T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İLERİ OKSİDASYON\ULTRAFİLTRASYON HİBRİT SİSTEMİ KULLANILARAK TEKSTİL ATIKSULARINDAN ORGANİK MADDE GİDERİMİ

ŞEYDA AKSU
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2016

T.C.

GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İLERİ OKSİDASYON\ULTRAFİLTRASYON HİBRİT SİSTEMİ KULLANILARAK TEKSTİL ATIKSULARINDAN ORGANİK MADDE GİDERİMİ

ŞEYDA AKSU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI

DOÇ.DR. COŞKUN AYDINER

GEBZE

2016

T.R.

GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

TEXTİLE WASTEWATER REMOVAL ORGANİC MATTER USİNG BY ADVANCED OXİDATİON/ ULTRAFİLTRATİON

ŞEYDA AKSU

A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF

MASTER OF SCIENCE

DEPARTMENT OF ENVİRONMENTAL ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR

ASSOC. PROF. DR. COŞKUN AYDINER

GEBZE

2016

GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ	**YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU**

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 13/03/2016 tarih ve 2016/23 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 23/03/2016 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Şeyda AKSU 'nun tez çalışması Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE
(TEZ DANIŞMANI) :Doç. Dr. Coşkun AYDINER

ÜYE :Doç. Dr. H. Cengiz YATMAZ

ÜYE :Yrd. Doç. Dr. Berna KIRIL MERT

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve ..../..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu çalışmada İOP/batık UF hibrit prosesiyle tekstil yıkama sularının arıtılması çalışmaları gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada iki ayrı İOP'un (Fenton ve foto-Fenton) hedef atıksuyun arıtımındaki etkinliği araştırılmıştır. Proses performans etkinlikleri Taguchi deneysel tasarım esasında: pH, iletkenlik, TDS, H_2O_2/TOK, H_2O_2/Fe^{+2} parametrelerinin, foto-Fenton'da ilave olaraksa UVA ve UVC ışık şiddetlerinin etkisi altında incelenmiştir.

İOP/batık UF hibrit sistemde tekstil atıksuyunun Fenton prosesiyle arıtımı için belirlenmiş optimum proses işletme şartları sırasıyla: *t* (zaman), *T* (sıcaklık), pH, H_2O_2/TOK oranı, H_2O_2/Fe^{+2} oranı, v_H (İOP reaktörü havalandırma hızı), $v_{SÇ}$ (UF membranda su çekim hızı), M_T (Membran türü); 60 dk, 26.5^{o}C, 3.73, 6.0 g/g, 15.0 g/g, 1.8 L/dk, 80 rpm, UH050 membranı olarak belirlenmiştir. İOP/batık UF hibrit sistemde tekstil atıksuyunun UVA 365 foto-Fenton prosesiyle arıtımı için belirlenmiş optimum proses işletme şartları sırasıyla: *t*, *T*, pH, H_2O_2/TOK oranı, H_2O_2 /Fe^{+2} oranı, v_H, $v_{SÇ}$, M_T, $I_Ş$ (ışık şiddeti), I_T (ışık türü); 60 dk, 40°C, 4.0, 7.75 g/g, 10.75 g/g, 1 L/dk, 71.1 rpm, UV150 membranı, 3 lamba, UVA-365 olarak saptanmıştır. UVC-254 foto-Fenton prosesiyle arıtımı için belirlenmiş proses işletme şartları sırasıyla: 41 dk ,40°C , 4.44, 9.88 g/g , 7.27 g/g, 2.89 L/dk, 64.7 rpm, UH050 membranı, 3 lamba, UVC-254 olarak belirlenmiştir. Yenilikçi İOP/UF batık hibrit sistemde tekstil yıkama atıksularında organik madde giderimi; Fenton, UVA foto-fenton, UVC foto-Fenton prosesleri için TOK ve KOİ parametreleri sırasıyla; % 38,4, % 53,3, % 42,6 ve % 67,1, % 38,6, % 70 ile yüksek arıtım performansı elde edilmiştir.

Sonuç olarak görülmüştür ki, tekstil yıkama atıksularından organik madde gideriminde başarıyla uygulanmış olan yenilikçi İOP/UF batık hibrit sistemi; tekstil endüstrisi gibi yüksek miktarlarda su tüketimi ve atıksu oluşumu söz konusu olan endüstrilerdeki proses atıksularından organik madde gideriminde etkin bir şekilde kullanılabilirdir.

Anahtar Kelimeler: Tekstil Yıkama Atıksuyu, Hibrit Membran Proses, Fenton, Foto-Fenton, Ultrafiltrasyon, Organik Madde Giderimi.

SUMMARY

In this study textile washing's water is carried out with AOP/submerged UF hybrid process. In the first step, two different AOP's (fenton, photo-Fenton) activity was investigated for wastewater treatment. Process performance was investigated in Taguchi experimental design basis events: pH, conductivity, TDS, H2O2/TOK, H_2O_2/ Fe^{+2} parameters. For photo-Fenton It was also examined under the influence of UVA and UVC light intensity.

AOP / submerged UF hybrid system in the textile wastewater for treatment by the process of Fenton determined optimum process operating conditions, respectively: *t* (time), *T* (temperature), pH, H_2O_2/TOK rate, H_2O_2/Fe^{+2} rate, ν_H (AOP reactor aeration rate), $\nu_{SÇ}$ (UF membrane water withdrawal rate), M_T (Membrane type);60 min, 26.5^{o}C, 3.73, 6.0 g/g, 15.0 g/g, 1.8 L/min, 80 rpm, UH050 is determined as membrane. AOP / submerged UV 365 UF hybrid system in textile wastewater for treatment by the process of photo- Fenton determined optimum process operating conditions , respectively: *t*, *T*, pH, H_2O_2/TOK rate, H_2O_2 /Fe^{+2} rate, ν_H, $\nu_{SÇ}$, M_T, $I_Ş$ (light intensity), I_T (light type); 60 min, 40°C ,4.0 ,7.75 g/g ,10.75 g/g , 1 L/dk, 71.1 rpm, UV150 membrane, 3 lamp, UVA-365 it was determined. Innovative AOP / UV submerged hybrid systems for textile washing wastewaters organic matter removal in; Fenton, UV photo-Fenton, UVC photo-Fenton processes for TOC and COD parameters respectively; %38,4 and %53,3 ,%42,6 and %67,1 ,%38,6 and % 70 with high treatment performance was obtained.

Finally, it has been observed, textile washing wastewater removal of organic matter in the which has been successfully implemented innovative AOP/UF submerged hybrid system; textile industry, such as water consumption and high amounts of organic matter from wastewater generation in industrial process wastewater in which said removal is used effectively.

Key Words: Textile Washing Wastewater, Hybrid membrane process, Fenton, foto-Fenton, Ultrafiltration, Organic Matter Removal.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca her sıkıntımda desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyip değerli rehberliği ile bu çalışmanın oluşmasının yolunu açan danışmanım Doç. Dr. Coşkun AYDINER' e teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma TÜBİTAK 113Y352 nolu yoğun su tüketilen endüstrilerde bütünleşik ileri oksidasyon\ membran filtrasyon sistemi ile su geri kazanımı ve konsantre yönetimi konulu proje tarafından desteklenmiştir.

Tez çalışmalarım boyunca, vermiş olduğu fikirleriyle katkıda bulunan Doç. Dr. Hüseyin Cengiz YATMAZ' a,

Aynı zamanda tez çalışmama boyunca bana destek olan ve yardım eden değerli çalışma arkadaşlarım Ayşegül Yağmur GÖREN'e, Yasemin Melek TİLKİ'ye, Esin Balcı' ya çalışmamda manevi desteklerini hiç esirgemeyen sevgili arkadaşlarım Duygu TOPALOĞLU, Tuğba Nur YILMAZ, Serkan AKKÖSE, Okan KARATAŞ, Metin BAŞOĞLU 'na teşekkür ediyorum.

Benim bu aşamalara gelmem de katkısı olan aileme, sevgi, sonsuz destek, güven ve sabırlarından dolayı en içten dileklerimle teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLOLAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Önemi	1
1.2. Tekstil Endüstrisi	2
2. TEKSTİL ATIKSUYU VE ARITIM YÖNTEMLERİ	9
2.1.1. Basınç Sürücülü Membran Prosesler (MP) ile Arıtma	9
2.1.2. İleri Oksidasyon Prosesleri (İOP) ile Arıtma	10
2.1.3. Bütünleşik İOP/MP Sistemi ile Arıtma	19
3. MATERYAL VE YÖNTEM	22
3.1. Araştırma altyapısının kurulması	22
3.2. Kullanılan Tekstil Atıksuyunun Karakterizasyonu	26
3.3. Deneysel izleme ve analitik yöntemler	28
3.4. Deneysel Tasarım Yöntemi	29
3.5. Hibrit İOP/Batık UF Deneysel Çalışma Sonuçları	36
3.5.1. Tekstil Atıksularının İOP/Batık UF Hibrit Sistemde Arıtımı	36
4. Sonuçlar ve Değerlendirmeler	125
KAYNAKLAR	127
ÖZGEÇMİŞ	133

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Kısaltmalar		**Açıklamalar**
E_i	:	İletkenlik
J	:	Akı (LMH)
T	:	Sıcaklık (^oC)
T	:	Süre (dk)
$I_Ş$	:	Işık şiddeti
$v_{SÇ}$	:	Membrandan su çekim hızı
v_H	:	Hava akış hızı
ANOVA	:	Varyans analizi
AKM	:	Askıda katı madde
AOX	:	Adsorplanabilen organik halojenler
BOI	:	Biyolojik oksijen ihtiyecı
ÇO	:	Çözünmüş oksijen
ÇOK	:	Çözünmüş organik karbon
EPA	:	Çevre Koruma Ajansı
İB	:	İletim bandı
İOP	:	İleri oksidasyon prosesi
KOİ	:	Kimyasal oksijen ihtiyacı
M_T	:	Membran türü
MF	:	Mikrofiltrasyon
MP	:	Membran proses
NF	:	Nanofiltrasyon
pH	:	Hidrojen potansiyeli
TÇK	:	Toplam çözünmüş katı
TÇM	:	Toplam çözünmüş madde
TO	:	Ters osmos
TOK	:	Toplam organik karbon

UVA	:	Ultraviyole A
UVC	:	Ultraviyole C
UF	:	Ultrafiltrasyon
VB	:	Valans bandı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No:		Sayfa
1.1:	Tekstil üretim zinciri.	5
2.1:	Boyar madde içeren atıksuların arıtımında kullanılan prosesler diyagramı.	21
3.1:	İOP/batık UF hibrit reaktörü.	22
3.2:	Multiparametre cihazı.	24
3.3:	TOK ölçüm cihazı.	25
3.4:	Ölçüm cihazları.	25
3.5:	KOİ-H_2O_2 ilişki grafiği.	29
3.6:	Çalışmasında uygulanan deneysel tasarım yöntemi.	30
3.7:	Hibrit İOP/batık UF reaktörde lamba sayısına bağlı ışık şiddeti değişimleri.	32
3.8:	Değişim grafikleri.	45
3.9:	Değişim grafikleri.	46
3.10:	TOK giderim verimi (%) grafikleri.	49
3.11:	KOİ giderim verimi (%) grafikleri.	50
3.12:	Süzüntü akısı grafikleri.	51
3.13:	UH050 membranı için değişim grafikleri.	52
3.14:	TOK giderim verimi (%) grafikleri.	57
3.15:	KOİ giderim verimi (%) grafikleri.	58
3.16:	Süzüntü akısı grafikleri.	59
3.17:	Optimum işletme deneyi 1 için model ve deneysel performans sonuçları.	61
3.18:	Optimum işletme deneyi 2 için model ve deneysel performans sonuçları.	62
3.19:	Optimum işletme deneyi 1 için zamana karşı değişen TOK ve KOI giderim verimleri ve çıkış suyunda H_20_2 konsantrasyonu.	62
3.20:	Optimum işletme deneyi 2 için zamana karşı değişen TOK ve KOI giderim verimleri ve çıkış suyunda H_20_2 konsantrasyonu.	63
3.21:	Optimum işletme deneyi için zamana karşı değişen UF süzüntü akısı.	64

3.22: Optimum işletme deneyi 1 için zamana karşı değişen çıkış suyunda demir konsantrasyonları. 65
3.23: Optimum işletme deneyi 2 için zamana karşı değişen çıkış suyunda demir konsantrasyonları. 65
3.24: Değişim grafikleri. 72
3.25: Değişim grafikleri. 73
3.26: Giderim verimi grafikleri. 74
3.27: Değişim grafikleri. 75
3.28: TÇK değişim grafikleri. 76
3.29: Renk değişim grafikleri. 76
3.30: Giderim verimi grafikleri. 77
3.31: Membranların TOK giderim verimi grafikleri. 83
3.32: Membranların TOK giderim verimi grafikleri. 84
3.33: Membranların TOK giderim verimi grafikleri. 85
3.34: Membranlarının TOK giderim verimi grafikleri. 86
3.35: Membranlarının KOİ giderim verimi grafikleri. 87
3.36: Membranlarının KOİ giderim verimi grafikleri. 88
3.37: Membranlarının KOİ giderim verimi grafikleri. 89
3.38: Membranlarının KOİ giderim verimi grafikleri. 90
3.39: Membranların süzüntü akısı grafikleri. 91
3.40: Membranlarının süzüntü akısı grafikleri. 92
3.41: Değişim grafikleri. 93
3.42: TÇK değişim grafikleri. 94
3.43: Renk değişim grafikleri. 94
3.44: Değişim grafikleri. 95
3.45: TÇK değişim grafikleri. 96
3.46: Renk değişim grafikleri. 96
3.47: Membranların TOK giderim verimi grafikleri. 101
3.48: Membranların TOK giderim verimi grafikleri. 102
3.49: Membranlarının TOK giderim verimi grafikleri. 103
3.50: Membranlarının TOK giderim verimi grafikleri. 104
3.51: Membranlarının KOİ giderim verimi grafikleri. 105

3.52: Membranlarının KOİ giderim verimi grafikleri. 106
3.53: Membranlarının KOİ giderim verimi grafikleri. 107
3.54: Membranlarının KOİ giderim verimi grafikleri. 108
3.55: Membranlarının süzüntü akısı grafikleri. 109
3.56: Membranlarının süzüntü akısı grafikleri. 110
3.57: Membranlarının süzüntü akısı grafikleri. 111
3.58: UVC-254 kullanılan optimum işletme deneyi 1 için model ve deneysel performans sonuçları. 114
3.59: UVA-365 kullanılan optimum işletme deneyi 2 için model ve deneysel performans sonuçları. 114
3.60: UVC-254 kullanılan optimum işletme deneyi 3 için model ve deneysel performans sonuçları. 115
3.61: UVA-365 kullanılan optimum işletme deneyi 4 için model ve deneysel performans sonuçları. 115
3.62: UVC-254 kullanılan optimum işletme deneyi 1 için zamana karşı değişen TOK ve KOI giderim verimleri ve çıkış suyunda H_20_2 konsantrasyonu. 116
3.63: UVA-365 kullanılan optimum işletme deneyi 2 için zamana karşı değişen TOK ve KOI giderim verimleri ve çıkış suyunda H_20_2 konsantrasyonu. 116
3.64: UVC-254 kullanılan optimum işletme deneyi 3 için zamana karşı değişen TOK ve KOI giderim verimleri ve çıkış suyunda H_20_2 konsantrasyonu. 117
3.65: UVA-365 kullanılan optimum işletme deneyi 4 için zamana karşı değişen TOK ve KOI giderim verimleri ve çıkış suyunda H_20_2 konsantrasyonu. 117
3.67: Optimum işletme deneyi 2 için zamana karşı değişen çıkış suyunda demir konsantrasyonları. 118
3.68: Optimum işletme deneyi 3 için zamana karşı değişen çıkış suyunda demir konsantrasyonları. 119
3.69: Optimum işletme deneyi 4 için zamana karşı değişen çıkış suyunda demir konsantrasyonları. 119

3.70: Her bir optimum işletme deneyi için zamana karşı değişen UF süzüntü akıları. 120
3.71: Aynı atıksuyla işletilen OD3 ve 21 no'lu tekrar deneyine ait performans sonuçları. 123
3.72: Fenton ve foto-Fenton destekli İOP/batık UF hibrit reaktörde tekstil atıksuyunu optimum arıtım performanslar. 124

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo No: **Sayfa**

3.1: Çalışmasında kullanılan UF, $NF_{gevşek-sıkı}$, TO membranları listesi. 26

3.2: Tekstil Endüstrisi Atıksuyu Karakterizasyonu. 27

3.3: Tekstil endüstrisi atıksuyunda analiz parametreleri ve yöntemleri. 28

3.4: İOP/UF hibrit sistem Taguchi tasarım deneyleri değişkenleri ve seviyeleri. 31

3.5: Fenton deneyleri için değişkenlerin kodlanmış değerlerini içeren Taguchi deneysel tasarım tablosu. 34

3.6: Foto–Fenton deneyleri için değişkenlerin kodlanmış değerlerini içeren Taguchi deneysel tasarım tablosu. 35

3.7: İO prosesi için değişkenlerin deneysel değerlerini içeren Taguchi deneysel tasarım tablosu ve her bir sonuç parametresi için deneysel sonuçlar. 37

3.8: UF prosesi için deneysel sonuçlar. 38

3.9: TOK ve KOİ giderim verimleri (%). 39

3.10: İOP reaktörün performans parametreleri için lineer model (Model I) ANOVA analiz sonuçları. 41

3.11: İOP reaktörü için proses performans parametrelerine ait model denklemleri. 42

3.12: Batık UF prosesi performans parametreleri için lineer model (Model I) ANOVA analiz sonuçları. 47

3.13: Batık UF prosesi performans parametrelerine ait model denklemleri. 48

3.14: Fenton prosesiyle arıtımında proses performans parametreleri için lineer modelin (Model I) ANOVA analiz sonuçları. 55

3.15: Fenton prosesiyle arıtımda proses performans parametreleri için model denklemleri. 56

3.16: Fenton prosesiyle arıtımda optimum proses işletme şartları. 60

3.17: İO prosesi için Taguchi deneysel tasarım tablosu ve deneysel sonuçlar. 67

3.18 : UF prosesi için Taguchi deneysel tasarım tablosu ve deneysel sonuçlar. 68
3.19: TOK ve KOİ giderim verimleri (%). 69
3.20: İOP reaktörün performans parametreleri için lineer model (Model I) ANOVA analiz sonuçları. 70
3.21: İOP reaktörü için proses performans parametrelerine ait model denklemleri. 71
3.22: Batık UF prosesi performans parametreleri için lineer model (Model I) ANOVA analiz sonuçları. 79
3.23: Batık UF prosesi performans parametrelerine ait model denklemleri. 82
3.24: Proses performans parametreleri için lineer modelin (Model I) ANOVA analiz sonuçları. 98
3.25: Batık UF prosesi performans parametrelerine ait model denklemleri. 99
3.26: Foto-Fenton prosesiyle arıtımı için belirlenmiş optimum proses işletme şartları. 113

1. GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Önemi

Gelişen dünya ve artan nüfusla orantılı olarak endüstrilerin gelişmesi ile birlikte su kaynaklarının kullanımı da her geçen gün artmakta ve buna paralel olarak da doğal kaynakların tüketimi hızlanmaktadır. Endüstriler çevre kirliliğini oluşturan en büyük etmenlerden biridir. Endüstriyel üretim esnasında ve sonrasında çevre kirliliğine neden olan değişik özellikte atıklar oluşmaktadır. Endüstriyel gelişme ve üretime paralel olarak, oluşacak atıkların en aza indirilmesi için yeni teknolojilere ve ileri arıtım tekniklerine başvurulması gerekmektedir. Çevrenin korunmasına yönelik getirilen yasal düzenlemeler ve işletmelerde su ihtiyacının giderek artmasından dolayı teknolojilerin iyileştirilmesi, atık su oluşumunun en aza indirilmesi, değerli maddelerin kazanılması ve suların tekrar kullanımı gündeme gelmektedir

Ülkemizde kişi başına su tüketimi 1650-1700 m3/yıl civarında olup, bugün ki nüfus artış hızı ve kalkınma verileri ışığında 2025-2030 yılları arasında su fakiri (<1500 m^3/kişi. yıl) ülke durumuna düşeceğimiz konunun uzmanları tarafından iyi bilinen ve dikkatlice takip edilen bir gerçektir. Bunun yanı sıra, Ülkemizdeki sanayi tesislerinin sayısı ve faaliyet çeşitliliklerinin artması ile endüstriyel su taleplerinin arttığı da iyi bilinmektedir. Ayrıca, sanayicimizin ulusal ve uluslararası pazarlarda yüksek rekabet gücüne sahip olabilmeleri hususu dikkate alındığında, yüksek miktarlarda su tüketen sanayi kollarında ürün maliyetleri içerisinde önemli girdiler oluşturmaya başlamış "*su tarifesi*" payının düşürülmesine de ihtiyaç bulunmaktadır. Zira böyle bir ihtiyacın varlığı, yoğun su tüketimine haiz endüstrilerdeki bazı üst düzey yöneticiler/sanayiciler/sektör temsilcileri tarafından da ifade edilmektedir.

Yukarıda bahsi geçen hususlar ortaya koymaktadır ki; Yüksek hacimlerde atıksu üretilen endüstriyel tesislerde, proseste yeniden kullanım amacıyla atıksudan suyun geri kazanıldığı, bu sayede su kaynaklarımızın etkin korunarak beraberinde endüstriyel üretim maliyetlerinin azaltıldığı arıtma uygulamaları geliştirilmesine ihtiyaç/gerek bulunmaktadır. Sadece Ülkemizi değil aynı zamanda birçok Dünya ülkesini de yakından ilgilendiren bu durumun varlığı, ilgili endüstrilerde su teminine

ve atıksu arıtımına yönelik bütünleşik teknolojilerin geliştirilerek, çevre korumaya dayalı yenilikçi, ekonomik ve uygulanabilir su ve atıksu yönetimi yaklaşımlarının hayata geçirilmesini gerekli kılmaktadır.

1.2. Tekstil Endüstrisi

Tekstil endüstrisi kategorisi, doğal ve fabrikasyon elyafları kullanarak kumaş ve diğer tekstil ürünleri üreten tesisleri kapsar. Fabrikasyon elyafların üretimi ve giyim sanayi bu kategorinin dışındadır. Tekstil endüstrisi doğal ve fabrikasyon ipliklerin hazırlanması, dokuma, örme veya başka yöntemlerle kumaş, triko, halı gibi tekstil ürünleri haline getirilmesi, iplik ve kumaşlara boya, baskı, apre gibi terbiye işlemlerinin uygulanması işlemlerini içerir [1].

- Pamuklu Tekstil Endüstrisi

Pamuk elyafı, iplik yapımı, dokuma hazırlık ve ürünlerin terbiyesi olarak üç aşamada işlenir. İplik yapımı, açma temizleme, tarama, çekme, eğirme, bobinleme gibi işlemleri kapsar. Bunlar çoğunlukla mekanik kuru işlemlerdir. Dokuma hazırlık işlemleri, bobin ve çile hazırlanması, çözgüler, haşıllama ve dokuma işlemlerini kapsar, bu işlemler de kuru işlemlerdir. Terbiye işlemlerinde önemli miktarlarda su kullanımı vardır. Başlıca terbiye işlemleri; haşıl sökme, yıkama, pişirme, merserizasyon, boyama ve apreleme işlemleridir [1].

Pamuklu tekstil atık suları, bazik özellikte, işlenen boyanın hakim olduğu renkte ve debisi yüksek atıklardır. Pamuklu, yünlü ve sentetik üretim yapılan süreçlerde, kimyasal madde ve bitim işlemlerinin farklı oluşu, atık suların karakterinin de bir tekstil tesisinden diğerine çok değişmesine sebep olmaktadır.

Ortalama büyüklükte bir pamuklu tekstil tesisi için, nişastalı atıklar toplam atık su hacminin %16'sını, BOİ değerinin %5,3'ünü, toplam katıların %36'sını ve alkalinitenin % 6'sını oluşturur.

Pamuklu tekstil endüstrisinde kullanılan en önemli kimyasal madde olan kostik soda ile pişirme işlemi sonucunda kostik soda içeren atıklar oluşur. Kostik sodalı atık, atık su hacminin %19'unu, BOİ'nin %37'sini, toplam katıların %43'ünü ve

toplam alkalinitenin %60'ını oluşturur. Kompozit atığın geri kalan kısmını yıkama, ağartma, boyama ve apre atıkları oluşturur. Bunlar toplam atığın hacimce %65'ini, BOİ'nin %10'unu, toplam katı maddenin %2'sini ve toplam alkalinitenin %34'ünü oluşturur [2].

- Yünlü Tekstil

Pamuklu tekstil ile aynı aşamalarda gerçekleştirilen yünlü tekstil işlemlerinde ilk ve en önemli fark yünün (yaprak, yapağı) yıkanmasıdır. Çok kirli yağlı atık su oluşturan bu işlem ayrı bir alt kategori oluşturur. İlk aşamada yüne, taraklama gibi işlemler yapılır ve sentetik madde katkıları da yapılarak bobinlere sarılır ve dokunur. Terbiye işlemleri arasında karbonizasyon, dinkleme, yıkama, boyama ve apre işlemleri yapılır. Boyamada başlıca asit, metalize ve mordant boyalar kullanılır, sonra sıcak su veya kimyasal maddeler ile fiksaj yapılır. Apre işlemleri, keçeleşmezlik işlemi ve pamuklu kumaşlara uygulanan diğer işlemleri kapsar [1]. Yünlü tekstil atık suları, yıkama-temizleme tesisi atıkları, yünün boyanması ve bitirme işlemlerinden gelen atık sulardır. Yünlü tekstil atık sularının genel özellikleri, yüksek asidite, çeşitli organik maddeler, boyalar, aktif yıkama maddeleri, tuzlar ve yüksek derişimde yağ içermesi olarak özetlenebilir [3].

- Sentetik Tekstil

Selülozik ve organik polimerlerin elyafları pamuk ve yünlülere karıştırılarak veya ayrı olarak iplik hazırlama, haşıl sökme, boyama ve apre işlemlerinden geçer. Boyamada asit, bazik, dispers gibi boyalar kullanılır [1].

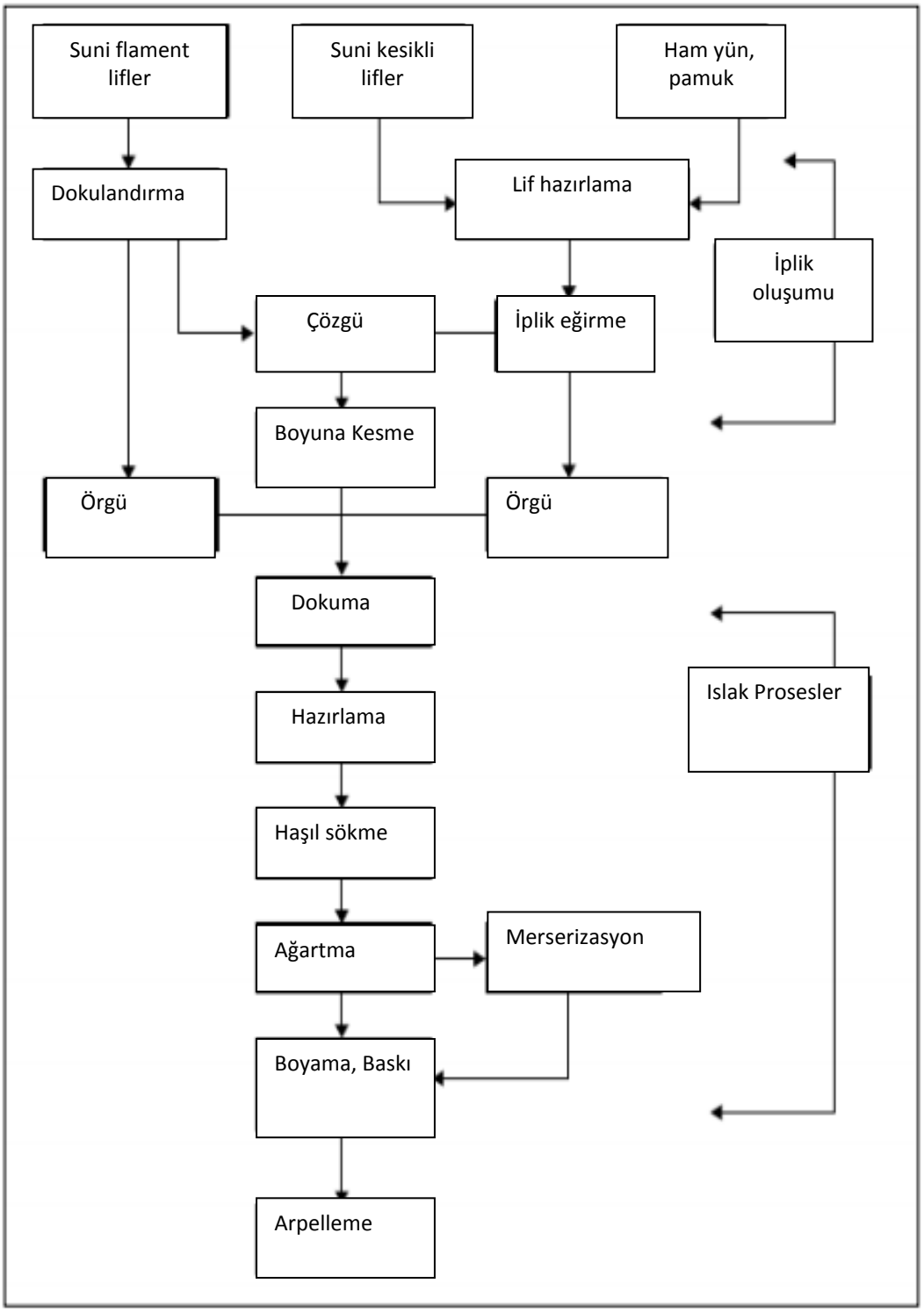
Tekstil endüstrisinde boyama, yıkama ve durulama işlemlerinden kaynaklanan atık sular yüksek derişimde çözünmüş madde içermekte, kompleks ve polar yapıdaki reaktif boyalardan dolayı yoğun renge sahiptir. Tekstil endüstrisi atık sularında boyama ve pigment baskı rengi oluşturan süreçlerdir. Boyarmaddeler ve pigmentler tekstil materyallerine estetik ve fonksiyonel amaçlarla renk vermek için kullanılan yoğun renkli maddelerdir. Tipik bir boyama sürecinde boyarmaddenin % 50-100 arasında kumaşa tutunması sağlanır. Geriye kalan boyarmadde, boya banyosu atık suyu olarak ya da diğer tekstil yıkama işlemlerinden gelen atık sularla birleştirilerek deşarj edilir [2].

- Tekstil Endüstrisi Genel Süreçleri

Tekstil endüstrisinde üretimde yer alan süreç ve işlemler, işlenen elyafa bağlı olmaksızın tanım olarak birbirine benzerler. Endüstride uygulanan ana işlemler, haşıllama, haşıl sökme, ağartma, merserize etme, boyama, apreleme olmak üzere gruplandırılabilirler [4].

Tekstil endüstrisinde işlenen elyaf çeşitleri ise, pamuklu, yünlü ve sentetik elyaflardır. Kullanılan elyafın özelliğine bağlı olarak farklı üretim işlemlerine de rastlanmaktadır. Örneğin, yünlü ürünlere uygulanan karbonizasyon işlemi pamuklu ürünlerde merserizasyon adını alır ya da pamuk ve sentetik elyaflarda başlangıçta yıkamayı gerektirecek bir kirlilik bulunmamasına karşın, yün elyafların çok kirli olmasından dolayı elyafın iplik haline getirilebilmesi için önceden yıkama işlemine tabi tutulması gerekmektedir. Yünlü dokuma endüstrisini kirleticilik bakımından diğer tekstil gruplarından ayıran en önemli fark bu yıkama işlemidir [4].

Tekstil endüstrisinde, yapağı ve ipliklerin yıkanması, ağartma, boyama ve son ürünlerin yıkanması gibi işlemlerin başından sonuna kadar yüksek hacimlerde su kullanılmaktadır. Ayrıca, tekstil fabrikalarında daha düşük maliyetli olan nehir, göl ve kuyu sularının da ek kaynak olarak kullanımı yaygındır. Başlangıçta kullanılan büyük miktarlardaki suyun az bir kısmı üründe yer almakta ve sonuçta üründe kullanılmayan kısım büyük hacimde atık su olarak çıkmaktadır [5].



Şekil 1.1: Tekstil üretim zinciri.

- Haşıllama

İnce kumaşların dokunması esnasında çok ince iplik kullanılır. Fakat bu incelikteki iplik, dokuma sırasında maruz kalacağı gerilimlerin etkisiyle kopar. Bu tür durumlarda, doğal nişasta ve dekstrin gibi maddeler kullanılarak kumaş geçici olarak sağlamlaştırılır. Bu işleme haşıllama denir [4], [6], [7].

Haşıl maddesi, dokuma sırasında meydana gelebilecek aşınma ve kopmaları önlemek için çözgü ipliklerine uygulanır. Böylece çeşitli mekanik zorlamalarla karsı karşıya kalan lifler birbirine daha iyi yapışarak, daha kapalı, daha sağlam bir hale gelir ve kayganlıklarının artması sağlanarak dokumada performans arttırılır [8].

Haşıl maddeleri çoğunlukla doğal nişastalar, modifiye selülozlar ve sentetiklerdir. Sentetik ipliklerde haşıl maddesi olarak nişasta bileşikleri yerine polivinil alkol, karboksi metil selüloz ve poliakrilik asit gibi maddelerin kullanımı biyolojik oksijen ihtiyacını azaltır. Atık sulardaki biyolojik oksijen ihtiyacını artıran en büyük etkenler arasına haşıl maddeleri girmektedir[9], [2].

- Yıkama ve Haşıl Giderme

Yıkama süreci elyaf üzerindeki tozun ve kimyasal maddelerin giderildiği bir ön yıkamayı ve enzimatik veya ön işlemler ile bazı yardımcı maddelerin uzaklaştırıldığı haşıl sökme kademelerini içermektedir. Bu işlem tekstil atık sularında toplam kirlilik yükünün yaklaşık %50'sini oluşturur. Boyama ve apreleme için temiz kumaş hazırlamak amacıyla sodyum hidroksit, klor, silikatlar, sodyum bisülfit ve deterjanlar, nişastanın hidrolizi için asitler ve enzimler kullanılır. Uygulanan elyafın cinsine göre; kullanılacak kimyasal, suyun sıcaklığı ve temas süreleri değişir. Yıkama toplam atık yükünün %30 artmasına sebep olur. Boyama süreçlerinden önce haşıl maddelerinin giderilmesi önemlidir. Aksi halde haşıl maddeleri boyanın elyafa nüfus etmesini engeller veya boyanın rengini değiştirir[4], [6], [7].

- Ağartma

Haşıl sökme ve yıkama ile giderilemeyen renk verici maddeleri gidermek için ağartma süreçi uygulanır. Doğal renklendiricileri gidermek için bu aşamada hidrojen peroksit, sodyum hipoklorit, sodyum klorür ve kükürt dioksit gazı gibi maddeler kullanılır. Bunlardan hidrojen peroksit özellikle pamuklu kumaşların ağartılmasında

kullanılır. Peroksit su ve oksijene bozunur ve çözünmemiş katı parçalar ya da gözlenebilen artıklar bırakır. Peroksit ilavesi atık akımında oksijen miktarını arttırır [4], [6], [7].

Ağartma süreçi 3 adımda gerçekleştirilir; kumaş ağartıcı maddeler, aktifleştirici katkı maddeleri, stabilizör ve diğer gerekli kimyasallarla doyurulur. Kumaşın, yeterli sıcaklıkta, yeterli süre ağartıcıyla teması sağlanır. Kumaş yıkanır ve kurutulur. Tekstil atık sularında toplam BOİ'nin yaklaşık %5'i, toplam KOİ' nin %9'u ağartma süreçinden gelmektedir [4], [6].

- Merserize Etme

Merserizasyon işleminin asıl amacı pamuk elyafının parlaklığını düzenlemektir. Merserizasyon sonucu, pamuk lifleri daha pürüzsüz bir görünüm kazanır. Doğal pamuklu elyaftan %20 daha kuvvetli bir hal alır ve boyamada afinitesi artar. Pamuklu dokumaların ağartılması NaOH çözeltisi ile yapılmaktadır. Bu uygulama, daha çok dokumanın boyanabilmesi ve absorblama karakterini düzeltebilmek içindir. Merserizasyondan çıkan atık sular yüksek alkalinite ihtiva eder [4], [6], [7].

- Boyama

Boyarmaddeler genellikle iki ana bileşenden oluşan küçük moleküllerdir; rengi veren kromofor ve boyayı ipliğe bağlayan fonksiyonel grup. Literatürde kimyasal yapısına göre veya uygulandığı ipliğin tipine göre sınıflandırılmış yüzlerce boya çeşidi mevcuttur. Boyanın iplik üzerine adsorbe olması tekstil ipliğine ve boyanın tipine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Adsorbsiyonun derecesi zaman, sıcaklık, pH ve yardımcı kimyasallar gibi çeşitli faktörlerin de etkisi altındadır. Yardımcı kimyasalların kullanımıyla boyama süreci çıkış sularında boyarmaddeler haricinde çok sayıda farklı bileşikler de bulunur. Tek bir boyama işlemi için farklı kimyasal sınıftaki boyarmaddelerin birlikte kullanılabiliyor olması çıkış suyu bileşimini daha da karmaşık hale getirmektedir. Boyama süreci çıkış sularındaki kimyasal yük, sürecin kimyasının yanı sıra boyama işleminin kesikli ya da sürekli olmasına bağlı olarak da farlılıklar göstermektedir [10], [11].

Boyama işlemi kirlilik yükünün %20-%40'ını oluşturmasına karşılık yüksek derecede renklilik ve çok miktarda atık oluşturur [4], [7].

- Apreleme

Fiziksel ve kimyasal özellikleri değişen kumaşın işlenmesi apreleme olarak adlandırılır. Apreleme işlemi ile görünüş, yumuşaklık, sağlamlık, pürüzsüzlük ve parlaklık gibi özelliklerin daha iyi olması sağlanır. Kullanılan maddeler; nişasta ve dekstrin kolası, doğal ve sentetik balmumu, sentetik reçineler, amonyum ve çinko klorit, yumuşatıcı maddeler ve çeşitli özel kimyasallar içerir. Bu kimyasalların kullanımı ile aşınma kalitesi düzelir, su geçirmeme, yanmama ve küflenmeme gibi özellikler sağlanır [4], [6], [7].

2. TEKSTİL ATIKSUYU VE ARITIM YÖNTEMLERİ

Tekstil endüstrilerinde yüksek su tüketimi ve atıksu oluşumu, su geri kazanımı ve atık azalımı esaslı su ve atıksu yönetimi uygulamalarının geliştirilmesini gerektirmektedir. Bu endüstrilerde 1000-5000 m^3/gün arasında su tüketimi söz konusu olup, Türkiye genelinde sadece tekstil üretim faaliyetlerinden yılda yaklaşık 150 milyon ton atıksu oluştuğu bilinmektedir. Bu atıksular genel olarak yüksek renk, değişken pH, AKM, toksisite, KOİ ve düşük biyo-parçalanabilirlikli organikler ile yüksek konsantrasyonlarda Na^+, Cl^-, CO_3^{2-}, SO_4^{2-} gibi inorganikler içermektedir. Bu atıksuların birbirlerine yakın değerlerdeki genel karakteristikleri, KOİ: 1000-2000 mg/L, TOK: 500-800 mg/L, pH: 6-8, iletkenlik: 1000-2000 µS/cm, TÇM: 800-1500 mg/L şeklindedir [12]-[17].

Tekstil endüstrisi atıksularının konvansiyonel arıtma sistemleriyle arıtılması, bazı şartlarda kötü kalitede çıkış suyu üretilmesine, etkili arıtma şartlarında dahi düşük oranlarda su geri kazanımına, ancak yüksek miktarlarda ve/veya bertarafı zor veya maliyetli arıtma çamurları oluşumuna neden olmaktadır [12], [18], [19], [16]. Bu atıksuların deşarj kalitesini ve proses suyu olarak yeniden kullanımını iyileştirmek için mutlaka ileri arıtıma ihtiyaç duyulmaktadır [16].

Tekstil atıksularında etkin su ve atıksu yönetiminde tercih edilen teknolojilerin başında İOP [12], [20]-[24] ve MP (özellikle basınç sürücülü) gelmektedir [25], [13], [26]-[30]. Bu iki prosesin bir arada kullanılarak su geri kazanımı ve konsantre atık azaltımının yapıldığı az sayıda literatür çalışması bulunmaktadır [31], [32], [33]. Ancak proseslerin hibrit/entegre bütünlükteki farklı kombinasyonlarının hedef atıksulara uygulandığı, saha ölçeğindeki uygulanabilirlik maliyetlerinin araştırılarak belirlendiği, etkin su geri kazanımının yanı sıra nihai konsantre yönetimi esaslarının da ortaya konduğu bütüncül bir AR-GE çalışması literatürde yer almamaktadır.

2.1.1. Basınç Sürücülü Membran Prosesler (MP) ile Arıtma

Basınç sürücülü membran proseslerin tek adımda işletildiği uygulamalarda, arzu edilir kalitede çıkış suyu eldesi bakımından mutlak bir başarı

sağlanamamaktadır [34].Buna karşın, bu proseslerle gerçekleştirilen entegre arıtma sistemi uygulamalarında, her bir adımdaki membran proseste azami % 80-90'lık su geri kazanımı ile işletim sağlanabilmekte; Bu da, 3 adımlı bir membran sistem bütününde atıksu debisinin yaklaşık %27-50'sine (iki adımda yaygın olarak % 19-36'sına) varabilen oranlarda konsantre atık akımının oluşumuna neden olmaktadır [35].

Oluşan konsantrelerin kalitelerinin ve özellikle de hacimsel miktarlarının, bu atıkların bertaraf seçeneklerini kısıtlaması sebebiyle, proses işletme maliyetlerinin arttığı bilinmektedir [35], [30]. Bunun neticesinde ise, basınç sürücülü membranlar ile hedef endüstrilerde su geri kazanımı ve konsantre yönetiminin bir arada etkin düzeyde sağlanamaması durumuyla karşılaşılmaktadır.

2.1.2. İleri Oksidasyon Prosesleri (İOP) ile Arıtma

İOP, atıksudaki organik karbonu parçalamak için foto ışınlama, katalizör ilavesi, termal giriş ve ultrases nüfuzu gibi şartlar altında H_2O_2 ve ozon gibi güçlü oksidantların varlığında gerçekleştirilen bir kimyasal arıtma prosesidir [17]. Proseste etkin organik giderim performansı elde edilebilmesi avantajına karşın, yüksek enerji ve/veya kimyasal madde tüketimi bütün İOP'lerin teknolojik uygulamalarının önünde genel bir problem olarak durmaktadır.

H_2O_2 ile homojen katalizör Fe^{+2} arasındaki elektron transferine bağlı olarak gerçekleşen Fenton prosesi, atıksuların arıtılmasında katalitik oksidasyon metodu olarak kullanılmaktadır [20]. Fenton reaksiyonlarıyla organik kirleticilerin parçalanma hızı ışık kaynağı olduğu durumlarda artmaktadır. Foto-Fenton reaksiyonlarının 400 nm' ye yakın dalga boylarındaki işletimlerinin, diğer İOP'ne kıyasla daha düşük enerji tüketimine ihtiyaç duyduğu ayrıca bilinmektedir [12], [36]. Ancak, Fenton prosesi geniş pH aralığında işletilebilmesine karşın, foto-Fenton prosesi pH' a bağlı olarak genelde asidik pH şartlarında en iyi işletim performansı sunmaktadır [20], [21].

- UV/Oksidasyon Teknolojileri

UV/Oksidasyon Teknolojileri, ya uygun bir oksidant madde (hidrojen peroksit yada ozon) ilavesiyle homojen bir ortamda yada yarı iletken partiküller (örn. titanyum dioksit) içeren heterojen bir ortamda meydana gelmektedir [37]. Reaksiyonun gerçekleştiği ortama göre de homojen prosesler (UV/H_2O_2, UV/O_3) ve heterojen prosesler (yarı iletken partiküllerin fotolizi) olarak adlandırılmaktadır. $OH^{\bullet}$, fenton reaksiyonu olarak bilinen reaksiyonla da meydana gelmektedir. Fenton prosesinde $OH^{\bullet}$, hidrojen peroksitin Fe^{+2} ve Fe^{+3} tuzlarıyla reaksiyona girmesi ile meydana gelmektedir [38].

- Homojen Prosesler

- UV Radyasyonu/Hidrojen Peroksit (UV/H_2O_2) Prosesi

Hidrojen peroksit kuvvetli bir kimyasal oksidandır. UV ışığı, oksidan bir molekülü parçaladığı zaman meydana gelen serbest radikaller daha enerjik oksidanlardır [39]. Hidrojen peroksit UV ışınlaması altında fotokimyasal olarak kararsızdır. UV ışığı ile hidrojen peroksitin ışınlanması çok sayıda kimyasal madde ile reaksiyona girdiği bilinen $OH^{\bullet}$ oluşturmaktadır [40]. H_2O_2 tarafından UV radyasyonunun maksimum absorbsiyonu yaklaşık 220 nm' de meydana gelmektedir. H_2O_2'in UV ışığıyla fotolizi ile $OH^{\bullet}$ oluşumu aşağıdaki denklemle verilmektedir.

$$H_2O_2 + h\nu \rightarrow 2\ OH^{\bullet} \qquad (2.1)$$

- UV Radyasyonu/Ozon (UV/O_3) Prosesi

Ozonun suda UV ışığıyla fotolizi, $OH^{\bullet}$ oluşturmak üzere UV radyasyonu ya da ozonla reaksiyona giren H_2O_2 oluşturmaktadır [41]. Bu reaksiyon aşağıda gösterildiği şekilde gerçekleşmektedir.

$$O_3 + h\nu + H_2O \rightarrow H_2O_2 + O_2 \qquad (2.2)$$

$$H_2O_2 + h\nu \rightarrow 2\ OH^{\bullet} \qquad (2.3)$$

$$H_2O_2 + 2\ O_3 \rightarrow 2\ OH\bullet + 3\ O_2 \qquad (2.4)$$

- Heterojen Prosesler

UV ışığı ve yarı iletken partiküllerin varlığında kirleticilerin bozunması yanifotokatalitik bozunma, birçok organik kirletici ve toksik madde bozunmasında önemli bir yoldur. Fotokatalitik bir sistem, bir çözücüde süspanse halde bulunan yarı iletken partiküllerden meydana gelmektedir. Hidroksil radikalleri fotokatalitik bir sistemde başlıca oksidanlardır [42].

Birçok metal oksidin yarı iletken olduğu bilinmektedir. Şimdiye kadar fotokatalitik bozunma prosesi için Fe_2O_3, $SrTiO_3$, In_2O_3, K_4NbO_{17}, WO_3, V_2O_5, MoO_3, MoS_2, SiC ve $ZnFe_2O_4$ gibi çok sayıda madde; alifatik aromatikler, boyalar, pestisitler ve herbisitler gibi çok sayıdaki organik kirleticinin bozunmasında fotokatalizör olarak kullanılmıştır [43]. Bunlar içerisinde fotokatalitik prosese en uygun ve aktif yarı iletkenin ise, TiO_2 olduğu belirlenmiştir. TiO_2, geniş pH aralığında yüksek fotokimyasal kararlılığa sahiptir [44]. Bunun yanı sıra, diğer maddelerin aksine korozyona da neden olmamaktadır. TiO_2'nin fotokatalitik aktivitesi ise, hammaddeye ve TiO_2'i hazırlamak için kullanılan metoda bağlıdır [45].

Yarı iletkenler sulu ortamda ışınlama altında etkili fotokatalizördürler. Bir yarı iletken elektronlarla dolu olan valans bandı (VB) ve boş enerji seviyelerini ihtiva eden iletim bandından (İB) meydana gelmektedir. Yarı iletkenin band aralığı enerjisinden daha yüksek enerjili fotonlarla ışınlanması durumunda, yarı iletkende kimyasal reaksiyonları başlatma kabiliyeti olan elektron-boşluk çiftleri meydana gelmektedir [46]. Valans bandı boşlukları oksitleyici, iletim bandı elektronları indirgeyici olarak hareket etmektedirler.

$$TiO_2 \rightarrow e^-\text{İB} + h\text{+VB} \qquad (2.5)$$

UV ışınlaması altında yarı iletkende meydana gelen elektron ve elektron boşluğu yüzeye doğru hareket etmektedir. OH^- iyonları ve H_2O molekülleri, TiO_2 yüzeyine en çok adsorblanan maddelerdir. Hem asidik hem de bazik koşullarda yüzeydeki OH^- ve H_2O gruplarının TiO_2'in valans bant boşlukları ile $OH^\bullet$ oluşturmak üzere oksidasyonu mümkündür [47].

Yarı iletkenlerde $OH^\bullet$oluşumu iki şekilde sağlanmaktadır:

1. Valans bandı boşluklarının adsorblanan H_2O ya da yüzey OH^- grupları ile reaksiyonu yoluyla;

$$TiO^2 \rightarrow e^-İB + h+VB \quad (2.6)$$

$$h+ VB+ H_2O \rightarrow OH^\bullet + H^+ \quad (2.7)$$

$$h+VB + OH^- \rightarrow OH^\bullet \quad (2.8)$$

2. $O_2^{\bullet -}$ 'den, H_2O_2 oluşumu yoluyla; Yüzeye adsorblanmış olan oksijen iletim bandı elektronlarıyla süperoksit iyonu ($O_2^{\bullet -}$) vermek üzere reaksiyona girer. Asidik koşullarda $O_2^{\bullet -}$ ile H^+ reaksiyonundan perhidroksil radikali ($HO_2^\bullet$) oluşabilir. Perhidroksil radikali daha sonra hidrojen peroksit oluşturur.

$$O_2 + e- İB \rightarrow O_2^- \quad (2.9)$$

$$O_2^{\bullet -} + H^+ \rightarrow HO^{2\bullet} \quad (2.10)$$

$$HO_2^\bullet + HO_2^\bullet \rightarrow H_2O_2 + O_2 \quad (2.11)$$

$$O_2^{\bullet -} + HO_2^\bullet \rightarrow HO_2^- + O_2 \quad (2.12)$$

$$HO_2^- + H^+ \rightarrow H_2O_2 \quad (2.13)$$

H_2O_2'in herhangi bir reaksiyonla parçalanması $OH^\bullet$ meydana getirmektedir [46]. H_2O_2, elektron-boşluk çiftlerinin yeniden birleşmesini azaltan ve $OH^\bullet$ meydana getiren elektron alıcısı olarak davranmaktadır. Yarı iletken partikül yüzeyinde meydana gelen H_2O_2 fotolizi (heterojen fotoliz) daha verimlidir ve homojen H_2O_2 fotolizinin gözlenmediği dalga boylarında meydana gelmektedir.

$$H_2O_2 + e^-İB \rightarrow OH^\bullet + OH^- \quad (2.14)$$

$$H_2O_2 + O_2^{\bullet -} \rightarrow OH^{\bullet} + OH^{-} + O_2 \quad (2.15)$$

$$H_2O_2 \rightarrow 2\ OH^{\bullet} \quad (2.16)$$

Uyarılmış partiküller üzerinde ya da yakınında uygun alıcıların olmaması durumunda elektron-boşluk çiftleri birleşmektedir. Bu olay enerji bantları arasında ya da yüzeyde meydana gelmektedir. Elektron-boşluk çiftlerinin birleşmesi sonucunda fotokatalitik verim azalmaktadır. Çevre şartlarına bağlı olarak elektron-boşluk prosesinin ömrü, birkaç nanosaniye ile birkaç saat arasında olabilmektedir [48].

$$e^{-}İB + h{+}VB \rightarrow ısı \quad (2.17)$$

Günümüzde TiO_2 varlığında fotokatalitik bozunma; ucuzluğu, basit oluşu, etkinliği ve son derece düşük organik kirletici seviyeleri sağlanabilmesi nedeniyle ticari açıdan da ilgi görmektedir [49].

Fotokatalitik bozunma işlemlerinde, TiO_2 iki şeklide uygulanmaktadır. Sulu ortamda süspanse halde veya destek materyallerde immobilize edilmiş bir şekilde (örn. kuvars kum, cam, aktif karbon vb). İmmobilize TiO_2 kullanımının etkinliği, genellikle süspanse TiO_2'nin kullanıldığı sistemlere göre daha düşük gibi görünmektedir. Ancak, teknik uygulamalar için immobilize edilmiş TiO_2 kullanımı süspanse halde TiO_2 kullanımına göre daha uygundur. Çünkü, sulu ortamda süspanse halde TiO_2 kullanımı durumunda katalizör partiküllerin geri kazanımı için ilave ekipman ve enerji gereksinimine ihtiyaç duyulmaktadır [50]. Katalitik modifikasyon, işletme şartlarının değiştirilmesi (örn. pH), oksidant kullanımı (örn H2O2) ve gelişmiş reaktör tasarımı ile sistemin etkinliğini artırmak da mümkündür [51]. Bu faktörler, sistemin etkinliğini artırmanın yanı sıra aynı zamanda fotokatalitik bozunmanın dezavantajı olan enerji maliyetini de azaltmaktadır.

- Fenton Prosesi

$OH^{\bullet}$ kimyasal ve fotokimyasal reaksiyonlar ile üretilmektedir ve en yaygın kullanılan kimyasal proses Fenton prosesidir. 1894 yılında İngiliz kimyager Henry John Horstman Fenton tarafından keşfedilen ve daha sonra "Fenton Reagent" olarak adlandırılan Fenton prosesi 1960'lı yıllardan itibaren toksik organiklerin parçalanması amacıyla bir oksidasyon prosesi olarak uygulanmaya başlanmıştır [52].

Fenton prosesinde H_2O_2'in, Fe^{+2} katalizörlüğünde asidik bir ortam içerisinde $OH^{\bullet}$ oluşturabilmesi özelliğinden yararlanılmaktadır. Bu reaksiyon sonucu hidroksil radikalleri oluşmaktadır [53].

$$Fe^{+2} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{+3} + OH^{\bullet} + OH \qquad (2.18)$$

Hidrojen peroksit, kısmen güçlü bir oksidandır bununla birlikte; uygun peroksit konsantrasyonlarında kinetik sınırlamalardan dolayı DOM veya belirli kararlı kirleticiler için tek başına kullanılması durumunda etkin değildir. Radikallerin oluşumu çözeltilerde bir kompleks reaksiyon zinciri şeklindedir [54]. Demir iyonu, H_2O_2'in ayrışmasını başlatır; kataliz eder ve hidroksil radikalleri oluşur. Radikallerin oluşumu sulu çözeltilerde bir kompleks reaksiyon zinciri şeklindedir.

$$OH^{\bullet} + Fe^{+2} \rightarrow OH^{-} + Fe^{+3} \qquad (2.19)$$

Oluşan ferrik iyonlar da hidrojen peroksiti kataliz ederek su ve oksijene ayrıştırır. Demir iyonları ve radikaller de reaksiyonlarda oluşur. Fe^{+3} iyonunun H_2O_2 ile reaksiyonu Fenton benzeri proses olarak adlandırılmaktadır.

Hidroksil radikalleri protonları çıkararak organikleri okside etmektedir ve çok iyi reaktif olan organik radikaller üretilmektedir.

pH 3 ve 7 arasında yukarıdaki kompleksler aşağıdaki komplekslere dönüşmektedir.

$$[Fe(H_2O)^5OH]^{+2} \leftrightarrow [Fe(H_2O)^8(OH)^2]^{+4} + 2\ H_2O \qquad (2.20)$$

$$[Fe(H2O)^8(OH)^2]^{+4} + H_2O \leftrightarrow [Fe(H_2O)^7(OH)^3]^{+3} + H_3O \quad (2.21)$$

$$[Fe(H_2O)^7(OH)^3]^{+3} + [Fe(H_2O)^5]^{+2} \leftrightarrow [Fe(H_2O)^7(OH)^4]^{+5} + 2\ H_2O \quad (2.22)$$

Bu kompleksler, Fenton prosesin koagülasyon kabiliyetini meydana getirmektedir [55].

Fenton arıtımı, oksidasyon ve koagülasyonu birleştirmiş olma avantajını taşımaktadır. Bu yöntem atıksuda bulunan kirleticilerin oksidasyon yoluyla arıtımının yanı sıra koagülasyon yoluyla da ikinci bir giderimi sağlamaktadır. Oksidasyon ve koagülasyonu birleştiren Fenton arıtımı bu sebepten ötürü çift arıtım etkisine sahiptir [56].

Fenton prosesi uygulandığında, endüstriyel atıksuların rengi tamamen, KOİ ve TOK parametre değerleri ise kısmen giderilebilmektedir.

Fenton reaksiyonunun oksitleyici gücü, UV ışınlamasıyla büyük ölçüde arttırılabilmektedir. UV ışığının varlığında gerçekleşen Fenton prosesi, foto-fenton prosesi olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntemde OH•, Fe^{+2} fotolizi ve Fe^{+2} ile H_2O_2 reaksiyonuyla oluşmaktadır [57].

$$Fe+2+ H2O2 \text{--------}> FeOH+2 + OH\bullet \quad (2.23)$$

$$FeOH^{+2} + hV \text{--------}> Fe^{+2} + OH^{\bullet} \quad (2.24)$$

İOP, atıksudaki organik karbonu parçalamak için foto ışınlama, katalizör ilavesi, termal giriş ve ultrases nüfuzu gibi şartlar altında H_2O_2 ve ozon gibi güçlü oksidantların varlığında gerçekleştirilen bir kimyasal arıtma prosesidir [15]. Proseste etkin organik giderim performansı elde edilebilmesi avantajına karşın, yüksek enerji ve/veya kimyasal madde tüketimi bütün İOP'lerin teknolojik uygulamalarının önünde genel bir problem olarak durmaktadır.

H_2O_2 ile homojen katalizör Fe^{+2} arasındaki elektron transferine bağlı olarak gerçekleşen Fenton prosesi, atıksuların arıtılmasında katalitik oksidasyon metodu olarak kullanılmaktadır [20]. Fenton reaksiyonlarıyla organik kirleticilerin parçalanma hızı ışık kaynağı olduğu durumlarda artmaktadır. Foto-Fenton

reaksiyonlarının 400 nm'ye yakın dalga boylarındaki işletimlerinin, diğer İOP'ne kıyasla daha düşük enerji tüketimine ihtiyaç duyduğu ayrıca bilinmektedir [12], [36]. Ancak, Fenton prosesi geniş pH aralığında işletilebilmesine karşın, foto-Fenton prosesi pH'a bağlı olarak genelde asidik pH şartlarında en iyi işletim performansı sunmaktadır [20], [21].Fenton prosesini etkileyen faktörleri aşağıdaki gibidir.

pH: Fenton prosesle kirleticilerin parçalanmasında işletme pH'ı etkin bir parametredir [58]. Fenton prosesle yapılan çalışmalarda, çoğunlukla optimum pH olarak 3 bulunmuştur [55]. Daha düşük pH'larda $[Fe^{+2}\ (H_2O)]^{+2}$ oluşumu meydana geldiğinden daha az hidroksil radikali üretilmektedir. pH>4 olması halinde Fe^{+2} komplekslerinin oluşumundan dolayı parçalanma hızı azalır. Bunun yanında H_2O_2 bazik ortamda kararsızdır. Ortamda oksijen bulunduğunda parçalanabilir ve oksidasyon yeteneğini kaybedebilir. Bu yüzden H_2O_2 ve demir iyonlarının etkili bir reaksiyon oluşturması zor olur, giderim verimini etkiler.

Demir İyonu Konsantrasyonu: Demir iyonu konsantrasyonunun artmasıyla parçalanma hızı artar. Ancak, belli konsantrasyonun üzerinde parçalanma hızı oldukça azdır. Hatta fazla demirin kullanılmasından dolayı çıkışta çözünmüş veya askıdaki demir miktarı artmaktadır.

Hidrojen Peroksit Konsantrasyonu: Hidrojen peroksit konsantrasyonunun artmasıyla genellikle kirleticilerin parçalanma hızı artmaktadır [58]. Ancak, fazla miktarda hidrojen peroksit konsantrasyonu durumunda hidroksil radikalleriyle reaksiyona gireceğinden tavsiye edilmemektedir. Aynı zamanda fazla hidrojen peroksit konsantrasyonu KOİ'nin artmasına da neden olmaktadır.

- Foto Fenton Prosesi

Fenton posesinin oksitleyici gücü UV ışınlamasıyla büyük ölçüde arttırılabilmektedir. Fenton prosesinin UV ışığının varlığında gerçekleşmesi durumu, Foto-Fenton (Fe^{+2}/H_2O_2 +UV) prosesi olarak adlandırılmaktadır. Foto-fentonproses, fenton prosese göre daha fazla hidroksil radikali üretir. Organik kirleticinin bozunma hızını ve mineralizasyonunu önemli ölçüde artırır. Fotokimyasal olarak Fe^{+2} 'ye indirgenen ve Fenton reaksiyonlarında tekrar Fe^{+3} 'e yükseltgenen demir iyonlarının çevrimi nedeniyle daha az Fe^{+2}/Fe^{+3} iyonuna ihtiyaç duyulmaktadır [59]. Fe^{+2} ile H_2O_2 'nin varlığından dolayı Fenton reaksiyon zinciri tekrar meydana gelir. Foto-Fenton

benzeri reaksiyonların bilinen radikal oluşum mekanizmaları ile arasındaki reaksiyonlar verilmiştir.

$$Fe^{+3} + H_2O + hv \rightarrow Fe^{+2} + {}^{\bullet}OH + H \quad (2.25)$$

$$Fe^{+2} + H_2O_2 \rightarrow {}^{\bullet}OH + OH- + Fe^{+3} \quad (2.26)$$

$$Fe^{+3} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{+2} + H^{+} + \bullet O_2H \quad (2.27)$$

$$Fe^{+2} + {}^{\bullet}OH \rightarrow Fe^{+3} + OH^{-} \quad (2.28)$$

$$Fe^{+2} + {}^{\bullet}O_2H \rightarrow Fe^{+3} + {}^{\bullet}O_2H \quad (2.29)$$

$${}^{\bullet}OH + RH \rightarrow R^{+} \text{ veya } [HORH] \bullet (R = \text{organik madde}) \quad (2.30)$$

UV/Fe^{+3} sistemi ile yapılan deneysel çalışmalarda, organik maddenin TOK konsantrasyonunda önemsiz bir düşüş gözlenmektedir. H_2O_2 oksidantının eklenmediği bu prosesler de, hidroksil radikalı sadece Fe^{+3} iyonunu fotolizi sonucu meydana gelen yük transferi ile oluşur. Bu reaksiyon, TOK konsantrasyonu belli bir oranda azaldıktan sonra durur çünkü Fe^{+2} iyonundan Fe^{+3} iyonunun tekrar oluşması, H_2O_2 gerektiren bir süreçtir (Denklem, 1.36). Sisteme H_2O_2 eklendikten sonra, karanlık/ H_2O_2/ Fe^{+3} prosesinin, UV/ Fe^{+3} prosesine oranla çok daha verimli olduğu görülmüştür. Fakat TOK gideriminde en yüksek verim UV/ H_2O_2/ Fe^{+3} isteminde gözlenir [60]. UV ile ışınlamanın oganik maddeyi parçalama oranındaki pozitif etkisinin nedeni, H_2O_2 ile yeni hidroksil radikallerini oluşumunu sağlayan Fe^{+3} iyonundan Fe^{+2}'ye foto parçalanmadır Denklem (1.35). Karanlık ortamda, H_2O_2'nin tüketiminden sonra, reaksiyonun, Foto Fenton prosesine oranla yavaşladığı görülmektedir. Bunun nedeni, hidroksil raikalinin oluşumunu sağlayan Fe^{+3} iyonunun Fe^{+2} iyonuna dönüşmesini içeren denklem (1.36) durmasıdır. Foto Fenton Prosesinde, organik maddenin parçalanması için gerekli olan H_2O_2 ve Fe^{+3} konsantrasyonları belirlenebilir.

Fe^{+3} konsantrasyonunun etkisi: Foto Fenton prosesinde organik maddenin parçalanma verimi Fe^{+3} iyonunun konsantrasyonuna bağlıdır. Yüksek Fe^{+3} konsantrasyonunda verim düşer. Bunun nedenleri şu şekilde açıklanabilir; Yüksek Fe^{+3} konsantrasyonunda oluşan kahverengi bulanıklığın artması nedeniyle proses için gerekli olan UV ışığının absorbsiyonu engellenir. Ferrik tuzlarını sulu çözeltilerinde 250-420 nm (λmak = 296 nm) dalga boyu arasında, sınırız yük transferi ile birlikte $Fe(OH)^{+2}$'nin oluştuğu bilinmektedir. Bundan dolayı, Fe^{+3} tuzlarının yüksek konsantrasyonu $Fe(OH)^{+2}$ gibi bu ışığı emen türlerin oluşumunu arttırır. Çözeltide aşırı Fe^{+2} (1.36 ve 1.38) oluşur. Oluşan Fe^{+2} iyonu organik madde ile hidroksil radikalleri (1.41) için rekabete girer. Sabit H_2O_2 konsantrasyonunda, aşırı Fe^{+3} kullanıldığında, Fe^{+3} iyonları yükseltgenme-indirgenme reaksiyonları için (1.36) sınırlayıcı faktör oluşturabilirler.

H_2O_2 konsantrasyonunun etkisi: Organik maddenin oksidasyonunda, belirli bir seviyeye kadar H_2O_2 konsantrasyonu parçalanmayı olumlu yönde etkilemektedir. Fakat yüksek H_2O_2 konsantrasyonu oksidasyonu negatif yönde etkilemektedir. Bunun sebebi, H_2O_2'nin O_2 ve H_2O'ya ayrışmasının Reaksiyon 1.42 yanısıra, Reaksiyon 8'de de belirtildiği gibi, hidroksil radikalinin tekrar H_2O_2 ile reaksiyona girmesidir. Böylece organik maddelerin oksidasyonu engelllenmiş olur [60].

$$2H_2O_2 \rightarrow 2H_2O + O_2 \tag{2.31}$$

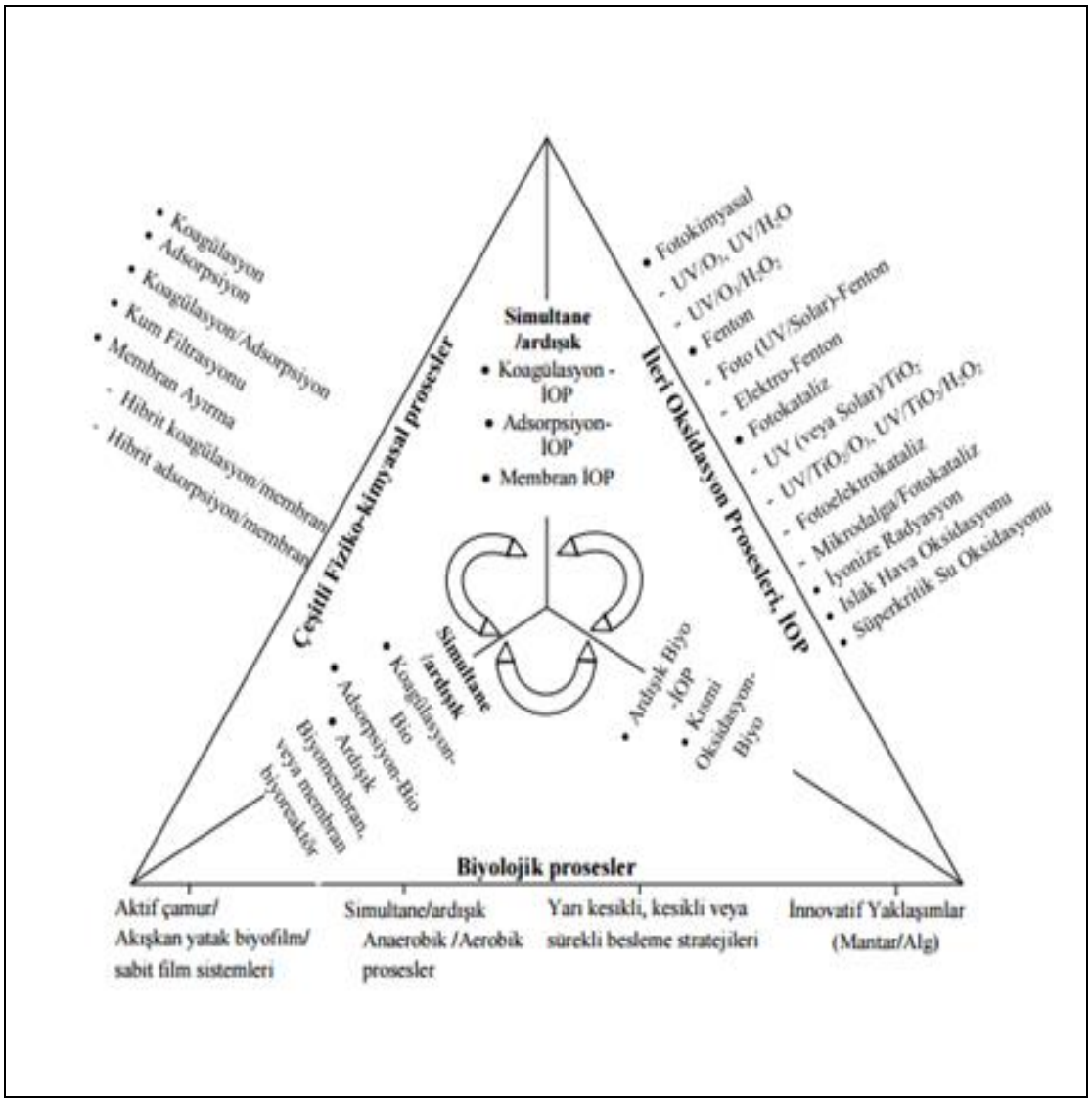
$$H_2O_2 + OH \rightarrow H_2O + O_2H \tag{2.32}$$

2.1.3. Bütünleşik İOP/MP Sistemi ile Arıtma

İOP' nin membran sisteminden önce kullanılması membran üzerinde oluşan kirlilik yükünü azaltmaktadır. Fenton prosesleri, kompleks ekipman ihtiyacı ile sıcaklık ve basınç gibi eksterm şartlar gerektirmediğinden, basit bir reaktörde gerçekleştirilebilmektedir. Buna karşın ozona ve ışığa bağlı prosesler, ozon üretim cihazları ve UV kaynağına olan ihtiyaç nedeniyle biraz daha işletimi zor olan prosesler olarak öne çıkmaktadır [34].

Diğer İOP' ne kıyasla Fenton-Membran entegre arıtma sistemi, pratikte birçok avantajlar taşımaktadır. Mikrofiltrasyon kullanılması İOP sırasında oluşan çamurun ayrılması için çöktürme işlemini elimine ederek arıtma süresini kısaltmaktadır. Fenton-MF ile NF kombinasyonundan oluşan bütünleşik atıksu arıtma yaklaşımı ise, sulardan kirleticilerin uzaklaştırılmasında daha da etkili olmaktadır. Çünkü bu yaklaşım çıkış standartları için kılavuz olmaya fırsat veren tamamlayıcı bir arıtım yaklaşımı olarak görülmekte ve gerekli tesis kurulum alanı ihtiyacının azlığından dolayı maliyetlerin oldukça düşmesi beklenmektedir. Ayrıca Fenton prosesi membranda tıkanmayı minimize etmeye katkı sağlamakta olup, oksidasyon sırasında, koagülasyonları sonucunda kolloidlerin membran porlarından nüfuzunun azaldığı da bilinmektedir [34].

Yukarıda verilen literatür bilgileri ışığında, projeye konu endüstrilere ait atıksuların arıtımında kullanılan İOP' lerinden, Fenton (Fe^{+2}+H_2O_2) ve foto-Fenton (UVA/UVC^{+}[Fe^{+2}+H_2O_2]) yöntemlerinin KOİ, TOK ve renk giderimi için en etkili prosesler olduğu ve bu proseslerin yüksek tuzluluk içeren sularda dahi (13.6 mS/cm iletkenlik, 382 mg/L ÇOK ve 1020 mg/L KOİ değerlerinde) yüksek mineralizasyon (%89) ve renk giderimi (%98) sağlayabildiği bilinmektedir [22]. Fakat bu sistemlerin tek başlarına kullanıldıklarında işletme maliyetleri çok yüksek olmakla birlikte, proseste düşük miktarda da olsa oluşan çamur için ilave ayırma işlemine gerek bulunmaktadır. Bu sebeple, İOP' nin membran proseslerle bir arada kullanılmasıyla; hem İOP performansında düşüş olmaksızın işletim sağlanabildiği hem de sinerjik verim artışı ile işletme maliyetlerinin azaltılabildiğinden hareketle, membran konsantreleri yüklerinin azaltılarak konsantrelerin etkin yönetilebilirliği açısından önemli bir bütünleşik uygulama avantajının sağlanacağı kanaatine ulaşılmaktadır. Düşük membran kirlenmesine imkan sağlaması da ayrı bir fayda olarak değerlendirildiğinde, avantajları ve dezavantajları birbirlerini karşılayan etkin iki prosesin hibrit ve entegre kombinasyonda bir arada kullanılması düşüncesi, bu projenin kuramsal yaklaşımının yenilikçi yönünü oluşturan en temel unsur olmaktadır.



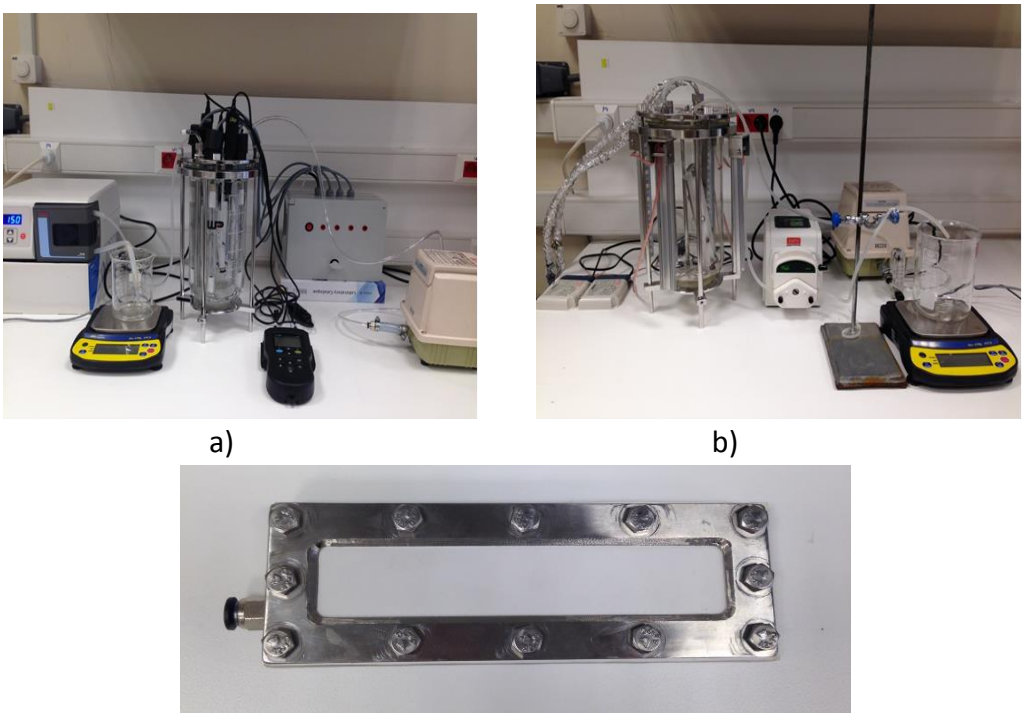
Şekil 2.1: Boyar madde içeren atıksuların arıtımında kullanılan prosesler diyagramı.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Araştırma altyapısının kurulması

Tekstil endüstrisi atıksuları, yaygın işletimleri ve yakın seviyelerde kirlilik ihtiva etmeleri sebebiyle yoğun su tüketilen endüstriyel atıksular için temsil edici olarak seçilmiştir.

Şekil 3.1'de gösterilen, tezgâh-üstü ileri oksidasyon prosesi/batık ultrafiltrasyon hibrit reaktörü, projede tekstil atıksularının arıtımı için yapılan çalışmalarında kullanılan laboratuar ölçekli sistemlerdir. UVC-254 ve UVA-365 lambalarla donatılan İOP/batık UF reaktörler ile Fenton ve foto-Fenton prosesleri deneyleri iki ayrı işletimde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1: İOP/batık UF hibrit reaktörü. a) UVC 254 lambalarla donatılmış genel görünüm, b) UVA 365 lambalarla donatılmış genel görünüm, c) Batık UF membran modülün yakından görünümü.

Deneysel çalışmaların farklı sıcaklıklarda yürütülebilmesi için 3 L kapasiteli borosilikat camdan üretilmiş olan İOP/batık UF hibrit reaktörüne su banyosu bağlantısı yapılmıştır. Reaktör ile birlikte kullanılan bütün metal parçalar paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Foto-Fenton prosesinde, UVC-254 ve UVA-365 olmak üzere iki ayrı lamba türü kullanılmıştır. Reaktör, içerisine monte edilip sökülüp takılabilir kuvars cam korumalı 4 adet 10 Watt (toplam 40 Watt) UVC-254 lamba sistemi ile simetrik yerleşimde donatılmış olup, her bir UVC lamba, harici bir enerji kaynağı kullanılarak ayrı ayrı devreye alınabilmektedir. Reaktör haznesi dışarıdan monte edilip sökülüp takılabilir, toplamda 8 Watt'lık (toplam 40 Watt) floresan ışık düzenekli 5 adet UVA-365 lambalar ile donatılmıştır.

Batık membran filtrasyon sistemi 39.4 cm^2 (dikdörtgen ebatlı, 14.6 cm x 2.7 cm) aktif membran alanına sahip bir batık membran modül içermektedir. Membran modül, 3 L'lik İOP reaktörü içerisine yerleştirilerek UVC-254 lambalarıyla simetrik yerleşimli nitelikte tamamıyla suya batık işletilmiştir. Membran modülü Delrin® malzemeden imal edilmiş, batık İOP reaktör sisteminde yer alan reaktör haznesi içerisine monte edilip, sökülüp takılabilir ve yüzeyde hava sıyırma amacıyla istenen açıda eğimlendirilebilir şekilde imal edilmiştir. Membranın modül içerisinde sabitlenmesi, çalışma sırasında sızdırmazlık sağlamak amacı ile paslanmaz çelik malzemeden yapılmış modül üst bağlantı elemanıyla sağlanmıştır. Batık membran filtrasyon sistemi, su akısının belirlenmesi amacıyla peristaltik pompa yardımı ile membrandan geçen su hacmini ölçen bir terazi ile donatılmış; bu sayede, bilgisayar ve otomasyona bağlı yazılım üzerinden membranın su akısı ölçülerek veriler on-line olarak izlenerek kaydedilmiştir. İOP/batık UF hibrit reaktörü, farklı sıcaklık, havalandırma hızı, UF membranlardan su çekim hızı, ışık şiddeti ve ışık türünde işletilebilir niteliktedir.

Sistemlerin kurulmasının yanı sıra proje kapsamında alınması öngörülen cihazların alım işlemleri de bu dönemde gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık, pH, iletkenlik ve TÇK parametreleri ve bulanıklık parametresi ölçümleri için kullanılan Hach marka multiparametre ve bulanıklık ölçüm cihazlarına ait fotoğraflar Şekil 3.2' de gösterilmiştir. Kocaeli Üniversitesi Çevre Mühendisliği laboratuvarında kurulumu yapılan TOK ölçüm cihazının fotoğrafı ise Şekil 3.3' te verilmiştir. Ayrıca kullanılan

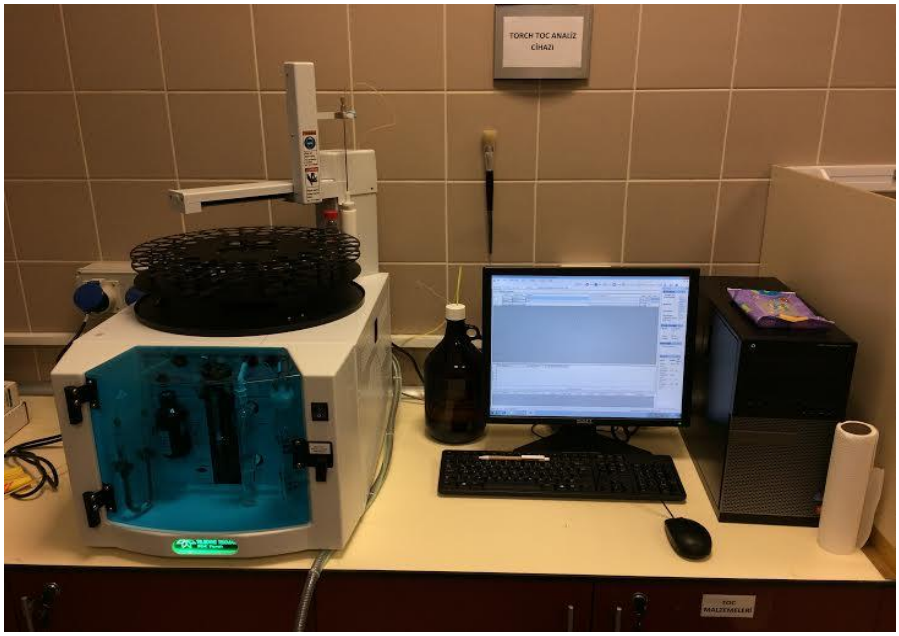
ışık kaynaklarının şiddetlerini ölçmek için temin edilen UVC 254 ve UVA 365 light-meter ışık ölçer cihazlarının genel görünümleri ise Şekil 3.4' te sunulmuştur.

Çalışmanın tamamında tekstil endüstrisi atıksuları ile yürütülen deneylerde kullanılacak olan ticari yaygınlığı bilinen ve/veya literatürden etkin performansları tespit edilmiş olan UF, NFgevşek, NFsıkı ve TO membranlarının satın alma/temin işlemleri yürütülmüştür. İOP reaktöründe batık olarak çalışılan UF prosesine ait deneylerde UP005, UP020 (proje önerisinde UC030 membranı olarak seçilmiş olmakla birlikte, tedarikçi tarafından üretiminin sonlandırıldığı bilgisi verildiğinden eşdeğer nitelikte seçilmiş olan UF membranı türüdür), UH050 ve UV150 membranları kullanılmıştır. Diğer membran prosesler için ise; NFgevşek membranları olarak NP010, NFG (proje önerisinde NTR Nitto-Denko marka gevşek NF membranı seçilmiş olmakla birlikte, yaklaşık 6 aylık piyasa araştırmaları neticesinde bu membranın alımı noktasında tedarikçilere ulaşım ya da ulaşılanlardan geri dönüş sağlanamadığından eşdeğer nitelikte olarak seçilmiş gevşek NF membranı türüdür), MPF-36 ve CK3001; NFsıkı membranları olarak NP030, ESNA 1-LF 2-LD, NF270 ve DS-5 DK; ve TO membranları olarak da TFC-HRRO, LFC-3, CPA-3/5 ve BW-30 kullanılmıştır. Çalışma kapsamında yer alan membranlar ve üretici/satıcı firma bilgileri Tablo 1'de sunulmuştur.

a)

b)

Şekil 3.2: Multiparametre cihazı. a) TDS, iletkenlik ve pH ölçüm cihazı, b) Bulanıklık ölçüm cihazı.



Şekil 3.3: TOK ölçüm cihazı.

a) b)

Şekil 3.4: Ölçüm cihazları. a) UVC 254 ışıkölçer, b) UVA 365 ışıkölçer.

Tablo 3.1: Çalışmasında kullanılan UF, $NF_{gevşek-sıkı}$, TO membranları listesi.

Sıra No	Membran Türü	Ticari İsim (Firma Adı))
1	UF membranları	UP 005 (Microdyn-Nadir GM bH)
2		UP 020 (Microdyn-Nadir GM bH)
3		UH 050 (Microdyn-Nadir GM bH)
4		UV 150 (Microdyn-Nadir GM bH)
5	NF gevşek membranları	NP 010 (Microdyn-Nadir GM bH)
6		NFG (Sterlitech)
7		MPF - 36 (Koch)
8		CK 3001 (GE Osmonics)
9	NF sıkı membranları	NP 030 (Microdyn-Nadir GMbH)
10		ESNA 1-LF 2-LD (Hydranautics)
11		NF 270 (DOW Film Tech)
12		DS - 5 DK (General Electric)
13	TO membranları	TFC - HRRO (GE Osmonics)
14		LFC-3
15		CPA - 3/5 (Hydranautics)
16		BW-30 (DOW Film Tech)

3.2. Kullanılan Tekstil Atıksuyunun Karakterizasyonu

Çalışmada yapılacak olan çalışmalarda kullanılacak olan atıksu su tüketimi yüksek olan tekstil endüstrilerinden temin edilmiştir. Atıksu karakterizasyonunun doğru tespit edilmesi, sonrasında yapılacak deneysel çalışmalardaki hata payınının en aza indirilmesini sağlamak açısından oldukça önemlidir. Karakterizasyon sonuçları

tekstil endüstrisi atıksuyu (tekstil ürünleri yıkama banyosu çıkış suyu) için Tablo 3.2 ’de verilmiştir.

Tablo 3.2: Tekstil Endüstrisi Atıksuyu Karakterizasyonu.

Parametre	**Birim**	**I. Ölçüm**	**II. Ölçüm**	**III. Ölçüm**	**IV. Ölçüm**	**V. Ölçüm**
pH	_	6.25	6.20	6.20	6.21	6.27
Sıcaklık	ºC	25.5	23.2	26.5	24.1	25.7
İletkenlik	µS/cm	1772	1457	2400	2500	3000
TÇK	mg/L	892	728	1216	1278	1536
$ÇO_2$	mg/L	8.5	9.25	7.26	8	7.17
KOİ	mg/L	1824	1524	2536	3392	2536
TOK	mg/L	630	-	960	1200	930
AKM	mg/L	10	20	10	20	35.15
AOX	mg/L	2.255	0.598	0.511	0.520	0.384
Bulanıklık	NTU	12.5	1.93	0.95	1.09	1.09
Amonyak	mg/L	3.29	0.84	3.82		0.88
Renk	λ:436	0.303	0.263	0.307	0.22	0.338
	λ:525	0.295	0.216	0.278	0.172	0.332
	λ:620	0.3	0.192	0.28	0.13	0.326
Nitrat	mg/L	13.0	3.5	3.4	6.5	16.0
Demir II	mg/L	30	1.4	2.8	2.5	1.6
Demir III	mg/L	0	2.8	7.2	3.2	7.0
Toplam	mg/L	6.7	45.1	5.9	8.0	2.9
Toplam	mg/L	82.0	22.6	217.0	82.4	103
Fenol	mg/L	8.6	5.7	11.6	13.4	18.5
Toksisite[1]	TU	-[2]	9.1	17.6	21.4	-[2]

[1]Toksisite parametresi, TU (toxicity unit) biriminde; 0: toksik değil, >1: az toksik, 1-10:toksik, 11-100: çok toksik, >100: aşırı toksik olarak değerlendirilmekte, analiz edilen tekstil yıkama banyosu atıksuyu ortalama değer olarak çok toksik sınırında toksik grubuna girmektedir.

[2] Ölçüm yapılmamıştır.

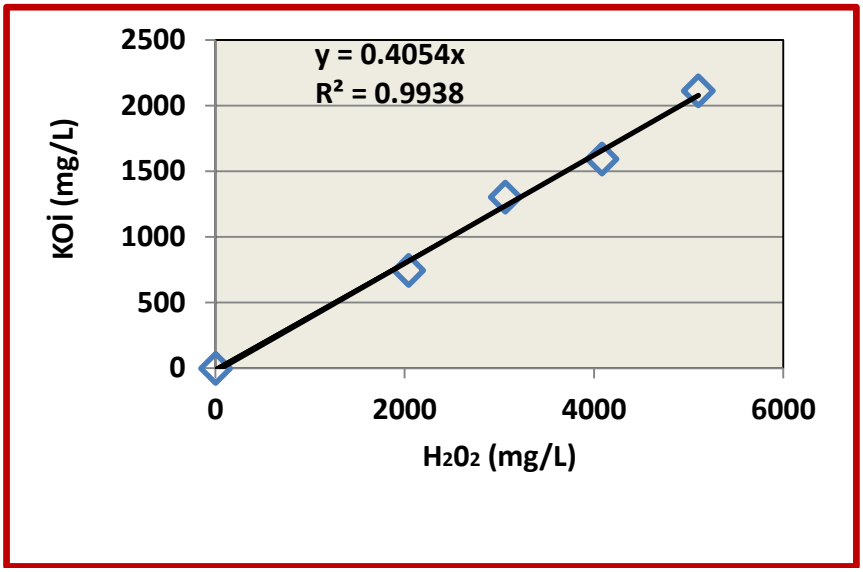
3.3. Deneysel İzleme ve Analitik Yöntemler

Deneysel çalışma sonuçları, tekstil atıksuyu için tüm proseslerde, [1]pH, [2]iletkenlik, [3]toplam çözünmüş katılar (TÇK), [4]toplam organik karbon (TOK), [5]renk olmak üzere toplam 7 su kalitesi parametresi üzerinden izlenmiştir. Atıksu karakterizasyonları dâhil tüm atıksu kalitesi analiz çalışmaları, Tablo 3.3' de verilen analiz yöntemleri üzerinden yerine getirilmiştir.

Tablo 3.3: Tekstil endüstrisi atıksuyunda analiz parametreleri ve yöntemleri.

Parametre	**Ölçüm Yöntemi**
pH	Multiparametre ölçüm cihazı
Sıcaklık (^{0}C)	Multiparametre ölçüm cihazı
İletkenlik (µS/cm)	Multiparametre ölçüm cihazı
TÇK (mg/L)	Multiparametre ölçüm cihazı
Çözünmüş Oksijen (mg/L)	Multiparametre ölçüm cihazı
KOİ (mg/L)	5220 D: Kapalı reflux kalorimetrik yöntem
TOK (mg/L)	5310 B: Yüksek sıcaklıkta yakma yöntemi
AKM (mg/L)	2540 D: 103-105 ^{0}C Gravimetrik yöntem
AOX (mg/L)	5910 B: UV Absorbsiyon yöntemi
Bulanıklık (NTU)	2130 B: Nefelometrik yöntem
Amonyak (mg/L)	4500 NH_3 B: Ön Destilasyon Metodu
Renk	Spektrofotometrik yöntem
Nitrat (mg/L)	Spektrofotometrik yöntem
Demir (II/III) (mg/L)	Spektrofotometrik yöntem
Toplam Azot (mg/L)	Spektrofotometrik yöntem
Toplam sertlik(mg/L)	Spektrofotometrik yöntem
Fenol (mg/L)	Spektrofotometrik yöntem
Toksisite	ISO 11348-3

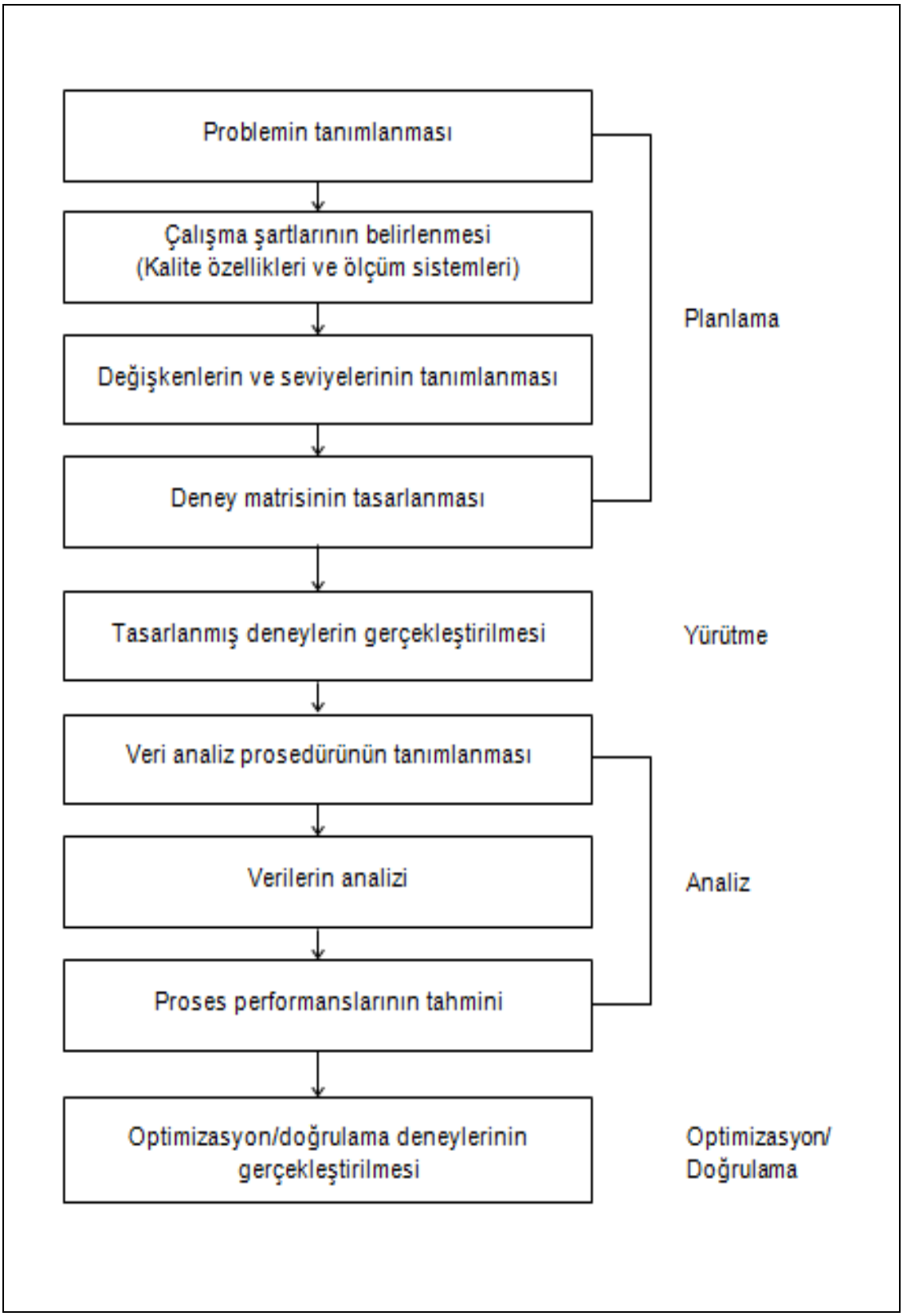
Analizlerde, kalıntı hidrojen peroksitten kaynaklanan KOİ girişimlerini belirlemek amacıyla Şekil 3.5'de verilen KOİ-H_2O_2 grafik verileri kullanılarak gerekli düzeltmeler yapılmıştır.



Şekil 3.5: KOİ-H_2O_2 ilişki grafiği.

3.4. Deneysel Tasarım Yöntemi

Gerçekleştirilen İOP/batık UF hibrit sistemde tekstil atıksuyunun arıtımına ilişkin deneysel çalışmalar, elde edilen sonuçların istatistikî yöntemlerle değerlendirilebilmesi amacıyla deneysel tasarım çerçevesinde planlanmış ve yürütülmüştür. Bu amaçla, hem İOP hem de batık UF proseslerinin performans değerlendirmelerini, İOP/UF hibrit proses bütününde ayrı ayrı dikkate alan ortak bir Taguchi deneysel tasarım planlaması uygulanmış; deneysel sonuçların analizi, cevap yüzeyi yöntemi (response surface methodology) üzerinden Design Expert 9.0 yazılımı kullanılarak yerine getirilmiştir. Deneysel tasarım uygulaması, Şekil 3.6 ’da verilen genel yapı çerçevesinde gerçekleştirilmiş olup, proses performanslarının izlenmesi, pH, elektriksel iletkenlik (E_i), toplam çözünmüş katılar (TÇK), toplam organik karbon (TOK), kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), renk, klorür, sülfat ve akı sonuç parametreleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. İOP/UF hibrit sistemin deneysel tasarımında dikkate alınmış giriş değişkenleri ve seviyelerine ilişkin bilgiler Tablo 3.4’te verilmiştir.

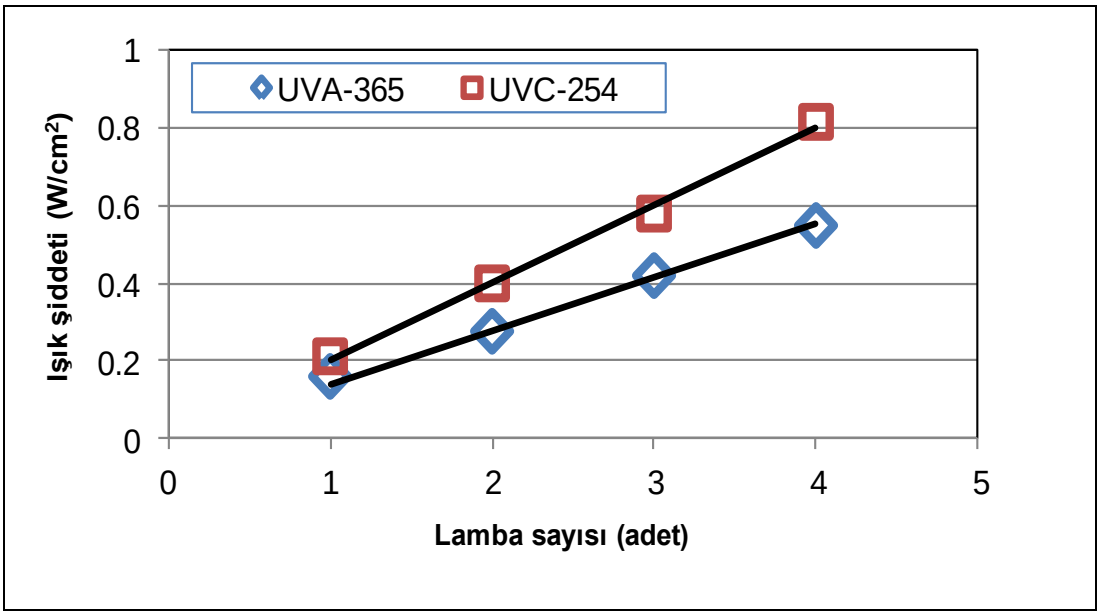


Şekil 3.6: Çalışmasında uygulanan deneysel tasarım yöntemi.

Tablo 3.4: İOP/UF hibrit sistem Taguchi tasarım deneyleri değişkenleri ve seviyeleri.

Giriş Değişkeni	Parametre	Açıklaması	Birim	Deneysel Tasarım Seviyesi			
				En düşük (1)	Düşük (2)	Yüksek (3)	En Yüksek (4)
A	t	Zaman	dak	15	30	45	60
B	T	Sıcaklık	^{0}C	25	30	35	40
C	pH	pH	–	3	4	5	6
D	H_2O_2/TOK	H_2O_2/TOK oranı	g/g	6	14	22	30
E	H_2O_2/Fe^{2+}	H_2O_2/Fe^{2+} oranı	g/g	3	7	11	15
F	v_H	İOP reaktörü havalandırma hızı	L/dk	1	2	3	4
G	$v_{SÇ}$	UF membranda su çekim hızı	rpm	55	70	85	100
H	M_T	Membran türü	–	UP005	UP020	UH050	UV150
J	$I_Ş$	Işık şiddeti[1]	[1]Lamba sayısı	1	2	3	4
K	I_T	Işık türü	–	UVC–254	UVA–365	–	–

[1] Lamba sayısına bağlı olarak UVC-254 ve UVA-365 ışık kaynağı türleri için İOP/batık UF hibrit reaktörde ölçülmüş ışık şiddeti değerleri Şekil 3.7'da gösterilmiştir.



Şekil 3.7: Hibrit İOP/batık UF reaktörde lamba sayısına bağlı ışık şiddeti değişimleri.

Hibrit Fenton ve foto-Fenton prosesleri için gerçekleştirilen 32 deneylik tasarımlarda, ışık türü hariç proses değişkenlerinin tamamı dört (4) seviyede seçilmiş olup, ışık türü için UVC-254 ve UVA-365 olmak üzere 2 değişken seviyesi dikkate alınmıştır. Proses performansı analizlerinde giriş değişkenlerinin sonuç parametreleri üzerine etkileri, ilk olarak lineer model bazında ANOVA (analysis of variance (varyans analizi)) yöntemi ile belirlenmiştir.

Giriş ve sonuç parametreleri arasındaki ilişki denklemleri, hibrit reaktörde esasen organik giderimi gerçekleştirildiğinden TOK ve KOI parametreleri üzerinden (İOP reaktörde pH ve batık UF proseste süzüntü akısı (*J*) da dâhil olmak üzere) lineer ve lineer olmayan model ilişki denklemleri ile ortaya çıkarılmıştır. Deneysel ve model tahmin sonuçları arasında çok daha iyi seviyelerde korelasyon elde ediliyor olması dolayısıyla yüzey cevap yöntemine (response surface methodology) dayalı çözümlemeler, II. derece lineer olmayan çözümleme esasında yerine getirilmiştir. Bu sayede, iki (2) ve/veya üç (3) boyutlu değişim grafikleri (contour veya 3D surface graphics) üzerinden proses performanslarının, her bir proses ve sistemin tamamı için ayrı ayrı belirlenmesi sağlanmıştır. Bu bağlamda uygulanan II. derece lineer olmayan model denklemi aşağıda verilmiştir.

$$Y = z_0 + \sum_{i=1}^{k} z_i \cdot X_i + \sum_{i=1}^{k} z_{ii} \cdot X_i^2 + \sum_{\substack{i=1 \\ j=1}}^{k} z_{ij} \cdot X_i X_j \tag{2.33}$$

Denklemde *Y*, sonuç değişkeni; *X*, giriş veya proses değişkeni; *i* veya *j*, giriş değişkeni numarası; *k*, giriş değişkeni sayısı ve *z*, model ilişki katsayısıdır.

Sonuç performanslarının belirlenmesi sonrasında, İOP/batık UF hibrit sistemdeki her bir prosese özgü giriş parametreleri için tercih önceliklerine göre maksimum/minimum yap veya aralıkta seç gibi tercih seçimleri yapılmak suretiyle, İOP/UF hibrit sistemde ulaşılmak istenen "*en uygulanabilir yüksek performans*" üzerinden optimizasyon işlemleri yerine getirilmiştir. Belirlenen optimum senaryolar arasından uygun olanların seçimi, herhangi bir optimum çözüm şartı için yazılım tarafından hesaplanmış arzu edilebilirlik (desirability: maksimum 1.0 olan ve genellikle >0.8 olan çözümlerin, gerçekte karşılaşılacak sonuçları daha iyi temsil edecek olması sebebiyle optimum şart seçiminde tercih edilme önceliğinin belirlendiği istatistiksel belirteç) parametresi dikkate alınarak gerçekleştirilmiş; bu sayede "*en uygulanabilir*" olan çözümler arasından seçim yapılabilmiştir. "*Yüksek performans*" belirteci olarak ise, TOK, KOİ ve *J* için hibrit prosese özgü elde edilmiş en iyi performansları bir arada sağlayan ya da eğer mümkünse daha yüksek performans elde edilebilen hedef değerler kullanılmıştır. Nihai olarak optimum seçiminde, 0.8'in üzerinde ve mümkünse 1'e yakın arzu edilebilirlik şartının sağlanabilirliği en temel unsur olarak dikkate alınmıştır.

Tekstil atıksuyunun Fenton ve foto-Fenton prosesleriyle birleştirilmiş batık UF prosesli hibrit deneysel arıtımları için uygulanmış, proses değişkenlerinin kodlanmış değerlerini içeren Taguchi deneysel tasarım tabloları sırasıyla Tablo 3.5 ve 3.6 'da sunulmuştur.

Tablo 3.5: Fenton deneyleri için değişkenlerin kodlanmış değerlerini içeren Taguchi deneysel tasarım tablosu.

Deney No	Giriş Parametreleri							
	A t	B T	C pH	D H_2O_2/TOK	E H_2O_2/Fe^{2+}	F v_H	G $v_{SÇ}$	H M_T
1	3	1	2	3	4	1	2	3
2	3	2	1	4	3	2	1	4
3	2	4	1	3	2	1	4	2
4	1	2	2	2	2	2	2	2
5	1	2	3	2	3	1	4	1
6	1	3	3	3	3	3	3	3
7	3	4	2	2	4	3	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1
9	4	2	4	3	1	3	1	2
10	3	2	4	4	2	1	3	3
11	2	4	4	3	3	2	2	1
12	3	4	3	2	1	4	3	2
13	1	1	4	1	4	2	3	2
14	2	3	3	4	4	1	1	2
15	1	3	2	3	2	4	1	4
16	4	3	4	2	1	1	2	4
17	4	1	2	4	3	3	4	2
18	1	4	4	4	4	4	4	4
19	4	2	1	3	4	4	3	1
20	4	3	1	2	4	2	4	3
21	4	4	3	1	2	2	1	3
22	1	4	1	4	1	3	2	3
23	3	3	1	1	3	4	2	2
24	4	1	3	4	2	4	2	1
25	2	2	2	1	1	4	4	3
26	3	3	4	1	2	3	4	1
27	2	1	4	2	3	4	1	3
28	2	2	3	1	4	3	2	4
29	2	1	1	2	2	3	3	4
30	2	3	2	4	1	2	3	1
31	3	1	3	3	1	2	4	4
32	4	4	2	1	3	1	3	4

Tablo 3.6: Foto–Fenton deneyleri için değişkenlerin kodlanmış değerlerini içeren Taguchi deneysel tasarım tablosu.

Deney No	Giriş Parametreleri									
	A t	B T	C pH	D H_2O_2/TOK	E H_2O_2/Fe^{2+}	F v_H	G $v_{SÇ}$	H M_T	J $I_Ş$	K I_T
1	3	1	2	3	4	1	2	3	4	1
2	3	2	1	4	3	2	1	4	3	1
3	2	4	1	3	2	1	4	2	3	2
4	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1
5	1	2	3	2	3	1	4	1	4	2
6	1	3	3	3	3	3	3	3	3	1
7	3	4	2	2	4	3	1	1	3	2
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	4	2	4	3	1	3	1	2	4	2
10	3	2	4	4	2	1	3	3	1	2
11	2	4	4	3	3	2	2	1	1	1
12	3	4	3	2	1	4	3	2	1	1
13	1	1	4	1	4	2	3	2	3	2
14	2	3	3	4	4	1	1	2	2	1
15	1	3	2	3	2	4	1	4	1	2
16	4	3	4	2	1	1	2	4	3	1
17	4	1	2	4	3	3	4	2	1	1
18	1	4	4	4	4	4	4	4	4	1
19	4	2	1	3	4	4	3	1	2	1
20	4	3	1	2	4	2	4	3	1	2
21	4	4	3	1	2	2	1	3	4	1
22	1	4	1	4	1	3	2	3	2	2
23	3	3	1	1	3	4	2	2	4	2
24	4	1	3	4	2	4	2	1	3	2
25	2	2	2	1	1	4	4	3	3	1
26	3	3	4	1	2	3	4	1	2	1
27	2	1	4	2	3	4	1	3	2	2
28	2	2	3	1	4	3	2	4	1	2
29	2	1	1	2	2	3	3	4	4	1
30	2	3	2	4	1	2	3	1	4	2
31	3	1	3	3	1	2	4	4	2	2
32	4	4	2	1	3	1	3	4	2	2

3.5. Hibrit İOP/Batık UF Deneysel Çalışma Sonuçları

İP 3.1 kapsamında, yoğun su tüketimi gerçekleştirilen ve buna bağlı yüksek miktarlarda atıksu oluşumuna sebebiyet veren projeye konu tekstil ve kağıt atıksularının, ileri oksidasyon prosesi/batık ultrafiltrasyon (İOP/batık UF) hibrit sistemde arıtım çalışmaları yerine getirilmiştir. Atıksuyun İP 3.1 kapsamında arıtım çalışmaları, deneysel tasarım uygulaması ışığında, Fenton prosesi veya UVC-254 ve UVA-365 destekli foto-Fenton prosesiyle ileri oksidasyonu ve beraberinde aynı reaktörde batık UF membran proses uygulaması bütününde ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, tekstil atıksuyu için ayrı alt başlıklarda sunulmuştur.

3.5.1. Tekstil Atıksularının İOP/Batık UF Hibrit Sistemde Arıtımı

- Fenton Deneyleri

İOP/batık UF hibrit reaktörde tekstil atıksuyunun Fenton prosesiyle arıtımında, değişkenlerin deneysel değerlerini içeren Taguchi deneysel tasarım tabloları ve deneysel performans sonuçları, İO ve batık UF prosesleri için sırasıyla Tablo 3.5 ve 3.6'da verilmiştir. Batık UF prosese ait sonuçlar, tüm sistemin performansı bakımından İOP/batık UF hibrit sistemde arıtılmış çıkış suyunun kalitesini vermektedir. İzlenen parametreler arasında yer alan renk parametresinde, sadece atıksuyun renginin değil, aynı zamanda Fenton proseste demirden gelen rengin de hibrit sistem çıkış suyunda bilinmesi gerektiği için (hibrit sistem sonrası NF ve/veya TO ile su geri kazanımı gerçekleştirileceğinden ve bu proseslerde renk verimi demir giderimi üzerinden de izleneceğinden), hibrit sisteme ve sistemdeki her iki prosese ait kirletici giderim verimi izlemeleri, TOK ve KOİ parametreleri üzerinden yerine getirilmiştir. Bu bağlamda, İOP/batık UF hibrit reaktörde tekstil atıksuyunun Fenton prosesiyle arıtımında TOK ve KOİ giderim verimleri, Tablo 3.7' da gösterilmiştir.

Tablo 3.7: İO prosesi için değişkenlerin deneysel değerlerini içeren Taguchi deneysel tasarım tablosu ve her bir sonuç parametresi için deneysel sonuçlar.

Deney No	Giriş Parametreleri						Sonuç Parametreleri							
							İO Prosesi							
	A	B	C	D	E	F	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6 renk		
	t	*T*	pH	H_2O_2 /T0K	H_2O_2 /Fe^{2+}	ν_H	pH	E_i	TÇK	TOK	KOI	λ_{436}	λ_{525}	λ_{620}
1	45	25	4	22	15	1	2.48	454	2370	603	1592	0.86	0.22	0.08
2	45	30	3	30	11	2	2.96	483	2530	470	1254	1.30	0.73	0.92
3	30	40	3	22	7	1	2.17	582	3100	573	1012	1.15	0.38	0.16
4	15	30	4	14	7	2	2.27	504	2650	668	1594	0.87	0.30	0.16
5	15	30	5	14	11	1	2.76	469	2550	778	1982	0.51	0.04	0.02
6	15	35	5	22	11	3	2.52	475	2480	720	1804	0.47	0.16	0.08
7	45	40	4	14	15	3	2.35	474	2480	566	1039	0.43	0.09	0.04
8	15	25	3	6	3	1	2.37	510	2680	778	1663	0.91	0.23	0.10
9	60	30	6	22	3	3	2.41	917	5000	612	1144	1.20	0.32	0.13
10	45	30	6	30	7	1	2.34	551	2980	499	1265	0.85	0.45	0.13
11	30	40	6	22	11	2	2.16	636	3410	512	1021	1.37	0.43	0.14
12	45	40	5	14	3	4	2.28	690	3690	564	991	1.48	0.48	0.24
13	15	25	6	6	15	2	4.15	489	2570	1010	2530	0.13	0.05	0.02
14	30	35	5	30	15	1	2.76	539	2840	511	990	1.56	0.52	0.31
15	15	35	4	22	7	4	2.82	525	2690	614	1164	2.63	2.37	1.69
16	60	35	6	14	3	1	2.72	622	3029	533	1414	1.98	1.37	2.68
17	60	25	4	30	11	3	2.19	518	2720	493	868	0.68	0.12	0.03
18	15	40	6	30	15	4	2.94	444	2240	529	1260	1.67	0.90	0.58
19	60	30	3	22	15	4	2.95	462	2300	513	828	0.94	0.31	0.13
20	60	35	3	14	15	2	2.63	484	2540	537	1245	0.54	0.10	0.03
21	60	40	5	6	7	2	2.87	392	2098	657	1634	0.24	0.14	0.07
22	15	40	3	30	3	3	2.32	701	3850	529	1060	2.40	0.58	0.13
23	45	35	3	6	11	4	2.32	479	2510	636	1241	0.41	0.07	0.02
24	60	25	5	30	7	4	2.56	658	3490	540	903	0.76	0.16	0.04
25	30	30	4	6	3	4	2.65	493	2570	718	1678	0.92	0.26	0.11
26	45	35	6	6	7	3	3.08	500	2560	839	2100	0.67	0.26	0.15
27	30	25	6	14	11	4	2.80	584	3120	731	1896	0.86	0.46	0.27
28	30	30	5	6	15	3	3.67	350	1751	835	2061	1.45	0.98	0.68
29	30	25	3	14	7	3	2.15	465	2300	764	1537	0.95	0.32	0.13
30	30	35	4	30	3	2	2.19	862	4660	524	933	1.58	0.46	0.20
31	45	25	5	22	3	2	1.97	751	4000	589	1230	2.86	1.88	1.96
32	60	40	4	6	11	1	3.07	420	2180	647	1423	0.54	0.09	0.04

Tablo 3.8: UF prosesi için deneysel sonuçlar.

Deney No	Giriş Parametreleri								Sonuç Parametreleri								
									*UF Prosesi								
	A t	B T	C pH	D H_2O_2 /TOK	E H_2O_2 /Fe^{2+}	F ν_H	G $\nu_{SÇ}$	H M_T	Y1 pH	Y2 E_i	Y3 TÇK	Y 4 TOK	Y5 KOI	Y6(renk) renk			Y7(J)
														λ_{436}	λ_{525}	λ_{620}	
1	45	25	4	22	15	1	70	UH050	2.5	4300	2250	536	1336	0.704	0.134	0.035	79.18
2	45	30	3	30	11	2	55	UV150	2.8	5150	2720	431	841	0.920	0.230	0.004	54.82
3	30	40	3	22	7	1	10	UP020	2.1	5780	3160	534	890	0.476	0.080	0.018	12.18
4	15	30	4	14	7	2	70	UP020	2.3	4820	2520	667	1429	0.540	0.138	0.063	61.67
5	15	30	5	14	11	1	10	UP005	2.6	5070	2560	712	1609	0.351	0.021	0.008	17.89
6	15	35	5	22	11	3	85	UH050	2.3	4850	2560	614	1431	0.416	0.049	0.009	37.30
7	45	40	4	14	15	3	55	UP005	2.1	4480	2340	562	978	0.299	0.038	0.016	17.89
8	15	25	3	6	3	1	55	UP005	2.6	4970	2610	663	1286	0.769	0.178	0.082	13.32
9	60	30	6	22	3	3	55	UP020	2.4	8820	4770	592	1032	0.771	0.204	0.072	15.23
10	45	30	6	30	7	1	85	UH050	2.4	5650	2910	451	1072	0.760	0.194	0.090	40.73
11	30	40	6	22	11	2	70	UP005	2.2	6360	3390	477	763	0.367	0.031	0.011	24.36
12	45	40	5	14	3	4	85	UP020	2.2	6590	3520	498	758	0.647	0.122	0.022	12.56
13	15	25	6	6	15	2	85	UP020	4.0	4790	2420	933	2160	0.295	0.108	0.066	60.91
14	30	35	5	30	15	1	55	UP020	2.8	5490	2800	414	702	1.800	0.733	0.492	60.15
15	15	35	4	22	7	4	55	UV150	2.9	5160	2720	544	918	1.081	0.222	0.036	58.60
16	60	35	6	14	3	1	70	UV150	2.6	5670	3010	461	1093	1.047	0.213	0.920	29.30
17	60	25	4	30	11	3	10	UP020	2.2	4830	2620	413	620	0.490	0.090	0.019	20.18
18	15	40	6	30	15	4	10	UV150	2.7	5120	2710	477	1050	0.470	0.058	0.010	25.10
19	60	30	3	22	15	4	85	UP005	2.8	4470	2310	486	747	0.705	0.137	0.043	16.4
20	60	35	3	14	15	2	10	UH050	2.7	4500	2320	474	975	0.398	0.052	0.013	43.00
21	60	40	5	6	7	2	55	UH050	3.1	3830	1995	540	1251	0.183	0.015	0.005	65.86
22	15	40	3	30	3	3	70	UH050	2.4	7570	4060	422	679	1.603	0.389	0.089	7.23
23	45	35	3	6	11	4	70	UP020	2.4	4530	2370	563	1030	0.381	0.066	0.036	25.13
24	60	25	5	30	7	4	70	UP005	2.4	6160	3250	510	809	0.716	0.150	0.032	17.89
25	30	30	4	6	3	4	10	UH050	2.7	4660	2450	593	1256	0.931	0.186	0.034	28.42
26	45	35	6	6	7	3	10	UP005	3.2	4270	2220	709	1632	0.099	0.040	0.028	8.38
27	30	25	6	14	11	4	55	UH050	2.9	5690	3010	559	1399	0.250	0.065	0.036	25.0
28	30	30	5	6	15	3	70	UV150	3.5	3440	1774	741	1693	0.156	0.026	0.017	87.5
29	30	25	3	14	7	3	85	UV150	2.4	4600	2320	660	1044	0.710	0.138	0.040	30.5
30	30	35	4	30	3	2	85	UP005	2.2	8350	4320	476	777	1.291	0.366	0.115	5.0
31	45	25	5	22	3	2	10	UV150	1.9	6540	3970	484	947	0.570	0.067	0.006	1362.0
32	60	40	4	6	11	1	85	UV150	2.9	4130	2153	598	1228	0.414	0.038	0.010	37.1

Tablo 3.9: TOK ve KOİ giderim verimleri (%).

Deney No	İO Prosesi		UF Prosesi		İOP/UF Sistemi	
	TOK[a]	KOİ [a]	TOK	KOİ	TOK	KOİ
1	31.7	36.0	11.1	16.1	39.2	46.3
2	42.7	46.2	8.4	32.9	47.5	63.9
3	31.6	59.4	6.8	12.1	36.3	64.3
4	22.4	31.8	0.3	10.4	22.6	38.8
5	7.3	17.7	8.5	18.8	15.1	33.2
6	22.0	30.4	14.7	20.7	33.5	44.8
7	35.2	54.0	0.7	5.9	35.7	56.7
8	11.6	33.4	14.8	22.7	24.7	48.5
9	27.3	58.2	3.3	9.8	29.7	62.3
10	42.9	50.1	9.5	15.3	48.3	57.7
11	45.4	61.1	7.0	25.2	49.2	70.9
12	33.1	61.1	11.7	23.5	41.0	70.2
13	4.7	7.5	7.6	14.6	12.0	21.1
14	39.5	57.9	18.9	29.1	51.0	70.2
15	35.7	44.9	11.5	21.1	43.1	56.5
16	34.8	45.4	13.4	22.7	43.5	57.8
17	42.8	62.8	16.2	28.6	52.1	73.5
18	44.0	55.0	9.8	16.7	49.5	62.5
19	46.6	65.8	5.3	9.8	49.4	69.2
20	39.2	50.1	11.6	21.7	46.2	60.9
21	28.8	37.0	17.8	23.4	41.5	51.7
22	40.1	57.5	20.2	35.9	52.2	72.8
23	26.6	50.3	11.5	17.0	35.1	58.7
24	35.6	62.5	5.6	10.4	39.2	66.4
25	14.1	34.6	17.4	25.2	29.1	51.1
26	11.3	20.0	15.5	22.3	25.0	37.8
27	13.2	29.8	23.6	26.2	33.6	48.2
28	13.0	17.8	11.2	17.8	22.7	32.5
29	27.7	38.2	13.6	32.1	37.5	58.1
30	40.0	58.6	9.2	16.7	45.5	65.6
31	35.8	52.8	17.8	23.0	47.2	63.7
32	31.1	42.4	7.6	13.7	36.4	50.3

- İleri Oksidasyon Prosesinin (İOP) Deneysel Performansı

Proses performansı analizlerinde giriş değişkenlerinin sonuç parametreleri üzerine etkileri ilk olarak lineer model bazında ANOVA yöntemi ile belirlendiğinden; hibrit reaktörde tekstil atıksuyunun Fenton prosesiyle arıtımında, İOP reaktörün TOK, KOİ ve pH performans parametreleri için lineer model (Model I) ANOVA analiz sonuçları Tablo 3.10'de verilmiş; hem I. derece lineer hem de II. derece lineer olmayan model bazında proses performans parametrelerine ait model denklemleri Tablo 3.11'de sunulmuştur. Tablo 3.10 için F istatistik ve P olasılık değerleri model ve değişkenlerin önem seviyesini belirtmekte; P>F değeri için 0.05'ten küçük olan model ve terimlerinin sonuç değişkeni üzerine etkileri "Önemli", 0,1'den büyük olan model ve terimlerinin sonuç değişkeni üzerine etkileri ise "Önemsiz" olarak değerlendirilmektedir. Tablo 3.11'de I. derece lineer model için verilen P>F değerlerine bakıldığında, İOP reaktörde TOK, KOİ ve pH etkinliklerinin lineer model ilişkilerine göre önemli olduğu görülmektedir. Proseste TOK ve KOİ giderim verimleri için zaman, H_20_2 konsantrasyonu, sıcaklık ve pH' nın, İOP reaktördeki pH değişimleri için ise H_20_2 ve Fe^{2+} konsantrasyonlarıyla kısmen atıksuyun başlangıçta ayarlanan pH' sının önemli performans etkilerinin olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 3.10: İOP reaktörün performans parametreleri için lineer model (Model I) ANOVA analiz sonuçları.

Performans parametresi	**Değişken**	**Kareler Toplamı**	**Serbestlik Derecesi**	**Ortalama Kareler Toplamı**	***F* Değeri**	***P>F* Değeri**
TOK (%)		3823.39	6	637.23	21.63	< 0.0001
	A-t	681.05	1	681.05	23.12	< 0.0001
	B-T	532.48	1	532.48	18.07	0.0003
	C-pH	171.38	1	171.38	5.82	0.0235
	D-	2423.42	1	2423.42	82.26	< 0.0001
	E-	13.42	1	13.42	0.46	0.5059
	F- v_H	1.64	1	1.64	0.056	0.8155
	Artan	736.55	25	29.46		
	Toplam	4559.95	31			
KOI (%)		5910.88	6	985.15	16.96	< 0.0001
	A-t	1271.81	1	1271.81	21.89	< 0.0001
	B-T	759.40	1	759.40	13.07	0.0013
	C-pH	390.51	1	390.51	6.72	0.0157
	D-	3097.20	1	3097.20	53.31	< 0.0001
	E-	192.42	1	192.42	3.31	0.0808
	F- v_H	199.55	1	199.55	3.43	0.0757
	Artan	1452.50	25	58.10		
	Toplam	7363.39	31			
pH (-)		2.61	6	0.44	3.38	0.0141
	A-t	0.068	1	0.068	0.53	0.4730
	B-T	0.060	1	0.060	0.46	0.5026
	C-pH	0.40	1	0.40	3.11	0.0901
	D-	1.25	1	1.25	9.67	0.0046
	E-	0.83	1	0.83	6.40	0.0181
	F- v_H	0.012	1	0.012	0.091	0.7655
	Artan	3.22	25	0.13		
	Toplam	5.84	31			

Tablo 3.11: İOP reaktörü için proses performans parametrelerine ait model denklemleri.

Proses Performans Parametresi	**Model I (Lineer Model)**	**Model II (II. Derece Lineer Olmayan Model)**
TOK (%)	29.93 +6.19 * A +5.47 * B -3.10 * C +11.68 * D +0.87 * E +0.30 * F (S = 5.43 ve r^2 = 0.8385)	22.84 +1.52 * A +5.84 * B -2.18 * C +13.31 * D -0.47 * E +0.73 * F +2.72 * AB -2.23 * AC +2.47 * AD +2.47 * AE -4.19 * AF +4.98 * BC +5.13 * BD +0.30 * BE -1.81 * BF +1.94 * CD -11.26 * CE -3.80 * CF -1.78 * DE -1.16 * DF +1.18 * EF +0.17 * A^2 +10.01 * B^2 -1.64 * C^2 +4.23 * D^2 (S = 5.05 ve r^2 = 0.9664)
KOİ (%)	44.70 +8.46 * A +6.54 * B -4.69 * C +13.20 * D -3.29 * E +3.35 * F (S = 7.62 ve r^2 = 0.8027)	54.34 +21.55 * A +9.66 * B -3.73 * C +13.51 * D -4.28 * E +3.27 * F +0.51 * AB -1.65 * AC +3.98 * AD +0.97 * AE +2.77 * AF -2.67 * BC +7.31 * BD +0.54 * BE +1.29 * BF +6.18 * CD +14.71 * CE -3.49 * CF +2.56 * DE +1.30 * DF +1.02 * EF -3.35 * A^2 -1.28 * B^2 -2.35 * C^2 (S = 6.43 ve r^2 = 0.9663)
pH (%)	2.62 -0.057 * A -0.047 * B +0.18 * C -0.23 * D +0.29 * E +0.027 * F (S = 0.37 ve r^2 = 0.4817)	3.29 +0.41 * A -4.836E-003 * B +0.062 * C -0.10 * D +0.30 * E +0.085 * F +0.21 * AB +0.015 * AC +0.14 * AD -0.16 * AE -0.16 * AF -0.31 * BC +0.14 * BD -0.13 * BE +0.12 * BF -0.19 * CD +0.62 * CE -0.13 * CF +0.20 * DE +0.77 * DF -0.10 * EF -0.52 * A^2 -0.78 * B^2 +0.058 * C^2 +0.043 * D^2 (S = 0.22 ve r^2 = 0.9546)

Tablo 3.11'ye bakıldığında ise, II. derece lineer olmayan modellerin, I. derece lineer modellere kıyasla çok daha iyi bir ilişki düzeyinde düşük standard sapma (*S*) ve yüksek korelasyon (r^2) değerleri verdiği görülmektedir. Bu durum, iç etkileşimli ve II. derece model terimlerinin model kurgusuna ve performans tahminine olan katkılarının önemli olduğu sonucunu ortaya koymaktadır.

İOP proseste, H_2O_2/TOK ve H_2O_2/Fe^{2+} giriş parametreleri ile pH, E_i, TÇK değişimleri Şekil 3.8 'de, TOK, KOİ, renk değişimleri ise Şekil 3.9 'de gösterilmiştir.

İleri oksidasyon prosesinde, reaktöre ilave edilen H_2O_2 ve Fe^{2+} miktarı arttıkça (H_2O_2/Fe^{2+} giriş parametresi miktarı azaldıkça) pH 2,7 civarına azalmakta ve iletkenlik 8000 μS/cm civarına artmakta; toplam çözünmüş katı madde miktarı, doğrusal olmayan bir artışla iki kat değerinin biraz üzeri olan 4200 mg/L değerine çıkmaktadır. Renk parametresi ise ortalama H_2O_2 konsantrasyonlarda sırasıyla dış ve iç bükey değişimler altında maksimum ve minimum değerler göstermektedir.

Hibrit reaktör içerisinde organik madde giderimi, esasen reaktöre ilave edilen H_2O_2 konsantrasyonuna bağlı olarak gerçekleşmekte, ilave edilen Fe^{2+} miktarı rölatif çok düşük giderim verimi katkısı sağlamaktadır. Buna ilaveten, artan H_2O_2 konsantrasyonuyla TOK giderimi etkinliğinde kısmen üstel bir değişimle belirgin bir artış görülmekte, aynı hızlı artış eğilimi H_2O_2 miktarının yüksek konsantrasyonlarında KOİ gideriminde gözlenememektedir. Bu durum, uygulamada maliyeti arttıracak olması bakımından yüksek konsantrasyonlarda H_2O_2 ilavesi gerekmeksizin, İOP proseste organik gideriminin TOK ve KOİ esaslı eşzamanlı sağlanabileceği şeklinde değerlendirilmektedir.

- Batık UF Prosesin Deneysel Performansı

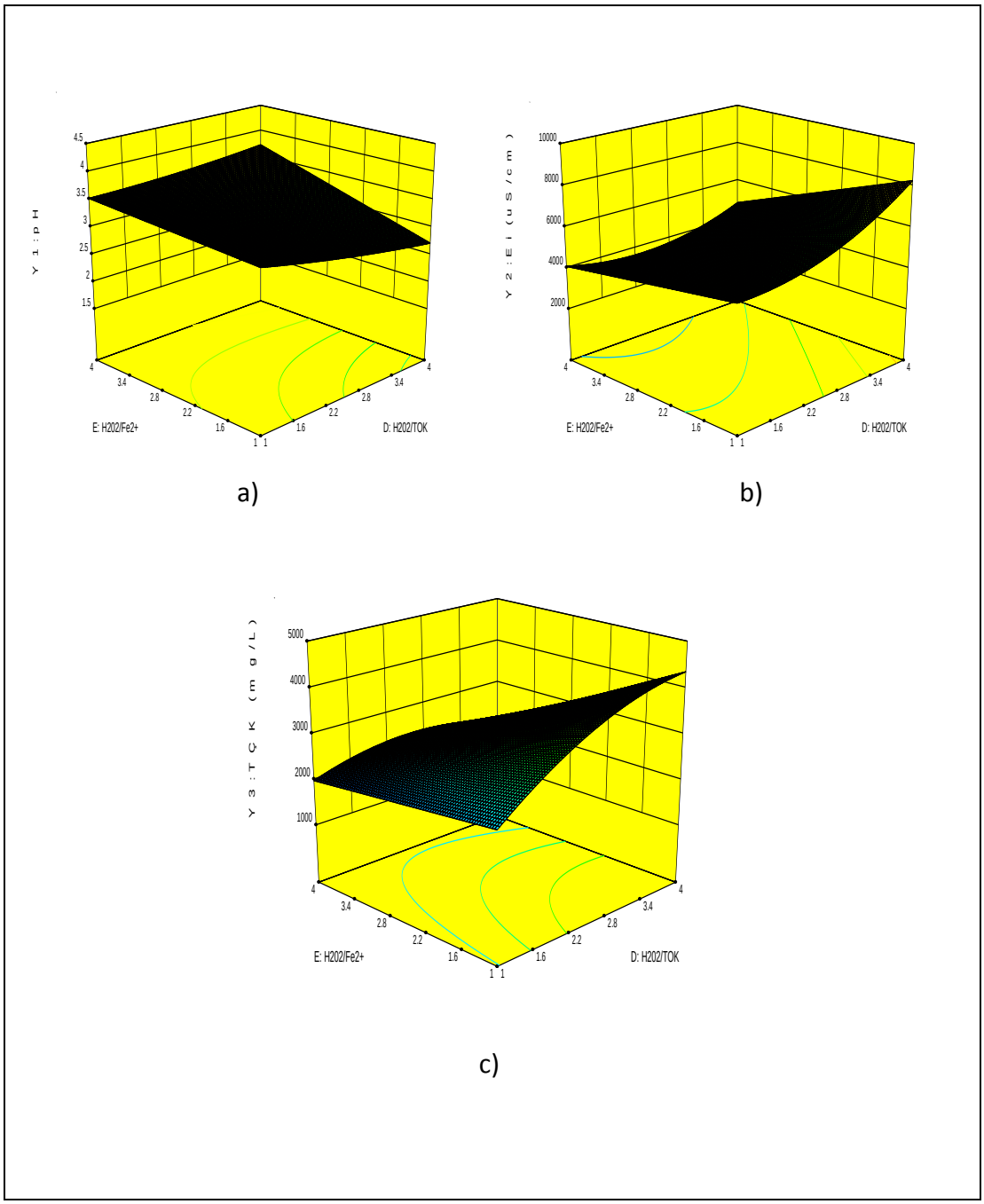
İOP/batık UF hibrit reaktörde tekstil atıksuyunun Fenton prosesiyle arıtımında, batık UF prosesin TOK, KOİ ve süzüntü akısı (*J*) performans parametreleri için lineer model (Model I) ANOVA analiz sonuçları Tablo 3.12 'de; hem I. derece lineer hem de II. derece lineer olmayan model bazında proses performans parametrelerine ait model denklemleri Tablo 3.13'te gösterilmiştir. Tablo 3.12 için F istatistik ve P olasılık değerleri model ve değişkenlerin önem seviyesini belirtmekte; P>F değeri için 0.05'ten küçük olan model ve terimlerinin sonuç değişkeni üzerine etkileri

“Önemli”, 0,1’ den büyük olan model ve terimlerinin sonuç değişkeni üzerine etkileri ise “Önemsiz” olarak değerlendirilmektedir.

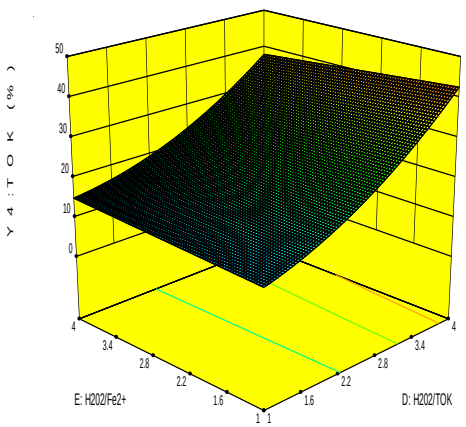
Tablo 3.12’de I. derece lineer model için verilen P>F değerlerine bakıldığında, batık UF proseste TOK, KOİ ve *J* performans parametrelerinden sadece süzüntü akısı sonuç parametresinin lineer modele göre önemli düzeyde bir ilişkisinin mevcut olduğu görülmektedir. Bu önem durumunun da esasen, membran türü, membrandan su çekim hızı ve sonrasında da İOP reaktöre ilave edilen H_20_2 konsantrasyonundan kaynaklandığı değerlendirmesine ulaşılmıştır.

Tablo 3.13’te göre, II. derece lineer olmayan modellerin, birebir ilişki düzeyinde sıfır standard sapma (S=0) ve tam korelasyon (r^2=1.0) değerleri veriyor olmasından hareketle; batık UF proses için tüm ana performans parametrelerinin, esasen iç etkileşimli model terimlerine dayalı olarak tahmin edilebilir olduğu anlaşılmaktadır.

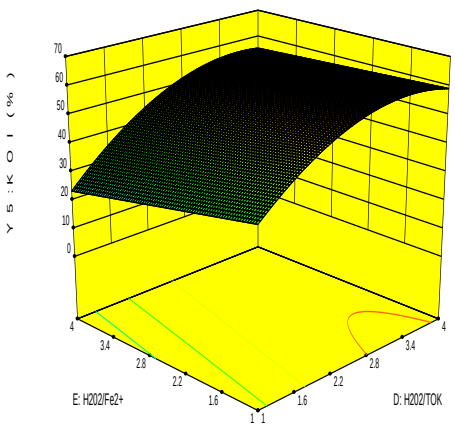
Batık UF proseste, her bir membran türü için H_20_2/TOK ve H_20_2/Fe^{2+} giriş parametreleri ile TOK, KOİ ve süzüntü akısı değişimleri sırasıyla Şekil 3.10, 3.11 ve 3.12’de verilmiştir. UH050 membranı için İOP/batık UF hibrit reaktörde tekstil atıksuyunun Fenton prosesiyle arıtımında İOP reaktör için TOK başına değişen H_20_2 ve Fe^{2+} konsantrasyonlarına göre pH, E_i, TÇK ve parametreleri ile renk değişimleri ise sırasıyla Şekil 3.13 ve 3.14’de gösterilmiştir. (Her bir grafikte, eksenlerde verilen H_20_2/TOK ve H_20_2/Fe^{2+} ile değişimi gösterilen parametre hariç kalan proses parametrelerinin tamamı için ortalama kodlanmış tasarım değerleri, 3.5 değerindedir.).



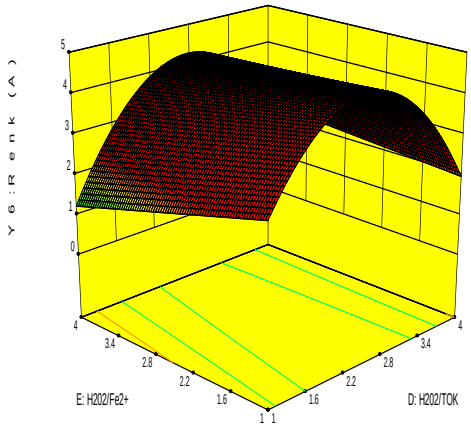
Şekil 3.8: Değişim grafikleri. a) pH, b) E_i, c) TÇK.



a)



b)



c)

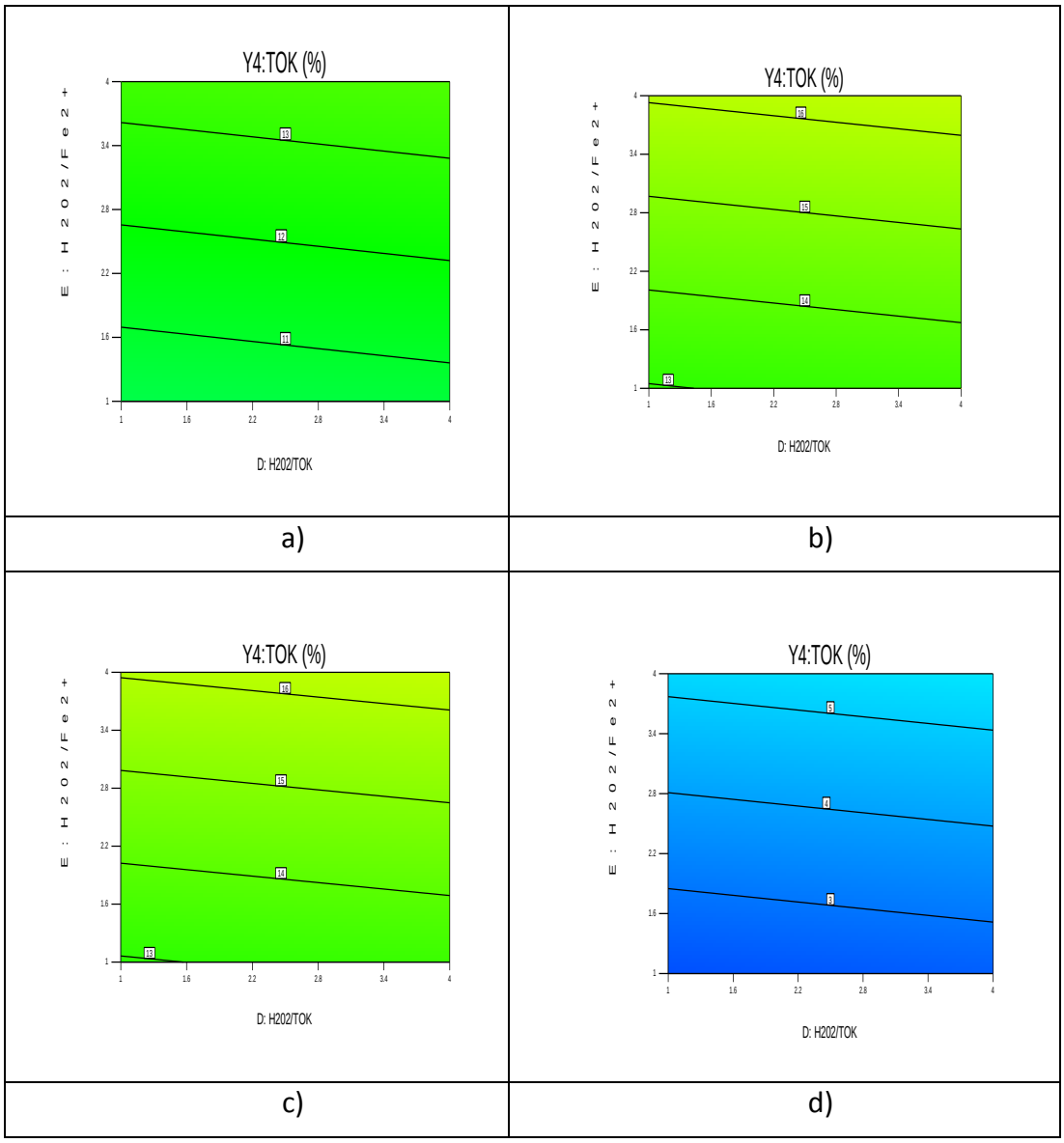
Şekil 3.9: Değişim grafikleri. a) TOK, b) KOİ, c) renk.

Tablo 3.12: Batık UF prosesi performans parametreleri için lineer model (Model I) ANOVA analiz sonuçları.

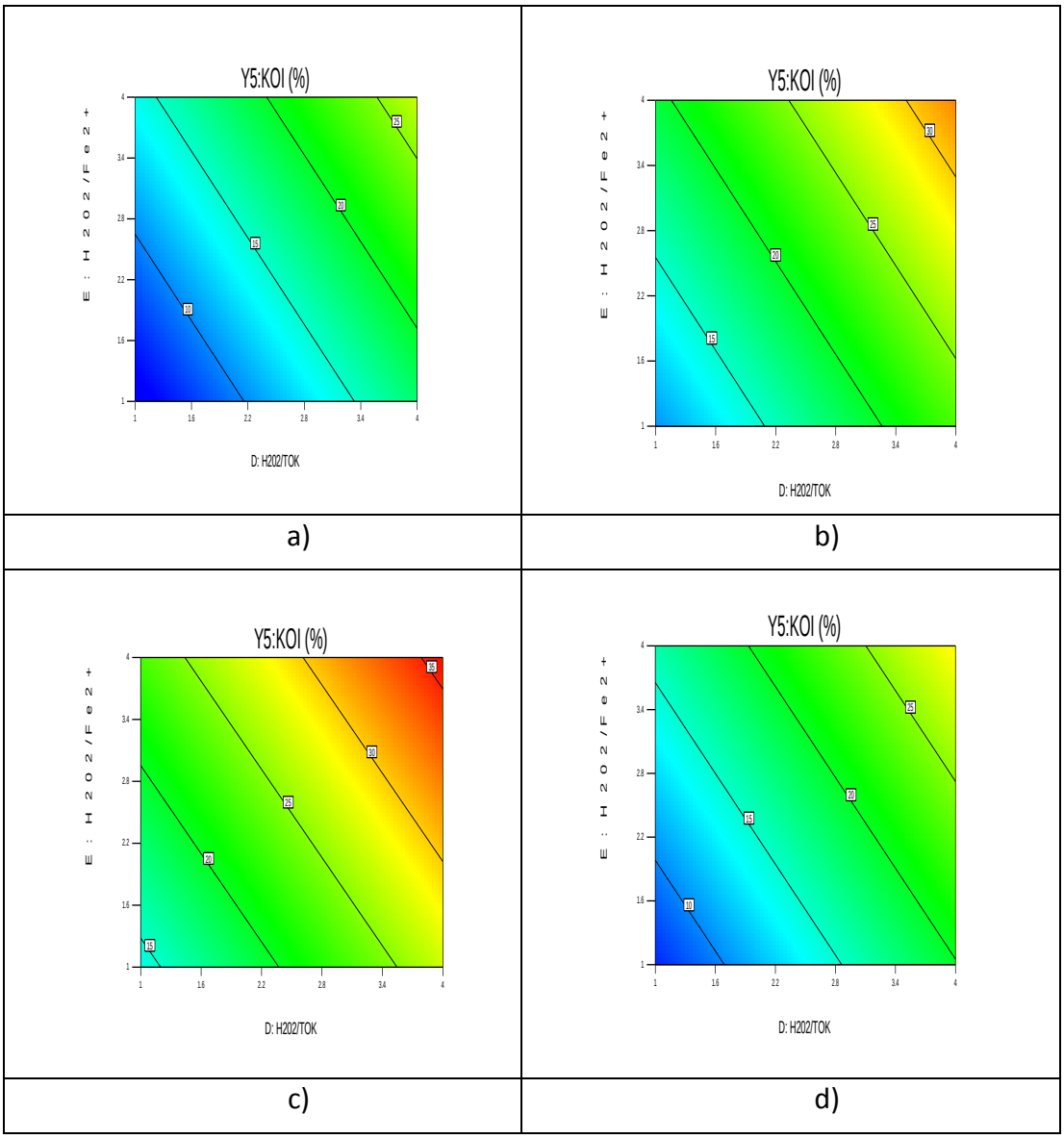
Performans parametresi	Değişken	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kareler Toplamı	*F* Değeri	*P>F* Değeri
TOK (%)	Model	330.90	10	33.09	1.13	0.3868
	A-t	10.71	1	10.71	0.37	0.5518
	B-T	11.86	1	11.86	0.40	0.5314
	C-pH	3.88	1	3.88	0.13	0.7194
	D-H_2O_2/TOK	3.32	1	3.32	0.11	0.7398
	E-H_2O_2/Fe^{2+}	38.46	1	38.46	1.31	0.2647
	F-v_H	6.77	1	6.77	0.23	0.6357
	G-$v_{SÇ}$	1.11	1	1.11	0.038	0.8478
	H-M_T	254.80	3	84.93	2.90	0.0590
	Artan	614.94	21	29.28		
	Toplam	945.84	31			
KOİ (%)	Model	431.41	10	43.14	0.73	0.6888
	A-t	51.60	1	51.60	0.87	0.3606
	B-T	2.66	1	2.66	0.045	0.8340
	C-pH	26.46	1	26.46	0.45	0.5106
	D-H_2O_2/TOK	24.78	1	24.78	0.42	0.5242
	E-H_2O_2/Fe^{2+}	71.92	1	71.92	1.22	0.2823
	F-v_H	0.067	1	0.067	0.00114	0.9734
	G-$v_{SÇ}$	1.89	1	1.89	0.032	0.8596
	H-M_T	252.03	3	84.01	1.42	0.2644
	Artan	1240.49	21	59.07		
	Toplam	1671.90	31			
J ($L/m^2 \cdot sa$)	Model	11765.25	10	1176.52	6.79	0.0001
	A-t	61.11	1	61.11	0.35	0.5589
	B-T	640.08	1	640.08	3.69	0.0683
	C-pH	8.73	1	8.73	0.050	0.8245
	D-H_2O_2/TOK	730.94	1	730.94	4.22	0.0526
	E-H_2O_2/Fe^{2+}	2983.39	1	2983.39	17.22	0.0005
	F-v_H	711.58	1	711.58	4.11	0.0556
	G-$v_{SÇ}$	1648.78	1	1648.78	9.52	0.0056
	H-M_T	4980.63	3	1660.21	9.58	0.0003
	Artan	3638.28	21	173.25		
	Toplam	15403.52	31			

Tablo 3.13: Batık UF prosesi performans parametrelerine ait model denklemleri.

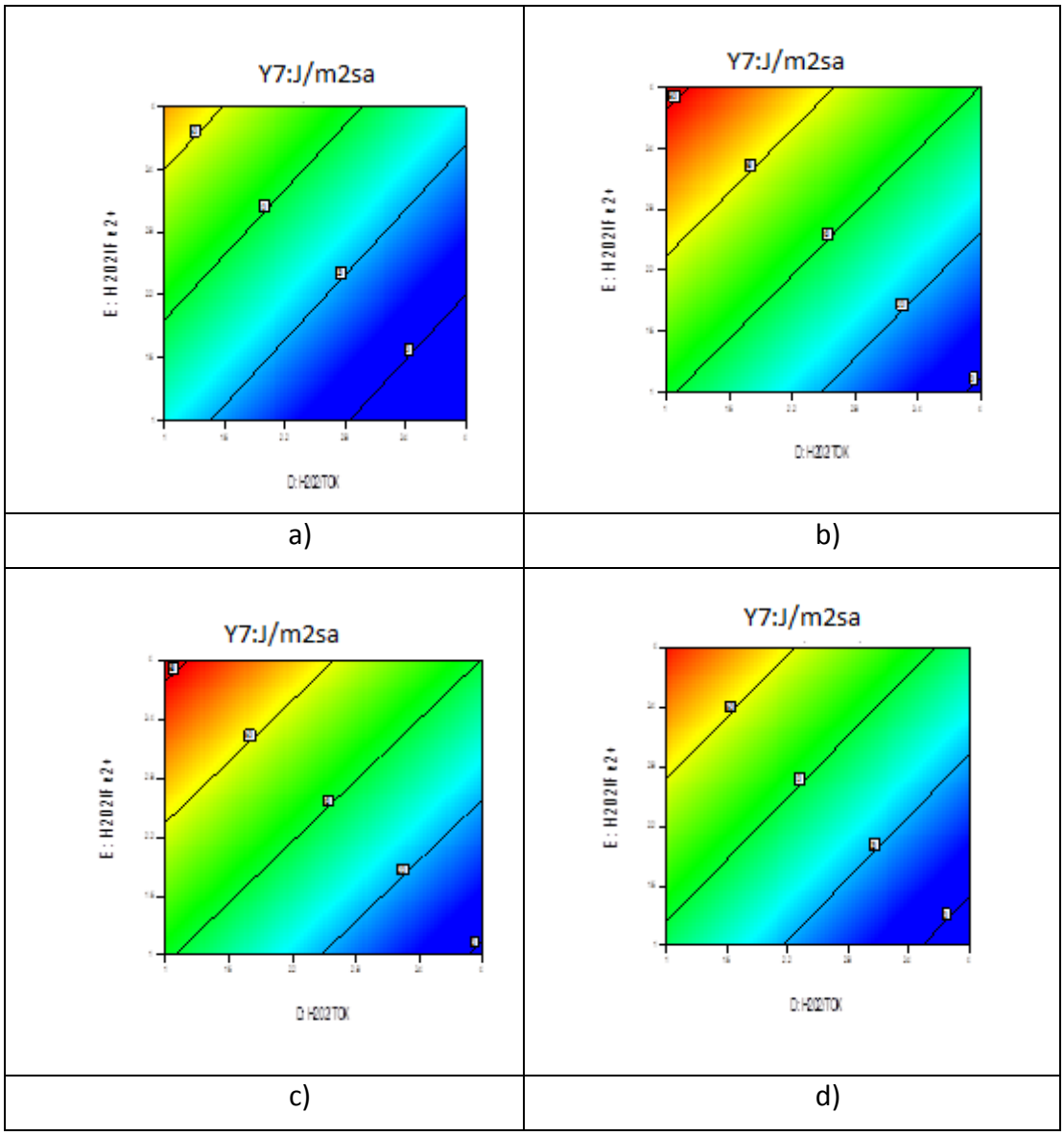
Proses Performans Parametresi	**Model I (Lineer Model)**	**Model II (II. Derece Lineer Olmayan Model)**
TOK (%)	11.31 -0.78 * A -0.82 * B +0.47 * C -0.43 * D -1.47 * E +0.62 * F +0.25 * G -3.00 * H[1] -1.77 * H[2] +4.42 * H[3] (S = 5.41 ve r^2 = 0.3498)	11.31 +3.38 * A -5.76 * B +1.20 * C +0.17 * D +1.56 * E +1.95 * F +0.064 * G +0.71 * H[1] +3.38 * H[2] +3.37 * H[3] +0.49 * AB -0.35 * AC -5.76 * AD -2.43 * AE -7.09 * AF +4.26 * AG -6.37 * AH[1] +4.81 * AH[2] +0.15 * AH[3] +2.25 * BC +0.63 * BD +6.96 * BE -0.57 * BF -0.39 * BG -7.34 * BH[1] +10.00 * BH[2] -9.90 * CD +7.67 * CE -4.62 * CF -0.51 * CH[1] -0.79 * CH[2] (S = 0 ve r^2 = 1)
KOİ (%)	20.04 -1.70 * A -0.39 * B -1.22 * C +1.18 * D -2.01 * E +0.061 * F -0.33 * G -3.56 * H[1] -1.92 * H[2] +3.01 * H[3] (S = 7.69 ve r^2 = 0.2580)	20.04 +5.75 * A -2.19 * B -0.13 * C +6.39 * D +4.49 * E +8.03 * F +1.03 * G -4.09 * H[1] +1.20 * H[2] +5.00 * H[3] +4.46 * AB +4.75 * AC -2.49 * AD -2.45 * AE -1.66 * AF +4.83 * AG -13.74 * AH[1] +1.07 * AH[2] +2.96 * AH[3] +5.62 * BC +7.47 * BD +5.87 * BE +0.33 * BF -2.90 * BG -7.25 * BH[1] +7.45 * BH[2] -10.36 * CD +6.25 * CE -3.62 * CF +7.01 * CH[1] -2.54 * CH[2] (S = 0 ve r^2 = 1)
J (L/m^2·sa)	35.63 -1.85 * A -6.00 * B +0.70 * C -6.41 * D +12.95 * E -6.33 * F -9.63 * G -19.45 * H[1] -2.13 * H[2] +8.93 * H[3] (S = 13.16 ve r^2 = 0.7638)	35.63 -25.86 * A -6.11 * B -2.83 * C -21.64 * D +20.88 * E +7.81 * F -3.22 * G -9.82 * H[1] +4.90 * H[2] +4.78 * H[3] -46.54 * AB +15.53 * AC -8.77 * AD -5.15 * AE -14.36 * AF +3.81 * AG -32.37 * AH[1] -31.12 * AH[2] +41.60 * AH[3] +7.64 * BC -53.86 * BD -1.15 * BE -14.90 * BF +31.84 * BG +18.29 * BH[1] +2.28 * BH[2] -2.97 * CD +18.40 * CE -22.47 * CF -35.42 * CH[1] +42.38 * CH[2] (S = 0 ve r^2 = 1)



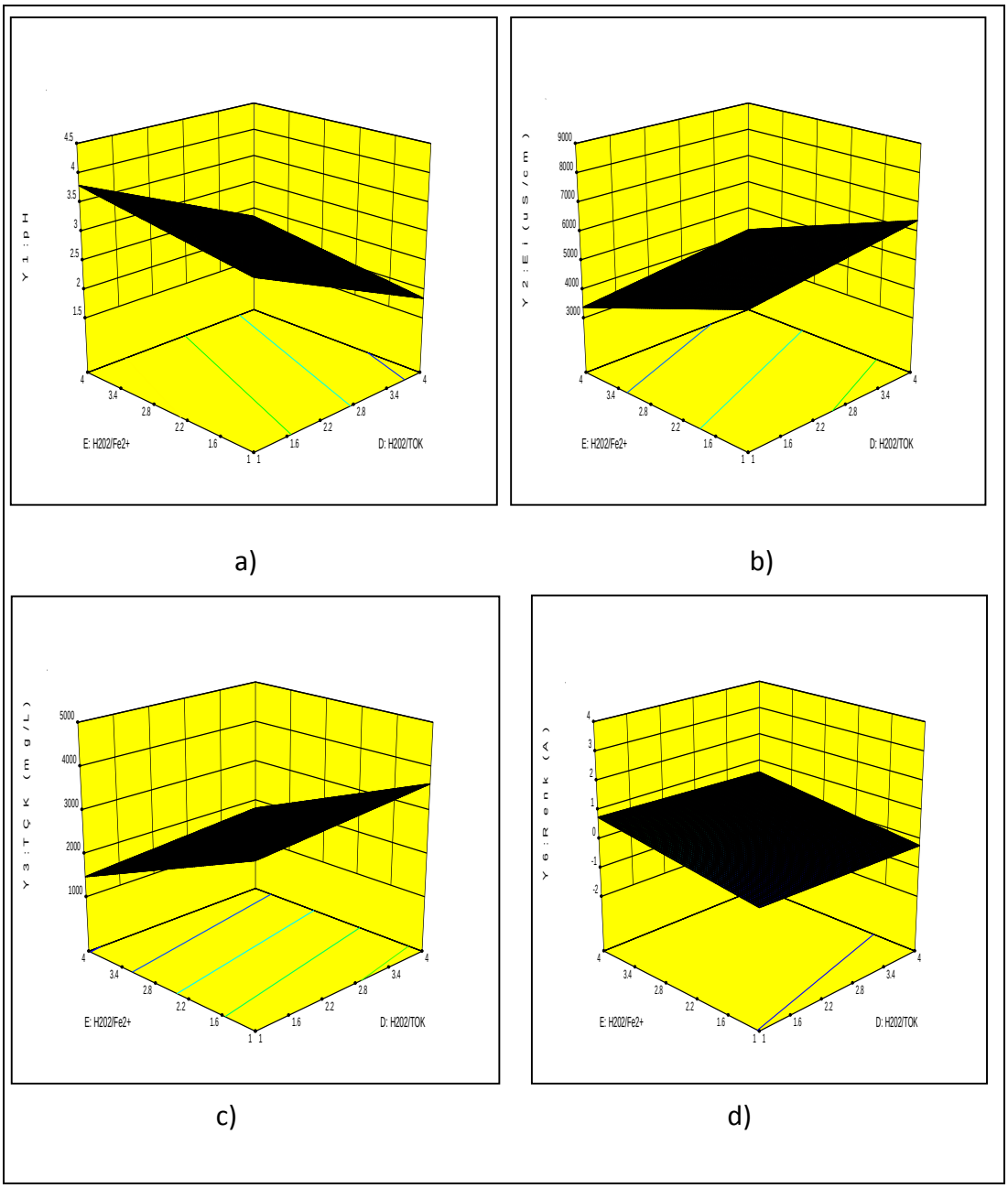
Şekil 3.10: TOK giderim verimi (%) grafikleri. a) UP005, b) UP020, c) UH050 ve d) UV150.



Şekil 3.11: KOİ giderim verimi (%) grafikleri. a) UP005, b) UP020, c) UH050 ve d) UV150.



Şekil 3.12: Süzüntü akısı grafikleri. a) UP005, b) UP020, c) UH050 ve d) UV150.



Şekil 3.13: UH050 membranı için değişim grafikleri. a) pH, b) E_i, c) TÇK, d) Renk.

Batık UF proseste organik madde giderim verimleri, UF prosesi çıkış suyu kalitesi değerlerinin reaktör içerisindeki deney sonu ölçülen değerlere göre ölçülendirilmesi üzerinden belirlenmiştir.

Batık membran proseste H_20_2 ve Fe^{2+} miktarları arttıkça *(H_20_2/Fe^{2+}* azaldıkça), TOK ve KOİ verimleri sırasıyla artmakta ve azalmakta; KOİ için değişimler, TOK parametresine kıyasla daha belirgin seviyelerde olmaktadır. Bunun yanı sıra, H_20_2 ve Fe^{2+} miktarları arttıkça, her iki giriş parametresi için yaklaşık aynı mertebelerde

olmak üzere, UF membran süzüntü akısının azaldığı görülmektedir. Diğer giriş değişkenlerinin ortalama değerleri için verilen değişimlere göre, 2 ve 3 numaralı UP020 ve UH050 membranları yaklaşık aynı seviyelerde olmak üzere en yüksek organik madde giderim verimine ve süzüntü akısı eldesine imkân sağlamakta; ancak KOİ parametresi açısından UH050 membranının etkinliği bir kademe daha iyi olarak gözükmektedir.

Reaktöre ilave edilen H_20_2 ve Fe^{2+} miktarı arttıkça UF prosesi çıkış suyu pH'sı 2'nin biraz altına düşmekte (İOP reaktörde 2.7) ve iletkenlik 6000 μS/cm civarına ulaşmakta (İOP reaktörde 8000 μS/cm); kısmen sülfat parametresinin etkisi altında toplam çözünmüş katı madde miktarı 3600 mg/L (İOP reaktörde 4200 mg/L) değerine çıkmaktadır. Çıkış suyunda klorür miktarının, Fenton reaktöre ilave edilen H_20_2 ve Fe^{2+} miktarıyla azaldığı; buna karşın UF çıkış suyu renk parametresinin, atıksuda kalan ve sudaki çözünmüş demir iyonlarından gelen renk içeriği itibariyle atıksuyun başlangıç renk değeri seviyelerine azaldığı gözlenmektedir.

- İOP/Batık UF Hibrit Sistemin Deneysel Performansı

İOP/batık UF hibrit reaktör sisteminde tekstil atıksuyunun Fenton prosesiyle arıtımında, TOK, KOİ ve süzüntü akısı (*J*) performans parametreleri için lineer model (Model I) ANOVA analiz sonuçları Tablo 2.14'te; I. derece lineer ve II. derece lineer olmayan modeller bazında proses performans parametrelerine ait model denklemleri Tablo 3.15'da sunulmuştur. Tablo 3.14 için F istatistik ve P olasılık değerleri model ve değişkenlerin önem seviyesini belirtmekte; P>F değeri için 0.05'ten küçük olan model ve terimlerinin sonuç değişkeni üzerine etkileri "Önemli", 0,1' den büyük olan model ve terimlerinin sonuç değişkeni üzerine etkileri ise "Önemsiz" olarak değerlendirilmektedir.

Tablo 3.14'te I. derece lineer model için verilen P>F değerlerine bakıldığında, batık UF proseste TOK, KOİ ve *J* performans parametrelerinin lineer modele göre önemli düzeyde bir ilişkiye sahip olduğu görülmektedir. TOK parametresinde, H_20_2 miktarı başta olmak üzere sırasıyla zaman ve sıcaklığın; KOİ parametresinde, yine H_20_2 miktarı başta olmak üzere UF prosesinde etkili parametreler olan membrandan su çekim hızı ve membran türü hariç diğer tüm parametrelerin önemli etkilerinin

olduğu görülmüştür. UF süzüntü akısı için önemli parametrelerin, başta membran türü olmak üzere, esasen H_20_2 miktarı ve membrandan su çekim hızı ile kısmen İOP reaktörü havalandırma hızı ve sıcaklık olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre, İOP/ batık UF hibrit reaktörde organik giderim veriminin esasen H_20_2 miktarı, zaman ve sıcaklığın bir fonksiyonu olduğu; UF membran su akısının ise membran türü, İOP reaktöre ilave edilen H_20_2 miktarı ve membrandan su çekim hızına bağlı olduğu anlaşılmıştır.

Tablo 3.15'ya göre, II. derece lineer olmayan modellerin, birebir ilişki düzeyinde sıfır standard sapma (S=0) ve tam korelasyon (r^2=1.0) değerleri veriyor olmasından hareketle; İOP/batık UF hibrit sistem için tüm ana performans parametrelerinin, lineer ve iç etkileşimli model terimlerine dayalı olarak tahmin edilebilir olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

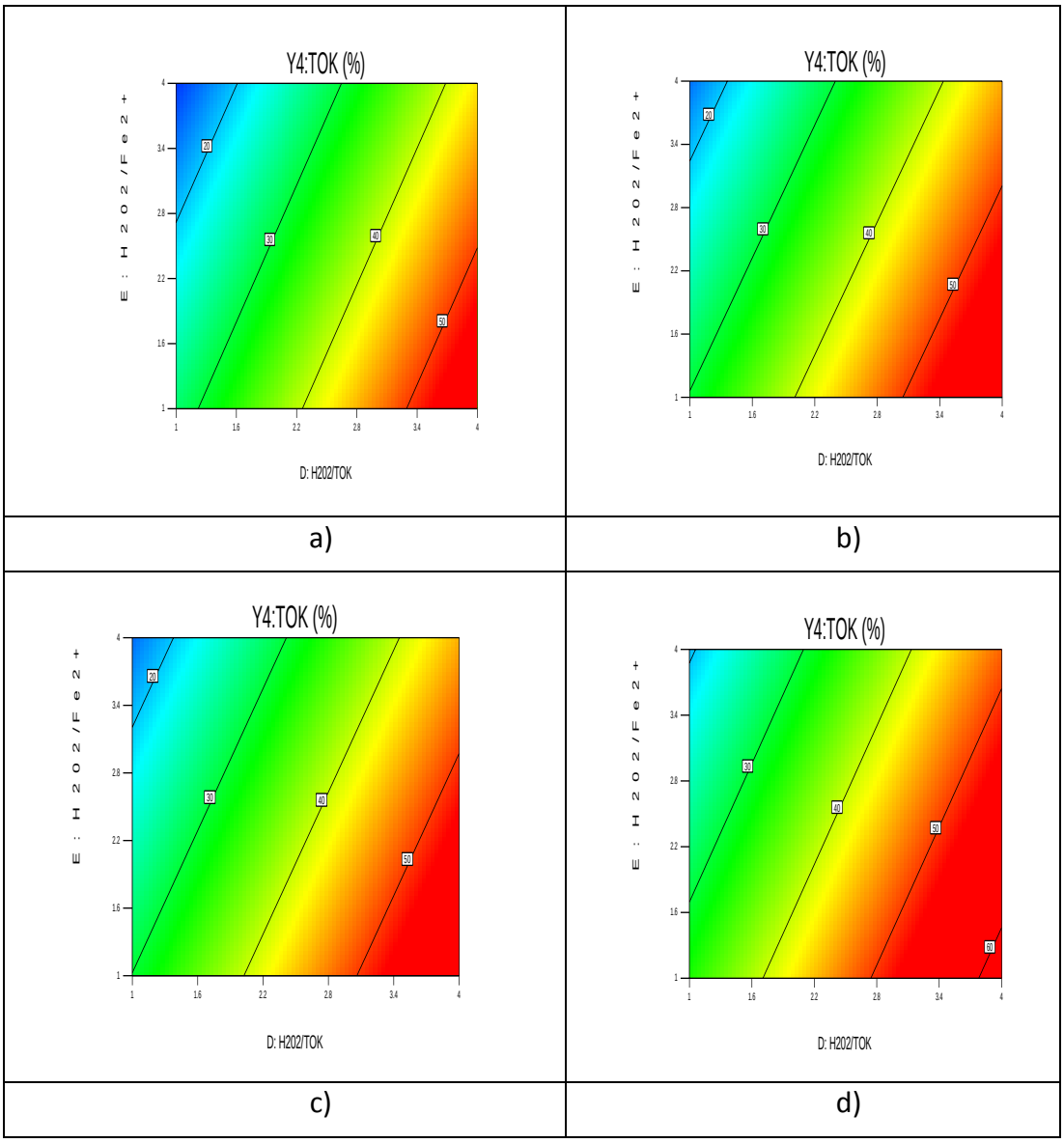
İOP/batık UF hibrit sistemde, her bir membran türü için H_20_2/TOK ve H_20_2/Fe^{2+} giriş parametreleri ile TOK, KOİ ve süzüntü akısı değişimleri sırasıyla Şekil 3.14, 3,15 ve 3.16'de verilmiştir. UF proses çıkış suyu, İOP/batık UF hibrit sistemde arıtılmış çıkış suyuna tekabül ettiğinden, pH, E_i, TÇK, renk parametreleri için performans değişimleri, UF proses için daha önce verildiğinden, hibrit sistem için tekraren gösterilmemiştir.

Tablo 3.14: Fenton prosesiyle arıtımında proses performans parametreleri için lineer modelin (Model I) ANOVA analiz sonuçları.

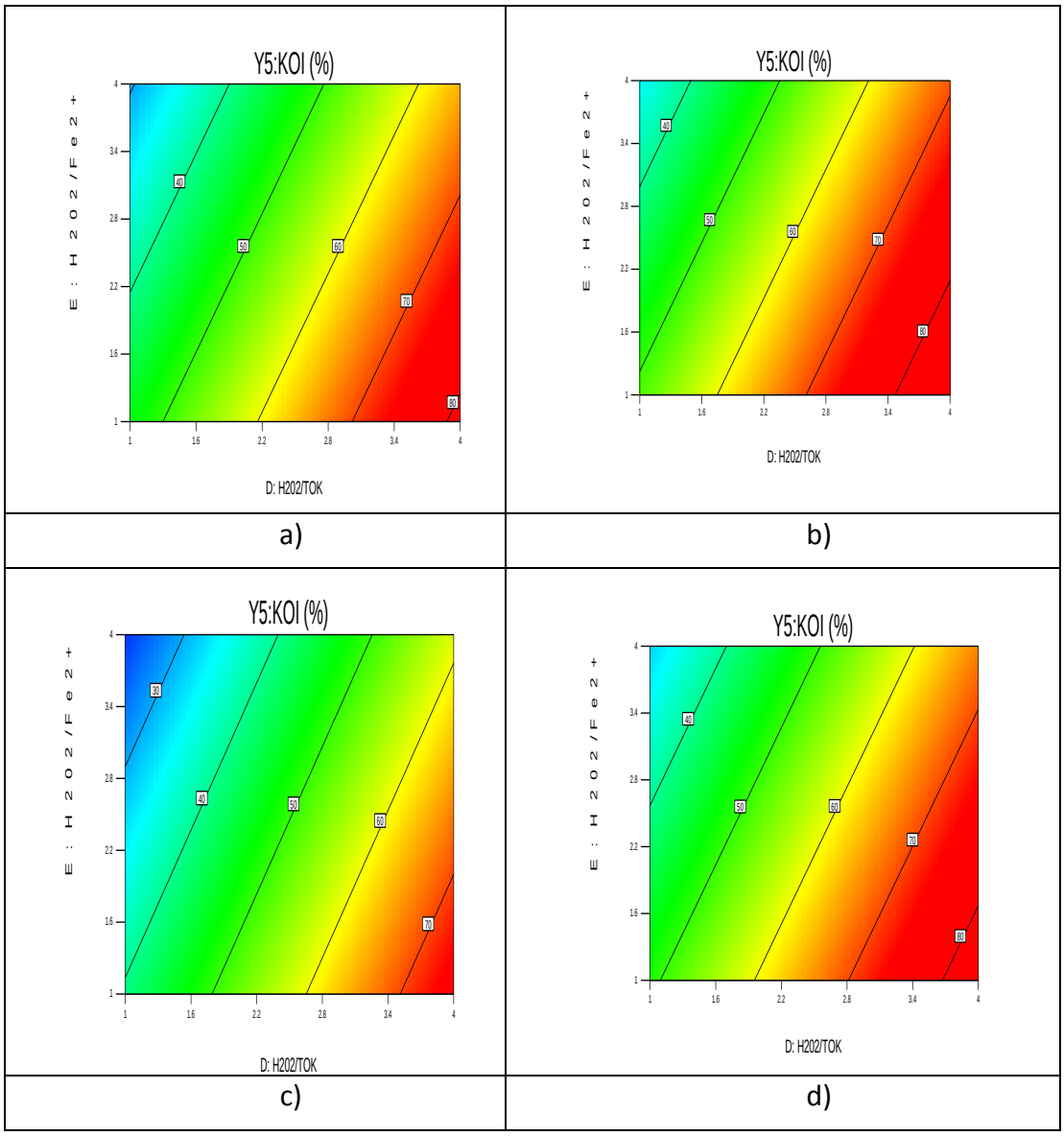
Performans parametresi	Değişken	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kareler Toplamı	*F* Değeri	*P>F* Değeri
TOK (%)	Model	2888.56	10	288.86	7.80	< 0.0001
	A-t	455.33	1	455.33	12.30	0.0021
	B-T	321.36	1	321.36	8.68	0.0077
	C-pH	99.77	1	99.77	2.70	0.1155
	D-H_2O_2/TOK	1749.75	1	1749.75	47.27	< 0.0001
	E-H_2O_2/Fe^{2+}	1.05	1	1.05	0.028	0.8680
	F-ν_H	17.63	1	17.63	0.48	0.4977
	G-$\nu_{SÇ}$	2.12	1	2.12	0.057	0.8131
	H-M_T	241.54	3	80.51	2.18	0.1211
	Artan değer	777.32	21	37.02		
	Toplam	3665.88	31			
KOİ (%)	Model	4218.70	10	421.87	8.74	< 0.0001
	A-t	706.08	1	706.08	14.63	0.0010
	B-T	439.10	1	439.10	9.10	0.0066
	C-pH	361.84	1	361.84	7.50	0.0123
	D-H_2O_2/TOK	2225.08	1	2225.08	46.11	< 0.0001
	E-H_2O_2/Fe^{2+}	264.46	1	264.46	5.48	0.0292
	F-ν_H	170.87	1	170.87	3.54	0.0738
	G-$\nu_{SÇ}$	10.06	1	10.06	0.21	0.6527
	H-M_T	41.21	3	13.74	0.28	0.8359
	Artan değer	1013.46	21	48.26		
	Toplam	5232.16	31			
J ($L/m^2 \cdot sa$)	Model	11765.25	10	1176.52	6.79	0.0001
	A-t	61.11	1	61.11	0.35	0.5589
	B-T	640.08	1	640.08	3.69	0.0683
	C-pH	8.73	1	8.73	0.050	0.8245
	D-H_2O_2/TOK	730.94	1	730.94	4.22	0.0526
	E-H_2O_2/Fe^{2+}	2983.39	1	2983.39	17.22	0.0005
	F-ν_H	711.58	1	711.58	4.11	0.0556
	G-$\nu_{SÇ}$	1648.78	1	1648.78	9.52	0.0056
	H-M_T	4980.63	3	1660.21	9.58	0.0003
	Artan değer	3638.28	21	173.25		
	Toplam	15403.52	31			

Tablo 3.15: Fenton prosesiyle arıtımda proses performans parametreleri için model denklemleri.

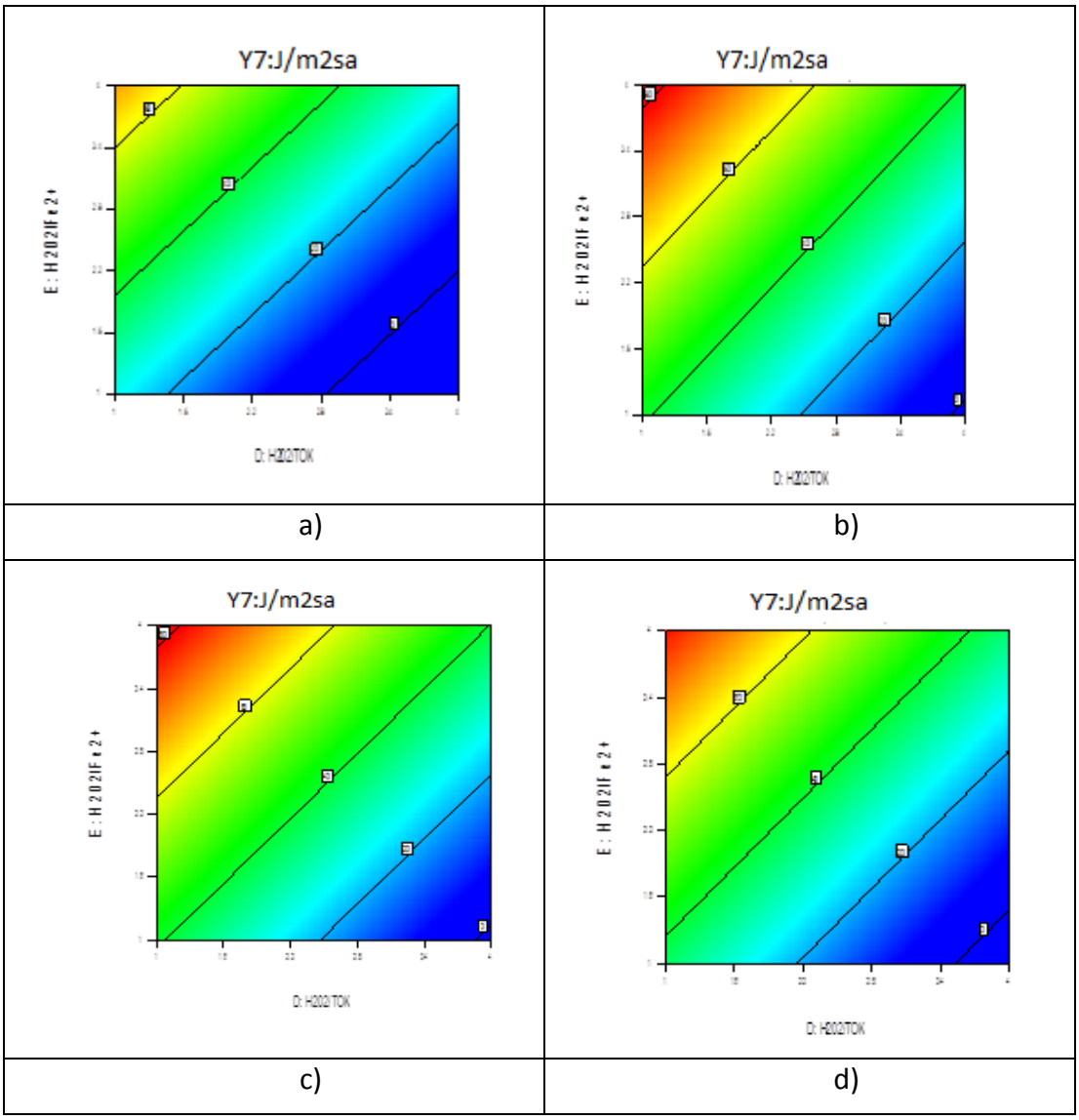
Proses Performans Parametresi	**Model I (Lineer Model)**	**Model II (II. Derece Lineer Olmayan Model)**
TOK (%)	37.95 +5.06 * A +4.25 * B -2.37 * C +9.92 * D -0.24 * E +1.00 * F -0.35 * G -2.48 * H[1] -2.99 * H[2] +2.49 * H[3] (S = 6.08 ve r^2 = 0.7880)	37.95 +14.40 * A +0.25 * B +3.08 * C +14.46 * D -6.88 * E -4.17 * F -4.34 * G -2.49 * H[1] -0.088 * H[2] -0.25 * H[3] +13.39 * AB -12.15 * AC -1.72 * AD +7.39 * AE -2.40 * AF +1.56 * AG +11.09 * AH[1] +6.38 * AH[2] -9.76 * AH[3] +3.65 * BC +16.68 * BD -3.28 * BE +1.69 * BF -13.16 * BG -6.56 * BH[1] +4.61 * BH[2] +3.43 * CD -0.23 * CE +5.83 * CF +10.14 * CH[1] -12.70 * CH[2]
KOİ (%)	55.81 +6.30 * A +4.97 * B -4.51 * C +11.19 * D -3.86 * E +3.10 * F -0.75 * G +0.21 * H[1] +1.57 * H[2] -1.62 * H[3] (S = 6.95 ve r^2 = 0.8063)	55.81 +19.62 * A +1.91 * B +3.98 * C +17.44 * D -8.51 * E -1.23 * F -4.80 * G -0.35 * H[1] +4.41 * H[2] -6.09 * H[3] +16.72 * AB -11.82 * AC +2.33 * AD +13.18 * AE -3.73 * AF -2.56 * AG +10.68 * AH[1] +8.20 * AH[2] -14.06 * AH[3] +3.04 * BC +29.53 * BD -6.71 * BE +0.28 * BF -23.43 * BG -12.80 * BH[1] +8.83 * BH[2] +9.97 * CD -5.45 * CE +14.46 * CF +16.49 * CH[1] -15.60 * CH[2]
J (L/m^2·sa)	35.63 -1.85 * A -6.00 * B +0.70 * C -6.41 * D +12.95 * E -6.33 * F -9.63 * G -19.45 * H[1] -2.13 * H[2] +8.93 * H[3] (S = 13.16 ve r^2 = 0.7638)	35.63 -25.86 * A -6.11 * B -2.83 * C -21.64 * D +20.88 * E +7.81 * F -3.22 * G -9.82 * H[1] +4.90 * H[2] +4.78 * H[3] -46.54 * AB +15.53 * AC -8.77 * AD -5.15 * AE -14.36 * AF +3.81 * AG -32.37 * AH[1] -31.12 * AH[2] +41.60 * AH[3] +7.64 * BC -53.86 * BD -1.15 * BE -14.90 * BF +31.84 * BG +18.29 * BH[1] +2.28 * BH[2] -2.97 * CD +18.40 * CE -22.47 * CF -35.42 * CH[1] +42.38 * CH[2] (S = 0 ve r^2 = 1)



Şekil 3.14: TOK giderim verimi (%) grafikleri. a) UP005, b) UP020, c) UH050 ve d) UV150.



Şekil 3.15: KOİ giderim verimi (%) grafikleri. a) UP005, b) UP020, c) UH050 ve d) UV150.



Şekil 3.16: Süzüntü akısı grafikleri. a) UP005, b) UP020, c) UH050 ve d) UV150.

İOP/batık UF hibrit sistemde, organik madde giderim verimleri, arıtılmış çıkış suyu kalitesiinin deney başlangıcında reaktör içerisindeki atıksuyun kalitesine göre ölçülendirilmesi üzerinden belirlenmiştir. Hibrit sistemde H_2O_2 ve Fe^{2+} miktarları arttıkça (H_2O_2/Fe^{2+} azaldıkça), TOK ve KOİ verimleri artmakta; H_2O_2'deki artışın organik giderim etkinliği üzerine katkısı daha fazla olarak gerçekleşmektedir. Bunun yanı sıra, H_2O_2 ve Fe^{2+} miktarları arttıkça, her iki giriş parametresi için yaklaşık aynı mertebelerde olmak üzere, UF membran süzüntü akısının azaldığı görülmektedir. Diğer giriş değişkenlerinin ortalama değerleri için verilen değişimlere göre, 2 ve 3 numaralı UP020 ve UH050 membranları yaklaşık aynı seviyelerde olmak üzere en

yüksek organik madde giderim verimine ve süzüntü akısı eldesine imkân sağlamaktadır.

- İOP/Batık UF Hibrit Sistem Performansının Optimizasyonu

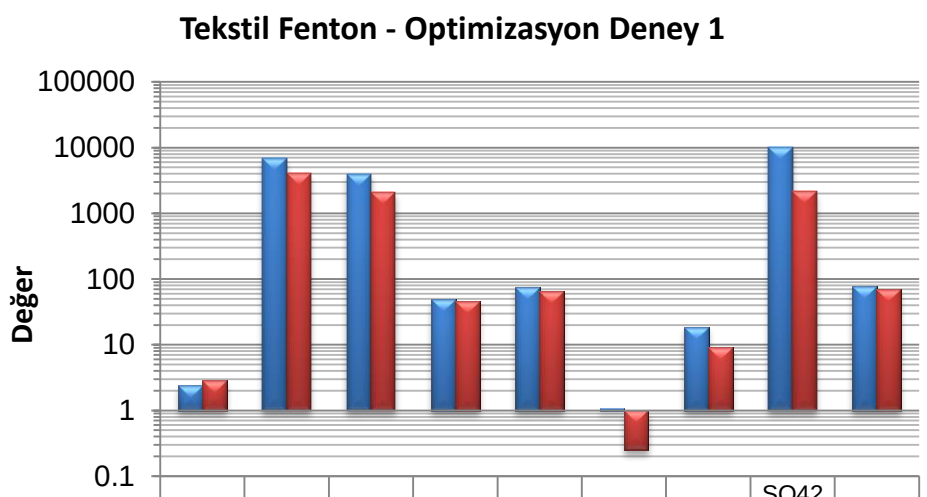
İOP/batık UF hibrit sistemde tekstil atıksuyunun Fenton prosesiyle arıtımında optimum proses işletme şartlarının belirlenmesinde, hidrojen peroksit hariç diğer giriş değişkenlerinin her biri, deneysel sonuçları elde edilmiş kendi değer aralıklarında seçilmiş; H_2O_2/TOK oranı ise, sürekli işletimde maliyet unsurunun asgariye indirilmesi hedefi gözetilerek minimize edilmiştir. Prosesin etkinliğinde önemli sonuç parametreleri olan TOK, KOI ve J parametreleri için sırasıyla %55, %75 ve 80 L/m^2.sa hedef değerlerine ulaşılmasının arzu edildiği amaç doğrultusunda, yazılım aracılığıyla 2 farklı optimum işletme şartı seçilerek belirlenmiştir. Seçilen iki farklı optimum işletme şartı için giriş değişkenlerinin kodlanmış ve gerçek değerleri Tablo 3.16'de sunulmuştur.

Tablo 3.16: Fenton prosesiyle arıtımda optimum proses işletme şartları.

Giriş Değişkeni	Parametre	Açıklaması	Birim	Optimum işletme şartları			
				Kodlanmış değerler		Gerçek Değerler	
				[1]OD1	[1]OD2	[1]OD1	[1]OD2
A	t	zaman	dak	4.00	4.00	60.0	60.0
B	T	sıcaklık	^{0}C	1.30	1.00	26.5	25.0
C	pH	pH	–	1.73	1.75	3.73	3.75
D	H_2O_2/TOK	H_2O_2/TOK oranı	g/g	1.00	1.55	6.0	10.4
E	H_2O_2/Fe^{2+}	H_2O_2/Fe^{2+} oranı	g/g	4.00	3.96	15.0	14.8
F	v_H	İOP reaktörü	L/dk	1.79	2.12	1.8	2.1
G	$v_{SÇ}$	UF membranda	rpm	2.65	3.13	80.0	87.0
H	M_T	Membran	–	3	3	UH050	UH05

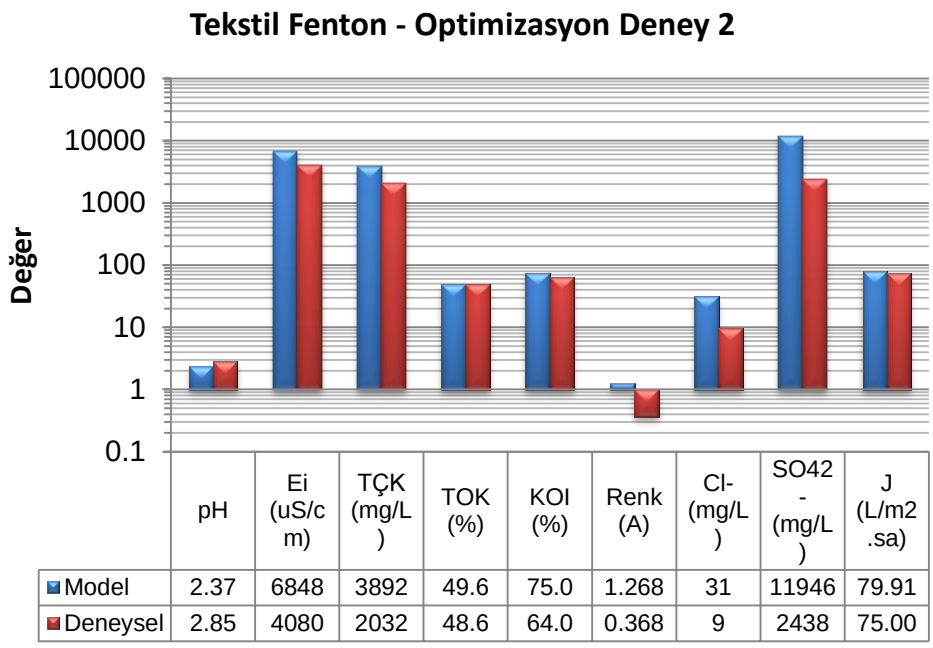
[1]OD kısaltması "Optimizasyon Deneyi" terimini ifade etmekte olup, OD1 ve OD2 için optimum şartların arzu edilebilirlikleri (desirabilities) sırasıyla 0.954 ve 0.919'dur.

Optimum şartlarda yürütülen deneyler, hibrit proses çıkış suyunda H_2O_2 konsantrasyonu 0-50 mg/L oluncaya dek sürdürülmüştür. Optimum işletme şartlarındaki deneysel performanslar, OD1 ve OD2 için sırasıyla Şekil 3.17 ve 3.18'de; hibrit sistemde TOK ve KOI giderim verimlerinin zamana karşı değişimleri de, çıkış suyuyla kaybedilen H_2O_2 ile birlikte, sırasıyla Şekil 3.19 ve 3.20' de gösterilmiştir.



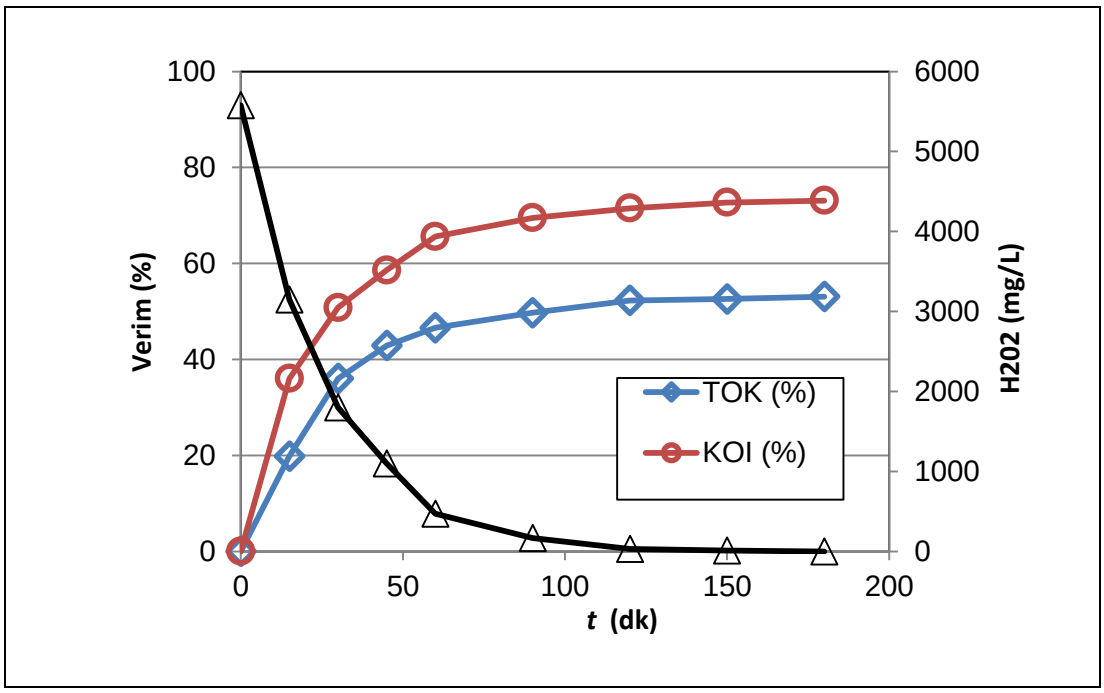
	pH	Ei (uS/cm)	TÇK (mg/L)	TOK (%)	KOI (%)	Renk (A)	Cl- (mg/L)	SO42- (mg/L)	J (L/m2.sa)
Model	2.40	6822	3992	49.2	74.6	1.099	19	10143	77.41
Deneysel	2.85	4030	2072	46.6	65.6	0.249	9	2140	68.81

Şekil 3.17: Optimum işletme deneyi 1 için model ve deneysel performans sonuçları.

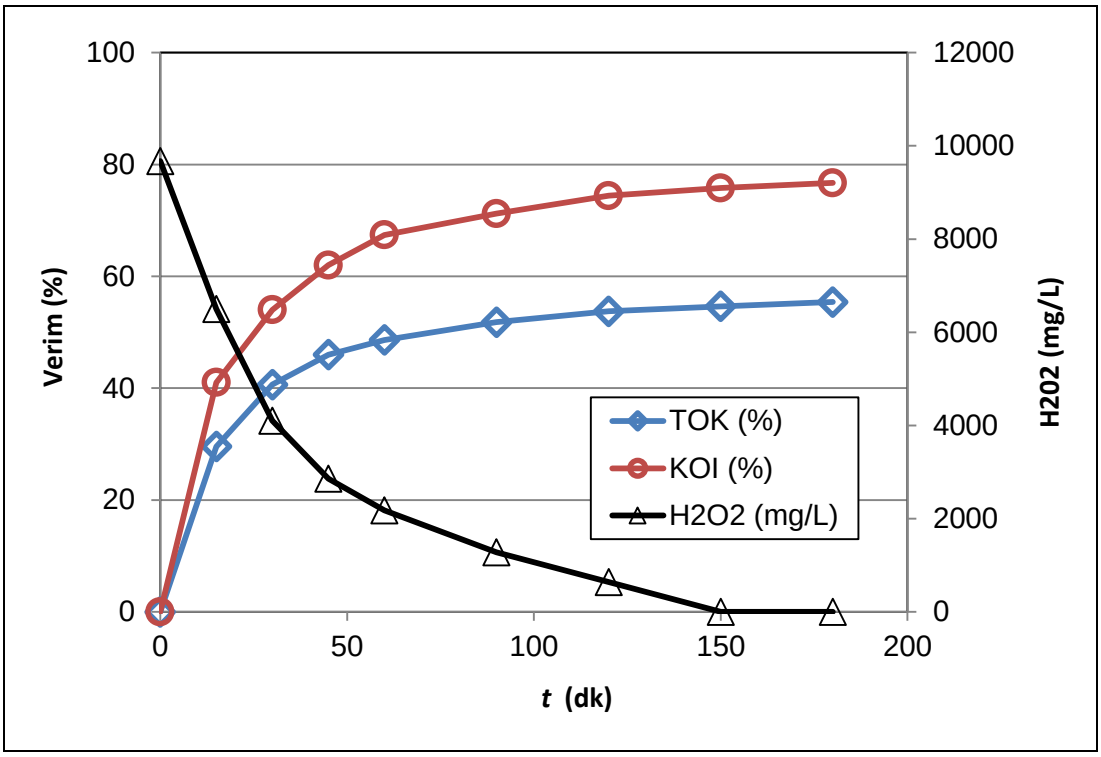


	pH	Ei (uS/cm)	TÇK (mg/L)	TOK (%)	KOI (%)	Renk (A)	Cl- (mg/L)	SO42- (mg/L)	J (L/m2.sa)
Model	2.37	6848	3892	49.6	75.0	1.268	31	11946	79.91
Deneysel	2.85	4080	2032	48.6	64.0	0.368	9	2438	75.00

Şekil 3.18: Optimum işletme deneyi 2 için model ve deneysel performans sonuçları.



Şekil 3.19: Optimum işletme deneyi 1 için zamana karşı değişen TOK ve KOI giderim verimleri ve çıkış suyunda H_2O_2 konsantrasyonu.



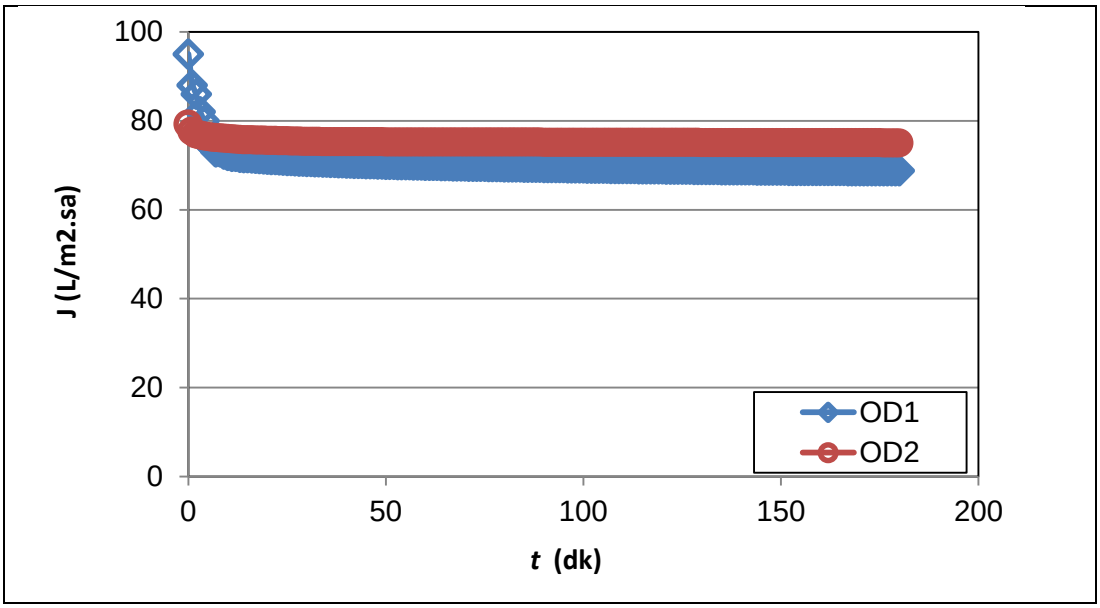
Şekil 3.20: Optimum işletme deneyi 2 için zamana karşı değişen TOK ve KOI giderim verimleri ve çıkış suyunda H_20_2 konsantrasyonu.

Optimizasyon deneyleri neticesinde, 3.73-3.75 başlangıç atıksu pH' sında ve minimum H_20_2 ve Fe^{2+} miktarlarında (atıksuyun 1000 mg TOK/L değeri için 6000 mg H_20_2/L ve 400 mg Fe^{2+}/L ilavesi) 60 dakikalık işletimle, yaklaşık %50 TOK ve %65 KOİ giderim verimleri elde edilebildiği görülmüştür. Organik madde giderim verimleri açısından kabul edilebilir hata seviyelerinde model tahminleri gerçekleştirilmiş olmakla birlikte; inorganik parametrelere ait model tahmin değerlerinin, deneysel ölçülmüş değerlerden biraz yüksek seviyelerde olduğu gözlenmiştir. Bu durumun, hibrit sistemin inorganik gideriminde herhangi bir etkinliğinin olmamasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Şekil 3.19 ve 3.20'e göre, hibrit arıtım uygulaması neticesinde, 60 dakika sonunda tahmin edilene yakın düzeylerde organik madde gideriminin gerçekleştirildiği belirlenmiştir. Her ne kadar 60 dk'dan 180 dk'ya kadar organik madde gideriminde bir miktar daha artış gözlenmişse de; bir yandan tüketime bağlı reaktör içerisindeki H_20_2 miktarının zamanla sıfır noktasına azaldığı, bu sebeple de reaktör içerisinde azalan H_20_2 miktarına bağlı olarak Fenton prosesi etkinliğinde düşme meydana geldiği görülmüştür. Membrandan H_20_2 kaçışının önlenerek, bir

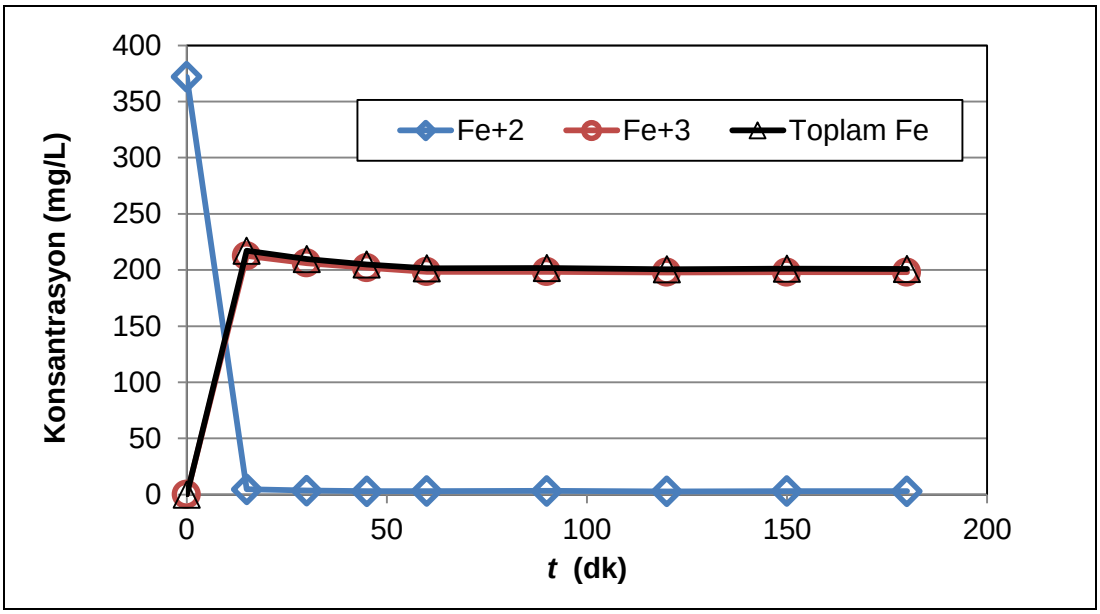
yandan reaktör içerisindeki Fenton etkinliğinin sürdürülmesi, diğer yandan kimyasal sarfiyatının azaltılması sayesinde hibrit prosesin sahada ekonomik olarak işletiminin gerçekleştirilebileceği değerlendirilmektedir. Bu amaçla, projenin sonraki adımlarında yürütülecek olan sürekli işletimli Fenton deneylerinde, İOP/batık UF hibrit sisteminin, sürekli olarak değil de, ardışık sürekli olarak işletiminin uygun olacağı kanaatine ulaşılmaktadır.

Hibrit sistemde batık UF proses süzüntü akısının zamana karşı değişimleri Şekil 3.21'te, çıkış suyunda ölçülen demir iyonları konsantrasyonlarının zamanla değişimleri ise OD1 ve OD2 için sırasıyla Şekil 3.22 ve 3.23'de sunulmuştur.

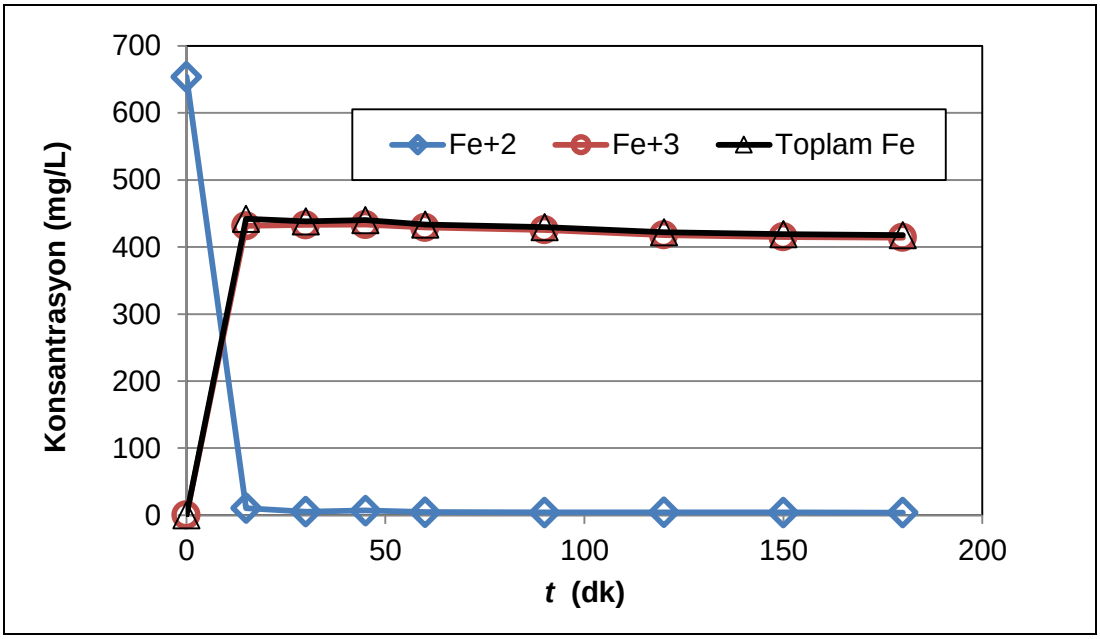


Şekil 3.21: Optimum işletme deneyi için zamana karşı değişen UF süzüntü akısı.

Önerilen sistemin ekonomik işletimi amacıyla H_2O_2 ve Fe^{2+} miktarlarının minimizasyonu kadar önemli bir diğer husus, yüksek su akısıyla batık UF membranın işletilebilirliğidir. Bir membran proses için süzüntü akısı, proses yatırım maliyetini belirleyici en temel unsurdur. Bu bağlamda, optimum şartlarda elde edilmiş yaklaşık 69-75 L/m^2.sa'lık arıtılmış çıkış suyu akısının, batık biyolojik arıtma sistemlerindekilere nazaran yaklaşık 6-19 kat yüksekliği de, hibrit sistemin endüstriyel atıksulara sahada başarıyla uygulanabilirliği bakımından ayrı bir avantaj olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 3.22: Optimum işletme deneyi 1 için zamana karşı değişen çıkış suyunda demir konsantrasyonları.



Şekil 3.23: Optimum işletme deneyi 2 için zamana karşı değişen çıkış suyunda demir konsantrasyonları.

Hibrit sistem çıkış sularında demir konsantrasyonlarına bakıldığında, toplam demirin esasen Fe(+3)'ten kaynaklandığı, OD1 ile elde edilen çıkış suyu değerlerinin OD2 şartlarında elde edilene kıyasla yaklaşık yarı yarıya düşük olduğu gözlenmiştir. Aynı membran uygulanan OD deneylerinde karşılaşılan bu durumun başlıca sebebi,

başlangıçta İOP reaktöre ilave edilen demir miktarının OD2'de daha yüksek olmasıdır.

- Foto-Fenton Deneyleri

İOP/batık UF hibrit reaktörde tekstil atıksuyunun foto-Fenton prosesiyle arıtımında, değişkenlerin deneysel değerlerini içeren Taguchi deneysel tasarım tabloları ve deneysel performans sonuçları, İO ve batık UF prosesleri için sırasıyla Tablo 3.16 ve 3.17'de verilmiştir. İzlenen parametreler arasında yer alan renk parametresinde, sadece atıksuyun renginin değil, aynı zamanda Fenton proseste demirden gelen rengin de hibrit sistem çıkış suyunda bilinmesi gerektiği için, hibrit sisteme ve sistemdeki her iki prosese ait organik kirletici giderim verimi izlemeleri, TOK ve KOİ parametreleri üzerinden yerine getirilmiştir. Bu bağlamda, İOP/batık UF hibrit reaktörde tekstil atıksuyunun foto-Fenton prosesiyle arıtımında TOK ve KOİ giderim verimleri, Tablo 3.20'de gösterilmiştir.

- İleri Oksidasyon Prosesinin (İOP) Deneysel Performansı

Proses performansı analizlerinde giriş değişkenlerinin sonuç parametreleri üzerine etkileri ilk olarak lineer model bazında ANOVA yöntemi ile belirlendiğinden; hibrit reaktörde tekstil atıksuyunun Fenton prosesiyle arıtımında, İOP reaktörün TOK, KOİ ve pH performans parametreleri için lineer model (Model I) ANOVA analiz sonuçları Tablo 3.20'de verilmiş; hem I. derece lineer hem de II. derece lineer olmayan model bazında proses performans parametrelerine ait model denklemleri Tablo 3.21'de sunulmuştur. Tablo 3.20'de I. derece lineer model için verilen P>F değerlerine bakıldığında, İOP reaktörde TOK, KOİ ve pH etkinliklerinin lineer model ilişkilerine göre önemli olduğu görülmektedir. Tablo 3.21'e bakıldığında ise, I. derece lineer modellere kıyasla çok daha iyi bir ilişki düzeyinde düşük standard sapma (*S*) ve yüksek korelasyon (r^2) değerleri verdiği görülmektedir. İOP proseste, farklı ışık kaynağı türleri (UVC-254 ve UVA-365) için H_2O_2/TOK ve H_2O_2/Fe^{2+} giriş parametreleri ile pH-E_i, TÇK renk değişimleri ile TOK-KOİ giderim verimleri, Şekil 3.24-3.27'de, H_2O_2/TOK ve ışık şiddeti giriş parametrelerine performans parametrelerinin aynı sırasındaki değişimler Şekil 3.27-3.30'da gösterilmiştir.

Tablo 3.17: İO prosesi için Taguchi deneysel tasarım tablosu ve deneysel sonuçlar.

Deney No	Giriş Parametreleri								Sonuç Parametreleri							
									İO Prosesi							
	A	B	C	D	E	F	J	K	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6		
	t	*T*	pH	H_2O_2/T0K	H_2O_2/Fe^{2+}	v_H	$I_Ş$	I_T	pH	E_i	TÇK	TOK	KOI	λ_{436}	λ_{525}	λ_{620}
1	45	25	4	22	15	1	4	UVC-254	2.72	4250	2200	510	1072	1.871	0.955	0.602
2	45	30	3	30	11	2	3	UVC-254	2.55	5630	2980	530	1191	1.248	0.267	0.085
3	30	40	3	22	7	1	3	UVA-365	2.38	6070	3190	641	1429	1.665	0.422	0.136
4	15	30	4	14	7	2	2	UVC-254	2.55	5610	2980	649	1320	0.856	0.169	0.067
5	15	30	5	14	11	1	4	UVA-365	2.44	4890	2610	683	1163	0.791	0.158	0.077
6	15	35	5	22	11	3	3	UVC-254	2.52	4940	2630	579	1149	1.699	0.966	0.638
7	45	40	4	14	15	3	3	UVA-365	2.49	5070	2660	602	1227	0.781	0.155	0.070
8	15	25	3	6	3	1	1	UVC-254	2.55	5730	3040	830	1986	1.220	0.266	0.082
9	60	30	6	22	3	3	4	UVA-365	2.27	7220	3860	502	830	1.742	0.506	0.267
10	45	30	6	30	7	1	1	UVA-365	2.29	6890	3690	461	820	1.628	0.458	0.228
11	30	40	6	22	11	2	1	UVC-254	2.39	5840	3020	581	1282	1.452	0.572	0.287
12	45	40	5	14	3	4	1	UVC-254	2.73	7410	4020	721	1521	2.762	1.141	0.652
13	15	25	6	6	15	2	3	UVA-365	4.50	3030	1544	1017	2590	0.131	0.007	0.003
14	30	35	5	30	15	1	2	UVC-254	2.41	5490	2900	496	1049	2.558	0.767	0.417
15	15	35	4	22	7	4	1	UVA-365	2.41	6470	3480	620	1400	1.038	0.230	0.089
16	60	35	6	14	3	1	3	UVC-254	2.32	7150	3840	544	1256	1.886	0.552	0.253
17	60	25	4	30	11	3	1	UVC-254	2.50	5700	3000	543	1212	2.726	1.208	0.776
18	15	40	6	30	15	4	4	UVC-254	2.44	5570	2920	515	1194	1.772	0.651	0.356
19	60	30	3	22	15	4	2	UVC-254	2.65	4690	2520	521	914	2.125	1.061	0.642
20	60	35	3	14	15	2	1	UVA-365	2.42	5420	2770	553	833	0.762	0.120	0.043
21	60	40	5	6	7	2	4	UVC-254	2.86	4560	2400	685	1398	0.448	0.167	0.097
22	15	40	3	30	3	3	2	UVA-365	2.50	12490	6930	611	1318	2.796	1.014	0.498
23	45	35	3	6	11	4	4	UVA-365	2.18	6230	3290	632	1040	1.162	0.366	0.195
24	60	25	5	30	7	4	3	UVA-365	2.35	9550	6660	571	980	1.809	0.500	0.223
25	30	30	4	6	3	4	3	UVC-254	2.67	5360	2780	807	1659	1.182	0.275	0.169
26	45	35	6	6	7	3	2	UVC-254	2.85	4100	2176	894	2310	0.645	0.283	0.049
27	30	25	6	14	11	4	2	UVA-365	2.51	4300	2220	706	2397	0.510	0.114	0.059
28	30	30	5	6	15	3	1	UVA-365	4.20	3010	1551	822	2244	4.676	2.246	1.262
29	30	25	3	14	7	3	4	UVC-254	2.51	5500	2910	689	1376	2.481	0.916	0.493
30	30	35	4	30	3	2	4	UVA-365	2.17	7900	4240	524	1189	2.423	0.634	0.203
31	45	25	5	22	3	2	2	UVA-365	2.33	8150	4390	618	1258	2.714	1.114	0.680
32	60	40	4	6	11	1	2	UVA-365	2.55	5110	2580	711	1546	0.708	0.174	0.088

Tablo 3.18 : UF prosesi için Taguchi deneysel tasarım tablosu ve deneysel sonuçlar.

Deney No	Giriş Parametreleri									Sonuç Parametreleri									
										*UF Prosesi									
	A t	B T	C pH	D H2O2/	E H2O2/	F νH	G νSÇ	H MT	J IŞ	K IT	Y1 pH	Y2 Ei	Y3 TÇK	Y4 TOK	Y5 KOI	Y6 renk λ436	Y6 renk λ525	Y6 renk λ620	Y7
1	45	25	4	22	15	1	70	UH050	4	UVC-254	2.78	4140	2130	410	632	0.453	0.100	0.052	35.40
2	45	30	3	30	11	2	55	UV150	3	UVC-254	2.55	5700	3030	461	741	1.326	0.436	0.225	35.02
3	30	40	3	22	7	1	100	UP020	3	UVA-365	2.41	5960	3160	568	1064	0.616	0.112	0.025	9.52
4	15	30	4	14	7	2	70	UP020	2	UVC-254	2.69	5640	2960	570	862	0.642	0.104	0.032	56.72
5	15	30	5	14	11	1	100	UP005	4	UVA-365	2.54	4710	2470	660	1007	0.521	0.061	0.025	18.65
6	15	35	5	22	11	3	85	UH050	3	UVC-254	2.56	4860	2540	521	989	0.428	0.067	0.019	34.26
7	45	40	4	14	15	3	55	UP005	3	UVA-365	2.55	4930	2580	509	916	0.440	0.051	0.022	12.94
8	15	25	3	6	3	1	55	UP005	1	UVC-254	2.85	3430	1760	785	1779	0.957	0.304	0.157	12.94
9	60	30	6	22	3	3	55	UP020	4	UVA-365	2.33	7590	4060	495	776	1.166	0.271	0.073	6.85
10	45	30	6	30	7	1	85	UH050	1	UVA-365	2.25	6950	3710	398	624	1.236	0.225	0.039	25.51
11	30	40	6	22	11	2	70	UP005	1	UVC-254	2.43	5950	3150	459	790	0.469	0.055	0.017	11.80
12	45	40	5	14	3	4	85	UP020	1	UVC-254	2.42	7640	4140	628	1150	0.955	0.180	0.045	15.23
13	15	25	6	6	15	2	85	UP020	3	UVA-365	4.55	2550	1304	900	1968	0.068	0.046	0.046	11.80
14	30	35	5	30	15	1	55	UP020	2	UVC-254	2.39	5440	2870	381	690	0.511	0.067	0.015	40.00
15	15	35	4	22	7	4	55	UV150	1	UVA-365	2.34	6310	3320	503	892	1.370	0.314	0.089	45.68
16	60	35	6	14	3	1	70	UV150	3	UVC-254	2.35	7260	3890	479	976	1.475	0.294	0.055	21.70
17	60	25	4	30	11	3	100	UP020	1	UVC-254	2.67	5590	2960	462	900	0.673	0.112	0.023	9.90
18	15	40	6	30	15	4	100	UV150	4	UVC-254	2.52	5400	2750	411	686	1.084	0.239	0.081	57.10
19	60	30	3	22	15	4	85	UP005	2	UVC-254	2.63	4620	2430	471	763	0.465	0.092	0.024	19.29
20	60	35	3	14	15	2	100	UH050	1	UVA-365	2.43	5390	2840	483	706	0.643	0.075	0.021	88.70
21	60	40	5	6	7	2	55	UH050	4	UVC-254	2.89	4470	2350	385	646	0.185	0.032	0.016	119.2
22	15	40	3	30	3	3	70	UH050	2	UVA-365	2.40	12770	7070	514	921	1.432	0.378	0.130	27.79
23	45	35	3	6	11	4	70	UP020	4	UVA-365	2.25	5870	3090	535	821	0.485	0.053	0.022	24.36
24	60	25	5	30	7	4	70	UP005	3	UVA-365	2.34	9540	6640	487	755	1.095	0.206	0.040	15.23
25	30	30	4	6	3	4	100	UH050	3	UVC-254	2.72	5240	2780	610	894	0.966	0.256	0.116	62.81
26	45	35	6	6	7	3	100	UP005	2	UVC-254	3.10	4010	2160	707	1540	0.228	0.032	0.018	30.07
27	30	25	6	14	11	4	55	UH050	2	UVA-365	2.55	4290	2220	545	1588	0.386	0.067	0.040	49.87
28	30	30	5	6	15	3	70	UV150	1	UVA-365	4.36	3010	1593	585	1234	0.085	0.049	0.040	91.37
29	30	25	3	14	7	3	85	UV150	4	UVC-254	2.46	5660	3000	562	941	1.344	0.236	0.046	46.44
30	30	35	4	30	3	2	85	UP005	4	UVA-365	2.30	8260	4460	448	898	2.076	0.474	0.081	15.98
31	45	25	5	22	3	2	100	UV150	2	UVA-365	2.41	9080	4930	444	646	2.013	0.601	0.260	28.17
32	60	40	4	6	11	1	85	UV150	2	UVA-365	2.47	4880	2550	549	1031	0.545	0.095	0.043	73.09

Tablo 3.19: TOK ve KOİ giderim verimleri (%).

Deney No	İO Prosesi		UF Prosesi		İOP/UF Sistemi	
	TOK	KOİ	TOK	KOİ	TOK	KOİ
1	42.0	58.8	19.6	41.0	53.4	75.7
2	47.6	61.2	12.9	37.8	54.3	75.9
3	35.1	53.5	11.4	25.5	42.5	65.4
4	37.0	57.4	12.1	34.7	44.6	72.2
5	31.3	56.6	3.4	13.4	33.7	62.4
6	30.6	50.2	10.0	13.9	37.6	57.1
7	39.5	59.7	15.5	25.3	48.8	69.9
8	19.9	35.4	5.4	10.4	24.2	42.1
9	39.7	64.7	1.3	6.5	40.4	67.0
10	55.0	75.3	13.7	23.9	61.2	81.2
11	44.4	57.6	21.0	38.4	56.1	73.9
12	29.4	43.3	12.9	24.4	38.6	57.1
13	7.0	12.5	11.5	24.0	17.6	33.5
14	52.2	63.6	23.3	34.2	63.3	76.0
15	35.2	50.0	18.9	36.3	47.4	68.1
16	47.5	60.8	12.0	22.3	53.8	69.5
17	47.3	60.9	15.0	25.7	55.2	70.9
18	50.3	62.4	20.3	42.5	60.4	78.4
19	49.6	67.4	9.6	16.5	54.4	72.8
20	43.9	69.6	12.6	15.3	51.0	74.3
21	34.0	47.8	43.7	53.8	62.8	75.9
22	43.6	58.3	15.9	30.1	52.5	70.8
23	35.9	62.1	15.3	21.1	45.8	70.1
24	42.6	68.2	14.7	23.0	51.0	75.5
25	20.8	42.1	24.5	46.1	40.2	68.8
26	14.4	23.6	20.9	33.3	32.3	49.1
27	16.0	27.8	22.8	33.7	35.1	52.2
28	5.7	8.0	28.8	45.0	32.8	49.4
29	33.4	55.2	18.5	31.6	45.8	69.4
30	35.2	48.9	14.5	24.5	44.6	61.4
31	36.5	53.4	28.2	48.6	54.4	76.1
32	33.1	49.3	22.8	33.3	48.3	66.2

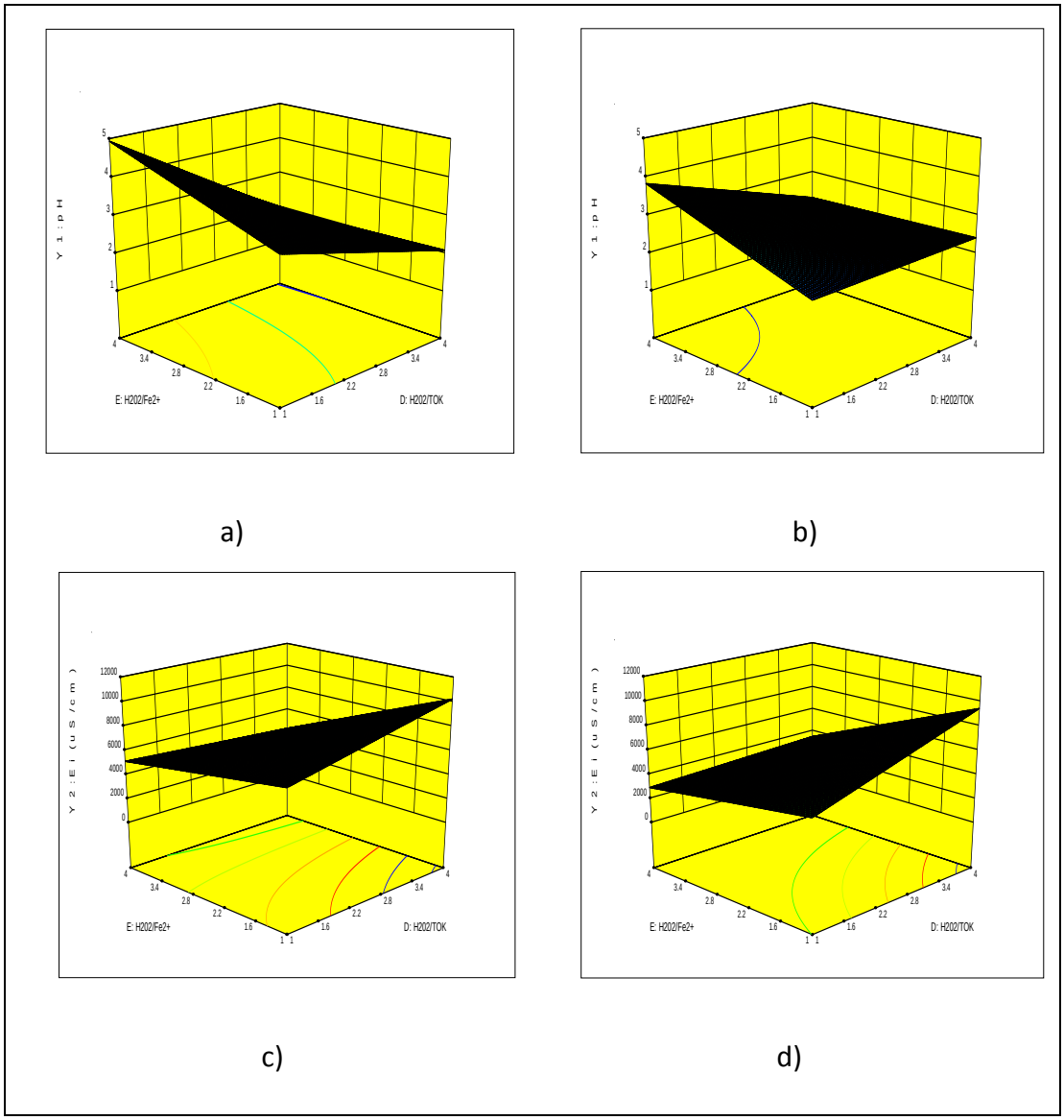
Tablo 3.20: İOP reaktörün performans parametreleri için lineer model (Model I) ANOVA analiz sonuçları.

Performans parametresi	**Değişken**	**Kareler Toplamı**	**Serbestlik Derecesi**	**Ortalama Kareler Toplamı**	***F* Değeri**	***P>F* Değeri**
TOK (%)	Model	3830.67	8	478.83	10.05	< 0.0001
	A-t	584.45	1	584.45	12.26	0.0019
	B-T	256.58	1	256.58	5.38	0.0295
	C-pH	108.47	1	108.47	2.28	0.1450
	D-	2592.48	1	2592.48	54.40	< 0.0001
	E-H_2O_2/Fe^{2+}	16.80	1	16.80	0.35	0.5585
	F- ν_H	122.13	1	122.13	2.56	0.1231
	J-$I_Ş$	16.85	1	16.85	0.35	0.5579
	K-I_T	132.91	1	132.91	2.79	0.1085
	Artan	1096.10	23	47.66		
	Toplam	4926.76	31			
KOİ (%)	Model	4833.89	8	604.24	4.82	0.0014
	A-t	991.32	1	991.32	7.91	0.0099
	B-T	192.53	1	192.53	1.54	0.2277
	C-pH	454.89	1	454.89	3.63	0.0693
	D-	2882.75	1	2882.75	23.00	< 0.0001
	E-H_2O_2/Fe^{2+}	2.38	1	2.38	0.019	0.8917
	F- ν_H	86.71	1	86.71	0.69	0.4141
	J-$I_Ş$	196.17	1	196.17	1.57	0.2235
	K-I_T	27.15	1	27.15	0.22	0.6460
	Artan	2882.73	23	125.34		
	Toplam	7716.62	31			
pH (–)	Model	3.60	8	0.45	2.71	0.0293
	A-t	0.31	1	0.31	1.88	0.1839
	B-T	0.33	1	0.33	1.96	0.1745
	C-pH	0.33	1	0.33	1.99	0.1722
	D-	1.55	1	1.55	9.32	0.0056
	E-H_2O_2/Fe^{2+}	0.95	1	0.95	5.69	0.0257
	F- ν_H	0.00518	1	0.00518	0.031	0.8616
	J-$I_Ş$	0.11	1	0.11	0.68	0.4164
	K-I_T	0.019	1	0.019	0.11	0.7416
	Artan	3.83	23	0.17		
	Toplam	7.43	31			

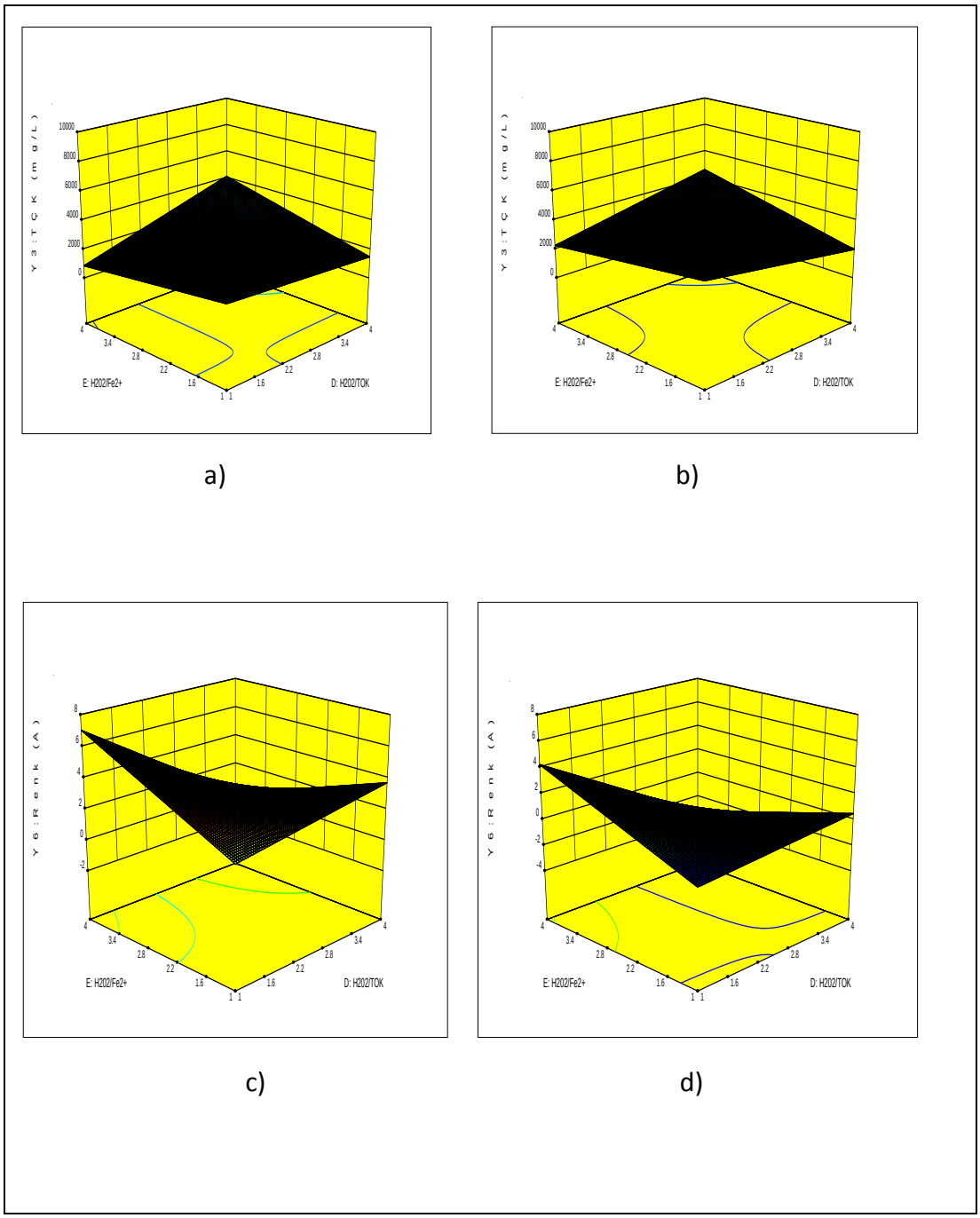
Tablo 3.21: İOP reaktörü için proses performans parametrelerine ait model denklemleri.

Proses Performans Parametresi	**Model I (Lineer Model)**	**Model II (II. Derece Lineer Olmayan Model)**
TOK (%)	35.49 +5.73 * A +3.80 * B -2.47 * C +12.08 * D +0.97 * E -2.62 * F +0.97 * J -2.04 * K (S = 6.90 ve r^2 = 0.7775)	35.49 +3.75 * A +4.62 * B -2.21 * C +12.80 * D +2.44 * E -2.11 * F +3.56 * J -0.65 * K +1.78 * AB +7.84 * AC +3.53 * AD +7.93 * AE -3.50 * AF -2.54 * AJ +1.26 * AK -1.27 * BC +4.36 * BD +0.15 * BE +1.58 * BF +1.373E-003 * BJ -5.04 * BK +3.88 * CD -6.54 * CE -3.09 * CF -2.27 * CJ -0.46 * CK +4.00 * DE +5.74 * DF -5.08 * DJ -3.19 * DK (S = 11.06 ve r^2 = 0.9752)
KOİ (%)	52.05 +7.47 * A +3.29 * B -5.06 * C +12.73 * D -0.37 * E -2.21 * F +3.32 * J -0.92 * K (S = 11.20 ve r^2 = 0.6264)	52.05 +0.43 * A +7.07 * B -3.74 * C +12.24 * D +2.80 * E -2.06 * F +8.62 * J +1.91 * K +0.58 * AB +13.70 * AC +8.76 * AD +15.49 * AE -4.71 * AF -6.32 * AJ +4.70 * AK -0.17 * BC +4.11 * BD -1.40 * BE +0.92 * BF -1.39 * BJ -9.18 * BK +5.95 * CD -13.57 * CE -1.96 * CF -1.66 * CJ -0.28 * CK +6.30 * DE +7.44 * DF -10.10 * DJ -4.21 * DK (S = 10.84 ve r^2 = 0.9848)
pH (%)	+2.60 -0.13 * A -0.14 * B +0.14 * C -0.30 * D +0.23 * E +0.017 * F -0.080 * J +0.024 * K (S = 0.41 ve r^2 = 0.4850)	2.60 +0.21 * A +0.068 * B -0.30 * C -0.49 * D +0.34 * E -0.10 * F -0.31 * J -0.19 * K -0.35 * AB -0.34 * AC +3.156E-003 * AD -0.86 * AE -0.029 * AF +0.12 * AJ -0.045 * AK -0.091 * BC -0.083 * BD -0.037 * BE +0.089 * BF -0.048 * BJ +0.10 * BK -0.15 * CD +0.60 * CE -0.19 * CF +0.26 * CJ +0.26 * CK -0.42 * DE -0.22 * DF +0.23 * DJ +0.35 * DK (S = 0.0045 ve r^2 = 1.0000)

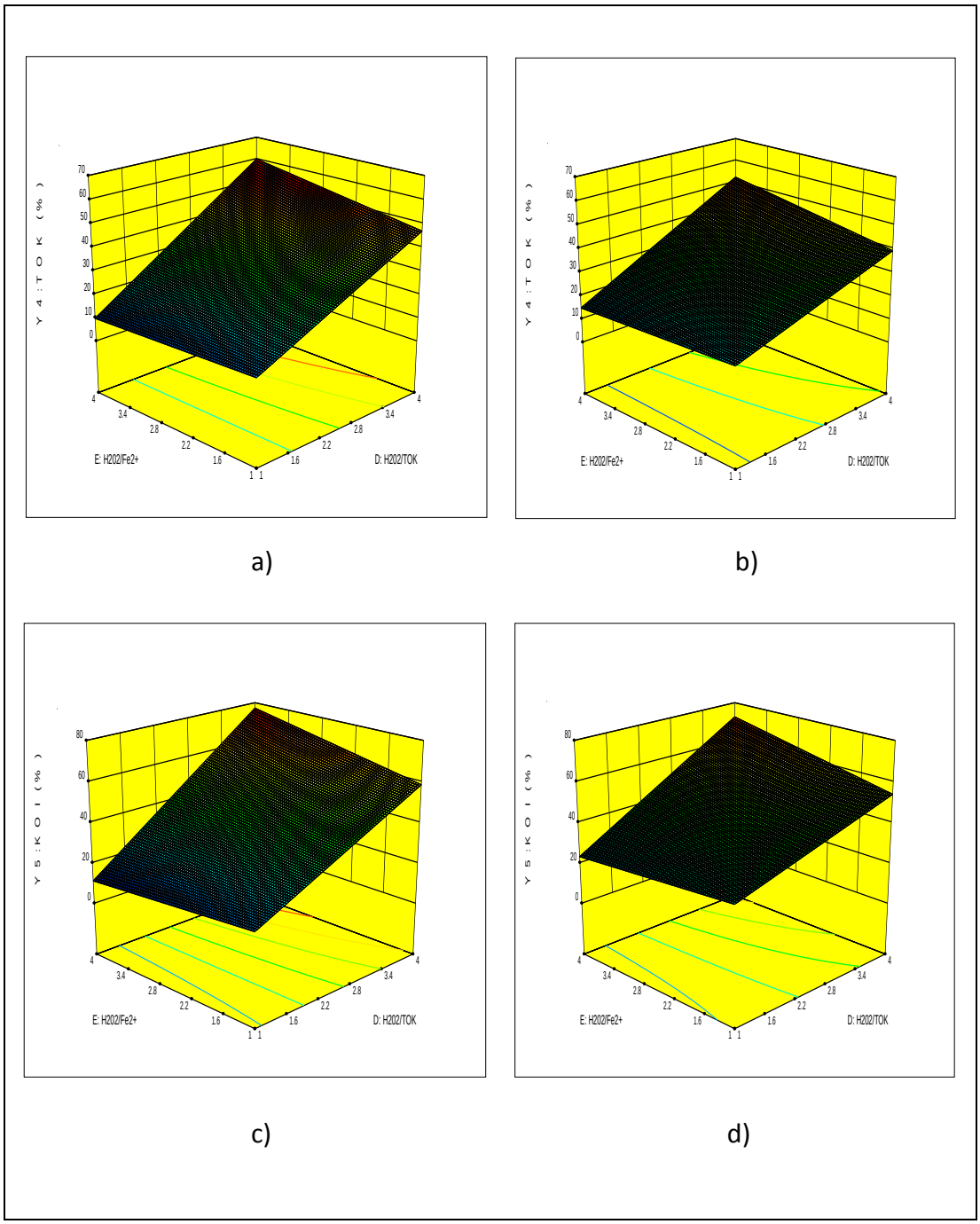
İOP/batık UF hibrit reaktörde tekstil atıksuyunun UVC–254 (1) ve UVA–365 (2) ışık kaynağı türleri kullanılarak foto-Fenton prosesiyle arıtımında İOP reaktör için TOK başına değişen H_20_2 ve Fe^{2+} konsantrasyonlarına göre değisim grafikleri sırasıyla verilmiştir. (Her bir grafikte, eksenlerde verilen H_20_2/TOK ve H_20_2/Fe^{2+} ile değişimi gösterilen parametre hariç kalan proses parametrelerinin tamamı için ortalama kodlanmış tasarım değerleri, 2.5 değerindedir.).



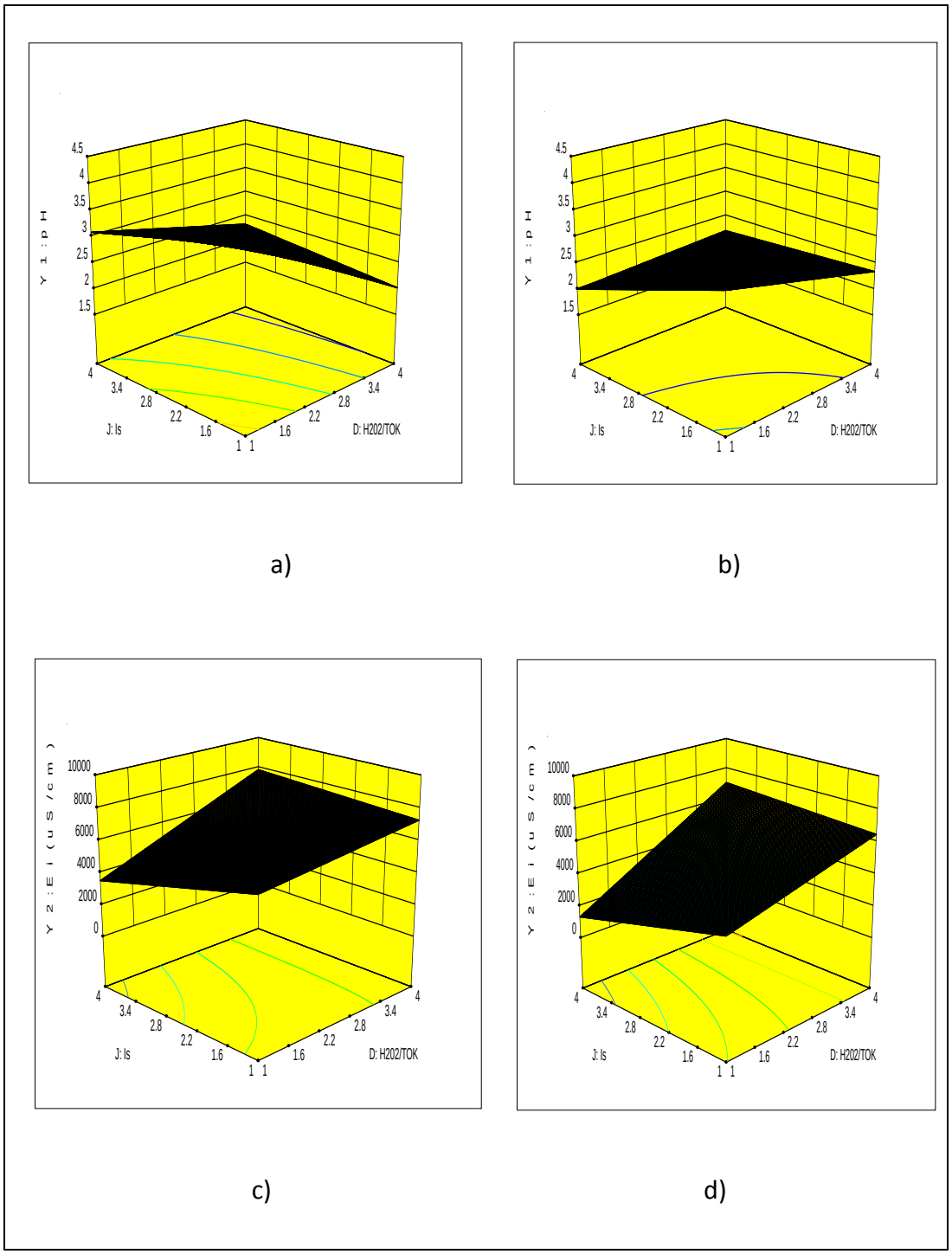
Şekil 3.24: Değişim grafikleri. a) UVC–254, b) UVA–365 için pH ve c) UVC–254, d) UVA–365 için E_i.



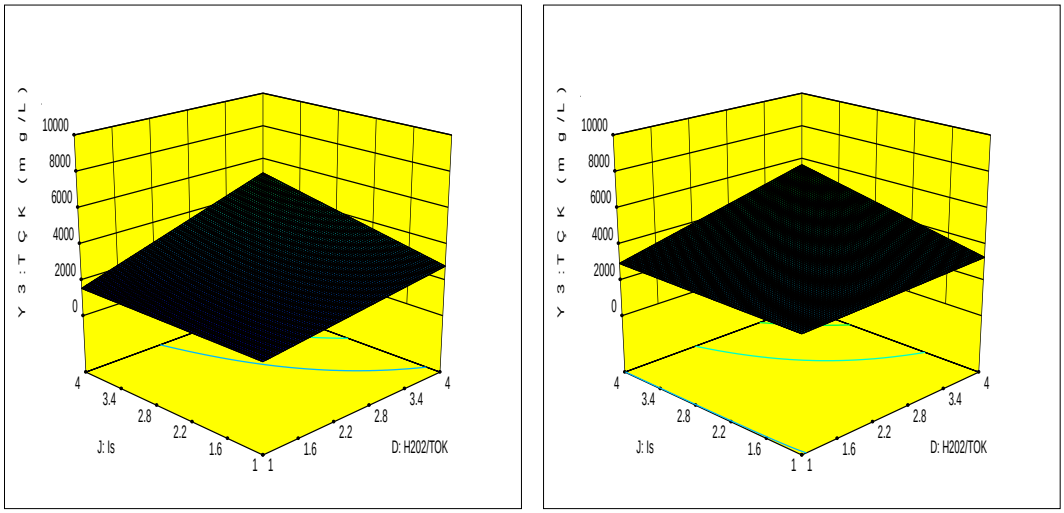
Şekil 3.25: Değişim grafikleri. a) UVC–254, b) UVA–365 için TÇK ve c) UVC–254, d) UVA–365 için renk.



Şekil 3.26: Giderim verimi grafikleri. a) UVC–254, b) UVA–365 için TOK ve c) UVC–254, d) UVA–365 için KOI.



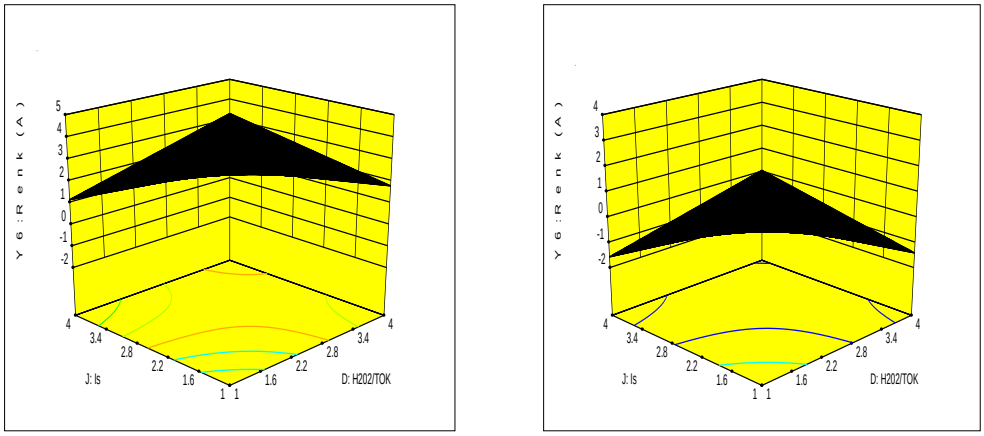
Şekil 3.27: Değişim grafikleri. a) UVC–254, b) UVA–365 için pH ve b) UVC–254, c) UVA–365 için E_i.



a) b)

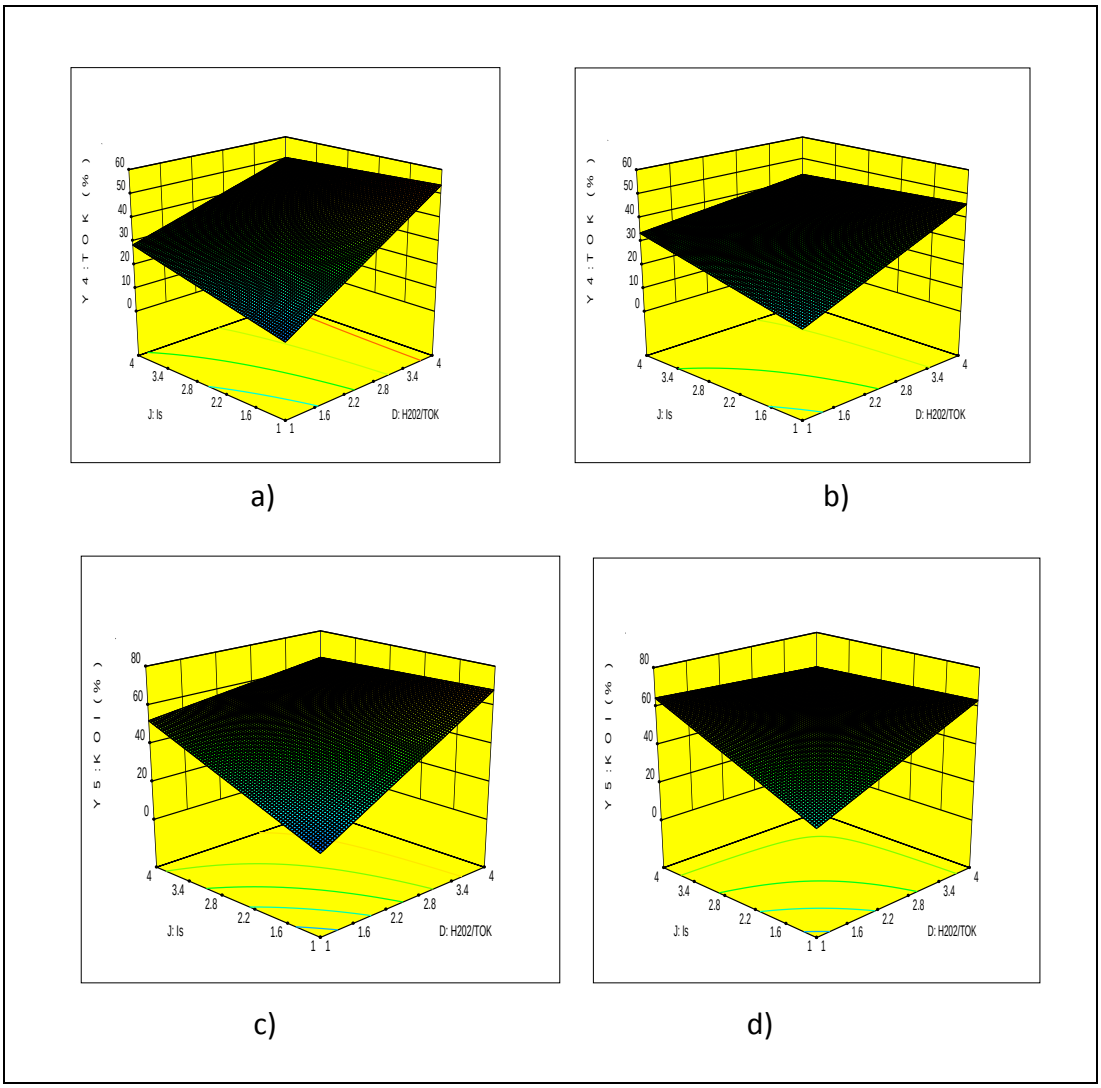
Şekil 3.28: TÇK değişim grafikleri. a) UVC–254, b) UVA–365.

İOP/batık UF hibrit reaktörde tekstil atıksuyunun UVC–254 (I) ve UVA–365 (II) ışık kaynağı türleri kullanılarak foto-Fenton prosesiyle arıtımında İOP reaktör için TOK başına değişen H_2O_2 ve ışık şiddetine ($I_Ş$) göre değişim grafikleri verilmiştir. (Her bir grafikte, eksenlerde verilen *H_2O_2/TOK* ve $I_Ş$ ile değişimi gösterilen parametre hariç kalan proses parametrelerinin tamamı için ortalama kodlanmış tasarım değerleri, 2.5 değerindedir.).



a) b)

Şekil 3.29: Renk değişim grafikleri. a) UVC–254, b) UVA–365.



Şekil 3.30: Giderim verimi grafikleri. a) UVC–254, b) UVA–365 için TOK ve c) UVC–254, d) UVA–365 KOI.

İleri oksidasyon prosesinde, reaktöre ilave edilen H_2O_2 ve Fe^{2+} miktarı arttıkça (H_2O_2/Fe^{2+} giriş parametresi miktarı azaldıkça), UVC-254 ve UVA-365 ışık kaynağı türleri için pH sırasıyla 5 ve 3.8 başlangıç değerlerinden 2.0 ve 2.4 civarına azalmakta; iletkenlik 5000 ve 2700 µS/cm başlangıç değerlerinden 9500-10.000 civarına artmaktadır. Sülfat parametresinin etkisi altında olmayan bir değişimle toplam çözünmüş katı madde miktarı 4000 mg/L ve bir miktar üzeri değere çıkmakta, sülfat artışı UVC-254'te daha belirgin olmaktadır. Renk doğrusal olmayan iç bükey değişimlerle, sırasıyla azalma ve artış eğilimleri göstermektedir. Hibrit reaktörde organik madde giderimi, her iki ışık kaynağı türü için de esasen reaktöre ilave edilen H_2O_2 konsantrasyonuna bağlı olarak ciddi artışlar göstermekte, ilave edilen Fe^{2+} miktarı rölatif daha düşük giderim verimi katkısı sağlamaktadır. Buna

ilaveten, artan H_20_2 konsantrasyonuyla TOK giderimi etkinliğinde kısmen doğrusal bir değişimle belirgin bir artış görülmekle birlikte, minimum demir miktarlarındaki TOK ve KOİ giderim verimleri artış en yüksek olarak görülmektedir. Bu durum, demir ilavesini azaltıp İOP işletme maliyetini azaltacağından, saha uygulamasında ekonomik bir avantaj sağlayacaktır.

İOP'ta, reaktöre ilave edilen H_20_2 konsantrasyonu ve ışık şiddeti etkisi altında performanslara bakıldığında; artan H_20_2 miktarı ve ışık şiddeti ile, UVC-254 ve UVA-365 ışık kaynağı türleri için pH sırasıyla 3.0'e artış ve 2.0 civarına azalış göstermekte; iletkenlik miktarlarında 8000 μS/cm civarlarına artışlar gözlenmektedir. Sülfat parametresinin etkisi altında doğrusal olan bir değişimle toplam çözünmüş katı madde miktarı 5000-5500 mg/L aralığına artmakta, sülfat artışı ışık şiddeti etkisi altında UVC-254'te daha belirgin gerçekleşmektedir. Renk dış bükey ve klorür doğrusal değişimler göstermekte olup, bu parametrelerin minimum ve/veya maksimum H_20_2 miktarı ve ışık şiddetinde negatife ulaşan değerlerde model tahmin sonuçlarına ulaşılmaktadır. Organik madde giderimi, her iki ışık kaynağı türü için de esasen reaktöre ilave edilen H_20_2 konsantrasyonuna bağlı olarak ciddi artışlar göstermekte, artışlar TOK'ta doğrusal ve KOİ'de doğrusal olmayan esasta gerçekleşmekte ve ışık şiddetinin KOİ giderme verimi üzerine etkisi TOK'a kıyasla daha fazla olmaktadır. Bununla birlikte, UVC-254'te TOK giderim etkinliği KOİ'ye nazaran biraz daha yüksek olarak gerçekleşmektedir.

- Batık UF Prosesin Deneysel Performansı

İOP/batık UF hibrit reaktörde tekstil atıksuyunun foto-Fenton prosesiyle arıtımında, batık UF prosesin TOK, KOİ ve süzüntü akısı (*J*) performans parametreleri için lineer model (Model I) ANOVA analiz sonuçları Tablo 3.22'de; hem I. derece lineer hem de II. derece lineer olmayan model bazında proses performans parametrelerine ait model denklemleri Tablo 3.23'de gösterilmiştir. Tablo 3.22'de I. derece lineer model için verilen P>F değerlerine bakıldığında, foto-Fenton batık UF proseste, Fenton UF proseste olduğu gibi, TOK, KOİ ve *J* performans parametrelerinden sadece süzüntü akısı sonuç parametresinin lineer modele göre önemli düzeyde bir ilişkisinin mevcut olduğu görülmektedir. Bu önem durumunun

da esasen, membran türü ve hibrit reaktöre ilave edilen H_20_2 konsantrasyonundan kaynaklandığı belirlenmiştir. Tablo 3.23'e göre, II. derece modellerin, birebir ilişkisinden (sıfır standard sapma (S=0) ve tam korelasyon (r^2=1.0)) hareketle; batık UF proses için tüm ana performans parametreleri, esasen iç etkileşimli model terimlerine dayalı olarak tahmin edilebilirdir.

Tablo 3.22: Batık UF prosesi performans parametreleri için lineer model (Model I) ANOVA analiz sonuçları.

Performans parametresi	**Değişken**	**Kareler Toplamı**	**Serbestlik Derecesi**	**Ortalama Kareler Toplamı**	**F Değeri**	**P>F Değeri**
TOK (%)	Model	747.33	12	62.28	0.90	0.5597
	A-t	36.88	1	36.88	0.54	0.4733
	B-T	68.56	1	68.56	1.00	0.3310
	C-pH	47.76	1	47.76	0.69	0.4154
	D-H_20_2/TOK	87.10	1	87.10	1.26	0.2749
	E-H_20_2/Fe^{2+}	14.80	1	14.80	0.21	0.6483
	F-v_H	16.52	1	16.52	0.24	0.6300
	G-$v_{SÇ}$	14.48	1	14.48	0.21	0.6518
	H-M_T	430.08	3	143.36	2.08	0.1367
	J-$I_Ş$	2.15	1	2.15	0.031	0.8615
	K-I_T	28.99	1	28.99	0.42	0.5244
	Artan değer	1309.13	19	68.90		
	Toplam	2056.47	31			

Tablo 3.22: Devam.

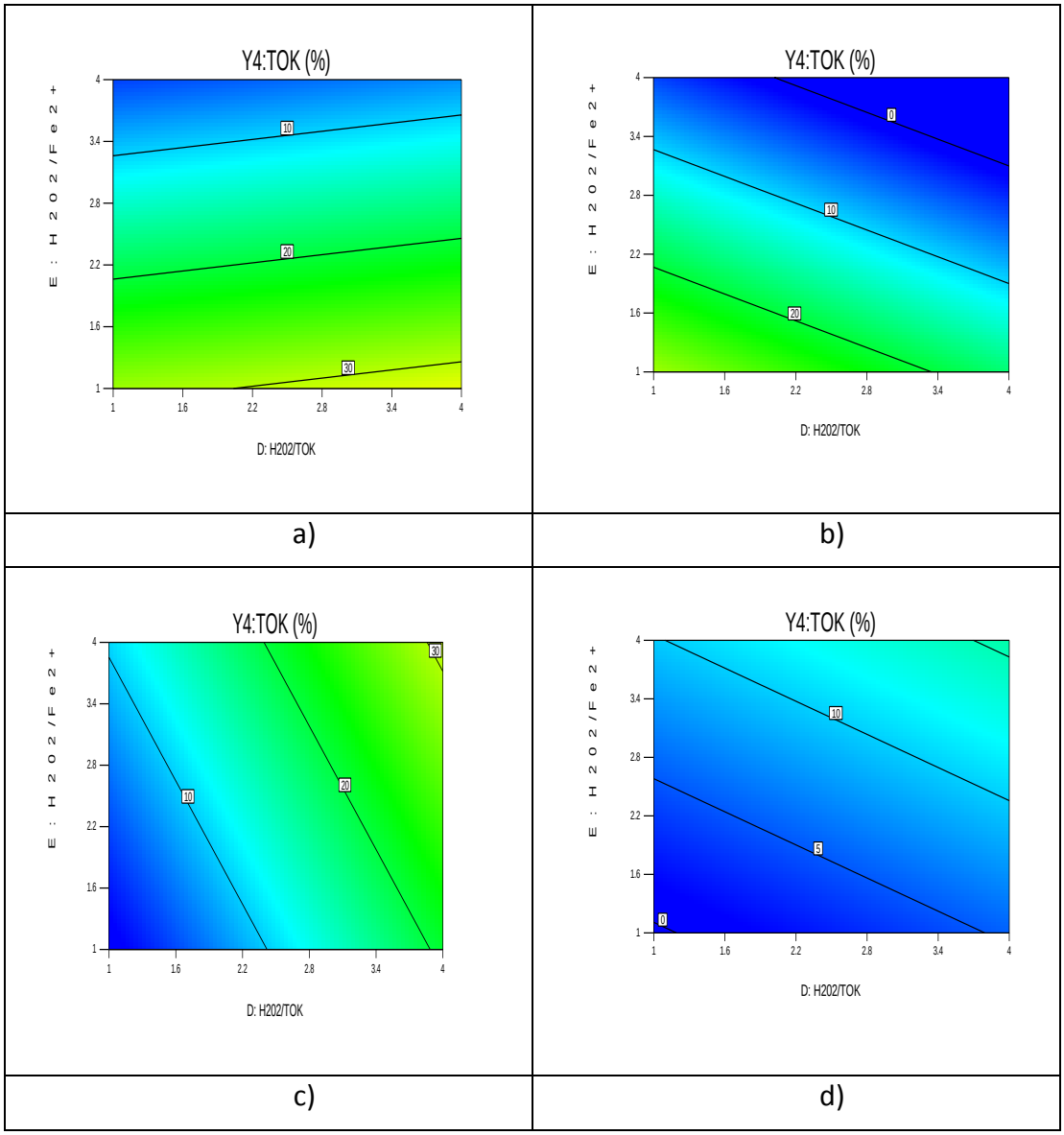
Performans parametresi	Değişken	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kareler Toplamı	F Değeri	P>F Değeri
KOİ (%)	Model	1413.09	12	117.76	0.81	0.6354
	A-t	15.90	1	15.90	0.11	0.7439
	B-T	42.80	1	42.80	0.30	0.5929
	C-pH	60.83	1	60.83	0.42	0.5246
	D-H_20_2/TOK	15.41	1	15.41	0.11	0.7478
	E-H_20_2/Fe^{2+}	14.49	1	14.49	0.10	0.7552
	F-ν_H	17.66	1	17.66	0.12	0.7307
	G-$\nu_{SÇ}$	4.14	1	4.14	0.029	0.8676
	H-M_T	1056.05	3	352.02	2.43	0.0966
	J-$I_Ş$	0.015	1	0.015	0.0001	0.9920
	K-I_T	185.80	1	185.80	1.28	0.2713
	Artan değer	2750.03	19	144.74		
	Toplam	1413.09	12	117.76	0.81	0.6354
J (L/m^2.sa)	Model	14353.84	12	1196.15	2.61	0.0300
	A-t	132.90	1	132.90	0.29	0.5966
	B-T	701.99	1	701.99	1.53	0.2310
	C-pH	60.69	1	60.69	0.13	0.7200
	D-H_20_2/TOK	3208.22	1	3208.22	7.00	0.0160
	E-H_20_2/Fe^{2+}	1020.20	1	1020.20	2.22	0.1522
	F-ν_H	15.98	1	15.98	0.035	0.8539
	G-$\nu_{SÇ}$	56.83	1	56.83	0.12	0.7287
	H-M_T	9017.89	3	3005.96	6.56	0.0032
	J-$I_Ş$	17.77	1	17.77	0.039	0.8460
	K-I_T	121.37	1	121.37	0.26	0.6129
	Artan değer	8712.21	19	458.54		
	Toplam	23066.05	31			

Batık UF proseste, değişen UF membran (UP005, UP020, UH050 ve UV150) ve ışık kaynağı (UVC-254 ve UVA-365) türleri için H_20_2/TOK – H_20_2/Fe^{2+} ve H_20_2/TOK – *ışık şiddeti* giriş parametreleri ile TOK değişimleri Şekil 2.36-2.39'da, KOİ değişimleri Şekil 3.35-3.38'de ve süzüntü akısı değişimleri de Şekil 3.39-3.42'de sunulmuştur. UVC-254'te UH050 membranı ve UVA-365'te UV150 membranı için; *H_20_2/TOK* ve H_20_2/Fe^{2+} giriş parametreleri ile pH-E_i, TÇK ve renk değişimleri, Şekil 3.43-3.45'de, H_20_2/TOK ve ışık şiddeti giriş parametrelerine göre proses performans parametrelerinin aynı sırasındaki değişimler Şekil 3.46-3.48'de gösterilmiştir.

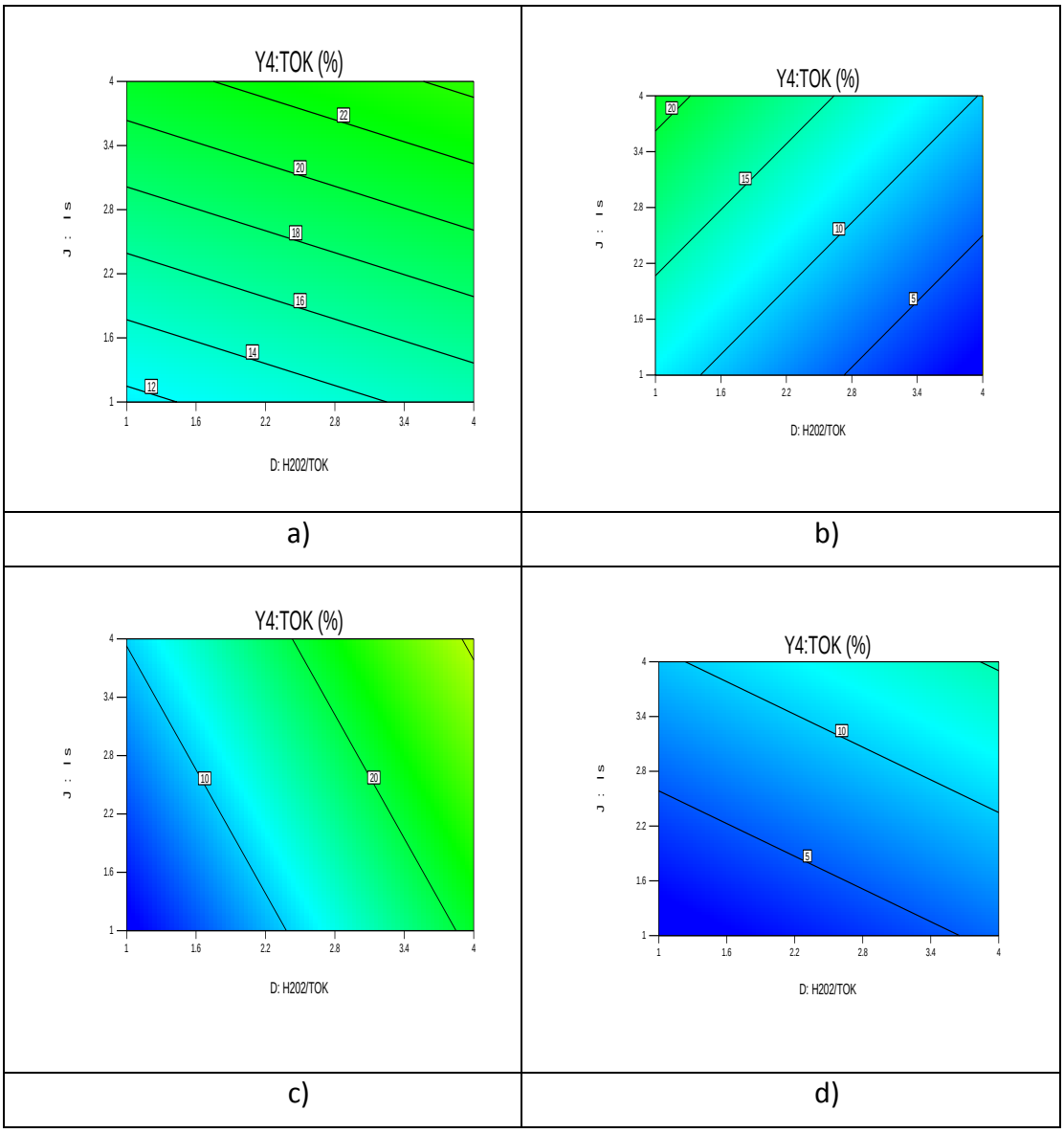
Tablo 3.23: Batık UF prosesi performans parametrelerine ait model denklemleri.

Proses Performans Parametresi	**Model I (Lineer Model)**	**Model II (II. Derece Lineer Olmayan Model)**
TOK (%)	16.65 +1.44 * A +1.96 * B +1.64 * C -2.21 * D +0.91 * E +0.96 * F -0.90 * G -3.53 * H[1] -3.80 * H[2] +3.69 * H[3] -0.35 * J -0.95 * K (S = 8.30 ve r^2 = 0.3634)	16.65 +4.60 * A +17.28 * B +81.62 * C -9.56 * D +7.56 * E -2.36 * F -7.50 * G -80.18 * H[1] +99.54 * H[2] +39.53 * H[3] +38.14 * J +107.48 * K -13.85 * AB -17.80 * AC +49.97 * AD +119.35 * AE -55.00 * AF +42.27 * AH[1] -47.09 * AH[2] -50.40 * AH[3] -23.19 * AK +244.74 * BC +0.040 * BD +68.40 * BE -3.06 * BF -11.67 * BG -68.70 * BH[1] +78.54 * BH[2] +8.53 * BJ -95.83 * CD +9.17 * CE (S = 0 ve r^2 = 1)
KOİ (%)	29.26 -0.95 * A +1.55 * B +1.85 * C -0.93 * D +0.90 * E +1.00 * F -0.48 * G -6.16 * H[1] -4.74 * H[2] +2.98 * H[3] -0.029 * J -2.41 * K (S = 12.03 ve r^2 = 0.3394)	29.26 +3.07 * A +43.95 * B +169.65 * C -14.70 * D +15.94 * E -1.07 * F -12.61 * G -172.05 * H[1] +199.39 * H[2] +78.96 * H[3] +82.74 * J +213.61 * K -29.62 * AB -30.68 * AC +115.44 * AD +252.67 * AE -100.74 * AF +80.17 * AH[1] -100.21 * AH[2] -99.22 * AH[3] -52.15 * AK +486.37 * BC -1.88 * BD +143.87 * BE -1.30 * BF -13.62 * BG -131.88 * H[1] +148.16 * BH[2] +11.45 * BJ -189.95 * CD +12.18 * CE (S = 0 ve r^2 = 1)
J (L/m^2·sa)	36.04 +2.73 * A +6.28 * B -1.85 * C -13.43 * D +7.58 * E +0.95 * F -1.79 * G -18.93 * H[1] -14.24 * H[2] +19.39 * H[3] -1.00 * J -1.95 * K (S = 21.41 ve r^2 = 0.6223)	36.04 -7.37 * A +84.65 * B +325.37 * C -14.66 * D +60.42 * E +19.49 * F -11.99 * G -368.04 * H[1] +410.78 * H[2] +194.66 * H[3] +158.04 * J +469.53 * K -21.53 * AB -27.49 * AC +216.74 * AD +488.04 * AE -193.78 * AF +151.95 * AH[1] -210.43 * AH[2] -197.48 * AH[3] -85.64 * AK +1065.96 * BC +12.56 * BD +284.70 * BE -20.60 * BF -40.10 * BG -297.22 * BH[1] +301.14 * BH[2] +35.50 * BJ -419.88 * CD -11.33 * CE (S = 0 ve r^2 = 1)

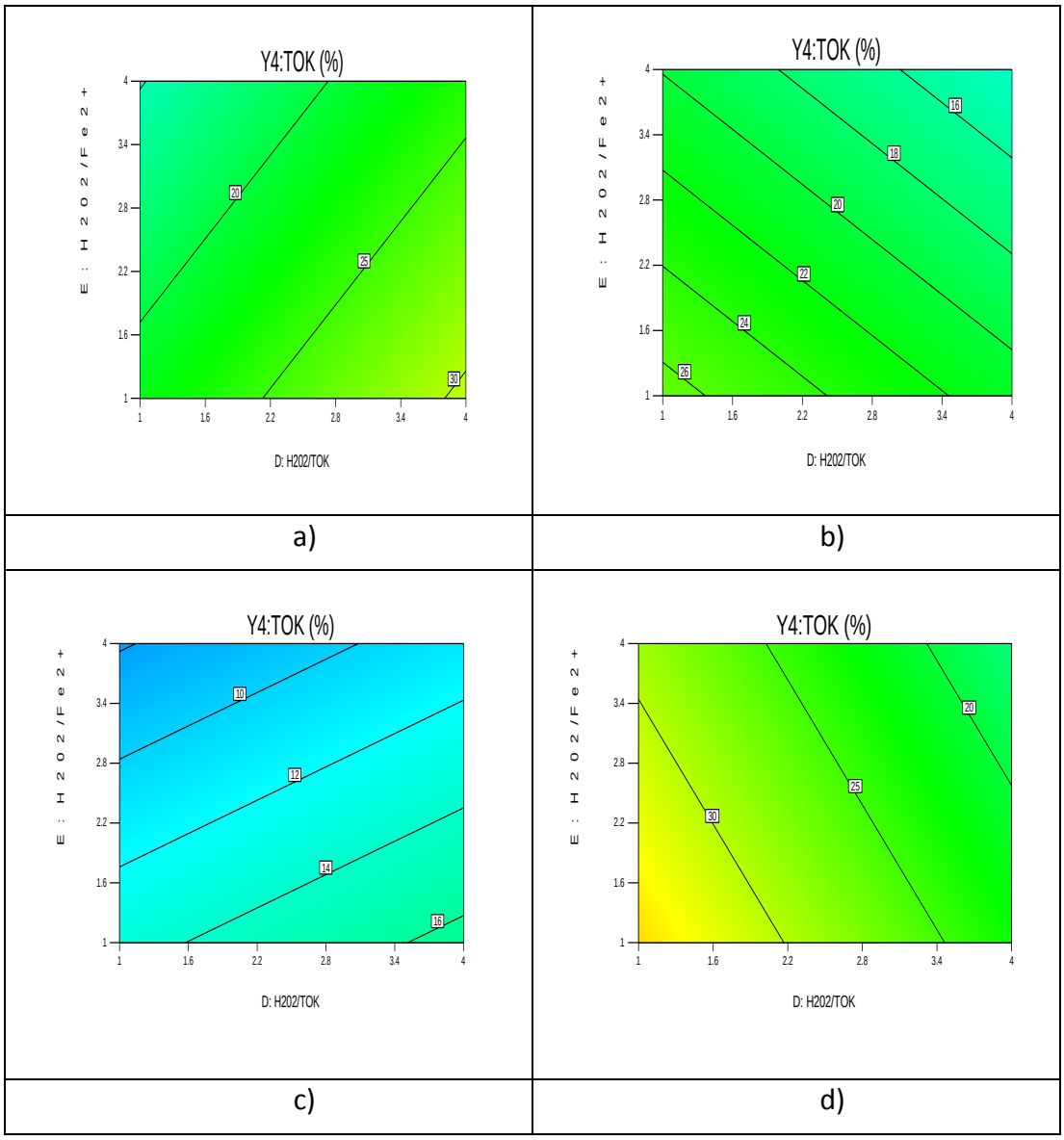
İOP/batık UF hibrit reaktörde tekstil atıksuyunun UVC–254 (I) ve UVA–365 (II) ışık kaynağı türleri kullanılarak foto-Fenton prosesiyle arıtımında batık UF prosesi için TOK başına değişen H_2O_2 ve Fe^{2+} konsantrasyonlarında değişim grafikleri verilmiştir. (t, T, pH, v_H, $v_{SÇ}$ ve $I_Ş$ giriş parametreleri ortalama kodlanmış tasarım değerleri, 2.5 değerindedir.).



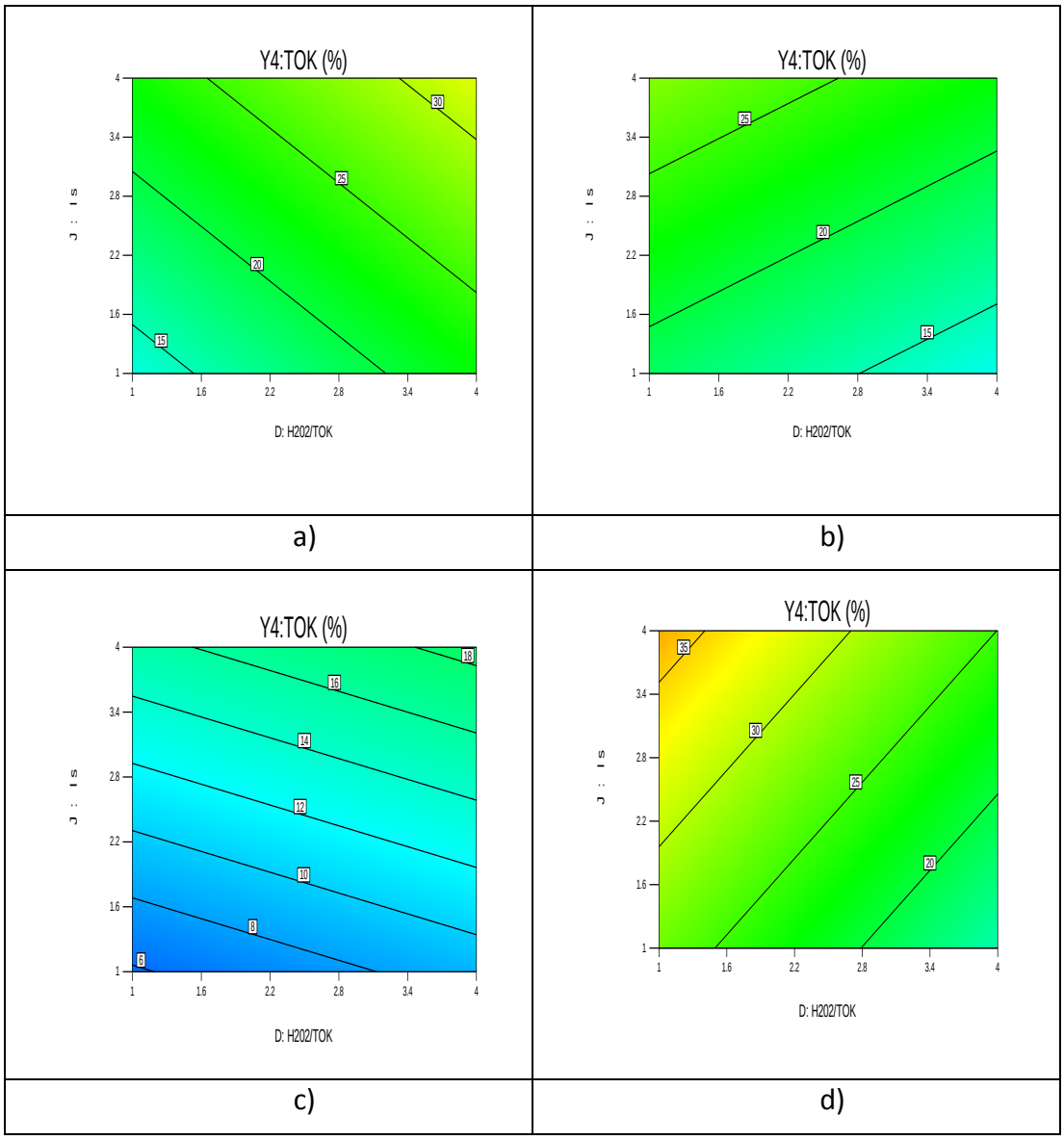
Şekil 3.31: Membranların TOK giderim verimi grafikleri. a) UVC–254-UP005 ve b) UVA–365-UP020, c) UVC–254-UP020, d) UVA–365-UP005.



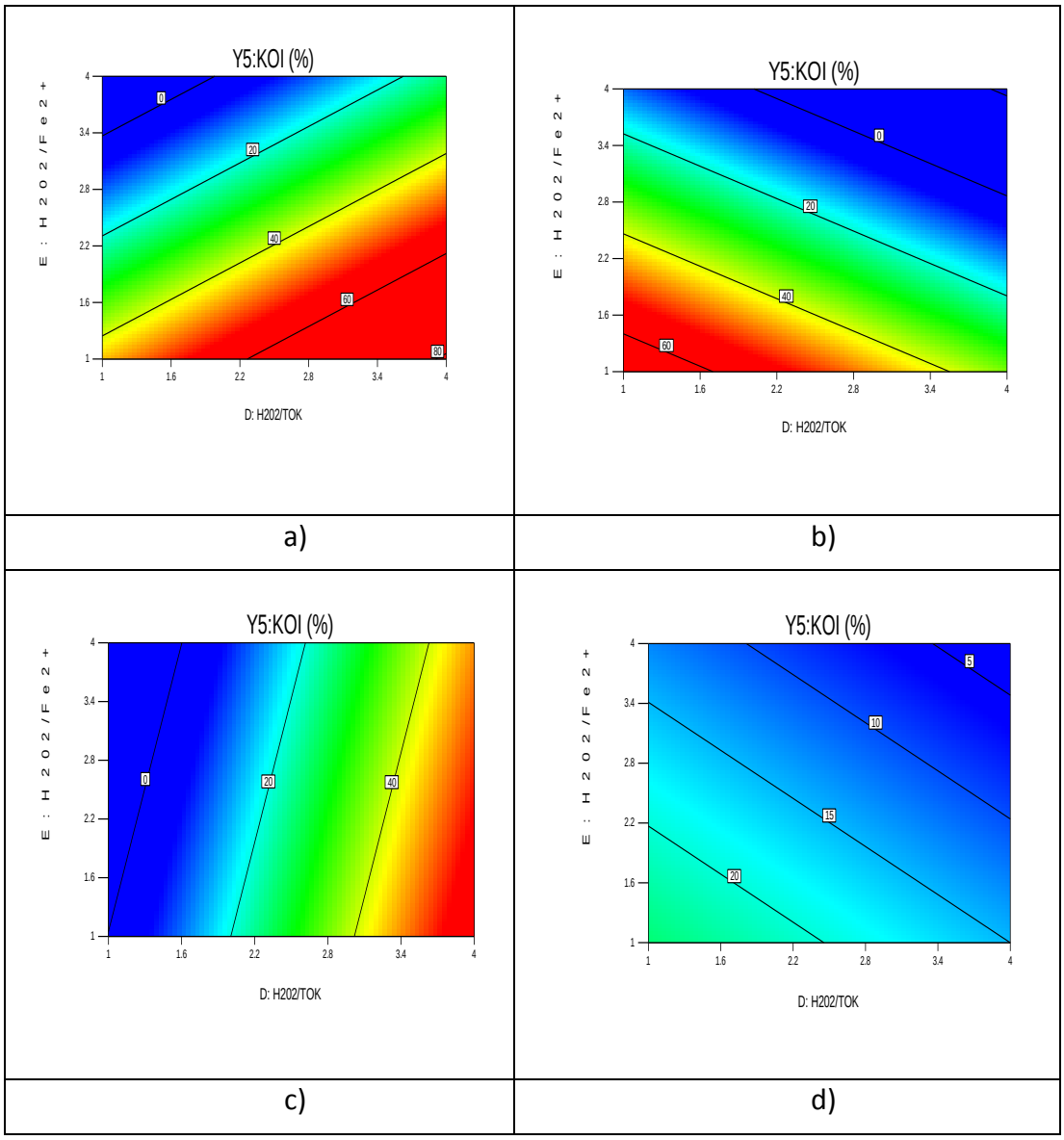
Şekil 3.32: Membranların TOK giderim verimi grafikleri. a) UVC–254-UP005 ve b) UVA–365-UP020, c) UVC–254-UP020, d) UVA–365-UP005.



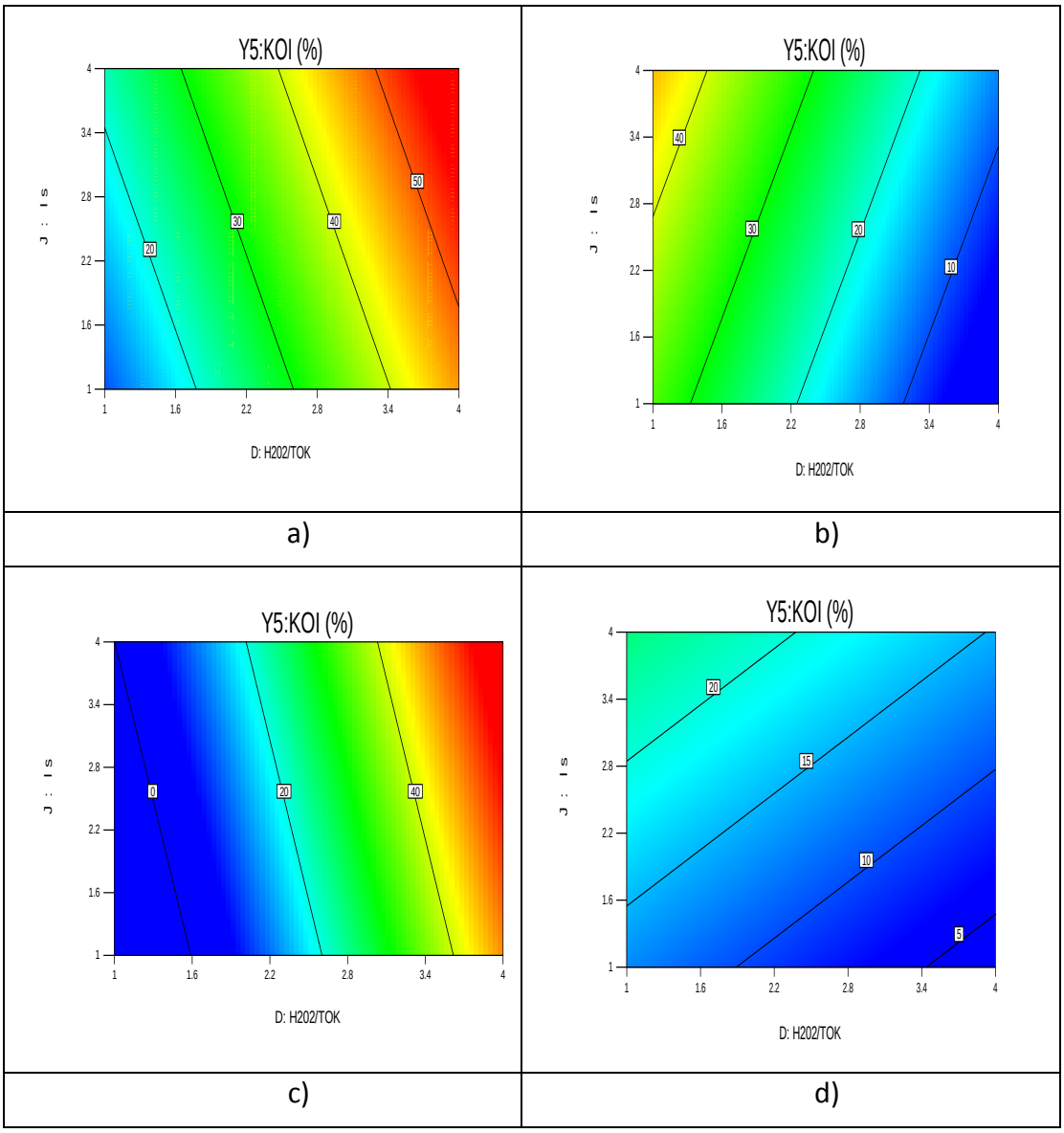
Şekil 3.33: Membranların TOK giderim verimi grafikleri. a) UVC–254-UH050 ve b) UVA–365-UV150, c) UVC–254-UV150, d) UVA–365-UH050.



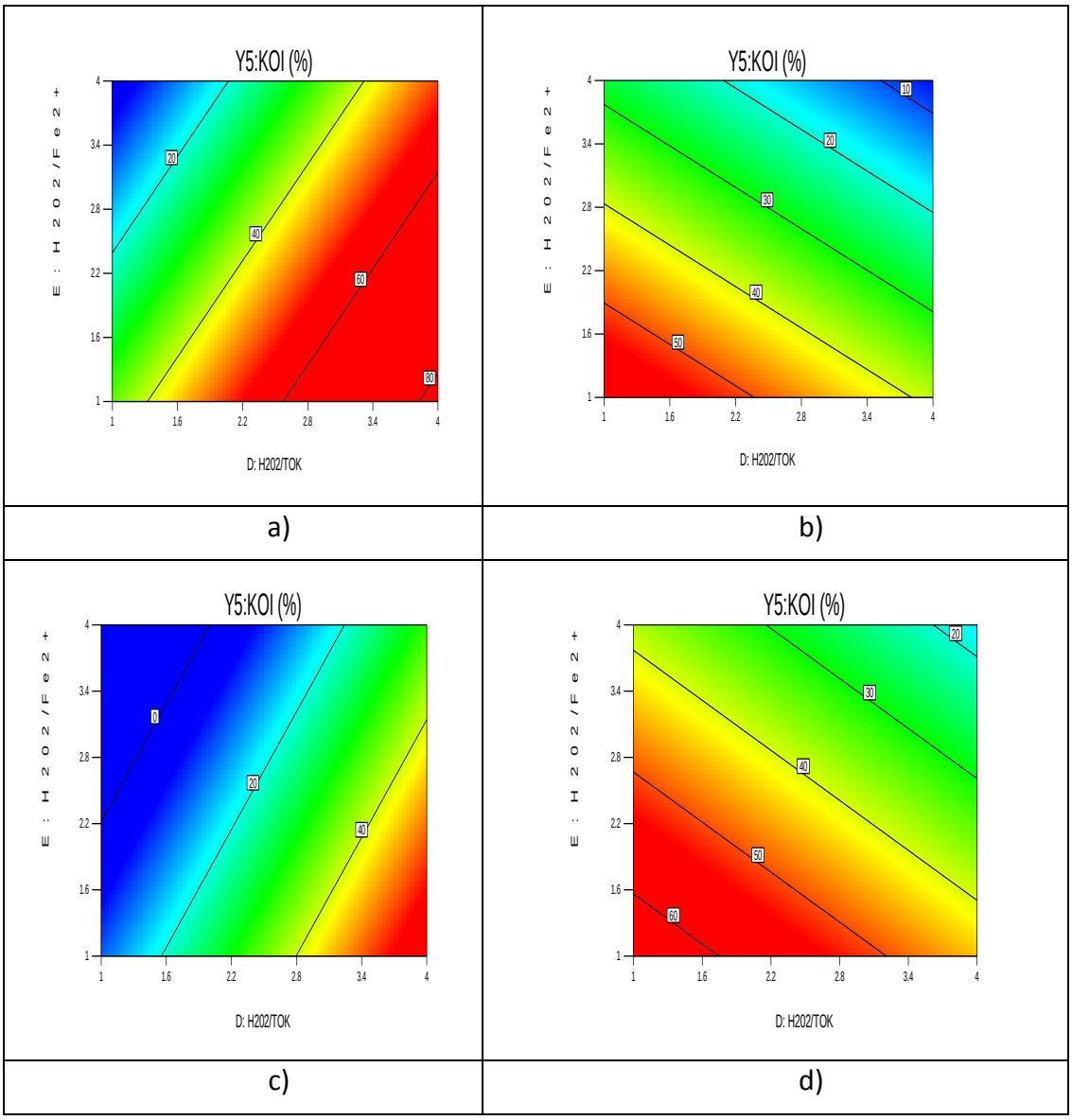
Şekil 3.34: Membranların TOK giderim verimi grafikleri. a) UVC–254-UH050 ve b) UVA–365-UV150, c) UVC–254-UV150, d) UVA–365-UH050.



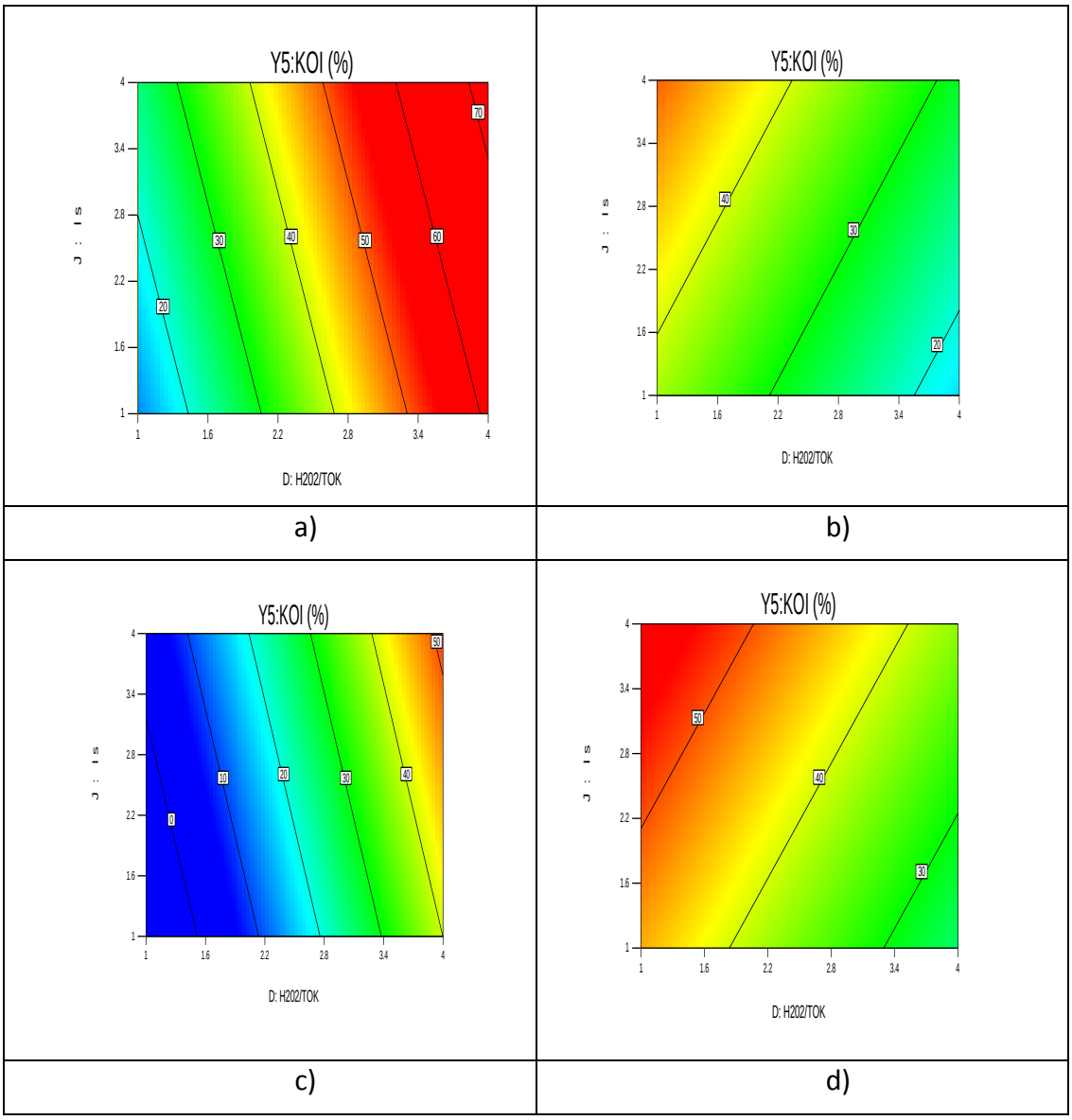
Şekil 3.35: Membranların KOİ giderim verimi grafikleri. a) UVC–254-UP005 ve b) UVA–365-UP020, c) UVC–254-UP020, d) UVA–365-UP005.



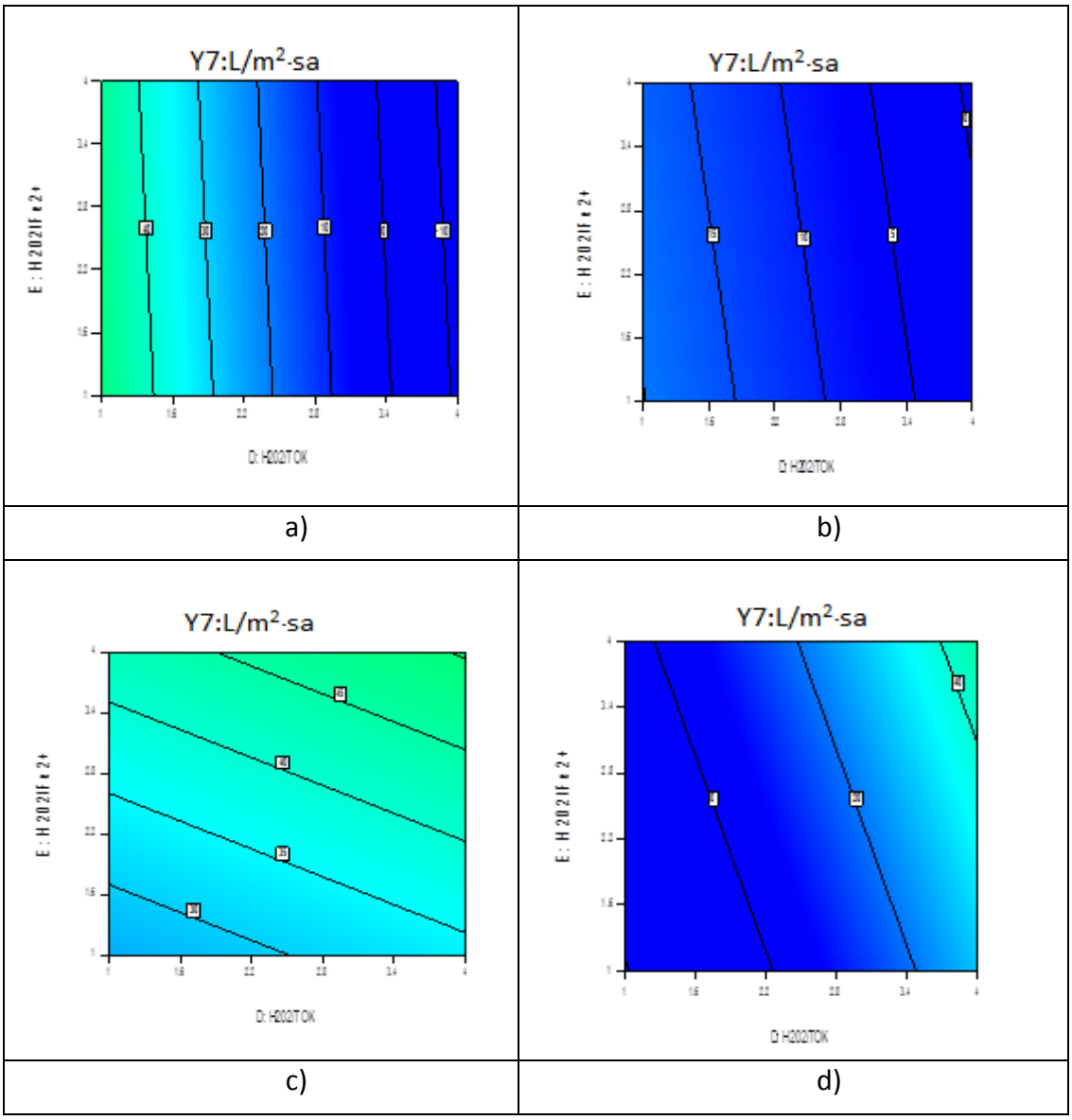
Şekil 3.36: Membranların KOİ giderim verimi grafikleri. a) UVC–254-UP005 ve b) UVA–365-UP020, c) UVC–254-UP020, d) UVA–365-UP005.



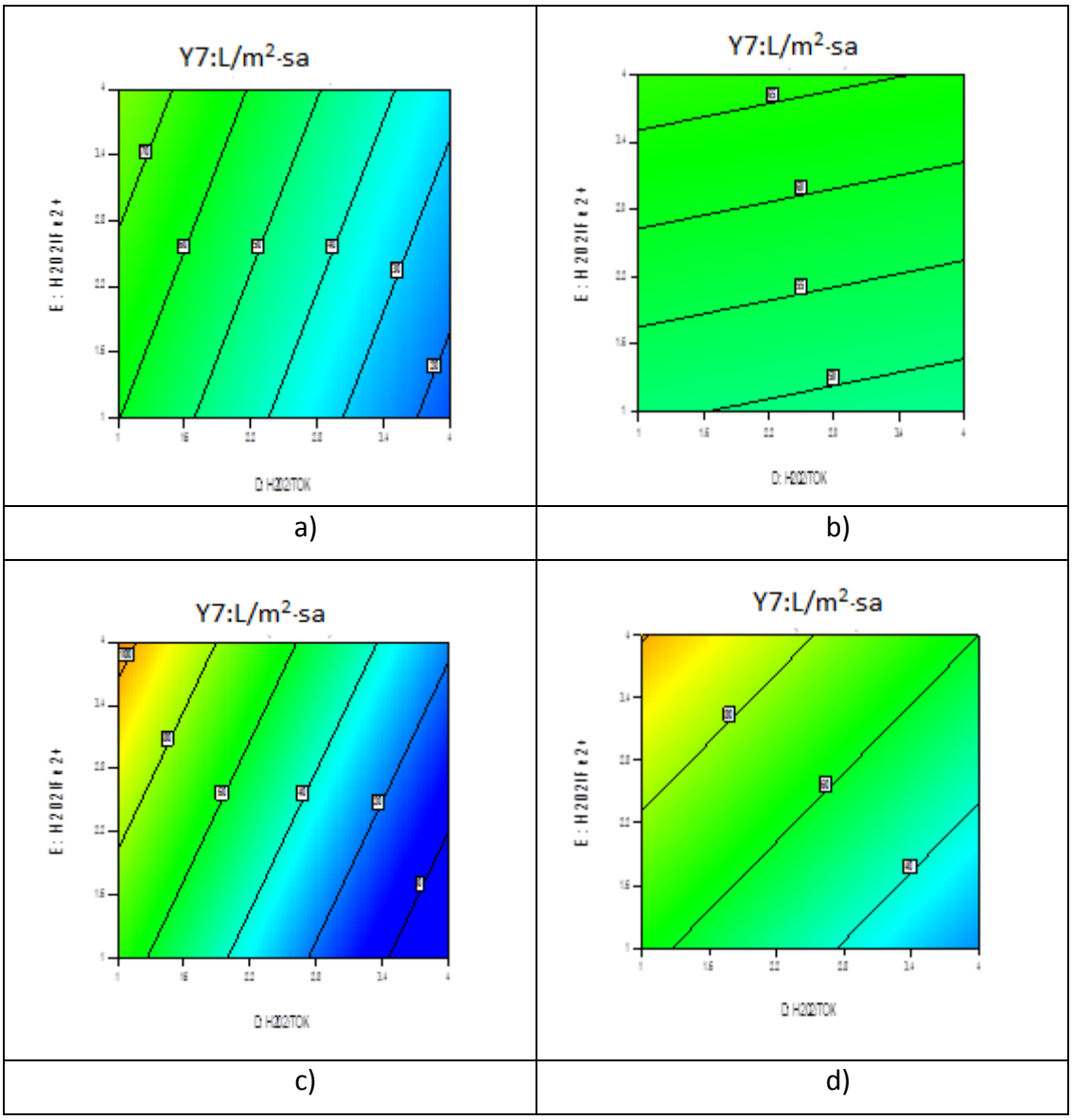
Şekil 3.37: Membranların KOİ giderim verimi grafikleri. a) UVC–254-UH050 ve b) UVA–365-UV150, c) UVC–254-UV150, d) UVA–365-UH050.



Şekil 3.38: Membranların KOİ giderim verimi grafikleri. a) UVC–254-UH050 ve b) UVA–365-UV150, c) UVC–254-UV150, d) UVA–365-UH050.



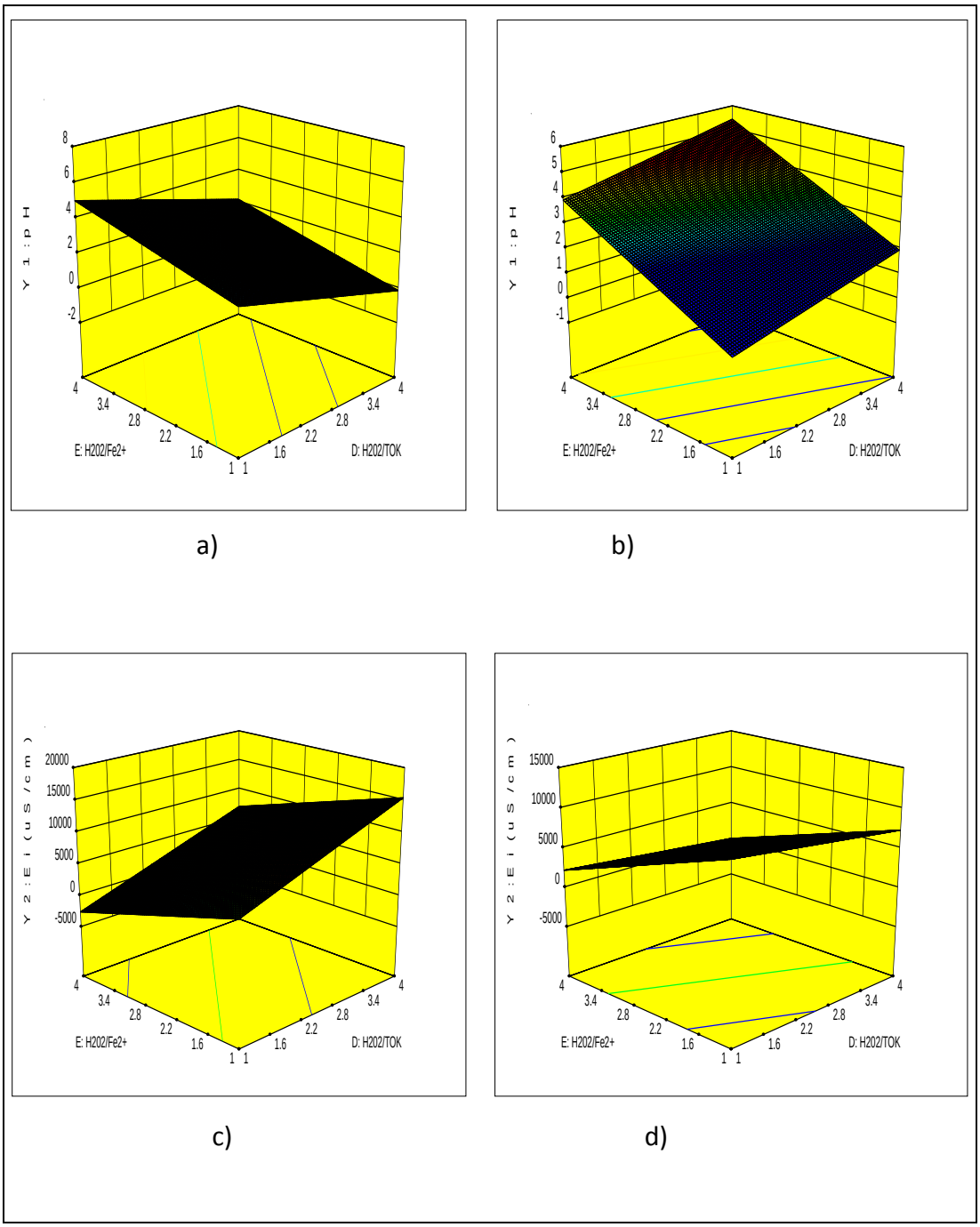
Şekil 3.39: Membranların süzüntü akısı grafikleri. a) UVC–254-UP005 ve b) UVA–365-UP020, c) UVC–254-UP020, d) UVA–365-UP005.



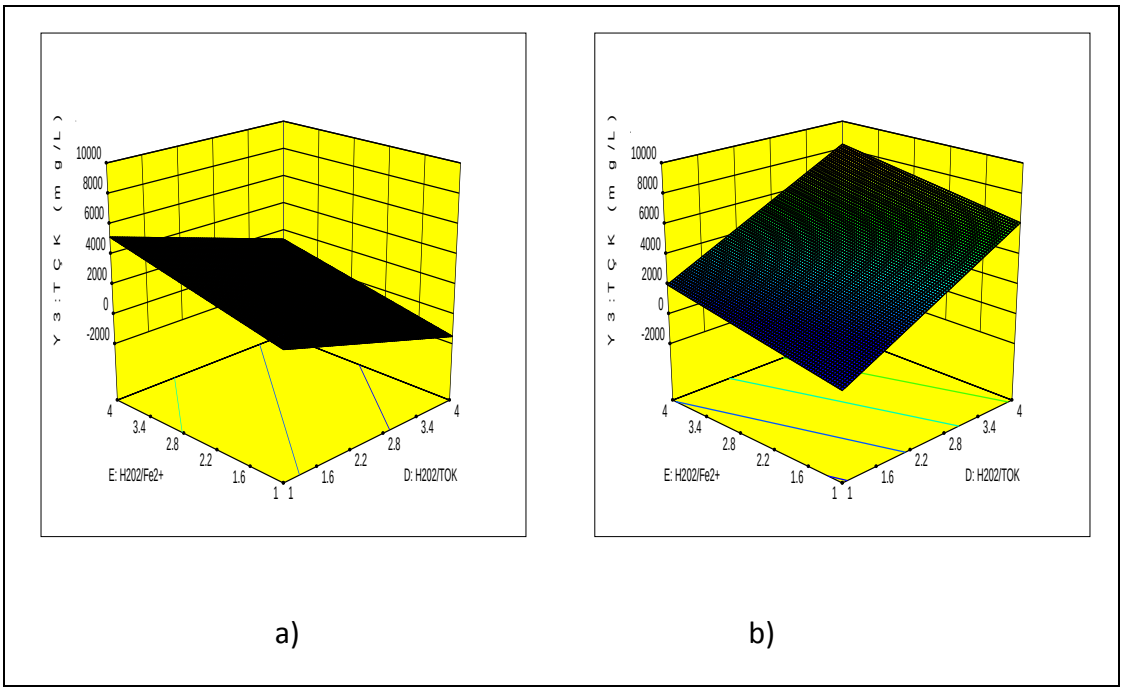
Şekil 3.40: Membranların süzüntü akısı grafikleri. a) UVC–254-UH050 ve b) UVA–365-UV150, c) UVC–254-UV150, d) UVA–365-UH050.

.

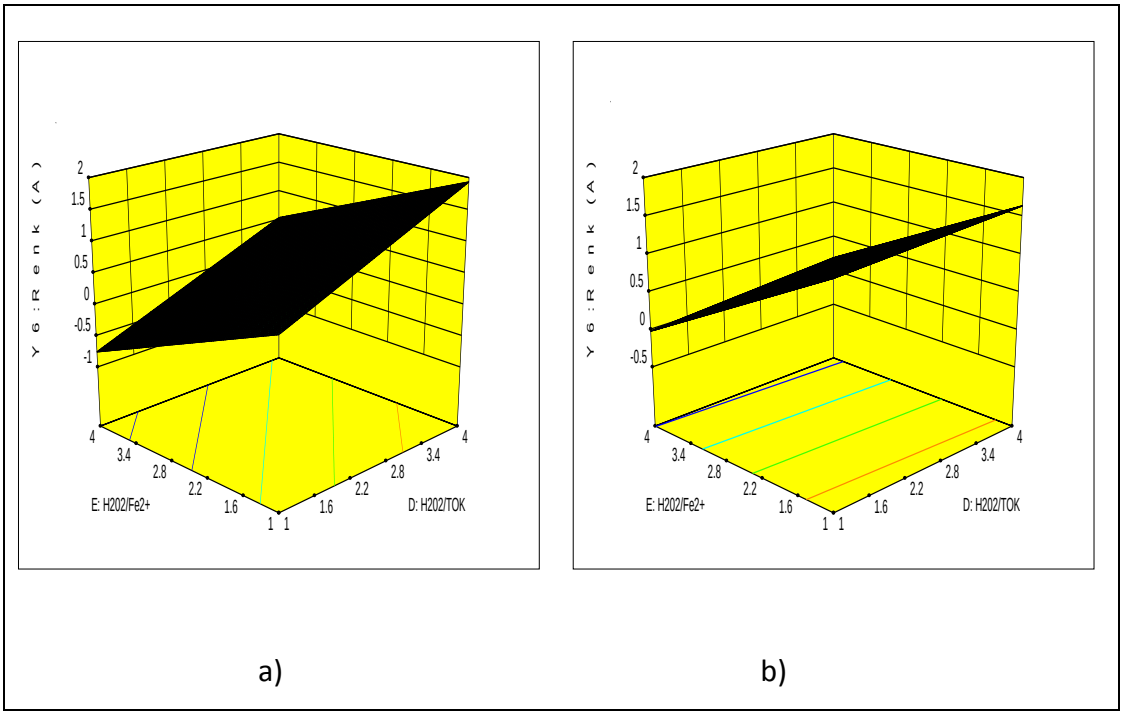
İOP/batık UF hibrit reaktörde tekstil atıksuyunun UVC–254/UH050 (I) ve UVA–365/UV150 (II) ışık kaynağı/membran türleri kullanılarak foto-Fenton prosesiyle arıtımında batık UF prosesi için TOK başına değişen H_2O_2 ve Fe^{2+} konsantrasyonlarına göre değişim grafikleri verilmiştir. (Her bir grafikte, eksenlerde verilen *H_2O_2/TOK* ve *H_2O_2/Fe^{2+}* ile değişimi gösterilen parametre hariç kalan proses parametrelerinin tamamı için ortalama kodlanmış tasarım değerleri, 2.5 değerindedir.).



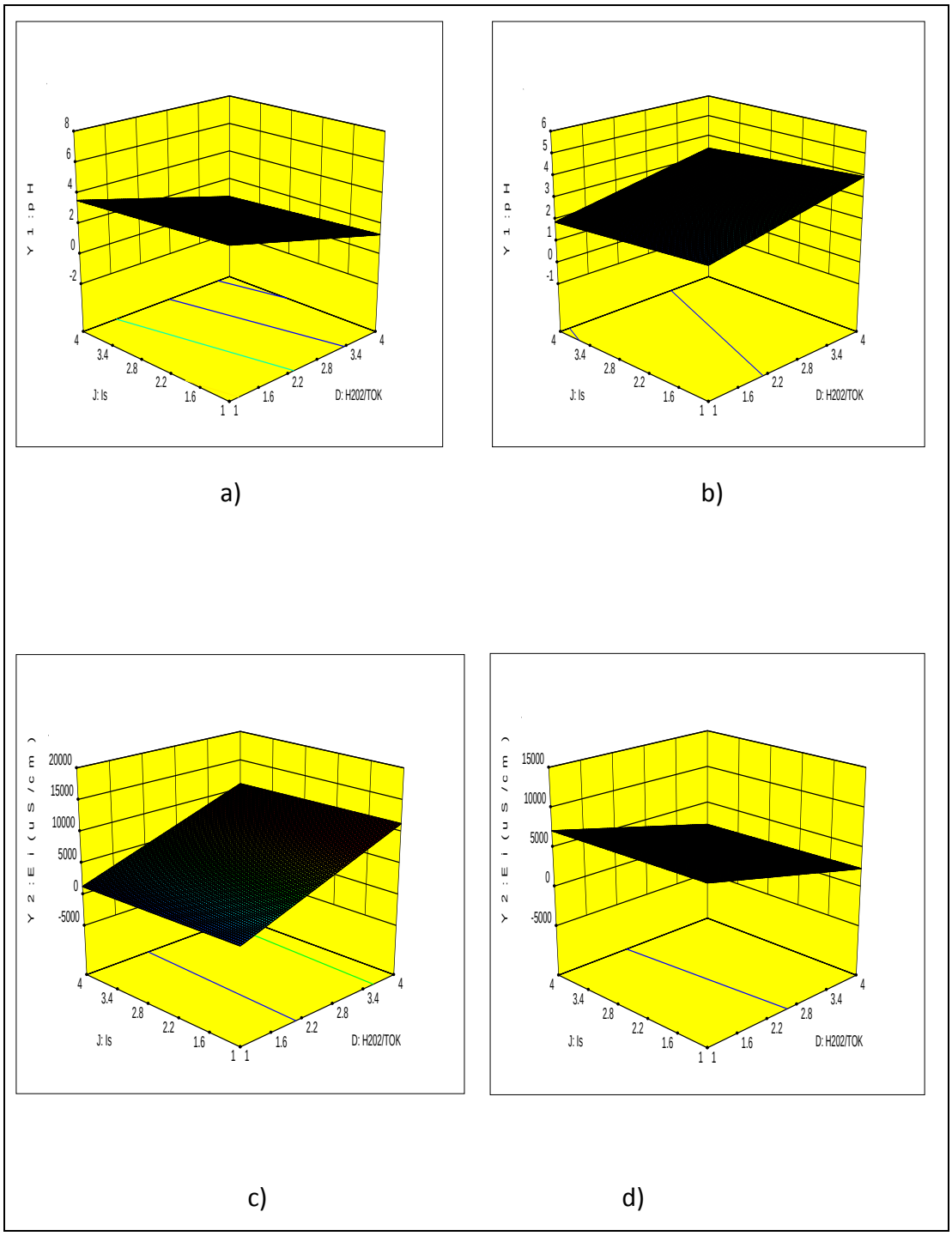
Şekil 3.41: Değişim grafikleri. a) UVC–254, b) UVA–365 için pH ve c) UVC–254, b) UVA–365 için E_i



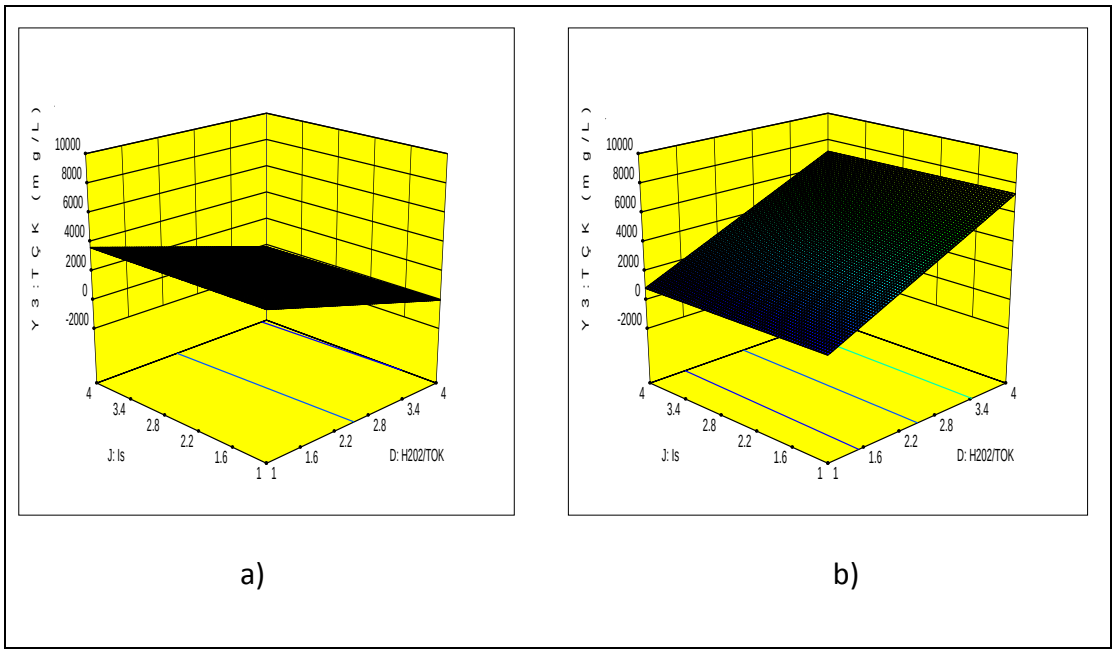
Şekil 3.42: TÇK değişim grafikleri. a) UVC–254, b) UVA–365.



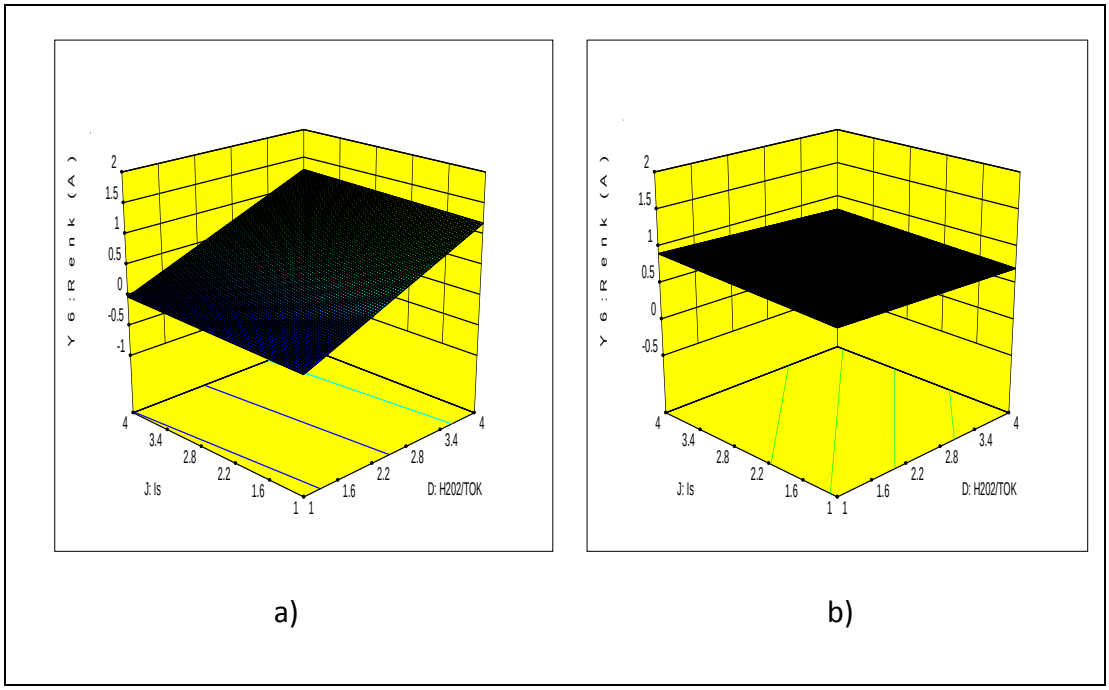
Şekil 3.43: Renk değişim grafikleri. a) UVC–254, b) UVA–365.



Şekil 3.44: Değişim grafikleri. a) UVC–254, b) UVA–365 için pH ve c) UVC–254, d) UVA–365 için Ei.



Şekil 3.45: TÇK değişim grafikleri. a) UVC–254, b) UVA–365.



Şekil 3.46: Renk değişim grafikleri. a) UVC–254, b) UVA–365.

Batık UF proseste organik madde giderim verimleri, UF prosesi çıkış suyu kalitesi değerlerinin reaktör içerisindeki deney sonu ölçülen değerlere göre ölçülendirilmesi üzerinden belirlenmiştir. Batık membran proseste, UVA-365 ışık kaynağı etkisi altında bazı membranlarda aksi durum gözlenmiş olmakla birlikte,

H_20_2 ve Fe^{2+} miktarları veya H_20_2 ve ışık şiddeti artışları ile genel olarak TOK ve KOİ giderim verimlerinin arttığı belirlenmiş; buna karşılık verim etkinliklerinin (değişim eğrisi eğimlerinin) değişen membran ve ışık kaynağı türleri için farklı seviyelerde olduğu görülmüştür. Membran süzüntü akısı bakımından ise, batık UF prosesin, hibrit reaktöre uygulanan arıtma kimyasalları miktarlarına ve uygulanan ışık enerjisinin tür ve şiddetine bağlı olarak birebir genelleştirilemeyen performanslar sergilediği ya da çok dinamik akı performans değişimleriyle arıtılmış su eldesine imkan olduğu anlaşılmaktadır. Buna karşın, UH050 ve UV150 membranlarının sırasıyla UVC-254 ve UVA-365 destekli hibrit reaktör uygulamasında en yüksek süzüntü akısını sağladıkları görülmüştür. UH050/ UVC-254 ve UV150/ UVA-365 membran/ışık kaynağı türleriyle UF prosesinin İOP hibrit reaktörde batık olarak uygulanmasının süzüntü akısını, artan H_20_2 ve Fe^{2+} miktarları ile azalttığı, artan ışık şiddetiyle de arttırdığı belirlenmiştir.

UH050/UVC-254 ve UV150/UVA-365 membran/ışık kaynağı türleriyle işletilen UF proseste, reaktöre ilave edilen H_20_2 ve Fe^{2+} miktarı arttıkça UF prosesi çıkış suyu pH'sının doğrusal olarak azaldığı ve iletkenlik değerinin 5000-6000 μS/cm civarına arttığı görülmüştür. Aynı giriş parametresi ikilisi (H_20_2 ve Fe^{2+}) değişim şartları altında, sülfat paramteresinin 10.000 mg/L ve üzeri değerlere çıktığı ve UH050/UVC-254 ikilisi etkinliğinde daha iyi UF çıkış suyu TÇK değerlerine ulaşıldığı belirlenmiştir. UF çıkış suyunda, atıksuyun giderilerek kalan kendi rengi ve sudaki çözünmüş demir iyonlarından gelen renklerin içeriğinden ibaret renk parametresinde 1.0 A ve üzeri değerlere doğrusal artışlar gözlenmiştir.

- İOP/Batık UF Hibrit Sistemin Deneysel Performansı

İOP/batık UF hibrit reaktör sisteminde tekstil atıksuyunun foto-Fenton prosesiyle arıtımında, TOK, KOİ ve süzüntü akısı (*J*) performans parametreleri için lineer model (Model I) ANOVA analiz sonuçları Tablo 3.24'te; I. derece lineer ve II. derece lineer olmayan modeller bazında proses performans parametrelerine ait model denklemleri Tablo 3.25'de sunulmuştur.

Tablo 3.24: Proses performans parametreleri için lineer modelin (Model I) ANOVA analiz sonuçları.

Performans parametresi	Değişken	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kareler Toplamı	F Değeri	P>F Değeri
TOK (%)	Model	2827.15	12	235.60	4.84	0.0012
	A-t	661.13	1	661.13	13.57	0.0016
	B-T	343.03	1	343.03	7.04	0.0157
	C-pH	14.97	1	14.97	0.31	0.5858
	D-	1266.56	1	1266.56	26.00	< 0.0001
	E-	37.39	1	37.39	0.77	0.3919
	F-ν_H	24.22	1	24.22	0.50	0.4893
	G-$\nu_{SÇ}$	24.45	1	24.45	0.50	0.4872
	H-M_T	300.85	3	100.28	2.06	0.1397
	J-$I_Ş$	3.03	1	3.03	0.062	0.8057
	K-I_T	151.52	1	151.52	3.11	0.0939
	Artan	925.56	19	48.71		
	Toplam	3752.71	31			
KOİ (%)	Model	2409.56	12	200.80	2.63	0.0292
	A-t	564.44	1	564.44	7.38	0.0137
	B-T	165.90	1	165.90	2.17	0.1571
	C-pH	107.83	1	107.83	1.41	0.2497
	D-H_20_2/TOK	1181.39	1	1181.39	15.45	0.0009
	E-H_20_2/Fe^{2+}	3.48	1	3.48	0.046	0.8333
	F-ν_H	4.24	1	4.24	0.055	0.8164
	G-$\nu_{SÇ}$	0.095	1	0.095	0.0012	0.9722
	H-M_T	253.53	3	84.51	1.11	0.3715
	J-$I_Ş$	75.90	1	75.90	0.99	0.3316
	K-I_T	52.77	1	52.77	0.69	0.4164
	Artan değer	1452.81	19	76.46		
	Toplam	3862.37	31			

Tablo 3.24: Devam.

Performans parametresi	Değişken	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kareler Toplamı	*F* Değeri	*P>F* Değeri
J (L/m^2.sa)	Model	14353.84	12	1196.15	2.61	0.0300
	A-t	132.90	1	132.90	0.29	0.5966
	B-T	701.99	1	701.99	1.53	0.2310
	C-pH	60.69	1	60.69	0.13	0.7200
	D-H_20_2/TOK	3208.22	1	3208.22	7.00	0.0160
	E-H_20_2/Fe^{2+}	1020.20	1	1020.20	2.22	0.1522
	F-ν_H	15.98	1	15.98	0.035	0.8539
	G-$\nu_{SÇ}$	56.83	1	56.83	0.12	0.7287
	H-M_T	9017.89	3	3005.96	6.56	0.0032
	J-$I_Ş$	17.77	1	17.77	0.039	0.8460
	K-I_T	121.37	1	121.37	0.26	0.6129
	Artan değer	8712.21	19	458.54		
	Toplam	23066.05	31			

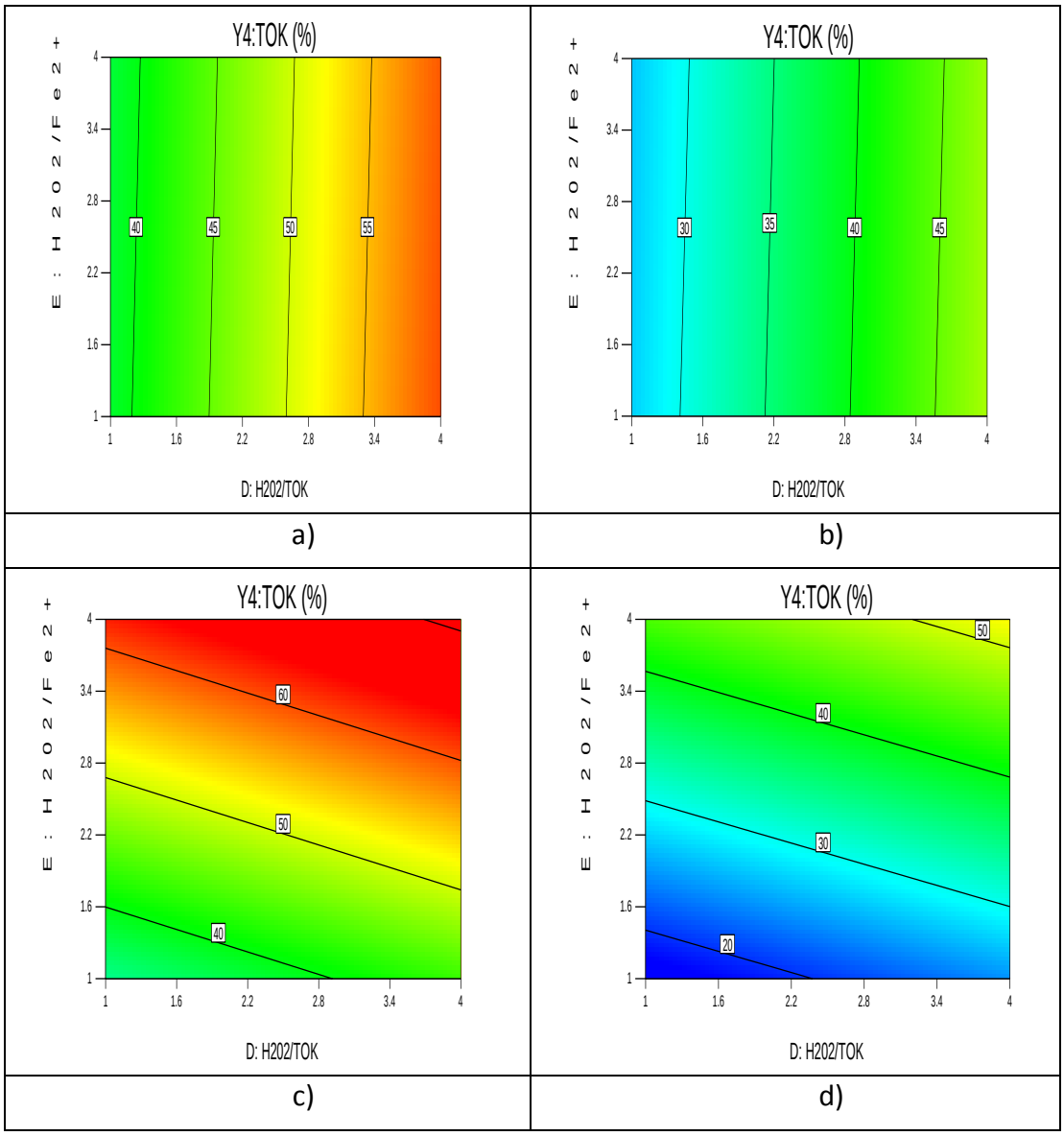
Tablo 3.25: Batık UF prosesi performans parametrelerine ait model denklemleri.

Proses Performans Parametresi	Model I (Lineer Model)	Model II (II. Derece Lineer Olmayan Model)
TOK (%)	16.65 +1.44 * A +1.96 * B +1.64 * C -2.21 * D +0.91 * E +0.96 * F -0.90 * G -3.53 * H[1] -3.80 * H[2] +3.69 * H[3] -0.35 * J -0.95 * K (S = 8.30 ve r^2 = 0.3634)	16.65 +4.60 * A +17.28 * B +81.62 * C -9.56 * D +7.56 * E -2.36 * F -7.50 * G -80.18 * H[1] +99.54 * H[2] +39.53 * H[3] +38.14 * J +107.48 * K -13.85 * AB -17.80 * AC +49.97 * AD +119.35 * AE -55.00 * AF +42.27 * AH[1] -47.09 * AH[2] -50.40 * AH[3] -23.19 * AK +244.74 * BC +0.040 * BD +68.40 * BE -3.06 * BF -11.67 * BG -68.70 * BH[1] +78.54 * BH[2] +8.53 * BJ -95.83 * CD +9.17 * CE (S = 0 ve r^2 = 1)
KOİ (%)	29.26 -0.95 * A +1.55 * B +1.85 * C -0.93 * D +0.90 * E +1.00 * F -0.48 * G -6.16 * H[1] -4.74 * H[2] +2.98 * H[3] -0.029 * J -2.41 * K (S = 12.03 ve r^2 = 0.3394)	29.26 +3.07 * A +43.95 * B +169.65 * C -14.70 * D +15.94 * E -1.07 * F -12.61 * G -172.05 * AH[1] -100.21 * AH[2] -99.22 * AH[3] -52.15 * AK +486.37 * BC -1.88 * BD +143.87 * BE -1.30 * BF -13.62 * BG -131.88 * H[1] +148.16 * BH[2] +11.45 * BJ -189.95 * CD +12.18 * CE (S = 0 ve r2 = 1)

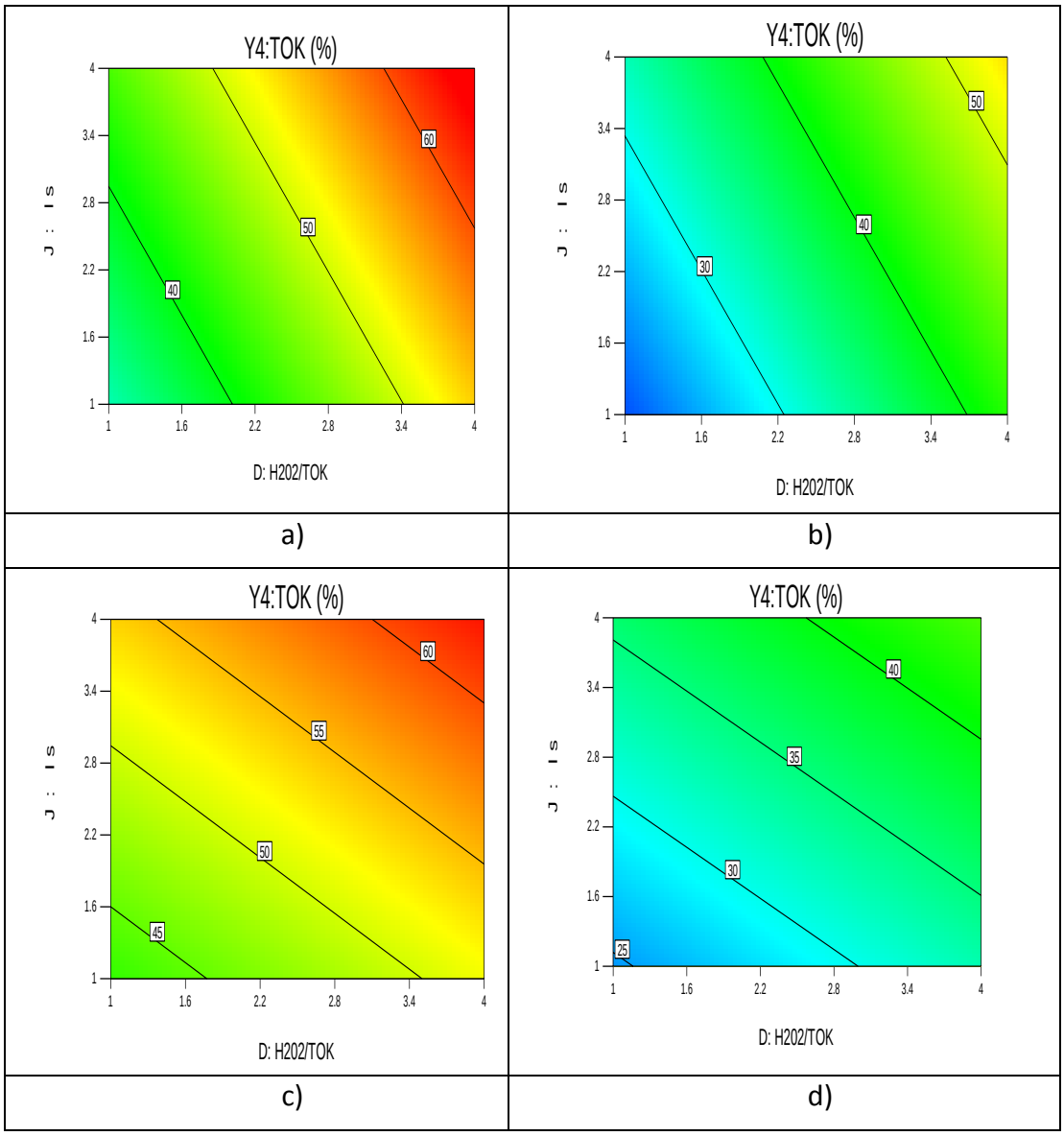
Tablo 3.25: Devam.

Proses Performans Parametresi	**Model I (Lineer Model)**	**Model II (II. Derece Lineer Olmayan Model)**
J (L/m^2·sa)	36.04 +2.73 * A +6.28 * B -1.85 * C -13.43 * D +7.58 * E +0.95 * F -1.79 * G -18.93 * H[1] -14.24 * H[2] +19.39 * H[3] -1.00 * J -1.95 * K (*S* = 21.41 ve r^2 = 0,6223)	36.04 -7.37 * A +84.65 * B +325.37 * C -14.66 * D +60.42 * E +19.49 * F -11.99 * G -368.04 * H[1] +410.78 * H[2] +194.66 * H[3] +158.04 * J +469.53 * K -21.53 * AB -27.49 * AC +216.74 * AD +488.04 * AE -193.78 * AF +151.95 * AH[1] -210.43 * AH[2] -197.48 * AH[3] -85.64 * AK +1065.96 * BC +12.56 * BD +284.70 * BE -20.60 * BF -40.10 * BG -297.22 * BH[1] +301.14 * BH[2] +35.50 * BJ -419.88 * CD -11.33 * CE (*S* = 0 ve r^2 = 1)

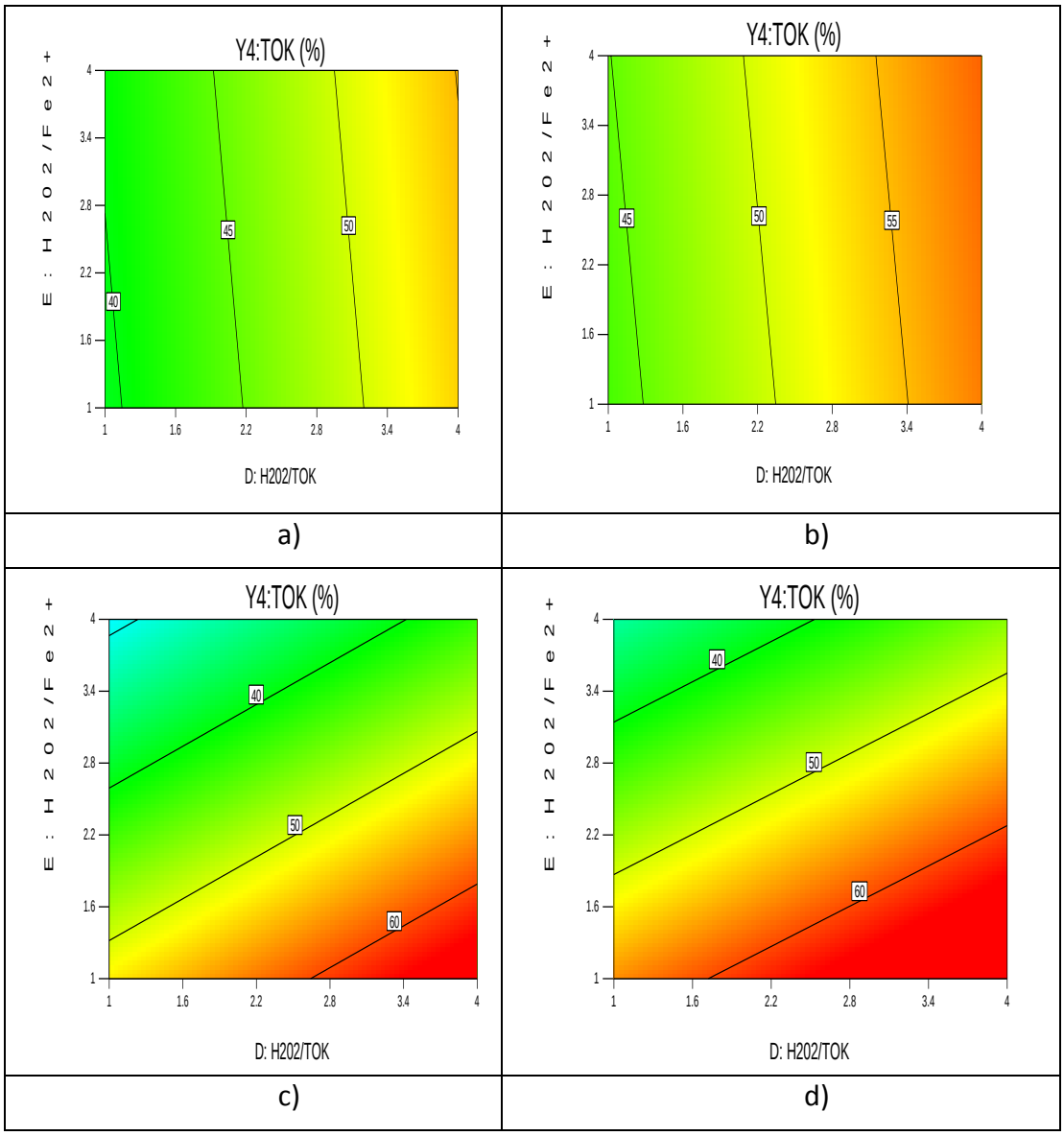
İOP/batık UF hibrit reaktörde tekstil atıksuyunun UVC–254 (I) ve UVA–365 (II) ışık kaynağı türleri kullanılarak foto-Fenton prosesiyle arıtımında batık UF prosesi için TOK başına değişen H_20_2 ve Fe^{2+} konsantrasyonlarında değişim grafikleri verilmiştir. (t, T, pH, ν_H, $\nu_{SÇ}$ ve $I_Ş$ giriş parametreleri ortalama kodlanmış tasarım değerleri, 2,5 değerindedir).



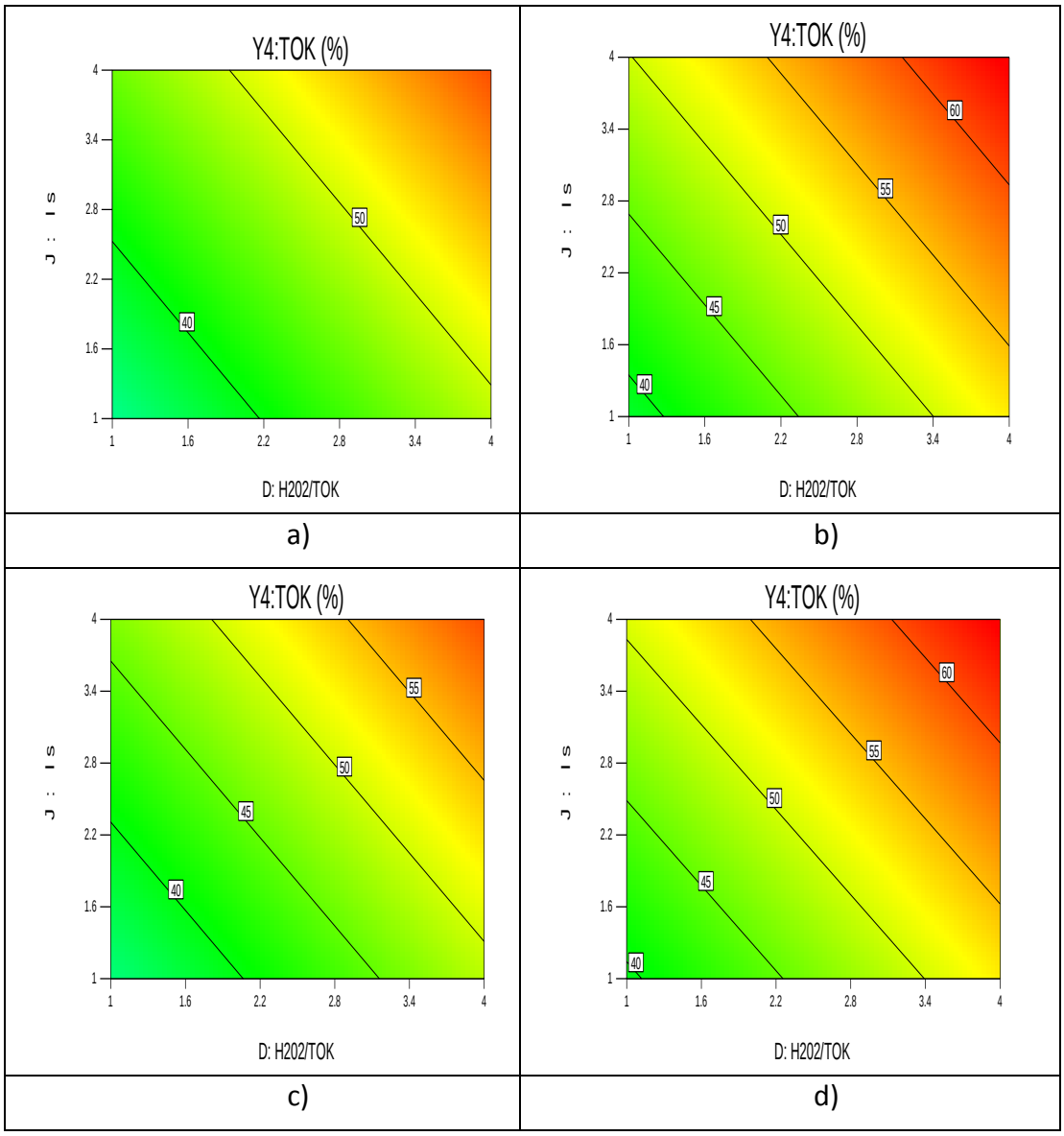
Şekil 3.47: Membranların TOK giderim verimi grafikleri. a) UVC–254-UP005 ve b) UVA–365-UP020, c) UVC–254-UP020, d) UVA–365-UP005.



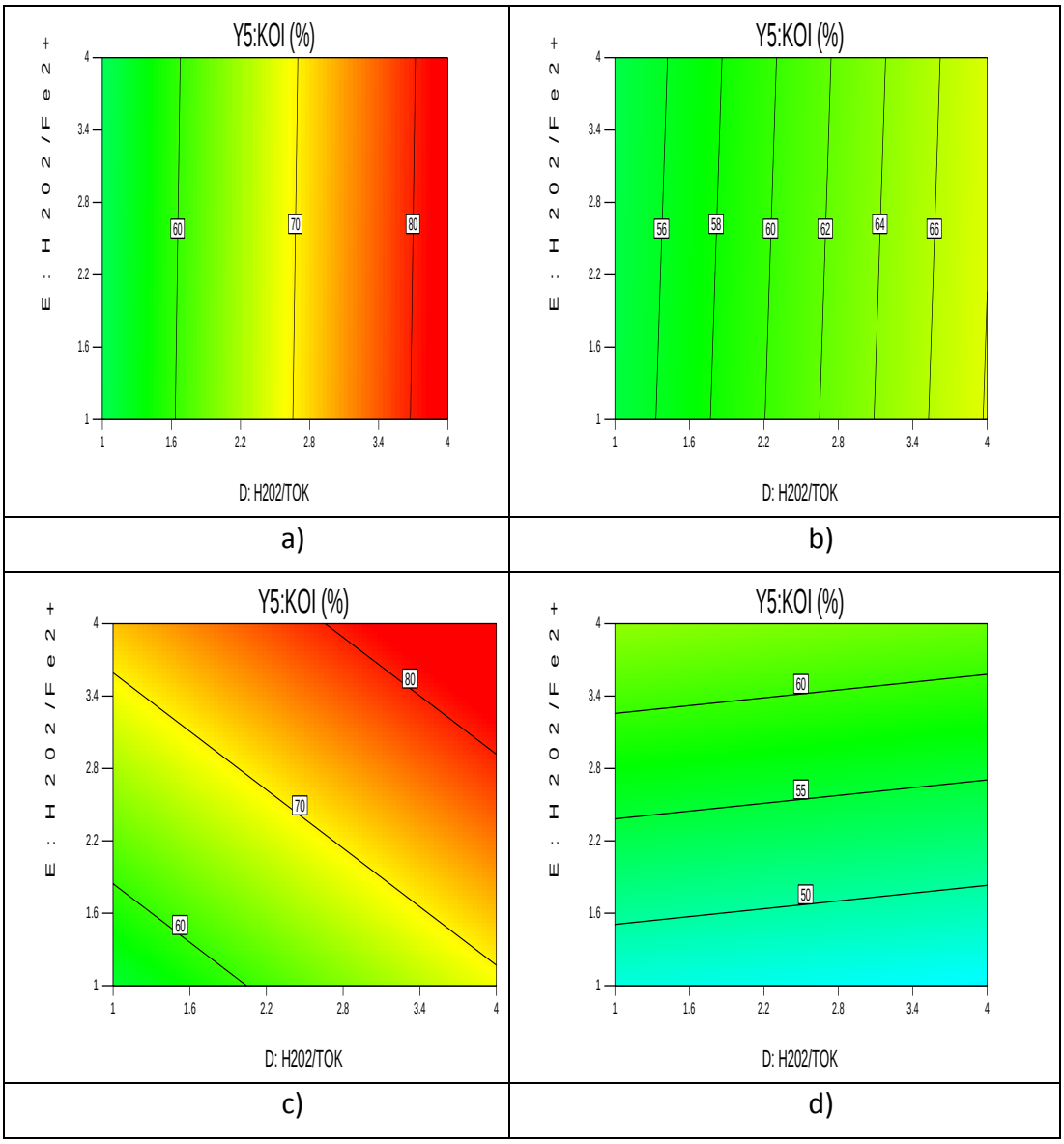
Şekil 3.48: Membranların TOK giderim verimi grafikleri. a) UVC–254-UP005 ve b) UVA–365-UP020, c) UVC–254-UP020, d) UVA–365-UP005.



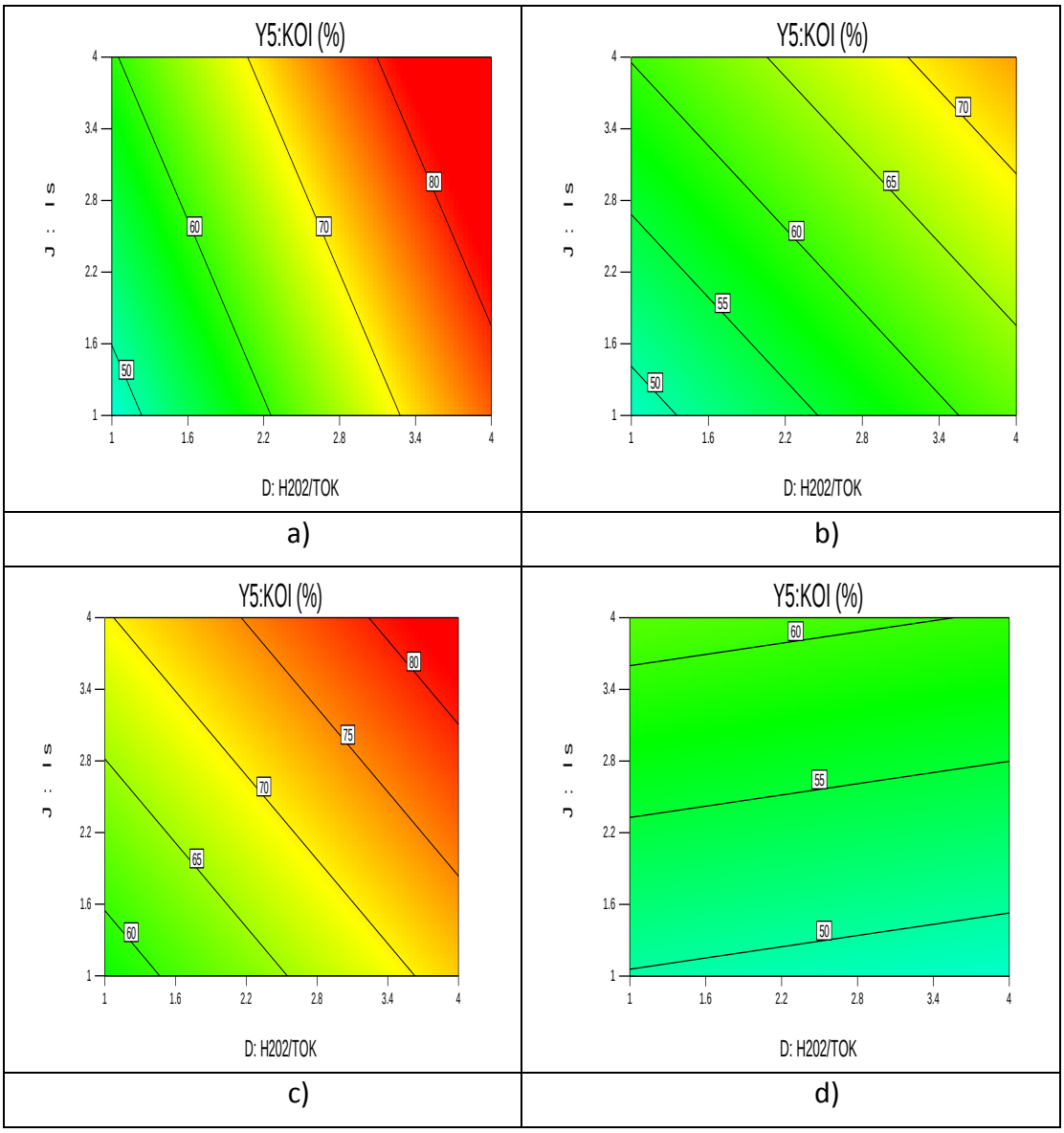
Şekil 3.49: Membranların TOK giderim verimi grafikleri. a) UVC–254-UH050 ve b) UVA–365-UV150, c) UVC–254-UV150, d) UVA–365-UH050.



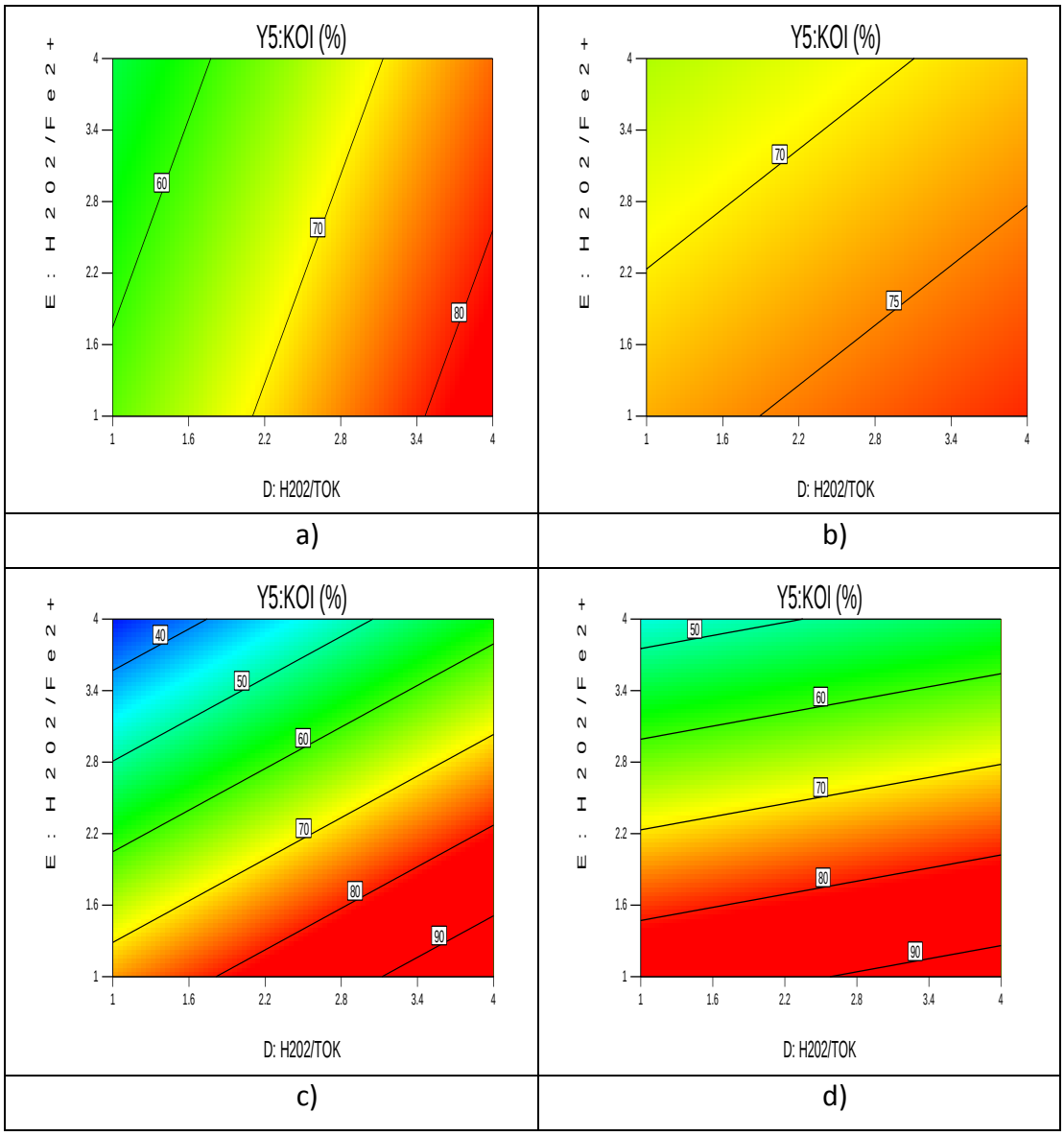
Şekil 3.50: Membranların TOK giderim verimi grafikleri. a) UVC–254-UH050 ve b) UVA–365-UV150, c) UVC–254-UV150, d) UVA–365-UH050.



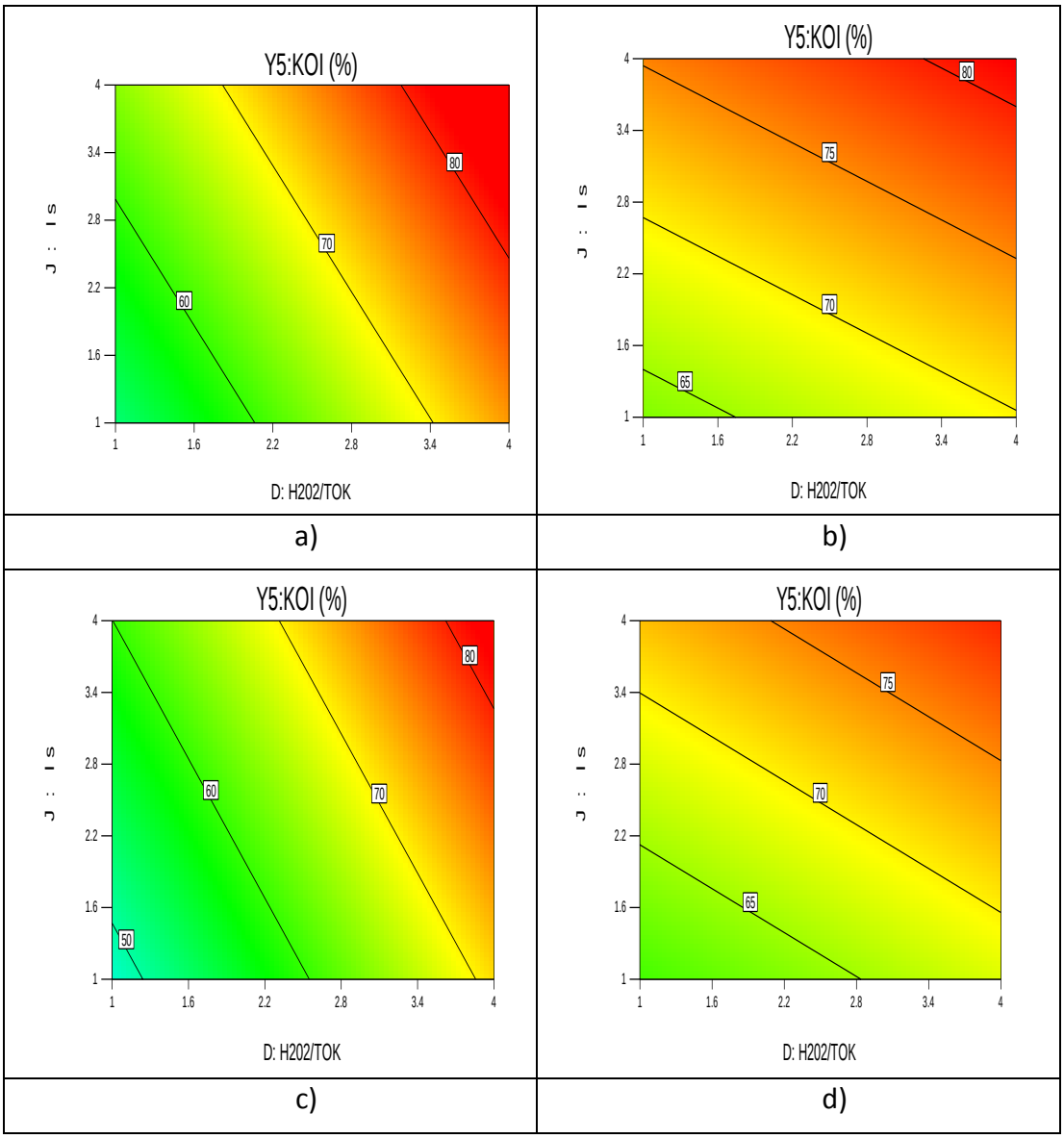
Şekil 3.51: Membranların KOİ giderim verimi grafikleri. a) UVC–254-UP005 ve b) UVA–365-UP020, c) UVC–254-UP020, d) UVA–365-UP005.



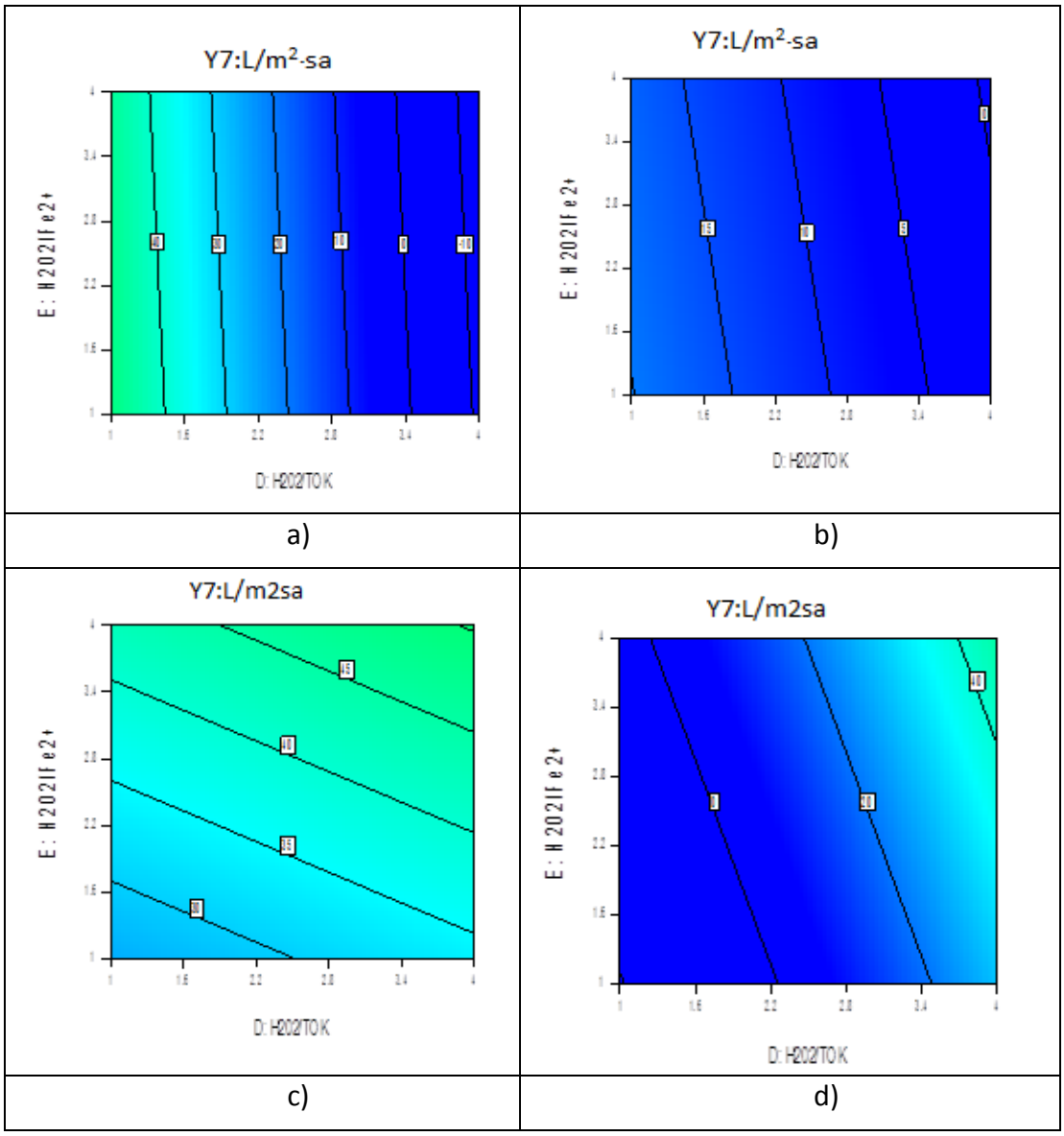
Şekil 3.52: Membranların KOİ giderim verimi grafikleri. a) UVC–254-UP005 ve b) UVA–365-UP020, c) UVC–254-UP020, d) UVA–365-UP005.



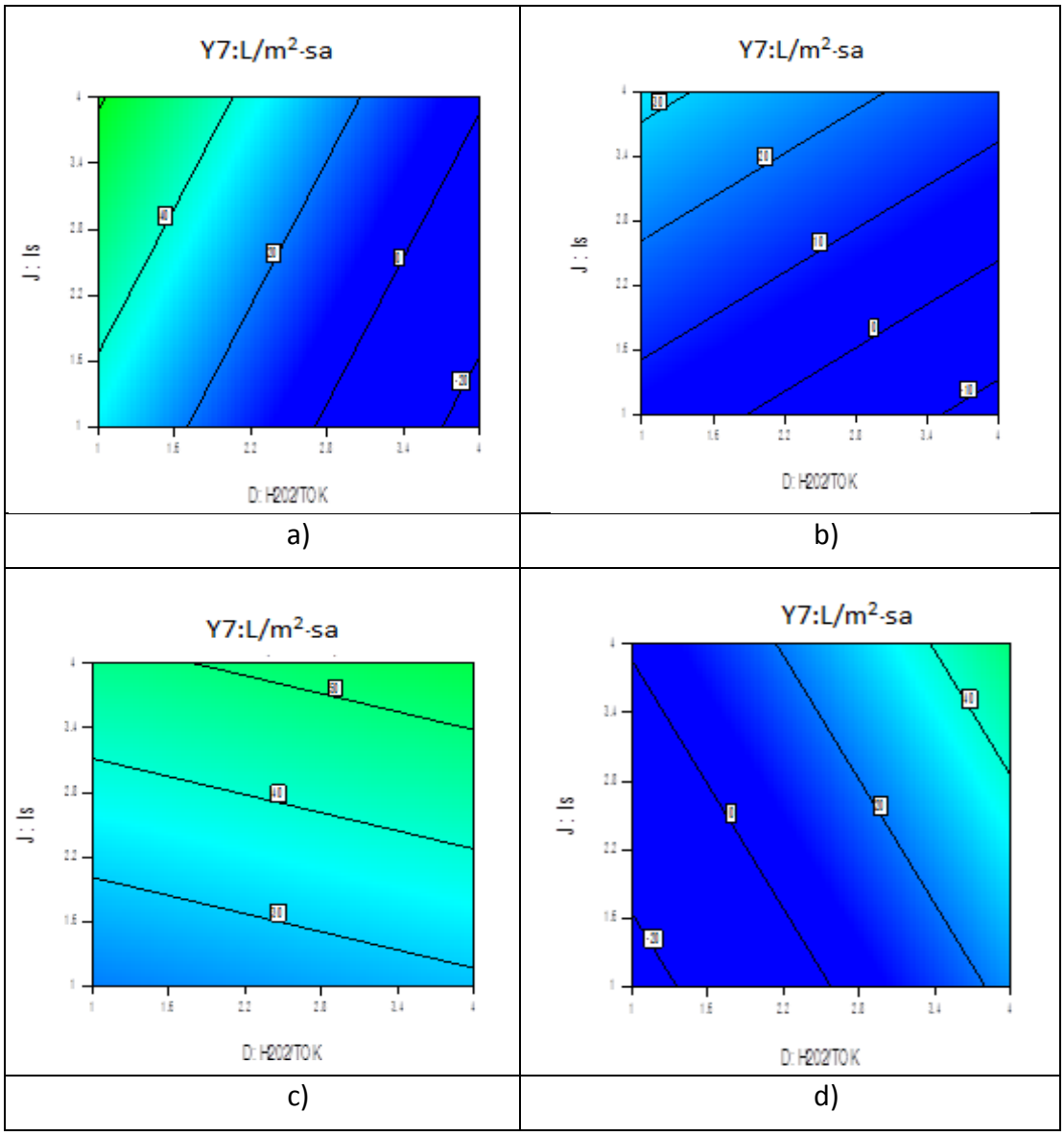
Şekil 3.53: Membranların KOİ giderim verimi grafikleri. a) UVC–254-UH050 ve b) UVA–365-UV150, c) UVC–254-UV150, d) UVA–365-UH050.



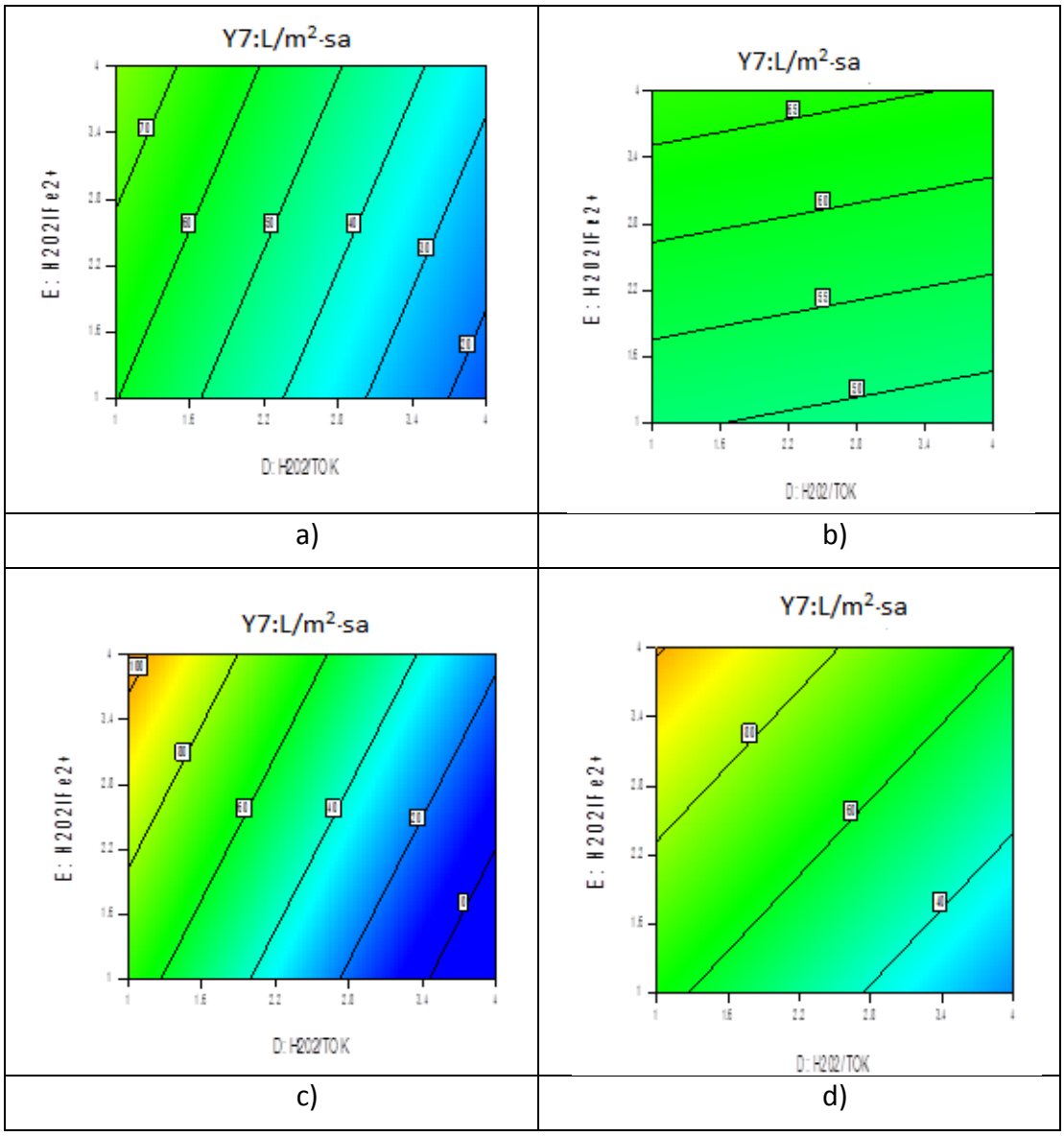
Şekil 3.54: Membranların KOİ giderim verimi grafikleri. a) UVC–254-UH050 ve b) UVA–365-UV150, c) UVC–254-UV150, d) UVA–365-UH050.



Şekil 3.55: Membranların süzüntü akısı grafikleri. a) UVC–254-UP005 ve b) UVA–365-UP020, c) UVC–254-UP020, d) UVA–365-UP005.



Şekil 3.56: Membranların süzüntü akısı grafikleri. a) UVC–254-UP005 ve b) UVA–365-UP020, c) UVC–254-UP020, d) UVA–365-UP005.



Şekil 3.57: Membranların süzüntü akısı grafikleri. a) UVC–254-UH050 ve b) UVA–365-UV150, c) UVC–254-UV150, d) UVA–365-UH050.

- İOP/Batık UF Hibrit Sistem Performansının Optimizasyonu

İOP/batık UF hibrit proseste tekstil atıksuyunun foto-Fenton prosesiyle arıtımında optimum proses işletme şartlarının belirlenmesi, ışık kaynağı türüne bağlı elde edilmiş farklı işletme performansları sebebiyle her bir ışık kaynağı türü için ayrı deneylerle yerine getirilmiştir. Optimizasyon öncesi, her iki ışık kaynağı türü için mevcut en iyi deneysel performanslar beraberce dikkate alınarak, proseslerin etkinliğinde önemli sonuç parametreleri olan TOK, KOI ve *J* parametreleri için sırasıyla %65, %85 ve 100 L/m^2.sa hedef değerlerine ulaşılmasının arzu edildiği amaç doğrultusunda yazılım aracılığıyla ikişer (2'şer) farklı optimum işletme şartları

seçilerek belirlenmiştir. Hibrit sistemde ışık şiddeti parametresi ancak lamba sayısı ilavesi/çıkarımı ile kontrol edilebildiği için, tüm optimizasyon çözümlemeleri, 1, 2, 3 ve 4 lamba sayısı için ayrı ayrı yerine getirilerek en arzu edilebilir olan ışık şiddeti seviyesi (lamba sayısı) için optimum şartların tespiti gerçekleştirilmiştir.

İOP/batık UF hibrit sistemde optimizasyon, iki farklı içerikte yürütülmüştür. Birinci adım opsiyonlu optimizasyon; Fenton'daki optimizasyonda yapıldığı gibi, hidrojen peroksit hariç diğer giriş değişkenleri deneysel belirlenmiş değer aralıklarında ve H_2O_2/TOK oranı ise sürekli işletimde maliyet unsurunun asgariye indirilmesi hedefi gözetilerek minimum seçilerek yerine getirilmiştir. İkinci adım opsiyonlu optimizasyonda ise, giriş değişkenlerinin tamamı deneysel belirlenmiş değer aralıklarında seçilerek elde edilen optimum çözümlerden en az Fenton kimyasalları sarfiyatlı işletimlerin tercih edildiği çözümler, her iki ışık kaynağı için ayrı ayrı optimum çözümler olarak belirlenmiştir.

Optimum çözümlerin tercihinde başlangıç pH'sının düşük olmasına dikkat edilmiş, zamanın Fenton'la aynı optimizasyonlu olan birinci opsiyonlularda eşdeğer işletme süresinde (60 dk) olmasına, değişkenlerin tamamının aralıkta olduğu ikinci opsiyonlu seçimlerde ise işletme süresinin azaltılarak prosesin etkinliğinin arttırılmasına ağırlık verilmiştir. Işık kaynağı türüne bağlı ayrı ayrı olmak üzere, birinci ve ikinci opsiyonlu seçilmiş toplam 4 farklı optimum işletme şartında giriş değişkenlerinin kodlanmış ve gerçek değerleri Tablo 3.26'de sunulmuştur.

Optimum şartlarda yürütülen deneyler, hibrit proses çıkış suyunda H_20_2 konsantrasyonu 0-50 mg/L oluncaya dek sürdürülmüştür. Optimum işletme şartlarındaki deneysel performanslar, I.Opsiyon deneyleri olan OD1 ve OD2 için sırasıyla Şekil 3.61 ve 3.62'de, II.Opsiyon deneyleri olan OD3 ve OD4 için sırasıyla Şekil 3.63 ve 3.64'de gösterilmiştir.

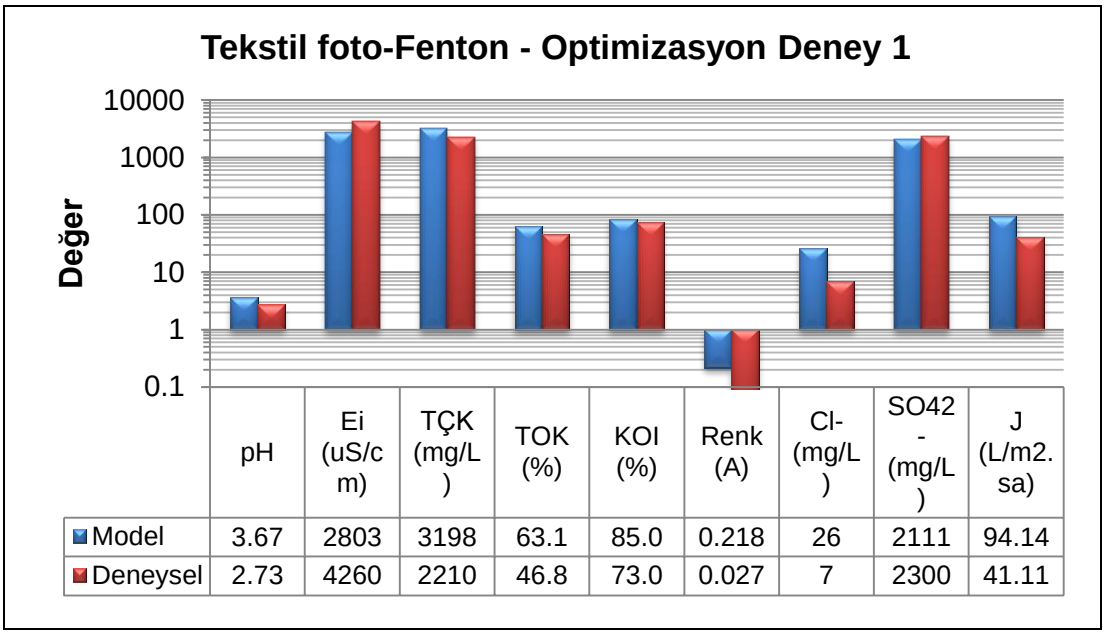
Hibrit sistemde TOK ve KOI giderim verimlerinin zamana karşı değişimleri, çıkış suyuyla kaybedilen H_20_2 miktarı ile birlikte, OD1–OD4 için Şekil 3.65–3.68'de sunulmuştur. Hibrit sistemde çıkış suyunda ölçülen demir iyonları konsantrasyonlarının zamanla değişimleri OD1–OD4 için sırasıyla Şekil 3.69–3.72'de, UF süzüntü akılarının zamana karşı değişimleri ise Şekil 3.73'de gösterilmiştir.

Tablo 3.23: Foto-Fenton prosesiyle arıtımı için belirlenmiş optimum proses işletme şartları.

Giriş Değiş-keni	Parametre	Açıklaması	Birim	Optimum işletme şartları							
				Kodlanmış değerler				Gerçek değerler			
				[1]I. Opsiyon		[1]II. Opsiyon		[1]I. Opsiyon		[1]II. Opsiyon	
				[2]OD1	[2]OD2	[2]OD3	[2]OD4	[2]OD1	[2]OD2	[2]OD3	[2]OD4
A	t	zaman	dak	4.00	4.00	2.71	2.75	60.0	60.0	41	41
B	T	sıcaklık	^{0}C	2.43	4.00	4.00	1.93	32.1	40.0	40	29.6
C	pH	pH	–	1.80	2.00	2.44	3.77	3.81	4.0	4.44	5.77
D	H_2O_2/TOK	H_2O_2/TOK oranı	g/g	1.00	1.22	1.49	1.71	6.0	7.75	9.88	11.69
E	H_2O_2/Fe^{2+}	H_2O_2/Fe^{2+} oranı	g/g	2.31	2.94	2.07	3.98	8.26	10.75	7.27	14.91
F	v_H	İOP reaktörü havalandırma hızı	L/dk	1.12	1.00	2.89	1.21	1.12	1.00	2.89	1.21
G	$v_{SÇ}$	UF membranda su çekim hızı	rpm	3.53	2.07	1.65	1.00	93.0	71.1	64.7	55.0
H	M_T	Membran türü	–	3	4	3	4	UH050	UV150	UH050	UV150
J	$I_Ş$	Işık şiddeti	W/cm^2	3				3 lamba			
K	I_T	Işık türü	–	1	2	1	2	UVC-254	UVA-365	UVC-254	UVA-365

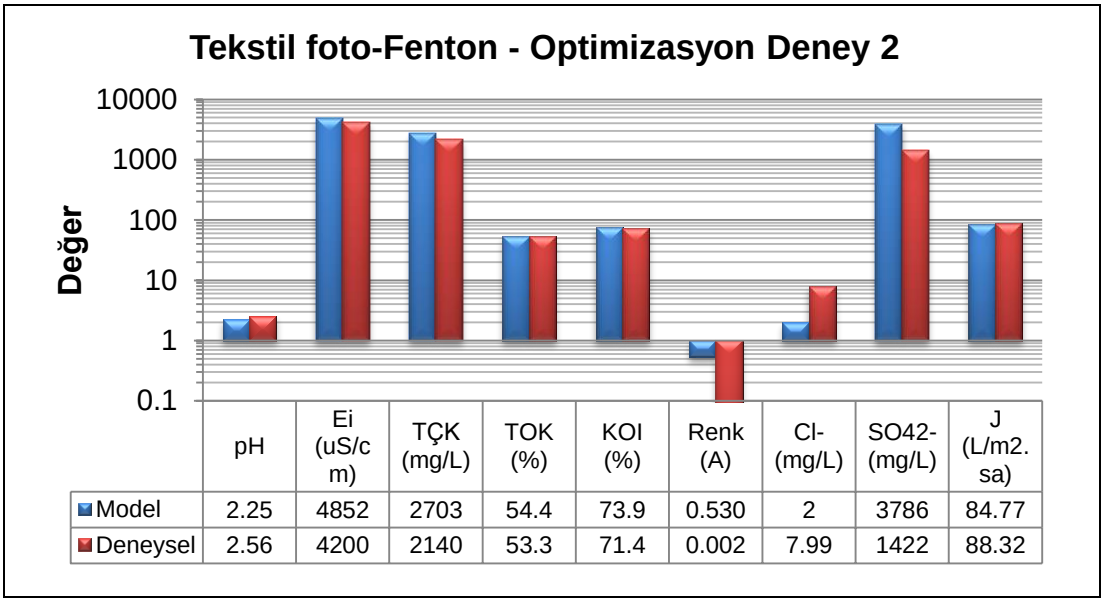
[1] I. ve II. Opsiyonlar, sırasıyla H_2O_2 miktarı minimizasyonlu-diğer tüm değişkenler performans aralığındayken ve H_2O_2 miktarı dâhil tüm değişkenler performans aralığındayken ki optimumlardan belirlenmiş deneysel şartları ifade etmektedir.

[2] OD kısaltması "*Optimizasyon Deneyi*" terimini ifade etmekte olup; OD1 ve OD3 deneyleri UVC-254, OD2 ve OD4 deneyleri ise UVA-365 ışık kaynağı türleri için gerçekleştirilmiş deneylerdir. OD1 ve OD3 deneylerine ait optimum şartların arzu edilebilirlikleri sırasıyla 0.9872 ve 0.9248, OD2 ve OD4 deneylerine ait optimum şartların arzu edilebilirlikleri ise sırasıyla 0.8289 ve 0.8545'tir.



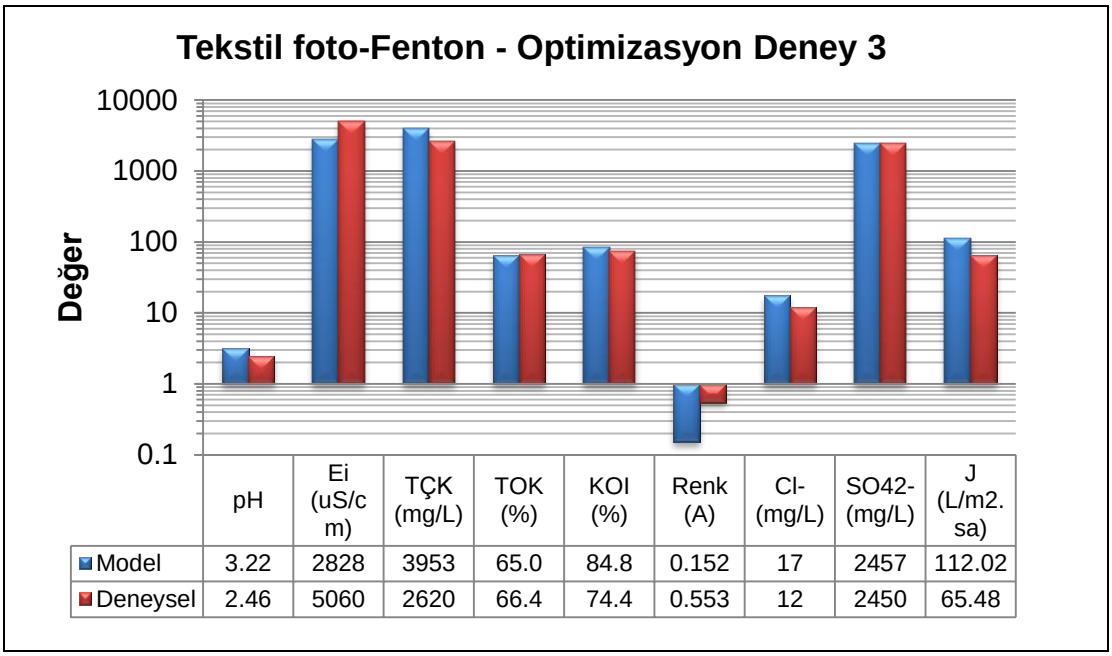
	pH	Ei (uS/cm)	TÇK (mg/L)	TOK (%)	KOI (%)	Renk (A)	Cl- (mg/L)	SO42- (mg/L)	J (L/m2.sa)
Model	3.67	2803	3198	63.1	85.0	0.218	26	2111	94.14
Deneysel	2.73	4260	2210	46.8	73.0	0.027	7	2300	41.11

Şekil 3.58: UVC-254 kullanılan optimum işletme deneyi 1 için model ve deneysel performans sonuçları.

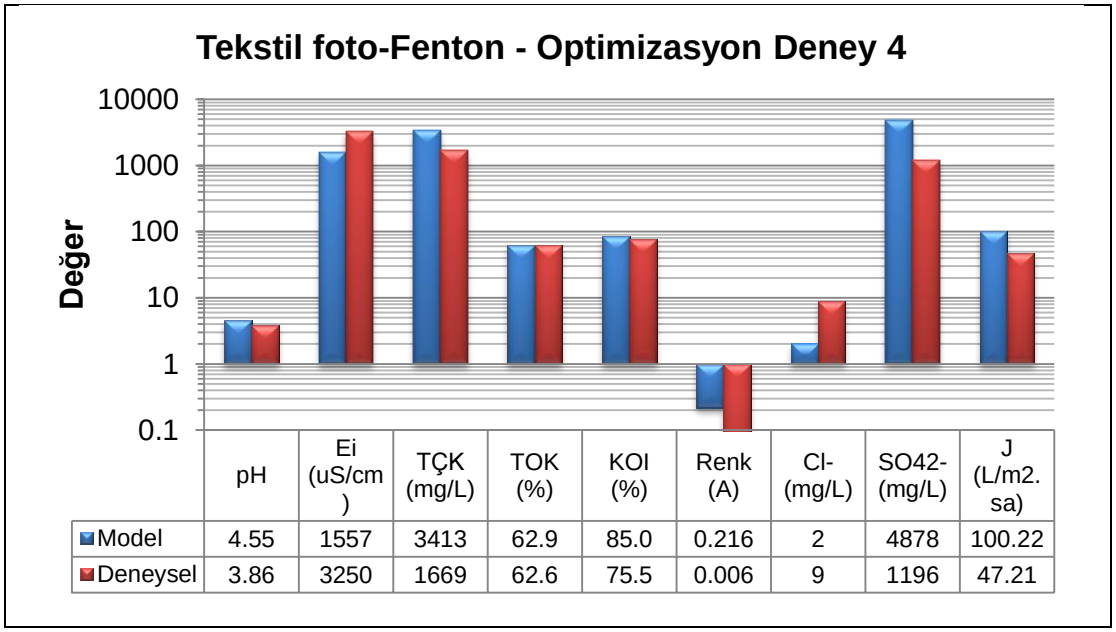


	pH	Ei (uS/cm)	TÇK (mg/L)	TOK (%)	KOI (%)	Renk (A)	Cl- (mg/L)	SO42- (mg/L)	J (L/m2.sa)
Model	2.25	4852	2703	54.4	73.9	0.530	2	3786	84.77
Deneysel	2.56	4200	2140	53.3	71.4	0.002	7.99	1422	88.32

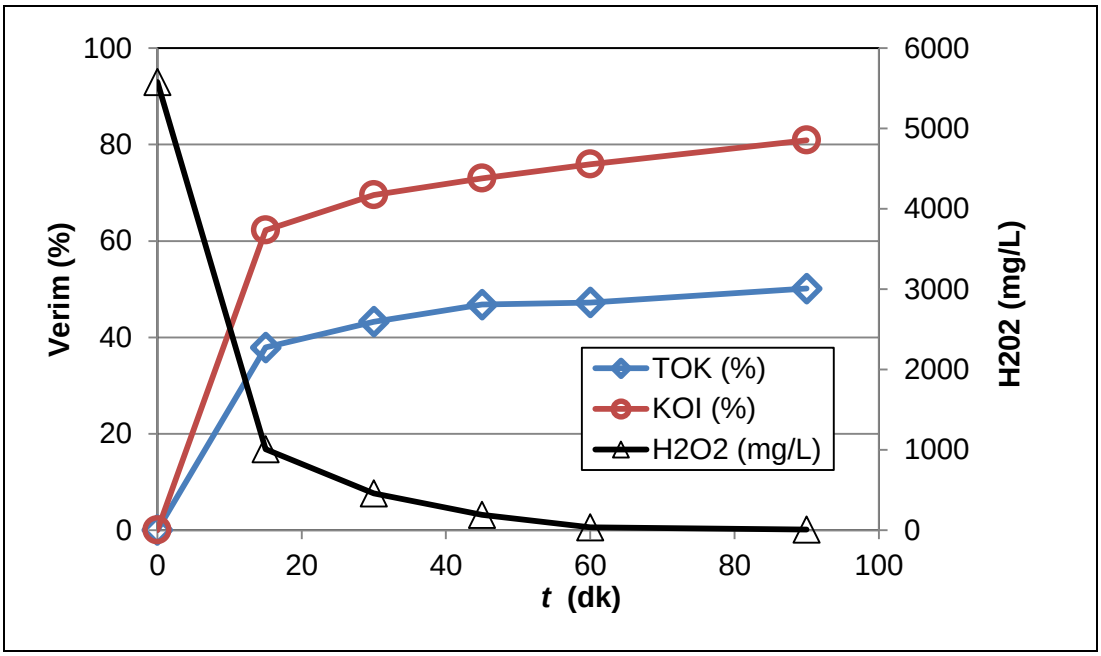
Şekil 3.59: UVA-365 kullanılan optimum işletme deneyi 2 için model ve deneysel performans sonuçları.



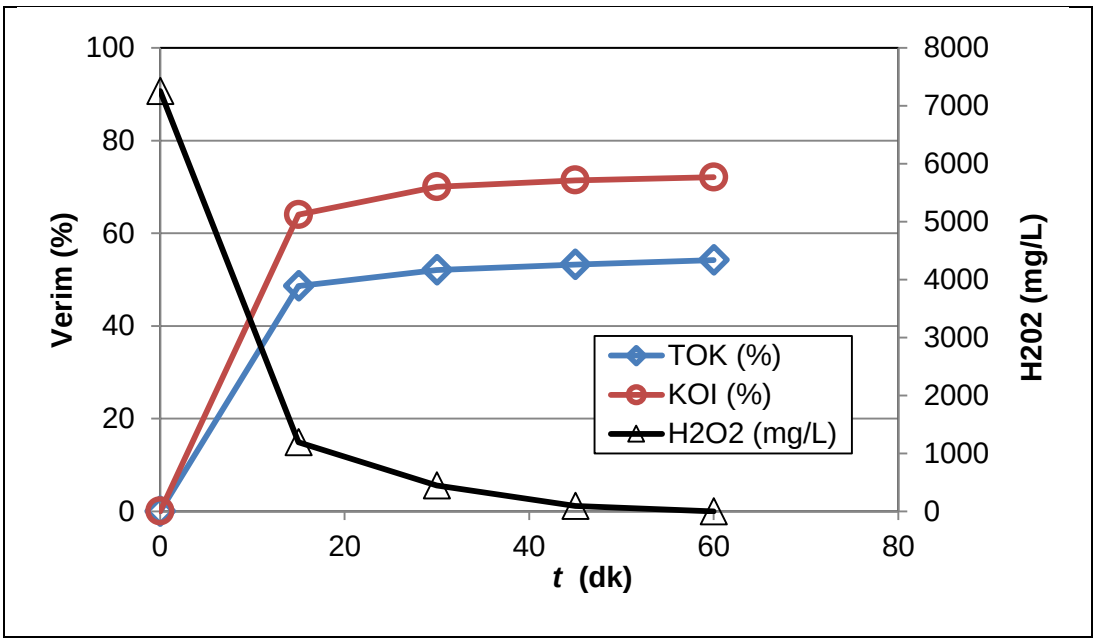
Şekil 3.60: UVC-254 kullanılan optimum işletme deneyi 3 için model ve deneysel performans sonuçları.



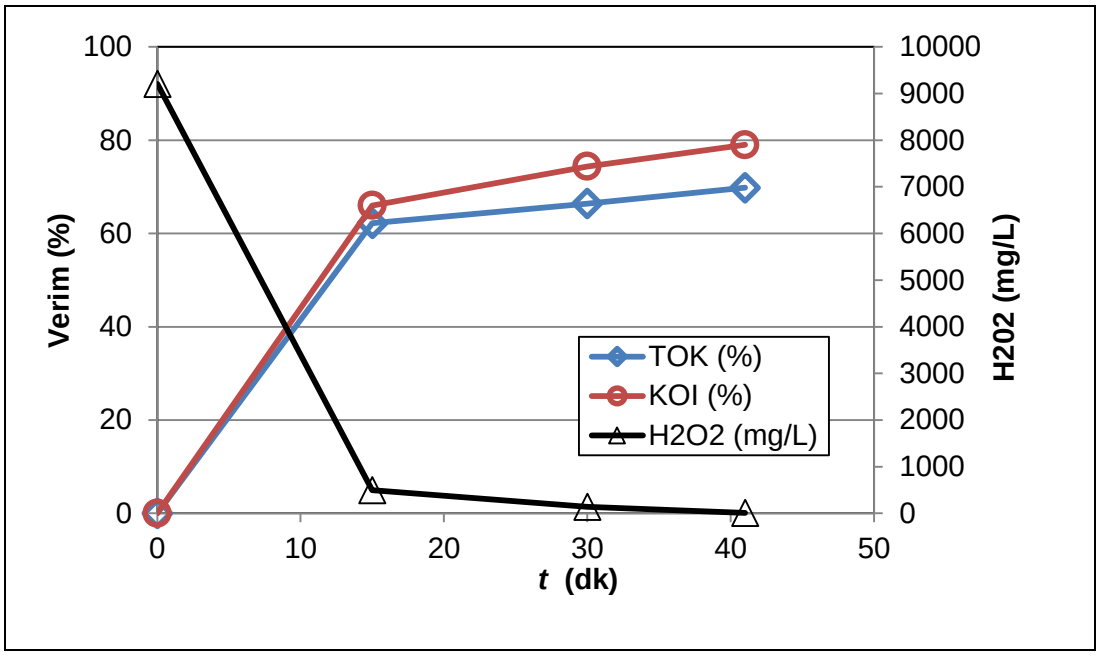
Şekil 3.61: UVA-365 kullanılan optimum işletme deneyi 4 için model ve deneysel performans sonuçları.



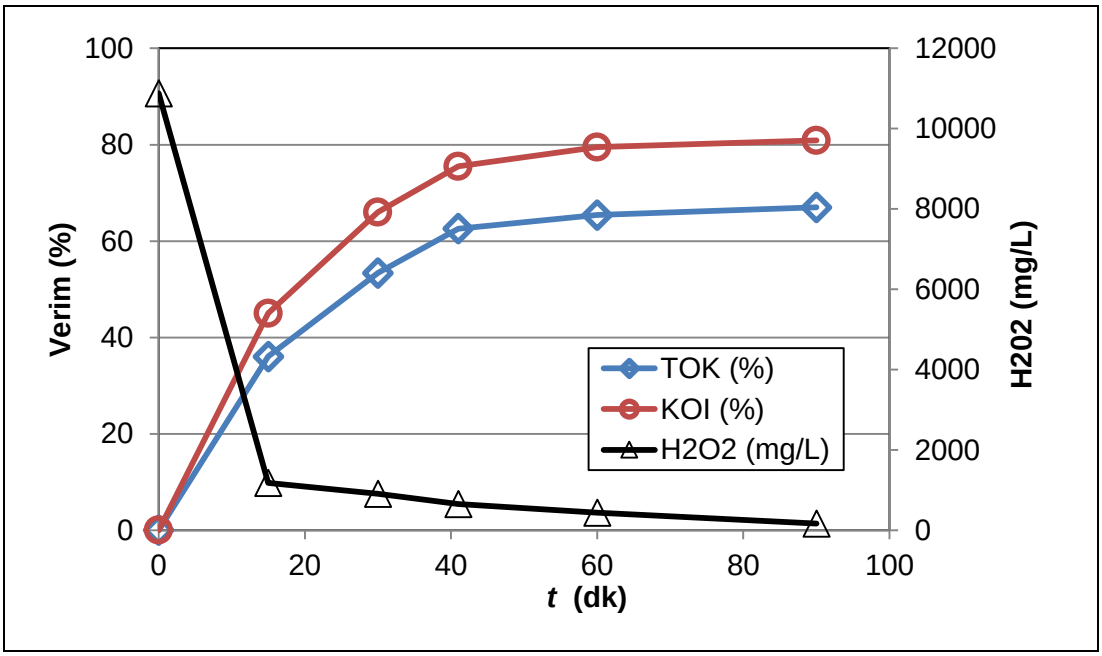
Şekil 3.62: UVC-254 kullanılan optimum işletme deneyi 1 için zamana karşı değişen TOK ve KOI giderim verimleri ve çıkış suyunda H_20_2 konsantrasyonu.



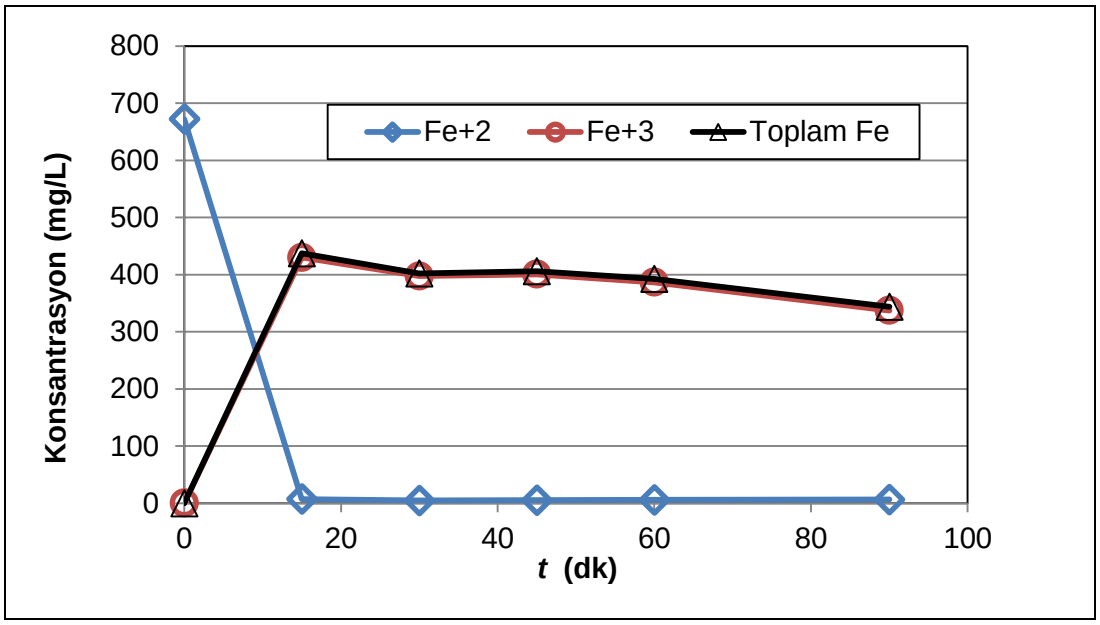
Şekil 3.63: UVA-365 kullanılan optimum işletme deneyi 2 için zamana karşı değişen TOK ve KOI giderim verimleri ve çıkış suyunda H_20_2 konsantrasyonu.



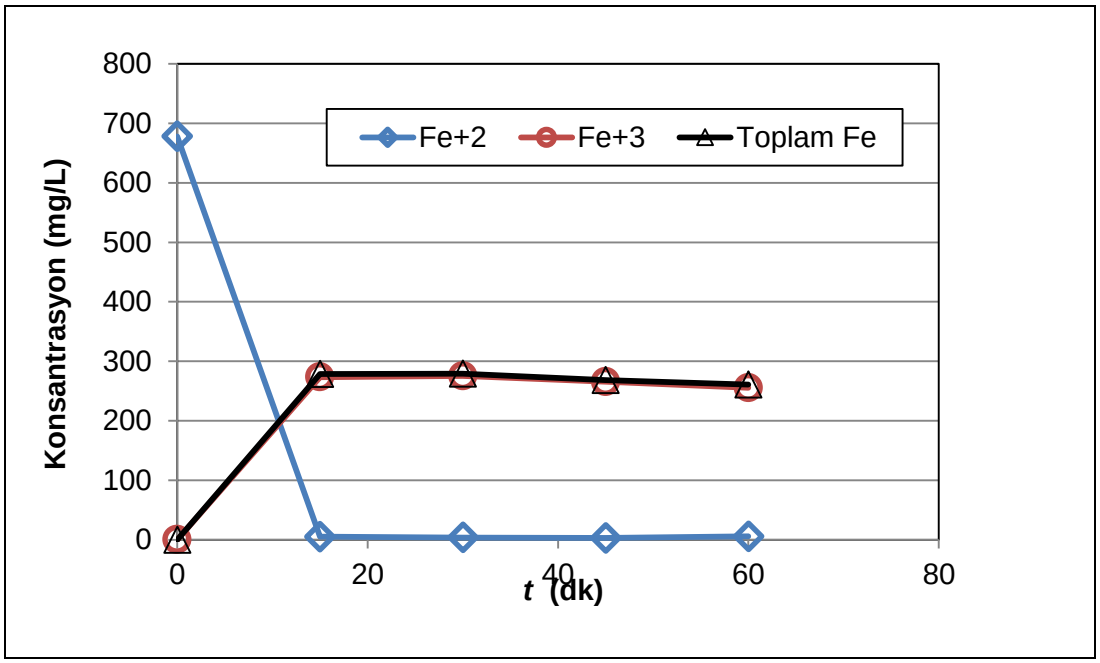
Şekil 3.64: UVC-254 kullanılan optimum işletme deneyi 3 için zamana karşı değişen TOK ve KOI giderim verimleri ve çıkış suyunda H_20_2 konsantrasyonu.



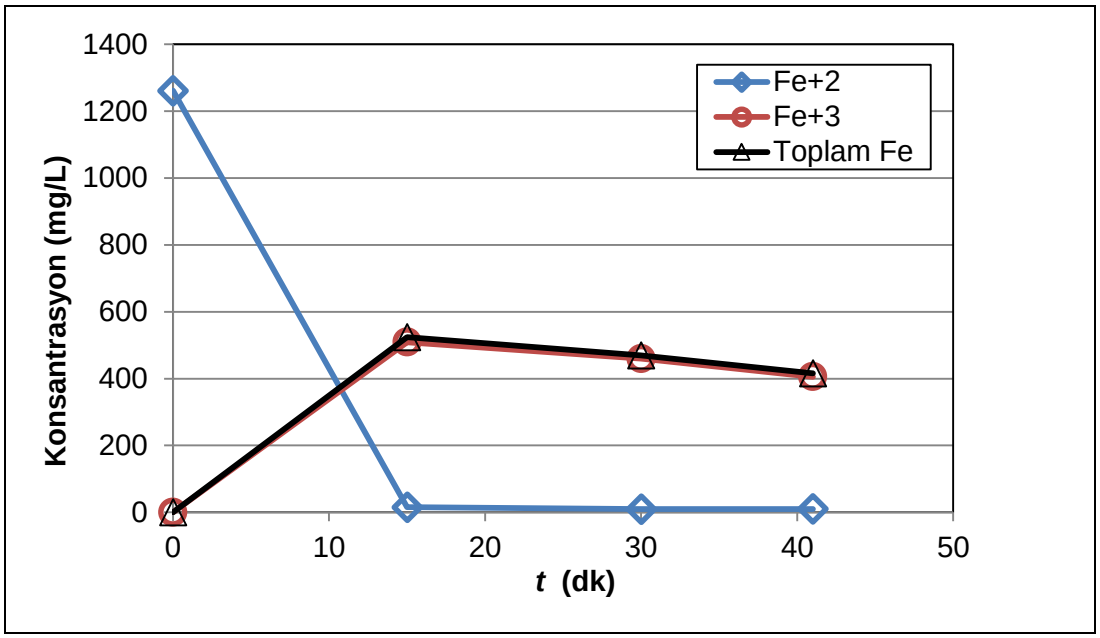
Şekil 3.65: UVA-365 kullanılan optimum işletme deneyi 4 için zamana karşı değişen TOK ve KOI giderim verimleri ve çıkış suyunda H_20_2 konsantrasyonu.



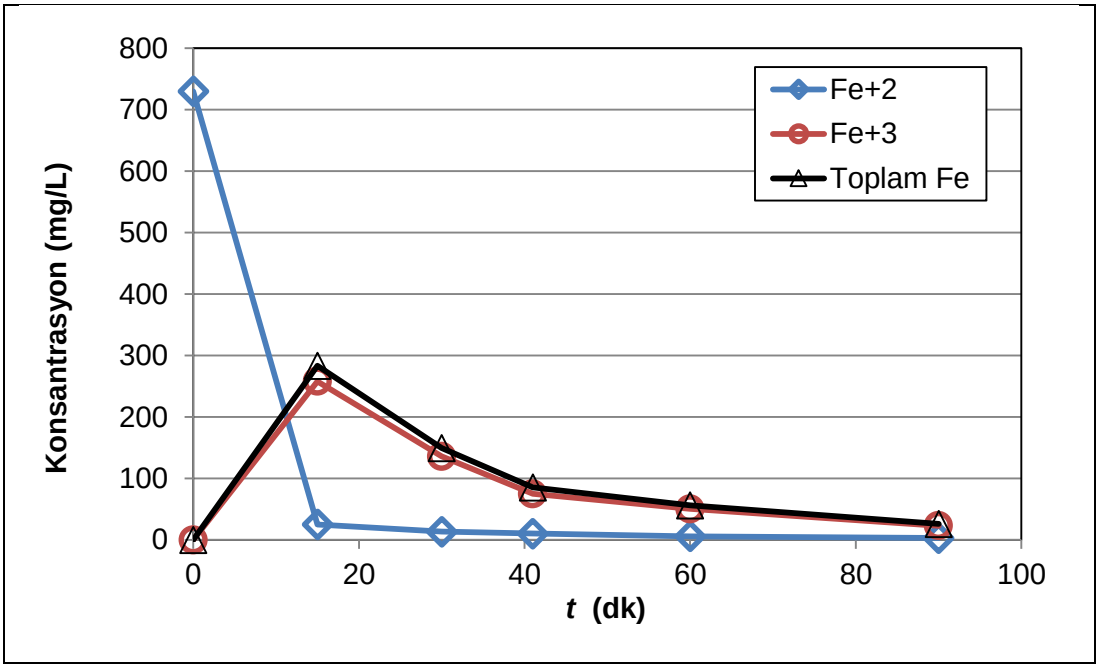
Şekil 3.66: Optimum işletme deneyi 1 için zamana karşı değişen çıkış suyunda demir konsantrasyonları.



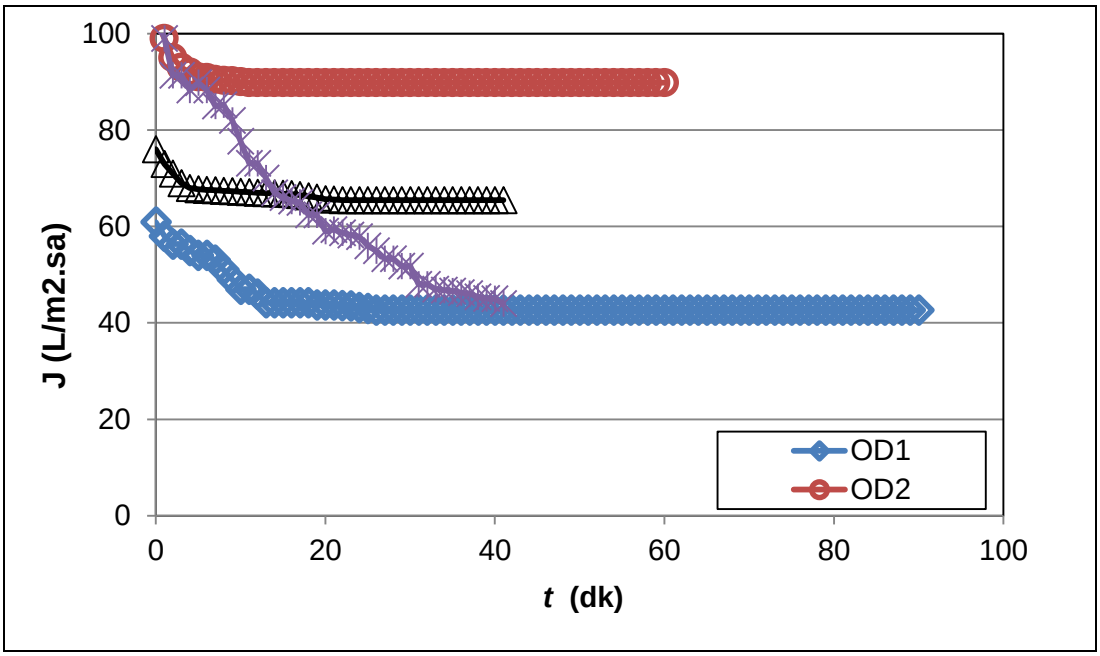
Şekil 3.67: Optimum işletme deneyi 2 için zamana karşı değişen çıkış suyunda demir konsantrasyonları.



Şekil 3.68: Optimum işletme deneyi 3 için zamana karşı değişen çıkış suyunda demir konsantrasyonları.



Şekil 3.69: Optimum işletme deneyi 4 için zamana karşı değişen çıkış suyunda demir konsantrasyonları.



Şekil 3.70: Her bir optimum işletme deneyi için zamana karşı değişen UF süzüntü akıları.

60 dakikalık işletimlerle gerçekleştirilen OD1 ve OD2 optimizasyon deneyleri sonuçları göstermektedir ki, UVC-254/UH050 ve UVA-365/UV150 ışık kaynağı/membran türü ikilileri için model ve deney sonuçları arasındaki uyumluluğun en yüksek olduğu deney UVA-365 ışık kaynağı kullanılan OD2 deneyidir. Deney süresinin azaltılarak UVA-365 için optimum şart elde edilen bir diğer deney olan OD4'te, her ne kadar % 5-10 civarında daha iyi organik giderimi elde edilebilmiş ise de; model ve deney akıları arasındaki % 100'den büyük fark ve OD4'teki yaklaşık % 50 daha fazla H_20_2 tüketimi, OD4'ün sürekli işletimli deneylerde UVA-365 için optimum şart olarak tercihini engellemiştir. OD2'de elde edilen 88.32 L/m^2.sa'lık akının da yüksek bir değerde olduğu ve organik giderim veriminin TOK ve KOİ için sırasıyla % 53.3 ve 71.4 olduğu sonucundan hareketle, hibrit İOP/UF sistemde sürekli işletimli UVA-365 destekli foto-Fenton oksidasyonda optimum işletme şartı OD2 şartı olarak belirlenmiştir. Zira OD4'te elde edilen çıkış suyunun daha düşük demir içeriğine karşın, bu durumun membranda demir tutunmasına bağlı akı azalmasını arttırması dolayısıyla OD2'yi OD4'e göre süzüntü akısı performansı bakımından daha etkin kıldığı değerlendirilmektedir.

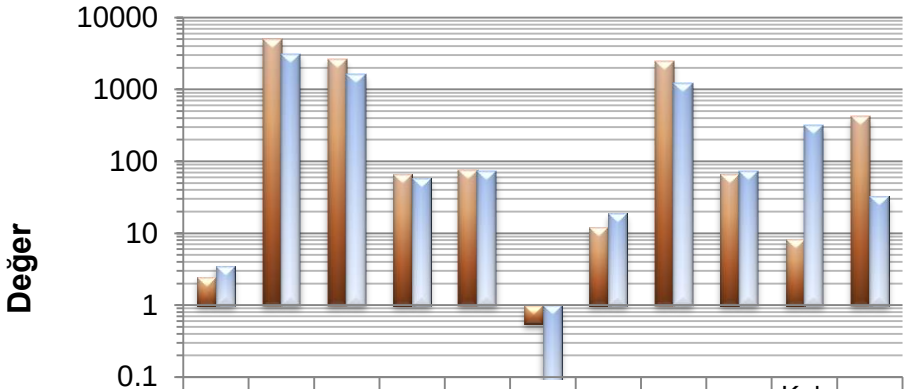
UVC-254 işletimli optimum deneylere bakıldığında, OD1 ile elde edilen organik giderim verimi ve süzüntü akısının, UVA-365 işletimli optimumlardan düşük kaldığı görülmektedir. OD3'te ise, OD1'e göre yaklaşık % 63 arttırılan H_20_2 miktarı ile, yaklaşık 1/3 oranında azaltılan işletme süresi ile UVA-365'ten daha yüksek organik giderim etkinliği sağlanabilmiş; ancak bu durumda UF süzüntü akısı 65.5 L/m^2.sa olarak ölçülmüştür. Her ne kadar tekstil atıksuyu için Fenton ve UVA-365 destekli foto-Fenton deney sonuçlarında, optimum işletme şartlarına kıyasla daha iyi performans gözlenmemiş ise de; UVC-254 için tam tersi bir durumun, 21 no'lu Taguchi deneysel tasarım deneyinde var olduğu görülmektedir. 4 lamba UVC-254 ile işletilen 21 no'lu deneyde, TOK, KOİ ve *J* etkinlikleri sırasıyla % 62.8, % 75.9 ve 119.15 L/m^2.sa olup bu performanslar, en iyi optimumu veren OD3 ile elde edilmiş 3 lamba UVC-254'ten (sırasıyla % 66.4, % 74.4 ve 65.48 L/m^2.sa), akı için yaklaşık % 45'lere varan seviyede daha yüksek değerdedir. Bu noktada, optimizasyon adımında, doğrulama deneylerinde kullanılan atıksuyun ortalama kalitesindeki değişimlere dayalı muhtemel performans etkilerini de gidermek amacıyla 21 no'lu Taguchi deneyi, UVC-254 destekli OD3 optimum deneyiyle aynı atıksu şartında tekrar edilmiştir. Hibrit sistemde aynı atıksuyla işletilen OD3 ve 21 no'lu tekrar deneyine ait performans sonuçları Şekil 2.73'de gösterilmiştir.

Şekil 2.69'den, kısmen değişen atıksu kalitesiyle 21 no'lu deneydeki işletim performansının Taguchi deneylerindeki performansından daha düşük kaldığı görülmektedir. OD3 ve 21 no'lu deney tekrarı sonuçlarına beraberce bakıldığında ise, OD3 performansının, organik gideriminde daha iyi, süzüntü akısında ise yaklaşık aynı performanslarla en iyi işletimi sağladığı anlaşılmaktadır. Bu sebeple, tekstil yıkama banyosu atıksularının UVC-254 destekli İOP/batık UF hibrit reaktörde arıtımı için optimum deney şartlarının OD3 dahilindeki şartlar olduğu kanaatine varılmıştır.

Deneysel tasarım çerçevesinde yürütülen hibrit İOP/batık UF deneyleri itibariyle, Fenton ve foto-Fenton destekli hibrit reaktör uygulamalarının, tekstil atıksuyunu optimum arıtma şartlarındaki deneysel performanslar Şekil 2.70'de gösterilmiştir.

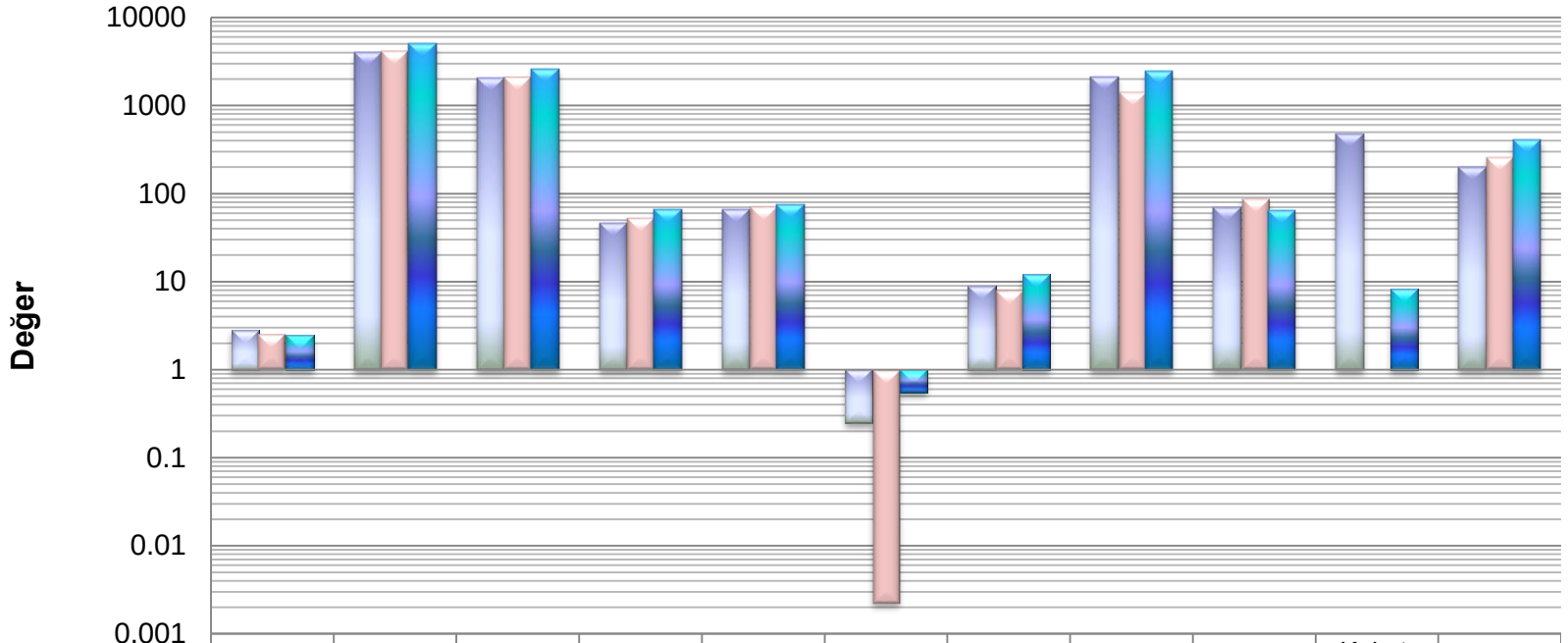
Optimum sistem performanslarına göre, hibrit reaktörde organik madde gideriminin Fenton destekli sistem işletiminden, UVC-Fenton destekli işletime arttığı açıkça görülmektedir. Çıkış suyunda önemli bir hidrojen peroksit kaybı olmaksızın 60

ve 40 dk'lık süre zarfında sırasıyla UVA-365 ve UVC-254 destekli sistem işletimlerinin yapılabildiği; buna karşın çıkış suyunda Fenton işletime kıyasla bir miktar daha fazla demir iyonlarıyla karşılaşılmaktadır. Fenton proseste ise, 60 dk'lık işletim sonrasında çıkış suyunda bir miktar hidrojen peroksit kaybının olduğu görülmektedir (120 ve 180 dk sonunda kalıntı H_20_2 konsantrasyonları sırasıyla 29 ve 0 mg/L'dir). Bu durum, sürekli işletimli peroksit kayıpsız Fenton deneylerinde sistemin, daha uzun süreli oksidasyon sürelerinde işletilmesinin gerekli olacağını ortaya koymaktadır. Fenton proseslerde optimizasyonla azaltılmış kimyasal madde sarfiyatlarına bağlı olarak ulaşılmış çıkış suyu TÇK değerlerinin, sürekli işletimli deneylerde sonraki adımlardaki membran proses konsantrelerinin hibrit reaktöre devriyle reaktöre gelecek toplam inorganik madde yükünü, atıksuyun başlangıç TÇK değerine kıyasla çok yüksek seviyelerde arttırmayacağı anlaşılmakta; bunun da, reaktöre konsantre devrinin inorganik yükünün etkisi altında ve konsantre atık minimizasyonu noktasında, daha uzun sürelerde sürekli işletimlerle hibrit reaktör işletimine katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir. Süzüntü akıları bakımından ise, batık tip hibrit reaktör uygulaması esasında, 65-88 L/m^2.sa arasında gerçekleşen proses performans değerlerinin gayet iyi seviyelerde olduğu değerlendirilmektedir. Ancak sürekli işletimli hibrit reaktörde, hibrit reaktöre konsantre akım geri devriyle artacak atıksu organik ve inorganik yükünün etkisiyle, organik madde giderim verimi ve UF süzüntü akısında bir miktar düşüşlerin olabileceği değerlendirilmektedir.



	pH	Ei (uS/cm)	TÇK (mg/L)	TOK (%)	KOI (%)	Renk (A)	Cl- (mg/L)	SO4 2- (mg/L)	J (L/m2.sa)	Kalıntı H202 (mg/L)	Top. Fe
OD3	2.46	5060	2620	66.4	74.4	0.553	12	2450	65.48	8	416
21 NOLU DENEY	3.52	3130	1614	59.2	71.5	0.035	19	1206	71.60	313	32

Şekil 3.71: Aynı atıksuyla işletilen OD3 ve 21 no'lu tekrar deneyine ait performans sonuçları.



	pH	Ei (uS/cm)	TÇK (mg/L)	TOK (%)	KOI (%)	Renk (A)	Cl- (mg/L)	SO42- (mg/L)	J (L/m2.sa)	Kalıntı H202 (mg/L)	Top.Fe
Fenton	2.85	4030	2072	46.6	65.6	0.249	9	2140	68.81	472	202
UVA-Fenton	2.56	4200	2140	53.3	71.42	0.002	8	1422	88.32	0	261
UVC-Fenton	2.46	5060	2620	66.4	74.37	0.553	12	2450	65.48	8	416

Şekil 3.72: Fenton ve foto-Fenton destekli İOP/batık UF hibrit reaktörde tekstil atıksuyunu optimum arıtım performanslar.

4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Çalışmada, tekstil atıksularında etkin su ve atıksu yönetiminde tercih edilen teknolojilerin başında, membran prosesler (MP) ile birlikte ileri oksidasyon prosesleri (İOP) (özellikle Fenton ve foto-Fenton) gelmektedir. Bu çalışmada membran prosesleri ile birlikte ileri oksidasyon prosesi hibrit olarak çalışılmıştır, UVA ve UVC lambaları kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda, tekstil atıksuyundan organik madde giderimi amaçlanmıştır.

Yenilikçi İOP/batık UF hibrit sistemi için gerçekleştirilen çalışmalarda, İOP'ta 2 farklı teknoloji (Fenton ve foto-Fenton (UVC-254 ve UVA-365)) uygulanarak, optimum arıtma performansları tekstil atıksuyu için tespit edilmiştir. Ayrıca çalışmada TOK ve KOİ gideriminde sıcaklık, pH ve Fe^{2+} konsantrasyonunun performansı üzerine olan etkisinin önemsiz denecek kadar az olduğu görülmüştür.

Batık membran proseste H_20_2'nin azalması veya Fe^{2+} miktarının artmasıyla (H_20_2/Fe^{2+} azaldıkça), TOK ve KOİ değişimleri benzer biçimde arttığı, proseste organik giderim etkinliği, temel olarak H_20_2'nin etkisi altında gerçekleşmektedir. Bunun yanı sıra, H_20_2 ve Fe^{2+} miktarları arttıkça, yaklaşık aynı mertebelerde olmak üzere, UF membran süzüntü akısının dört membran için de arttığı görülmektedir. Diğer giriş değişkenlerinin ortalama değerleri için verilen değişimlere göre, UH050 membranları daha yüksek seviyelerde en iyi organik madde giderim verimine ve süzüntü akısı eldesine imkân sağladığı görülmüştür.

Batık UF proseste organik madde giderim verimleri, UF prosesi çıkış suyu kalitesi değerlerinin reaktör içerisindeki deney sonu ölçülen değerlere göre ölçülendirilmesi üzerinden belirlenmiştir. Batık membran proseste, UVC-254 ve UVA-365 ışık kaynaklarında H_20_2 ve Fe^{2+} miktarları arttıkça organik madde giderim verimini veren TOK ve KOİ parametreleri benzer değişiklikler göstermekle birlikte, bu parametrelerin farklı eğilim ve seviyelerde olduğu görülmüştür.

Membran süzüntü akısı bakımından ise, batık UF prosesin, hibrit reaktöre uygulanan arıtma kimyasalları miktarlarına ve uygulanan ışık enerjisinin tür ve şiddetine bağlı olarak birebir genelleştirilemeyen performanslar sergilediği ya da çok dinamik akı performans değişimleriyle arıtılmış su eldesine imkân olduğu

anlaşılmaktadır. Buna karşın, UH050 ve UV150 membranlarının sırasıyla UVC-254 ve UVA-365 destekli hibrit reaktör uygulamasında en yüksek süzüntü akısını sağladıkları görülmüştür. UH050/UVC-254 ve UV150/UVA-365 membran/ışık kaynağı türleriyle UF prosesinin İOP hibrit reaktörde batık olarak uygulanmasının süzüntü akısını, artan H202 ve Fe^{2+} miktarları ile arttığı, artan ışık şiddetiyle de azaldığı belirlenmiştir.

Hibrit sistemde optimum işletme şartlarında, tekstil atıksuyunun Fenton prosesle 60 dk'daki % 47 TOK ve % 66 KOİ organik giderim performansı, UVA-365 destekli foto-Fenton prosesle % 53 TOK ve % 71 KOİ seviyesine çıkarılmış; UVC-254 destekli foto-Fenton prosesle 41 dk zarfında % 66 TOK ve % 74 KOİ ile en yüksek arıtım performansı elde edilmiştir. Çalışılan değer aralıklarına göre düşük Fenton kimyasalları sarfı ışığında arıtılmış çıkış suyunda, 200-400 mg/L toplam demir ve düşük hidrojen peroksit konsantrasyonu (foto-Fenton için 0-8 mg/L) sağlanarak; hibrit sistemin, konvansiyonel membran biyolojik reaktör akısına kıyasla yaklaşık ortalama 10-20 kat yüksek olan yaklaşık 66-88 L/m^2.sa'lık UF su akıları ile işletilebileceği tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

[1] Tünay O., Kabdaslı I., Eremektar G. ve Orhon D., (1996),"Color Removal from Textile Wastewaters", Water Science and Technology, 34(11), 9-16.

[2] Kaleli B., (2006), "Atıksuların İleri Arıtımında Membran Proseslerinin Kullanımının Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi.

[3] Şengül F., (1991), ''Endüstriyel Atık Suların Özellikleri ve Arıtılması'', Dokuz Eylül Üniversitesi, Dergi, 5, 38-42.

[4] Kırdar E., (1995), ''Tekstil Atık Sularında Renk Giderimi'', Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

[5] Aytaç E., (2011), ''Elektrokoagülasyon Yöntemi Kullanılarak, Tekstil Atık Sularının Arıtımı'', Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi.

[6] EPA, (1997), ''Profile of the Textile Industry'', Environmental Protection Agency.

[7] EPA, (2000), ''Emergency Planning and Community Right- To- Know Act Section'', Enviromental Protection Agency.

[8] Kanlıoğlu B.Ü., Volume 2000, ''Pamuklu Tekstil Endüstrisi Atık Sularında İyon Çifti Ekstraksiyonu Metodu ile Renk Giderimi'',Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi.

[9] Kestioglu K., (1992), ''Tekstil Çıkış Sularından Adsorblama Tekniği ile Renk Giderimi'', İstanbul Teknik Üniversitesi 3.Endüstriyel Kirlenme Sempozyumu, 74-85,İstanbul, Türkiye.

[10] Kocaer F.O. ve Alkan, U., (2002), Uludağ Üniversitesi Mühendislik–Mimarlık Fakültesi Dergisi, 7, (1) 47- 55.

[11] Shreve R.N., Brink, J.A., (1985), Kimyasal Süreç Endüstrileri 2. Baskı, (Çev. İ. Çataltaş), İnkılap Kitapevi.

[12] Perez M., Torrades F., Domenech X., Peral J., (2002a), ''Fenton and Photo-Fenton Oxidation of Textile Effluents'', Water Research, (36), 2703-2710.

[13] Çapar G., Yılmaz L., Yetis Ü., (2006), ''Reclamation of Acid Dye Bath Wastewater: Effect of pH on Nanofiltration Performance'', Journal of Membrane Science, 281, 560–569.

[14] Kritikos D.E., Xekoukoulotakis P.N., Psillakis E. and Mantzavinos D., (2007), "Photocatalytic Degradation of Reactive Black 5 in Aqueous Solutions: Effect of Operating Conditions and Coupling With Ultrasound Irradiation", Water Research, 41, 2236-2246.

[15] Xu M., Wang Q., Hao Y., (2007), "Removal of Organic Carbon from Wastewater Pulp Effluent by Lab-scale Solar Photo-Fenton Process", Journal of Hazardous Materials, 148, 103-109.

[16] Gönder Z.B., Arayici S., Barlas H., (2011), "Advanced Treatment of Pulp and Paper Mill Wastewater by Nanofiltration Process: Effects of Operating Conditions on Membrane Fouling", Separation and Purification Technology, 76, 292-302.

[17] Ellouze E., Tahri N., Ben Amar R., (2012), "Enhancement of Textile Wastewater Treatment Process Using Nanofiltration", Desalination, 286, 16-23.

[18] Perez M., Torrades F., Garcia-Hortal J.A., Domenech X., Peral J., (2002b), "Removal of Organic Contaminants in Paper Pulp Treatment Effluents under Fenton and Photo-Fenton Conditions", Applied Catalysis B: Environmental, 36, 63-74.

[19] Santos Ramos D.L.W., Poznyak T., Chairez I., Cordova R.I., (2009), "Remediation of Lignin and its Derivatives from Pulp and Paper Industry Wastewater by the Combination of Chemical Precipitation and Ozonation", Journal of Hazardous Materials, 169, 428-434.

[20] Çatalkaya Ç.E., Kargi F., (2007), "Color, TOC and AOX Removals from Pulp Mill Effluent by Advanced Oxidation Processes: A Comparative Study", Journal of Hazardous Materials, B139, 244-253.

[21] Jamil T.S., Ghaly M.Y., El-Seesy I.E., Souyada E.R., Nasr R.A., (2011),"A Comparative Study Among Different Photochemical Oxidation Processes to Enhance the biodegradability of Paper Mill Wastewater", Journal of Hazardous Materials, 185, 353-358.

[22] Vilar V.J.P., Pinho L.X., Pintor AM.M.A Boaventura R.A.R., (2011), "Treatment of Textile Wastewaters by Solar-driven Advanced Oxidation Processes", Solar Energy, 85, 1927-1934.

[23] Guimaraes J.R., Milena Guedes Maniero, Renata Nogueira de Araújo, (2012), "A Comparative Study on the Degradation of RB-19 dye in an Aqueous Medium by Advanced Oxidation Processes", Journal of Environmental Management, 110, 33-39.

[24] Lucas M.S., Peres J.A., Amor C., Prieto-Rodriguez L., Maldonado M.I., (2012), "Tertiary Treatment of Pulp Mill Wastewater by Solar Photo-Fenton", Journal of Hazardous Materials, 225-226, 173-181.

[25] Pızzıcıhını M., Russo C., Di Meo C., (2005), "Purification of Pulp and Paper Wastewater, with Membrane Technology, for Water Reuse in a Closed Loop", Desalination, 178, 351-359.

[26] Bes-Pia A., Iborra-Clar A., Garcia-Figueruelo C., Barredo-Damas S., Alcaina-Miranda M.I., Mendoza-Roca J.A., Iborra-Clar M.I., (2009), "Comparison of Three NF Membranes for the Reuse of Secondary Textile Effluents", Desalination, 241, 1-7.

[27] Cıputra S., Antony A., Philips R., Richardson D., Leslie G., (2010), "Comparison of Treatment Options for Removal of Recalcitrant Dissolved Organic Matter from Paper Mill Effluent", Chemosphere, 81, 86-91.

[28] Gönder Z.B., Arayici S., Barlas H., (2012), "Treatment of Pulp and Paper Mill Wastewater Using Ultrafiltartion Process: Optimization of the Fouling and Rejections", Industrial & Engineering Chemistry Research, 51, 6184-6195.

[29] Negaresh E., Antony A., Bassandeh M., Richardson D.E., Leslie G., (2012), "Selective Separation of Contaminants from Paper Mill Effluent Using Nanofiltration", Chemical Engineering Research and Design, 90, 576-583.

[30] Vergili I., Kaya Y., Sen U., Gönder Z.B., Aydiner C., (2012), "Techno-economic Analysis of Textile Dye Bath Wastewater Treatment by Integrated Membrane Processes under the Zero Liquid Discharge Approach", Resources Conservation and Recycling, 58, 25-35.

[31] Grzechulska-Damszel, J., Tomaszewska, M., Morawski, A.W., (2009), "Integration of Photocatalysis with Membrane Processes for Purification of Water Contaminated with Organic Dyes", Desalination, 241, 118-126.

[32] Feng F., Xu Zhenliang Li X., You W., Zhen Y., (2010), "Advanced Treatment of Dyeing Wastewater towards Reuse by the Combined Fenton Oxidation and Membrane Bioreactor Process", Journal of Environmental Sciences, 22(11) 1657-1665.

[33] Hermosilla D., Merayo N., Ordonez R., Blanco A., (2012), "Optimization of Conventional Fenton and Ultraviolet-assisted Oxidation Processes for the Treatment of Reverse Osmosis Retentive from a Paper Mill", Waste Management, 32, 1236-1243.

[34] Moravia W.G., Amaral M.C.S., Lange L.C., (2013), "Evaluation of Landfill Leach Ate Treatment by Advanced Oxidative Process by Fenton's Reagent Combined with Membrane Separation System", Waste Management, 33, 89-101.

[35] Perez-Gonzales A., Urtiaga A.M., Ibanez R., Ortiz I., (2012), "State of the Art and Review on the Treatment Technologies of Water Reverse Osmosis Concentrates", Water Research, 46, 267-283.

[36] Demirci C., (2007), "Pamuklu Tekstil Endsütrisi Atıksularındaki Rengin Foto-Fenton Prosesiyle Giderimi", Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi.

[37] Rajenshwar K., (1996), "Photochemical Strategies for Abating Environmental Pollution", Chemistry&Industry, 454-458.

[38] Sun Y., Pignatello J., (1993), "Photochemical Reactions Involved in the Total Mineralization of 2, 4-D by Fe3+/ H2O2 /UV", Environmental Science Technology, 27, 2, 304-310.

[39] Prat C., Vicente M., Esplugas S., (1988), "Treatment of Bleaching Waters in the Paper Industry by Hydrogen Peroxide and Ultraviolet Radiation", Water Research, 22, 663-668.

[40] Draper W. M., Crosby D. G., (1984), "Solar Photo oxidation of Pesticides in Dilute Hydrogen Peroxide", Food Chemistry, 32(2), 231- 237

[41] Topudurti K.V., Lewis N.M., Hirs S.H., (1993), "The Applicability of UV/Oxidation Technologies Treat Contaminated Groundwater", Environmental Progress, 12, 1, 54-60.

[42] Bahnemann D., Bockelman D., Goslich, R., (1991), "Mechanistic Studies of Water Detoxification in Illuminated TiO2 Suspensions, Solar Energy Materials", 24, 564-583.

[43] Ha H.Y, Anderson M.A., (1996), "Photocatalytic Degradation of Formic Acid via Metal-Supported Titania", Journal of Environmental Engineering, 1(1).

[44] Mehos M.S., Turchi C.S., (1993), "Field Testing Solar Photocatalytic Detoxification on TCE-Contaminated Groundwater", Environmental Progress, 12(3), 194-199.

[45] Crittenden J.C., Liu J., Hand D.W., (1997), "Photocatalytic Oxidation of Chlorinated Hydrocarbons in Water", Water Research, 31(3), 429-438.

[46] Pelizzetti E., Pramuro E., Minero C., (1990), "Sunlight Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants in Aquatic Systems", Waste Management, 10, 65-71.

[47] Turchi C.S., Ollis D.F., (1990), "Photocatalytic Degradation of Organic Water Contaminants: Mechanism Involving Hydroxyl Radical Attack", Journal of Catalysis, 122, 178-192.

[48] Tseng J.M., Huang C.P., (1991), "Removal of Chlorophenols from Water by Photocatalytic Oxidation", Water Science and Technology, 23, 377-387.

[49] Kim D.H., Anderson M.A., (1994), "Photoelectrocatalytic Degradation of Formic Acid Using a Porous TiO2 Thin-film Electrode", Environmental Science Technology, 28(3), 479-483.

[50] Haarstrick A., Kut O.M., Heinzle E., (1996), "TiO2-Assisted Degradation of Environmentally Relevant Organic Compounds in Wastewater Using a Novel Fluidized Bed Photoreactor", Environmental Science Technology, 30(3), 817-824.

[51] Manilal V.B., Haridas A., Alexander R., (1992), "Photocatalytic Treatment of Toxic Organics in Wastewater: Toxicity of Photodegradation Products", Water Research, 26(8), 1035-1038.

[52] Aydın A.F. ve Sarıkaya H.Z., (2002), "Biyolojik Proseslerle Arıtılmış Afyon Alkaloidleri Endüstrisi Atıksularının Fenton Oksidasyonu ile İleri Arıtımı", İTÜ Dergisi, 1 (1).

[53] Kitis M., Adams C.D., Daigger G.T., (1999), "The Effects of Fenton's Reagent Pretreatment on the Biodegradability of Nonionic Surfactants", Water Research. 33(11), 2561-2568.

[54] Nam S., Renganathan V., Tratnyek P.G., (2011), "Substituent Effects on Azo Dye Oxidation by the FeIII-EDTA-H2O2 System", Chemosphere, 45, 59-65.

[55] Neyens E., Baeyens J., (2003), "A rewiev of classic Fenton's Peroxidation as an Advanced Oxidation Technique", Journal of Hazardous Materials, B98, 33-50.

[56] Gülkaya İ., Sürücü G., Dilek F.B., (2000), "Halı Fabrikası Boyalı Atıksularının Fenton Oksidasyonu ile Arıtımı", 1. Ulusal Çevre Kirliliği, 1(1), İstanbul, Türkiye.

[57] Haag W., Yao C., (1992), "Rate Constants for Reaction of Hydroxyl Radicals with Several Drinking Water Contaminants", Environmental Sciences Technology, 26, 1005-1013.

[58] Kang Y.W., Hwang K., (2000), "Effect of Reaction Conditions on the Oxidation Efficiency in the Fenton Process", Water Research, 10, 2786-2790.

[59] Alaton A., Gürses F., (2004), "Penisilin Prokain G Antibiyotik Formülasyon Atıksuyunun Fenton-benzeri ve Foto-fenton-benzeri İleri Oksidasyon Prosesleri ile Arıtılabilirliginin İncelenmesi", Su Kirlenmesi ve Kontrolü Dergisi , 1, 11-16.

[60] Parra S., Sarria V., Malata S., Peringer P., Pulgarin C., (2000), "Photochemical Versus Coupled Photochemical-Biological Flow System for the Treatment of Two Biorecalcitrant Herbicides: Metobromuron and Isoproturon", Applied Catalysis, 27, 153-168.

ÖZGEÇMİŞ

1990 yılında Samsun'da doğdu. Ünye Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi'nde lise eğitimini gördü. 2008 yılında Atatürk Üniversitesi Çevre Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2012 yılında mezun oldu. 2013 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı.