

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



**YONGA LEVHA ENDÜSTRİSİ ATIK SULARININ KİMYASAL VE
ELEKTROOKSİDASYON YÖNTEMLERİYLE ARITIMI VE
OPTİMİZASYONU**

YELİZ SÜZEN

DOKTORA TEZİ

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ahmet GÜNEY (Tez Danışmanı)**
 Prof. Dr. Hüseyin SELÇUK
 Prof. Dr. Doğan KARADAĞ
 Prof. Dr. İsmail TOSUN
 Dr. Öğr. Üyesi Elif ÖZMETİN

BALIKESİR, ŞUBAT - 2023

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Yonga Levha Endüstrisi Atık Sularının Kimyasal ve Elektrokoksiasyon Yöntemleriyle Arıtımı ve Optimizasyonu**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

Beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Yeliz SÜZEN

ÖZET

**YONGA LEVHA ENDÜSTRİSİ ATIK SULARININ KİMYASAL VE
ELEKTROOKSİDASYON YÖNTEMLERİYLE ARITIMI VE OPTİMİZASYONU
DOKTORA TEZİ
YELİZ SÜZEN
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. AHMET GÜNAY)**

BALIKESİR, ŞUBAT - 2023

Bu çalışmada yonga levha endüstrisi atık sularının kimyasal ön arıtımı sonrası elektrokoksidasyon (EO) prosesi ile hibrit arıtımı incelenmiştir. Koagülasyon prosesi için Flo30, demir (III) klorür ve anyonik patates nişastası (APN) kullanılmıştır. Kesikli modda gerçekleştirilen EO prosesinde ise anot elektrot malzemesi olarak grafit ve karışık metal oksit (KMO) kaplama elektrotlar, katot olarak da paslanmaz çelik kullanılmıştır. Yanıt yüzey yöntemi (YYY) ve yapay sinir ağları (YSA) teknikleri ile sonuçlar optimize edilmiştir. Demir (III) klorür/APN kullanılarak yapılan kimyasal ön arıtmada başlangıç pH (6, 7, 8), koagülant dozu (2, 3, 4 g/L), flokülant dozu (10, 20, 30 ml/L) olarak seçilmiş; KOİ (Kimyasal Oksijen İhtiyacı), AKM (Askıda Katı Madde) ve renk giderim verimleri sırasıyla %70,9, %98,36 ve %97,51 olurken, ortalama maliyet 47,36 USD/m³ olarak hesaplanmıştır. Flo30/APN kullanılarak yapılan ön arıtmada başlangıç pH (5, 6,5, 8), koagülant dozu (6, 9, 12 ml/L), flokülant dozu (10, 20, 30 ml/L) olarak seçilmiş; KOİ, AKM ve renk giderim verimleri %56,83, %96,07 ve %83,2 olarak olurken, ortalama maliyet 17,79 USD/m³ olarak hesaplanmıştır. EO prosesinde her iki anot için bağımsız değişkenler ve seviyeleri; atık su başlangıç pH'sı (4, 6, 8), sodyum sülfat konsantrasyonu (2, 3, 4 g/L), akım (2, 3,5, 5 A), süre (60, 120, 180 dk) olmuştur. Kimyasal ön arıtım sonrası grafit/paslanmaz çelik elektrotlarla yapılan deneysel çalışmaların maksimum giderim şartlarında KOİ ve renk giderim verimleri sırasıyla %90,41, %96,52 ve ortalama maliyet 76,46 USD/m³ olurken, KMO/paslanmaz çelik elektrotlarla EO sonucu maksimum giderim şartlarında KOİ ve renk giderim verimleri sırasıyla %50,05, %96,15 ve ortalama maliyet değeri 59,53 USD/m³ olarak elde edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Yonga levha atık suyu, atık su arıtımı, koagülasyon, elektrokoksidasyon, deney tasarımı, optimizasyon

ABSTRACT

TREATMENT OF PARTICLE BOARD INDUSTRY WASTEWATER BY CHEMICAL AND ELECTROOXIDATION METHODS AND OPTIMIZATION

PH. D THESIS

YELİZ SÜZEN

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

ENVIRONMENTAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. AHMET GÜNAY)

BALIKESİR, FEBRUARY - 2023

In this study, the hybrid treatment of particle board industry wastewater with electrooxidation (EO) processes after chemical pretreatment was investigated. Flo30, iron (III) chloride and anionic potato starch (APS) were used for the coagulation process. In the EO process carried out in batch mode, graphite and mixed metal oxide (MMO) coated electrodes as the anode electrode material, stainless steel as the cathode were used. The results are optimized with response surface method (RSM) and artificial neural networks (ANN) techniques. In chemical pretreatment using iron (III) chloride/APN; initial pH (6, 7, 8), coagulant dose (2, 3, 4 g/L), flocculant dose (10, 20, 30 ml/L) were selected; COD (Chemical Oxygen Demand), TSS (Total suspended solids) and color removal efficiencies were 70,9%, 98,36% and 97,51%, respectively, while the average cost was calculated as 47,36 USD/m³. In chemical pretreatment using Flo30/APN; initial pH (5, 6,5, 8), coagulant dose (6, 9, 12 ml/L), flocculant dose (10, 20, 30 ml/L) were selected; while the COD, TSS and color removal efficiencies were 56,83%, 96,07% and 83,2%, the average cost was calculated as 17,79 USD/m³. Independent variables and levels for both anodes in the EO process were; initial pH (4, 6, 8), sodium sulfate concentration (2, 3, 4 g/L), current (2, 3,5, 5 A), time (60, 120, 180 min). In the maximum removal conditions of the experimental studies performed with graphite/stainless steel electrodes after chemical pretreatment, the COD and color removal efficiencies were 90,41% and 96,52%, respectively, and the average cost was 76,46 USD/m³. In the maximum removal conditions of the experimental studies performed with KMO/stainless steel electrodes after chemical pretreatment, the COD and color removal efficiencies were 50,05% and 96,15%, respectively, and the average cost value was 59,53 USD/m³.

KEYWORDS: Particle board wastewater, wastewater treatment, coagulation, electrooxidation, experimental design, optimization

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ.....	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	x
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	3
2.1 Yonga Levha Endüstrisi.....	3
2.1.1 Yonga Levhaların Sınıflandırılması.....	4
2.1.2 Yonga Levha Üretim Prosesleri	5
2.1.3 Dünya ve Türkiye’de Yonga Levha Üretimi	9
2.1.4 Yonga Levha Endüstrisi Atık Sularının Özellikleri.....	14
2.1.5 Yonga Levha Endüstrisi Atık Suların Arıtımı	16
2.2 Odun Hammaddesi Kullanılan Endüstriyel Atık Suların Arıtım Yöntemleri.....	18
2.2.1 Fizikokimyasal Arıtım	18
2.2.1.1 Kimyasal Koagülasyon/ Flokülasyon.....	18
2.2.1.2 Adsorpsiyon/İyon Değişimi	21
2.2.1.3 Fotokatalitik Oksidasyon/Fenton/Ozonlama	23
2.2.1.4 Membran Filtrasyon	24
2.2.2 Biyolojik Arıtım.....	25
2.2.3 Elektrokimyasal Arıtım.....	26
2.2.3.1 Genel Elektrokimyasal Kavramlar	26
2.2.3.2 Elektrooksidasyon	27
2.2.3.3 Elektrokoagülasyon	35
2.2.3.4 Elektrofenton	36
2.2.3.5 Elektrofotasyon	37
2.3 Deneysel Tasarım ve Optimizasyon Metotları	37
2.3.1 Yanıt Yüzey Yöntemi	38
2.3.2 Yapay Sinir Ağları	42
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	45
3.1 Materyaller	45
3.1.1 Atık Su Karakterizasyonu	45
3.1.2 Kullanılan Cihaz ve Ekipmanlar	46
3.1.3 Kullanılan Kimyasallar	47
3.2 Yöntem.....	47
3.2.1 Deneysel Tasarım.....	47
3.2.1.1 YYY İle Kimyasal Ön Arıtım Deney Tasarımı.....	47
3.2.1.2 YSA İle Kimyasal Ön Arıtım Deney Modellenmesi	49
3.2.2 Kimyasal Ön Arıtım Deneylerinin Yürütülmesi	50
3.2.2.1 YYY İle Elektrooksidasyon Prosesi Deney Tasarımı	51
3.2.2.2 YSA İle Elektrooksidasyon Prosesi Deney Modellemesi	52

3.2.3 Elektrooksidasyon Deneylerinin Yürütülmesi	53
3.2.4 Analizler.....	55
3.2.5 Deneysel Hesaplamalarda Kullanılan Eşitlikler.....	59
3.2.5.1 Giderim Verimlerinin Hesaplanması.....	59
3.2.5.2 Enerji Tüketimi ve Maliyetin Hesaplanması.....	59
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	60
4.1 Kimyasal Ön Arıtım Prosesi	60
4.1.1 Demir (III) Klorür- Anyonik Patates Nişastası ile Kimyasal Arıtıma Ait Deney Sonuçları	60
4.1.1.1 KOİ Giderimi Sonuçları	60
4.1.1.2 AKM Giderim Sonuçları	66
4.1.1.3 Renk Giderim Sonuçları.....	70
4.1.2 Ön Arıtım Verileri ile YYY ve YSA Çıktılarının Karşılaştırılması (Demir (III) Klorür ve APN)	76
4.1.3 Flo30-Anyonik Patates Nişastası Kullanımına Ait Deney Tasarımı ve Sonuçları	78
4.1.3.1 KOİ Giderim Sonuçları	78
4.1.3.2 AKM Giderim Sonuçları	82
4.1.3.3 Renk Giderim Sonuçları.....	86
4.1.4 Flo30 veAnyonik Patates Nişastası ile Ön Arıtım Verileri ile YYY ve YSA Çıktılarının Karşılaştırılması	91
4.2 Elektrooksidasyon Prosesi	93
4.2.1 Grafit Anot ile EO Sonrası Deney Sonuçları	94
4.2.1.1 KOİ Giderim Sonuçları	94
4.2.1.2 Renk Giderim Sonuçları.....	100
4.2.2 Grafit Anot ile EO Arıtım Verileri ile YYY ve YSA Çıktılarının Karşılaştırılması	106
4.2.3 Karışık Metal Oksit (KMO) Anot ile EO Sonrası Deney Sonuçları.....	109
4.2.3.1 KOİ Giderim Sonuçları	109
4.2.3.2 Renk Giderim Sonuçları.....	114
4.2.4 KMO Anot ile EO Arıtım Verileri ile YYY ve YSA Çıktılarının Karşılaştırılması	121
4.3 Biyobozunurluk Değişiminin İncelenmesi	125
4.4 Maliyet Hesabı	127
4.4.1 Ön Arıtım Prosesi İçin Maliyet.....	127
4.4.2 Elektrooksidasyon Prosesi için Maliyet.....	128
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	130
6. KAYNAKLAR (IEEE)	133
EKLER	149
EK A: (Değişik:RG-17/12/2022-32046) Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği.....	149
EK B: KMO Elektrot Bilgi Formu	151
EK C: Anyonik Nişasta (Emfloc KA 3 (F 9976)) Güvenlik Bilgi Formu.....	153
EK D: Flo30 Kimyasalı Güvenlik Bilgi Formu	158
ÖZGEÇMİŞ	162

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Yonga levha örnek resim [12].	3
Şekil 2.2: Yonga levha endüstrisine ait genel akış şeması.	6
Şekil 2.3: Yonga levha üretim ünitesi iş akış şeması.	7
Şekil 2.4: Dünya’da yonga levha üretimi [25].	10
Şekil 2.5: Dünya’da yonga levha ihracatı [25].	10
Şekil 2.6: Avrupa Birliği ülkeleri yonga levha ihracatları [25].	11
Şekil 2.7: Türkiye’de yer alan yonga levha fabrikaları ve bulundukları yerler [27].	12
Şekil 2.8: Türkiye’de üretilen levhalar ve miktarları [25].	12
Şekil 2.9: Türkiye’nin ihracat verileri [25].	13
Şekil 2.10: Türkiye’nin ithalat verileri [25].	13
Şekil 2.11: Odun bileşenlerinin sınıflandırılması [30].	14
Şekil 2.12: Bir bitki hücresine ait lignoselüloz yapısı [32].	15
Şekil 2.13: Odun hammaddesinin kullanıldığı endüstriler [34].	16
Şekil 2.14: Yonga levha atık suları arıtma tesisi şeması.	17
Şekil 2.15: Koagülasyon ve flokülasyon mekanizması [51].	20
Şekil 2.16: Adsorpsiyon süreci [60].	22
Şekil 2.17: Fenton prosesi şematik gösterim [69].	23
Şekil 2.18: Lignin polimer boyutunun anaerobik parçalanabilirlik üzerindeki rolü [82].	26
Şekil 2.19: Bir elektrooksidasyon hücresinin şematik gösterimi [89].	28
Şekil 2.20: EO prosesi ile atık su arıtımında farklı proseslerin kombinasyon alternatifleri [84].	30
Şekil 2.21: Elektrokoagülasyon mekanizması şematik gösterim [110].	36
Şekil 2.22: Merkezi kompozit tasarımı bölümler.	39
Şekil 2.23: Örnek bir yapay sinir ağı [128].	43
Şekil 3.1: Kimyasal ön arıtım prosesi için uygulanan tek katmanlı YSA örneği.	49
Şekil 3.2: Kimyasal ön arıtım deney düzeneği (Jar testi).	50
Şekil 3.3: Mekanik karıştırıcı sistem şematik gösterimi.	51
Şekil 3.4: EO prosesi için uygulanan tek katmanlı YSA örneği.	52
Şekil 3.5: Elektrooksidasyon deney düzeneği.	54
Şekil 3.6: Elektrooksidasyon prosesi deney sistemi şematik gösterimi.	54
Şekil 3.7: Deneylerin ve tasarımların gerçekleştirilme çerçevesi.	55
Şekil 4.1: Deney ve model KOİ giderim verilerinin korelasyon grafiği (Demir (III) klorür/APN).	61
Şekil 4.2: KOİ giderimi için yüzey ve kontür grafikleri (Demir (III) klorür/ APN).	63
Şekil 4.3: 12 mM (1 g/L) FeCl ₃ konsantrasyonu için pH-konsantrasyon diyagramı.	64
Şekil 4.4: 60 mM (5 g/L) FeCl ₃ konsantrasyonu için pH-konsantrasyon diyagramı.	65
Şekil 4.5: Deney ve model AKM giderim verilerinin korelasyon grafiği (Demir (III) Klorür/APN).	67
Şekil 4.6: AKM giderimi için yüzey ve kontür grafikleri (Demir (III) klorür/APN).	69
Şekil 4.7: Deney ve model renk giderim verilerinin korelasyon grafiği (Demir (III) Klorür/APN).	71
Şekil 4.8: Renk giderimi için yüzey ve kontür grafikleri (Demir (III) Klorür/APN).	73
Şekil 4.9: Maksimum nokta doğrulama deney sonuçlarının model sonuçları ile karşılaştırması (Demir (III) klorür/APN).	74
Şekil 4.10: YSA regresyon grafiği (Demir (III) klorür/APN).	77

Şekil 4.11: Deney, YSA ve YYY datalarının uyum grafiği (Demir (III)klorür/APN).	77
Şekil 4.12: Deney ve model KOİ giderim verilerinin korelasyon grafiği (Flo30/APN).....	79
Şekil 4.13: KOİ giderimi için yüzey ve kontür grafikleri (Flo30/APN).	81
Şekil 4.14: Deney ve model AKM giderim verilerinin korelasyon grafiği (Flo30/APN). .	83
Şekil 4.15: AKM giderimi için yüzey ve kontür grafikleri (Flo30/APN).....	85
Şekil 4.16: Deney ve model renk giderim verilerinin korelasyon grafiği (Flo30/APN).....	87
Şekil 4.17: Renk giderimi için yüzey ve kontür grafikleri (Flo30/APN).....	89
Şekil 4.18: Maksimum nokta doğrulama deney sonuçlarının model sonuçları ile karşılaştırması (Flo30/APN).....	90
Şekil 4.19: YSA regrasyon grafiği (Flo30/APN).....	92
Şekil 4.20: Deney, YSA ve YYY datalarının uyum grafiği (Flo30/APN).	93
Şekil 4.21: Deney ve model KOİ giderim verilerinin korelasyon grafiği (Grafite anot).....	95
Şekil 4.22: Grafite anot ile KOİ giderimi için oluşturulan kontür grafikleri.	97
Şekil 4.23: Grafite anot ile KOİ giderimi için oluşturulan yüzey grafikleri.	98
Şekil 4.24: Deney ve model renk giderim verilerinin korelasyon grafiği (Grafite anot)....	101
Şekil 4.25: Grafite anot ile renk giderimi için oluşturulan kontür grafikleri.	103
Şekil 4.26: Grafite anot ile renk giderimi için oluşturulan yüzey grafikleri.	104
Şekil 4.27: Maksimum nokta doğrulama deney sonuçlarının model sonuçları ile karşılaştırması (Grafite anot).....	105
Şekil 4.28: YSA regrasyon grafiği (Grafite anot).....	108
Şekil 4.29: Deney, YSA ve YYY datalarının uyum grafiği (Grafite anot).	108
Şekil 4.30: Deney ve model KOİ giderim verilerinin korelasyon grafiği (KMO anot)...	110
Şekil 4.31: KMO anot ile KOİ giderimi için oluşturulan kontür grafikleri.	112
Şekil 4.32: KMO anot ile KOİ giderimi için oluşturulan yüzey grafikleri.	113
Şekil 4.33: Deney ve model renk giderim verilerinin korelasyon grafiği (KMO anot)....	115
Şekil 4.34: KMO anot ile renk giderimi için oluşturulan kontür grafikleri.	118
Şekil 4.35: KMO anot ile renk giderimi için oluşturulan yüzey grafikleri.	119
Şekil 4.36: Maksimum nokta doğrulama deney sonuçlarının model sonuçları ile karşılaştırması (KMO anot).	120
Şekil 4.37: YSA regresyon grafiği (KMO anot).	123
Şekil 4.38: Deney, YSA ve YYY datalarının uyum grafiği (KMO anot).....	123
Şekil 4.39: Ham atık su-kimyasal arıtım çıkışı ve grafite anot ile EO çıkışı atık sudaki değişim.	124
Şekil 4.40: Ham atık su-kimyasal arıtım çıkışı ve KMO anot ile EO çıkışı atık sudaki değişim.	124

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: EO prosesinin avantaj ve dezavantajları [84].....	29
Tablo 2.2: Anot materyallerinden bazılarının oksijen dönüşüm potansiyelleri [91].	33
Tablo 3.1: Atık su karakterizasyonu için ölçülen parametreler ve değerleri.	45
Tablo 3.2: Laboratuvar da değişimi takip edilen atık su parametreleri ve değerleri.	46
Tablo 3.3: Kimyasal ön arıtım proses tasarımı için bağımsız değişkenler ve seviyeleri (FeCl ₃ /APN).	48
Tablo 3.4: Kimyasal ön arıtım proses tasarımı için bağımsız değişkenler ve seviyeleri (Flo30 /APN).	49
Tablo 3.5: Elektrokoksidasyon deney tasarımı için bağımsız değişkenler ve seviyeleri	51
Tablo 4.1: Deney ve YYY model KOİ giderim verimleri (Demir (III) klorür/APN).	60
Tablo 4.2: KOİ giderimi ANOVA tablosu (Demir (III) klorür/APN).	62
Tablo 4.3: Maksimum KOİ giderim şartları (Demir (III) klorür/APN).	66
Tablo 4.4: Deney ve YYY model AKM giderim verimleri (Demir (III) klorür/APN).	66
Tablo 4.5: AKM giderimi ANOVA tablosu (Demir (III) klorür/APN).	68
Tablo 4.6: Maksimum AKM giderim şartları (Demir (III) klorür/APN).	70
Tablo 4.7: Deney ve YYY model renk giderim verimleri (Demir (III) klorür/APN).	70
Tablo 4.8: Renk giderimi ANOVA tablosu (Demir (III) klorür/APN).	72
Tablo 4.9: Maksimum renk giderim şartları (Demir (III) klorür/APN).	74
Tablo 4.10: Ön arıtım için yapılan kontrol deney sonuçları (Demir (III) klorür/APN).	75
Tablo 4.11: YYY’de KOİ, AKM ve renk gideriminin birlikte optimum olduğu şartlar (Demir (III) klorür/APN).	75
Tablo 4.12: Deney sonuçlarının YSA ve YYY model çıktılarıyla karşılaştırılması.	76
Tablo 4.13: YSA’da KOİ, AKM ve renk gideriminin birlikte optimum olduğu şartlar (Demir (III) klorür/APN).	78
Tablo 4.14: Deney ve YYY model KOİ giderim verimleri (Flo30/APN).	78
Tablo 4.15: KOİ giderimi ANOVA tablosu (Flo30/APN).	80
Tablo 4.16: Maksimum KOİ giderim şartları (Flo30/APN).	82
Tablo 4.17: AKM giderim verimleri (Flo30/APN).	82
Tablo 4.18: AKM giderimi ANOVA tablosu (Flo30/APN).	84
Tablo 4.19: Maksimum AKM giderim şartları (Flo30/APN).	86
Tablo 4.20: Renk giderim verimleri (Flo30/APN).	86
Tablo 4.21: Renk giderimi ANOVA tablosu (Flo30/APN).	88
Tablo 4.22: Maksimum renk giderim şartları (Flo30/APN).	90
Tablo 4.23: Ön arıtım için yapılan kontrol deney sonuçları (Flo30/APN).	91
Tablo 4.24: YYY’de KOİ, AKM ve renk gideriminin birlikte optimum olduğu şartlar (Flo30/APN).	91
Tablo 4.25: Deney sonuçlarının YSA ve YYY çıktıları ile karşılaştırılması.	92
Tablo 4.26: YSA’da KOİ, AKM ve renk gideriminin birlikte optimum olduğu şartlar (Flo30/APN).	93
Tablo 4.27: Grafit anot ile EO sonucu KOİ giderim verimleri.	94
Tablo 4.28: Grafit anot ile EO sonucu KOİ giderimi için ANOVA tablosu.	96
Tablo 4.29: Grafit anot ile EO sonucu maksimum KOİ giderim şartları.	99
Tablo 4.30: Grafit anot ile EO sonucu renk giderim verimleri.	100
Tablo 4.31: Grafit anot ile EO sonucu renk giderimi için ANOVA tablosu.	102
Tablo 4.32: Grafit anot ile EO sonucu maksimum renk giderim şartları.	105

Tablo 4.33: Grafit anot ile EO prosesi için yapılan kontrol deney sonuçları.	106
Tablo 4.34: YYY’de KOİ ve renk gideriminin birlikte optimum olduğu şartlar (Grafit anot).	106
Tablo 4.35: Deney sonuçlarının YSA ve YYY çıktıları ile karşılaştırılması.	107
Tablo 4.36: YSA’da KOİ ve renk gideriminin birlikte optimum olduğu şartlar (Grafit anot).	108
Tablo 4.37: KMO anot ile EO sonucu KOİ giderim verimleri.	109
Tablo 4.38: KMO anot ile EO sonucu KOİ giderimi için ANOVA tablosu.	111
Tablo 4.39: KMO anot ile EO sonucu maksimum KOİ giderim şartları.	114
Tablo 4.40: KMO anot ile EO sonucu renk giderim verimleri.	114
Tablo 4.41: KMO anot ile EO sonucu renk giderimi için ANOVA tablosu.	116
Tablo 4.42: KMO anot ile EO sonucu maksim renk giderim şartları.	120
Tablo 4.43: KMO anot ile EO prosesi için yapılan kontrol deney sonuçları.	121
Tablo 4.44: YYY’de KOİ ve renk gideriminin birlikte optimum olduğu şartlar (KMO anot).	121
Tablo 4.45: Deney sonuçlarının YSA ve YYY çıktıları ile karşılaştırılması.	122
Tablo 4.46: YSA’da KOİ ve renk gideriminin birlikte optimum olduğu şartlar (KMO anot).	123
Tablo 4.47: Sodyum klorür ve sodyum sülfatın etkisinin incelenmesi.	125
Tablo 4.48: Organik bileşiklerde “C” atomunun oksidasyon dereceleri.	127
Tablo 4.49: Ön arıtım maliyetleri.	128
Tablo 4.50: EO ile maksimum giderim şartlarında elektrik tüketimi maliyetleri.	128
Tablo 4.51: Toplam giderim maliyeti (USD/m ³).	129

SEMBOL LİSTESİ

A	: Amper
AKM	: Askıda Katı Madde (mg/L)
ANOVA	: Varyans Analizi
APN	: Anyonik Patates Nişastası (ml/L)
BOİ	: Biyolojik Oksijen İhtiyacı (mg/L)
cm	: Santimetre (10^{-2} m)
ÇKM	: Çökebilir Katı Madde (mg/L)
EAAT	: Endüstriyel Atık Su Arıtma Tesisi
EÇK	: Elektriksel Çift Tabaka
EF	: Elektrofenton
EK	: Elektrokoagülasyon
EO	: Elektrooksidasyon
FAO	: Birleşmiş Milletler Tarım ve Gıda Teşkilatı
g	: Gram
İOP	: İleri Oksidasyon Prosesi
kJ	: Kilo Joule (10^3 J)
KMO	: Karışık Metal Oksit
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı (mg/L)
KOOB	: Karbonun Ortalama Oksidasyon Basamağı
L	: Litre
m	: Metre
mA	: Miliamper (10^{-3} A)
mm	: Milimetre (10^{-3} m)
mg	: Miligram (10^{-3} g)
MDF	: Medium density fiberboard- Orta yoğunlukta sunta
MLR	: Çoklu Doğrusal Regresyon
MKT	: Merkezi Kompozit Tasarım
nm	: Nanometre (10^{-9} m)
OSB	: Organize Sanayi Bölgesi
PAC	: Polialüminyum Klorür
RSM	: Response Surface Methodology
s	: Saniye
sa	: Saat
SVR	: Destek Vektör Regresyon
SKKY	: Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği
TOK	: Toplam Organik Karbon (mg/L)
YSA	: Yapay Sinir Ağları
YYY	: Yanıt Yüzey Yöntemi

ÖNSÖZ

Tez çalışmalarımın yürütülmesi sırasında bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım değerli tez danışmanım Sayın Prof.Dr. Ahmet GÜNAY'a saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmanın her aşamasında yanımda olan ve desteğini esirgemeyen Tez İzleme Komite Üyesi kıymetli hocam Dr.Öğ.Üy. Elif ÖZMETİN'e; ayrıca doktora sürecimde çalışmalarımı sunmuş olduğu bilimsel katkı ve desteği ile Tez İzleme Komite Üyesi hocam Prof.Dr. Hüseyin SELÇUK'a teşekkürü bir borç bilirim.

Laboratuvar ve tez çalışmaları sırasındaki yardımları ile bana destek olan sevgili hocalarım ve meslek arkadaşlarım Arş.Gör.Elif ÇALGAN başta olmak üzere, Arş.Gör.Gülşah TULGER KARA, Arş.Gör.Dr. Süleyman UZUNER ve Arş.Gör.Mustafa KORKMAZ'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca her konudaki sonsuz desteğinden dolayı Arş.Gör.Dr.Haris ÇALGAN'a çok teşekkür ederim.

Tezimde kullandığım atık suyun temini ve işletme hakkındaki yardımlarından dolayı Yıldız Entegre A.Ş. Manisa Yonga Levha Fabrikası yöneticilerine ve Çevre Yüksek Müh. Şerafettin Saim'e ve Çevre Müh. Beytullah CÖMERT'e teşekkür ederim. Tezimde kullandığım elektrotların temini ve yardımlarından dolayı Galtek Kimya Sayın Mustafa GÖKTEPE'ye teşekkürler. TOK analizlerini gerçekleştiren Dokuz Eylül Üniversitesi Çevre Müh. Laboratuvarı'nda çalışan hocalarıma yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Her koşulda yanımda olan en büyük destekçim, sevgili eşim Murat SÜZEN'e ve doktora dönemimde dünyaya gelen moral kaynağım, hayat ışığım, çiçeğim, canım kızım Melis SÜZEN'e bu yolda hep yanımda oldukları, olacakları ve fedakarlıkları için sonsuz teşekkürler. Ayrıca hayatımın her döneminde sevgilerini ve desteklerini hiç esirgemeyen kıymetli anneme, kardeşlerime ve tüm aileme bana inandıkları için minnettarım.

Bu tezi; tez dönemi sırasında kaybettiğim ama her zaman yanımda olduğunu hissettiğim canım babam Ömer YAŞAR'a ve yine tez dönemimde kaybettiğim kayınvalidem Münevver SÜZEN'e ithaf ediyorum.

Balıkesir, 2023

Yeliz SÜZEN

1. GİRİŞ

Orman kaynakları; ülkemizin yaklaşık yüzde 28,6'sını kaplayan sunduğu ekosistem hizmetleri yanında sağladığı sosyoekonomik faydalar ile peyzaj ve miras değeri gibi önemli katkıları olan ekosistemlerdir [1]. Odun pek çok alanda kullanılan yüksek değerli ve kullanışlı bir malzemedir. Bu nedenle odun kökenli atıklar toplam atıklar içinde miktar ve çeşitlilik açısından oldukça büyük bir yer tutmaktadır [2].

Ağaç malzeme, yıllardır insanoğlunun ihtiyaçlarını karşılamak için tercih edilen en kullanışlı malzemelerdendir. Ağaç malzeme, yapısal özelliklerine göre farklı kullanım alanlarında değerlendirilmektedir. Odunun doğal kusurlarından kısmen arındırılmış homojen yapıya sahip yonga levhalar endüstriyel olarak 1940'lı yıllarda üretilmeye başlamıştır. Türkiye'de ilk yonga levha tesisi 1955'te kurulmuştur [3]. Yonga Levha, vinil esaslı yapay reçine tutkalları ile odun veya odunlaşmış lignoselülozik bitkilerin yongalarının karıştırılması sonrasında yüksek sıcaklık ve basınçta sıkıştırılması ile elde edilen malzeme olarak tanımlanabilmektedir [4].

Yonga levha üretiminde sırasında; yonga levhayı oluşturacak malzemelerin levha formuna dönüştürülmesi ve bu malzemelerin birbiri ile tutunmasını sağlamak amacıyla sentetik tutkalların ek olarak az da olsa kâğıt fabrikalarından elde edilen sülfite atık suyu, reçineler, çimento, alçı, manyezit gibi inorganik bağlayıcılardan da yararlanılmaktadır. Ayrıca üretimde üre formaldehit, fenol formaldehit ve melamin formaldehit tutkalları kullanılmaktadır [5]. Farklı kaynaklardaki ve yaştaki odunlar farklı yapıya sahiptirler ve dolayısıyla farklı özellikleri bulunmaktadır. Uzun bitkisel lifler esas olarak selüloz ve lignin içermektedir. Bu bitkilerde ayrıca balmumu, pektin, inorganik tuzlar, azotlu maddeler, renklendirici maddeler vb. gibi bir dizi küçük bileşen bulunabilmektedir [6]. Üretimde kullanılan ağaç türünün farklılığından dolayı oluşan atık suyun içeriğinde de değişimler gözlenmektedir. Endüstriyel atık suların arıtımında yaygın olarak kullanılan temel arıtma yöntemlerinden olan fiziksel (ön çöktürme, filtreleme), kimyasal (kimyasal oksidasyon, kimyasal çöktürme) arıtım yöntemleri yonga levha gibi selülöz içeriği yüksek atık sulara uygulanabilmektedir [7].

Bunun yanı sıra son yıllarda endüstriyel atık suların ileri arıtım yöntemleri ile yeniden kullanılabilirliğinin artırılması çalışmaları da gündeme gelmektedir. Üretim sırasında

kullanılan kimyasal bileşenler ve odunun yapısından kaynaklanan yoğun lignoselülozik içeriği nedeniyle; yonga levha endüstrisi atık suları alıcı ortamda oluşturacakları renk ve ışık geçirgenliği problemleri, sucul ekosistemlerde balçık birikimine neden olabilmeleri, içeriğindeki bazı toksik bileşenler nedeniyle alternatif arıtım çalışmaları gerçekleştirilmelidir. Yüksek hacimde su tüketen bu sektörden kaynaklanan atık suların yeniden kullanımı son yıllarda gündeme gelen “Sürdürülebilir Kalkınma” kavramı çerçevesinde olumlu çevresel kazancın yanında; tesisin temiz su maliyeti ve atık su uzaklaştırma/arıtma maliyetlerinin de azalmasına yardımcı olacağından ekonomik açıdan da önem arz etmektedir [8].

Çalışmanın amacı; yüksek askıda ve çökebilen katı madde içeriğine sahip biyobozunurluğu düşük bir endüstriyel atık su olan yonga levha endüstrisi atık sularının kimyasal arıtım (koagülasyon/flokülasyon) ve ileri arıtım yöntemlerinden olan elektrooksidasyon (EO) prosesinin ardışık kullanımı ile arıtımıdır. Ön arıtımda koagülant olarak demir (III) klorür ve Flo30 kullanılmış; flokülant olarak ise anyonik patates nişastası (APN ,%1’lik) tercih edilmiştir. İki kimyasalın giderim verimleri karşılaştırıldığında; demir (III) klorür/APN ile elde edilen verimler daha yüksek olduğu için çalışmanın ön arıtım kısmında bu kimyasal tercih edilmiştir. EO prosesinde ise grafit anot/paslanmaz çelik katot ve karışık metal oksit (KMO) anot/paslanmaz çelik katot elektrot çiftleri kullanılmıştır. Deney tasarımları Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY) ile yapılmış, deney sonuçları da YYY ve Yapay Sinir Ağları (YSA) teknikleri kullanılarak optimize edilmiştir. Modelleme ile YYY’de güven aralığı yüksek full quadratik denklemlerinin elde edilmesi sağlanmıştır. YYY ve YSA’da elde edilen model sonuçları karşılaştırılmış ve her ikisinin de deney verileri ile örtüştüğü tespit edilmiştir. Elde edilen maksimum giderim şartlarında doğrulama deneyleri yapılmış, belirlenen noktalarda yapılan kontrol deneyleri ile modellerin uygulanabilirliği test edilmiştir. Doğrulama ve kontrol deney sonuçları model verileri ile uyumlu çıkmıştır. Her yöntem için maksimum giderim noktalarında maliyet değerleri hesaplanmıştır. Çalışmalarda Manisa ili Akhisar ilçesinde yer alan bir yonga levha üretim firmasından alınan atık sular kullanılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Yonga Levha Endüstrisi

Yonga levha, otsu materyal yongalarına veya odun yongalarına, sentetik tutkalla basınç ve ısı altında oluşturulan kompozit bir malzemedir. En çok mobilya endüstrisi tarafından kullanılır [9]. Türk Standartları (TS) EN 309 yonga levhayı; odun (testere talaşı, odun yongası vb.) ve/veya diğer lifli lignoselülozik materyalin (kenevir lifleri, keten, şeker kamışı vb.) sıcaklık ve basınç altında bir tutkal ilavesi ile şekillendirilmesi sonucu oluşan levhalar olarak tanımlamaktadır [10]. British Standart (BS) 1811'e göre ise; bir tutkal ilavesiyle veya tutkalsız olarak hidrolik bağlayıcıların oluşturduğu yapışmayla, odun ya da testere talaşı, odun yongası, keten lifi vb diğer lignoselülozik maddenin şekillendirilmesi sonucu oluşan levhalardır [11]. Şekil 2.1'de örnek bir yonga levha resmi verilmiştir.



Şekil 2.1: Yonga levha örnek resim [12].

Yonga levha ve lif levha fabrikaları, iğne ve yapraklı ağaçlarla birlikte özel yetiştirilmiş kavak ağacı odunlarını işleyebilmektedirler. Yardımcı hammadde olarak ise endüstriyel atıklar ve talaş kullanılabilir. Fabrikaların kuruldukları bölge dolayısıyla orman varlığı değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle iğne ve yapraklı ağaçlar farklı miktarlarda kullanılır. Üretimde yüksek oranda çam ağaçları (kızılçam, karaçam, sarıçam) ve iğne yapraklı ağaçlar (göknar, sedir, ardıç, kestane, kızılgağaç, söğüt, okaliptus, gürgen, ladin) gibi türler ile yapraklı ağaç olarak meşe, kavak, kayın odunu kullanılmaktadır [13].

Son yıllarda yonga levha üretimindeki artışın nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Farklı kullanım alanları için istenilen standartlarda mekanik ve fiziksel özellikleri taşımaları ve homojen yüzeyli olmaları,
- Diğer malzemelerle mekanik ve kimyasal olarak kolaylıkla birleştirilebilmeleri,
- Su itici madde ilavesi ile hidrofobik özellik kazandırılabilmesi,
- Mantar ve böceklerle karşı kimyasal koruyucu maddelerle direnç kazanabilmeleri,
- Odun artıkları, ahşap atıklarının gibi atıkların hammadde olarak kullanılabilmesi ile daha az maliyetli oluşları,
- Çeşitli özelliklere ve istenilen yüzey desenine sahip olmaları [14].

2.1.1 Yonga Levhaların Sınıflandırılması

Yonga levhalar özgül ağırlıklarına, presleme yöntemlerine, tabaka sayılarına, yonga geometrisine, yüzey kaplama malzemesi çeşidine, kullanım alanına göre, bağlayıcı madde türüne ve üretim metoduna göre sınıflandırılmaktadır. Aşağıda yonga levhaların genel sınıflandırılması yer almaktadır.

1. Yonga levhalar özgül ağırlıklarına göre üç kategoride toplanmaktadır [15]:

- Düşük özgül ağırlıktaki yonga levhalar (Özgül ağırlıkları $<0,59 \text{ gr/cm}^3$)
- Orta özgül ağırlıktaki yonga levhalar (Özgül ağırlıklar $=0,59-0,8 \text{ gr/cm}^3$)
- Yüksek özgül ağırlıktaki yonga levhalar (Özgül ağırlıkları $>0,8 \text{ gr/cm}^3$)

2. Yonga levhalar presleme yöntemlerine göre ikiye ayrılmaktadırlar:

- Yatay yongalı levhalar ve dik yongalı levhalar

3. Tabaka sayılarına göre yonga levhaları üç gruba ayrılmaktadır [16]:

- Tek, üç ve çok tabakalı yonga levhalar.

4. Yonga geometrisine (şekil ve boyutuna) göre dört guruba ayrılmaktadır [17]:

- Normal yonga levhalar (Particle board; yonga genişlikleri 2-6 mm ve uzunlukları 10-25 mm, kalınlıkları ise 0,25-0,40 mm olmaktadır).
- Etiket yongalı levhalar (Wafer board; yonga genişlikleri ve yonga uzunlukları 35-75 mm 25-40 mm, kalınlıkları ise 0,5-0,7 mm arasında değişmektedir).
- Şerit yongalı levha (Flake board; yonga genişlikleri 9-10 mm, yonga kalınlık ve uzunlukları etiket yongalı levha ile aynı olmaktadır).

- Yönlendirilmiş yongalı levha (Oriented Structural Board, OSB; Yonga genişlikleri 6-25 mm ve uzunlukları ise 38-63 mm, kalınlıkları genel olarak 0,4–0,8 mm arasında değişmektedir).

5. Yüzey kaplama malzemesi çeşidine göre yonga levhalar iki sınıfa ayrılmaktadır [18]:

- Sıvı yüzey kaplama malzemeleri ile kaplanmış ve katı yüzey kaplama malzemeleri ile kaplanmış yonga levhalar

6. Yonga levhalar kullanım yerine göre iki gruba ayrılmaktadır:

- Açık mekânlarda ve kapalı mekânlarda kullanılanlar

7. Kullanılan bağlayıcı madde çeşidine göre yonga levhalar iki sınıfa ayrılmaktadırlar:

- Çimentolu ve sentetik reçineli yonga levhalar.

8. Levha üretim metoduna göre üçe ayrılmaktadır:

- Termodin metoduna göre, Werzalit metoduna, Callipress metoduna göre kaplanmış.

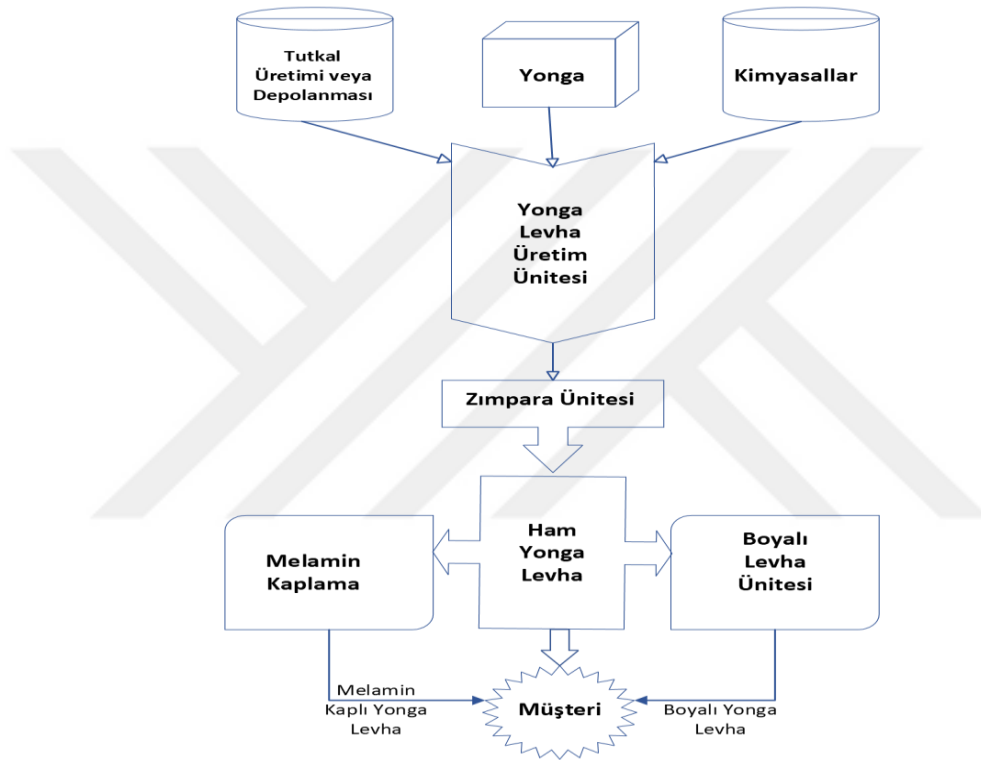
2.1.2 Yonga Levha Üretim Prosesleri

Yonga levha üretiminde orman atıkları, yıllık bitkiler, tutkallar (üre formaldehit tutkalı çoğunlukla olmak üzere organik tutkallar, melamin veya fenol formaldehit, izosiyanat, termoplastik tutkallar), suya ve böceklerle dayanımı arttırmak için kullanılan katkı maddeleri (sertleştirici, hidrofofik, koruyucu maddeler) kullanılmaktadır [19].

Yonga levhalar üretilirken bu amaçla tedarik edilmiş ağaçlar küçük parçalara ayrılır ve büyüklüklerine göre iki ayrı sınıfta çeşitli işlemlerden geçirilir. Her iki sınıftaki talaş parçaları ayrı rutubet değerine göre kurutulur. Kurutulmuş talaş parçalarının uygun sıcaklık ve basınç altında yapılan presleme işlemleriyle birbirine yapışmaları sağlanır. Levhalar prestan çıktıktan soğumaya bırakılırlar. Belirlenen soğuma süresinin tamamlanır ardından zımpara işlemi gerçekleştirilir ve son kullanıma hazır hale getirilirler [20].

2012 yılında üretime başlayan ve çalışmada kullanılan atık suyun temin edildiği tesiste; yonga levha pres hattında “Ham Sunta” üretimi, melamin pres hattında “Suntalam” üretimi, boya ünitesinde “Boyalı Levha Üretimi” ve üre formaldehit reçinesi üretimi

gerçekleştirilmektedir. Değirmende; odunlar yonga haline getirilmekte akabinde bağlayıcı maddelerle karıştırılmaktadır. Sunta (yonga levha) üretimi için son olarak sıcak preslerden geçirilmektedir. Suntalam üretimi için ise yonga levhalar (sunta) tutkal emdirilmiş (emprenyelenmiş) kağıtla melamin kaplama işlemine tabi tutulmaktadır. Yonga levhalara (sunta) boya ünitesinde boya kaplama işlemi yapılırsa da boyalı sunta üretimi gerçekleştirilmektedir. Tesise ait iş akış şeması Şekil 2.2’de görülmektedir. Tesise ait genel iş bölümleri de aşağıda detaylı olarak yer almaktadır [21].



Şekil 2.2: Yonga levha endüstrisine ait genel akış şeması.

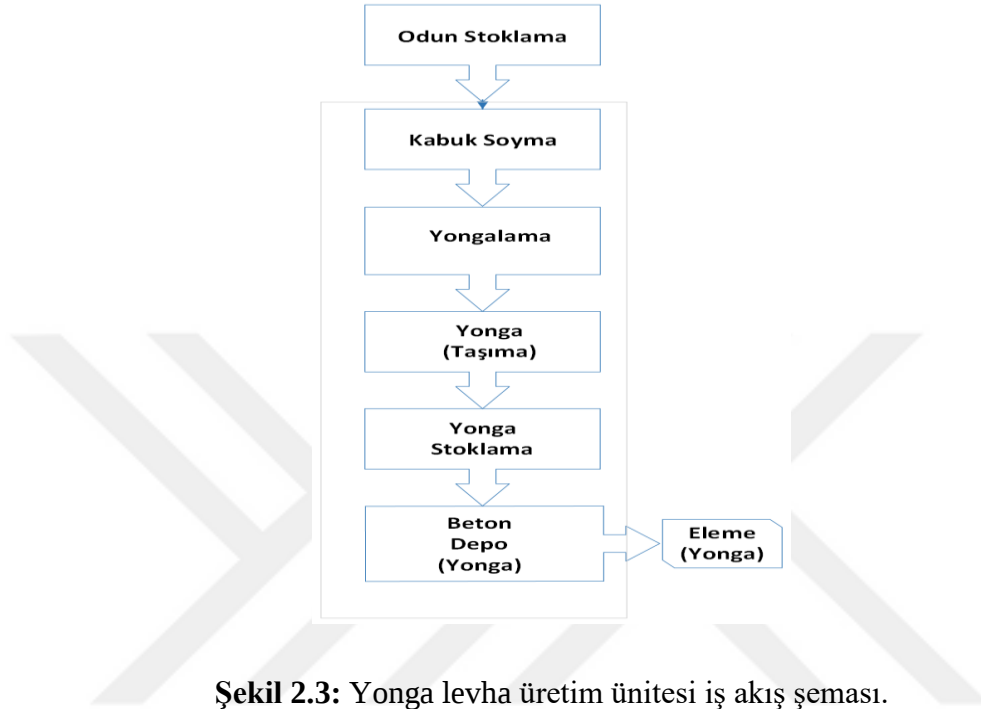
1. Hammadde Stok Sahası (Odun ve Cips)

Üretimde kullanılmak üzere yurt içinden ya da ithal getirilen odunlar bu açık alanda depolanmaktadır.

2. Kaba Yongalama Birimi

Üretimde hammadde olarak kullanılan yonga; bu birimde odun, çıta, tomruk, gibi maddelerin kırılmasıyla elde edilir. Oluşan yonganın bir kısmı direkt üretime verilebilir, kalanlar ise proses açık alanda veya proses silolarında stoklanır. Tomrukların kırılması aşamasında oluşan tozları toplamak için toz emiş sistemi kullanılır ve toplanan tozlar ısı

santralinde gönderilerek yakıt olarak kullanılmaktadır. Kazan yakıtı olarak kullanılmak üzere yongalama işleminde oluşan odun kabukları da depolanmaktadır [22]. Yonga levha üretim ünitesine ait iş akış şeması Şekil 2.3'te verilmiştir. Üretim; odun stoklama, kabuk soyma, yongalama ve yonga stoklama kısımlarından oluşmaktadır.



Şekil 2.3: Yonga levha üretim ünitesi iş akış şeması.

3. İnce Yongalama Ünitesi (Elek-Değirmen)

Değirmen besleme silosuna gönderilmeden önce cips yongalar tartımlı bantlar ile beton silolardan alınır ve roleli eleklerde ince (mikro), kaba (makro) yonga olarak ayrılır ve verilir. İnce malzeme roleli elekten çıkarak sarsak elekte yeniden elenir. Bu ince malzeme elendikten sonra mikro yonga bandına gönderilir [22].

4. Yonga-Toz Talaş Kurutma Birimi

Belirli oranlarda yonga, yaş yonga silolarından alınır ve bantlar aracılığı ile kurutma fırını besleme tankına aktarılır. Hava-yanan gaz karışımı döner kurutucuya iletilir. Döner kurutucudan çıkan büyük yongalar yangından korunma silosuna alınır. Eleklerde, yangından koruma silosundaki malzeme mikro, makro, oversize ve elek altı olmak üzere gruba 4 gruba ayrılır. Kurutma ünitesinden kurutma bacası ile elektronik yoğuşma egzoz gazı temizleme sistemine (SEKA) bağlıdır [23].

5. Sunta Üretim Birimi

Preslenmeye hazır malzeme; Yonga toz-talaş kurutma biriminden geçer ve pres besleme tankına alınır. Daha sonra bu malzeme aşağıdaki bölümlerden geçerek ham sunta üretimi gerçekleştirilir;

- Yonga Tartma
- Yonga Tutkal Karıştırma
- Serme (Taslak Oluşturma)
- Soğuk Presleme (Ön Pres)
- Sıcak Presleme
- Ebatlama (Çapraz Kesme)
- Soğutma

Bu işlemler sırasında üretim durmadığından üretim sürekli sistemle gerçekleştirilmiş olur. Plakalar minimum 2 gün form tutma bölümünde stoklanır. Bu işlemle yapışmanın tam olması, sehpalara alınan plakaların sağlamlaşması ve tutkalın kürleşmesi sağlanır [23].

6. Zımparalama Birimi

Ebatlamadan çıkan levhalar zımparadan aşama aşama geçirilerek, istenilen kalınlıkta sunta levhalar elde edilir. Sırasıyla kaba ve ince zımparalamadan çıkan levhalar kalitelerine (1. ve 2. Kalite) göre ayrılmakta ve stok alanında ayrı ayrı istiflenmektedir. Ham sunta, pres hattında ürettildikten sonra istif alanında en az iki gün bekletilir. Bekletilen sunta, enine kesme testeresine kalınlıklarına göre paketler halinde girer. Çıkan ürünler ise ham levha olarak satılmak üzere sevkiyata ya da melamin presine, boyalı levha ünitesine gönderilir [22].

7. Melamin Kaplama Birimi

Kapalı alanda yer alan bu kısımdaki preslerde; zımparalanmış suntalar kaplama yapılmak üzere tutkal emdirilmiş kâğıtlarla kaplanır. Presten çıkmış ve zımparalanmış levha soğutulduktan sonra (en az 3 gün) istif beklemeye konur. Kağıt besleme istasyonuna, tutkal emdirilmiş (emprenyelenmiş) kağıt paletleri yerleştirilir. Önce alt kağıt, sonra ham levha ve en son üst kağıt sırasıyla serilir. Pres içerisine giren ürün, ortalama 200 °C de 15-20 saniye preslenir. Ardından kenar temizlemede fazlalıklar alınır ve soğutucuda soğutulur. Kalite kontrolü yapılan malzeme istiflenir [22].

8. Boyalı Yonga Levha Üretim Birimi

Ham sunta levha, boyalı yonga levha üretim ünitesine otomatik olarak stok sahasından alınarak beslenmektedir. Fırçalama bölümünde yüzey temizliği yapılmış levhaya astar (bir kat) uygulanır ve kurutulur. Levha yüzeyine; fırında ısıtılan temiz havanın ve kızgın yağın (pres ünitesinde kullanılan) püskürtülmesiyle kurutma işlemi gerçekleştirilir. Ardından kalınlık hatalarını gidermek, yüzey düzgünlüğünü artırmak ve sonradan uygulanacak yüzey işlemlerine hazır hale getirmek için levha zımparalanmaktadır. Zımparalamadan sonra levhaya ana boya (bir kat) uygulanır ve üstüne 2 kat daha boya atılır ve levha kurutmaya geçirilir. Levhaya desen, desen makinası aracılığıyla verilir. Fırından çıkan emisyonlar toz tutucu siklonlardan geçirilip atmosfere verilmektedir. Sonrasında tekrar kurutulan boyaya bir kat cila uygulanır. Cilasısı soğutularak son ürün oluşturulur. Bu ürün istiflenir ve paketlenerek stok sahasına kaldırılır [22].

9. Üre Formaldehit Reçinesi Üretim Birimi

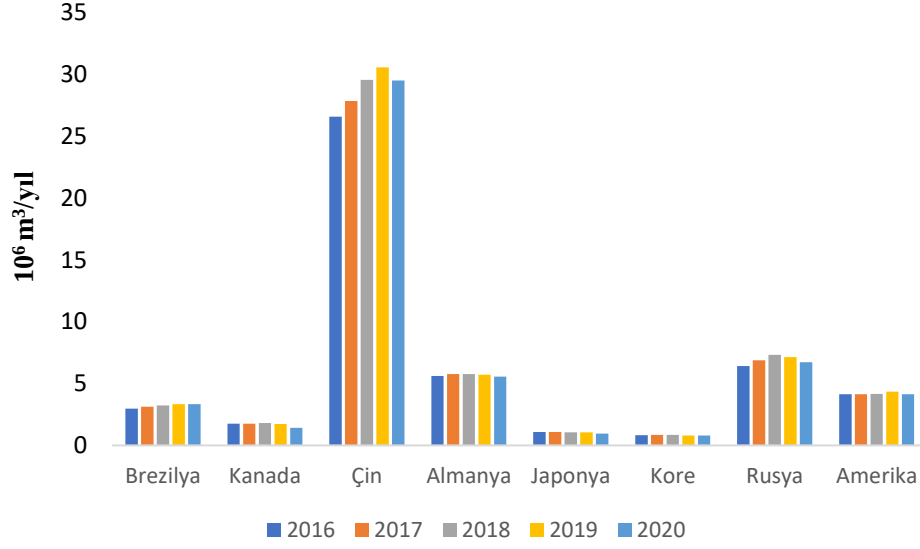
Formaldehit ünitesinde üretilen ve %37-40 konsantrasyona sahip formaldehite adsorpsiyon kolonlarında üre ilave edilerek üre formaldehitin oluşması sağlanır [22].

10. Yardımcı İşletmeler

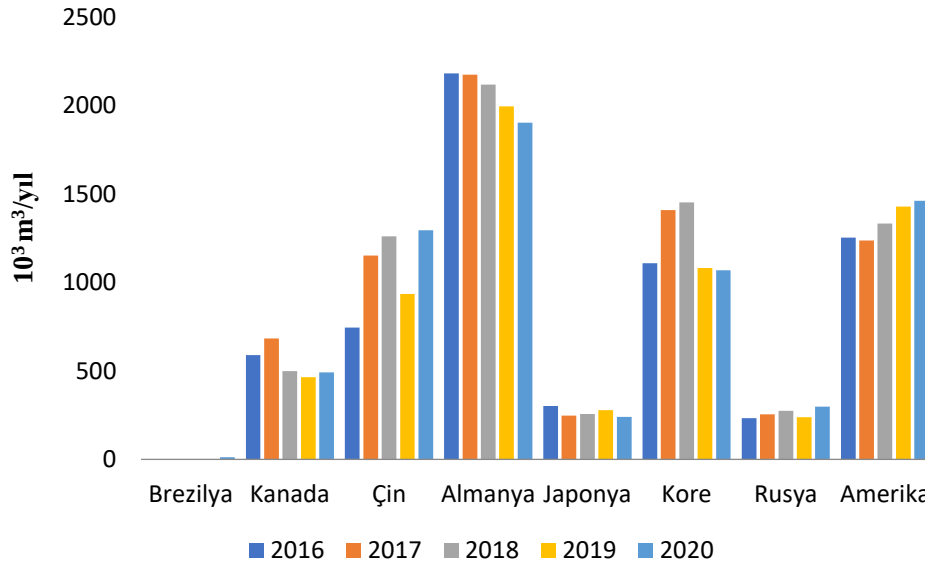
Tesiste yer alan yardımcı işletmeler; ısı enerji santrali, kalite kontrol laboratuvarı, toz toplama sistemleri, atık su arıtma tesisi, yangın söndürme sistemleri, mamul deposudur [23].

2.1.3 Dünya ve Türkiye’de Yonga Levha Üretimi

Yonga levha üretimi hakkında ilk fikirleri 1887 yılında ortaya çıkaran Ernst Hubbart’tır. İlk yonga levha fabrikası ise 1941 yılında Torfit-Werke firması tarafından Almanya’nın Bremen şehrinde kurulmuştur. F. Fahrni 1943’de Steiermork’ta ve 1944’de İsviçre’de de yonga levha fabrikaları kurmuştur [24]. Dünya genelinde yonga levha üretimi, 1994-1998 yıllarına gelindiğinde artış göstermiştir [18]. Şekil 2.4 ve Şekil 2.5’te; 2016-2020 yıllarına ait dünyadaki farklı ülkelerin güncel yonga levha üretim ve ihracat verileri yer almaktadır.

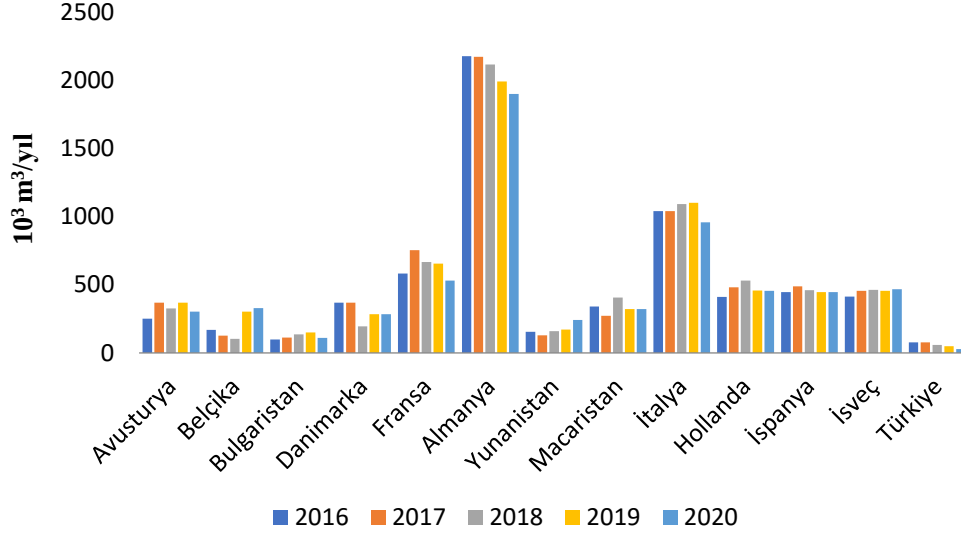


Şekil 2.4: Dünya’da yonga levha üretimi [25].



Şekil 2.5: Dünya’da yonga levha ihracatı [25].

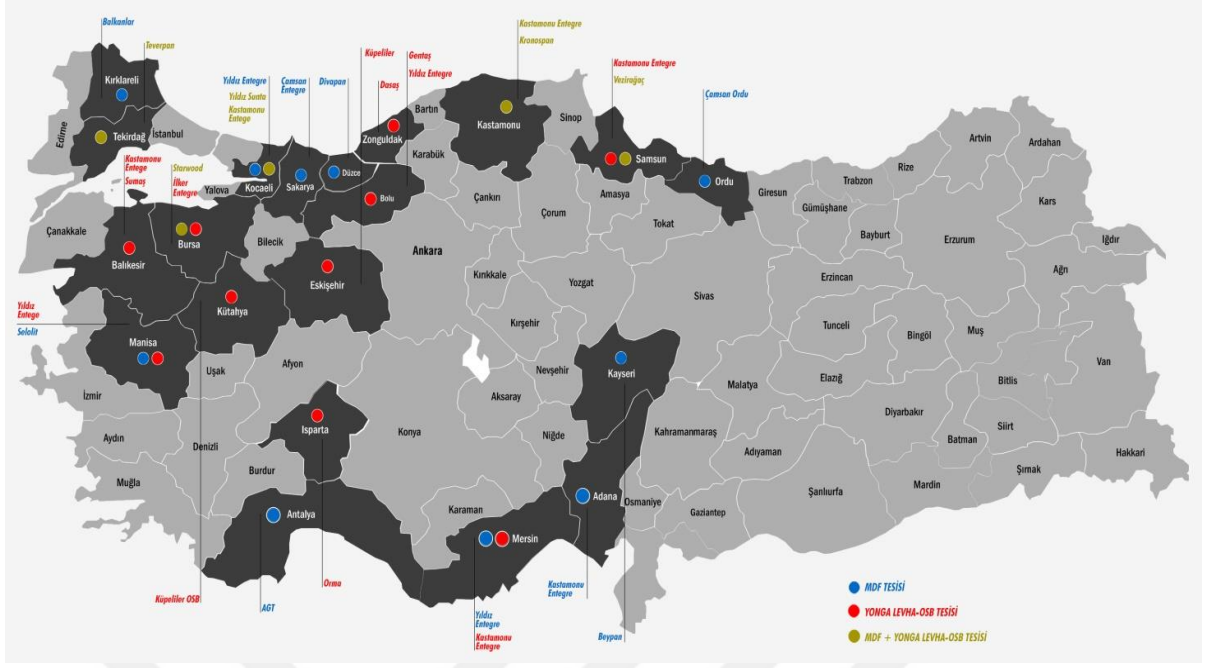
FAOSTAT verilerine göre Avrupa Birliği ülkelerinde 2016-2020 yıllarına ait güncel yonga levha ihracatı verileri Şekil 2.6’da yer almaktadır. Yonga levha ihracatında son yıllardaki artış, levhaya olan talep artışı olarak değerlendirilebilir. 2020 yılında ise pandemiyle birlikte gerçekleşen üretim kısıtlamalarının ihracat verileri üzerindeki olumsuz etkileri görülmektedir. Özellikle Türkiye’nin 2019 ve 2020 yıllarındaki kısmen düşmüş ihracat verileri pandeminin etkisi ile endüstriyel üretimdeki azalma olarak açıklanabilir.



Şekil 2.6: Avrupa Birliği ülkeleri yonga levha ihracatları [25].

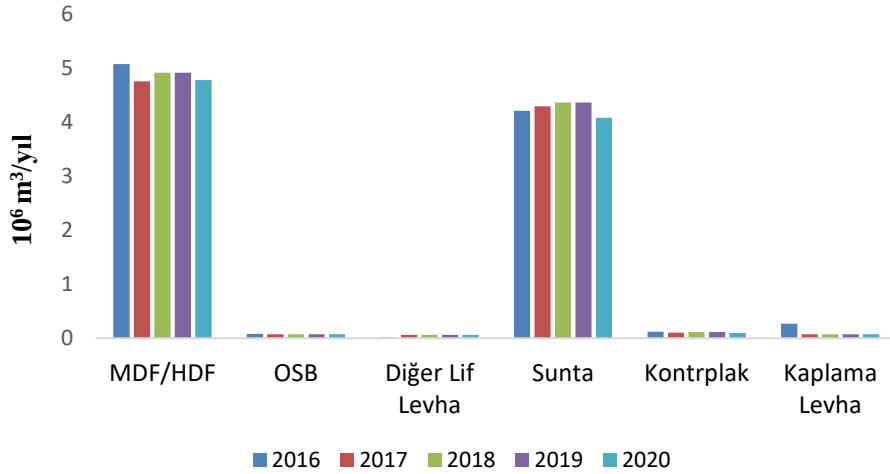
Yonga levhanın ülkemizdeki tarihsel gelişimi incelendiğinde ise ilk yonga levha fabrikası 1955 yılında İstanbul’un Kartal semtinde, diğer fabrikanın ise 1967 yılında Halkalı ’da kurulduğu bilinmektedir. Üretilen ilk ürün olan ve “Suni Tahta” malzeme adı altında pazarlanmaya başlanan “Sunta” halen halk arasında bu şekilde adlandırılmaktadır. Daha sonra ise ORMA (Orman Mahsulleri Entegre Sanayi T.A.Ş.) tarafından Isparta’da ki fabrika 1972 yılında kurulmuştur. [9].

Ülkemizde tüketilen yonga levhaların yaklaşık; %73’ü mobilya üretimi, %13’ü dekorasyon işlemlerinde, %11’i inşaat sektörü ve %0,2’si prefabrik ev yapımında tüketilmektedir [26]. Sektördeki yonga levha kuruluşlarının 2’si (%7,6) Akdeniz bölgesinde, 3’ü (%11,5) İç Anadolu, 4’ü (%15,3) Ege, 6’sı (%23) Marmara ve 11’i (%42,3) Karadeniz bölgesinde yer almaktadır. Lif levha kuruluşlarının; 1’i (%9) Ege bölgesinde, 4’ü (%36,3) Karadeniz ve 6’sı (%54,5) Marmara bölgesinde yer almaktadır. Şekil 2.7’de Türkiye’de mevcut yonga levha fabrikaları ve bulundukları iller yer almaktadır. Yonga levha ve lif levha fabrikaları verimli ormanların fazla olduğu bölgelerde yoğunlaşmıştır [27]. Son on yılda ülkemizde ki nüfus artışına bağlı olarak ve yaşam standartlarının yükselmesiyle birlikte birçok üretim sektöründe olduğu gibi ahşap esaslı levha üretiminde önemli kapasite artışları olmuştur. 2000’li yıllardan sonra ülkemizde yonga levha (sunta) başta olmak üzere, orta-yüksek yoğunlukta lif levha (MDF/HDF) üretim miktarlarında da hızlı bir artış trendi oluşmuş ve ülkemiz dünyada en önemli üretici ülkeler arasında yer almıştır [28].



Şekil 2.7: Türkiye’de yer alan yonga levha fabrikaları ve bulundukları yerler [27].

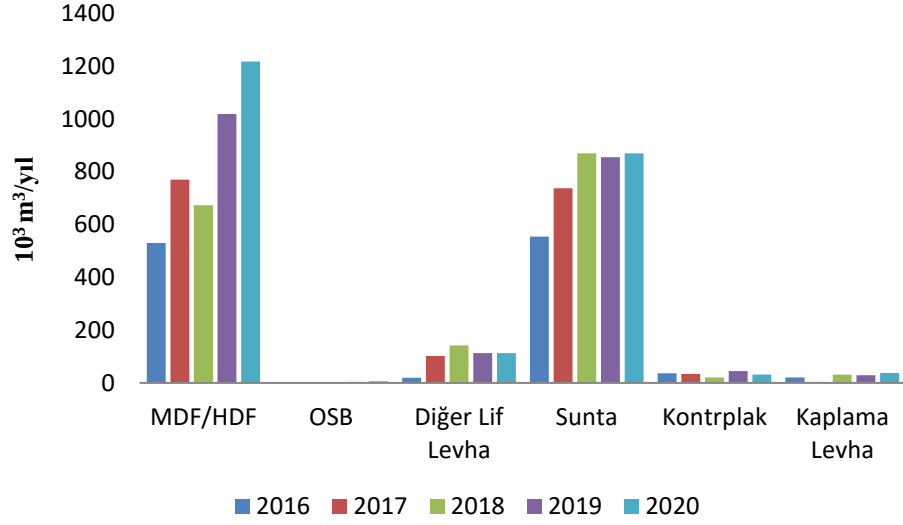
Güncel FAOSTAT verilerine göre Türkiye’de üretilen farklı türlerdeki levha miktarları Şekil 2.8’de yer almaktadır. Ülkemizde üretim sıralamasında mobilya üretiminde de kullanılan MDF (Medium density fiberboard- Orta yoğunlukta sunta) ilk sırada yer alırken akabinde sunta üretimi gelmektedir.



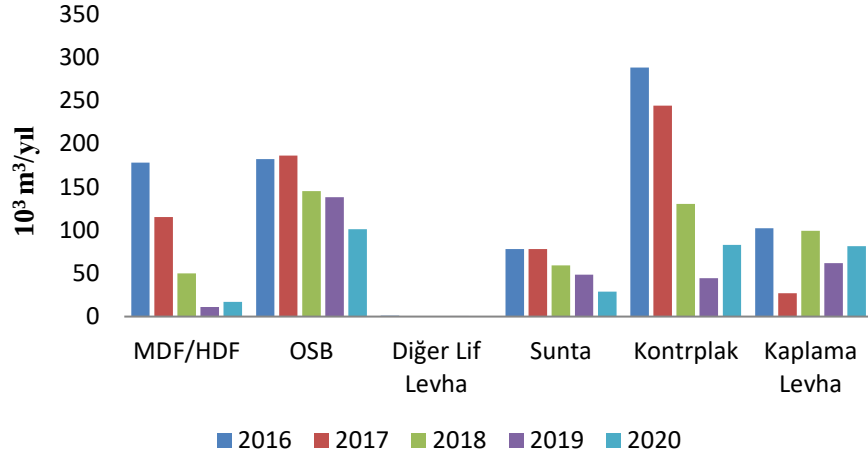
Şekil 2.8: Türkiye’de üretilen levhalar ve miktarları [25].

Türkiye ağaç ve ahşap eşya ürünleri 150’den fazla ülkeye ihraç edilmektedir. Türkiye’nin 2016-2020 yıllarına ait güncel ihracat verileri Şekil 2.9’da verilmiştir.

Şekil 2.10’da ise ülkemizin güncel ithalat verileri görülmektedir [25]. Ülkemizin çoğu levha türü için ithalat değerleri azalırken ihracat verilerindeki artış göze çarpmaktadır.



Şekil 2.9: Türkiye’nin ihracat verileri [25].



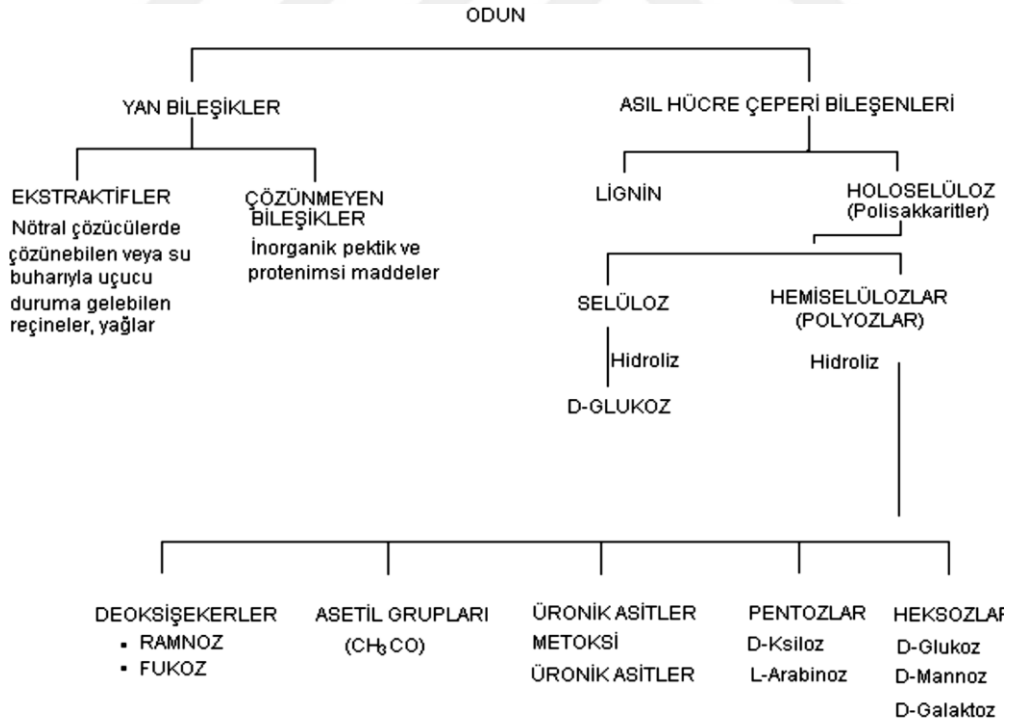
Şekil 2.10: Türkiye’nin ithalat verileri [25].

Ülkemizde üretim ve ihracatta yüksek oranlarda yer alan MDF ve sunta levhanın yanı sıra, ithalat durumunda kontrplak ve kaplama levha miktarları artmaktadır.

2.1.4 Yonga Levha Endüstrisi Atık Sularının Özellikleri

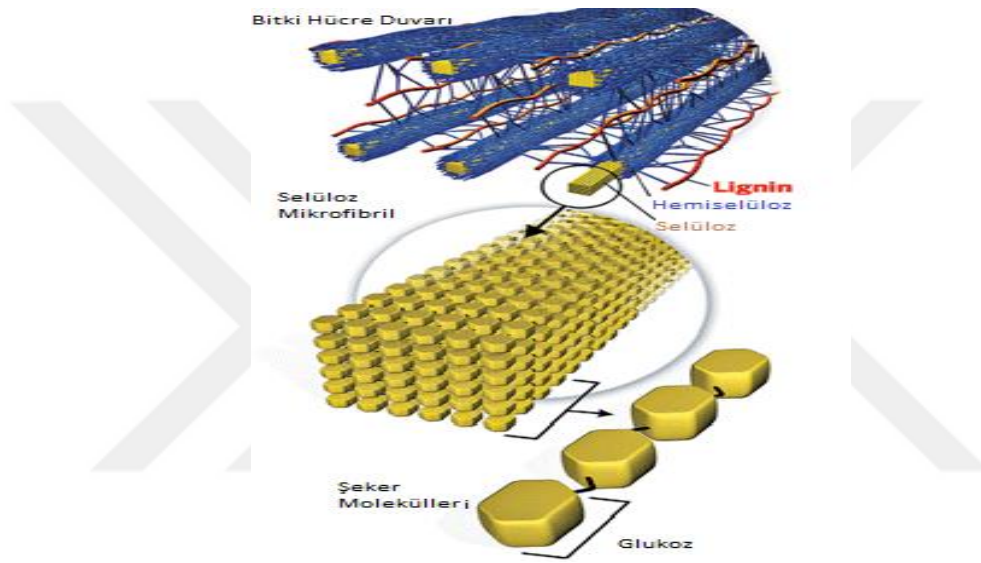
İnsanoğlu ihtiyaçlarını karşılamak için eskilerden süre gelen en kullanışlı malzemelerden biri ağaç malzemedir. Ağaç malzeme doğal bir malzeme olup, özellikleri türlerine göre farklılık göstermektedir [29]. Bu lignoselülozik madde üç bileşeni (selüloz, hemiselüloz ve lignin) içeren bir biyokütle yapısından oluşmaktadır. Lignin genellikle metoksil, karboksil, hidroksil ve karbonil grupları içeriği ile karakterize edilir [6].

Odunun kimyasal bileşimi oldukça komplekstir. Odunsu doku anatomik yapının bir sonucu olarak düzenli bir dağılım göstermeyen ve basit fiziksel karışımlar biçiminde bulunmayan çok sayıda kimyasal bileşiklerden oluşur. Bu nedenle odunun kimyasal özellikleri ayrıntılı bir biçimde bileşenlerin özelliklerinden çıkarılmamaktadır. Odunda bulunan bileşikler genellikle kimyasal bir sınıflandırma ile; karbonhidratlar, fenolik maddeler, terpenler, alifatik bileşenler, alkoller, aldehitler, hidrokarbonlar, alkaloitler, proteinler, iki değerli asitler, inorganik bileşenler olarak tanımlanabilir [30]. Odun bileşenlerinin genel sınıflandırılması Şekil 2.11’de gösterilmektedir.



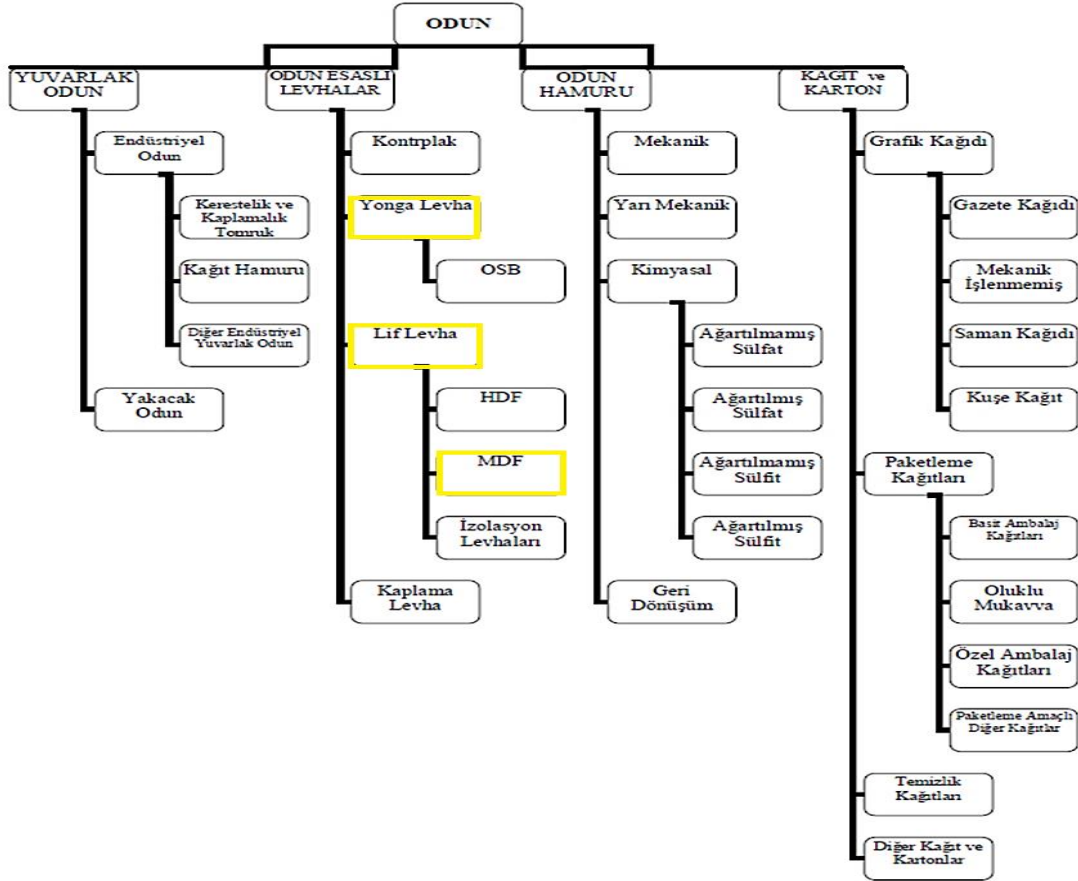
Şekil 2.11: Odun bileşenlerinin sınıflandırılması [30].

Selüloz; odun, bambu, pamuk, keten ve diğer bitkisel materyallerin hücre çeperinin temel maddesini oluşturmakta olup, odunun hücre çeperinin %40-60'ını kapsar. Lineer bir polimer olup zincir şeklinde moleküllerden oluşmaktadır. Lignin; yapraklı ağaç odunlarında %17-%25 oranında, iğne yapraklı ağaç odunlarında ise %25-%35 oranında bulunan karbonhidrat olmayan kompleks yapıda bileşiktir. Tüm odun türlerinde kuru ağırlığının %20-%30'unu hemiselüloz oluşturur. Bu nedenle odunun veya ağacın lignin, yarı selüloz ve selülözden meydana gelen kompozit bir yapısı bulunmaktadır [31]. Şekil 2.12'de bir bitkiye ait lignoselülozik yapı görülmektedir.



Şekil 2.12: Bir bitki hücresine ait lignoselüloz yapısı [32].

Orman ürünleri (odundan elde edilen ürünler) sanayi, çeşitli şekillerde sınıflandırılmaktadır. Bu sanayi ağaç mamullerini de kapsamakta olup, sektörün genel bir şekilde sınıflandırılması Şekil 2.13'te şematik olarak gösterilmektedir. Odun hammadde olarak yonga levhanın dışında çoğunlukla karton ve kağıt üretimi, işlenmesi, geri kazanımı sektörlerinde de kullanılmaktadır. Bu sektörden kaynaklanan atık sular ise dünya endüstriyel atık su üretiminde üst sıralarda yer almaktadır [33].



Şekil 2.13: Odun hammaddesinin kullanıldığı endüstriler [34].

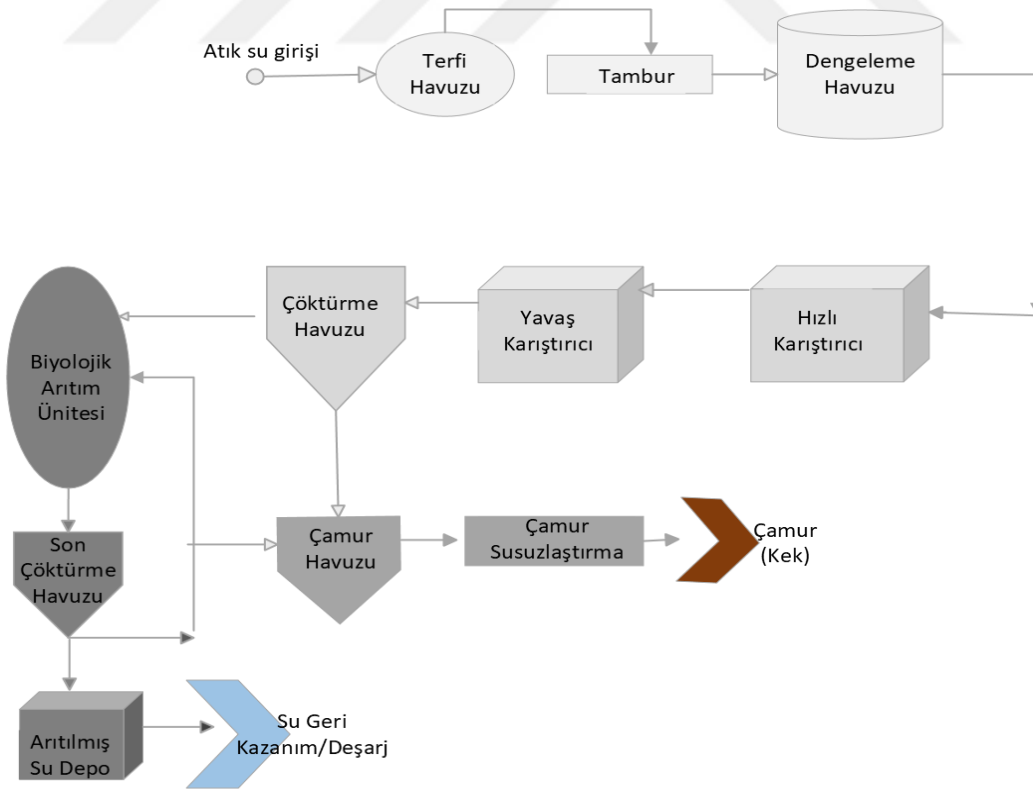
Kompozit ağaç ürünlerinden olan yonga levhaların üretiminde kullanılan yapıştırıcı, sertleştirici gibi maddelerin yanı sıra odunun selülozik yapıda bileşenler ve lignin içeriği nedeniyle yüksek askıda katı madde ve organik madde içeriğine sahip atık sular meydana gelmektedir. Yonga levha üretiminde atık suların %95 gibi büyük bir oranı kurutma işlemi sonucunda oluşmaktadır. Kurutma ile suya karışan yüksek miktardaki odun toz ve parçacıkları atık suyun içindeki lignoselülozik içeriğin temelini oluşturmaktadır. Bu içerik nedeniyle atık sular biyolojik arıtmada dirençli ve yüksek KOİ'ye sahiptir. %5'lik geriye kalan kısım ise yıkama işlemlerinden kaynaklanmaktadır. Oluşan atık sular tesis bünyesindeki arıtma tesisinde arıtılmakta ve tesis içinde yeniden kullanılmaktadır. Yeniden kullanılmayan bir kısmı ise organize sanayi bölgesinde bulunan ortak arıtma tesisine gönderilmektedir [22].

2.1.5 Yonga Levha Endüstrisi Atık Suların Arıtımı

Yonga levha endüstrisi atık sularının arıtımıyla ilgili temel olarak fabrikalarda uygulanan yöntemler; çöktürme, kimyasal ve biyolojik arıtmadır. Çalışmamızda kullanılan atık suyun

alındığı mevcut arıtma tesisinde terfi havuzunda biriktirilen atık sular ve tambur eleğe terfi pompaları ile gönderilmektedir. Tambur elekte fiziksel olarak arıtılan atık su dengeleme havuzuna gelmektedir. Dengeleme havuzunda bekletildikten sonra ise kimyasal üniteye gönderilmektedir. pH dengeleme ve koagülasyon işlemi hızlı karıştırmada, flokülasyon işlemi ise yavaş karıştırma prosesinde gerçekleştirilmektedir. Tesiste koagölant olarak sıvı polialüminyum klorür kullanılmaktadır. Cazibe ile durultucuya gelen atık suların içinde çökelen parçaçıklar, havuz tabanından pompalar ile çamur havuzuna aktarılır, savaklanan su ise biyolojik arıtım ünitesine alınır.

Atık sular biyolojik olarak arıtıldıktan sonra çöktürme havuzunda bekletilmektedir. Son öktürme havuzu tabanından çekilen çamurun bir kısmı biyolojik arıtıma geri döndürken kalanı ise çamur havuzuna alınmaktadır. Susuzlaştırma işlemi beltpres kullanılarak yapılmaktadır. Beltpres ile susuzlaştırılan çamur toplanıp mevzuata uygun olarak değerlendirilmektedir. Terfi havuzuna beltpres yıkama suları ve süzöntü suları geri döndürölmektedir. Atık su numunelerinin alındığı tesise ait arıtma tesisi şeması şekil 2.14'te verilmiştir.



şekil 2.14: Yonga levha atık suları arıtma tesisi şeması.

Ağaç ve kağıt endüstrisi atık sularına ait Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'nde (SKKY) yer alan alıcı ortama deşarj sınırları EK-A'da verilmektedir. Bununla birlikte endüstride farklı ürünlerin üretimi, suyun yeniden kullanım talebi vs durumlarla bu atık suların arıtım kriterleri ve deşarj limitleri değişebilmektedir. Selülöz içerikli diğer atık suların (kağıt, karton vb.) deşarj kriterlerinde yer alan AKM, renk gibi parametrelere de direk deşarjda dikkat edilmesi gerektiği düşünülmektedir.

2.2 Odun Hammaddesi Kullanılan Endüstriyel Atık Suların Arıtım Yöntemleri

Odunu üretimde hammadde olarak kullanılan endüstrilerin atık suları temel olarak fizikokimyasal arıtım, biyolojik arıtım ve elektrokimyasal arıtım yöntemleri ile arıtılabilmektedir. Aşağıda başlıklar altında bu yöntemlerin kısaca açıklamaları verilmiştir.

2.2.1 Fizikokimyasal Arıtım

Fizikokimyasal süreçler genellikle atık suyun ön, birincil veya üçüncül arıtım aşamalarında kullanılan yöntemlerdir [35]. Fizikokimyasal arıtma prosesleri; askıda katı maddelerin, koloidal partiküllerin, yüzen maddelerin, renkli ve toksik bileşiklerin çöktürme, flotasyon, iyon değişimi, adsorpsiyon, pıhtılaşma, ıslak oksidasyon, ozonlama, elektroliz, ters ozmoz, ultra ve nano filtrasyon teknolojileri ile uzaklaştırılmasını içerir [36, 37]. Yonga levha atık suyunun içeriğinde yüksek miktarda bulunan odun kaynaklı askıda ve çökebilen katılar nedeniyle sedimentasyon başta olmak üzere fiziksel birincil arıtma prosesleri sıklıkla kullanılmaktadır.

2.2.1.1 Kimyasal Koagülasyon/ Flokülasyon

Koagülasyon su ve atık su arıtımında basit, ucuz, etkili ve geleneksel bir yöntem olması nedeniyle önemli rol oynayan bir prosestir [38, 39]. Pıhtılaşma, çeşitli kimyasallar kullanılarak bir süspansiyondaki kolloidlerin veya parçacıkların kararsız hale getirilmesi ve küçük parçacık kümelerinin oluşumuna dayanan işlemdir. Alüminyum (Al^{+3}) ve demir (Fe^{+3}) tuzları, kireç gibi geleneksel pıhtılaştırıcılar; askıda katı maddeleri [40], organik maddeleri [41] ve inorganik iyonları [42] gidermek için yaygın olarak kullanılır. Bunlara ek olarak farklı, doğal pıhtılaştırıcılar kullanılarak yapılan arıtım çalışmaları da literatürde yer almaktadır [43, 44, 45]. Metal tuzlarının pıhtılaştırıcı olarak nasıl davrandığını anlamak için iki ayrı mekanizmanın dikkate alınması gerekir; yük nötralizasyonu ve katyonların elektriksel çift tabaka üzerindeki etkisi. Her iki mekanizma da pH ve toplam metal

konsantrasyonu gibi su kalitesi parametrelerine bağlıdır. Kirletici konsantrasyonu ve cinsi de giderim verimini etkileyen parametrelerdir [46].

Doğal partikül maddelerin yüklü yüzeyinde bir elektriksel çift katman (EÇK) oluşur. İlk katman "Stern tabakası", yüzeyde biriken yükü içerir ve yüzeyin doğasına bağlı olarak pozitif veya negatiftir [47]. Stern tabakasındaki yük, iyonların adsorpsiyonu veya fonksiyonel grupların türlerindeki farklılık nedeniyle değişebilir. İkinci katman, Coulomb kuvveti aracılığıyla yüzey yüküne çekilen 'serbest' iyonlardan oluşur ve Stern katmanını elektriksel olarak perdeler [48]. İyonların yerlerine güçlü bir şekilde bağlı olduğu yüzey Stern tabakasının aksine, bu ikinci tabakadaki iyonlar, elektrostatik kuvvetlerin ve termal hareketin etkisi altında sıvı içinde daha serbest hareket eder. İkinci katman genellikle "yaygın katman" olarak adlandırılır. EÇK, çok yüksek bağlı yüzey alanı/hacim oranı nedeniyle koloidal sistemlerde önemli bir rol oynar. Van der Waals kuvveti zayıf ve atomlar veya moleküller arasında mesafeye bağlı bir etkileşimdir. Bir molekülün boyutu arttıkça Van der Waals kuvveti de artar, bu nedenle koloidal sistemlerde önemli bir etkidir. Bağımsız koloidal parçacıklar birbirine yaklaştıkça mesafe bir noktaya ulaşır ve parçacıkların çekim gücü itme gücünü yener bu sayede parçacıklar bir araya gelir. Çoğu sulu sistemde, koloidal stabilite için birincil mekanizma yük stabilizasyonudur [41].

Koagülantlar; yüzey yükünü ve dolayısıyla zeta potansiyelini düşürerek enerji sınırını azaltmak için ilave edilir. Bu işlemde; kolloid yüküne ters yüklü bir koagülant kullanılması gerekmektedir. Flokülasyon da ise süspansiyona flokülantlar eklenerek asılı kümelenmiş partiküllerin parçacık boyutunu artırmak için yavaşça karıştırılır ve mikro floklar birbirleriyle temas ettirilerek agregalar oluşturulur. Parçacıkların çarpışması, bunların birbirine yapışmasına ve daha büyük floklar üretmesine neden olur. Bu adımda eklenen yüksek moleküler ağırlıklı polimerler topaklanmayı güçlendirmeye, ağırlığı artırmaya ve çökelme oranını iyileştirmeye yardımcı olabilir. Flokülasyon işleminin verimini; flokülant dozu, pH, karıştırma hızı ve süresi etkilemektedir [46].

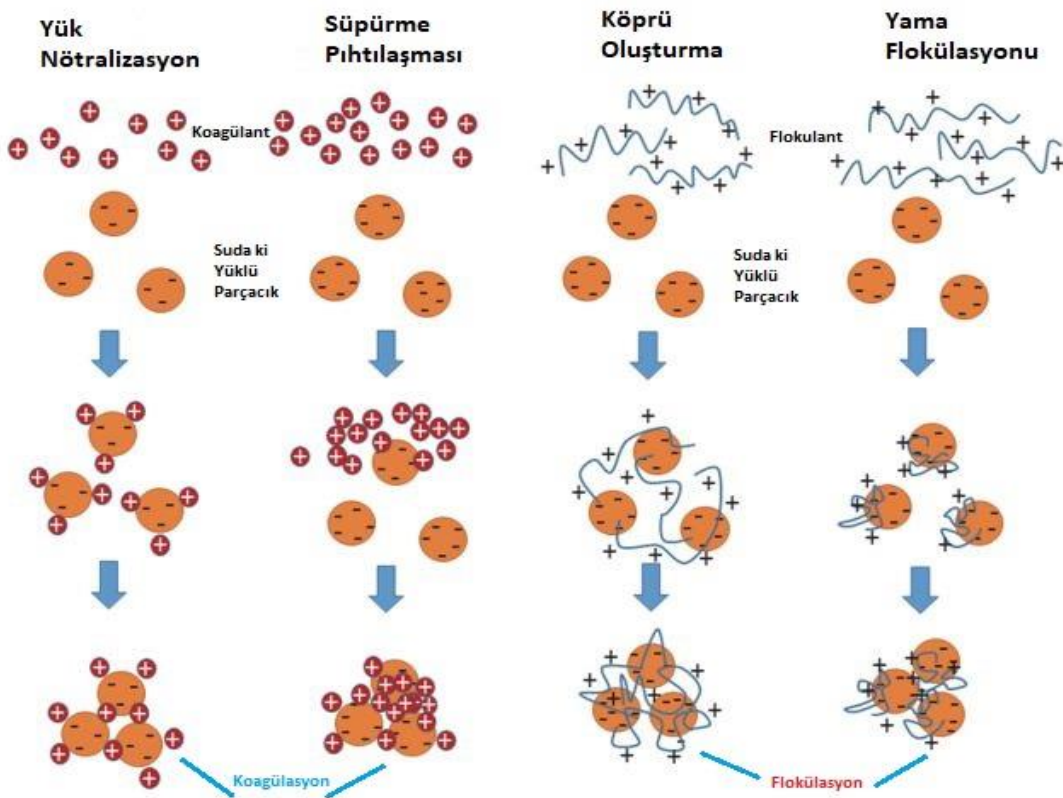
Kimyasal koagülasyon prosesisinin avantajları;

- Sistemin enerji tüketiminin az, işletiminin kolay olması,
- Renk, bulanıklık, zararlı bileşenler, tat, koku, organik madde ve askıda katı madde içeriği yüksek sularda kullanılabilir olmasıdır.

Sistemin dezavantajları ise;

- En büyük dezavantajı çamur oluşumudur,
- Koagülant olarak kullanılan kimyasallar maliyet kalemini yükseltmektedir [49].

Flokların boyutlarının dağılımı ve proses sırasında çökelen çamurun kalınlığı koagülasyon-flokülasyon prosesi için kritik tasarım ve kontrol parametreleridir. Flokülasyon işleminden sonra çöktürme işlemi yapılır [50]. Koagülasyon ve flokülasyonun yüklü parçacık üzerinde şematik gösterimi Şekil 2.15'te verilmiştir.



Şekil 2.15: Koagülasyon ve flokülasyon mekanizması [51].

Yonga levha/MDF üretim sanayi atık sularının arıtımıyla ilgili literatürde çok fazla çalışma bulunmamakla birlikte; son yıllarda deşarj standartlarına eklenen yeni parametrelerin ve su kaynaklarının korunması amacı taşıyan suyun yeniden kullanımı düşüncesinin etkisiyle selülöz içeriği yüksek atık suların arıtımıyla ilgili çalışmalar da artmaktadır. Kimyasal arıtım kullanılarak yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda yer almaktadır.

Razali vd. (2011), geliştirdikleri farklı molekül ağırlığındaki polidialildimetilamonyum klorürün (polyDADMAC) kağıt atık suyunun arıtımdaki flokülasyon performanslarını incelemişlerdir. 0,4–2,0 mg/L aralığındaki flokülant konsantrasyonlarında yapılan çalışmada bulanıklık, AKM, KOİ ve zeta potansiyeli ölçümleri yapılmıştır. pH 9’un altında giderimin gerçekleştiğı ve PDM04 flokülantının en başarılı sonucu sağladığı tespit edilmiştir [52].

Irfan vd. (2013), kağıt endüstrisi atık suyundan AKM, renk, KOİ giderimi için; Alum, demir klorür, alüminyum klorür, demir sülfat, polialüminyum klorür (PAC), katyonik ve anyonik poliakrilamid polimerleri (PAM) gibi çok farklı pıhtılaştırıcı ve flokülantlar kullanarak kimyasal arıtımı araştırmışlardır. Demir klorür ve alüminyum klorür için optimum pH’larda (pH 3-4-5) maksimum KOİ, AKM ve renk giderim verimleri sırasıyla %16, %50, %46 ve %13, %48, %52 olarak tespit edilmiştir. Katyonik ve anyonik PAM eklendiğinde KOİ, AKM ve renk giderimi sırasıyla %74, %93, %77 (katyonik PAM) ve %72, %93, %78 (anyonik PAM) olarak bulunmuştur [53].

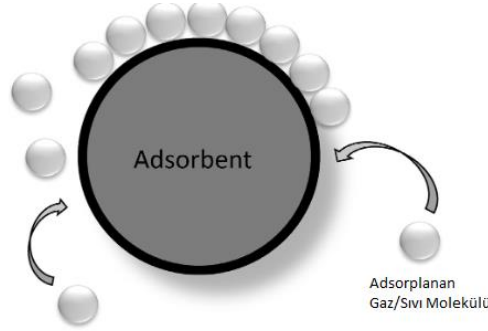
Kim (2016), yaptığı çalışmada koagölant olarak PAC dozajının (1000-5000 mg/L), flokülant olarak PAM dozajının (10-50 mg/L) ve pH’nın (2-10) kağıt atıksuyunun ön arıtımındaki etkisini incelemiştir. YYY kullanılarak yapılan optimizasyonda optimum koşullar; PAC 3689 mg/L, PAM 39,9 mg/L ve pH 5,4’tür. Bu şartlarda KOİ, AKM ve çamur hacim indeksi parametrelerinin maksimum giderim değerleri sırasıyla %35, %75, %88 olarak bulunmuştur [54].

2.2.1.2 Adsorpsiyon/İyon Değişimi

Adsorpsiyon; bir çözeltiden belirli maddelerin uzaklaştırılması için bir soğurucunun (adsorbent) kullanımından oluşan bir yöntemdir. Su arıtımında, ileri atık su arıtımında ve spesifik kirleticilerin endüstriyel atık sulardan gideriminde yaygın olarak kullanılır. Ekonomik oluşu ve organik bileşenlerin büyük kısmını soğurma özelliğı nedeniyle en çok kullanılan adsorbent aktif karbondur. Atık su ileri arıtımında organik maddelerin ve endüstriyel atık su arıtımında da başlıca zehirli/inert bileşenlerin uzaklaştırılması için kullanılır [55].

Aktif karbon ağaç, talaş, meyve çekirdekleri, hindistan cevizi kabuğu, kömür, linyit ve petrol artığı gibi çeşitli maddelerden üretilir [56]. Ayrıca aktif karbonun rejenerasyonunun pahalı bir işlemdir. Bu nedenle alternatif adsorbentlerin oluşturulması ve kullanılması ile ilgili arıtım çalışmaları da son yıllarda çokça yapılmaktadır. Doğal biosorbent olarak; patates

kabuğu [57], şeker kamışı küspesi [58], pirinç kabuğu [59] vb. gibi malzemeler de kullanılmaktadır. Adsorpsiyonu kısaca açıklayan görsel Şekil 2.16’da verilmiştir.



Şekil 2.16: Adsorpsiyon süreci [60].

Shawwa vd. (2001), kağıt ağartma atık sularından renk, KOİ, AOX giderimini kendi ürettikleri toz aktif karbon ile %90’ın üzerinde gidermişlerdir [61]. Temmink ve Grolle (2005), yaptıkları çalışmada biyolojik arıtılmış kağıt atık sularının aktif karbon kullanarak ileri arıtımını araştırmışlardır. Aktif karbon adsorpsiyonunun özellikle renk gideriminde verimli bir metot olduğunu belirlemişlerdir [62].

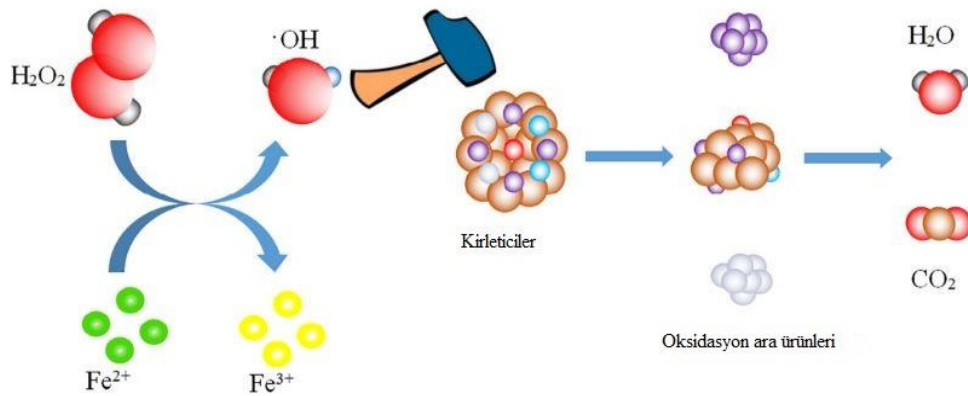
İyon Değişimi; çözeltideki belirli iyonlar, iyon değişimi katısı tarafından tercihli olarak soğurulur ve elektriksel yük eşitliğinin korunması gerektiğinden iyon değiştirici katı bu iyonlar yerine çözeltiye yeni iyonlar bırakır. Ticari olarak su yumuşatılmasında kullanılan ilk iyon değişimi malzemesi zeolittir. Son yıllarda ise yüksek iyon değişimi kapasitesine sahip yapay organik değişim reçineleri kullanılmaktadır [56]. İyon değişimi; su yumuşatma, nitrat ve fosfat giderimi [63], ağır metal içeren atık suların arıtımı [64] gibi işlemlerde tercih edilmektedir.

Bassandeh vd. (2013), çalışmalarında biyolojik ön arıtılmış gazete kâğıdı atık sularından 6 farklı iyon değiştirici reçine (TAN1, Marathon MSA, Marathon WBA, 21K-XLT, Marathon 11, G26) kullanarak toplam çözünmüş madde giderimini araştırmışlardır. TAN1 reçinesi en iyi performansı gösterirken TOK giderimi %50 olmuştur. G26 reçinesinin ise %27 TOK giderimi ile çok etkin olmadığı anlaşılmıştır. TAN1 ve Marathon WBA reçineleri için %74 ve %93’e varan maksimum rejenerasyon oranlarına ulaşılan çalışmada reçinelerin anyon, katyon, renk ve lignin gideriminde de etkili olduğu tespit edilmiştir [65].

2.2.1.3 Fotokatalitik Oksidasyon/Fenton/Ozonlama

Fotokatalitik oksidasyonda; UV ışığının etkisi ile yarı iletken metal oksit katalizör yüzeylerinde oluşan $\text{OH}\cdot$ radikalleri adsorpsiyon mekanizmasına göre hedef kirleticilere tutunarak bozunma sağlanmaktadır. Katalizör olarak bazı metal oksitler (Cu, Co, Mn, Cr, Ti ve Zn) ve çeşitli soy metaller (Ru, Pt, Ir ve Pd) kullanılabilir. En çok tercih edilenler ZnO ve TiO_2 'dir. TiO_2 'ye dayalı yarı iletken fotokataliz, çok çeşitli organik kirleticilerin ve hatta mikroorganizmaların bozunma ve mineralizasyonu için en yaygın olarak araştırılan ileri oksidasyon prosesidir (İOP) [66]. Fotokatalitik bozunma, kirletici türüne ve ortam koşullarına göre değişen birçok farklı reaksiyon basamağı içermektedir. Bu reaksiyonlar ile oluşan yan ürünler de farklı olduğundan standart bir reaksiyon hız denklemi oluşturulabilmiş değildir [67]. Puri ve Verma (2022), ikincil arıtılmış kâğıt atık sularında Fe– TiO_2 katalizör kompoziti kullanarak 60 dk reaksiyon süresi sonunda %91,6'lık renk giderimi elde etmiş ve çeşitli kinetik modellerin hız sabitlerini belirlemişlerdir. Yöntemin kâğıt endüstrisi atık sularında üçüncül arıtma tekniği olarak renk gideriminde etkili olduğunu belirtmişlerdir [68].

Fenton prosesi; Yüksek elektrokimyasal oksidasyon potansiyeline sahip serbest hidroksil radikallerinin ($\text{OH}\cdot$) oluşumunu temel almaktadır. Endüstriyel atık suların arıtımı için de kullanılan proses, bilinen en iyi İOP'lerdendir [69]. Fenton prosesinde temel ajanlar; Fe^{+2} iyonları ile $\text{OH}\cdot$ radikalleridir. Bu radikaller sulu asidik çözeltide katalitik olarak hidrojen peroksitin bozunması sonucu ortaya çıkar. pH aralığı 3-5 aralığı fenton reaksiyonlarında radikal oluşumu için önerilen proses çalışma aralığıdır [70]. Şekil 2.17'de fenton prosesi şematik olarak görülmektedir.



Şekil 2.17: Fenton prosesi şematik gösterim [69].

Machado vd. (2004), yaptıkları çalışmada Brezilya’da bulunan yonga levha endüstrisi atık suyunun fotofenton ve fenton benzeri prosesleri ile arıtımını incelemişlerdir. 2000-4000 mg/L başlangıç KOİ’sine sahip atık suda; demir tuzu olarak 7 ve 10 mg/L FeSO_4 ve $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ kombinasyonlarının kullanıldığı çalışmada %60-100 arasında KOİ giderim verimleri elde edilmiştir. 39,85 °C ve pH 3 en iyi giderim şartlarını sağlamıştır. Fotofenton için ise 400 kJm^{-2} ($\pm 5\%$) UV-A dozunda optimum şartlar olmuştur [71].

Ozonlama; kuvvetli bir oksitleyici ve etkili bir dezenfektan olan ozon (O_3) organik kirletici ile doğrudan (moleküler O_3 formunda) ya da dolaylı olarak ($\text{OH}\cdot$ serbest radikal formunda) reaksiyona girebilir Ozonlama atık sulardan deterjan, endokrin bozucular, ilaç atıkları gibi mikro kirleticilerin giderimi için de uygun bir arıtma seçeneğidir. Ayrıca dezenfeksiyon amaçlı klora da alternatif oluşturmaktadır [72, 73] .

Mainardis vd. (2020), biyolojik arıtım öncesi ve sonrası kağıt atık atık sularının pilot ölçekli ozonlama ünitesi ile KOİ giderimini inceledikleri çalışmada ozonlamanın uygulanabilirliğinin tespiti için maliyet analizi de gerçekleştirmişlerdir. Biyolojik arıtım öncesi ozonlamada %46 olan KOİ oranı, biyolojik arıtım sonrası ozonlamada %81’e yükselmiştir. 1200 m^3/sa debideki atık su arıtımı için maliyet 1,5-2 M€ bulunmuştur. Ozonlamanın toksisiteyi de azalttığı belirlenmiştir [74].

2.2.1.4 Membran Filtrasyon

Atık su arıtımında, membran ayırma sistemlerinin seçiminde veya tasarımında en önemli parametre, suda giderilecek kirleticileri ayırmak için uygun membran özelliğinin bilinmesidir. Birçok proses için membran, süspanse veya çözünmüş halde olabilen kirleticileri tutarak sudaki kirleticilerin büyük ölçüde uzaklaştırılmasını sağlar. Membran malzemesi seçiminde; basınca, sıcaklığa ve pH’ya dayanıklı olması, kimyasal direncinin yüksek olması ve maliyete dikkat edilmelidir. Membranlar itici kuvvet tipine göre; basınç, konsantrasyon, elektriksel potansiyel ve sıcaklık farklılığı olmak üzere dört ana grupta toplanmaktadır. Çevre Mühendisliği uygulamalarında en çok itici kuvveti basınç olanlar tercih edilmektedir. İtici kuvvet olarak basıncı kullanan membran prosesleri ise; mikrofiltasyon, ultrafiltasyon, nanofiltasyon ve ters ozmosdur [75].

Zhang vd. (2007), geleneksel yöntemlerle arıtılmış kâğıt atık suyunun üretimde yeniden kullanımı amacıyla membran biyoreaktör, membran filtrasyonu ve ters ozmozdan oluşan bir sistemi incelemişlerdir. Ters ozmoz ile su 200 mS/cm altında iletkenlik değeri, 15 mg/L altında KOİ ve 0,1 NTU'dan az bulanıklık değerini sağlamıştır. %65'lik su geri kazanımı ile en etkili proses olduğu belirlenmiştir [76]. Membran prosesleri ile katı madde içeriği yüksek atık suların arıtımında en önemli sınırlama membranın kirlenmesidir. Bu durum hızlı bir akı düşüşüne neden olur. Membran seçimi ve işletimi bu anlamda en önemli konulardır [77].

2.2.2 Biyolojik Arıtım

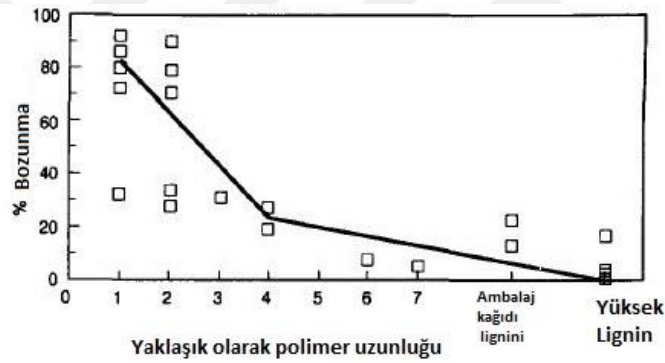
Klasik arıtma sistemleri endüstriyel atık sulardan çeşitli kirleticilerin (KOİ, BOİ, AKM ve AOX) gideriminde kullanılmaktadır. Kâğıt ve odun sanayi atık sularının ana bileşenlerden bazıları (formaldehit, melamin, üre, odun özütleyiciler, lignin, üre/formaldehit ve melamin/formaldehit reçine parçaları) toksik ve büyük olasılıkla içerdiği formaldehit-melamin varlığından dolayı biyolojik arıtma ile parçalanmaları zordur [78]. Biyolojik arıtma sistemleri aerobik ve anaerobik sistemler olarak ayrılırlar. Endüstriyel atık suların arıtılmasında en çok kullanılanlar aktif çamur sistemleri ve uzun havalandırmalı lagünlerdir [36].

Saunamaki (1997), Finlandiya'da kâğıt üretimi sonucu oluşan atık sulardan, gerçek ölçekli bir tesiste aktif çamur sistemi ile % 82 oranında KOİ gidermişlerdir. Kâğıt hamuru üretimi atık sularda ise bu oran % 57,1 KOİ giderimidir. Aynı zamanda kâğıt üretimi ve kâğıt hamuru üretimi atık sularından sırasıyla %90 ve %76 AKM ile %93 ve %94 oranında BOİ giderimi de gerçekleştirilmiştir. Aktif çamur sistemlerinde bu tarz atık suları arıtırken karşılaşılan başlıca işletme problemlerinin; makro nütrientlerin (azot, fosfor) kısıtlı olmasına bağlı olarak ipliksi bakterilerin gelişimi ve çamur kabarması olduğu bilinmektedir [79].

Aktif çamur proseslerinde bulunan bakterilerin zarar görmemesi ve inhibe olmaması adına atık sudaki bazı kirletici parametrelerinin belli konsantrasyonların altında olması gerekmektedir. BOİ₅/KOİ oranı; endüstriyel atık suların aktif çamur sistemlerinde arıtılabilirliğinde önemli bir indekstir. Ülkemizdeki mevcut tesislerde genellikle uzun havalandırmalı aktif çamur sistemleri tercih edilmektedir. İşletme kolaylığı sağlaması ve giderim verimliliğinin yüksek olması gibi etmenler bu prosesin en önemli tercih sebepleridir [80].

Anaerobik arıtım yöntemleri ilaç, kimya, mezbaha, süt/peynir üretimi ve selüloz/kağıt endüstrisi atık sularının arıtımında geniş uygulama alanına sahiptir. En yaygın kullanılanları klasik anaerobik lagünler ve akışkan yataklı reaktördür. Aerobik arıtmaya göre; oluşan çamur miktarının daha az oluşu ve enerji masrafının düşük olması gibi avantajları olan bir prosestir [81].

Odun temelli atık sularının biyolojik arıtımı içerdiği lignin nedeniyle zordur. Çünkü lignin diğer polimerlerden farklı olarak aynı tip monomerlerin ardışık bağlanmış şekli olmayıp, farklı tipteki monomerlerden oluşur. Lignini oluşturan monomerler en az beş farklı tarzda bir araya gelebilmekte ve bunlardan hiçbiri anaerobik olarak kolayca hidroliz olamamaktadır [81]. Rintala ve Puhakka (1993), lignin polimer uzunluğu ve anaerobik parçalanabilirliği arasındaki ilişki olduğunu belirtmişlerdir [82]. Şekil 2.18’de polimer uzunluğu ve bozunma ilişkisi gösterilmiştir.



Şekil 2.18: Lignin polimer boyutunun anaerobik parçalanabilirlik üzerindeki rolü [82].

2.2.3 Elektrokimyasal Arıtım

2.2.3.1 Genel Elektrokimyasal Kavramlar

Elektrokimyasal su arıtmanın temelleri 1889 yılında atılmıştır. İçme suyu için elektrokoagülasyon ilk olarak 1946'da Fred E. Stuart tarafından gerçekleştirilmiştir. 20. yüzyılın ikinci yarısında ise konu üzerine birçok araştırma yapılmıştır [83]. Elektrokimyasal arıtım yöntemleri petrokimya, tekstil, deri, ilaç, zeytinyağı, kâğıt endüstrisi atık sularının arıtımında ve sızıntı suyu arıtımında kullanılmaktadır [84].

Elektrokimya; elektrik enerjisi üreten veya elektrik enerjisiyle yürüyen indirgenme, yükseltgenme reaksiyonlarının tamamını içine alan bir bilim dalıdır. Elektrokimyasal

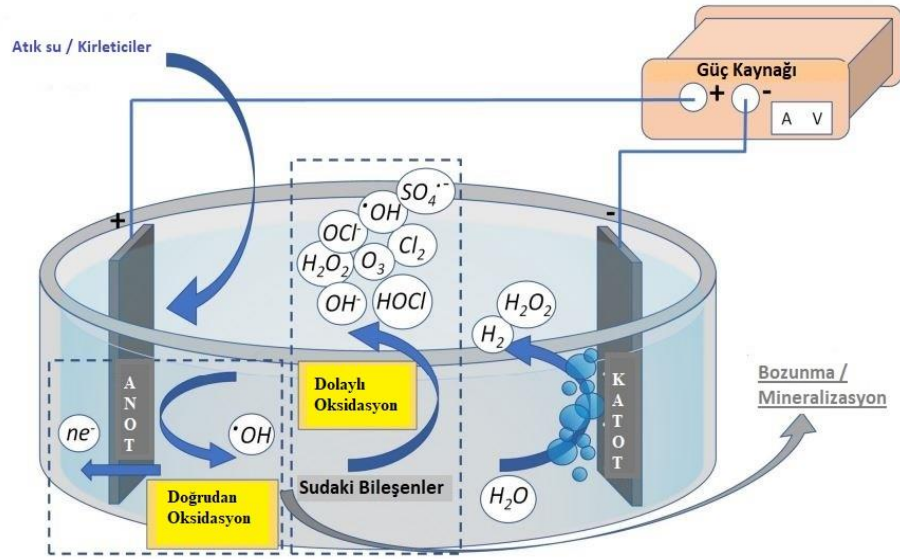
olayların mekanizması temelinde redoks reaksiyonuna dayanır. Yani elektrik üretir veya elektrik akımı yardımıyla reaksiyon gerçekleşir. Redoks reaksiyonları iki yarı reaksiyondan ibaretti. Bunlar; indirgenme yarı reaksiyonu ve yükseltgenme yarı reaksiyonudur. Elektrik akımı ise bir metalik iletken ve bir elektrolit iletken yardımıyla ortaya çıkarılır [85].

Elektrolitik hücre; iletken bir ortamda bulunan iki farklı tür elektrotun oluşturduğu sistemler olarak tanımlanabilir. Katot; indirgenme tepkimesinin olduğu elektrot, anot ise yükseltgenme tepkimesi olan elektrota denilir. İki tür reaksiyon gerçekleşir. Elektrolitik hücre içinde elektrot elektrolite pozitif elektrik yükü verirse veya elektrolit elektroda negatif elektrik yükü aktarırsa katodik reaksiyon gerçekleşir ve bu durumdaki akım ise katodik akım olarak adlandırılır. Tam tersi durumlarında gerçekleşen reaksiyona ise anodik reaksiyon ve geçen akıma da anodik akım adı verilir [86].

2.2.3.2 Elektrooksidasyon

Elektrooksidasyon (EO); organik maddelerin dolaylı ya da direk yollardan çözünmeyen bir anot malzemesi kullanılarak oksitlenmesi esasına dayanır. EO prosesi, birçok kirliliğin yanı sıra toksiteye sahip atıkların parçalanmasına da olanak sağladığı için atık suların arıtımında kullanılan alternatif yöntemlerden biridir. Yöntemde aktif rolü oynayan elektrot anottur, bundan ötürü proste etkili olan parametrelerin başında anodun katalitik aktivitesi gelmektedir. Elektrot materyalinin tipine bağlı olarak hidroksil radikallerinin ($\text{OH}\cdot$) üretim ve reaktivitesi doğrudan değişir. Yapılan çalışmalarda genellikle; Ti/Pt-Ir , $\text{TiO}_2/\text{TiRuO}_2$, $\text{Ti/RhO}_x\text{-TiO}_2$, $\text{Ti/PdO-Co}_3\text{O}_4$, Ti/Pt , PbO_2/Ti , $\text{PbO}_2/\text{SnO}_2$, SnO_2 , PbO_2 , Bor kaplı elmas anotlar yaygın olarak kullanılmaktadır [87, 88].

EO, anot yüzeyinde üretilen hidroksil veya hidroperoksil radikalleri kullanılarak kirleticilerin doğrudan oksidasyonu yoluyla veya klor, hipokloröz asit ve hipoklorit veya hidrojen peroksit/ozon gibi kimyasalların elektrotlarda oluşturduğu oksidanların aracılığı ile indirek bir işlemle oluşabilir [83]. Şekil 2.19'da bir elektrokimyasal hücre üzerinde bu reaksiyonlar görülmektedir.



Şekil 2.19: Bir elektrooksidasyon hücresinin şematik gösterimi [89].

Elektroliz süresince elektrokimyasal olarak anot yüzeyinde aktif oksijenin iki oksit türü (MO_x) üretilebilir. Elektrokimyasal parçalanmadan sorumlu olan ilk ajan fiziksel olarak adsorplanmış oksijendir ($OH\cdot$) ve adsorplanmış aktif oksijenin (MO_{x+1}) de elektrokimyasal çevrimden sorumlu olduğu söylenebilir [90]. Bununla ilgili oluşum denklemleri Denklem 2.1 ve Denklem 2.2’de verilmiştir.



Burada; R, organik bileşiklerin ve n, anot yüzeyinde adsorbe edilmiş olan $OH\cdot$ ’nin sayısıdır. Elektrolit olarak sodyum sülfat kullanılması durumunda Denklem 2.3’teki gibi güçlü persülfat oksidantları da verimli bir şekilde üretilebilir.



Ayrıca Denklem 2.4’teki H_2O_2 oksidantı da, asidik/nötr ortamda katot yüzeyinde iki elektronlu oksijen indirgenmesinden üretilebilir [91].



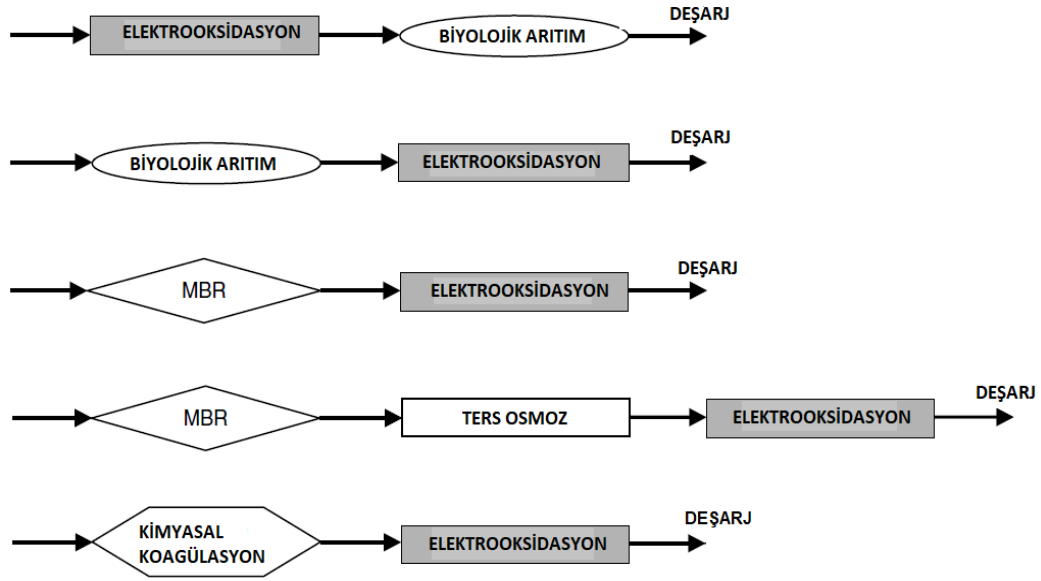
Elektrokimyasal oksidasyon, sulardaki kirlilik problemlerinin önlenmesi ve giderilmesi için çeşitli avantajlar sağlar. EO prosesinin avantajları ve dezavantajları Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1: EO prosesinin avantaj ve dezavantajları [84].

EO Prosesinin Avantajları	EO Prosesinin Dezavantajları
Prosesin doğasındaki temel avantaj; temiz bir reaktif olan elektron kullanmasıdır. Yani kimyasal eklemeye çok ihtiyaç yoktur.	Yüksek enerji tüketimine bağlı elektrik maliyeti oluşmaktadır.
Basit ekipman gerekir ve kolay kullanım sağlar.	Yeterli iletkenliğe sahip olmayan sularda elektrolit desteği gerekir.
Sağlamlık; Bir operasyon probleminden sonra reaksiyon saniyeler içinde sonlandırılabilir yada yeniden başlatılabilir.	Aktif klor dikkate alınmalıdır. Dolaylı oksidasyon sırasında klorlu organiklerin oluşum potansiyeli vardır.
Çok yönlülük; EO süreci birçok kirleticiyle giderebilir ve mikrolitreden milyonlarca litreye kadar farklı miktarlarda atık su işlenebilir.	Elektrot yüzeyinde birikme nedeniyle yüzey kirlenmesi meydana gelebilir.
Otomasyona yatkınlık; EO da kullanılan elektriksel değişkenler veri toplama, süreç otomasyonu ve kontrolü için uygundur.	
Çamur oluşumu yok denecek kadar azdır.	

Bazen proseste ortam direncini artırması ile verilen akımın bir kısmının ısıya dönüşmesi ve akım yoğunluğunun verimini düşüşü görülebilir. Bunun en önemli nedeni atık suların içinde bulunabilecek katı maddelerdir. Böyle bir durumda hem elektrik maliyetlerini artırmakta hem de atık suların arıtma verimleri düşmektedir.

Bu nedenle EO prosesinden önce bir ön arıtım yöntemi uygulanması, EO prosesinin verimini artıracaktır. Daha yüksek arıtma verimleri aynı akım şiddetlerinde elde etmek amacıyla; katı madde uzaklaştırılması iyi yapılmış olan bir atık suya EO uygulanmalıdır. Böylece anotların pasifize olması engellendiğinden verim artacaktır [85]. Ayrıca EO prosesi diğer elektro (EK gibi) proseslerde birlikte de kombinlendiğinde başarılı sonuçlar elde edilmektedir [92]. Şekil 2.20’de farklı proseslerin EO ile ardışık kullanım alternatiflerinden bazıları görülmektedir.



Şekil 2.20: EO prosesi ile atık su arıtımında farklı proseslerin kombinasyon alternatifleri [84].

Brink vd. (2018), geri dönüştürülmüş kağıt endüstrisi atık suyunda yaptıkları çalışmada aerobik hareketli yataklı bir biyofilm reaktörü (biyolojik arıtım) ile fenton benzeri yöntemini ($\text{Fe(III)/H}_2\text{O}_2$) ardışık kullanım potansiyelini incelemişlerdir. %55 KOİ giderimi ve %63,5 uçucu organik asitler giderim verimi bulunmuştur [93].

Gilpavas vd. (2020), çalışmalarında EK, EO ve adsorpsiyon işlemini birleştirmişlerdir. Tekstil atık sularından KOİ, TOK ve renk gideriminin incelendiği çalışmada atık su toksisitesi ve maliyet analizi de değerlendirilmiştir. Ardışık EK ve EO prosesinin sonucunda rengin %100'ünün, KOİ'nin %88'inin ve TOK'un %79'unun giderimi sağlanmış ve BOİ₅/KOİ oranı 0,23'ten 0,58'e yükselmiştir; ancak arıtılmış atık su, *Artemia salina* için çok zehirli olmaya devam ettiğinden prosese adsorpsiyon eklenerek akut toksisite azaltılmıştır. EK+ EO'nun düşük moleküler ağırlıklı (< 5 kDa) bileşikler elimine etmede etkili olduğu anlaşılmıştır. Bu ardışık üç proses için kimyasal reaktifler, elektrotlar, enerji tüketimi ve çamur bertarafını içeren işlem maliyeti 3,83 USD/m³ olarak hesaplanmıştır. [94].

Elektrooksidasyon prosesini etkileyen parametreler; Akım yoğunluğu/şiddeti, işletim süresi, pH, elektriksel iletkenlik, sıcaklık ve kullanılan elektrot özellikleridir [83]. Bu parametrelerin etkisi aşağıda sırasıyla özetlenmiştir.

1. İletkenlik Etkisi

İletkenlik; cisimlerin, ortamların, kütlelerinin bir noktasından diğerine ısı veya elektriği az/çok iletmesi özelliğidir. Elektriksel iletkenlikte, elektronların metal atomları üzerindeki hareketi önem taşımaktadır. Çözeltilerin elektrolitik iletkenliğinde elektrolitler içindeki (+) ve (-) yüklü iyonlar bir potansiyel farkı altında katoda ve anoda doğru hareket ederek elektrik akımını taşınır. Anot ve katotta aynı anda meydana gelen kimyasal reaksiyonlar ile elektron alınır veya verilir ve elektrik akımı çözelti içinden taşınmış olur [95]. İletkenliğin toplam oksidasyon verimine etkisi konusunda bir fikir birliği olmamasına rağmen sabit bir akım yoğunluğu için elektrolit iletkenliği arttığında elektrokimyasal hücre voltajının azaldığı belirtilmektedir. Bu nedenle arıtılacak olan atık suyun elektriksel iletkenliği yüksek ise elektrokimyasal oksidasyon prosesinin işletme maliyeti daha uygun olacağı düşünülmektedir [96].

2. pH Etkisi

EO'da reaksiyon sonucunda pH düşme eğiliminde olmaktadır. Hidroksil radikallerinin oluşum mekanizması için EO prosesinde en etkili parametre pH'dır. Kullanılan atık suların kompozisyonlarının karmaşık olması, kullanılan anot malzeme türü ve çalışılan farklı pH aralıkları neticesinde literatürdeki çalışmaların bazılarında nötr yada bazik, bazılarında ise asidik şartlarda iyi giderimler elde edilmiştir [90]. pH çözeltide kullanılan elektrolit cinsine göre radikal oluşumunu da etkileyen bir parametredir. Kullanılan elektrolitin oksidatif ajanları oluşturması için uygun pH aralığı elektrolit cinsine göre değişmektedir [91].

3. Elektrolit Etkisi

EO çalışmalarında genellikle sodyum klorür (NaCl) ve sodyum sülfat (Na_2SO_4) destek elektrolit olarak kullanılmaktadır. Destek elektrolit olarak eklenmesi en çok tercih edilen sodyum klorür ile güçlü oksidant ajanlar elde edilebilmektedir. Bunun yanı sıra aktif klor varlığında oluşabilecek organoklorlu ara ürünler ise çok toksiktir. Bu elektrolitlerin çözünmesi sonucu EO prosesini etkileyen oksidatif ajanlar oluşmaktadır. Oluşacak oksidant miktarını artıran elektrolit konsantrasyonu ile artıracak için belli noktaya kadar EO'nun etkinliği de artırmaktadır. Örneğin; sülfat radikalleri pH <7'de dominant reaktiflerdir ve asidik pH'da oksidasyon için hidroksil radikallerinden daha seçicidirler. Fakat nötr seviyede $\text{OH}\cdot$ ve sülfat radikalleri reaksiyonda eşit olarak görev alırlar. Bununla beraber, sülfat radikallerinin yarı ömrü hidroksil radikallerinden daha uzundur ve dolayısıyla elektron

transferi reaksiyonlarında daha seçicidir. Bu nedenle daha verimli oksidant olarak kabul edilmektedirler [97, 98].

4. Sıcaklık Etkisi

Artan sıcaklıkla birlikte sudaki oksidatif ajanların çözünürlüğünün azalması kirletici giderimine olumsuz etki göstermektedir. Sıcaklığın iletkenlik üzerine de önemli etkisi vardır. Sıcaklık arttıkça çözeltinin viskozitesi azalır yani akışkanlığı artar ve iyonlar çözelti içinde daha kolay hareket eder böylelikle iletkenlikte artış olur. Ancak sıcaklık daha da artarsa bu defa iyon hareketlerinde görülen artış iyonların birbiri ile şiddetle çarpışmasına neden olur. Bu durum iyon hareketlerini güçleştirir ve iletkenliği azaltacak yönde etki yapar. Bu iki etki sonucu iletkenlikte artış olduğu halde yüksek sıcaklıklarda yeniden azalış görülür [99].

5. Süre Etkisi

EO sürenin artmasıyla birlikte atık sulardan kirletici gideriminin arttığı bilinmektedir [90]. Bu durum elektroliz süresiyle anotta üretilen hidroksil radikalleri ve üretilen dolaylı oksidanların miktarındaki artış ile organik kirletici gideriminin artması ile açıklanabilmektedir [100]. Bununla birlikte belirli bir süre sonrasında oluşan bazı kararlı organik bileşiklerin yükseltgenmeye karşı direnç göstermesinin EO prosesinin enerji tüketimini artırdığı bildirilmiştir [101].

6. Elektrot Tercihi

Prosesin seçiciliğini ve verimliliğini etkilediği için elektrot cinsinin seçimi çok önemlidir. Bir elektrot; yüksek fiziksel ve kimyasal kararlılık, erozyona karşı direnç, korozyon ve pasivasyon tabakalarının oluşumu, katalitik aktivite ve seçicilik, ucuz ve dayanıklı olmak gibi özelliklere sahip olmalıdır [84]. Grafit ve KMO elektrotlarının kağıt atık sularının arıtımında etkili bir şekilde kullanıldığı rapor edilmiştir [88]. Grafit çok eskiden beri mükemmel elektriksel özellikleri, düşük maliyeti ve elektrotların kolay hazırlanması gibi avantajları nedeniyle tercih edilmektedir. KMO anotlar ise iyi bir stabiliteye ve yüksek katalitik aktiviteye sahiptirler. Grafit elektrotlarla karşılaştırıldığında bu oksit elektrotların iletkenliği ve korozyon direnci iyidir ancak mekanik mukavemeti ve erozyon direnci zayıftır. KMO elektrotlarda titanyum bazlı malzemeler alt tabaka olarak kullanılmak olarak kullanılmaktadır.

Literatürde sıklıkla karşılaşılan bazı anot materyallerine ait oksijen dönüşüm potansiyel değerleri Tablo 2.2’de verilmiştir. Elektrot mesafesinin etkisi üzerine yapılan literatür çalışmalarında ise; elektrotların birbirine çok yakın yerleştirilmesinin elektrotlar arasında birikmelere neden olarak atık sudaki kirleticilerinin uzaklaştırılmasında verimi azaltacağı belirlenmiştir [102].

Tablo 2.2: Anot materyallerinden bazılarının oksijen dönüşüm potansiyelleri [91].

Anot Türleri	Değer (V)
RuO ₂	1,4-1,7
IrO ₂	1,5-1,8
Pt	1,6-1,9
Grafit	1,7
Ebonex (Ti ₄ O ₇)	1,7-1,8
PbO ₂	1,8-2,0
SnO ₂	1,9-2,2
Si/BDD	2,3
Pb/Sn	2,5
Ti/BDD	2,7-2,8

Son yıllarda literatürde EO prosesi ile yapılan çalışmalar artmaktadır. Aşağıda da bunlardan bazıları özetlenmiştir.

Linares-Hernández vd. (2010), yaptıkları çalışmada endüstriyel atık su arıtma tesisinden aldıkları numunede elektrokoagülasyon ve elektrooksidasyon prosesleri ile KOİ giderimini araştırmışlardır. Çalışma pH 2-12 aralığında yürütülmüştür. Renk, bulanıklık, BOİ ve toplam koliformun da incelendiği bu çalışmada EK prosesi (kolloidal ve askıda katı giderimi) 30 dk gibi kısa bir sürede sonuçlanırken, EO prosesi (minerilizasyon) 210 dk sürmüştür. Bu nedenle başlangıç KOİ’sinin 890 mg/L olduğu atık suda iki proses kombine edilmiş, EK sonrası pH 8 ve KOİ 425 mg/L iken EO prosesine devam edilmiştir. 90 dk sonunda KOİ’nin tamamı giderilmiştir [92].

Radjenovic vd. (2011), çalışmalarında belediye atık sularının ıslahı sırasında oluşan temiz su akışı (geçirgen) bir ters ozmoz konsantresinin arıtımı için elektrokimyasal oksidasyon araştırılmıştır. Beş farklı elektrot malzemesi (IrO₂-Ta₂O₅, RuO₂-IrO₂, Pt-IrO₂, PbO₂ ve SnO₂-Sb ile kaplanmış titanyum) kesikli mod deneylerinde anot olarak test edilmiştir. En iyi giderim performansı Ti/ Pt-IrO₂ anotlarında ve sırasıyla Ti/ SnO₂-Sb ve Ti/ PbO₂ elektrotlarında gerçekleşmiştir. Elektrot performansları ürettikleri oksidant formuyla

(Cl₂/HClO/ClO⁻) yakından ilgilidir. Çalışmada ayrıca EO sonucu trihalometanlar (THM'ler) ve haloasetik asitler (HAA'lar) gibi zararlı yan ürünlerin oluşumu da tespit edilmiştir [103].

Chanworrawoot ve Hunsom (2012), çalışmalarında kağıt hamuru ve kağıt fabrikası atık suyunun (129,600-137,600 mg/L başlangıç KOİ) kesikli ve sürekli sistemlerde elektrokimyasal arıtımını incelemişlerdir. Deneysel parametre olarak; seyreltme etkisi (10 ila 100 kat), sürekli sistemdeki su akış hızı (0-3,95 L/dk), akım yoğunluğu (1,90-3,80 mA/cm²) ve sodyum klorür konsantrasyonu (0-3,75 g/L) seçilmiştir. Kesikli sistemde akım yoğunluğu 2,53 mA/cm², akış hızı 3,46 L/dk, başlangıç atık su pH'ı 11,87 ve 50 kat seyreltme, 2,0 g/L NaCl ve 3 saatlik elektroliz süresi için renk, BOİ, KOİ giderim verimleri %98, %98 ve %97 olmuştur. Çalışma süresi 8 saate çalıştırıldığında ise sistemde ise giderim verimleri sırasıyla %91, %83 ve %86'e çıkmıştır [104].

Shao vd. (2014), çalışmalarında Ti/Sb-SnO₂ ve Ti/PbO₂ elektrotlarını bir sodyum lignosülfonat (lignin) çözeltisinin (2000 mg/L) bozunmasında kullanılmışlardır. Bu iki elektrotun performansları, KOİ, biyolojik bozunabilirlik ve UV-Vis absorpsiyonunun değişimi değerlendirilerek karşılaştırılmıştır. Uygulanan akım, geçen elektrik yükü, çözelti sıcaklığı ve destekleyici elektrolit arıtmanın etkinliğini ve verimliliğini etkileyen parametreler olarak seçilmiştir. Sırasıyla kinonlar ve düşük zincirli karboksilik asit, önemli ara ürünler ve ana ürünler olarak tanımlandığı çalışmada oksidasyon etkinliğinin, elektrot malzemesine büyük ölçüde bağlı olduğu belirlenmiştir. Ti/Sb-SnO₂ elektrot, UV-Vis absorpsiyonunu azaltma ve KOİ gidermede daha başarılı sergilerken, Ti/PbO₂ biyolojik olarak bozunabilirliği arttırmada daha etkili olmuştur [105].

Ardhan vd. (2015), yaptıkları çalışmada sentetik reaktif mavi 21(500 mg/L) çözeltisinden renk ve KOİ gidermek için kesikli ve sürekli akımlı reaktör geliştirmişlerdir. 1,8 L hacimdeki kesikli sistemde %90 KOİ ve %95 renk giderim verimi için şartlar; akım yoğunluğu 30 A/m², elektrot alanı 0,10 m² ve süre 7 dk'dır. 1,5 L hacimde ve aktif elektrot alanı 0,15 m² olan sürekli akışlı tüp reaktörde de akım yoğunluğu ve uygulanan elektrik aynı tutulduğunda giderim verimleri %10 sapmayla neredeyse aynı bulunurken, kesikli reaktördeki verimler daha yüksek olmuştur [106].

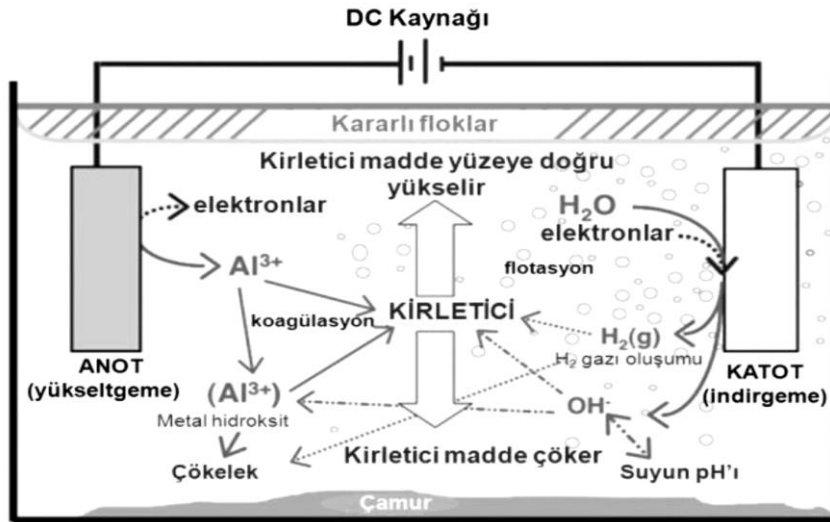
Babaei vd.'nin (2020), çalışmasında da dirençli bir farmasötik olan fenazopiridin hidroklorürün (PhP) üç farklı boyutsal olarak kararlı anot üzerinde (Ti bazlı çok katmanlı

IrO₂/Ta₂O₅ kaplı) elektrokimyasal bozunması değerlendirilmiştir. Akım yoğunluğu (mA), başlangıç çözelti pH'sı, PhP'nin başlangıç konsantrasyonu (mg/L) ve elektroliz süresi etkisi araştırılmıştır. Anodik malzemelerin yüzdesi elektrotların performansı ve PhP bozulma oranını değiştirmiştir. Ti/IrO₂-Ta₂O₅ üzerinde PhP'nin tam mineralizasyonu, TOK analizi ile doğrulanmıştır. TOK sonuçları, 180 dakikalık elektrolizde daha yüksek PhP mineralizasyonu (%72,2) göstermiş olup, ara ürün oluşumu belirlenmiştir [107].

Belal vd. (2021), çalışmalarında, sodyum sülfat (Na₂SO₄) veya sodyum klorür (NaCl) varlığında IrO₂/Ti örgülü elektrotun Basic Yellow 28 (BY28) tekstil boyasının renk giderimi ve mineralizasyonunda etkisini incelemişlerdir. Optimum koşulların; 0.03 Acm⁻²'lik akım yoğunluğu, 2×10⁻⁵M başlangıç boya konsantrasyonu olduğu belirlenmiştir. Na₂SO₄ ve NaCl için optimum pH 2,5 veya 6,5 olduğu ve yine sırasıyla Na₂SO₄ ve NaCl için 0,08 ve 0,03M destekleyici elektrolit konsantrasyonu olduğu belirlenmiştir. 15 dakika işlem sonrasında, BY28 boyasının renk giderimi Na₂SO₄ ve NaCl varlığında sırasıyla %92,9, %93,3 ve KOİ giderimi sırasıyla %26,8, %46,2 olarak bulunmuştur. NaCl elektroliti daha etkili bir giderim performansı sağlamıştır [108].

2.2.3.3 Elektrokoagülasyon

Elektrokoagülasyon (EK) prosesi, elektroliz sonucu anodun çözünmesi ve katotta oluşan hidroksil iyonları ile arıtılması istenen atık suyun içerisinde metal hidroksit floklarının oluşturulmasına dayanır. Şekil 2.21'de örnek bir EK hücresi görülmektedir. EK prosesinde anot olarak demir veya alüminyum elektrotlar kullanılması halinde bu elektrotlar çözünür ve Al⁺³, Fe⁺² ve Fe⁺³ iyonları çözeltiye geçer. Bu iyonlar sudaki hidroksil iyonları (OH⁻) ile birleşerek az çözünen Al(OH)₃, Fe(OH)₂ ve Fe(OH)₃ gibi metal hidroksitler oluşturur [101, 109].



Şekil 2.21: Elektrokoagülasyon mekanizması şematik gösterim [110].

Katal ve Pahlavanzadeh (2011), kâğıt endüstrisi atık sularında Fe ve Al elektrotlar kullanılarak EK ile fenol, renk ve KOİ giderimini araştırmışlardır. Sıcaklık (20-60 °C), pH (2-10), elektrot çeşidi, süre, iletkenlik ve akım yoğunluğunun (70-110 mAcm⁻²) değişken olduğu çalışmada optimum çalışma aralığı; pH 5-7, akım yoğunluğu 70 mAcm⁻² olarak bulunmuş ve sıcaklık artışının giderim performansını olumsuz etkisi olduğu belirtilmiştir. Al-Al elektrot kombinasyonunun renk gideriminde, Fe-Fe elektrot kombinasyonunun KOİ ve fenol gideriminde, Al-Fe ve Fe-Al elektrot kombinasyonunun ise tümünün gideriminde etkili olduğu tespit edilmiştir [111].

2.2.3.4 Elektrofenton

Elektrofenton (EF) prosesi; EK ve fenton işleminin bir kombinasyonu olarak geliştirilmiştir ve proseslerin birleşimidir. Bu yöntem dört kategoriye ayrılmıştır. Tip 1'de, proses için gerekli hidrojen peroksit ve demir iyonu, sırasıyla bir anot ve oksijen üreten bir katot kullanılarak üretilir. Tip 2'de, harici olarak hidrojen peroksit eklenirken, demir iyon kaynağı olarak bir demir anot kullanılır. Tip 3'te, demir iyonu dışarıdan eklenir ve bir oksijen üreten katodu kullanılarak hidrojen peroksit üretilir. Tip 4'te, bir elektrolitik hücrede hidroksil radikalleri üretmek için kullanılan Fenton reaktifi ve demir iyonu, katod üzerindeki ferrik iyonların indirgenmesi yoluyla yeniden üretilir. OH⁻ radikalleri aynı ortamda bulunan dirençli organikler reaksiyonlara girerek parçalanır ve yeterli işlem süresi olursa da giderek mineralize olurlar [102]. Proses en iyi pH 3-4 aralığında çalışmaktadır. Literatürde yer alan çalışmalarda EF ile farklı atık su türleri (tekstil, deri, sızıntı suyu, kâğıt vb.) için yüksek oranlarda giderim verimleri elde edilebilmektedir [112, 113].

Babuponnusami ve Muthukumar (2014), yaptıkları çalışmada Fenton, EF, sono EF ve foto EF proseslerini karşılaştırdıkları çalışmalarında fenol giderimini incelemişlerdir. Sırasıyla: foto EF > sono EF > elektroFenton > Fenton şeklindedir, maksimum bozunma %67,93tür [102].

2.2.3.5 Elektroflotasyon

Elektroflotasyon yöntemi, atık suda bulunan çeşitli kirleticilerin; çözünmüş ve organik partikül halindeki asılı maddelerin elektrotlarda suyun elektrolizi sonucu oluşan H₂, O₂ gazı kabarcıkları ile birleşmesi ve su yüzeyinde toplanmasıdır. Oluşan çamur yüzeyden bir sıyrıcı yardımıyla uzaklaştırılır. Elektrot materyali, suyun iletkenliği, akım yoğunluğu, pH, gaz kabarcıklarının hacimlerine ve miktarlarına bağlı olarak proses verimi değişebilir. Katotta genellikle çelik materyaller kullanılır [90]. Akım doğrultusunda oluşan kabarcıklar, mineral parçacıkları çok küçük olduğunda bunların etrafını çevreler ve bir kılıf şeklinde sararak yüzeye doğru taşırlar [112, 114].

Mansour vd. (2007), 3 farklı özellikteki kağıt atık sularının koagülasyon ve elektroflotasyon ile kesikli ve sürekli modda arıtımını incelemişlerdir. Ortogonal merkezi kompozit tasarım ile planlanan çalışmada AKM, KOİ, BOİ₅ ve Cl⁻ incelenmiş ve akım yoğunluğu, pH ve alüminyum sülfat dozunu optimize etmişlerdir. Sürekli sistemde süre de optimize edilmiş 14-16 dk'lık işlemde %95'in üstünde KOİ giderimi elde edilmiştir [115].

2.3 Deneyisel Tasarım ve Optimizasyon Metotları

Maliyetleri artırmadan sistemlerin performansını iyileştirmek ve süreçlerin verimini artırmak önemlidir. Bu amaçla kullanılan yöntemle optimizasyon denir. Klasik konvensiyonel deneysel yöntemlerle yapılan uygulamalarda genel olarak değişkenlerin diğerleri sabit bir seviyede tutulurken bir parametrede değişiklik yapılır. Bu tekniğin en büyük dezavantajı, değişkenler arasında etkileşimi tespit edilememesi ve sonuçta parametrelerin süreç üzerindeki etkilerini tam olarak belirlenememesidir [116]. Bütün bu olumsuzlukları ortadan kaldırmak için, deneysel proses optimizasyonlarının istatistiksel tasarım araçlarına dayandırılması gerekmektedir. Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY), bu amaçla optimizasyonda son yıllarda kullanımı artmaya başlamış [117, 118, 119], çalışma süreleri ve ekonomik açıdan avantajlı bir yöntemdir [120].

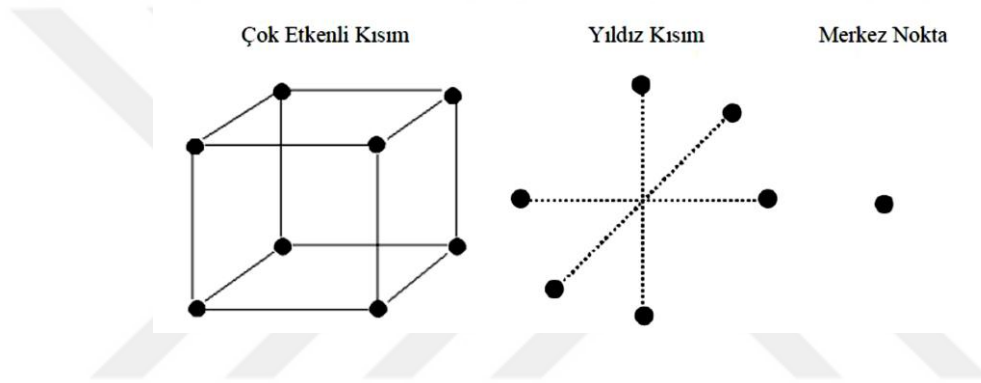
Tasarım yöntemlerinden olan “*Taguchi metodu*” nda asıl amaç hedef değer etrafındaki değişkenliği azaltmaktır. Belirlenen rassal deneyler dışında da optimal sonuç bulunabilmesi Taguchi yönteminin diğer yöntemlerden ayıran en önemli özelliktir. Tam faktöriyel tasarım ise en az iki veya daha fazla parametre ve bu parametrelere ait en az iki veya daha fazla seviyelerinin bulunduğu deneylerde seviyelerin birbirleri ile çarpımları ile oluşan kombinasyondur. Bu metot ile sistemde gerçekleştirilecek deneylerden elde edilen varyans analiz tabloları kullanılarak matematiksel modeller türetilebilir [70]. Diğer bir metot olan ve çalışmamızda da kullanılan “Yanıt yüzey yöntemi” ve merkezi kompozit tasarım aşağıdaki başlıklarda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

2.3.1 Yanıt Yüzey Yöntemi

YYY (Response Surface Metodology- RSM), ilk kez 1951 yılında G.E.P.Box ve K.B.Wilson tarafından ortaya atılmıştır. YYY süreçleri geliştirmek, iyileştirmek ve optimize etmek amacıyla yanıt ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkileri tek başına veya kombinasyon halinde tanımlamak için kullanılan istatistiksel ve matematiksel tekniklerin bir birleşimidir. Bu deneysel yöntem, bağımsız değişkenlerin etkilerini analiz etmenin yanı sıra matematiksel bir model de üretir. YYY ve optimizasyon çalışmaları son yıllarda çok popüler olmuştur. YYY, yeni ürünlerin tasarımında ve geliştirilmesinde olduğu kadar mevcut ürün tasarımının iyileştirilmesinde de önemli bir uygulamaya sahiptir. YYY prosesi ile sistemi etkileyen parametreler arasında etkileşim olup olmadığı, varsa hangi etkileşimin daha baskın olduğu ya da prosesin hangi bağımsız değişkene daha duyarlı olduğunu belirleyebilmektedir [116].

YYY kullanan bir optimizasyon çalışmasını üç aşamaya ayırmak mümkündür; birinci aşama, bağımsız parametrelerin ve düzeylerinin belirlenmesinin yer aldığı tasarım aşamasıdır. İkinci aşama, deney tasarımına göre elde edilen verilerin işlenmesi ve model denkleminin tahmini ve doğrulanmasını içerir. Sonuncusu, bağımsız parametrelerin bir fonksiyonu olarak yanıtın hesaplanması ve optimum noktaların belirlenmesi ve yanıt yüzey grafikleri ile kontur grafiklerinin oluşturulmasıdır. Önerilen modelin uygunluğu ise varyans analiziyle (ANOVA) açıklanır. Düzeltilmiş belirtme katsayısı R^2_{adj} değerleri; istatistiki olarak önemsiz terimlerin modelde kullanılabilmesi nedeniyle oluşturulan modellerin değerlendirilmesi aşamasında yüksek R^2 değerlerinin kontrolü amacıyla kullanılmaktadır [121].

Yanıt modellerini oluşturmak için gerekli veriler, tam faktöriyel, kesirli faktöriyel veya merkezi kompozit tasarım gibi bir istatistiksel deney tasarım yöntemi vasıtasıyla elde edilir. Bir merkezi kompozit tasarım; üç katmandan oluşmaktadır. Boyutsuz koordinat sisteminde faktöriyel noktalar -1, +1 değerleri ile kodlanır; en düşük kodlu seviye (-), en yüksek kodlu seviye (+) ve merkez nokta 0 ile gösterilir. Deneysel hatayı tahmin etmek için; tekrar edilen merkez noktalar oluşturulur. Bunların sayısı sistemden otomatik verileceği gibi elle de değiştirilebilir. Sistemde n_0 adet merkez noktası ($n_0 \geq 1$) bulunur ve her bir tasarım değişkeninin ekseninde, tasarım merkezine uzaklığı α olan iki yıldız (veya eksen) noktası yer alır, bunlar $+\alpha$ ve $-\alpha$ ile ifade edilen aksiyal noktalardır. Şekil 2.22’de merkezi kompozit tasarıma ait bölümler görülmektedir [121].



Şekil 2.22: Merkezi kompozit tasarımda bölümler.

Bağımsız değişkenlerin değişimi ile istenen cevap arasındaki değişim doğrusalsa, model 1. dereceden bir polinom olur ve tasarımlarda bu değişkenler kodlanmış (Kodlanmış form (X_i)) olarak Denklem 2.5’deki gibi ifade edilir;

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (2.5)$$

Burada; y : Bağımlı değişken (Cevap) , ε ; Deneysel hata, X_i : Bağımsız değişken , β_i : Regresyon katsayısı ‘dır.

Birinci dereceden polinomiyal modeller gerçek yanıt yüzeyindeki eğriliği belirlemede yetersiz kalmaktadır. İkinci dereceden modeller ise; esnekliği ile çeşitli formlar alabildiğinden fonksiyon tahmininde kolaylık sağlar, katsayı değerlerini karmaşık hesaplamalar olmadan tahmin eder ve optimum nokta matematiksel olarak belirlenebilir. Aynı zamanda istenen cevap üzerinde bağımsız parametrelerin içsel etkileşimleri de etkili

olabilir. Böyle bir durumda quadratik model olarak ifade edilen bir matematiksel model tanımlanır. Bu model; bağımsız değişkenlerin doğrusal katsayılarını, yüksek dereceden katsayıları ve iç etkileşim katsayılarını içerir [122]. k sayıdaki bağımsız değişkenli ve cevabın ikinci dereceden etkileşimler ile iç etkileşimleri içerdiği bir quadratik model Denklem 2.6’da verilmektedir. Bu nedenle çalışmada deney planı olarak ikinci dereceden quadratik model oluşturmada en iyi sonucu veren yüzey merkezli kompozit tasarım (MKT) seçilmiştir.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k (\beta_i X_i) + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} X_i X_j \quad (2.6)$$

Burada ; y :Yanıt (çıktı) , β_0 : Sabit katsayı, β_i : 1. Dereceden etkiler için lineer katsayı, β_{ii} : Quadratik katsayı, β_{ij} : Etkileşim için interaksiyon katsayısı , X_i ve X_j : Çalışılan değişkenler için kodlanmış değerler, k : Parametre sayısı’dır.

Literatürde; farklı atık suların arıtımında çeşitli optimizasyon teknikleriyle yapılmış çokça çalışma yer almaktadır. Bunlardan bazıları aşağıda yer almaktadır.

Wang vd. (2011), kağıt sanayi atık sularının kimyasal arıtımı ile yaptıkları çalışmada koagülant (alüminyum klorür) ve flokülant (modifiye edilmiş nişasta) kullanıldığı çalışmayı YYY ve üniform kombinasyon tasarımı ile optimize etmişlerdir. Değişken olan parametreler koagülant dozu (0-2100 mg/L), flokülant dozu (0-48 mg/L), pH (2,5-11,5)’dır. Su geri kazanımı, lignin ve bulanıklık giderimi için belirlenen optimum şartlar; pH 8,35, koagülant dozu 871 mg/L, flokülant dozu 22,3 mg/L olarak bulunmuştur [78].

Wang vd. (2014), tütün işleme endüstrisi kağıt yapımı atık suyunda koagülasyon/flokülasyon prosesini YYY’de yer alan 2^3 tam faktöriyel merkezi kompozit tasarım ile optimize etmişlerdir. KOİ ve renk gideriminin incelendiği çalışmada değişken parametreler olarak polialüminyum klorür (PAC) ve katyonik poliakrilamid (CPAM) dozları ve pH seçilmiştir. Sırasıyla PAC 715 mg/L, CPAM 4,8 mg/L ve pH 6,6 olduğu şartlarda KOİ giderim verimi %67,8 ve renk giderim verimi %77,7 olmuştur. Renk giderimi için $R^2 = 0,967$ olurken KOİ giderimi içinse $R^2 = 0,955$ olarak bulunmuştur [120].

Kaur vd. (2017), RuO₂ kaplı Ti elektrotu (Ti/RuO₂) kullanılarak gerçek tekstil atık suyu için EO arıtma performansı incelemişlerdir. pH, akım ve elektroliz süresi gibi EO proses

parametrelerinin; kimyasal oksijen ihtiyacı giderim verimi (S_1), renk giderim verimi (S_2) ve tüketilen enerji (S_3) üzerine etkisi Box Behnken tasarımı kullanılarak araştırılmıştır. Optimum koşulda S_1 , S_2 ve S_3 'ün gerçek değerleri sırasıyla %80,0, %97,25 ve 0,679 kWh olarak bulunmuştur. S_1 ve S_2 için hız sabiti sırasıyla $0,025 \text{ dk}^{-1}$ ve $0,015 \text{ dk}^{-1}$ olurken, R^2 değerleri 0,988 ve 0,986 olarak bulunmuştur. EO ile arıtılmış atık suda organiklerin çoğunun EO işlemi sırasında tamamen ortadan kaldırıldığını göstermiştir [123].

Kothari ve Shah (2020), çalışmalarında Rhodamine-B boyasının renk giderimi için karışık metal oksitlerle kaplanmış (TiO_2 , RuO_2 ve IrO_2) bir anot kullanılarak EO prosesi uygulamışlardır. Dört değişkeninin; akım yoğunluğu, elektrolit konsantrasyonu, başlangıç pH'sı ve elektroliz süresinin, renk giderme ve enerji tüketimi üzerindeki etkisini değerlendirdikleri bu çalışmada süreci yapay sinir ağı kullanılarak modellemişler ve optimizasyonu için merkezi kompozit tasarım metodolojisi kullanmışlardır. Renk üzerinde etkili parametre elektroliz süresi olurken enerji tüketiminde akım yoğunluğunun etkili olduğu tespit edilmiştir. 10 mA/cm^2 akım yoğunluğu, başlangıç pH'sı 3,7, NaCl konsantrasyonu 0,031 M, elektroliz süresi 4,9 dk şartları için maksimum %97 renk giderim verimi ve minimum $1,01 \text{ kWh/m}^3$ enerji tüketimi sağlandığı bulunmuştur [124].

Singla vd. (2021), yaptıkları çalışmada yeni katkılı KMO ($\text{Ti/IrO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SnO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_4$) elektrotlar kullanılarak düşük maliyetli sentetik olarak hazırladıkları üre (NH_2CONH_2 -2000 mg/L) numunesinin arıtımını incelemişlerdir. Başlangıç pH'sı, süre, akım yoğunluğu ve NaCl dozunun parametre olarak seçildiği çalışmada TOK giderim verimi ve maliyetin YYY kullanılarak optimizasyonu sonucu yüksek R^2 değerlerine ulaşılmıştır. Maksimum giderimin bulunduğu nokta için %91,2 TOK giderim verimi, maliyet $51,53 \text{ kWh m}^{-3}$ olarak tespit edilmiştir [118].

Asfaha vd. (2022) , sentetik tekstil (Vivazol Red 3 BS reaktif boya) atık sularından renk, KOİ, TOK gideriminde hibrit EK-EO prosesini kullanmışlardır. EK için Al/Al, EO için IrO_2/Ti kaplı elektrotlar anot ve katot olarak kullanılmıştır. Box-Behnken deney tasarımı yöntemi ile EK prosesinde boya konsantrasyonu, akım yoğunluğu, süre ve pH parametrelerini, EK+EO prosesinde akım yoğunluğu, süre ve pH parametrelerini optimize etmişlerdir. Yalnız EK prosesi ile %89 renk ve %76 KOİ giderimi olurken hibrit uygulandığında bu oran %97'ye ulaşmıştır. Bu durumda boyanın nihai olarak bozunarak

karbondioksit ve suya dönüştüğü tespit edilmiştir. Toplam işletim ücreti olan 1,4 \$/m³ ile maliyetin EK+ozon ve EK+fenton prosesinden daha uygun olduğu da tespit edilmiştir [125].

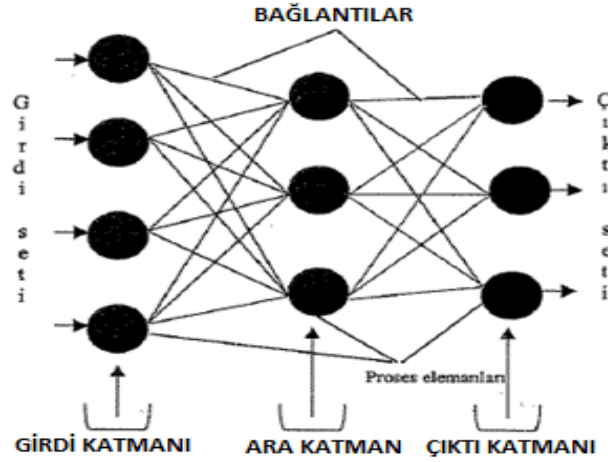
Shirkoohi vd. (2022), gerçek atık su ve sentetik atık sudan psikoaktif farmasötik kafein gideriminin YYY yöntemlerinden merkezi kompozit tasarım ve uyarlanabilir nöro bulanık çıkarım sistemine (ANFIS) ile modellenmesi ve optimizasyonunu araştırmışlardır. Reaksiyon süresi, elektroliz süresi, akım şiddeti, kafeinin başlangıç konsantrasyonu ve anot tipi gibi bağımsız değişkenlerin etkisi incelenmiştir. MKT ve ANFIS için sırasıyla kafein giderimi için $R^2 = 0,993$, RMSE = 2,694, enerji tüketimi için $R^2 = 0,976$, RMSE = 0,261 bulunmuştur. Optimum koşullarda EO uygulandığında gerçek atık suyun toksisitesinin arttığı belirlenmiştir. Oksidasyon süresi uzatılarak ya da granüle aktif karbon ilavesi ile toksisitenin azaltılabileceği bulunmuştur [126].

2.3.2 Yapay Sinir Ağları

Öğrenmenin tam olarak nasıl gerçekleştiği ile ilgili günümüz teknolojisi ile elde edilen bilimsel verilerde kesin bir bilgi yer almamaktadır. Genel bir teori ortaya konulurken sinir hücrelerinin birbirleriyle olan ilişkileri ve sinir hücresinin yapısı araştırılmıştır. Ortaya konulan teoriler bununla ilgili yeni uygulamaları da beraberinde getirmiştir. Yapay sinir ağları (YSA) beyin öğrenme yapısını taklit eden bilgi işleme sistemleridir. Beyin hücrelerdeki nöronlar gibi, kendi aralarında etkileşim oluşturur ve çeşitli bağlar kurarlar [127].

Yapay sinir ağlarıyla ilgili çalışmalar 1970 öncesi ve sonrası olarak ayrılmaktadır. Nöronların birbirleri arasındaki bağlantı oluşumları ve tabakalar şeklinde gruplandırılması ile yapay sinir ağları oluşur. Yapay sinir hücresinde (nöronlara) girdi olarak tanımlanan değerler dışarıdan verilen bilgilerdir. Ağırlık değerleri ise; hücreye girdi olarak verilen bilgilerin önemini ve bu girdilerin hücre üzerindeki etkisini göstermektedir. Hücreye gelen net girdiyi hesaplamakla görevli fonksiyon toplama fonksiyonudur ve genellikle gelen girdilerin kendi ağırlıklarıyla çarpımlarının toplamıdır. YSA'lar önceki örneklerden faydalanarak ağırlıkları belirlemek yoluyla girdi değişkenler ile tahmin edilen değişkenler arasındaki ilişkiyi ortaya çıkartacak şekilde eğitilebilmektedirler [128]. Bir yapay sinir ağının temel ödevi teknik olarak kendisine gösterilen bir girdi setine karşılık çıktı seti belirlemektir.

Bir yapay sinir ağı örneğinin şematik gösterimi Şekil 2.23'te verilmiştir. Girdi katmanı, ara katman ve çıktı katmanı birbirine paralel halde bir araya gelerek bir ağı oluşturmaktadırlar.



Şekil 2.23: Örnek bir yapay sinir ağı [128].

Literatürde son yıllarda artan çalışmalar arasında yapay sinir ağları kullanılarak yapılmış çalışmalar yer almaktadır. Bunlardan bazıları aşağıda yer almaktadır.

Kumar ve Gupta (2022), direk mavi 86 boyasının (DB 86) elektrokimyasal oksidasyonunu (EO) araştırdıkları çalışmalarında anot olarak KMO kaplı Ti elektrot ve katot olarak paslanmaz çelik elektrot kullanmışlardır. pH, akım yoğunluğu, boya konsantrasyonu ve elektroliz süresi gibi çalışma koşullarının optimize edildiği şartlarda (pH =5; CD=15 mA/cm²; DC =50 mg/L ve t = 105 dakika), maksimum boya giderimi %98,03 ve KOİ giderimi ise %95 olarak bulunmuştur. YSA modeli, boya ve KOİ giderimlerini tahmin etmek için destek vektör regresyon (SVR) ve çoklu doğrusal regresyon (MLR) modellerinden en iyi istatistiksel uyumu sergilemiştir (R²= 0,9691; RMSE=0,0583; MAPE=7,41; IA=0,99; MSRE=0,0084). Prosesin enerji ve operasyon maliyetleri 5,61 kWhm⁻³ ve 1.29 \$m⁻³ olarak hesaplanmıştır [129].

Kothari vd. (2022), yaptıkları bu çalışmada Brilliant Green boyasının EK (T sabit 30°C) ile giderim sürecini modellemek ve optimize etmek için yanıt yüzeyi yöntemi ile yapay sinir ağları yaklaşımını birlikte uygulamışlardır. Çok katmanlı bir algılayıcı (MLP) - YSA modeli; reaksiyon süresini, akım yoğunluğunu, pH'ı, NaCl konsantrasyonunu temsil eden dört giriş nöronu ve boya giderim verimliliğini (%) ve elektrik enerjisi tüketimini (kWh/kg) temsil

eden iki çıkış nöronu tarafından eğitilmiştir. Optimize edilmiş durumda (elektroliz süresi 10 dak, akım yoğunluğu 80 A/m², başlangıç pH 5 ve elektrolit (NaCl) konsantrasyonu 0,5 g/L) için, RSM’de %98,83 renk giderme ve 14,99 kWh/kg elektrik enerjisi tüketimi değerleri tahmin edilmiştir. R² değeri renk giderim verimi için 0,99; enerji tüketimi için 0,97 olarak bulunmuştur [130].

Kuleyin vd. (2022), çalışmalarında hem kesikli hem de sürekli akış durumlarında tekstil endüstrisi atık suyunun birleşik elektrofenton ve sepiyolit kili kullanılarak yapılan adsorpsiyon prosesi ile KOİ ve TOK giderimini incelenmiştir. Grafit elektrotla tek başına yapılan EF işleminde KOİ ve TOK giderimleri sırasıyla %58 ve %36 olurken, bileştirilmiş sistemde bu değerler %85’e ve %63’e yükselmiştir. YSA kullanılarak yapılan modelleme sonucunda optimum şartlar; pH 3, sepiyolit miktarı 5 g/L, demir 1 mM Fe²⁺ ve akım 0,55A olarak bulunmuştur [131].

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Materyaller

3.1.1 Atık Su Karakterizasyonu

Yapılan bu çalışma kullanılan atık su numunesi, Manisa-Akhisar OSB’de bulunan Yıldız Entegre A.Ş./Akhisar Yonga Levha Tesisi’nden belirlenen periyotlarda alınmıştır. Alınan numuneler buzdolabında (+4°C) saklanmıştır. Dengeleme havuzundan alınan atık su numuneleri toplam atık su karakteristik özelliğini temsil etmektedir. Atık suyun ilk karakterizasyon deneyleri TÜBİTAK’a yaptırılmış ve sonuçlar Tablo 3.1’de verilmiştir. Atık su da takip edilmesi gereken; KOİ, AKM, ÇKM, renk, bulanıklık, iletkenlik, pH gibi parametrelerin deneyleri ise laboratuvarında düzenli aralıklarla yapılmış ve atık su karakterizasyonundaki değişim belirlenmiş, analiz sonuçları ise Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.1: Atık su karakterizasyonu için ölçülen parametreler ve değerleri.

Parametre	Birim	Analiz Yöntemi (Standart Metotlar)	Konsantrasyon
Toplam Organik Karbon	mg/L	SM-5310 B Yük.Sıc.Yakma	4401
Kimyasal Oksijen İhtiyacı	mg/L	SM-5220 Açık Reflux	20650
Çözülmüş Kimyasal Oksijen İhtiyacı	mg/L	SM-5220 Açık Reflux	11603
Biyolojik Oksijen İhtiyacı	mg/L	SM 5210 B 5 Günlük	4509
Askıda Katı Madde	mg/L	SM 2540 D	5800
Çökebilir Katı Madde	ml/L	SM 2540 F	0,3
Bulanıklık	NTU	SM 2130 B Nefelometrik	3275
pH	-	SM 4500-H+ B	7,35
İletkenlik	Ms/cm	SM 2510 B	12,86
Renk	Pt-Co	SM-2120 C spekto.	8700
Alkalinite	CaCO ₃ mg/L	SM-2320 B Titrasyon	3,49
Klorür	mg/L	SM-4110 B İyon Kromatografi	2,28
Sülfat	mg/L	SM-4110 B İyon Kromatografi	2,21
Toplam azot	mg/L	SM-4500 P J	878
Toplam fosfor	mg/L	SM-4500 P D Kalay klorür	5,92

Litetarürde benzer özellikte yonga levha endüstrisi atık sularıyla ilgili çok kaynak olmamakla birlikte; ağaç işleme endüstrisi atık suları endüstride yer alan üretim ve kimyasallara göre farklı özellikte olabilmektedirler. Özellikle yüksek KOİ içeriğine sahip olan bu atık suda toplam KOİ'nin yarısına yakını çözülmüş KOİ olarak bulunmaktadır. AKM içeriğinin de yoğun olduğu atık su, koyu kahverengi yoğun bir renge sahiptir. İçerdiği çözülmüş bileşenler nedeniyle iletkenlik seviyesi çok düşük olmayan atık suyun doğal pH'sı nötral seviyeye yakındır. Çabuk bozunma özelliğinde olmayan atık suyun BOİ değeri KOİ değerine oranla düşüktür.

Tablo 3.2: Laboratuvarında değişimi takip edilen atık su parametreleri ve değerleri.

Parametre	Birim	Analiz Yöntemi (Standart Metotlar)	Konsantrasyon
Çözülmüş Kimyasal Oksijen İhtiyacı	mg/L	5220 D kapalı refluks kolorimetrik	12600-8850
Biyolojik Oksijen İhtiyacı	mg/L	SM 5210 B 5 Günlük	3200-2600
Askıda Katı Madde	mg/L	SM 2540 D	5700-2700
Çökelebilir Katı Madde	ml/L	SM 2540 F	0,65-0,25
Bulanıklık	NTU	SM 2130 B Nefelometrik	4100-2680
pH	-	SM 4500-H+ B	8,27-7,05
İletkenlik	Ms/cm	SM 2510 B	13,13-11,08
Renk	Pt-Co	SM-2120 F spekto.	12640-8200

3.1.2 Kullanılan Cihaz ve Ekipmanlar

Deneylerde kullanılan cihaz ve ekipmanlar aşağıda listelenmiştir. Elektrot olarak kullanılan grafit ve KMO (Platinode 177 Ir kaplama titanyum) anot Galtek Kimya San. Tic. Şirketinden temin edilmiş olup, KMO anota ait bilgi formu EK-B'de verilmiştir.

- Ceketli cam reaktör (1L)
- Spektrofotometre (Spektroquant Pharo 300)
- Jar Test Cihazı (Velp Scientifica FC6S)
- Termoreaktör (WTW CR3200)
- Vakum pompası/süzme seti (Rocker 300)
- Etüv (Nüve FN 400)
- Hassas terazi (Precisa XB 220 A)

- pH Metre-İletkenlik ölçer (WTW 3320)
- Manyetik karıştırıcı (Topo MS300HS)
- Isıtıcı/soğutucu su sirkülatörü (Labo SM3)
- Güç kaynağı (DC Power Supply Rxn 3010D)
- Mekanik karıştırıcı (RW20 D2M)
- Peristaltik pompa (ISMATEC)
- Ultrasound (Bandelin Sonorex)
- İnkübatör
- Otomatik pipet

3.1.3 Kullanılan Kimyasallar

Çalışmada kullanılan analitik saflıktaki bütün kimyasal maddeler ticari olarak (Sigma ve Merck) temin edilmiştir. Koagülant olarak kullanılan Flo30 kimyasalı ise Uz-Ar Kimya'dan temin edilmiştir. Deneylerde kullanılan anyonik patates nişastasının güvenlik bilgi formu EK-C'de, Flo30 koagülantı güvenlik bilgi formu ise EK-D'de verilmiştir.

- pH Ayarlamasında Kullanılan kimyasallar; NaOH, H₂SO₄.
- Analiz ve kalibrasyonda kullanılan kimyasallar; Ag₂SO₄, K₂Cr₂O₇, HgSO₄, C₈H₅KO₄, K₂PtCl₆, CoCl₂.6H₂O, HCl, KH₂PO₄, K₂HPO₄, Na₂HPO₄.7H₂O, NH₄Cl, MgSO₄.7H₂O, CaCl₂, FeCl₃.6H₂O, Na₂S₂O₃.5H₂O, MnSO₄.2H₂O, NaN₃, NaI.
- Koagülasyonda kullanılan kimyasallar; Anyonik patates nişastası (APN), Flo-30 koagülant, FeCl₃.
- Elektrooksidasyonda kullanılan kimyasallar; Na₂SO₄.

3.2 Yöntem

3.2.1 Deneysel Tasarım

3.2.1.1 YYY İle Kimyasal Ön Arıtım Deney Tasarımı

Mevcut atık suyun içerdiği yüksek AKM içeriğinden dolayı direk EO prosesine gönderilemeyeceği yapılan ön denemelerle tespit edilmiştir. Bu nedenle EO prosesini inhibe eden AKM, ÇKM gibi parametrelerin giderilmesi adına bir ön arıtıma ihtiyaç duyulmuştur. O nedenle çalışmada endüstriyel atık suların arıtımında sıklıkla kullanılan bir proses olan koagülasyon/flokülasyon prosesinin kullanılmasına karar verilmiştir [7, 43]. Ayrıca yapılan literatür çalışmalarında görülmektedir ki demir (III) klorür selülöz içeriği yüksek kağıt atık sularının arıtımında başarılı sonuçlar vermektedir [53]. Koagülasyon flokülasyon prosesinde

etkili olan ve tasarımda yer alan parametreler ön deneme çalışmaları ve literatür araştırması sonucu belirlenmiştir. Deneysel tasarımda Minitab 19 trial versiyonu, YYY ile MKT kullanılmış, uzay dışı seviyeleri de seçilerek tasarım oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında her bir koagülant (FeCl_3 ve Flo30) için iki ayrı tasarım yapılmıştır. Bunlarda bağımsız değişken olarak başlangıç pH'sı (X_1), koagülant dozu (X_2), anyonik patates nişastası (APN) dozu (X_3); çıktı (yanıt) olarak ise KOİ (Y_1), AKM (Y_2) ve renk (Y_3) giderim verimleri seçilmiştir. Bunun sonucunda değiştirilebilir olan parametrelerin farklı seviyeleri için demir (III) klorür/APN kimyasal kombinasyonu deney tasarımı Tablo 3.3'te, Flo30/APN kimyasal kombinasyonu deney tasarımı Tablo 3.4'te verilmiştir. İki farklı kimyasal kombinasyonun karşılaştırılabilir olması adına deneysel parametreler sabit tutulmuş, sadece seviyeleri (dozları) değiştirilmiştir.

FeCl_3 koagülantı ve anyonik nişasta flokülantı için yapılan ön giderim çalışmalarında da başlangıç pH'sı için temel 3 seviye değerleri; pH 6, 7, 8 olurken uzay dışı pH 5 ve pH 9 değerleri de tasarımda bulunmaktadır. Bu değerler suda demirin aktif olarak çalıştığı pH aralığı olduğu için seçilmiştir. FeCl_3 dozu temel 3 seviye 2, 3, 4 g/L alınırken 1 ve 5 g/L değerleri uzay dışı olarak çalışılmıştır. APN (%1'lik) dozu olarak 0-40 ml/L uzay dışı olmak üzere 10, 20, 30 ml/L dozları kullanılmıştır. Deneysel tasarıma göre yapılan deney sonuçları, model denklemi ve maksimum giderim şartları araştırma bulguları kısmında verilmiştir.

Tablo 3.3: Kimyasal ön arıtım proses tasarımı için bağımsız değişkenler ve seviyeleri (FeCl_3 /APN).

Değişkenler	Birim	Faktör	Seviyeler				
			- α	-1	0	+1	+ α
Başlangıç pH	-	X_1	5	6	7	8	9
FeCl_3 Dozu	g/L	X_2	1	2	3	4	5
APN Dozu	ml/L	X_3	0	10	20	30	40

Flo30 koagülantı ve anyonik nişasta flokülantı için yapılan ön giderim çalışmalarında başlangıç pH'sı için temel 3 seviye değerleri; pH 5, 6, 8 olurken uzay dışı pH 3,5 ve pH 9,5 değerleri de tasarımda bulunmaktadır. Bu değerler pH ayarlama sırasında kimyasal kullanımını minimize etmek adına atık suyun doğal pH'sına yakın olarak ve arıtılmış suyun da deşarj limitlerini sağlaması amacıyla seçilmiştir.

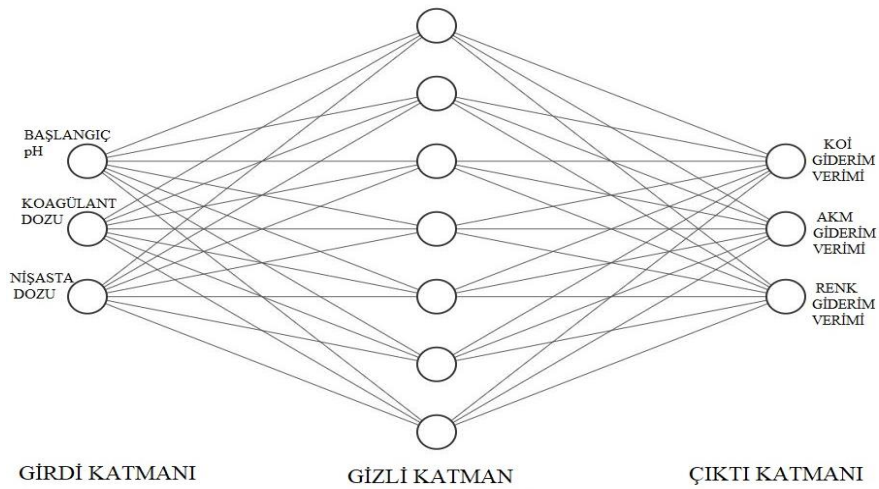
Flo30 dozu temel 3 seviye 6, 9, 12 ml/L alınırken 3 ve 15 ml/L değerleri uzay dışı olarak çalışılmıştır. APN (%1'lik) dozu olarak 0-40 ml/L uzay dışı olmak üzere 10, 20, 30 ml/L dozları kullanılmıştır.

Tablo 3.4: Kimyasal ön arıtım proses tasarımı için bağımsız değişkenler ve seviyeleri (Flo30 /APN).

Değişkenler	Birim	Kod	Seviyeler				
			- α	-1	0	+1	+ α
Başlangıç pH	-	X ₁	3,5	5	6,5	8	9,5
Flo30 Dozu	ml/L	X ₂	3	6	9	12	15
APN Dozu	ml/L	X ₃	0	10	20	30	40

3.2.1.2 YSA İle Kimyasal Ön Arıtım Deney Modellenmesi

Bir yapay sinir ağını birçok yapay sinir hücreleri bir araya gelerek oluştururlar. Bu hücreler rastgele bir araya gelmez. Hücreler genel olarak üç katman (girdi katmanı-ara katman-çıkış katmanı) halinde ve her katman için de paralel şekilde bir araya gelerek ağı oluştururlar [128]. Diğer model tasarımlarından yapay sinir ağları ile modellemeyi ayıran en önemli fark, lineer olmayan verilerden de YSA ile başarılı sonuçlar çıkartılabilmektedir. Matlab programında bulunan “Neural Network Toolbox” isimli arayüz kullanılarak YSA yapısı oluşturulmuştur. Arayüzün yapısında bulunan gizli katmanlı YSA’da bu katmanların nöron sayıları istenilen aralıkta belirlenebilmektedir. Şekil 3.1’de kimyasal ön arıtıma ait bir tek katmanlı YSA örneği yer almaktadır.

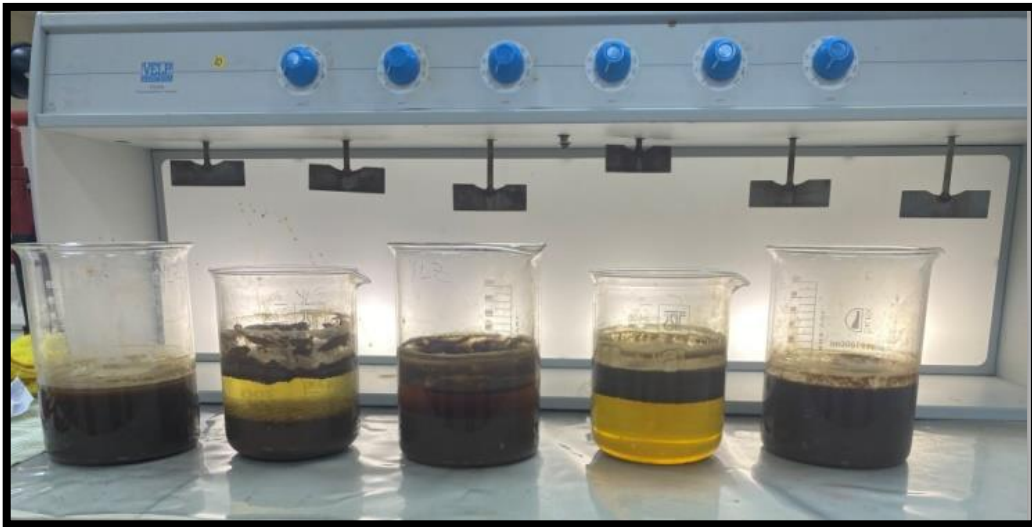


Şekil 3.1: Kimyasal ön arıtım prosesi için uygulanan tek katmanlı YSA örneği.

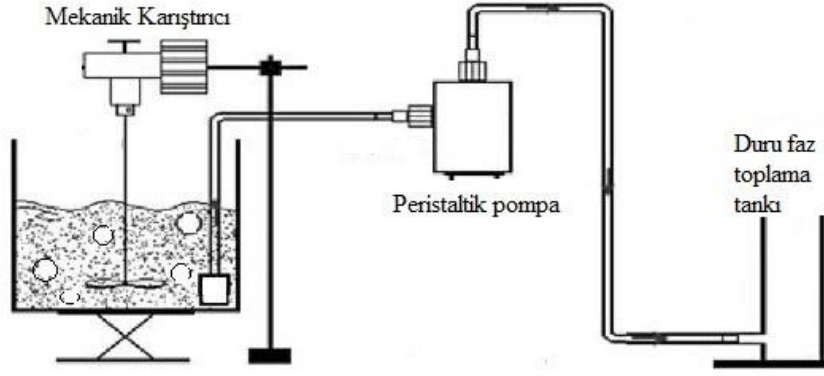
3.2.2 Kimyasal Ön Arıtım Deneylerinin Yürütülmesi

Ön arıtım deneysel tasarım ve optimizasyon deneyleri klasik jar test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. 500'er ml numune alındıktan sonra deney tasarımında belirlenen başlangıç pH değerlerine 0,01 M H_2SO_4 ve 0,01 M NaOH çözeltileri kullanılarak ayarlanmıştır. Numunelere deneysel tasarım matrisinde belirlenen dozda koagülant ($FeCl_3$ veya Flo30) ilave edilmiş ve ilk olarak hızlı karıştırma (120 rpm'de 5 dakika), ardından belirlenen dozda günlük olarak taze hazırlanmış nişasta çözeltisi (APN, %1'lik) ilave edilerek yavaş karıştırma işlemi (30 rpm'de 20 dakika) uygulanmıştır. Yavaş karıştırma işleminin bittikten sonra numune, içindeki flokların çökmesi adına 60 dakika süreyle dinlendirilmiştir. Çökme işleminin ardından duru fazdan alınan örneklerde istenen analizler yapılmıştır.

İki koagülantın giderim verimleri karşılaştırıldığında demir (III) klorür Flo30'a göre daha iyi performans göstermiştir. Bu nedenle EO öncesi atık su ön arıtımında demir (III) klorür/APN kullanılmıştır. Jar testi kullanarak; EO için gerekli hacimde ön arıtılmış numunenin duru fazların toplanması işlemi çok vakit aldığından ve flokların stabilitesi bozulup dağıldığından, mekanik karıştırıcı/peristaltik pompa sistemi oluşturulmuş ve ön arıtım gerçekleştirilmiştir. EO deneyleri öncesi numuneler mekanik karıştırıcı sistemi ile topluca hazırlanmış ve peristaltik pompa ile duru faz toplanmıştır. Çalışmada kimyasal ön arıtım için kullanılan Jar Test düzeneği Şekil 3.2'de, mekanik karıştırıcılı sistemin şeması da Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.2: Kimyasal ön arıtım deney düzeneği (Jar testi).



Şekil 3.3: Mekanik karıştırıcılı sistemin şematik gösterimi.

3.2.2.1 YYY İle Elektrooksidasyon Prosesi Deney Tasarımı

Elektrooksidasyon prosesi gibi ileri arıtım teknikleri ile yapılan arıtım çalışmaları literatürde son yıllarda sıkça yer alan konulardandır [132]. Çalışmada; EO arıtım prosesinde etkili olan parametreler ön deneme çalışmaları ve literatür araştırması sonucu belirlenmiş ve en çok etkileyen parametrelerden başlangıç pH'sı (X_1), akım (X_2), süre (X_3) ve elektrolit konsantrasyonu (X_4) bağlı değişkenler olarak belirlenmiştir. Yanıt olarak ise KOİ giderim verimi, % (Y_1) ve renk giderim verimi, % (Y_2) seçilmiştir. Yaygın kullanılan bir elektrolit olan sodyum klorür neticesinde oluşan klorat arıtılmış atık suda istenmeyen toksik bir ürün olduğundan [133] elektrolit olarak sodyum sülfat (Na_2SO_4) seçilmiş ve klorlu organik yan ürünlerin oluşumunun önüne geçilmiştir. Çalışmalarda elektrot cinsinin de giderim performansını etkilediği düşünüldüğünden iki farklı anot kullanılmıştır. Farklı anot kombinasyonun karşılaştırılabilir olması adına deneysel parametreler ve seviyeleri sabit tutulmuştur. Deneysel tasarımda Minitab 19 trial versiyonu, YYY ile MKT kullanılmış, uzay dışı seviyeleri ($-\alpha$, $+\alpha$) de seçilerek Tablo 3.5'teki tasarım oluşturulmuştur.

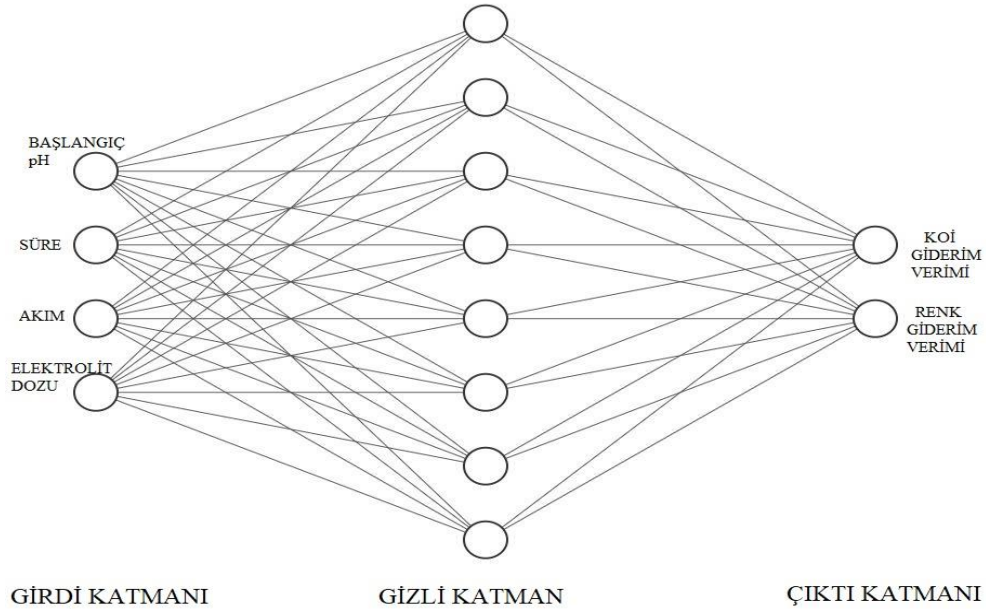
Tablo 3.5: Elektrooksidasyon deney tasarımı için bağımsız değişkenler ve seviyeleri (Grafit/Paslanmaz çelik ve KMO/Paslanmaz çelik).

Değişkenler	Birim	Kod	Seviyeler				
			$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
Başlangıç pH	-	X_1	3	4	6	8	9
Akım	A	X_2	1,25	2	3,5	5	5,75
Süre	dk	X_3	30	60	120	180	210
Elektrolit Dozu	g/L	X_4	1,5	2	3	4	4,5

Grafit ve KMO anot paslanmaz çelik katot için yapılan EO çalışmalarında; başlangıç pH'sı için temel 3 seviye değerleri; pH 4, pH 6, pH 8 olurken uzay dışı pH 3 ve pH 9 değerleri de tasarımda bulunmaktadır. Bu değerler atık suyun doğal pH'sına yakın olarak ve arıtılmış suyun da deşarj limitlerini aşmaması amacıyla seçilmiştir. Akım için temel 3 seviye 2, 3,5, 5 Amper alınırken 1,25 ve 5,75 Amper değerleri uzay dışı olarak çalışılmıştır. Süre içinse 60-120-180 dk aralığı ile uzay dışı 30 ve 210 dk belirlenmiştir. Süre değerleri ön denemeler neticesinde reaksiyonun 60 dk'dan sonra kabul edilebilir giderim verimini oluşturmaya başladığı tespit edildiğinden 60 dk ile başlatılmıştır, literatürde bu durumu kanıtlayan çalışmalar bulunmaktadır [134]. Elektrolit olarak sodyum sülfatın kullanıldığı çalışmada; literatür değerleri ve ön denemelerdeki mevcut iletkenlik değerinin seviyesi dikkate alınmış ve 2, 3, 4 g/L (1,5-4,5 g/L uzay dışı) olacak şekilde tasarımda seçilmiştir.

3.2.2.2 YSA İle Elektrooksidasyon Prosesi Deney Modellemesi

Şekil 3.4'te görüleceği üzere, sırasıyla birer adet giriş katmanı, gizli katman ve çıkış katmanı olan bir YSA ağ örneği EO ile arıtım sonucu deneyleri modellemek için kullanılmıştır. Giriş katmanına dört adet veri girişi yapılmış ve çıkış katmanının içerisinde iki adet veri çıkışı (KOİ giderim verimi,%) gerçekleşmiştir. YSA için de YYY'de kullanılan deneysel datalar kullanılmıştır.

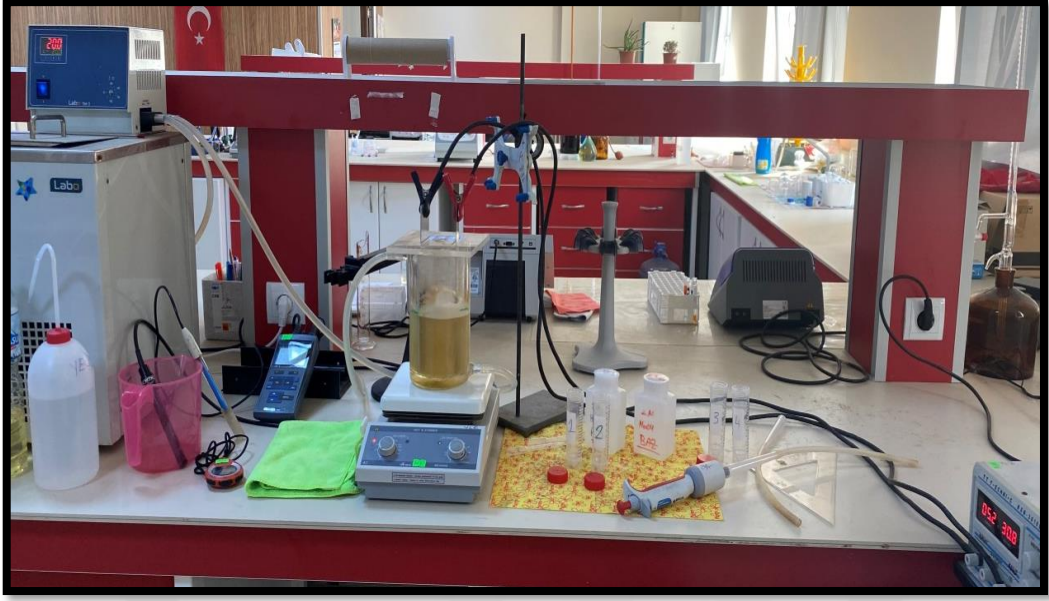


Şekil 3.4: EO prosesi için uygulanan tek katmanlı YSA örneği.

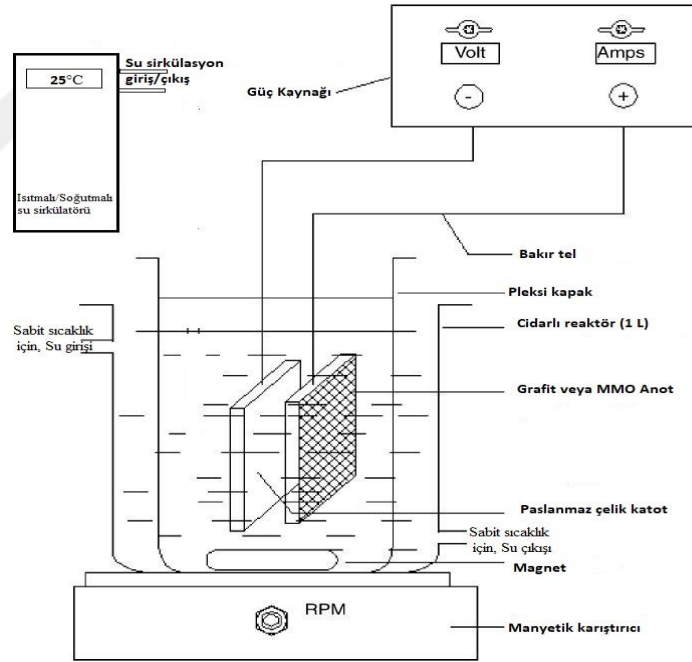
3.2.3 Elektrooksidasyon Deneylerinin Yürütülmesi

Elektrooksidasyon deneyleri 1000 mL'lik ceketli cam reaktörde ve 500 mL numune hacminde gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında numune sıcaklığı (25°C) Labo SM3 sirkülatörü ile sabit tutulmuştur. Deneylerde gerekli olan elektrik akımını sağlamak için DC Power Supply Rxn 3010D (0,1-10A) güç kaynağı ve numunenin homojen dağılımının sağlanabilmesi için dijital manyetik karıştırıcı (Topo MS300HS) kullanılmıştır. Reaksiyon başlangıcında ve sonrasında atık suyun pH, iletkenlik ve sıcaklık değerleri pH metre-iletkenlik ölçer ile okunmuş ve ayarlanmıştır. Elektrotlar paralel bağlı monopolar şekilde bağlanmıştır. Bir anot ve bir katot ile yapılan çalışmalarda plakalar arası mesafe sabit 5 cm olarak seçilmiş ve grafit için plaka boyutlarının yaklaşık ıslak yüzey alanı 258 cm², karışık metal oksit için 265 cm² olarak hesaplanmıştır. Anot materyalleri olarak grafit ve karışık metal oksit (Umicore MMO-Mixed metal oxide) anotlar, katot materyali olarak ise paslanmaz çelik kullanılmıştır.

Kimyasal olarak demir (III) klorür/APN için belirlenen optimum arıtım şartlarında ön arıtılmış numuneden 500 mL alınmış ve EO için hazırlanan deneysel tasarımda belirlenen pH'ya 0,01 M H₂SO₄ ve 0,01 M NaOH çözeltileri kullanılarak ayarlanmıştır. Ardından tasarımda belirlenen dozda sodyum sülfat elektroliti numuneye ilave edilmiş ve çözünene kadar karıştırılmıştır. Oluşan iletkenlik değeri not edilmiştir. Su sirkülatörü çalıştırılarak numunenin sabit sıcaklığa (25°C) gelmesi sağlanmıştır. Ardından seçilen elektrotlar güç kaynağına bağlanmış ve çalışma başlatılmıştır. EO sırasında 400 rpm sabit karıştırma hızında manyetik karıştırma ile numune karıştırılmıştır. Belirlenen sürelerde alınan numunelerin iletkenlik ve pH değerleri ölçüldükten sonra 0.45µm'lik şırınga filtreden süzölmüş, daha sonra KOİ ve renk analizleri yapılmıştır. Elektrotlar kullanım sonrası ultrases banyosunda bekletilmiş ve saf su ile hassas bir şekilde temizlenmiştir. Deneyler; YYY içinde yer alan Merkezi Kompozit Tasarım (MKT) ile belirlenen arıtma parametreleri (atık su başlangıç pH'sı, akım (A), Na₂SO₄ destek elektrolit miktarı (g/L), süre (dk)) için tasarımda belirlenen şartlarda yapılmıştır. Çalışmada kullanılan EO düzeneği Şekil 3.5'te, proses şeması ise Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



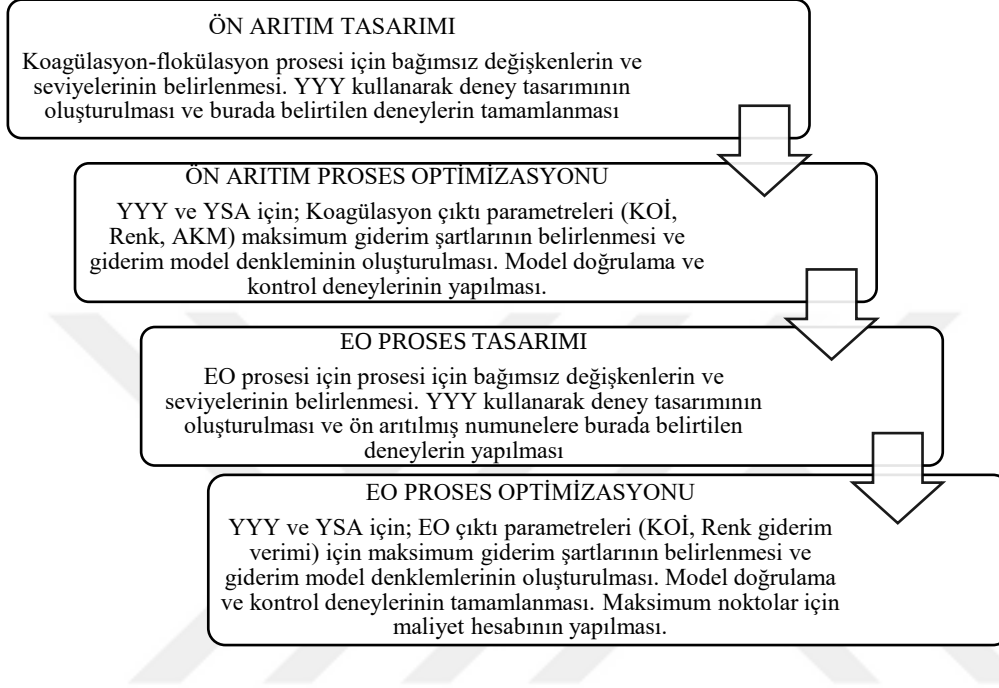
Şekil 3.5: Elektrokoksidasyon deney düzeneği.



Şekil 3.6: Elektrokoksidasyon prosesi deney sistemi şematik gösterimi.

Yapılan çalışmamızda; deneyler iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada KOİ, AKM ve renk parametrelerini birlikte optimize eden giderim şartını sağlayan demir (III) klorür/APN kimyasal kombinasyonu için belirlenen doz ve pH'da numuneler ön arıtılmıştır. İkinci aşamada ise ön arıtılmış numunelere EO prosesi uygulanmıştır.

Sonuç olarak kirletici parametrelerindeki değişim kullanılarak YYY ve YSA ile optimizasyon gerçekleştirilmiş, model denklemleri türetilmiştir. Ayrıca hibrit arıtım prosesi sonunda maksimum giderim şartlarındaki maliyet değerleri hesaplanmıştır. Şekil 3.7’de deneylerin gerçekleştirilme çerçevesi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.7: Deneylerin ve tasarımların gerçekleştirilme çerçevesi.

3.2.4 Analizler

Analizler ve kullanılan yöntemler aşağıda açıklanmıştır. Tüm yöntemler standart metotlarda belirlenen prosedürlere göre yapılmıştır [135].

1. Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) Analizi

KOİ analizi Standart Metotlar 5220 D kapalı reflüks kolorimetrik yöntem ile yapılmıştır.

- Potasyum hidrojen fitalat (KHP) kalibrasyon çözeltisi hazırlanışı

850 mg potasyum hidrojen fitalat 105°C’de kurutulur, saf su ile 1 L’ye tamamlanarak ve çözelti hazırlanmıştır. Kalibrasyon eğrisinin oluşturulurken, hazırlanan bu stok çözeltiden belirlenen aralıklarda seyreltilmiş numuneler kullanılmıştır.

- Parçalama çözeltisi hazırlanışı

500 ml saf su içerisinde; etüvde 105°C’de 2 saat kurutulan 10,216 gr $K_2Cr_2O_7$ çözülmüştür. Daha sonra 167 mL derişik H_2SO_4 ve 33 gr $HgSO_4$ sırasıyla ilave edilmiştir. Çözelti bir litreye saf su ile tamamlanmıştır.

- Asit çözeltisi hazırlanışı

1 L derişik H_2SO_4 içerisinde 5,5 gr Ag_2SO_4/kg H_2SO_4 olacak şekilde Ag_2SO_4 , çözdürülmüştür. Çözeltinin hazır olması için 1 gün bekletilmiştir.

Çözünmüş KOİ analizi için 0,45 μm 'lik filtreden süzülmüş numuneden borosilikat tüpe 1,5 mL alınarak üzerine parçalama çözeltisinden 1 mL ve son olarak asit çözeltisinden 2 mL eklenmiş, 2 saat boyunca termoreaktörde (WTW marka CR3200 model) $148 \pm 2^\circ C$ 'de ısıtılmıştır. Örnekler reaktörden alınarak oda sıcaklığına gelinceye kadar soğuması beklenmiş ve 600 nm'de Spektroquant Pharo 300 marka spektrofotometrede okunmuştur. Referans çözelti olarak örnek yerine distile suyun kullanıldığı dikromat içeren parçalanmamış kör kullanılmıştır.

2. Renk Tayini

Renk analizi Standart Metotlar 2120 F spektrofotometrik yöntem ile yapılmıştır. Renk kalibrasyonu için numuneler aşağıdaki şekilde hazırlanmıştır.

- Kalibrasyon çözeltisinin hazırlanması

500 Pt–Co renk birimindeki stok standart çözeltinin hazırlanması amacıyla 1 gr kristalize kobalt klorit ($CoCl_2 \cdot 6H_2O$) ve 500 mg metalik Pt'e eşdeğer 1,246 gr potasyum kloroplatinat (K_2PtCl_6) 100 ml derişik hidroklorik asitle (HCl) saf su içerisinde çözdürülür ve 1 L'ye tamamlanır [135]. Bu stok standart solüsyondan belirlenen oranlarda seyreltmeler yapılmıştır. Oluşturulan standartların spektrofotometrede 456 nm dalga boyunda absorbans değerleri okunmuştur. Analizden önce numuneler şırınga uçlu filtreden (0,45 mm) filtrelenmiştir. Filtrelenen numuneler quarz küvetlerde spektrofotometrede (Spektroquant Pharo 300) daha önceden kalibrasyonu yapılmış metot ile mg/L Pt/Co olarak okunmuştur.

3. Askıda Katı Madde (AKM) Tayini

Askıda Katı Madde analizleri Standart Metot 2540'a uygun olarak gerçekleştirilmiştir. AKM analizleri $105^\circ C$ 'deki etüvde 1 saat süreyle kurutulmuş 0,45 μm gözenek çapında whatman filtre kâğıtları kullanılarak yapılmıştır. Desikatörde sabit tartıma gelinceye oda sıcaklığında bekletilen filtre kâğıtları hassas terazide tartılmıştır. Süzme işlemi, deneylerden sonra numunelerden belli hacimde alınarak gerçekleştirilmiştir. Süzülen numune hacmi not edilmiştir. Süzme işlemi yapılan filtre kâğıdı $105^\circ C$ 'deki etüvde kurutulmuş ve desikatörde

bekletilerek soğutulmuştur. Ardından tartılarak hesaplama işlemine geçilmiştir. Sonuçlar ise Denklem 3.1’de belirtilen şekilde hesaplanmıştır.

$$AKM\left(\frac{mg}{L}\right) = \frac{(B-A)}{V} \times 1000 \quad (3.1)$$

Burada, B süzme işlemi gerçekleştirilip, kurutma ve soğutma işleminden sonra tartılan dolu filtre kağıdı ağırlığı (gr), A kurutulup sabit tartıma getirilmiş boş filtre kağıdı ağırlığı (gr), V süzülen numune hacmini (L) göstermektedir.

4. Biyolojik Oksijen İhtiyacı (BOİ) Tayini

BOİ analizi Standart Metotlar 5210 B 5 gün yöntemine göre yapılmıştır. BOİ ölçümü için aşı ve seyreltme suyu aşağıdaki şekilde hazırlanmıştır.

- Fosfat tampon çözeltisi için; 8,5 g KH_2PO_4 , 21,75 g K_2HPO_4 , 33,4 g $Na_2HPO_4 \cdot 7H_2O$ ve 1,7 g NH_4Cl yaklaşık 500 mL distile suda çözölmüş, pH 7,2 olacak şekilde 1L’ye seyreltilmiştir.
- Magnezyum sülfat çözeltisi: 22,5 g $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ distile suda çözölmüş ve 1L’ye seyreltilmiştir.
- Kalsiyum klorür çözeltisi: 27,5 g $CaCl_2$ distile suda çözölmüş ve 1L’ye seyreltilmiştir.
- Demir klorür çözeltisi: 0,25 g $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ distile suda çözölür ve 1L’ye seyreltilmiştir.
- Seyreltme suyu: Distile su analizin yapılacağı gün taze olarak doygunluğa ulaşana kadar havalandırılmıştır.
- Aşı taze alınmış, havalandırılmış ve çökmeye bırakılarak üstteki duru faz deneylerde kullanılmıştır.

Numune üzerine, suyun litresi başına birer mL tampon çözeltiilerden sırasıyla eklenmiştir. pH 7’ye getirilerek yeterli miktarda aşı ilave edilmiştir (1-2 mL). Çözönmüş oksijene doygun seyreltme suyu ile litreye tamamlanmıştır. Daha önce KOİ tayini yapılmış olan numune, beklenen BOİ değerine göre uygun seyreltme oranındaki miktarda şişeye konulur. Her numune için 3 paralel numune hazırlanır ve inkübatöre (karanlık, $20^\circ C \pm 1$) konulmuştur. Şişelerden birincilere başlangıç çözönmüş oksijen tayini yapılır. 5 günün sonunda aşındaki, seyreltme suyundaki ve numunelerdeki ÇO değerleri ölçölmüştür. Aşağıda verilen Denklem 3.2’ye göre gerekli hesaplamalar yapılır.

$$BOİ_5 \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(D_1 - D_2) - (B_1 - B_2) \cdot f}{P} \quad (3.2)$$

Burada; D₁ aşılı seyrelmiş atık suyun numune hazırlandıktan sonra 15 dakika içinde ölçülmüş çözünmüş oksijen değeri (mg/L), D₂ aşılı seyrelmiş atık suyun inkübasyondan sonraki çözünmüş oksijen değeri (mg/L), B₁ seyrelmiş aşının hazırlandıktan sonra 15 dakika içindeki çözünmüş oksijen değeri (mg/L), B₂ aşı numunesinin inkübasyondan sonraki çözünmüş oksijen değeri (mg/L), f numunedeki aşı yüzdesinin kontroldeki aşı yüzdesine oranı (D₁'deki aşı %/ B₁'deki aşı %), P Seyreltme oranıdır.

5. Çözünmüş Oksijen Tayini (Winkler Metodu)

Çözünmüş oksijen tayini ise yine Standart Metotlar 4500-O C yöntemine göre yapılmıştır.

- Mangan sülfat çözeltisi için 400 gr MnSO₄.2H₂O saf suda çözülür, süzülür ve 1L'ye tamamlanmıştır.
- Alkali-iyodür-azotür çözeltisi için 500 gr NaOH ve 135 gr NaI saf suda çözülüp 1L'ye seyreltilmiş ve bu çözeltiye 10 gr NaN₃'ün 40 ml saf suda çözünmüş çözeltisi eklenmiştir.
- Nişasta çözeltisi hazırlamak için 2 gr analitik saflıktaki nişasta 100 ml saf sıcak suda çözölmüş ve analiz yapılacağı gün taze hazırlanmıştır.
- Sülfürik asit
- 0,025 N Standart sodyum tiyosülfat çözeltisi titrasyonda kullanılmıştır.

BOİ şişesine hızlıca 1 ml mangan sülfat çözeltisi, 1 ml alkali-iyodür-azotür reaktifi ilave edilmiş ve şişe alt-üst edilerek karıştırılmıştır. Çökelek oluştuğunda şişeye 1 ml derişik H₂SO₄ çözeltisi katılmış ve yine alt-üst edilerek daha önce oluşmuş çökeleğin karıştırılarak çözünmesi sağlanmıştır. Erlene alınan 200 ml çözelti 0,025 N tiyosülfat çözeltisi ile açık sarı renk alana kadar titre edilmiş, sonra nişasta çözeltisi eklenmiş ve oluşan mavi renk kayboluncaya kadar titrasyona devam edilmiştir. 200 ml numune ve 0,025 N tiyosülfat durumunda 1ml sarfiyat 1 mg/L O₂ eşdeğerdir.

6. Diğer analizler

Çalışmada zamana karşı alınan numunelerin elektriksel iletkenlik ve pH değışimleri multiparametre ölçer (WTW 3320) kullanılarak ölçölmüştür. Sabit akımla çalışılan sistemdeki voltaj değışimleri ayarlanabilir güç kaynağı (DC Power Supply Rxn 3010D)

kullanılarak takip edilmiştir. Numunelerde incelenen TOK analizleri Dokuz Eylül Üniversitesi Çevre Müh. Bölümü Atık Su Laboratuvarında, Standart Metot 5310-B Yanma-Kızılötesi Işıklar Yöntemi ile Shimadzu marka TOC V-CPN cihazı kullanılarak yapılmıştır.

3.2.5 Deneysel Hesaplamalarda Kullanılan Eşitlikler

Deneysel çalışmalardan sonra yapılan hesaplamalarda kullanılan denklemler aşağıda verilmektedir.

3.2.5.1 Giderim Verimlerinin Hesaplanması

KOI, AKM ve renk giderim verimleri Denklem 3.3 ile hesaplanmıştır.

$$\% \text{Giderim verimi} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (3.3)$$

Burada, C_0 başlangıçta atık sudaki kirletici konsantrasyonunu (mg/L), C_t , t anında atık sudaki kirletici konsantrasyonudur (mg/L) .

3.2.5.2 Enerji Tüketimi ve Maliyetin Hesaplanması

Elektrooksiasasyon prosesi için enerji tüketim değerleri proses süresinde kaydedilen parametrelerin yardımı ile Denklem 3.4 kullanılarak hesaplanmıştır [136].

$$\text{Tüketilen Enerji/Arıtılan Atık su (Wsa/L, kWsa/m}^3\text{)} = (\text{Uygulanan Akım, A} \times \text{Gerilim, V} \times 1\text{sa}) / (\text{Arıtılan atık su hacmi, L/sa}) \quad (3.4)$$

Toplam arıtım maliyeti denklem 3.5'e göre hesaplanmıştır. Burada; M_t toplam maliyet (USD/m³), W : Elektrik maliyeti (USD/ m³), M_{kim} : Birim kimyasal madde maliyeti (USD/m³), c: Birim elektrot fiyatı (USD/m³)'dır.

$$M_t = W + M_{kim} + c \quad (3.5)$$

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1 Kimyasal Ön Arıtım Prosesi

Kimyasal ön arıtım prosesinde koagülant ve flokülant olarak sırasıyla demir (III) klorür/anyonik patates nişastası (%1) ve Flo30/anyonik patates nişastası (%1) kullanılmıştır. Nişasta, atık sularda geleneksel pıhtılaştırıcılara göre daha güvenli ve çevre dostu bir alternatiftir [64]. Deney tasarımı, deney sonuçları, elde edilen denklemler, ANOVA tabloları ve maksimum/optimum giderim şartları ve bu şartlardaki deney sonuçlarına ait tablolar ve grafikler aşağıda yer almaktadır.

4.1.1 Demir (III) Klorür- Anyonik Patates Nişastası ile Kimyasal Arıtıma Ait Deney Sonuçları

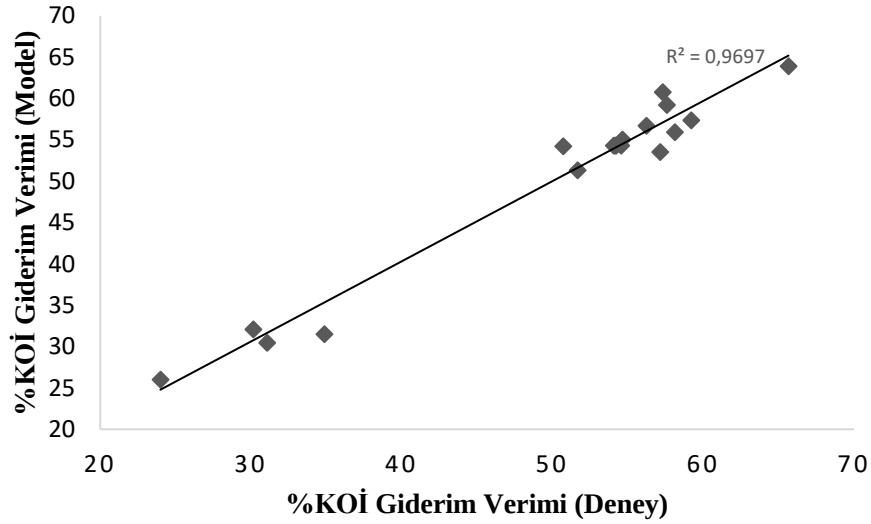
4.1.1.1 KOİ Giderimi Sonuçları

Demir (III) klorür- anyonik patates nişastası kullanılarak YYY tasarım matrisi ve belirtilen şartlarda yapılan deneyler sonucu KOİ giderim verim sonuçları ile modelin ön gördüğü KOİ giderim verimleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1:Deney ve YYY model KOİ giderim verimleri (Demir (III) klorür/APN).

Deney No	Parametreler			KOİ Giderim Verimi,% Deney	KOİ Giderim Verimi,% Model
	Başlangıç pH (X ₁)	FeCl ₃ Dozu, g/L (X ₂)	APN, ml/L (X ₃)		
1	6	2	10	57,14	53,52
2	8	2	10	23,99	26,00
3	6	4	10	54,63	55,05
4	8	4	10	57,58	59,24
5	6	2	30	59,21	57,37
6	8	2	30	31,06	30,47
7	6	4	30	58,12	55,94
8	8	4	30	57,32	60,76
9	5	3	20	50,71	54,23
10	9	3	20	34,87	31,52
11	7	1	20	30,15	32,08
12	7	5	20	65,66	63,90
13	7	3	0	51,66	51,34
14	7	3	40	56,22	56,71
15	7	3	20	54,06	54,29
16	7	3	20	54,16	54,29
17	7	3	20	54,55	54,29
18	7	3	20	54,22	54,29

Uzay dışı noktaların deneyleri ile maksimum/optimum giderim şartlarını sağlayan noktadaki deneyler üç tekrar olarak yapılmıştır. Deney sonuçları ile modelin verdiği sonuçlar arasındaki ilişki Şekil 4.1’de verilmektedir. Grafikten görüldüğü üzere, veriler arasında başarılı bir uyum bulunmaktadır.



Şekil 4.1: Deney ve model KOİ giderim verilerinin korelasyon grafiği (Demir (III) klorür/APN).

%KOİ giderim verimine ait deney sonuçları kullanılarak oluşturulan model eşitliği, Denklem 4.1’de görüldüğü gibidir. Bu modele ait korelasyon katsayıları sırasıyla $R^2 = 0,9697$, $R^2_{adj} = 0,9356$ olarak tespit edilmiştir. 1’e yakın R^2 değerlerinin olması verilerin birbirleri ile uyumluluğu ve deneysel çalışmanın bu model ile açıklanabilirliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Değerler %80’lik bir güvenilirlik eşiğinin üzerinde olduğundan, model kabul edilebilir bir doğruluk sergilemektedir [137].

KOİ giderimini tahmin etmek için oluşturulan modelin R^2 değeri 0,9697 olduğundan, bağımlı değişkende meydana gelen değişimlerin %96,9’unun bağımsız değişkenler tarafından açıklanabildiği söylenebilir. %96,97 olarak hesaplanan R^2 ve %93,56 olarak hesaplanan R^2_{adj} değerleri arasındaki farkın %3,41 olması uygulanan model ile tahmin edilen KOİ giderim verimlerinin, deneysel çalışmalarla elde edilen gerçek sonuçları tahmin etmede başarılı olduğunu göstermektedir [138]. R^2 ve R^2_{adj} değerlerinin birbirlerine yakın olması (fark %3,41), uygulanan model ile tahmin edilen KOİ giderim verimlerinin, deneysel çalışmalarla elde edilen gerçek sonuçları oldukça iyi yanıttığının göstergesidir.

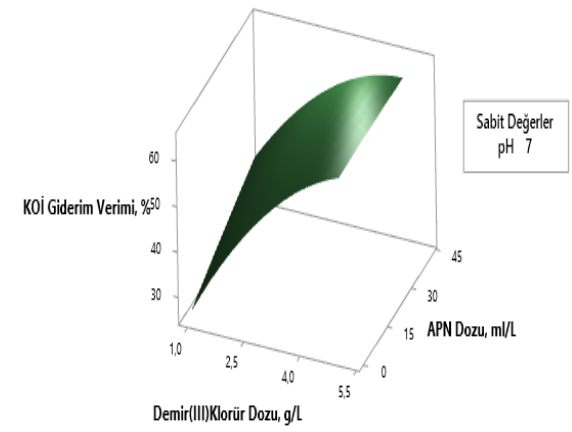
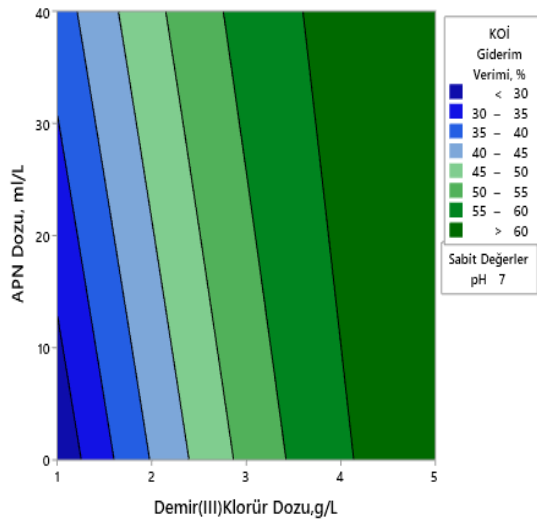
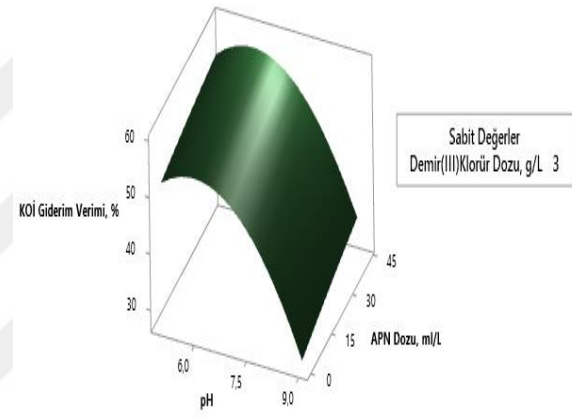
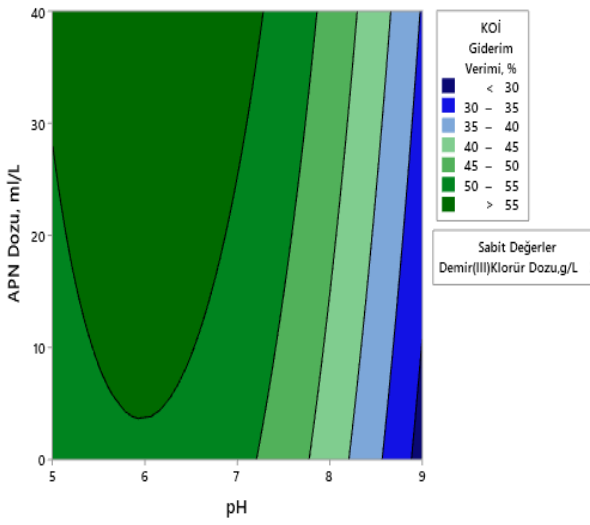
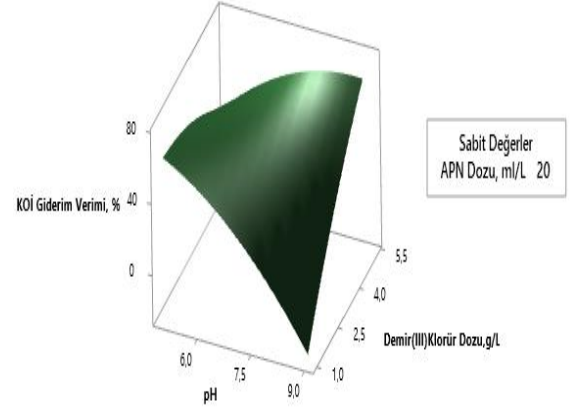
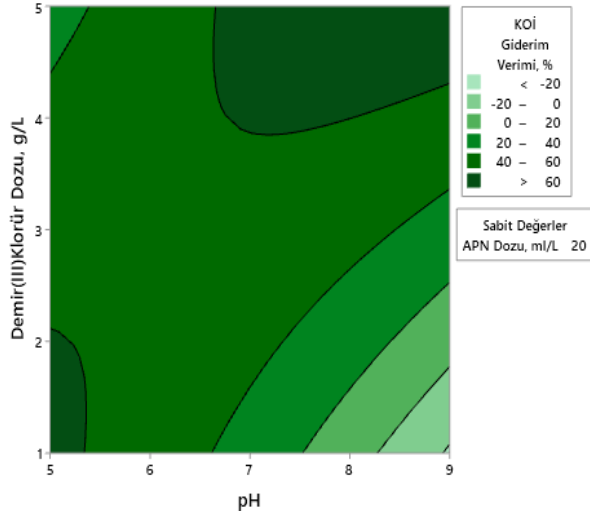
$$\%KOİ \text{ Giderim Verimi} = 77,5 + 10,18*X_1 - 36,62*X_2 + 0,273*X_3 - 2,854*X_1^2 - 1,576*X_2^2 - 0,00068*X_3^2 + 7,93*X_1*X_2 + 0,016*X_1*X_3 - 0,074*X_2*X_3 \quad (4.1)$$

Elde edilen veriler programa girildikten sonra sistem tarafından verilen istatistiksel sonuçları içeren ANOVA tablosu Tablo 4.2’de verilmiştir. İstatistiksel anlamlılığı tanımlamak için %95’lik bir güven düzeyi ($\alpha = 0.05$) kullanılmıştır [117].

Tablo 4.2: KOİ giderimi ANOVA tablosu (Demir (III) klorür/APN).

Kaynak	Serbestlik derecesi	Düzeltilmiş kareler toplamı	Düzeltilmiş ortalama kareler	F-Değeri	P-Değeri	P<0,05
Model	9	2278,86	253,21	28,42	0,000	Anlamlı
Lineer	3	1556,78	518,93	58,25	0,000	Anlamlı
X ₁	1	515,69	515,69	57,89	0,000	Anlamlı
X ₂	1	1012,26	1012,26	113,63	0,000	Anlamlı
X ₃	1	28,83	28,83	3,24	0,110	-
Kuadratik	3	214,45	71,48	8,02	0,009	Anlamlı
X ₁ ²	1	177,76	177,76	19,95	0,002	Anlamlı
X ₂ ²	1	54,18	54,18	6,08	0,039	Anlamlı
X ₃ ²	1	0,10	0,10	0,01	0,918	-
İki faktör etkileşimli	3	507,63	169,21	18,99	0,001	Anlamlı
X ₁ *X ₂	1	503,06	503,06	56,47	0,000	Anlamlı
X ₁ * X ₃	1	0,20	0,20	0,02	0,885	-
X ₂ * X ₃	1	4,36	4,36	0,49	0,504	-
Toplam	17	2350,13				

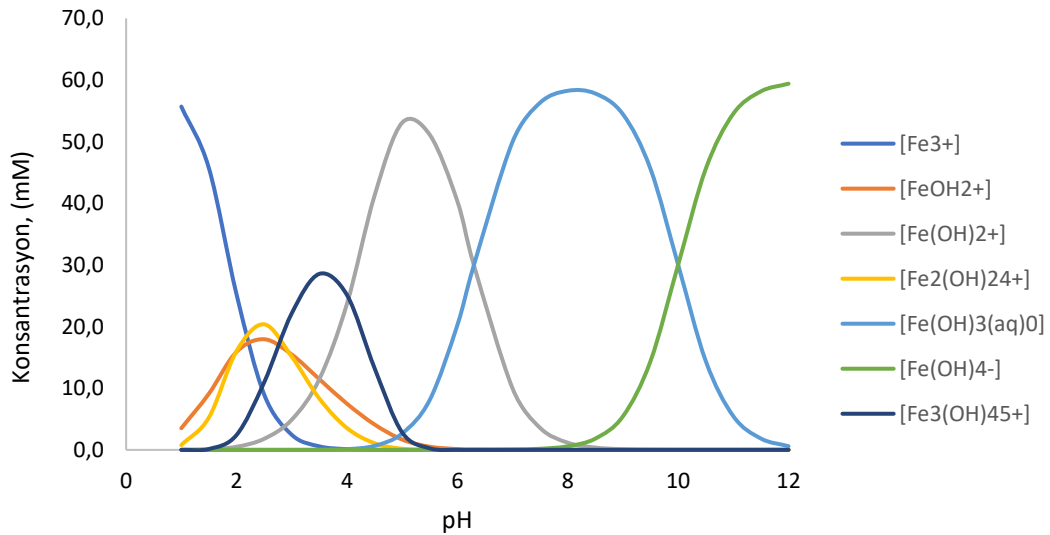
X₁- başlangıç pH, X₂-FeCl₃ dozu (g/L), X₃-APN (ml/L) olmak üzere; X₁,X₂ ve X₃ lineer faktörler, X₁², X₂² ve X₃² kuadratik faktörler, X₁*X₂, X₁* X₃, X₂* X₃ iki faktör etkileşim faktörleridir [139]. Tablodaki değerler incelendiğinde model içinde yer alan parametrelerin çoğunun anlamlı olduğu görülmektedir. Özellikle lineer kısımda yer alan başlangıç pH ve FeCl₃ dozu parametrelerinin KOİ giderimi üzerinde etki oranının yüksek olduğu (p=0,000), APN miktarının ise KOİ gideriminde çok etkili olmadığı görülmektedir.



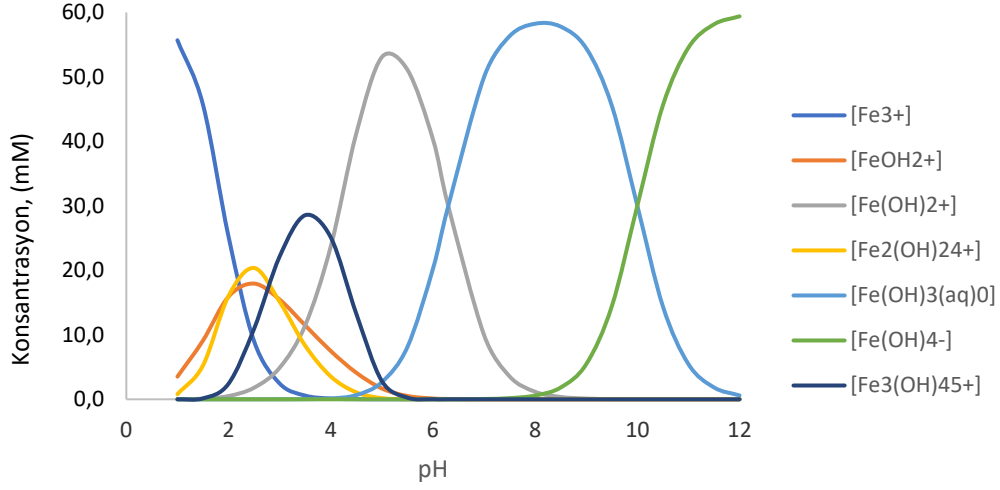
Şekil 4.2: KOİ giderimi için yüzey ve kontür grafikleri (Demir (III) klorür/ APN)

Tahmin edilen model denkleminin görselleştirilmesi yüzey (surface) grafiği ve kontür (contour) grafikleri ile sağlanır. Yüzey grafiğinin iki boyutlu görüntüsüne kontür grafiği denir ve kontür grafiğinde, bağımsız değişkenlerin düzleminde sabit yanıt çizgileri çizilir. Kontür grafikleri, bir yanıt yüzeyinin şeklini görselleştirmeye yardımcı olur ve bu grafikler elipsler veya daireler şeklinde, bazen de hiperbolik veya parabolik olarak görülebilir [116].

Her grafik için bir değişken 0 seviyesinde (APN dozu 20 ml/L, demir (III) klorür dozu 3 g/L, pH 7) sabit tutularak diğer iki değişkenin deneysel aralıklarındaki değişiminin KOİ giderimi üzerindeki etkisi yüzey ve kontür grafikleri Şekil 4.2’de toplu olarak verilmiştir. Bu grafiklerden de anlaşılabacağı üzere; pH artışı bir noktaya kadar KOİ giderim verimini arttırmış olup, pH 9’un üstüne çıkıldıkça KOİ giderim veriminin düştüğü görülmektedir. Yüksek giderim verimlerinin başlangıç pH 8-9 değerlerinde elde edilmesi Şekil 4.3 ve 4.4’te ki grafiklerden de anlaşılabacağı üzere kirleticilerin $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ile birlikte çökmesi ve böylelikle sudan uzaklaştırıldığını düşündürmektedir. Ayrıca başlangıç pH’sı üzerinden yapılan bu çalışmada suda bulunan Fe^{+2} metallerinin asit karakterleri neticesiyle nihai pH düşmekte ve demirin aktif çökeldiği aralığa ulaşmaktadır. Çünkü demir tuzlarının hidroliz reaksiyonları sonucu suya H^+ iyonları vermektedirler [140].



Şekil 4.3: 12 mM (1 g/L) FeCl_3 konsantrasyonu için pH-konsantrasyon diyagramı.



Şekil 4.4: 60 mM (5 g/L) FeCl₃ konsantrasyonu için pH-konsantrasyon diyagramı.

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te verilen demirin pH-konsantrasyon diyagramları çalışma aralığındaki sırasıyla en düşük ve en yüksek (1 ve 5 g/L) FeCl₃ konsantrasyonları için mM olarak çizilmiştir. pH değerleri daha da yükseldikçe koagülasyonun etkinliğini azaltmaktadır. Bunun nedeni daha az pozitif yüklü ve nötral Fe(OH)⁺, Fe(OH)₂ türleri atık suda baskın olarak bulunmasıdır. Demir (III) klorür dozu ve APN dozundaki artış ise KOİ giderim verimini olumlu etkilemiştir. Koagülant dozu arttıkça, pozitif yüklü demir iyonun konsantrasyonunun artması sonucu, daha fazla negatif yüklü partikül nötralize olur ve flok oluşumu artar [141].

Flokülant maddelerin ortamda artışı flok büyüklükleri artmakta ve çökelebilmek özellikleri iyileşmektedir. Doğada kolloidal parçacıklar genellikle negatif yüklüdür. Bu nedenle pozitif yüklü koagülant kullanımı başarılı sonuçlar vermektedir. Kullanılan demir (III) klorür için en uygun pH aralığı 4-12'dir. Asidik pH da flok yükü pozitif alkali pH da negatif, pH 6,5-8,0 aralığında ise karışık yüklüdür. Atık sudaki anyonik yüzey maddeleri koagülant dozunu artırır [49].

Kullanılan program (Minitab 19 trial) yardımıyla maksimizasyon baz alınarak KOİ giderimi için optimum işletme şartları belirlenmiş ve Tablo 4.3'te verilmiştir. Maksimum nokta için deneyler üç tekrarlı yapıp ortalaması alınmıştır. Deneysel değerlerin tahmini değerlerle tutarlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 4.3: Maksimum KOİ giderim şartları (Demir (III) klorür/APN).

Başlangıç pH (X ₁)	FeCl ₃ Dozu, g/L (X ₂)	APN, ml/L (X ₃)	KOİ Giderim Verimi, % Model	KOİ Giderim Verimi, % Deney
8,30	5	20	72,31	70,9 ±1,13

4.1.1.2 AKM Giderim Sonuçları

Demir (III) klorür- anyonik patates nişastası kullanılarak YYY tasarım matrisi, belirtilen şartlarda yapılan deneyler neticesinde AKM giderim verim sonuçları ve modelin ön gördüğü AKM giderim verimleri Tablo 4.4'te verilmiştir.

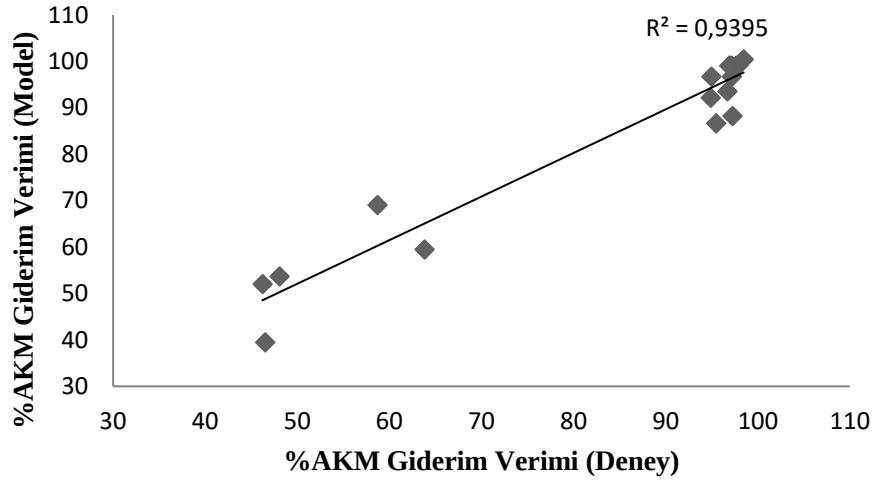
Tablo 4.4: Deney ve YYY model AKM giderim verimleri (Demir (III) klorür/APN).

Deney No	Parametreler			AKM Giderim Verimi, % Deney	AKM Giderim Verimi, % Model
	Başlangıç pH (X ₁)	FeCl ₃ Dozu, g/L (X ₂)	APN, ml/L (X ₃)		
1	6	2	10	97,27	88,21
2	8	2	10	46,51	39,46
3	6	4	10	96,71	93,56
4	8	4	10	95,50	86,66
5	6	2	30	97,96	99,28
6	8	2	30	63,83	59,45
7	6	4	30	97,20	96,72
8	8	4	30	97,21	98,74
9	5	3	20	98,48	100,40
10	9	3	20	48,07	53,68
11	7	1	20	46,22	52,04
12	7	5	20	94,96	96,67
13	7	3	0	58,72	69,01
14	7	3	40	94,91	92,15
15	7	3	20	97,20	99,06
16	7	3	20	96,90	99,06
17	7	3	20	97,65	99,06
18	7	3	20	96,96	99,06

Deney sonuçları ile modelin verdiği sonuçlar arasındaki ilişki Şekil 4.5'te verilmektedir. Grafikten görüldüğü üzere, veriler arasında başarılı bir uyum bulunmaktadır. %AKM giderim verimine ait model eşitliği deney sonuçları kullanılarak elde edilmiş olup, Denklem 4.2'de verilmektedir. Bu modele ait korelasyon katsayıları sırasıyla $R^2 = 0,9395$, $R^2_{adj} = 0,8714$ olarak tespit edilmiştir.

R^2 katsayısı kararlılık katsayısı olarak da isimlendirilir ve regresyon kareler toplamı ile kareler toplamının oranıdır. 0-1 arasında değişen bu değerin 0 olması; değerlerdeki değişimin faktörler ile açıklanamaması, katsayının 1 olması ise verileri faktörlerin tam olarak açıkladığı anlamına gelir [142].

$$\begin{aligned} \%AKM \text{ Giderim Verimi} = & 31 + 29,6 * X_1 - 21,1 * X_2 + 1,46 * X_3 - 5,51 * X_1^2 - 6,18 * X_2^2 \\ & - 0,0462 * X_3^2 + 10,46 * X_1 * X_2 + 0,223 * X_1 * X_3 - 0,198 * X_2 * X_3 \end{aligned} \quad (4.2)$$



Şekil 4.5: Deney ve model AKM giderim verilerinin korelasyon grafiği (Demir (III) Klorür/APN).

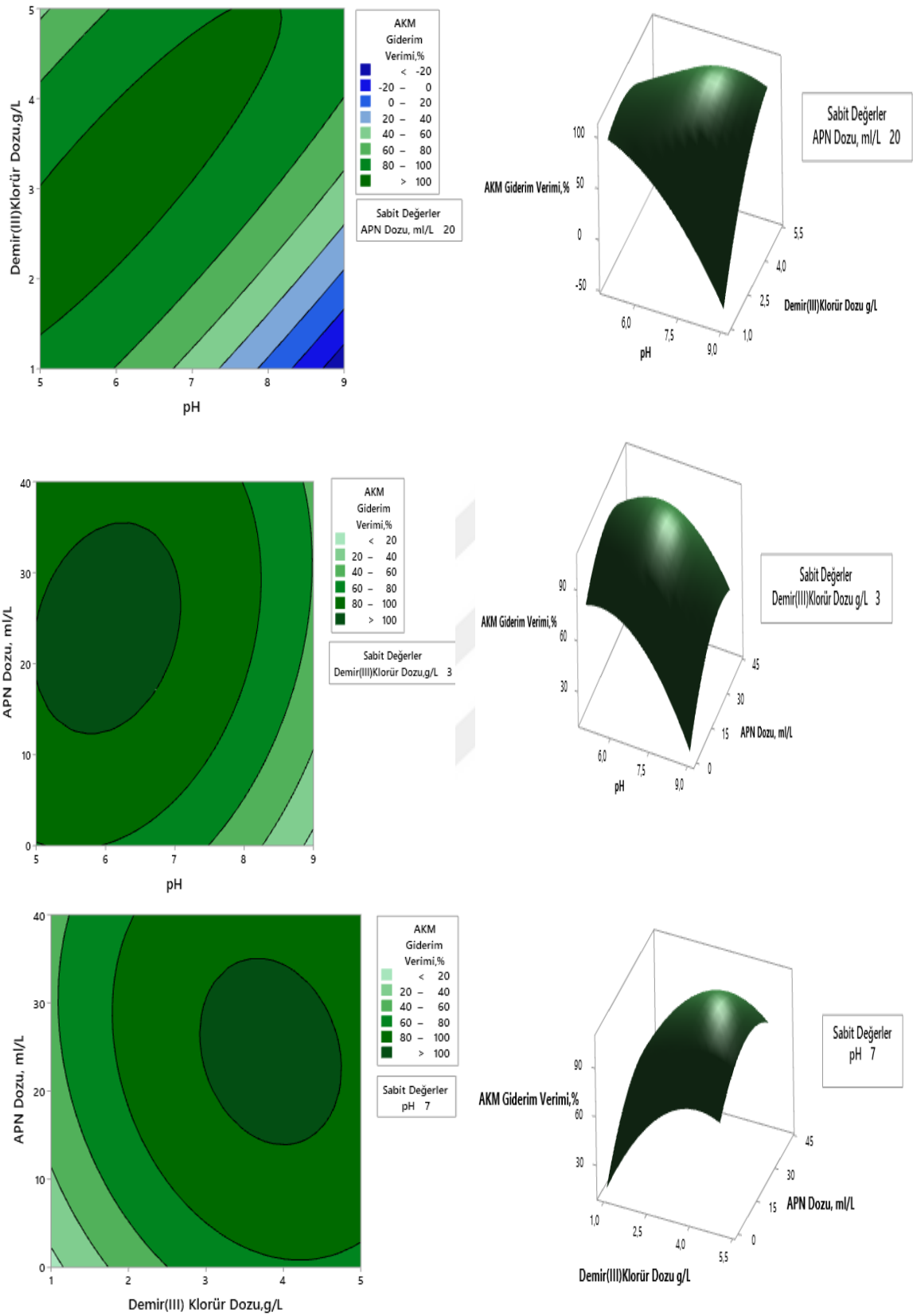
Elde edilen veriler programa girildikten sonra sistem tarafından verilen regresyon analizlerinin sonuçları olan ANOVA değerleri Tablo 4.5’te verilmiştir.

X_1 - başlangıç pH, X_2 -FeCl₃ dozu (g/L), X_3 -APN (ml/L) olmak üzere; iki faktör etkileşimli bulunan $X_1 * X_3$, $X_2 * X_3$ parametreleri dışındaki model içinde yer alan tüm parametrelerin anlamlı olduğu görülmektedir ($p < 0,05$). KOİ giderimindekine benzer şekilde; AKM gideriminde de başlangıç pH, X_2 -FeCl₃ dozunun etkisi yüksek olurken, APN dozunun da giderim üzerinde anlamlı seviyede etkili olduğu anlaşılmaktadır. ANOVA tablosunda her parametrenin ayrı ayrı anlamlılık seviyesi görülebilmektedir. Tüm tasarımlarda; “Model” parametresinin anlamlı seviyede olması elde edilen matematiksel modelin doğruluğu açısından büyük önem taşımaktadır.

Tablo 4.5: AKM giderimi ANOVA tablosu (Demir (III) klorür/APN).

Kaynak	Serbestlik derecesi	Düzeltilmiş kareler toplamı	Düzeltilmiş ortalama kareler	F-Değeri	P-Değeri	P<0,05
Model	9	6878,07	764,23	13,79	0,001	Anlamlı
Lineer	3	4711,24	1570,41	28,35	0,000	Anlamlı
X ₁	1	2183,31	2183,31	39,41	0,000	Anlamlı
X ₂	1	1992,27	1992,27	35,96	0,000	Anlamlı
X ₃	1	535,66	535,66	9,67	0,014	Anlamlı
Kuadratik	3	1220,23	406,74	7,34	0,011	Anlamlı
X ₁ ²	1	661,32	661,32	11,94	0,009	Anlamlı
X ₂ ²	1	832,45	832,45	15,03	0,005	Anlamlı
X ₃ ²	1	465,73	465,73	8,41	0,020	Anlamlı
İki faktör etkileşimli	3	946,59	315,53	5,70	0,022	Anlamlı
X ₁ *X ₂	1	875,51	875,51	15,80	0,004	Anlamlı
X ₁ * X ₃	1	39,80	39,80	0,72	0,421	-
X ₂ * X ₃	1	31,28	31,28	0,56	0,474	-
Toplam	17	7321,27	-	-	-	-

Bağımsız değişkenlerin AKM giderim verimi üzerindeki etkisini veren yüzey ve kontür grafikleri Şekil 4.6'da toplu olarak verilmiştir. Her grafikte ayrı ayrı sabit tutulan değerler; APN dozu 20 ml/L, demir (III) klorür dozu 3 g/L, pH 7 için bu grafiklerden de anlaşılabileceği üzere; pH artışı belli bir değerden sonra (pH>8) AKM giderim verimini olumsuz etkilerken, demir (III) klorür dozu ve APN dozundaki artış da giderim verimini bir noktaya kadar olumlu etkilemiştir. Bunun nedeni olarak; koagülant dozunun çok fazla artırılması ile destabilize kararsız partiküllerin demir katyonlarını absorbe edip elektriksel olarak yüklenerek tekrar stabilize kararlı hale dönüşmesi söylenebilir. Bu da flok oluşumunu engelleyerek çökelme ile partiküllerin atık sudan giderilememesine dolayısıyla AKM gideriminin azalmasına yol açmaktadır [143].



Şekil 4.6: AKM giderimi için yüzey ve kontür grafikleri (Demir (III) klorür/APN).

Maksimum AKM giderimini sağlayan şartlar ise Tablo 4.6’da verilmiştir. Maksimum nokta için deneyler üç tekrarlı yapıp ortalaması alınmıştır. Maksimum deney sonucu AKM’nin tamamına yakını giderilmiştir.

Tablo 4.6: Maksimum AKM giderim şartları (Demir (III) klorür/APN).

Başlangıç pH (X ₁)	FeCl ₃ Dozu, g/L (X ₂)	APN, ml/L (X ₃)	AKM Giderim Verimi,% Model	AKM Giderim Verimi,% Deney
6	3	20	100	98,37±0,7

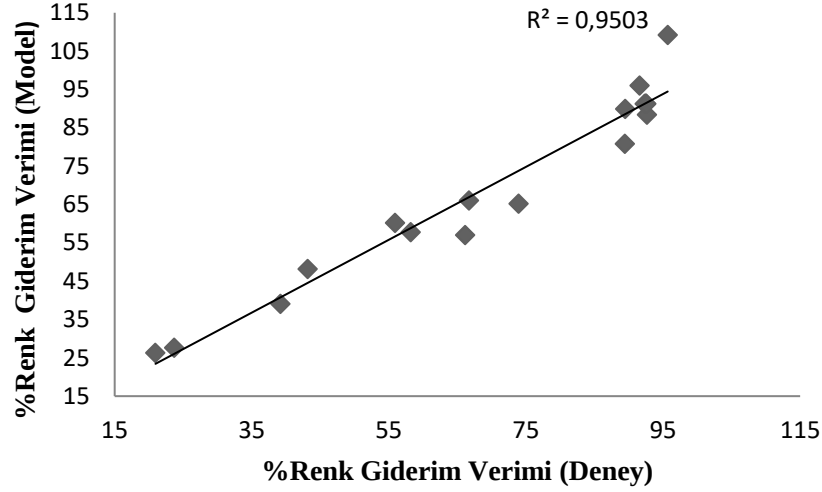
4.1.1.3 Renk Giderim Sonuçları

Demir (III) klorür- anyonik patates nişastası kullanılarak matrikste belirtilen şartlarda yapılan deney sonuçları ve modelin ön gördüğü renk giderim verimleri Tablo 4.7’de verilmiştir.

Tablo 4.7: Deney ve YYY model renk giderim verimleri (Demir (III) klorür/APN).

Deney No	Parametreler			Renk Giderim Verimi,% Deney	Renk Giderim Verimi,% Model
	Başlangıç pH (X ₁)	FeCl ₃ Dozu, g/L (X ₂)	APN, ml/L (X ₃)		
1	6	2	10	89,42	80,77
2	8	2	10	43,17	48,17
3	6	4	10	20,95	26,25
4	8	4	10	91,59	95,97
5	6	2	30	89,49	89,94
6	8	2	30	58,21	57,74
7	6	4	30	39,20	39,03
8	8	4	30	95,68	109,16
9	5	3	20	23,68	27,63
10	9	3	20	73,93	65,16
11	7	1	20	55,89	60,15
12	7	5	20	66,13	57,05
13	7	3	0	66,68	66,07
14	7	3	40	92,64	88,42
15	7	3	20	92,52	91,27
16	7	3	20	92,49	91,27
17	7	3	20	92,35	91,27
18	7	3	20	92,56	91,27

Deney sonuçları ile modelin verdiği sonuçlar arasındaki ilişki Şekil 4.7’de verilmektedir. Grafikten görüldüğü üzere, veriler arasında başarılı bir uyum bulunmaktadır.



Şekil 4.7: Deney ve model renk giderim verilerinin korelasyon grafiği (Demir (III) Klorür/APN).

Deney sonuçlarından elde edilen %Renk giderim verimine ait model eşitliği, Denklem 4.3’te görüldüğü gibidir. Bu modele ait korelasyon katsayıları deney ve model için sırasıyla $R^2=0,9503$, $R^2_{adj}=0,8944$ olarak tespit edilmiştir.

$$\begin{aligned} \% \text{Renk Giderim Verimi} = & -77 + 89,5 * X_1 - 132,6 * X_2 + 1,62 * X_3 - 11,22 * X_1^2 - 8,17 * X_2^2 \\ & - 0,0351 * X_3^2 + 25,58 * X_1 * X_2 + 0,010 * X_1 * X_3 + 0,090 * X_2 * X_3 \end{aligned} \quad (4.3)$$

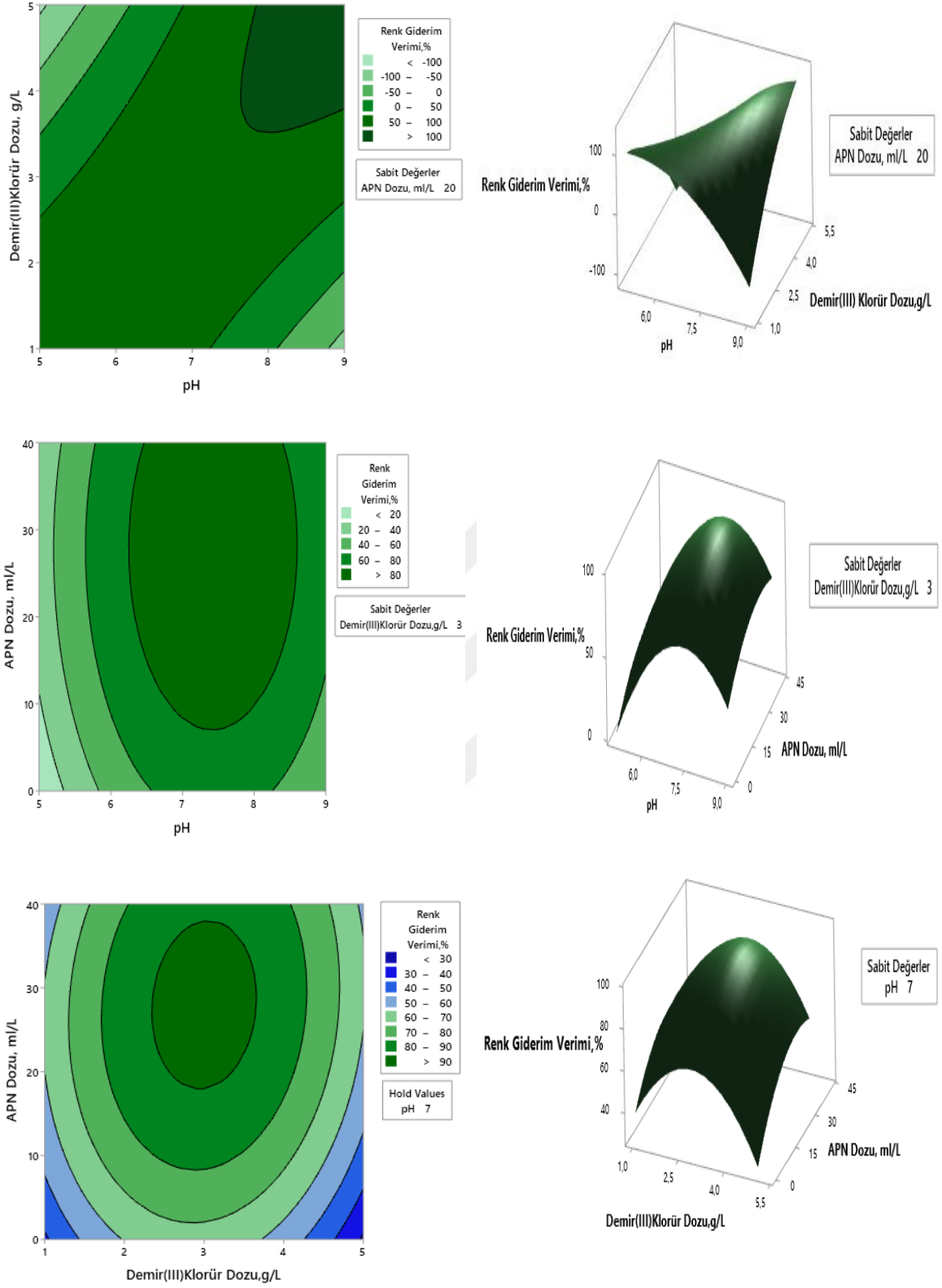
Elde edilen veriler programa girildikten sonra sistem tarafından verilen istatistiksel analizlerin sonuçları ANOVA tablosu olarak Tablo 4.8’ de verilmiştir. ANOVA tablosu (varyans analizi) çalışma sonuçları ile oluşturduğumuz full quadratik denklemin (lineer, kuadratik ve iki faktör etkileşimli) tüm parametrelerinin ve denklem bölümlerinin genel anlamlılık katsayılarını içeren bir tablodur.

Tablo 4.8: Renk giderimi ANOVA tablosu (Demir (III) klorür/APN).

Kaynak	Serbestlik derecesi	Düzeltilmiş kareler toplamı	Düzeltilmiş ortalama kareler	F-Değeri	P-Değeri	P<0,05
Model	9	10453,8	1161,53	17,01	0,000	Anlamlı
Lineer	3	1917	639	9,36	0,005	Anlamlı
X ₁	1	1407,8	1407,82	20,61	0,002	Anlamlı
X ₂	1	9,6	9,60	0,14	0,717	-
X ₃	1	499,6	499,57	7,31	0,027	Anlamlı
Kuadratik	3	3295,5	1098,51	16,08	0,001	Anlamlı
X ₁ ²	1	2746,5	2746,50	40,21	0,000	Anlamlı
X ₂ ²	1	1456,1	1456,08	21,32	0,002	Anlamlı
X ₃ ²	1	268,3	268,28	3,93	0,083	-
İki faktör etkileşimli	3	5241,3	1747,09	25,58	0,000	Anlamlı
X ₁ *X ₂	1	5234,7	5234,66	76,64	0,000	Anlamlı
X ₁ * X ₃	1	0,1	0,08	0,00	0,973	-
X ₂ * X ₃	1	6,5	6,53	0,10	0,765	-
Toplam	17	11000,2				

X₁- başlangıç pH, X₂-FeCl₃ dozu (g/L), X₃-APN (ml/L) olmak üzere; ANOVA tablosundaki değerler incelendiğinde model içinde yer alan parametrelerin büyük çoğunluğunun anlamlı olduğu görülmektedir. FeCl₃ dozu renk giderimi üzerinde tek başına anlamlı bir değişikliğe neden olmasa da pH ile iki faktör etkileşimli olacak şekilde anlamlı seviyeye ulaşmıştır.

Bağımsız değişkenlerin renk giderim verimi üzerindeki etkisini veren yüzey ve kontür grafikleri Şekil 4.8’de toplu olarak verilmiştir. Bu grafiklerden de anlaşılabacağı üzere her grafikte ayrı ayrı sabit tutulan değerler; APN dozu 20 ml/L, demir (III) klorür dozu 3 g/L, pH 7’dir. pH artışı ve demir (III) klorür dozundaki artış renk giderim verimini arttırırken, APN dozundaki artışın giderim verimi üzerinde ciddi bir etkisi olmamakla birlikte bir noktaya kadar olumlu etkilemiştir. Rengin temelini oluşturan maddeler asılı katı maddelerden ziyade çözünmüş bileşenlerdir. Bu nedenle parçacıkların bir araya gelerek çökeltim verimini arttıran flokülant dozu renk gideriminde çok etkili bir faktör olmamıştır [144].



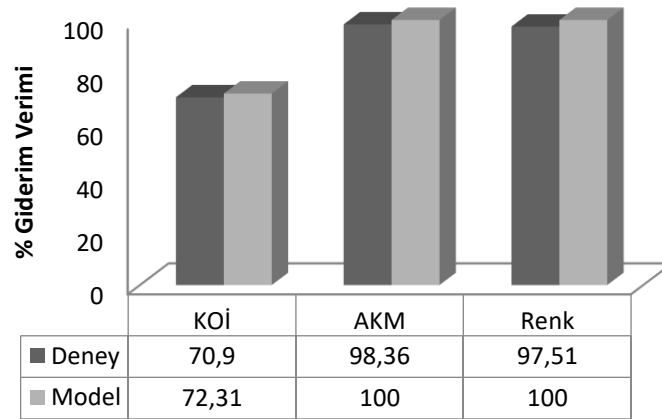
Şekil 4.8: Renk giderimi için yüzey ve kontür grafikleri (Demir (III) Klorür/APN).

Maksimum renk giderimini sağlayan şartlar ise Tablo 4.9’da verilmiştir. Maksimum nokta için deneyler üç tekrarlı yapıp ortalaması alınmıştır. Modelden tahmin edilen giderim verimi ile deneysel olarak elde edilen giderim verimi arasında bir uyum bulunmaktadır.

Tablo 4.9: Maksimum renk giderim şartları (Demir (III) klorür/APN).

Başlangıç pH (X ₁)	FeCl ₃ Dozu, g/L (X ₂)	APN, ml/L (X ₃)	Renk Giderim Verimi,% Model	Renk Giderim Verimi,% Deney
9	5	25	100	97,51±1,3

Demir (III) klorür- anyonik nişasta ile yapılan koagülasyon ön arıtım çalışmaları sonucunda; modelin KOİ, AKM ve renk için verdiği maksimum giderim verim değerlerinin doğrulama deney sonuçları ile karşılaştırma grafiği Şekil 4.9’da verilmiştir. Belirlenen şartlar için giderim verimlerinin modelden elde edilen değerlerle yakın olduğu ve model geçerliliğinin doğruluğu görülmektedir. Ekstra deney yapma ihtiyacı olmadan optimizasyon ile prosesteki parametrelerinin seviyelerinin değişmesi durumunda; elde edilen matematiksel modeller kullanılarak istenen çıktı üzerindeki etkiyi görebilme imkânı sağlamaktadır.



Şekil 4.9: Maksimum nokta doğrulama deney sonuçlarının model sonuçları ile karşılaştırması (Demir (III) klorür/APN).

YYY ile elde edilen matematiksel model kullanılarak; tasarımda yer alan parametreler için tasarımda belirlenen aralıklarda seçilen herhangi bir noktada deney yapmaksızın model çıktı parametrelerini (KOİ, AKM, renk giderim verimi) hesaplayabilmek mümkündür. Hesaplanan sonuçlar ile deney sonuçlarının uyumu model güven aralığı içinde olmaktadır.

Elde edilen modellerin belirttiğimiz şekilde çıktıyı tahmin etme kabiliyetini görmek amacıyla, modelde yer alan bağımsız parametrelerin aralıkları içinde rastgele belirlenen kontrol deneyleri tasarlanmış ve bu deneylerin modelde yerine koyarak hesaplanan sonuçları ile yapılan deneyler sonucu elde edilen değerler Tablo 4.10’da verilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde değerlerin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Bu da modelin başarılı bir şekilde uygulanabilirliğinin göstermektedir.

Tablo 4.10: Ön arıtım için yapılan kontrol deney sonuçları (Demir (III) klorür/APN).

Deney No	pH	Demir(III) Klorür Dozu, g/L	APN Dozu, ml/L	KOİ Giderim Verimi, % Deney	KOİ Giderim Verimi, % Model	AKM Giderim Verimi, % Deney	AKM Giderim Verimi, % Model	Renk Giderim Verimi, % Deney	Renk Giderim Verimi, % Model
#1	6,5	4,5	5	63,55	58,54	92,10	85,4	35,47	26,35
#2	7,5	3,5	15	60,46	55,85	96,43	94,28	92,38	92,67
#3	8,5	2,5	25	36,32	32,96	65,14	58,04	59,68	60,43

Minitab programı aracılığı ile özellikle %100 giderime ihtiyaç olmayan durumlarda, giderim maliyetlerini optimize etmek amacıyla yada parametrelerin deşarj standartlarını sağladığı şartlar için optimum verim hedeflenerek yeni optimizasyonlar program aracılığı ile tasarlanabilmektedir. YYY ile bağımsız değişkenlere bağlı olan çıktı parametreleri ayrı ayrı minimize, optimize, maksimize edilebildiği gibi birlikte de değerlendirilebilmektedir [145]. KOİ giderim verimi, AKM giderimi verimi ve renk giderim verimi parametrelerinin üçünün aynı anda optimize edildiği bir tasarım da çalışılmış ve tüm parametrelerin maksimize edildiği şartlar için elde edilen noktalar ile modelin verdiği giderim değerleri ve üç tekrarlı doğrulama deney sonuçları Tablo 4.11’de verilmiştir.

Tablo 4.11: YYY’de KOİ, AKM ve renk gideriminin birlikte optimum olduğu şartlar (Demir (III) klorür/APN).

pH	Demir(III) Klorür Dozu, g/L	APN Dozu, ml/L	KOİ Giderim Verimi, % Model	KOİ Giderim Verimi, % Deney	AKM Giderim Verimi, % Model	AKM Giderim Verimi, % Deney	Renk Giderim Verimi, % Model	Renk Giderim Verimi, % Deney
5	1,17	28,68	65,43	67,12±2,93	98,37	97,68±1,05	95,93	91,9±2,53

Bu sonuçlardan da anlaşılacağı üzere parametrelerin aynı anda optimize edilmesi durumu özellikle gerçek atık sular için daha uygulanabilirdir. Çalışmamızda yapılan ön arıtım çalışmaları bu şartlarda gerçekleştirilmiştir.

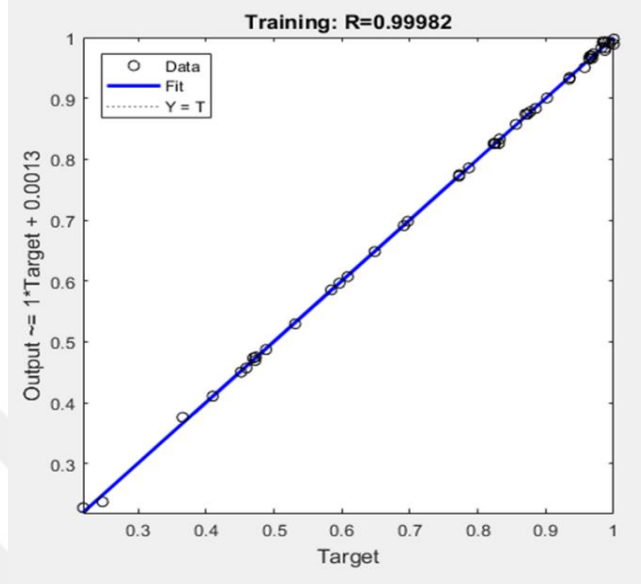
4.1.2 Ön Arıtım Verileri ile YYY ve YSA Çıktılarının Karşılaştırılması (Demir (III) Klorür ve APN)

YSA, bir modelleme aracı olarak polinom regresyon yöntemine bir alternatif sunmaktadır. Klasik YYY; doğrusal, birinci dereceden etkileşim veya ikinci dereceden karesel gibi bir polinom fonksiyonunun lineer ilişkilerini ele alır. YSA metodolojisi, incelenebilecek karmaşık ilişkilerin, özellikle doğrusal olmayan ilişkilerin karmaşık denklemler olmadan modellenmesini sağlar. Ayrıca sinir ağı modelleri, regresyon modellerinden daha iyi tahmin gücüne sahip olabilir. Çalışmada MATLAB yazılımının kullanılarak sistem modellemesi yapılmış ve içerisinde yer alan Neural Network Toolbox kullanılmıştır. Deney sonuçlarının YYY ve YSA ile modellenmesi sonucu elde edilen veriler Tablo 4.12’de görülmektedir.

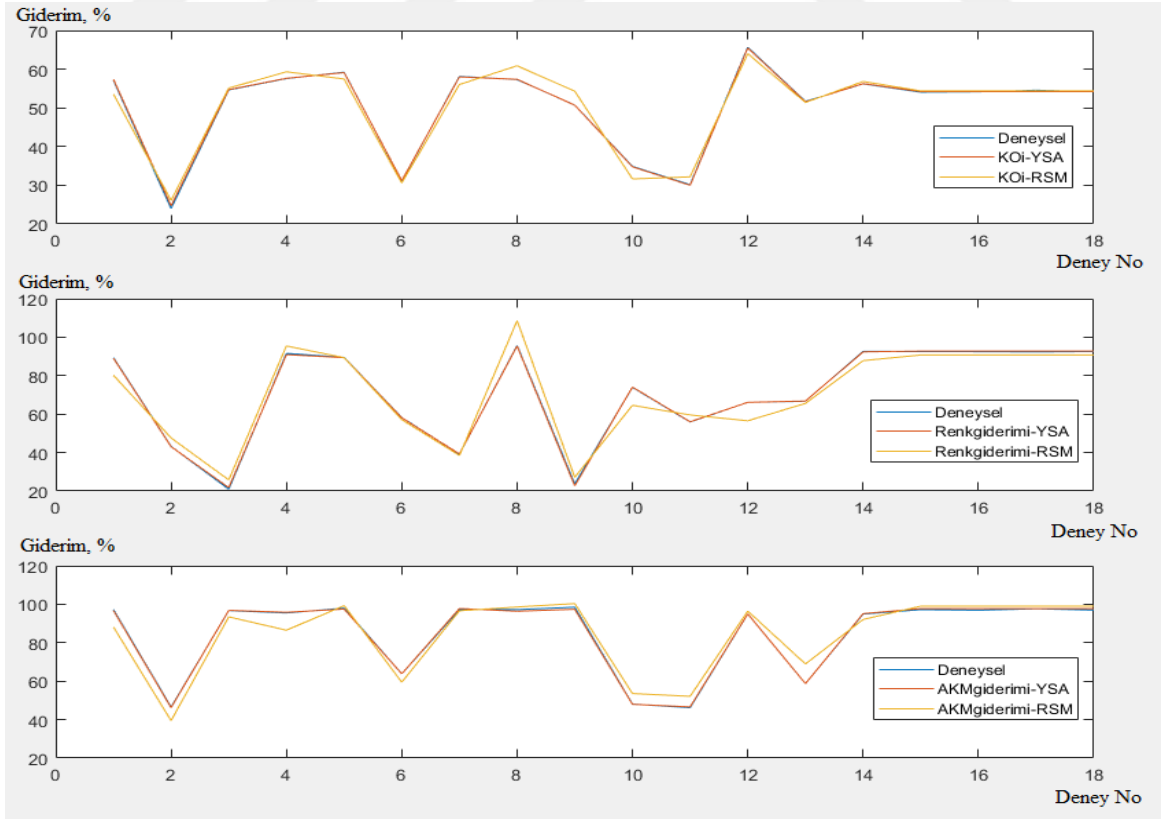
Tablo 4.12: Deney sonuçlarının YSA ve YYY model çıktılarıyla karşılaştırılması.

Deney No	KOİ Giderim Verimi,% Deney	YSA Model	YYY Model	Renk Giderim Verimi,% Deney	YSA Model	YYY Model	AKM Giderim Verimi,% Deney	YSA Model	YYY Model
1	57,14	57,29	53,59	89,42	89,24	80,24	97,27	97,26	88,24
2	23,99	24,21	26,08	43,17	43,15	47,6	46,51	46,22	39,46
3	54,63	54,57	55,12	20,95	20,95	25,76	96,71	97,79	93,44
4	57,58	57,59	59,32	91,59	91,57	95,44	95,5	95,46	86,5
5	59,21	59,09	57,46	89,49	89,6	89,36	97,96	97,92	99,32
6	31,06	31,04	30,59	58,21	58,2	57,12	63,83	63,86	59,46
7	58,12	58,07	56,03	39,2	39,2	38,48	97,2	97,89	96,6
8	57,32	57,34	60,88	95,68	95,26	108,56	97,21	97,17	98,58
9	50,71	50,75	54,3	23,68	20,95	27,13	98,48	97,56	100,36
10	34,87	34,86	31,64	73,93	73,93	64,56	48,07	48,06	53,57
11	30,15	30,11	32,17	55,89	55,9	59,56	46,22	46,35	52,13
12	65,66	65,64	63,99	66,13	66,14	56,52	94,96	98,47	96,44
13	51,66	51,65	51,4	66,68	66,68	65,57	58,72	58,71	68,94
14	56,22	56,04	56,83	92,64	92,5	87,81	94,91	97,23	92,1
15	54,06	54,27	54,38	92,52	92,56	90,73	97,2	96,68	99,01
16	54,16	54,27	54,38	92,49	92,56	90,73	96,9	96,68	99,01
17	54,55	54,27	54,38	92,35	92,56	90,73	97,65	96,68	99,01
18	54,22	54,27	54,38	92,56	92,56	90,73	96,96	96,68	99,01

Şekil 4.10 ve 4.11’de ise modelden alınan sistem çıktıları ile deneysel verilerin uygunluğu görülmektedir. Eğitim sonucu R^2 değeri 0,99982 olarak bulunmuştur. Çıktılar birlikte optimize edilirken dengeli bir dağılım yapılmış ve tüm çıktılar için ağırlıklar eşit alınmıştır.



Şekil 4.10: YSA regresyon grafiği (Demir (III) klorür/APN).



Şekil 4.11: Deney, YSA ve YYY datalarının uyum grafiği (Demir (III) klorür/APN).

Tablo 4.13'te YSA ile üç çıktı parametresinin birlikte optimize edildiği şartlar için şartlar ve giderim verimleri yer almaktadır. Deneysel sonuçlar model sonuçlarıyla uyumlu çıkmıştır.

Tablo 4.13: YSA'da KOİ, AKM ve renk gideriminin birlikte optimum olduğu şartlar (Demir (III)klorür/APN).

pH	Demir(III) Klorür Dozu, g/L	APN Dozu, ml/L	KOİ Giderim Verimi, % Model	KOİ Giderim Verimi, % Deney	AKM Giderim Verimi, % Model	AKM Giderim Verimi, % Deney	Renk Giderim Verimi, % Model	Renk Giderim Verimi, % Deney
5	2,8	40	65,63	58,92	98,48	91,95	95,57	93,72

4.1.3 Flo30-Anyonik Patates Nişastası Kullanımına Ait Deney Tasarımı ve Sonuçları

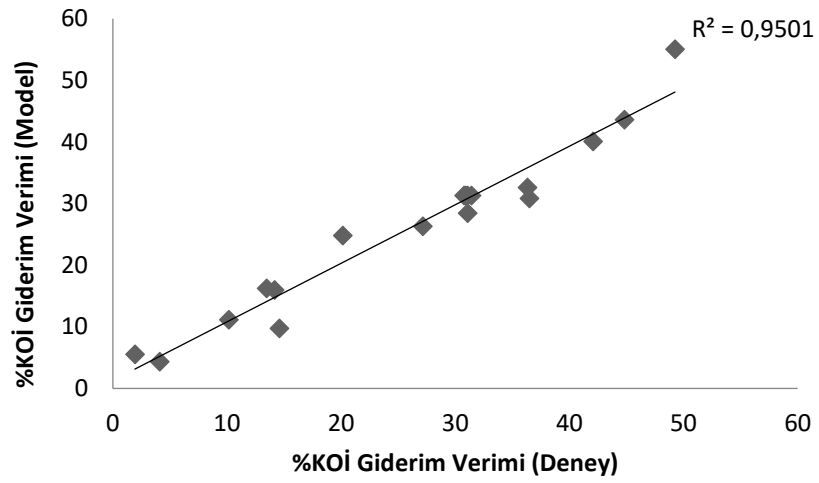
4.1.3.1 KOİ Giderim Sonuçları

Flo30- anyonik patates nişastası (%1) kullanılarak matrikste belirtilen şartlarda yapılan deney sonuçları ve modelin ön gördüğü KOİ giderim verimleri Tablo 4.14'te verilmiştir.

Tablo 4.14: Deney ve YYY model KOİ giderim verimleri (Flo30/APN).

Deney No	Parametreler			KOİ Giderim Verimi, % Deney	KOİ Giderim Verimi, % Model
	Başlangıç pH (X ₁)	Flo30 Dozu, ml/L (X ₂)	APN, ml/L (X ₃)		
1	5	6	10	36,49	30,83
2	8	6	10	4,08	4,33
3	5	12	10	42,06	40,09
4	8	12	10	13,47	16,24
5	5	6	30	36,32	32,58
6	8	6	30	10,14	11,14
7	5	12	30	44,82	43,60
8	8	12	30	20,13	24,81
9	3,5	9	20	49,25	55,05
10	9,5	9	20	14,58	9,75
11	6,5	3	20	1,93	5,51
12	6,5	15	20	31,06	28,45
13	6,5	9	0	14,17	15,98
14	6,5	9	40	27,16	26,31
15	6,5	9	20	30,91	31,28
16	6,5	9	20	32,94	31,28
17	6,5	9	20	31,08	31,28
18	6,5	9	20	30,77	31,28

Flo30/APN kullanılarak yapılan ön arıtım çalışmalarında bakıldığında maksimum %49,25, minimum %1,93 gibi düşük bir arıtım verimi görülmektedir. Minimum giderimin olduğu noktada koagülant Flo30 kimyasal dozunun 3 mL/L ile en düşük değerde olduğu görülmektedir. KOİ gideriminde koagülant dozunun etkisi bu noktada da anlaşılmaktadır. Flo30/APN kombinasyonuna göre daha başarılı sonuçlanmıştır. Deney sonuçları ile modelin verdiği sonuçlar arasındaki ilişki Şekil 4.12’de verilmektedir. Grafikten görüldüğü üzere, veriler arasındaki uyum modelin tahmin etmedeki güvenilirliğini ve başarısını da belirlemektedir.



Şekil 4.12: Deney ve model KOİ giderim verilerinin korelasyon grafiği (Flo30/APN).

Deney sonuçlarından elde edilen %KOİ giderim verimine ait model eşitliği, Denklem 4.4’te görüldüğü gibidir. Bu modele ait korelasyon katsayıları deney ve model için sırasıyla $R^2=0,9501$, $R^2_{adj}= 0,8941$ olarak tespit edilmiştir.

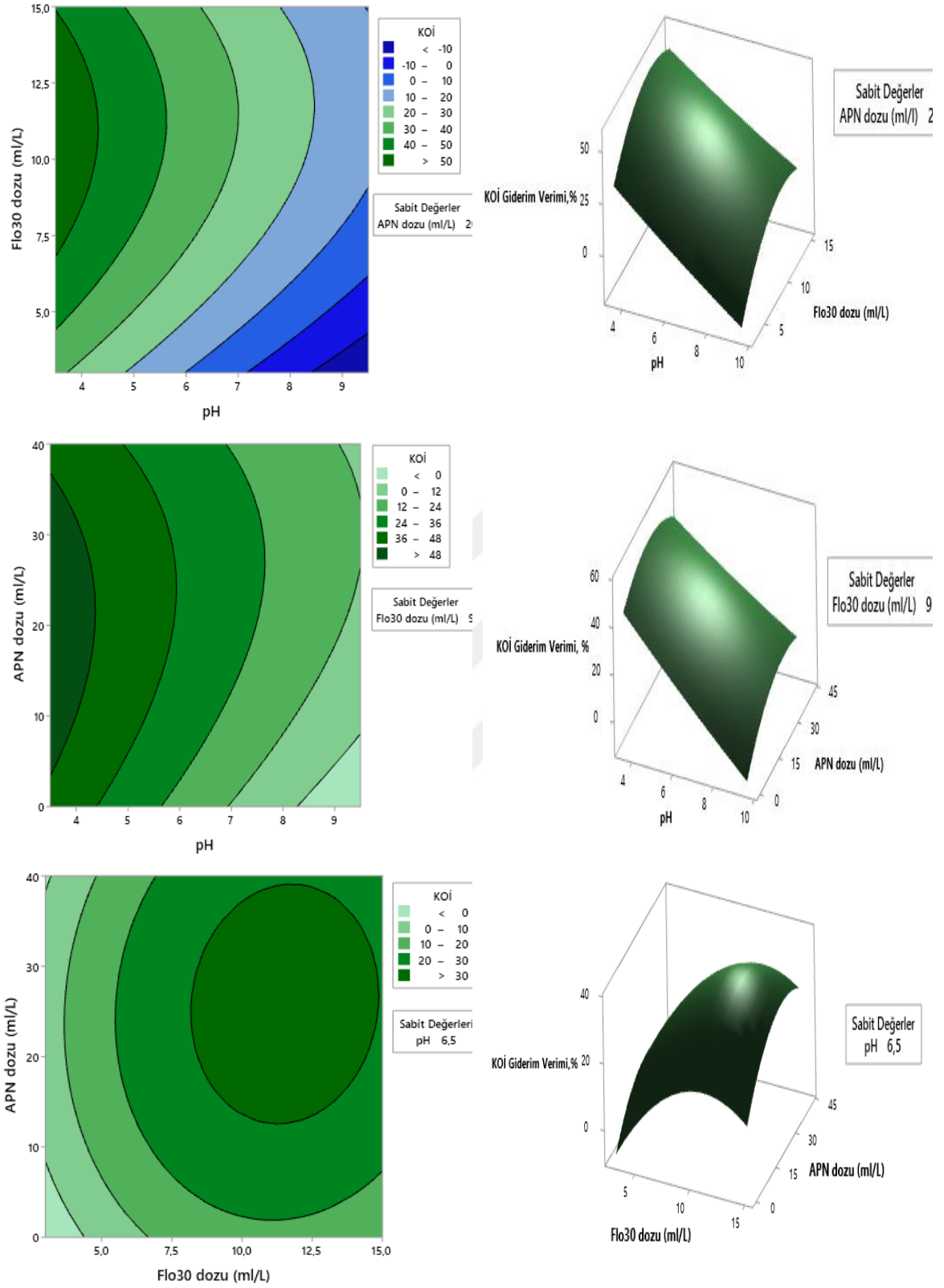
$$\begin{aligned} \%KOİ \text{ Giderim Verimi} = & 43,2 - 12,18 \cdot X_1 + 7,81 \cdot X_2 + 0,590 \cdot X_3 + 0,124 \cdot X_1^2 - 0,397 \cdot X_2^2 \\ & - 0,02533 \cdot X_3^2 + 0,147 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,084 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,0147 \cdot X_2 \cdot X_3 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Elde edilen veriler programa girildikten sonra sistem tarafından verilen ANOVA testinin sonuçları da Tablo 4.15’te verilmiştir.

Tablo 4.15: KOİ giderimi ANOVA tablosu (Flo30/APN).

Kaynak	Serbestlik derecesi	Düzeltilmiş kareler toplamı	Düzeltilmiş ortalama kareler	F-Değeri	p-Değeri	P<0,05
Model	9	3107,60	345,29	16,94	0,000	Anlamlı
Lineer	3	2684,10	894,70	43,90	0,000	Anlamlı
X ₁	1	2052,01	2052,01	100,69	0,000	Anlamlı
X ₂	1	525,56	525,56	25,79	0,001	Anlamlı
X ₃	1	106,53	106,53	5,23	0,052	-
Kuadratik	3	405,58	135,19	6,63	0,015	Anlamlı
X ₁ ²	1	1,71	1,71	0,08	0,780	-
X ₂ ²	1	278,94	278,94	13,69	0,006	Anlamlı
X ₃ ²	1	140,03	140,03	6,87	0,031	Anlamlı
İki Faktör Etkileşimli	3	17,92	5,97	0,29	0,829	-
X ₁ *X ₂	1	3,52	3,52	0,17	0,689	-
X ₁ * X ₃	1	12,85	12,85	0,63	0,450	-
X ₂ * X ₃	1	1,56	1,56	0,08	0,789	-
Toplam	17	3270,63				

X₁-başlangıç pH, X₂-Flo30 dozu (ml/L), X₃-APN (ml/L) olmak üzere; tablodaki değerler incelendiğinde model içinde yer alan lineer ve kuadratik parametrelerin büyük çoğunluğunun anlamlı olduğu görülmektedir. İki faktör etkileşimli parametrelerinin ise anlamlı olmadığı anlaşılmaktadır. ANOVA tablosuna göre KOİ giderimi üzerinde en çok etkili olan parametre başlangıç pH'sı ve Flo30 dozudur. Bağımsız değişkenlerin KOİ giderim verimi üzerindeki etkisini veren yüzey ve kontür grafikleri Şekil 4.13'te toplu olarak verilmiştir. Her grafikte ayrı ayrı sabit tutulan değerler; APN dozu 20 ml/L, Flo30 dozu 9 ml/L, pH 6,5 için grafiklerden de anlaşılabileceği üzere; pH artışı KOİ giderim verimini düşürürken, Flo30 ve APN dozundaki artış KOİ giderim verimini bir noktaya kadar arttırmıştır. Eklenen koagülant ve flokülant kimyasalları optimal dozdan fazla olduğunda partikül uzaklaştırma verimleri düşebilmektedir [146]. KOİ giderim verimi üzerinde Demir (III) klorür/APN ile kimyasal arıtımın Flo30/APN yapılandan daha başarılı sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.13: KOİ giderimi için yüzey ve kontür grafikleri (Flo30/APN).

Maksimum KOİ giderimini sağlayan şartlar ise Tablo 4.16’da verilmiştir. Maksimum nokta için deneyler üç tekrarlı yapıp ortalaması alınmıştır. Maksimum şartlar için deneysel olarak bulunan giderim veriminin modelden elde edilenle aynı olduğu görülmektedir. Bu durum da modelin geçerliliğini ispatlamaktadır.

Tablo 4.16: Maksimum KOİ giderim şartları (Flo30/APN).

Başlangıç pH (X ₁)	Flo30 Dozu, ml/L (X ₂)	APN, ml/L (X ₃)	KOİ Giderim Verimi,% Model	KOİ Giderim Verimi,% Deney
3,5	10,55	20,60	56,38	56,83±1,82

4.1.3.2 AKM Giderim Sonuçları

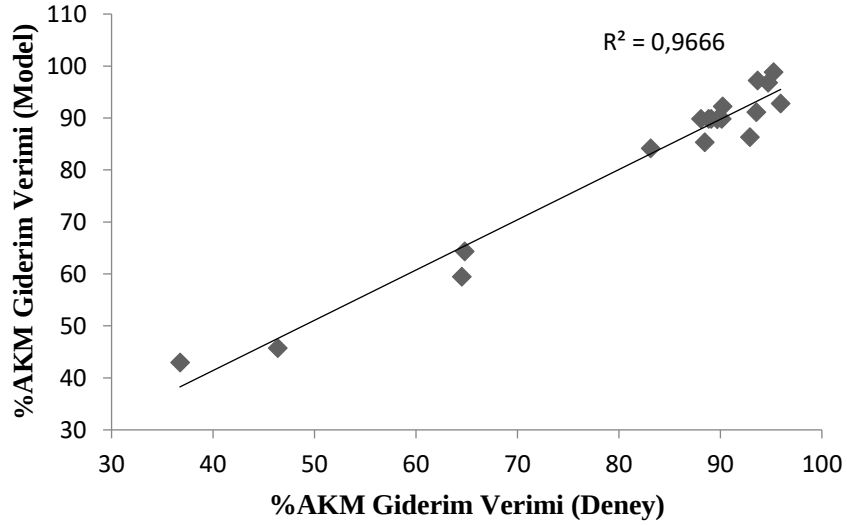
Flo30- anyonik patates nişastası kullanılarak matrikste belirtilen şartlarda yapılan deney sonuçları ve modelin ön gördüğü AKM giderim verimleri Tablo 4.17’de verilmiştir.

Tablo 4.17: AKM giderim verimleri (Flo30/APN).

Deney No	Parametreler			AKM Giderim Verimi,% Deney	AKM Giderim Verimi,% Model
	Başlangıç pH (X ₁)	Flo30 Dozu, ml/L (X ₂)	APN, ml/L (X ₃)		
1	5	6	10	92,91	86,29
2	8	6	10	46,38	45,74
3	5	12	10	94,71	96,78
4	8	12	10	89,69	89,78
5	5	6	30	88,47	85,32
6	8	6	30	64,52	59,44
7	5	12	30	93,54	91,13
8	8	12	30	95,23	98,79
9	3,5	9	20	93,65	97,21
10	9,5	9	20	64,81	64,32
11	6,5	3	20	36,74	42,95
12	6,5	15	20	95,94	92,79
13	6,5	9	0	83,13	84,18
14	6,5	9	40	90,21	92,22
15	6,5	9	20	88,82	89,79
16	6,5	9	20	90,14	89,79
17	6,5	9	20	89,07	89,79
18	6,5	9	20	88,07	89,79

Flo30/APN kullanılarak yapılan ön arıtım çalışmalarında AKM giderim verimleri %36 ve %95 arasında değişmektedir. AKM gideriminde de KOİ de olduğu gibi en düşük giderim

verimi koagülant dozunun en düşük olduğu noktada elde edilmiştir. Genel olarak AKM giderim verimleri %80'nin üstünde gerçekleşmiştir. Deney sonuçları ile modelin verdiği sonuçlar arasındaki ilişki Şekil 4.14'te verilmektedir. Grafikten görüldüğü üzere, veriler arasında başarılı bir uyum bulunmaktadır. Bu uyum modelden elde edilen verilerin uygunluğunu da göstermektedir.



Şekil 4.14: Deney ve model AKM giderim verilerinin korelasyon grafiği (Flo30/APN).

DeneySEL sonuçlardan elde edilen %AKM giderim verimine ait model eşitliği, Denklem 4.5'te görüldüğü gibidir. Bu modele ait korelasyon katsayıları deney ve model için sırasıyla $R^2=0,9666$, $R^2_{adj}= 0,9290$ olarak tespit edilmiştir.

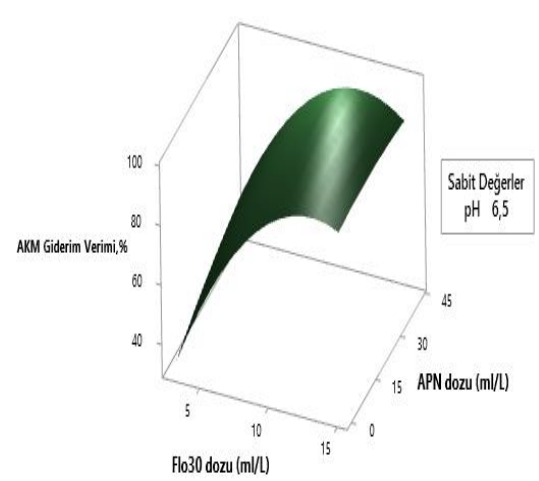
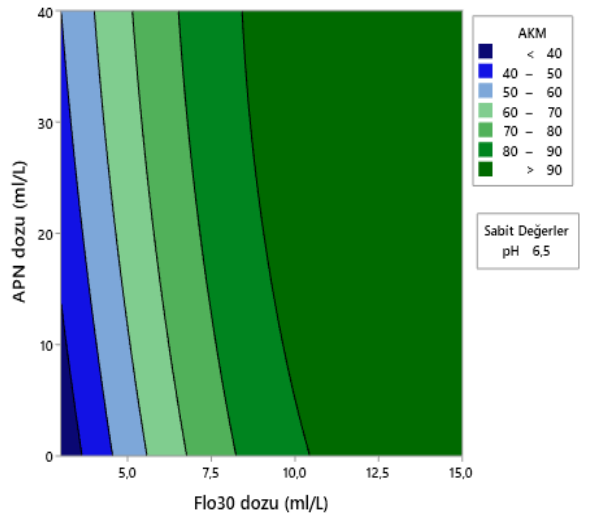
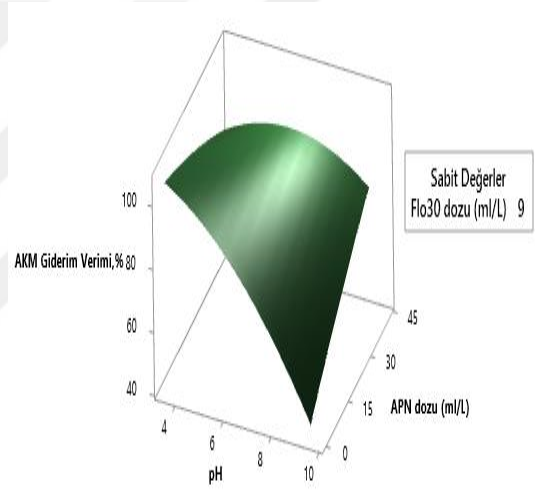
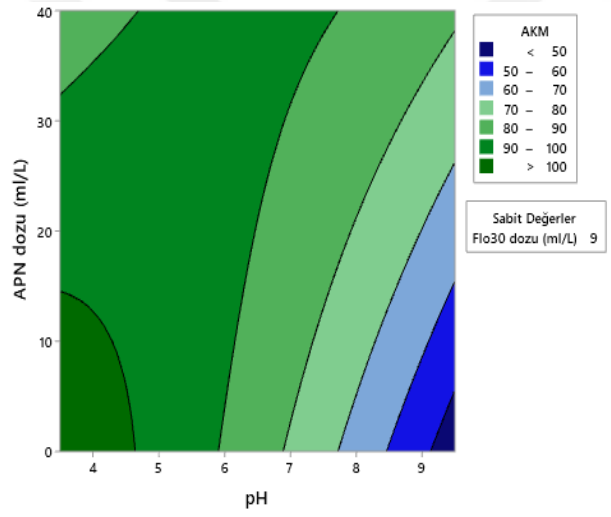
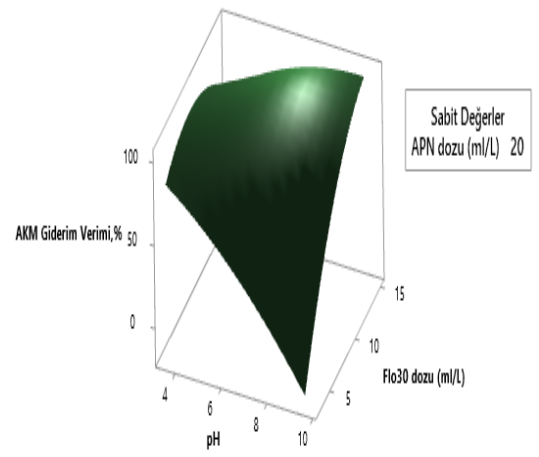
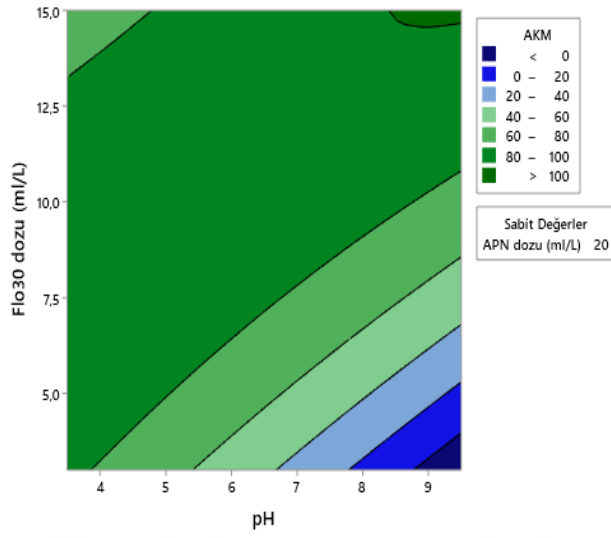
$$\begin{aligned} \%AKM \text{ Giderim Verimi} = & 124,5 - 14,10 \cdot X_1 + 3,78 \cdot X_2 - 0,877 \cdot X_3 - 1,003 \cdot X_1^2 - \\ & 0,609 \cdot X_2^2 - 0,00398 \cdot X_3^2 + 1,864 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,244 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,0391 \cdot X_2 \cdot X_3 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Elde edilen deney verilerinin modellenmesi sonucu oluşturulan ANOVA testinin sonuçları da Tablo 4.18' de verilmiştir.

Tablo 4.18: AKM giderimi ANOVA tablosu (Flo30/APN).

Kaynak	Serbestlik derecesi	Düzeltilmiş kareler toplamı	Düzeltilmiş ortalama kareler	F-Değeri	p-Değeri	P<0,05
Model	9	5029,19	558,80	25,72	0,000	Anlamlı
Lineer	3	3630,48	1210,16	55,70	0,000	Anlamlı
X ₁	1	1081,38	1081,38	49,77	0,000	Anlamlı
X ₂	1	2484,40	2484,40	114,35	0,000	Anlamlı
X ₃	1	64,71	64,71	2,98	0,123	-
Kuadratik	3	717,56	239,19	11,01	0,003	Anlamlı
X ₁ ²	1	111,16	111,16	5,12	0,054	-
X ₂ ²	1	655,47	655,47	30,17	0,001	Anlamlı
X ₃ ²	1	3,46	3,46	0,16	0,700	-
İki faktör etkileşimli	3	681,15	227,05	10,45	0,004	Anlamlı
X ₁ *X ₂	1	562,60	562,60	25,90	0,001	Anlamlı
X ₁ * X ₃	1	107,57	107,57	4,95	0,057	-
X ₂ * X ₃	1	10,98	10,98	0,51	0,497	-
Toplam	17	5203,00				

X₁-başlangıç pH, X₂-Flo30 dozu (ml/L), X₃-APN (ml/L) olmak üzere; tablodaki değerler incelendiğinde model içinde yer alan parametrelerin büyük çoğunluğunun anlamlı olduğu görülmektedir. Bağımsız değişkenlerin AKM giderim verimi üzerindeki etkisini veren yüzey ve kontür grafikleri Şekil 4.15'te toplu olarak verilmiştir. Her grafikte ayrı ayrı sabit tutulan değerler; APN dozu 20 ml/L, Flo30 dozu 9 ml/L, pH 6,5 için; pH, Flo30 ve APN dozundaki artış AKM giderim verimini arttırmıştır. Pıhtılaşma ve flokülasyon sürecinde pH, hidroliz dengesini etkileyen çok önemli bir faktördür. Flo30'ın pH 7'de daha iyi performans göstermesinin ana nedeni, içerdiği hidroksit flok türlerinin 5–7 pH aralığında pozitif yüklü olmasıdır. Böylece çoğunlukla negatif yüklü olan kirletici katıları nötralize eder, organik kirleticileri adsorbe ederler ve sonuç olarak giderim verimini artırır [147]. AKM giderimindeki temel mekanizma asılı parçacıkların çökebilir forma dönüşmesidir, flokülant dozundaki artış taneciklerin çökebilirliğini arttırarak AKM giderim verimini de arttırmaktadır.



Şekil 4.15: AKM giderimi için yüzey ve kontür grafikleri (Flo30/APN).

Maksimum AKM giderimini sağlayan şartlar ise Tablo 4.19’da verilmiştir. Bu şartlar altında atık suda bulunan AKM’ler yüksek oranda gideriliği görülmektedir.

Tablo 4.19: Maksimum AKM giderim şartları (Flo30/APN).

Başlangıç pH (X ₁)	Flo30 Dozu, ml/L (X ₂)	APN, ml/L (X ₃)	AKM Giderim Verimi,% Model	AKM Giderim Verimi,% Deney
9,5	15	40	100	96,46±1,45

4.1.3.3 Renk Giderim Sonuçları

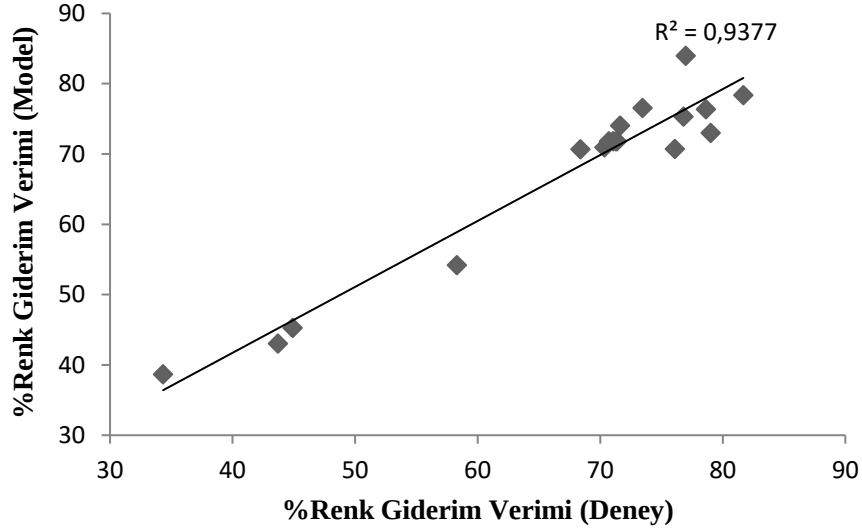
Flo30- anyonik patates nişastası kullanılarak matrikste belirtilen şartlarda yapılan deney sonuçları ve modelin ön gördüğü renk giderim verimleri Tablo 4.20’de verilmiştir.

Tablo 4.20: Renk giderim verimleri (Flo30/APN).

Deney No	Parametreler			Renk Giderim Verimi,% Deney	Renk Giderim Verimi,% Model
	Başlangıç pH (X ₁)	Flo30 Dozu, ml/L (X ₂)	APN, ml/L (X ₃)		
1	5	6	10	79,01	72,99
2	8	6	10	43,70	43,05
3	5	12	10	81,68	78,38
4	8	12	10	71,62	74,07
5	5	6	30	76,10	70,75
6	8	6	30	44,90	45,29
7	5	12	30	78,63	76,38
8	8	12	30	73,45	76,56
9	3,5	9	20	76,97	83,97
10	9,5	9	20	58,30	54,20
11	6,5	3	20	34,33	38,68
12	6,5	15	20	76,79	75,34
13	6,5	9	0	68,38	70,68
14	6,5	9	40	70,35	70,94
15	6,5	9	20	71,27	71,82
16	6,5	9	20	71,36	71,82
17	6,5	9	20	71,05	71,82
18	6,5	9	20	70,70	71,82

Flo30/APN kullanılarak yapılan ön arıtım çalışmalarında renk giderim verimleri %34 ve %81 arasında değişmektedir. Deneysel sonuçlar ile modelin verdiği sonuçlar arasındaki

ilişki ise Şekil 4.16’da verilmektedir. Grafikten görüldüğü üzere, veriler arasında iyi bir uyum bulunmaktadır.



Şekil 4.16: Deney ve model renk giderim verilerinin korelasyon grafiği (Flo30/APN)

DeneySEL sonuçlardan elde edilen %Renk giderim verimine ait model eşitliği, Denklem 4.6’da görüldüğü gibidir. Bu modele ait korelasyon katsayıları deney ve model için sırasıyla **R²=0,9377, R²adj= 0,8676** olarak tespit edilmiştir.

$$\begin{aligned} \text{\%Renk Giderim Verimi} = & 122,8 - 15,33 \cdot X_1 + 1,16 \cdot X_2 - 0,40 \cdot X_3 - 0,304 \cdot X_1^2 - 0,411 \cdot X_2^2 \\ & - 0,0025 \cdot X_3^2 + 1,425 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,075 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,0021 \cdot X_2 \cdot X_3 \end{aligned} \quad (4.6)$$

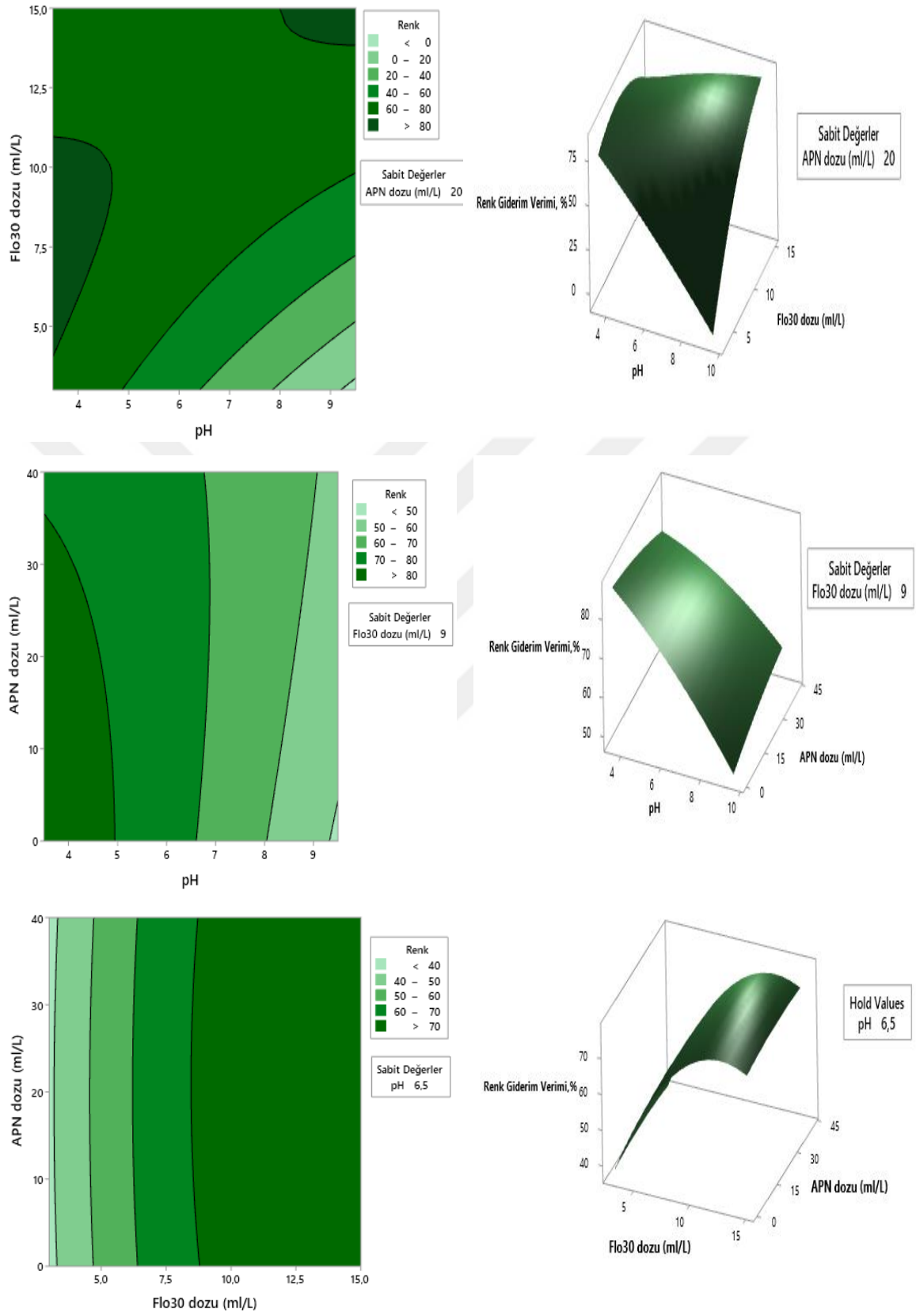
Deney sonuçları ile yapılan modelleme sonucu elde edilen ANOVA tablosu Tablo 4.21’de verilmiştir.

Tablo 4.21: Renk giderimi ANOVA tablosu (Flo30/APN).

Kaynak	Serbestlik derecesi	Düzeltilmiş kareler toplamı	Düzeltilmiş ortalama kareler	F-Değeri	p-Değeri	P<0,05
Model	9	2890,19	321,13	13,38	0,001	Anlamlı
Lineer	3	2229,62	743,21	30,96	0,000	Anlamlı
X ₁	1	886,51	886,51	36,93	0,000	Anlamlı
X ₂	1	1343,05	1343,05	55,94	0,000	Anlamlı
X ₃	1	0,06	0,06	0,00	0,960	-
Kuadratik	3	321,71	107,24	4,47	0,040	Anlamlı
X ₁ ²	1	10,18	10,18	0,42	0,533	-
X ₂ ²	1	298,97	298,97	12,45	0,008	Anlamlı
X ₃ ²	1	1,38	1,38	0,06	0,817	-
İki Faktör Etkileşimli	3	338,86	112,95	4,71	0,035	Anlamlı
X ₁ *X ₂	1	328,75	328,75	13,69	0,006	Anlamlı
X ₁ * X ₃	1	10,08	10,08	0,42	0,535	-
X ₂ * X ₃	1	0,03	0,03	0,00	0,972	-
Toplam	17	3082,24				

X₁-başlangıç pH, X₂-Flo30 dozu (ml/L), X₃-APN (ml/L) olmak üzere; tablodaki değerler incelendiğinde model içinde yer alan parametrelerin büyük çoğunluğunun anlamlı olduğu görülmektedir. Özellikle model, kareler ve iki faktör etkileşimli kısımlarının anlamlı (p<0,05) olması model geçerliliğini artırmaktadır [139]. Başlangıç pH değeri ve Flo30 dozunun renk gideriminde en etkili parametreler olduğu tablodan görülmektedir (p=0,000).

Bağımsız değişkenlerin renk giderim verimi üzerindeki etkisini veren yüzey ve kontür grafikleri Şekil 4.17’de toplu olarak verilmiştir. Her grafikte ayrı ayrı sabit tutulan değerler; APN dozu 20 ml/L, Flo30 dozu 9 ml/L, pH 6,5 için; pH’nın artması, Flo30 ve APN dozundaki artışın AKM’de olduğu gibi renk giderim verimini de arttırdığı anlaşılmaktadır. Buna asılı partiküllerle birlikte renge neden olan bileşenlerin çökelerek sudan ayrılması neden olmaktadır.



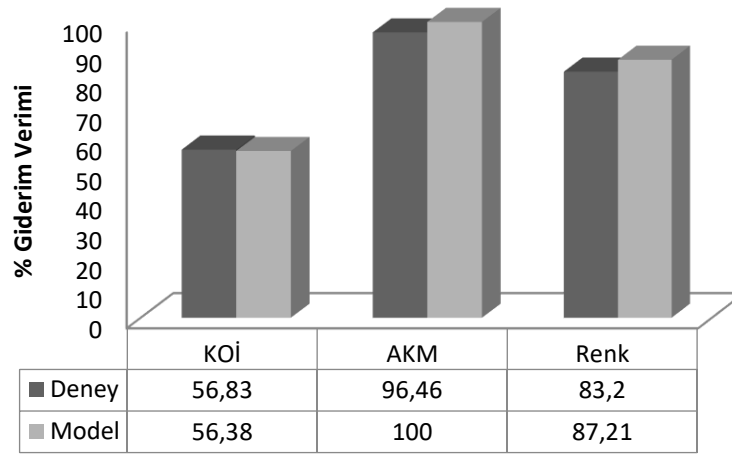
Şekil 4.17: Renk giderimi için yüzey ve kontür grafikleri (Flo30/APN).

Maksimum renk giderimini sağlayan şartlar ise Tablo 4.22’de verilmiştir. Maksimum nokta için deneyler üç tekrarlı yapıp ortalaması alınmıştır. Renk giderimi için elde edilen model ve deneysel sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu görülmektedir.

Tablo 4.22: Maksimum renk giderim şartları (Flo30/APN).

Başlangıç pH (X ₁)	Flo30 Dozu, ml/L (X ₂)	APN, ml/L (X ₃)	Renk Giderim Verimi, % Model	Renk Giderim Verimi, % Deney
9,5	15	40	87,21	83,2±0,66

Flo30-APN ile yapılan koagülasyon ön arıtım çalışmaları sonucunda tasarımdan elde edilen maksimum giderim verimlerinin doğrulama deney sonuçları ile karşılaştırılma grafiği Şekil 4.18’de verilmiştir. Grafikte; maksimum giderim şartlarında modelden elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçların birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu durum model doğruluğu sağlamaktadır.



Şekil 4.18: Maksimum nokta doğrulama deney sonuçlarının model sonuçları ile karşılaştırması (Flo30/APN).

Çalışılan parametre aralıkları için kurulan modelde YYY ile deney yapmadan da (Aynı deney sistemi için geçerli olmak üzere) yanıtın ne olacağını tahmin edilebilmesi tasarımın en büyük avantajlarından. Flo30/APN ile deney tasarımından elde edilen model geçerliliğini test etmek için seçilen parametreler ve aralıklarında yapılan rastgele üç deney sonucu ve bunların model sonuçlarıyla karşılaştırılması Tablo 4.23’te verilmiştir. Model sonuçları ile deney sonuçları arasındaki ilişki model geçerliliğini doğrulamaktadır.

Tablo 4.23: Ön arıtım için yapılan kontrol deney sonuçları (Flo30/APN).

Deney No	pH	Flo30 Dozu, ml/L	APN Dozu, ml/L	KOİ Giderim Verimi, % Deney	KOİ Giderim Verimi, % Model	AKM Giderim Verimi, % Deney	AKM Giderim Verimi, % Model	Renk Giderim Verimi, % Deney	Renk Giderim Verimi, % Model
#1	4	5	15	39,22	37,82	94,37	90,66	75,54	78,74
#2	5,5	8	25	35,30	36,9	93,65	91,21	74,24	74,14
#3	7	11	35	27,25	29,07	94,30	97,23	70,37	75,47

Flo30/APN kimyasal setiyle yapılan deney sonuçlarında çıktı parametreleri deneysel tasarım için ayrı ayrı optimize edilerek verilmiştir. Bu üç parametrenin ayrıca beraber optimizasyonu da yapılmış ve tasarım sonuçları ile doğrulama deney sonuçları Tablo 4.24'te verilmiştir.

Tablo 4.24: YYY'de KOİ, AKM ve renk gideriminin birlikte optimum olduğu şartlar (Flo30/APN).

pH	Flo30 Dozu, ml/L	APN Dozu, ml/L	KOİ Giderim Verimi, % Model	KOİ Giderim Verimi, % Deney	AKM Giderim Verimi, % Model	AKM Giderim Verimi, % Deney	Renk Giderim Verimi, % Model	Renk Giderim Verimi, % Deney
3,5	8	11,70	51,52	50,68±1,35	100	96,36±1	86,43	81,36±1,66

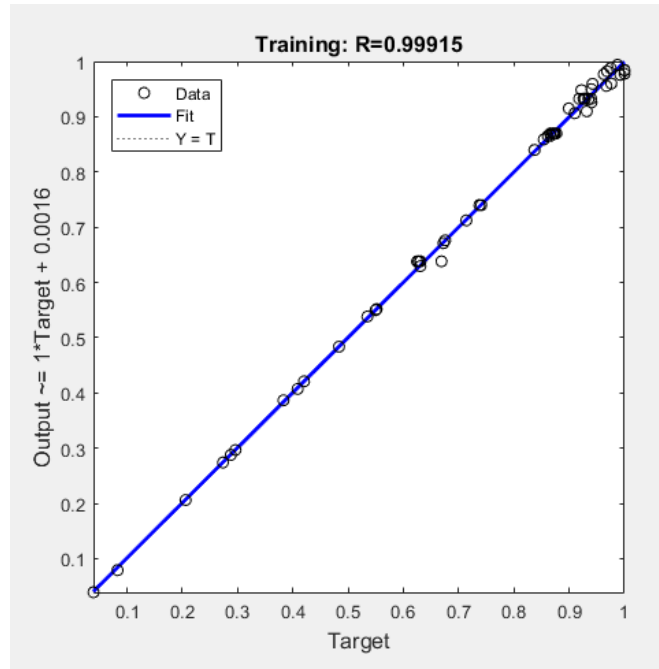
4.1.4 Flo30 veAnyonik Patates Nişastası ile Ön Arıtım Verileri ile YYY ve YSA

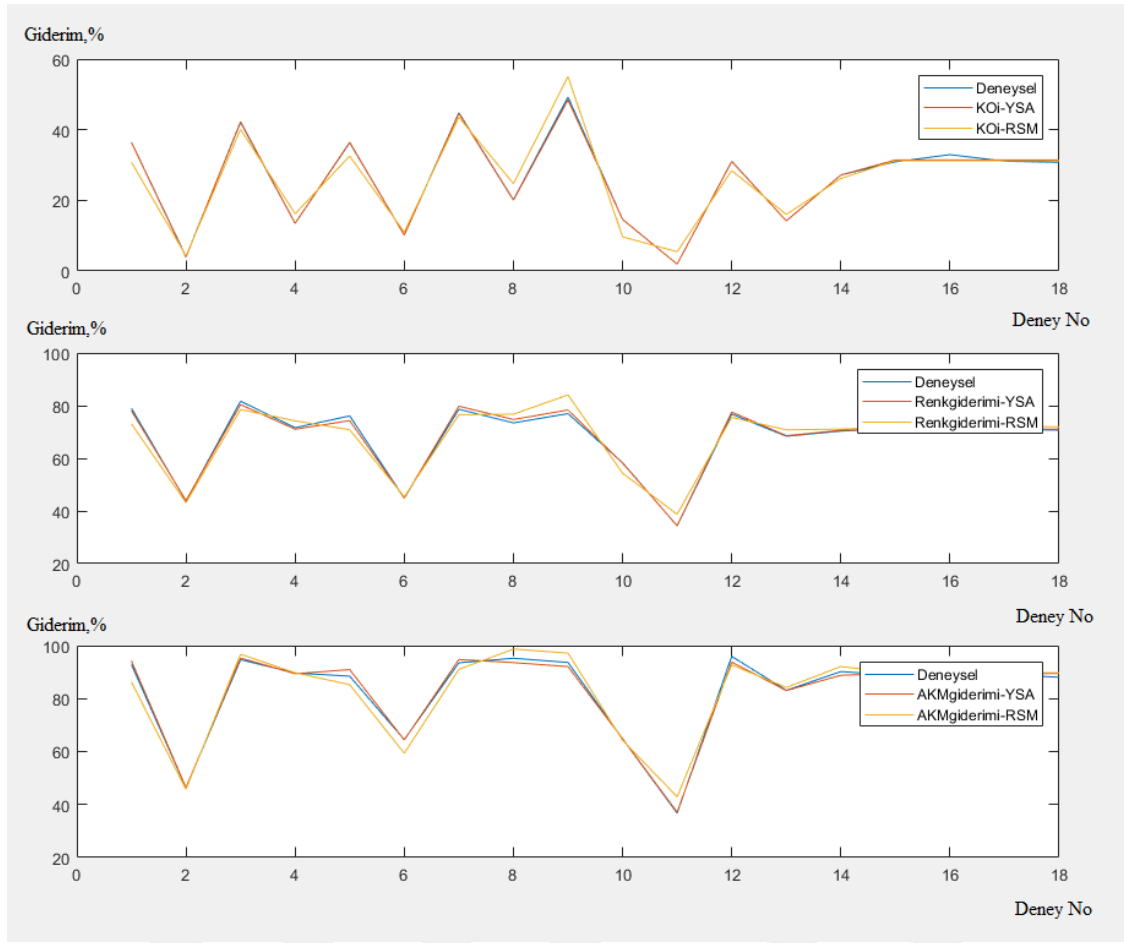
Çıktılarının Karşılaştırılması

YSA ile yapılan modelleme sonucu verilen çıktılar ile bunların deney sonuçları ve YYY çıktılarıyla karşılaştırılması Tablo 4.25'te gösterilmiştir. Şekil 4.19 ve 4.20'de ise regresyon grafiği ve sistem çıktılarının birlikte gösterildiği grafik yer almaktadır. Model eğitimi sonucu sistem R^2 0,99915 değeri model verileri ile deneyler sonuçları arasındaki uyum bu grafikte görülmektedir. YSA yöntemi YYY'den farklı olarak lineer ilişkisi olmayan verilerin modellenmesinde de kullanılmaktadır. YSA verileri arasında parabolik, logaritmik vb. ilişkiler kurmayı sağlamaktadır, bu nedenle oluşturduğu denklemlerin R^2 'leri YYY'dekilerden daha yüksek çıkmaktadır. Ayrıca YSA modellemesi sonucu oluşan değerler de gerçek datalarla daha uyumlu olmaktadır. Tablo 4.26'da YSA ile optimize edilen üç parametre için giderim şartları ve bu şartlarda elde edilen deney sonuçları yer almaktadır.

Tablo 4.25: Deney sonuçlarının YSA ve YYY çıktıları ile karşılaştırılması.

Deney No	KOİ Giderim Verimi,% Deney	YSA Model	YYY Model	Renk Giderim Verimi,% Deney	YSA Model	YYY Model	AKM Giderim Verimi,% Deney	YSA Model	YYY Model
1	36,49	36,44	30,82	79,01	78,06	73,09	92,91	94,24	86,28
2	4,08	3,9	4,28	43,7	43,96	43,14	46,38	46,41	45,74
3	42,06	42,29	40,1	81,68	80,4	78,53	94,71	95,34	96,76
4	13,47	13,49	16,21	71,62	71,05	74,24	89,69	89,4	89,77
5	36,32	36,44	32,52	76,1	74,3	70,84	88,47	90,95	85,27
6	10,14	10,15	11,02	44,9	44,91	45,39	64,52	64,38	59,36
7	44,82	44,64	43,56	78,63	79,79	76,54	93,54	94,78	91,06
8	20,13	20,05	24,71	73,45	74,73	76,74	95,23	93,6	98,7
9	49,25	48,44	55,04	76,97	78,36	84,08	93,65	92,09	97,18
10	14,58	14,6	9,65	58,3	58,17	54,34	64,81	64,87	64,28
11	1,93	1,93	5,46	34,33	34,38	38,75	36,74	37,1	42,92
12	31,06	31	28,42	76,79	77,56	75,55	95,94	93,8	92,74
13	14,17	14,18	16	68,38	68,59	70,82	83,13	83,03	84,2
14	27,16	27,17	26,2	70,35	70,64	71,07	90,21	88,82	92,12
15	30,91	31,43	31,23	71,27	71,04	71,95	88,82	89,46	89,75
16	32,94	31,43	31,23	71,36	71,04	71,95	90,14	89,46	89,75
17	31,08	31,43	31,23	71,05	71,04	71,95	89,07	89,46	89,75
18	30,77	31,43	31,23	70,7	71,04	71,95	88,07	89,46	89,75

**Şekil 4.19:** YSA regresyon grafiği (Flo30/APN).



Şekil 4.20: Deney, YSA ve YYY datalarının uyum grafiği (Flo30/APN).

Tablo 4.26: YSA’da KOİ, AKM ve renk gideriminin birlikte optimum olduğu şartlar (Flo30/APN).

pH	Flo30 Dozu, ml/L	APN Dozu, ml/L	KOİ Giderim Verimi, % Model	KOİ Giderim Verimi, % Deney	AKM Giderim Verimi, % Model	AKM Giderim Verimi, % Deney	Renk Giderim Verimi, % Model	Renk Giderim Verimi, % Deney
3,5	8,01	26,71	49,24	46,81	95,91	91,94	81,67	80,02

4.2 Elektrooksidasyon Prosesi

Elektrooksidasyon ile elektrokimyasal arıtım prosesinde anot malzemesi olarak grafit ve karışık metal oksit elektrotlar, katot malzemesi olarak da her iki anot tipi için paslanmaz çelik elektrot kullanılmıştır. Deney tasarımı, deney sonuçları, elde edilen denklemler, ANOVA tabloları ve maksimum/optimum giderim şartları ve bu şartlardaki deney sonuçlarına ait tablolar ve grafikler sırasıyla grafit anot ve KMO anot için aşağıda verilmiştir.

4.2.1 Grafit Anot ile EO Sonrası Deney Sonuçları

4.2.1.1 KOİ Giderim Sonuçları

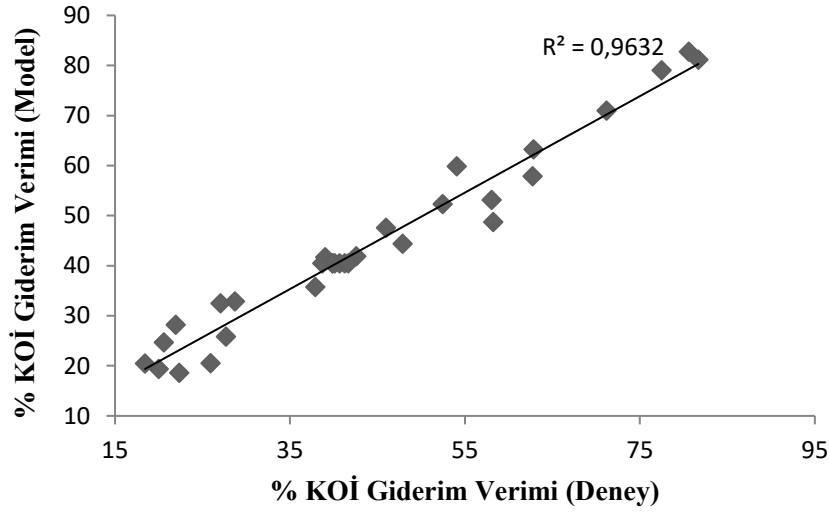
Grafit anot- paslanmaz çelik katot kullanılarak matrikste belirtilen şartlarda yapılan deney sonuçları ve modelin ön gördüğü KOİ giderim verimleri Tablo 4.27’de verilmiştir.

Tablo 4.27: Grafit anot ile EO sonucu KOİ giderim verimleri.

Deney No	Parametreler				KOİ Giderim Verimi,% Deney	KOİ Giderim Verimi,% Model
	Başlangıç pH (X ₁)	Akım,A (X ₂)	Süre,dk (X ₃)	Na ₂ SO ₄ Dozu, g/L (X ₄)		
1	4	2	60	2	22,32	18,65
2	8	2	60	2	18,43	20,51
3	4	5	60	2	54,07	59,90
4	8	5	60	2	62,72	57,86
5	4	2	180	2	27,67	25,88
6	8	2	180	2	21,94	28,20
7	4	5	180	2	80,58	82,74
8	8	5	180	2	81,68	81,16
9	4	2	60	4	28,70	32,89
10	8	2	60	4	25,93	20,55
11	4	5	60	4	58,23	48,74
12	8	5	60	4	27,05	32,51
13	4	2	180	4	45,97	47,61
14	8	2	180	4	37,89	35,73
15	4	5	180	4	77,48	79,06
16	8	5	180	4	62,84	63,28
17	3	3,5	120	3	52,44	52,33
18	9	3,5	120	3	42,57	41,89
19	6	1,25	120	3	19,98	19,40
20	6	5,75	120	3	71,20	71,00
21	6	3,5	30	3	20,59	24,67
22	6	3,5	210	3	58,04	53,17
23	6	3,5	120	1,5	47,87	44,40
24	6	3,5	120	4,5	39,00	41,68
25	6	3,5	120	3	38,67	40,50
26	6	3,5	120	3	40,12	40,50
27	6	3,5	120	3	39,85	40,50
28	6	3,5	120	3	41,25	40,50
29	6	3,5	120	3	40,65	40,50
30	6	3,5	120	3	39,87	40,50
31	6	3,5	120	3	41,67	40,50

Grafit anot- paslanmaz çelik katot kullanılarak yapılan elektrooksidasyon çalışmalarında KOİ giderim verimleri %18 ve %81 arasında değişmektedir. En düşük giderim verimi akımın ve işletim süresinin minimum olduğu noktada elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar ile

modelin verdiği sonuçlar arasındaki ilişki Şekil 4.21’de verilmektedir. Grafikten görüldüğü üzere, veriler arasında başarılı bir uyum bulunmaktadır.



Şekil 4.21: Deney ve model KOİ giderim verilerinin korelasyon grafiği (Grafite anot)

DeneySEL sonuçlardan elde edilen %KOİ giderim verimine ait model eşitliği, Denklem 4.7’de görüldüğü gibidir. Bu modele ait korelasyon katsayıları deney ve model için sırasıyla $R^2=0,9632$, $R^2_{adj}= 0,9310$ olarak tespit edilmiştir.

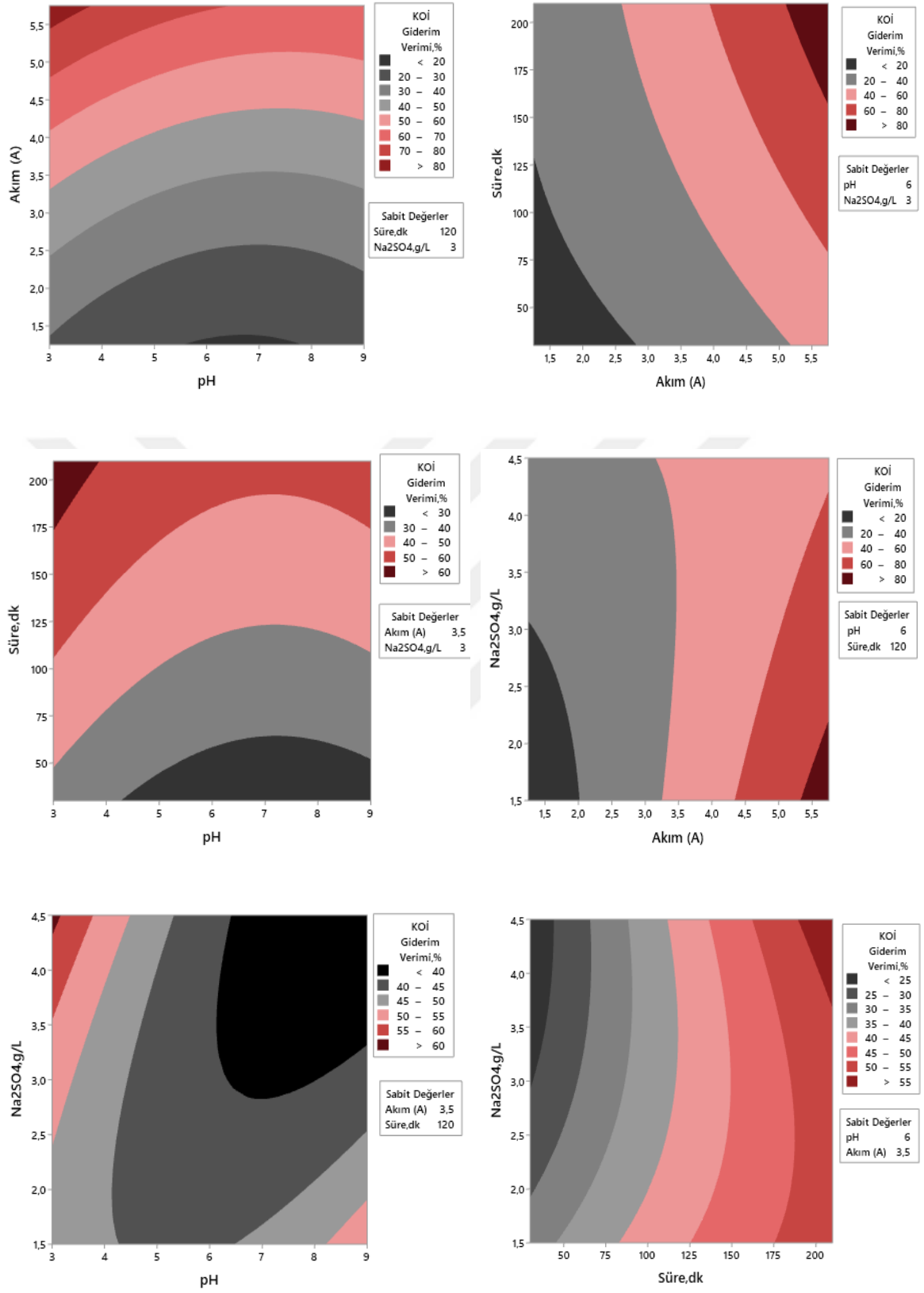
$$\begin{aligned} \%KOİ \text{ Giderim Verimi} = & -13,4 - 4,21 * X_1 + 14,41 * X_2 - 0,046 * X_3 + 14,03 * X_4 + 0,735 * X_1^2 \\ & + 0,929 * X_2^2 - 0,000195 * X_3^2 + 1,13 * X_4^2 - 0,325 * X_1 * X_2 + 0,00096 * X_1 * X_3 - 1,775 * X_1 * X_4 \\ & + 0,0433 * X_2 * X_3 - 4,233 * X_2 * X_4 + 0,0312 * X_3 * X_4 \end{aligned} \quad (4.7)$$

Elde edilen veriler programa girildikten sonra sistem tarafından verilen ANOVA analiz sonuçları da Tablo 4.28’de verilmiştir.

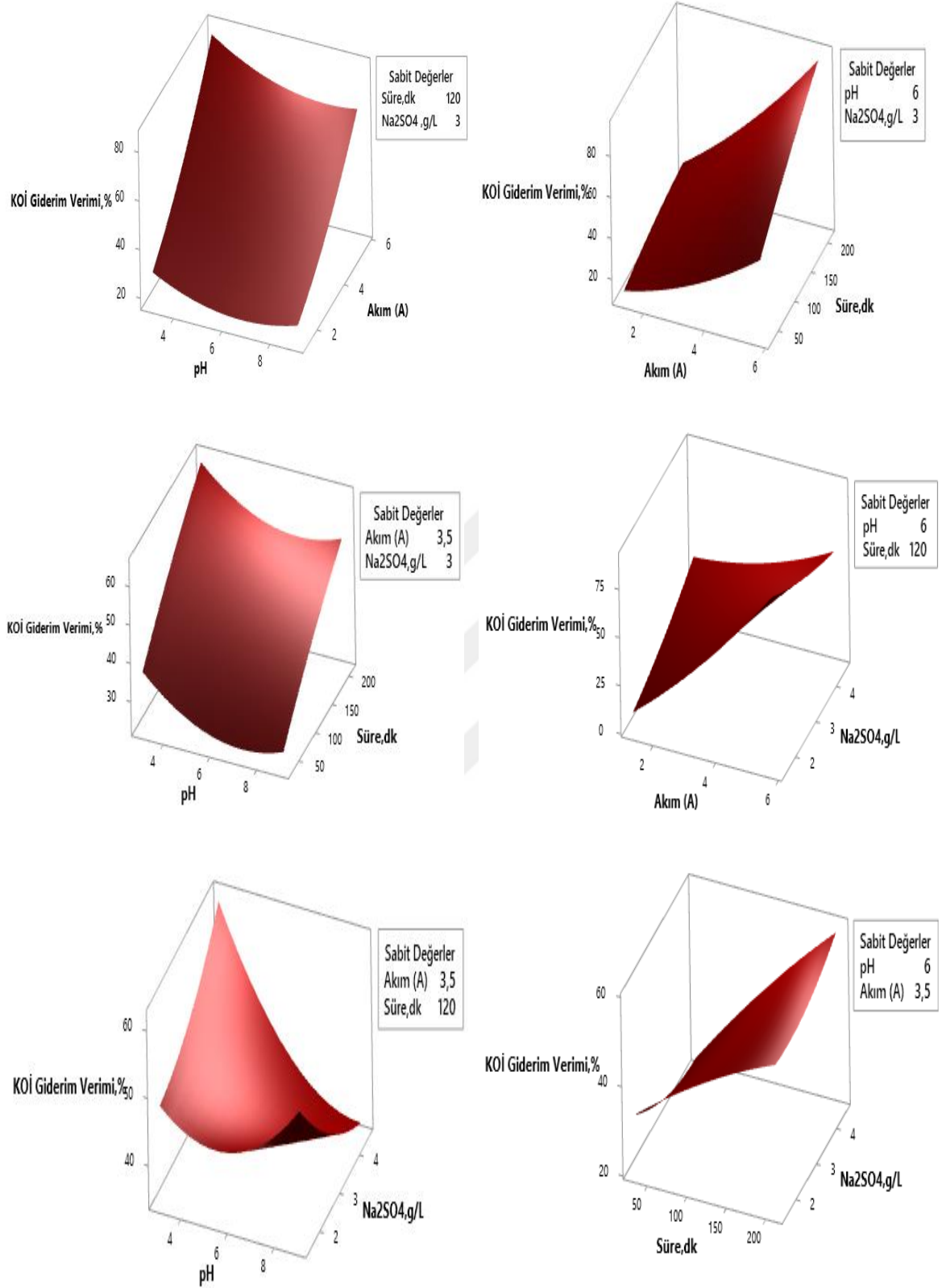
Tablo 4.28: Grafit anot ile EO sonucu KOİ giderimi için ANOVA tablosu.

Kaynak	Serbestlik derecesi	Düzeltilmiş kareler toplamı	Düzeltilmiş ortalama kareler	F-Değeri	p-Değeri	P<0,05
Model	14	9565,68	683,26	29,89	0,000	Anlamlı
Lineer	4	8181,64	2045,41	89,49	0,000	Anlamlı
X ₁	1	248,25	248,25	10,86	0,005	Anlamlı
X ₂	1	6065,57	6065,57	265,38	0,000	Anlamlı
X ₃	1	1850,91	1850,91	80,98	0,000	Anlamlı
X ₄	1	16,90	16,90	0,74	0,403	-
Kuadratik	4	222,48	55,62	2,43	0,090	-
X ₁ ²	1	99,76	99,76	4,36	0,053	-
X ₂ ²	1	50,41	50,41	2,21	0,157	-
X ₃ ²	1	5,66	5,66	0,25	0,625	-
X ₄ ²	1	14,76	14,76	0,65	0,433	-
İki Faktör Etkileşimli	6	1161,56	193,59	8,47	0,000	Anlamlı
X ₁ *X ₂	1	15,20	15,20	0,67	0,427	-
X ₁ * X ₃	1	0,21	0,21	0,01	0,925	-
X ₁ * X ₄	1	201,62	201,62	8,82	0,009	Anlamlı
X ₂ * X ₃	1	243,53	243,53	10,66	0,005	Anlamlı
X ₂ * X ₄	1	644,98	644,98	28,22	0,000	Anlamlı
X ₃ * X ₄	1	56,01	56,01	2,45	0,137	-
Toplam	30	9931,38				

X₁-başlangıç pH'sı, X₂-Akım (A), X₃-Süre (dk), X₄-Na₂SO₄ dozu (g/L) olmak üzere; tablodaki değerler incelendiğinde model içinde lineer kısımda bulunan tüm parametrelerin anlamlı olduğu, kuadratik kısımda yer alan parametrelerin ise anlamlı olmadığı görülmektedir. Arıtım üzerinde tek başına en anlamlı etkiye sahip olan parametreler ise akım ve süre olarak görülmektedir (p=0,000). Aynı şekilde akım ve elektrolit dozu etkisinin birlikte (X₂* X₄ ,p=0,000) oldukça anlamlı olduğu görülmektedir. Bu akım değerinin değişmesi ile oksidatif ara ürün oluşumunun tetiklenmesi ile açıklanabilir. Bağımsız değişkenlerin KOİ giderim verimi üzerindeki etkisini veren kontür grafikleri Şekil 4.22'de, yüzey grafikleri ise Şekil 4.23'te toplu olarak verilmiştir.



Şekil 4.22: Grafit anot ile KOİ giderimi için oluşturulan kontür grafikleri.



Şekil 4.23: Grafit anot ile KOİ giderimi için oluşturulan yüzey grafikleri.

Her grafikte ayrı ayrı sabit tutulan değerler; pH 6, akım 3,5 A, süre 120 dk, Na₂SO₄ dozu 3 g/L için; pH'nın artması KOİ giderim verimini bir noktaya kadar artırırken, akım ve süredeki artış KOİ giderim verimini de arttırmıştır. Elektrolit dozundaki artış belli bir noktadan sonra giderim verimi olumsuz etkilemiştir. Sülfat iyonları suda bulunan diğer iyonların çökmesine neden olarak elektrotların yüzeyinde geçirimsiz bir tabaka oluşturabilmektedir. Oluşan bu tabaka elektrotlararası potansiyeli oldukça artırarak, akım veriminde düşürebilmektedir. Düşen akım verimi giderim verimini de olumsuz etkilemektedir.

EO işleminin giderim verimliliği atıksu başlangıç pH'sı ile birlikte EO sırasında ki pH değişime de bağlıdır. pH değişimi ise organik bileşiklerin farklı pH'lardaki parçalanması sırasındaki reaksiyonlar sonucudur [148]. Ayrıca EO verimini etkileyen hidroksil radikallerinin oluşumunda pH birinci dereceden etkilidir. Çalışmamızda pH düşme eğilimdedir. Maksimum giderimin pH 5-6 civarında gerçekleşmesi bu durum ile açıklanabilir. Uygulanan akımın ve reaksiyon süresinin artması ile giderim verimindeki artış Faraday yasasına göre açıklanabilir. Buna göre katalizör ürünlerin oluşumu süre ve akım şiddetinin artması ile artmaktadır. Bu katalizör ürünlerin başında; elektrolit olarak sodyum sülfat tuzunun kullanımından kaynaklanan sülfat radikalleri (SO₄[•]) gelmektedir. Bu radikaller redoks potansiyelleri çok güçlü (2,5-3,1 V) oksidantlardır (OH[•] radikalleri gibi). Bu radikaller pH 1–11 arasında, geniş bir aralıkta birçok organik maddenin oksitlenmesi için kullanılabilir.

Maksimum KOİ giderimini sağlayan şartlar ise Tablo 4.29'da verilmiştir. Maksimum nokta için deneyler üç tekrarlı yapıp ortalaması alınmıştır. Tablodan akım değerinin ve sürenin maksimum olduğu şartlar için giderim veriminin maksimum olduğu görülmektedir. Ayrıca ön arıtım uygulaması ile KOİ ve AKM'nin bir kısmının giderilmesi sayesinde elektrooksidasyon prosesinde daha yüksek verimlere ulaşılabilir.

Tablo 4.29: Grafit anot ile EO sonucu maksimum KOİ giderim şartları.

Başlangıç pH (X ₁)	Akım,A (X ₂)	Süre,dk (X ₃)	Na ₂ SO ₄ Dozu, g/L (X ₄)	KOİ Giderim Verimi,% Model	KOİ Giderim Verimi,% Deney
5,94	5,75	210	1,5	100	90,41±1,27

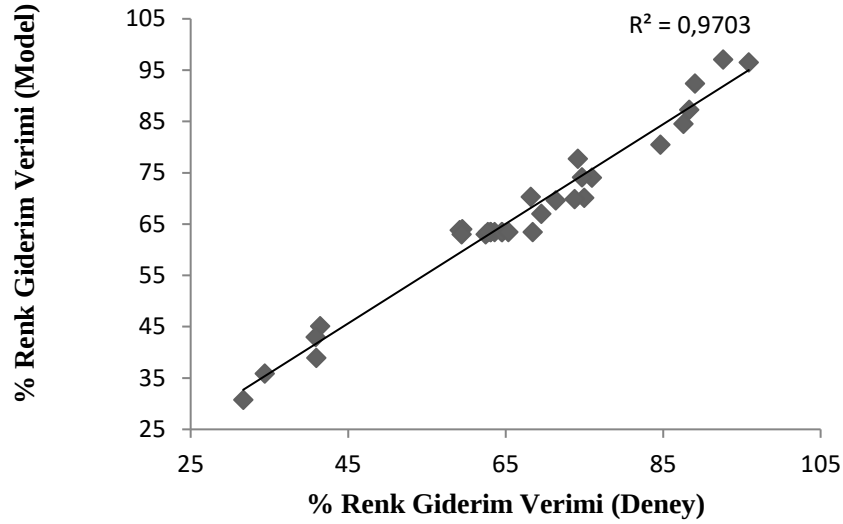
4.2.1.2 Renk Giderim Sonuçları

Grafit anot- paslanmaz çelik katot kullanılarak matrikste belirtilen şartlarda yapılan deney sonuçları ve modelin ön gördüğü renk giderim verimleri Tablo 4.30’da verilmiştir.

Tablo 4.30: Grafit anot ile EO sonucu renk giderim verimleri.

Deney No	Parametreler				Renk Giderim Verimi,% Deney	Renk Giderim Verimi,% Model
	Başlangıç pH (X ₁)	Akım,A (X ₂)	Süre,dk (X ₃)	Na ₂ SO ₄ Dozu, g/L (X ₄)		
1	4	2	60	2	74,17	77,69
2	8	2	60	2	68,41	63,44
3	4	5	60	2	84,64	80,48
4	8	5	60	2	59,50	64,02
5	4	2	180	2	75,95	74,02
6	8	2	180	2	69,52	67,01
7	4	5	180	2	95,88	96,47
8	8	5	180	2	88,30	87,25
9	4	2	60	4	62,45	62,99
10	8	2	60	4	31,67	30,72
11	4	5	60	4	68,17	70,31
12	8	5	60	4	34,41	35,83
13	4	2	180	4	74,97	70,08
14	8	2	180	4	41,42	45,06
15	4	5	180	4	92,61	97,07
16	8	5	180	4	73,74	69,85
17	3	3,5	120	3	74,68	74,11
18	9	3,5	120	3	40,86	42,99
19	6	1,25	120	3	59,17	63,81
20	6	5,75	120	3	87,57	84,49
21	6	3,5	30	3	71,36	69,59
22	6	3,5	210	3	89,02	92,35
23	6	3,5	120	1,5	59,41	63,01
24	6	3,5	120	4,5	40,95	38,92
25	6	3,5	120	3	64,53	63,45
26	6	3,5	120	3	63,05	63,45
27	6	3,5	120	3	63,58	63,45
28	6	3,5	120	3	63,12	63,45
29	6	3,5	120	3	62,75	63,45
30	6	3,5	120	3	64,51	63,45
31	6	3,5	120	3	65,32	63,45

Grafit anot- paslanmaz çelik katot kullanılarak yapılan EO çalışmalarında renk giderim verimleri %31 ve %92 arasında değişmektedir. Deneysel sonuçlar ile modelin verdiği sonuçlar arasındaki ilişki Şekil 4.24’te verilmektedir. Grafikten görüldüğü üzere, veriler arasında başarılı bir uyum bulunmaktadır.



Şekil 4.24: Deney ve model renk giderim verilerinin korelasyon grafiği (Grafite anot).

Deney sonuçlarından elde edilen %Renk giderim verimine ait model eşitliği, Denklem 4.8’de görüldüğü gibidir. Bu modele ait korelasyon katsayıları deney ve model için sırasıyla $R^2=0,9703$, $R^2_{adj}= 0,9443$ olarak tespit edilmiştir.

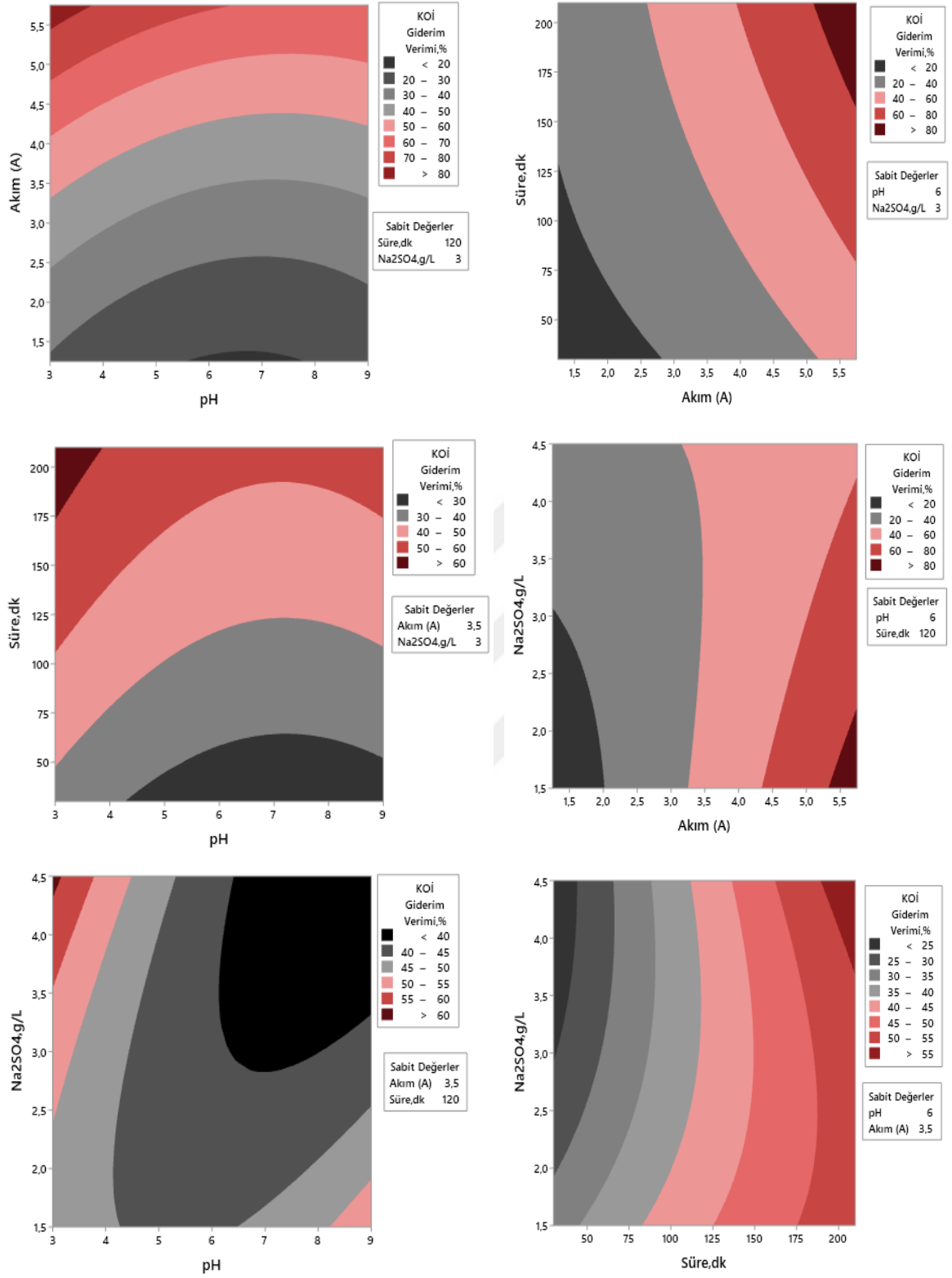
$$\begin{aligned} \% \text{Renk Giderim Verimi} = & 88,5 + 6,93 \cdot X_1 - 17,93 \cdot X_2 - 0,809 \cdot X_3 + 30,74 \cdot X_4 - 0,544 \cdot X_1^2 \\ & + 2,115 \cdot X_2^2 + 0,002163 \cdot X_3^2 - 5,55 \cdot X_4^2 - 0,184 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,01511 \cdot X_1 \cdot X_3 - 2,252 \cdot X_1 \cdot X_4 \\ & + 0,0546 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,757 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,0449 \cdot X_3 \cdot X_4 \end{aligned} \quad (4.8)$$

Elde edilen veriler programa girildikten sonra sistem tarafından verilen regresyon analizlerinin sonuçları da Tablo 4.31’de verilmiştir. X_1 -başlangıç pH’sı, X_2 -Akım (A), X_3 -Süre (dk), X_4 - Na_2SO_4 dozu (g/L) olmak üzere; tablodaki değerler incelendiğinde model içinde lineer kısımda bulunan tüm parametrelerin ve kuadratik kısımda pH dışındaki tüm parametrelerin anlamlı olduğu görülmektedir. Ayrıca başlangıç pH’sı, akım, süre, Na_2SO_4 dozu’nun lineer etkilerinin yüksek derecede anlamlı olduğu görülmektedir ($p=0,000$). Az sayıdaki anlamsız parametrenin çoğunun iki faktör etkileşimli olduğu belirlenmiştir.

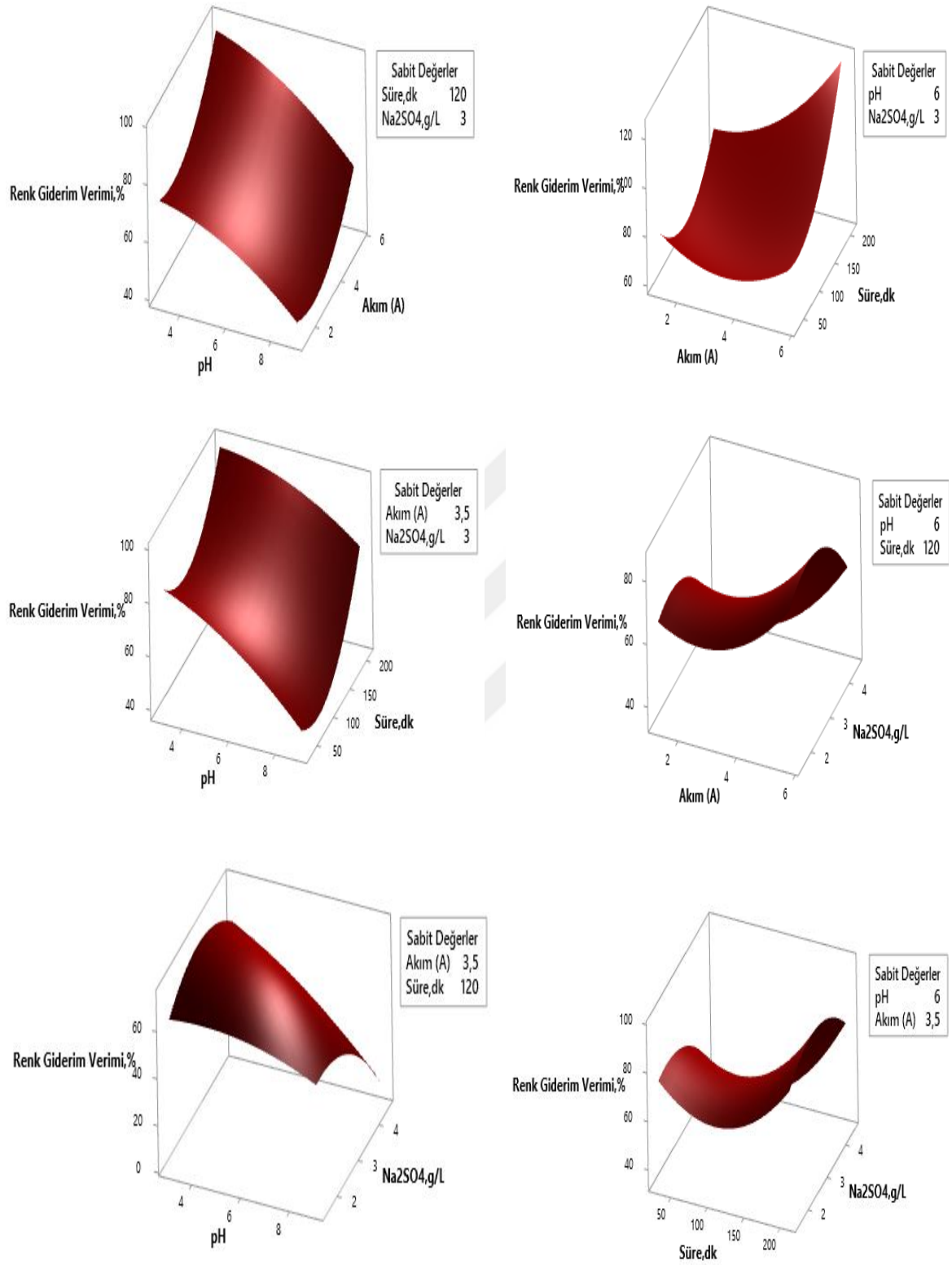
Tablo 4.31: Grafit anot ile EO sonucu renk giderimi için ANOVA tablosu.

Kaynak	Serbestlik derecesi	Düzeltilmiş kareler toplamı	Düzeltilmiş ortalama kareler	F-Değeri	p-Değeri	P<0,05
Model	14	7844,37	560,31	37,34	0,000	Anlamlı
Lineer	4	5679,24	1419,81	94,63	0,000	Anlamlı
X ₁	1	2205,00	2205,00	146,96	0,000	Anlamlı
X ₂	1	973,74	973,74	64,90	0,000	Anlamlı
X ₃	1	1179,02	1179,02	78,58	0,000	Anlamlı
X ₄	1	1321,48	1321,48	88,08	0,000	Anlamlı
Kuadratik	4	1259,74	314,94	20,99	0,000	Anlamlı
X ₁ ²	1	54,64	54,64	3,64	0,074	-
X ₂ ²	1	261,26	261,26	17,41	0,001	Anlamlı
X ₃ ²	1	700,12	700,12	46,66	0,000	Anlamlı
X ₄ ²	1	355,30	355,30	23,68	0,000	Anlamlı
İki Faktör Etkileşimli	6	905,39	150,90	10,06	0,000	Anlamlı
X ₁ *X ₂	1	4,88	4,88	0,33	0,577	-
X ₁ * X ₃	1	52,60	52,60	3,51	0,080	-
X ₁ * X ₄	1	324,56	324,56	21,63	0,000	Anlamlı
X ₂ * X ₃	1	386,66	386,66	25,77	0,000	Anlamlı
X ₂ * X ₄	1	20,62	20,62	1,37	0,258	-
X ₃ * X ₄	1	116,07	116,07	7,74	0,013	-
Toplam	30	8084,43				

Bağımsız değişkenlerin renk giderim verimi üzerindeki etkisini veren kontür grafikleri Şekil 4.25'te, yüzey grafikleri ise Şekil 4.26'da toplu olarak verilmiştir. Her grafikte ayrı ayrı sabit tutulan değerler; pH 6, akım 3,5 A, süre 120 dk, Na₂SO₄ dozu 3 g/L için; pH'nın artması renk giderim verimini olumsuz etkilemektedir, akım ve süredeki artış ise KOİ giderim veriminde olduğu gibi renk giderim verimini de arttırmıştır. Elektrolit dozundaki artış ise giderim verimini bir noktaya kadar arttırdığı grafiklerden anlaşılmaktadır. Fizikokimyasal yöntemlerde endüstriyel atık sulara asit kraking işlemi uygulanabilmektedir. Düşük pH'larda renk giderim veriminin yüksek olması aslında EO prosesine ek olarak asit kraking işleminin de renk giderim verimini arttırdığını düşündürmektedir.



Şekil 4.25: Grafit anot ile renk giderimi için oluşturulan kontür grafikleri.



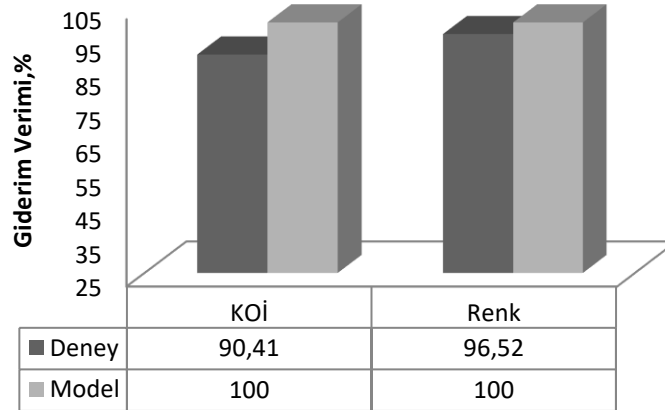
Şekil 4.26: Grafit anot ile renk giderimi için oluşturulan yüzey grafikleri.

Maksimum renk giderimini sağlayan şartlar ise Tablo 4.32’de verilmiştir. Maksimum nokta için deneyler üç tekrarlı yapıp ortalaması alınmıştır. Renk giderimi neredeyse %100’e yakın olarak sağlandığı sonuçlardan anlaşılmaktadır.

Tablo 4.32: Grafit anot ile EO sonucu maksimum renk giderim şartları.

Başlangıç pH (X ₁)	Akım, A (X ₂)	Süre, dk (X ₃)	Na ₂ SO ₄ Dozu, g/L (X ₄)	Renk Giderim Verimi, % Model	Renk Giderim Verimi, % Deney
3	5,75	210	3,4	100	96,52±0,75

Grafit anot kullanılarak yapılan EO çalışmaları sonucunda ayrı ayrı optimize edilen maksimum KOİ ve renk giderim verimlerinin karşılaştırılma grafiği Şekil 4.27’de verilmiştir. Belirlenen şartlar için giderim verimlerinin modelden elde edilen değerlerle yakın olduğu görülmekte ve modellerin belirlenen güven aralığındaki geçerliliği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.27: Maksimum nokta doğrulama deney sonuçlarının model sonuçları ile karşılaştırması (Grafit anot).

Bu şartlarda elde edilen modellerin tek bir nokta ile doğruluğunu kontrol etmek yeterli değildir bu nedenle modellerin belirlenen parametrelerin seçilen aralıkları içinde geçerliliğini test etmek amacıyla; tasarımda belirlenen parametrelerin rastgele seçilen şartlarındaki kontrol deney sonuçları ise Tablo 4.33’te verilmiştir. Veriler arasında başarılı bir uyum olduğu görülmektedir.

Tablo 4.33: Grafit anot ile EO prosesi için yapılan kontrol deney sonuçları.

Deney No	Başlangıç pH	Akım,A	Süre,dk	Na ₂ SO ₄ Dozu, g/L	KOİ Giderim Verimi,% Deney	KOİ Giderim Verimi,% Model	Renk Giderim Verimi,% Deney	Renk Giderim Verimi,% Model
#1	3,5	4	100	2,5	55,36	52,01	76,41	74,75
#2	5,5	3	150	3,5	42,25	41,61	68,12	64,49
#3	7,5	5	180	2,5	78,93	75,10	90,25	89,80

Optimizasyonda parametrelerin birlikte minimize, optimize ve maksimize edilebildiği bilinmektedir. Çıktı parametrelerimiz KOİ ve renk giderim veriminin beraber optimize edildiği şartlar, optimum giderim model sonuçları ve deney sonuçları Tablo 4.34'te verilmiştir. Modelden elde edilen maksimum ile deneysel sonuçların örtüştüğü görülmektedir.

Tablo 4.34: YYY'de KOİ ve renk gideriminin birlikte optimum olduğu şartlar (Grafit anot).

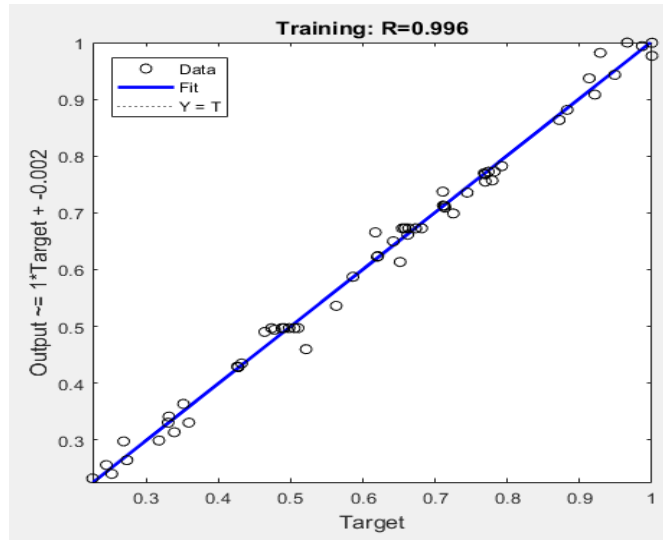
Başlangıç pH (X ₁)	Akım,A (X ₂)	Süre,dk (X ₃)	Na ₂ SO ₄ Dozu, g/L (X ₄)	KOİ Giderim Verimi,% Model	KOİ Giderim Verimi,% Deney	Renk Giderim Verimi,% Model	Renk Giderim Verimi,% Deney
3	5,75	210	2,30	100	88,56±1,33	100	97,81±1,89

4.2.2 Grafit Anot ile EO Arıtım Verileri ile YYY ve YSA Çıktılarının Karşılaştırılması

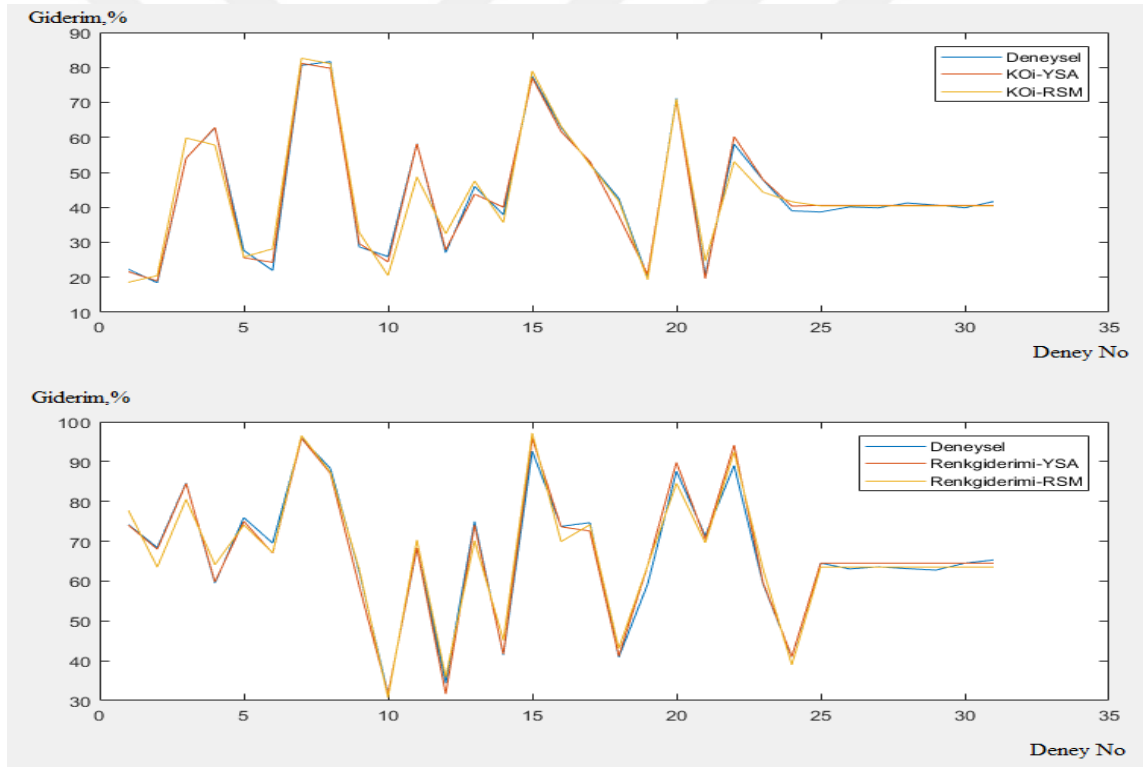
YSA kullanılarak deney sonuçlarının modellenmesi yapılmış ve YYY ile karşılaştırılması Tablo 4.35'te verilmiştir. Şekil 4.28 ve 4.29'da sistemin eğitilmesi ile elde edilen çıktılar ve bunların YYY model sonuçları ve deneysel sonuçlar karşılaştırılması görülmektedir. YSA ile iki parametrenin (KOİ ve renk giderim verimi) birlikte optimize edildiği şartlar için model ve deneysel çıktılar Tablo 4.36'da verilmiştir. Optimum noktadan elde edilen model sonuçları ile deney sonuçlarının birbirine yakın çıktığı görülmektedir.

Tablo 4.35: Deney sonuçlarının YSA ve YYY çıktıları ile karşılaştırılması.

Deney No	KOİ Giderim Verimi, % Deneysel	YSA Model	YYY Model	Renk Giderim Verimi, % Deneysel	YSA Model	YYY Model
1	22,32	21,58	18,61	74,17	74,06	77,74
2	18,43	18,96	20,48	68,41	67,99	63,49
3	54,07	54,02	59,84	84,64	84,5	80,53
4	62,72	62,86	57,81	59,5	59,81	64,07
5	27,67	25,6	25,81	75,95	75	74,09
6	21,94	24,28	28,14	69,52	67	67,09
7	80,58	81,16	82,64	95,88	95,83	96,53
8	81,68	79,75	81,07	88,3	87,08	87,33
9	28,7	29,67	32,84	62,45	58,8	63,02
10	25,93	24,41	20,51	31,67	31,67	30,75
11	58,23	58,16	48,68	68,17	68,34	70,35
12	27,05	27,85	32,45	34,41	31,67	35,88
13	45,97	43,79	47,53	74,97	74,07	70,15
14	37,89	40,03	35,66	41,42	41,67	45,13
15	77,48	77,02	78,96	92,61	95,86	97,13
16	62,84	61,66	63,19	73,74	73,62	69,91
17	52,44	53,07	52,26	74,68	72,57	74,16
18	42,57	37,55	41,83	40,86	41,15	43,06
19	19,98	20,88	19,35	59,17	63,8	63,88
20	71,2	70,53	70,92	87,57	89,83	84,55
21	20,59	19,61	24,62	71,36	70,52	69,63
22	58,04	60,22	53,08	89,02	94,13	92,42
23	47,87	47,97	44,34	59,41	59,69	63,07
24	39	40,35	41,61	40,95	41,03	38,97
25	38,67	40,58	40,43	64,53	64,49	63,51
26	40,12	40,58	40,43	63,05	64,49	63,51
27	39,85	40,58	40,43	63,58	64,49	63,51
28	41,25	40,58	40,43	63,12	64,49	63,51
29	40,65	40,58	40,43	62,75	64,49	63,51
30	39,87	40,58	40,43	64,51	64,49	63,51
31	41,67	40,58	40,43	65,32	64,49	63,51



Şekil 4.28: YSA regresyon grafiği (Grafite anot).



Şekil 4.29: Deney, YSA ve RSM verilerinin uyum grafiği (Grafite anot).

Tablo 4.36: YSA’da KOİ ve renk gideriminin birlikte optimum olduğu şartlar (Grafite anot).

Başlangıç pH (X ₁)	Akım, A (X ₂)	Süre, dk (X ₃)	Na ₂ SO ₄ Dozu, g/L (X ₄)	KOİ Giderim Verimi, % Model	KOİ Giderim Verimi, % Deney	Renk Giderim Verimi, % Model	Renk Giderim Verimi, % Deney
3	5,75	210	1,50	81,48	79,55	95,87	96,54

4.2.3 Karışık Metal Oksit (KMO) Anot ile EO Sonrası Deney Sonuçları

4.2.3.1 KOİ Giderim Sonuçları

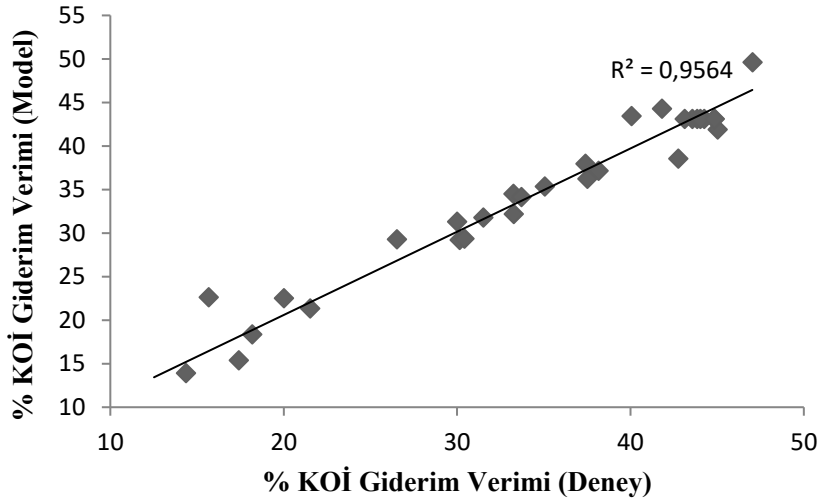
KMO anot- paslanmaz çelik katot kullanılarak matrikste belirtilen şartlarda yapılan deney sonuçları ve modelin ön gördüğü KOİ giderim verimleri Tablo 4.37’de verilmiştir.

Tablo 4.37: KMO anot ile EO sonucu KOİ giderim verimleri.

Deney No	Parametreler				KOİ Giderim Verimi,% Deney	KOİ Giderim Verimi,% Model
	Başlangıç pH (X ₁)	Akım,A (X ₂)	Süre,dk (X ₃)	Na ₂ SO ₄ Dozu, g/L (X ₄)		
1	4	2	60	2	12,52	9,31
2	8	2	60	2	21,52	21,37
3	4	5	60	2	26,52	29,29
4	8	5	60	2	30,15	29,22
5	4	2	180	2	17,40	15,41
6	8	2	180	2	30,42	29,36
7	4	5	180	2	35,06	35,35
8	8	5	180	2	38,15	37,16
9	4	2	60	4	14,35	13,91
10	8	2	60	4	33,26	32,21
11	4	5	60	4	31,51	31,81
12	8	5	60	4	37,40	37,97
13	4	2	180	4	18,19	18,37
14	8	2	180	4	42,76	38,56
15	4	5	180	4	37,51	36,23
16	8	5	180	4	41,82	44,28
17	3	3,5	120	3	33,25	34,53
18	9	3,5	120	3	47,03	49,62
19	6	1,25	120	3	15,67	22,64
20	6	5,75	120	3	45,02	41,92
21	6	3,5	30	3	33,70	34,16
22	6	3,5	210	3	40,05	43,46
23	6	3,5	120	1,5	20,00	22,54
24	6	3,5	120	4,5	30,00	31,33
25	6	3,5	120	3	44,82	43,10
26	6	3,5	120	3	44,25	43,10
27	6	3,5	120	3	43,56	43,10
28	6	3,5	120	3	43,85	43,10
29	6	3,5	120	3	43,12	43,10
30	6	3,5	120	3	44,02	43,10
31	6	3,5	120	3	44,85	43,10

KMO anot- paslanmaz çelik katot kullanılarak yapılan elektrooksidasyon çalışmalarında KOİ giderim verimleri %12,5 ve %47 arasında değişmektedir. En düşük arıtım veriminin olduğu durum, grafit elektrottaki gibi akımın ve sürenin en düşük olduğu şartlarda

oluşturmuştur. Deneysel sonuçlar ile modelin verdiği sonuçlar arasındaki ilişki Şekil 4.30’da verilmektedir. Grafikten görüldüğü üzere, veriler arasında başarılı bir uyum bulunmaktadır.



Şekil 4.30: Deney ve model KOİ giderim verilerinin korelasyon grafiği (KMO anot).

Deneysel sonuçlardan elde edilen %KOİ giderim verimine ait model eşitliği, Denklem 4.9’da görüldüğü gibidir. Bu modele ait korelasyon katsayıları deney ve model için sırasıyla **R²=0,9564, R²adj= 0,9182** olarak tespit edilmiştir.

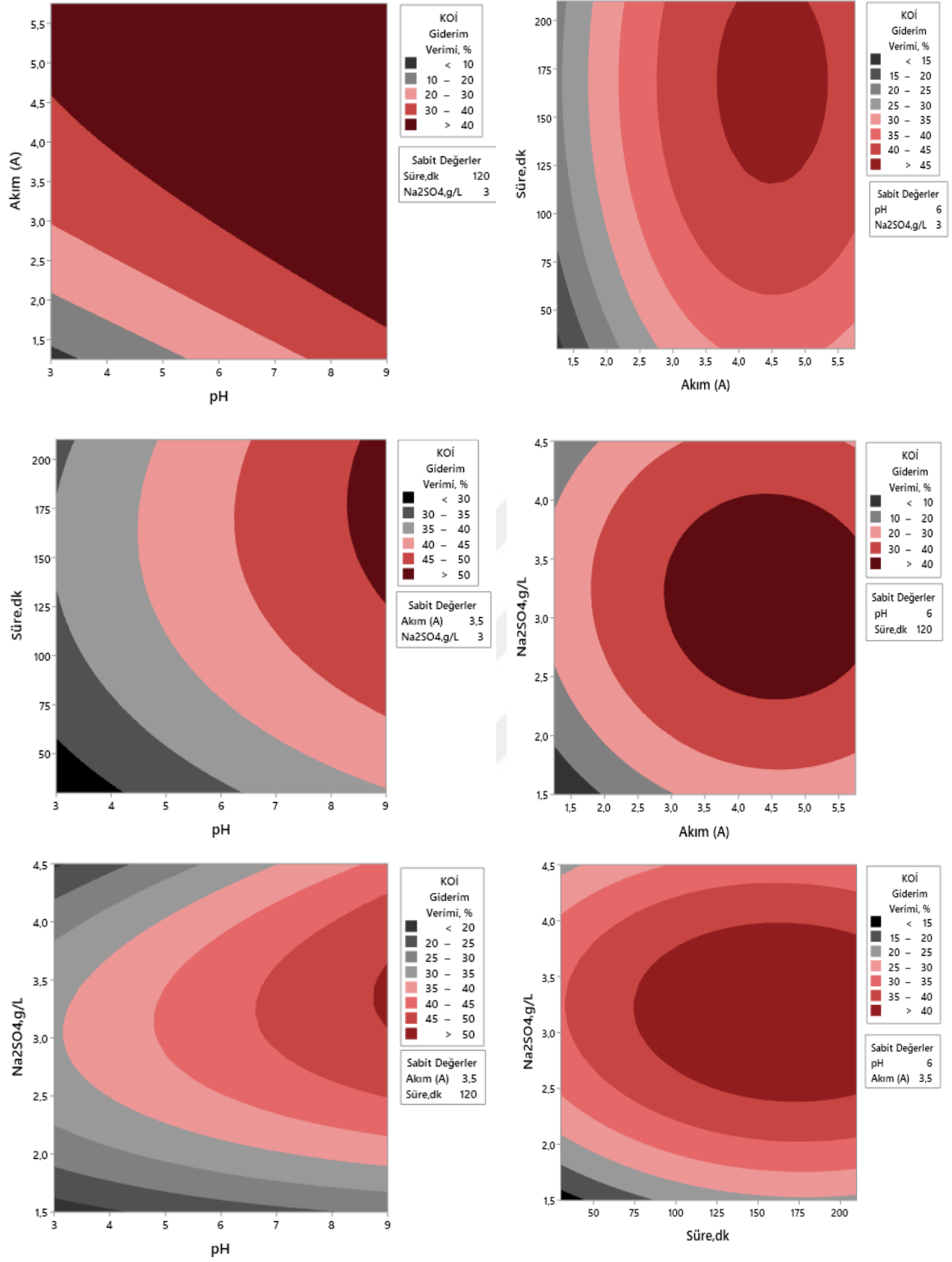
$$\begin{aligned} \text{\%KOİ Giderim Verimi} = & -115,1 + 4,62 \cdot X_1 + 26,38 \cdot X_2 + 0,1762 \cdot X_3 + 43,41 \cdot X_4 - \\ & 0,114 \cdot X_1^2 - 2,138 \cdot X_2^2 - 0,000530 \cdot X_3^2 - 7,187 \cdot X_4^2 - 1,012 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,00393 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,780 \\ & \cdot X_1 \cdot X_4 - 0,00012 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,347 \cdot X_2 \cdot X_4 - 0,0068 \cdot X_3 \cdot X_4 \end{aligned} \quad (4.9)$$

Elde edilen veriler ile oluşturulan full kuadratik modelleme sonucu ANOVA tablosu Tablo 4.38’de verilmiştir. X₁-başlangıç pH’sı, X₂-Akım (A), X₃-Süre (dk), X₄ -Na₂SO₄ dozu (g/L) olmak üzere; tablodaki değerler incelendiğinde model içinde lineer kısımda bulunan tüm parametrelerin ve kuadratik kısımda pH dışındaki tüm parametrelerin anlamlı olduğu görülmektedir. KOİ giderimi üzerinde seçilen tüm parametrelerin lineer kısımlarının yüksek oranda anlamlı etkisi bulunmaktadır (p=0,000). Anlamsız parametrenin çoğunun iki faktör etkileşimli olduğu belirlenmiştir.

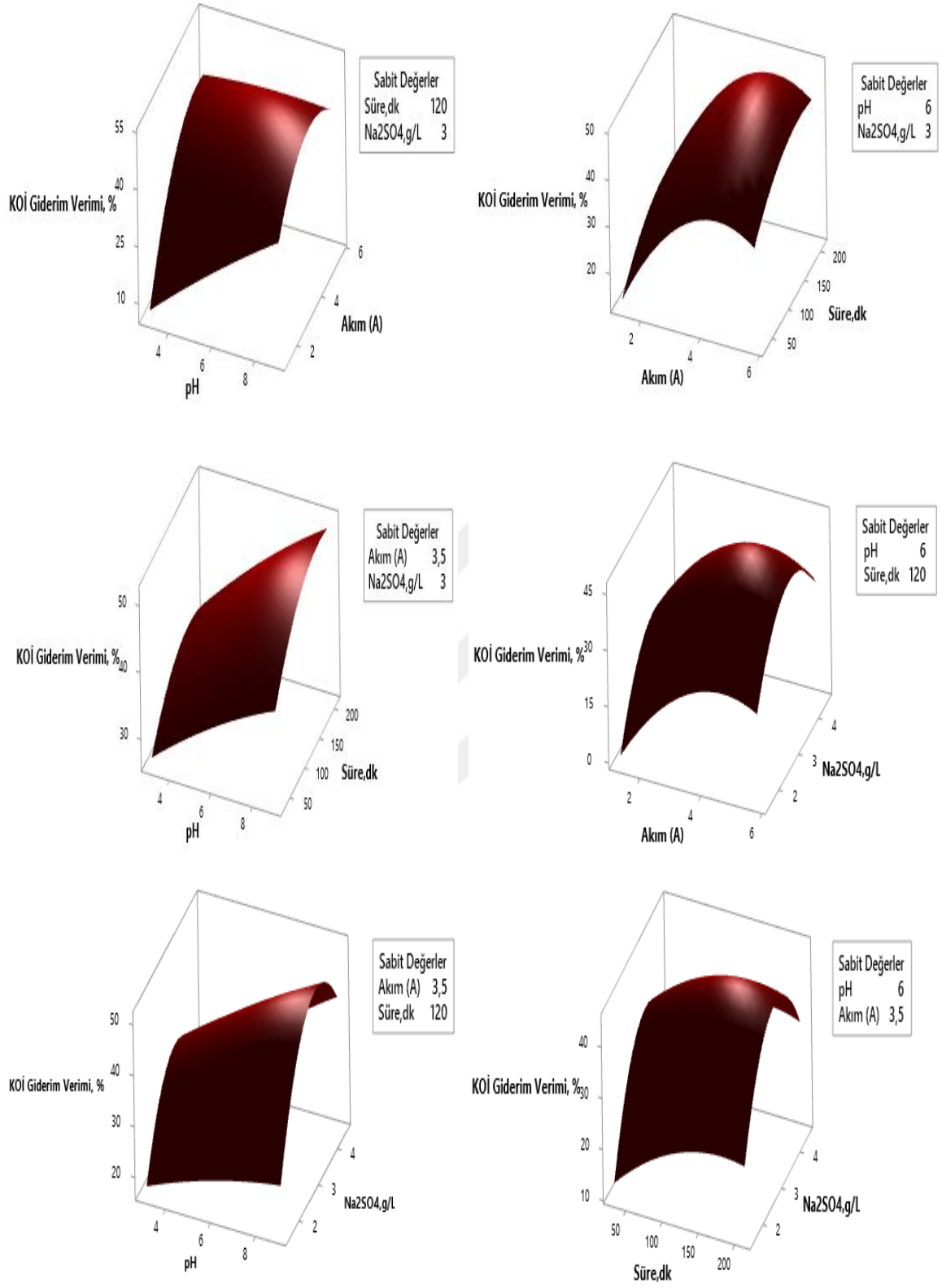
Tablo 4.38: KMO anot ile EO sonucu KOİ giderimi için ANOVA tablosu.

Kaynak	Serbestlik derecesi	Düzeltilmiş kareler toplamı	Düzeltilmiş ortalama kareler	F-Değeri	p-Değeri	P<0,05
Model	14	3235,27	231,091	25,06	0,000	Anlamlı
Lineer	4	1738,08	434,520	47,13	0,000	Anlamlı
X ₁	1	518,40	518,398	56,23	0,000	Anlamlı
X ₂	1	846,57	846,568	91,82	0,000	Anlamlı
X ₃	1	197,18	197,181	21,39	0,000	Anlamlı
X ₄	1	175,93	175,933	19,08	0,000	Anlamlı
Kuadratik	4	1300,20	325,049	35,26	0,000	Anlamlı
X ₁ ²	1	2,41	2,411	0,26	0,616	-
X ₂ ²	1	267,08	267,076	28,97	0,000	Anlamlı
X ₃ ²	1	42,01	42,014	4,56	0,049	Anlamlı
X ₄ ²	1	596,14	596,141	64,66	0,000	Anlamlı
İki Faktör Etkileşimli	6	196,99	32,832	3,56	0,020	Anlamlı
X ₁ *X ₂	1	147,49	147,492	16,00	0,001	Anlamlı
X ₁ * X ₃	1	3,56	3,563	0,39	0,543	-
X ₁ * X ₄	1	38,89	38,892	4,22	0,057	-
X ₂ * X ₃	1	0,00	0,002	0,00	0,989	-
X ₂ * X ₄	1	4,35	4,345	0,47	0,502	-
X ₃ * X ₄	1	2,70	2,697	0,29	0,596	-
Toplam	30	3382,78				

Bağımsız değişkenlerin KOİ giderim verimi üzerindeki etkisini veren kontür grafikleri Şekil 4.31’de, yüzey grafikleri ise Şekil 4.32’de toplu olarak verilmiştir. Her grafikte ayrı ayrı sabit tutulan değerler; pH 6, akım 3,5 A, süre 120 dk, Na₂SO₄ dozu 3 g/L için; pH’nın artması KOİ giderim verimini arttırmaktadır, akım ve süredeki artış ise KOİ giderim verimini bir noktaya kadar arttırmaktadır. Genel olarak akım artışının elektron üretimini arttırması nedeniyle kirleticilerin giderimini hızlandırdığı söylenebilir fakat daha yüksek akım şiddetleri daha fazla elektron üretimi ve bazı parazit kayıp reaksiyonlar gibi istenmeyen yan reaksiyonların gerçekleşmesine sebep olduğu bilinmektedir [149].



Şekil 4.31: KMO anot ile KOİ giderimi için oluşturulan kontür grafikleri.



Şekil 4.32: KMO anot ile KOİ giderimi için oluşturulan yüzey grafikleri.

Maksimum KOİ giderimini sağlayan şartlar ise Tablo 4.39’da verilmiştir. Maksimum nokta için deneyler üç tekrarlı yapıp ortalaması alınmıştır. Ön arıtımı yapılmış numunenin KMO anot ile maksimum noktada arıtımı sonucu %50 KOİ giderimi gerçekleşmiştir.

Tablo 4.39: KMO anot ile EO sonucu maksimum KOİ giderim şartları.

Başlangıç pH (X ₁)	Akım,A (X ₂)	Süre,dk (X ₃)	Na ₂ SO ₄ Dozu, g/L (X ₄)	KOİ Giderim Verimi,% Model	KOİ Giderim Verimi,% Deney
9	3,75	177	3,30	52,48	50,05±1,18

4.2.3.2 Renk Giderim Sonuçları

KMO anot- paslanmaz çelik katot kullanılarak matrikste belirtilen şartlarda yapılan deney sonuçları ve modelin ön gördüğü renk giderim verimleri Tablo 4.40’ta verilmiştir.

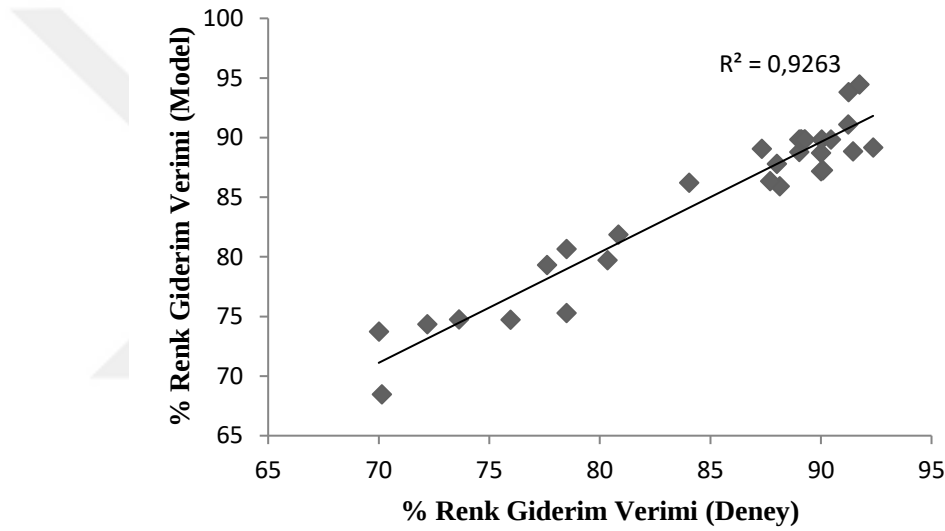
Tablo 4.40: KMO anot ile EO sonucu renk giderim verimleri.

Deney No	Parametreler				Renk Giderim Verimi,% Deney	Renk Giderim Verimi,% Model
	Başlangıç pH (X ₁)	Akım,A (X ₂)	Süre,dk (X ₃)	Na ₂ SO ₄ Dozu, g/L (X ₄)		
1	4	2	60	2	70,00	73,72
2	8	2	60	2	78,49	75,29
3	4	5	60	2	90,00	87,17
4	8	5	60	2	72,19	74,34
5	4	2	180	2	90,08	87,25
6	8	2	180	2	87,32	89,05
7	4	5	180	2	91,74	94,46
8	8	5	180	2	80,83	81,86
9	4	2	60	4	70,14	68,45
10	8	2	60	4	75,95	74,72
11	4	5	60	4	89,01	88,78
12	8	5	60	4	78,49	80,66
13	4	2	180	4	80,35	79,70
14	8	2	180	4	84,04	86,21
15	4	5	180	4	91,25	93,80
16	8	5	180	4	88,13	85,91
17	3	3,5	120	3	91,23	91,09
18	9	3,5	120	3	87,69	86,35
19	6	1,25	120	3	77,60	79,31
20	6	5,75	120	3	92,36	89,17
21	6	3,5	30	3	73,62	74,75
22	6	3,5	210	3	91,45	88,83
23	6	3,5	120	1,5	90,00	88,72
24	6	3,5	120	4,5	88,00	87,80
25	6	3,5	120	3	89,01	89,83

Tablo 4.40 (devam)

26	6	3,5	120	3	89,12	89,83
27	6	3,5	120	3	90,03	89,83
28	6	3,5	120	3	89,25	89,83
29	6	3,5	120	3	90,45	89,83
30	6	3,5	120	3	89,08	89,83
31	6	3,5	120	3	89,27	89,83

KMO anot- paslanmaz çelik katot kullanılarak yapılan elektrokodasyon çalışmalarında renk giderim verimleri %70 ve %92 arasında değişmektedir. Deneysel sonuçlar ile modelin verdiği sonuçlar arasındaki ilişki Şekil 4.33'te verilmektedir. Grafikten görüldüğü üzere, veriler arasında başarılı bir uyum bulunmaktadır.

**Şekil 4.33:** Deney ve model renk giderim verilerinin korelasyon grafiği (KMO anot)

Deneysel sonuçlardan elde edilen %renk giderim verimine ait model eşitliği, Denklem 4.10'da görüldüğü gibidir. Bu modele ait korelasyon katsayıları deney ve model için sırasıyla $R^2=0,9263$, $R^2_{adj}= 0,8618$ olarak tespit edilmiştir.

$$\begin{aligned} \% \text{Renk Giderim Verimi} = & 27,0 + 3,06 \cdot X_1 + 15,76 \cdot X_2 + 0,4025 \cdot X_3 - 2,54 \cdot X_4 - 0,123 \cdot X_1^2 \\ & - 1,104 \cdot X_2^2 - 0,000992 \cdot X_3^2 - 0,697 \cdot X_4^2 - 1,2 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,00048 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,589 \cdot X_1 \cdot X_4 \\ & - 0,01733 \cdot X_2 \cdot X_3 + 1,147 \cdot X_2 \cdot X_4 - 0,0095 \cdot X_3 \cdot X_4 \end{aligned} \quad (4.10)$$

Elde edilen veriler programa girildikten sonra sistem tarafından verilen ANOVA analizlerinin sonuçları da Tablo 4.41'de verilmiştir.

Tablo 4.41: KMO anot ile EO sonucu renk giderimi için ANOVA tablosu.

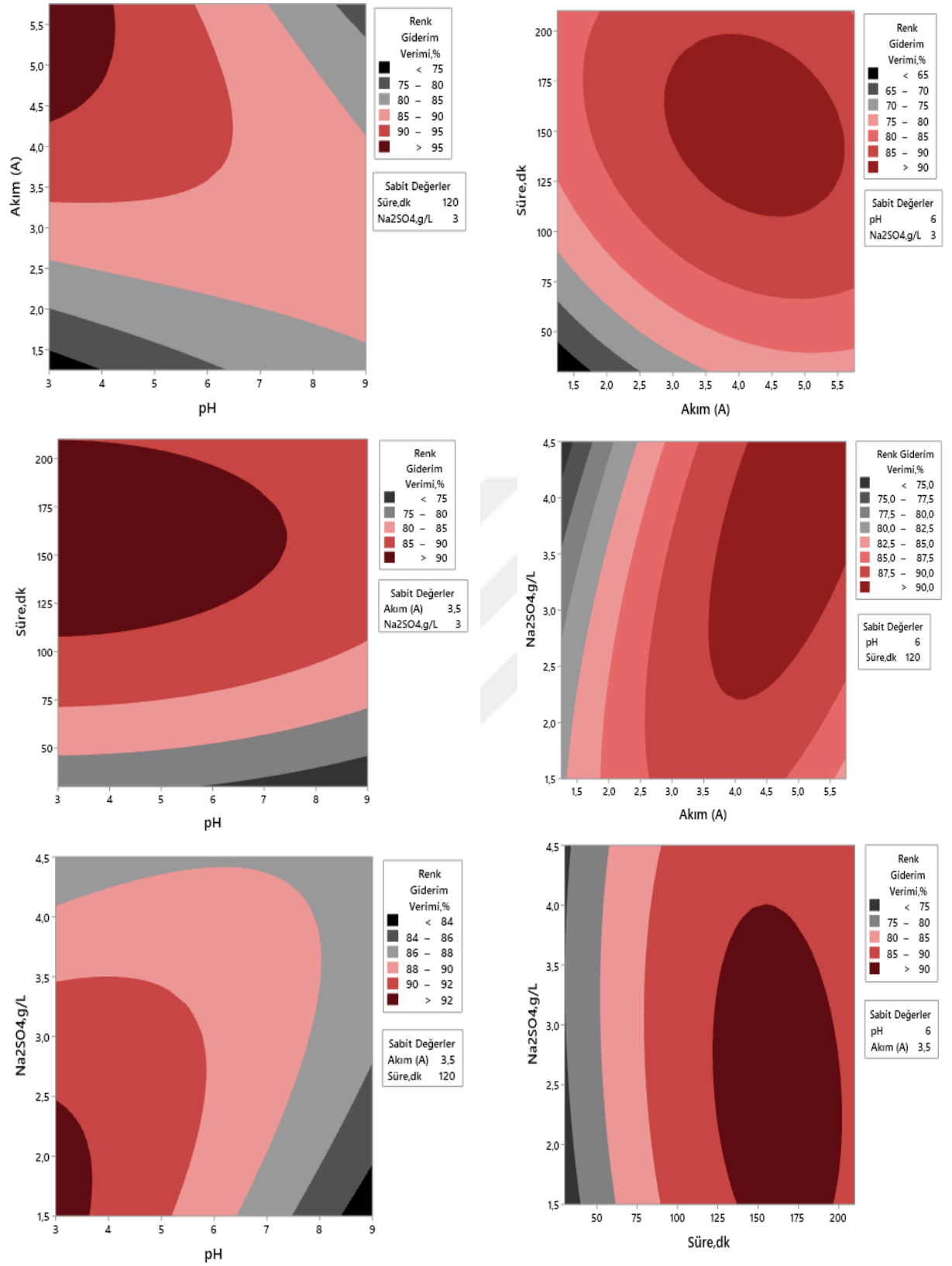
Kaynak	Serbestlik derecesi	Düzeltilmiş kareler toplamı	Düzeltilmiş ortalama kareler	F-Değeri	p-Değeri	P<0,05
Model	14	1374,67	98,191	14,37	0,000	Anlamlı
Lineer	4	726,39	181,598	26,57	0,000	Anlamlı
X ₁	1	51,27	51,268	7,50	0,015	Anlamlı
X ₂	1	221,60	221,605	32,43	0,000	Anlamlı
X ₃	1	451,59	451,589	66,08	0,000	Anlamlı
X ₄	1	1,93	1,932	0,28	0,602	-
Kuadratik	4	327,16	81,789	11,97	0,000	Anlamlı
X ₁ ²	1	2,79	2,795	0,41	0,532	-
X ₂ ²	1	71,19	71,186	10,42	0,005	Anlamlı
X ₃ ²	1	147,21	147,212	21,54	0,000	Anlamlı
X ₄ ²	1	5,60	5,603	0,82	0,379	Anlamlı
İki Faktör Etkileşimli	6	321,12	53,520	7,83	0,000	Anlamlı
X ₁ *X ₂	1	207,41	207,406	30,35	0,000	Anlamlı
X ₁ * X ₃	1	0,05	0,053	0,01	0,931	-
X ₁ * X ₄	1	22,20	22,196	3,25	0,090	-
X ₂ * X ₃	1	38,92	38,917	5,69	0,030	Anlamlı
X ₂ * X ₄	1	47,38	47,378	6,93	0,018	Anlamlı
X ₃ * X ₄	1	5,17	5,173	0,76	0,397	-
Toplam	30	1484,02				

X₁-başlangıç pH'sı, X₂-Akım (A), X₃-Süre (dk), X₄-Na₂SO₄ dozu (g/L) olmak üzere; tablodaki değerler incelendiğinde model içinde lineer kısımda bulunan X₄ parametresi ve kuadratik kısımda X₁² ve X₄² dışındaki tüm parametrelerin anlamlı olduğu görülmektedir. İki faktör etkileşimli kısımda X₁*X₃ ve X₁*X₄ parametrelerinin anlamsız diğerlerinin anlamlı olduğu belirlenmiştir.

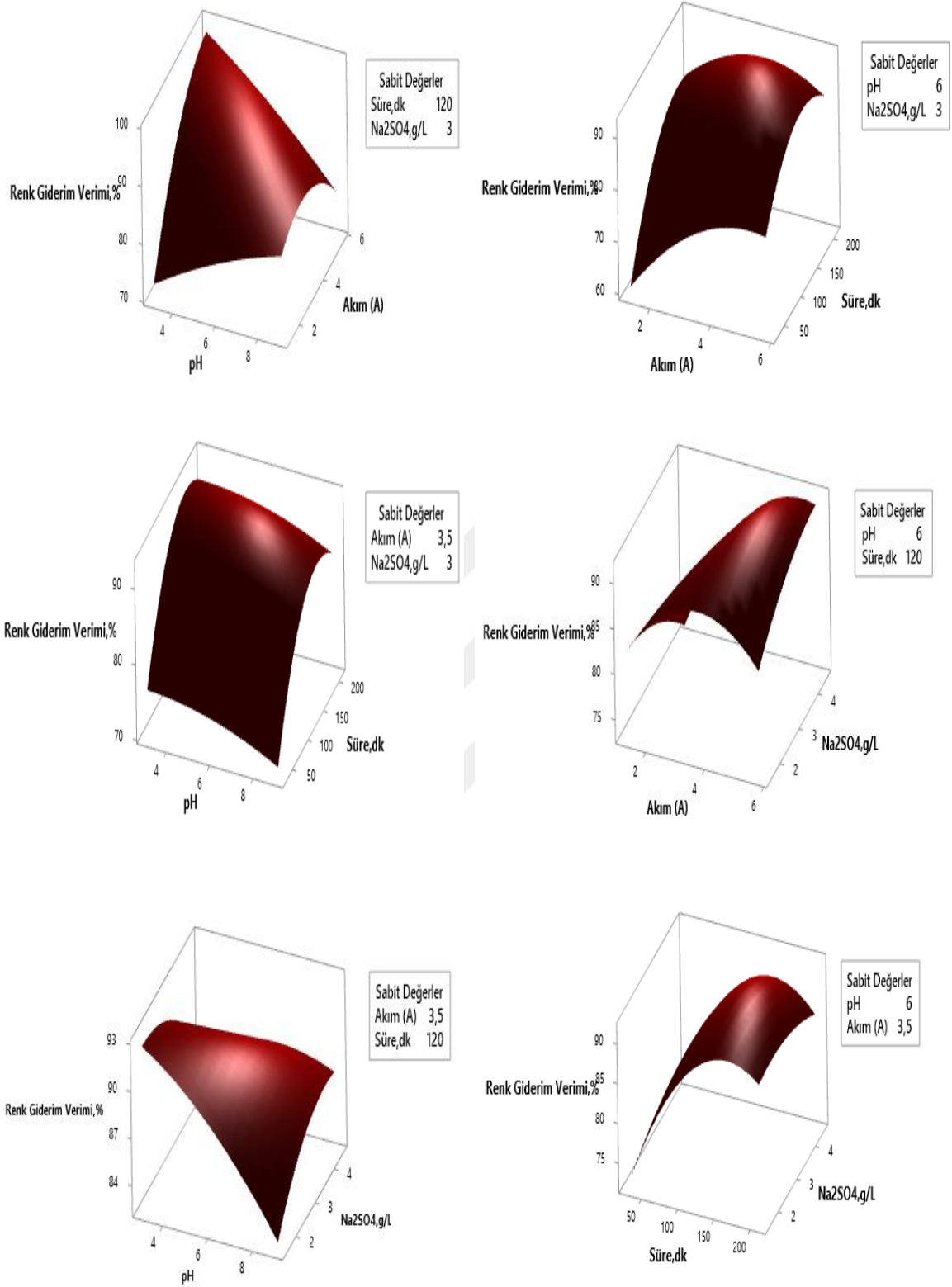
Bağımsız değişkenlerin renk giderim verimi üzerindeki etkisini veren kontür grafikleri Şekil 4.34'te, yüzey grafikleri ise Şekil 4.35'te toplu olarak verilmiştir. Her grafikte ayrı ayrı sabit tutulan değerler; pH 6, akım 3,5 A, süre 120 dk, Na₂SO₄ dozu 3 g/L için; pH'nın artışı renk giderim verimini düşürürken, akım artışı ile renk giderim verimi artmaktadır. Süre ve

elektrolit dozundaki artış ise giderim verimini bir noktaya kadar arttırmıştır. Elektrolit olarak kullanılan sodyum sülfat miktarının artışı ile ön arıtım sonucu (demir(III) klorür kaynaklı) ortamda bulunan ve renk gideriminde etkili ajanların oluşumunu sağlayan klorür iyonları ingirgenmekte ve miktarları azalmaktadır. Bu da renk giderim veriminin düşmesine neden olmaktadır. Grafiklerden de görüleceği üzere; akım değeri 3 A'ın süre 100 dk'nın üzerinde olduğu şartlarda giderim verimi %85'in üstüne çıkmaktadır.

Renk gideriminde pH'nın etkisi grafit anot kullanıldığında da benzer sonuçlar vermiştir. KOİ'nin aksine renk giderim verimleri düşük pH'larda maksimuma ulaşmıştır. Grafiklerden de görüleceği üzere pH 4,5'un altında, akım değeri 4 A'ın üzerinde renk giderim verimi %95 seviyesine ulaşmıştır. Düşük pH'larda renge neden olan bileşiklerin arasındaki bağların parçalanması sonucu renk verme özelliğini kaybetmeleri bu durumun nedeni olabilmektedir [129]. Sistemin reaksiyon sonunda ki denge pH'sının da başlangıç pH'sı kadar önemli olduğu belirtilmiş olup, sistem pH'sı oluşan ara ürün türüne göre genellikle düşme eğilimindedir. KMO anotların dışında bor kaplı elmas anotların da renk gideriminde başarılı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir [150]. Süre 60 dk'nın altına düştüğünde sodyum sülfat dozundaki artış (pH 6, Akım 3,5 A sabit) renk giderim verimi üzerinde hiçbir değişiklik yaratmamıştır.



Şekil 4.34: KMO anot ile renk giderimi için oluşturulan kontür grafikleri.



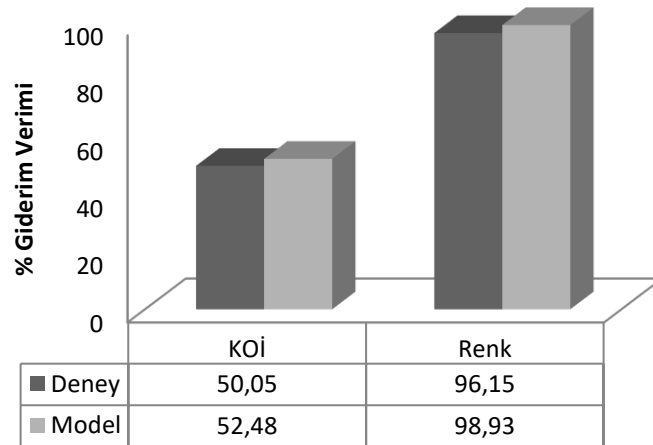
Şekil 4.35: KMO anot ile renk giderimi için oluşturulan yüzey grafikleri.

Maksimum renk giderimini sağlayan şartlar ise Tablo 4.42’de verilmiştir. Maksimum nokta için deneyler üç tekrarlı yapıp ortalaması alınmıştır.

Tablo 4.42: KMO anot ile EO sonucu maksimum renk giderim şartları.

Başlangıç pH (X ₁)	Akım,A (X ₂)	Süre,dk (X ₃)	Na ₂ SO ₄ Dozu, g/L (X ₄)	Renk Giderim Verimi,% Model	Renk Giderim Verimi,% Deney
3	5,75	137	3,25	98,93	96,15±1,28

KMO anot kullanılarak yapılan EO çalışmaları sonucunda maksimum KOİ ve renk giderim verimlerinin karşılaştırılma grafiği Şekil 4.36’da verilmiştir. Belirlenen şartlar için giderim verimlerinin modelden elde edilen değerlerle yakın olduğu görülmekte ve modelin belirlenen güven aralığındaki geçerliliği anlaşılmaktadır. Renk gideriminde; grafit elektrot ve KMO elektrot benzer yüksek arıtım verimlerine ulaşırken, KOİ gideriminde grafit elektrodun daha etkili olduğu belirlenmiştir Atık suyun başlangıç KOİ değerleri düşünüldüğünde, %50 KOİ giderimi ile KMO elektrodun da iyi bir giderim sağladığı düşünülmektedir.



Şekil 4.36: Maksimum nokta doğrulama deney sonuçlarının model sonuçları ile karşılaştırması (KMO anot).

Her bir çıktı parametresi için ayrı ayrı model denklemleri elde edilmiştir. Bu denklemlerin belirlenen çalışma aralıklarında ki herhangi bir nokta için verdiği sonucu kontrol etmek amacıyla rastgele seçilmiş şartlarda üç adet deney planlanmıştır. Tablo 4.43’te bu deney

şartları, elde edilen model ve deney sonuçları yer almaktadır. Deney sonuçları ile model sonuçlarının iyi seviyede uyduğu görülmektedir.

Tablo 4.43: KMO anot ile EO prosesi için yapılan kontrol deney sonuçları.

Deney No	Başlangıç pH	Akım,A	Süre,dk	Na ₂ SO ₄ Dozu, g/L	KOİ Giderim Verimi,% Deney	KOİ Giderim Verimi,% Model	Renk Giderim Verimi,% Deney	Renk Giderim Verimi,% Model
#1	3,5	4	100	2,5	40,21	35,73	93,02	91,89
#2	5,5	3	150	3,5	43,14	39,45	89,96	89,27
#3	7,5	5	180	2,5	45,86	44,21	86,75	84,99

Çalışmamızda çıktı parametreleri ayrı ayrı optimize edilmiş olup, birlikte optimize edildiği şartlar ve bu şartlarda yapılan üç tekrarlı deney sonuçları Tablo 4.44'te verilmiştir. Deney sonuçlarının model sonuçlarına yakın olduğu görülmektedir.

Tablo 4.44: YYY'de KOİ ve renk gideriminin birlikte optimum olduğu şartlar (KMO anot).

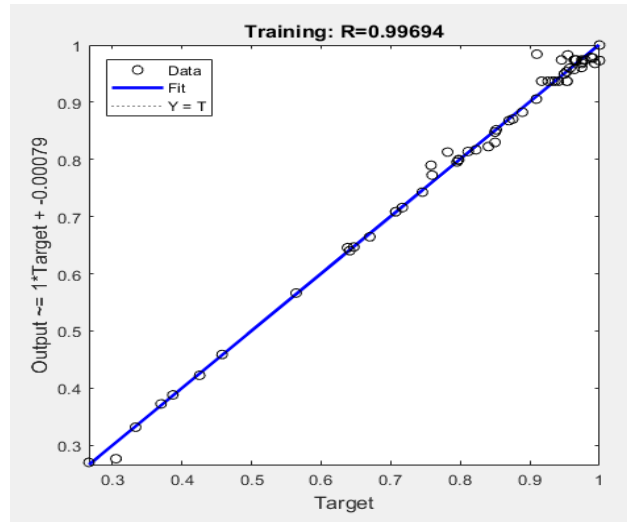
Başlangıç pH (X ₁)	Akım,A (X ₂)	Süre,dk (X ₃)	Na ₂ SO ₄ Dozu, g/L (X ₄)	KOİ Giderim Verimi,% Model	KOİ Giderim Verimi,% Deney	Renk Giderim Verimi,% Model	Renk Giderim Verimi,% Deney
5,72	4,52	210	3,13	46,12	45,19±1,98	92,37	90,89±2,33

4.2.4 KMO Anot ile EO Arıtım Verileri ile YYY ve YSA Çıktılarının Karşılaştırılması

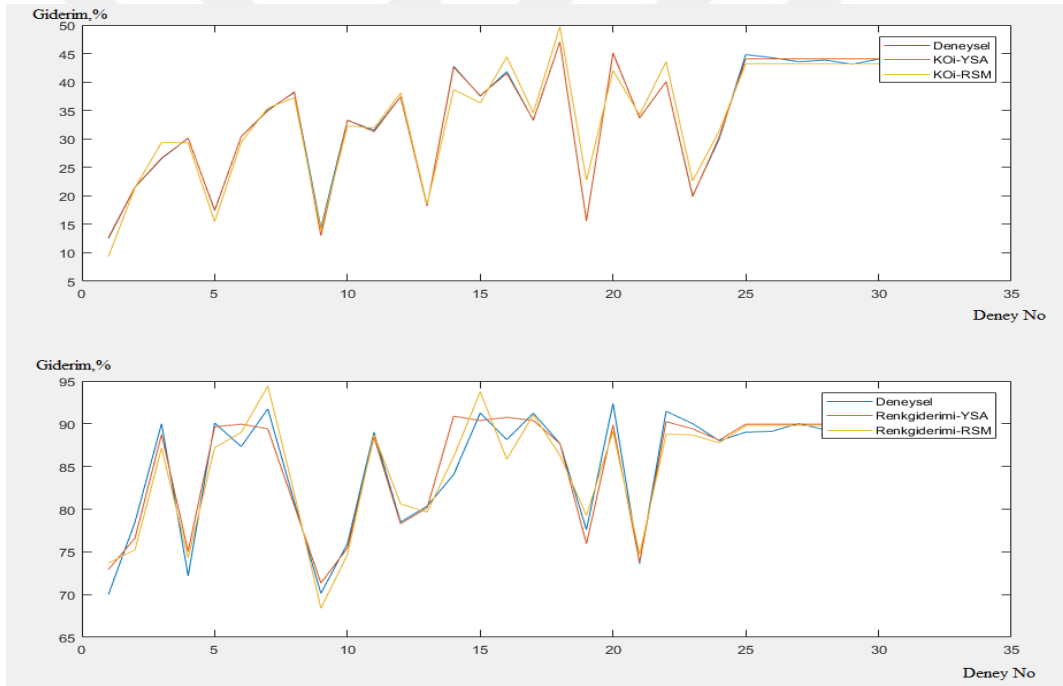
KMO anot paslanmaz çelik katot kombinasyonu ile YYY de belirlenen tasarıma göre yapılan deney sonuçları YSA ile modellenmiştir. Bu iki modelin çıktıları Tablo 4.45'te yer almaktadır. Şekil 4.37'de YSA'dan alınan sonuçların deneysel çıktılarla uyumu gösterilmiştir. Şekil 4.38'de ise YSA'dan alınan çıktılar ile YYY çıktıları ve deney sonuçları ile karşılaştırma grafikleri yer almaktadır. Regrasyon sonucu R² değeri 0,99694 olarak bulunmuştur. YSA'ya göre giderim verimlerinin birlikte optimize edildiği şartlar Tablo 4.46'da gösterilmiştir. Model sonuçları ile deneysel sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir.

Tablo 4.45: Deney sonuçlarının YSA ve YYY çıktıları ile karşılaştırılması.

Deney No	KOİ Giderim Verimi,% Deney	YSA Model	YYY Model	Renk Giderim Verimi,% Deney	YSA Model	YYY Model
1	12,52	12,69	9,36	70	72,93	73,68
2	21,52	21,57	21,46	78,49	76,62	75,24
3	26,52	26,62	29,36	90	88,74	87,14
4	30,15	30,11	29,31	72,19	75,06	74,3
5	17,4	17,51	15,47	90,08	89,63	87,2
6	30,42	30,41	29,45	87,32	89,96	88,99
7	35,06	34,93	35,42	91,74	89,4	94,42
8	38,15	38,27	37,26	80,83	80,4	81,81
9	14,35	13	13,98	70,14	71,34	68,39
10	33,26	33,32	32,31	75,95	75,44	74,67
11	31,51	31,25	31,89	89,01	88,43	88,73
12	37,4	37,4	38,08	78,49	78,29	80,61
13	18,19	18,24	18,45	80,35	80,14	79,64
14	42,76	42,58	38,67	84,04	90,89	86,14
15	37,51	37,6	36,32	91,25	90,37	93,74
16	41,82	41,5	44,4	88,13	90,75	85,84
17	33,25	33,31	34,59	91,23	90,38	91,04
18	47,03	47,02	49,72	87,69	87,68	86,3
19	15,67	15,59	22,72	77,6	75,95	79,25
20	45,02	45,12	42,01	92,36	89,85	89,12
21	33,7	33,66	34,23	73,62	73,76	74,71
22	40,05	40,06	43,55	91,45	90,25	88,78
23	20	19,86	22,61	90	89,39	88,68
24	30	30,36	31,42	88	88,08	87,74
25	44,82	44,05	43,19	89,01	89,96	89,78
26	44,25	44,05	43,19	89,12	89,96	89,78
27	43,56	44,05	43,19	90,03	89,96	89,78
28	43,85	44,05	43,19	89,25	89,96	89,78
29	43,12	44,05	43,19	90,45	89,96	89,78
30	44,02	44,05	43,19	89,08	89,96	89,78
31	44,85	44,05	43,19	89,27	89,96	89,78



Şekil 4.37: YSA regresyon grafiği (KMO anot).



Şekil 4.38: Deney, YSA ve RSM dalarının uyum grafiği (KMO anot).

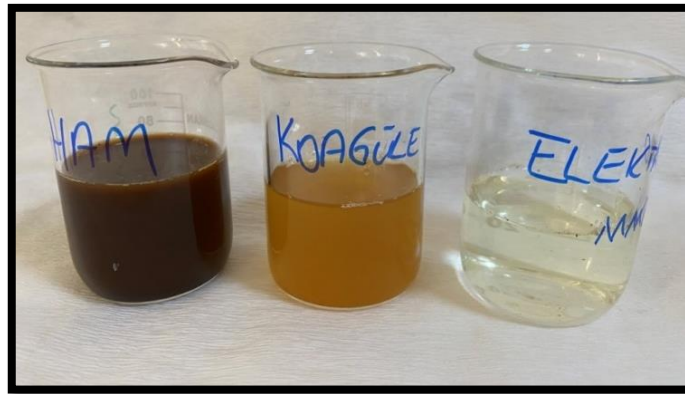
Tablo 4.46: YSA’da KOİ ve renk gideriminin birlikte optimum olduğu şartlar (KMO anot).

Başlangıç pH (X ₁)	Akım, A (X ₂)	Süre, dk (X ₃)	Na ₂ SO ₄ Dozu, g/L (X ₄)	KOİ Giderim Verimi, % Model	KOİ Giderim Verimi, % Deney	Renk Giderim Verimi, % Model	Renk Giderim Verimi, % Deney
3	5,75	210	3.30	47,01	53	92,36	95,21

Atık suyun başlangıçtaki ve demir (III) klorür/APN ile koagülasyon ve flokülasyon sonrası maksimum giderim şartlarındaki halinin ve grafit anot ile maksimum KOİ giderim şartlarında EO işlemin sonrasındaki görüntüsü Şekil 4.39’da verilmiştir. Atık suyun başlangıçtaki ve demir (III) klorür/APN ile koagülasyon ve flokülasyon sonrası maksimum giderim şartlarındaki halinin ve KMO anot/paslanmaz çelik katot ile maksimum KOİ giderim şartlarında EO işlemin sonrasındaki görüntüsü ise Şekil 4.40’da verilmiştir. Kimyasal arıtım ile ham numuneden %92 oranında maksimum renk giderimi sağlanmıştır. Kimyasal ön arıtılmış numunenin kalan rengi ise EO prosesi ile %98 oranında giderilmiştir. Gerçek atık su ile yapılan çalışmamızda başlangıçtaki ham numunenin içeriğine bağlı olarak renk yoğunluğu değişmektedir. Buna bağlı olarak koagüle edilmiş son numunenin de renginde farklılıklar olmaktadır. Özellikle hibrit proseslerde birincil arıtım (ön arıtım) işleminin performansı ikincil arıtma prosesinin performansını da etkilemektedir.



Şekil 4.39: Ham atık su-kimyasal arıtım çıkışı ve grafit anot ile EO çıkışı atık sudaki değişim.



Şekil 4.40: Ham atık su-kimyasal arıtım çıkışı ve KMO anot ile EO çıkışı atık sudaki değişim.

4.3 Biyobozunurluk Değişiminin İncelenmesi

Elektro proseslerde farklı elektrolitler reaksiyona destek amaçlı sisteme eklenebilmektedir. Bunlardan en sık kullanılanı sodyum klorür (NaCl) ve tez çalışmamızda da kullanılan sodyum sülfattır (Na₂SO₄). Çoğu durumda sodyum klorürün arıtım verimi daha yüksek olsa da halojenli yan ürünlerin oluşma potansiyelinden dolayı kullanımı kısıtlanmaktadır. Klorür yerine sülfat kullanımı, bu klorlu ara ürünlerin oluşumunu azaltabilir. Ayrıca sodyum sülfatın tekstil atık sularının arıtımında kullanımının biyolojik bozunmayı arttırdığını ve akut toksisiteyi azalttığı belirtilmiştir [151]. Sodyum klorür ve sodyum sülfatın BOİ₅/KOİ oranında oluşturduğu farklılıklar ve TOK üzerindeki etkisi incelenmek üzere aşağıdaki Tablo 4.47'deki deneyler belirlenmiştir. Her iki anot için; deneysel çalışma sonuçlarına göre KOİ giderim verimini maksimum yapan nokta ile ortalama giderimi sağlayan noktalar seçilmiştir. Bu noktalar için aynı şartlarda sadece elektrolit cinsi değiştirilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Sodyum sülfatın dozu deneysel tasarımdan seçilirken, sodyum klorür için bu doza karşılık aynı başlangıç iletkenliğini sağlayacak doz tercih edilmiştir. Böylece aynı şartlardaki numunelerin başlangıç iletkenlik değerleri aynı olmuştur.

Tablo 4.47: Sodyum klorür ve sodyum sülfatın etkisinin incelenmesi.

Numune No		KOİ, mg/L	BOİ, mg/L	TOK, mg/L	Toplam KOİ Giderim Verimi, %	Toplam BOİ ₅ Giderim Verimi, %	Toplam TOK Giderim Verimi, %	BOİ ₅ / KOİ	KO OB
Ham Numune		20180	4750	6890	-	-	-	0,23	-0,39
Koagülasyon Sonrası		4125	675	2671	79,56	85,78	61,23	0,16	1,68
Grafit Elektrot	1	1598,8	135	959	92,07	97,15	86,06	0,084	1,50
	2	1934,6	122	1053	90,41	97,43	84,71	0,063	1,24
	3	1434,8	116	773	92,89	97,55	88,78	0,081	1,22
	4	1335,3	92	751	93,38	98,06	89,10	0,068	1,33
KMO Elektrot	1’	2247,5	154	1039	88,86	96,75	84,92	0,069	0,76
	2’	2210,8	147	1098	89,04	96,90	84,06	0,066	0,98
	3’	2160,1	163	1407	89,29	96,56	79,57	0,075	1,70
	4’	1834,6	143	1545	90,91	96,98	77,57	0,078	2,22

1: Grafit anot ile EO, pH:3, A:3,5 Amper, Süre:120 dk, sodyum sülfat dozu:3g/L

2: Grafit anot ile EO, pH:3, A:3,5 Amper, Süre:120 dk, sodyum klorür dozu:1,5 g/L

3: Grafit anot ile EO, pH:6, A:5,75 Amper, Süre:210 dk, sodyum sülfat dozu:1,5g/L

4: Grafit anot ile EO, pH:6, A:5,75 Amper, Süre:210 dk, sodyum klorür dozu:1,0g/L

1': KMO anot ile EO, pH:3, A:3,5 Amper, Süre:120 dk, sodyum sülfat dozu:3g/L

2': KMO anot ile EO, pH:3, A:3,5 Amper, Süre:120 dk, sodyum klorür dozu:2,2 g/L

3': KMO anot ile EO, pH:9, A:3,75 Amper, Süre:170 dk, sodyum sülfat dozu:3,3 g/L

4': KMO anot ile EO, pH:9, A:3,75 Amper, Süre:170 dk, sodyum klorür dozu:2,3 g/L

*Aşı (%2-%5) ortalama 140 mg/L

Çalışmada; biyoparçalanabilirliği düşük olduğu bilinen yonga levha atık suyunun BOİ₅'indeki değişim incelenerek, atık suların biyolojik parçalanabilirliğini de ifade eden BOİ₅/KOİ oranlarındaki değişim oranları karşılaştırılmıştır. Netice de atık suyun içinde bulunan selülozik ve lignoselülozik yapılar ve bunların tam olarak parçalanamaması nedeniyle BOİ₅/KOİ oranının düştüğü gözlenmiştir. Ayrıca çalışmada kullanılan; Grafit ve KMO (iridyum dioksit (IrO₂)) aktif elektrotlar için, OH[•] radikali elektrot yüzeyinde kimyasal olarak adsorbe edilir. Yani, suyun elektrolizi ile üretilen OH[•], aktif anot ile reaksiyona girecek ve anot kafesinde kimyasal olarak adsorbe edilmiş bir MO oluşturmak için OH[•]'deki oksijene bağlanacaktır. Reaksiyon Denklem 4.11 ile açıklanırsa:



Aktif elektrotun yüzeyinde MO oluştuğunda, OH[•] oksidasyon aktivitesi zayıflayacaktır. Düşük oksidasyon performansı, organik kirleticilerin tamamen mineralize edilmesini zorlaştırır ve organik kirleticilerin biyolojik olarak parçalanabilen ara ürünlere (kısa zincirli karboksilik asitler, aldehitler ve ketonlar gibi bileşikler dahil) yalnızca kısmi oksidasyonuna yol açar. Aktif olmayan elektrotun (Bor kaplı elmas (BDD) vb.) yüzeyindeki OH[•] ise hala güçlü oksidasyon aktivitesine sahiptir ve bazı zor parçalanılan bileşenleri tamamen mineralize edip, doğrudan CO₂ ve H₂O'ya dönüştürebilir. Ardışık hibrit proste giderilen KOİ ile birlikte bir kısım BOİ₅ fraksiyonu organik bileşen de giderildiği için giderim BOİ₅ giderim verimi ise artmıştır [152]. Karbonun ortalama oksidasyon basamağı (KOOB) Denklem 4.12'deki formüle göre hesaplanmıştır [153].

$$KOOB = 4 - 1,5 * \frac{KOİ}{TOK} \quad (4.12)$$

Karbon atomunun oksidasyon değerleri -4, +4 arasında değişmektedir. +4 değerli karbon nihai parçalanma ürünü olan karbondioksittir. Deney sonuçlarından karbonun oksidasyon değerinin -0,39'dan +2.22'ye yükseldiği görülmektedir. Karbon atomunun oksidasyon dereceleri Tablo 4.48'de verilmiştir [154].

Tablo 4.48: Organik bileşiklerde “C” atomunun oksidasyon dereceleri.

Oksidasyon Basamağı	Primer	Sekonder	Tersiyer	Kuaterner
-4	CH ₄			
-3		RCH ₃		
-2	CH ₃ OH	R ₂ CH ₂		
-1		RCH ₂ OH	R ₃ CH	
0	CH ₂ O	R ₂ CHOH		R ₄ C
+1		RCHO	R ₃ COH	
+2	HCOOH	R ₂ CO		
+3		RCOOH		
+4	CO ₂			

4.4 Maliyet Hesabı

Çalışma sonunda maliyet; ön arıtım prosesi için oluşan kimyasal maliyet (birinci aşama), EO prosesi için elektrot ve elektrik tüketim maliyeti (ikinci aşama) olmak üzere iki aşamalı olarak hesaplanmıştır. Ön arıtım koagülasyon prosesine ait maliyet analizleri kullanılan koagülant miktarları ve bunların birim fiyatları üzerinden gerçekleştirilmiştir. EO prosesinin enerji tüketim değerleri deneylerde kullanılan eşitlikler kısmında verilen Denklem 3.4 ile hesaplanmıştır.

4.4.1 Ön Arıtım Prosesi İçin Maliyet

Maksimum giderim şartları için kimyasal tüketim maliyetleri Tablo 4.49'da verilmiştir. Güncel döviz kuru kullanılarak birim m³ atık su başına maliyet dolar olarak hesaplanmıştır (1USD=18,65 TL). APN için %1'lik çözelti kullanıldığından 1 gr anyonik patates nişastası ile 100 ml APN çözeltisi oluşturulmuştur. Demir (III) klorür/APN ile arıtım maliyetleri, Flo30/APN ile arıtmadan daha yüksek çıkmıştır. Nişasta ise düşük maliyetli bir hammadde olduğu için flokülant olarak polielektrolitlere iyi bir alternatif oluşturmaktadır. Hammaddelerin birim fiyatları için 2022 Aralık ayındaki değerler baz alınmıştır. Demir (III) Klorür/APN için maksimum AKM giderim maliyeti KOİ ve renk giderim maliyetlerinden daha düşük çıkmıştır. Flo30/APN için ise AKM ve renk giderim maliyetleri daha yüksektir.

Tablo 4.49: Ön arıtım maliyetleri.

Giderim Şartları												
	KOİ _{maks}		AKM _{maks}		RENK _{maks}		KOİ _{maks}		AKM _{maks}		RENK _{maks}	
	Demir(III) Klorür Dozu, g/L	APN Doz, ml/L	Demir(III) Klorür Dozu, g/L	APN Dozu, ml/L	Demir(III) Klorür Dozu, g/L	APN Dozu, ml/L	Flo30 Dozu, ml/L	APN Dozu, ml/L	Flo30 Dozu, ml/L	APN Dozu, ml/L	Flo30 Dozu, ml/L	APN Dozu, ml/L
Kimyasal Dozu	5	20	3	20	5	25	10,5	20,6	15	40	15	40
Maliyet TL/m³	1103,76		662,96		1103,76		273,64		390,01		390,01	
Maliyet USD/m³	59,18		35,54		59,20		14,67		20,91		20,91	

*pH ayarlama maliyeti hariçtir.

4.4.2 Elektrooksidasyon Prosesi için Maliyet

Tablo 4.50’de EO ile kirleticilerin gideriminde ortaya çıkan elektrik tüketimleri ve maliyet değerleri verilmiştir. Hesaplamalar (USD/kg KOİ) için Enerji Piyasaları Denetlem Kurulu’ndan alınan güncel elektrik maliyetleri güncel dolar kuru ile çevrilerek kullanılmıştır (1USD=18,65 TL, 1kWh= 4,31 TL, 1kWh=0,23 USD) [155]. Elektrot maliyetlerinin de eklendiği toplam maliyet analizinde bir elektrotun tahmini 100 m³ atık suyu arıtılacağı varsayılmıştır. Atık su özelliklerine, çalışılan sistem pH’sına vb. bağlı olarak bu değer değişebilmektedir.

Tablo 4.50: EO ile maksimum giderim şartlarında elektrik tüketimi maliyetleri.

	Elektrot Türü			
	Grafite Anot		KMO Anot	
	KOİ _{maks}	RENK _{maks}	KOİ _{maks}	RENK _{maks}
Elektrik Enerji Tüketimi, W.sa/L	339,95	324,3	171,75	338,1
Elektrik Enerji Tüketimi, USD/m ³	77,49	74,5	39,50	77,76
Elektrot Maliyeti, USD/m ³	0,47	0,47	0,9	0,9

*pH ayarlama maliyeti hariçtir.

Tablo 4.50’den görüleceği üzere akım şiddetindeki artış elektrik tüketimini direkt etkilemektedir. Ayrıca elektrik tüketimini arttıran bir diğer önemli faktör reaksiyon süresidir. Destek elektrolit kullanılan enerji tüketimi desteksiz deneylerde elde edilen enerji tüketiminden daha düşük olmuştur.

Bu durum kimyasalların çözünürlüğünün çok yüksek olması ile çözelti ortamı ve dolayısıyla çözeltilerin elektriksel iletkenliğinin artmasıyla açıklanabilir. Ayrıca çözeltide azalan potansiyel fark, daha düşük enerji tüketim değerlerine neden olur [156].

Birim atık su başına toplam giderim maliyeti Denklem 3.5'e göre hesaplanmıştır. Maksimum KOİ ve renk giderim şartlarında her bir ön arıtım kimyasal çifti için ve EO'daki elektrot çifti için farklı kombinasyonlardaki maliyet değerleri Tablo 4.52'de verilmiştir. En yüksek maliyet maksimum renk giderimi şartlarında demir(III)klorür/APN ön arıtımı sonrası KMO/paslanmaz çelik ile EO'da olurken, en düşük maliyet ise maksimum KOİ giderim şartlarında Flo30/APN ön arıtımı sonrası KMO/paslanmaz çelik ile EO'da olmuştur.

Tablo 4.51: Toplam giderim maliyeti (USD/m³).

Demir(III)Klorür/APN+ Grafit/Paslanmaz Çelik	<i>KOI_{maks}</i>	<i>RENK_{maks}</i>
	136,44	134,17
Demir(III)Klorür/APN+ KMO/Paslanmaz Çelik	<i>KOI_{maks}</i>	<i>RENK_{maks}</i>
	99,58	137,86
Flo30/APN+Grafit/Paslanmaz Çelik	<i>KOI_{maks}</i>	<i>RENK_{maks}</i>
	92,63	95,88
Flo30/APN+KMO/Paslanmaz Çelik	<i>KOI_{maks}</i>	<i>RENK_{maks}</i>
	61,31	99,57

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada; kimyasal koagülasyon ile ön arıtımın gerçekleştiği ilk kısım ve EO prosesi ile ön arıtılmış numunenin arıtıldığı ikinci kısım olarak ardışık bir proses kullanılmıştır. Kimyasal koagülasyon ve ardından uygulanan EO prosesi ile yüksek AKM ve inert içerikli yonga levha atık suyunun arıtımı için en uygun deneysel koşulları belirlemek adına; Minitab 19 trial versiyonu kullanılarak Merkezi Kompozit Tasarım içinde yer alan yaklaşımı ile deneysel tasarım yapılmıştır. Deney sonuçları yanıt yüzey metodolojisi ve yapay sinir ağları metodolojileri kullanılarak optimize edilmiştir. Çalışma kapsamında ulaşılan sonuçlar aşağıda listelenmiştir:

1. Ön arıtımda iki farklı koagülant ve bunların iki farklı tasarımıyla optimizasyonu çalışılmıştır. Kimyasal ön arıtım ile maksimum KOİ giderim şartları demir (III) klorür/APN kombinasyonu için sırasıyla; başlangıç pH 8,3, koagülant dozu 5 g/L, APN dozu 20 ml/L için maksimum KOİ giderim verimi %70,9 olmuştur. Başlangıç pH 6, koagülant dozu 3 g/L, APN dozu 20 ml/L için maksimum AKM giderimi %98,37 ve başlangıç pH 9, koagülant dozu 5 g/L, APN dozu 25 ml/L için renk giderimi verimi %97,51 olmuştur. Bu değerler Flo30/APN kullanılan şartlarda maksimum %56,83 KOİ giderimi için sırasıyla; başlangıç pH 3,5, koagülant dozu 10,55 ml/L, APN dozu 20,6 ml/L olmuştur. Maksimum %96,07 AKM giderimi için başlangıç pH 9,5, koagülant dozu 15 ml/L, APN dozu 40 ml/L ,aynı şartlarda renk giderim verimi maksimum noktası %83,2 olmuştur. Demir (III) klorür/APN ile elde edilen toplam kirletici giderim verimi diğer koagülanta göre daha yüksek olduğundan ön arıtım Demir (III) klorür/APN kimyasalları kullanılarak yapılmıştır. Özellikle Flo30 kimyasalı daha önce literatürde çalışılmamış bir kimyasal olduğundan, anyonik patates nişastası ise flokülant olarak kullanılan kimyasallara (polielektrolit vs.) bir alternatif oluşturduğu düşünülmektedir.
2. Gelişmiş bir oksidasyon prosesi olan Elektrooksidasyon ile grafit/paslanmaz çelik elektrot kombinasyonunda maksimum KOİ giderimi %90,41 için optimum koşullar; başlangıç pH'sı 5,94, reaksiyon süresi 210 dk, akım 5,75 A ve elektrolit dozu 1,5 g/L iken, maksimum %96,52 renk giderimi için ise sırasıyla 3, 210 dk, 5,75 A ve 3,4 g/L'dir. Bir diğer elektrot çifti KMO/paslanmaz çelik elektrot kombinasyonunda ise maksimum %50,05 KOİ giderimi için optimum koşullar; başlangıç pH'sı 9,

reaksiyon süresi 177 dk, akım 3,75 A ve elektrolit dozu 3,3 g/L olurken, %96,15 renk giderimi için ise bu değerler sırasıyla 3, 137 dk, akım 5,75 A, 3,25 g/L'dir.

3. Yapılan modellemeler sonucunda istatistiksel olarak önemli ($p < 0.0001$) ve güvenilir ($R^2 > 0,8$) modeller elde edilmiştir. Kimyasal ön arıtım için parametreler YYY ile ayrı ayrı ve birlikte optimize edildiği şartlarda oluşturulan modellerin kontrolünü sağlamak amacıyla doğrulama ve kontrol deneyleri gerçekleştirilerek sonuçlar yorumlanmıştır. Demir (III) klorür/APN kombinasyonu ile ön arıtım sonucu; KOİ giderim verimi için $R^2=0,9697$, AKM için $R^2=0,9395$ ve renk giderimi için $R^2=0,9503$ değerleri bulunmuştur. Flo30/APN kimyasalları ile ön arıtım sonucu ise KOİ giderim verimi için $R^2=0,9501$, AKM için $R^2=0,9666$ ve renk giderimi için $R^2=0,9377$ sonuçlarına ulaşılmıştır. EO prosesinde yine iki farklı elektrot çifti için tasarım yapılmış ve sonuçlar YYY, YSA kullanılarak modellenmiştir. Arıtımda varyans analizi, full quadratik regresyon modelinin deneysel verilerle tatmin edici bir şekilde ayarlanmasını sağlamıştır. Çıktı parametreleri beraber YSA ile optimize edildiğinde ise; Demir (III) klorür/APN kombinasyonu için $R^2=0,99982$, Flo30/APN kombinasyonu içinse $R^2=0,99915$ değerleri bulunmuştur.
4. EO sonrasında elde edilen deneysel verilerle; ayrı ayrı YYY ve YSA kullanılarak istatistiksel olarak önemli ($p < 0.0001$) ve güvenilir ($R^2 > 0,8$) model denklemleri oluşturulmuştur. Bu modellerin doğrulama deneyleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar istatistiksel olarak yorumlanmıştır. Grafit/paslanmaz çelik kombinasyonu ile EO için; KOİ giderim verimi için $R^2=0,9632$ ve renk giderimi için $R^2=0,9703$ değerleri bulunmuştur. Aynı çıktılarla yapılan YSA analizi sonucu $R^2=0,996$ olmuştur. KMO/paslanmaz çelik kombinasyonu için ise KOİ giderim verimi için $R^2=0,9564$ ve renk giderimi için $R^2=0,9263$ sonuçlarına ulaşılmıştır. YSA analizi sonucunda $R^2=0,99694$ olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar model denklemlerinin son derece güvenilir olduğunu göstermektedir. Ayrıca doğrulama deney sonuçlarına ve rastgele seçilen tasarım şartlarında yapılan kontrol denemelerine bakıldığında model denklemlerinin uygulanabilirliği de anlaşılmaktadır.
5. Arıtım sonucu; arıtım veriminin maksimum olduğu, ortalama olduğu ve ortalamanın altında olduğu üç nokta belirlenmiş ve BOİ₅ analizleri yapılmıştır. Bu sayede atık suyun biyolojik ayrışabilirliğindeki değişim gözlenmiştir. Bunun sonucunda BOİ

değerlerinde ham atık suya göre azalma olmuş ve BOİ/KOİ oranı düşmüştür. Atık suyun biyolojik olarak arıtmaya elverişli olmadığı tespit edilmiştir. EO prosesi için de maksimum giderimin olduğu şartlardaki elektrik tüketim ve maliyet değerleri çalışmaya eklenmiştir. Bunun sonucunda ön arıtmada demir(III) klorür/APN kullanılması durumunda maksimum KOİ, AKM ve renk giderim değerlerindeki maliyetler toplanarak aritmetik ortalaması alınmış ve ortalama işletim maliyeti 47,36 USD/m³ bulunmuştur. Diğer tüm maliyetler için de aynı hesaplama yapıldığında; Flo30/APN kullanılması durumunda ortalama işletim maliyeti 17,79 USD/m³ bulunmuştur. EO prosesinde maksimum KOİ ve renk giderimi için; grafit/paslanmaz çelik kullanımında ortalama 76,46 USD/m³, KMO/paslanmaz çelik kullanımında 59,53 USD/m³ arıtım maliyetleri hesaplanmıştır.

Çalışma sonucunda; kirletici ve partikül madde içeriği yüksek olan bu atık suların direk EO prosesi ile istenen seviyede arıtılabilirliğinin düşük olacağı belirlenmiştir. Bu nedenle parçalanması zor kompleks bileşenler içeren atık suların arıtımında; klasik yöntemler ve ileri arıtım metotlarının kombinasyonunda daha iyi sonuçlar vermektedir.

Atık suyun temin edildiği firmada arıtım sonrası sular direk yüzeysel sulara deşarj edilmemekte, kullanılmayan arıtılmış sular organize sanayi bölgesi arıtma tesisine gönderilmektedir. Ayrıca firmada mevcut olan; arıttıkları suları sistem içinde tekrar kullandıkları bir geri kazanım hattı da bulunmaktadır. Arıtılmış atık suların endüstriyel bazlı yeniden kullanılabilirlik kriterleri sabit olmamakla birlikte; üretim prosesine, atık suyun nerede kullanılacağına (yıkama suyu, soğutma suyu, üretim vb.), arıtılmış su ihtiyacı ve kapasitesine göre değişmektedir. Çalışmamızda elde edilen sonuçlar neticesinde; arıtılmış suların fabrika içinde yeniden kullanımı kapasitesinin arttırılabileceği ve daha kaliteli su kullanımına ihtiyaç duyulan kısımlarda da atık suyun kullanılabileceği tespit edilmiştir. Ayrıca atık su arıtım sonrası organize sanayi bölgesi endüstriyel atık su arıtma tesisine (EAAT) deşarj için geçerli sınırları sağlayacak özelliklere ulaşmaktadır.

6. KAYNAKLAR (IEEE)

- [1] Kalkınma Bakanlığı, “Orman ürünleri sektör raporu”, Ankara, 2018.
- [2] S. Demirkır ve C. Çolak, (2006). “Odun kökenli atıkların levha endüstrisinde yeniden kullanım imkanları”, *Artvin Orman Fakültesi Derg.*, cilt 7, no 2, 41–50, Ara. 2022. [Online] Erişim adresi: <http://ofd.artvin.edu.tr/en/download/article-file/25666>.
- [3] S. Dayanıklıoğlu, “Türkiye’de lif levha ve yonga levha sektörünün durumu, Avrupa Birliği ülkeleriyle karşılaştırılması, problemleri ve çözüm yolları”, Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniv., İstanbul, 2004.
- [4] MDF ve Yonga Levha Sanayicileri Derneği, “Faaliyet raporu”, İstanbul, 2017.
- [5] İ.H. Başboğa, “Melamin emdirilmiş kağıt (MEK) atıkların yonga levha üretiminde değerlendirilmesi”, Doktora tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniv., Kahramanmaraş, 2018.
- [6] N. Chand, R. K. Tiwary, and P. K. Rohatgi, “Bibliography Resource structure properties of natural cellulosic fibres — an annotated bibliography”, *J. Mater. Sci.*, vol. 23, no. 2, pp. 381–387, 1988, doi: 10.1007/BF01174659.
- [7] I. Haq, P. Mazumder, and A. S. Kalamdhad, “Recent advances in removal of lignin from paper industry wastewater and its industrial applications – A review”, *Bioresour. Technol.*, vol. 312, p. 123636, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123636>.
- [8] Çevre Şehircilik Bakanlığı, “Arıtılmış suların yeniden kullanımı projesi nihai raporu”, Ankara, 2018.
- [9] M. İbiş, “Bir yonga levha fabrikasında ham madde kaynaklarının optimizasyonu ve üretim koşullarının teknolojik yönden incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Düzce Üniv., Düzce, 2018.
- [10] *Yonga levhalar*, TS EN 309, Ankara, 2008.
- [11] *Methods of test for wood chipboard and other particleboard*, BS 1811 British standard, UK, 1969.
- [12] Orta Anadolu İhracatçı Birlikleri, Levha Sanayii Sektör Raporu, Ankara, (2015).
- [13] A. Özkalaycı, “Mobilya endüstrisinde kullanılan odun esaslı levhaların teknolojik özelliklerinin araştırılması”, Yüksek lisans tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniv., Kahramanmaraş, 2017.
- [14] G. Ceylan, “Evsel ve endüstriyel ahşap atıklarından üretilen yonga levhanın fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması”, Yüksek lisans tezi, Düzce Üniv., Düzce,

2019.

- [15] G. Nemli, “Yüzey kaplama malzemeleri ve uygulama parametrelerinin yonga levha teknik özellikleri üzerine etkileri”, Doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniv., Trabzon, 2000.
- [16] S. Bardak and T. Bardak, “Odun kökenli levhalar ve kullanım alanları”, in *2nd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies*, 2018, vol. 3, pp. 254–259.
- [17] M. C. Korkmaz, “Birim hacimdeki yonga miktarının yonga levha kalitesine etkisi”, Yüksek lisans tezi, Bartın Üniv., Bartın, 2020.
- [18] M. Cülfük, “İki farklı tutkal kullanılarak üretilen yonga levhaların bazı özelliklerinin belirlenmesi”, Yüksek lisans tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniv., Kahramanmaraş, 2017.
- [19] TÜBİTAK, “Ege bölgesi bağ budama artıklarının yonga levha endüstrisinde değerlendirilmesi”, Proje No 105O513, Ankara, 2008.
- [20] Yıldız Entegre, “Teknik Ürün Kitapçığı”, Kocaeli.
- [21] E. Er, “Yonga levha endüstrisi atık sularının kimyasal arıtımı ve yanıt yüzey yöntemi ile optimizasyonu”, Yüksek lisans tezi, Balıkesir Üniv., Balıkesir, 2016.
- [22] Ş. Saim, “Yonga levha endüstrisi atıksularının odun külü ve modifiye nişasta ile arıtılması ve optimizasyonu”, Yüksel lisans tezi, Balıkesir Üniv., Balıkesir, 2019.
- [23] Yıldız Entegre, “Proses Tanıtım Raporu”, Balıkesir, 2014.
- [24] C. Uğur, “Endüstriyel lignoselülozik atıklardan çevreye duyarlı kompozit malzeme üretiminin araştırılması”, Doktora tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniv., Kahramanmaraş, 2021.
- [25] FAOSTAT. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>. Erişim tarihi: 20 Kasım 2022.
- [26] S. Dayanıklıoğlu, “Türkiye’de lif levha ve yonga levha sektörünün durumu,avrupa birliği ülkeleriyle karşılaştırılması, problemleri ve çözüm yolları”, Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniv., İstanbul, 2004.
- [27] “Türkiye çapındaki tesislerimiz”, <http://yomsad.org.tr/tesislerimiz/>. Erişim tarihi: 25 Kasım 2022
- [28] A. İstek, İ. Özlüsoylu, and A. Kizilkaya, “Türkiye ahşap esaslı levha sektör analizi”, *Bartın Orman Fak. Derg.*, vol. 19, no. 1, pp. 132–138, 2017, doi: 10.24011/barofd.297231.
- [29] M. Akman, “Isıl işlem uygulanmış ebe karaçamın bazı mekaniksel özellikleri ve

- yetişme muhitiinin toprak özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Dumlupınar Üniv., Kütahya, 2018.
- [30] Ö. Dalman, “Kalem imalatında kullanılacak ağaç malzemenin kimyasal yönden incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniv., Trabzon, 1996.
- [31] İ. Bilici, “Ders Notu”, Hitit Üniv., Çorum, Nis. 2016.
- [32] S. K. Ritter, “Lignocellulose: A Complex Biomaterial.” <https://cen.acs.org/articles/86/i49/Lignocellulose-Complex-Biomaterial.html>.
Erişim tarihi: 27 Kasım 2022
- [33] R. Toczyłowska-Mamińska, “Limits and perspectives of pulp and paper industry wastewater treatment – A review”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 78, pp. 764–772, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.021>.
- [34] H. Zengin, “Yonga levha ve lif levha endüstrisinde odun hammaddesi sağlanması sorunları ve çözüm yolları”, Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniv., İstanbul, 2010.
- [35] O. Ashrafi, L. Yerushalmi, and F. Haghighat, “Wastewater treatment in the pulp-and-paper industry: A review of treatment processes and the associated greenhouse gas emission”, *J. Environ. Manage.*, vol. 158, pp. 146–157, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.05.010>.
- [36] D. Pokhrel and T. Viraraghavan, “Treatment of pulp and paper mill wastewater—a review”, *Sci. Total Environ.*, vol. 333, no. 1, pp. 37–58, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.05.017>.
- [37] M. Kamali and Z. Khodaparast, “Review on recent developments on pulp and paper mill wastewater treatment”, *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 114, pp. 326–342, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.05.005>.
- [38] W. Wang, Q. Yue, R. Li, F. Bu, X. Shen, and B. Gao, “Optimization of coagulation pre-treatment for alleviating ultrafiltration membrane fouling: The role of floc properties on Al species”, *Chemosphere*, vol. 200, pp. 86–92, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.02.114>.
- [39] B. Liu *et al.*, “Coagulation behavior of polyaluminum-titanium chloride composite coagulant with humic acid: A mechanism analysis”, *Water Res.*, vol. 220, p. 118633, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118633>.
- [40] W. Lan *et al.*, “Characteristic of a novel composite inorganic polymer coagulant—PFAC prepared by hydrochloric pickle liquor”, *J. Hazard. Mater.*, vol. 162, no. 1, pp. 174–179, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.05.032>.
- [41] H. N. P. Dayarathne, M. J. Angove, R. Aryal, H. Abuel-Naga, and B. Mainali,

- “Removal of natural organic matter from source water: Review on coagulants, dual coagulation, alternative coagulants, and mechanisms”, *J. Water Process Eng.*, vol. 40, p. 101820, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101820>.
- [42] X. Wang, Y. Gan, S. Guo, X. Ma, M. Xu, and S. Zhang, “Advantages of titanium xerogel over titanium tetrachloride and polytitanium tetrachloride in coagulation: A mechanism analysis”, *Water Res.*, vol. 132, pp. 350–360, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.081>.
- [43] M. S. S. Abujazar, S. U. Karaağaç, S. S. Abu Amr, M. Y. D. Alazaiza, and M. J. K. Bashir, “Recent advancement in the application of hybrid coagulants in coagulation-flocculation of wastewater: A review”, *J. Clean. Prod.*, vol. 345, p. 131133, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131133>.
- [44] C. Y. Teh, T. Y. Wu, and J. C. Juan, “Potential use of rice starch in coagulation–flocculation process of agro-industrial wastewater: Treatment performance and flocs characterization”, *Ecol. Eng.*, vol. 71, pp. 509–519, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.07.005>.
- [45] N. Chaibakhsh, N. Ahmadi, and M. A. Zanjanchi, “Use of *Plantago major* L. as a natural coagulant for optimized decolorization of dye-containing wastewater”, *Ind. Crops Prod.*, vol. 61, pp. 169–175, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.06.056>.
- [46] C. Özmetin and E. Özmetin, “Pihtılaştırma ve yumaklaştırma”, in *Su ve Atık Su Mühendisliği Tasarım Esasları ve Uygulamaları*, Nobel Kitap, 2015, pp. 6-1,6-22.
- [47] S. Lamperski, L. B. Bhuiyan, D. Henderson, and M. Kaja, “Monte Carlo Study of a Planar Electric Double Layer Formed by Ions with Off-Center Charge”, *Langmuir*, vol. 33, no. 42, pp. 11554–11560, Oct. 2017, doi: [10.1021/acs.langmuir.7b01677](https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.7b01677).
- [48] A. H. Jalil and U. Pyell, “Quantification of Zeta-Potential and Electrokinetic Surface Charge Density for Colloidal Silica Nanoparticles Dependent on Type and Concentration of the Counterion: Probing the Outer Helmholtz Plane”, *J. Phys. Chem. C*, vol. 122, no. 8, pp. 4437–4453, Mar. 2018, doi: [10.1021/acs.jpcc.7b12525](https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b12525).
- [49] İ. Öztürk, H. Timur, and U. Koşkan, *Atıksu Arıtımının Esasları-Evsel, Endüstriyel Atıksu Arıtımı ve Arıtma Çamurlarının Kontrolü*.
- [50] E. S. Tarleton and R. J. Wakeman, *Solid/Liquid Separation: Equipment Selection and Process Design*. Great Britain: Institution of Chemical Engineers, 2007.
- [51] T. Suopajarvi, “Functionalized nanocelluloses in wastewater treatment applications”, Ph. D . dissertation, University of Oulu, Finland, 2015.

- [52] M. A. A. Razali, Z. Ahmad, M. S. B. Ahmad, and A. Ariffin, "Treatment of pulp and paper mill wastewater with various molecular weight of polyDADMAC induced flocculation", *Chem. Eng. J.*, vol. 166, no. 2, pp. 529–535, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.11.011>.
- [53] M. Irfan, T. Butt, N. Imtiaz, N. Abbas, R. A. Khan, and A. Shafique, "The removal of COD, TSS and colour of black liquor by coagulation–flocculation process at optimized pH, settling and dosing rate", *Arab. J. Chem.*, vol. 10, pp. S2307–S2318, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.08.007>.
- [54] S. C. Kim, "Application of response surface method as an experimental design to optimize coagulation–flocculation process for pre-treating paper wastewater," *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 38, pp. 93–102, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.04.010>.
- [55] D. Pereira, M. V. Gil, V. I. Esteves, N. J. O. Silva, M. Otero, and V. Calisto, "Ex-situ magnetic activated carbon for the adsorption of three pharmaceuticals with distinct physicochemical properties from real wastewater", *J. Hazard. Mater.*, vol. 443, p. 130258, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130258>.
- [56] T. Reynolds and P. Richards, *Çevre Mühendisliğinde Temel İşlemler ve Süreçler*, Efil Yayınevi, Ankara, 2011.
- [57] M. Feizi and M. Jalali, "Removal of heavy metals from aqueous solutions using sunflower, potato, canola and walnut shell residues", *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 54, pp. 125–136, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2015.03.027>.
- [58] N. Esfandiar, B. Nasernejad, and T. Ebadi, "Removal of Mn(II) from groundwater by sugarcane bagasse and activated carbon (a comparative study): Application of response surface methodology (RSM)", *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 20, no. 5, pp. 3726–3736, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.12.072>.
- [59] E. Özmetin, Y. Yaşar, and A. D. Karaoğlu, "Pirinç kabuğu ile metilen mavisi gideriminin optimizasyonu", *III. Fiziksel Kimya Günleri*, Balıkesir, 2012.
- [60] N. N. Rudi *et al.*, "Evolution of adsorption process for manganese removal in water via agricultural waste adsorbents", *Heliyon*, vol. 6, no. 9, p. e05049, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05049>.
- [61] A. R. Shawwa, D. W. Smith, and D. C. Sego, "Color and chlorinated organics removal from pulp mills wastewater using activated petroleum coke", *Water Res.*, vol. 35, no. 3, pp. 745–749, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00322-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00322-5).

- [62] H. Temmink and K. Grolle, “Tertiary activated carbon treatment of paper and board industry wastewater”, *Bioresour. Technol.*, vol. 96, no. 15, pp. 1683–1689, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.12.035>.
- [63] E. Priya, S. Kumar, C. Verma, S. Sarkar, and P. K. Maji, “A comprehensive review on technological advances of adsorption for removing nitrate and phosphate from waste water”, *J. Water Process Eng.*, vol. 49, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103159>.
- [64] T. A. Saleh, M. Mustaqeem, and M. Khaled, “Water treatment technologies in removing heavy metal ions from wastewater: A review”, *Environ. Nanotechnology, Monit. Manag.*, vol. 17, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100617>.
- [65] M. Bassandeh, A. Antony, P. Le-Clech, D. Richardson, and G. Leslie, “Evaluation of ion exchange resins for the removal of dissolved organic matter from biologically treated paper mill effluent”, *Chemosphere*, vol. 90, no. 4, pp. 1461–1469, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.09.007>.
- [66] R. Lin, Y. Li, T. Yong, W. Cao, J. Wu, and Y. Shen, “Synergistic effects of oxidation, coagulation and adsorption in the integrated fenton-based process for wastewater treatment: A review”, *J. Environ. Manage.*, vol. 306, p. 114460, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114460>.
- [67] G. Koyuncu Türkay, “Beta-Laktam grubu antibiyotik kalıntılarının atıksularda tespiti ve fenton, fotokatalitik, elektro-fenton oksidasyon yöntemleri ile arıtılabilirliğinin incelenmesi”, Doktora tezi, Mersin Üniv., Mersin, 2019.
- [68] S. Puri and A. Verma, “Color removal from secondary treated pulp & paper industry effluent using waste driven Fe–TiO₂ composite”, *Chemosphere*, vol. 303, p. 135143, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135143>.
- [69] M. Zhang, H. Dong, L. Zhao, D. Wang, and D. Meng, “A review on Fenton process for organic wastewater treatment based on optimization perspective”, *Sci. Total Environ.*, vol. 670, pp. 110–121, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.180>.
- [70] Y. Süzen, “Tekstil endüstrisi boyar maddelerinin fenton oksidasyonu ile sulu ortamlardan giderimi ve yanıt yüzey yöntemiyle (YYY) optimizasyonu”, Yüksek lisans tezi, Balıkesir Üniv., Balıkesir, 2015. [71]
- [71] A. Eduardo da Hora Machado *et al.*, “Solar photo-Fenton treatment of chip board production waste water”, *Sol. Energy*, vol. 77, no. 5, pp. 583–589, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.03.024>.

- [72] M. Mišík *et al.*, “Impact of ozonation on the genotoxic activity of tertiary treated municipal wastewater”, *Water Res.*, vol. 45, no. 12, pp. 3681–3691, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.04.015>.
- [73] H. Schaar, M. Clara, O. Gans, and N. Kreuzinger, “Micropollutant removal during biological wastewater treatment and a subsequent ozonation step”, *Environ. Pollut.*, vol. 158, no. 5, pp. 1399–1404, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.12.038>.
- [74] M. Mainardis, M. Buttazzoni, N. De Bortoli, M. Mion, and D. Goi, “Evaluation of ozonation applicability to pulp and paper streams for a sustainable wastewater treatment”, *J. Clean. Prod.*, vol. 258, p. 120781, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120781>.
- [75] Ö. B. Gökçek, “Melas atığı ve endüstriyel atıksu karışımının anaerobik ve membran hibrit sistemle arıtılabilirliği”, Doktora tezi, Cumhuriyet Üniv., Sivas, 2016.
- [76] Y. Zhang, C. Ma, F. Ye, Y. Kong, and H. Li, “The treatment of wastewater of paper mill with integrated membrane process”, *Desalination*, vol. 236, no. 1, pp. 349–356, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.10.086>.
- [77] Z. Beril Gönder, S. Arayıcı, and H. Barlas, “Advanced treatment of pulp and paper mill wastewater by nanofiltration process: Effects of operating conditions on membrane fouling”, *Sep. Purif. Technol.*, vol. 76, no. 3, pp. 292–302, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2010.10.018>.
- [78] J.-P. Wang, Y.-Z. Chen, Y. Wang, S.-J. Yuan, and H.-Q. Yu, “Optimization of the coagulation-flocculation process for pulp mill wastewater treatment using a combination of uniform design and response surface methodology”, *Water Res.*, vol. 45, no. 17, pp. 5633–5640, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.08.023>.
- [79] R. Saunamaki, “Activated sludge plants in Finland”, *Water Sci. Technol.*, vol. 35, no. 2, pp. 235–243, 1997, doi: [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(96\)00936-5](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(96)00936-5).
- [80] L. Dumlu, “Kağıt endüstrisi atıksularına uygun arıtma teknolojilerinin belirlenmesi ve türkiye’deki mevcut durumun analizi”, Uzmanlık tezi, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara, 2014.
- [81] A. Samsunlu, *Atık Suların Arıtılması*, 3. Baskı. İstanbul: Birsan Yayınevi, 2006.
- [82] J. A. Rintala and J. A. Puhakka, “Anaerobic treatment in pulp- and paper-mill waste management: A review”, *Bioresour. Technol.*, vol. 47, no. 1, pp. 1–18, 1994, doi: [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0960-8524(94)90022-1).
- [83] Ş. Özyurt and B. Camcıoğlu, “Applications of Combined Electrocoagulation and

- Electrooxidation Treatment to Industrial Wastewaters”, Ed. Rijeka: IntechOpen, 2018.
- [84] Á. Anglada, A. Urtiaga, and I. Ortiz, “Contributions of electrochemical oxidation to waste-water treatment: fundamentals and review of applications”, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 84, no. 12, pp. 1747–1755, Dec. 2009, doi: <https://doi.org/10.1002/jctb.2214>.
- [85] B. A. Fil, “Antep fıstığı işleme atıksularının elektrokoksiasyon yöntemiyle arıtılması”, Doktora tezi, Atatürk Üniv., Erzurum, 2014.
- [86] T. Kaygusuz, “Elektrokimyasal oksiasyon yönteminin tekstil atıksularının arıtılabilirliğine etkilerinin tam ölçekli araştırılması”, Yüksek lisans tezi, Namık Kemal Üniv., Tekirdağ, 2013.
- [87] A. Güngördü, “Atıksulardan ileri arıtım yöntemleri ile antibiyotik giderimi”, Doktora tezi, Anadolu Üniv., Eskişehir, 2018.
- [88] H. Särkkä, A. Bhatnagar, and M. Sillanpää, “Recent developments of electro-oxidation in water treatment — A review”, *J. Electroanal. Chem.*, vol. 754, pp. 46–56, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2015.06.016>.
- [89] G. Bampos, A. Petala, and Z. Frontistis, “Recent Trends in Pharmaceuticals Removal from Water Using Electrochemical Oxidation Processes”, *Environments*, vol. 8, no. 8, 2021, doi: 10.3390/environments8080085.
- [90] S. Kul, “Zeytin karasuyunun elektrokoksiasyon yöntemi ile arıtımının incelenmesi”, Doktora tezi, Atatürk Üniv., Erzurum, 2015.
- [91] F. C. Moreira, R. A. R. Boaventura, E. Brillas, and V. J. P. Vilar, “Electrochemical advanced oxidation processes: A review on their application to synthetic and real wastewaters”, *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 202, pp. 217–261, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.08.037>.
- [92] I. Linares-Hernández, C. Barrera-Díaz, B. Bilyeu, P. Juárez-GarcíaRojas, and E. Campos-Medina, “A combined electrocoagulation–electrooxidation treatment for industrial wastewater”, *J. Hazard. Mater.*, vol. 175, no. 1, pp. 688–694, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.064>.
- [93] A. Brink, C. Sheridan, and K. Harding, “Combined biological and advance oxidation processes for paper and pulp effluent treatment”, *South African J. Chem. Eng.*, vol. 25, pp. 116–122, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2018.04.002>.
- [94] E. GilPavas, I. Dobrosz-Gómez, and M.-Á. Gómez-García, “Efficient treatment for textile wastewater through sequential electrocoagulation, electrochemical oxidation

- and adsorption processes: Optimization and toxicity assessment”, *J. Electroanal. Chem.*, vol. 878, p. 114578, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2020.114578>.
- [95] T. Kaygusuz, “Elektrokimyasaloksidasyon yönteminin tekstil atıksularının arıtılabilirliğine etkilerinin tamölçekli araştırılması”, Yüksek lisans tezi, Namık Kemal Üniv., Tekirdağ, 2013.
- [96] B. Özyurt, “Applications of Combined Electrocoagulation and Electrooxidation Treatment to Industrial Wastewaters”, Ed. Rijeka: IntechOpen, 2018.
- [97] R. Homlok, E. Takács, and L. Wojnárovits, “Degradation of organic molecules in advanced oxidation processes: Relation between chemical structure and degradability”, *Chemosphere*, vol. 91, no. 3, pp. 383–389, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.11.073>.
- [98] S. Y. Guvenc, G. Varank, and A. Demir, “Effects of persulfate, peroxide activated persulfate and permanganate oxidation on treatability and biodegradability of leachate nanofiltration concentrate”, *Environ. Prot. Eng.*, vol. 46, no. 3, pp. 97–108, 2020.
- [99] Ş. Camcıoğlu, “Kağıt endüstrisi atıksularının elektrokimyasal yöntemle arıtılması”, Doktora tezi, Ankara Üniv., Ankara, 2016.
- [100] M. Panizza and G. Cerisola, “Olive mill wastewater treatment by anodic oxidation with parallel plate electrodes”, *Water Res.*, vol. 40, no. 6, pp. 1179–1184, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.01.020>.
- [101] B. Özyurt, “Evsel ve endüstriyel atık suların birleşik elektrokoagülasyon ve elektrooksidasyon prosesi ile arıtılması”, Doktora tezi, Ankara Üniv., Ankara, 2019.
- [102] A. Babuponnusami and K. Muthukumar, “A review on Fenton and improvements to the Fenton process for wastewater treatment”, *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 557–572, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.10.011>.
- [103] A. Y. Bagastyo, J. Radjenovic, Y. Mu, R. A. Rozendal, D. J. Batstone, and K. Rabaey, “Electrochemical oxidation of reverse osmosis concentrate on mixed metal oxide (MMO) titanium coated electrodes”, *Water Res.*, vol. 45, no. 16, pp. 4951–4959, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.06.039>.
- [104] K. Chanworrawoot and M. Hunsom, “Treatment of wastewater from pulp and paper mill industry by electrochemical methods in membrane reactor”, *J. Environ. Manage.*, vol. 113, pp. 399–406, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.09.021>.
- [105] D. Shao, J. Liang, X. Cui, H. Xu, and W. Yan, “Electrochemical oxidation of lignin by two typical electrodes: Ti/SbSnO₂ and Ti/PbO₂”, *Chem. Eng. J.*, vol. 244, pp.

- 288–295, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.01.074>.
- [106] N. Ardhan, T. Ruttithiwapanich, W. Songkasiri, and C. Phalakornkule, “Comparison of performance of continuous-flow and batch electrocoagulators: A case study for eliminating reactive blue 21 using iron electrodes”, *Sep. Purif. Technol.*, vol. 146, pp. 75–84, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.03.028>.
- [107] T. Babaei, M. Zarei, M. G. Hosseini, and M. M. Hosseini, “Electrochemical advanced oxidation process of Phenazopyridine drug waste using different Ti-based IrO₂-Ta₂O₅ anodes”, *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 117, pp. 103–111, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2020.12.004>.
- [108] R. M. Belal, M. A. Zayed, R. M. El-Sherif, and N. A. Abdel Ghany, “Advanced electrochemical degradation of basic yellow 28 textile dye using IrO₂/Ti meshed electrode in different supporting electrolytes”, *J. Electroanal. Chem.*, vol. 882, p. 114979, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2021.114979>.
- [109] M. Kobya, C. Ciftci, M. Bayramoglu, and M. T. Sensoy, “Study on the treatment of waste metal cutting fluids using electrocoagulation”, *Sep. Purif. Technol.*, vol. 60, no. 3, pp. 285–291, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.09.003>.
- [110] P. K. Holt, G. W. Barton, M. Wark, and C. A. Mitchell, “A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation,” *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 211, no. 2, pp. 233–248, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(02\)00285-6](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(02)00285-6).
- [111] R. Katal and H. Pahlavanzadeh, “Influence of different combinations of aluminum and iron electrode on electrocoagulation efficiency: Application to the treatment of paper mill wastewater”, *Desalination*, vol. 265, no. 1, pp. 199–205, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.07.052>.
- [112] Ö. Gökkuş, “Tıbbi atık sterilizasyon tesisi atıksuyunun elektrokimyasal metotlarla arıtımı”, Doktora tezi, Erciyes Üniv., Kayseri, 2014.
- [113] A. Fitch, P. Balderas-Hernandez, and J. G. Ibanez, “Electrochemical technologies combined with physical, biological, and chemical processes for the treatment of pollutants and wastes: A review,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 10, no. 3, p. 107810, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107810>.
- [114] G. Montes-Atenas, F. J. Garcia-Garcia, R. Mermillod-Blondin, and S. Montes, “Effect of suspension chemistry onto voltage drop: Application to electro-flotation”, *Powder Technol.*, vol. 204, no. 1, pp. 1–10, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.06.024>.

- [115] L. Ben Mansour, I. Ksentini, and B. Elleuch, “Treatment of wastewaters of paper industry by coagulation–electroflotation”, *Desalination*, vol. 208, no. 1, pp. 34–41, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.04.072>.
- [116] D. Baş and İ. H. Boyacı, “Modeling and optimization I: Usability of response surface methodology”, *J. Food Eng.*, vol. 78, no. 3, pp. 836–845, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.11.024>.
- [117] N. Volkan and E. Ozmetin, “Maxilon Blue GRL Boyar Maddesinin İllit Kil Minerali İle Gideriminin Optimizasyonu”, *Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 216–232, 2022.
- [118] J. Singla, I. Thakur, V. Sangal, and A. Verma, “Dimensionally stable anode (Doped-MMO) mediated electro-oxidation and multi-response optimization study for remediation of urea wastewater”, *Chemosphere*, vol. 285, p. 131498, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131498>.
- [119] S. Kaya *et al.*, “Glucose electrooxidation modelling studies on carbon nanotube supported Pd catalyst with response surface methodology and density functional theory”, *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 168, p. 110810, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2022.110810>.
- [120] Y. Wang, K. Chen, L. Mo, J. Li, and J. Xu, “Optimization of coagulation–flocculation process for papermaking-reconstituted tobacco slice wastewater treatment using response surface methodology”, *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 20, no. 2, pp. 391–396, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.04.033>.
- [121] A. Aygün, “Tekstil endüstrisi reaktif ve dispers boya banyo atıksularının elektrokoagülasyon prosesiyle arıtımı: yanıt yüzey yöntemiyle optimizasyon”, Doktora tezi, Selçuk Üniv., Konya, 2012.
- [122] D. Öztürk, “Ağrı dağı eteğinden toplanan pomza örnekleri üzerine kurşun (II) adsorpsiyonunun incelenmesi ve ortam koşullarının CYY (cevap yüzeyi yöntemi) ile optimizasyonu”, Yüksek lisans tezi, Yüzüncü Yıl Üniv., Van, 2013.
- [123] P. Kaur, J. P. Kushwaha, and V. K. Sangal, “Evaluation and disposability study of actual textile wastewater treatment by electro-oxidation method using Ti/RuO₂ anode”, *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 111, pp. 13–22, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.06.004>.
- [124] M. S. Kothari and K. A. Shah, “Electrochemical oxidation for decolorization of Rhodamine-B dye using mixed metal oxide electrode: modeling and optimization”, *Water Sci. Technol.*, vol. 81, no. 4, pp. 720–731, Apr. 2020, doi: [10.2166/wst.2020.151](https://doi.org/10.2166/wst.2020.151).

- [125] Y. G. Asfaha, F. Zewge, T. Yohannes, and S. Kebede, "Application of hybrid electrocoagulation and electrooxidation process for treatment of wastewater from the cotton textile industry", *Chemosphere*, vol. 302, p. 134706, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134706>.
- [126] M. Gholami Shirkoohi, R. D. Tyagi, P. A. Vanrolleghem, and P. Drogui, "Modelling and optimization of psychoactive pharmaceutical caffeine removal by electrochemical oxidation process: A comparative study between response surface methodology (RSM) and adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS)", *Sep. Purif. Technol.*, vol. 290, p. 120902, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120902>.
- [127] N. Daneshvar, A. R. Khataee, and N. Djafarzadeh, "The use of artificial neural networks (ANN) for modeling of decolorization of textile dye solution containing C. I. Basic Yellow 28 by electrocoagulation process", *J. Hazard. Mater.*, vol. 137, no. 3, pp. 1788–1795, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.05.042>.
- [128] E. Öztemel, *Yapay Sinir Ağları*. İstanbul: Papatya Yayıncılık, 2006.
- [129] D. Kumar and S. K. Gupta, "Electrochemical oxidation of direct blue 86 dye using MMO coated Ti anode: modelling, kinetics and degradation pathway", *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.*, vol. 181, p. 109127, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.109127>.
- [130] M. S. Kothari, K. G. Vegad, K. A. Shah, and A. Aly Hassan, "An artificial neural network combined with response surface methodology approach for modelling and optimization of the electro-coagulation for cationic dye", *Heliyon*, vol. 8, no. 1, p. e08749, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08749>.
- [131] A. Kuleyin *et al.*, "Combining Electro-Fenton and adsorption processes for reclamation of textile industry wastewater and modeling by Artificial neural Networks", *J. Electroanal. Chem.*, vol. 921, p. 116652, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2022.116652>.
- [132] F. E. Titchou *et al.*, "An overview on the elimination of organic contaminants from aqueous systems using electrochemical advanced oxidation processes", *J. Water Process Eng.*, vol. 41, p. 102040, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102040>.
- [133] I. Sirés, E. Brillas, M. A. Oturan, M. A. Rodrigo, and M. Panizza, "Electrochemical advanced oxidation processes: today and tomorrow. A review", *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 21, no. 14, pp. 8336–8367, 2014, doi: [10.1007/s11356-014-2783-1](https://doi.org/10.1007/s11356-014-2783-1).

- [134] D. Öztürk, “Mezbaha atıksularının elektrooksidasyon prosesi ile kesikli ve sürekli sistemde arıtımının incelenmesi”, Doktora tezi, Atatürk Üniv., Erzurum, 2019.
- [135] APHA, “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”. 19th Edition”, Washington DC., 1995.
- [136] G. İ. Alaton, “Electrocoagulation and advanced oxidation as intermediate effluent treatment steps for water reuse in a textile dyeing plant”, Doktora tezi, Boğaziçi Üniv., İstanbul, 2005.
- [137] R. A. Márquez-Montes, R. E. Orozco-Mena, A. A. Camacho-Dávila, S. Pérez-Vega, V. H. Collins-Martínez, and V. H. Ramos-Sánchez, “Optimization of the electrooxidation of aqueous ammonium sulfite for hydrogen production at near-neutral pH using response surface methodology”, *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 27, pp. 13821–13831, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.213>.
- [138] A. Aygün, “Tekstil endüstrisi reaktif ve dispers boya banyo atık sularının elektrokoagülasyon prosesi ile arıtımı: yanıt yüzey yöntemi ile optimizasyon”, Doktora tezi, Selçuk Üniv., Konya, 2012.
- [139] A. Arami-Niya, W. M. A. Wan Daud, F. S. Mjalli, F. Abnisa, and M. S. Shafeeyan, “Production of microporous palm shell based activated carbon for methane adsorption: Modeling and optimization using response surface methodology”, *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 90, no. 6, pp. 776–784, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2011.10.001>.
- [140] E. Gürtekin, “Koagülasyon/Flokülasyon prosesiyle peyniraltı suyunun fizikokimyasal arıtılabilirliği”, *Journal*, vol. 11, no. 2, pp. 17–22, 2011.
- [141] H. Dong, B. Gao, Q. Yue, Y. Wang, and Q. Li, “Effect of pH on floc properties and membrane fouling in coagulation – Ultrafiltration process with ferric chloride and polyferric chloride”, *Chemosphere*, vol. 130, pp. 90–97, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.03.049>.
- [142] M. A. Bezerra, R. E. Santelli, E. P. Oliveira, L. S. Villar, and L. A. Escaleira, “Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry”, *Talanta*, vol. 76, no. 5, pp. 965–977, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.05.019>.
- [143] C. S. D. Rodrigues, A. R. Neto, R. M. Duda, R. A. de Oliveira, R. A. R. Boaventura, and L. M. Madeira, “Combination of chemical coagulation, photo-Fenton oxidation and biodegradation for the treatment of vinasse from sugar cane ethanol distillery”, *J. Clean. Prod.*, vol. 142, pp. 3634–3644, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.044>.

- <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.104>.
- [144] A. K. Verma, R. R. Dash, and P. Bhunia, “A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters”, *J. Environ. Manage.*, vol. 93, no. 1, pp. 154–168, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.09.012>.
- [145] I. Arslan-Alaton, G. Tureli, and T. Olmez-Hanci, “Treatment of azo dye production wastewaters using Photo-Fenton-like advanced oxidation processes: Optimization by response surface methodology”, *J. Photochem. Photobiol. A Chem.*, vol. 202, no. 2–3, pp. 142–153, 2009, doi: [10.1016/j.jphotochem.2008.11.019](https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2008.11.019).
- [146] “Minitab support.” <https://support.minitab.com/en-us/minitab/21/> . Erişim tarihi: 02 Aralık 2008.
- [147] I. M. Iloamae, N. J. Nnaji, E. C. Okpala, A. N. Eboatu, and T. U. Onuegbu, “*Mercenaria mercenaria* shell: Coagulation-flocculation studies on colour removal by response surface methodology and nephelometric kinetics of an industrial effluent”, *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 9, no. 4, p. 105715, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105715>.
- [148] S. Ghafari, H. A. Aziz, and M. J. K. Bashir, “The use of poly-aluminum chloride and alum for the treatment of partially stabilized leachate: A comparative study”, *Desalination*, vol. 257, no. 1, pp. 110–116, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.02.037>.
- [149] R. Kaur, J. P. Kushwaha, and N. Singh, “Electro-oxidation of Ofloxacin antibiotic by dimensionally stable Ti/RuO₂ anode: Evaluation and mechanistic approach”, *Chemosphere*, vol. 193, pp. 685–694, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.065>.
- [150] N. Mohan, N. Balasubramanian, and C. A. Basha, “Electrochemical oxidation of textile wastewater and its reuse”, *J. Hazard. Mater.*, vol. 147, no. 1, pp. 644–651, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.063>.
- [151] M. Zhou, H. Särkkä, and M. Sillanpää, “A comparative experimental study on methyl orange degradation by electrochemical oxidation on BDD and MMO electrodes”, *Sep. Purif. Technol.*, vol. 78, no. 3, pp. 290–297, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.02.013>.
- [152] Y. A. Oktem, B. Yuzer, M. I. Aydin, H. E. Okten, S. Meric, and H. Selcuk, “Chloride or sulfate? Consequences for ozonation of textile wastewater”, *J. Environ. Manage.*, vol. 247, pp. 749–755, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.114>.

- [153] J. Qiao and Y. Xiong, “Electrochemical oxidation technology: A review of its application in high-efficiency treatment of wastewater containing persistent organic pollutants”, *J. Water Process Eng.*, vol. 44, p. 102308, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102308>.
- [154] A. Günay, “Anaerobik Arıtma Sistemlerinde Proses Tasarımı-Ders Notu”. <https://cevre.balikesir.edu.tr/index.php/prof-dr-ahmet-gunay-ders-notlari/anaerobik-aritma-sistemleri-proses-tasarimi/>. Erişim tarihi: 05 Aralık 2022
- [155] “Oksidasyon ve Redüksiyon Reaksiyonları-Açık Erişim Ders Notları.” https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/10655/mod_resource/content/0/oksidasyon-reduksiyon.pdf. Erişim tarihi: 07 Aralık 2022.
- [156] EPDK, “Elektrik Faturalarına Esas Tarife Tabloları.” <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tablolari>. Erişim tarihi: 03 Aralık 2022.
- [157] B. A. Fil, R. Boncukcuoğlu, and A. E. Yılmaz, “Electro-oxidation of pistachio processing wastewater using Ti/Pt mesh-type anodes in batch system”, *Water Environ. J.*, vol. n/a, no. n/a, Oct. 2022, doi: <https://doi.org/10.1111/wej.12828>.



EKLER

EKLER

EK A: (Değişik:RG-17/12/2022-32046) Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği

TABLO 13: SELÜLOZ, KAĞIT, KARTON VE BENZERİ SANAYİLERİN ATIKSULARININ ALICI ORTAMA DEŞARJ STANDARTLARI

Tablo 13.1: Selüloz, Kağıt, Karton ve Benzeri Sanayii (Saman, Yıllık Bitki ve Odundan Ağartılmamış Selüloz Üretimi ile Ağartılmamış Selüloz İle Üretilen Kağıt ve Kağıt Mamulleri)*

PARAMETRE	BİRİM	2 SAATLİK KOMPOZİT NUMUNE
KİMYASAL OKSİJEN İHTİYACI (KOİ)	(mg/L)	500
ASKIDA KATI MADDE (AKM)	(mg/L)	150
BALIK BİYODENEYİ (ZSF)	-	10
pH	-	6-9

* 1 ton kuru ürün başına tüketilen günlük ortalama debi miktarı 150 m³'ü aşamaz.

Tablo 13.2: Selüloz, Kağıt, Karton ve Benzeri Sanayii (Saman, Yıllık Bitki ve Odundan Ağartılmış Selüloz Üretimi ile Ağartılmış Selüloz İle Üretilen Kağıt ve Kağıt Mamulleri)*

PARAMETRE	BİRİM	2 SAATLİK KOMPOZİT NUMUNE
KİMYASAL OKSİJEN İHTİYACI (KOİ)	(mg/L)	500
ASKIDA KATI MADDE (AKM)	(mg/L)	150
BALIK BİYODENEYİ (ZSF)	-	10
pH	-	6-9

*1 ton kuru ürün başına tüketilen günlük ortalama debi miktarı 150 m³'ü aşamaz.

Tablo 13.3: Selüloz, Kağıt, Karton ve Benzeri Sanayii (Hurda Kağıttan Ağartılmamış ve Ağartılmış Selüloz Üretimi ile Bu Selülozlar ile Üretilen ve Harmanında Hazır Selüloz ve/veya Odun Hamuru İhtiva Edebilen Kağıt ve Kağıt Mamulleri)*

PARAMETRE	BİRİM	2 SAATLİK KOMPOZİT NUMUNE
KİMYASAL OKSİJEN İHTİYACI (KOİ)	(mg/L)	350
ASKIDA KATI MADDE (AKM)	(mg/L)	150
BALIK BİYODENEYİ (ZSF)	-	8
RENK	(Pt-Co)	280
pH	-	6-9

* 1 ton kuru ürün başına tüketilen günlük ortalama debi miktarı 150 m³'ü aşamaz.

Tablo 13.4: Selüloz, Kağıt, Karton ve Benzeri Sanayii (Tutkallanmış, Tutkallanmamış En Fazla %5 Odun Hamuru İçeren Odun Hamursuz Kağıt Üretimi)

PARAMETRE	BİRİM	2 SAATLİK KOMPOZİT NUMUNE
KİMYASAL OKSİJEN İHTİYACI (KOİ)	(mg/L)	175
RENK	(Pt-Co)	280
pH	-	6-9

TABLO 16: AĞAÇ MAMULLERİ VE MOBİLYA SANAYİİ ATIKSULARININ ALICI ORTAMA DEŞARJ STANDARTLARI (SUNTA, DURALİT, KERESTE, DOĞRAMA, KUTU, AMBALAJ, MEKİK VE BENZERİ)

PARAMETRE	BİRİM	2 SAATLİK KOMPOZİT NUMUNE
KİMYASAL OKSİJEN İHTİYACI (KOİ)	(mg/L)	90
ÇÖKEBİLİR KATI MADDE	(ml/L)	0.5
pH	-	6-9

EK B: KMO Elektrot Bilgi Formu

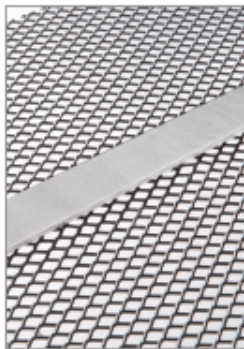


Versión: 9 October 2018



PLATINODE®

MMO ANODES



Optimal Results with Perfect Price/Performance Ratio

Mixed metal oxide anodes (MMO) are dimensionally stable and suitable for a wide range of applications. The electrolytes can be alkaline-cyanide to strongly acidic.

MMO anodes persuade with a perfect price/performance ratio. They have a low oxygen over-voltage compared to other electrocatalytical surfaces. This results in less energy and minimized organic additive consumption. Customers benefit from significantly prolonged lifespans of the electrolyte.

A wide range of anode shapes is possible. Therefore, they can be optimally adapted to the design of the components, which shall be plated.

Due to their electrochemical characteristics the anodes are well suited in electroplating for metal deposition out of sensitive electrolytes and for water treatment.



Advantages

- Reduced consumption of organic additives
- High current densities possible
- Improved performance, prolonged lifetime of electrolytes
- Uniform layer thickness distribution
- No anode sludge, no anode maintenance

Applications

- Metal deposition out of sensitive electrolytes
- Water treatment

TECHNICAL SPECIFICATIONS

Fields of Application of Different MMO Anodes	
Ruthenium electrolytes, strongly acid	177
Platinum electrolytes, strongly acid	177
Rhodium electrolytes, strongly acid	177
Gold electrolytes, strongly acid	177
Gold electrolytes, weakly acid	147
Gold electrolytes, alkaline	147
Bronze electrolytes, cyanide-alkaline	167
Silver electrolytes, cyanide-alkaline	167
Acid copper	187 50, 177
Halogen-containing electrolytes	177
Decorative CR3+ electrolytes	187 LOC
Zinc/Zinc alloy electrolytes, alkaline	177, 187 LOC
Pd electrolytes, Pd/Ni alloy electrolytes, ammoniacal	187 50
Pd/Ni alloy electrolytes ammonium-free, chloride-free	187 50

Fields of Application of Different MMO Anodes	
Nickel/nickel alloy electrolytes	177, 187 LOC
Drinking water conditioning	197
Treatment of swimming pool water	197

EK C: Anyonik Nişasta (Emfloc KA 3 (F 9976)) Güvenlik Bilgi Formu.

according to Regulation (EC) No 1907/2006

Emfloc KA 3 (F 9976)

Print date: 26.04.2016

Product code: 5000125

Page 1 of 5

SECTION 1: Identification of the substance/mixture and of the company/undertaking

1.1. Product identifier

Emfloc KA 3 (F 9976)

CAS No: 9063-38-1

1.2. Relevant identified uses of the substance or mixture and uses advised against

Use of the substance/mixture

drinking water treatment

1.3. Details of the supplier of the safety data sheet

Company name: Emsland-Stärke GmbH

Werk Emlichheim

Street: Emslandstrasse 58

Place: D-49824 Emlichheim

Post-office box: 1140

D-49820 Emlichheim

Telephone: +49 (0) 5943/81-0

Telefax: +49 (0) 5943/81-205

e-mail:

Internet:

Responsible Department: Documents Department - Products

1.4. Emergency telephone

+49 (0) 5943/81-0 (during office hours: 8.00 - 16.00)

number:

SECTION 2: Hazards identification

2.1. Classification of the substance or mixture

This substance is not classified as hazardous according to Directive 67/548/EEC.

GHS classification

This substance is not classified as hazardous according to Regulation (EC) No. 1272/2008.

2.2. Label elements

SECTION 3: Composition/information on ingredients

3.1. Substances

Chemical characterization

Starch, carboxymethyl ether, sodium salt

CAS-No.: 9063-38-1

SECTION 4: First aid measures

4.1. Description of first aid measures

General information

in case of skin contact defatty behaviour.

After inhalation

Provide fresh air.

After contact with skin

Rinse immediately with plenty of water.

After contact with eyes

Rinse immediately carefully and thoroughly with eye-bath or water. Medical treatment necessary.

Emfloc KA 3 (F 9976)

Print date: 26.04.2016

Product code: 5000125

Page 2 of 5

After ingestion

Rinse mouth thoroughly with water.

SECTION 5: Firefighting measures

5.1. Extinguishing media

Suitable extinguishing media

All, water gives glue formation.

Unsuitable extinguishing media

Where appropriate water.

5.2. Special hazards arising from the substance or mixture

Can be released in case of fire: Carbon dioxide (CO₂). Carbon monoxide. Hydrogen chloride (HCl).

5.3. Advice for firefighters

In case of fire: Wear self-contained breathing apparatus.

SECTION 6: Accidental release measures

6.1. Personal precautions, protective equipment and emergency procedures

Avoid skin contact.

6.2. Environmental precautions

Keep away from aquatic environment, high solubility, high COD/BOD-value.

6.3. Methods and material for containment and cleaning up

Dust avoiding take up, rests rinse with water.

SECTION 7: Handling and storage

7.1. Precautions for safe handling

Advice on safe handling

Avoid dusting conditions.

Advice on protection against fire and explosion

Avoid dust deposits. Clean working area. Keep away from sources of ignition - No smoking. Dust explosion risk.

Further information on handling

Use explosion-protected machinery, apparatus, suction equipment, appliances etc.

7.2. Conditions for safe storage, including any incompatibilities

Requirements for storage rooms and vessels

Keep cool and dry in closed bags.

Further information on storage conditions

15 - 25 °C store temperature, max. 65 % humidity

SECTION 8: Exposure controls/personal protection

8.1. Control parameters

Exposure limits (EH40)

CAS No	Substance	ppm	mg/m ³	fibres/ml	Category	Origin
9005-25-8	Starch, respirable	-	4		TWA (8 h)	WEL
		-	-		STEL (15 min)	WEL
9005-25-8	Starch, total inhalable	-	10		TWA (8 h)	WEL
		-	-		STEL (15 min)	WEL

according to Regulation (EC) No 1907/2006

Emfloc KA 3 (F 9976)

Print date: 26.04.2016

Product code: 5000125

Page 3 of 5

8.2. Exposure controls

Appropriate engineering controls

Care for good ventilation/absorption at work.

Protective and hygiene measures

No dangerous substance, however pay attention for universal precaution in handling with chemicals.

Eye/face protection

Under dusting conditions: Wear eye/face protection.

Hand protection

Wear protective gloves

Respiratory protection

Under dusting conditions:
breathing mask filter P1

SECTION 9: Physical and chemical properties

9.1. Information on basic physical and chemical properties

Physical state:	Scaling
Colour:	white - off-white
Odour:	characteristic

Test method

Changes in the physical state

Explosive properties

dust explosive, Dust explosion category: ST 1

Lower explosion limits:	60 g/m ³
Upper explosion limits:	-
Ignition temperature:	400 - 450 °C
Water solubility: (at 20 °C)	completely

9.2. Other information

see data sheet

SECTION 10: Stability and reactivity

10.4. Conditions to avoid

Keep away from sources of ignition - No smoking

10.5. Incompatible materials

Water. Acids.

10.6. Hazardous decomposition products

Does not decompose by proper application.

Further information

None

SECTION 11: Toxicological information

11.1. Information on toxicological effects

Acute toxicity

LD50, oral: > 2000 mg/kg
LD50, dermal: > 2000 mg/kg
LC50, inhalativ, dust: > 5mg/l/4 h

according to Regulation (EC) No 1907/2006

Emfloc KA 3 (F 9976)

Print date: 26.04.2016

Product code: 5000125

Page 4 of 5

Irritation and corrosivity

unknown

Sensitising effects

unknown

Specific effects in experiment on an animal

Toxicological data are not available

Practical experience

Observations relevant to classification

Has de-greasing effect on the skin.

SECTION 12: Ecological information

12.1. Toxicity

LC50 (fish, 96 h): > 100mg/l

EC50 (daphnia, 48 h): > 100mg/l

IC50 (algae, 72 h): > 100 mg/l

12.2. Persistence and degradability

Chemical Oxygen Demand (COD) approximate 1100 mg O2/g

Product is biodegradable

12.4. Mobility in soil

No mobility in the ground.

SECTION 13: Disposal considerations

13.1. Waste treatment methods

Waste disposal number of waste from residues/unused products

020304 WASTES FROM AGRICULTURE, HORTICULTURE, AQUACULTURE, FORESTRY, HUNTING AND FISHING, FOOD PREPARATION AND PROCESSING; wastes from fruit, vegetables, cereals, edible oils, cocoa, coffee, tea and tobacco preparation and processing; conserve production; yeast and yeast extract production; molasses preparation and fermentation; materials unsuitable for consumption or processing

Waste disposal number of used product

020304 WASTES FROM AGRICULTURE, HORTICULTURE, AQUACULTURE, FORESTRY, HUNTING AND FISHING, FOOD PREPARATION AND PROCESSING; wastes from fruit, vegetables, cereals, edible oils, cocoa, coffee, tea and tobacco preparation and processing; conserve production; yeast and yeast extract production; molasses preparation and fermentation; materials unsuitable for consumption or processing

Contaminated packaging

Waste disposal according to official state regulations

SECTION 14: Transport information

Land transport (ADR/RID)

14.2. UN proper shipping name: No dangerous good in sense of this transport regulation.

Inland waterways transport (ADN)

14.2. UN proper shipping name: No dangerous good in sense of this transport regulation.

Marine transport (IMDG)

14.2. UN proper shipping name: No dangerous good in sense of this transport regulation.

Air transport (ICAO)

14.2. UN proper shipping name: No dangerous good in sense of this transport regulation.

Safety Data Sheet

according to Regulation (EC) No 1907/2006

Emfloc KA 3 (F 9976)

Print date: 26.04.2016

Product code: 5000125

Page 5 of 5

SECTION 15: Regulatory information

15.1. Safety, health and environmental regulations/legislation specific for the substance or mixture

EU regulatory information

Additional information

In accordance with Article 33 of Regulation (EC) 1907/2006 (Reach), including the last update of ECHA committee (info: <http://echa.europa.eu/candidate-list-table>) we declare that the product does not contain any substances of very high concern (SVHC list).

National regulatory information

Water contaminating class (D): 1 - slightly water contaminating

SECTION 16: Other information

EK D: Flo30 Kimyasal Güvenlik Bilgi Formu



FLOCULANT 30

Zararlı Maddeler ve karışımlarına ilişkin güvenlik bilgi formları hakkındaki yönetmelik ve eklerine göre hazırlanmıştır. (R.G. Tarih : 13.12.2014 ve No: 29204)
Revizyon no. 4
Revizyon tarihi: 19/09/2018
Basım tarihi: 25/10/2018
Sayfa no. 1 / 11

Güvenlik Bilgi Formu

BÖLÜM 1. Maddenin/karışımın ve şirketin/dağıtıcının kimliği

1.1. Madde/Karışım kimliği

Kod: UZFL30
Unvanı: FLOCULANT 30
Kimyevi ismi ve eşanlamlılar: karışım

1.2. Madde veya karışımın belirlenmiş kullanımları ve tavsiye edilmeyen kullanımları

Tanımlama/Kullanım: Flokulant
Tanımlanan kullanım alanı dışında kullanılmaz.

1.3. Güvenlik bilgi formu tedarikçisinin bilgileri

Şirket Unvanı: UZ-AR MÜHENDİSLİK KİMYA SANAYİ VE DİŞ TİCARET LTD. ŞTİ.
Adres: İstanbul Cad. Mektep Arkası Sok. Şengüler İş Hanı No:2 D: 4
Mevki ve Ülke: 34142 BAKIRKOY -İSTANBUL
TÜRKİYE

Güvenlik Bilgi Formu Danışma

1.4. Acil durum telefon numarası

Acil bilgiler için danışınız: ZEHİRLİLİK MERKEZİ (POİSON CENTER) 114 YANGIN (FIRE) 110 POLİS (POLICE)155

BÖLÜM 2. Zararlılık tanımlanması

2.1. Madde veya karışımın sınıflandırılması

Ürün, Maddelerin ve karışımların sınıflandırılması, etiketlenmesi ve ambalajlanması hakkında yönetmelik hükümleri (ve sonraki değişiklikler ve uyarlamalar) uyarınca tehlikeli olarak sınıflandırılmıştır. Ürün, 1272/2008 (AT) Yönetmeliği (CLP) hükümleri (ve sonraki değişiklikler ve uyarlamalar) uyarınca tehlikeli olarak sınıflandırılmıştır. Bu doğrultuda ürün, 1907/2006 (AT) Yönetmeliği hükümleri ve sonraki değişikliklerine uygun bir güvenlik bilgi formu düzenlenmesini gerektirir. Sağlık ve/veya çevreye yönelik olarak taşıdığı risklere ilişkin olası ilave bilgiler, işbu formun 11 ve 12. bölümlerinde bulunur.

Sınıflandırma ve tehlikelerin tanıtımı:

Göz Tahrişi, Zararlılık Kategorisi 2	H319	Ciddi göz tahrişine yol açar.
Ciltte Tahriş, Zararlılık Kategorisi 2	H315	Cilt tahrişine yol açar.

2.2. Etiket unsurları

Maddelerin ve karışımların sınıflandırılması, etiketlenmesi ve ambalajlanması hakkında yönetmelik ve ekleri ve sonraki değişiklikler ve uyarlamalar uyarınca tehlike etiketleri 1272/2008 (AT) Yönetmeliği (CLP) ve sonraki değişiklikler ve uyarlamalar uyarınca tehlike etiketleri.

GHS İşareti:



Uyarı Kelimesi:

Dikkat



FLOCULANT 30

Zararlı Maddeler ve karışımlarına ilişkin güvenlik bilgi formları hakkındaki yönetmelik ve eklerine göre hazırlanmıştır. (R.G. Tarih : 13.12.2014 ve No : 29204)
Revizyon no. 4
Revizyon tarihi 19/09/2018
Basım tarihi 25/10/2018
Sayfa no. 2 / 11

Zararlılık ifadesi:

H319 Ciddi göz tahrişine yol açar.
H315 Cilt tahrişine yol açar.

Önem ifadeleri:

P264 Elleçlemeden sonra su ve sabun ile iyice yıkayın.
P273 Çevreye verilmesinden kaçının.
P280 Koruyucu eldiven / göz koruyucu / yüz koruyucu kullanın.
P337+P313 Göz tahrişi kalıcı ise: Tıbbi yardım / bakım alın.

2.3. Diğer zararlar

Hâlihazırda mevcut bilgilere göre, ürün %0,1'den daha yüksek yüzdede PBT veya vPvB maddeleri içermez.

BÖLÜM 3. Bileşimi/içindekiler hakkında bilgi

3.1. Maddeler

İlgili olmayan bilgiler

3.2. Karışımlar

Kapsadıkları:

Tehlike açıklamalarının komple metinleri bilgi formunun 16. bölümünde bulunur.

Tanıtımı	Kons. %	Sınıflandırma 1272/2008 (CLP)
Polialüminyum klorür		
C.A.S. 1327-41-9	30	Met. Asnd. 1 H290, Akut Tok. 4 H302, Göz Tah. 2 H319, Cilt Tah. 2 H315
AT 215-477-2		
İNDEKS -		

BÖLÜM 4. İlk yardım önlemleri

4.1. İlk yardım tedbirlerinin tanımı

İlk yardım eğitilmiş ve şartlara uygun kişisel koruyucu donanımlı kişiler tarafından yapılmalıdır. Acil durumda müdahale ekibi için gereken koruyucu önlemler alınmalıdır.
GENEL UYARI : Maruz kalan kişinin üzerindeki kıyafetleri çıkarınız. Kendini iyi hissetmiyor ise ya da kendinde değilse hemen tıbbi yardım alınız. Mümkün ise etiketini gösteriniz
SOLUNUM: Maruz kalmış olan kişiyi kaza yerinden uzakta açık havaya çıkarınız. Solunum düzenli değil ise veya kesilirse, suni solunum uygulayınız. Mümkün ise suni solunum eğitilmiş kişiler tarafından uygun sistemlerle yapılmalıdır. Derhal tıbbi yardım alınız.
DERİ: Kirlenmiş giysileri üzerinden çıkarınız ve kirlenmiş giysileri güvenli bir şekilde ortamdaki uzaklaştırınız. Mümkünse derhal bir duş alınız. Maruz kalan bölgeyi bol su ile yıkayınız. Derhal tıbbi yardım alınız.
GÖZLER: Varsa lensleri çıkarın. Göz kapaklarını iyice açarak, derhal ve bol su ile en az 30/60 dakika yıkayınız. Derhal tıbbi yardım alınız.
YUTMA: Hasta kendinde ise ağız bol su ile çalkalayınız. KÜSTURMAYINIZ. Derhal tıbbi yardım alınız.

4.2. Akut ve sonradan görülen önemli belirtiler ve etkiler

Göz :Kızamıklık, ağrı, tahriş Deri : Kızamıklık , ağrı, tahriş. Solunum : öksürük, nefes darlığı, baş dönmesi, Yutma : Sindirim sisteminde tahriş, mide bulantısı, kusma, karın ağrısı Ek bilgi için Bakınız Bölüm 11.

4.3. Tıbbi müdahale ve özel tedavi gereği için ilk işaretler

Belirtilere göre tedavi edin (dekontaminasyon, hayati fonksiyonlar), bilinen herhangi bir spesifik antidotu yoktur.



FLOCULANT 30

Zararı Maddeler ve karışımlarına ilişkin güvenlik bilgi formları hakkındaki yönetmelik ve eklerine göre hazırlanmıştır. (R.G. Tarih : 13.12.2014 ve No : 29204)
Revizyon no: 4
Revizyon tarihi: 19/09/2018
Baskın tarihi: 25/10/2018
Sayfa no: 6 / 11

İş eldivenleri malzemesinin kati seçimi için aşağıdaki hususlar dikkate alınmalıdır: uyumluluk, degradasyon, kırılma süresi ve içine işleme. Müstahzarlar halinde, iş eldivenlerinin kimyasal maddelere dayanıklılığı, önceden tahmin edilebilir olmadığından, kullanmadan önce kontrol edilmelidir. Eldivenler, kullanım süresi ve şekline bağlı olan bir aşınma süresine tabidirler.

CİLT KORUMA

Kategori II profesyonel kullanım amaçlı uzun kollu iş giysileri ve güvenlik ayakkabıları giyiniz (ref. 89/686/EEC Direktifi ve EN ISO 20344 standardı). Koryucu giysileri çıkardıktan sonra su ve sabun ile yıkayınız.

GÖZ KORUMA

Hava geçirmez koryucu gözlük takılması tavsiye edilir (ref. EN 166 standardı).

SOLUNUM KORUMA

Maddenin veya üründe bulunan bir veya daha fazla maddenin eşik değerinin (ör. TLV-TWA) aşılması halinde, sınıfı (1, 2 veya 3) kullanım limiti konsantrasyonuna göre seçilecek olan B tip filtreli bir maskenin takılması tavsiye edilir. (ref. EN 14387 standardı). Farklı doğal gaz veya buharların ve/veya partiküllü gaz veya buharların (aerosol, duman, sis, vb.) bulunması halinde kombine tip filtreler öngörmek gerekir. Uygulanan teknik önlemlerin, işçinin dikkate alınmış eşik değerlerine maruziyetini sınırlandırmak için yeterli olmaması halinde, solunum yollarını koruma araçlarının kullanılması gerekir. Her halükarda maske ile sağlanan koruma sınırlıdır. Dikkate alınan maddenin kokusuz veya bunun koku eşiklerinin ilgili TLV-TWA değerinden daha fazla olması halinde ve acil durumda, kendi kendine yeterli açık devreli basınçlı hava solunum cihazı (ref. EN 137 standardı) veya dış hava alımlı solunum cihazı (ref. EN 138 standardı) takınız. Solunum yolları koruma donanımının doğru seçilmesi için, EN 529 standardını referans olarak alınız.

ÇEVRESEL MARUZİYET KONTROLLERİ

Havalandırma cihazlarından emisyonlar da dahil olmak üzere, üretim süreçlerinin emisyonları çevreyi koruma normatiflerine uygunluk açısından kontrol edilmelidir.

BÖLÜM 9. Fiziksel ve kimyasal özellikler

9.1. Temel fiziksel ve kimyasal özellikler hakkında bilgi

Fiziksel Durumu	sıvı
Renk	off brown-amber
Koku	karakteristik
Koku eşiği	Mevcut değil
pH	3-4
Erime noktası/donma noktası	Mevcut değil
Başlangıç kaynama noktası	Mevcut değil
Kaynama aralığı	Mevcut değil
Parlama noktası	> 93 °C
Buharlaşma hızı	Mevcut değil
Alevlenirlik katı ve gaz	Mevcut değil
Alt alevlenirlik limitleri	Mevcut değil
Ust alevlenirlik limitleri	Mevcut değil
Alt patlayıcı limitleri	Mevcut değil
Ust patlayıcı limitleri	Mevcut değil
Buhar basıncı	Mevcut değil
Buhar yoğunluğu	Mevcut değil
Bağıl yoğunluk	1,18±0,05 gr/cm³
Çözünürlük	suda çözülebilir
Dağılım katsayısı: n-oktanol/su	Mevcut değil
Kendiliğinden alevlenme ısısı	Mevcut değil
Bozunma sıcaklığı	Mevcut değil
Akışkanlık	Mevcut değil
Patlayıcı özellikler	Mevcut değil
Oksitleyici özellikler	Mevcut değil

9.2. Diğer bilgiler

Bulunmayan bilgiler



FLOCULANT 30

Zararı Maddeler ve kayımlarına ilişkin güvenlik bilgi formu hakkındaki yönetmelik ve eklerine göre hazırlanmıştır. (R.G: Tarih : 13.12.2014 ve No : 29204)
Revizyon no. 4
Revizyon tarihi 19/09/2018
Baskın tarihi 25/10/2018
Sayfa no. 7 / 11

Bu tehlike kategorisi açısından sınıflandırma kriterlerini karşılamıyor
UREME SİSTEMİ TOKSİSİTESİ
Bu tehlike kategorisi açısından sınıflandırma kriterlerini karşılamıyor
BELİRLİ HEDEF ORGAN TOKSİSİTESİ - TEK MARUZ KALMA
Bu tehlike kategorisi açısından sınıflandırma kriterlerini karşılamıyor
BELİRLİ HEDEF ORGAN TOKSİSİTESİ - TEKRARLI MARUZ KALMA
Bu tehlike kategorisi açısından sınıflandırma kriterlerini karşılamıyor
ASPIRASYON ZARARI
Bu tehlike kategorisi açısından sınıflandırma kriterlerini karşılamıyor

BÖLÜM 12. Ekolojik bilgiler

12.1. Toksikite

Ürün test verileri bulunmamaktadır. İpçikte yer alan girdilerin kabul edilmiş verileri verilmiştir. Bakınız Bölüm 12.

Polialüminyum klorür: Çevre için tehlikeli olarak sınıflandırılmaz. Çevre açısından uygun pH 5,5 - 8'de alüminyumun çözünürlüğü düşüktür. Alüminyum tuzları su ile ayrışır, böylece alüminyum hidroksitlerin hızlı bir şekilde oluşumu ve çökmesi sağlanır. PH <5.5 olduğunda, serbest iyon (Al³⁺) yaygın form haline gelir, bu pH'da artan kullanılabilirlik daha yüksek toksisiteye yansıtılır. PH 8.0-7.5'te çözünmezlik, çözünmeyen Al (OH)₃ varlığına bağlı olarak azalmaktadır. Daha yüksek pH'larda (pH > 8.0), kullanılabilirliği artıran daha çözünür Al (OH)₄⁻ türü baskın hale gelir. Alüminyum tuzları, nehirlere ve göllere kontrolsüz olarak salınmamalı ve 5 - 6.5 civarında pH değişiklikleri önlenmelidir.

12.2. Kalıcılık ve bozunabilirlik

Ürün test verileri bulunmamaktadır. İpçikte yer alan girdilerin kabul edilmiş verileri verilmiştir. Bakınız Bölüm 12.

12.3. Biyobirikim potansiyeli

Ürün test verileri bulunmamaktadır. İpçikte yer alan girdilerin kabul edilmiş verileri verilmiştir. Bakınız Bölüm 12.

Polialüminyum klorür : Bioakümülyasyon beklenmez.

12.4. Toprakta hareketlilik

Ürün test verileri bulunmamaktadır. İpçikte yer alan girdilerin kabul edilmiş verileri verilmiştir. Bakınız Bölüm 12.

12.5. PBT ve vPvB değerlendirmesinin sonuçları

Hâlihazırda mevcut bilgilere göre, ürün %0,1'den daha yüksek yüzdede PBT veya vPvB maddeleri içermez.

12.6. Diğer olumsuz etkiler

Ürünün su ve atık su yollarına girmesini engelleyiniz.

BÖLÜM 13. Bertaraf etme bilgileri

13.1. Atık işleme yöntemleri

Mümkün ise, tekrar kullanınız. Ürünün kalıntılar, tehlikeli özel atık olarak kabul edilmelidir. Bu ürünü kısmen içeren atıkların tehlikeliliği, yürürlükteki kanun hükümlerine göre değerlendirilmelidir.
Bertaraf etme, ulusal ve olası yerel kanunlara uygun olarak atık idaresi konusunda yetki sahibi bir şirkete teslim edilerek gerçekleştirilmelidir.
Atıkların taşınması ADR 'ye tabi olabilir.
KONTAMİNE AMBALAJLAR
Kontamine olmuş ambalajlar, atık idaresine ilişkin ulusal kanunlara uygun olarak geri kazanım veya imha edilmek üzere gönderilmelidir.

BÖLÜM 14. Taşımacılık bilgileri

14.1. UN numarası

ADR / RID, IMDG, 3264
IATA:

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : YELİZ SÜZEN

Doğum tarihi ve yeri :

e-posta :

Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi/ Çevre Mühendisliği	2015
Lisans	Balıkesir Üniversitesi/ Çevre Mühendisliği	2011
Lise	Bursa Kız Lisesi (Yabancı Dil Ağırlıklı)	2007

Yayın Listesi

A.Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

1. KORKMAZ MUSTAFA, ÖZMETİN ELİF, **SÜZEN YELİZ**, ÇALGAN ELİF, ÖZMETİN CENGİZ (2022). A new adsorbent (aluminum modified talc) for phosphate removal from alkaline solutions and optimization of data by central composite design. Desalination and Water Treatment, 245, 178- 190., Doi: 10.5004/dwt.2022.27977 (Yayın No: 7938681)
2. KORKMAZ MUSTAFA, ÖZMETİN CENGİZ, ÖZMETİN ELİF, **SÜZEN YELİZ** (2020). Modelling of boron removal from solutions by ion exchange for column reactor design in boron mine wastewater treatment. Desalination and Water Treatment, 179, 63-74., Doi: 10.5004/dwt.2020.25041 (Yayın No: 7938725)
3. ÖZMETİN CENGİZ, KORKMAZ MUSTAFA, ÖZMETİN ELİF, **SÜZEN YELİZ**, ÇALGAN ELİF (2019). Boron removal from solutions by talc clay. Desalination and Water Treatment, 172, 260-269., Doi:10.5004/dwt.2019.24829 (Yayın No: 5936260)
4. **SÜZEN YELİZ**, ÖZMETİN CENGİZ (2019). Removal of Reactive Black 5 dye using Fenton oxidation from aqueous solutions and optimization of response surface methodology. Desalination and Water Treatment, 172, 106-114., Doi: 10.5004/dwt.2019.24943 (Yayın No: 5936392)
5. ÖZMETİN ELİF, ÇALGAN ELİF, **SÜZEN YELİZ**, KORKMAZ MUSTAFA, ÖZMETİN CENGİZ (2017). Optimisation of Textile Industry Wastewater Treatment Using Bigadiç Zeolite (Clinoptilolite) By Response Surface Methodology. Journal of Environmental Protection and Ecology, 18(3), 1127- 1136. (Yayın No: 3676009)
6. KORKMAZ MUSTAFA, FIL BAYBARS ALI, ÖZMETİN CENGİZ, **SÜZEN YELİZ** (2014). Full Factorial Design of Experiments for Boron Removal From Colemanite Mine Wastewater Using Purolite S 108 Resin. Bulgarian Chemical Communications, 46(3), 594-601. (Yayın No: 2046695)
7. KORKMAZ MUSTAFA, ÖZMETİN CENGİZ, FIL BAYBARS ALI, ÖZMETİN ELİF, **SÜZEN YELİZ** (2013). Methyl Violet Dye Adsorption Onto Clinoptilolite Natural Zeolite

Isotherm and Kinetic Study. Fresenius Environmental Bulletin, 22(5), 1524-1533. (Yayın No: 202420)

B. Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında (proceedings) basılan bildiriler :

1. **SÜZEN YELİZ**, ÖZMETİN CENGİZ (2018). Removal of Reactive Black 5 With Fenton Oxidation From Aqueous Solutions And Optimization of Response Surface Methodology. 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECYCLING AND REUSE, 313-314. (Tam Metin Bildiri/Poster)(Yayın No:4446911)
2. KORKMAZ MUSTAFA, ÖZMETİN CENGİZ, ÖZMETİN ELİF, **SÜZEN YELİZ**, ÇALGAN ELİF, DURSUN MEHMET, ONUR DERSİM DENİZ (2018). Metilen Mavisinin Çinko Elektrodun Kullanıldığı Elektrokoagülasyon Prosesi ile Giderimi ve Optimizasyonu. Uluslararası Su ve Çevre Kongresi(SUÇEV) (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:4919140)
- 3.KORKMAZ MUSTAFA, ÖZMETİN CENGİZ, MUTLU ATILLA, **SÜZEN YELİZ**, ÖZMETİN ELİF, ÇALGAN ELİF, KEMAL KEMAL, DEMİRAL DİLAY, BOZ CEM UTKU, AYDIN CEREN, ENGİN ILKER (2018). Kireçli Toprak Üzerine Sulama Suyu Katyonlarının Bor Adsorpsiyonuna Etkisi ve Adsorpsiyonu. Uluslararası Su ve Çevre Kongresi (SUÇEV), 1270-1278. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:4918939)
- 4.ÖZMETİN ELİF, ÖZMETİN CENGİZ, ÇALGAN ELİF, **SÜZEN YELİZ**, KORKMAZ MUSTAFA (2018). Balıkesir İli Kuyu Sularında Metal Kirliliğinin Değerlendirilmesi. Uluslararası Su ve Çevre Kongresi(SUÇEV) (Özet Bildiri/Poster)(Yayın No:4446872)
- 5.ÖZMETİN CENGİZ, ÖZMETİN ELİF, **SÜZEN YELİZ**, ÇALGAN ELİF, KORKMAZ MUSTAFA (2018). Balya Terk Edilmiş Maden Atıklarından Kaynaklanan Kirliliğin Değerlendirilmesi. Uluslararası Su ve Çevre Kongresi (SUÇEV) (Özet Bildiri/Poster)(Yayın No:4446889)
- 6.KORKMAZ MUSTAFA, ÖZMETİN ELİF, ÖZMETİN CENGİZ, ÇALGAN ELİF, **SÜZEN YELİZ**, ZİYANAK ÖZNUR, KAPLAN LEYLA, ERKİLİNÇ EMRE, ARICI OZAN, TEKEZ AYTAÇ (2017). Boron Removal from Solutions by Chemical Coagulation-Precipitation Method Using Iron-III Chloride. International Congress of the New Approaches and Technologies for Sustainable Development (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:4935900)
- 7.ÖZMETİN ELİF, ÇALGAN ELİF, **SÜZEN YELİZ**, GÖNÜL FEYZA, AYYILDIZ TUGAY, ARSLAN GAMZE (2017). Development of Environmental Consciousness in Primary School Students. International Congress of the New Approaches and Technologies for Sustainable Development (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3602649)
- 8.KORKMAZ MUSTAFA, ÖZMETİN ELİF, ÖZMETİN CENGİZ, ÇALGAN ELİF, **SÜZEN YELİZ**, ZİYANAK ÖZNUR, KAPLAN LEYLA, ERKİLİNÇ EMRE, ARICI OZAN, TEKEZ AYTAÇ (2017). Boron Removal from Solutions by Chemical Coagulation-Precipitation Method Using Iron-III Chloride. International Congress of the New Approaches and Technologies for Sustainable Development (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3602640)
- 9.KORKMAZ MUSTAFA, ÖZMETİN CENGİZ, MUTLU ATILLA, **SÜZEN YELİZ**, ÖZMETİN ELİF, ÇALGAN ELİF (2017). Statistically Optimization of Effect of Soil Clay Type and Amount for Boron Adsorption onto Lime Soil. ICOCEE 2017 (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3602758)
10. ÖZMETİN ELİF, ÇALGAN ELİF, **SÜZEN YELİZ**, ÖZMETİN CENGİZ (2017). The Optimization Of Treatment Of Olive Oil Mill Wastewater By Bigadic Zeolite Using Responce Surface Methodology (Rsm). ICENS,3rd INTERNATIONAL CONFERENCE

ON ENGINEERING AND NATURAL SCIENCES (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3572056)

11.ÖZMETİN ELİF, ÇALGAN ELİF, **SÜZEN YELİZ**, KORKMAZ MUSTAFA, ÖZMETİN CENGİZ (2017). Tekstil Endüstrisi Atıksularının Bigadiç Zeoliti(Klinoptilolit) Kullanılarak Arıtımının Yüzey Yanıt Yöntemi ile Optimizasyonu (Bu bildiri kongre organizasyonu tarafından Journal of Environmental Protection and Ecology dergisi için Makale olarak seçildi ve basıldı). 2. Uluslararası Su ve Sağlık Kongresi, 2(1), 534-537. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:4935563)

12.GÜNDÜZ ZÜRRIYE, **SÜZEN YELİZ** (2016). Treatment of Leachate by Electrocoagulation Using Three Different Electrodes. 1ST International Black Sea Congress on Environmental Sciences (IBCESS) (Özet Bildiri/Poster)(Yayın No:2872649)

13.ÖZMETİN ELİF, ÖZMETİN CENGİZ, **SÜZEN YELİZ**, KORKMAZ MUSTAFA (2016). Determination of Priority Contamination Factors in Lake of Manyas Bird Paradise. International Conference on Engineering and Natural Science (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:2872636)

14.KORKMAZ MUSTAFA, ÖZMETİN CENGİZ, **SÜZEN YELİZ**, ÖZMETİN ELİF (2013). Effect of pH temperature and concentration on boron removal from solutions by Purolite S 108 resin in a fixed bed column reactor. The Second International Conference on Water, Energy and the Environment (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3547777)

15. ÖZMETİN CENGİZ, ÖZMETİN ELİF, **SÜZEN YELİZ** (2013). Wetlands And Their Problems In Turkey. International Conference West of The East The East of The West, 1, 3 (Tam Metin Bildiri/Poster)(Yayın No:204323)

16. **SÜZEN YELİZ**, ÖZMETİN CENGİZ, ÖZMETİN ELİF (2013). Renewable Energy Sources In The South Marmara Region. International Conference West of The East The East of The West, 1, 1 (Tam Metin Bildiri/Poster)(Yayın No:204001)

17. ÖZMETİN ELİF, ÖZMETİN CENGİZ, **SÜZEN YELİZ** (2013). Transboundry Waters Of Turkey. International Conference West of The East The East of The West, 1, 2 (Tam Metin Bildiri/Poster)(Yayın No:204109)

D. Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler :

1. KORKMAZ MUSTAFA, ÖZMETİN CENGİZ, **SÜZEN YELİZ**, MUTLU ATILLA (2022). Boron Adsorption on Lime Soil and Phytoremediation of Lime Soil by Potato Plant (Solanum Tuberosum L.). Celal Bayar University Journal of Science, 18(3), 239-247., Doi: 10.18466/cbayarfbe.961739 (Kontrol No: 7938694)

2. KORKMAZ MUSTAFA, ÖZMETİN CENGİZ, ÖZMETİN ELİF, ÇALGAN ELİF, **SÜZEN YELİZ** (2021). Boron Removal by Aluminum Modified Pumice and Aluminum Hydroxide from Boron Mine Wastewater-Full Factorial Experimental Design. Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi, 10(1), 1-13., Doi: 10.17100/nevbittek.828753 (Kontrol No: 7283512)

3. ÖZMETİN ELİF, ÖZMETİN CENGİZ, **SÜZEN YELİZ**, KORKMAZ MUSTAFA (2017). Determination of Priority Contamination Factors in Lake of Manyas (Bird Paradise). European Journal of Engineering and Natural Sciences, 2(1), 87-94. (Kontrol No: 4049409)

4. ÖZMETİN CENGİZ, ÖZMETİN ELİF, **SÜZEN YELİZ**, FİL BAYBARS ALI (2016). Metil Viyoleto Boyasının Aktif Karbon Kullanarak Adsorpsiyonla Gideriminin Response Surface Metodu ile Optimizasyonu. ÇMO - Çevre Bilim ve Teknoloji, 1(1), 1-8. (Kontrol No: 2872643)

5. KORKMAZ MUSTAFA, ÖZMETİN CENGİZ, FİL BAYBARS ALI, **SÜZEN YELİZ** (2013). Determination of Parameters Affecting Copper Removal from Solutions by Clinoptilolite: Adsorption Isotherm and Thermodynamic. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 3(1), 47-54. (Kontrol No: 201585)

E. Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler:

1. ÖZMETİN CENGİZ, ÖZMETİN ELİF, **SÜZEN YELİZ**, FİL BAYBARS ALI (2015). Metil Viyoleto Boyasının Aktif Karbon Kullanarak Adsorpsiyonla Gideriminin Response Surface Metodu ile Optimizasyonu. 11. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:2047696)
2. ÖZMETİN ELİF, **SÜZEN YELİZ**, ÖZMETİN CENGİZ, KORKMAZ MUSTAFA, ER EREN (2015). Sulu Ortamlardan Bigadiç Zeoliti Kullanarak Amonyum Gideriminin Response Surface Metodu ile Optimizasyonu. 11. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:2047932)
3. FİL BAYBARS ALI, KUL SINAN, KORKMAZ MUSTAFA, **SÜZEN YELİZ**, SERTKAYA SİMGE, TEKİN ELİF, ER EREN (2015). Sentetik Katyonik Boya İçeren Atıksuların Elek Tipi Anotlar Kullanılarak Arıtılması. Sağlıklı Su Yönetimi Kongresi (Tam Metin Bildiri/Poster)(Yayın No:2047222)
4. ÖZMETİN CENGİZ, ÖZMETİN ELİF, **SÜZEN YELİZ** (2012). Manyas Kuş Gölü Su Kalitesi İzlenmesi. 2.TÜRKİYE’DE ÇEVRE KİRLENMESİ ÖNCELİKLERİ SEMPOZYUMU VII, 1, 35 (Tam Metin Bildiri/Poster)(Yayın No:203847)
5. KORKMAZ MUSTAFA, ÖZMETİN CENGİZ, ÖZMETİN ELİF, **SÜZEN YELİZ** (2012). Klinoptilolit Üzerine Metil Viyoleto Boyası Adsorpsiyonu. III. Fiziksel Kimya Günleri (Özet Bildiri/Poster)(Yayın No:2046080)
6. ÖZMETİN ELİF, **SÜZEN YELİZ**, KARAOĞLAN ASLAN DENİZ (2012). Pirinç Kabuğu ile Metilen Mavisi Gideriminin Optimizasyonu. III. Fiziksel Kimya Günleri, 1, 229 (Özet Bildiri/Poster)(Yayın No:202761)