

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

**SÜT VE SÜT ÜRÜNLERİ ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ
ELEKTROKOAGÜLASYON YÖNTEMİ İLE ARITIMINDA RSM KULLANILARAK
PROSES OPTİMİZASYONU**

MUSTAFA EREN SABUNCU

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

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. GAMZE VARANK**

İSTANBUL, 2014

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜT VE SÜT ÜRÜNLERİ ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ
ELEKTROKOAGÜLASYON YÖNTEMİ İLE ARITIMINDA RSM KULLANILARAK
PROSES OPTİMİZASYONU

Mustafa Eren SABUNCU tarafından hazırlanan tez çalışması 17.04.2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Gamze VARANK

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Gamze VARANK

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Güleda ENGİN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Abdurrahman AKYOL

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü

ÖNSÖZ

Öncelikle, yüksek lisans tez çalışmamın yürütücülüğünü üstlenen, çalışmamın her aşamasında yardımlarından dolayı, bilgi ve tecrübelerini aktaran, yakın ilgi ve her alandaki desteği sebebiyle tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Gamze VARANK'a,

Deneysel çalışmanın laboratuvar sürecinin her aşamasında yardımları ve önerileri ile tezin gelişimine destek olan değerli hocalarım Araş. Gör. Senem YAZICI'ya, Araş. Gör. Hanife SARI'ya, Araş. Gör. Selin TOP'a,

Yüksek lisans öğretim hayatım boyunca beraber yol aldığımız, laboratuvar sürecinde her türlü yardım ve desteğini gördüğüm sevgili arkadaşım Çevre Müh. Gökhan GÜRBÜZ'e,

Öğrenim hayatım boyunca bugünlere gelmem konusunda yardım ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen babam Necib SABUNCU ve annem Cevriye SABUNCU'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Nisan, 2014

Mustafa Eren SABUNCU

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖZET	xiii
ABSTRACT.....	xv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Bulgular	2
BÖLÜM 2	
SÜT VE SÜT ÜRÜNLERİ ENDÜSTRİSİ.....	3
2.1 Genel Özellikleri	3
2.2 Süt ve Süt Ürünleri Endüstrisinde Uygulanan Temel Süreçler.....	4
2.2.1 Isıtma	5
2.2.2 Klarifikasyon	5
2.2.3 Separasyon	5
2.2.4 Hava Giderme	5
2.2.5 Pastörizasyon.....	6
2.2.6 Homojenizasyon	6
2.2.7 Standardizasyon	7
2.2.8 Sterilizasyon.....	7
2.2.9 Ultra Yüksek Sıcaklık (UHT) İşlemi	7
2.3 Süt Ürünleri.....	8
2.3.1 Pastörize Süt Üretimi.....	8

2.3.2	Peynir Üretimi.....	9	
2.3.3	Yoğurt Üretimi	9	
2.3.4	Tereyağı Üretimi	10	
2.3.5	Süttozu Üretimi	10	
2.3.6	Dondurma Üretimi.....	11	
2.4	Süt ve Süt Ürünleri Endüstrisi Atıksu Kaynakları ve Özellikleri	12	
2.4.1	Soğutma Suları.....	14	
2.4.2	Peynir Altı Suyu.....	14	
2.5	Süt ve Süt Ürünleri Endüstrisi Atıksularının Karakterizasyonu	15	
2.6	Süt ve Süt Ürünleri Endüstrisi Atıksularının Arıtım Yöntemleri	17	
2.6.1	Biyolojik Arıtım Yöntemleri.....	18	
2.6.2	Fiziko-Kimyasal Arıtım Yöntemleri.....	20	
2.7	Süt ve Süt Ürünleri Endüstrisi Atıksularının Türkiye ve Dünya’da ki Deşarj Kriterleri	20	
BÖLÜM 3			
ELEKTROKOAGÜLASYON			22
3.1	Elektrokoagülasyon Prosesinin Genel Esasları.....	23	
3.2	Elektrokoagülasyon Prosesi Reaktör Dizaynı	27	
3.3	Elektrokoagülasyon Prosesinin Avantaj ve Dezavantajları	29	
BÖLÜM 4			
YAPILAN ÇALIŞMALAR.....			31
4.1	Gerçek Atıksular ile Yapılan Çalışmalar.....	31	
4.2	Sentetik Atıksular ile Yapılan Çalışmalar.....	36	
BÖLÜM 5			
MATERYAL VE METOT.....			40
5.1	Atıksu Karakterizasyonu.....	40	
5.2	Deneyel Düzeneğin Kurulumu ve İşletilmesi.....	40	
5.3	Cevap Yüzey Yöntemi.....	41	
5.3.1	Cevap Yüzey Yöntemi Esasları	42	
5.3.2	Cevap Yüzey Yöntemi Teorisi ve Deneyel Tasarım	44	
5.3.3	Cevap Yüzey Yöntemi İstatiksel Analizi	47	
5.3.4	Merkezi Kompozit Dizayn	50	
5.3.5	Cevap Yüzey Yöntemi Avantajları ve Dezavantajları	52	
BÖLÜM 6			
BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER.....			53
6.1	Demir Elektrotlar Kullanılan EC Prosesinin İşletme Parametrelerinin İstatiksel Analizi ve Optimizasyonu.....	53	
6.2	Alüminyum Elektrotlar Kullanılan EC Prosesinin İşletme Parametrelerinin İstatiksel Analizi ve Optimizasyonu.....	61	

6.3	Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopiyle (FT-IR) çamur karakterizasyonu.....	79
6.4	İşletme Maliyeti	80
BÖLÜM 7		
	SONUÇLAR.....	82
	KAYNAKLAR.....	84
	ÖZGEÇMİŞ.....	90

SİMGE LİSTESİ

\$	Dolar
Δx	Değişim değeri
€	Euro
A	Amper
A/m^2	Akım yoğunluğu
kWh	Kilowatt saat
R^2	Regresyon katsayısı
V	Volt
X_{avg}	i'inci faktörde yüksek ve düşük değerlerin ortalaması
X_i	i'inci faktörde gerçek değer

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif Akım
AKM	Askıda Katı Madde
Al	Alüminyum
ANOVA	Varyans Analizi
APHA	Amerikan Halk Sağlığı Birliği
BOİ	Biyolojik Oksijen İhtiyacı
CCD	Merkezi Kompozit Dizayn
DC	Doğru Akım
EC	Elektrokoagülasyon
Fe	Demir
FT-IR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
HTST	Yüksek Sıcaklık Kısa Süre
KOİ	Kimyasal Oksijen İhtiyacı
LTLT	Düşük Sıcaklık Uzun Süre
MP	Tek Kutuplu
PAS	Peynir Altı Suyu
RSM	Cevap Yüzey Yöntemi
S.D.	Serbestlik Derecesi
SKKY	Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği
TAKM	Toplam Askıda Katı Madde
TKM	Toplam Katı Madde
TKN	Toplam Kjeldahl Azotu
TN	Toplam Azot
TOK	Toplam Organik Karbon
TP	Toplam Fosfor
UAKM	Uçucu Askıda Katı Madde
UHT	Ultra Yüksek Sıcaklık
UKM	Uçucu Katı Madde

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1	Sütün içinde ağırlıklı olarak bulunan bileşenler 4
Şekil 2. 2	Pastörize süt üretimi akım şeması 8
Şekil 2. 3	Süt endüstrisi proseslerinde oluşan çeşitli atıksu çıkışları (DD : Deterjan ve Dezenfektanlar, YS : Yıkama suyu, SB : Su buharı, SS : Soğutma Suyu) 12
Şekil 3. 1	Elektrokoagülasyon prosesi bileşenleri ve kirletici giderim mekanizması ..24
Şekil 3. 2	Elektrokoagülasyon sistemleri, (a) MP-P sistemi, (b) MP-S sistemi, (c) BP-S sistemi.....28
Şekil 5. 1	Deney düzeneği.....41
Şekil 5. 2	X_1 ve X_2 ' nin y 'ye etkisinin cevap yüzey grafiği 49
Şekil 5. 3	Kontur Grafiği..... 49
Şekil 5. 4	Merkezi kompozit dizayn kısımları51
Şekil 5. 5	Üç değişkenli merkezi kompozit dizaynın analitik düzlemde gösterimi.....51
Şekil 6. 1	Fe elektrot kullanılan EC prosesiyle arıtılan süt endüstrisi atıksuları için cevap yüzey model grafikleri a) pH ve elektroliz süresinin KOİ giderimi üzerine etkisi b) Akım yoğunluğu ve elektroliz süresinin KOİ giderimi üzerine etkisi c) pH ve akım yoğunluğunun KOİ giderimi üzerine etkisi.....69
Şekil 6. 2	Fe elektrot kullanılan EC prosesiyle arıtılan süt endüstrisi atıksuları için cevap yüzey model grafikleri a) pH ve elektroliz süresinin renk giderimi üzerine etkisi b) Akım yoğunluğu ve elektroliz süresinin renk giderimi üzerine etkisi c) pH ve akım yoğunluğunun renk giderimi üzerine etkisi 70
Şekil 6. 3	Fe elektrot kullanılan EC prosesiyle arıtılan süt endüstrisi atıksuları için cevap yüzey model grafikleri a) pH ve elektroliz süresinin ortofosfat giderimi üzerine etkisi b) Akım yoğunluğu ve elektroliz süresinin ortofosfat giderimi üzerine etkisi c) pH ve akım yoğunluğunun ortofosfat giderimi üzerine etkisi 71
Şekil 6. 4	Fe elektrot kullanılan EC prosesiyle arıtılan süt endüstrisi atıksuları için cevap yüzey model grafikleri a) pH ve elektroliz süresinin AKM giderimi üzerine etkisi b) Akım yoğunluğu ve elektroliz süresinin AKM giderimi üzerine etkisi c) pH ve akım yoğunluğunun AKM giderimi üzerine etkisi.... 72
Şekil 6. 5	Fe elektrot kullanılan EC prosesiyle arıtılan süt endüstrisi atıksuları için cevap yüzey model grafikleri a) pH ve elektroliz süresinin bulanıklık giderimi üzerine etkisi b) Akım yoğunluğu ve elektroliz süresinin bulanıklık giderimi üzerine etkisi c) pH ve akım yoğunluğunun bulanıklık giderimi üzerine etkisi 73

- Şekil 6. 6 Al elektrot kullanılan EC prosesiyle arıtılan süt endüstrisi atıksuları için cevap yüzey model grafikleri a) pH ve elektroliz süresinin KOİ giderimi üzerine etkisi b) Akım yoğunluğu ve elektroliz süresinin KOİ giderimi üzerine etkisi c) pH ve akım yoğunluğunun KOİ giderimi üzerine etkisi..... 74
- Şekil 6. 7 Al elektrot kullanılan EC prosesiyle arıtılan süt endüstrisi atıksuları için cevap yüzey model grafikleri a) pH ve elektroliz süresinin renk giderimi üzerine etkisi b) Akım yoğunluğu ve elektroliz süresinin renk giderimi üzerine etkisi c) pH ve akım yoğunluğunun renk giderimi üzerine etkisi 75
- Şekil 6. 8 Al elektrot kullanılan EC prosesiyle arıtılan süt endüstrisi atıksuları için cevap yüzey model grafikleri a) pH ve elektroliz süresinin ortofosfat giderimi üzerine etkisi b) Akım yoğunluğu ve elektroliz süresinin ortofosfat giderimi üzerine etkisi c) pH ve akım yoğunluğunun ortofosfat giderimi üzerine etkisi 76
- Şekil 6. 9 Al elektrot kullanılan EC prosesiyle arıtılan süt endüstrisi atıksuları için cevap yüzey model grafikleri a) pH ve elektroliz süresinin AKM giderimi üzerine etkisi b) Akım yoğunluğu ve elektroliz süresinin AKM giderimi üzerine etkisi c) pH ve akım yoğunluğunun AKM giderimi üzerine etkisi.... 77
- Şekil 6. 10 Al elektrot kullanılan EC prosesiyle arıtılan süt endüstrisi atıksuları için cevap yüzey model grafikleri a) pH ve elektroliz süresinin bulanıklık giderimi üzerine etkisi b) Akım yoğunluğu ve elektroliz süresinin bulanıklık giderimi üzerine etkisi c) pH ve akım yoğunluğunun bulanıklık giderimi üzerine etkisi 78

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2. 1	Süt üretimi işlemlerinde kullanılan su ve atıksu hacimleri.....13
Çizelge 2. 2	Süt ve süt ürünleri endüstrisi atıksu karakterizasyon çalışmaları.....16
Çizelge 2. 3	Süt ve süt ürünleri endüstrisi atıksu karakterizasyon çalışmaları.....17
Çizelge 2. 4	Süt endüstrisi atıksuları aerobik ve anaerobik arıtımının karşılaştırılması19
Çizelge 2. 5	Süt ve süt ürünleri endüstrisi atıksuları alıcı ortama deşarj standartları.21
Çizelge 2. 6	Süt ve süt ürünleri endüstrisi atıksuları alıcı ortama deşarj standartları.21
Çizelge 3. 1	Elektrokimyasal yükseltgenme ve indirgenme reaksiyonları.....25
Çizelge 4. 1	Gerçek atıksularda uygulanan elektrokoagülasyon prosesinin optimizasyonu için RSM uygulamaları ve giderim verimleri.....35
Çizelge 4. 2	Sentetik atıksularda uygulanan elektrokoagülasyon prosesinin optimizasyonu için RSM uygulamaları ve giderim verimleri.....39
Çizelge 5. 1	Süt ve süt ürünleri endüstrisi atıksu karakterizasyonu.....40
Çizelge 5. 2	EC prosesi için deneysel dizayn matrisi değişkenlerinin kodlanmış ve gerçek değerleri..... 44
Çizelge 5. 3	Fe ve Al elektrotlar kullanılarak süt endüstrisi atıksularının EC ile arıtılmasında full faktöriyel dizayn metodunun kullanılması..... 46
Çizelge 6. 1	Demir elektrot kullanılan EC prosesinde, KOİ, renk, ortofosfat, AKM, bulanık giderim verimi gerçek ve tahmin edilen değerleri.....55
Çizelge 6. 2	Cevap yüzey modeli regresyon parametreleri ANOVA sonuçları 57
Çizelge 6. 3	Fe elektrotlar kullanılan EC prosesi ile KOİ giderimi için uygulanan cevap yüzey modeli ANOVA sonuçları..... 57
Çizelge 6. 4	Fe elektrotlar kullanılan EC prosesi ile renk giderimi için uygulanan cevap yüzey modeli ANOVA sonuçları..... 58
Çizelge 6. 5	Fe elektrotlar kullanılan EC prosesi ile ortofosfat giderimi için uygulanan cevap yüzey modeli ANOVA sonuçları 59
Çizelge 6. 6	Fe elektrotlar kullanılan EC prosesi ile AKM giderimi için uygulanan cevap yüzey modeli ANOVA sonuçları 59
Çizelge 6. 7	Fe elektrotlar kullanılan EC prosesi ile bulanıklık giderimi için uygulanan cevap yüzey modeli ANOVA sonuçları 60
Çizelge 6. 8	Proses değişkenlerinin optimum işletme şartları 61
Çizelge 6. 9	Alüminyum elektrot kullanılan EC prosesinde, KOİ, renk, ortofosfat, AKM, bulanık giderim verimi gerçek ve tahmin edilen değerleri..... 63
Çizelge 6. 10	Cevap yüzey modeli regresyon parametreleri ANOVA sonuçları 65

Çizelge 6. 11	Al elektrotlar kullanılan EC prosesi ile KOİ giderimi için uygulanan cevap yüzey modeli ANOVA sonuçları.....	65
Çizelge 6. 12	Al elektrotlar kullanılan EC prosesi ile renk giderimi için uygulanan cevap yüzey modeli ANOVA sonuçları.....	66
Çizelge 6. 13	Al elektrotlar kullanılan EC prosesi ile ortofosfat giderimi için uygulanan cevap yüzey modeli ANOVA sonuçları	67
Çizelge 6. 14	Al elektrotlar kullanılan EC prosesi ile AKM giderimi için uygulanan cevap yüzey modeli ANOVA sonuçları.....	67
Çizelge 6. 15	Al elektrotlar kullanılan EC prosesi ile bulanıklık giderimi için uygulanan cevap yüzey modeli ANOVA sonuçları	68
Çizelge 6. 16	Süt endüstrisi atıksuyunun EC prosesi ile arıtımı sonucu ortaya çıkan çamurun karakterizasyonu.....	80

**SÜT VE SÜT ÜRÜNLERİ ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ
ELEKTROKOAGÜLASYON YÖNTEMİ İLE ARITIMINDA RSM KULLANILARAK
PROSES OPTİMİZASYONU**

Mustafa Eren SABUNCU

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Gamze VARANK

Bu çalışmada, Al ve Fe elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon prosesi ile süt ve süt endüstrisi atıksularından KOİ, renk, ortofosfat, AKM ve bulanıklık gideriminde proses parametrelerinin optimizasyonu ve matematiksel model oluşturulması için cevap yüzey yöntemlerinden biri olan merkezi kompozit dizayn metodu uygulanmıştır. Proses değişkenleri olan pH, akım yoğunluğu ve reaksiyon süresinin kirletici giderim verimleri üzerine etkileri değerlendirilmiştir. Varyans analizi (ANOVA) ve cevap yüzey grafikleri, süt ve süt ürünleri endüstrisi atıksularından KOİ, renk, ortofosfat, AKM ve bulanıklık giderimi için optimum şartların belirlenmesi için uygulanmıştır. Giderim verimlerinin tahmin edilmesi için ikinci dereceden regresyon modelleri, Statgraphics Centurion XVI.I yazılım programı kullanılarak geliştirilmiştir. Optimum şartlar altında Fe elektrotlar kullanılarak sağlanan giderim verimleri, KOİ için %98,91 ve ortofosfat için % 98,24, Al elektrotlar kullanılarak sağlanan giderim verimleri, KOİ için %98,84 ve ortofosfat için %99,78 olarak belirlenmiştir. Optimum şartlarda elektrik ve elektrot sarfiyatının her ikisini de içeren işletme maliyeti, Fe elektrot için, 0,54 €/m³, Al elektrot için 0,42 €/m³ olarak tespit edilmiştir. Elektrokoagülasyon prosesinde optimum şartlar altında oluşan çamur FT-IR yardımıyla karakterize edilmiştir. Çalışma sonuçları, cevap yüzey

yönteminin, süt endüstrisi atıksuyuna uygulanan EC prosesinin işletme şartlarının optimizasyonu için etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Süt ve süt ürünleri endüstrisi atıksuyu, elektrokoagülasyon, RSM, işletme maliyeti, çamur karakterizasyonu

**PROCESS OPTIMIZATION OF DAIRY WASTEWATER TREATMENT BY
ELECTROCOAGULATION USING RESPONSE SURFACE METHODOLOGY**

Mustafa Eren SABUNCU

Department of Environmental Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assist. Prof. Dr. Gamze VARANK

In this study, response surface methodology (RSM) approach using Central Composite Design (CCD) was applied to develop mathematical model and optimize process parameters for COD, color, orthophosphate, TSS and turbidity removal from dairy wastewater by electrocoagulation process using iron and aluminium electrodes. Evaluation of the effects and interactions of process variables; pH, current density and reaction time were studied. Analysis of variance (ANOVA) showed the relative significance of process parameters in removal process. The second-order regression model was developed to predict the removal efficiencies using Statgraphics Centurion XVI.I software programme. Under optimal values of process parameters 98.91 % COD and 98.24 % orthophosphate removal efficiencies with Fe electrodes, 98.84 % COD and 99.78 % orthophosphate removal efficiencies with Al electrodes were obtained. The operational cost including both electricity and the electrode consumption at optimum conditions were determined to be 0.54 and 0.42 €/m³ for Fe and Al electrodes, respectively. The sludge formed under optimized conditions in EC process was characterized by FT-IR analysis. Results of the study show that RSM is a powerful tool for optimizing the operational conditions of electrocoagulation for COD, color, orthophosphate, TSS and turbidity removals from dairy wastewater.

Keywords: Dairy wastewater, electrocoagulation, RSM, cost analysis, sludge characterization

1.1 Literatür Özeti

Dünya’da ve Türkiye’de hızla gelişen endüstriyel faaliyetler endüstri kollarına bağlı olarak farklı çevresel sorunları da beraberinde getirmektedir. Bu faaliyetler neticesinde hava, su, toprak kalitesinin ortaya çıkan farklı özellikteki kirleticiler tarafından olumsuz yönde etkilendiği görülmektedir. Özellikle hızla gelişen sanayileşme ve nüfus artışına bağlı olarak artan atıksuların bilinçsizce çevreye deşarj edilmesiyle, gittikçe azalmakta olan doğal su kaynakları kirlenmektedir. Bu yüzden, doğal kaynakların korunması ve sürdürülebilir bir çevre için endüstrilerde oluşan atıksuların çevreye hiç zarar vermeyecek ya da bu zararları en aza indirecek şekilde kaynağında etkili, yeni teknolojiler kullanılarak arıtılması ve yeniden kullanılması gerekmektedir.

Süt ve süt ürünleri endüstrisi bütün dünyada gıda endüstrisi içinde önemli bir role sahiptir. Ülkemizde hızla artan nüfusa bağlı olarak ortaya çıkan süt ve süt ürünleri ihtiyacının karşılanması için en gelişmiş teknolojileri kullanan entegre tesisler ile küçük ve orta ölçekli üretim yapan mandıralar kurulmuştur. Artan işletme sayısı ile orantılı olarak oluşan atıksu miktarları da artış göstermekte ve bu işletmelerden kaynaklanan çevre kirliliği ve özellikle de su kirlenmesi riski artmaktadır.

Süt ve süt ürünleri endüstrisi birçok farklı prosese sahip olan bir endüstri koludur. Süt ve süt endüstrisi atıksularının karakterizasyonları, üretim prosesine ve üretim çeşitliğine bağlı olarak çok farklılık göstermektedir. Süt ve süt ürünleri endüstrisi atıksularının organik kirlilik içeriği yüksek değerlerde olması nedeniyle, alıcı ortama verilmeden önce uygun arıtma teknolojisiyle deşarj standartlarını sağlayacak şekilde

arıtılması gerekmektedir. Süt ve süt ürünleri endüstrisi atıksularında uygulanan arıtma yöntemlerini, özellikle aerobik ve anaerobik biyolojik arıtma yöntemleri, bunların kombinasyonları, kimyasal arıtma yöntemleri ve son yıllarda kullanım alanı artan ileri arıtma yöntemleri oluşturmaktadır.

1.2 Tezin Amacı

Süt ve süt ürünlerinin işlenmesi sonucu ortaya çıkan atıksuların organik kirlilik değerleri tesislerde kullanılan teknolojilere bağlı olarak farklılık göstermekle beraber, bu atıksular içeriğindeki aminoasit, protein, karbonhidrat ve yağlara bağlı olarak yüksek oranda KOİ, yağ-gres, azot, fosfor, renk ve bulanıklık değerlerine sahiptirler. Süt ve süt ürünleri endüstrisi atıksularının arıtılmasında, klasik arıtma yöntemlerinin dışında son yıllarda ileri arıtma yöntemleri kullanılan çalışmalar yoğunluk kazanmıştır.

Bu çalışmada, süt ve süt ürünleri endüstrisi atıksularının ileri arıtma yöntemlerinden biri olan elektrokoagülasyon (EC) prosesiyle arıtılabilirliği araştırılmış, cevap yüzey yöntemi (RSM) kullanılarak proses optimizasyonu ortaya konulmuştur. Bununla birlikte, işletme parametreleri olan pH, akım yoğunluğu ve elektroliz süresinin, KOİ, renk, ortofosfat, AKM ve bulanıklık giderim verimleri üzerindeki etkisi değerlendirilmiş, oluşan çamurun karakterizasyonu gerçekleştirilmiş ve işletme maliyeti çalışmaları yapılmıştır.

1.3 Bulgular

Bu çalışmada, EC prosesinde alüminyum ve demir elektrotlar kullanılarak yürütülen deneysel çalışmalar ile her bir elektrot için KOİ, renk, ortofosfat, AKM ve bulanıklık giderimi tahminleri için modeller oluşturulmuştur. ANOVA testleriyle oluşturulan modellerin uygunluğu, modellerde kullanılan terimlerin etki düzeyleri belirlenmiştir. Birim arıtma maliyetleri dikkate alınarak optimum maliyet değerleri belirlenmiştir. Süt ve süt ürünleri endüstrisi atıksularının uygulanan EC prosesinde belirlenen optimum şartlarda arıtılması ile uygulanabilirliği ortaya konulmuştur. Çalışmanın asıl değer kazandığı nokta ise, gerçek süt ve süt ürünleri endüstri atıksuyunun EC prosesiyle yapılan arıtma işleminin RSM kullanılarak optimizasyonunun yapılmasıdır. Bu konuda literatürde az sayıda çalışma mevcuttur.

SÜT VE SÜT ÜRÜNLERİ ENDÜSTRİSİ

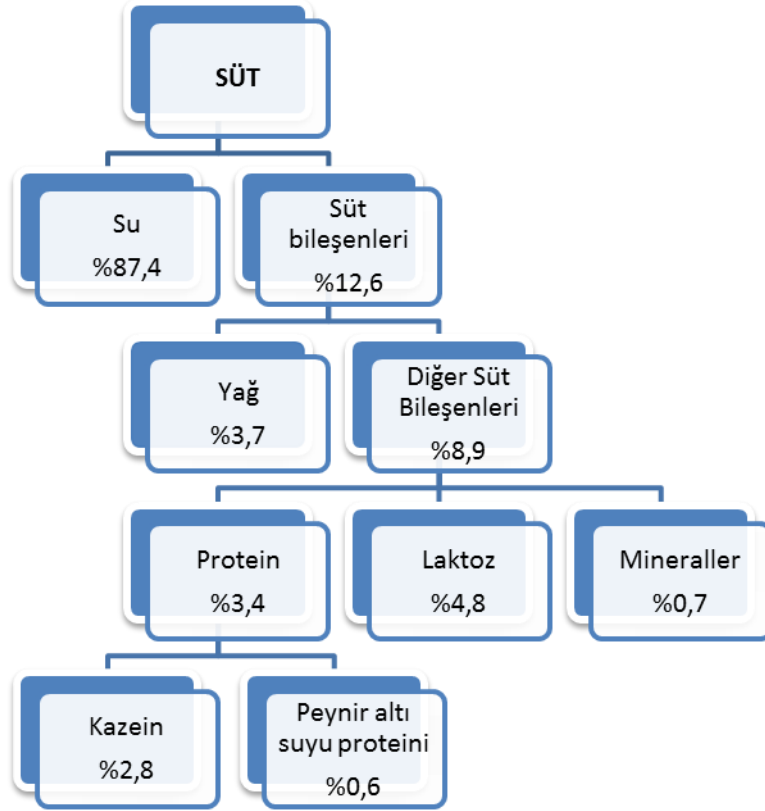
2.1 Genel Özellikleri

Süt ve süt ürünleri endüstrisi, çiğ sütü işleyerek içme sütü, peynir, tereyağı, krema, ayran, konsantre süt, yoğurt, süt tozu ve dondurma gibi ürünlerinin üretildiği bir gıda endüstrisi koludur. Süt ve süt ürünleri endüstrisi temel ihtiyaçlarımızın karşılanmasını sağlayan ve üretim miktarı oldukça yüksek olan bir endüstri grubudur.

Sayıları az olan entegre süt işletme tesisleri hariç tutulursa süt ve süt ürünleri endüstrisi üretimleri mandıra olarak adlandırılan mevsimlik veya sürekli çalışan küçük işletmelerde gerçekleştirilmektedir. Süt tesislerinde üretim mevsimsel olarak değişiklik göstermektedir. Genellikle mandıralar diye adlandırılan küçük işletmelerde Mayıs-Eylül ayları arasında üretim olmaktadır. Bununla birlikte, geri kalan aylarda üretilen ürünlerin satışları yapılmaktadır [1]. Süt ve süt ürünleri endüstrilerinin hammaddesi çiğ süttür oluşmaktadır. Hammadde kaynağı, besiciliğin yapıldığı sabit verime sahip süt üretim tesisleridir. Bununla birlikte, ülkemizde besiciliğin yaygın olduğu bölgelerde süt ve süt ürünleri endüstrileri de yaygınlaşmıştır [2].

Süt, 100'den fazla kimyasal bileşiği içinde bulunduran kompleks bir sıvı olarak tanımlanabilir. İçeriği ağırlıklı olarak su, yağ, laktoz, kazein, peynir altı suyu (PAS) proteinleri ve mineraller gibi bileşiklerden oluşmaktadır. Bu bileşenlerin süt içinde bulunma oranları sütü veren memelinin metabolik sürecine bağlı olarak önemli derecede değişebilir. Bununla birlikte, süütün kompozisyonu aynı tür içinde bile genetik ve çevresel etkilere bağlı olarak değişebilir [3]. Sütün gerçek çözeltisi laktoz, vitaminler,

asitler, enzimler ve bazı inorganik tuzları içermektedir. Kolloidal faz kazein, kalsiyum fosfat ve protein zerreciklerinden oluşmaktadır [4]. Sütün içinde ağırlıklı olarak bulunan bileşenler aşağıda Şekil 2.1’de gösterilmektedir.



Şekil 2. 1 Sütün içinde ağırlıklı olarak bulunan bileşenler [4]

Bir gıda bileşeni ya da tek başına tüketilmesi halinde süt, insanın beslenmesinde mükemmel bir besin kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Uzmanlar sütü tek başına bütün bir gıda olarak kabul ederler; çünkü beslenme için gerekli olan protein, yağ, karbonhidratlar, mineraller ve birkaç minerali önemli miktarda içermektedir [5].

2.2 Süt ve Süt Ürünleri Endüstrisinde Uygulanan Temel Süreçler

Süt ve süt ürünleri endüstrisinde bazı işlemler çoğunlukla bütün üretim aşamalarında uygulanmaktadır. Uygulanan bu işlemler sırasıyla; ısıtma, klarifikasyon, separasyon, hava giderme, pastörizasyon, homojenizasyon, standardizasyon, sterilizasyon ve UHT (Ultra Yüksek Sıcaklık)'dır. Aşağıda bu işlemler hakkında bilgiler verilmiştir.

2.2.1 Isıtma

Isıtmanın temel amacı, çiğ sütün 8°C'den daha yüksek sıcaklıklarda saklanma kalitesinin iyileştirilmesi için ılık bir sıcaklıkta işlenip soğutulmasıdır. Bu işlemde, çiğ süte 60-65°C sıcaklık ve 10-20 saniye aralıkları boyunca ısı değiştiricilerde uygulanmaktadır. Bu uygulama sonunda süt bozulmadan uzun süre depolanabilmektedir [3].

2.2.2 Klarifikasyon

Proses girmeden önce sütün içindeki katı safsızlıkların giderilmesi için klarifikasyon işlemi uygulanır. Bu uygulama filtrasyonla veya sürekli süt temizleyicisinde santrifüjle ayırma metoduyla daha verimli olarak yapılabilmektedir. Bu işlemle birçok yabancı madde giderimi sağlanmaktadır. Bunlar; toz ve kir, ölü epitel hücreler, akyuvarlar, eritrositler ve yüksek konsantrasyonda bakteri, mikroorganizma grupları içeren protein gruplarıdır [5].

2.2.3 Separasyon

Bu işlemin kullanılmasıyla sütten, az yağlı süt ve krema olarak iki ayrı madde elde edilir. Yağ zerrecikleri, çevresini saran su fazından daha hafiftirler ve sütün yüzeyinde toplanırlar. Genel olarak kendi kendine temizlenen separatörler ve soğuk süt separatörleri kullanılır. Separatör, operatörün yağ içeriğini önceden belirlemesine yardımcı olur. Sıvı süte vitamin ve mineral eklenecekse, bu aşamada eklenirler. A ve D vitaminleri yağsız ve düşük yağlı sütlere eklenmelidir [4].

2.2.4 Hava Giderme

Sütün içinde çözülmüş veya dağılmış halde gazlar bulunur. Toplam gaz miktarı karıştırma ve pompalama sırasında süt tarafından emilen hava miktarına bağlıdır. Yüksek miktarda gaz bulunması proses hattında sorun yaratabilmektedir. Bunlar; yağ separatörlerinde verimin düşmesi, ısı değiştiricilerin fazla ısınması veya kabuklanması ve kültür katılmış ürünlerde peynir altı suyunun ayrılma eğiliminin artmasıdır. Hava gidermenin temel amacı, süte yemlerden gelen kokulu uçucu maddelerin giderilmesidir [3].

2.2.5 Pastörizasyon

Çiğ sütün içinde bulunan insanlarda hastalık yapan patojen mikroorganizmaların ısıyla öldürülmesi işlemi pastörizasyonun esas amacı olarak tanımlanmaktadır. Endüstriyel pastörizasyon, sütün fiziksel ve kimyasal özelliklerini minimum derecede değiştirilmesiyle bu amaca ulaşmak için gerekli teknik adımlar arasındaki en uygun faktördür. Yapılan çalışmalarla sütün 63°C'de 30 dakika ısıtılmasının bütün bakterileri öldürmek için yeterli olduğu anlaşılmıştır. Bu sisteme "düşük sıcaklık uzun süre" (LTLT) adı verilmiştir.

Farklı zaman ve sıcaklık parametrelerinde de patojen bakteriler aynı etkiyle yok edilebilir. Çok daha kısa sürede ve daha yüksek sıcaklıkta güvenli süt elde etmek mümkündür. Sütün 72 °C ve en az 15 saniye ısıtılmasının da bakterileri öldürmek için yeterli olduğu belirlenmiştir. Bu sisteme de "yüksek sıcaklık düşük süre" (HTST) denilmektedir. Bu yöntem sürekli akış prosesidir ve ısı değiştiricilerdeki teknolojik gelişmeler sayesinde oluşmuş, süt pastörizasyonunda tercih edilir hale gelmiştir. Daha yüksek katı içeriği bulunan süt ürünlerinde daha yüksek sıcaklık ve daha uzun süre kombinasyonları tavsiye edilmektedir.

Pastörize süt steril değildir. Daha yoğun bir şekilde ısının uygulanması pastörizasyona göre daha verimli sonuçlar verecektir. Diğer yandan, fazla ısıtma işlemi sütün görünüşünü, tadını, besin ve teknolojik değerini olumsuz yönde etkiler [4].

2.2.6 Homojenizasyon

Homojenizasyonun esas amacı, sütün içinde ortalama çapları 3,5 µm civarında bulunan yağ zerreciklerinin boyutunun depolanan sütte krema oluşmasını önlemek için ≤ 1 µm olacak şekilde azaltılmasıdır. İyi homojenize edilmiş bir süt, 7 °C'de hareketsiz bir şekilde saklanan ve üst fazın %10'unun içerdiği yağ miktarıyla geri kalan kısmın içerdiği yağ miktarının farkı %10'dan fazla olmayandır.

Homojenizasyon 37 °C'den yüksek sıcaklıklarda uygulanmaktadır. Süt yüksek basınç altında pompalanmaktadır. Bu basınç, yağ zerreciklerinin süttten ayrılmasını sağlamaktadır [6].

İşlemin en etkili olduğu durum yağ fazının sıvı olduğu zamandır. Pastörizatördeki ön ısıtma adımından sonra ulaşılan 55-60 °C bu durum için uygun bir sıcaklıktır. Homojenizasyonun diğer etkileri mekanik türbülans nedeniyle aktif olacak doğal lipazların aktivitesinin azaltılması ve ayrıca zengin bir tat sağlamasıdır. Homojenizasyon ve pastörizasyon ark arkaya uygulanmalıdır [5].

2.2.7 Standardizasyon

Çiğ sütte en fazla değişiklik gösteren parametre yağ konsantrasyonudur. Standardizasyon, yağ içeriğinin istenilen bir seviyeye getirilmesi işlemi olarak tanımlanmaktadır. Kesikli standardizasyonda süt daha düşük ve yüksek yağ içeriği elde etmek amacıyla yağı alınmış süt veya kremayla karıştırılır. Proses, pastörize edilmiş hammaddelerle veya pastörize edilmiş ürünlerle yürütülebilir [3].

2.2.8 Sterilizasyon

Genellikle steril süt üretim prosesinde kullanılan bir işlemdir. Süte sterilizasyon işlemi iki şekilde uygulanabilmektedir. Birincisi, ısıtmayı takiben 120-140 °C arasında birkaç saniye olarak uygulanır. İkinci adımda ise, 110-120 °C'de şişe içinde sterilizasyon işlemi olarak 10-20 dakika aralıklarında uygulanmaktadır [7].

2.2.9 Ultra Yüksek Sıcaklık (UHT) İşlemi

İşleme ve paketlenme alanındaki gelişmeler, süt ve diğer süt ürünlerinin oda sıcaklığında 6 aya kadar saklayabilme olanağını sağlamaktadır. Sütü HTST sistemi için tavsiye edilenden daha yüksek sıcaklıklarda ısıtmak bakteriyel topluluğa daha fazla zarar vermektedir. Sütün kalitesine gelebilecek zararları minimuma indirmek için doğru teknolojiler yardımıyla temas süresi daha kısa tutulabilir [5].

UHT işlemi, sütün sürekli bir akım şeklinde 135-150 °C aralıklarında 2-8 saniye ısıttıktan sonra aseptik koşullarda paketlenmesini sağlamak amacıyla kullanılmaktadır [6]. UHT ürünleri, oda sıcaklığında, depolamadan sonra son kullanma tarihine kadar ya da 30 °C'de 15 günlük inkübasyondan sonra da mikrobiyolojik olarak dengede kalmalıdır [7]. UHT işlemi üzerinde uygulanan dikkatli kontrollerle ve uygun paketlenmeyle, sütün

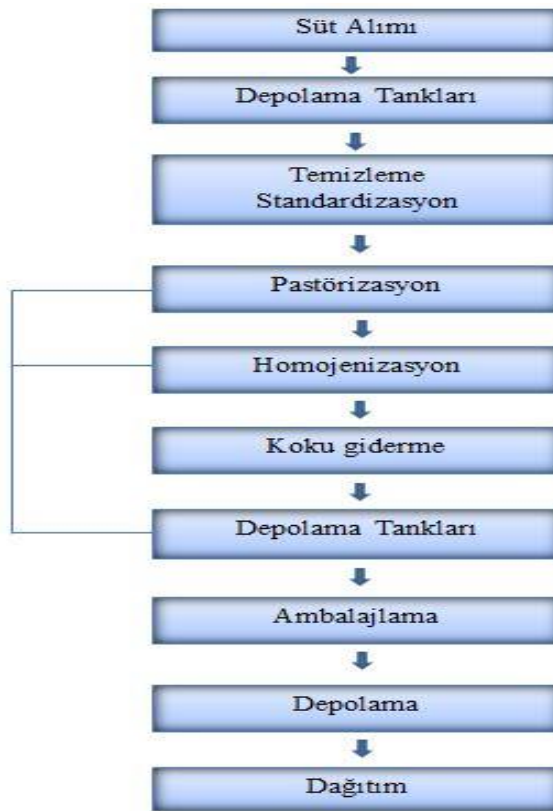
besin değeri protein, yağ, karbonhidrat, yağda çözünen vitaminler, suda çözünen vitaminlerin çoğu ve mineraller bakımından korunur [5].

2.3 Süt Ürünleri

Süt ve süt ürünleri endüstrisinde ham süttten üretilen ürünler çok çeşitlidir. Ülkemizde uygulanan; pastörize süt üretimi, peynir üretimi, yoğurt üretimi, tereyağ üretimi, süttozu üretimi, dondurma üretimi gibi bazı prosesler hakkında bilgiler aşağıda verilmiştir.

2.3.1 Pastörize Süt Üretimi

Pastörize süt, çiğ süttün doğal ve biyolojik özelliklerine zarar vermeden pastörizasyon işlemi uygulanarak patojen mikroorganizmaların tamamen, diğer mikroorganizmaların büyük bir kısmının yok edilmesiyle elde edilen ve pastörizasyondan hemen sonra, kısa sürede 6 °C'yi geçmeyecek sıcaklığa soğutulan türüdür. Pastörize süt üretim akım şeması Şekil 2.2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. 2 Pastörize süt üretimi akım şeması [3]

2.3.2 Peynir Üretimi

Peynir türleri, tüketim alışkanlıklarına, bölgelere, kültürlere, tüketim alışkanlıklarına, kimyasal bileşime, lezzete ve raf ömrüne göre çeşitlilik göstermektedir.

Endüstriyel anlamda beyaz peynir üretim aşamaları şu şekilde olmaktadır [5]:

- Süt Alımı
- Sütte temizlik ve yağ separasyonu
- Pastörizasyon
- Mayalama için ısıtma
- Mayalama ve pıhtılaşma
- Pıhtının parçalanması ve baskıya alma
- Pıhtının kalıplarda beklemesi
- Pıhtının kalıplara bölünmesi ve salamuraya konulması
- Ambalajlama
- Depolama ve olgunlaştırma.

2.3.3 Yoğurt Üretimi

Yoğurt, yağsız kuru süt katısı veya yağsız süt konsantresi eklenmiş, tamamen veya kısmen yağı giderilmiş süte, kültür ilave edilerek üretilen fermente edilmiş bir süt ürünüdür. Yoğurt sade veya aromalı olarak üretilmektedir. Kültüre eklenen laktozu fermente eden mayasıyla Türk yoğurdu diğer türlerden ayrılmaktadır [5].

Yoğurdun üretim aşamaları şu şekilde olmaktadır [3]:

- Çiğ süt ve kalite kontrolü
- Klarifikasyon ve standardizasyon
- Homojenizasyon
- Isıtma işlemi
- İnokülasyon ısısına kadar soğutma

- Özel yoğurt kültürü ilavesi.

2.3.4 Tereyağı Üretimi

Genelde tereyağı üretimi yağ zerreciklerinin yumuşak bir katı madde oluşturması amacı ile tatlı kremanın yayıklanması ile yapılır. Tereyağı üretim prosesi birkaç adımdan oluşmaktadır. Kremanın tereyağına dönüştüğü yayıklama prosesi bu üretim prosesleri arasında en önemlidir [5].

Tereyağının üretim aşamaları şu şekilde olmaktadır [3]:

- Çiğ süt ve kalite kontrolü
- Ön ısıtma
- Separasyon
- Kremanın pastörizasyonu, olgunlaştırılması, nötralizasyonu
- Standardizasyon
- Starter ilavesi
- Yayıklama
- Yıkama
- Yoğurma, tuzlama
- Paketleme.

2.3.5 Süttozu Üretimi

Süte kurutma işlemi uygulanarak süt tozu elde edilmektedir. Kurutma işlemi, konsantre süte püskürtülen sıcak hava ile suyun süttten ayrılmasıyla yapılabilmektedir. Aynı zamanda 150 °C civarında kızgın buharla ısıtılmış birbirine ters olarak dönen silindirlerin iç yüzeyine yağlı toz taneciklerinin tutunmasıyla da kurutma işlemi yapılabilmektedir.

Süttozu üretim aşamaları şu şekildedir [5]:

- Süt alımı
- Depolama tankları
- Temizleme
- Separasyon
- Pastörizasyon
- Depolama tankları
- Yoğunlaştırma
- Kurutma
- Ambalajlama.

2.3.6 Dondurma Üretimi

Dondurma, sürekli ya da kesikli olarak farklı aroma ve katkı maddeleri kullanılarak üretilmektedir.

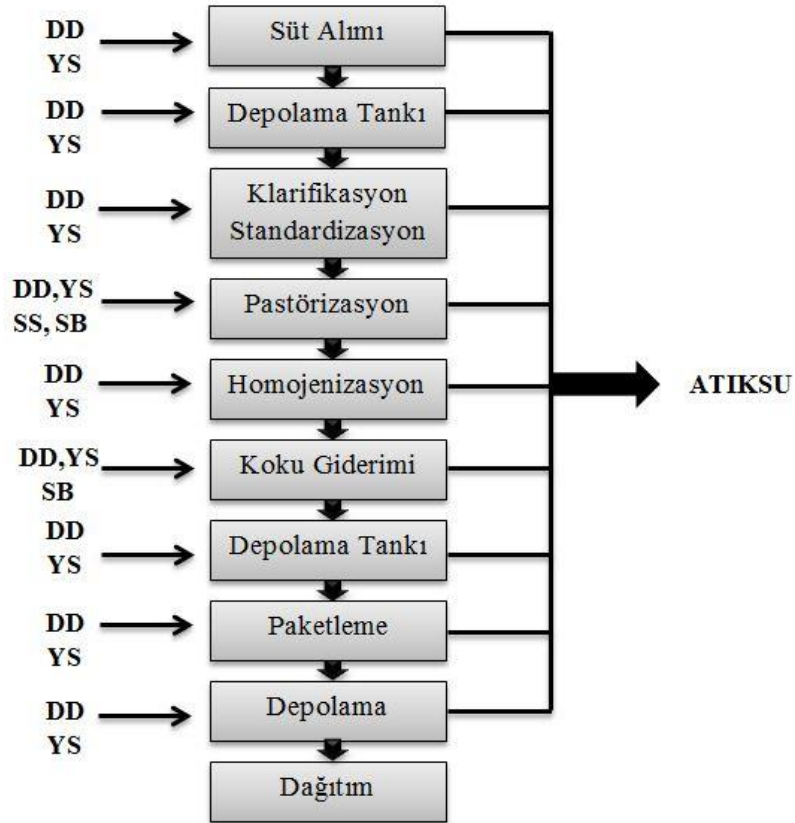
Dondurma üretim aşamaları şu şekildedir [3]:

- Karışımın hazırlanması
- Pastörizasyon
- Homojenizasyon
- Soğutma
- Olgunlaştırma
- Aroma ve renk maddesi ilavesi
- Dondurma
- Paketleme
- Sertleştirme.

2.4 Süt ve Süt Ürünleri Endüstrisi Atıksu Kaynakları ve Özellikleri

Süt ve süt ürünleri endüstrisi atıksuları diğer atıksular gibi yüksek konsantrasyonda organik madde, yağ-gres ve katı madde içeren atıksulardır. Yüksek miktarda organik madde içeriği, sütün yapısında bulunan karbonhidrat, protein ve yağlardan ileri gelmektedir. Süt ve süt ürünleri endüstrisinde sağlıklı üretim koşullarının sağlanabilmesi için bütün işlemlerde su kullanımı zorunlu bir hale gelmektedir.

Süt endüstrisi atıksuları; süt atıkları, deterjanlar, dezenfektanlar ve temizleme suyu içermektedir. Bu atıksular da yüksek nütrient, organik ve inorganik madde içeriği bulunmaktadır [8]. Şekil 2.3'de Süt endüstrisi proseslerinde oluşan çeşitli atıksu çıkışları gösterilmektedir.



Şekil 2. 3 Süt endüstrisi proseslerinde oluşan çeşitli atıksu çıkışları (DD : Deterjan ve Dezenfektanlar, YS : Yıkama suyu, SB : Su buharı, SS : Soğutma Suyu) [8]

Süt endüstrisinde ortaya çıkan en büyük atıksu hacmi, nakliye araçlarının temizliği, üretim ekipmanları arasındaki döngü, tank vagonlarının temizliği, süt silolarının yıkanması, ekipmanların bozulması ve operatör hatalarından meydana gelmektedir [9].

Süt endüstrisi atıksuları üretime bağlı olarak çoğunlukla kesik kesik üretilmektedir. Bu yüzden çıkış sularının debileri önemli derecede değişmektedir. Mevsimsel değişikliklere bağlı olarak atıksu miktarları yaz aylarında yüksek, kış aylarında düşüktür. Yapılan inceleme ve araştırmalar sonucunda süt ve süt ürünleri işletmelerinde 1 ton süttten 0.1 ton kaşar peyniri ve 0.9 m³ atıksu, ayrıca 1 ton süttten 0.23 ton beyaz peynir ve 0.77 m³ atıksu oluştuğu gözlenmiştir [10]. Bir tesiste yapılan çalışma sonucunda Çizelge 2.1'deki değerler elde edilmiştir.

Çizelge 2. 1 Süt üretimi işlemlerinde kullanılan su ve atıksu hacimleri [11]

Kaynaklar	Su Kullanımı				Atıksu Oluşumu			
	Aralık	Ortalama	Aralık	Ortalama	Aralık	Ortalama	Aralık	Ortalama
	(m ³ /gün)	(m ³ /gün)	(m ³ /ton süt)	(m ³ /ton süt)	(m ³ /gün)	(m ³ /gün)	(m ³ /ton süt)	(m ³ /ton süt)
Tanker Boşaltma	0,9-1,3	1,2	0,09-0,13	0,12	0,95-1,4	1,25	0,095-0,14	0,125
Berraklaştırma								
Standartlaştırma	0,1-0,18	0,15	0,01-0,018	0,015	0,1-0,18	0,15	0,01-0,018	0,015
Harmanlama								
Depolama	0,6-1	0,8	0,06-0,1	0,08	0,6-1	0,8	0,06-0,1	0,08
Toplam	1,6-2,48	2,15	0,16-0,248	0,215	1,65-2,58	2,2	0,165-0,258	0,22
Pastörizasyon	2,8-3,2	3	0,28-0,32	0,3	2,8-3,2	3	0,28-0,32	0,3
Depolama	0,8-1,3	1	0,08-0,13	0,1	0,8-1,3	1	0,08-0,13	0,1
Doldurma	0,4-0,6	0,5	0,04-0,06	0,05	0,4-0,6	0,5	0,04-0,06	0,05
Toplam	4-5,1	4,5	0,4-0,51	0,45	4-5,1	4,5	0,4-0,51	0,45

Süt ve süt ürünleri endüstrilerinden gelen atıksuları dört grupta toplamak mümkündür. Isıtma ve soğutma sistemlerinden gelen temiz sular, evsel atıksular, tesis ve makinaların yıkanmasından gelen atıksular ile peynir altı atıksularıdır. Küçük işletmelerde genellikle ilk üç gruptaki sular birlikte toplanmakta sadece peynir altı

suları ayrı olarak toplanabilmektedir [12]. Basit arıtma yöntemleriyle arıtılması güç olan ve kirlilik yükü yüksek atıksu kaynakları, peynir altı suyu ve soğutma sularıdır.

2.4.1 Soğutma Suları

Çiğ sütün, pastörize edildikten sonra yoğurt ve peynir üretimi için gerekli olan mayalanma işlemine geçilebilmesi için pastörizasyon sıcaklığından (90°C) mayalanma sıcaklığına (45°C) getirilmesi gerekmektedir. Bu işlemlerin gerçekleştirilebilmesi için sütün soğutma suları yardımıyla soğutulması sağlanır.

Günümüzde halen süt endüstrisi işletmelerinden çıkan atıksuların hacminin % 60-90'ını soğutma suyu oluşturmaktadır. Geriye kalan kısım ise yıkama suları ve diğer proseslerden kaynaklanan atıksulardır [2].

Soğutma suları; temaslı ve temassız soğutma suları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Sütü soğutmak için eşanjörlü sistemlerden yararlanılmaktadır. İç içe geçmiş borulardan sıcak süt ile soğuk su çarpıştırılarak soğutma işlemi uygulanmaktadır. Isısı artan su ise tank veya yüzey temizliğinde kullanılarak arıtma tesisine gönderilir. Bu şekilde oluşan atıksu, temassız atıksu olarak tanımlanabilir. Sütün soğutulması için soğuk su direkt süt ile temas edilerek kullanılabilir. Tereyağı üretimi sırasında kremanın yıkama işlemlerinde soğuk su kullanılabilir. Bu süreçte kullanılan suyun kirlilik yükü artmaktadır. Bu şekilde oluşan atıksu, temaslı atıksu olarak tanımlanır. Çoğu işletme, pastörizasyon ünitesinde iç içe geçmiş borular sayesinde soğuk süt ile sıcak sütü çarpıştırarak soğutma işlemi gerçekleştirilmektedir. Böylece, soğutma suyu kullanılmadığı gibi kirlilikte azalmaktadır [1].

2.4.2 Peynir Altı Suyu

Peynir altı suyu; beyaz peynir, kaşar peyniri gibi peynir üretimleri sırasında pıhtının parçalanması ve baskıya alınması süreçlerinde oluşur. Peynir altı suları kompleks ve kirlilik yükü fazla olan arıtılması güç atıksulardır. Farklı endüstriler tarafından hammadde olarak kullanılabilirdiğinden dolayı arıtılmanın getirdiği yüksek maliyetin önüne geçilerek biriktirilerek peynir altı suyu toplayan firmalara verilmektedir.

Peynir altı suyu, yüksek oranda şeker içerdiğinden dolayı mikroorganizmalar için uygun bir büyüme ortamı yaratır. Peynir altı suyu, alıcı ortama deşarj edilmeye devam edilirse doğal su ortamlarında biyokütle oluşumunu hızlandırır, bu da çözülmüş oksijen miktarının azalmasına neden olarak ekolojik denge üzerinde olumsuz etki yaratır. Peynir altı suyu yüksek BOİ'ye sahip olarak kabul edilir [5].

Peynir altı suyunun ticari olarak geri kazanılması ekonomik açıdan önemlidir. Peynir altı suyundan, peynir altı suyu tozu elde edilmektedir. Peynir altı suyu tozu, şekerlemeler, unlu mamüller, bebek mamaları, et ürünleri, çorbalar, soslar, içecekler gibi ürünlerde dolgu malzemesi olarak ve çikolata ve dondurma üretiminde de kullanılmaktadır [1].

2.5 Süt ve Süt Ürünleri Endüstrisi Atıksularının Karakterizasyonu

Süt ve süt ürünleri endüstrisi atıksularının karakterizasyonu üretim prosesine bağlı olarak tesisten tesise önemli değişiklikler göstermektedir. Süt endüstrisi atıksuları, yüksek organik madde içeriğine sahip olduklarından dolayı yüksek BOİ ve yüksek KOİ değerlerinde olmaktadır. Süt endüstrisi atıksuyunda, nütrientler (azot, fosfor ve potasyum) ve organik madde (yağ ve gres, çözülmüş laktik asit vb.) de yüksek oranda bulunmaktadır. Bu maddelerin süt endüstrisi atıksuyunda yüksek olması, BOİ 'nin da yüksek olmasına neden olmaktadır. Ayrıca, süt endüstrisi atıksularının çözülmüş tuz (toplam çözülmüş katı madde) konsantrasyonuda bir hayli yüksektir [13].

Süt endüstrisinde kullanılan asit ve alkali temizleyiciler ve yumuşatıcılar atıksu karakteristiğine etki eder ve tipik olarak çok değişken pH değerlerinde sonuç verir [14]. Süt endüstrisi atıksularında, koagüle edilmiş süt, peynir pıhtıları, meyve ve fındık gibi tatlandırıcı maddeler AKM kaynağı olarak görülmektedir. Bu askıda katı madde kaynaklarının doğası gereği organik içerik fazladır [15].

Süt endüstrisi atıksularında, azot süt proteinlerinden, organik azot ise proteinler, üre, nükleik asitler ya da NH_4^+ , NO_2^- ve NO_3^- gibi iyonlardan kaynaklanmaktadır. Fosfor ağırlıklı olarak ortofosfat (PO_4^{3-}) ve polifosfat ($\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$) gibi inorganik formlarda ya da organik formlarda bulunabilmektedir [9]. Omil vd. tarafından [16] da yaptıkları bir araştırmada süt ve süt ürünleri endüstrisi atıksu karakterizasyon çalışmaları Çizelge 2.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 2. 2 Süt ve süt ürünleri endüstrisi atıksu karakterizasyon çalışmaları [16]

Fabrika	KOİ	BOİ	Yağlar	TN	TP	TAKM	UAKM	TKM	UKM	pH
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	
SF	4000	2600	400	55	35	675	635	-	-	8-11
SF	4000	2160	-	200	60	-	500	5100	4300	5-9
SF	2926	1580	294	36	21	-	-	2750	1880	6,7
SF	633	260	-	106	-	240	-	710	447	8,9
SF	2209	1112	60	-	-	278	-	-	-	7,2
SF	4500	2300	-	56	33	816	-	2540	1093	7,2
SF	3190	1950	690	43	7	820	-	-	-	5-10
SF	-	285	-	296	-	943	-	-	-	8,1
SF	2125	1250	-	70	100	280	250	1500	-	9,8
SF	-	241	-	191	51	-	804	-	-	8,5
SF	4500	2300	350	60	50	800	-	-	-	-
SF	4000	2000	-	60	-	800	-	-	-	-
SF	1750	-	-	75	9,1	400	355	-	-	-
PF	4430	3000	754	18	14	1100	-	-	-	7,3
PAS	61250	-	-	2500	533	5077	4900	-	-	4,6
PAS	66000	-	-	650	650	-	2000	63000	57000	4-6
YAF	1500	1000	-	63	7,2	191	-	-	-	-

SF: Süt Fabrikası, PAS: Peynir altı suyu, PF: Peynir Fabrikası, YAF: Yoğurt ve Ayrın Fabrikası

Danalewich vd. [15] de 15 ayrı tesiste yaptıkları karakterizasyon çalışmaları sonucunda Çizelge 2.3'ü oluşturmuşlardır.

Çizelge 2. 3 Süt ve süt ürünleri endüstrisi atıksu karakterizasyon çalışmaları [15]

Tesis	BOİ ₅	KOİ	AKM	UAKM	Toplam P	Ortofosfat	TKN	Alkalinite	pH
	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg CaCO ₃ /l)	
1	1843	2447	586	419	60	19	111	375	10,7
2	5722	7619	1533	1477	74	20	106	225	6,2
3	1298	2032	389	225	49	15	140	500	11,3
4	826	2309	696	567	51	11	40,1	500	6,7
5	2738	3556	730	663	36	9	134	400	6,9
6	568	785	470	307	65	19	14	525	6,8
7	1466	2909	1910	1010	134	32	62	1550	9,4
8	565	2290	3560	1935	181	35	-	1525	7,9
9	3269	4895	885	680	79	21	122	775	10,3
10	1003	1644	371	327	29	7	83	625	7,0
11	2406	3093	757	699	35	22	128	500	6,9
12	1887	2817	853	767	68	6	83	650	7,5
13	2108	3232	923	890	97	26	-	614	10,8
14	1175	1570	326	284	52	13	74	450	9,8
15	959	1625	655	298	54	15	-	400	7,6
Ort.	1856	2855	976	703	71	18	91,4	652	8,4

2.6 Süt ve Süt Ürünleri Endüstrisi Atıksularının Arıtım Yöntemleri

Süt ve süt ürünleri üreten işletmelerde atıksu arıtımından önce katı atıkların ayrılması, atıkların ve yan ürünlerin kullanılması, tesiste oluşan fazla suyun tekrar kullanımı gibi önlemlere başvurulur. Süt endüstrisinde oluşan atıksuların tekrar kullanılması mümkündür. Süt ve süt ürünleri endüstrisi atıksularının organik madde içeriğinin

yüksek değerlerde olması nedeniyle yaygın uygulanan teknolojilerin büyük bir kısmını biyolojik arıtma yöntemleri oluşturmaktadır.

2.6.1 Biyolojik Arıtma Yöntemleri

Biyolojik arıtmanın amacı çözülmüş ve kolloid halde kirletici maddelerin aerobik ve anaerobik şartlarda giderilmesi ve organik maddenin daha kararlı ve zararsız formlara dönüştürülmesidir. Biyolojik arıtmada mikroorganizma hücrelerine dönüşen organik maddelerin çökerek atıksudan ayrılması amaçlanmaktadır. Biyolojik arıtma yöntemlerinde mikroorganizmaların yaşamlarını etkileyen faktörlerin dikkate alınması ve öngörülen sınır değerlerin aşılmaması gerekir [17]. Biyolojik arıtma yöntemleri aerobik ve anaerobik prosesler olmak üzere iki grupta incelenebilir. Aerobik biyolojik arıtma yöntemi oksijen varlığında atığın parçalanması ve oksidasyonunu içermektedir. Aerobik proseslerle süt endüstrisi atıksularının arıtılması, aktif çamur sistemi, damlatmalı filtreler, havalandırılmalı lagünler ya da bunların kombinasyonu olan sistemlerle yapılmaktadır. Süt endüstrisi atıksularındaki bütün birleşikler parçalanması zor olan protein ve yağ hariç biyolojik olarak parçalanabilir [8], [18].

Çeşitli aerobik arıtma yöntemleri arasında, ardışık kesikli reaktörler (SBR) süt endüstrisi atıksularının arıtılmasında çok ümit verici bir teknolojidir. Bu sistemde, atıksu kesikli reaktöre eklenir, istenmeyen birleşiklerin giderimi ve deşarjı sağlanır. Dengeleme, havalandırma, berraklaştırma tek bir kesikli reaktörde sağlanmaktadır [8].

Süt endüstrisi atıksularının arıtımı için arıtılacak proses atıksuyunun AKM konsantrasyonu düşük ise, biyolojik arıtma için havasız filtre reaktörler uygundur. Süt atıksuyunun KOİ konsantrasyonları önemli derecede değişkenlik gösterir. Süt atıksuyunun ılık ve dayanıklı olması, anaerobik arıtma için ideal bir ortam yaratmaktadır. Anaerobik arıtma, aerobik proseslerle karşılaştırıldığında, anaerobik arıtmada havalandırma ihtiyacının olmaması, fazla çamurun düşük miktarda oluşması ve alan ihtiyacının az olması gibi sebepler anaerobik arıtmayı avantajlı kılmaktadır [9].

Kushawa vd. [8] de yaptıkları bir literatür çalışmasında süt ve süt ürünleri endüstrisi atıksularının aerobik ve anaerobik yöntemleriyle arıtılmasını (Çizelge 2.4) karşılaştırmışlardır.

Çizelge 2. 4 Süt endüstrisi atıksuları aerobik ve anaerobik arıtımının karşılaştırılması [8]

Faktörler	Aerobik Proses	Anaerobik Proses
Reaktörler	Havalandırmalı lagünler, Oksidasyon hendekleri, Stabilizasyon havuzları, Damlatmalı filtreler, Biyodisk. Ardışık kesikli reaktör	UASB(Yukarı yatay akışlı çamur yataklı reaktör), Havasız filtreler, Yukarı akışlı dolgu yataklı reaktör, Sürekli karıştırılmalı tank reaktör, Aşağı akışlı karışımli film reaktör, Yüzer filtre biyoreaktör
Reaktör Boyutu	Havalandırmalı lagünler, Oksidasyon hendekleri, Stabilizasyon havuzları, Damlatmalı filtreler, Biyodisk için büyük alan gereksinimi. Ardışık Kesikli Reaktör için oldukça küçük alan gereksinimi	Küçük reaktör gereksinimi vardır.
Çıkış Suyu Kalitesi	KOİ,BOİ ve nütrient giderimi açısından çok kaliteli çıkış suyu.	KOİ açısından iyi çıkış suyu kalitesi. Ama ikincil bir arıtmaya ihtiyaç var. Nütrient giderimi çok düşük.
Enerji	Yüksek enerji gereksinimi	Metan formunda enerji üretimi
Biyokütle Ürünü	Anaerobik prosesle karşılaştırıldığında, 6-8 kez daha büyük biyokütle üretimi.	Düşük biyokütle üretimi
Yükleme Hızı	Literatürde maksimum 9000g KOİ/m ³ olarak görülmektedir.	Literatürde çok yüksek olarak 31 kg KOİ/m ³ görülmektedir. Bunun nedeni küçük reaktör hacmi ve daha küçük alandır.
Yağ ve Gres Giderimi	Aerobik proseste sorun oluşturmamaktadır.	Atıksudaki yağlar süt endüstrisi atıksularının arıtılması sırasında inhibitör etki göstermektedir.
Şok Yüklemesi	Mükemmel performans.	Kötü performans.
Alkalinite Eklenmesi	Gerek yoktur.	Laktozun parçalanması sırasında pH değişmektedir. bu yüzden pH 'ı dengede tutmak için gerek vardır.

2.6.2 Fiziko-Kimyasal Arıtma Yöntemleri

Koagülasyon/flokülasyon, adsorpsiyon ve membran prosesler gibi fiziko-kimyasal arıtma yöntemlerine askıda, kolloidal ve çözünmüş bileşenlerin giderimi için gereksinim vardır. Koagülasyon ve flokülasyon endüstriyel atıksuların birincil arıtılması için sıklıkla kullanılan proseslerdir. Koagülasyon, koagülant çözeltilerinin eklenmesiyle atıksu içerisindeki yük dengesini bozmak ve pıhtı oluşumu sağlamak için karıştırıcı yardımıyla sağlanan bir yöntemdir. Koagülasyon havuzunda oluşturulan pıhtıların, flokülant çözeltilerin ilavesiyle yumaklaşmasının sağlandığı flokülasyon (yavaş karıştırma) prosesidir. Bu durum, sonraki arıtma prosesleri olan çökeltme, flotasyon ve filtrasyon aşamalarında organik madde giderimi kolaylaştırmaktadır [1], [8].

Elektrokoagülasyon prosesi süt endüstrisi atıksularının arıtılması için başka bir alternatif yöntemdir. EC prosesi bir anot ve bir katotdan meydana gelmektedir. Güç kaynağından uygulanan elektrik akımı, anot materyalin oksidasyonuna ve katot materyalinde indirgenmesine neden olmaktadır. Daha sonra metal hidroksitler ve polihidroksitlerin üretimiyle, koagülasyonu takiben elektrostatik çekim tarafından atık maddelerin sudan giderimi sağlanmaktadır [13].

Adsorpsiyon organik bileşiklerin giderimi için çok etkili bir yöntemdir. Çeşitli atıksuların arıtılması için, aktif karbon genellikle adsorban olarak kullanılmaktadır. Membran arıtma yöntemleri mikrofiltrasyon (MF), ultrafiltrasyon (UF), nanofiltrasyon (NF), ters ozmos (RO) diyaliz ve elektrodiyalizden oluşmaktadır. Bu metodlar, yüksek çıkış suyu kalitesinin sağlanması ve doğrudan yeniden kullanım için uygulanabilir [8].

2.7 Süt ve Süt Ürünleri Endüstrisi Atıksularının Türkiye ve Dünya’da ki Deşarj

Kriterleri

Süt ve süt ürünleri endüstrisi atıksuları, yüksek organik kirlilik değerlerine sahip olduklarından dolayı arıtılmadan bir alıcı ortama verilmesi önemli derecede çevre kirliliğine neden olmaktadır. Süt ve süt ürünleri endüstrisi atıksularının şehir kanalizasyon şebekesine verilmesi, kentsel atıksu arıtma tesislerinde organik kirlilik yükü açısından ciddi problemler oluşturmaktadır. Bu yüzden, atıksuların deşarj standartlarına uygun olarak arıtılması ve alıcı ortama verilmesi gerekmektedir.

Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliğine göre, süt ve süt ürünleri endüstrisi atıksularının alıcı ortama deşarj standartları Çizelge 2.5’de gösterilmektedir.

Çizelge 2. 5 Süt ve süt ürünleri endüstrisi atıksuları alıcı ortama deşarj standartları [19]

Parametre	Birim	Kompozit Numune	
		2 Saatlik	24 Saatlik
Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)	(mg/l)	170	160
Yağ ve Gres	(mg/l)	60	30
pH		6-9	6-9

Dünya Bankası Raporu’na göre süt ve süt endüstrisi atıksularının alıcı ortama deşarj kriterleri Çizelge 2.6’de belirtilmiştir.

Çizelge 2. 6 Süt ve süt ürünleri endüstrisi atıksuları alıcı ortama deşarj standartları [20]

Parametre	Birim	Maksimum değerler
pH		6-9
BOİ ₅	(mg/l)	50
KOİ	(mg/l)	250
TAKM	(mg/l)	50
Yağ ve Gres	(mg/l)	10
Toplam Azot	(mg/l)	10
Toplam Fosfor	(mg/l)	2
Sıcaklık Artışı	(°C)	<3
Koliform Bakteri	EMS/100ml	400

EMS: En Muhtemel Sayı

ELEKTROKOAGÜLASYON

Elektrokimyasal tepkimeler, elektrolitten göç eden iyonik bileşiklerin anotta ve katotta yükseltgendiği veya indirgendiği heterojen iyon transferi tepkimelerdir. Anot ve katotta genellikle metal, karbon veya bir yarı iletken elektrot kullanılmaktadır [21]. Elektrokimyasal teknolojiler çok yönlü oldukları için, sıvıların, gazların ve katıların arıtımı yapabilmektedirler. Elektrokimyasal metotta temel faktör elektrondur ve bu temiz bir faktördür [22].

Elektrokoagülasyon, elektrokimyasal arıtmada kullanılan yaygın bir prosestir. EC prosesi, atıksudan kontrollü olarak elektrik enerjisi geçirilerek partiküllerin destabilize edilmesi, böylece stabil çözelti oluşturarak atıksudan ayrılması prensibine dayanır [23]. EC sulu ortamda istenmeyen askıda katı maddeleri ve çözünmüş partikülleri elektroliz ile verimli bir şekilde gideren elektrokimyasal bir tekniktir [24]. Elektrokoagülasyonun temeli, su ve atıksu arıtımında çeşitli kirlilikleri giderebilen koagülant türlerinin yerinde oluşumudur [25].

EC prosesinde elektrokoagülasyonla birlikte elektroflotasyon ve elektrooksidasyon olmak üzere üç önemli mekanizmanın birlikte meydana geldiğine inanılmaktadır. Bu durum, giderim verimine olumlu etki etmektedir [26].

Koagülasyon işlemleri, Fe^{+2} , Fe^{+3} , Al^{+3} iyonlarının kimyasal madde şeklinde ilavesi yapılarak gerçekleştirilirken, elektrokoagülasyon anot materyali olarak seçili Fe veya Al metalinin elektroliz sırasında çözünerek ortama geçmesiyle gerçekleşmektedir [27].

Literatürde karbon, yumuşak çelik, grafit, titanyum, demir ve alüminyum gibi farklı elektrotlar kullanılmaktadır. Uygulama şartlarında kirlilik giderimin de başarılı ve çok verimli olan demir ve alüminyum olduğu görülmektedir [24], [28].

Gıda, yağ, maden üretim işlemleri atıksuları, kağıt endüstrisi, boya, zeytin işleme prosesi, tekstil endüstrisi, arsenik ve nitrat içerikli atıksular, tabakhane atık suyu ve krom içerikli atıksular gibi birçok atıksuyun arıtımında elektrokoagülasyon prosesi kullanılmaktadır [29].

3.1 Elektrokoagülasyon Prosesinin Genel Esasları

Elektrokoagülasyon, elektroliz ürünü H_2 ve O_2 gazlarının üretimi, Fe ve Al gibi aşınabilen anotların oksidasyonundan kaynaklanan çok değerlikli katyonların oluşturulmasına dayalı olarak kombine bir sistemden oluşmaktadır. Gaz kabarcıkları, kirletici bileşenleri daha kolay konsantre olabilecekleri, toplanabilecekleri ve uzaklaştırılabilecekleri çözelti yüzeyine flotasyonla taşıyabilmektedir. Metal iyonları, H_2 gazının üretimi esnasında katotta oluşan OH^- iyonları ile reaksiyona girerek, çözünmeyen ve süspansiyon bileşenleri çöktürebilir veya ortamda mevcut olabilen negatif yüklü koloidal tanecikleri nötralize ederek koagülasyona katkıda sağlayabilir. Belirli akım şiddetinde organik maddeler katotta indirgenerek daha küçük moleküllere parçalanabilirler. Bu organik moleküllerin elektroliz esnasında oluşan $Fe(OH)_3$ ya da $Al(OH)_3$ hidroliz ürünlerine absorblanması ve H_2 flotasyonu ile ortamdan uzaklaştırılabilecekleri gösterilmektedir [30].

Elektrokoagülasyon prosesinde, sulu ortamda askıda, koloidal ya da çözünmüş halde bulunan kirleticiler koagülasyon, adsorpsiyon, absorpsiyon, çöktürme ve flotasyon mekanizmaları ile giderilebilir [31].

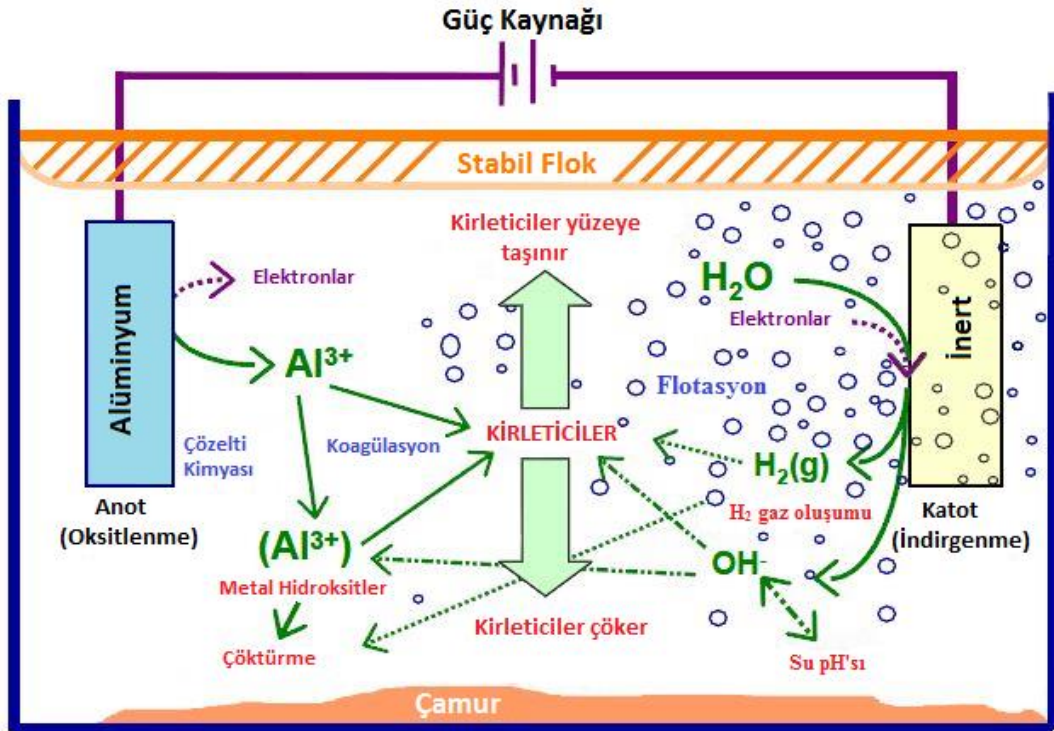
Elektrokoagülasyon prosesi birbirini takip eden 3 aşamada gerçekleştiği kabul edilmektedir:

- Tükenebilir elektrotların elektrolitik oksidasyonu ile koagülantların oluşumu,
- Kirleticilerin destabilizasyonu, partikül süspansiyonu ve emülsiyonların kırılması,
- Destabilize edilmiş fazlarda flokların toplanması.

Kirleticilerin destabilizasyonu, partikül süspansiyonu ve emülsiyon kırılması mekanizmaları aşağıdaki maddelerle tanımlanabilir:

- Çözelti içinden geçen akımdan dolayı kullanılan elektrotun çözünmesiyle oluşan iyonların etkileşimleri sonucu yüklü türler etrafındaki yayılmış çift tabakanın sıklaştırılması,
- Kullanılan elektrotların elektrokimyasal olarak çözünmesi ile üretilen zıt iyonların sebep olduğu, atıksu içerisindeki mevcut iyonik türlerin yük nötralizasyonu,
- Flok oluşumu [32].

EC reaktörü, basit olarak anot ve katot elektrotun bulunduğu elektrolitik hücre ile anot ve katot elektrotların bağlandığı DC güç kaynağından oluşmaktadır. Elektrokoagülasyon prosesinde arıtım mekanizması, ortamın kimyasal özelliği, iletkenlik, pH, partikül boyutu, arıtılacak maddenin kimyasal özellikleri ve miktarı tarafından belirlenir [33]. Şekil 3.1'de elektrokoagülasyon prosesi temel bileşenleri ve kirletici giderim mekanizmaları verilmiştir.



Şekil 3. 1 Elektrokoagülasyon prosesi bileşenleri ve kirletici giderim mekanizması [34]

Elektrokoagülasyon hücresinde meydana gelen fizikokimyasal reaksiyonlar aşağıdaki maddelerle tanımlanabilir:

- Atıksudaki kirleticilerin katodik redüksiyonu
- Kolloidal partiküllerin koagülasyonu
- Çözeltilerdeki iyonların elektroforetik parçalanması
- Elektrotlarda üretilen O₂ ve H₂ kabarcıklarıyla koagüle olmuş partiküllerin elektroflotasyonu
- Katotta metal iyonların redüksiyonu
- Diğer elektrokimyasal ve kimyasal prosesler [32].

Elektrokoagülasyonda yaygın olarak demir ve alüminyum elektrotlar kullanılmaktadır. Bu elektrotların uygulanabilirliklerinin kanıtlanmış olmasının yanında ucuz ve kolay temin edilebilir olmaları tercih sebebidir [35].

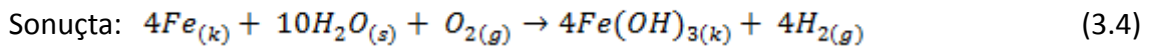
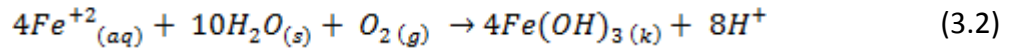
Bir elektroliz hücresinde anot ve katotta gerçekleşen elektrokimyasal yükseltgenme ve indirgenme reaksiyonları Çizelge 3.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 3. 1 Elektrokimyasal yükseltgenme ve indirgenme reaksiyonları [36]

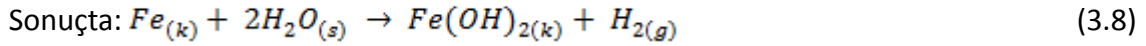
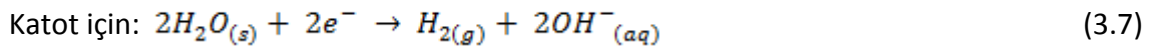
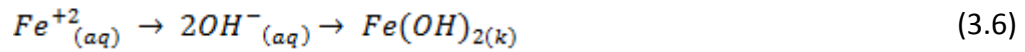
Anot Reaksiyonları	Katot Reaksiyonları
▪Anot elektron verir.	▪Katot elektron alır.
▪Anotta yükseltgenme	▪Katotta indirgenme
▪Anodik çözünme: (Al → Al ³⁺ + 3e ⁻)	▪Katodik birikme: (Cu ²⁺ + 2e ⁻ → Cu)
▪Anyonlar anotta toplanır.	▪Kationlar katotta toplanır.
▪Anolit bölge oluşur.	▪Katolit bölge oluşur.
▪Anot oksijen: 2H ₂ O + 4e ⁻ → O ₂ ↑ + 4H ⁺	▪Katotta hidrojen: 2H ₂ O + 2e ⁻ → H ₂ ↑ + 2OH ⁻
▪Klor var ise: 2Cl ⁻ + 2e ⁻ → Cl ₂ ↑	▪Gazın indirgenmesi: O ₂ + 4H ⁺ + 4e ⁻ → 2H ₂ O

Demir anot olarak kullanıldığı zaman, elektrolitik sistemde $Fe(OH)_n$ ($n=2$ ya da 3) demir hidroksitler oluşturur. Metal hidroksitlerin oluşumu, denklem (3.1), (3.2), (3.3), (3.4), (3.5), (3.6), (3.7) ve (3.8)' de iki mekanizma şeklinde gösterilmektedir.

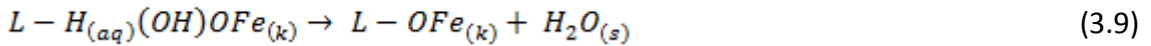
1.Mekanizma:



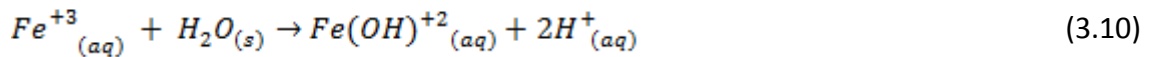
2.Mekanizma:

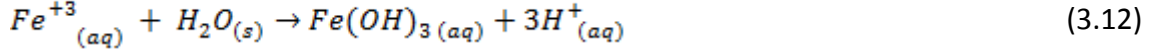
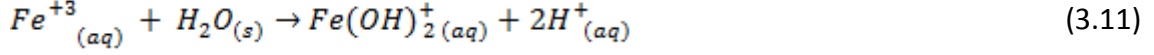


Elektrostatik çekicilik veya kompleksleşme ve takip eden koagülasyon yoluyla atıksudan kirleticileri ayıran $Fe(OH)_{n(s)}$ akıntıda jelatinimsi bir süspansiyon oluşturur. Yüzey kompleksleşme modunda kirletici $Fe(OH)_{n(s)}$ 'e kimyasal olarak bağlanan bir ligand gibi davranır.



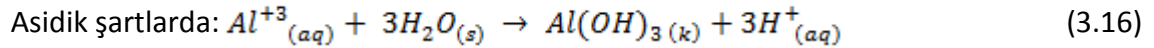
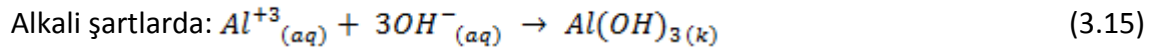
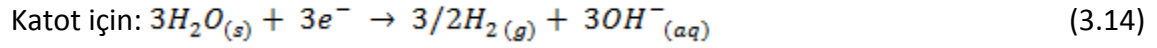
Redoks reaksiyonu sonucu üretilen H_2 , çözünmüş organikleri veya askıda maddeleri flotasyon yoluyla giderebilir. Bu yüzden Fe^{+3} iyonları çözeltinin pH' sına bağlı olarak hidrasyon geçirebilirler ve asidik koşullar altında $Fe(OH)^{+2}$, $Fe(OH)_2^{+}$, ve $Fe(OH)_3$ bileşiklerini oluşturabilirler [33].





Elektrokoagülasyon prosesinde oluşacak ve kirleticilerin gideriminde etkin rol alacak metal hidroksitlerin türü ortamın pH'sı tarafından belirlenmektedir. Demir elektrotların kullanılmasıyla pH 7-10 aralığında monomerik $Fe(OH)_3$ oluşur, pH 3,5-7 aralığında oluşan kompleksler ise polimerleşme eğilimindedir ve polimerik türler $Fe(OH)^{+2}$, $Fe(OH)_2^{+1}$, $Fe_2(OH)_2^{+4}$, $Fe(H_2O)_2^{+}$, $Fe(H_2O)_5OH^{+2}$, $Fe(H_2O)_4(OH)_2^{+1}$, $Fe(H_2O)_8(OH)_2^{+4}$, $Fe(H_2O)_6(OH)_4^{+2}$ ve pH 10'un üzerinde polimerik olan $Fe(OH)_4^{-}$ oluşmaktadır [31], [37].

Alüminyum elektrot materyali olarak kullanıldığında Al anotta çözünür (3.13) ve katota hidrojen gazı (3.14) açığa çıkmaktadır. Alüminyumun oksidasyonla suda elektrolitik olarak çözünmesi sulu Al^{+3} türlerini oluşturur. Hidroliz reaksiyonu sırasında oluşan H_2 gazı su yüzeyine doğru hareket eder ve flotasyon prosesi bu sayede hızlanır. Al^{+3} iyonlarının katı $Al(OH)_3$ çökelti oluşum reaksiyonu alkali ve asidik şartlarda denklem (3.15) ve (3.16)'da gösterilmektedir [31].



Al^{+3} iyonlarının hidrolizi ile $Al(H_2O)_6^{+3}$, $Al(H_2O)_5OH^{+2}$, $Al(H_2O)_4(OH)^{+2}$ oluşmaktadır. Bu hidroliz ürünleri geniş pH aralığında $Al(OH)^{+2}$, $Al(OH)_2^{+}$, $Al_2(OH)_2^{+4}$, $Al(OH)_4^{-}$ gibi monomerik türler ve $Al_6(OH)_{15}^{+3}$, $Al_7(OH)_{17}^{+4}$, $Al_8(OH)_{20}^{+4}$, $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{+7}$, $Al_{13}(OH)_{34}^{+5}$ gibi polimerik türler şeklinde görülmektedir [32].

3.2 Elektrokoagülasyon Prosesi Reaktör Dizaynı

En basit bir EC reaktörü, bir elektrolit içine daldırılmış bir anot ve bir katottan oluşmaktadır. Elektrokoagülasyon prosesi, elektrot plakalarının yerleştirilme biçimine

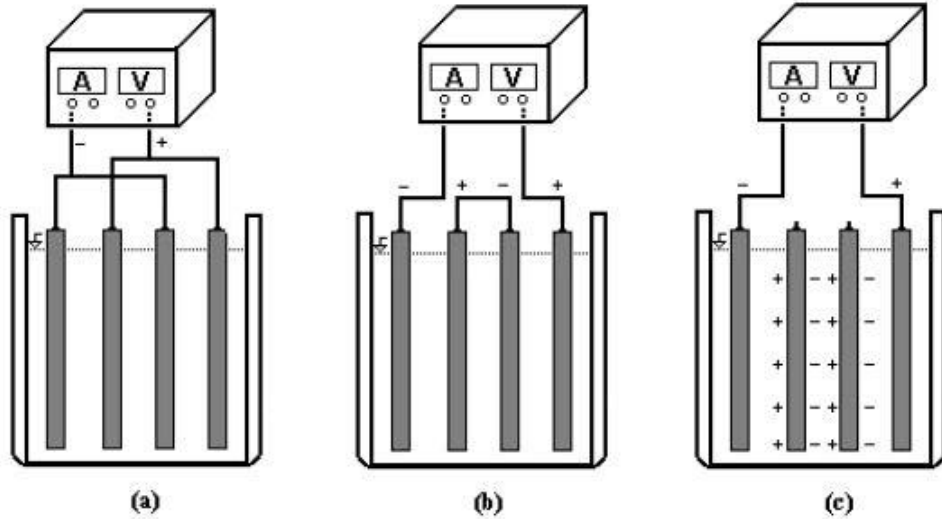
göre yatay veya dikey olarak işletilebilir. Elektrot bağlantı şekilleri ile tek kutuplu paralel, monopolar seri ve çift kutuplu olmak üzere dizayn edilebilir, sürekli akımlı sistemlerde tek kanallı veya çok kanallı olarak su akışı sağlanmaktadır [31].

Paralel bağlı monopolar elektrotlarda (MP-P) anot ve katotların paralel bağlantı düzeneğinde akım her bir hücrenin direncine göre bölünür. Böylece, seri bağlantıya oranla daha düşük potansiyel fark gereklidir (Şekil 3.2).

Seri bağlı monopolar elektrotların (MP-S) olduğu düzenekte her bir elektrot çifti dahili olarak birbirine bağlanmıştır. Seri bağlantıda her bir hücre voltajı toplanacağından verilen akım için yüksek potansiyel fark gereklidir (Şekil 3.2).

Seri bağlı bipolar elektrotlarda (BP-S) iç kısımdaki iki elektrotta elektrik bağlantısı yoktur, sadece dış elektrotlar güç kaynağına bağlanmıştır. Dış kısımdaki elektrotlar monopolar ve iç kısımdakiler de bipolardır (Şekil 3.2).

Elektrokoagülasyon reaktörlerinde doğru akım (DC) veya alternatif akım (AC) uygulanmaktadır. Doğru akım elektrokoagülasyon teknolojisinde; oksitlenmeden dolayı anot bozulmakta, diğer taraftan ise katotta su geçirmeyen bir oksit tabakası oluşmaktadır [38].



Şekil 3. 2 Elektrokoagülasyon sistemleri, (a) MP-P sistemi, (b) MP-S sistemi, (c) BP-S sistemi [38].

Elektrokoagülasyon ünitesinin geliştirilmesi ve optimizasyonu için, pH gibi atıksuya ait karakteristikler, akım yoğunluğu ve uygulama süresi gibi proses değişkenleri ve elektrot

materyalinin tipi ile bağlantı şekli gibi proses konfigürasyonlarının ayrıntılı bir şekilde gözönüne alınması gerekmektedir [39].

3.3 Elektrokoagülasyon Prosesinin Avantaj ve Dezavantajları

Elektrokoagülasyon prosesinin diğer farklı prosesler gibi avantaj ve dezavantajlarının olduğu durumlar söz konusu olmaktadır. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

EC'nin avantajları;

- Basit ekipmanlar ve işletme şartları gerektirmektedir.
- Arıtım sonrası çıkış suyu renksiz, kokusuz ve berraktır.
- Oluşan çamur, metal oksit ve hidroksitlerden oluştuğu için kolaylıkla stabil hale getirilir ve susuzlaştırılabilir. Oluşan çamur miktarı azdır.
- Oluşan floklar kimyasal floklara benzemekle birlikte; daha büyük floklar olma eğiliminde ve daha az bağlı su içermektedirler. Asidik ortama dirençli ve stabil olup, filtrasyonla daha hızlı ayrılabilirler.
- Kimyasal arıtma ile karşılaştırıldığında EC çıkış suyu daha az toplam çözünmüş katı madde içerir. Eğer suyun yeniden kullanılması gerekirse, toplam çözünmüş katı madde seviyesi maliyet açısından katkı sağlayacaktır.
- EC prosesler en küçük kolloidal parçacıkları giderme avantajına sahiptirler. Çünkü cihazların uyguladığı elektrik alan onların daha hızlı hareket etmelerini sağlayarak koagülasyonu kolaylaştırır.
- EC'de kimyasal madde kullanımından kaçınılır ve böylece kimyasal koagülasyonda ilave edilen yüksek konsantrasyondaki kimyasal maddelerin sebep olduğu ikincil kirlenme olasılığı ve aşırı kimyasalların nötralizasyonu problemi ortadan kaldırılmış olunur.
- Elektroliz sırasında üretilen gaz kabarcıkları kirleticileri çözelti yüzeyine taşıyabilir, daha kolay toplanmaları ve giderimleri sağlanır.
- EC hücresi içindeki elektrotlar sabit konumda olup, elektriksel olarak kontrol edilir. Böylece daha az bakım gerektirir.

- EC prosesi için, kırsal alanlarda elektrik prosese entegre şekilde güneş panellerinden temin edilebilir.

EC'nin dezavantajları;

- Oksidasyon sonucu tükenen elektrotların düzenli olarak yenilenmesi gerekmektedir.
- Birçok yerde elektrik kullanımı pahalı olabilir.
- Katot üzerinde geçirimsiz bir oksit tabakasının oluşumu prosesin verimliliğini düşürebilir.
- Atıksu çözeltilerinin yüksek iletkenliğe sahip olması gerekmektedir [33].

YAPILAN ÇALIŞMALAR

4.1 Gerçek Atıksular ile Yapılan Çalışmalar

Gengeç vd. tarafından [40] ekmeç mayası atıksuyu arıtımı anaerobik ve anaerobik-aerobik çıkış suyuna, alüminyum elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon prosesi uygulanmıştır. Elektrokoagülasyon prosesinde renk, KOİ ve TOK giderim verimine etki eden üç ana bağımsız parametre olan pH, akım yoğunluğu ve elektroliz süresini baz alınmış, cevap yüzey yöntemi kullanarak renk, KOİ ve TOK gideriminin optimizasyonu yapılmıştır. Çalışmanın amacı renk, KOİ ve TOK giderim verimlerini maksimuma çıkartmak ve EC prosesi işletme maliyetini minimuma indirmek olarak tanımlanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda optimum proses şartları anaerobik çıkış suyunda, pH 4, akım 50 A/m^2 , elektroliz süresi 22 dakika olarak ve optimum şartlar altında giderim verimleri renk için %82, KOİ için %41 ve TOK için %39 olarak tespit edilmiştir. Anaerobik-aerobik çıkış suyu için ise optimum proses şartları pH 5, akım 11 A/m^2 , elektroliz süresi 18 dakika olarak ve optimum şartlar altında giderim verimleri renk için %77, KOİ için %36 ve TOK için %32 olarak belirlenmiştir. Anaerobik ve anaerobik-aerobik çıkış suyu işletme maliyetleri, optimum şartlarda sırasıyla 0.418 €/m^3 ve $0,076 \text{ €/m}^3$ olarak hesaplanmıştır. Elektrokoagülasyon gibi bir ileri arıtma yönteminin maya endüstrisi atıksularının arıtımında avantajlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Chavalparit ve Ongwande tarafından [41] yapılan çalışmada ester değişimi metoduyla küçük ölçekli biyodizel üretimi yapan bir tesisin yüksek seviyelerde KOİ, yağ ve gres içeren atıksularını, alüminyum anot ve grafit katot kullanılarak elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtımı gerçekleştirilmiştir. Proses değişkenleri pH, uygulanan voltaj ve

reaksiyon süresi olarak belirlenmiş, cevap yüzey yönteminde, işletme şartlarını optimize etmek için Box-Behnken dizayn metodu kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda, pH 6,06 uygulanan voltaj 18,2 V ve reaksiyon süresinin 23,5 dakika olduğu optimum şartlarda giderim verimleri KOİ için %55,43, yağ ve gres için %98,42 ve AKM için %96,5 olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda cevap yüzey metodunun çok faktörlü işletilen EC proseslerinde optimizasyon için etkin olarak uygulanabildiği sonucuna varılmıştır.

Prasad vd. tarafından [42] yapılan çalışmada içki fabrikası atıksuyunda, demir anot ve çelik katot kullanarak elektrokoagülasyon arıtma yöntemiyle renk giderimi araştırılmıştır. Elektrokoagülasyon prosesinde renk giderimi üzerine etki eden üç farklı bağımsız değişken olan akım yoğunluğu, seyreltme oranı ve elektroliz süresini belirlenmiş, cevap yüzey yöntemlerinden biri olan Box-Behnken dizayn metodu kullanılmıştır. Çalışmalar pH 7'de gerçekleştirilmiş, optimum proses şartları akım yoğunluğu 31 mA/cm², seyreltme oranı %17,53 ve elektroliz süresi 4 saat olarak tesbit edilmiştir. Optimum şartlar altında model yardımıyla hesaplanan renk giderim verimi %95, elde edilen renk giderim verimi %93,5 olup olarak belirlenmiş, deneysel olarak elde edilen değerin model ile tahmin edilen değere yakın olduğu sonucuna varılmıştır.

Kobyay vd. tarafından [43] otomotiv sektörü için metal parçaları imalatı yapılan yerel bir imalat firmasının metal kesme atıksuyunun elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılması ve proses optimizasyonu üzerine yapılan çalışmada demir ve alüminyum elektrotlar kullanılmış, KOİ, TOK ve bulanıklık giderim verimine etki eden bağımsız değişkenler akım yoğunluğu, pH ve elektroliz süresi olarak belirlenmiş ve cevap yüzey yöntemi kullanılarak optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Demir ve alüminyum elektrotlar için 17 ayrı deney setiyle yapılan çalışmalar sonucunda, RSM optimizasyonu ile KOİ, TOK ve bulanıklık için optimum EC şartlarında maksimum giderim verimleri bulunmuştur. Optimum şartlar demir elektrot kullanıldığında, pH 7,03, akım yoğunluğu 66,39 A/m² ve elektroliz süresi 20,6 dakika olarak tesbit edilmiş, optimum şartlar altında giderim verimleri KOİ için %88,43, TOK için %79,1 ve bulanıklık için %99,8 olarak belirlenmiştir. Alüminyum elektrotlar kullanıldığında ise optimum şartlar olan pH 5,01, akım yoğunluğu 62,67 A/m² ve elektroliz süresi 24,39 dakika değerlerinde giderim verimleri KOİ için % 90,11, TOK için %81,3 ve bulanıklık için %99,9 olarak belirlenmiştir. Optimize şartlarda deneysel çalışmalar ile elde edilen giderim

verimleri demir elektrotlar kullanılarak KOİ için %93, TOK için %83 ve bulanıklık için %99,8, alüminyum elektrotlar kullanılarak KOİ için %93,5, TOK için %85,2 ve bulanıklık için %99,9 olarak bulunmuştur. Minimal işletme maliyetleri demir elektrotlar kullanıldığında 0,371 €/m³, alüminyum elektrotlar kullanıldığında 0,337 €/m³ olarak hesaplanmıştır. Bu cevapların RSM kullanılarak tahmin edilen cevaplar ile yakın olduğunu belirlenmiştir. Her iki elektrot için işletme maliyeti minimal düzeyde tutulduğunda, RSM ile işletme şartlarının optimizasyonu maksimum KOİ, TOK ve bulanıklık giderim verimi için uygulanabilir önemli bir metot olduğu sonucuna varılmıştır.

Ölmez tarafından [44] yapılan çalışmada, metal kaplama endüstrisinde krom kaplama prosesini takiben durulama tankından alınan atıksu örneğinde, paslanmaz çelik elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon yöntemiyle Cr(VI) giderimi ve RSM ile optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Cevap yüzey yöntemi olan merkezi kompozit dizayn metodu ile EC prosesinde Cr(VI) giderimine etki eden üç bağımsız değişken uygulanan elektrik akımı, elektrolit (NaCl) konsantrasyonu ve elektroliz süresi olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan 1470 mg/l gibi yüksek değerlerde Cr(VI) konsantrasyonu içeren metal kaplama endüstrisi atıksuyundan, %100 Cr(VI) giderim verimi için optimum şartlar, uygulanan elektrik akımı 7.4 A elektrolit konsantrasyonu 33,6 mM ve elektroliz süresi 70 dk olarak belirlenmiştir. Varyans analizi sonucunda, regresyon katsayısının 0,875 gibi yüksek değerleri gösterdiği belirtilmiştir. Sonuç olarak, Cr(VI) giderimi için elektrokoagülasyon işletme şartlarının optimizasyonu, cevap yüzey yönteminin uygulanabilir bir metot olduğunu ortaya çıkarmıştır.

Quinones vd. tarafından [45] yapılan çalışmada elektrolit kaplama yapan bir fabrikanın galvaniz prosesi bazlı yan ürünlerinin toplandığı durulama tankı atıksu örneğiyle, demir elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon yöntemiyle inorganik kirletici giderimi ve sistem optimizasyonu araştırılmıştır. Cevap yüzey yöntemi olan merkezi kompozit dizayn metodu kullanılan çalışmada 4 bağımsız değişken olarak elektroliz süresi, karıştırma hızı, akım yoğunluğu ve pH seçilmiştir. Demir elektrotlarla 28 ayrı deney setiyle yapılan çalışmalar sonucunda, metaller ve fiziko-kimyasal parametreler için tahmin edilen tüm ikinci dereceden modeller %95 güvenilirlik seviyesinde ANOVA yazılımı ile doğrulanmıştır. Reaktör optimum performansının 35 dakika reaksiyon

süresi, 175 rpm karıştırma hızı, 97,7 A/m² akım yoğunluğu ve 6,5 pH değerinde sağlandığı tespit edilmiştir. Optimum şartlar altında, %100 renk ve bulanıklık, %90 KOİ ve AKM, %100 krom ve nikel, %99 çinko ve bakır giderimi elde edilmiştir. Yaptıkları bu çalışmalar sonucunda, ağır metal çözeltilerinin EC ile arıtılması, konvansiyonel sistemlerden daha uygun maliyetli olduğunu kanıtlamış ve EC metodunun endüstriyel uygulamalar için umut verici bir alternatif olduğunu göstermiştir.

Mondal vd. tarafından [46] yapılan çalışmada, yerel bir tekstil fabrikasından alınan boya banyosu atıksuyunun, paslanmaz çelik elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılması ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. EC prosesinde KOİ, renk giderimi ve enerji tüketimi üzerine etki eden 4 bağımsız değişken olarak pH, akım yoğunluğu, elektrotlar arası mesafe ve elektroliz süresi belirlenmiş, cevap yüzey yöntemi olan merkezi kompozit dizayn metoduyla optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Elektrokoagülasyon prosesinde 30 farklı deney setiyle yapılan çalışmalar sonucunda, optimum şartlar pH 7,2, akım yoğunluğu 15,34 mA/cm², elektrotlar arası mesafe 1.5 cm ve elektroliz süresi 90 dakika olarak belirlenmiştir. Bu şartlar altında maksimum KOİ ve renk giderim verimlerini sırasıyla, %91,7 ve %99,8 olarak, minimum enerji tüketimi ise KOİ giderimi için 7,71 kWh/kg KOİ giderimi olarak elde edilmiştir. Çalışma sonucunda EC prosesinin, boya banyosu atıksularının arıtılması için uygulanabilir ve ucuz bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

Zodi vd. tarafından [47] yapılan çalışmada tekstil endüstrisi atıksu örneğinin, elektrokoagülasyon ve çökeltme prosesinin birlikte olduğu bir sistemde arıtılması ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Cevap yüzey yöntemi olan Box-Behnken dizayn metoduyla belirlenen akım yoğunluğu, pH ve elektrokoagülasyon süresi bağımsız değişkenlerinin, KOİ, TKM, bulanıklık ve çamur çökeltme hızı gibi cevaplara etkisi araştırılmıştır. EC prosesinde yapılan 15 farklı deney seti çalışması sonucunda, regresyon katsayısı (R²) 0.89'dan yüksek olarak tesbit edilmiş ve ikinci dereceden modellerle deneysel verilerin uyum içinde olduğu belirlenmiştir. Optimum şartlar, akım yoğunluğu 80 A/m², pH 7 ve elektrokoagülasyon süresi 70 dakika olarak elde edilmiştir. Bu şartlar altında giderim verimleri, KOİ için %70, TKM için %50 ve bulanıklık için % 90 olarak hesaplanmıştır. RSM optimizasyonunun KOİ, TKM ve bulanıklığın azaltılmasında endüstriyel atıksular için uygulanabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Çizelge 4. 1 Gerçek atıksularda uygulanan elektrokoagülasyon prosesinin optimizasyonu için RSM uygulamaları ve giderim verimleri

Atıksu Tipi	Aritma Tekniği	Elektrot Tipi	Bağımsız Değişkenler	Cevaplar	Optimum Giderim Verimleri	Referanslar
Ekmek Mayası Atıksuyu	Elektrokoagülasyon	Alüminyum	İlk pH, Akım Yoğunluğu, İşletme Süresi	Renk, KOİ , TOK giderimi, İşletme Maliyeti	Anaerobik çıkış suyu için ; Renk: %82 KOİ: %41 TOK: %39 Anaerobik-Aerobik çıkış suyu için ; Renk : %77 KOİ : %36 TOK: %32	[40]
Biyodizel Atıksuyu	Elektrokoagülasyon	Alüminyum(Anot) Grafit (Katot)	İlk pH, Uygulanan Voltaj, Reaksiyon Süresi	KOİ, yağ ve gres , AKM giderimi	KOİ: %55,43 Yağ ve Gres : %98,42 AKM: %96,5	[41]
İçki Fabrikası Atıksuyu	Elektrokoagülasyon	Demir(Anot) Çelik(Katot)	Akım Yoğunluğu, Seyreltme, Elektroliz Süresi	Renk giderimi	Renk: %95	[42]
Metal Kesme Atıksuyu	Elektrokoagülasyon	Demir ve Alüminyum	Akım Yoğunluğu, İlk pH, İşletme Süresi	KOİ, TOK, Bulanıklık giderimi, İşletme Maliyeti	Demir elektrot için; KOİ: %88,43 TOK: %79,1 Bulanıklık: %99,8 Alüminyum elektrot için; KOİ: %90,11 TOK: %81,3 Bulanıklık : %99,9	[43]
Metal Kaplama Endüstrisi Atıksuyu	Elektrokoagülasyon	Çelik	Elektrik Akımı, Elektrolit(NaCl) Konsantrasyonu, İşletme Süresi	Cr(VI) giderimi	Cr (VI) : %100	[44]
Metal Kaplama Endüstrisi Atıksuyu	Elektrokoagülasyon	Demir	Reaksiyon Süresi, Karıştırma Hızı, Akım Yoğunluğu, İlk pH	KOİ, Bulanıklık, Renk, TAKM ve Cr, Ni, Zn, Cu giderimi	KOİ : %90 Bulanıklık ve Renk: %100 TAKM : %100 Cr ve Ni : %100 Zn ve Cu : %99	[45]
Tekstil Endüstrisi Boya Banyosu Atıksuyu	Elektrokoagülasyon	Çelik	İlk pH, Akım Yoğunluğu, Elektrotlar arası mesafe, İşletme Süresi	KOİ, Renk giderimi, Enerji Tüketimi	KOİ : %91,7 Renk : %99,8	[46]
Tekstil Endüstrisi ağırlıklı Endüstriyel Atıksu Karışımı	Elektrokoagülasyon ve Çökeltme	Alüminyum	Akım Yoğunluğu, İlk pH, İşletme Süresi	KOİ, TKM, Bulanıklık giderimi, Çamur çökeltme hızı	KOİ : %70 TKM: %50 Bulanıklık: %90	[47]

4.2 Sentetik Atıksular ile Yapılan Çalışmalar

Tir ve Mostefa tarafından [48] yapılan çalışmada sentetik atıksu çözeltisinden alüminyum anot ve çelik katot kullanarak elektrokoagülasyon metoduyla yağ giderimi optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. EC prosesinde KOİ ve bulanıklık giderimine etki eden bağımsız değişkenler, akım yoğunluğu, pH, işletme süresi olup cevap yüzey yöntemi optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. 16 ayrı deney setiyle yapılan çalışmalar sonucunda, akım yoğunluğu 25 mA/cm^2 , pH 7 ve işletme süresi 22 dakika olan optimum şartlar altında, giderim verimleri KOİ için %89,63 ve bulanıklık için %99 olarak belirlenmiştir. Varyans analizi sonucunda, ikinci dereceden regresyon modelleriyle deneysel verilerin uyum içinde olduğu belirlenmiştir.

Kushwaha vd. tarafından [49] yapılan çalışmada 1 litre saf suya 4 g süt tozu karıştırarak oluşturulan süt atıksuyu örneğinde, demir elektrotlar kullanarak elektrokoagülasyon metoduyla arıtım prosesi uygulanmıştır. Cevap yüzey yöntemi olan merkezi kompozit dizayn metodu yardımıyla belirlenen ana bağımsız değişkenlerin (akım yoğunluğu, sodyum klorür (NaCl) dozajı, elektroliz süresi, ve pH) KOİ, TKM, Toplam Azot ve bulanıklık gibi cevaplara etkileri araştırılmıştır. Çalışma sonucunda optimum şartlar, akım yoğunluğu 270 A/m^2 , elektroliz süresi 50 dakika, pH 7 ve NaCl dozajı sıfır olarak belirlenmiştir. Bu şartlar altında giderim verimleri, KOİ %70, TKM %48,2, Toplam Azot %92,75 ve bulanıklık %99,8 olmaktadır. Elektrik ve elektrot tüketim maliyetleri 1 m^3 suda KOİ giderimi için optimum şartlarda, 0,072-2,55 \$ aralığında belirlenmiştir. Yapılan çalışmada, süt atıksuyunun arıtılmasında demir elektrot kullanarak uygulanan EC prosesinde RSM uygulamaları, uygulanabilir ve başarılı sonuçlar ortaya koymuştur.

Bhatti vd. tarafından [50] yapılan çalışmada laboratuvar ortamında potasyum dikromat ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) ve deiyonize su ile oluşturdukları 100 mg/l Cr(VI) çözeltisinde, alüminyum elektrotlar kullanarak elektrokoagülasyon yöntemiyle Cr(VI) giderimi ve optimizasyonu araştırılmıştır. Cevap yüzey yöntemi olan merkezi kompozit dizayn metodu ile EC prosesinde, Cr (VI) giderimi ve enerji tüketimine etki eden pH, voltaj ve arıtma süresi gibi bağımsız değişkenler belirlenip optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Elektrokoagülasyon prosesinde 20 deney setiyle yapılan çalışmalar sonucunda, maksimum Cr(VI) giderim verimi için optimum proses şartları pH 5, voltaj 24 V ve

elektroliz süresi 24 dakika olarak belirlenmiş, optimum şartlar altında Cr(VI) giderim verimi %90,4 ve enerji tüketimi 137,2 KWh/m³ olarak tesbit edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, EC prosesinin optimizasyonunda kullanılan cevap yüzey yönteminin, Cr(VI) giderimi ve enerji tüketimi üzerinde etkili sonuçları olduğunu belirlenmiştir.

Bhatti vd. tarafından [51] yapılan çalışmada sentetik olarak hazırlanan çözeltilerden alüminyum elektrotlar kullanılarak EC prosesiyle Cr(VI) giderim ve optimizasyonu araştırılmıştır. Cevap yüzey yöntemi olan merkezi kompozit dizayn metodu ile 2 bağımsız değişken voltaj ve arıtma süresi olarak belirlenmiştir. Bu bağımsız değişkenler Cr(VI) giderimi ve enerji tüketimi cevaplarına etki etmektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda, maksimum Cr(VI) giderim verimi, 12,8 V ve 19.2 dakika arıtma süresi şartlarında, %51,9 olarak bulunmuştur. Bu şartlarda enerji tüketimi 23 KWh/m³ olarak hesaplanmıştır. Optimum işletme şartları olarak belirlenen 11V ve 18.6 dakika arıtma süresinde, Cr(VI) giderim verimi %50 ve enerji tüketimi 15,46 KWh/m³ olarak hesaplanmıştır. Varyans analizi sonucunda, Cr(VI) giderimi için regresyon katsayısı $R^2 = 0,975$ ve enerji tüketimi için $R^2 = 0,990$ gibi yüksek değerleri göstermektedir.

Zaroual vd. tarafından [52] yapılan çalışmada sentetik çözeltilerden, alüminyum elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon prosesiyle Cr(III) giderimi ve proses optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Elektrokoagülasyon prosesinde giderim verimi, bakiye alüminyum ve enerji tüketimine etki eden, 4 bağımsız değişken olarak pH, voltaj, işletme süresi ve sıcaklığı dikkate alınmış, cevap yüzey yöntemi olan merkezi kompozit dizayn metoduyla optimizasyon çalışmalarını yapılmıştır. EC prosesinde 31 deney setiyle yapılan çalışmalar sonucunda optimum işletme şartları, pH 4,23, voltaj 9,14 V, işletme süresi 10 dakika ve sıcaklık 27,5 °C olarak belirlenmiştir. Bu şartlar altında Cr(III) giderim verimi %91, enerji tüketimi 3,536 KWh/m³ ve bakiye alüminyum %0,57 olarak hesaplanmıştır. RSM ile yapılan EC prosesi optimizasyonunun, maksimum Cr(III) giderimi için en iyi işletme şartlarının belirlenmesi adına doğru ve uygun sonuçları gösterdiğini belirlenmiştir.

Araştırmacıların son yıllarda yaptıkları çalışmalarda, ileri arıtma yöntemlerinde arıtma verimine ve maliyet analizine etki eden faktörleri dikkate alarak, daha az deney sayısı ile en uygun işletme şartlarının RSM optimizasyonu ile belirlenmesinin gitgide arttığı

görülmektedir. Farklı özellikli atıksuların arıtılmasında uygulanan elektrokoagülasyon prosesinin RSM ile optimizasyonu, olumlu sonuçları ortaya çıkarmıştır. Sonuç olarak, cevap yüzey yönteminin uygulanabilirliği ileri arıtma yöntemi olan elektrokoagülasyon prosesinde pozitif etki yaratmıştır (Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2).

Çizelge 4. 2 Sentetik atıksularda uygulanan elektrokoagülasyon prosesinin optimizasyonu için RSM uygulamaları ve giderim verimleri

Atıksu Tipi	Aritma Tekniği	Elektrot Tipi	Bağımsız Değişkenler	Cevaplar	Optimum Giderim Verimleri	Referanslar
Yağlı Atıksu Çözeltileri	Elektrokoagülasyon	Alüminyum(Anot) Çelik(Katot)	İlk pH, Akım Yoğunluğu, İşletme Süresi	KOİ ve Bulanıklık giderimi	KOİ: %89,63 Bulanıklık: %99	[48]
Yapay Süt Atıksuyu	Elektrokoagülasyon	Demir	İlk pH, Akım Yoğunluğu, NaCl dozajı, Elektroliz Süresi	KOİ, TKM, Toplam Azot ve Bulanıklık giderimi	KOİ: %70 TKM: %48,2 Toplam Azot: %92,75 Bulanıklık: %99,8	[49]
Cr(VI) Çözeltileri İçeren Yapay Atıksu	Elektrokoagülasyon	Alüminyum	İlk pH, Voltaj, Aritma Süresi	Cr(VI) giderimi, Enerji Tüketimi	Cr(VI): %49,6	[50]
Cr(VI) Çözeltileri İçeren Yapay Atıksu	Elektrokoagülasyon	Alüminyum	Voltaj, Aritma Süresi	Cr(VI) giderimi, Enerji Tüketimi	Cr(VI): %50	[51]
Krom Çözeltileri İçeren Yapay Atıksu	Elektrokoagülasyon	Alüminyum	pH, İşletme Süresi, Voltaj, Sıcaklık	Cr(III) giderimi, Bakiye Alüminyum, Enerji Tüketimi	Cr (III) : %91	[52]

MATERYAL VE METOT**5.1 Atıksu Karakterizasyonu**

Bu çalışmada, İstanbul'da bulunan bir süt işleme endüstrisinin çıkış suyundan alınan gerçek atıksu kullanılmıştır. Atıksu örneği 4 °C sıcaklıkta muhafaza edilmiştir. Çizelge 5.1'de kullanılan süt endüstrisi atıksuyunun karakterizasyonu verilmiştir. Karakterizasyon kapsamında yapılan analizler APHA tarafından önerilen Standart Metod'lara göre gerçekleştirilmiştir [53].

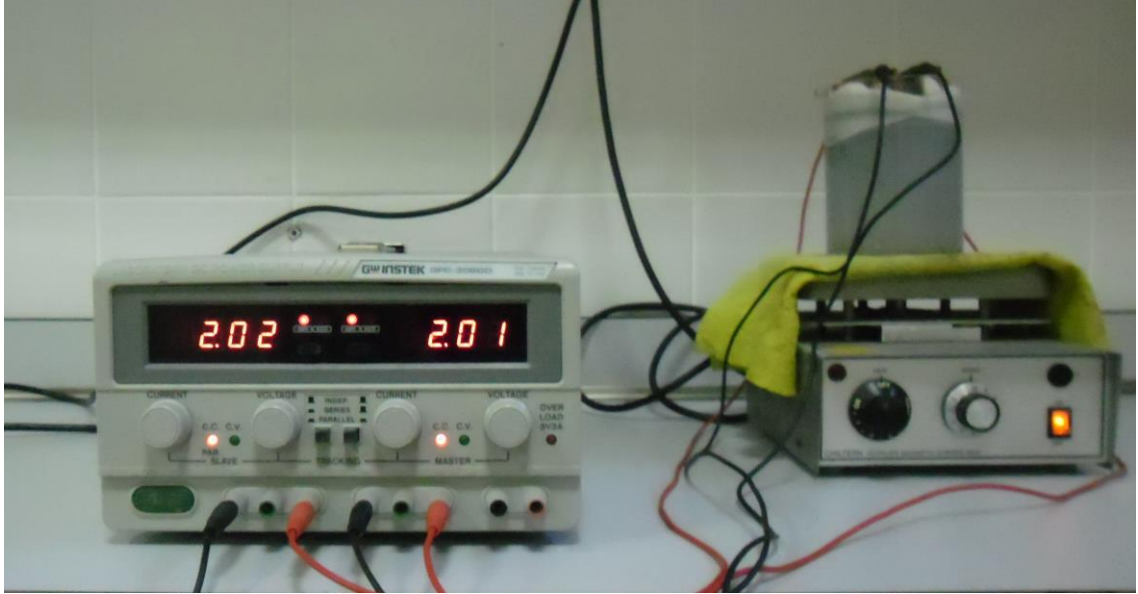
Çizelge 5. 1 Süt ve süt ürünleri endüstrisi atıksu karakterizasyonu

Parametre	Aralık	Ortalama Değer
pH	6.78-7.07	6.9
KOİ, mg/L	783-792	788
TAKM, mg/L	91-98	94
Bulanıklık, NTU	465-481	473
Klorür, mg/L	76-81	79
Ortofosfat, mg/L	6.87-7.01	6.91
Renk, Pt/Co	429-441	436
İletkenlik, mS/cm	2.07-2.09	2.08

5.2 Deneysel Düzeneğin Kurulumu ve İşletilmesi

Laboratuvar ölçekli bir pleksiglas EC reaktörü, 9 cm çapında ve 13 cm yüksekliğindeki boyutlarda dizayn edilmiştir. Elektrot setleri (iki anot ve iki katot elektrot) 4 tek kutuplu (MP) paralel alüminyum ve demir plakalardan (6 cm en x 11,5 cm yükseklik ve 0,1 cm

kalınlık) oluşmakta ve her bir plaka 46 cm² efektif alan kaplamaktadır. Elektrotlar birbirlerine 1.5 cm aralıklarla yerleştirilmiştir. Her bir test içi 600 ml atıksu örneği kullanılmış, atıksu içeriğindeki klorür konsantrasyonundan dolayı elektrolit çözeltisi kullanılmamıştır. Her bir deney setinden önce, elektrotlar aseton ile yıkanmış, alüminyum ve demir elektrotların yüzeyindeki kirlilikler 100 cm³ HCl çözeltisi(%35) ile 200 cm³ heksametilentetraamin sulu çözeltisinin (%2,80) karıştırılmasıyla hazırlanan çözeltiliye 5 dk maruz bırakılmak suretiyle giderilmiştir. Elektrokoagülasyon deneyleri, pH 5-9, süre 5-45 dakika ve güç kaynağı tarafından sağlanan 25-65 A/m² akım yoğunluğu aralığında gerçekleştirilmiştir. Her bir deney aşamasından sonra çökelmeye bırakılan numunelerin çökeltme süresi sonunda üst fazından numune alınarak analizler yapılmıştır. EC prosesi sırasında oluşan çamurların karakterizasyonu FTIR spektrometresi (SCHIMADZU 8900) yardımıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. 1 Deney düzeneği

5.3 Cevap Yüzey Yöntemi

Optimizasyon, prosenin belirlenen hedefler (cevaplar) doğrultusunda, bağımsız değişkenlerin birbirleriyle olan etkileşimleri ve bu bağımsız değişkenlerin hedefe (cevaba) olan etkileri göz önünde bulundurularak uygulanmasıdır. Optimizasyon, genel olarak hedef fonksiyonu adı verilen önceden tanımlanmış kriterleri maksimize veya

minimize etmek için karar (bağımsız) değişkenleri olarak tanımlanan, belirlenen koşulların değiştirilmesi işlemidir. Deneme setlerinden türetilen basit ampirik modellerin kullanıldığı cevap yüzey yöntemi, son yıllarda yaygın olarak kullanılan bir optimizasyon tekniğidir [54].

Geleneksel deney tasarım yöntemlerinde her bir parametrenin sistem performansı üzerine etkisi araştırılırken diğer bütün parametreler sabit tutulur. Aynı anda sistem performansına etki eden tüm değişkenlerin farklı seviyelerinin etkisinin incelenmesi mümkün değildir. Deney sayısının azaltılması, kaynakların verimli kullanılması, zamandan ve maliyetten tasarruf, en önemlisi araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin hızlandırılması için deneysel tasarımın yapılması zorunluluktur [31].

5.3.1 Cevap Yüzey Yöntemi Esasları

Cevap yüzey yöntemi, yanıt yüzeyi y ile X_1, X_2, \dots, X_k şeklinde gösterilen bir grup değişken arasında yeterli bir fonksiyonel ilişki geliştirmek için matematiksel ve istatistiksel tekniklerin birlikte kullanıldığı bir yöntem olarak tanımlanmıştır. Deneysel planlama dahilinde, prosese etki eden faktörler için ön deneyler yapılarak sınırlar araştırılır, sınırlar belirlendikten sonra programın ön gördüğü düzende deneysel çalışmalar tamamlanır ve program yardımıyla değerlendirilerek prosesin optimum koşulları ortaya konur [31].

Cevap yüzey yöntemi, ilk olarak Box ve Wilson tarafından 1951 yılında tanımlanmış ve geliştirilmiştir. Bu araştırmacıların oluşturduğu yaklaşımlar, mühendislerin, bilimci ve istatistikçilerin endüstriyel proseslerin geliştirilmesine bakış açılarının tamamıyla değişmesine neden olmuştur.

Cevap yüzey yöntemini uygulamalarında bir dizi istatistiksel ve matematiksel teknikler birbiri ardına uygulanmakta ve her bir aşamada elde edilen veriler bir sonraki aşamada kullanılmaktadır. İlk aşamada, bir takım fikirler öne sürülerek sistemi karakterize edebilecek performans ölçütleri ve bunlar üzerine etkili olabilecek faktörlerin ve değişkenlerin belirlenmesi gerekmektedir. Çoğu proseste bu faktörler oldukça fazladır. Bu nedenle bir takım ön denemeler yapılarak faktörlerin istatistiksel olarak en önemli birkaç tanesi seçilebilir. Bu denemeler "eleme" olarak adlandırılır ve araştırmanın

ilerleyen aşamalarında daha az deneme yapılarak maliyet ve zaman açısından önemli avantajlar elde edilmektedir.

Cevap yüzey yönteminin ikinci aşamasında amaç, bağımsız değişkenlerin deneme bölgesi içerisinde belirlenen seviyelerinin sistemin hedefinde oluşturdukları değer, optimum noktaya yakın sonuçları verip vermediğinin belirlenmesidir. Optimum noktaya yaklaştıkça oluşturulan cevap yüzeydeki eğrilik daha belirgin hale gelmektedir. Dolayısıyla, cevap yüzey yönteminin ikinci aşaması birinci dereceden modeller kullanılarak eğriliğin test edilmesini içermektedir. Birinci derece modeller sistemin yanıtını belirlemede yeterli olursa, seçilen deneme bölgesinin sistemin optimum performansından uzakta olduğu sonucuna varılır ve yeni deneme bölgesi seçilerek faktör ayarlamaları yapılır. Bu işlem cevap yüzeydeki eğriliğin önemli olduğu bölgeler tesbit edilinceye kadar devam eder. Üçüncü aşama, işlem optimum noktaya ulaşıldığında başlamaktadır. Bu noktada araştırmacı, optimum nokta çevresinde doğru ve hassas bir şekilde yanıt fonksiyonunu tahmin etmektedir. Gerçek cevap fonksiyonu, optimum nokta çevresinde önemli değişiklikler göstermektedir. Bu eğriliğin tahmin edilmesinde genellikle ikinci dereceden modeller kullanılır. Bu modelde eğriliğin tahmin edilmesinde bir önceki aşamada uygulanan deneysel dizayna ek olarak deneysel noktaların eklenmesi gerekmektedir. Uygun bir model elde edildiğinde, bu model optimum nokta araştırmasında kullanılır.

Ancak bazı durumlarda, araştırmacının bir takım fiziksel kısıtlamalar nedeniyle, dizayn değişkenlerinin belirli aralıklar içerisinde incelemesi gerekmektedir. Başka bir deyişle, deneme bölgesi ve işletme bölgesi aynıdır. Bu nedenle bölge taramasının yapılmasını gerektiren bir durum yoktur. Ayrıca, araştırmacı proses hakkında daha önceden detaylı bilgiye sahipse bahsedilen bu aşamalardan birkaçını kullanmayabilir. Bu sayede zaman ve maliyet açısından önemli kazançlar sağlanabilmektedir. Cevap yüzey yönteminin başlıca aşamaları, denemelerin dizayn edilmesi, model geliştirilmesi (regresyon analizi), varyans analizi (ANOVA) ve optimizasyondur [55]. Cevap modellerini oluşturmak için gerekli veriler, tam faktöriyel, kesirli faktöriyel veya merkezi kompozit tasarım gibi bir istatistiksel deney tasarımı yöntemi aracılığıyla elde edilir.

5.3.2 Cevap Yüzey Yöntemi Teorisi ve Deneysel Tasarım

Çalışma kapsamında süt endüstrisi atıksuyundan KOİ, AKM, ortofosfat, renk ve bulanıklık gideriminde elektrokoagülasyon prosesi optimizasyonu üç analitik adımda (ön çalışmalar yardımıyla faktör ve değişkenlerin belirlenmesi, varyans analizi ve cevap yüzey grafiklerinin çizimi, optimizasyonun uygun model çerçevesinde gerçekleştirilmesi) elde edilmiştir. Deneylein istatistiksel tasarımı ve veri analizleri için, Statgraphics Centurion XVI.I yazılımı kullanılmıştır. Bu çalışmada, cevap yüzey yöntemi olan 3 bağımsız değişkenli ve 5 farklı seviyeli full faktöriyel merkezi kompozit dizayn (CCD) modeli kullanılmış ve toplamda 20 deney seti ile çalışılmıştır. İşletme parametreleri; J:25-65 A/m², t: 5-45 dakika ve pH: 5-9 bağımsız değişken olarak, KOİ, renk, ortofosfat, AKM ve bulanıklık giderim oranları sistem cevapları(hedefleri) olarak belirlenmiştir. Çizelge 5.2’de bağımsız değişkenler ve seviyeleri, Çizelge 5.3’de ise deneysel tasarım matrisi verilmiştir.

Çizelge 5. 2 EC prosesi için deneysel dizayn matrisi değişkenlerinin kodlanmış ve gerçek değerleri

Faktörler	Orijinal faktör (X)	Faktör kodları				
		-2	-1	0	+1	+2
pH	X ₁	5	6	6,9	8	9
Akım yoğunluğu (A/m ²)	X ₂	25	35	45	55	65
Elektroliz süresi (dk)	X ₃	5	15	25	35	45

İstatistiksel hesaplamalar için, üç parametrenin (X₁ (pH), X₂ (J), X₃ (t)) seviyeleri (5.1)’de verilen eşitliğe bağlı olarak X_i şeklinde kodlanmıştır. Matematiksel modelin grafiksel bakış açısı cevap yüzey yöntemi teriminin oluşmasına yol açmıştır. Yanıtlar ve değişkenler arasındaki ilişki (5.1) eşitliğinde gösterilmektedir.

$$Y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \pm \varepsilon \quad (5.1)$$

Y gözlenebilen cevap değişkeni, f fonksiyon cevabı, $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ bağımsız değişkenleri, n bağımsız değişkenleri numarasını ve ε istatistiksel hatayı göstermektedir. Dizayn seçiminden sonra, model denklemi tanımlanabilir ve model denklemi katsayıları tahmin edilir olmaktadır.

Seçili bağımsız değişkenler denklem (5.2)'ye göre kodlanmaktadır.

$$Kod\ değeri = x_i = \frac{x_i - x_{avg}}{\Delta x} \quad (5.2)$$

Bu denklemde x_i , i'inci faktörde gerçek değeri, x_{avg} i'inci faktörde yüksek ve düşük değerlerin ortalamasını, Δx değişim değerini ifade etmektedir [56].

Sistemin cevabı, bağımsız değişkenin bir lineer fonksiyonu olarak izah edilebiliyorsa, birinci dereceden polinomial denklem model olarak kullanılabilir. Sistemin cevap yüzeyinde bir eğrilik varsa, ikinci dereceden polinomial denklemler kullanılmalıdır. Gerçek cevap yüzeyindeki eğriliği belirlemede birinci dereceden polinomial modeller yetersiz kalmaktadır [31].

Birçok durumda bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi açıklayan fonksiyon bilinmemektedir. Sistemi ifade edebilmek için genellikle birinci veya ikinci dereceden denklemler kullanılmaktadır.

Birinci dereceden model;

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (5.3)$$

İkinci dereceden model;

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^n b_{ij} X_i X_j + \beta \quad (5.4)$$

Burada, i ve j lineer ve ikinci dereceden katsayıları, b_0 sabit katsayıyı, b_i lineer katsayıyı, b_{ii} etkileşimli katsayıyı, b_{ij} ikinci dereceden katsayıyı ifade etmektedir. Her bir değişkenin giderim oranı üzerine bağımsız ve etkileşimli araştırılmaktadır. Denklem (5.4)'de üç bağımsız değişkenin kodlanmış değerleri nihai cevap olarak Y için düzenlenirse (5.5) eşıtliği elde edilmektedir.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 \quad (5.5)$$

Çizelge 5. 3 Fe ve Al elektrotlar kullanılarak süt endüstrisi atıksularının EC ile arıtılmasında full faktöriyel dizayn metodunun kullanılması

Deney No	İlk pH (X ₁)	Akım Yoğunluğu (X ₂)	Elektroliz Süresi (X ₃)	İlk pH (X ₁)	Akım Yoğunluğu (X ₂)	Elektroliz Süresi (X ₃)	Çamur hacmi mL		Çıkış pH	
							Fe elektrotlar	Al elektrotlar	Fe elektrotlar	Al elektrotlar
1	-1	-1	-1	6	35	15	23	130	9,57	7,22
2	1	-1	-1	8	35	15	10	38	11,2	9,08
3	-1	1	-1	6	55	15	86	195	9,58	7,75
4	1	1	-1	8	55	15	4,5	32	10,24	9,2
5	-1	-1	1	6	35	35	67	390	10,09	8,41
6	1	-1	1	8	35	35	10	150	11,79	9,5
7	-1	1	1	6	55	35	82	177	10,38	7,42
8	1	1	1	8	55	35	15	64	11,24	9,83
9	-2	0	0	5	45	25	115	320	8,99	7,72
10	2	0	0	9	45	25	12	56	11,53	9,87
11	0	-2	0	6,9	25	25	50	100	10,94	8,95
12	0	2	0	6,9	65	25	16	80	10,95	9,72
13	0	0	-2	6,9	45	5	13	36	9,62	7,38
14	0	0	2	6,9	45	45	38	120	10,77	9,24
15	0	0	0	6,9	45	25	23	82	10,71	9,52
16	0	0	0	6,9	45	25	17	265	10,62	9,2
17	0	0	0	6,9	45	25	12,5	190	10,44	9
18	0	0	0	6,9	45	25	12,5	191	10,44	8.9
19	0	0	0	6,9	45	25	12,5	192	10,44	9.1
20	0	0	0	6,9	45	25	12,5	190	10,44	9

ikinci dereceden modellerin cevap yüzey yönteminde yaygın olarak kullanılması aşağıdaki gibi tanımlanabilmektedir:

- Esnekliği nedeniyle çok çeşitli fonksiyonel formlar alabildiğinden gerçek yanıt fonksiyonunun tahmin edilebilmesinde kolaylık sağlar,
- Katsayı değerlerinin karmaşık hesaplamalar olmadan en küçük kareler yöntemi kullanılarak tahmin edilebilmesine imkan verir,
- Cevap yüzey yönteminin problem çözümünde başarıyla uygulanabildiğini gösteren çok sayıda deneysel çalışma mevcuttur,
- Optimum nokta, matematiksel olarak kolayca belirlenebilmektedir [31].

ikinci dereceden modelin matris formunda gösterildiği durumda çözmek çok daha kolaydır. Matris notasyonu ile ifade edilen denklem sistemi en küçük kareler yöntemi kullanılarak çözülmektedir. Bu yöntemde hatanın rastgele olduğu, hataların ortalamasının sifıra eşit olduğu ve birbirinden bağımsız olduğu varsayımı yapılmaktadır.

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (5.6)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Buradaki ε rastgele hatayı göstermektedir.

Deneylerin toplam sayısını hesaplamak için denklem (5.8)' den yararlanılmaktadır.

$$N = n^3 + 2n + n_c \quad (5.8)$$

Burada N, toplam deney sayısını, n ise çarpanların sayısını belirtmektedir [57].

5.3.3 Cevap Yüzey Yöntemi İstatistiksel Analizi

Cevap yüzey yönteminde çok çeşitli istatistiksel ve tanılama çalışmaları elde edilmektedir. Varyans analizi (ANOVA), sıralı F-testi, model uygunsuzluğu testi, yeterli tahminleme ve diğer uygunluk ölçümlerini içermektedir. Varyans analizi sonuçları, model uygunluğunu kontrol ederek raporlamaktadır.

Regresyon katsayısı (R^2) denklem (5.9)'de, düzeltilmiş regresyon katsayısı (R^2_{Adj}) denklem (5.10)'da, tahmin edilmiş çoklu belirleme katsayısı (R^2_{Pred}) denklem (5.11)'da gösterilmektedir. Cevap yüzeyi yöntemiyle oluşturulan polinomiyal modelin uygunluğu bu değerler kullanılarak test edilmektedir.

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{Residual}}{SS_{Model} + SS_{Residual}} \quad (5.9)$$

$$R^2_{Adj} = 1 - \frac{SS_{Residual}/DF_{Residual}}{(SS_{Model} + SS_{Residual})/(DF_{Model} + DF_{Residual})} \quad (5.10)$$

$$R^2_{Pred} = 1 - \frac{PRESS}{(SS_{Model} + SS_{Residual})} \quad (5.11)$$

Burada ifade edilen SS kareler toplamı, DF serbestlik derecesi, PRESS ise tahmin edilmiş kalıntı hata kareler toplamı olarak tanımlanmaktadır.

Kalıntı kareler toplamı (SS_E) denklem (5.12)'de ifade edilmektedir.

$$SS_E = SS_{PE} + SS_{LOF} \quad (5.12)$$

$$SS_{PE} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (5.13)$$

$$SS_{LOF} = \sum_{i=1}^m n_i (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5.14)$$

SS_{PE} safsızlık hatasından kaynaklanan kareler toplamını, SS_{LOF} model uygunsuzluğundan kaynaklanan kareler toplamını ifade etmektedir.

Tahmin edilmiş kalıntı hata kareler toplamı denklem (5.15)'de gösterilmektedir.

$$PRESS = \sum_{i=1}^n e_{(i)}^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - \hat{y}_{(i)}]^2 \quad (5.15)$$

Yeterli tahminleme (AP) değerinin hesaplanması işaret gürültü oranına göre denklem (5.16), (5.17)'de belirtilmiştir.

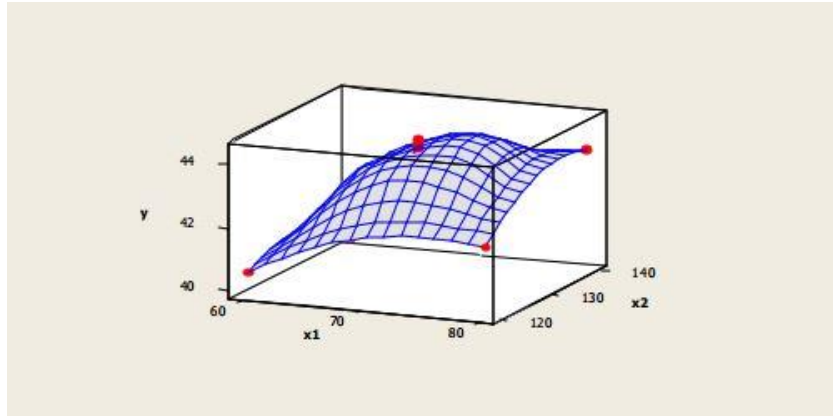
$$AP = \frac{\max(\hat{Y}) - \min(\hat{Y})}{\sqrt{\bar{V}(\hat{Y})}} \quad (5.16)$$

$$\bar{V}(\hat{Y}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V(\hat{Y}) = \frac{p \sigma^2}{n} \quad (5.17)$$

Burada p değeri, model parametrelerinin sayısını, σ^2 kalıntı ortalama kareyi ve n deneylerin numarasını göstermektedir [57]. Bir polinomun doğruluğu istatistiksel analizlerle test edildikten sonra bilgisayar programı kullanılarak cevap yüzeyi ve kontur grafikleri çizilir.

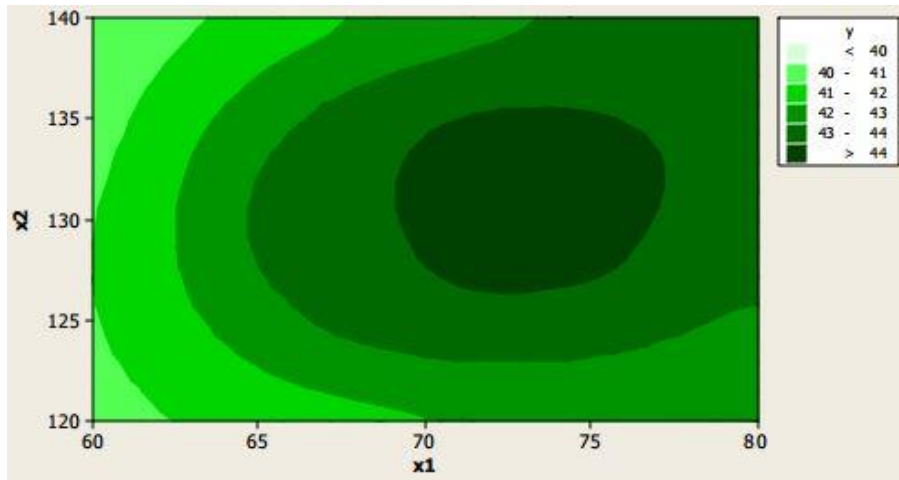
$$y = f(X_1, X_2) + \varepsilon \quad (5.18)$$

Denklem (5.18)'de X_1 ve X_2 'nin her değeri y 'yi oluşturmaktadır. Şekil 5.2'de verilen bu üç boyutlu grafik, cevap yüzeyi grafiği olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 5. 2 X_1 ve X_2 'nin y 'ye etkisinin cevap yüzey grafiği [58]

Cevap yüzeyi grafiğini iki boyutlu grafik olarak göstermek daha az karmaşık olabilmektedir. Şekil 5.3'de kontur grafiği örneği gösterilmektedir.



Şekil 5. 3 Kontur Grafiği [58]

Geliştirilen modellerin yeterliliği varyans analizi (ANOVA) tekniğiyle kontrol edilmiştir. Elektrokoagülasyon prosesi verimi üzerinde anlamlı değişkenlerin etkileşimli ve bağımsız etkileri değerlendirilmektedir. Uygun polinomial modellerin uygunluğu R^2 ile ifade edilmekte ve istatistiksel önemi Fisher F-test tarafından kontrol edilmektedir. Model terimleri p-değeri ve F-değeri ile hesaplanmıştır.

5.3.4 Merkezi Kompozit Dizayn

Box ve Wilson (1951), 3^k faktöriyel tasarımlara ek olarak merkezi kompozit dizaynı (CCD) önermiştir. Önemli istatistiksel özelliklere (dönersellik ve ortogonallik) sahip merkezi kompozit dizayn, ikinci dereceden bir cevap yüzeyi modelinin oluşturulması için en popüler yöntemlerden biridir.

Merkezi kompozit dizayn üç kısımdan oluşmaktadır:

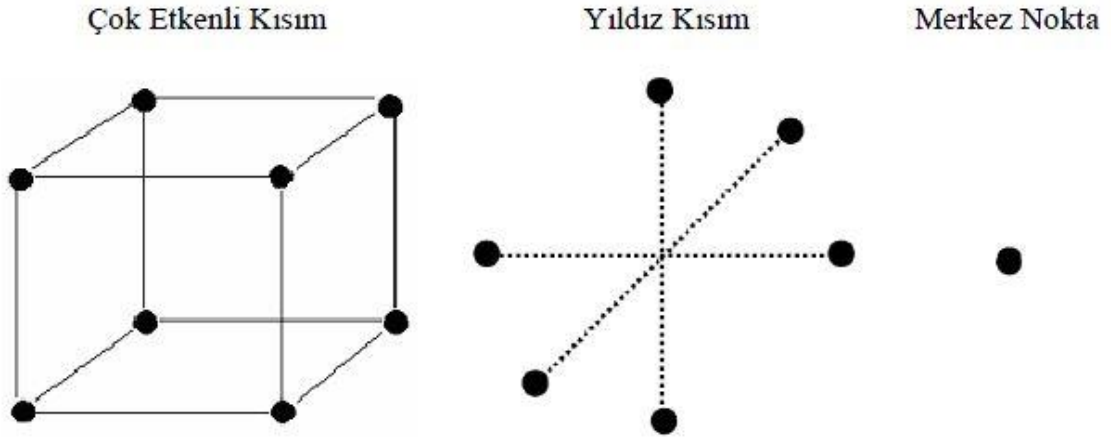
- k faktör sayısı olmak üzere 2^k faktöriyel veya 2^{k-m} kesirli faktöriyel tasarımıdır. Burada faktör seviyeleri -1, +1 değerleri ile kodlanır. Buna tasarımın faktöriyel parçası denir.
- n_0 adet merkez noktası ($n_0 \geq 1$) mevcuttur.
- Her bir tasarım değişkeninin eksenini üzerinde, tasarım merkezine uzaklığı α olan iki yıldız (veya eksen) noktasıdır. Bu kısım ise eksen parçası veya yıldız parçası olarak adlandırılır.

Burada toplam tasarım noktası sayısı $N = 2^k + 2k + n_0$ olur. Oluşturulacak olan ikinci dereceden modelin ana etkileri ve birinci dereceden etkileşim etkileri $2k$ denemesinden elde edilirken, merkez noktalar yardımıyla sistemin eğriselliği test edilir. Şekil 5.4' de merkezi kompozit dizayn kısımları verilmiştir [59].

Merkezi karmaşık dizayn yöntemiyle;

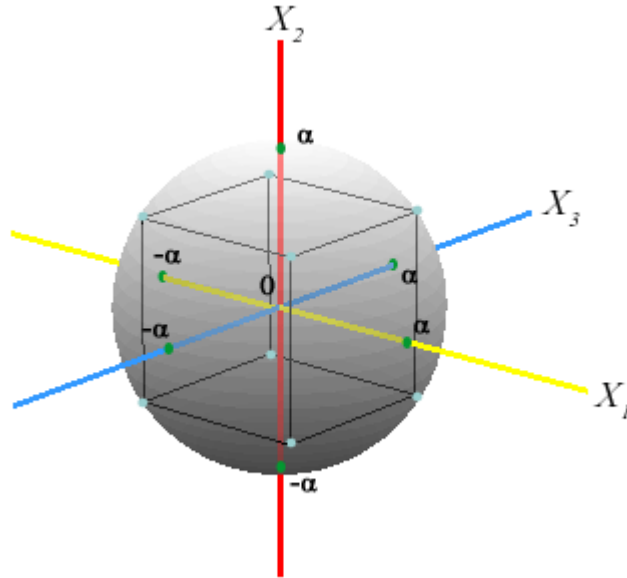
- Faktörlerin doğrusal etkisi incelenebilir.
- Faktörlerin parabolik etkileri ve faktörler arasındaki etkileşim ve karesel ilişki incelenebilir.
- Optimum koşullar bulunabilir.

- Deneysel hata olup olmadığı kontrol edilebilir [60].



Şekil 5. 4 Merkezi kompozit dizayn kısımları [59]

Merkezi kompozit dizayn yöntemi, ağır metal giderimi, renk giderimi, elektrokoagülasyon ve etanol üretimini gibi farklı mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır [56]. Şekil 5.5’de üç değişkenli merkezi kompozit dizayn analitik düzlemde gösterilmektedir.



Şekil 5. 5 Üç değişkenli merkezi kompozit dizaynın analitik düzlemde gösterimi [60].

5.3.5 Cevap Yüzey Yöntemi Avantajları ve Dezavantajları

Cevap yüzey yönteminin klasik deneysel ya da optimizasyon metotlarıyla karşılaştırıldığında avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

Cevap yüzey yönteminin avantajları;

- Daha az deney ile daha fazla bilgi elde edilmesi,
- Bağımsız değişkenlerin etkilerini birlikte inceleme imkanı oluşturması,
- Sistemin matematiksel bir model ile tanımlanması, böylece bağımlı değişken ve bağımsız değişken arasındaki ilişkinin bu model ile ifade edilebilmesidir.

Cevap yüzey yönteminin dezavantajları ise;

- Elde edilen biyokimyasal süreçler gibi doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesinde başarılı olamaması,
- Hiperbolik ya da çan eğrisi şeklinde simetrik olmayan fonksiyonlar ile modellenememesidir [61], [62].

BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER**6.1 Demir Elektrotlar Kullanılan EC Prosesinin İşletme Parametrelerinin İstatistiksel Analizi ve Optimizasyonu**

İkinci dereceden polinomial cevap yüzey modeli, CCD ile elde edilen deney sonuçlarının tahmin edilen değerlerle uyumunu analiz etmek için uygulanmıştır. Demir elektrot kullanılarak uygulanan EC prosesi ile süt endüstrisi atıksuyundan KOİ, renk ortofosfat, AKM ve bulanıklık giderimini ifade etmek için; Çizelge 5.3'te verilen deneysel sonuçlar baz alınarak oluşturulan kodlanmış değişkenlerin yer aldığı regresyon denklemleri aşağıdaki verilmiştir.

$$\text{KOİ giderimi, \%} = 129,24 - 12,536 * X_1 + 0,5577 * X_2 - 0,8190 * X_3 + 1,7419 * X_1^2 - 0,3127 * X_1 X_2 - 0,0272 * X_1 X_3 + 0,0153 * X_2^2 + 0,0006 * X_2 X_3 + 0,0123 * X_3^2 \quad (6.1)$$

$$\text{Renk giderimi, \%} = -114,91 + 59,866 * X_1 + 0,2259 * X_2 - 0,3015 * X_3 - 3,8644 * X_1^2 - 0,0799 * X_1 X_2 - 0,0105 * X_1 X_3 - 0,0043 * X_2^2 + 0,0233 * X_2 X_3 - 0,0137 * X_3^2 \quad (6.2)$$

$$\text{Ortofosfat giderimi, \%} = 96,570 + 0,6791 * X_1 + 0,0359 * X_2 + 0,0183 * X_3 - 0,1099 * X_1^2 + 0,0098 * X_1 X_2 + 0,0123 * X_1 X_3 - 0,0007 * X_2^2 - 0,0018 * X_2 X_3 - 0,0005 * X_3^2 \quad (6.3)$$

$$\text{AKM giderimi, \%} = -87,165 + 35,346 * X_1 + 2,6705 * X_2 - 1,4273 * X_3 - 1,4515 * X_1^2 - 0,4132 * X_1 X_2 + 0,1808 * X_1 X_3 + 0,0034 * X_2^2 + 0,0053 * X_2 X_3 + 0,0029 * X_3^2 \quad (6.4)$$

$$\text{Bulanıklık giderimi, \%} = 94,742 + 2,8584 * X_1 - 0,1153 * X_2 - 0,2485 * X_3 - 0,4236 * X_1^2 + 0,0433 * X_1 X_2 + 0,0519 * X_1 X_3 - 0,0018 * X_2^2 - 0,0016 * X_2 X_3 - 0,0007 * X_3^2 \quad (6.5)$$

Denklem (6.1), (6.2), (6.3), (6.4) ve (6.5)'de katsayıların pozitif işareti sinerjik etkinin, negatif işareti ise antagonistik etkinin göstergesidir [56]. Bağımsız işletme değişkenleri göz önüne alındığında, çözelti giriş pH'ı ve elektroliz süresinin KOİ giderimi üzerinde belirgin negatif etkisinin, akım yoğunluğunun ise belirgin pozitif etkisinin olduğu görülmektedir. Denklemler çözelti giriş pH'ı ve akım yoğunluğunun renk ve AKM giderimi üzerinde belirgin pozitif etkiye, elektroliz süresinin ise belirgin bir negatif etkiye sebep olduğunu göstermektedir. Çözelti giriş pH'ının bulanıklık giderimi üzerinde belirgin pozitif etkisi, akım yoğunluğu ve elektroliz süresinin ise belirgin negatif etkisi mevcuttur. Bağımsız tüm işletme değişkenlerinin ortofosfat giderimi üzerinde pozitif etkisi olduğu görülmektedir. Katsayı işaretleri pozitif olan bağımsız işletme parametrelerinin katsayı değerleri arttıkça, KOİ, renk, ortofosfat, AKM ve bulanıklık giderim verimleri de artmakta ve katsayı işaretleri negatif olan bağımsız işletme parametrelerinin katsayı değerleri azaldıkça, giderim verimleri de azalmaktadır. Demir elektrot kullanılarak sağlanan giderim verimleri denklem (6.1), (6.2), (6.3), (6.4) ve (6.5) ile tahmin edilmiş ve Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Modelin istatistiksel olarak değerlendirilmesi, ANOVA ile gerçekleştirilmiştir. Elektrokoagülasyon prosesi ile atıksudan KOİ, AKM, ortofosfat, renk ve bulanıklık giderimi için deneysel sonuçlar kullanılarak oluşturulan tahmini cevap yüzey modeli regresyon parametreleri varyans analizi sonuçları Çizelge 6.1'de verilmiştir. Yüksek F değeri ilgili terimin önemine işaret eder. F değerinin yeterli derecede yüksek değere sahip olup olmadığı ise p değeri ile değerlendirilir. Düşük p değeri hipotezin reddedilmesini işaret ederken, aynı zamanda değişkenin anlamlılığını ifade etmektedir.

0.05'den düşük değere sahip p değerleri regresyon modelinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu doğrulamaktadır [63], [64]. Bununla beraber değişkenin anlamlı olup olmaması ile ilgili değerlendirme yapılırken kareler toplamı mutlaka dikkate alınmalıdır. Kareler toplamının değerinin artmasıyla değişkenlerin anlamlılığı da artmaktadır [56], [65], [66]. "Prob>F" değerinin 0,0001'den düşük değerlere sahip olması durumunda, model istatistiksel olarak çok anlamlı ve model terimleri %95 olasılık seviyesinde anlamlıdır şeklinde değerlendirme yapılabilir. "Prob>F" değerlerinin 0.05'den düşük olduğu durumlarda ise, model terimleri anlamlı şeklinde ifade edilmektedir.

Çizelge 6. 1 Demir elektrot kullanılan EC prosesinde, KOİ, renk, ortofosfat, AKM, bulanık giderim verimi gerçek ve tahmin edilen değerleri

Deney No	KOİ		Renk		Ortofosfat		AKM		Bulanıklık	
	Deneyssel	Tahmin edilen	Deneyssel	Tahmin edilen	Deneyssel	Tahmin edilen	Deneyssel	Tahmin edilen	Deneyssel	Tahmin edilen
z	76,65	77,7736	96,33	94,5688	99,53	99,5101	79,0	81,7129	99,16	99,4347
2	82,0	78,7657	99,77	100,186	98,8	98,8479	85,0	88,2573	98,0	97,88
3	83,0	79,2734	88,0	88,5843	99,6	99,6361	91,0	93,1353	98,5	98,5914
4	66,24	67,7555	92,0	91,0028	99,4	99,3665	83,0	83,1483	98,34	98,77
5	72,0	70,8562	88,0	89,8047	99,5	99,6325	78,0	81,4378	99,07	98,8656
6	67,13	70,7587	95,0	95,0013	99,42	99,4653	94,0	95,214	99,2	99,388
7	69,0	72,5959	92,66	93,1451	99,0	99,0485	95,0	94,9601	97,0	97,3823
8	61,2	59,9885	92,89	95,1434	99,17	99,2739	91,2	92,205	99,67	99,638
9	80,33	80,4847	80,0	79,8468	99,4	99,3536	84,0	81,8846	97,5	97,3742
10	69,16	68,8694	88,0	87,4619	98,96	98,9168	87,0	85,6738	98,2	98,0752
11	78,3	78,1813	99,77	99,888	99,42	99,3622	89,36	85,7829	99,0	99,0571
12	70,18	70,1618	95,18	94,3655	99,29	99,2576	95,74	95,8495	98,6	98,2904
13	78,0	80,2293	92,43	93,6575	99,37	99,3998	89,0	86,607	99,28	99,0682
14	68,02	65,6538	95,0	93,076	99,5	99,38	95,74	94,6654	99,2	99,1593
15	70,3	68,017	99,0	98,883	99,6	99,5849	90,0	89,476	99,4	99,3976
16	67,89	68,017	99,0	98,883	99,6	99,5849	90,1	89,476	99,42	99,3976
17	67,7	68,017	99,0	98,883	99,6	99,5849	90,05	89,476	99,47	99,3976
18	67,5	68,017	99,0	98,883	99,6	99,5849	90,0	89,476	99,5	99,3976
19	67,75	68,017	99,0	98,883	99,6	99,5849	90,2	89,476	99,4	99,3976
20	67,1	68,017	99,0	98,883	99,6	99,5849	90,0	89,476	99,45	99,3976

Çizelge 6.2’de cevap yüzey metodu regresyon parametreleri ANOVA sonuçları verilmiştir. F değeri 9,28, p değeri 0,00086 olarak belirlenen model değerleri elde edilen sonuçların anlamlı olduğunu, KOİ giderimi için değişkenler ile hedefler arasındaki ilişkinin model yardımıyla açıklanabilirliğini ortaya koymaktadır. Çizelge 6.2’de verilen değerler, lineer katsayılar, kareli ve etkileşimli katsayılardan daha anlamlıdır şeklinde yorumlanabilir. ANOVA çalışması, KOİ giderimi üzerinde çözelti giriş pH’ının bağımsız değişkenler arasında en yüksek etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Çizelge 6.3’de görüldüğü üzere tüm kareli katsayılar ve pH ve akım yoğunluğu etkileşim katsayısı KOİ giderim verimi üzerine önemli derecede etkiye sahiptir. ANOVA analizi sonucunda F ve p değerlerine bağlı olarak anlamlı değil olarak ifade edilen katsayılar giderim verimi üzerine önemli etkiye sahip olmadıklarında dolayı RSM denklemlerinde göz ardı edilmektedir. Bu katsayıların denklemlerden çıkarılması işlemleri basitleştirerek sonuca ulaşılmasında kolaylık sağlamaktadır. Renk giderimi ANOVA sonuçları modelin anlamlı olduğunu, pH ve akım yoğunluğu ile ilgili lineer katsayıların, pHxpH, süresüre ve akım yoğunluğuxakım yoğunluğu kareli katsayıların ve akım yoğunluğuxsüre etkileşimli katsayıların renk giderimi üzerine önemli etkileri olduğunu ifade etmektedir (Çizelge 6.4). Ortofosfat giderimi için model F değeri 18,26 ve ilgili p değeri ise 0,000044 olarak belirlenmiştir (Çizelge 6.2). Bu değerler, modelin anlamlı olduğunu ve ortofosfat giderimi için bağımsız değişkenler ile hedefler arasındaki ilişkinin açıklanabilir olduğunu ifade etmektedir. Çizelge 6.5’de verilen ANOVA analizi sonuçlarına göre, ortofosfat giderimi için kareli ve etkileşimli katsayılar lineer katsayılara oranla daha büyük önem arz etmektedir. ANOVA sonuçlarına göre, AKM giderimi için F-değerini 6,92, P-değeri 0,0028, bulanıklık giderimi için F-değerini 14,99, P değeri 0,00011 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar modelin her iki parametrenin giderimi için de anlamlı olduğunu göstermektedir. Çizelge 6.6’da görülmektedir ki AKM giderimi üzerine akım yoğunluğu ve elektroliz süresi ile ilgili lineer katsayıların, pHxpH kareli katsayısının ve pHxakım yoğunluğu etkileşim katsayısının önemli etkileri mevcuttur. Bulanıklık giderimi üzerine ise çözelti giriş pH’ı ile ilgili lineer katsayısının, pHxpH ve akım yoğunluğuxakım yoğunluğu kareli katsayılarının etki değeri yüksek olarak tesbit edilmiştir (Çizelge 6.7).

Çizelge 6. 2 Cevap yüzey modeli regresyon parametreleri ANOVA sonuçları

Model	R ²	Düzeltilmiş R ²	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	Prob>F
KOİ	0.89	0.79	618.5	68.7	9,28	0,00086
Renk	0.96	0.93	515,3613083	57,26236759	29,42364085	0.000005
Ortofosfat	0.94	0.89	1,034191886	0,11491021	18,26055185	0.000044
AKM	0.86	0.73	404,3928073	44,93253415	6,929339951	0,0028
Bulanıklık	0.93	0.97	9,49125712	1,054584124	14,99132582	0,00011

Çizelge 6. 3 Fe elektrotlar kullanılan EC prosesi ile KOİ giderimi için uygulanan cevap yüzey modeli ANOVA sonuçları

Kaynak	Kareler Toplamı	S.D.	Kareler Ortalaması	F-Oranı	P-Değeri	Yorum
Model	618.5	9	68.7	9,289	0,00086	Anlamlı
X ₁	135,123	1	135,123	18,26	0,0016	Anlamlı
X ₂	85,5167	1	85,5167	11,56	0,0068	Anlamlı
X ₃	214,566	1	214,566	29,00	0,0003	Anlamlı
X ₁ X ₁	75,691	1	75,691	10,23	0,0095	Anlamlı
X ₁ X ₂	78,6407	1	78,6407	10,63	0,0086	Anlamlı
X ₁ X ₃	0,59653	1	0,59653	0,08	0,7822	Anlamlı değil
X ₂ X ₂	59,5014	1	59,5014	8,04	0,0177	Anlamlı
X ₂ X ₃	0,0288	1	0,0288	0,00	0,9515	Anlamlı değil
X ₃ X ₃	38,0949	1	38,0949	5,15	0,0466	Anlamlı
Toplam hata	73,9816	10	7,39816			
Toplam (corr.)	692,484	19				

R² = %89,31

Çizelge 6. 4 Fe elektrotlar kullanılan EC prosesi ile renk giderimi için uygulanan cevap yüzey modeli ANOVA sonuçları

Kaynak	Kareler Toplamı	S.D.	Kareler Ortalaması	F-Oranı	P-Değeri	Yorum
Model	515.36	9	57,26	29,42	0.0000049	Çok Anlamlı
X ₁	58,0798	1	58,0798	29,84	0,0003	Anlamlı
X ₂	33,9648	1	33,9648	17,45	0,0019	Anlamlı
X ₃	0,386837	1	0,386837	0,20	0,6652	Anlamlı değil
X ₁ X ₁	372,508	1	372,508	191,41	<0.0001	Çok Anlamlı
X ₁ X ₂	5,14	1	5,14	2,64	0,1352	Anlamlı değil
X ₁ X ₃	0,088704	1	0,088704	0,05	0,8352	Anlamlı değil
X ₂ X ₂	4,84539	1	4,84539	2,49	0,1457	Anlamlı değil
X ₂ X ₃	43,4778	1	43,4778	22,34	0,0008	Anlamlı
X ₃ X ₃	47,8003	1	47,8003	24,56	0,0006	Anlamlı
Toplam hata	19,4613	10	1,94613			
Toplam (corr.)	534,823	19				

R² = %96,36

Çizelge 6.2’de KOİ giderimi için model korelasyon katsayısı (R²) 0,89 olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu değer toplam varyasyonun sadece %10.69’unun ampirik model ile açıklanabilir olmadığını ifade etmektedir. Modele uygunluk durumundan bahsedebilmek için korelasyon katsayısının 0,80’den yüksek bir değere sahip olması yeterlidir [44]. Renk ve ortofosfat giderimi için model korelasyon katsayısı değerleri sırasıyla, 0,96 ve 0,94 olarak belirlenmiştir (Çizelge 6.2). Her iki parametre için model korelasyon katsayısı değerlerinin 0,80 değerinden yüksek olması, prosesin regresyon modelleri ile açıklanabilir olduğunu, bu çalışmada renk ve ortofosfat giderim verimlerini tahmin etmede uygulanan cevap yüzey modelinin kabul edilebilir yeterlilikte sonuçlar verdiğini göstermektedir. Çizelge 6.2’de AKM ve bulanıklık giderimi için modelin korelasyon katsayısı değerleri sırasıyla, 0,86 ve 0,93 olarak belirlenmiştir. Toplam varyasyonun AKM için %13,82’si, bulanıklık için ise %6,91’i ampirik model ile açıklanamamaktadır.

Çizelge 6. 5 Fe elektrotlar kullanılan EC prosesi ile ortofosfat giderimi için uygulanan cevap yüzey modeli ANOVA sonuçları

Kaynak	Kareler Toplamı	S.D.	Kareler Ortalaması	F-Oranı	P-Değeri	Yorum
Model	1.034	9	0,115	18,26	0.000044	Çok Anlamlı
X ₁	0,191074	1	0,191074	30,36	0,0003	Anlamlı
X ₂	0,00425249	1	0,00425249	0,68	0,4302	Anlamlı değil
X ₃	0,000880755	1	0,000880755	0,14	0,7161	Anlamlı değil
X ₁ X ₁	0,301544	1	0,301544	47,92	<0.0001	Çok Anlamlı
X ₁ X ₂	0,077428	1	0,077428	12,30	0,0057	Anlamlı
X ₁ X ₃	0,123137	1	0,123137	19,57	0,0013	Anlamlı
X ₂ X ₂	0,118758	1	0,118758	18,87	0,0015	Anlamlı
X ₂ X ₃	0,25205	1	0,25205	40,05	0,0001	Anlamlı
X ₃ X ₃	0,0597051	1	0,0597051	9,49	0,0116	Anlamlı
Toplam hata	0,0629281	10	0,00629281			
Toplam (corr.)	1,09712	19				

R² =%94,26

Çizelge 6. 6 Fe elektrotlar kullanılan EC prosesi ile AKM giderimi için uygulanan cevap yüzey modeli ANOVA sonuçları

Kaynak	Kareler Toplamı	S.D.	Kareler Ortalaması	F-Oranı	P-Değeri	Yorum
Model	404.39	9	44,93	6,929	0,00281276	Anlamlı
X ₁	14,3808	1	14,3808	2,22	0,1673	Anlamlı değil
X ₂	70,4354	1	70,4354	10,86	0,0081	Anlamlı
X ₃	76,7346	1	76,7346	11,83	0,0063	Anlamlı
X ₁ X ₁	52,5548	1	52,5548	8,10	0,0173	Anlamlı
X ₁ X ₂	137,326	1	137,326	21,18	0,0010	Anlamlı
X ₁ X ₃	26,2805	1	26,2805	4,05	0,0718	Anlamlı değil
X ₂ X ₂	2,82115	1	2,82115	0,44	0,5244	Anlamlı değil
X ₂ X ₃	2,205	1	2,205	0,34	0,5727	Anlamlı değil
X ₃ X ₃	2,11419	1	2,11419	0,33	0,5806	Anlamlı değil
Toplam hata	64,8439	10	6,48439			
Toplam (corr.)	469,237	19				

R² = %86,18

Çizelge 6. 7 Fe elektrotlar kullanılan EC prosesi ile bulanıklık giderimi için uygulanan cevap yüzey modeli ANOVA sonuçları

Kaynak	Kareler Toplamı	S.D.	Kareler Ortalaması	F-Oranı	P-Değeri	Yorum
Model	9.49	9	1,054	14,99	0,0001	Anlamlı
X ₁	0,492178	1	0,492178	7,00	0,0245	Anlamlı
X ₂	0,350302	1	0,350302	4,98	0,0497	Anlamlı
X ₃	0,0888726	1	0,0888726	1,26	0,2873	Anlamlı değil
X ₁ X ₁	4,4773	1	4,4773	63,65	<0.0001	Çok Anlamlı
X ₁ X ₂	1,50973	1	1,50973	21,46	0,0009	Anlamlı
X ₁ X ₃	2,16799	1	2,16799	30,82	0,0002	Anlamlı
X ₂ X ₂	0,823081	1	0,823081	11,70	0,0065	Anlamlı
X ₂ X ₃	0,2048	1	0,2048	2,91	0,1188	Anlamlı değil
X ₃ X ₃	0,126572	1	0,126572	1,80	0,2095	Anlamlı değil
Toplam hata	0,703463	10	0,0703463			
Toplam (corr.)	10,1947	19				

R² = %93,09

Model yardımıyla elde edilen değerlere karşılık deneysel olarak elde edilen değerler kullanılarak çizilen grafik birinci dereceden doğru vermekte, KOİ, AKM, ortofosfat, renk ve bulanıklık giderimi için çizilen grafiklerin R² değerleri sırasıyla 0,89, 0,86, 0,94, 0,96, ve 0,93 olarak belirlenmiştir. Yüksek R² değerleri deneysel verilerin model sonuçları ile uyum içinde olduğunu göstermektedir. Fe ve Al elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilen elektrokoagülasyon prosesi ile maksimum kirletici giderimi için optimum proses parametrelerinin belirlenmesi için cevap yüzey modeli baz alınarak sayısal optimizasyon uygulanmıştır. Optimize şartlar Çizelge 6.8'de verilmiştir. Maksimum giderim verimleri, model yardımıyla belirlenen optimum proses şartları altında gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucunda elde edilmiştir.

Çizelge 6. 8 Proses değişkenlerinin optimum işletme şartları

Faktör	Fe elektrotlar					Al elektrotlar				
	KOİ	Renk	Ortofosfat	AKM	Bulanıklık	KOİ	Renk	Ortofosfat	AKM	Bulanıklık
pH	5,0	7,4782	5,96789	5,72947	8,98713	5,0	9	5	5	5.8
Akım yoğunluğu (A/m ²)	65,0	25,0	63,8796	64,9999	55,8485	25,0	50.5	65	25	65
Süre(dk)	5,21	7,32748	5,00002	45,0	45,0	5,06	45	5	44.76	5

6.2 Alüminyum Elektrotlar Kullanılan EC Prosesinin İşletme Parametrelerinin İstatiksel Analizi ve Optimizasyonu

Alüminyum elektrotlar kullanılarak uygulanan elektrokoagülasyon prosesiyle KOİ, renk, ortofosfat, AKM ve bulanıklık giderimi için elde edilen ikinci dereceden model denklemleri (6.6), (6.7), (6.8), (6.9) ve (6.10) eşitlikleri ile verilmiştir. ANOVA analizi sonuçları modelin elektrokoagülasyon prosesi ile süt endüstrisi atıksularından KOİ, AKM, ortofosfat, renk ve bulanıklık giderimi için anlamlı olduğunu göstermektedir. Model uygulandığında her bir kirletici için düşük p değerleri ve yüksek F değerleri elde edilmiştir.

$$\text{KOİ giderimi, \%} = 171,41 - 15,418 * X_1 - 0,8618 * X_2 - 1,0398 * X_3 + 0,5678 * X_1^2 + 0,1356 * X_1 X_2 + 0,04804 * X_1 X_3 - 0,0067 * X_2^2 + 0,0174 * X_2 X_3 - 0,0062 * X_3^2 \quad (6.6)$$

$$\text{Renk giderimi, \%} = 103,541 - 0,2733 * X_1 - 0,0645 * X_2 - 0,1379 * X_3 - 0,2419 * X_1^2 + 0,04782 * X_1 X_2 + 0,0543284 * X_1 X_3 - 0,00136588 * X_2^2 - 0,0048 * X_2 X_3 - 0,000153383 * X_3^2 \quad (6.7)$$

$$\text{Ortofosfat giderimi, \%} = 103,57 - 1,5815 * X_1 + 0,07325 * X_2 - 0,0205 * X_3 + 0,1043 * X_1^2 - 0,0086 * X_1 X_2 + 0,0136 * X_1 X_3 + 0,0004 * X_2^2 - 0,0013 * X_2 X_3 - 0,0005 * X_3^2 \quad (6.8)$$

$$\text{AKM giderimi, \%} = 241,06 + 0,0015 * X_1 - 5,5320 * X_2 - 2,1651 * X_3 - 2,1664 * X_1^2 + 0,5699 * X_1 X_2 - 0,0636 * X_1 X_3 + 0,0233 * X_2^2 - 0,0092 * X_2 X_3 + 0,0605 * X_3^2 \quad (6.9)$$

$$\text{Bulanıklık giderimi, \%} = 100,54 + 1,4059 * X_1 - 0,0256 * X_2 - 0,2955 * X_3 - 0,6186 * X_1^2 + 0,0770 * X_1 X_2 + 0,1001 * X_1 X_3 - 0,0027 * X_2^2 - 0,0075 * X_2 X_3 + 0,0001 * X_3^2 \quad (6.10)$$

Denklemlerde görüldüğü üzere bağımsız işletme değişkenleri, giriş pH'ının, akım yoğunluğunun ve elektroliz süresinin KOİ ve renk giderimi üzerinde, belirgin negatif etkisi mevcuttur. Elektroliz süresi ve pH'ın ortofosfat giderimi üzerinde ise belirgin pozitif etkisi vardır. AKM ve bulanıklık giderimi üzerine, giriş pH'ının pozitif etkisi görülürken, akım yoğunluğu ve elektroliz süresinin negatif etkisi mevcuttur. Denklemler yardımıyla tahmin edilen giderim verimleri Çizelge 6.9'da verilmiştir.

Çizelge 6. 9 Alüminyum elektrot kullanılan EC prosesinde, KOİ, renk, ortofosfat, AKM, bulanık giderim verimi gerçek ve tahmin edilen değerleri

Deneş No.	KOİ		Renk		Fosfat		AKM		Bulanıklık	
	Deneşsel	Tahmin edilen	Deneşsel	Tahmin edilen	Deneşsel	Tahmin edilen	Deneşsel	Tahmin edilen	Deneşsel	Tahmin edilen
1	84,26	85,9068	99,77	99,565	99,0	99,1522	87,23	88,281	99,75	99,2921
2	81,22	81,9059	96,6	97,2201	98,75	98,7133	68,0	65,6121	92,47	93,1826
3	78,0	78,11	99,77	100,114	99,77	99,8458	89,36	85,2251	99,41	100,848
4	78,56	79,5339	99,54	99,6819	99,0	99,0599	90,0	85,3554	98,63	97,8209
5	77,0	76,7964	99,8	99,8128	99,0	98,9959	95,74	91,4114	99,86	100,226
6	74,0	74,7174	99,77	99,641	99,11	99,1045	71,0	66,1969	99,81	98,124
7	76,0	75,9596	98,9	98,4417	99,06	99,1545	92,0	84,6705	99,87	98,7518
8	80,0	79,3054	99,77	100,183	99,0	98,9161	91,5	82,2553	99,56	99,7324
9	82,65	82,3561	98,8	99,0603	99,9	99,7773	76,6	78,7862	99,78	99,466
10	82,2	81,701	98,9	98,4564	99,04	99,1001	47,0	53,702	93,68	94,337
11	80,0	78,9762	98,8	98,7429	98,94	98,9185	78,72	79,4765	96,62	96,9798
12	75,0	75,2249	99,77	99,6423	99,5	99,4584	82,0	90,1991	99,85	99,8357
13	83,35	82,0411	99,77	99,412	99,13	99,0359	99,0	99,5804	98,94	98,3255
14	72,0	72,51	99,77	99,9433	98,65	98,681	91,49	99,8652	99,81	100,77
15	80,08	79,7792	99,77	99,739	99,0	99,0394	72,0	75,5155	99,38	99,498
16	80,0	79,7792	99,77	99,739	99,0	99,0394	74,47	75,5155	99,79	99,498
17	79,8	79,7792	99,77	99,739	99,1	99,0394	74,0	75,5155	99,27	99,498
18	80,2	79,7792	99,77	99,739	99,2	99,0394	74,2	75,5155	99,25	99,498
19	79,65	79,7792	99,77	99,739	99,0	99,0394	74,6	75,5155	99,35	99,498
20	79,75	79,7792	99,77	99,739	99,0	99,0394	74,8	75,5155	99,6	99,498

Cevap yüzey modeli regresyon parametreleri ANOVA sonuçları Çizelge 6.10'da verilmiştir. Yüksek F değerleri ve 0.05'in altındaki p değerleri ilgili değişkenin giderim verimleri üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu ifade etmektedir. Bu anlamda kareler toplamı da mutlaka değerlendirilmeye alınmalıdır. Kareler toplamının yüksek değerlere sahip olması değişkenin etki derecesinin yüksek olduğunun göstergesidir [56], [65], [66]. Çizelge 6.11'de görüldüğü üzere model F değeri 22.02, ilgili p değeri 0,0000189 olarak tesbit edilmiştir. F değeri, p değeri ve yüksek kareler toplamı değeri birlikte değerlendirildiğinde modelin anlamlı olduğu, KOİ giderimi için bağımsız değişkenler ile hedefler arasında bağlantının model yardımıyla açıklanabilir olduğu sonucuna varılmaktadır. ANOVA sonuçlarına göre pH lineer katsayısı ve pHxsüre etkileşim katsayısı dışında tüm katsayıların KOİ giderim verimi üzerine önemli etkiye sahip olduğu söylenebilir. Renk ve ortofosfat giderimi için model regresyon parametreleri ANOVA analizi sonuçlarına bakıldığında, sırasıyla F-değerlerinin 7,56 ve 15,09, p değerlerini 0,0019 ve 0,0001 olduğu görülmektedir. Bu değerlere göre modelin anlamlı olduğu yorumu yapılabilir. Renk giderimi üzerine lineer katsayılar arasında akım yoğunluğunun, kareli katsayılar arasında phxph teriminin ve tüm etkileşimli katsayıların önemli etkisinin mevcut olduğu Çizelge 6.12'den, ortofosfat giderimi üzerine ise kareli katsayılardan phxph teriminin ve tüm lineer ve etkileşimli katsayıların önemli etkisinin mevcut olduğu Çizelge 6.13'ten görülmektedir. AKM ve bulanıklık için F değerleri sırasıyla 6.09 and 8.08 elde edilmiştir (Çizelge 6.10). ANOVA sonuçları değerlendirildiğinde AKM giderimi üzerine pH, pHxakım yoğunluğu ve sürexsüre model terimlerinin, bulanıklık giderimi üzerine ise pHxakım yoğunluğu, akım yoğunluğu xakım yoğunluğu ve sürexsüre dışında tüm lineer, kareli ve etkileşimli model terimlerinin önemli etkisi olduğu sonucuna varılmaktadır (Çizelge 6.14, Çizelge 6.15).

Çizelge 6. 10 Cevap yüzey modeli regresyon parametreleri ANOVA sonuçları

Model	R ²	Düzeltilmiş R ²	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	Prob>F
KOİ	0.95	0.91	176,8891307	19,65434785	22,02180328	0.0000189
Renk	0.87	0.76	9,602940564	1,066993396	7,566071064	0,001985827
Ortofosfat	0.93	0.87	1,578378462	0,175375385	15,09299566	0,00010549
AKM	0.85	0.71	2374,55929	263,8399211	6,089475385	0,004631397
Bulanıklık	0.88	0.77	72,00285957	8,00031773	8,080785847	0,00152352

Çizelge 6. 11 Al elektrotlar kullanılan EC prosesi ile KOİ giderimi için uygulanan cevap yüzey modeli ANOVA sonuçları

Kaynak	Kareler Toplamı	S.D.	Kareler Ortalaması	F-Oranı	P-Değeri	Yorum
Model	176.89	9	19,65434	22,02	0.000019	Anlamlı
X ₁	0,429773	1	0,429773	0,48	0,5035	Anlamlı değil
X ₂	10,2451	1	10,2451	11,48	0,0069	Anlamlı
X ₃	86,7834	1	86,7834	97,24	<0,0001	Çok Anlamlı
X ₁ X ₁	8,04355	1	8,04355	9,01	0,0133	Anlamlı
X ₁ X ₂	14,7882	1	14,7882	16,57	0,0022	Anlamlı
X ₁ X ₃	1,85607	1	1,85607	2,08	0,1799	Anlamlı değil
X ₂ X ₂	11,2709	1	11,2709	12,63	0,0052	Anlamlı
X ₂ X ₃	24,2208	1	24,2208	27,14	0,0004	Anlamlı
X ₃ X ₃	9,84629	1	9,84629	11,03	0,0077	Anlamlı
Toplam hata	8,92495	10	0,892495			
Toplam (corr.)	185,814	19				

R² = %95.2

Elde edilen yüksek korelasyon katsayısı değerleri modelin deneysel verilerle uyumunun tatmin edici olduğunu göstermektedir (Çizelge 6.10). KOİ ve ortofosfat giderimi için model korelasyon katsayısı (R²) sırasıyla 0,95 ve 0,93 olarak belirlenmiştir. KOİ giderimi için toplam varyasyonun %5'inin ve ortofosfat giderimi için %7'sinin ampirik model ile açıklanamamaktadır. Renk, AKM ve bulanıklık giderimi için model korelasyon katsayıları

(R²) sırasıyla, 0,87, 0,85, 0,88 olarak belirlenmiştir. Tüm R² değerlerinin 0,80'den daha yüksek değerlere sahip olması prosesin regresyon modeli ile açıklanabilir olduğunun göstergesidir.

Çizelge 6. 12 Al elektrotlar kullanılan EC prosesi ile renk giderimi için uygulanan cevap yüzey modeli ANOVA sonuçları

Kaynak	Kareler Toplamı	S.D.	Kareler Ortalaması	F-Oranı	P-Değeri	Yorum
Model	9.6	9	1,066993	7,56607	0,00198	Anlamlı
X ₁	0,365248	1	0,365248	2,59	0,1386	Anlamlı değil
X ₂	1,18362	1	1,18362	8,39	0,0159	Anlamlı
X ₃	0,557712	1	0,557712	3,95	0,0748	Anlamlı değil
X ₁ X ₁	1,46076	1	1,46076	10,36	0,0092	Anlamlı
X ₁ X ₂	1,83881	1	1,83881	13,04	0,0048	Anlamlı
X ₁ X ₃	2,37306	1	2,37306	16,83	0,0021	Anlamlı
X ₂ X ₂	0,468902	1	0,468902	3,32	0,0982	Anlamlı değil
X ₂ X ₃	1,8432	1	1,8432	13,07	0,0047	Anlamlı
X ₃ X ₃	0,00591302	1	0,00591302	0,04	0,8419	Anlamlı değil
Toplam hata	1,41023	10	0,141023			
Toplam (corr.)	11,0132	19				

R² = %87,2

KOİ, renk ve ortofosfat gideriminde deneysel olarak elde edilen veriler ile model ile tahmin edilen değerler arasında yüksek bir uyum söz konusudur. AKM ve bulanıklık giderimi için ise daha düşük korelasyon katsayıları elde edilmiş olup, bu durum yapılan deneysel çalışmanın sınırlı sayıda gerçekleşmiş olması veya kirletici giderimi üzerine etkisi düşük terimlerin mevcudiyeti ile açıklanabilir [56], [67]. Çizelge 6.8'de optimize edilmiş proses şartları verilmiştir. Model yardımıyla belirlenen optimize şartlar altında maksimum KOİ giderim verimleri %98.91, Al elektrotlar için, Fe elektrotlar için %98.84 olarak; ortofosfat giderim verimleri ise %98.24, Al elektrotlar için, Fe elektrotlar için %99.78 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 6. 13 Al elektrotlar kullanılan EC prosesi ile ortofosfat giderimi için uygulanan cevap yüzey modeli ANOVA sonuçları

Kaynak	Kareler Toplamı	S.D.	Kareler Ortalaması	F-Oranı	P-Değeri	Yorum
Model	1.58	9	0,1753753	15,093	0,000105	Anlamlı
X ₁	0,459364	1	0,459364	39,53	0,0001	Anlamlı
X ₂	0,253913	1	0,253913	21,85	0,0009	Anlamlı
X ₃	0,0896287	1	0,0896287	7,71	0,0195	Anlamlı
X ₁ X ₁	0,271442	1	0,271442	23,36	0,0007	Anlamlı
X ₁ X ₂	0,0605107	1	0,0605107	5,21	0,0456	Anlamlı
X ₁ X ₃	0,150634	1	0,150634	12,96	0,0048	Anlamlı
X ₂ X ₂	0,0349015	1	0,0349015	3,00	0,1137	Anlamlı değil
X ₂ X ₃	0,143112	1	0,143112	12,32	0,0056	Anlamlı
X ₃ X ₃	0,05143	1	0,05143	4,43	0,0617	Anlamlı değil
Toplam hata	0,116197	10	0,0116197			
Toplam (corr.)	1,69458	19				

R² = %93,14

Çizelge 6. 14 Al elektrotlar kullanılan EC prosesi ile AKM giderimi için uygulanan cevap yüzey modeli ANOVA sonuçları

Kaynak	Kareler Toplamı	S.D.	Kareler Ortalaması	F-Oranı	P-Değeri	Yorum
Model	2374.6	9	263,83992	6,089475	0,0046313	Anlamlı
X ₁	630,186	1	630,186	14,54	0,0034	Anlamlı
X ₂	168,227	1	168,227	3,88	0,0771	Anlamlı değil
X ₃	0,000908961	1	0,000908961	0,00	0,9964	Anlamlı değil
X ₁ X ₁	117,078	1	117,078	2,70	0,1312	Anlamlı değil
X ₁ X ₂	261,203	1	261,203	6,03	0,0339	Anlamlı
X ₁ X ₃	3,25604	1	3,25604	0,08	0,7896	Anlamlı değil
X ₂ X ₂	136,515	1	136,515	3,15	0,1063	Anlamlı değil
X ₂ X ₃	6,78961	1	6,78961	0,16	0,7005	Anlamlı değil
X ₃ X ₃	920,51	1	920,51	21,25	0,0010	Anlamlı
Toplam hata	433,272	10	43,3272			
Toplam (corr.)	2807,83	19				

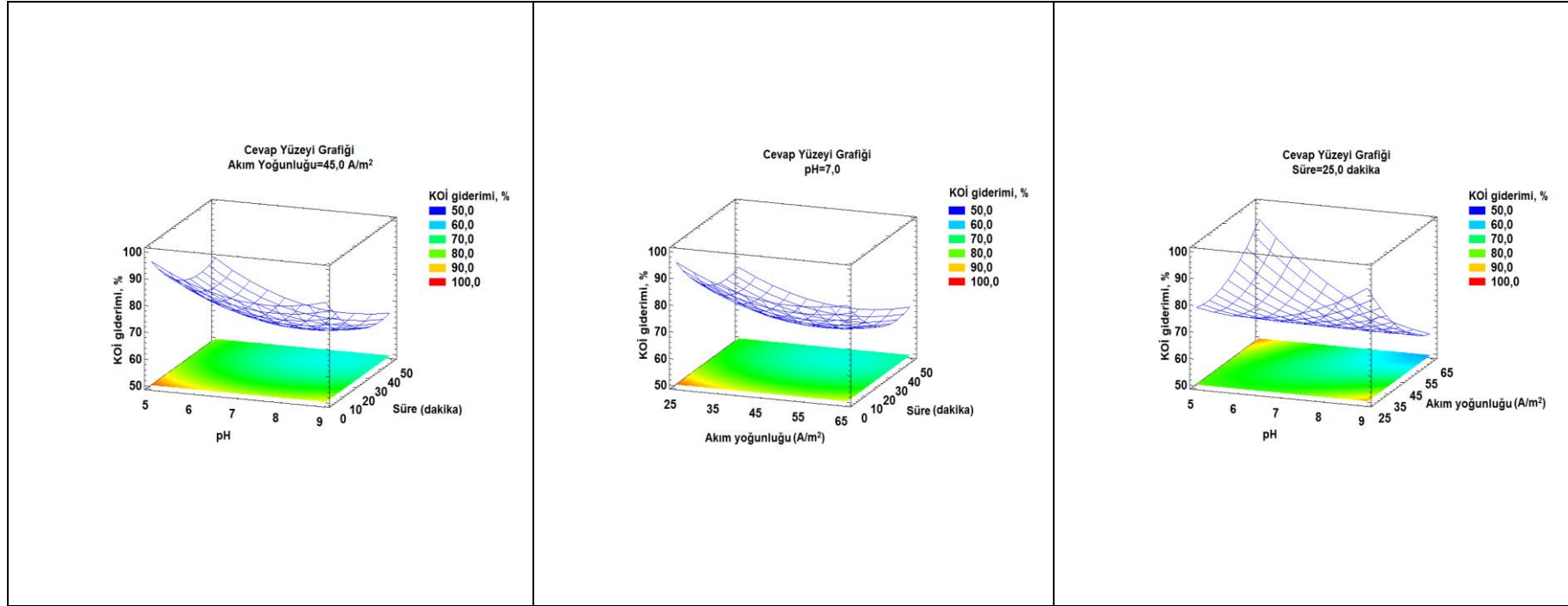
R² = %84,57

Çizelge 6. 15 Al elektrotlar kullanılan EC prosesi ile bulanıklık giderimi için uygulanan cevap yüzey modeli ANOVA sonuçları

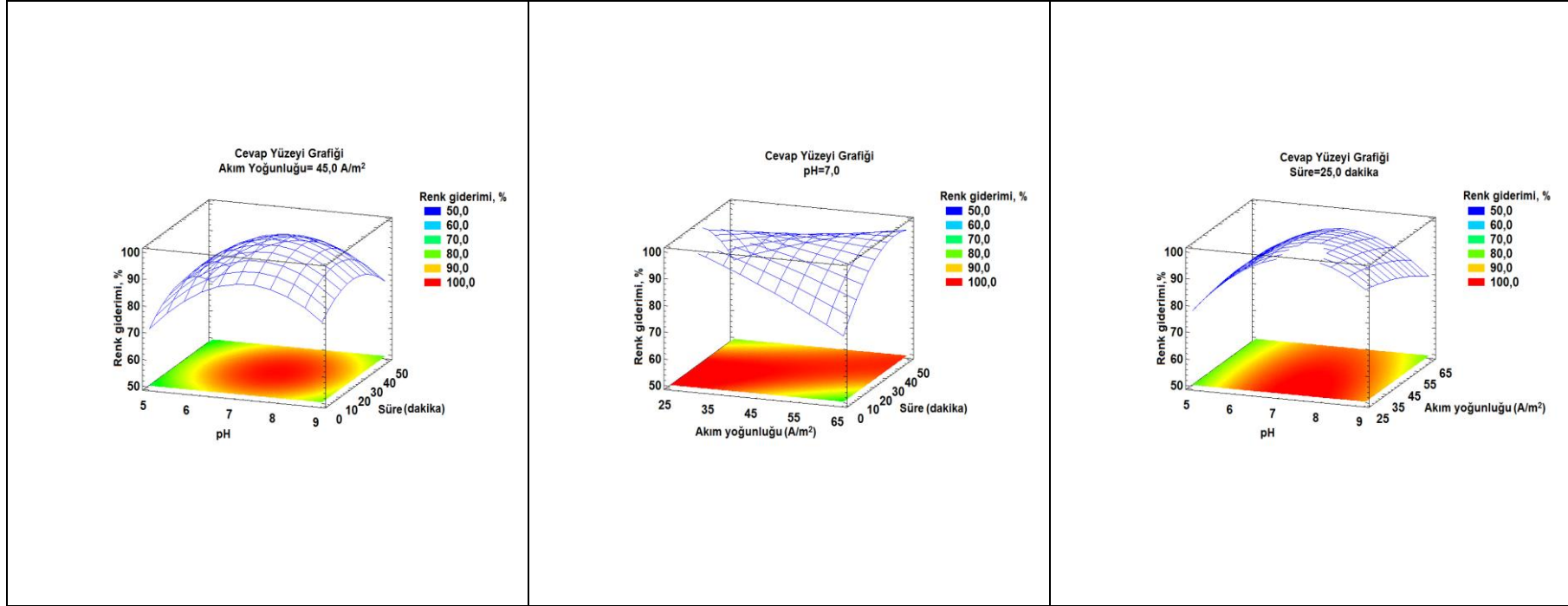
Kaynak	Kareler Toplamı	S.D.	Kareler Ortalaması	F-Oranı	P-Değeri	Yorum
Model	72.002	9	8,000317	8,08078	0,00152	Anlamlı
X ₁	26,3475	1	26,3475	26,61	0,0004	Anlamlı
X ₂	9,96215	1	9,96215	10,06	0,0100	Anlamlı
X ₃	8,05607	1	8,05607	8,14	0,0172	Anlamlı
X ₁ X ₁	9,54608	1	9,54608	9,64	0,0112	Anlamlı
X ₁ X ₂	4,77493	1	4,77493	4,82	0,0528	Anlamlı değil
X ₁ X ₃	8,07003	1	8,07003	8,15	0,0171	Anlamlı
X ₂ X ₂	1,8672	1	1,8672	1,89	0,1997	Anlamlı değil
X ₂ X ₃	4,59045	1	4,59045	4,64	0,0567	Anlamlı
X ₃ X ₃	0,00388754	1	0,00388754	0,00	0,9513	Anlamlı değil
Toplam hata	9,90042	10	0,990042			
Toplam (corr.)	81,9033	19				

R² = %87,91

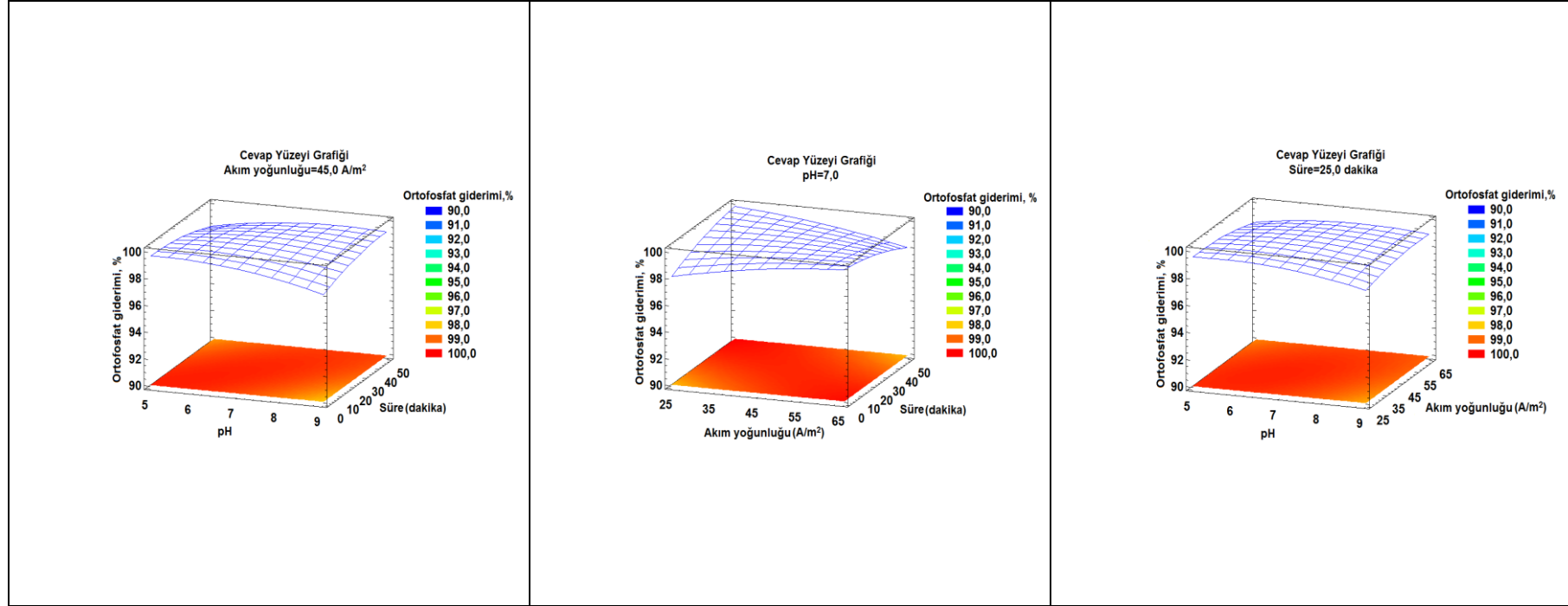
Cevap yüzey modeli grafikleri Şekil 6.1–Şekil 6.10’da verilmiştir. Şekil 6.1–Şekil 6.10’da görüldüğü gibi bir değişken merkezde sabit tutulurken diğer iki değişken belirlenen sınırlar arasında değerler almaktadır. Cevap yüzeyi ve kontür grafiği sabit tutulan bir değişken ve sınırlar arasında değerler alan iki değişkenin bir fonksiyonudur.



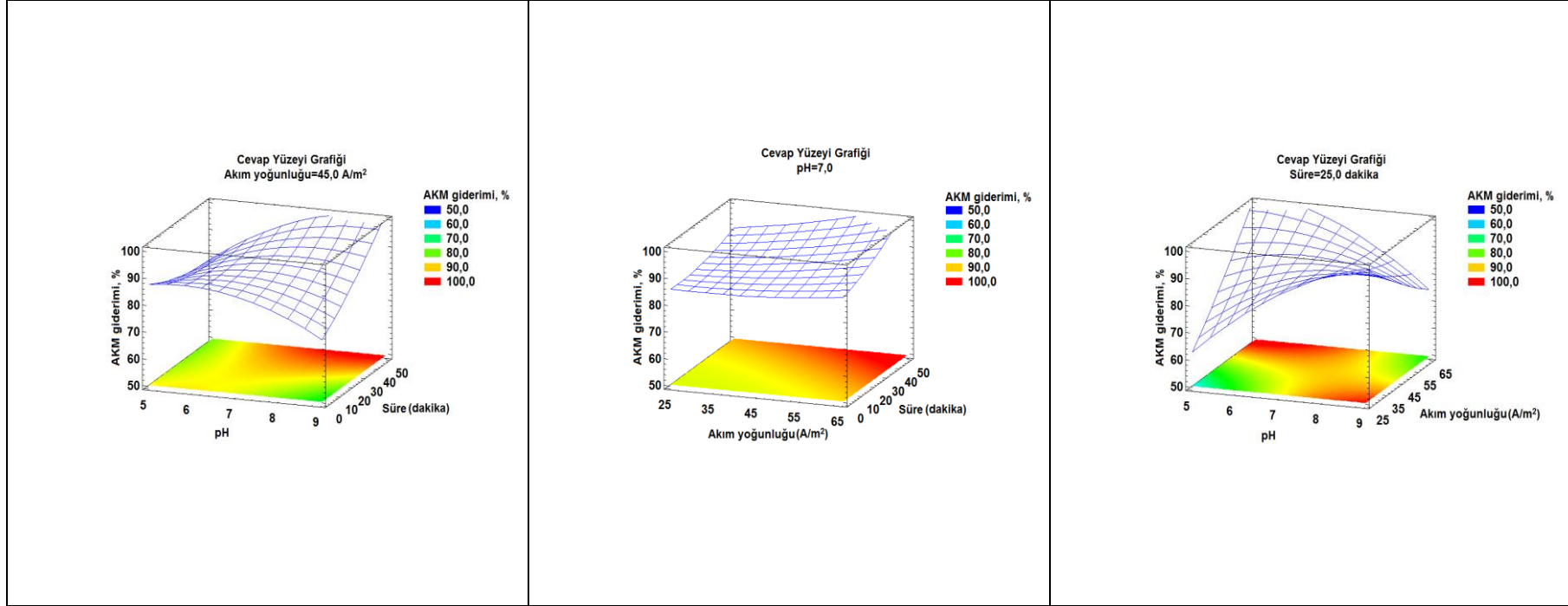
Şekil 6. 1 Fe elektrot kullanılan EC prosesiyle arıtılan süt endüstrisi atıksuları için cevap yüzey model grafikleri a) pH ve elektroliz süresinin KOİ giderimi üzerine etkisi b) Akım yoğunluğu ve elektroliz süresinin KOİ giderimi üzerine etkisi c) pH ve akım yoğunluğunun KOİ giderimi üzerine etkisi



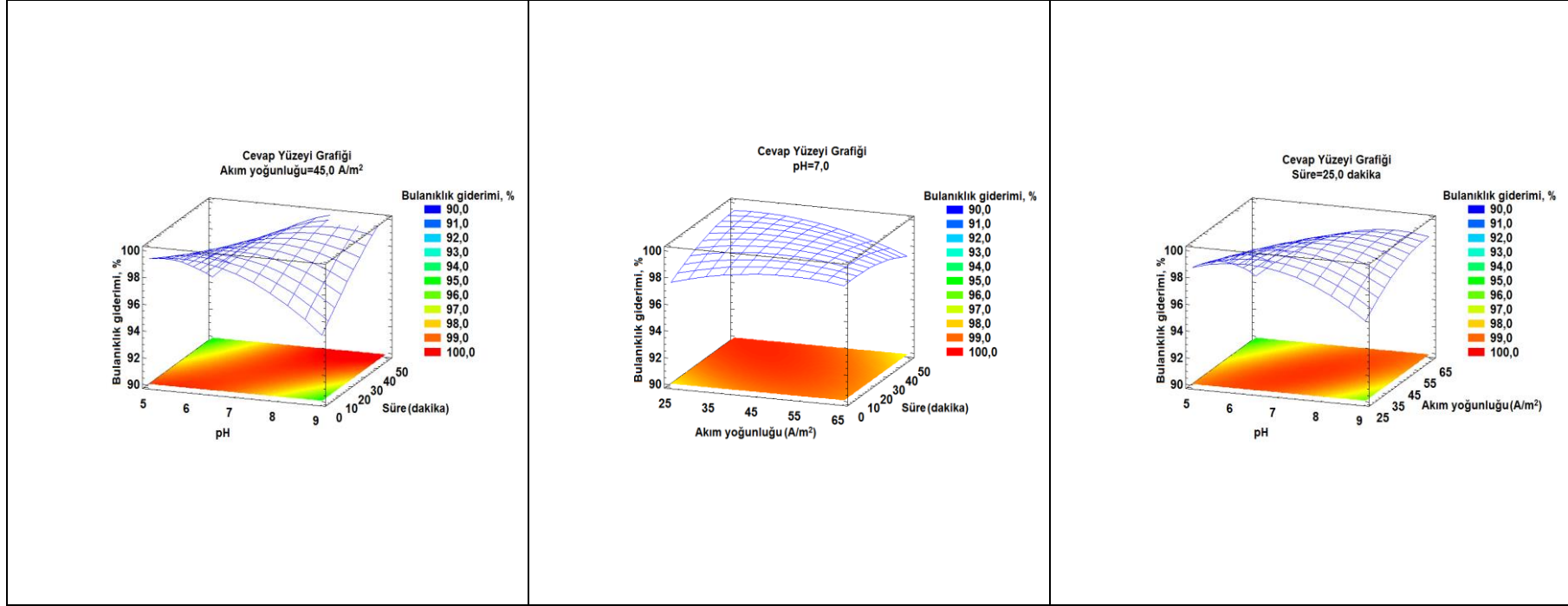
Şekil 6. 2 Fe elektrot kullanılan EC prosesiyle arıtılan süt endüstrisi atıksuları için cevap yüzey model grafikleri a) pH ve elektroliz süresinin renk giderimi üzerine etkisi b) Akım yoğunluğu ve elektroliz süresinin renk giderimi üzerine etkisi c) pH ve akım yoğunluğunun renk giderimi üzerine etkisi



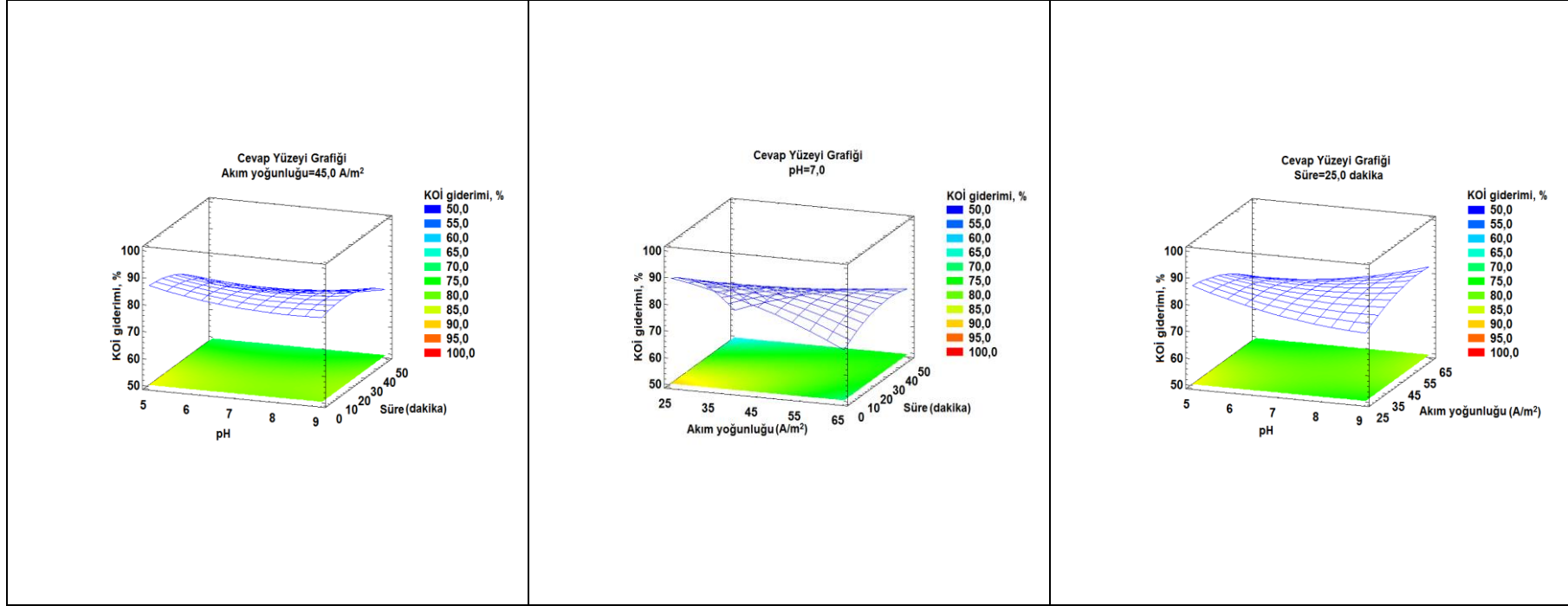
Şekil 6. 3 Fe elektrot kullanılan EC prosesiyle arıtılan süt endüstrisi atıksuları için cevap yüzey model grafikleri a) pH ve elektroliz süresinin ortofosfat giderimi üzerine etkisi b) Akım yoğunluğu ve elektroliz süresinin ortofosfat giderimi üzerine etkisi c) pH ve akım yoğunluğunun ortofosfat giderimi üzerine etkisi



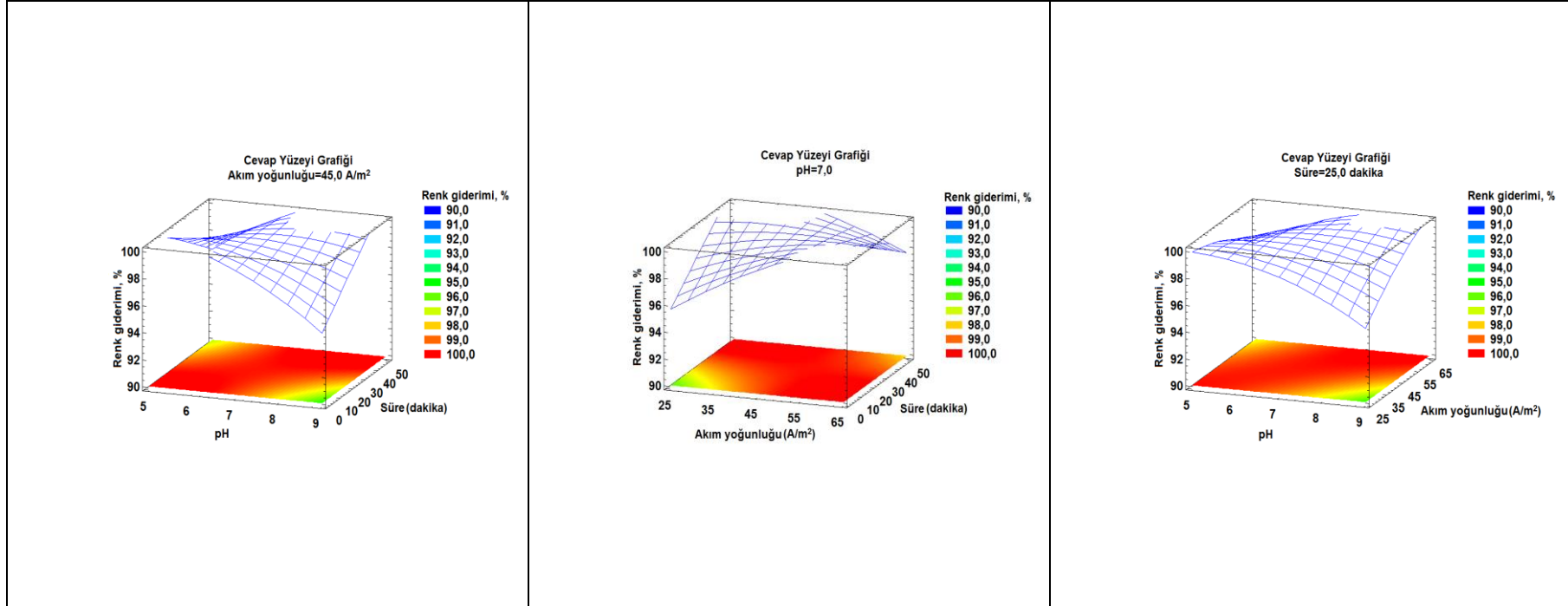
Şekil 6. 4 Fe elektrot kullanılan EC prosesiyle arıtılan süt endüstrisi atıksuları için cevap yüzeyi model grafikleri a) pH ve elektroliz süresinin AKM giderimi üzerine etkisi b) Akım yoğunluğu ve elektroliz süresinin AKM giderimi üzerine etkisi c) pH ve akım yoğunluğunun AKM giderimi üzerine etkisi



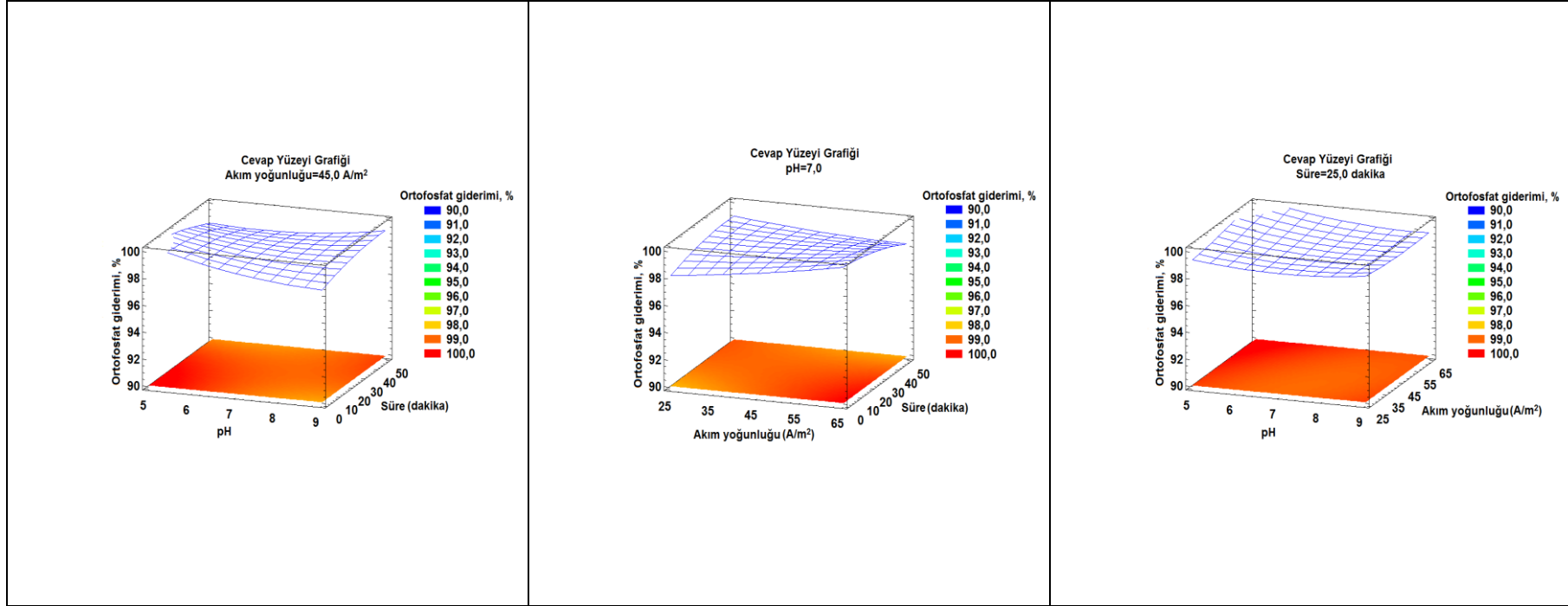
Şekil 6. 5 Fe elektrot kullanılan EC prosesiyle arıtılan süt endüstrisi atıksuları için cevap yüzey model grafikleri a) pH ve elektroliz süresinin bulanıklık giderimi üzerine etkisi b) Akım yoğunluğu ve elektroliz süresinin bulanıklık giderimi üzerine etkisi c) pH ve akım yoğunluğunun bulanıklık giderimi üzerine etkisi



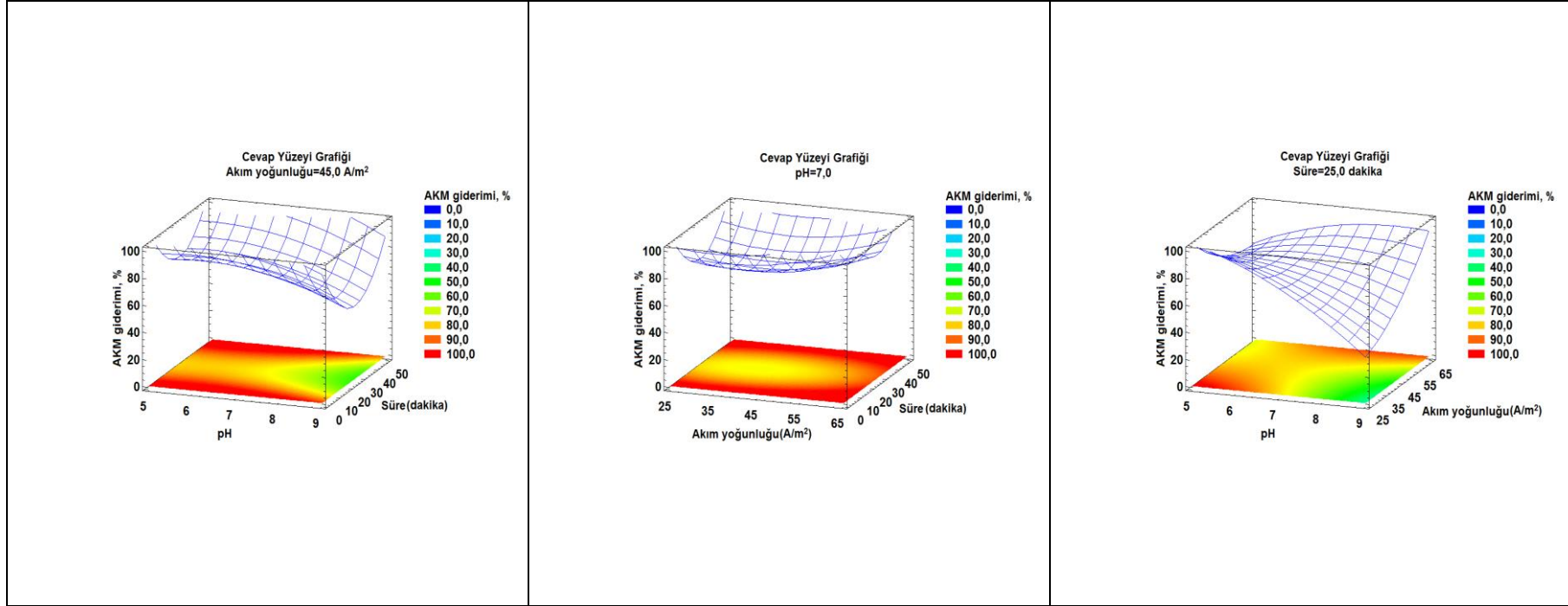
Şekil 6. 6 Al elektrot kullanılan EC prosesiyle arıtılan süt endüstrisi atıksuları için cevap yüzey model grafikleri a) pH ve elektroliz süresinin KOİ giderimi üzerine etkisi b) Akım yoğunluğu ve elektroliz süresinin KOİ giderimi üzerine etkisi c) pH ve akım yoğunluğunun KOİ giderimi üzerine etkisi



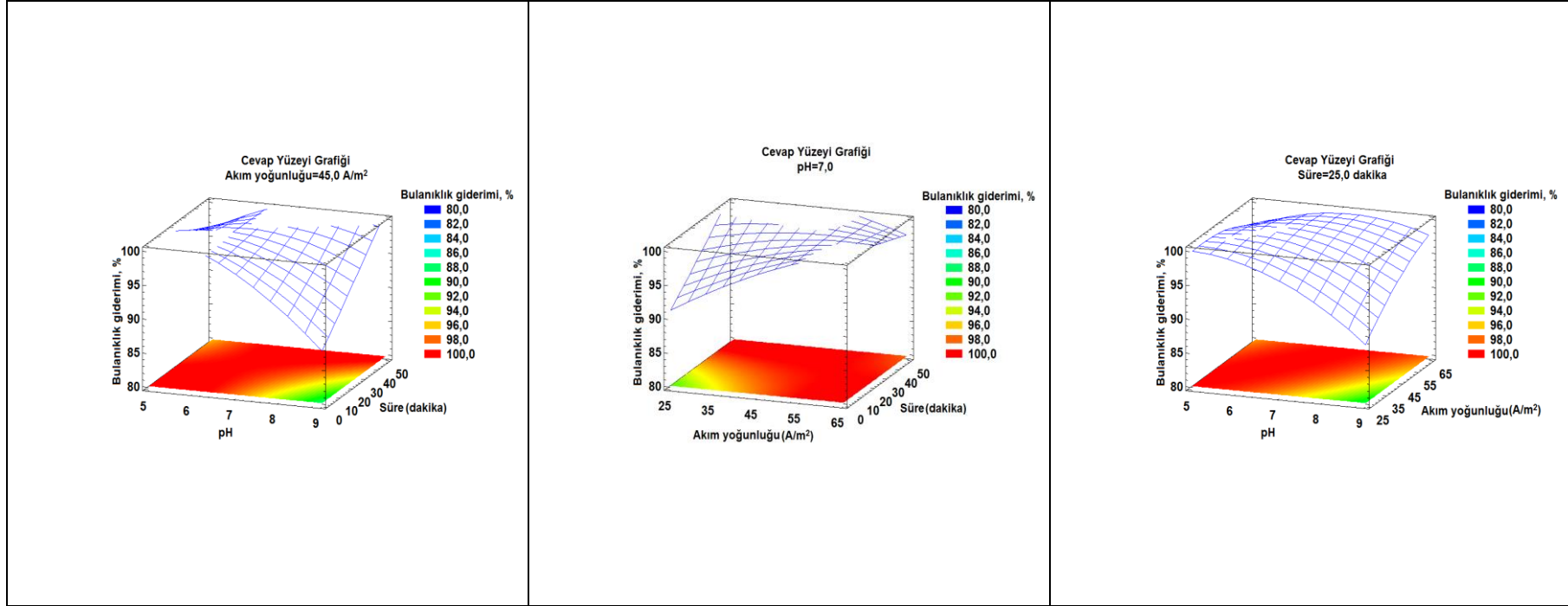
Şekil 6. 7 Al elektrot kullanılan EC prosesiyle artırılan süt endüstrisi atıksuları için cevap yüzey model grafikleri a) pH ve elektroliz süresinin renk giderimi üzerine etkisi b) Akım yoğunluğu ve elektroliz süresinin renk giderimi üzerine etkisi c) pH ve akım yoğunluğunun renk giderimi üzerine etkisi



Şekil 6. 8 Al elektrot kullanılan EC prosesiyle arıtılan süt endüstrisi atıksuları için cevap yüzey model grafikleri a) pH ve elektroliz süresinin ortofosfat giderimi üzerine etkisi b) Akım yoğunluğu ve elektroliz süresinin ortofosfat giderimi üzerine etkisi c) pH ve akım yoğunluğunun ortofosfat giderimi üzerine etkisi



Şekil 6. 9 Al elektrot kullanılan EC prosesiyle arıtılan süt endüstrisi atıksuları için cevap yüzey model grafikleri a) pH ve elektroliz süresinin AKM giderimi üzerine etkisi b) Akım yoğunluğu ve elektroliz süresinin AKM giderimi üzerine etkisi c) pH ve akım yoğunluğunun AKM giderimi üzerine etkisi



Şekil 6. 10 Al elektrot kullanılan EC prosesiyle arıtılan süt endüstrisi atıksuları için cevap yüzey model grafikleri a) pH ve elektroliz süresinin bulanıklık giderimi üzerine etkisi b) Akım yoğunluğu ve elektroliz süresinin bulanıklık giderimi üzerine etkisi c) pH ve akım yoğunluğunun bulanıklık giderimi üzerine etkisi

6.3 Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisiyle (FT-IR) çamur karakterizasyonu

FT-IR analizi ile elde edilen bilgiler numune yüzeyinde yer alan fonksiyonel grupların konsantrasyonlarının çok düşük olmasından dolayı sınırlıdır fakat absorpsiyon bantları ve pikleri bazı fonksiyonel grupların varlığına işaret etmektedir. Süt endüstrisi atıksuyunun elektrokoagülasyonla arıtılması sonucu ortaya çıkan çamur karakterizasyonu ve absorpsiyon pik değerleri Çizelge 6.16'da verilmiştir. Üretilen çamurun FT-IR spektrumuna bakıldığında 3271 cm^{-1} 'de elde edilen pik, bağlı veya bağlı olmayan hidroksil gruplarını temsil etmektedir. 2926 ve 2853 cm^{-1} 'de gözlemlenen pikler metilen grubunun varlığını özellikle de yağların çamur içeriğindeki varlığını işaret etmektedir. 1630 ve 1563 cm^{-1} 'de tesbit edilen pikler ise sırasıyla protein amid I ve protein amid II gruplarını temsil etmektedir. Çamur spektrumundaki $1150-1030\text{ cm}^{-1}$ aralığında yer alan 1115 cm^{-1} merkezli temel absorpsiyon numunede karbonhidrat varlığını göstermektedir. Benzer olarak $800-1000\text{ cm}^{-1}$ aralığında bulunan 891 cm^{-1} ve 980 cm^{-1} merkezli bant da karbonhidrat varlığını temsil etmektedir. 704 cm^{-1} 'de gözlemlenen pik proteinleri, 1100 ve 1018 cm^{-1} 'de elde edilen bantlar ise Al-OH ve Fe-OH bileşiklerini ifade eder. 3271 cm^{-1} 'de gözlemlenen kısa bant ise çamur içeriğindeki nemin varlığını işaret etmektedir. Bu sonuçlar bir bütün olarak göz önüne alındığında, kolloidal ve askıda maddelerin stabilliği bozulduktan sonra oluşan alüminyum hidroksit ve demir hidroksit bileşiklerinin üzerine adsorbe oldukları şeklinde değerlendirilebilir. FT-IR analizi sonuçlarına göre elektrokoagülasyon prosesi esnasında oluşan çamurun alüminyum hidroksit ve demir hidroksit bileşiklerinin yanında süt bileşenleri de mevcuttur. Bu sonuçlar, Bensadok vd. tarafından [68] de yapılan çalışma ile uyum içindedir.

Çizelge 6. 16 Süt endüstrisi atıksuyunun EC prosesi ile arıtımı sonucu ortaya çıkan çamurun karakterizasyonu

Dalga boyu (cm ⁻¹)	Grup	Nitelik
3271	O-H	Hidroksil grubu
2926	Metilen(-CH ₂)	Ağırlıklı olarak yağ
2853	Metilen(-CH ₂)	Ağırlıklı olarak yağ
1630	Karbonil (C-O)	Protein (amid I)
1563	N-H	Protein (amid II)
1115	C-O C-C C-O-C	Karbonhidrat
980	Karbonhidrat zinciri	Karbonhidrat
891	Karbonhidrat zinciri	Karbonhidrat
704	Amid (N-H)	Protein

6.4 İşletme Maliyeti

İşletme maliyeti herhangi bir atıksu arıtma prosesinin uygulanabilirliğinin fizibilitesini yapmak için kullanılan en önemli parametrelerden biridir. İşletme maliyeti aşağıda verilen eşitlik yardımıyla hesaplanır [69], [70].

$$\text{İşletme maliyeti} = aC_{\text{enerji}} + bC_{\text{elektrot}} + cC_{\text{kimyasal}} \quad (6.11)$$

Eşitlikte C_{enerji} değeri enerji sarfiyatını (kWh/m³), C_{elektrot} değeri elektrot sarfiyatını (kg/m³) ve C_{kimyasal} değeri atıksuyun arıtılmasında kullanılan kimyasal sarfiyatını (kg/m³) göstermektedir. İşletme maliyeti çalışan ücreti, bakım ve diğer sabit giderleri de içermektedir. İkincil maliyet öğeleri çoğunlukla elektrot materyalinin tipinden bağımsızdır [71]. Bu çalışmada, enerji ve elektrot materyali maliyeti ana maliyet öğeleri olarak ele alınmıştır. Maliyet analizi hesaplamaları, kg KOİ giderimi başına kWh olarak yapılmıştır.

EC prosesindeki ana işletme maliyeti bileşeni Cenerji olarak ifade edilen elektriksel enerji sarfiyatıdır. Elektriksel enerji sarfiyatı Denklem (6.12) kullanılarak hesaplanmaktadır [72].

$$C_{enerji} = \frac{U \times i \times t_{EC}}{V} \quad (6.12)$$

Bu eşitlikte, Celettrot enerji sarfiyatını (kWh/m³), U uygulanan voltajı(V), I akım yoğunluğunu(A), t elektrokoagülasyon süresini(saat) ve V arıtılan atıksu miktarını(L) ifade etmektedir.

Çözünen elektrot miktarı teorik olarak Faraday kanunları kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$C_{elektrot} = \frac{i \times t_{EC} \times M_w}{z \times F \times V} \quad (6.13)$$

Bu denklemde, C (g/L) elektroliz hücresindeki demir yada alüminyum konsantrasyonu, I akım yoğunluğunu(A), t elektrokoagülasyon süresini (saat), M anodun moleküler ağırlığı (g/mol), Z kimyasal eşdeğerliği, F değeri Faraday sabitini (96500 C/mol) ve V arıtılan atıksu hacmini(L) ifade etmektedir.

Reaksiyon süresi ve akım yoğunluğu, proses performansı ve işletme maliyeti üzerinde benzer etkiler göstermektedirler. Süt endüstrisi atıksuyunun arıtılmasında Fe elektrotlar kullanıldığında işletme maliyeti 0,54 €/m³, Al elektrotlar kullanıldığında işletme maliyeti 0,42 €/m³ olarak hesaplanmıştır. Enerji ve elektrot sarfiyatı demir elektrotlar kullanılarak uygulanan EC prosesinde, alüminyum elektrotlar kullanılarak uygulanan EC prosesinden daha yüksek olarak bulunmuştur.

SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında süt ve süt ürünleri endüstrisi atıksularının Fe ve Al elektrotlar kullanarak elektrokoagülasyon prosesi ile arıtımının uygulanabilirliği araştırılmıştır. Çalışma sonuçları, elektrokoagülasyon prosesinin süt endüstrisi atıksuyundan düşük enerji sarfiyatı ile yüksek kirletici giderim verimi sağlamak için, uygun bir arıtma alternatifi olduğunu göstermiştir. Kirletici giderim verimleri giriş pH, akım yoğunluğu ve elektroliz süresinin bir fonksiyonudur. Cevap yüzey yöntemi, süt endüstrisi atıksularında elektrokoagülasyon prosesinin uygulanmasında başarılı bir şekilde uygulanmıştır. KOİ, renk, ortofosfat, AKM ve bulanıklık giderimi üzerindeki giriş pH'ı, akım yoğunluğu ve elektroliz süresi değişkenlerinin etkileri araştırılmıştır. Üç işletme parametresi, giriş parametreleri olarak; pH: 5-9, J: 25-65 A/m², t: 5-45 dakika aralıklarında; KOİ, renk, ortofosfat, AKM ve bulanıklık giderim oranları ise sistem hedefleri olarak belirlenmiştir. Çalışmada uygulanan model deneysel veriler ile model yardımıyla tahmin edilen değerler arasında yüksek korelasyon olduğunu göstermiştir. Varyans analizinin yüksek korelasyon katsayısı değerleri vermesi ikinci dereceden modelin deneysel veriler ile yeterli düzeyde uyum içinde olduğunu göstermektedir. Optimum şartlar altında Fe elektrotlar kullanılarak sağlanan giderim verimleri, KOİ için %98,91 ve ortofosfat için % 98,24, Al elektrotlar kullanılarak sağlanan giderim verimleri, KOİ için %98,84 ve ortofosfat için %99,78 olarak belirlenmiştir. Optimum şartlarda elektrik ve elektrot sarfiyatının her ikisini de içeren işletme maliyeti, Fe elektrot için, 0,54 €/m³, Al elektrot için 0,42 €/m³ olarak tesbit edilmiştir. Cevap yüzey grafikleri ve deneysel ve tahmin edilen değerlerdeki düşük hata oranları modellerden elde edilen değerler ile gerçek veriler arasındaki uyumun göstergesidir. Yapılan

çalışmalarda, optimum şartlarda EC ıkış suyu pH değerleri SKKY deşarj standartlarını tam olarak sağlayamadığı görülmektedir. Optimum şartlarda pH=7'de uygulanan EC prosesi öncesinde, nötralizasyon işlemi ile pH=5 değerine çekilmesi ile EC ıkış suyu pH standartları SKKY'ne uygun olarak sağlanacaktır. Sonuçlar, cevap yüzey yönteminin, süt endüstrisi atıksuyuna uygulanan EC prosesinin işletme şartlarının optimizasyonu için etkili bir yöntem olduğunu doğrulamaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Çelik, A., (2011). Süt Endüstrisi Atıksularının Arıtma Alternatifleri, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- [2] Kılıç, A., (2006). Süt Endüstrisi Atıksularının Arıtımında Ardışık Kesikli Reaktör (SBR)'de Hareketli Biofilm Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [3] Hepşen, R., (2010). Süt Endüstrisi Atıksularının Membran Teknolojisi ile Geri Kazanımı ve Deneysel Tasarım Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] Chandan, R.C., (1997). Dairy-Based Ingredients, Eagan Press, Minnesota.
- [5] Ekdal, A., (2000). Süt ve Süt Endüstrisi Atıksularının Kimyasal Arıtılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [6] Chandan, R.C., Kilara, A. ve Shah, N., (2008). Dairy Processing and Quality Assurance, First Edition, Wiley-Blackwell, Massachusetts.
- [7] Britz, T.J. ve Robinson, R.K., (2008). Advanced Dairy Science and Technology, First Edition, Wiley-Blackwell, Oxford.
- [8] Kushwaha, J.P., Srivastava. V.C. ve Mall, I.D., (2011). "An Overview of Various Technologies for the Treatment of Dairy Wastewaters", Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 51:442-452.
- [9] Demirel, B., Yenigün, O. ve Onay, T.T., (2005). "Anaerobic Treatment of Dairy Wastewaters: A Review", Process Biochemistry, 40:2583-2595.
- [10] Tınkır, E., (2010). Beyaz Peynir ve Yoğurt Üretimi Atıksularının Yukarı Akışlı Ardışık Anaerobik Çamur Yatağı Reaktörlerle Arıtımı, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [11] Tünay, O., (1996). Endüstriyel Kirlenme Kontrolü, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [12] Pala, A. ve Sponza D., (1994). "Bir Süt Endüstrisi Atıksularının Karakterizasyonu ve Arıtma Sisteminin İncelenmesi", Su Kirlenmesi Kontrolü Dergisi, 4(3):119-125.

- [13] Şengil, İ.A. ve Özacar, M., (2006). "Treatment of Dairy Wastewaters by Electrocoagulation Using Mild Steel Electrodes", *Journal of Hazardous Materials*, 137:1197-1205.
- [14] Baskaran, K., Palmowski, L.M. ve Watson, B.M., (2000). "Wastewater Reuse and Treatment Options for the Dairy Industry", *Water Science and Technology*, 3:85-91.
- [15] Danalewich, J.R., Papagiannis, T.G., Belyea, R.L., Tumbleson, M.E. ve Raskin, L., (1998). "Characterization of Dairy Waste Streams, Current Treatment Practices and Potential for Biological Nutrient Removal", *Water Research*, 32:3555-3568.
- [16] Omil, F., Garrido, J.M., Arrojo, B. ve Mendez, R., (2003). "Anaerobic Filter Reactor Performance for the Treatment of Complex Dairy Wastewater at Industrial Scale", *Water Research*, 37:4099-4108.
- [17] Samsunlu, A., (2011). *Atık Suların Arıtılması*, 3. Baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [18] Carta-Escobar, F., Pereda-Marin, J., Alvarez-Mateos, P., Romero-Guzman, F., Duran-Barrantes, M.M. ve Barriga-Mateos, F., (2004). "Aerobic Purification of Dairy Wastewater in Continuous Regime: Part I: Analysis of the Biodegradation Process in Two Reactor Configurations", *Biochemical Engineering Journal*, 21:183-191.
- [19] T.C. Resmi Gazete, Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği. (25687), 31.12.2004, 51.
- [20] World Bank Group, (1998). *Pollution Prevention and Abatement Handbook*, Washington.
- [21] Pletcher, D. ve Walsh F.C., (1990). *Industrial Electrochemistry*, Second Edition, The University Press, Cambridge.
- [22] Uğurlu, M., Gürses, A., Doğar, Ç. ve Yalçın, M., (2008). "The Removal of Lignin and Phenol from Paper Mill Effluents by Electrocoagulation", *Journal of Environmental Management*, 87(3):420-428.
- [23] Öztürk, İ., Timur H. ve Koşkan, U., (2005). *Atıksu Arıtımının Esasları*, T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı Yayınları, Ankara.
- [24] Danacı, N., (2012). *Elektrokoagülasyon Prosesi ile Kağıt Endüstrisi Atıksularının Arıtılması*, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- [25] Emamjomeh, M. M. ve Sivakumar, M., (2009). "Review of Pollutants Removed by Electrocoagulation and Electrocoagulation/flotation Processes", *Journal of Environmental Management*, 90(5):1663-1679.
- [26] Kumar, P.R., Chaudhari, S., Khilar, K.C. ve Mahajan, S.P., (2004). "Removal of Arsenic from Water by Electrocoagulation", *Chemosphere*, 55(9):1245-1252.
- [27] Kurt, U., (2007). *Fenton ve Elektrokimyasal Yöntemlerle Evsel Atıksuların Arıtılabilirliğinin Araştırılması*, Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [28] Ghosh, D., Solanki, H. ve Purkait, M.K., (2008). "Removal of Fe (II) from Tap Water by Electrocoagulation Technique", *Journal of Hazardous Materials*, 155:135-143.
- [29] Kandemir, A., (2011). *Peynir Altı Suyunun Elektrokoagülasyon Yöntemi ile Arıtımı*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [30] Uğurlu, M., (2004). "Elektrokoagülasyon Yöntemi ile Kağıt Atık Sularında Bazı İnorganik Bileşenlerin Giderilmesi", *G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 17(3):85-99.
- [31] Aygün, A., (2012). *Tekstil Endüstrisi Reaktif ve Dispers Boya Banyo Atıksularının Elektrokoagülasyon Prosesi ile Arıtımı: Yanıt Yüzey Yöntemi ile Optimizasyon*, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [32] Mollah, M.Y.A., Morkovsky, P., Gomes, J.A.G., Kesmez, M., Parga, J. ve Cocke, D.L., (2004). "Fundamentals, Present and Future Perspectives of Electrocoagulation", *Journal of Hazardous Materials*, 144:199–210.
- [33] Mollah, M.Y.A., Schennach, R., Parga, J.R. ve Cocke, D.L., (2001). "Electrocoagulation (EC)-Science and Applications", *Journal of Hazardous Materials*, 84(1):29–41.
- [34] Holt, P.K., (2002). *Electrocoagulation: Unravelling and Synthesising the Mechanisms Behind A Water Treatment Process*, Doktora Tezi, University of Sydney, Sidney.
- [35] Chen, X., Chen, G. ve Yue, L.P., (2000). "Separation of Pollutants from Restaurant Wastewater by Electrocoagulation", *Separation and Purification Technology*, 19:65-76.
- [36] Eyvaz, M., (2006). *Farklı Demir ve Alüminyum Elektrot Bağlantıları ile Tekstil Atıksularının Elektrokoagülasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [37] Şengil, İ.A. ve Özacar, M., (2009). "The Decolorization of C.I. Reactive Black 5 in Aqueous Solution by Electrocoagulation Using Sacrificial Iron Electrodes", *Journal of Hazardous Materials*, 161:1369-1376.
- [38] Şanlı, N., (2006). *Deri Sanayi Atıksularının Kimyasal Koagülasyon ve Elektrokoagülasyon ile Arıtımı*, Yüksek Lisans Tezi, G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [39] Eyvaz, M., Bayramoğlu, M. ve Kobya, M., (2006). "Tekstil Endüstrisi Atıksularının Elektrokoagülasyon ile Arıtılması: Teknik ve Ekonomik Değerlendirme", *İTÜ Dergisi*, 16(1-3):55-65.
- [40] Gengeç, E., Kobya, M., Demirbaş, E., Akyol, A. ve Oktor, K., (2012). "Optimization of Baker's Yeast Wastewater Using Response Surface Methodology by Electrocoagulation", *Desalination*, 286:200-209.
- [41] Chavalparit, O. ve Ongwandee, M., (2009). "Optimizing Electrocoagulation Process for the Treatment of Biodiesel Wastewater Using Response Surface Methodology", *Journal of Environmental Sciences*, 21:1491-1496.

- [42] Prasad, R.K., Kumar, R.R. ve Srivastava, S.N., (2007). "Design of Optimum Response Surface Experiments for Electro-Coagulation of Distillery Spent Wash", *Water, Air and Soil Pollution*, 191:5-13.
- [43] Kobya, M., Demirbaş, E., Bayramoğlu, M. ve şensoy, M.T., (2010). "Optimization of Electrocoagulation Process for the Treatment of Metal Cutting Wastewaters with Response Surface Methodology", *Water, Air and Soil Pollution*, 215:399-410.
- [44] Ölmez, T., (2009). "The Optimization of Cr(VI) Reduction and Removal by Electrocoagulation Using Response Surface Methodology", *Journal of Hazardous Materials*, 162:1371-1378.
- [45] Espinoza-Quinones, F.R., Modenes, A.N., Theodoro, P.S., Palacio, S.M., Trigueros, D.E.G., Borba, C.E., Abugderah, M. ve Kroumov, A.D., (2012). "Optimization of the Iron Electro-Coagulation Process of Cr, Ni, Cu, and Zn Galvanization By-Products by Using Response Surface Methodology", *Separation Science and Technology*, 47:688-699.
- [46] Mondal, B., Srivastava, V.C. ve Mall, I.D., (2012). "Electrochemical Treatment of Dye-bath Effluent by Stainless Steel Electrodes: Multiple Response Optimization and Residue Analysis", *Journal of Environmental Science and Health*, 47(13):2040-2051.
- [47] Zodi, S., Potier, O., Lapicque, F. ve Leclerc, J.P., (2010). "Treatment of the Industrial Wastewaters by Electrocoagulation: Optimization of Coupled Electrochemical and Sedimentation Processes", *Desalination*, 261:186-190.
- [48] Tir, M. ve Moulai-Mostefa, N., (2008). "Optimization of Oil Removal from Oily Wastewater by Electrocoagulation Using Response Surface Method", *Journal of Hazardous Materials*, 158(1):107-115.
- [49] Kushwaha, J.P., Srivastava, V.C. ve Mall, I.D., (2010). "Organics Removal from Dairy Wastewater by Electrochemical Treatment and Residue Disposal", *Separation and Purification Technology*, 76(2):198-205.
- [50] Bhatti, M.S., Reddy, A.S. ve Thukral, A.K., (2009). "Electrocoagulation Removal of Cr(VI) from Simulated Wastewater Using Response Surface Methodology", *Journal of Hazardous Materials*, 172:839-846.
- [51] Bhatti, M.S., Reddy, A.S., Kalia, R.K. ve Thukral, A.K., (2010). "Modeling and Optimization of Voltage and Treatment Time for Electrocoagulation Removal of Hexavalent Chromium", *Desalination*, 269:157-162.
- [52] Zaroual, Z., Chaair, H., Essadki, A.H., El Ass, K. Ve Azzi, M., (2009). "Optimizing the Removal of Trivalent Chromium by Electrocoagulation Using Experimental Design", *Chemical Engineering Journal*, 148:488-495.
- [53] APHA, (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, APHA, 21. Edition, Washington.
- [54] Koç, B. ve Kaymak Ertekin, F., (2009). "Yanıt Yüzey Yöntemi ve Gıda İşleme Uygulamaları", *Gıda Dergisi*, 35(1):1-8.

- [55] Eren, İ., (2004). Patateslerin Osmotik Dehidrasyonunun "Response Surface" Metodu Kullanılarak Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [56] Bajpai, S., Gupta, S.K., Dey, A., Jha, M.K., Bajpai, V., Joshi, S. ve Gupta, A., (2012). "Application of Central Composite Design Approach for Removal of Chromium (VI) from Aqueous Solution Using Weakly Anionic Resin: Modelling, Optimization, and Study of Interactive Variables", Journal of Hazardous Materials, 227-228:436-444.
- [57] Basir, M.J.K., Aziz, H.A., Aziz, S.Q. ve Amr, S.A., (2012). "An Overview of Wastewater Treatment processes Optimization Using Response Surface Methodology (RSM)", The 4th International Engineering Conference, 15-16 October 2012, Gaza.
- [58] Bradley, N., (2007). The Response Surface Methodology, Yüksek Lisans Tezi, Indiana University South Bend, IUSB Master of Science in Applied Mathematics and Computer Science, South Bend.
- [59] Subaşı, A., (2010). Yanıt Yüzey Yöntemi Yardımı ile Isı Değiştirici Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [60] Oba, Ş., (2012). Ekstraksiyon Koşulları Optimize Edilmiş Bazı Baharat Ekstraktlarının Köftenin Depolama Stabilitesi Üzerine Etkilerinin Cevap Yüzey Metodu Kullanılarak Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- [61] Myers, R.H., Montgomery, D.C., (1995). Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, Second Edition, John Wiley and Sons, New York.
- [62] Ürküt, Z., (2007). Kalsiyum Aljinatta İmmobilize Edilmiş *Aureobasidium pullulans* P56 Hücreleri ile Pullulan Üretiminin Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [63] Kumar, M., Ponselvan, F.I.A., Malviya, J.R., Srivastava, V.C. ve Mall, I.D.,(2009). "Treatment of Bio-digester Effluent by Electrocoagulation Using Iron Electrodes", Journal of Hazardous Materials, 165:345-352.
- [64] Amani-Ghadima, A.R., Aber, S., Olad, A. ve 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, 64:68-78.
- [65] Ravikumar, K., Krishnan, S., Ramalingam S. ve Balu, K., (2007). "Optimization of Process Variables by the Application of Response Surface Methodology for Dye Removal Using a Novel Adsorbent", Dyes and Pigments, 72(1):66-74.
- [66] Jing, X., Cao, Y., Zhang, X., Wang, D., Wu, X. ve Xu, H., (2011). "Biosorption of Cr (VI) from Simulated Wastewater Using a Cationic Surfactant Modified Spent Mushroom", Desalination, 269:120-127.

- [67] Cronje, K.J., Chetty, K., Carsky, M., Sahu, J.N. ve Meikap, B.C., (2011). "Optimization of Chromium(VI) Sorption Potential Using Developed Activated Carbon from Sugarcane Bagasse with Chemical Activation by Zinc Chloride", *Desalination*, 275:276-284.
- [68] Bensadok, K., Benammar, S., Lopicque, F. ve Nezzal, G., (2007). "Electrocoagulation of Cutting Oil Emulsions Using Aluminium Plate Electrodes", *Journal of Hazardous Materials*, 152:423-430.
- [69] Bayramoğlu, M., Eyvaz, M. ve Kobya, M., (2007). "Treatment of The Textile Wastewater by Electrocoagulation: Economical Evaluation", *Chemical Engineering Journal*, 128(2-3):155-161.
- [70] Sridhar, R., Sivakumar, V., Immanuel, V.P. ve Maran, J.P., (2011). "Treatment of Pulp and Paper Industry Bleaching Effluent by Electrocoagulant Process", *Journal of Hazardous Materials*, 186:1495-1502.
- [71] Bayramoğlu, M., Kobya, M., Can, O.T. ve Sözbir, M., (2004). "Operating Cost Analysis of Electrocoagulation of Textile Dye Wastewater", *Separation and Purification Technology*, 37(2):117-125.
- [72] El-Ashtoukhy, E.-S.Z., Amin, N.K. ve Abdelwahab, O., (2009). " Treatment of Paper Mill Effluents in Batch-stirred Electrochemical Tank Reactor", *Chemical Engineering Journal*, 146(2):205-210.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mustafa Eren SABUNCU
Doğum Tarihi ve Yeri : 21.08.1988 İSTANBUL
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : mustafaeren5@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Çevre Mühendisliği	Kocaeli Üniversitesi	2011
Lise	Fen	Ahmet Sani Gezici Lisesi	2005

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2012	Doğam Geri Dönüşüm Plastik İnşaat Turizm Nakliyat ve Tic. Ltd. Şti.	Çevre Mühendisi