 arttırdığı, enerji tüketimini ise % 30.66 oranında azalttığı görülmüştür. SISO GMV sıcaklık kontrolünün kontrolsüz durumda yapılan arıtım çalışmasına göre KOİ giderimini % 4.07 arttırdığı, enerji tüketimi değerini ise % 13.26 oranında azalttığı görülmüştür. Bunun yanı sıra iletkenliğin pH üzerinde herhangi bir etkisi bulunmadığı için SISO GMV pH kontrol çalışmasına göre MIMO GMV kontrol çalışmasında pH kontrolünün daha iyi performans göstermesi de sıcaklık kontrolü ile ilişkilendirilmiştir. Bu bölümde yapılan çalışmalarda elektriksel iletkenliğin enerji tüketimi ve pH'nin KOİ giderimi üzerindeki önemli etkileri vurgulandığı ve sıcaklığın pH üzerindeki etkisi bilindiğinden bu üç işletme parametresinin arıtım çalışmalarında aynı anda kontrol edilmesinin kirlilik giderimleri ve enerji tüketimi açısından gerekli olduğu sonucuna varılmıştır.

Elektrokoagülasyon yöntemiyle atık su arıtımı karmaşık bir süreç olup elektrot yerleşimi ve malzemesi, akım şiddeti, elektroliz süresi, pH, sıcaklık ve elektriksel iletkenlik gibi pek

çok faktörden etkilenmektedir. Elektrokoagülasyon prosesi ile kağıt endüstrisi atık sularının arıtımında sistem cevabını tahmin ederek kirlilik giderimleri ve enerji tüketimi değerlerini bulabilmek için uygun bir model denklemi elde etmek ve sonrasında bağımsız değişkenlerin en uygun değerlerini belirlemek amacıyla önce en uygun karıştırma hızı belirlenmiş, daha sonra CYY kullanılarak optimizasyon çalışması yapılmıştır. Çalışmalarda elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklık başlangıçta deney tasarımında belirtilen koşullara ayarlanmış, GMV kontrol ediciler aracılığıyla arıtım süresince bu değerlerde sabit tutulmuştur.

Deney sisteminin izin verdiği sınırlar dahilinde çalışılacak en uygun karıştırma hızının belirlenmesi için 1 A sabit akım, 20 °C sıcaklık, 2 mS/cm elektriksel iletkenlik ve pH 8 işletme koşullarında 45 dakika süresince alüminyum elektrotlar kullanılarak 200, 400 ve 600 devir/dk karıştırma hızlarında arıtım çalışmaları gerçekleştirilmiş, belirli aralıklarla numuneler alınarak sonuçlar KOİ giderimi açısından değerlendirilmiştir. 15 dakikalık işletim süresinde KOİ giderimi durgunluk fazına geçmekte ve karıştırma hızının 200 devir/dk'dan 600 devir/dk'ya çıkarılması durumunda KOİ giderimi % 10.9 artmaktadır. Karıştırma hızının 400 devir/dk'dan 600 devir/dk'ya artırılması ile KOİ giderimi % 2.5 artmaktadır. Bu sonuç karıştırma hızının 600 devir/dk'dan büyük değerlerinde KOİ gideriminde anlamlı bir artış sağlanamayacağını ve en uygun işletim koşullarının belirleneceği çalışmalarda, karıştırma hızı olarak 600 devir/dk kullanılmasının uygun olacağını göstermektedir.

MBT yöntemi kullanılarak cevaplar olarak seçilen KOİ, renk, bulanıklık, AKM giderim verimleri ve enerji tüketimi değerleri ile faktörler olarak seçilen akım şiddeti, pH, elektriksel iletkenlik, sıcaklık ve süre arasındaki ilişkinin belirlenmesi amacıyla bu faktörlerin 5 seviye olarak Al ve Fe elektrotlar için ayrı ayrı çalışıldığı toplam 64 adet deneysel çalışmayı içeren bir deney tasarım matrisi oluşturulmuştur. Sabit akımda, 600 devir/dk karıştırma hızında, elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın kontrol edilmesiyle gerçekleştirilen MBT çalışmalarında çoklu regresyon yöntemi kullanılarak deney verilerine ikinci mertebeden polinom denklemleri uydurulmuş ve denklemlerin katsayıları bulunmuştur.

Alüminyum ve demir elektrotlar kullanılarak elde edilen deneysel sonuçlara modeller oturtulduktan sonra yapılan ANOVA çalışmaları KOİ, renk, bulanıklık ve AKM giderimleri ile enerji tüketimi açısından F değerlerinin, % 95 güven seviyesinde F dağılımı tablosundan okunan değerden ($F_{0.05} (20, 11) = 2.65$) yüksek ve P değerlerinin de 0.05'ten düşük olduğu için elde edilen modellerin deney sonuçlarına iyi uyduğu ve istatistiksel olarak anlamlı olduğu sonucu doğrulanmıştır. Çalışmalarda bulunan düzeltilmiş R^2 değerleri ile R^2 değerinin yakın olduğu görülmüştür.

Alüminyum elektrotlar kullanılarak yapılan optimizasyon çalışmasında elektriksel iletkenlik, pH, sıcaklık, süre ve akım şiddeti için en uygun değerler sırasıyla 2.72 mS/cm, 5.82, 22.62 °C, 10.83 dakika ve 1.22 A olarak bulunmuştur. Amaca uygunluğun 0.9239 bulunduğu bu çalışmada en uygun işletme parametresi değerleriyle çalışıldığında % 47.17 KOİ, % 91.85 renk, % 94.54 bulanıklık, % 93.53 AKM giderimi ve 6.69 kWh/kg KOİ enerji tüketimi hedeflenmiştir. Demir elektrotlar kullanılarak yapılan optimizasyon çalışmasında elektriksel iletkenlik, pH, sıcaklık, süre ve akım şiddeti için en uygun değerler sırasıyla 3.09 mS/cm, 5.42, 10 °C, 10.99 dakika ve 1.38 A olarak bulunmuştur. Amaca uygunluğun 0.8953 bulunduğu bu çalışmada en uygun işletme parametresi değerleriyle çalışıldığında % 51.04 KOİ, % 88.91 renk, % 93.33 bulanıklık, % 69.99 AKM giderimi ve 5.57 kWh/kg KOİ enerji tüketimi hedeflenmiştir.

600 devir/dk karıştırma hızında alüminyum elektrotlar ile elektriksel iletkenlik, pH, sıcaklık, süre ve akım şiddetinin sırasıyla en uygun değerleri olan 2.72 mS/cm, 5.82, 22.62 °C, 10.83 dakika ve 1.22 A koşullarında, elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın GMV kontrol edicilerle kontrol edildiği ve kontrol edilmediği durumların kıyaslandığı çalışmada kontrollü durumda KOİ, renk, bulanıklık, AKM giderimi ve enerji tüketimi sırasıyla % 42.21, % 100, % 98.61, % 97.06 ve 8.82 kWh/kg KOİ olarak elde edilmiş, kontrolsüz arıtım çalışması ile karşılaştırıldığında KOİ gideriminde artış, enerji tüketiminde düşüş görülmüş olup renk, bulanıklık, AKM giderimlerinde önemli bir değişim gözlenmemiştir.

600 devir/dk karıştırma hızında demir elektrotlar ile elektriksel iletkenlik, pH, sıcaklık, süre ve akım şiddetinin sırasıyla en uygun değerleri olan 3.09 mS/cm, 5.42, 10 °C, 10.99

dakika ve 1.38 A koşullarında, elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın GMV kontrol edicilerle kontrol edildiği ve kontrol edilmediği durumların kıyaslandığı çalışmada kontrollü durumda KOİ, renk, bulanıklık, AKM giderimi ve enerji tüketimi sırasıyla % 30.29, % 80.93, % 83.52, % 76.47 ve 14.58 kWh/kg KOİ olarak elde edilmiş, kontrolsüz arıtım çalışması ile karşılaştırıldığında renk, bulanıklık, AKM giderimlerinde artış görülmüş olup KOİ giderimi ve enerji tüketiminde önemli bir değişim gözlenmemiştir.

Alüminyum ve demir elektrotlar kullanılarak kontrollü en uygun işletim koşullarında gerçekleştirilen arıtım çalışmalarının sonuçları karşılaştırıldığında alüminyum elektrotlar kullanılarak elde edilen KOİ, renk, bulanıklık, AKM giderimlerinin demir elektrotlar kullanılarak elde edilen kirletici giderimlerinden sırasıyla % 11.92, % 19.07, % 15.09, % 20.59 daha fazla, giderilen kg KOİ başına enerji tüketiminin ise % 39.92 oranında daha az olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar ışığında kağıt endüstrisi atık sularının elektrokoagülasyonla arıtımında alüminyum elektrotların kullanımının daha uygun olduğu belirlenmiştir. Alüminyum elektrotlar kullanılarak en uygun koşullarda gerçekleştirilen arıtım çalışması sonucunda elde edilen arıtılmış suyun kirlilik parametreleri KOİ, renk, bulanıklık ve AKM sırasıyla 370.56 mg/L, 0 CU, 0.92 NTU, 1.74 mg/L'dir.

Alüminyum elektrotlar kullanılarak bulunan en uygun işletme koşulları olan 2.72 mS/cm elektriksel iletkenlik, 5.82 pH, 10.83 dakika süre ve 1.22 A akım şiddetinde ve 17.5 °C, 22.5 °C, 27.5 °C, 32.5 °C, 37.5 °C sıcaklıklarında elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın kontrol edildiği kinetik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. KOİ giderim hızının ikinci mertebe tepkime modeline uyduğu varsayımının uygun olduğu sonucuna ulaşılmış, tepkime aktivasyon enerjisi -22.33 kJ/mol, Arrhenius sabiti 1.57×10^{-8} dakika⁻¹ olarak bulunmuş, yapılan çalışma sonucunda KOİ giderim hızının sıcaklık arttıkça azaldığı görülmüştür.

Literatürde günümüze kadar yapılan çalışmalarda atık suların elektrokimyasal yöntemlerle arıtımı elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklık parametrelerinin başlangıç değerleri ayarlanarak gerçekleştirilmiştir. Ancak yapılan arıtım çalışmalarında işletim süresince elektriksel iletkenliğin azaldığı, pH ve sıcaklığın ise arttığı gözlenmiş, elektrokoagülasyon prosesinde işletme parametrelerinin zamanla önemli ölçüde değişmesinin arıtım

performansı açısından yanıltıcı sonuçlar ortaya çıkartabileceği düşünülmüştür. Bu amaçla geleneksel ve ileri kontrol yöntemleri kağıt endüstrisi atık sularının elektrokoagülasyonla arıtımına uygulanmış, bu çalışmaların sonuçları kontrolsüz arıtım ile kıyaslandığında KOİ gideriminde artış, enerji tüketiminde düşüş sağlanmıştır. İşletme parametreleri olan elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın aynı anda kontrol edildiği MIMO kontrol çalışmasının, bu parametrelerinin tek başına kontrol edildiği SISO kontrollü arıtım çalışmalarına göre giderim verim artışı ile enerji tüketimi düşüşüne katkı sağladığı gözlenmiştir.

Literatürde atık suların elektrokimyasal yöntemlerle arıtımında proses kontrol uygulaması yapılan çalışmalarda pH kontrolü için tek bir ayarlanabilen değişken kullanılmış olup bu durum farklı set noktalarında çalışabilmeyi güçleştirmekte ve endüstriyel uygulamalarda prosese yapılabilecek müdahaleleri sınırlandırmaktadır. Bu nedenle bu tez kapsamında geleneksel ve ileri kontrol yöntemleri ile asit ve baz akış hızlarını koordineli olarak ayarlayarak pH kontrol çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ve kontrol edici performanslarını sınamak üzere gerçekleştirilen değişken set noktası çalışmaları tasarlanan kontrol edicilerin endüstriyel uygulamaya daha uygun olduğunu göstermektedir.

Literatürde yapılan çalışmalarda atık suların elektrokimyasal yöntemlerle arıtımında tüm CYY uygulamaları elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın başlangıç değerleri ayarlanarak gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla CYY'lerden MBT kullanılarak kontrollü koşullarda yapılan arıtım çalışmaları sonucunda işletme parametrelerinin en uygun değerleri belirlenmiş, elde edilen en uygun değerlerde elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklığın kontrol edilmesiyle gerçekleştirilen kontrollü arıtımın, kontrolün uygulanmadığı arıtım çalışmasından daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu tez kapsamında ilk kez yapılan kontrollü koşullarda CYY ile en uygun işletme parametrelerinin belirlenmesi çalışmalarının literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Akay, B., Ertunc, S., Boyacioglu, H., Hapoglu, H. and Alpbaz, M. 2011. Discrete system identification and self-tuning control of dissolved oxygen concentration in a stirred reactor. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 28(3), 837-847.
- Al-Shannag, M., Lafi, W., Bani-Melhem, K., Gharagheer, F. and Dhaimat, O. 2012. Reduction of COD and TSS from paper industries wastewater using electro-coagulation and chemical coagulation. *Separation Science and Technology*, 47(5), 700-708.
- Amani-Ghadim, A.R., Aber, S., Olad, A. and Ashassi-Sorkhabi, H. 2013. Optimization of electrocoagulation process for removal of an azo dye using response surface methodology and investigation on the occurrence of destructive side reactions. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 64, 68-78.
- Anonim. 2000. Devlet Planlama Teşkilatı Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Kağıt Sanayi Özel İhtisas Komisyonu Raporu. Ankara.
- Anonim. 2004a. T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı ÇED ve Planlama Genel Müdürlüğü Türkiye Çevre Atlası. Ankara.
- Anonim. 2004b. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, (<http://mevzuat.basbakanlik.gov.tr/Metin.Aspx?MevzuatKod=7.5.7221&sourceXmlSearch=&MevzuatIliski=0>) Erişim Tarihi: 10/03/2016.
- Aström, K.J. and Wittenmark, B. 1973. On self-tuning regulators. *Automatica*, 9(2), 185-199.
- Avcı, S. 2007. Sularda kimyasal oksijen ihtiyacının (KOİ) belirlenmesi için otomatik analiz sisteminin geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, 135, 2007.
- Alinsafi, A., Khemis, M., Pons, M.N., Leclerc, J.P., Yaacoubi, A., Benhammou, A. and Nejmeddine, A. 2005. Electrocoagulation of reactive textile dyes and textile wastewater. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 44(4), 461-470.
- Bayramoglu, M., Kobya, M., Can, O.T. and Sozbir, M. 2004. Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. *Separation and Purification Technology*, 37(2), 117-125.
- Bellebia, S., Kacha, S., Bouyakoub, A.Z. and Derriche, Z. 2012. Experimental investigation of chemical oxygen demand and turbidity removal from cardboard paper mill effluents using combined electrocoagulation and adsorption processes. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 31(3), 361-370.

- Bezerra, M.A., Santelli, R.E., Oliveira, E.P., Villar, L.S. and Escaleira, L.A. 2008. Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*, 76(5), 965-977.
- Boyacıoğlu, H. 2013. Çok girdili-çok çıktıli kontrolün ekmek mayası üretimine uygulanması, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, 233, Ankara.
- Bursalı, N., Akay, B., Ertunç, S., Hapoğlu, H. and Alpbaz, M. 2001. New tuning method for generalized predictive control of the production of *S. cerevisiae*. *Food and Bioproducts Processing*, 79(1), 27-34.
- Camcıoğlu, Ş., Özyurt, B. ve Hapoğlu, H. 2015. Elektrokoagülasyon yöntemiyle kağıt atık suyu arıtımında pH kontrolü. *Anadolu University Journal of Science and Technology–A Applied Sciences and Engineering*, 16(2), 107-115.
- Canizares, P., Carmona, M., Lobato, J., Marinez, F. and Rodrigo, M.A. 2005. Electrodisolution of aluminum electrodes in electrocoagulation processes. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 44(12), 4178-4185.
- Chen, X., Chen, G. and Yue, P.L. 2000. Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation. *Separation and Purification Technology*, 19(1-2), 65-76.
- Chen, G. 2004. Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 38(1), 11-41.
- Chou, W.L., Wang, C.T. and Huang, K.Y. 2010. Investigation of process parameters for the removal of polyvinyl alcohol from aqueous solution by iron electrocoagulation. *Desalination*, 251, 12-19.
- Clarke, D.W. and Gawthrop, P.J. 1975. Self-tuning controller. *IEE Proceedings Part D: Control Theory and Applications*, 122 (9), 929-934.
- Clarke, D.W., Mohtadi, C. and Tuffs, P.S. 1987. Generalized predictive control- Part I: the basic algorithm. *Automatica* 23(2), 137-148.
- Coughanowr, D.R. and Koppel, L.B. 1965. *Process System Analysis and Control*. McGraw-Hill, 491, New York.
- Coughanowr, D.R. and LeBlanc, S.E. 2009. *Process System Analysis and Control*. McGraw Hill, 624, New York.
- Daneshvar, N., Oladegaragoze, A., and Djafarzadeh, N. 2006. Decolorization of basic dye solutions by electrocoagulation: an investigation of the effect of operational parameters. *Journal of Hazardous Materials*, 129(1), 116-122.

- Daneshvar, N., Khataee, A.R., Ghadim, A.A. and Rasoulifard, M. H. 2007. Decolorization of CI Acid Yellow 23 solution by electrocoagulation process: Investigation of operational parameters and evaluation of specific electrical energy consumption (SEEC). *Journal of Hazardous Materials*, 148(3), 566-572.
- Das, C. and Patnaik, L. 2000. Removal of lignin by industrial solid wastes. *Practice Periodical Hazardous Toxic and Radioactive Waste Management*, 4(4), 156-161.
- Demirci, Y., Pekel, L. C., Altinten, A. and Albaz M. 2015. Application of fuzzy control on the electrocoagulation process to treat textile wastewater. *Environmental Technology*, 36(24), 3243-3252.
- Eaton, A.D., Clesceri, L.S., Rice, E.W. and Greenberg A.E. 2005. Standard methods for the examination of water & wastewater (21st Ed.). American Public Health Association, 1200, Washington.
- El-Ashtoukhy, E., Amin, N. and Abdelwahab, O. 2009. Treatment of paper mill effluents in a batch-stirred electrochemical tank reactor. *Chemical Engineering Journal*, 146(2), 205-210.
- Erçek, E. 2010. Yarı kesikli bir polimerizasyon reaktörünün genetik algoritma kullanılarak geliştirilmiş öngörmeli kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, 148, Ankara.
- Ertunç, S., Akay, B., Bursalı, N., Hapoğlu, H. and Albaz, M. 2003. Generalized minimum variance control of growth medium temperature of baker's yeast production. *Food and Bioproducts Processing*, 81(4), 327-335.
- Ertunc, S., Akay, B., Boyacioglu, H. and Hapoglu, H. 2009. Self-tuning control of dissolved oxygen concentration in a batch bioreactor. *Food and Bioproducts Processing*, 87(1), 46-55.
- Hapoğlu, H. 1993. Self-tuning control of packed distillation columns, Doktora Tezi, University of Wales, 308, UK.
- Hassan, M. and Hawkyard, C. 2002. Decolourisation of aqueous dyes by sequential oxidation treatment with ozone and Fenton's reagent. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 77(7), 834-841.
- Hernandez, I.L., Diaz, C.B., Morales, G.R., Bilyeu, B. and Nunez, F.U. 2009. Influence of the anodic material on electrocoagulation performance. *Chemical Engineering Journal*, 148(1), 97-105.
- Karacan, S., Hapoglu, H., Cabbar, Y. and Albaz, M. 1997. Pole placement self tuning control for packed distillation column. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 36(4), 309-315.

- Karagoz, A.R., Hapoglu, H. and Alpbaz, M. 2000. Generalized minimum variance control of optimal temperature profiles in a polystyrene polymerization reactor. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 39(3), 253-262.
- Kalyani, K., Balasubramanian, N. and Srinivasakannan, C. 2009. Decolorization and COD reduction of paper industrial effluent using electro-coagulation. *Chemical Engineering Journal*, 151(1-3), 97-104.
- Katal, R. and Pahlavanzadeh, H. 2011. Influence of different combinations of aluminum and iron electrode on electrocoagulation efficiency: Application to the treatment of paper mill wastewater. *Desalination*, 265(1-3), 199-205.
- Khansorthong, S. and Hunsom, M. 2009. Remediation of wastewater from pulp and paper mill industry by the electrochemical technique. *Chemical Engineering Journal*, 151, 228-234.
- Khataee, A.R., Fathinia, M., Aber, S. and Zarei, M. 2010a. Optimization of photocatalytic treatment of dye solution on supported TiO₂ nanoparticles by central composite design: intermediates identification. *Journal of Hazardous Materials*, 181, 886-897.
- Khataee, A.R., Dehghan, G., Ebadi, E. and Pourhassan, M. 2010b. Central composite design optimization of biological dye removal in the presence of macroalgae *Chara* sp. *CLEAN–Soil, Air, Water*, 38(8), 750-757.
- Khosla, N.K., Venkatachalam, S. and Somasundaran, P. 1991. Pulsed electrogeneration of bubbles for electroflotation. *Journal of Applied Electrochemistry*, 21(11), 986-990.
- Koby, M., Hiz, H., Senturk, E., Aydin, C. and Demirbas, E. 2006. Treatment of potato chips manufacturing wastewater by electrocoagulation. *Desalination*, 190, 201-211.
- Koby, M., Bayramoğlu, M., Can, O.T. ve Sözbir, M. 2008. Endüstriyel atıksuların arıtılması için elektrokimyasal reaktör geliştirilmesi. TÜBİTAK Proje No: 104Y267; Kocaeli.
- Kongjao, S., Damronglerd, S. and Hunsom, M. 2008. Simultaneous removal of organic and inorganic pollutants in tannery wastewater using electrocoagulation technique. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 25(4), 703-709.
- Körbahti, B.K. 2003. Boya endüstrisi su bazlı boya atıksuyu ve tekstil endüstrisi atıksuyunun elektrokimyasal olarak arıtılması için sistem tasarlanması ve proses geliştirilmesi. Doktora tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, 189, Ankara.
- Körbahti, B.K. and Taşyürek, S. 2016. Electrochemical oxidation of sulfadiazine antibiotic using boron-doped diamond anode: application of response surface methodology for process optimization. *Desalination and Water Treatment*, 57(6), 2522-2533.

- Leblebici, Z. 1995. Kağıt Sanayinde Arıtım Teknolojilerinin Araştırılması, T.C. Çevre Bakanlığı, 129, Ankara.
- Levenspiel, O. 1999. Chemical Reaction Engineering, John Wiley & Sons, 668, New York.
- Liu, H.L. and Chiou, Y.R. 2005. Optimal decolorization efficiency of Reactive Red 239 by UV/TiO₂ photocatalytic process coupled with response surface methodology. Chemical Engineering Journal, 112, 173-179.
- McCleskey, R., Nordstrom, D., Ryan, J. and Ball J. 2012. A new method of calculating electrical conductivity with applications to natural waters. Geochimica et Cosmochimica Acta. 77, 369-382.
- Merzouk, B., Gourich, B., Sekki, A., Madani, K., Vial, C. and Barkaoui M. 2009. Studies on the decolorization of textile dye wastewater by continuous electrocoagulation process. Chemical Engineering Journal, 149(1-3), 207-214.
- Mollah, M.Y.A., Schennach, R., Parga, J.R. and Cocke, D.L. 2001. Electrocoagulation (EC)-science and applications. Journal of Hazardous Materials, 84(1), 29-41.
- Mollah, M.Y.A., Morkovsky, P., Gomes, J.A.G., Kesmez, M., Parga, J. and Cocke, D.L. 2004. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. Journal of Hazardous Materials, 114(1-3), 199-210.
- Ozkan, G., Hapoglu, H. and Alpbaz, M. 1998. Identification and nonlinear pole placement self tuning PID control of a jacketed well mixed reactor. Chemical Engineering Communications, 170(1), 199-215.
- Özkan, G., Hapoglu, H. and Alpbaz, M. 1998. Generalized predictive control of optimal temperature profiles in a polystyrene polymerization reactor. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 37 (2), 125-139.
- Özyurt, B. 2012. Karanlık fermentasyon ile biyohidrojen üretiminde pH kontrolü. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, 172, Ankara.
- Phalakornkule, C., Mangmeemak, J., Intrachod K. and Nuntakumjorn, B. 2010. Pretreatment of palm oil mill effluent by electrocoagulation and coagulation. Science Asia, 36, 142-149.
- Pokhrel, D. and Viraraghavan, T. 2004. Treatment of pulp and paper mill wastewater-a review, Science of the Total Environment, 333(1-3), 37– 58.
- Rai, A., Mohanty, B. and Bhargava, R. 2016. Supercritical extraction of sunflower oil: A central composite design for extraction variables. Food Chemistry, 192, 647-659.

- Raj, A., Reddy, M. and Chandra R. 2007. Decolourisation and treatment of pulp and paper mill effluent by lignin-degrading *Bacillus* sp. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 82(4), 399-406.
- Rajeshwari, K., Balakrishnan, M., Kansal, A., Lata, K. and Kishore, V. 2000. State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4(2), 135-156.
- Samsunlu, A. 2013. Çevre Mühendisliği Kimyası. Birsen Yayınevi, 393, İstanbul.
- Seborg, D.E., Mellichamp, D.A., Edgar, T.F. and Doyle, F.J. 2010. *Process Dynamics and Control*. John Wiley & Sons, 514, USA.
- Shawwa, A., Smith, D. and Sego, D. 2001. Color and chlorinated organics removal from pulp mills wastewater using activated petroleum coke. *Water Research*, 35(3), 745-749.
- Soloman, P.A., Basha, C.A., Velan, M., Balasubramanian, N. and Marimuthu, P. 2009. Augmentation of biodegradability of pulp and paper industry wastewater by electrochemical pre-treatment and optimization by RSM. *Separation and Purification Technology*, 69, 109-117.
- Sridhar, R., Sivakumar, V., Immanuel, V.P. and Prakash, M.J. 2011. Treatment of pulp and paper industry bleaching effluent by electrocoagulant process. *Journal of Hazardous Materials*, 186(2-3), 1495-1502.
- Sridhar, R., Sivakumar, V., Immanuel, V.P. and Prakash, M.J. 2012. Development of model for treatment of pulp and paper industry bleaching effluent using response surface methodology. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 31(4), 558-565.
- Şengül, F. 1991. Endüstriyel Atıksuların Özellikleri ve Arıtılması, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Yayınları No:172, 476, İzmir.
- Tapan, N.A. ve Erdoğan, S. 2012. *Proses Dinamiği ve Kontrolü*, 3. Basımdan Çeviri. Nobel Yayınevi, 514, Ankara.
- Terrazas, E., Vázquez, A., Briones, R., Lázaro, I. and Rodríguez, I. 2010. EC treatment for reuse of tissue paper wastewater: Aspects that affect energy consumption. *Journal of Hazardous Materials*, 181(1-3), 809-816.
- Uğurlu, M., Gürses, A., Doğan, Ç. and Yalçın, M. 2008. The removal of lignin and phenol from paper mill effluents by electrocoagulation. *Journal of Environmental Management*, 87, 420-428.
- Wang, C.T. and Chou, W.L. 2009. Performance of COD removal from oxide chemical mechanical polishing wastewater using iron electrocoagulation. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 44(12), 1289-1297.

- Wellstead, P.E. and Zarrop, M.B. 1991. Self-Tuning Systems: Control and Signal Processing, John Wiley & Sons, 604, New York.
- Vepsäläinen, M., Kivisaari, H., Pulliainen, M., Oikari, A. and Sillanpää, M. 2011a. Removal of toxic pollutants from pulp mill effluents by electrocoagulation. Separation and purification technology, 81(2), 141-150.
- Vepsäläinen, M., Selin, J., Rantala, P., Pulliainen, M., Särkkä, H., Kuhmonen, K., Bhatnagar, A. and Sillanpää, M. 2011b. Precipitation of dissolved sulphide in pulp and paper mill wastewater by electrocoagulation. Environmental Technology, 32(12), 1393-1400.
- Verenich, S., Laari, A. and Kallas, J. 2000. Wet oxidation of concentrated wastewaters of paper mills for water cycle closing. Waste Management, 20(4), 287-293.
- Yalçın, H. ve Gürü M. 2010. Su Teknolojisi. Palme Yayıncılık, 640, Ankara.
- Zaied, M. and Bellakhal, N. 2009. Electrocoagulation treatment of black liquor from paper industry. Journal of Hazardous Materials, 163(2-3), 995-1000.
- Zodi, S., Louvet, J.N., Michon, C., Potier, O., Pons, M.N., Lapique, F. and Leclerc, J.P. 2011. Electrocoagulation as a tertiary treatment for paper mill wastewater: Removal of non-biodegradable organic pollution and arsenic. Separation and purification Technology, 81(1), 62-68.

EKLER

EK 1 PID pH kontrol algoritması

EK 2 GPC pH kontrol algoritması

EK 3 GMV pH kontrol algoritması

EK 4 Adaptif GMV pH kontrol algoritması

EK 5 % 95 güven seviyesi için F dağılımı çizelgesi

EK 6 YEKK algoritması

EK 7 Kutup yerleştirme arayüz programı

EK 8 Alüminyum elektrotlarla yapılan optimizasyon çalışmalarında KOİ giderimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri

EK 9 Alüminyum elektrotlarla yapılan optimizasyon çalışmalarında renk giderimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri

EK 10 Alüminyum elektrotlarla yapılan optimizasyon çalışmalarında bulanıklık giderimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri

EK 11 Alüminyum elektrotlarla yapılan optimizasyon çalışmalarında AKM giderimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri

EK 12 Alüminyum elektrotlarla yapılan optimizasyon çalışmalarında enerji tüketimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri

EK 13 Demir elektrotlarla yapılan optimizasyon çalışmalarında KOİ giderimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri

EK 14 Demir elektrotlarla yapılan optimizasyon çalışmalarında renk giderimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri

EK 15 Demir elektrotlarla yapılan optimizasyon çalışmalarında bulanıklık giderimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri

EK 16 Demir elektrotlarla yapılan optimizasyon çalışmalarında AKM giderimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri

EK 17 Demir elektrotlarla yapılan optimizasyon çalışmalarında enerji tüketimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri

EK 1 PID pH kontrol algoritması

```
function [sys,x0,str,ts] = PID_PH_Velocity_2003(t,x,u,flag)
```

```
switch flag,
```

```
case 0,
```

```
    [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes;
```

```
case 1,
```

```
    sys=mdlDerivatives(t,x,u);
```

```
case 2,
```

```
    sys=mdlUpdate(t,x,u);
```

```
case 3,
```

```
    sys=mdlOutputs(t,x,u);
```

```
case 4,
```

```
    sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u);
```

```
case 9,
```

```
    sys=mdlTerminate(t,x,u);
```

```
otherwise
```

```
    error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]);
```

```
end
```

```
function [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes
```

```
sizes = simsizes;
```

```
sizes.NumContStates = 0;
```

```
sizes.NumDiscStates = 11;
```

```
sizes.NumOutputs = 11;
```

```
sizes.NumInputs = 2;
```

```
sizes.DirFeedthrough = 1;
```

```
sizes.NumSampleTimes = 1; % at least one sample time is needed
```

```
sys = simsizes(sizes);
```

```
x0 = [7.950 7.950 0 0 8 8 8 0 0 0 0];
```

```
str = [];
```

```
ts = [-1 0]; % Inherited sample time
```

```

function sys=mdlDerivatives(t,x,u)

sys = [];

function sys=mdlUpdate(t,x,u)

    giris_n_1 = x(2);    %Input @ t(n-1)
    giris_n   = x(1);    %Input @ t(n)

    cikis_n_1a = x(4);    %Controller output @ t(n-1)
    cikis_na   = x(3);    %Controller output @ t(n)

    sp_n_2     = x(7);    %Set point @ t(n-2)
    sp_n_1     = x(6);    %Set point @ t(n-1)
    sp_n       = x(5);    %Set point @ t(n)
    deltau_na  = x(8);

    cikis_n_1b = x(10);   %Controller output @ t(n-1)
    cikis_nb   = x(9);    %Controller output @ t(n)
    deltau_nb  = x(11);

    deltat = 0.5;

    KCa = 1000;
    KIa = 0.05;
    KDa = 0.01;
    KCb = 1;
    KIb = 0.06;
    KDb = 0.4;

    deltaua = KCa * (1+(deltat/KIa)+(KDa/deltat)) * (u(2) - u(1)) - KCa*(1+(2*KDa/deltat))
    * (sp_n - giris_n) + (KCa*(KDa/deltat)) * (sp_n_1 - giris_n_1); %PID velocity form
    Hapoglu
    deltaub = KCb * (1+(deltat/KIb)+(KDb/deltat)) * (u(2) - u(1)-0.1) -
    KCb*(1+(2*KDb/deltat)) * (sp_n - giris_n-0.1) + (KCb*(KDb/deltat)) * (sp_n_1 -
    giris_n_1-0.1);

    outputa = cikis_na - 0.0001*deltaua;
    outputb=cikis_nb + 1*deltaub;
    if (outputa < 0)
        outputa = 0;
    elseif (outputa > 2)
        outputa = 2;
    end
    if (outputb < 0)
        outputb = 0;
    elseif (outputb > 0.5)

```

```

    outputb = 0.5;
end

sys(11)= deltaub;
sys(10)= cikis_nb;
sys(9) = outputb;
sys(8) = deltaua;
sys(7) = sp_n_1;    % Set point noktalarini kaydir
sys(6) = sp_n;
sys(5) = u(2);

sys(4) = cikis_na;   % Output degerlerini kaydir
sys(3) = outputa;    % Yeni Controller cikis degeri

sys(2) = giris_n;    % Input degerlerini kaydir
sys(1) = u(1);

function sys=mdlOutputs(t,x,u)

sys(1) = x(1);
sys(2) = x(2);
sys(3) = x(3);
sys(4) = x(4);
sys(5) = x(5);
sys(6) = x(6);
sys(7) = x(7);
sys(8) = x(8);
sys(9) = x(9);
sys(10) = x(10);
sys(11) = x(11);
function sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u)

sampleTime = 0.5; % Example, set the next hit to be one second later.
sys = t + sampleTime;

function sys=mdlTerminate(t,x,u)

sys = [];

```

EK 2 GPC pH kontrol algoritması

```
function [sys,x0,str,ts] = GPC_pH(t,x,u,flag)
switch flag,
```

```
    case 0,
        [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes;
```

```
    case 1,
        sys=mdlDerivatives(t,x,u);
```

```
    case 2,
        sys=mdlUpdate(t,x,u);
```

```
    case 3,
        sys=mdlOutputs(t,x,u);
```

```
    case 4,
        sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u);
```

```
    case 9,
        sys=mdlTerminate(t,x,u);
```

```
    otherwise
        error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]);
```

```
end
```

```
function [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes
```

```
    sizes = simsizes;
```

```
    sizes.NumContStates = 0;
    sizes.NumDiscStates = 16;
    sizes.NumOutputs    = 16;
    sizes.NumInputs     = 2;
    sizes.DirFeedthrough = 1;
    sizes.NumSampleTimes = 1; % at least one sample time is needed
```

```
    sys = simsizes(sizes);
```

```
    x0 = [8 8 8 8 0 0 0 0 0 0 0 0 8 8 8 8];
```

```
    str = [];
    ts = [-1 0]; % Inherited sample time
```

```
function sys=mdlDerivatives(t,x,u)
```

```
sys = [];
```

```
function sys=mdlUpdate(t,x,u)
```

```
giris_n_3 = x(4);    %Input @ t(n-3)
giris_n_2 = x(3);    %Input @ t(n-2)
giris_n_1 = x(2);    %Input @ t(n-1)
giris_n   = x(1);    %Input @ t(n)
```

```
cikis_nb_3 = x(12);   %Controller output @ t(n-3)
cikis_nb_2 = x(11);   %Controller output @ t(n-2)
cikis_nb_1 = x(10);   %Controller output @ t(n-1)
cikis_nb   = x(9);    %Controller output @ t(n)
cikis_na_3 = x(8);    %Controller output @ t(n-3)
cikis_na_2 = x(7);    %Controller output @ t(n-2)
cikis_na_1 = x(6);    %Controller output @ t(n-1)
cikis_na   = x(5);    %Controller output @ t(n)
```

```
sp_n_3   = x(16);    %Set point @ t(n-3)
sp_n_2   = x(15);    %Set point @ t(n-2)
sp_n_1   = x(14);    %Set point @ t(n-1)
sp_n     = x(13);    %Set point @ t(n)
```

```
AASa=zeros(1,10);
BBSa=zeros(1,10);
AASa(1)=-0.9846;
AASa(2)=-0.00020054;
AASa(3)=0.0;
AASa(4)=0.0;
BBSa(1)=-0.00055438;
BBSa(2)=0.0;
NAASa=2;
NBBSa=1;
NIKIa=2;%4,6,8
NUNUa=1;%2
ALWSa=0.0;
ALAMa=0.000001;%dene yanıl 0.002
NSAYa=NAASa+NBBSa+1;
AASb=zeros(1,10);
BBSb=zeros(1,10);
AASb(1)=-0.9846;
AASb(2)=-0.00020054;
AASb(3)=0.0;
AASb(4)=0.0;
BBSb(1)=-0.0057;
BBSb(2)=0.0;
NAASb=2;
```

```

NBBSb=1;
NIKIb=2;%4,6,8
NUNUb=1;%2
ALWSb=0.0;
ALAMb=0.000001;%dene yanıl 0.002
NSAYb=NAASb+NBBSb+1;
for Ia=NAASa:-1:1;
    AASa(Ia+1)=AASa(Ia);
end
for Ib=NAASb:-1:1;
    AASb(Ib+1)=AASb(Ib);
end
AASa(1)=1.0;
NFSa=NAASa+1;
ATILa=zeros(1,10);
ATILa(1)=1.0;
AASb(1)=1.0;
NFSb=NAASb+1;
ATILb=zeros(1,10);
ATILb(1)=1.0;
for Ia=2:NAASa+1;
    ATILa(Ia)=AASa(Ia)-AASa(Ia-1);
end
for Ib=2:NAASb+1;
    ATILb(Ib)=AASb(Ib)-AASb(Ib-1);
end
FFLa=zeros(1,10);
FFLb=zeros(1,10);
for Ia=1:NFSa
    FFLa(1,Ia)=AASa(Ia)-AASa(Ia+1);
end
for Ib=1:NFSb
    FFLb(1,Ib)=AASb(Ib)-AASb(Ib+1);
end
EELa=zeros(1,10);
EELa(1)=1.0;
EELb=zeros(1,10);
EELb(1)=1.0;
for Ja=1:NIKIa-1;
    EELa(Ja+1)=FFLa(Ja,1);
    for Ia=1:NFSa;
        FFLa(Ja+1,Ia)=FFLa(Ja,Ia+1)-ATILa(Ia+1)*FFLa(Ja,1);
    end
end
for Jb=1:NIKIb-1;
    EELb(Jb+1)=FFLb(Jb,1);
    for Ib=1:NFSb;
        FFLb(Jb+1,Ib)=FFLb(Jb,Ib+1)-ATILb(Ib+1)*FFLb(Jb,1);
    end
end

```

```

    end
end
GDIAa=zeros(1,10);
GDIAb=zeros(1,10);
for Ja=1:NIKla;
    GDIAa(Ja)=0.0;
    JKLb=Ja;
    for Ia=1:JKLb;
        GDIAa(Ja)=BBSa(Ia)*EELa(Ja-Ia+1)+GDIAa(Ja);
    end
end
for Jb=1:NIKlb;
    GDIAb(Jb)=0.0;
    JKLb=Jb;
    for Ib=1:JKLb;
        GDIAb(Jb)=BBSb(Ib)*EELb(Jb-Ib+1)+GDIAb(Jb);
    end
end
GSTEPa=zeros(1,10);
GSTEPb=zeros(1,10);
for Ja=1:NIKla-1;
    GSTEPa(Ja)=0.0;
    JKLb=Ja;
    for Ia=1:JKLb;
        GSTEPa(Ja)=BBSa(Ia)*EELa(Ja-Ia+1)+GSTEPa(Ja);
    end
end
for Jb=1:NIKlb-1;
    GSTEPb(Jb)=0.0;
    JKLb=Jb;
    for Ib=1:JKLb;
        GSTEPb(Jb)=BBSb(Ib)*EELb(Jb-Ib+1)+GSTEPb(Jb);
    end
end
GZa=zeros(1,10);
GZb=zeros(1,10);
for Ja=1:NUNUa;
    for Ia=Ja:NIKla;
        GZa(Ia,Ja)=GSTEPa(Ia-Ja+1);
    end
end
for Jb=1:NUNUb;
    for Ib=Jb:NIKlb;
        GZb(Ib,Jb)=GSTEPb(Ib-Jb+1);
    end
end
GTGa=zeros(1,10);
GTGa(NUNUa,NIKla)=0.0;

```

```

GTGb=zeros(1,10);
GTGb(NUNUb,NIKIb)=0.0;
if NUNUa==1;
    SCALa=0.;
    for Ia=1:NIKIa;
        SCALa=SCALa+GZa(Ia,1)*GZa(Ia,1);
    end
    SCALa=SCALa+ALAMa;
    for Ia=1:NIKIa;
        GTGa(1,Ia)=GZa(Ia,1)/SCALa;
    end
elseif NUNUa>1;
    GTGa=GZa'/(GZa*GZa'+ALAMa*eye(NIKIa,NIKIa));
else
end
if NUNUb==1;
    SCALb=0.;
    for Ib=1:NIKIb;
        SCALb=SCALb+GZb(Ib,1)*GZb(Ib,1);
    end
    SCALb=SCALb+ALAMb;
    for Ib=1:NIKIb;
        GTGb(1,Ib)=GZb(Ib,1)/SCALb;
    end
elseif NUNUb>1;
    GTGb=GZb'/(GZb*GZb'+ALAMb*eye(NIKIb,NIKIb));
else
end
yyyya(NSAYa)=u(1);
yyyya(NSAYa-1)=giris_n;
yyyya(NSAYa-2)=giris_n_1;
yyyya(NSAYa-3)=giris_n_2;
uuuuu(NSAYa)=cikis_na;
uuuuu(NSAYa-1)=cikis_na_1;
uuuuu(NSAYa-2)=cikis_na_2;
uuuuu(NSAYa-3)=cikis_na_3;
wwwwa(NSAYa)=u(2);
wwwwa(NSAYa-1)=sp_n;
wwwwa(NSAYa-2)=sp_n_1;
wwwwa(NSAYa-3)=sp_n_2;
HFa=zeros(1,10);
WMFa=zeros(1,10);
yyyyb(NSAYb)=u(1);
yyyyb(NSAYb-1)=giris_n;
yyyyb(NSAYb-2)=giris_n_1;
yyyyb(NSAYb-3)=giris_n_2;
uuuub(NSAYb)=cikis_nb;
uuuub(NSAYb-1)=cikis_nb_1;

```



```

uuuub(NSAYb-2)=cikis_nb_2;
uuuub(NSAYb-3)=cikis_nb_3;
wwwwb(NSAYb)=u(2);
wwwwb(NSAYb-1)=sp_n;
wwwwb(NSAYb-2)=sp_n_1;
wwwwb(NSAYb-3)=sp_n_2;
HFb=zeros(1,10);
WMFb=zeros(1,10);
for IWWa=1:NIKla;
    HFa(IWWa)=0.0;
for JWWa=1:NFSa;
    HFa(IWWa)=HFa(IWWa)+FFLa(IWWa,JWWa)*yyyya(NSAYa-JWWa+1);
end
HFa(IWWa)=GDIAa(IWWa)*(uuuua(NSAYa)-uuuua(NSAYa-1))+HFa(IWWa);
end
for IWWb=1:NIKlb;
    HFb(IWWb)=0.0;
for JWWb=1:NFSb;
    HFb(IWWb)=HFb(IWWb)+FFLb(IWWb,JWWb)*yyyby(NSAYb-JWWb+1);
end
HFb(IWWb)=GDIAb(IWWb)*(uuuub(NSAYb)-uuuub(NSAYb-1))+HFb(IWWb);
end

for IWWa=2:NIKla;
    wwwwa(IWWa)=ALWSa*wwwwa(IWWa-1)+(1.0-ALWSa)*wwwwa(NSAYa);
end
for IWWb=2:NIKlb;
    wwwwb(IWWb)=ALWSb*wwwwb(IWWb-1)+(1.0-ALWSb)*wwwwb(NSAYb);
end
for IWWa=1:NIKla;
    WMFa(IWWa)=wwwwa(IWWa)-HFa(IWWa);
end
for IWWb=1:NIKlb;
    WMFb(IWWb)=wwwwb(IWWb)-HFb(IWWb);
end
DELCONa=0.0;
DELCONb=0.0;
for JWWa=1:NIKla;
    DELCONa=DELCONa+GTGa(1,JWWa)*WMFa(JWWa);
end
for JWWb=1:NIKlb;
    DELCONb=DELCONb+GTGb(1,JWWb)*WMFb(JWWb);
end
deltaua = (1.0/1.0)*DELCONa;
outputa=cikis_na+deltaua;
deltaub = (1.0/1.0)*DELCONb;
outputb=cikis_nb-deltaub;
if (outputa < 0 )

```

```

        outputa = 0;
elseif (outputa > 2)
    outputa = 2;
end
    if (outputb < 0 )
        outputb = 0;
elseif (outputb > 0.5)
    outputb = 0.5;
end

sys(4) = giris_n_2;    %Input @ t(n-2)
sys(3) = giris_n_1;    %Input @ t(n-1)
sys(2) = giris_n;      %Input @ t(n)
sys(1) = u(1);         %Input @ t(n+1)

sys(12) = cikis_nb_2;   %Controller output @ t(n-2)
sys(11) = cikis_nb_1;   %Controller output @ t(n-1)
sys(10) = cikis_nb;     %Controller output @ t(n)
sys(9) = outputb;       %Controller output @ t(n+1)
sys(8) = cikis_na_2;    %Controller output @ t(n-2)
sys(7) = cikis_na_1;    %Controller output @ t(n-1)
sys(6) = cikis_na;      %Controller output @ t(n)
sys(5) = outputa;       %Controller output @ t(n+1)

sys(16) = sp_n_2;       %Set point @ t(n-2)
sys(15) = sp_n_1;       %Set point @ t(n-1)
sys(14) = sp_n;         %Set point @ t(n)
sys(13) = u(2);         %Set point @ t(n+1)

```

```

function sys=mdlOutputs(t,x,u)

```

```

sys(1) = x(1);
sys(2) = x(2);
sys(3) = x(3);
sys(4) = x(4);
sys(5) = x(5);
sys(6) = x(6);
sys(7) = x(7);
sys(8) = x(8);
sys(9) = x(9);
sys(10)= x(10);
sys(11)= x(11);
sys(12)= x(12);
sys(13)= x(13);
sys(14)= x(14);
sys(15)= x(15);
sys(16)= x(16);

```

```
function sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u)

sampleTime = 0.5; % Example, set the next hit to be one second later.
sys = t + sampleTime;

function sys=mdlTerminate(t,x,u)

sys = [];
```



EK 3 GMV pH kontrol algoritması

```
function [sys,x0,str,ts] = GMV_pH(t,x,u,flag)
switch flag,
```

```
    case 0,
        [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes;

    case 1,
        sys=mdlDerivatives(t,x,u);

    case 2,
        sys=mdlUpdate(t,x,u);

    case 3,
        sys=mdlOutputs(t,x,u);

    case 4,
        sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u);

    case 9,
        sys=mdlTerminate(t,x,u);

    otherwise
        error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]);
```

```
end
```

```
function [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes
```

```
    sizes = simsizes;
```

```
    sizes.NumContStates = 0;
    sizes.NumDiscStates = 16;
    sizes.NumOutputs    = 16;
    sizes.NumInputs     = 2;
    sizes.DirFeedthrough = 1;
    sizes.NumSampleTimes = 1; % at least one sample time is needed
```

```
    sys = simsizes(sizes);
```

```
    x0 = [8 8 8 8 0 0 0 0 0 0 0 0 8 8 8 8];
```

```
    str = [];
```

```
    ts = [-1 0]; % Inherited sample time
    function sys=mdlDerivatives(t,x,u)
```

```

sys = [];

function sys=mdlUpdate(t,x,u)

giris_n_3 = x(4);    %Input @ t(n-3)
giris_n_2 = x(3);    %Input @ t(n-2)
giris_n_1 = x(2);    %Input @ t(n-1)
giris_n   = x(1);    %Input @ t(n)

cikis_nb_3 = x(12);   %Controller output @ t(n-3)
cikis_nb_2 = x(11);   %Controller output @ t(n-2)
cikis_nb_1 = x(10);   %Controller output @ t(n-1)
cikis_nb   = x(9);    %Controller output @ t(n)
cikis_na_3 = x(8);    %Controller output @ t(n-3)
cikis_na_2 = x(7);    %Controller output @ t(n-2)
cikis_na_1 = x(6);    %Controller output @ t(n-1)
cikis_na   = x(5);    %Controller output @ t(n)

sp_n_3   = x(16);    %Set point @ t(n-3)
sp_n_2   = x(15);    %Set point @ t(n-2)
sp_n_1   = x(14);    %Set point @ t(n-1)
sp_n     = x(13);    %Set point @ t(n)

AASa=zeros(1,10);
BBSa=zeros(1,10);
AASa(1)=-0.9846;
AASa(2)=-0.00020054;
AASa(3)=0.0;
AASa(4)=0.0;
BBSa(1)=-0.00055438;
BBSa(2)=0.0;
CCSa(1)=1.0;
NAASa=2;
NBBSa=1;
NGGSa=1.0;
NFFSa=2.0;
NCCSa=1.0;
USUMa=0.0;
YSUMa=0.0;
WSUMa=0.0;
ALMBDAa=0.0;
QQSa=0.0000001;
RRSa=1.0;
DELEZa=0.0;
NSAYa=NAASa+NBBSa+1;
AASb=zeros(1,10);
BBSb=zeros(1,10);
AASb(1)=-0.9846;

```

```

AASb(2)=-0.00020054;
AASb(3)=0.0;
AASb(4)=0.0;
BBSb(1)=-0.0057;
BBSb(2)=0.0;
CCSb(1)=1.0;
NAASb=2;
NBBSb=1;
NGGSb=1.0;
NFFSb=2.0;
NCCSb=1.0;
USUMb=0.0;
YSUMb=0.0;
WSUMb=0.0;
ALMBDAb=0.0;
QQSb=0.0000001;
RRSb=1.0;
DELEZb=0.0;
NSAYb=NAASb+NBBSb+1;
GGSa(1)=BBSa(1);
FFSa(1)=-AASa(1);
FFSa(2)=-AASa(2);
GGSb(1)=BBSb(1);
FFSb(1)=-AASb(1);
FFSb(2)=-AASb(2);
yyyya(NSAYa)=u(1);
yyyya(NSAYa-1)=giris_n;
yyyya(NSAYa-2)=giris_n_1;
yyyya(NSAYa-3)=giris_n_2;
uuuua(NSAYa)=cikis_na;
uuuua(NSAYa-1)=cikis_na_1;
uuuua(NSAYa-2)=cikis_na_2;
uuuua(NSAYa-3)=cikis_na_3;
wwwwa(NSAYa)=u(2);
wwwwa(NSAYa-1)=sp_n;
wwwwa(NSAYa-2)=sp_n_1;
wwwwa(NSAYa-3)=sp_n_2;
yyyby(NSAYb)=u(1);
yyyby(NSAYb-1)=giris_n;
yyyby(NSAYb-2)=giris_n_1;
yyyby(NSAYb-3)=giris_n_2;
uuuub(NSAYb)=cikis_nb;
uuuub(NSAYb-1)=cikis_nb_1;
uuuub(NSAYb-2)=cikis_nb_2;
uuuub(NSAYb-3)=cikis_nb_3;
wwwwb(NSAYb)=u(2);
wwwwb(NSAYb-1)=sp_n;
wwwwb(NSAYb-2)=sp_n_1;

```

```

    wwwwb(NSAYb-3)=sp_n_2;
for III=1:NGGSa;
    USUMa=USUMa+GGSa(III);
end
for III=1:NFFSa;
    YSUMa=YSUMa+FFSa(III)*(yyyya(NSAYa-III+1)-wwwwa(NSAYa-III+1));
end
for III=1:NCCSa;
    WSUMa=WSUMa+CCSa(III)*(wwwa(NSAYa-III+1)-wwwa(NSAYa-
III+1))*RRSa;
    ALMBDAa=ALMBDAa+CCSa(III)*QQSa;
end
for III=1:NGGSb;
    USUMb=USUMb+GGSb(III);
end
for III=1:NFFSb;
    YSUMb=YSUMb+FFSb(III)*(yyyb(NSAYb-III+1)-wwwb(NSAYb-III+1));
end
for III=1:NCCSb;
    WSUMb=WSUMb+CCSb(III)*(wwwb(NSAYb-III+1)-wwwb(NSAYb-
III+1))*RRSb;
    ALMBDAb=ALMBDAb+CCSb(III)*QQSb;
end

    DELCONa=(WSUMa-YSUMa-DELEZa)/(ALMBDAa+USUMa);
    DELCONb=(WSUMb-YSUMb-DELEZb)/(ALMBDAb+USUMb);

    deltaua = (1.0/1.0)*DELCONa;
    outputa=cikis_na+deltaua;
    deltaub = (1.0/1.0)*DELCONb;
    outputb=cikis_nb-deltaub;
    if (outputa < 0 )
        outputa = 0;
    elseif (outputa > 2)
        outputa = 2;
    end
    if (outputb < 0 )
        outputb = 0;
    elseif (outputb > 0.5)
        outputb = 0.5;
    end
    for JK=1:NSAYa-1;
        uuuua(JK)=uuuua(JK+1);
        wwwa(JK)=wwwa(JK+1);
        yyyy(JK)=yyyy(JK+1);
    end
    for JK=1:NSAYb-1;
        uuub(JK)=uuub(JK+1);

```

```

        wwwwb(JK)=wwwwb(JK+1);
        yyyyb(JK)=yyyyb(JK+1);
    end

    sys(4) = giris_n_2;    %Input @ t(n-2)
    sys(3) = giris_n_1;    %Input @ t(n-1)
    sys(2) = giris_n;      %Input @ t(n)
    sys(1) = u(1);         %Input @ t(n+1)

    sys(12) = cikis_nb_2;   %Controller output @ t(n-2)
    sys(11) = cikis_nb_1;   %Controller output @ t(n-1)
    sys(10) = cikis_nb;     %Controller output @ t(n)
    sys(9) = outputb;       %Controller output @ t(n+1)
    sys(8) = cikis_na_2;    %Controller output @ t(n-2)
    sys(7) = cikis_na_1;    %Controller output @ t(n-1)
    sys(6) = cikis_na;      %Controller output @ t(n)
    sys(5) = outputa;       %Controller output @ t(n+1)

    sys(16) = sp_n_2;       %Set point @ t(n-2)
    sys(15) = sp_n_1;       %Set point @ t(n-1)
    sys(14) = sp_n;         %Set point @ t(n)
    sys(13) = u(2);         %Set point @ t(n+1)

function sys=mdlOutputs(t,x,u)

    sys(1) = x(1);
    sys(2) = x(2);
    sys(3) = x(3);
    sys(4) = x(4);
    sys(5) = x(5);
    sys(6) = x(6);
    sys(7) = x(7);
    sys(8) = x(8);
    sys(9) = x(9);
    sys(10)= x(10);
    sys(11)= x(11);
    sys(12)= x(12);
    sys(13)= x(13);
    sys(14)= x(14);
    sys(15)= x(15);
    sys(16)= x(16);
    function sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u)

    sampleTime = 0.5; % Example, set the next hit to be one second later.
    sys = t + sampleTime;

    function sys=mdlTerminate(t,x,u)
    sys = [];

```


EK 4 Adaptif GMV pH kontrol algoritması

```
function [sys,x0,str,ts] = GMVb_pH(t,x,u,flag)
switch flag,
```

```
case 0,
    [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes;
```

```
case 1,
    sys=mdlDerivatives(t,x,u);
```

```
case 2,
    sys=mdlUpdate(t,x,u);
```

```
case 3,
    sys=mdlOutputs(t,x,u);
```

```
case 4,
    sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u);
```

```
case 9,
    sys=mdlTerminate(t,x,u);
```

```
otherwise
    error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]);
```

```
end
```

```
function [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes
```

```
sizes = simsizes;
```

```
sizes.NumContStates = 0;
sizes.NumDiscStates = 33;
sizes.NumOutputs    = 33;
sizes.NumInputs     = 2;
sizes.DirFeedthrough = 1;
sizes.NumSampleTimes = 1; % at least one sample time is needed
```

```
sys = simsizes(sizes);
```

```
x0 = [2.28 2.28 2.28 0 0 0 0 0 0 2.28 2.28 2.28 2.28 -0.9846 -0.00020054 0.00055438 0
0.79 -0.1656 -0.1399 0 0 0 -0.9846 -0.00020054 0.0057 0 0.79 -0.1656 -0.1399 0 0 0];
str = [];
```

```
ts = [-1 0];
function sys=mdlDerivatives(t,x,u)
```

```

sys = [];

function sys=mdlUpdate(t,x,u)

gir_n_2 = x(3);    %Input @ t(n-2)
gir_n_1 = x(2);    %Input @ t(n-1)
gir_n   = x(1);    %Input @ t(n)

cik_n_2a = x(9);    %Controller output @ t(n-2)
cik_n_1a = x(8);    %Controller output @ t(n-1)
cik_na   = x(7);    %Controller output @ t(n)
cik_n_2  = x(6);    %Controller output @ t(n-2)
cik_n_1  = x(5);    %Controller output @ t(n-1)
cik_n    = x(4);    %Controller output @ t(n)

sp_n_3   = x(13);    %Set point @ t(n-3)
sp_n_2   = x(12);    %Set point @ t(n-2)
sp_n_1   = x(11);    %Set point @ t(n-1)
sp_n     = x(10);    %Set point @ t(n)

a1=x(14);
a2=x(15);
b0=x(16);
b1=x(17);

f0=x(18);
f1=x(19);
fiki=x(20);
g0=x(21);
g1=x(22);
h0=x(23);

a1a=x(24);
a2a=x(25);
b0a=x(26);
b1a=x(27);

f0a=x(28);
f1a=x(29);
fikia=x(30);
g0a=x(31);
g1a=x(32);
h0a=x(33);
if t<=1

tetaest(1,1)=-0.9846;
tetaest(2,1)=-0.00020054;
tetaest(3,1)=0.00055438;

```

```

tetaest(4,1)=0;

for I=1:6
    for J=1:1
        tetaesti(I,J)=0.001;
    end
end

else

    tetaest(1,1)=a1;
    tetaest(2,1)=a2;
    tetaest(3,1)=b0;
    tetaest(4,1)=b1;

    tetaesti(1,1)= f0;
    tetaesti(2,1)= f1;
    tetaesti(3,1)= fiki;
    tetaesti(4,1)= g0;
    tetaesti(5,1)= g1;
    tetaesti(6,1)= h0;
end

for I=1:4
    for J=1:4
        P(I,J)=0;
    end
end
for I=1:4
    P(I,I)=10000.0;
end

    for I=1:6
        for J=1:6
            P2(I,J)=0;
        end
    end
    for I=1:6
        P2(I,I)=10000.0;
    end

lamda=0.99;

Pfonk=2;    % Minimum prediction horizon
Qfonk=0.8;  % Maximum prediction horizon
Rfonk=2;

Ai=[1 0.783 0.072];

```

```

Bi=[0.01152 0];
Ci=[1];
Di=[1];
Fi=[1 0.2 -0.1];
Gi=[1 1];
Hi=[1];

lA=length(Ai);
nA=lA-1;
lB=length(Bi);
nB=lB;
nC=length(Ci);
nD=length(Di);
lF=length(Fi);
nF=lF;
lG=length(Gi);
nG=lG;
lH=length(Hi);
nH=lH;
lt=nA+nB;
lt2=nF+nG+nH;

    F(1,1)=(-1.0)*gir_n;
    F(2,1)=(-1.0)*gir_n_1;
    F(3,1)=cik_n;
    F(4,1)=cik_n_1;
    for I=1:lt;
        for J=1:1;
            FT(J,I)=F(I,J);
        end
    end

    for I=1:1;
        for J=1:1;
            D(I,J)=0;
            for K=1:lt;
                D(I,J)=D(I,J)+FT(I,K)*tetaest(K,J);
            end
        end
    end

    E=D(1,1);

    EPS=u(1)-E;

    for I=1:lt;
        for J=1:1;
            S(I,J)=0;

```

```

for K=1:lt;
S(I,J)=S(I,J)+P(I,K)*F(K,J);
end
end
end

    for I=1:1;
    for J=1:lt;
    T(I,J)=0;
    for K=1:lt
    T(I,J)=T(I,J)+FT(I,K)*P(K,J);
    end
    end
    end

for I=1:1;
    for J=1:1;
    R(I,J)=0;
    for K=1:lt;
    R(I,J)=R(I,J)+FT(I,K)*S(K,J);
    end
    end
    end

PAYDA=R(1,1)+lamda;
for I=1:lt;
    for J=1:lt;
    V(I,J)=0;
    for K=1:1;
    V(I,J)=V(I,J)+S(I,K)*T(K,J);
    end
    end
    end

CARPIM=1/PAYDA;

for I=1:lt;
    for J=1:lt;
    W(I,J)=V(I,J)*CARPIM;
    end
    end

for I=1:lt;
    for J=1:lt;
    W(I,J)=W(I,J)*(-1);
    end
    end

```

```

for I=1:lt;
    for J=1:lt;
        C(I,J)=P(I,J)+W(I,J);
    end
end

```

```

for I=1:lt;
    for J=1:lt;
        P(I,J)=C(I,J)*(1.0/lamda);
    end
end

```

```

for I=1:lt;
    for J=1:1;
        XF(I,J)=0;
    for K=1:lt;
        XF(I,J)=XF(I,J)+P(I,K)*F(K,J);
    end
    end
end

```

```

for I=1:lt;
    for J=1:1;
        O(I,J)=XF(I,J)*EPS;
    end
end

```

```

for I=1:lt;
    for J=1:1;
        tetaest(I,J)=tetaest(I,J)+O(I,J);
    end
end

```

```

A1=tetaest(1,1);
A2=tetaest(2,1);
%A3=tetaest(3,1);
B0=tetaest(3,1);
B1=tetaest(4,1);

```

```

PSE=(Pfonk*u(1))+(Qfonk*cik_n)-(Rfonk*sp_n);

```

```

F2(1,1)=cik_n;
F2(2,1)=cik_n_1;
F2(3,1)=cik_n_2;
F2(4,1)=gir_n;
F2(5,1)=gir_n_1;
F2(6,1)=sp_n;

```

```

for I=1:lt2;
for J=1:1;
FT2(J,I)=F2(I,J);
end
end

```

```

for I=1:1;
for J=1:1;
D2(I,J)=0;
for K=1:lt2;
D2(I,J)=D2(I,J)+FT2(I,K)*tetaesti(K,J);
end
end
end

```

```

E2=D2(1,1);
EPS2=PSE-E2;

```

```

for I=1:lt2;
for J=1:1;
S2(I,J)=0;
for K=1:lt2;
S2(I,J)=S2(I,J)+P2(I,K)*F2(K,J);
end
end
end

```

```

for I=1:1;
for J=1:lt2;
T2(I,J)=0;
for K=1:lt2;
T2(I,J)=T2(I,J)+FT2(I,K)*P2(K,J);
end
end
end

```

```

for I=1:1;
for J=1:1;
R2(I,J)=0;
for K=1:lt2;
R2(I,J)=R2(I,J)+FT2(I,K)*S2(K,J);
end
end
end

```

```

PAYDA2=R2(1,1)+lamda;

```

```

for I=1:lt2;

```

```

for J=1:lt2;
V2(I,J)=0;
for K=1:1;
V2(I,J)=V2(I,J)+S2(I,K)*T2(K,J);
end
end
end

CARPIM2=1/PAYDA2;
for I=1:lt2;
for J=1:lt2;
W2(I,J)=V2(I,J)*CARPIM2;
end
end

for I=1:lt2;
for J=1:lt2;
W2(I,J)=W2(I,J)*(-1);
end
end

for I=1:lt2;
for J=1:lt2;
C2(I,J)=P2(I,J)+W2(I,J);
end
end

for I=1:lt2;
for J=1:lt2;
P2(I,J)=C2(I,J)*(1.0/lamda);
end
end

for I=1:lt2;
for J=1:1;
XF2(I,J)=0;
for K=1:lt2;
XF2(I,J)=XF2(I,J)+P2(I,K)*F2(K,J);
end
end
end

for I=1:lt2;
for J=1:1;
O2(I,J)=XF2(I,J)*EPS2;
end
end

```



```

for I=1:lt2;
for J=1:1;
tetaesti(I,J)=tetaesti(I,J)+O2(I,J);
end
end

```

```

f0=tetaesti(1,1);
f1=tetaesti(2,1);
fiki=tetaesti(3,1);
g0=tetaesti(4,1);
g1=tetaesti(5,1);
h0=tetaesti(6,1);

```

```

if t<=1

```

```

    tetaesta(1,1)=-0.9846;
    tetaesta(2,1)=-0.00020054;
    tetaesta(3,1)=0.0057;
    tetaesta(4,1)=0;

```

```

for Ia=1:6
for Ja=1:1
    tetaestia(Ia,Ja)=0.001;
end
end

```

```

else

```

```

    tetaesta(1,1)=a1a;
    tetaesta(2,1)=a2a;
    tetaesta(3,1)=b0a;
    tetaesta(4,1)=b1a;

```

```

    tetaestia(1,1)= f0a;
    tetaestia(2,1)= f1a;
    tetaestia(3,1)= fikia;
    tetaestia(4,1)= g0a;
    tetaestia(5,1)= g1a;
    tetaestia(6,1)= h0a;

```

```

end

```

```

for Ia=1:4
for Ja=1:4
    Pa(Ia,Ja)=0;
end
end
for Ia=1:4
    Pa(Ia,Ia)=10000.0;
end

```

```

        for Ia=1:6
        for Ja=1:6
            P2a(Ia,Ja)=0;
        end
        end
        for Ia=1:6
            P2a(Ia,Ia)=10000.0;
        end

lamdaa=0.99;

Pfonka=2;    % Minimum prediction horizon
Qfonka=1;    % Maximum prediction horizon
Rfonka=2;

Aia=[1 0.783 0.072];
Bia=[0.01152 0];
Cia=[1];
Fia=[1 0.2 -0.1];
Gia=[1 1];
Hia=[1];

lAa=length(Aia);
nAa=lAa-1;
lBa=length(Bia);
nBa=lBa;
nCa=length(Cia);
lFa=length(Fia);
nFa=lFa;
lGa=length(Gia);
nGa=lGa;
lHa=length(Hia);
nHa=lHa;
lta=nAa+nBa;
lt2a=nFa+nGa+nHa;

Fa(1,1)=(1.0)*gir_n;
Fa(2,1)=(1.0)*gir_n_1;
Fa(3,1)=cik_na;
Fa(4,1)=cik_n_1a;
%F(5,1)=cik_n_2;

for Ia=1:lta;
for Ja=1:1;
    FTa(Ja,Ia)=F(Ia,Ja);
end
end

```

```

for Ia=1:1;
for Ja=1:1;
Da(Ia,Ja)=0;
for Ka=1:lta;
Da(Ia,Ja)=Da(Ia,Ja)+FTa(Ia,Ka)*tetaesta(Ka,Ja);
end
end
end

```

```

Ea=Da(1,1);

```

```

EPSa=u(1)-Ea;

```

```

for Ia=1:lta;
for Ja=1:1;
Sa(Ia,Ja)=0;
for Ka=1:lta;
Sa(Ia,Ja)=Sa(Ia,Ja)+Pa(Ia,Ka)*Fa(Ka,Ja);
end
end
end

```

```

for Ia=1:1;
for Ja=1:lta;
Ta(Ia,Ja)=0;
for Ka=1:lta
Ta(Ia,Ja)=Ta(Ia,Ja)+FTa(Ia,Ka)*Pa(Ka,Ja);
end
end
end

```

```

for Ia=1:1;
for Ja=1:1;
Ra(Ia,Ja)=0;
for Ka=1:lta;
Ra(Ia,Ja)=Ra(Ia,Ja)+FTa(Ia,Ka)*Sa(Ka,Ja);
end
end
end

```

```

PAYDAa=Ra(1,1)+lamdaa;

```

```

for Ia=1:lta;
for Ja=1:lta;
Va(Ia,Ja)=0;
for Ka=1:1;
Va(Ia,Ja)=Va(Ia,Ja)+Sa(Ia,Ka)*Ta(Ka,Ja);
end
end
end

```

```

end

CARPIMa=1/PAYDAa;

for Ia=1:lta;
    for Ja=1:lta;
        Wa(Ia,Ja)=Va(Ia,Ja)*CARPIMa;
    end
end

for Ia=1:lta;
    for Ja=1:lta;
        Wa(Ia,Ja)=Wa(Ia,Ja)*(-1);
    end
end

for Ia=1:lta;
    for Ja=1:lta;
        Ca(Ia,Ja)=Pa(Ia,Ja)+Wa(Ia,Ja);
    end
end

for Ia=1:lta;
    for Ja=1:lta;
        Pa(Ia,Ja)=Ca(Ia,Ja)*(1.0/lamdaa);
    end
end

for Ia=1:lta;
    for Ja=1:1;
        XFa(Ia,Ja)=0;
    for Ka=1:lta;
        XFa(Ia,Ja)=XFa(Ia,Ja)+Pa(Ia,Ka)*Fa(Ka,Ja);
    end
    end
end

for Ia=1:lta;
    for Ja=1:1;
        Oa(Ia,Ja)=XFa(Ia,Ja)*EPSa;
    end
end

for Ia=1:lta;
    for Ja=1:1;
        tetasta(Ia,Ja)=tetasta(Ia,Ja)+Oa(Ia,Ja);
    end
end

```

```

A1a=tetaesta(1,1);
A2a=tetaesta(2,1);
B0a=tetaesta(3,1);
B1a=tetaesta(4,1);

PSEa=(Pfonka*u(1))+(Qfonka*cik_na)-(Rfonka*sp_n);

F2a(1,1)=cik_na;
F2a(2,1)=cik_n_1a;
F2a(3,1)=cik_n_2a;
F2a(4,1)=-gir_n;
F2a(5,1)=-gir_n_1;
F2a(6,1)=sp_n;

for Ia=1:lt2a;
for Ja=1:1;
FT2a(Ja,Ia)=F2a(Ia,Ja);
end
end

for Ia=1:1;
for Ja=1:1;
D2a(Ia,Ja)=0;
for Ka=1:lt2a;
D2a(Ia,Ja)=D2a(Ia,Ja)+FT2a(Ia,Ka)*tetaestia(Ka,Ja);
end
end
end

E2a=D2a(1,1);
EPS2a=PSEa-E2a;

for Ia=1:lt2a;
for Ja=1:1;
S2a(Ia,Ja)=0;
for Ka=1:lt2a;
S2a(Ia,Ja)=S2a(Ia,Ja)+P2a(Ia,Ka)*F2a(Ka,Ja);
end
end
end

for Ia=1:1;
for Ja=1:lt2a;
T2a(Ia,Ja)=0;
for Ka=1:lt2a;
T2a(Ia,Ja)=T2a(Ia,Ja)+FT2a(Ia,Ka)*P2a(Ka,Ja);
end
end
end

```

```

end

for Ia=1:1;
for Ja=1:1;
R2a(Ia,Ja)=0;
for Ka=1:lt2a;
R2a(Ia,Ja)=R2a(Ia,Ja)+FT2a(Ia,Ka)*S2a(Ka,Ja);
end
end
end

```

```

PAYDA2a=R2a(1,1)+lamdaa;

```

```

for Ia=1:lt2a;
for Ja=1:lt2a;
V2a(Ia,Ja)=0;
for Ka=1:1;
V2a(Ia,Ja)=V2a(Ia,Ja)+S2a(Ia,Ka)*T2a(Ka,Ja);
end
end
end

```

```

CARPIM2a=1/PAYDA2a;
for Ia=1:lt2a;
for Ja=1:lt2a;
W2a(Ia,Ja)=V2a(Ia,Ja)*CARPIM2a;
end
end

```

```

for Ia=1:lt2a;
for Ja=1:lt2a;
W2a(Ia,Ja)=W2a(Ia,Ja)*(-1);
end
end

```

```

for Ia=1:lt2a;
for Ja=1:lt2a;
C2a(Ia,Ja)=P2a(Ia,Ja)+W2a(Ia,Ja);
end
end

```

```

for Ia=1:lt2a;
for Ja=1:lt2a;
P2a(Ia,Ja)=C2a(Ia,Ja)*(1.0/lamdaa);
end
end

```

```

for Ia=1:lt2a;

```

```

    for Ja=1:1;
        XF2a(Ia,Ja)=0;
    for Ka=1:lt2a;
        XF2a(Ia,Ja)=XF2a(Ia,Ja)+P2a(Ia,Ka)*F2a(Ka,Ja);
    end
    end
end

for Ia=1:lt2a;
    for Ja=1:1;
        O2a(Ia,Ja)=XF2a(Ia,Ja)*EPS2a;
    end
end

for Ia=1:lt2a;
    for Ja=1:1;
        tetaestia(Ia,Ja)=tetaestia(Ia,Ja)+O2a(Ia,Ja);
    end
end

f0a=tetaestia(1,1);
f1a=tetaestia(2,1);
fikia=tetaestia(3,1);
g0a=tetaestia(4,1);
g1a=tetaestia(5,1);
h0a=tetaestia(6,1);

giden=((h0*sp_n)-((g0*u(1))+(g1*gir_n)))/(f0+f1+fiki);
output=giden;

gidena=((h0a*sp_n)-((g0a*u(1))+(g1a*gir_n)))/(f0a+f1a+fikia);

outputa=gidena;

if (giden <0)
    output=0;
end
if (outputa <0)
    outputa=0;
end

sys(1) = u(1);           %Input @ t(n+1)
sys(2) = gir_n;          %Input @ t(n)
sys(3) = gir_n_1;        %Input @ t(n-1)
sys(4) = output;         %Input @ t(n-2)
sys(5) = cik_n;          %Controller output @ t(n+1)
sys(6) = cik_n_1;        %Controller output @ t(n-1),
sys(7) = outputa;        %Input @ t(n-2)

```

```

sys(8) = cik_na;      %Controller output @ t(n+1)
sys(9) = cik_n_1a;   %Controller output @ t(n-1)
sys(10)=u(2);
sys(11)=sp_n;
sys(12)=sp_n_1;
sys(13)=sp_n_2;
sys(14)=tetaest(1,1);%a1 baz
sys(15)=tetaest(2,1);%a2 baz
sys(16)=tetaest(3,1);%b0 baz
sys(17)=tetaest(4,1);

sys(18)=tetaesti(1,1);%f0 baz
sys(19)=tetaesti(2,1);%f1 baz
sys(20)=tetaesti(3,1);%f2 baz
sys(21)=tetaesti(4,1);%g0 baz
sys(22)=tetaesti(5,1);%g1 baz
sys(23)=tetaesti(6,1);%h0 baz

sys(24)=tetaesta(1,1);%a1 asit
sys(25)=tetaesta(2,1);%a2 asit
sys(26)=tetaesta(3,1);%b0 asit
sys(27)=tetaesta(4,1);

sys(28)=tetaestia(1,1);%f0 asit
sys(29)=tetaestia(2,1);%f1 asit
sys(30)=tetaestia(3,1);%f2 asit
sys(31)=tetaestia(4,1);%g0 asit
sys(32)=tetaestia(5,1);%g1 asit
sys(33)=tetaestia(6,1);%h0 asit
function sys=mdlOutputs(t,x,u)

```

```

sys(1) = x(1);
sys(2) = x(2);
sys(3) = x(3);
sys(4) = x(4);
sys(5) = x(5);
sys(6) = x(6);
sys(7) = x(7);
sys(8) = x(8);
sys(9) = x(9);
sys(10) = x(10);
sys(11) = x(11);
sys(12) = x(12);
sys(13) = x(13);
sys(14) = x(14);
sys(15) = x(15);
sys(16) = x(16);
sys(17) = x(17);

```



```
sys(18)= x(18);
sys(19)= x(19);
sys(20)= x(20);
sys(21)= x(21);
sys(22)= x(22);
sys(23)= x(23);
sys(24)= x(24);
sys(25)= x(25);
sys(26)= x(26);
sys(27)= x(27);
sys(28)= x(28);
sys(29)= x(29);
sys(30)= x(30);
sys(31)= x(31);
sys(32)= x(32);
sys(33)= x(33);
function sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u)
    sampleTime = 0.5;
    sys = t + sampleTime;
function sys=mdlTerminate(t,x,u)
    sys = [];
```

EK 5 % 95 güven seviyesi için F dağılımı çizelgesi

df	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	50	100	∞
1	161.45	199.50	215.71	224.58	230.16	233.99	236.77	238.88	240.54	241.88	245.95	248.02	249.26	250.10	251.77	253.04	254.32
2	18.5128	19.0000	19.1642	19.2467	19.2963	19.3295	19.3531	19.3709	19.3847	19.3959	19.4291	19.4457	19.4557	19.4625	19.4757	19.4857	19.4957
3	10.1280	9.5521	9.2766	9.1172	9.0134	8.9407	8.8867	8.8452	8.8123	8.7855	8.7028	8.6602	8.6341	8.6166	8.5810	8.5539	8.5265
4	7.7086	6.9443	6.5914	6.3882	6.2561	6.1631	6.0942	6.0410	5.9988	5.9644	5.8578	5.8025	5.7687	5.7459	5.6995	5.6640	5.6281
5	6.6079	5.7861	5.4094	5.1922	5.0503	4.9503	4.8759	4.8183	4.7725	4.7351	4.6188	4.5581	4.5209	4.4957	4.4444	4.4051	4.3650
6	5.9874	5.1432	4.7571	4.5337	4.3874	4.2839	4.2067	4.1468	4.0990	4.0600	3.9381	3.8742	3.8348	3.8082	3.7537	3.7117	3.6689
7	5.5915	4.7374	4.3468	4.1203	3.9715	3.8660	3.7871	3.7257	3.6767	3.6365	3.5107	3.4445	3.4036	3.3758	3.3189	3.2749	3.2298
8	5.3176	4.4590	4.0662	3.8379	3.6875	3.5806	3.5005	3.4381	3.3881	3.3472	3.2184	3.1503	3.1081	3.0794	3.0204	2.9747	2.9276
9	5.1174	4.2565	3.8625	3.6331	3.4817	3.3738	3.2927	3.2296	3.1789	3.1373	3.0061	2.9365	2.8932	2.8637	2.8028	2.7556	2.7067
10	4.9646	4.1028	3.7083	3.4780	3.3258	3.2172	3.1355	3.0717	3.0204	2.9782	2.8450	2.7740	2.7298	2.6996	2.6371	2.5884	2.5379
11	4.8443	3.9823	3.5874	3.3567	3.2039	3.0946	3.0123	2.9480	2.8962	2.8536	2.7186	2.6464	2.6014	2.5705	2.5066	2.4566	2.4045
12	4.7472	3.8853	3.4903	3.2592	3.1059	2.9961	2.9134	2.8486	2.7964	2.7534	2.6169	2.5436	2.4977	2.4663	2.4010	2.3498	2.2962
13	4.6672	3.8056	3.4105	3.1791	3.0254	2.9153	2.8321	2.7669	2.7144	2.6710	2.5331	2.4589	2.4123	2.3803	2.3138	2.2614	2.2064
14	4.6001	3.7389	3.3439	3.1122	2.9582	2.8477	2.7642	2.6987	2.6458	2.6022	2.4630	2.3879	2.3407	2.3082	2.2405	2.1870	2.1307
15	4.5431	3.6823	3.2874	3.0556	2.9013	2.7905	2.7066	2.6408	2.5876	2.5437	2.4034	2.3275	2.2797	2.2468	2.1780	2.1254	2.0659
16	4.4940	3.6337	3.2389	3.0069	2.8524	2.7413	2.6572	2.5911	2.5377	2.4935	2.3522	2.2756	2.2272	2.1938	2.1240	2.0685	2.0096
17	4.4513	3.5915	3.1968	2.9647	2.8100	2.6987	2.6143	2.5480	2.4943	2.4499	2.3077	2.2304	2.1815	2.1477	2.0769	2.0204	1.9604
18	4.4139	3.5546	3.1599	2.9277	2.7729	2.6613	2.5767	2.5102	2.4563	2.4117	2.2686	2.1906	2.1413	2.1071	2.0354	1.9780	1.9168
19	4.3808	3.5219	3.1274	2.8951	2.7401	2.6283	2.5435	2.4768	2.4227	2.3779	2.2341	2.1555	2.1057	2.0712	1.9986	1.9403	1.8780
20	4.3513	3.4928	3.0984	2.8661	2.7109	2.5990	2.5140	2.4471	2.3928	2.3479	2.2033	2.1242	2.0739	2.0391	1.9656	1.9066	1.8432
25	4.2417	3.3852	2.9912	2.7587	2.6030	2.4904	2.4047	2.3371	2.2821	2.2365	2.0889	2.0075	1.9554	1.9192	1.8421	1.7794	1.7110
30	4.1709	3.3158	2.9223	2.6896	2.5336	2.4205	2.3343	2.2662	2.2107	2.1646	2.0148	1.9317	1.8782	1.8409	1.7609	1.6950	1.6223
35	4.1213	3.2674	2.8742	2.6415	2.4851	2.3718	2.2852	2.2167	2.1608	2.1143	1.9629	1.8784	1.8239	1.7856	1.7032	1.6347	1.5580
40	4.0847	3.2317	2.8387	2.6060	2.4495	2.3359	2.2490	2.1802	2.1240	2.0773	1.9245	1.8389	1.7835	1.7444	1.6600	1.5892	1.5089
45	4.0566	3.2043	2.8115	2.5787	2.4221	2.3083	2.2212	2.1521	2.0958	2.0487	1.8949	1.8084	1.7522	1.7126	1.6264	1.5536	1.4700
50	4.0343	3.1826	2.7900	2.5572	2.4004	2.2864	2.1992	2.1299	2.0733	2.0261	1.8714	1.7841	1.7273	1.6872	1.5995	1.5249	1.4383
100	3.9562	3.0873	2.6955	2.4626	2.3053	2.1906	2.1025	2.0323	1.9748	1.9267	1.7675	1.6764	1.6163	1.5733	1.4772	1.3917	1.2832
∞	3.8414	2.9957	2.6049	2.3719	2.2141	2.0986	2.0096	1.9384	1.8799	1.8307	1.6664	1.5705	1.5061	1.4591	1.3501	1.2434	1.0000

EK 6 YEKK algoritması

```
clear all
close all
Cdinamik;

for i=1:9555;
    r(i)=u(i);
    b(i)=y(i);
end

u=r;
y=b;

teta=3;
L=teta;
nB=1;
nA=2;
lamda=0.98;

sp=0.5;           % örnekleme aralığı
simutime=4777;    % benzetim süresi

t=0:sp:simutime;
itno=length(t);

alfa=1000;
P=alfa*eye(L);    % Kovaryans matrisi

for n=1:nA+1
    tetaest(:,n)=0.0*ones(L,1); % Parametre matrisi
    phi(:,n)=zeros(L,1);        % Veri matrisi
    eps(n)=0;                   % Hata
end

for n=nA+2:itno
    phi(:,n)=[-y(n-1:-1:n-nA) u(n-1:-1:n-nB)]';
    eps(n)=y(n)-phi(:,n)'*tetaest(:,n-1);

    P=(1/lamda)*(P-(P*phi(:,n)*phi(:,n)'*P)/(lamda+phi(:,n)'*P*phi(:,n)));
    tetaest(:,n)=tetaest(:,n-1)+P*phi(:,n)*eps(n);

    yk(n)=phi(:,n)'*tetaest(:,n);
    res(n)=y(n)-yk(n);
    hata(n)=(y(n)-yk(n))^2;
    ISE=sum(hata);
```

```

end

NORM=norm((y-yk)/y);

ISE1=sum(hata);
IAE=sum(abs(hata));
ITAE=sum(t(n)*(abs(hata)));
ITSE=sum(t(n)*(hata.^2));
l=max(u);
k=min(y);
r=max(y);
figure(1)

subplot(312)
plot(t,u)
axis([0 simutime 0 l+5])
ylabel('Destek Elektrolit Akis Hizi (mL/dk)')

subplot(311)
plot(t,y,'r',t,yk,'b')
axis([0 simutime k-0.1 r+0.1])
ylabel('İletkenlik, mS/cm')

subplot(313)
plot(t,tetaest)
axis([0 simutime -2.5 2.0])
xlabel('Zaman Adimi Sayisi')
ylabel('Parametreler')
su=gcf;
saveas(su,'na2nb1lam0.98tum.jpg')
saveas(su,'na2nb1lam0.98tum.fig')
figure(2)
plot(t,tetaest)
axis([0 simutime -5 5.0])
xlabel('Zaman adimi sayisi')
ylabel('parametreler')
suu=gcf;
saveas(suu,'na2nb1lam0.98parametreler.jpg')
saveas(suu,'na2nb1lam0.98parametreler.fig')
tetaest=tetaest';

```

EK 7 Kutup yerleştirme arayüz programı

```
function varargout = kutupyerlestir(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
    'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @kutupyerlestir_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn', @kutupyerlestir_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn', [] , ...
    'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
function kutupyerlestir_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;

guidata(hObject, handles);

function varargout = kutupyerlestir_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

function P_edit_Callback(hObject, eventdata, handles)
KC = str2double(get(hObject,'String'));
if (isempty(KC))
    set(hObject,'String','0')
end
guidata(hObject, handles);

function P_edit_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
    get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function I_edit_Callback(hObject, eventdata, handles)
Ki = str2double(get(hObject,'String'));
if (isnan(Ki))
    set(hObject,'String','1000000000')
end
guidata(hObject, handles);
```

```

function I_edit_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function D_edit_Callback(hObject, eventdata, handles)
KD = str2double(get(hObject,'String'));
if (isnan(KD))
set(hObject,'String','0.0000000001')
end
guidata(hObject, handles);
function D_edit_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function deltat_edit_Callback(hObject, eventdata, handles)
deltat = str2double(get(hObject,'String'));
if (isnan(deltat))
set(hObject,'String','1')
end
guidata(hObject, handles);

function deltat_edit_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function bsifir_edit_Callback(hObject, eventdata, handles)
bsifir = str2double(get(hObject,'String')); %#ok<*ST2NM>
if (isnan(bsifir))
set(hObject,'String','0')
end
guidata(hObject, handles);

function bsifir_edit_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function aiki_edit_Callback(hObject, eventdata, handles)
aiki = str2double(get(hObject,'String'));

```

```

if (isnan(aiki))
set(hObject,'String','0')
end
guidata(hObject, handles);
function aiki_edit_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function abir_edit_Callback(hObject, eventdata, handles)
abir = str2double(get(hObject,'String'));
if (isnan(abir))
set(hObject,'String','0')
end
guidata(hObject, handles);

function abir_edit_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function calistir_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
abir = str2double(get(handles.abir_edit,'String')); aiki =
str2double(get(handles.aiki_edit,'String'));
bsifir = str2double(get(handles.bsifir_edit,'String'));
KC = str2double(get(handles.P_edit,'String'));
Ki = str2double(get(handles.I_edit,'String'));
KD = str2double(get(handles.D_edit,'String'));
deltat = str2double(get(handles.deltat_edit,'String'));

if KD > 0.0000000001 && Ki < 10000000000;
    s0=KC+((KC*deltat)/(2*Ki))+((KC*KD)/deltat);
    s1=((KC*deltat)/(2*Ki))-KC-((2*KC*KD)/deltat);
    s2=((KC*KD)/deltat);
    t1=(s0*bsifir)+abir-1;
    t2=(s1*bsifir)+aiki-abir;
    t3=(s2*bsifir)-aiki;
    T=[1 t1 t2 t3];
elseif KD == 0.0000000001 && Ki ~= 10000000000;
    s0=KC+((KC*deltat)/(2*Ki))+((KC*KD)/deltat);
    s1=-KC;
    t1=abir+(bsifir*s0)-1;
    t2=aiki-abir+(s1*bsifir);
    t3=-1*aiki;
    T=[1 t1 t2 t3];
elseif KD == 0.0000000001 && Ki == 10000000000;
    s0=KC+((KC*deltat)/(2*Ki))+((KC*KD)/deltat);

```

```

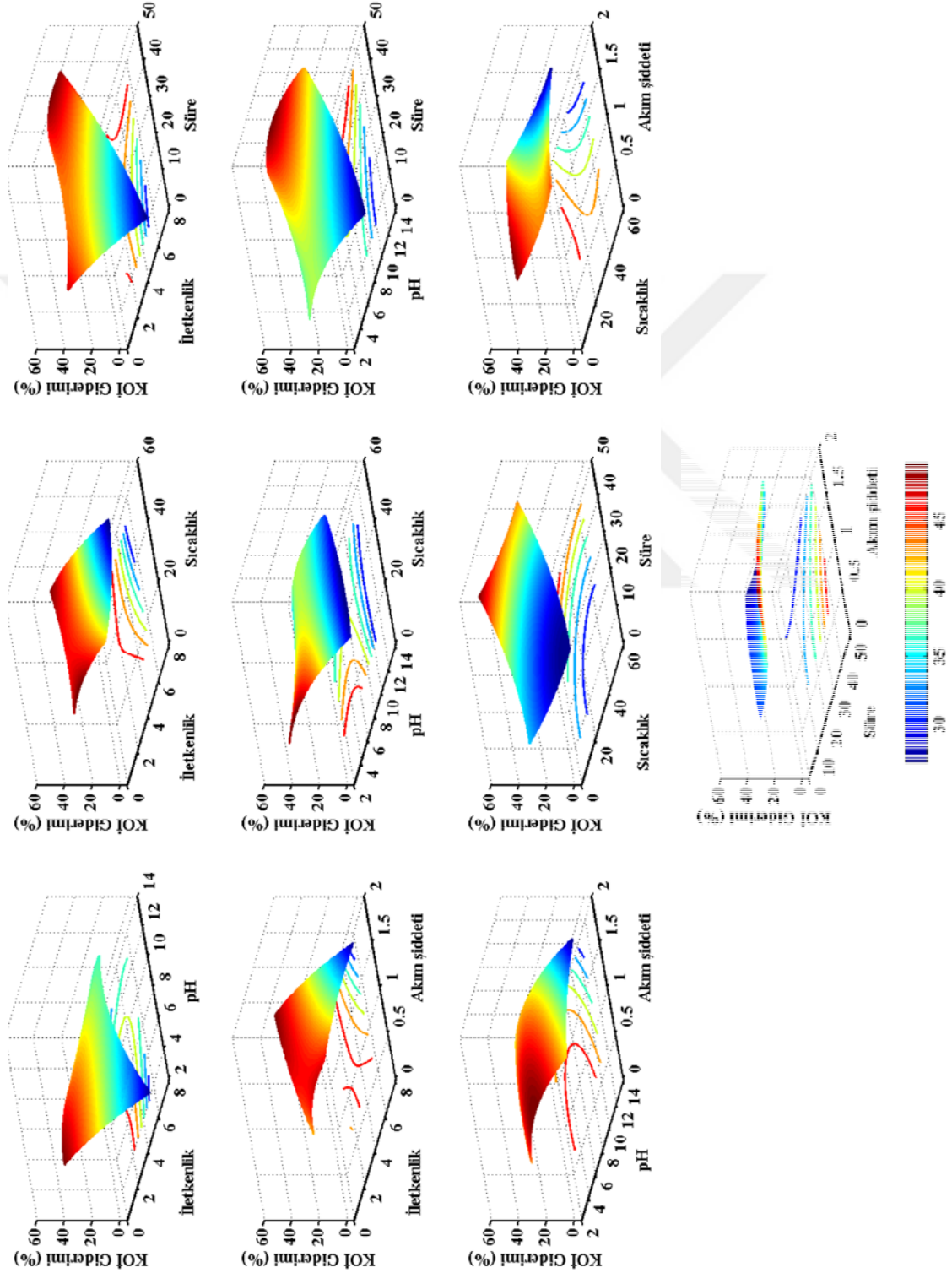
    t1=abir+bsifir*s0;
    t2=aiki;
    T=[1 t1 t2];
end
p=roots(T);
r=length(p);
if r>2
    c1=p(1);
    c2=p(2);
    c3=p(3);
    set(handles.answer_statictext,'String',c1);
    set(handles.answer1_statictext,'String',c2);
    set(handles.answer2_statictext,'String',c3);
else
    c1=p(1);
    c2=p(2);
    set(handles.answer_statictext,'String',c1);
    set(handles.answer1_statictext,'String',c2);
    set(handles.answer2_statictext,'String','0');
end

axes(handles.axes1)
zplane(p)
xlabel('Gerçek Eksen');
ylabel('Kompleks Eksen');
guidata(hObject, handles);

```

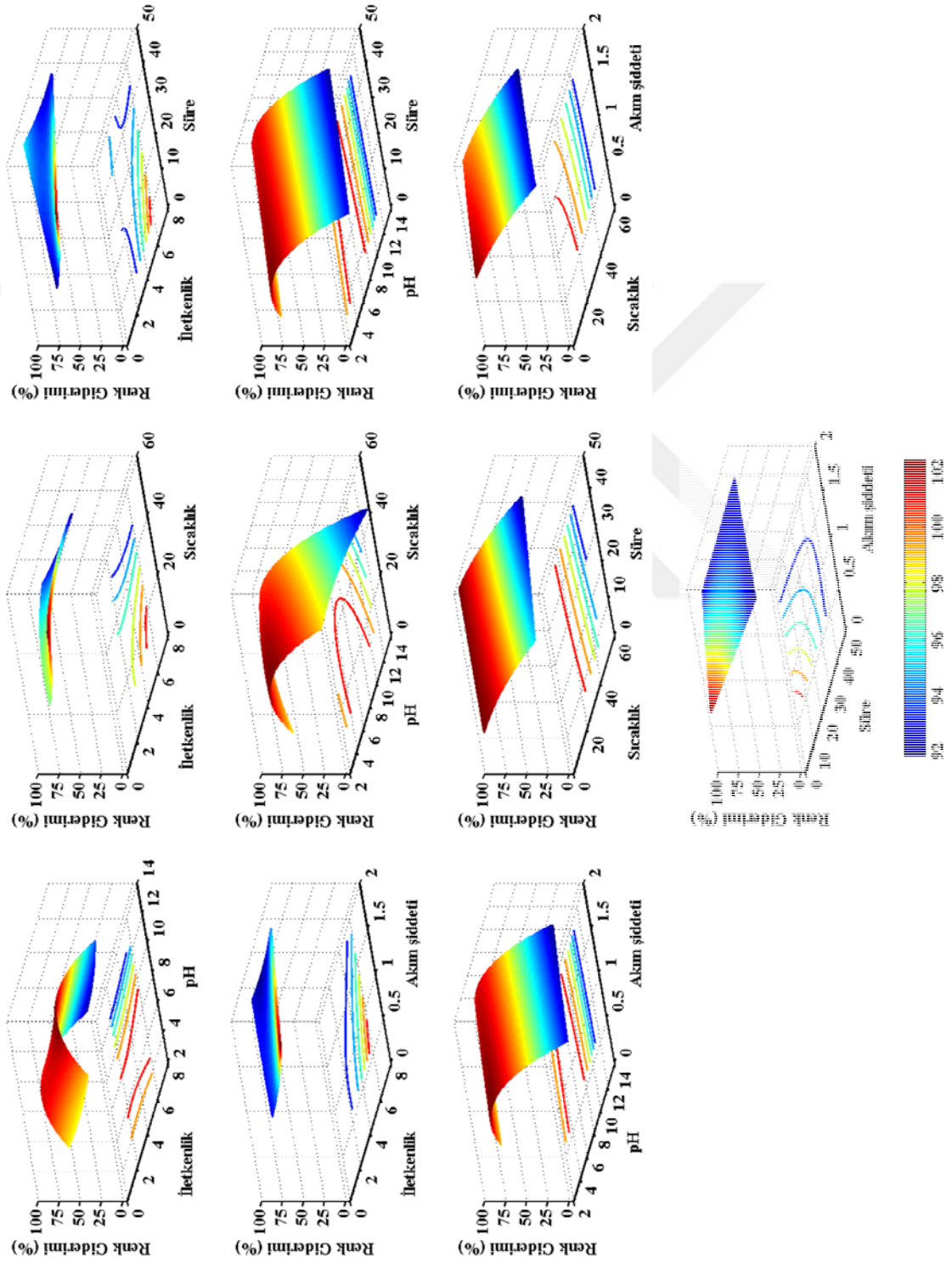

EK 8 Alüminyum elektrotlarla yapılan optimizasyon çalışmalarında KOİ giderimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri

(Elektriksel iletkenlik: 4.35 mS/cm, pH: 7.5, sıcaklık: 30 °C, süre: 25 dakika, akım şiddeti: 1.15 A)



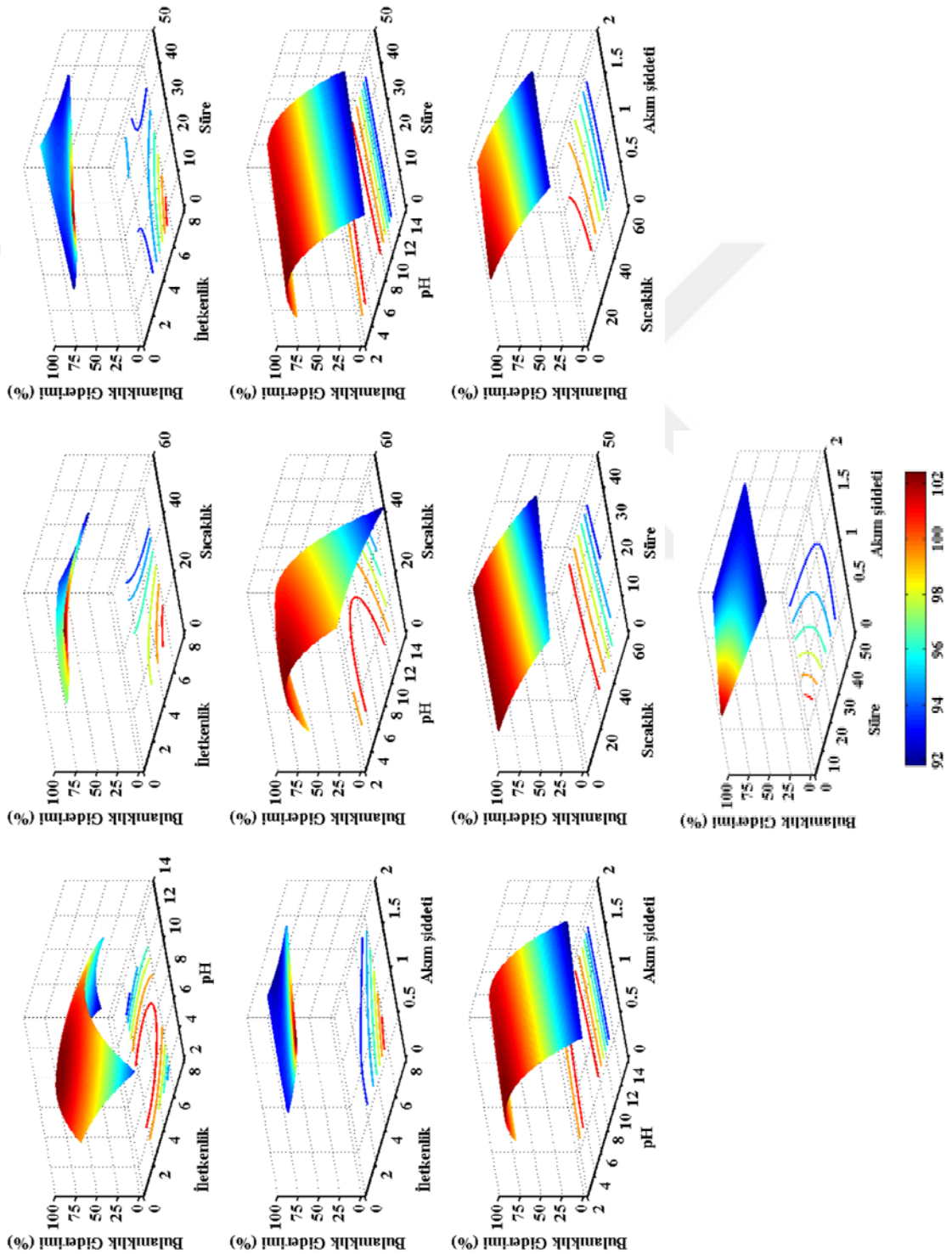
EK 9 Alüminyum elektrotlarla yapılan optimizasyon çalışmalarında renk giderimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri

(Elektriksel iletkenlik: 4.35 mS/cm, pH: 7.5, sıcaklık: 30 °C, süre: 25 dakika, akım şiddeti: 1.15 A)



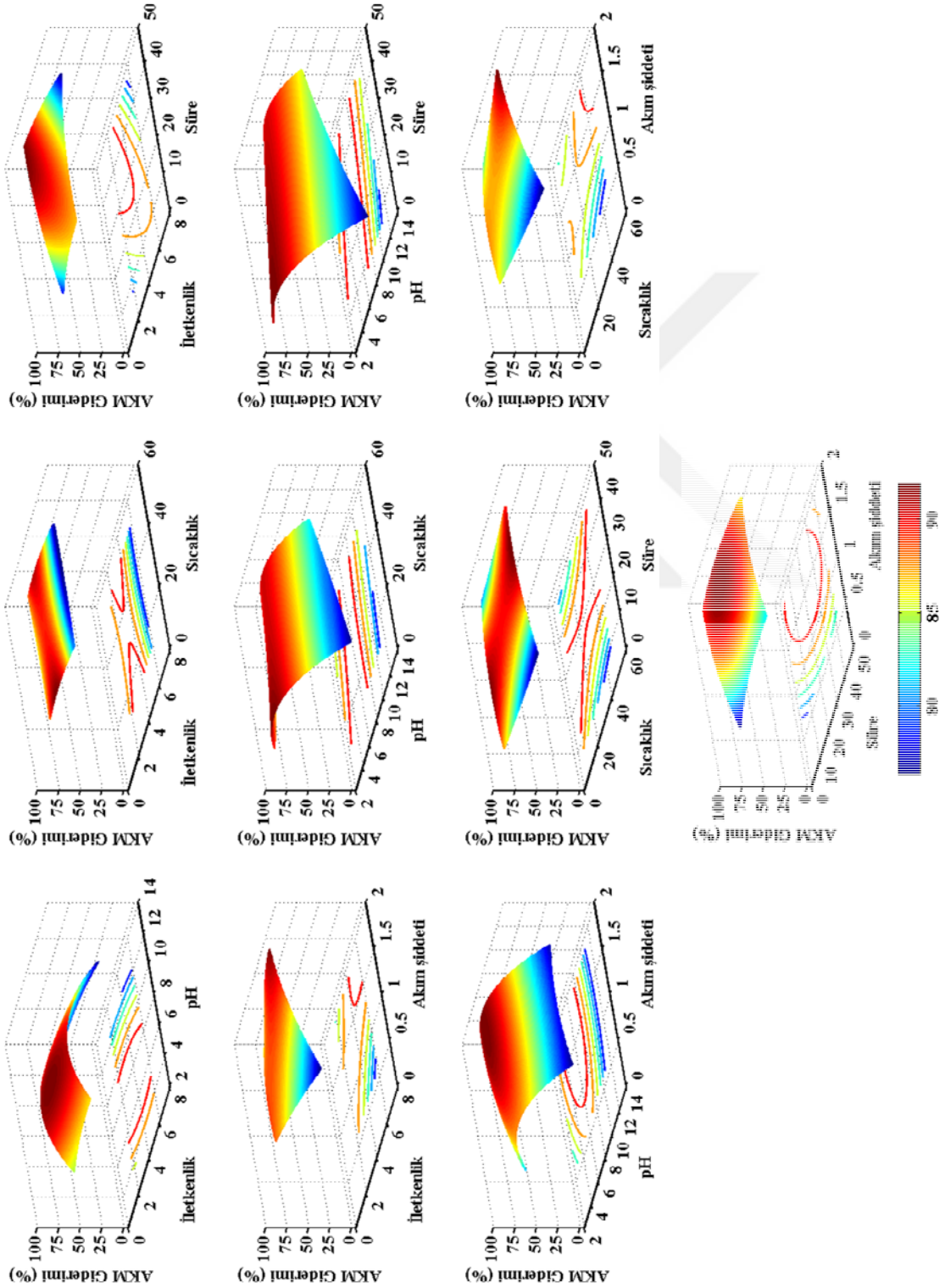
EK 10 Alüminyum elektrotlarla yapılan optimizasyon çalışmalarında bulanıklık giderimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri

(Elektriksel iletkenlik: 4.35 mS/cm, pH: 7.5, sıcaklık: 30 °C, süre: 25 dakika, akım şiddeti: 1.15 A)



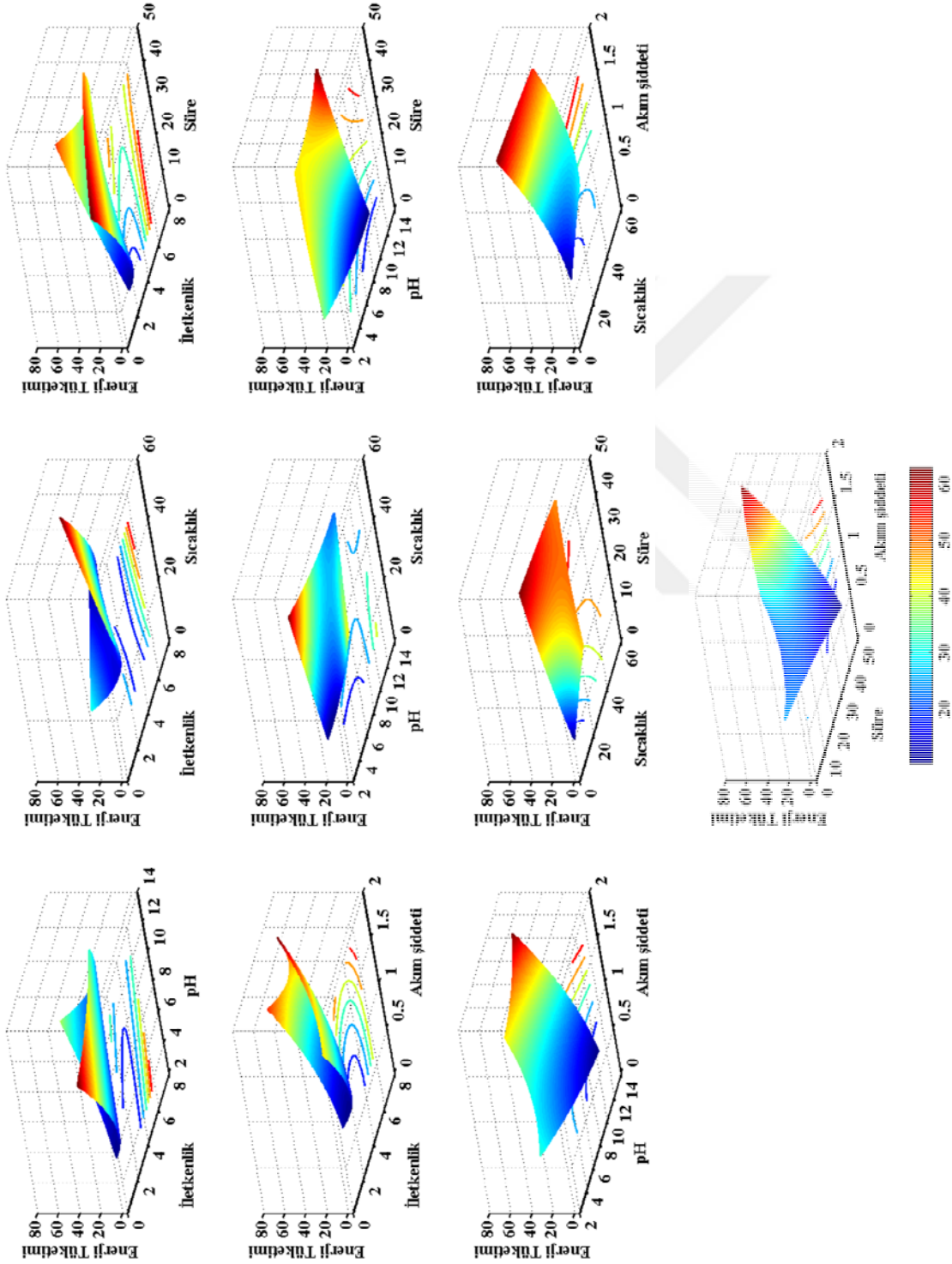
EK 11 Alüminyum elektrotlarla yapılan optimizasyon çalışmalarında AKM giderimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri

(Elektriksel iletkenlik: 4.35 mS/cm, pH: 7.5, sıcaklık: 30 °C, süre: 25 dakika, akım şiddeti: 1.15 A)



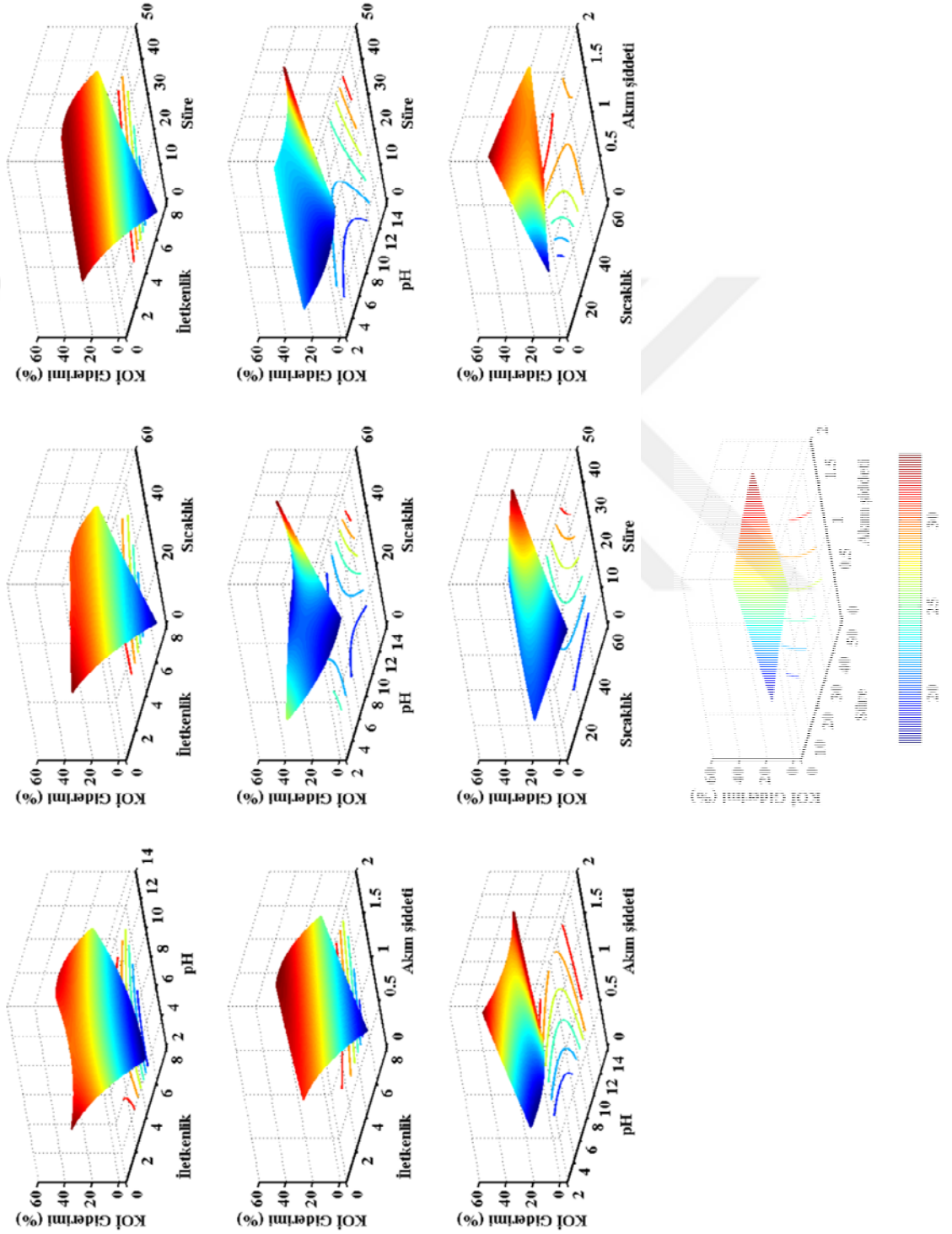
EK 12 Alüminyum elektrotlarla yapılan optimizasyon çalışmalarında enerji tüketimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri

(Elektriksel iletkenlik: 4.35 mS/cm, pH: 7.5, sıcaklık: 30 °C, süre: 25 dakika, akım şiddeti: 1.15 A)



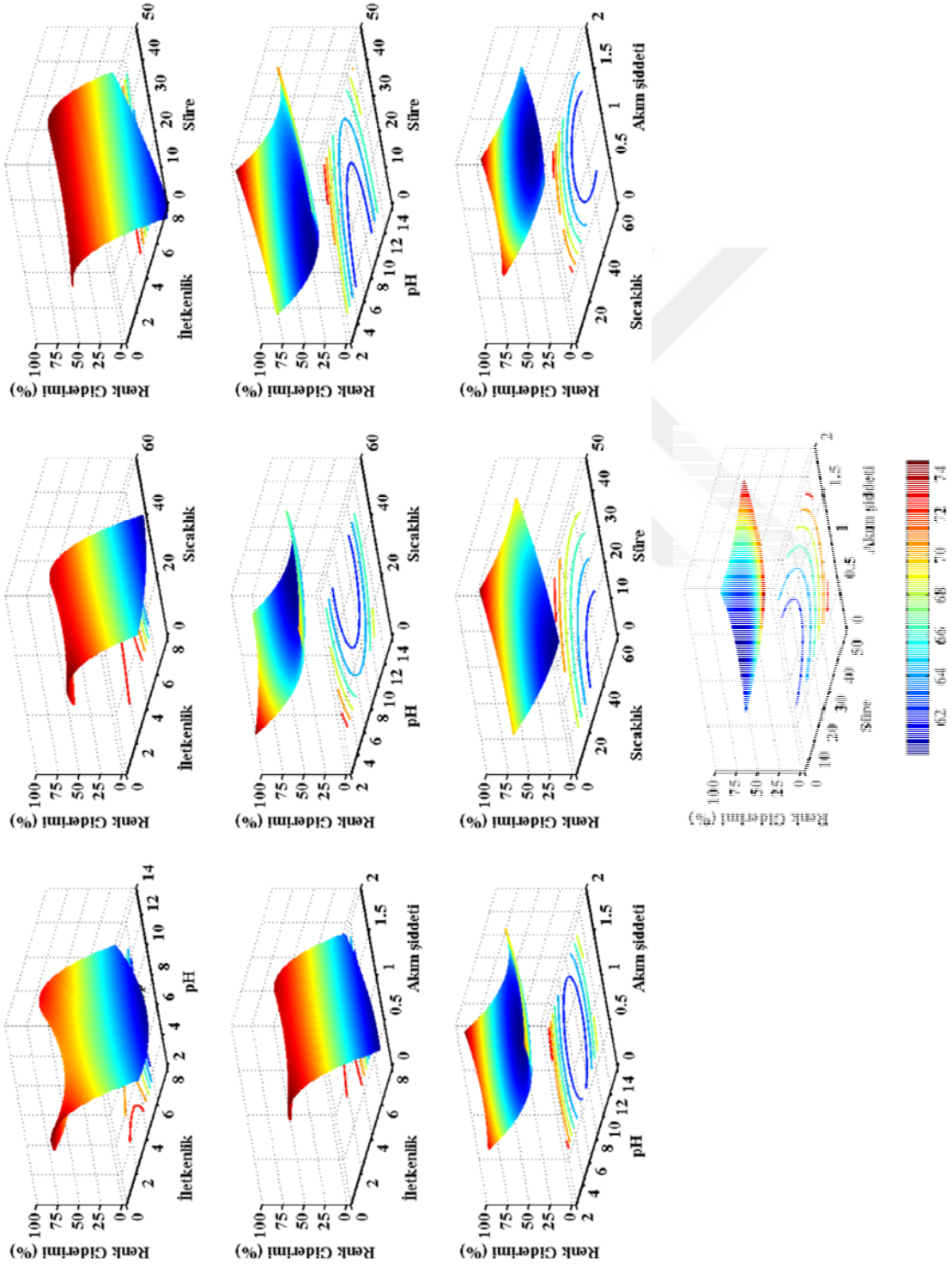
EK 13 Demir elektrotlarla yapılan optimizasyon çalışmalarında KOİ giderimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri

(Elektriksel iletkenlik: 4.35 mS/cm, pH: 7.5, sıcaklık: 30 °C, süre: 25 dakika, akım şiddeti: 1.15 A)



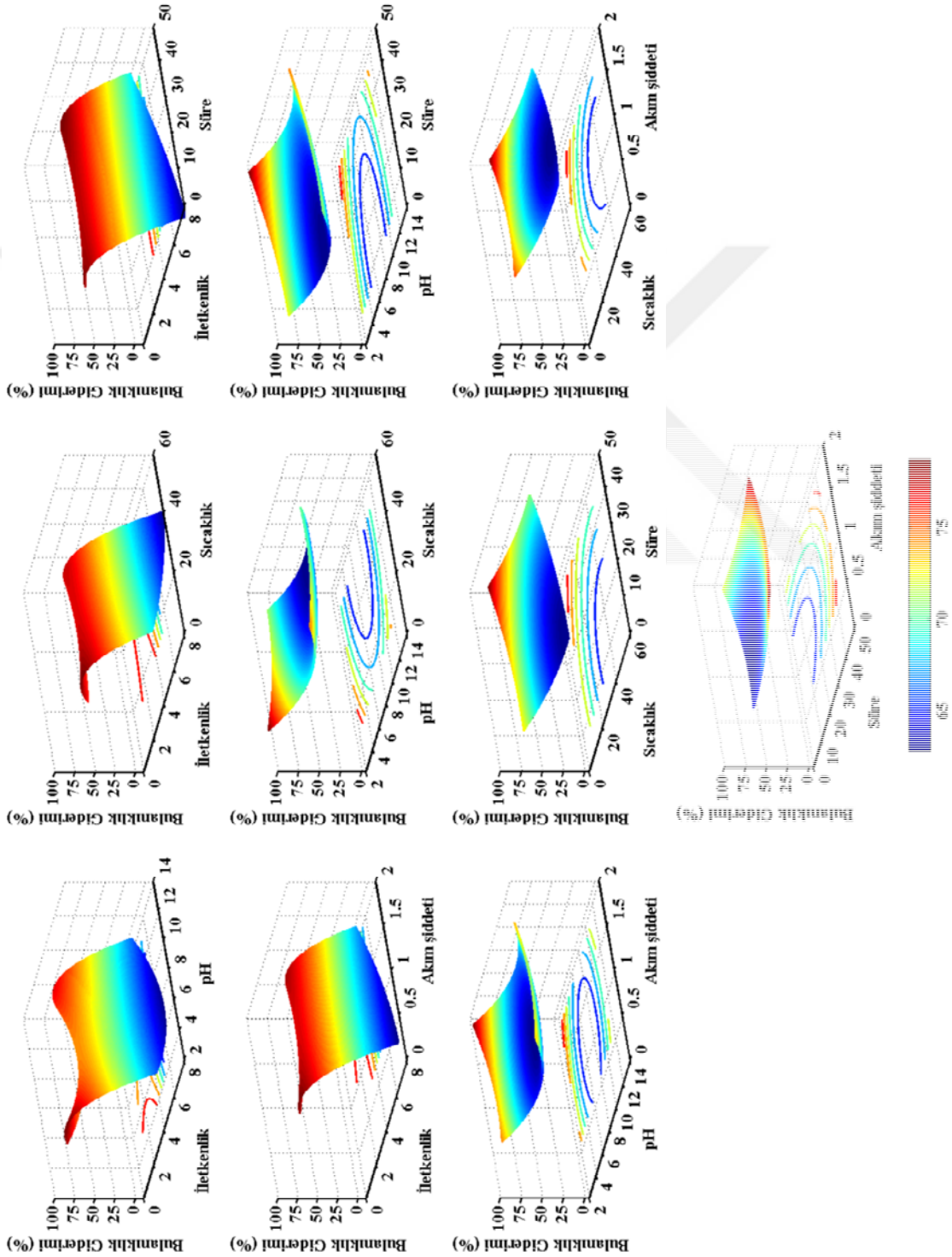
EK 14 Demir elektrotlarla yapılan optimizasyon çalışmalarında renk giderimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri

(Elektriksel iletkenlik: 4.35 mS/cm, pH: 7.5, sıcaklık: 30 °C, süre: 25 dakika, akım şiddeti: 1.15 A)



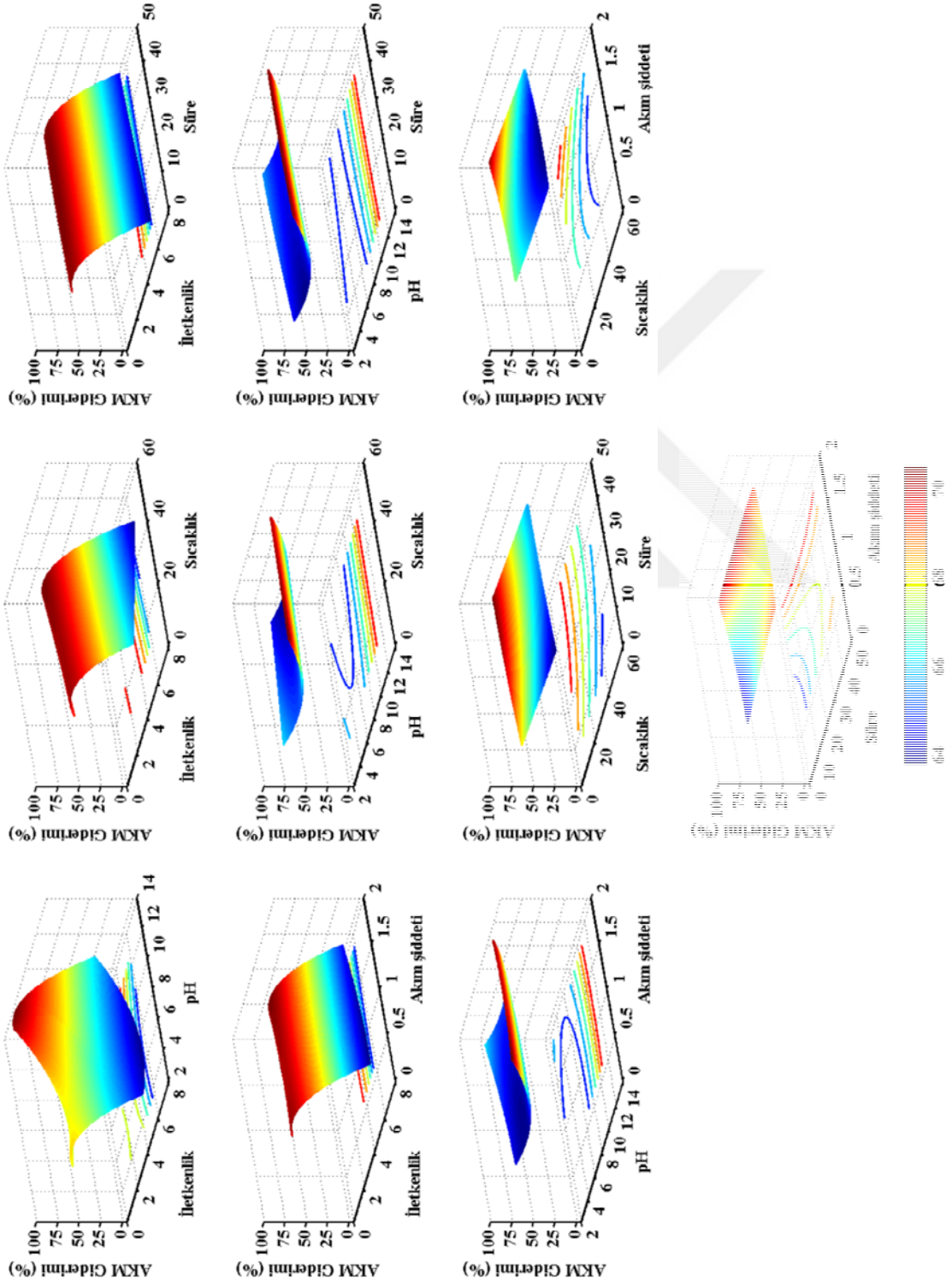
EK 15 Demir elektrotlarla yapılan optimizasyon çalışmalarında bulanıklık giderimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri

(Elektriksel iletkenlik: 4.35 mS/cm, pH: 7.5, sıcaklık: 30 °C, süre: 25 dakika, akım şiddeti: 1.15 A)



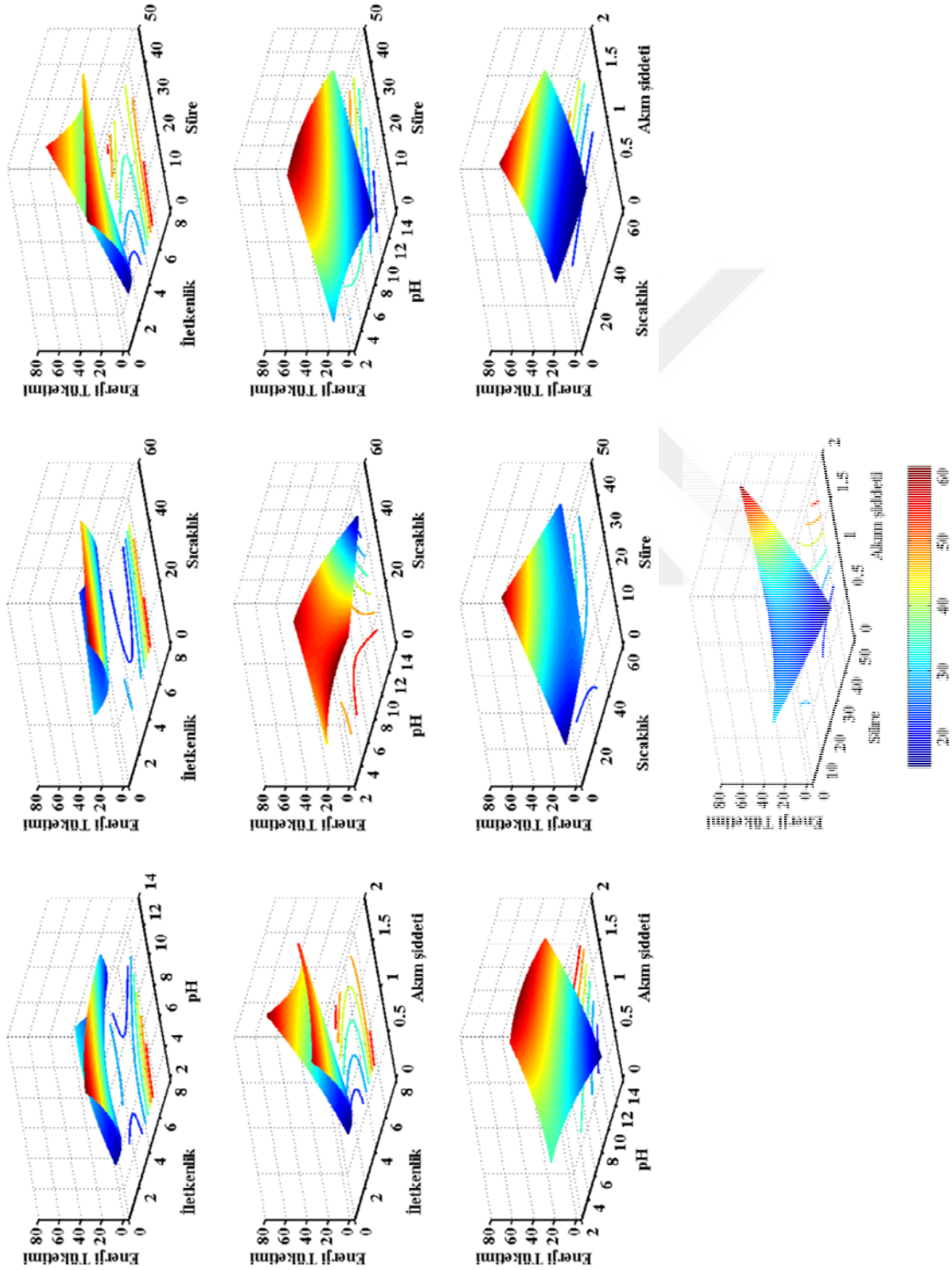
EK 16 Demir elektrotlarla yapılan optimizasyon çalışmalarında AKM giderimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri

(Elektriksel iletkenlik: 4.35 mS/cm, pH: 7.5, sıcaklık: 30 °C, süre: 25 dakika, akım şiddeti: 1.15 A)



EK 17 Demir elektrotlarla yapılan optimizasyon çalışmalarında enerji tüketimi için faktörlerin ikili etkilerini içeren cevap yüzey ve kontur grafikleri

(Elektriksel iletkenlik: 4.35 mS/cm, pH: 7.5, sıcaklık: 30 °C, süre: 25 dakika, akım şiddeti: 1.15 A)



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Şule CAMCIOĞLU

Doğum Yeri : Adana

Doğum Tarihi : 08/05/1984

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Hacı Ömer Tarman Anadolu Lisesi (2002)

Lisans : Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü
(2007)

Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği
Anabilim Dalı (Ocak 2010)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi 2009-devam ediyor

Hakemli Dergiler

Camcioglu, S., Zeybek, Z., Hapoglu, H., Alpbaz, M. and Akpinar, A. 2010. Generalized Minimum Variance (GMV) control in waterborne wastewater treatment. Chemical Engineering Transactions, 21, 823-828.

Giwa, S. O., Pekel, C., **Camcioglu, S.**, Ertunc, S., Alpbaz, M., and Hapoglu, H. 2013. Aluminium electrode dissolution in electrocoagulation process, International Journal of Advanced Scientific and Technical Research, 4(3), 127-136.

Camcioglu, S., Pekel, L. C., Polat, K. and Hapoglu, H. 2014. Experimental design of wastewater treatment with electro-coagulation. Management of Environmental Quality: An International Journal, 25(1), 86-95.

Camcioğlu, Ş., Özyurt, B. ve Hapoğlu, H. 2015. Elektrokoagülasyon yöntemiyle kağıt atık suyu arıtımında pH kontrolü. Anadolu University Journal of Science and Technology– A Applied Sciences and Engineering, 16(2), 107-115.

Uluslararası Kongre Sunum

Alpbaz, M., Ozkan, G., Hapoglu, H. and **Camcioglu, S.** 2009. An Adaptive Single Neuron Based Control Application to a Batch Reactor, Applied Automatic Systems (AAS 2009), 26-29 September, Proceedings of Selected AAS 2009 Papers, 99-101, Ohrid, Macedonia,.

Camcioglu, S., Zeybek, Z., Hapoglu, H., Alpbaz, M. and Akpinar, A. 2010. Generalized Minimum Variance (GMV) Control in Waterborne Wastewater Treatment, 19th International Congress of Chemical and Process Engineering (CHISA 2010), 28 August-1 September, Summaries 4, 1671, Prague, Czech Republic.

Akpinar, A., Pekel, L.C., **Camcioglu, S., Togrul, H. and Alpbaz, M.** 2011. System Identificaiton of Process Control Simulator, 8th European Congress of Chemical Engineering (ECCE-8), 25-29 September, Berlin, Germany.

Camcioglu, S., Vural, N., Polat, K., Alpbaz, M. and Hapoglu, H. 2011. The Dynamic Analysis of Wastewater Treatment With Electrocoagulation Method in Pulp and Paper Making Industry, 9th International Electrochemistry Meeting in Turkey, 25-29 September, Abstract Book, 301, Çeşme İzmir.

Camcioglu, S., Polat, K., Zeybek, Z., Togrul, H. and Hapoglu, H. 2012. Investigation of Current Density, NaCl Concentration and Electrolysis Time Effects for the Treatment of Pulp and Paper Wastewater with Electrocoagulation, 7th Chemical Engineering Conference for Colloborative Research in Eastern Mediterranean Countries (EMCC-7), 27 April – 1 May, Corfu, Greece.

Pekel, L.C., **Camcioglu, S., Vural, N. and Alpbaz, M.** 2012. The Effect of Operating Parameters on Textile Wastewater Electrochemical Treatment, 7th Chemical Engineering

Conference for Colloborative Research in Eastern Mediterranean Countries (EMCC-7), 27 April – 1 May, Corfu, Greece.

Giwa, S.O., **Camcioglu, S.**, Ertunc, S., Aldemir, A. and Hapoglu, H. 2012. Turbidity Removal From Petrochemical Wastewater by Electrocoagulation, 7th Chemical Engineering Conference for Colloborative Research in Eastern Mediterranean Countries EMCC-7), 27 April – 1 May, Corfu, Greece.

Camcioglu, S., Pekel, L.C., Polat, K. and Hapoglu, H. 2012. Application of Statistical Experimental Design Methodology to Pulp and Paper Mill Wastewaters Treatment Process, International Conference on Recycling and Reuse, 4-6 June, Book of Abstracts, 248, İstanbul.

Pekel, L.C., **Camcioglu, S.**, Polat, K., Hapoglu, H. and Alpbaz, M. 2012. Electrocoagulation Treatment of Textile Wastewater, Istanbul International Solid Waste, Water and Wastewater Congress, 22-24 May, Congress Proceedings, 1210-1214, İstanbul.

Giwa, S.O., Pekel, L.C., **Camcioglu, S.**, Ertunc, S., Alpbaz, M. and Hapoglu, H. 2013. Aluminium Electrode Dissolution in Electrocoagulation Process, Istanbul International Solid Waste, Water and Wastewater Congress, 22-24 May, Congress Proceedings, 1073-1081, İstanbul.

Camcioglu, S., Ozyurt, B. and Hapoglu, H. 2014. Effect of MIMO pH and Temperature Control in Pulp and Paper Mill Wastewater Treatment with Electrocoagulation Process, 2nd International Conference on Recycling and Reuse, 4-6 June, Book of Abstracts, 213, İstanbul.

Ulusal Kongre Sunum

Camcioğlu, Ş., Zeybek, Z., Hapoğlu, H. ve Alpbaz, M. 2010. Su Bazlı Boya Atıksularının Arıtılmasında Uygun Koşulların pH Kontrol Çalışmalarında Uygulanmak Üzere

Belirlenmesi, 9. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi (UKMK-9), 22-25 Haziran, Gazi Üniversitesi, Bildiri Özetleri Kitabı, 597, Ankara.

Sarıgül, G., **Camcıoğlu, Ş.** ve Hapoğlu, H. 2013. Kağıt Endüstrisi Atık Sularında Kirlilik Parametrelerinin İncelenmesi, 2. Ulusal Kimya Mühendisliği Öğrenci Kongresi (UKMÖK-2), 4-6 Mayıs, Ankara Üniversitesi, Bildiri Özetleri Kitabı, 135-137, Ankara.

Camcıoğlu, Ş., Özyurt, B. ve Hapoğlu, H. 2014. Elektrokoagülasyon Yöntemiyle Kağıt Atık Suyu Arıtımında pH Kontrolü, 11. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi (UKMK-11), 2-5 Eylül, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Bildiri Özetleri Kitabı, 314-315, Eskişehir.

