

T.C.
ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



KANATLI ET KESİMHANESİ ARITMA TESİSİ ÇIKIŞ
SUYUNUN FOTOKATALİTİK BOZUNMA İLE İLERİ ARITIMI:
MALİYET ANALİZİ, OPTİMİZASYON VE MODELLEME

DOKTORA TEZİ

MUSA BÜYÜKADA

BOLU, KASIM - 2017

T.C.
ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



KANATLI ET KESİMHANESİ ARITMA TESİSİ ÇIKIŞ
SUYUNUN FOTOKATALİTİK BOZUNMA İLE İLERİ ARITIMI:
MALİYET ANALİZİ, OPTİMİZASYON VE MODELLEME

DOKTORA TEZİ

MUSA BÜYÜKADA

BOLU, KASIM - 2017

KABUL VE ONAY SAYFASI

Musa BÜYÜKADA tarafından hazırlanan “KANATLI ET KESİMHANESİ ARITMA TESİSİ ÇIKIŞ SUYUNUN FOTOKATALİTİK BOZUNMA İLE İERİ ARITIMI: MALİYET ANALİZİ, OPTİMİZASYON VE MODELLEME” adlı tez çalışması Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda 23/11/2017 tarihinde ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Danışman
Prof. Dr. Fatih EVRENDİLEK
Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Üye
Doç. Dr. Nusret KARAKAYA
Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Üye
Doç. Dr. Yalçın GÜNEŞ
Namık Kemal Üniversitesi

Üye
Yrd. Doç. Dr. Muhammed ÖZ
Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Üye
Yrd. Doç. Dr. Sema YURDAKUL
Süleyman Demirel Üniversitesi

İmza

.....

.....

.....

.....

.....

Mezuniyet tarihi:

...../...../20....

Prof. Dr. Duran KARAKAŞ

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Eşime ve çocuklarıma,

ETİK BEYAN

Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

1. Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 2. Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 3. Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 4. Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 5. Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Musa BÜYÜKADA

ÖZET

KANATLI ET KESİMHANESİ ARITMA TESİSİ ÇIKIŞ SUYUNUN FOTOKATALİTİK BOZUNMA İLE İLERİ ARITIMI: MALİYET ANALİZİ, OPTİMİZASYON VE MODELLEME

DOKTORA TEZİ

MUSA BÜYÜKADA

ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. FATİH EVRENDİLEK)

BOLU, KASIM - 2017

Bu tez çalışmasında, bir ileri oksidasyon süreci (İOS) olan titanyum dioksit (TiO_2) destekli fotokatalitik bozunma ile Bolu ilinde bulunan iki farklı kanatlı et kesimhanesine (tavuk ve hindi) ait çıkış sularının ileri arıtımı (renk, kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve toplam organik karbon (TOK) giderimleri) ve bunun toplam giderim maliyeti incelenmiştir. Bu amacı gerçekleştirebilmek ve hata payını indirmek için iki farklı eleme ve dört farklı etkileşim tasarımı deneylerin planlanmasında kullanılmıştır. Etkisi incelenen işletme parametreleri; atık su tipi (1), lamba tipi (2), bulanıklık (3), havalandırma (4), katalizör dozu (5), reaksiyon süresi (6) ve başlangıç pH'sıdır (7).

Sonuçlar, lamba tipi, atık su tipi, bulanıklık ve katalizör dozunun doğrusal olarak renk, KOİ ve TOK giderimi üzerinde etkili olduklarını göstermiştir ($p < 0.001$). Ayrıca katalizör dozu ve bulanıklığın ikinci mertebe üssel etkilerinin de ($p < 0.001$) tüm giderimler üzerinde son derece etkili oldukları belirlenmiştir. Toplam giderim maliyeti ise sadece katalizör dozunun doğrusal bir fonksiyonu olarak bulunmuştur ($p < 0.001$).

Optimum eleme tasarımı; renk, KOİ ve TOK giderimleri için Plackett-Burman tasarımı iken, toplam giderim maliyeti için kısmi faktöriyel tasarım olarak belirlenmiştir. Optimum etkileşim tasarımı ise, renk, KOİ ve TOK giderimleri için merkezi karma tasarım, toplam giderim maliyeti için D-optimal tasarımları olarak belirlenmiştir. Optimum deneme tasarımlarına istinaden türetilen çoklu doğrusal (olmayan) regresyon modelleri (ÇD(O)R) yanıt değişkenlerinde ki değişkenliği %99.97 ile %99.99 oranında açıklayabilmiş ve yanıt değişkenlerini %99.95 ile %99.99 oranında tahmin edebilmiştir. Ayrıca her bir deneme tasarımının %50'si kadar deney ile gerçekleştirilen bağımsız veri setleri ile yapılan uyumluluk sonuçları, türetilen ÇD(O)R modellerinin tahminleri ile deneysel sonuçlar arasında %98.1 ile %99.99 arasında değişen bir uyum olduğunu göstermiştir. Tüm bu sonuçlar türetilen ÇD(O)R modellerinin başarısını ortaya koymuştur.

Cevap yüzey metodu (CYM) temelli eş zamanlı optimizasyon neticesinde 0-1 NTU bulanıklık, 0.005-0.01 g/L TiO_2 , hindi atık suyu ve UVA lamba optimum işletme şartları olarak belirlenmiş ve bu şartlarda %60-65 renk, %55-65 KOİ ve %50-55 TOK giderimi ile 0.013-0.015 \$/L giderim maliyeti öngörülmüştür. Optimum şartlarda gerçekleştirilen validasyon deneyleri neticesinde %64.7 renk, %54.9 KOİ, %48.5 TOK giderimi elde edilmiş ve bunun toplam giderim maliyeti 0.0141 \$/L atık

su olarak belirlenmiştir. Sonuçlar CYM temelli eş zamanlı optimizasyonun işletme parametrelerinin optimize edilmesinde son derece başarılı olduğunu ortaya koymuştur.

Toplam giderim maliyetinin, bu tez çalışmasında gerçekleştirilen 337 deney süresince 0.0141 \$/L civarında seyretmiş olması bu sürecin ekonomik olma noktasında beklentileri karşıladığını göstermiştir. TiO_2 destekli fotokatalitik bozunma sürecinin, kanatlı et kesimhanesi çıkış sularının arıtımında ki başarısının pozitif mali çıktılar ile bir araya gelmesi endüstriyel uygulamalar noktasında önünü açmaktadır. Bu durum, olası pilot ölçekli ya da endüstriyel uygulamalar adına süreci makul kılmaktadır.

Son olarak optimum etkileşim tasarımlarına istinaden türetilen en iyi uyumlu ÇD(O)R modellerin ifade etmekte zorlandığı kısımlar belirsizlik analizleri ile incelenmiştir. Deterministik ÇD(O)R modellerine ait olan bu belirsizlikler Monte Carlo simülasyonu ile açıklanmaya çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar renk, KOİ ve TOK giderimleri ile toplam giderim maliyetinde sırası ile %10, %9, %7 ve 0.0045 \$/L standart hatanın olduğunu göstermiştir.

ANAHTAR KELİMELE: UV/ TiO_2 süreci, Endüstriyel atık su, Deneme tasarımları, Çoklu doğrusal olmayan regresyon, Eş zamanlı optimizasyon, Maliyet analizi, Belirsizlik analizi

ABSTRACT

ADVANCED TREATMENT BY PHOTOCATALYTIC DEGRADATION OF EFFLUENTS FROM TREATMENT PLANTS OF POULTRY SLAUGHTERHOUSE: COST ANALYSIS, OPTIMIZATION AND MODELING

PHD THESIS

MUSA BÜYÜKADA

**ABANT İZZET BAYSAL UNIVERSITY GRADUATE SCHOOL OF
NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
(SUPERVISOR: PROF. DR. FATİH EVRENDİLEK)**

BOLU, NOVEMBER – 2017

In this dissertation, advanced treatment (color, chemical oxygen demand (COD), and total organic carbon (TOC)) and their total cost of the effluents of two different poultry slaughterhouses in Bolu were investigated using titanium dioxide-assisted photocatalytic degradation process as an advanced oxidation process (AOP). To carry out this purpose and decrease error probability, two screening designs and four interaction designs were utilized. The seven explanatory variables were the effluent type (ET), lamb type (LT), turbidity (T), aeration (A), catalyst dose (CD), reaction time (RT), and initial pH (pH).

Results showed that, LT, ET, CD, and T were significantly effective on color, COD, and TOC removals ($p < 0.001$). Also, quadratic effects of CD and T were found significantly effective on all removals ($p < 0.001$). Total cost was found as a linear function of only CD ($p < 0.001$). Furthermore, no meaningful effects of RT, pH, and A were found on color, COD, and TOC removals and total cost ($p > 0.05$).

Plackett Burman design for color, COD, and TOC removals and fractional factorial design for total cost were determined as the optimum screening designs. Central composite design and D-optimal design were determined as the optimum interaction designs for the same order. Multiple (non-) linear regression (M(N)LR) models that were derived considering the optimum interaction designs stated the variation in response variables accounting for 99.95 to 99.995% and predicted the response variables accounting for 99.95% to 99.99%. Besides, the fitness results with independent data performed by experiment up to 50% of each experimental design showed that there was a good fitness between the experimental results and predicted values accounting for 98.1% to 99.99%. All these results demonstrated the accuracy of M(N)LR models.

60-65% color removal, 55-60% COD removal, 50-55% TOC removal, and 0.013-0.015 \$/L total cost were predicted under the optimum operating conditions of 0-1 NTU turbidity, 0.005-0.01 g/L TiO_2 , UVA lamb, and turkey effluent based on response surface methodology (RSM)-based concurrent optimization. 64.7% color,

54.9% COD, and 48.5% TOC removals and 0.0141 \$/L total cost were obtained under the optimum operating conditions. These results demonstrated that RSM-based concurrent optimization was quite successful in optimization of the operating conditions.

The fact that the total cost was in the range of 0.0141 \$/L wastewater during a total of 337 experimental runs showed that this process was partially above the economic point. Although the TiO₂-assisted photocatalytic degradation process succeeded in the advanced treatment of poultry slaughterhouse effluents, the result was comparable to the expectation of industrial application in the financial sector. Further studies can be made on cost analysis in order to improve this situation.

Finally, the residuals belonged to conducted the best fit M(N)LR models considering the optimum interaction designs, which were unaccounted were examined using an uncertainty analysis. These uncertainties, associated with the deterministic M(N)LR models were analyzed using Monte Carlo simulations. Results showed that standard error of 10%, 9%, 7% and 0.0045 \$/L color, COD and TOC removals and total cost.

KEYWORDS: UV/TiO₂ process, Industrial effluents, Design of experiments, Multiple non-linear regression, Cocurrent optimization, Cost analysis, Uncertainty analysis

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	vi
ABSTRACT	viii
İÇİNDEKİLER	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ	xiv
TEŞEKKÜR	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	4
2.1 İleri Oksidasyon Süreçleri (İOS)	4
2.2 Kanatlı Et Kesimhanesi Çıkış Sularının Fotokatalitik Bozunma Süreciyle Arıtımı.....	7
2.3 Kanatlı Et Kesimhanesi Çıkış Suyunun Farklı Süreçler İle Arıtımı ...	10
2.4 Deneme Tasarımlarının Kullanıldığı Çalışmalar	12
2.4.1 Fotokatalitik Bozunma ve DT'lerin Birlikte Kullanımı	17
2.4.2 Kanatlı Et Kesimhanesi Atık Sularına DT'lerin Uygulanması, Optimizasyon ve Modelleme	20
2.5 Belirsizlik Analizi.....	20
2.6 Boşlukların Değerlendirilmesi	23
3. MOTİVASYON VE HİPOTEZLER.....	26
3.1 Motivasyon	26
3.2 Hipotezler.....	27
4. MATERYAL VE YÖNTEM	29
4.1 Kanatlı Et Kesimhanesi Arıtma Tesisi Çıkış Suyu	29
4.2 Katalizör.....	31
4.3 Deneysel Çalışmalar	31
4.3.1 Ön Deneyler	32
4.4 DT	35
4.5 Analitik Ölçümler	35
4.5.1 Renk Ölçümü	36
4.5.2 KOİ Ölçümü	36
4.5.3 TOK Ölçümü	36
4.5.3 Diğer Analizler	37
4.6 Maliyet Analizi	38
4.7 İstatistiksel Veri Analizi	38
4.8 Optimum Deneme Tasarımının Belirlenmesi	39
4.9 Optimizasyon	40
4.10 Validasyon	41

4.11 Belirsizlik Analizleri	41
5. BULGULAR	44
5.1 Eleme Tasarımları	44
5.1.1 PBT	44
5.1.2 KFT	48
5.2 Etkileşim (Optimizasyon) Tasarımları	52
5.2.1 BBT	52
5.2.2 MKT	59
5.2.3 TDY	65
5.2.4 D-opt	67
5.3 Uyumluluk (U, %)	71
5.3.1 BBT	68
5.3.2 MKT	70
5.3.3 TDY	71
5.3.4 D-opt	72
5.4 Optimum Eleme Tasarımının Belirlenmesi	74
5.5 Optimizasyon	77
5.5.1 Eş zamanlı Optimizasyon	77
5.5.2 Tek Parametrelili Sayısal Optimizasyon	80
5.6 Validasyon (Doğrulama)	81
5.7 Optimizasyon Tekniklerinin Karşılaştırılması	81
5.8 Belirsizlik Analizleri	82
6. TARTIŞMA	87
6.1 Eleme Tasarımları	87
6.1.1 PBT	87
6.1.2 KFT	87
6.2 Etkileşim Tasarımları	88
6.2.1 BBT	89
6.2.2 MKT	90
6.2.3 TDY	91
6.2.4 D-opt	92
6.3 İşletme Parametrelerinin Etkileri	94
6.3.1 Renk, KOİ ve TOK Giderimleri	94
6.3.2 Toplam Giderim Maliyeti	95
6.4 Belirsizlik Analizleri	99
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	102
7.1 Sonuçlar	102
7.2 Öneriler	106
8. KAYNAKLAR.....	108
9. ÖZGEÇMİŞ.....	115

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. İOS'un genel mekanizması.....	4
Şekil 2.2. TiO ₂ -destekli fotokatalitik bozunma sürecine ait bir mekanizma örneği.....	5
Şekil 2.3. TiO ₂ 'in UV ışık enerjisi altında aktifleşme mekanizması	6
Şekil 2.4. TiO ₂ destekli fotokatalitik bozunma sürecinin şematik gösterimi.....	7
Şekil 2.5. Türkiye'de 2014 yılına ait kanatlı et üretimi, ihracatı ve 2025 hedefleri (BESD-BİR, 2014)	8
Şekil 2.6. DT'nin şematik ifadesi	12
Şekil 2.7. DT'lerin gruplandırılması (Sakkas vd., 2010).....	14
Şekil 2.8. TDY'nin şematik ifadesi.....	15
Şekil 2.9. Fotokatalitik bozunma süreci üzerine DT uygulamasının örneksel gösterimi (Sakkas vd., 2010)	17
Şekil 4.1. (a) Tavuk (b) Hindi kesimhanelerinin şematik gösterimi.....	30
Şekil 4.2. Deneylerde kullanılan foto reaktör sistemi: A: reaktör, B: ısıtmalı manyetik karıştırıcı, C: UV-A, UV-C ve floresan lambaları, D: havalandırma pompası ve E: numune alma noktası	32
Şekil 4.3. Monte Carlo simülasyonu için iş akışı.....	42
Şekil 5.1. Plackett-Burman tasarımı (PBT) ile (a) renk giderimi, (b) KOİ giderimi, (c) TOK giderimi, (d) toplam giderim maliyeti üzerine açıklayıcı değişkenlerin etkisi.....	46
Şekil 5.2. Kısmi faktöriyel tasarım (KFT) ile (a) renk giderimi, (b) KOİ giderimi, (c) TOK giderimi, (d) toplam giderim maliyeti üzerine açıklayıcı değişkenlerin etkisi.....	50
Şekil 5.3. Box-Behnken tasarımı (BBT) ile bulanıklık ve katalizör dozunun; (a) renk giderimi, (b) KOİ giderimi, (c) TOK giderimi üzerine etkileri.....	56
Şekil 5.4. M17 ile renk, KOİ ve TOK giderimi için eş zamanlı optimizasyon.....	78
Şekil 5.5. Renk, KOİ ve TOK giderimi ile toplam giderim maliyetinin M17 ile eş zamanlı optimizasyonu.....	79
Şekil 5.6. Renk, KOİ ve TOK giderimleri ile toplam giderim maliyetinin DE programı ile eş zamanlı optimizasyonu	80
Şekil 5.7. Renk giderimi için elde edilen MC temelli histogram sonuçları	83
Şekil 5.8. KOİ giderimi için elde edilen MC temelli histogram sonuçları	84
Şekil 5.9. TOK giderimi için elde edilen MC temelli histogram sonuçları	85
Şekil 5.10. Toplam giderim maliyeti için elde edilen MC temelli histogram sonuçları	86

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Bazı yükseltgenme ajanlarının yükseltgenme potansiyelleri.....	5
Çizelge 4.1. Kanatlı kesimhanesi arıtma tesisi çıkış sularına ait karakteristik özellikler ($n = 25$)	29
Çizelge 4.2. Açıklayıcı değişkenler, seviyeleri ve yanıt değişkenleri	34
Çizelge 4.3. Kanatlı kesimhanesi arıtma çıkış sularına ait bulanıklık, KOİ ve TOK değerleri ($n = 10$)	35
Çizelge 4.4. Deneme tasarımları.....	35
Çizelge 4.5. İstatistiksel ölçütler.....	40
Çizelge 5.1. Eleme tasarımlarındaki açıklayıcı değişkenler ve seviyeleri.....	44
Çizelge 5.2. Plackett-Burman tasarımına (PBT) ait deney listesi.....	45
Çizelge 5.3. Kısmi faktöriyel tasarımına (KFT) ait deney çizelgesi.....	49
Çizelge 5.4. Etkileşim tasarımlarında kullanılan açıklayıcı değişkenler ve seviyeleri.....	52
Çizelge 5.5. Box-Behnken tasarımına (BBT) ait deneyler ($n = 90$)	53
Çizelge 5.6. BBT'na istinaden renk, KOİ ve TOK giderimleri ile toplam giderim maliyeti için elde edilen GDM-VA sonuçları	55
Çizelge 5.7. BBT'ye ait TY-VA Tukey çoklu karşılaştırma sonuçları	58
Çizelge 5.8. BBT'ye istinaden en iyi uyumlu ÇD(O)R modelleri ($n = 90$).....	59
Çizelge 5.9. Merkezi karma tasarıma (MKT) ait deney listesi ($n = 78$)	60
Çizelge 5.10. MKT'ye ait GDM-VA sonuçları	62
Çizelge 5.11. MKT'ye ait TY-VA Tukey çoklu karşılaştırma sonuçları	63
Çizelge 5.12. MKT sonuçlarına göre en iyi uyumlu ÇDOR modelleri ($n = 78$) ...	64
Çizelge 5.13. TDY'ye ait deney listesi ($n = 18$)	65
Çizelge 5.14. TDY'ye ait GDM-VA sonuçları.....	66
Çizelge 5.15. TDY için TY-VA Tukey çoklu karşılaştırma sonuçları	66
Çizelge 5.16. TDY neticesinde türetilen ÇDR modelleri ($n = 18$)	67
Çizelge 5.17. D-opt tasarımına ait deney çizelgesi ($n = 20$).....	68
Çizelge 5.18. D-opt için GDM-VA sonuçları.....	69
Çizelge 5.19. D-opt için TY-VA Tukey çoklu karşılaştırma sonuçları	69
Çizelge 5.20. D-opt'na istinaden türetilen ÇD(O)R modelleri ($n = 20$)	70
Çizelge 5.21. BBT temelli ÇD(O)R modeli için bağımsız veri seti	71
Çizelge 5.22. MKT temelli ÇD(O)R modeli için bağımsız veri seti	72
Çizelge 5.23. TDY temelli ÇD(O)R modeli için bağımsız veri seti.....	74
Çizelge 5.24. D-opt temelli ÇD(O)R modeli için bağımsız veri seti.....	74
Çizelge 5.25. Optimum deneme tasarımlarının seçimi.....	76
Çizelge 5.26. M17 ile elde edilen tek parametrelili sayısal optimizasyon sonuçları	81
Çizelge 5.27. Deneyisel renk giderimine ait betimleyici istatistikler	83
Çizelge 5.28. Deneyisel KOİ giderimine ait betimleyici istatistikler	84
Çizelge 5.29. Deneyisel TOK giderimine ait betimleyici istatistikler	85
Çizelge 5.30. Deneyisel toplam giderim maliyetine ait betimleyici istatistikler	86

KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

AD	: Açıklayıcı Değişken(ler)
AICc	: Düzeltilmiş Akaike Bilgi Kriteri
AICp	: Akaike Bilgi Kriteri
APCp	: Amemiya Türetim Kriteri
AT	: Atık Su Tipi
B	: Bulanıklık (NTU)
BBT	: Box Behnken Tasarımı (BBD)
BICp	: Bayesian Bilgi Kriteri
BOİ	: Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı (mg/L)
ÇD(O)R	: Çoklu Doğrusal (Olmayan) Regresyon
ÇOM	: Çözünmüş Organik Madde
CYM	: Cevap Yüzey Metodu
D-opt	: D-optimal Tasarımı
DT	: Deneme Tasarımları
DW	: Durbin Watson Katsayısı
F	: Fisher Testi
GDM	: Genel Doğrusal Model
H	: Havalandırma (mL/dk)
İOS	: İleri Oksidasyon Süreçleri
KD	: Katalizör Dozu (g/L)
KFT	: Kısmi Fraksiyonel Tasarım
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı (mg/L O ₂)
LOT	: Likelihood Oran Testi
LT	: Lamba Tipi
MAP	: Maksimum A Posteriori
MC	: Monte Carlo
MCMC	: Markov Chain Monte Carlo
MKT	: Merkezi Karma Tasarım (CCD)
OH⁻	: Hidroksil radikali
p	: Güven aralığı (95%)
pH	: Başlangıç pH'sı

RS	: Reaksiyon Süresi (dk)
SH	: Standart Hata
SKTR	: Sürekli Karıştırılmalı Tank Reaktör
SSE	: Hataların Kareleri Toplamı
T	: Toplam Başarılı Ölçüt Sayısı
TAK	: Toplam Askıda Katı
TDY	: Taguchi Düzlemsel Yaklaşımı (TOA)
TiO₂	: Titanyum Dioksit
TOK	: Toplam Organik Karbon (mg/L)
TY	: Tek Yönlü
U	: Uyumluluk
UV	: Ultraviyole
VA	: Varyans Analizi
VEF	: Varyasyon Enflasyon Faktörü
YD	: Yanıt Değişken(ler)i
YENİGİDAM:	Yenilikçi Gıda Teknolojileri Uygulama, Araştırma ve Geliştirme Merkezi

TEŞEKKÜR

Akademik hayatım içerisinde yaşadığım pek çok sıkıntının neredeyse tüm ümitlerimi silip götürmeyi başardığı bir noktada tanıdığım, sadece akademik geçmişi, bilgi ve becerisi ile değil, aynı zamanda kibarlığı, nezaketi ve insanlığı ile beni yeniden ümitlendiren, kimi zaman beni benden çok düşünen çok kıymetli hocam

Sn. Prof. Dr. Fatih EVRENDİLEK;

Bana verdiğiniz değer, öğrettiğiniz ve kattığınız bilgiler ve açtığınız yeni ufuklar için size nasıl teşekkür edebileceğimi bilmiyorum. İyi ki varsınız ve hocamsınız. Sizinle birlikte çalışmak ve ekibinizin bir parçası olmak büyük bir mutluluk ve şereftir. Gerek yüksek lisans tezim gerekse doktora tezim sizin rehberliğiniz olmadan bu hale gelemezdi. Her şey için çok ama çok müteşekkirim.

Bu tez çalışmasına tatlı sert münakaşalar ile muazzam katkı sunan, sonsuz saygı duyduğum bilgisel altyapısı ile yolumu aydınlatan ve Hidrojeoloji ve Limnoloji Laboratuvarında sunduğu altyapısal imkânlardan ötürü bir diğer çok ama çok kıymetli hocam Sn. Doç. Dr. Nusret KARAKAYA'ya en içten teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Değerli vaktini benim için ayırarak tezime katkı sunan ve görüşleriyle bana yardımcı olan Sn. Yrd. Doç. Dr. Muhammed ÖZ'e teşekkür ederim.

Kendilerine çok zahmet verdiğim ve bu tez çalışmasında bana muazzam katkılar sunan Sn. Doç. Dr. Yalçın GÜNEŞ ve Sn. Yrd. Doç. Dr. Sema YURDAKUL'a ayrı ayrı teşekkürlerimi sunarım.

Bugünlerimin mimarı, altyapım, temelim ve mesnet noktam biricik anneciğim ve evimizin sarsılmaz direği biricik babacığım. Sizin kendinizden kısararak sunmuş olduğunu imkânların bugün meyvesini yiyorum. Duanız ve gölgeniz üzerimden eksik olmasın! İyi ki varsınız ve iyi ki benim ailemsiniz.

15.10.2008 tarihinden beri adeta kahrımı çeken, 23.07.2011'den beri hayat arkadaşım olan, tüm kötü zamanlarımda istisnasız yanımda bulabildiğim tek arkadaşım çok kıymetli ve canımdan çok sevdiğim biricik eşim Pınar BÜYÜKADA; iyi ki yanımdasın ve bu hayatta yol arkadaşımsın. Sen olmasan yapamazdım!

23.04.2012 ve 12.11.2015 tarihlerinde hayatımıza bahar gibi gelen çocuklarım Ali Batuhan ve Miray Nur. Sizleri öyle çok seviyorum ki... Varlığınız bana her daim güç ve azim verdi. İleride sizlerin de başarılı olacağınız günlerin ümidiyle...

Münakaşaları ile beni sinirlendiren, her daim seçtiğim il, meslek vb. konularda beni takip eden ☺, yıldızımız pek barışmasa da yine de alternatifi olmayan tek kardeşim Arş. Gör. Samet BÜYÜKADA, iyi ki kardeşimsin ve tartışıyoruz ☺

Kader arkadaşım, türlü cefaya birlikte göğüs gerdiğim kardeşim, meslektaşım, Uzm. Miraç ERYİĞİT; kendi başına bir şeyler becerebilme azmin ve kararlı duruşun ben de bıraktığın en önemli katkılar olacak ve hayat boyu hatırlanacaksın. Umarım akademik yaşantının ileriki safhalarında hak ettiğin yerlere ulaşırsın.

Tatlı sohbetleri, misafirperverlikleri, üst düzey akademik kişilikleri ve en önemlisi kötü günlerimde göstermiş oldukları duruş sebebi ile hayatım boyunca sevgi ile hatırlayacağım hocalarım Sn. Prof. Dr. Gülsün AKDEMİR EVRENDİLEK ve Sn. Yrd. Doç. Dr. Fatma ÖZTÜRK ile arkadaşım Arş. Gör. Dr. Sibel UZUNER, sizlere canı gönülden teşekkür ederim. Hayatlarınız boyunca tüm güzellikler sizlerle olsun.

Zahmetli deneysel çalışmalarım arasında mola vermek için tek adresim olan Arş. Gör. Mehmet Fatih KAHRAMAN ve o molalarda her daim benim için bir bardak sıcak çayı olan Arş. Gör. Habibullah BİLGE; bu teze manevi katkınız büyük, hayatınızda her şey gönlünüzce olsun.

Bu tezin deneysel kısmının gerçekleştirildiği dönemlerde Çevre Mühendisliği bölümü öğrencileri olan ve bana yardımcı olan genç mühendisler Ersin ABANUZ, Haluk FİDAN ve Eray ÖZALP'e teşekkür eder, hayatlarında başarılar dilerim.

Son olarak, bu tez çalışmasını mali yönden 2015.09.02.920, 2016.09.02.1006, 2016.09.02.1007 ve 2016.09.02.1035 numaralı projeler ile destekleyen Abant İzzet Baysal Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (AİBÜ-BAP) birimine teşekkür ederim.

Ayrıca analizlerdeki yardımlarından ötürü YENİGİDAM biriminin başta müdiresi Prof. Dr. Gülsün AKDEMİR EVRENDİLEK olmak üzere tüm ekibine ve ilaveten Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümündeki arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

Hızla artan insan nüfusu beraberinde artan bir tüketim getirmekte ve bu durum endüstrinin hemen her alanında farklı yatırımları tetiklemektedir. Gıda sektörünün en büyük gelişimlerinin yaşandığı alanlarından birisi kanatlı et sektörüdür. Bu bağlamda Türkiye, özellikle kanatlı et sektöründe hem bölgesel hem de küresel olarak oldukça büyük ölçekli yatırımlar yapmaktadır (BESD-BIR, 2014). Kanatlı etlerinin tüketicilere ulaşma süreci; kesim, parçalama, yıkama, sterilizasyon ve paketlenme olarak özetle sıralanabilir (Yetilmezsoy ve Sakar, 2008a; 2008b, Yetilmezsoy, 2012a; 2012b). Amorim vd. (2007), bir kanatlı et kesimhanesi için üretim sürecinde su kullanımının optimizasyonunu ve bu süreçte üretilen sıvı atıkların içindeki organik ve hidrolik yüklerin azaltılmasını araştırmışlardır. Bu araştırmacılar, kesim ile temizleme ve dezenfekte etme işlemlerinin sırasıyla tüketilen toplam suyun % 62'si ve % 9'unu oluşturduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmadaki atıkların geri dönüşümü ile tüketilen su miktarında %12'lik bir azalma elde edilebileceği ve bunun tesise yılda yaklaşık 6500 \$ kazanç sağlayacağı belirtilmiştir.

Gerek kesim gerekse sterilizasyon aşamalarında son derece büyük miktarlarda atık su oluşmaktadır (Amorim vd., 2007). Bu atık suların arıtılmadan alıcı ortamlara deşarj edilmesinin beraberinde çok büyük çevre sorunları getireceği ve ekosistem üzerinde çok ciddi bir tahribat yaratacağı şüphesizdir. Bu durum, endüstriyel atık suların arıtımının önemini açıkça ortaya koymaktadır (Yetilmezsoy vd., 2009, Buyukada, 2016b).

Endüstriyel atık suların arıtımında adsorpsiyon, flokulasyon vb. gibi pek çok klasik yöntem araştırmacılar tarafından sıklıkla denenmiş ve belli ölçülerde tatminkâr sonuçlar elde edilmiştir. Son dönemlerde araştırmacıların endüstriyel atık suların arıtımında yoğunlaştığı diğer bir teknik ileri oksidasyon süreçleridir (İOS). Fenton, ultrases, ozon vb. pek çok tekniğin genel adı olan İOS, adsorpsiyon gibi klasik metotların aksine son derece hızlı ve oldukça yüksek bir verimle ancak beraberinde daha yüksek bir maliyetle endüstriyel atık suların arıtımını sağlayan bir yöntemdir (Xu vd, 2011; Wang, 2016; Shen vd, 2016).

Başka bir İOS olan fotokatalitik bozunma, ultraviyole (UV) ışık altında aktive olan yarı iletken bir katalizör varlığında süspansiyon ortamındaki hidroksil ($\text{OH}^\cdot$) radikallerinin varlığını arttırarak organik bileşikler hızla parçalayan bir süreçtir (Asha vd., 2014, Asha ve Kumar, 2014, Asha vd., 2015). İlgili literatürde fotokatalitik bozunma sürecinin endüstriyel atık su arıtımında inceleyen pek çok çalışma bulunmaktadır ki yapılan bu çalışmalar da genellikle lamba tipi, katalizör dozu, başlangıç pH'si gibi klasik parametrelerin etkisi incelenmiştir (Asha vd., 2014, Asha ve Kumar, 2014, Asha vd., 2015). Bu noktada katalizör ile organik kirleticinin ve katalizör ile UV ışığın daha iyi buluşması için ortama hava kabarcıkları göndermek sıra dışı katkı sunan bir yaklaşım olabilir. İlaveten literatürdeki çalışmalarda mekanizma tespiti de dikkat çekmektedir. İleri düzey spektrofotometrik yöntemlere dayalı bu analiz, genellikle disiplinler arası çalışma ekipleri tarafından irdelenmektedir (Silva vd., 2002, Umar ve Aziz, 2013, Haitao vd., 2012, Chen vd., 2015). Ayrıca bir diğer dikkat çeken durum ise sıklıkla sistematik olmayan deneyler ile çalışmaların gerçekleştirilmiş olmasıdır. Bu durum istatistiksel bir planlama ile deneyleri gerçekleştirme gerekliliğini doğurmuştur (Yogi vd, 2008; Shaykhi ve Zinatizadeh, 2014; Buyukada, 2016c; Rasoulifard vd, 2016).

Deneme tasarımları (DT) veya deneme desenleri, deneylerden elde edilen verilerin belli bir desen oluşturup bir bölgeye yığılmasını engellemek, deneyleri tekrar etme zorunluluğunu ortadan kaldırmak, hata payını minimize etmek ve deneylere ekonomik olarak katkı sunmak adına geliştirilmiş metotların genel ismidir (Das vd, 2014; Azri, 2016; Buyukada, 2016a). Bu tasarımlar kendi içerisinde iki ana grupta toplanabilir: eleme tasarımları (1) ve etkileşim (optimizasyon) tasarımları (2). Her hangi bir deneysel çalışmada belirli yanıt değişken(ler)i üzerine etkisi incelenecek açıklayıcı değişken sayısı beş ve üzerinde ise genellikle eleme tasarımı kullanılarak, deneylerin gerçekleştiği güven aralığında istatistiksel açıdan anlamsız açıklayıcı değişkenlerin elenmesi sağlanır. Bu noktadan sonra veya başlangıçta etkisi incelenecek açıklayıcı değişken sayısı beş ve daha az ise optimizasyon tasarımları doğrudan tercih edilebilir (Buyukada, 2017a).

Belirsizlik, yani müphemiyet, kelime anlamı olarak belirsiz yani net olamama durumunu ifade etmek için kullanılan bir kelimedir. Dinamik sistemler için ise, herhangi bir yanıt değişkenin rassal varyasyonunu izah edememe belirsizlik olarak tanımlanır. Özellikle son dönemlerde belirsizlik analizleri artan bir biçimde

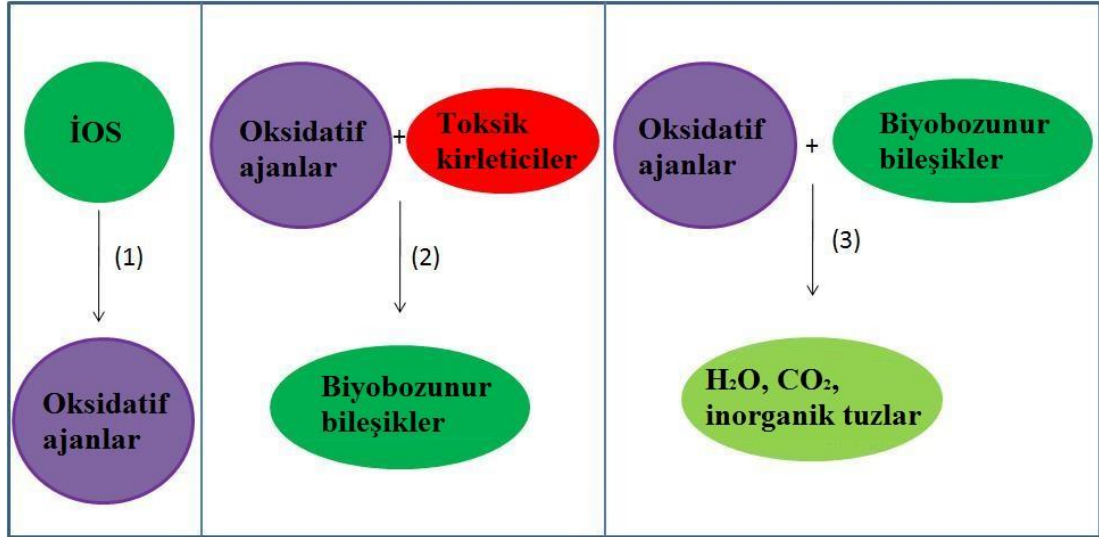
araştırmacıların ilgisini çekmekte ve bu konularla ilgili çalışmalarda belirgin bir artış görölmektedir (Evrendilek vd., 2016, Pan ve Pandey, 2016, Chaudhary ve Hantush, 2017). Belirsizlik analizi için en sık tercih edilen metotlar likelihood, Monte Carlo (MC), Markov Chain Monte Carlo (MCMC veya Bayesian) ve maximum a posteriori (MAP) metotlarıdır (Buyukada, 2017b). Literatürdeki bazı çalışmalar, birden fazla açıklayıcı değişken için belirsizlik analizini uygularken bunların içerisinde belirsizliğin ana kaynağını oluşturma önemlerine göre ayrıca bir sıralama da yapmaktadırlar. İşte bu durum ayrı bir çalışma konusu olan hassasiyet analizini ifade etmektedir. Hassasiyet analizi, nispeten belirsizlik analizi ile ortak noktalarda buluşsa da, temelde son derece farklı bir yaklaşımdır (Pan ve Pandey, 2016, Zhang vd., 2016).

Tüm bu bilgiler; gelişen endüstrinin hat safhada atık su ürettiğine ve çevre kirliliğinin önlenmesi adına bu durumun bertaraf edilmesi gerektiğine işaret etmektedir. Ayrıca bir İOS olan fotokatalitik bozunmanın etkin bir ileri arıtım süreci olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. İlaveten deneme tasarımlarının, deneylerin planlanması ve dinamik sistemlerin istatistiksel modelleme ile tanımlanması açısından önemli olduğuna dikkat çekmektedir. Son olarak, belirsizlik analizinin istatistiksel modelleme ile tanımlanan süreçlere operasyonel bir katkı sunacağı aşikârdır. Edinilen bu bilgiler ışığında ana çatısı ve genel hatları belli olan tez konusunu netleştirebilmek için kapsamlı ve güncel bir araştırma yapılmıştır. Elde edilen bilgiler literatür özeti halinde takip eden kısımda sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. İleri Oksidasyon Süreçleri (İOS)

Son dönemde endüstriyel atık suların arıtımında araştırmacıların yoğunlaştığı ultrasesi ozoni Fenton vb. süreçlerin genel adı ileri oksidasyon süreçleridir (İOS). Bu bağlamda, örneğin ozon sürecinin, bir İOS olabilmesi için çözünmüş ortam olması gerekmektedir. Çözünmemiş bir ortamda ozon doğrudan bir indirgeme yapamaz ve olduğu gibi sistemden dışarı çıkar. Ancak çözünmüş organik kirletici ile yükseltgeme ve indirgeme reaksiyonlarına girerek kendisi yükseltgenirken organik kirleticiyi indirger ve zararsız yan ürünlere dönüştürür. Süreçlerin tamamı üretilen bağımsız hidroksil radikallerinin öncülüğünde ilerler. Bu noktadan hareketle genel bir İOS'un organik kirletici ile girdiği reaksiyon takip eden mekanizma ile görsel olarak ele alınabilir (Şelik 2.1).



Şelik 2.1. İOS'un genel mekanizması.

Bu noktadan sonra izlemek yok, arıtımı düşünülen endüstriyel atık suya uygun İOS'un belirlenmesi olacaktır. Uygun İOS seçimi için güvenilir ve aynı zamanda fikir verici olan yollardan birisi İOS'larda üretilen bağımsız radikallerin elektron potansiyelleridir. Bütün İOS'lar temelde hidroksil radikali oluşumuna dayanır. Hidroksil radikali ($\bullet\text{OH}$), aromatik, klorlu ve fenolik bileşikler gibi kırılkan organik

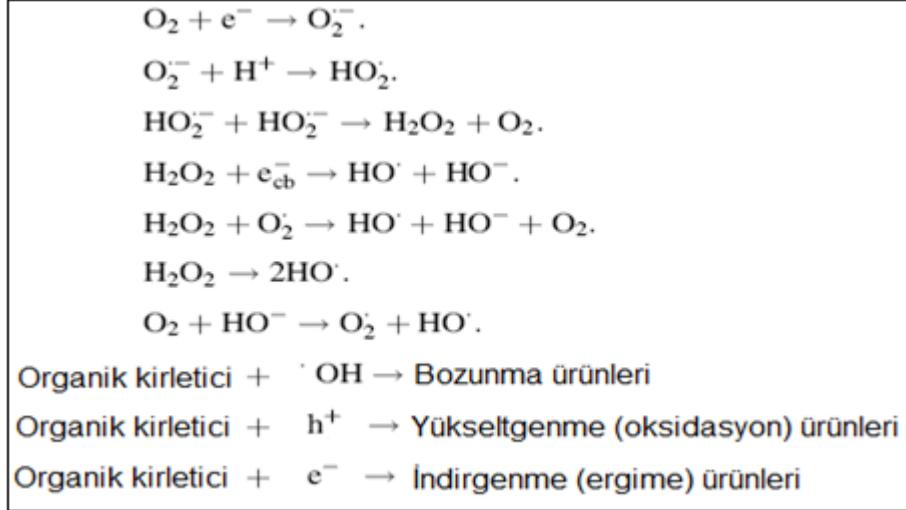
maddeleri hızla parçalayabilen oldukça reaktif bir radikaldır. Hidroksil radikali, Çizelge 2.1’de gösterildiği gibi yüksek oksidasyon potansiyeline sahiptir ve ozon oksidasyonu, Fenton oksidasyonu vb. farklı elektrokimyasal oksidasyon sistemleri ile üretilir. Buna ek olarak, bu radikal ışıktan veya ultrasesle ışın yoluyla sudan da üretilir. Bu radikal, atık suyun içindeki kirleticilerle kolayca reaksiyona girer. Bununla birlikte, radikal bikarbonat iyonu gibi katışkı tutucu elementler ile reaksiyona girerek süreç verimliliğinde bir azalmaya neden olabilirler (Barrera-Diaz vd., 2014).

Çizelge 2.1. Bazı yükseltgenme ajanlarının yükseltgenme potansiyelleri.

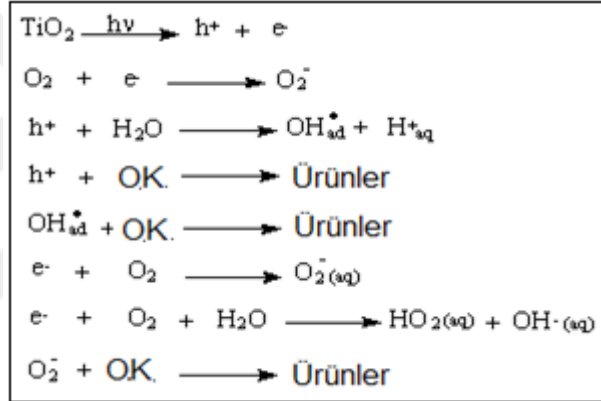
Yükseltgenme ajanı	Yükseltgenme potansiyeli (V)
Flor	3.1
Hidroksil radikali	2.8
Atomik oksijen	2.4
Ozon	2.1
Hidrojen peroksit	1.8
Hipoklorit	1.5
Klor	1.4
Klor dioksit	1.3
Moleküler oksijen	1.2

Çizelge 2.1, hidroksil radikalının ne denli yüksek bir yükseltgenme potansiyeliyle sahip olduğunu (2.8 V) net bir biçimde ortaya koymaktadır. Bu bağlamda hidroksil radikali üreten bir İOS seçimi endüstriyel atık suların arıtımı noktasında büyük katkı sunacaktır. Hidroksil radikali, hemen her İOS’ta üretildiği gibi fotokatalitik bozunma sürecinde de üretilmektedir. Bu durum UV ışık altında aktive olan çözelti ortamındaki yarı iletken bir katalizör ile mümkündür.

Şekil 2.2’den görüldüğü üzere oksijenin bir elektron alması ile başlayan reaksiyon, peroksit oluşumu, değerlik ve iletim bağlarının kırılması ile devam etmekte ve hidroksil radikallerinin oluşumu ile sonlanmaktadır. Bu noktadan sonra ortamdaki organik kirleticilerin hidroksil radikali varlığında parçalanması söz konusudur. Eğer bu mekanizmayı tetikleyen oksijen-elektron etkileşimini, yüksek ışık enerjisi altındaki TiO_2 ’in proton ve elektron saçmasının başlattığı göz önüne alınırsa, fotokatalitik bozunma sürecinin kompleks mekanizması daha net bir biçimde anlaşılacaktır (Şekil 2.3).



Şekil 2.2. TiO₂-destekli fotokatalitik bozunma sürecine ait bir mekanizma örneği.

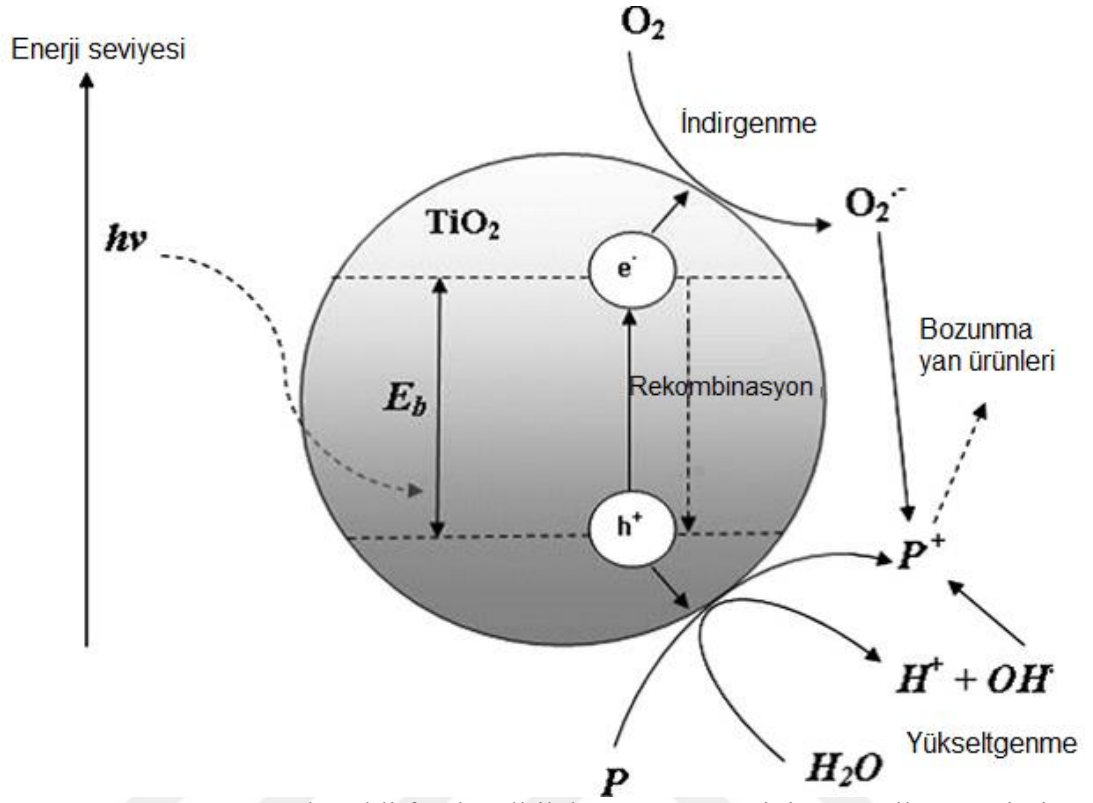


Şekil 2.3. TiO₂'in UV ışık enerjisi altında aktifleşme mekanizması.

Şekil 2.3, TiO₂'in ışık enerjisi altında aktifleşmesini göstermektedir. Elektron saçılmasıyla devam eden süreç oksijenin buradan saçılan elektron ile etkileşimi ile devam etmektedir. Dolayısı ile toplam reaksiyon mekanizması Şekil 2.4'te gösterildiği gibi özetlenebilir. UV ışık altında aktifleşen ve buna bağlı olarak hem elektron hem de proton saçan yarı iletken katalizör TiO₂'nin bu iki ana saçılmasının iki ana görevi bulunmaktadır. Bunlar elektron için oksijenin indirgenmesi iken proton için organik kirlenicinin pozitif yüklere parçalanmaya ön hazırlığının yapılması ve sudan hidroksil radikali üretilmesidir.

Bu noktadan sonra pozitif yüklenmiş organik kirlenici, indirgenmiş oksijen eşliğinde ancak primerde ortamdaki hidroksil radikali üzerinden zararsız yan ürünlere dönüştürülür. Süreç ortamdaki parçalanabilir organik madde bitene kadar devam eder.

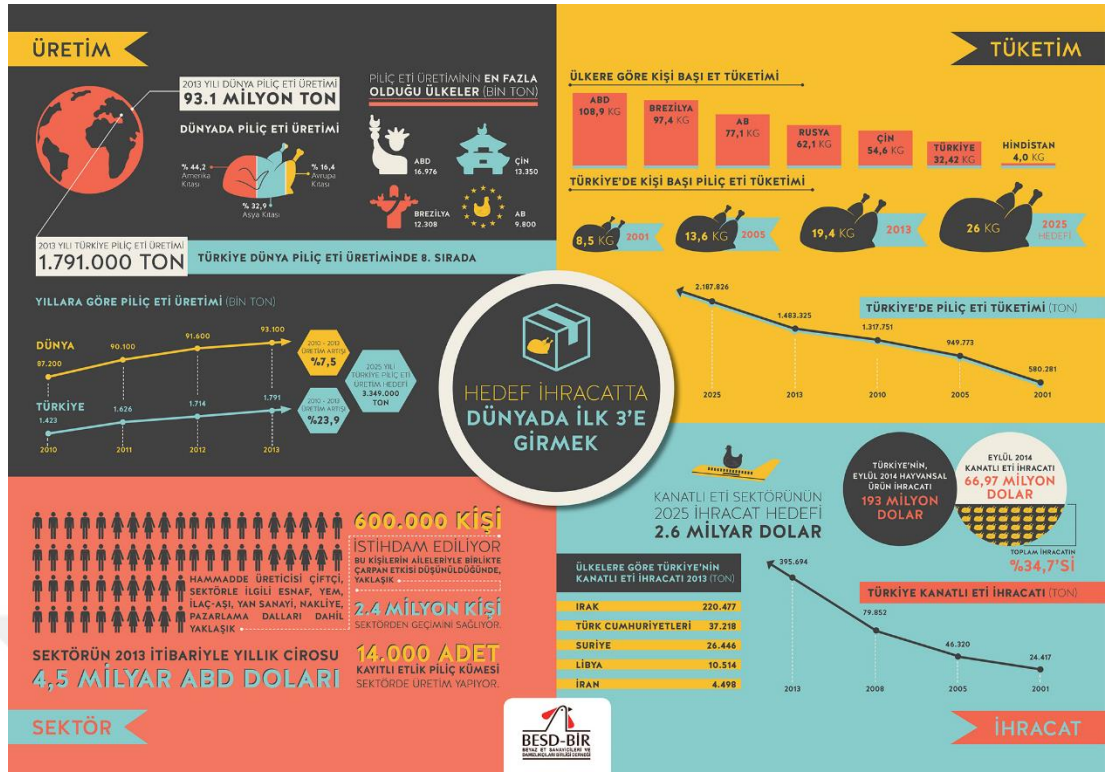
Bu noktada yükseltgenme potansiyeli yüksek olan bir ajanın kullanılma gerekliliği daha da iyi anlaşılmaktadır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. TiO₂ destekli fotokatalitik bozunma sürecinin şematik gösterimi.

2.2. Kanatlı Et Kesimhanesi Çıkış Sularının Fotokatalitik Bozunma Süreciyle Arıtımı

Türkiye İstatistik Kurumu verilerine göre 2014 yılının ilk 8 aylık döneminde kanatlı sektörü üretiminin geçen yılın aynı dönemine göre %5.8 oranında artarak 1,275,000 tona ulaştığını açıklanmıştır (BESD-BİR, 2014). 2013 yılı Temmuz ayında Rusya'ya başlayan piliç eti satışının katkısıyla yükselen ihracat 2014 yılının ilk 10 ayında 357,545 ton olarak kayıt altına alınmıştır. Türk ekonomisi için önemli sektörlerden biri olan kanatlı et sektörünün hedefi piliç eti üretimini 2025 yılında 3.35 milyon tona çıkarmak olarak belirlemiştir. Bu bağlamda sektörün 2025 yılı ihracat hedefi ise 2,6 milyar \$ olarak belirlenmiştir (Şekil 2.5). Bu durum Türkiye'de ve dünyada kanatlı etin ulaştığı noktayı açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 2.5. Türkiye’de 2014 yılına ait kanatlı et üretimi, ihracatı ve 2025 hedefleri (BESD-BİR, 2014).

Türkiye’de üretilen yıllık kanatlı et miktarı göz önüne alınırsa (BESD-BİR, 2014) ortaya çok büyük miktarda arıtmaya ve/veya ileri arıtmaya tabi tutulması gereken bir atık suyun çıkacağı ve beraberinde ciddi bir maliyet getireceği aşikârdır. Bu bağlamda fotokatalitik bozunma ile kanatlı et kesimhanesi çıkış sularının arıtımını inceleyen güncel çalışmaların özeti takip eden kısımda sunulmuştur.

Asha ve Kumar (2016), kanatlı et işleme tesisi atık sularının arıtımını fotokatalitik bozunma süreci ile birleştirdikleri sürekli membran çamur reaktöründe incelemiştir. Sülfametoksazol (SMX) maddesinin entegre kanatlı et işleme tesisinde yüksek oranda bulunduğu dikkat çeken çalışmalarında, yüksek basınç sıvı kromatografisi (HPLC) ile analizlerini yapıp aktif karbonla desteklenmiş TiO_2 kullanarak sürekli modlu membran fotokatalitik çamur reaktöründe bu maddenin parçalanmasını incelemişler ve LCMS analizi ile bozunma ürünlerini tespit mekanizması önermişlerdir. İzoksazol halkası oluşumu ile başlayan, fenil sülfınat iyonu oluşumu için metil ve amid gruplarının eliminasyonu ile devam eden bir mekanizmayı LCMS ve HPLC analizlerinden elde ettikleri sonuçlarla ortaya koymuşlardır. Sonuç olarak reaktörün SMX içeren kanatlı et işleme tesisi atık sularının arıtımında oldukça iyi bir süreç tipi olduğunu ifade etmişlerdir.

Asha vd. (2015), kanatlı et kesimhanesi çıkış sularını granüler formdaki aktif karbon ile modifiye edilmiş TiO_2 eşliğinde fotokatalitik bozunma sürecinde kesikli ve sürekli olarak incelemiştir. İlgili atık suyun karakterizasyonu sonucunda toplam, askıda, uçucu ev sabit katı maddenin APHA 2005 standartlarında sırası ile 1200, 200, 400 ve 800 mg/L olduğunu ayrıca başlangıç pH'sının 6.5 ve BOİ değerinin ise 1000 mg/L olduğunu belirtmişlerdir. Hem kesikli hem de sürekli (60 mL/dk akış hızında) fotokatalitik sürecin muazzam değerlere ulaştığını belirtmişlerdir. Sadece 6 dk sonunda kesikli sistemde %100'lük toplam uçucu katı giderimi elde edildiğini ve bunun maliyetinin 0.68 \$/kg toplam uçucu katı olduğunu belirtmişlerdir. Sürekli sistemde ise aynı süre sonunda ve dört saatlik hidrolik alıkonma süresi sonunda %63'lük bir toplam uçucu katı giderimi olduğunu ve bunun maliyetinin ise 62.16 \$/kg toplam uçucu katı olduğunu belirtmişlerdir. Ekonomik analizlerin, maliyetin reaksiyon süresinin bir fonksiyonu olduğunu ve maliyeti düşürmek için reaksiyon süresinin azaltılması gerektiğini göstermiştir. Ayrıca çalışmada, UV ışık, modifiye TiO_2 ve kombine süreç ayrı ayrı da test edilmiştir. Sonuçlar modifiye TiO_2 'in adsorpsiyon etkisinin ihmal edilebilir olduğunu; ancak, bozunma mekanizmasındaki iki ana reaksiyonun sırası ile granüler aktif karbon yüzeyine adsorpsiyon ve modifiye TiO_2 ile parçalanma olduğunu belirtmişlerdir.

Asha vd. (2014), çalışmalarında kanatlı et kesimhanesi çıkış suyunun fotokatalitik bozunma ile arıtımını sol-gel metodu ile sentezledikleri TiO_2 -kil alaşımlı yeni bir katalizör ile incelemiştir. 2 L hacmindeki pilot uygulamada, 4 g/L TiO_2 ve 4.5 g/L modifiye TiO_2 kullanarak, ayrıca; 40 mW/cm² yoğunluğunda, 14 W gücünde 4 adet 254 nm dalga boyundaki UVC lamba kullanarak kurdukları sistemde 4 saatlik reaksiyon süreci sonunda doğrudan fotoliz (katalizörsüz) ile %60 BOİ, %43.8 toplam uçucu katı ve %36.1 toplam katı giderirken, katalizörlü sistemde ise çok daha kısa bir sürede %100 civarı giderim elde etmişlerdir.

Asha ve Kumar (2014), laboratuvar ölçekli bir çalışmada kanatlı et kesimhanesi atık suyunun arıtımını fotokatalitik bozunma ile incelemiş ve katalizör olarak TiO_2 , toz ve granül yapılı aktif karbon etkileşimli TiO_2 kullanmışlardır. 180 dk'lık reaksiyon sonunda aktif karbon etkileşimli TiO_2 kullanılan süreçlerin %100 toplam katı ve biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ) giderimi elde ettiğini belirtmişlerdir (hem 14 W hem de 56 W'lık sabit UV ışımaya şartlarında). Çalışmalarının devamında kinetik çalışmalara hız vermişler ve maksimum BOİ giderim hızı ile

sabitini sırası ile 320 mg/L/dk ve 0.987 dk⁻¹ olarak belirlemişlerdir. Bu kısımdan sonra güncel literatür özetinde kanatlı et kesimhanesi çıkış sularına uygulanan diğer arıtma süreçleri ve fotokatalitik bozunma sürecinin diğer uygulama alanları hakkında bilgi verilmiştir.

2.3. Kanatlı Et Kesimhanesi Çıkış Suyunun Farklı Süreçler İle Arıtımı

Wang vd (2016) elektrokimyasal oksidasyon ile kanatlı kesimhanesi çıkış suyunun arıtımını incelemiş ve aynı zamanda mekanizma ile kinetik çalışmalarını gerçekleştirmiştir. NaCl, Na₂SO₄ ve HCl'in elektrolit özelliklerinin de incelendiği bu çalışmada, amonyum, toplam fosfor, toplam organik karbon ve inorganik karbon giderimi de gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak iki saatlik bir elektrokimyasal işleme müteakip %57 amonyum, %76 toplam fosfor, %72 toplam organik karbon ve %77 inorganik karbon giderimi gerçekleştirmişlerdir.

Liaoa vd (2016) kanatlı hayvanlarda görülen koksidiyosis hastalığının tedavisinde yaygın bir biçimde kullanılan sodyum sülfakinoksalin maddesinin kanatlı et kesimhanesi çıkış sularına geçip geçmediği hakkında daha önce hiçbir araştırma yapılmadığını belirterek bu maddenin UV destekli H₂O₂ süreci ile ayrışmasını ve ayrışma mekanizmasını incelemişlerdir. pH'nın 11'den büyük olduğu alkali durumlarda muazzam sonuçların alınabileceğini çalışmalarının en büyük çıktılarından bir olarak belirtmişlerdir. Bozunma ürünlerinin tespitine dayanan mekanizma önerisi ise sıvı kromatografi/kütle spektroskopisi-iyon tuzağı-kütle uçuş zaman spektroskopisi analizleri ile gerçekleştirilmiştir.

Yetilmezsoy (2012a), çok nesneli optimizasyon tekniği ile doğrusal olmayan regresyon tekniği bazlı kinetik modelleri, kanatlı kesim hanesi çıkış suyunun yukarı akışlı anaerobik çamur reaktöründe (UASB) süreci ile arıtımında işletme parametrelerinin optimizasyonunda kullanılmıştır. Maksimum substrat değerlendirme hızı sabitini ve doygunluk sabitini sırası ile 11.83g KOİ/gün/L ve 13.02g KOİ/gün/L olarak belirlemiştir. UASB reaktörün bu tip atık suların arıtımında son derece başarılı olduğunu belirtmişlerdir.

Yetilmezsoy (2012b), anaerobik olarak ön arıtmadan geçmiş kanatlı et kesimhanesi çıkış suyundan Fenton oksidasyonu ile renk ve KOİ giderimini, bulanık

mantık temelli modeller ile tahmin etmeye çalışmıştır. Modelin girdileri olarak başlangıç pH, H₂O₂ ve Fe⁺² dozlarını belirlemiştir. Deneyler sonunda elde ettiği sonuçlar ile modelin tahmin ettiği sonuçlar arasında çok az bir hata olduğunu uyumluluğun 98% olduğunu belirtmiştir. Ancak aynı durumun doğrusal olmayan regresyon modelleri için geçerli olmadığını belirtmiştir ($R^2 = 0.77$). Bu sonuçların, bulanık mantık temelli modellerin ilgili süreçte renk ve KOİ giderimini tahmin etme de oldukça başarılı olduğunu belirtmiştir.

Yetilmezsoy vd. (2009), anaerobik olarak ön arıtımı yapılmış kanatlı et kesimhanesi çıkış suyundan renk ve KOİ giderimi için elektrokoagülasyon tekniğini kullanmışlar ve çalışmalarını kesikli bir biçimde gerçekleştirmişlerdir. Optimizasyon çalışmaları neticesinde; başlangıç pH'ı 5, akım yoğunluğu 15 mA/cm², elektroliz süresi olarak 20 dk optimum şartlar olarak belirlenmiş ve bu şartlarda 92% oranında renk ve 90% oranında KOİ giderimi elde etmişlerdir. Sonuçlara dayalı olarak, Al elektrotun kullanılacağı bir elektrokoagülasyon sürecinin UASB ile kanatlı kesimhanesi çıkış sularının arıtımında etkili olabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca çalışmalarının sonunda *Lebistes reticulatus* bakterisi ile küçük bir toksisite çalışması yaparak, konvansiyonel çalışmalar ile bu analizlerin bir araya getirilmesinin daha iyi bir değerlendirme ışık tutacağını vurgulamışlardır.

Yetilmezsoy ve Sakar (2008a), farklı organik ve hidrolik yükleme şartlarında çalıştırılan UASB reaktörün, kanatlı et kesimhanesi çıkış sularının arıtımı üzerine performansını doğrusal olmayan bir modelleme tekniği kullanarak incelemişlerdir. 15.7 L hacmindeki reaktörü mezofilik (30-35°C) şartlarda ve 6.68-7.82 pH aralığında çalıştırmışlardır. Hidrolik yükleme seviyeleri 0.105-0.21 m³/(m² gün) iken, biyogaz üretimi 4.2-29.4 L/gün olarak değişmiştir. Bu esnada 0.536-3.779 kg KOİ/(m³ gün) uzaklaştırması gerçekleştirmişlerdir. Bu deneysel verilere istinaden türettikleri model ifadesinin R^2 değerleri günlük biyogaz üretimi için 99.54% ve KOİ giderimi için 94.16% olarak hesaplamışlardır. Tahmin edilen değerler ile deneysel veriler arasındaki uyumun, doğrusal olmayan regresyonun dinamik sistemlerdeki yanıt değişkenini tahmin etmedeki becerisini ispatladığını belirtmişlerdir.

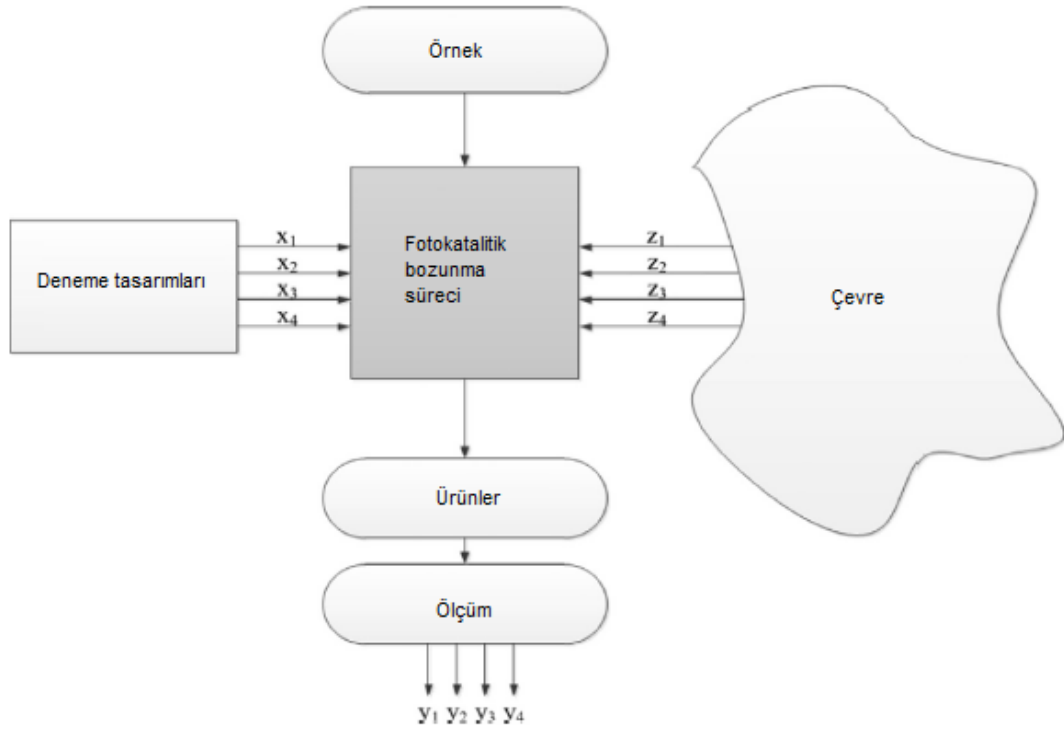
Yetilmezsoy ve Sakar (2008b), 15.7 L hacminde pilot ölçekli, UASB kanatlı et kesimhanesine ait atık suyun arıtımını incelemişlerdir. 72 günlük mezofilik işletme şartlarında (pH = 6.5 ve 33-35°C) farklı hidrolik alıkonma sürelerini, organik yükleme

oranlarını ve sıcaklıkların etkilerini incelemişlerdir. 8 günlük hidrolik bekleme süresi sonunda 63. günde %90.7'lik bir KOİ giderimi elde etmişlerdir.

Çalışmanın ikinci kısmında ise H_2O_2 destekli Fenton süreci ile aynı atık suyun arıtımını incelemişler ve 400 ve 200 mg/L Fe^{+2} ve H_2O_2 şartlarında %88.7 ve %80.9 KOİ ve renk giderimleri elde etmişlerdir. Aynı şartların aynı sıra ile 100'e 1200 mg/L yapılması ile elde edilen giderim verimleri sırası ile KOİ ve renk için %95 ve %95.7 olarak elde edilmiştir.

2.4. Deneme Tasarımlarının Kullanıldığı Çalışmalar

Deneme tasarımları (DT), deneyleri tekrar etme zorunluluğunu kaldırmak, hata payını minimize etmek ve maliyeti düşürmek adına geliştirilmiş deneysel planlama metotlarıdır (Das vd, 2014; Azri, 2016; Buyukada, 2016a). Deneme tasarımlarının nasıl kullanılacağı ve nasıl seçileceği hem kullanılacak sürece ve işletme şartlarına hem de çalışmada etkisi incelenecek açıklayıcı değişken sayısına ve çevre şartlarına bağlı olarak değişmektedir (Şekil 2.6).

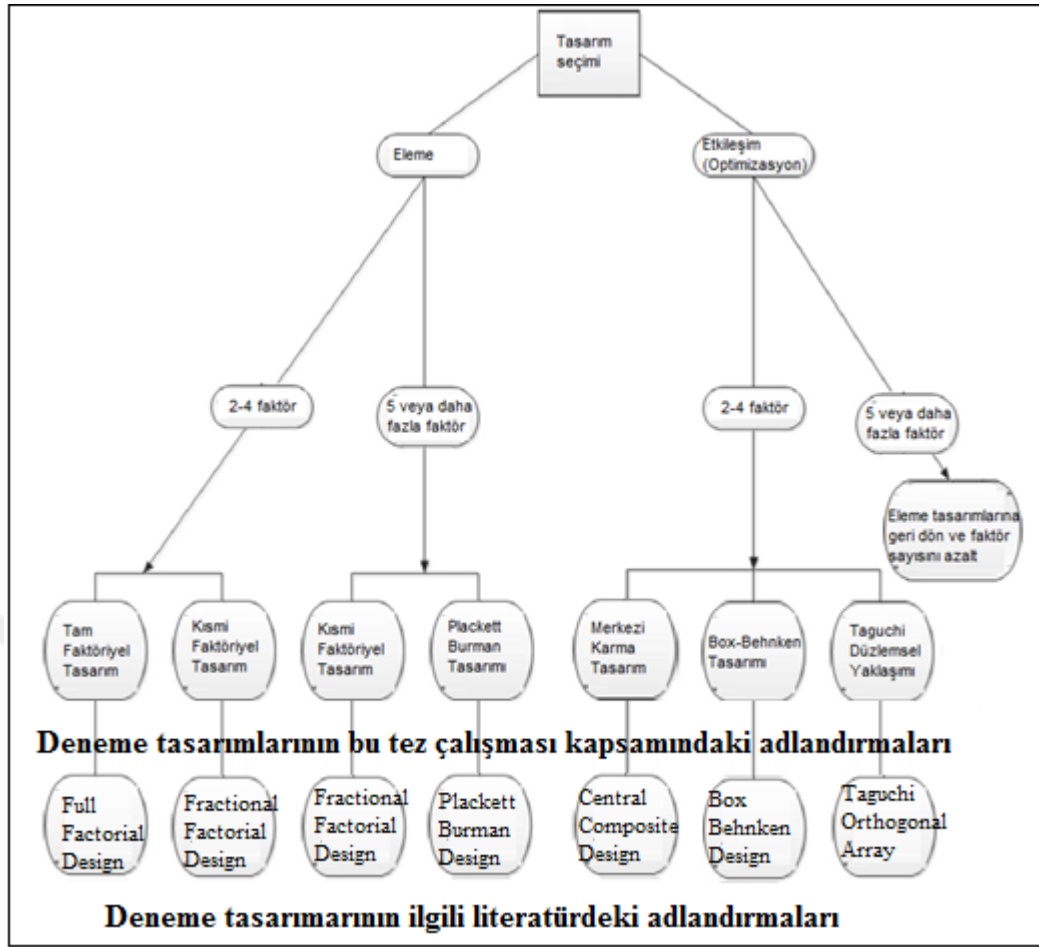


Şekil 2.6. DT'nin şematik ifadesi.

Dolayısı ile DT'lerinin türlerinin ve hangi amaçla nasıl kullanılacağına bilinmesi gerekmektedir. DT, eleme ve etkileşim tasarımları olmak üzere kendi aralarında iki gruba ayrılmaktadırlar (Sakkas vd., 2010, Asha ve Kumar, 2012). Etkisi incelenecek açıklayıcı değişken sayısı beş ve üzerinde ise birer eleme tasarımı olan kısmi faktöriyel tasarım (KFT) veya Plackett Burman tasarımı (PBT) kullanılabilir. Ancak bu sayısının 2 ile 4 arasında olması durumunda faktöriyel tasarımın her iki türünden de yararlanılabilir, yani tam faktöriyel tasarım (TFT) ve KFT. Esas amaç açıklayıcı değişken sayısını mümkünse en az 2 en fazla 4 olacak şekilde indirmektir. Bu amaçla kullanılan eleme tasarımları açıklayıcı değişkenlerin genellikle doğrusal etkilerini belirlenen güven aralığında inceleyip anlamlı ya da anlamsız olduğuna karar vermektedir (Sakkas vd., 2010, Asha ve Kumar, 2012).

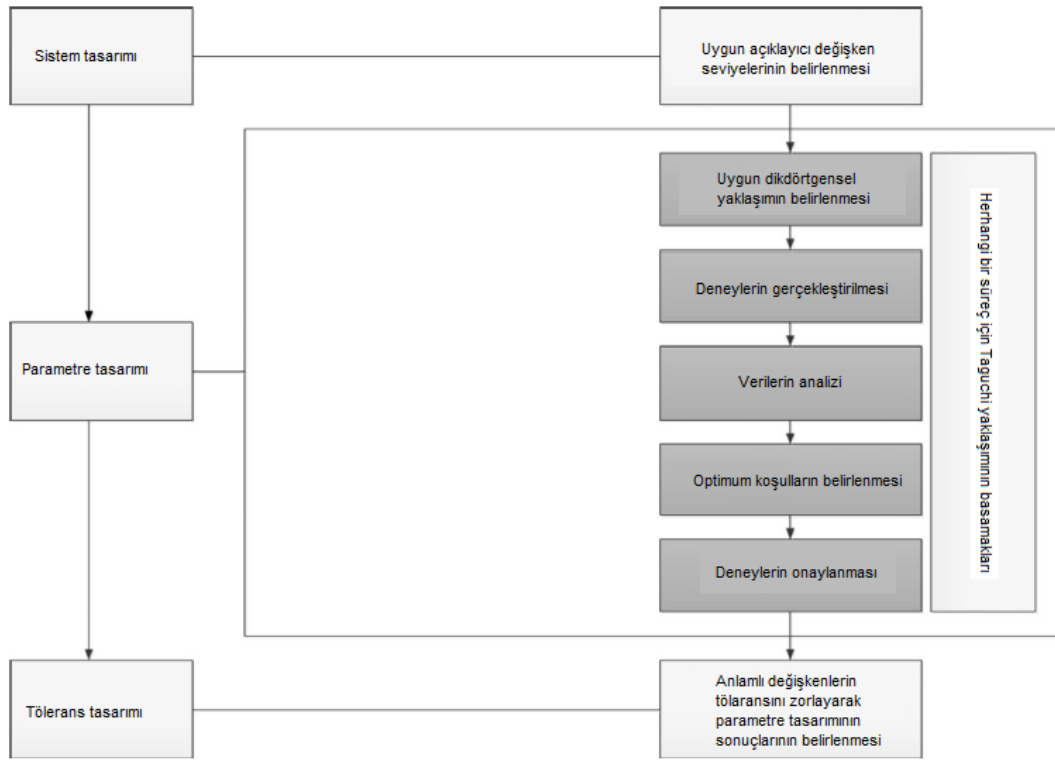
Bu bağlamda eleme tasarımlarının avantaj ve dezavantajları eş zamanlı olarak irdelenmeli ve seçim bu kıstaslara göre yapılmalıdır. TFT, açıklayıcı değişkenlerin temel etki ve etkileşimlerini belirlemede kullanılabilir; ancak, açıklayıcı değişken sayısının artması deney numarasının geometrik olarak artmasına yol açar. Bu nedenle, tasarım, on altıdan fazla faktörün taranması için uygun değildir (Sakkas vd., 2010). KFT, eşit sayıda faktör için TFT ile karşılaştırıldığında daha az sayıda deney gereklidir; ancak, faktör etkileşimlerinin etkisi çok sınırlıdır ve bu tasarımda bir hata ölçüsü olmadığından yanlış yönlendirilebilmektedir (Sakkas vd., 2010). PBD, çok sayıda değişkeni çok az sayıda deneysel yolla incelenebilmekte, ancak; sadece önemli ana etkinin belirlenmesinde yararlıdır ve herhangi bir ikili etkileşimi irdelenebilmektedir (Asha ve Kumar, 2012).

Açıklayıcı değişkenlerin birbirleri ile olan ikili etkileşimleri ya da ikinci mertebe üssel etkileri ise ikinci tür DT olan etkileşim tasarımları ile irdelenebilmektedir (Asha ve Kumar, 2012). Bu bağlamda birer cevap yüzey metodu (CYM) olan merkezi karma tasarım (MKT) ve Box Behnken tasarımı (BBT) ile diğer bir tür eleme tasarımı olan Taguchi düzlemsel yaklaşımı (TDY) en sık kullanılan etkileşim tasarımlarıdır (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. DT'lerin gruplandırılması (Sakkas vd., 2010).

Taguchi, parametre tasarımı ve tolerans tasarımıyla oluşan sağlam bir tasarım elde etmek için üç adım önermiştir (Taguchi, 1986, 1987). Parametre tasarımı sıklıkla ilgili sürecin daha sağlam veya optimize edilmiş çıktısı için kullanılır. Süreçte kullanılan Taguchi tasarım aşamaları Şekil 2.8'de verilmiştir. Taguchi yaklaşımı, deneysel işlemleri belirlemek için dikdörtgensel diziyi kullanır. Değişkenlerin sayısını ve etkileşimlerini incelemek için gerekli olan serbestlik dereceleri dikdörtgensel dizinin boyutunu belirler. Kontrol faktörleri veya etkileşimleri, dikdörtgensel dizi sütunlarına tekabül eder ve gerçekleştirilen deneyler satırlarla uyumludur. Dikdörtgensel dizi bir anda birçok faktörü göz önüne alabilir ve bu tasarımda deney sayısı faktör sayılarıyla artar. İşlemin ve ana faktörlerin ve optimal girdi seviyelerinin anlaşılması tek bir Taguchi yöntemi ile analiz edilebilir. Fakat uygun sonuç çoğunlukla, araştırmacılar tarafından genellikle belirlenen en etkili faktörlerin ve seviyelerinin seçimine bağlı olacaktır (Taguchi, 1986, 1987).



Şekil 2.8. TDY'nin şematik ifadesi.

Box ve Wilson, merkezi karma tasarımı (MKT) 1951 yılında geliştirmişlerdir (Box ve Wilson, 1951). Hem doğrusal hem de ikinci mertbe modellerin bu tasarım tarafından belirlenmesine izin verilmektedir. Daha az sayıda deney ile karşılaştırılabilir sonuçlar sağlayan MKT, üç seviyeli tam faktöriyel tasarımın iyi bir alternatifi olarak değerlendirilmektedir (Box ve Wilson, 1951, Box ve Bisgaard, 1988, Montgomery, 1991). MKT, genelde iki katlı ek eksen veya yıldız noktaları ($\pm\alpha$) ve deneysel tasarımın en az bir merkez noktası olan TFT veya KFT (Box ve Bisgaard, 1988, Montgomery, 1991) olarak tanımlanabilir. Eksensel tasarım ve merkezi tasarım, yüksek düzeyin üstünde ya da düşük seviyenin altındaki seviyeleri alabilecek bir faktör hariç, iki düzeyli TFT için hemen hemen aynıdır. MKT'ın deney sayısı şu şekilde hesaplanmaktadır (2.1).

$$N = k^2 + 2k + C_p \quad (2.1)$$

Burada C_p , merkez noktanın çoğaltılmış sayıdır ve k ise faktör sayıdır. Box-Behnken tasarımı (BBT), Box ve Behnken tarafından MKT'a alternatif olarak 1960 yılında geliştirilmiştir (Box ve Behnken, 1960). Bu tasarım üç seviyeli bir faktöriyel tasarımdan ve kübik olarak tam dönebilen veya neredeyse dönebilen bir tasarım sunmak ve aşırı köşelerden kaçınmak için eksik blok tasarımından oluşur. BBT'na ait deney sayısı şu şekilde hesaplanır (2.2).

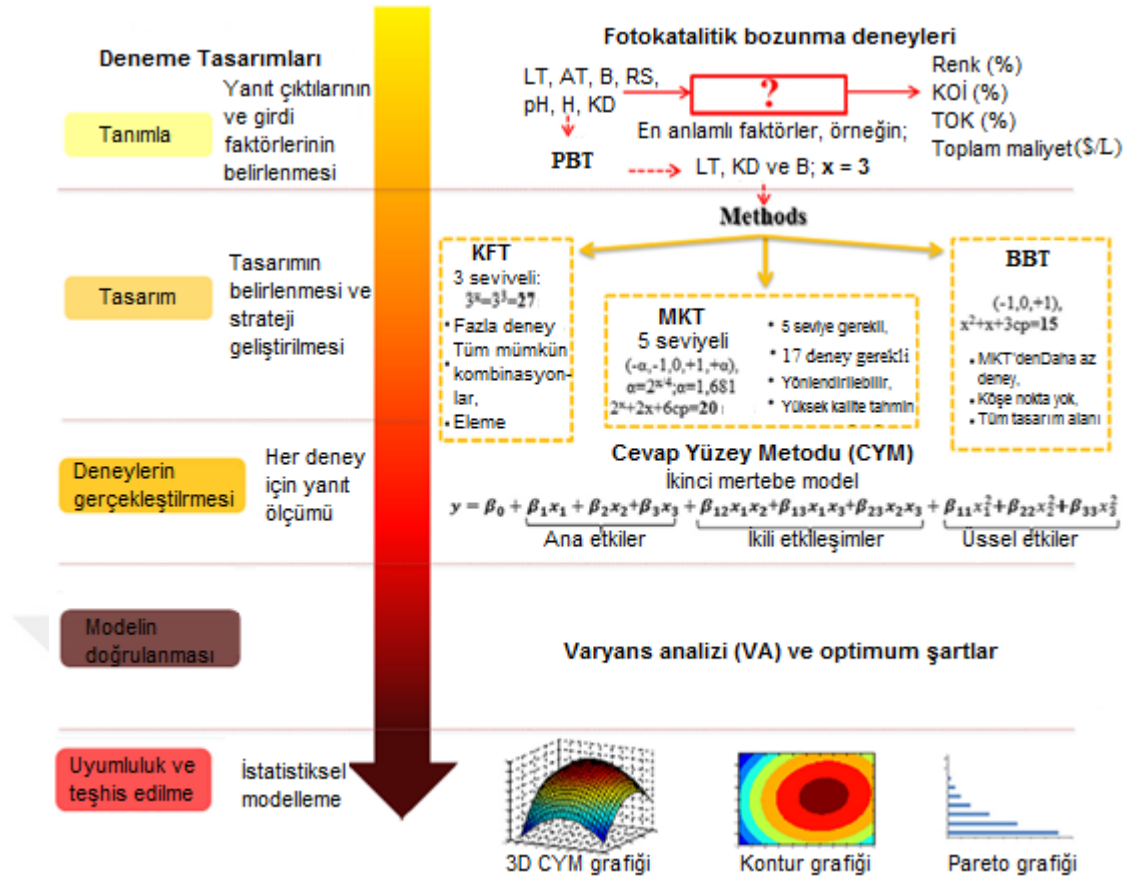
$$N = 2k \times (k-1) + C_o (2.2)$$

Burada k faktör sayıları ve C_o merkezi nokta sayılarıdır. BBT, aşırı koşullardaki deneylerden kaçınmak için yararlıdır, çünkü her faktör için en üst düzey ve en düşük seviyedeki kombinasyonlar BBT'ye dahil edilemez. BBT'de tatmin edici olmayan sonuçlar önlenebilir. BBT'nin yanıt üzerindeki belirgin etkileri varyans analizi (VA) ile incelenebilir ve optimal yanıt, modelin türevlerini hesaplayan regresyon modeli ile belirlenebilir. MKT, BBT'den daha fazla faktör düzeyine sahiptir, bu nedenle BBT, MKT'nin ekonomik bir alternatifi olarak kullanılabilir.

Literatürde eşine az rastlanır bir biçimde kullanılan etkileşim tasarımlarından birisi de D-optimal (D-opt) tasarımıdır. Hoogerbrugge vd. (2003), solucanlardan polisiklik aromatik hidrokarbonlar çıkardıkları ve etkili süper kritik ekstraksiyon parametrelerinin optimizasyonu amacıyla D-opt kullanmışlardır. 15 polisiklik aromatik hidrokarbon (PAH) verimi, sıcaklık, basınç, yakalama sorbent miktarı, akış ve ekstraksiyon zamanı (dinamik) olmak üzere beş faktör kullanılarak optimize etmişlerdir.

Buraya kadar olan DT hakkındaki genel bilgiler, nasıl oldukları, nerede, niçin ve ne zaman kullanıldıklarını net bir biçimde ifade etmektedir. Bu bilgiler ayrıca küçük bir örnek üzerinden şu şekilde özetlenebilir (Şekil 2.9). Şekil 2.9, fotokatalitik bozunma sürecini rastgele bir örnek üzerinden DT ile ilişkilendirerek DT'lerin işleyiş mekanizmasını ifade etmektedir.

İlk olarak yapılması gereken etkisi incelenecek açıklayıcı değişkenlerin ve bunların ne(ler) üzerine etkisinin araştırılacağıdır, yani yanıt değişkenlerin belirlenmesidir. Bu noktada örnekteki açıklayıcı değişkenler; lamba tipi (LT), atık su tipi (AT), bulanıklık (B), katalizör dozu (KD), başlangıç pH'sı (pH), havalandırma (H) ve reaksiyon süresidir (RS). Sürecin çıktıları olan yanıt değişkenleri ise renk, KOİ ve TOK giderimleri (%) ile birim atık su üzerinden toplam giderim maliyetidir (\$/L).



Şekil 2.9. Fotokatalitik bozunma süreci üzerine DT uygulamasının örnek gösterimi (Sakkas vd., 2010).

Daha sonra hangi eleme ve etkileşim tasarımlarının kullanılacağını, sürecin ve çevresel şartların hangi DT'ye uygun olduğunu belirlemek ve buna müteakip deneyleri gerçekleştirmek yapılması gerekenlerdir. Bir eleme tasarımı olan PBT kullanılarak bu yedi açıklayıcı değişkenin etkisinin eş zamanlı olarak irdelendiği ve sonunda LT, KD ve B'nin etkili olduğu örnekte kabul edilmiştir. Birer CYM olan MKT ve BBT için avantaj ve dezavantajları kıyaslar, sonraki adımların sırası ile üç boyutlu CYM grafikleri, kontur grafikleri veya pareto grafikleri ile açıklayıcı değişkenlerin görsel olarak ifade edilmesi gelmektedir. Bu grafikler sırası ile ikili etkileşimlerin, doğrusal etkilerin ve önem sırasının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Son olarak görsel sunumların VA ile yorumlanması yapılmaktadır. Bu bağlamda, kanatlı et sektörü ile dolaylı olarak bağlantılı ya da fotokatalitik bozunma süreci ile doğrudan bağlantılı olup DT'lerini inceleyen çalışmalar takip eden kısımda verilmiştir.

2.4.1. Fotokatalitik Bozunma ve DT'lerinin Birlikte Kullanımı

Azri vd. (2016) polibromobin difenil eterin fotokatalitik bozunmasını kendi sentezledikleri Cu/Ni/TiO₂/PVC katalizörü ile incelemişlerdir. Deneyler esnasında bir CYM tekniği olan BBT tasarımından yararlanmışlardır. TiO₂ yüklemesi, katalizör dozu ve kalsinasyon sıcaklığını açıklayıcı değişkenler, süreç verimini ise yanıt değişkeni olarak belirlemişlerdir. BBT sonucunda optimum açıklayıcı değişken seviyelerini aynı sıra ile %83, 20mg ve 800°C olarak belirlemişler ve bu değerlerde %64.63 giderim verimi elde etmişlerdir. Ayrıca türettikleri model yanıt değişkenindeki değişkenliği %92.47 oranında açıklayabilmiştir.

Shen vd. (2016) TiO₂ destekli fotokatalitik bozunma ile dielektrik bariyerli yükleme plazmasını kombine bir süreç haline getirip reaktif sarı 167 (RY167) boyasını sulu çözeltilerden gidermeyi hedeflemiştir. HAc/Ti(OBu)₄, H₂O/Ti(OBu)₄, kalsinasyon sıcaklığı ve süresi merkezi karma (MKT) tasarımında kullanılacak açıklayıcı değişkenler olarak belirlenmiştir. CYM optimizasyonu neticesinde bu değerler aynı sıra ile 2, 3.42, 577.6°C ve 3.25 saat olarak belirlenmiştir. Bu şartlarda sentezlenmiş 0.1g/L TiO₂ ile kombine süreçte %83.5'lik bir giderim verimine ulaşmışlardır. Bu değer, plazma sürecinin yalnız kullanıldığı duruma göre yaklaşık %17'lik bir artış sağlamış ve bu durum da TiO₂ destekli fotokatalitik bozunmanın sulu çözeltilerden boya gideriminde ki pozitif etkisini ortaya koymuştur.

Rasoulifard vd. (2016), bazik kırmızı 46 (BR46) boyasını kendi sentezledikleri Zn₂SnO₄ katalizörü ile sulu çözeltilerden gidermeyi hedeflemiş ve bu doğrultuda bir CYM tekniği olan MKT tasarımından yararlanmışlardır. İşletme şartları olarak katalizör dozu, başlangıç boya konsantrasyonu, ışık kaynağı ile çözelti arasındaki mesafe ve başlangıç pH'ını belirlemişler ve bunların optimum değerlerini 110 mg/L, 17 mg/L, 10 cm ve 8.5 olarak bulmuşlardır. Bu şartlarda MKT 95.3% giderim verimi önerirken validasyon deneyleri neticesinde 94.7% olarak bulmuşlardır. Sonuçlar CYM'nin optimizasyonda ne kadar başarılı olduğunu göstermiştir. Son olarak ikinci mertebe çoklu doğrusal olmayan regresyon (ÇDOR) denklemi türetmişler ve bu denklemin yanıt değişkenindeki değişkenliği açıklama gücünü 98.4% olarak belirtmişlerdir.

Yu vd. (2015) elektro-tortu yaklaşımı temelli yöntem ile ince film Cu_2O sentezlemişler ve bu maddenin Metilen Mavisi (MM)'nin fotokatalitik bozunmasındaki rolünü incelemişlerdir. Sıcaklık (15-30 °C), H_2O_2 dozu (0.1-0.4 ml), pH (3.5-6.5) ve başlangıç MM konsantrasyonu (10-30 mg/L) açıklayıcı değişkenlerinin bireysel ve etkileşimsel etkilerini incelemek için cevap yüzey metodu (CYM)'den faydalanmışlardır. 30 mg/L başlangıç MM konsantrasyonu, 28 °C, pH 3.5 ve 0.24 ml H_2O_2 dozunu optimum şartlar olarak belirlemiş ve optimum şartlarda MB'nin üç saat içerisinde %98.2'lik bir giderime ulaştığını belirtmişlerdir.

Shaykhi ve Zinatizadeh (2014) çalışmalarında TiO_2 katalizörü eşliğinde 365 nm UV ışık altında sentetik amoksisilinin (AMX) atıksularının bozunmasını CYM yardımı ile incelemiştir. Yanıt değişkenleri olarak; KOİ giderim verimi, spesifik KOİ giderim hızı, BOI_5/KOI oranı ve son pH değeri seçilmiştir. Açıklayıcı değişkenler olarak KOİ (400-2000 mg L^{-1}), reaksiyon süresi (20-240 dk) ve başlangıç pH'sı (3-11) seçilmiştir. En yüksek BOI_5/KOI oranını; 2000 mg/L başlangıç KOİ ve pH 3 değerinde 0.43 olarak elde etmişlerdir. En yüksek KOİ giderim verimini fotokatalitik sürecin yalnız olduğu durumda %20, sıralı havalandırmanın olduğu durumda %38 olarak bulmuşlardır. Ozonlama ve ozon/ H_2O_2 sisteminde ise sırası ile %53 ve %58 KOİ giderim verimi elde edilmiştir.

Metil Mavisi (MB) boyasının gümüş kaplı TiO_2 katalizörlüğünde UV ışık altında kesikli bir sistemde fotokatalitik bozunmasının incelendiği bu çalışmada Sahoo ve Gupta (2012), giderim verimi üzerine; pH (5-9), katalizör dozu (0.5-1.5 mg/L) ve boya konsantrasyonunun (25-100 ppm) etkilerini incelemişlerdir. Üç faktörlü ve üç seviyeli Box–Behnken deney (BBT) tasarımı ile 15 setlik bir deneysel çalışma planı tasarlamışlar ve elde ettikleri sonuçların cevap yüzey yöntemi kullanılarak renksizleştirme ve mineralizasyon verimini nicelleştirmişlerdir. 0.99 g/L katalizör dozu, 57.68 ppm boya konsantrasyonu ve 7.76 pH değerlerini optimum parametreler olarak belirlemişlerdir. Bu parametrelerde gerçekleştirilen deneyler sonucunda %95.97 renksizleştirme ve %80.33 mineralizasyon gerçekleştirilmiştir.

Parilti vd. (2011) cevap yüzey yöntemi (CYM) ile hümik asitin (NOM) fotokatalitik oksidasyonuna etki eden işletme şartlarını incelemiştir. pH 7, 2 mg/L TiO_2 ve 30 mg/L NOM şartlarında %89.3'lük çözünmüş organik madde miktarına

(ÇOM) ulaşılmıştır. pH'nın 5'e ve katalizör yükünün 1 mg/L'e düşürülmesi ile NOM'nin tamamen giderildiği belirtilmiştir.

Chong vd. (2010) uzun lif köklü bir yapıya sahip H-titanat nanofiber katalizörlerini 10-20 nm boyutundaki anataz TiO₂ kristalleri kullanarak sentezlemişler ve sentezledikleri katalizörü Kongo Kırmızı (KK) boyasının fotokatalitik bozunma reaksiyonunda kullanmışlardır. TDY ve MKT tekniklerini birlikte kullanarak giderim verimi üzerine; katalizör yükü, pH, havalandırma hızı ve başlangıç boya konsantrasyonunun etkilerini irdelemişlerdir. L₉ desenli TDY deney tasarımı sonuçları doğrultusunda pH'nın, başlangıç KK konsantrasyonunun ve havalandırma hızının giderim üzerinde etkili olduğu; ancak, aynı durumun katalizör yükü için geçerli olmadığı; ancak, katalizör yükünün pH ve havalandırma hızı ile birlikte ikili anlamlı etkileşimlerin olduğu belirtilmiştir.

2.4.2. Kanatlı Et Kesimhanesi Atık Sularına DT'lerin Uygulanması, Optimizasyon ve Modelleme

Nam vd (2015) kanatlı et kesimhanesi atık sularının arıtmadan sonra bile yüksek oranda Metoprolol (MTP) içerdiğini belirtmişler ve çalışmalarında MTP'ü klorleştirme, UV-C fotolizi ve iki sürecin birlikte kullanıldığı kombine süreçler ile gidermeye çalışmışlardır. Deneysel tasarımda etkisini inceledikleri faktörler ve seviyeleri; UV yoğunluğu (1.1-4.4 mW/cm²), klor dozu (1-5 mg Cl₂/L), pH (2-9) ve çözünmüş organik maddedir (ÇOM, 1-4 mg C/L). ÇOM, OH radikallerini almasından dolayı kombine süreç ile MTP gideriminde en önemli faktör olarak belirlenmiştir. 4.4 mW/cm² UV yoğunluğu, 5 mg Cl₂/L, pH 7 ve 0.8-1.1 mg C/L değerleri optimizasyon şartları olarak belirlenmiş ve bu şartlarda %78.9'luk MTP giderimi sağlamışlardır.

Kanatlı et kesimhanesi atık sularında sık rastlanan bir kimyasal olan klorheksidinin UV ışık ve TiO₂ katalizörlüğünde foto mineralizasyonu Das vd. (2014) tarafından CYM kullanılarak incelenmiştir. UV yoğunluğu, ortam pH'sı ve substrat katalizör oranı açıklayıcı değişkenler olarak seçilmiştir MKT'da yapılan analizler neticesinde substrat katalizör oranı 1.25, UV yoğunluğu 87.5 µW/cm² ve pH 10.5 değerleri optimum şartlar olarak belirlenmiş ve bu şartlarda %99'luk çekicilik faktörü ile %67.5'lik bir giderim elde edilmiştir.

2.5. Belirsizlik Analizi

Klasik konvansiyonel veya İOS ile atık su arıtımı, farklı disiplinlerin uzun yıllardır ilgilendiği ve halen araştırmaya devam ettiği bir alan olsa da bu alandaki çalışmaların istatistiksel analizler ile bir araya getirilmesinin geçmişi çok uzak değildir. Yanıt değişkenlerindeki rassal varyasyonların izah edilemeyen kısımlarını tanımlamak için kullanılan belirsizlik ve onu nicelleştirme metodu olan belirsizlik analizleri, hâlihazırda var olan endüstriyel uygulamalara nispeten uyarlanmaya çalışılmışsa da henüz pilot ölçekli laboratuvar uygulamalarına olan bir çalışma söz konusu değildir.

Belirsizlik genel olarak aleoretik ve epistemik olmak üzere iki türde sınıflandırılmıştır (Pan ve Pandey, 2016). Aleoretik (istatistiki) belirsizlikler, aynı deneyin çoklu koşullarında farklı olan bilinmeyen değişkenlerden kaynaklanmaktadır. Epistemik (sistematik) belirsizlikler, modelde olası tüm parametrelerin etkilerini ihmal ettikleri için ortaya çıkmaktadır. Genellikle belirsizlik nicelleştirme teknikleri, epistemik belirsizliğin azaltılmasına yöneliktir. Mevcut yöntem jeneriktir ve gürültü varyansının büyüklüğünün nasıl tanımlandığına bağlı olarak bu iki etkiyi de içerebilir. Örneğin, deneylerdeki rassal olmayan ölçüm değişkenliği nedeniyle gözlemlerin kendileri gürültülü olabilir. Böyle bir durumda model, aleoretik belirsizlikleri yansıtacaktır. Bununla birlikte, sadece dokuz giriş parametresi modele dâhil edilmiş ve diğer gereksiz değişkenler ihmal edildiğinden, bunu dâhil etmek için biraz daha fazla gürültü varyansı eklemek mümkündür (aleoretik belirsizlik nedeniyle bunun üstünde ve üzerinde). Sonuçta, bir mühendislik perspektifinden en önemlisi, tahminin belirsizliği ve doğruluğudur. Bu, mevcut yöntemle uygun şekilde ele alınmaktadır (Pan ve Pandey, 2016, Zhang vd., 2016, Chaudhary ve Hantush, 2017). Belirsizlik analizinin nasıl uygulanabileceğine ve nispeten sonuçlarının nasıl okunması ve/veya yorumlanması gerektiğine katkı sunabileceği düşüncesiyle bazı güncel çalışmaların özetleri takip eden kısımlarda sunulmuştur.

Evrendilek vd. (2016) atımlı elektrik alan ile muamele edilmiş şeftali nektarının duyuşal ve fiziksel özelliklerinin bir fonksiyonu olarak aroma aktif bileşiklerdeki stokastik değişkenliği ve belirsizliğini modellemişlerdir. 28 farklı aroma bileşiğinin önce optimum istatistiksel dağılımları belirlenmiş, sonrasında ise Monte

Carlo simülasyonu (MC) rassal değerler üretilmiştir. Ancak bu çalışmada fiziksel ve duyuşal özelliklerdeki belirsizlikler incelenmemiştir.

Pan ve Pandey (2016), çalışmalarında akışkan yatak gazlaştırma ünitesinin iki yanıt değişkenini ifade etmeye çalışırken aynı zamanda bu modellerin kestiricilerinin içerdikleri belirsizlikleri de bir araya getirmeyi hedeflemişlerdir. Çalışmalarında Bayesian temelli Monte Carlo simülasyonunu (MCMC) kullanılmışlardır. Çalışmaları hem hangi açıklayıcı değişken(ler)den belirsizliğin kaynaklandığı noktasında hem de Bayesian metodunun uygulanabilmesi için model içerisinde en az ya da en fazla ne kadar kestirici olması gerektiği noktasında önemli bilgiler içermektedir

Buyukada (2016a), çalışmasında fıstık kabuğu ile kömürün yanmasını, ısıtma hızı, sıcaklık ve karışım oranının bir fonksiyonu olarak incelemiş ve kütle kaybı ile kütle kaybı hızını bunların bir fonksiyonu olarak modellemiştir. Türettiği çoklu doğrusal olmayan regresyon modellerinden sonra, rastgele türettiği 100,000 veriye göre modeli ve sonuçları MC ile incelemiştir. Ancak yanıt değişkenleri için her hangi bir uygulama yapmamıştır. Sonuçların yanıt değişkeni olan kütle kaybı (%) için $\pm\%10$ hata içerdiğini belirtmiştir.

Zhang vd (2016), hidrolojik bir modeldeki belirsizliği incelemek için çok seviyeli faktör temelli Markov Chain Monte Carlo metodundan yararlanmışlardır. Hâlihazırda, MCMC zaten MC'nun bir üst düzeyi iken MCMC'nu yeni bir yazılım ile yeni bir belirsizlik analizine dönüştürmüşlerdir. Uzun süreli ve çok fazla verili bu model neticesinde yeni belirsizlik analizi tekniğinin emsallerinden daha başarılı olduğunu belirtmişlerdir.

Buyukada (2017a), fıstık kabuğu ile kömür karışımlarının birlikte yanmasını incelediği çalışmasında kütle kaybı yüzdesini, BBT ile yaptığı çalışmasında istatistiksel olarak modellemiş ve belirsizlik analizi uygulamıştır. Rastgele 100,000 simülasyon verisi ile test ettiği modelin yanıt değişkeni olan kütle kaybı için standart hatanın $\pm\%5$ olduğunu belirtmiştir. Sonuç olarak deterministik yöntemlerle yakalamanın mümkün olmadığı belirsizlikleri tanımlamak için Monte Carlo simülasyonunun etkin bir yöntem olduğunu belirtmiştir.

Buyukada (2017b), ceviz kabuğu ve linyit kömürünün birlikte yanmasını incelediği çalışmasında kısmi hassasiyet analizi içerikli bir belirsizlik analizi uygulamıştır. İlk önce 100,000 rastgele veri ile belirsizliğin muhtemel kaynaklarını görsel olarak ifade etmeye çalışmıştır. Sonuçlar, belirsizliğin çok sık aralıklarla ölçüm alınan sıcaklık değerlerinden kaynaklandığını, karışım oranının nispeten daha az belirsizlik içerdiğini ve ısıtma hızının ise belirsizliğe neden olmadığını göstermiştir. Nokta-çizgi grafikleri ile sonuçları irdeleyen Bayesian yaklaşımının oldukça iyi bir belirsizlik analizi metodu olduğunun altını çizmiştir.

Liu vd. (2017), kağıt fabrikası çamuru ile tekstil boyama çamurunun birlikte yanma sürecini karışım oranı, ısıtma hızı ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak incelemişler ve modellemişlerdir. Yanıt değişkeni olarak belirledikleri kütle kaybı oranı (%) ve hızını (mg/dk) inceledikleri çalışmalarında son olarak yanıt değişkenlerindeki belirsizliği ifade etmek için MC kullanmışlardır. Sonuç olarak deterministik ampirik modellerin stokastik belirsizlik analizinde ortalama kütle kaybında %15.6, ortalama kütle kaybı hızında ise %50 oranında bir belirsizlik tespit etmişlerdir.

Liu vd. (2017), arıtma çamuru ve su sümbülünün birlikte yanmasını inceledikleri çalışmalarında, en iyi uyumlu regresyon modeline MC uygulayarak belirsizlikleri ifade etmeye çalışmışlardır. Modeldeki tek sürekli kestirici olan sıcaklık için türettikleri dataların 2-parametrelili Weibull dağılımına uyduğunu belirledikten sonra 50 kez rastgele data türetmişlerdir. Sonuçta, modelin tahminlerindeki ortalama kütle kaybı (%), ortalama ölçülenden sadece %1 daha yüksek, MC ile elde edilenden ise %19 daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Chaudhary ve Hantush (2017), çalışmalarında göl oksijeninin geri kazanımı üzerine likelihood ve Bayesian Monte Carlo analizleri uygulayarak sıra dışı bir belirsizlik kıyaslaması yapmışlardır. 1990 yılına ait verileri model kalibrasyonu, 1991 yılına ait verileri ise validasyon için ayıran Chaudhary ve Hantush (2017), likelihood metodunun aksine Bayesian yaklaşımının belirsizlikleri ifade etmede daha başarılı olduklarını belirtmişlerdir. Laboratuvar koşullarından ziyade bu çalışmanın gerçek sistemlerden elde edilmiş verilere uygulanmış olmasını ve elde ettikleri bu iyi sonuçları bir dönüm noktası olarak değerlendirmişlerdir.

2.6. Boşlukların Değerlendirilmesi

Bu kısma kadar olan güncel literatür özeti, kanatlı et kesimhanesi çıkış sularının fotokatalitik bozunma ile gideriminin, (modifiye edilmiş) TiO_2 eşliğinde incelendiği çalışmaları özetlemektedir. Bu çalışmalarda toplam katı, toplam uçucu katı ve toplam sabit katı gibi yanıt değişkenleri üzerinde kesikli sistem fotokatalitik bozunmanın son derece başarılı olduğu belirtilmiştir. Nispeten maliyet analizi de bazı çalışmalarda ele alınmış; ancak, renk, kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve toplam organik madde (TOK) giderimi üzerine herhangi bir çalışma yapılmadığı gibi herhangi bir istatistiksel deney yaklaşımı ya da metot da uygulanmamıştır.

İlaveten literatür özeti, kanatlı et kesimhanesi çıkış sularının arıtımında doğrudan fotokatalitik bozunma sürecinin kullanıldığı çalışmaların çok az olduğunu göstermiştir. Öte yandan gerek fotokatalitik-kombine süreçlerle gerekse herhangi başka bir süreçle bu atık suların arıtımını incelerken DT'larından yararlanan çalışmalar yok denecek kadar azdır. Genel belirsizlik tanımı, sınıflandırılması ve temel bilgilerden sonra gerçekleştirilen literatür taramasına sonucunda kanatlı et kesimhanesi atık suları, fotokatalitik bozunma ve deneme tasarımlarını belirsizlik analizleri ile bir araya getiren herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

Sonuç olarak literatür araştırması;

- Gerek sentetik atık suların gerekse endüstriyel atık suların arıtımında bir İOS olan fotokatalitik bozunma sürecinin genellikle kullanıldığını,
- Fotokatalitik bozunma süreci ile DT bir araya getirildiği belli başlı bazı çalışmaların olduğunu,
- Fotokatalitik bozunma sürecinde araştırmacıların sıklıkla yeni tip katalizör sentezine odaklandıklarını,
- Diğer bir odak noktasının ise bozunma ürünlerinin tespitine dayalı reaksiyon mekanizmasının tespiti olduğuna dikkat çekmektedir.

Ancak aşağıda listelenen noktalar, ilgili literatürde halen büyük bir boşluk olarak göze çarpmaktadır:

- Kanatlı et kesimhanesi çıkış sularından renk, KOİ ve TOK giderimlerinin incelenmesi,
- Bu arıtma sürecinin ekonomik fizibilitesinin bir maliyet analizi ile irdelenmesi,
- DT'lerinin kullanımı ve nasıl seçileceği,
- Yüzeysel yerine kapsamlı istatistiksel modelleme,
- Optimizasyon,
- Optimizasyon sürecini test etmek için validasyon (doğrulama),
- Belirsizlik analizi.

Tüm bu bulgular neticesinde bu tez çalışmasının amaç ve kapsamı şu şekilde sıralanabilir:

- 1) Kanatlı et kesimhanesi arıtma tesisi çıkış sularının TiO_2 destekli fotokatalitik bozunma ile ileri arıtımında renk, KOİ ve TOK giderimleri ile toplam giderim maliyeti üzerine lamba tipi, atık su tipi, havalandırma, reaksiyon süresi, katalizör dozu, başlangıç pH'ı ve bulanıklığın etkilerini incelemek,
- 2) Birinci amacı iki farklı eleme (PBT ve KFT) ve dört farklı optimizasyon (BBT, MKT, TDY ve D-opt) tasarımları kullanarak test etmek,
- 3) İkinci amacın sonuçlarına binaen ilgili literatürde ilk defa bir DT optimizasyonu yapmak ve ilk defa DT seçimi için bir rehber oluşturmak,
- 4) İleri arıtma verimlerini ve toplam giderim maliyetini tahmin edebilen en iyi uyumlu çoklu doğrusal (olmayan) regresyon (ÇD(O)R) modellerini türetmek ve bağımsız veri setleri ile uyumluluğunu irdelemek,
- 5) Hem eş zamanlı hem de tek parametrelili sayısal optimizasyon ile optimum işletme şartlarını belirlemek, bu şartların doğrulamasını yapmak ve
- 6) Belirsizlik analizi ile türetilen modellerin ifade etmekte zorlandıkları kısımları açıklamaya çalışmaktır.

3. MOTİVASYON VE HİPOTEZLER

3.1. Motivasyon

Literatür araştırmasına göre fotokatalitik bozunma ile reaktif boyarmaddeler de dâhil pek çok organik kirleticiye ait renk ve KOİ giderimlerinin farklı şartlar altında araştırıldığı görülmektedir. Ancak, çok az çalışma DT, TOK giderimi, maliyet analizini ve belirsizlik analizlerini bir araya getirmiştir. İlaveten bu noktada kanatlı et kesimhanesi çıkış sularının ileri arıtımı üzerine bu konuları irdeleyen her hangi bir çalışma bulunmamaktadır. Aynı zamanda farklı DT'lerin mukayesesi ile ilgili herhangi bir çalışma olmadığı da görülmektedir. Klasik metotlar ile karşılaştırıldığında DT sonuçlardaki hata olasılığını en aza indiren, zaman ve maliyet yönünden tasarruf sağlayan bir uygulama olduğu aşikardır (Sakkas vd., 2009; Chong vd., 2010; Das vd., 2014).

Ayrıca önerilen sürece ait kapsamlı bir istatistiksel modelleme çalışmasına rastlanılmadığı gibi çalışmaların çok az bir kısmı istatistiksel modeller ile irdelenmiştir. Özellikle modelleme çalışmaları sıklıkla yanıt değişkenin ifade edilmesi ile sonlandırılmıştır. Ancak türetilen model ifadesinin açıklamakta eksik kaldığı yani ifade edemediği kısımlardan hiç bahsedilmediği gibi bu konuda ilgili literatürde bildiğimiz kadarı ile hala bir çalışma yoktur.

Bu bağlamda bu tez çalışmasının;

Endüstriyel atık suların ileri arıtımında renk ve KOİ analizlerini TOK ve toplam giderim maliyeti analizleri ile bir araya getirerek incelenmesinin günümüzün en önemli çevre sorunlarından biri olan atık suların ekosistem üzerindeki tahribatına hem kapsamlı hem de ekonomik boyutta çözüm aranmasına katkı sunacağı düşünülmekte,

Bu alanda ilk defa belirsizlik analizi uygulayarak literatürdeki bu büyük boşluğun nispeten kapanmasına yardımcı olacağı öngörülmekte ve

Benzer konularda çalışmakta olan veya çalışmayı planlayan araştırmacıların yolunu aydınlatıp onlara bir rehber olarak eşlik edebileceği ve onlara yeni ufuklar açabileceğine inanılmaktadır.

3.2. Hipotezler

Bu tez çalışması ile test edilecek hipotezler aşağıda listelenmiştir:

- H1) TiO_2 eşliğinde fotokatalitik bozunma ile kanatlı et kesimhanesi çıkış sularının daha da artırılabilmesi ve bu durumun ekosistem tahribatını azaltacağı düşünülmektedir; çünkü ilgili literatürde fotokatalitik bozunma süreci ile elde edilmiş iyi sonuçlar bulunmaktadır. Bu bağlamda süreçten önce ve süreçten sonra ilgili atık su numunelerinin renk, KOİ ve TOK giderimleri (%) birbirleri ile kıyaslanacaktır.
- H2) Ayrıca bu ileri arıtımın olası ekonomik çıktıları olacağı düşünülmektedir; zira yeniden kullanıma uygun endüstriyel suyun, satın alınma üzerinden bir kazanç sağlayabilmesi muhtemeldir. Bu bağlamda endüstriyel suyun birim bazda satın alınma maliyeti ile önerilen sürecin birim bazda su arıtma maliyetleri karşılaştırılacaktır.
- H3) Farklı ışık kaynaklarının, atık su tipinin, katalizör dozunun, reaksiyon süresinin, sıcaklığın, başlangıç pH'nın, havalandırmanın ve bulanıklığın süreç verimi üzerinde farklı etkileri olacağı düşünülmektedir. Dolayısı ile açıklayıcı değişkenlerin seviyeleri arasında anlamlı farklar olup olmadığı varyans analizine müteakip yapılacak Tukey çoklu karşılaştırma sonuçları ile belirlenecektir.
- H4) Deneme tasarımları kullanılarak veri toplama işleminin gerçekleştirilmesinin deney sayısına bağlı maliyeti düşüreceği öngörülmektedir. Çalışma sonunda önerilen DT yolu ile bir deneysel planlamanın deney sayıları kıyaslanarak bu hipotez test edilecektir.
- H5) Amaca yönelik avantajları düşünüldüğünde farklı DT'lerinin farklı yanıt değişkenleri için optimum sonuçları vereceği düşünülmektedir. Bu durum

sadece, ilgili literatürde ilk defa yapılacak olan, bir DT optimizasyonu ile belirlenebilir.

- H6) Benzer çalışmalara ışık tutması ve/veya endüstriyel işletmelere yardımcı olabilmesi adına deneysel verilere istinaden yanıt değişkenleri için tahmin gücü yüksek ÇD(O)R modelleri türetilecek, doğrulaması (validasyonu) yapılacak ve bağımsız veri setleri ile uyumluluğu test edilecektir. Uyumluluk (R^2) değerleri göz önüne alınarak bu hipotez test edilecektir.
- H7) Renk, KOİ ve TOK giderimleri ile toplam giderim maliyetinin hem eş zamanlı hem de sayısal tek parametrelili optimizasyonu yapılarak hem optimum işletme şartları belirlenmeye çalışılacak hem de bu iki farklı teknik birbiri ile kıyaslanacaktır. Bu bağlamda her iki optimizasyon tekniği ile elde edilen şartlarda deneyler gerçekleştirilerek hangisinin sonucu daha iyi kestirebildiği test edilecektir.
- H8) Son olarak, türetilen ÇD(O)R model ifadelerinin açıklayamadığı ve/veya açıklamakta zorlandığı kısımlar olacağı ön görülmektedir, zira dinamik bir sistemi %100 ifade edebilmek mümkün değildir. Bu bağlamda MC temelli belirsizlik analizi ile rastgele veriler türetilip ÇD(O)R tahmin ettirilecek ve elde edilen ortalama sonuçlar üzerinden standart hataya bağlı olarak belirsizlikler nicelleştirilecektir.

4. MATERYAL VE METOT

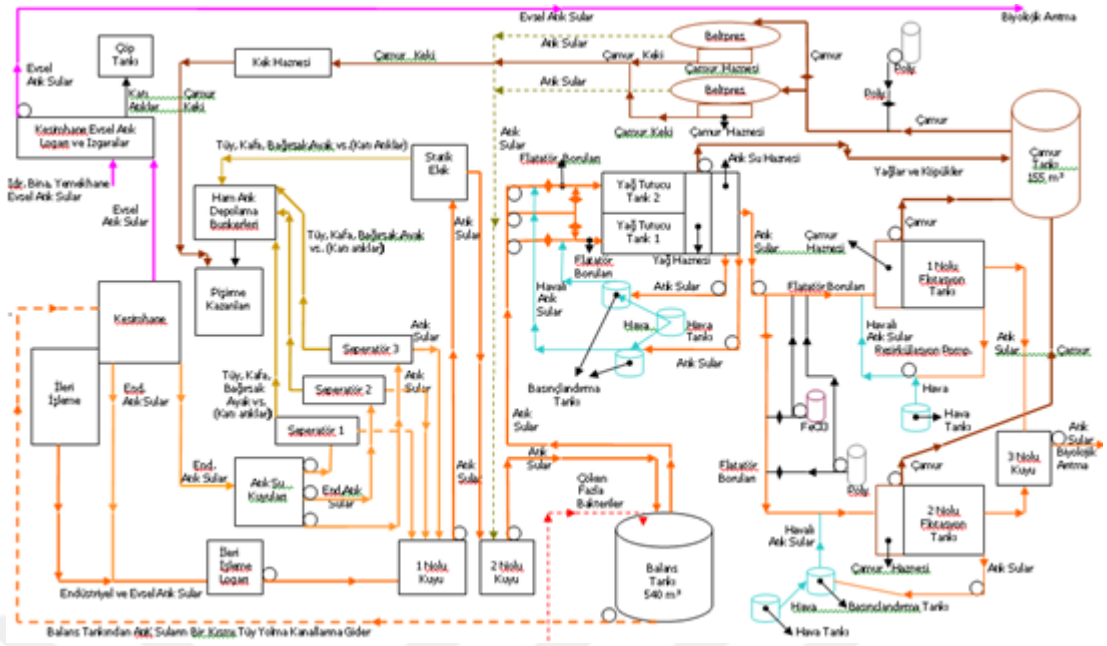
4.1. Kanatlı Et Kesimhanesi Arıtma Tesis Çıkış Suyu

Fotokatalitik bozunma ile arıtımı incelenecek olan kanatlı et kesimhanesi arıtma çıkış suları, hindi ve tavuk atık su numuneleri olmak üzere Bolu ilinde bulunan iki farklı yerel işletmeden temin edilmiştir. İlgili kesimhanelerin atık su arıtma tesisi çıkış sularına ait karakteristik özellikler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

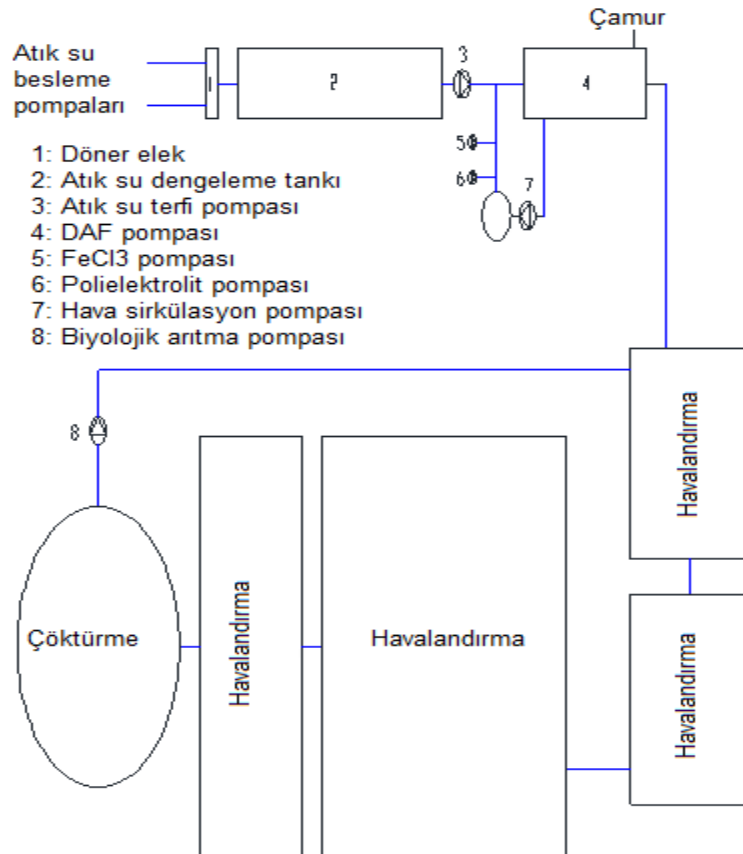
Çizelge 4.1. Arıtma tesisi çıkış sularına ait karakteristik özellikler ($n = 25$).

Özellikler	Atık su	
	Tavuk	Hindi
Maksimum dalga boyu (λ_{maks} , nm)	291±2	292±2
Absorbans (IU)	0.394±0.1	0.374±0.1
Renk (L)	9.16±1.1	10.434±1.6
Renk (a)	-0.02±0.01	0.226±0.04
Renk (b)	-2.18±0.02	-1.064±0.03
KOİ (mg/L O ₂)	136.7±10.1	116.2±11.2
TOK (mg/L)	102.8±9.1	96.4±9.7
Bulanıklık (NTU)	10.5±1.5	10.5±1.3
pH	7.6±0.1	7.5±0.1
İletkenlik (µS/cm)	1396±44	1375±45

Bu kesimhanelere ait atık su arıtma tesislerinin şematik gösterimleri ise Şekil 4.1’de verilmiştir. Atık su numunelerin karakteristik özellikleri başta mevsim, tesisin işletme şartları ve hayvanların beslenme alışkanlıkları olmak üzere pek çok değişkene bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Bu durum deneylerde bazen atık su numunesinin kaba bir süzme işlemine tabi tutulmasını gerektirdiği gibi bazen de doğrudan kullanımına müsaade eden bir ortam oluşturmuştur. Numuneler belirli dönemlerde (tesisin çalışma düzenine bağlı olarak) haftada bir ile ayda bir olarak her bir atık su için 10’ar L olmak üzere toplamda 20 L olarak temin edilmiştir.



Şekil 4.1. (a) Tavuk kesimhanesi atık su arıtma tesisinin şematik gösterimi.



Şekil 4.1. (b) Hindi kesimhanesi atık su arıtma tesisinin şematik gösterimi.

Dolayısı ile ortalama her üç numune alımında bir standart sapma hesaplanarak ortalama karakteristik değerler belirlenmeye çalışılmıştır (Çizelge 4.1.). Numuneler 4°C'deki soğutucuda muhafaza edilmiştir. İlâveten, ilgili atık sularda PO_4^{-3} , NO_3^{-} ve Fe^{+2} gibi KOİ ve TOK değerlerine etki edebilecek girişimlerin olmadığı öngörülmüştür.

4.2. Katalizör

Deneylerde, katalizör olarak titanyum dioksit (TiO_2) kullanılmıştır. Kullanılan TiO_2 , Polar Lab A.Ş.'den (Adana, Türkiye) temin edilmiştir. TiO_2 , UV ışık altında aktifleşebilen yarı iletken bir malzemedir. Bu durum, TiO_2 'nin bulunduğu çözelti ortamındaki bağımsız hidroksil radikallerinin varlığını artırmasını sağlar. Bu özellik, TiO_2 'in bu tez çalışmasında katalizör olarak kullanılmasında amacı ifade etmektedir. Anataz formunda ve %99.9 saflıkta olan TiO_2 deneylerde her hangi bir ön arıtma işlemine tabi tutulmadan doğrudan kullanılmıştır. Degussa, P25 vb. başka formları da bulunan TiO_2 nin, partiküler halde olmasından dolayı anataz formu seçilmiştir.

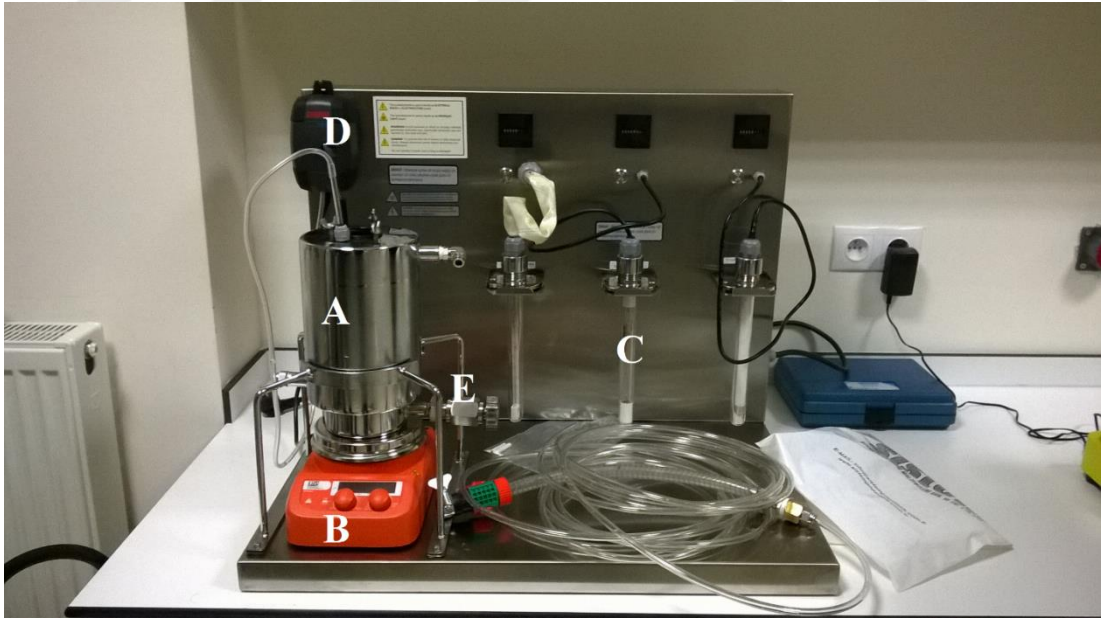
Literatürde, özellikle yeni sentezlenen katalizörler ile ilgili sık yapılan çalışmalardan birisi de rejenerasyon yani katalizörün aynı verimle ne kadar kullanılabildiği üzerinedir (Etaiw ve El-Bendary, 2012). Bu bağlamda, her ne kadar maliyet analizi tez çalışmasının ana çıktılarından biri olsa da, yeni bir tip katalizör sentezlenmediğinden rejenerasyon konusu kapsam dışı bırakılmıştır. Bu nokta araştırmacıların dikkatine ilerleyen safhalarda tekrar sunulmuştur.

4.3. Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalarda, tasarımı tamamen ve özgün bir biçimde proje ekibine ait olan fotokatalitik bozunma sistemi kullanılmıştır (Şekil 4.2). Bu sistem bir reaktör, bir pompa, üç farklı ışık kaynağı ve ısıtıcılı manyetik karıştırıcıdan oluşmaktadır. Reaktör, 1.25 L net iç hacme ve yansıtıcı bir iç yüzeye sahip olacak şekilde paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Genellikle cam veya pireks ile yapılan reaktör, kolay kırılabilmesi ve deneylerde meydana getirebileceği olası aksaklıklar nedeni ile

paslanmaz çelikten imal edilmiştir. 8 cm iç çapa, 10 cm dış çapa ve 25 cm yüksekliğe sahip olan reaktör sistemde dikey olarak konumlandırılmıştır.

UV lambalar gerek sentetik gerekse endüstriyel atık suların arıtımında literatürde başarılı sonuçların elde edildiği lamba tipleridir (Pardeshi ve Patil, 2008; Zhang vd, 2009; Meshram vd, 2011; Kuo vd, 2015). UV ışık; 200-280 nm, 280-315 nm ve 315-400 nm dalga boyları için sırası ile UV-C, UV-B ve UV-A olarak gruplandırılmaktadır (Behnajady vd, 2007a; 2007b). Tüm UV lamba tipleri içerisinde UV-B lambanın özellikle göz ve cilt sağlığı açısından son derece zararlı oluşu ve hastanelerde sterilizasyon amaçlı kullanışı nedeni ile daha güvenli sistemlerde kullanılabileceği belirtilmiştir (Syahki ve Zinatizadeh, 2014). Dolayısı ile bu çalışmada kullanılan üç farklı ışık kaynağından ikisi sırası ile UV-A (20 cm, 11W, 365nm, Philips) ve UV-C (20 cm, 12W, 254 nm, Philips) lambalardır. Son olarak hem gün ışığından yararlanabilme ihtimalini test etmek hem de olası bir pilot ya da endüstriyel uygulamayı değerlendirebilmek adına gün ışığına yakın dalga boyunda ışık yayan bir floresan lamba (20 cm, 15W, 625nm) üçüncü ışık kaynağı olarak kullanılmıştır.



Şekil 4.2. Deneylerde kullanılan foto reaktör sistemi: A: reaktör, B: ısıtmalı manyetik karıştırıcı, C: UV-A, UV-C ve floresan lambaları, D: havalandırma pompası ve E: numune alma noktası.

Deneylerde havalandırma için bir akvaryum pompasından yararlanılmıştır. Verilen hava bir debimetre yardımı ile ayarlanmıştır. Pompadan elde edilen hava,

içerisine camı bir çubuk geçirilmiş hortum yardımıyla (reaktör üzerindeki özel yuvadan geçirilerek) reaktörün alt kısmına daldırılmış ve böylece havanın alttan yukarı olacak şekilde sisteme verilmesi sağlanmıştır. Bu hortumun ucuna takılan bir aparat sayesinde hava, kabarcıklar halinde süspansiyona verilmiştir. Reaktör, 1500 rpm karıştırma hızına ulaşabilen ve 120 °C'ye kadar ısıtma yapabilen ısıtıcılı bir manyetik karıştırıcının üzerine dikey olarak konumlandırılmıştır.

4.3.1. Ön Deneyler

Deneylerde kullanılacak açıklayıcı değişkenleri ve seviyelerini belirlemek için kapsamlı literatür araştırmasından faydalanılmıştır (bkz. Bölüm 2). Bu bağlamda; çözelti ortamında fotokatalitik bozunma sürecini bir ileri oksidasyon süreci yapacak olan hidroksil radikalini sağlamak amacı ile katalizör dozu ve seviyeleri (1), zaman temelli bu süreçte reaksiyon süresi ve seviyelerinin etkisi (2) başta kararlaştırılan açıklayıcı değişkenlerdir. Daha sonra farklı ışık kaynaklarının etkili olabileceği düşüncesiyle lamba tipi (3) ve ilgili literatüre katkı sunmak amacıyla ilk defa atık su tipi (4) kategorik açıklayıcı değişkenler olarak belirlenmiştir.

İlaveten, az da olsa tercih edilen havalandırma (5) ve yine sıklıkla tercih edilen başlangıç pH'sı (6) açıklayıcı değişkenler olarak belirlenmiştir. Son olarak ışık kaynağından kopan fotonlar ile aktifleşecek olan katalizörün buluşmasındaki en önemli faktör; bulanıklık (7), son açıklayıcı değişken olarak belirlenmiştir. Bu tez çalışmasının ilgili literatüre kattığı sıra dışı katkılardan birisi de bulanıklığın bir yanıt değişkeni olarak değil, açıklayıcı değişken olarak ele alınmasıdır.

Katalizör dozunun etkisi 20 dk'lık reaksiyon süresinde, doğal pH değerlerinde, bulanıklığı 5 ve 10 NTU'ya ayarlanmış atık sularda 0.5-10 g/L TiO₂ değerlerinde denenmiştir. Bu bağlamda en ideal sonuçların 2-4 g/L seviyelerinde alındığı tespit edilmiştir. 2 g/L'den düşük seviyelerde makul bir giderim elde edilememişken, 4 g/L'nin üstündeki değerlerde ise katalizörün kendi kendine bir bulanıklık oluşturduğu ve ayrıca sisteme sürekli karıştırmaya rağmen tam olarak homojen bir biçimde katılamadığı tespit edilmiştir.

Başlangıç pH'sının, başta renk ve KOİ olmak üzere pek çok değeri doğrudan etkileyebileceği düşünüldüğünde çok fazla değiştirilmemesi gerektiği düşünülmüştür.

Bu bağlamda başlangıç pH'ları 7.5-7.6 arasında değişen atık suları için minimum 7 ve maksimum 8 olarak belirlenmiştir. Bu şartlarda başlangıç renk, KOİ ve TOK değerleri yeniden ölçülerek ilgili analitik hesaplamalarda değişen yeni değerler kullanılmıştır.

Bulanıklık, belirtildiği üzere katalizör ile ışığın buluşmasındaki en önemli parametredir. Bu bağlamda baştan şartlandırılması oldukça önemlidir. Dolayısı ile bulanıklık için 0, 5 ve 10 NTU değerleri belirlenmiş ve farklı hız ve sürelerdeki santrifüjleme işleminin bir fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Ancak, DT'lerde tam sayılı seviye kullanma zorunluluğundan dolayı küsuratlı bulanıklık değerleri sahip oldukları tam sayı değerlerinde kabul edilmiştir. Reaksiyon seviyesi için 5 dk ile 90 dk arası değişen süreler denenmiştir. Bu bağlamda 20 ve 40 dk'lık sürelerde en iyi değerler elde edilmiştir. Dolayısı ile reaksiyon süresinin seviyeleri 20, 40 ve 69 dk olarak belirlenmiştir.

Son olarak havalandırma, için 0, 10 ve 20 mL/dk seviyeleri belirlenmiştir. 0 mL/dk seviyesinin amacı havalandırmanın olmadığı şartlar ile farklı havalandırma hızlarının etkilerini kıyaslarken hem havalandırmanın etkili olup olmadığını araştırmak hem de eğer etkili ise mevcut etkisini ortaya koymaktır. Bu bağlamda, bu tez çalışmasında etkileri incelenecek açıklayıcı değişkenler, seviyeleri ve yanıt değişkenleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Açıklayıcı değişkenler ve yanıt değişkenleri.

Açıklayıcı değişkenler		Yanıt değişkenleri	
Adı	Seviyesi	Adı	Seviyesi
Atık su tipi (AT)	Tavuk ve hindi	Renk (%)	0-100
Lamba tipi (LT)	Floresan, UVC ve UVA	KOİ (%)	0-100
Katalizör dozu (KD, g/L)	2,3 ve 4	TOK (%)	0-100
Bulanıklık (B, NTU)	0, 5 ve 10	Maliyet (\$/L)	19-22
Başlangıç pH'ı (pH)	7, 7.5 ve 8		
Reaksiyon süresi (RS, dk)	20, 40 ve 60		
Havalandırma (H, mL/dk)	0, 10 ve 20		

Çizelge 4.2'de listelenen açıklayıcı değişkenlerden AT ve LT kategorik değişkenler olup diğer tüm açıklayıcı değişkenler ise sayısal değişkenlerdir. İlgili atık suların bulanıklığı farklı hız ve sürelerde yapılan santrifüj işleminin bir fonksiyonu olarak elde edilmiş ve atık sular, deneylerden önce belirli hız ve sürelerde santrifüjlenerek ilgili değerlere ayarlanmıştır. Atık suların bulanıklık ile ilgili doğal ve ayarlanmış değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir. DT'lerinin belirlediği şartlarda

gerçekleştirilen deneylerin sonunda, reaktörün altında yer alan numune alma noktasından numuneler alınarak sırası ile santrifüj edilmiş ve analiz kısmına geçilmiştir.

Çizelge 4.3. Şartlandırılmış atı sularındaki bazı parametreler ($n = 10$).

Santrifüj hızı (rpm)/süresi (dk)	Tavuk	Hindi
	Bulanıklık (NTU)	
0/0 (Doğal)	10.5±1.5	10.5±1.3
2000/5	5.7±0.2	5.7±0.2
5000/5	0.3±0.1	0.4±0.1
Santrifüj hızı (rpm)/süresi (dk)	KOİ (mg/L O ₂)	
0/0 (Doğal)	136.7±10.1	116.2±11.2
2000/5	125.5±9.5	109.8±10.7
5000/5	118.7±8.3	101.7±9.5
Santrifüj hızı (rpm)/süresi (dk)	TOK (mg/L)	
0/0 (Doğal)	102.8±9.1	96.4±9.7
2000/5	95.4±7.8	90.1±8.8
5000/5	89.2±7.1	83.2±7.9

4.4. Deneme Tasarımları

Bu tez çalışmasında kullanılacak deneme tasarımları ayrıca Çizelge 4.4'te tablosal olarak sunulmuştur. Renk, KOİ ve TOK giderimi ile bunların toplam giderim maliyetii üzerine ilgili açıklayıcı değişkenlerin (bkz. Çizelge 4.2) etkileri önce birer eleme tasarımı olan Plackett Burman tasarımı (PBT) ve kısmi faktöriyel tasarım (KFT) kullanılarak incelenmiştir.

Çizelge 4.4. Deneme tasarımları.

Deneme Tasarımları	
Eleme Tasarımları	Optimizasyon (Etkileşim) Tasarımları
Plackett-Burman Tasarımı (PBT)	Box-Behnken Tasarımı (BBT)
Kısmi Faktöriyel Tasarım (KFT)	Merkezi Karma Tasarım (MKT)
	Taguchi Düzlemsel Yaklaşımı (TDY)
	D-optimal Tasarımı (D-opt)

Bu tasarımlar neticesinde anlamlı bulunan açıklayıcı değişkenler için birer etkileşim (optimizasyon) tasarımı olan Box Behnken tasarımı (BBT), Taguchi düzlemsel yaklaşımı (TDY), Merkezi Karma Tasarım (MKT) ve D-optimum tasarımı (D-opt) kurularak açıklayıcı değişkenlerin ikili etkileşim ve üssel etkileri de incelenmiştir.

4.5. Analitik Ölçümler

Yanıt değişkenlerinin analitik ölçümlerine geçmeden önce aynı zamanda bir adsorbent özelliği olan TiO₂'in atık su arıtma verimine olabilecek adsorptif etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, hem tavuk hem de hindi atık suyu için TiO₂-destekli adsorpsiyonun anlamsız bir etki oluşturduğunu göstermiştir (renk < 5%, KOİ < 2%, TOK < 1%). Renk, KOİ ve TOK giderimlerinde olası bir TiO₂-destekli adsorpsiyon etkisinin yaşanabilme ihtimaline karşı ortalama her on deneyde bir bu ölçüm tekrar edilmiş; ancak, elde edilen sonuçlarda olağanın dışında bir farklılık görülmemiştir.

4.5.1. Renk Ölçümü

Renk giderimi ile ilgili analizler maksimum absorbans değerinin elde edildiği dalga boylarında spektrofotometrik olarak tayin edilmiştir (Gnaser vd., 2005; Kashif ve Ouyang, 2008; Gupta vd., 2011; Sahoo ve Gupta, 2012). Bunun için bir UV spektrofotometre (Hach 2000) cihazı kullanılmıştır. İlgili reaksiyon süresi sonunda reaktörden alınan 50 mL hacminde numune, analiz yapılmadan önce 5000 rpm ve 5 dk süre ile santrifüjlenmiştir. Katı ve sıvı fazın ayrılmasından sonra elde kalan sıvı fazın spektrofotometrik olarak okuması sonucu renk değişimi (IU) incelenmiştir (4.1) (Sakkas vd., 2010; Sahoo ve Gupta, 2012).

$$\text{Renk giderimi (\%)} = \frac{A_o - A_i}{A_o} \times 100 \quad (4.1)$$

Bu denklemde A_o ve A_i sırası ile başlangıç anındaki ve her hangi bir anda alınan numunelere ait absorbans değerlerini göstermektedir (IU).

4.5.2. KOİ Ölçümü

KOİ analizleri için ise santrifüjlenmiş 2'şer mL numuneler, hazır KOİ ölçüm kit(ler)ine (Hach LCI 400, 0-1000 mg O₂/L) konulmuş ve bir ısıtıcıda (Hach DR 200) 150 °C'de 2 saat ısıtılmışlardır. Buna müteakip 60°C'ye kadar ısıtıcı içerisinde, sonra da oda sıcaklığına kadar laboratuvar ortamında kademeli olarak soğutulmuş ve kitlerin üzerinde yer alan barkot yardımı ile renk okumasının yapıldığı spektrofotometre kullanılarak KOİ değerleri okunmuştur (4.2)

$$\text{KOİ giderimi (\%)} = \frac{\text{KOİ}_0 - \text{KOİ}_i}{\text{KOİ}_0} \times 100 \quad (4.2)$$

Bu denklemde KOİ_0 ve KOİ_i değerleri sırası ile numunenin başlangıç ve herhangi bir andaki KOİ değerlerini göstermektedir.

4.5.3. TOK Ölçümü

TOK analizleri, bir TOK analizörü (Ltx) kullanılarak uygulanmış ve bu analiz Abant İzzet Baysal Üniversitesi Yenilikçi Gıda Teknolojileri Uygulama, Araştırma ve Geliştirme Merkezi'nden (YENİGIDAM) hizmet alımı yolu ile gerçekleştirilmiştir. TOK analizi, sulu matrislerdeki karbon içeriğini ($\mu\text{g/L}$); yüksek sıcaklıkta yanma, karbonun karbondioksit içerisine oksidasyonu ve dağılımlı kızılötesi detektörü kullanılarak miktar tespitine dayanan bir yöntemi temel alarak uygulanmıştır. Deneyler sonunda TOK giderimi yüzdesel olarak belirlenmiştir (4.3).

$$\text{TOK giderimi (\%)} = \frac{\text{TOK}_0 - \text{TOK}_i}{\text{TOK}_0} \times 100 \quad (4.3)$$

Bu denklemde TOK_0 ve TOK_i değerleri sırası ile numunenin başlangıç ve herhangi bir andaki TOK değerlerini göstermektedir.

4.5.4. Diğer Analizler

Renk analizi spektrofotometrik olarak okunan absorbans değerleri üzerinden elde edilmiştir. Bunun için Hach-2020 model bir UV spektrofotometre kullanılmıştır. İlgili atık su tipleri için elde edilen maksimum dalga boylarında okumalar yapılmıştır (bkz. Çizelge 4.1).

Bulanıklık analizi bir türbidimetre yardımı ile gerçekleştirilmiştir. İlk olarak bulanıklığı 0 NTU, 10 NTU ve 20 NTU olan özel çözeltiler ile cihaz kalibre edilmiştir. Daha sonra numunelerin toplamda üçer kez bulanıklığının ölçülmesi ile ilgili değerler elde edilmiştir.

Başlangıç pH'sı ve iletkenlik bir ph metre yardımı ile okunmuştur. 0.1 M HCl ve 0.1 M NaOH kullanılarak ilgili atık suların başlangıç pH'sı şartlandırılmıştır. pH ve

iletkenlik analizlerinden önce pH'sı 3.0, 7.0 ve 10.0 olan üç adet stok çözelti yardımı ile her defasında pH metrenin kalibrasyonu yapılmıştır.

4.6. Maliyet Analizi

Toplam giderim maliyeti; renk, KOİ ve TOK giderimlerinin tamamını kapsayan enerji sarfıyatı ve kimyasal madde maliyeti gibi etkenler göz önünde tutularak orijinal olarak türetilen bir denklem (4.4) yardımı ile hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned} \text{Toplam giderim maliyeti} \left(\frac{\$}{1 \text{ L atık su}} \right) = & \left\{ \left[\text{katalizör miktarı (g)} \times \text{katalizörün birim fiyatı} \left(\frac{\$}{\text{g}} \right) \right] + \right. \\ & \left[\text{elektrik sarfıyatı (kWh)} \times \text{elektriğin birim fiyatı} \left(\frac{\$}{\text{kWh}} \right) \right] + \\ & \left[\text{asit/bazın miktarı (mL)} \times \text{asit/bazın birim fiyatı} \left(\frac{\$}{\text{mL}} \right) \right] + \\ & \left. \left[\text{üretilen hava miktarı (mL)} \times \text{birim havanın elektrik bazlı maliyeti} \left(\frac{\$}{\text{mL}} \right) \right] \right\} \quad (4.4) \end{aligned}$$

Bu tanım, yani toplam giderim maliyeti, ilgili kesimhanelerin arıtma tesislerinin çıkışından alınan 1 L arıtılmış atık suyun TiO₂ destekli fotokatalitik bozunma süreci ile farklı işletme şartlarındaki ileri arıtım maliyetini ifade etmektedir. Ancak; reaktör, pompa vb. demirbaş kalemlerin ilk alım maliyetleri ile işletmeye alma giderleri ve analizler için kullanılan kitler ve hizmet alımları vb. kalemler toplam giderim maliyeti içerisine dâhil edilmemiştir. İlaveten, lambaların ilk alım maliyeti ise ortalama 10,000 saatlik kullanım ömürleri, deneylerde toplam lamba çalışma süresinin 170 saat olduğu ve ortalama lamba fiyatının 25 ₺ olduğu göz önüne alındığında lamba satın alımından gelecek maliyetin ihmal edilebilir olduğu kanısına varılmıştır.

4.7. İstatistiksel Veri Analizi

Bu tez çalışmasında kullanılacak olan istatistiksel veri analizleri şu şekilde sıralanabilir:

- 1) Genel Doğrusal Model Varyans Analizi (GDM-VA): DT sonuçlarına istinaden açıklayıcı değişkenlerin %95 güven aralığında yanıt değişkenleri üzerinde anlamlı fark oluşturup oluşturmadıklarını test etmek için kullanılacaktır,
- 2) Tek Yönlü Varyans analizi (TY-VA): Açıklayıcı değişkenlerin %95 güven aralığında, yanıt değişkenleri üzerinde anlamlı fark oluşturup oluşturmadıklarını test etmek için Tukey çoklu karşılaştırması ile birlikte kullanılacaktır,
- 3) Tukey çoklu karşılaştırması: Açıklayıcı değişkenlerin seviyelerinin %95 güven aralığında önemli düzeyde birbirlerinde farklı olup olmadığını test etmek için TY-VA ile eş zamanlı olarak uygulanacaktır,
- 4) Çoklu doğrusal (olmayan) regresyon (ÇD(O)R): Yanıt değişkenlerindeki değişkenliği ifade etmek ve yanıt değişkenini tahmin etmek için en iyi uyumlu modellerin türetilmesinde kullanılacaktır,
- 5) MC temelli belirsizlik analizi: Türetilen ÇD(O)R modellerinin ifade etmekte zorlandıkları yerleri açıklamakta kullanılacaktır.

Bu parametrik testlerin varsayımları aşağıdaki şekilde test edilmiştir:

- Anderson-Darling testi ile normal dağılım sergileyip sergilemedikleri,
- Varyasyon enflasyon faktörü (VEF) ile varyansların homojenliği,
- Durbin-Watson ile otokorelasyonun mevcut olup olmadığı kontrol edilmiştir.

4.8. Optimum Deneme Tasarımının Belirlenmesi

Optimum deneme tasarımlarını belirleyebilmek için pek çok farklı istatistiksel ölçüt kullanılmıştır. Tüm bu ölçütlerin eş zamanlı bir biçimde yorumlanması ile sonuca ulaşma hedeflenmiştir. Kullanılan ölçütler Çizelge 4.5'te verilmiştir. Bu bağlamda en az (küçük) olmak üzere; veri sayısı (n), hataların kareleri toplamı (HKT), ÇD(O)R

modeli içerisindeki toplam açıklayıcı değişken sayısı (kayma dâhil, k), Akaike bilgi kriteri (AIC_p) (4.5), düzeltilmiş Akaike bilgi kriteri (AIC_c) (4.6), Bayesian bilgi kriteri (BIC_p) (4.7), Amemiya türetim kriteri (APC_p) (4.8), maliyet ($\$/L$) (4.4), güven aralığı (p); ve en çok (fazla) olmak üzere modelin tahmin gücü (R^2_{tah}), her bir deneme tasarımındaki toplam deney sayısının 50%'si kadar sayıda yapılan bağımsız deney sonuçlarına dayalı uyumluluk (U) ve bunların toplam başarılı ölçüt sayısı (T) kriterleri göz önünde bulundurularak optimum deneme tasarımları belirlenmeye çalışılmıştır.

Çizelge 4.5. Optimum DT'nın belirlemede kullanılan istatistiksel ölçütler.

1. grup (minimum)		2. grup (maksimum)	
Kriter	Sembol/Denklem	Kriter	Sembol/Denklem
Veri sayısı	n	Modelin tahmin gücü	R^2_{tah}
Hataların kareleri toplamı	HKT	Uyumluluk	U
Model içerisindeki toplam kestirici sayısı (kayma dâhil)	k	Toplam başarılı ölçüt	T
Akaike bilgi kriteri	$AIC_p = n \ln(HKT) - n \ln n + 2p$ (4.5)		
Düzeltilmiş Akaike bilgi kriteri	$AIC_c = AIC_p + \frac{2k(k+1)}{n-k-1}$ (4.6)		
Bayesian bilgi kriteri	$BIC_p = n \ln(HKT) - n \ln n + p \ln n$ (4.7)		
Amemiya türetim kriteri	$APC_p = \frac{(n+p)}{n(n-p)} HKT$ (4.8)		
Maliyet	(bkz. Bölüm 4.6)		
Güven aralığı	$p < 0.05$		

AIC_p , farklı regresyon modelleri içerisinde en uygun olanı belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemi uygulayabilmenin şartı gözlem sayısının açıklayıcı değişkenden fazla olmasıdır (Akaike, 1974). Tam tersi durumlar da bir düzeltme faktörü ile AIC_c en uygun regresyon modelini belirlemekte kullanılabilir (Hurvich ve Tsai, 1989). Bayesian tekniği, bir modelin olasılık açısından bilinmeyen

tüm bütün parametreleri içerdği prensibi üzerine kurularak kullanılan bir model seçme tekniğidir (Bernardo ve Smith, 1994). Amemiya'ya göre, model seçiminde en makul strateji, iki veya üç kriter seçerek sonuçları kıyaslamak olacaktır (Amemiya, 1981).

4.9. Optimizasyon

Optimum etkileşim tasarımının belirlenmesinin ardından işletme şartlarını iyileştirmek adına optimizasyon süreci uygulanmıştır. Bunun için Minitab 17 (M17, Minitab, PA, USA) ve Design Expert 9.0.6 (DE, StatEase, USA) istatistiksel programları kullanılmıştır. Optimizasyon süreci iki farklı metot ile ele alınmıştır. Bunlar, eş zamanlı optimizasyon ve tek parametrelili sayısal optimizasyon teknikleridir. Eş zamanlı optimizasyonda tüm yanıt değişkenleri aynı anda tahmin edilmektedir. Yani açıklayıcı değişkenler her bir yanıt değişkeni için ayrı ayrı oluşturulmamaktadır. Bu optimizasyon türünün amacı; renk, KOİ ve TOK giderimlerini maksimize etmeye çalışırken maliyeti de aynı anda minimize edebilmektir.

Diğer bir tür olan tek parametrelili sayısal optimizasyon da ise yanıt değişkenleri, eş zamanlı optimizasyonun aksine, ayrı ayrı değerlendirilmektedir. Bu noktada, renk, KOİ ve TOK giderimleri ayrı ayrı maksimize edilmeye çalışılırken toplam giderim maliyeti ise bunlardan bağımsız olarak minimize edilmeye çalışılmaktadır. Bu optimizasyonun çıktısı olarak eş zamanlı optimizasyondan ana farkı şu şekilde izah edilebilir: Eş zamanlı optimizasyonun sonuçları aynı işletme şartlarında elde edilmişken, tek parametrelili sayısal optimizasyonun sonuçları her bir yanıt değişkeni için farklı işletme şartlarında elde edilmektedir.

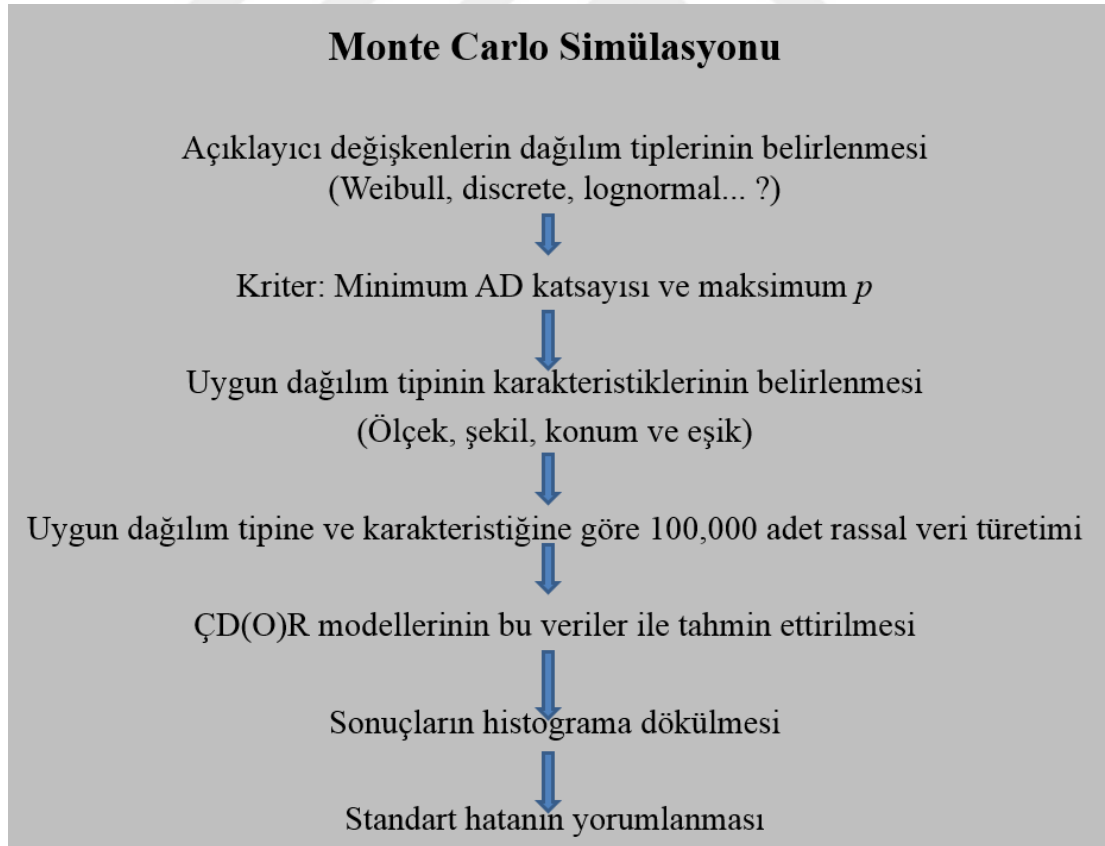
4.10. Validasyon

Son olarak ilgili istatistiksel yazılımların optimizasyondaki becerisini irdelemek, optimum olarak belirlenen deneme tasarımının başarısını test etmek ve optimum olarak belirlenen işletme şartlarının geçerliliğini sınamak için validasyon yani doğrulama deneyleri yapılmıştır. Bu bağlamda her bir optimizasyon tipinde belirlenen işletme şartlarında üçer kez deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler

neticesinde elde edilen sonuçlar, tahmin edilen sonuçlar ile kıyaslanarak optimizasyon süreçlerinin başarısı test edilmiştir.

4.11. Belirsizlik Analizleri

Türetilen ÇD(O)R modellerinin ifade etmekte zorlandığı kısımları açıklamak adına belirsizlik analizi gerçekleştirilmiştir. Bunun için, literatürde en yaygın olarak kullanılan metotlardan birisi olan Monte Carlo (MC) simülasyonlarından yararlanılmıştır. MC, M17 programı kullanılarak uygulanmıştır. MC, genellikle, 100,000 adet rastgele türetilmiş açıklayıcı değişken değerleri için ÇD(O)R modelinin tahmin ettirilmesi ve bu sonuçların histogramının çizdirilerek standart hatanın gözlemine dayanan bir uygulamadır (Evrendilek vd., 2016). Bu bağlamda çalışılan güven aralığının da bir diğer önem arz eden unsur olduğu da hatırlanmalıdır (Liu vd., 2017a).



Şekil 4.3. Monte Carlo simülasyonu için iş akışı.

Belirsizlik analizini uygulayabilmek için ilk olarak açıklayıcı değişkenlerin dağılım tipleri belirlenmelidir. Bu adım MC'da rastgele türetilcek verilerin hangi dağılıma göre türetilceğinin belirlenmesi açısından önem arz etmektedir. Bir biri ile uyuşmayan farklı dağılım tiplerinde veri türetilmesi ya da dağılım tipine bakılmaksızın verilerin türetilmesi belirsizlik analizinde ciddi hatalara sebebiyet verebilmektedir (Liu vd., 2017b). Dağılım tipinin belirlenmesinde maksimum seçim kriteri (p) birinci öncelikli kontrol edilmesi gereken parametredir. İkinci olarak minimum Anderson Darling (AD) istatistiğine bakılarak seçim yapılmaktadır. Bazı özel durumlarda likelihood oran testi (LOT) olarak bilinen üçüncü bir p değeri daha kullanılabilir ki, bu durum iki ya da üç parametrelili dağılımlardan hangisinin daha iyi bir uyum sergilediğini belirlemek için kullanılır (Gibbons, 1986).

Bir sonraki adım, uygun dağılım tiplerinin karakteristik özelliklerinin belirlenmesidir. Bu özellikler; konum, şekil, ölçek ve eşik değerleridir. Bir önceki basamakta en uyumlu dağılım olarak belirlenen tip(ler) ve bun(lar)a ait bu sayısal özellikler kullanılarak ilgili açıklayıcı değişkenler için 100,000 adet rastgele veri türetilerek ÇD(O)R modeli tahmin ettirilmektedir. Renk, KOİ ve TOK giderimleri (%) ile toplam giderim maliyeti (\$/L), farklı ÇD(O)R ile ifade edildiğinden her bir model ifadesi ayrı ayrı M17'ye girilmektedir. Sonuç olarak toplamda 30 defa her bir yanıt değişkeni tahmin ettirilmekte ve bu 30 tahminin bütün sonuçları histograma dökülerek standart hataya bakılmaktadır. Standart hatanın düşük olması istenilen ve beklenen bir durumdur. Tüm bu iş akışı Şekil 4.3'te şematik olarak ifade edilmiştir.

5. BULGULAR

5.1. Eleme Tasarımları

Eleme tasarımları içerisinde etkisi incelenen açıklayıcı değişkenler ve onlara ait seviyeler Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Eleme tasarımlarındaki açıklayıcı değişkenler ve seviyeleri.

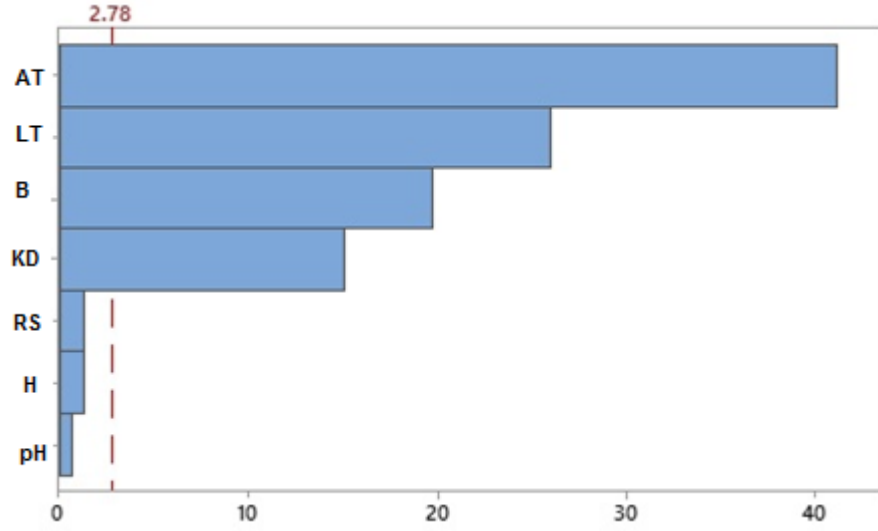
Seviyeler	AT	LT	B (NTU)	RS (dk)	KD (mg/L)	H (mL/dk)	pH
Minimum (-1)	Tavuk	UVC	10	20	2	0	7
Maksimum (+1)	Hindi	UVA	0	60	4	20	8

5.1.1. PBT

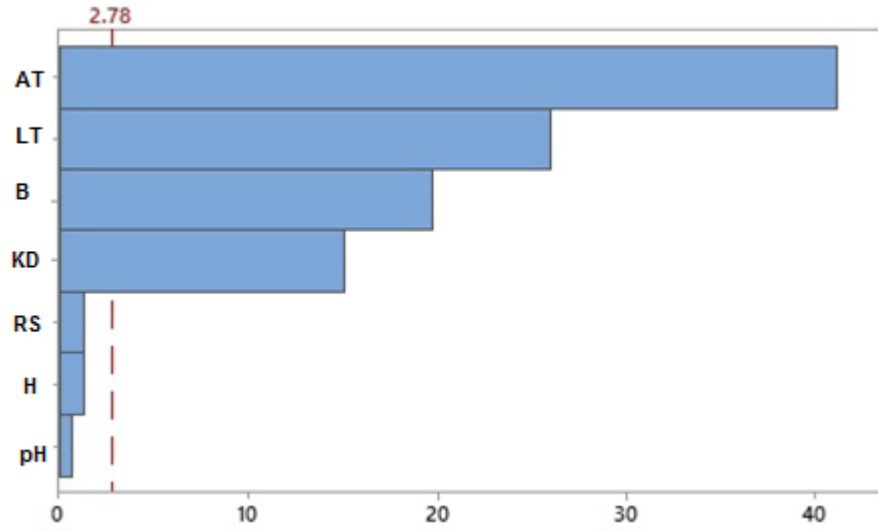
PBT yardımı ile tasarlanan ve gerçekleştirilen deneyler Çizelge 5.2.’de verilmiştir. Yanıt değişkenleri üzeri etkiler pareto grafikleri incelenmiştir. Bu grafikler, açıklayıcı değişkenlerin etkilerini görsel olarak önem sırasına göre çoktan aza olacak şekilde sıralamaktadır. Bu bağlamda renk, KOİ veTOK giderimleri ile toplam giderim maliyeti üzerine olan etkiler sırası ile Şekil 5.1 (a), (b), (c) ve (d)’de verilmiştir (bkz. Çizelge 4.2.)

Çizelge 5.2. Plackett-Burman tasarımına (PBT) ait deney listesi.

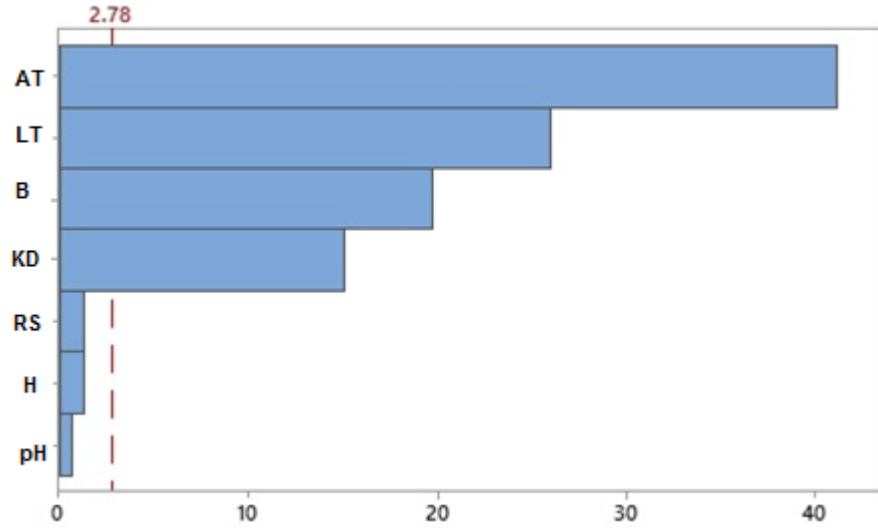
Normal sıra	Deneysel sıra	Açıklayıcı Değişkenler							Yanıt Değişkenleri			
		Atık su tipi	Lamba tipi	Bulanıklık (NTU)	Katalizör dozu (g/L)	Havalandırma (mL/dk)	pH	Süre (dk)	Renk (%)	KOİ (%)	TOK (%)	Maliyet (\$/L)
10	1	Tavuk	UVC	0	4	0	8	60	75.16	63.89	55.65	0.0148
4	2	Hindi	UVC	0	2	20	8	20	85.28	72.49	63.14	0.0141
1	3	Hindi	UVC	10	4	0	7	20	83.76	71.20	62.02	0.0141
5	4	Tavuk	UVC	10	2	0	8	60	63.52	53.99	47.03	0.0148
11	5	Hindi	UVA	0	4	0	8	20	99.99	84.99	74.03	0.0141
2	6	Hindi	UVA	0	2	0	7	60	95.09	80.83	70.40	0.0148
8	7	Hindi	UVA	10	2	20	8	60	86.24	73.41	64.05	0.0148
3	8	Tavuk	UVA	10	2	0	7	20	73.15	62.29	54.35	0.0141
9	9	Tavuk	UVA	0	4	20	7	60	84.93	72.30	63.08	0.0149
7	10	Tavuk	UVC	0	2	20	7	20	70.65	60.16	52.50	0.0140
6	11	Tavuk	UVA	10	4	20	8	20	78.51	66.84	58.32	0.0141
12	12	Hindi	UVC	10	4	20	7	60	83.74	71.29	62.20	0.0148



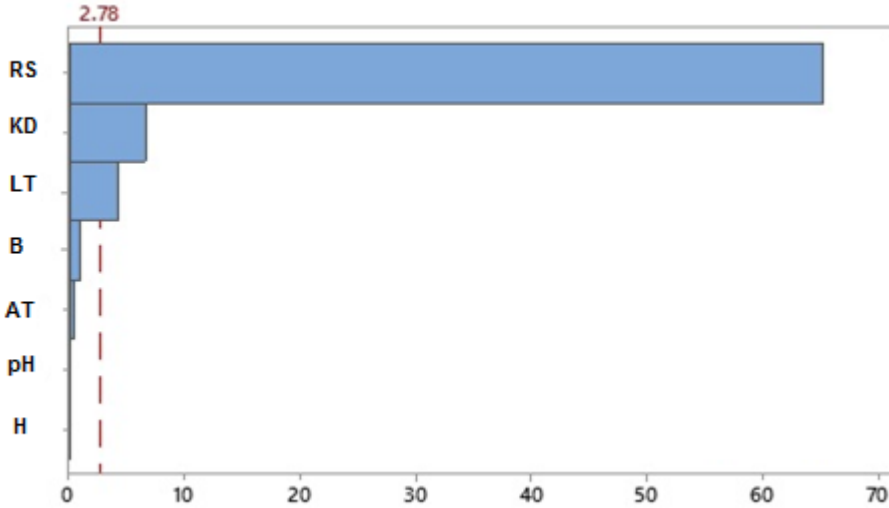
Şekil 5.1. (a) PBT ile renk giderimi üzerine açıklayıcı değişkenlerin etkisi.



Şekil 5.1. (b) PBT ile KOİ giderimi üzerine açıklayıcı değişkenlerin etkisi.



Şekil 5.1. (c) PBT ile TOK giderimi üzerine açıklayıcı değişkenlerin etkisi.



Şekil 5.1. (d) PBT ile toplam giderim maliyeti üzerine açıklayıcı değişkenlerin etkisi.

Grafikler üzerinde görülen 2.78, eşik değeri olup istatistiksel olarak şu şekilde hesaplanmıştır: M17, x ekseninde kullandığı ölçütte belli bir hata payı olup olmadığına göre iki yaklaşım benimser. Bunlardan biri; herhangi bir hata teriminin olmamasıdır ki bu durumda M17 standart olmayan etkilerin mutlak değerlerini kullanmaktadır. Diğer durum ki aynı zamanda PBT tasarımı için de geçerli olan durum, bir hatanın olduğu durumdur. Bu noktada standart etkilerin t istatistikleri hesaplanır ve bunun için her açıklayıcı değişkenin katsayısı kendi standart hatasına bölünür.

Dolayısıyla t istatistiği 2.78'in üzerinde olan açıklayıcı değişkenler, renk, KOİ ve TOK giderimi ile toplam giderim maliyeti üzerinde anlamlı fark oluşturan önemli açıklayıcı değişkenlerdir. Bu durumda renk, KOİ ve TOK giderimi için atık su tipi,

lambda tipi, bulanıklık ve katalizör dozunun son derece etkili olduğu açıkça görülmektedir. Ancak aynı durum diğer açıklayıcı değişkenler olan RS, pH ve H için geçerli değildir (Şekil 5.1 (a), (b) ve (c)). Toplam giderim maliyeti için ise en önemli açıklayıcı değişken RS olarak belirlenirken, diğer anlamlı açıklayıcı değişkenler KD ve nispeten LT olmuştur (Şekil 5.1 (d)).

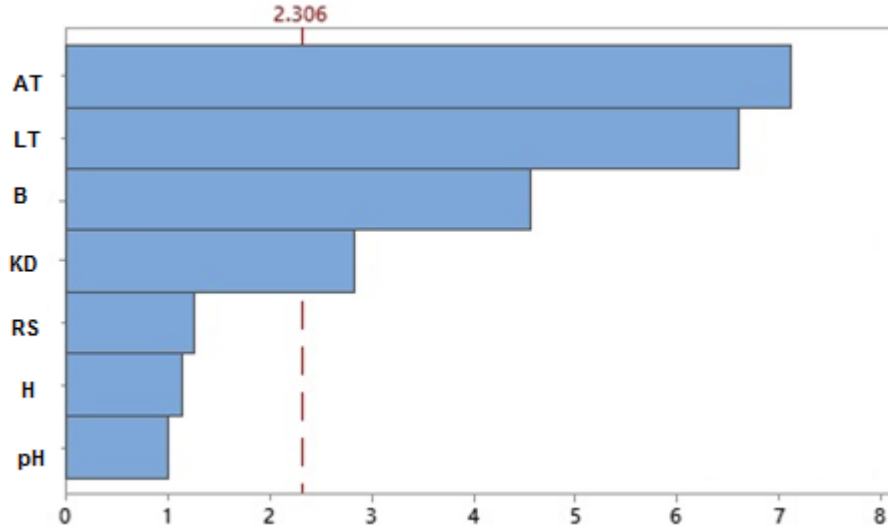
5.1.2. KFT

Renk, KOİ ve TOK giderimleri ile toplam giderim maliyeti üzerine yedi açıklayıcı değişkenin etkisini incelemek ve anlamsız olanları elemine etmek amacı ile kurulan KFT, toplam 16 setlik bir deney öngörmüş ve bu bağlamda gerçekleştirilen ilgili deneyler Çizelge 5.3'te verilmiştir.

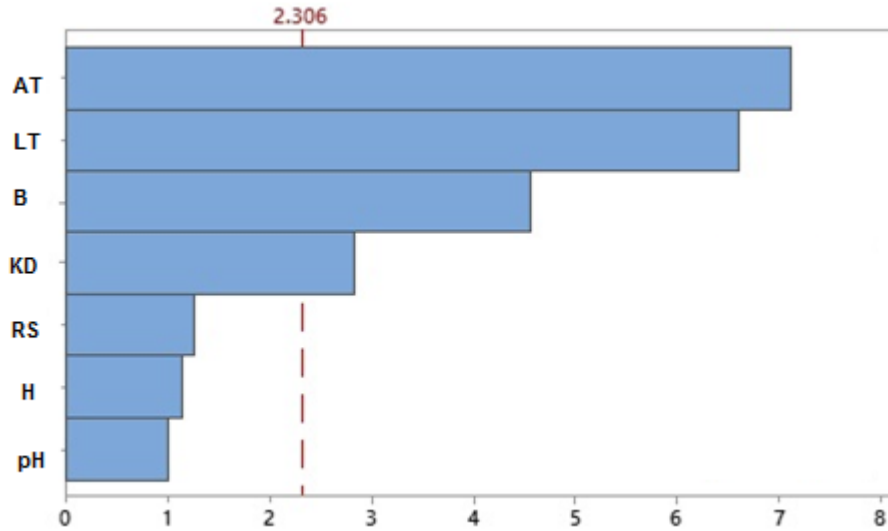
Çizelge 5.3. Kısmi faktöriyel tasarımına (KFT) ait deney çizelgesi.

Normal sıra	Deneysel sıra	Açıklayıcı Değişkenler							Yanıt Değişkenleri			
		Atık su tipi	Lamba tipi	Bulanıklık (NTU)	Katalizör dozu (g/L)	Havalandırma (mL/dk)	pH	Süre (dk)	Renk (%)	KOİ (%)	TOK (%)	Maliyet (\$/L)
16	1	Tavuk	UVC	0	2	0	7	60	67.99	57.79	51.39	0.0148
5	2	Tavuk	UVA	10	2	0	7	20	82.52	70.14	62.37	0.0141
11	3	Hindi	UVC	0	2	20	7	20	83.02	70.56	62.75	0.0141
2	4	Hindi	UVA	0	4	0	7	60	99.99	84.99	75.58	0.0148
9	5	Tavuk	UVC	0	4	0	8	20	74.76	63.54	56.51	0.0141
1	6	Tavuk	UVC	10	2	20	8	20	57.02	48.46	43.10	0.0141
3	7	Tavuk	UVC	10	4	20	7	60	64.71	55.08	49.06	0.0148
6	8	Hindi	UVA	10	2	20	7	60	82.86	70.55	62.86	0.0148
10	9	Tavuk	UVA	0	4	20	7	20	84.26	71.73	63.89	0.0141
4	10	Hindi	UVC	10	4	0	7	20	79.28	67.51	60.15	0.0141
8	11	Tavuk	UVA	0	2	20	8	60	77.24	65.76	58.58	0.0148
15	12	Hindi	UVC	0	4	20	8	60	88.98	75.75	67.47	0.0148
14	13	Hindi	UVA	10	4	20	8	20	90.01	76.62	68.25	0.0141
7	14	Hindi	UVC	10	2	0	8	60	70.89	60.36	53.78	0.0148
13	15	Tavuk	UVA	10	4	0	8	60	74.33	63.18	56.18	0.0148
12	16	Hindi	UVA	0	2	0	8	20	92.98	79.03	70.28	0.0141

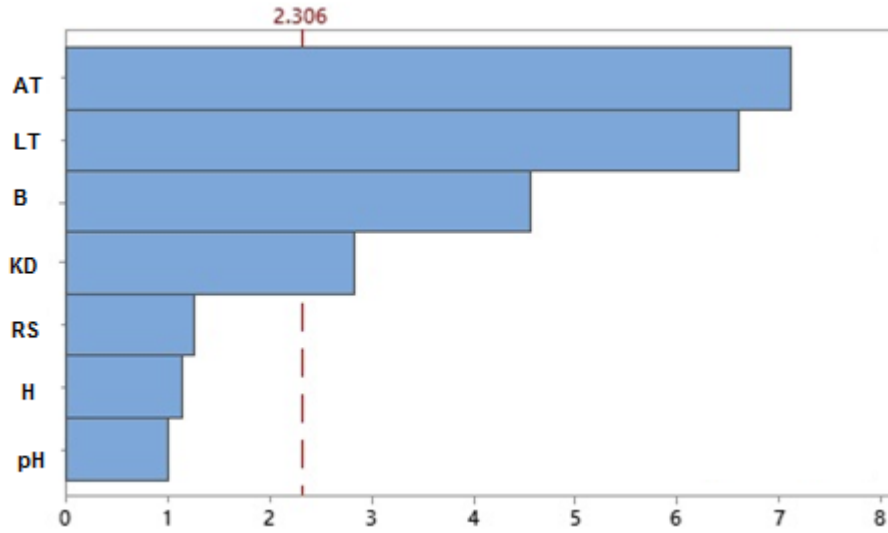
Sonuçlar PBT ile benzerlik göstermekle birlikte yine pareto grafikleri ile incelenmiştir ve Şekil 5.2. (a), (b), (c) ve (d)'de görsel olarak sunulmuştur (bkz. Çizelge 4.2.).



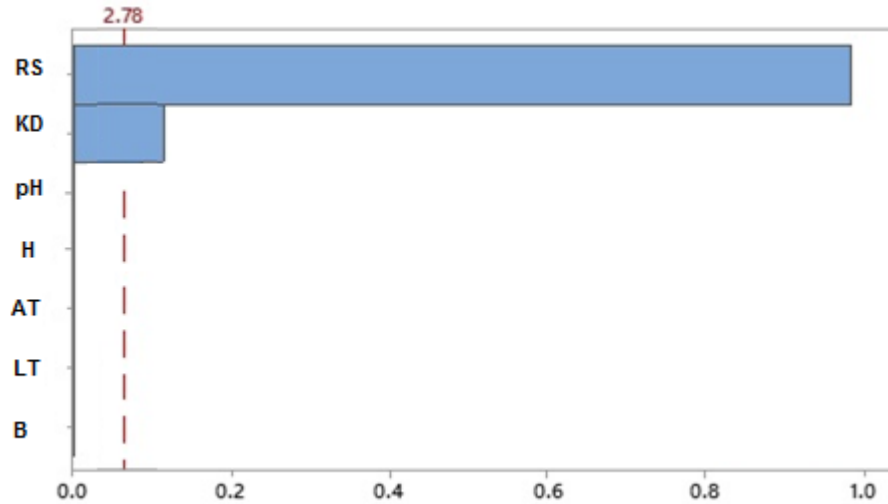
Şekil 5.2. (a) KFT ile renk giderimi üzerine açıklayıcı değişkenlerin etkisi.



Şekil 5.2. (b) KFT ile KOİ üzerine açıklayıcı değişkenlerin etkisi.



Şekil 5.2. (c) KFT ile TOK üzerine açıklayıcı değişkenlerin etkisi.



Şekil 5.2. (d) KFT ile toplam giderim maliyeti üzerine açıklayıcı değişkenlerin etkisi.

KFT'nın t istatistiği değeri PBT'den farklı olarak 2.306 olarak hesaplanmıştır. Bu bağlamda renk, KOİ ve TOK giderimleri için anlamlı olduğu belirlenen açıklayıcı değişkenler önem sırası çoktan aza olacak şekilde AT, LT, B ve KD olarak sıralanmaktadır. RS, pH H ise anlamsız açıklayıcı değişkenler olarak bulunmuştur. KFT'na ait bu kısma kadar olan bulguların PBT tasarımı ile büyük bir uyum içerisinde olduğu açıkça görülmektedir (Şekil 5.2 (a), (b) ve (c)).

Toplam giderim maliyeti üzerine ise PBT ile benzer bir biçimde RS ve KD anlamlı olarak belirlenmiştir. Ancak sürpriz bir biçimde LT toplam giderim maliyeti üzerinde her hangi bir anlamlı etkisi bulunmamıştır (Şekil 5.2 (d)).

5.2. Etkileşim (Optimizasyon) Tasarımları

Etkileşim tasarımları içerisinde incelenecek açıklayıcı değişkenler ve onlara ait seviyeler Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4. Etkileşim tasarımlarında kullanılan açıklayıcı değişkenler ve seviyeleri.

Seviye	KD (mg/L)	RS (dk) ²	B (NTU)	AT	LT
Küçük yıldız nokta (- α) ¹	1.58		11.71		
Minimum (-1)	2	20	10 (10 ¹)	Tavuk	Floresan
Orta (0)	3	40	5 (5.86 ¹)		UVC
Maksimum (+1)	4	60	0 (1.72 ¹)	Hindi	UVA
Büyük yıldız nokta (+ α) ¹	4.41		0.005		

¹ Sadece MKT için geçerli. ² Sadece BBT için geçerli.

5.2.1. BBT

Hem PBT hem de KFT; renk, KOİ ve TOK giderimleri üzerine ortak sonuçlar vererek AT, LT, KD ve B'lığın etkili olduklarını ortaya koyduğundan BBT bu açıklayıcı değişkenler ile kurulmuştur. Ancak, BBT'nin altyapısındaki algoritma gereği en az üç sayısal değişken ile kurulma zorunluluğu bulunmaktadır (bkz. Bölüm 2.3). Bu durum BBT'nin kübik yüzey temelli bir DT olmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısı ile anlamsız bulunan açıklayıcı değişkenler içerisinde RS, pareto grafiklerinde en üst sırada yer almasından ötürü BBT'a dahil edilmiştir (Şekil 5.1, 5.2). BBT bu bağlamda ilgili gözlemlerin yapılabilmesi için 90 adet deney içeren bir set önermiş ve ilgili deneyler Çizelge 5.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.5. BBT'ye ait deneyler ve açıklayıcı değişken seviyeleri.

Deney sırası	Açıklayıcı Değişkenler					Yanıt Değişkenleri			
	KD (mg/L)	RS (dk)	B (NTU)	AT	LT	Renk (%)	KOİ (%)	TOK (%)	Maliyet (\$/L)
1	2	20	5	Tavuk	UVA	72.17	61.34	53.44	0.01407
2	4	40	0	Hindi	Floresan	69.47	59.15	51.63	0.01450
3	2	20	5	Hindi	UVC	77.26	65.78	57.40	0.01407
4	2	40	0	Hindi	UVA	82.21	69.98	61.06	0.01442
5	3	40	5	Tavuk	Floresan	55.05	46.79	40.76	0.01446
6	3	40	5	Hindi	UVC	80.36	68.31	59.50	0.01446
7	3	40	5	Tavuk	UVA	75.08	63.81	55.59	0.01446
8	3	40	5	Tavuk	UVA	74.98	63.73	55.52	0.01446
9	3	40	5	Tavuk	UVC	65.36	55.55	48.40	0.01446
10	4	60	5	Hindi	UVA	94.17	80.16	69.94	0.01484
11	3	20	10	Hindi	UVC	85.76	73.02	63.73	0.01411
12	3	60	0	Tavuk	Floresan	50.22	42.68	37.19	0.01481
13	3	20	0	Tavuk	UVC	60.31	51.34	44.79	0.01411
14	3	40	5	Hindi	UVA	90.08	76.68	66.91	0.01446
15	2	40	10	Hindi	UVA	92.12	78.44	68.47	0.01442
16	3	40	5	Hindi	UVA	90.01	76.63	66.87	0.01446
17	3	40	5	Hindi	UVA	90.17	76.64	66.77	0.01446
18	3	60	0	Hindi	UVA	84.66	71.96	62.69	0.01481
19	2	40	0	Tavuk	UVA	67.21	57.23	49.95	0.01442
20	4	20	5	Tavuk	UVC	69.18	58.89	51.38	0.01415
21	2	40	10	Hindi	Floresan	75.65	64.30	56.02	0.01442
22	4	60	5	Hindi	UVC	84.18	71.55	62.33	0.01484
23	2	60	5	Hindi	UVA	87.11	74.04	64.50	0.01477
24	4	40	0	Hindi	UVC	79.22	67.33	58.66	0.01450
25	3	60	10	Hindi	Floresan	75.12	63.94	55.79	0.01481
26	2	60	5	Tavuk	UVA	72.09	61.39	53.58	0.01477
27	3	60	10	Tavuk	UVA	80.01	68.12	59.44	0.01481
28	3	60	10	Hindi	UVA	95.01	80.90	70.60	0.01481
29	4	20	5	Hindi	UVA	94.03	80.05	69.84	0.01415
30	2	40	0	Tavuk	Floresan	50.15	42.69	37.25	0.01442
31	3	60	10	Tavuk	Floresan	60.12	51.10	44.52	0.01481
32	4	40	0	Tavuk	UVC	64.22	54.67	47.70	0.01450
33	2	40	10	Hindi	UVC	82.61	70.35	61.40	0.01442
34	2	40	10	Tavuk	Floresan	60.65	51.64	45.07	0.01442
35	3	20	10	Hindi	UVA	94.89	80.79	70.50	0.01411
36	2	40	10	Tavuk	UVC	67.61	57.56	50.22	0.01442
37	3	60	10	Hindi	UVC	85.42	72.72	63.45	0.01481
38	3	40	5	Hindi	Floresan	70.05	59.54	51.87	0.01446
39	3	40	5	Tavuk	UVA	75.11	63.96	55.82	0.01446
40	2	40	0	Tavuk	UVA	84.53	71.96	62.78	0.01411
41	3	40	5	Hindi	Floresan	70.76	60.25	52.57	0.01411
42	3	40	5	Tavuk	UVC	80.31	68.39	59.68	0.01446
43	3	20	10	Tavuk	UVA	86.98	74.05	64.60	0.01407
44	3	40	5	Hindi	Floresan	74.72	63.63	55.53	0.01484
45	2	20	5	Hindi	UVC	55.31	47.01	40.95	0.01446
46	4	60	5	Hindi	UVA	72.96	62.12	54.21	0.01415

Çizelge 5.5 (devam)

Deney sırası	Açıklayıcı Değişkenler					Yanıt Değişkenleri			
	KD (mg/L)	RS (dk)	B (NTU)	AT	LT	Renk (%)	KOI (%)	TOK (%)	Maliyet (\$/L)
47	3	40	5	Tavuk	UVA	54.47	46.30	40.33	0.01450
48	4	20	5	Hindi	UVC	64.21	54.58	47.54	0.01442
49	4	40	0	Tavuk	UVA	60.61	51.52	44.88	0.01411
50	2	40	0	Tavuk	UVC	52.52	44.64	38.89	0.01477
51	3	20	10	Tavuk	Floresan	62.26	52.92	46.10	0.01477
52	2	60	5	Tavuk	UVC	65.15	55.38	48.24	0.01442
53	2	60	5	Tavuk	UVA	75.31	64.01	55.76	0.01411
54	2	40	0	Hindi	Floresan	65.22	55.44	48.29	0.01411
55	3	20	0	Hindi	UVC	79.13	67.26	58.59	0.01450
56	3	20	0	Hindi	UVA	80.11	68.09	59.32	0.01446
57	4	40	10	Hindi	Floresan	74.71	63.60	55.49	0.01450
58	3	40	5	Hindi	UVC	69.97	59.47	51.81	0.01446
59	4	40	10	Tavuk	UVC	65.16	55.47	48.40	0.01481
60	4	40	10	Tavuk	UVC	74.96	63.83	55.70	0.01450
61	3	60	0	Hindi	Floresan	67.52	57.49	50.18	0.01407
62	4	40	0	Tavuk	UVA	59.76	50.87	44.39	0.01484
63	2	20	5	Hindi	Floresan	75.23	64.04	55.88	0.01411
64	4	60	5	Tavuk	Floresan	69.66	59.32	51.77	0.01411
65	3	20	10	Hindi	Floresan	69.86	59.49	51.92	0.01446
66	3	20	0	Tavuk	UVA	75.28	64.09	55.93	0.01481
67	3	40	5	Hindi	Floresan	77.12	65.66	57.30	0.01442
68	3	60	0	Hindi	UVC	69.71	59.35	51.78	0.01481
69	2	40	10	Tavuk	UVA	77.28	65.79	57.40	0.01477
70	3	60	0	Tavuk	UVA	99.23	84.35	73.47	0.01450
71	2	60	5	Hindi	UVC	59.58	50.64	44.12	0.01415
72	4	40	10	Hindi	UVA	84.23	71.70	62.56	0.01450
73	4	20	5	Tavuk	Floresan	62.34	53.08	46.33	0.01407
74	4	40	10	Tavuk	UVA	55.12	46.92	40.94	0.01446
75	2	20	5	Tavuk	UVC	60.16	51.23	44.71	0.01481
76	3	40	5	Tavuk	Floresan	79.21	67.43	58.83	0.01442
77	3	60	0	Tavuk	UVC	68.97	58.72	51.24	0.01484
78	2	40	0	Hindi	UVC	89.96	76.60	66.85	0.01450
79	4	60	5	Tavuk	UVC	70.71	60.10	52.36	0.01481
80	4	40	0	Hindi	UVA	65.64	55.79	48.60	0.01446
81	3	60	10	Tavuk	UVC	50.05	42.54	37.06	0.01411
82	3	40	5	Tavuk	UVC	52.28	44.44	38.71	0.01407
83	3	20	0	Tavuk	Floresan	79.17	67.29	58.62	0.01484
84	2	20	5	Tavuk	Floresan	79.35	67.45	58.75	0.01415
85	4	60	5	Tavuk	UVA	65.54	55.79	48.68	0.01446
86	4	20	5	Tavuk	UVA	67.61	57.56	50.22	0.01477
87	3	40	5	Tavuk	UVC	83.98	71.51	62.42	0.01415
88	2	60	5	Hindi	Floresan	89.71	76.38	66.65	0.01450
89	4	20	5	Hindi	UVC	64.13	54.61	47.66	0.01450
90	4	40	10	Hindi	UVC	79.95	68.06	59.38	0.01411

Gerçekleştirilen deneylere ait GDM-VA sonuçları Çizelge 5.6’da verilmiştir.

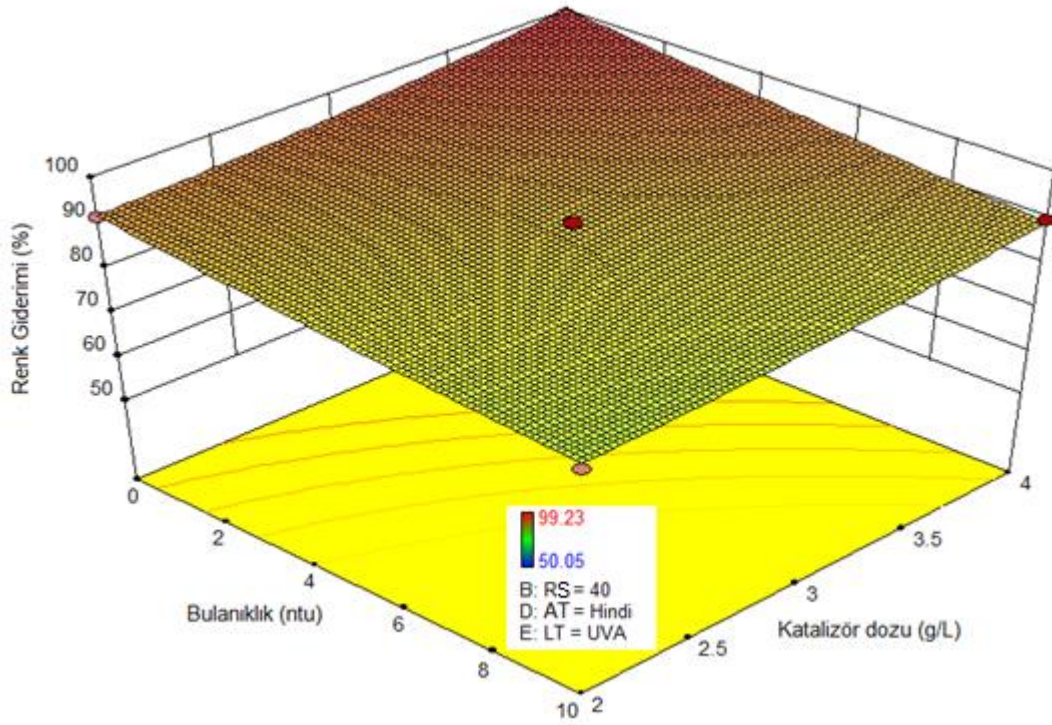
Çizelge 5.6. BBT'ye istinaden renk, KOİ ve TOK giderimleri ile toplam giderim maliyeti için elde edilen GDM-VA sonuçları.

YD	Kaynak	Sd	DHK	DOK	F değeri	<i>p</i>	VIF
Renk (%)	Model	12	12263.8	1021.98	1159.05	0.001	
	KD	1	421.1	421.09	477.57	0.001	1
	B	1	1100	1099.98	1247.51	0.001	1
	AT	1	5005.4	5005.36	5676.71	0.001	1
	LT	2	5671.2	2835.62	3215.95	0.001	1.33
	KD*KD	1	31	31.03	35.19	0.001	1.01
	RS*RS	1	8.7	8.74	9.92	0.002	1.01
	B*B	1	8.4	8.42	9.54	0.003	1.01
	KD*B	1	5.2	5.25	5.95	0.017	1
	KD*LT	2	10.8	5.39	6.12	0.003	1.33
KOİ (%)	Model	12	8898.29	741.52	1167.23	0.001	
	KD	1	304.57	304.57	479.42	0.001	1
	B	1	799.07	799.07	1257.81	0.001	1
	AT	1	3629.9	3629.9	5713.8	0.001	1
	LT	2	4116.55	2058.28	3239.92	0.001	1.33
	KD*KD	1	23.06	23.06	36.3	0.001	1.01
	RS*RS	1	6.08	6.08	9.58	0.003	1.01
	B*B	1	6.54	6.54	10.29	0.002	1.01
	KD*B	1	3.63	3.63	5.72	0.019	1
	KD*LT	2	7.62	3.81	5.99	0.004	1.33
TOK (%)	Model	12	6781.91	565.16	1165.75	0.001	
	KD	1	231.38	231.38	477.26	0.001	1
	B	1	609.75	609.75	1257.73	0.001	1
	AT	1	2765.09	2765.09	5703.5	0.001	1
	LT	2	3138.73	1569.36	3237.1	0.001	1.33
	KD*KD	1	18.01	18.01	37.15	0.001	1.01
	RS*RS	1	4.44	4.44	9.16	0.003	1.01
	B*B	1	5.33	5.33	11	0.001	1.01
	KD*B	1	2.64	2.64	5.44	0.022	1
	KD*LT	2	5.65	2.82	5.82	0.004	1.33
Maliyet (\$/L)	Model	2	11.775	5.8875	1167.23	0.001	
	KD	1	0.156	0.156	567.71	0.001	1
	RS	1	11.6191	11.6191	321.95	0.001	1

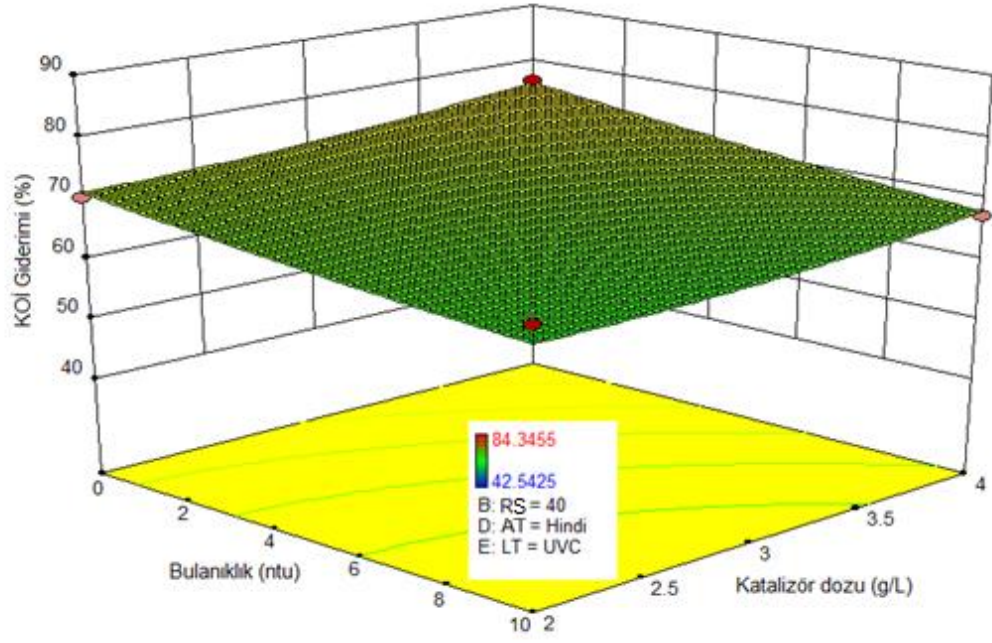
Sd: Serbestlik derecesi, YD: Yanıt değişkeni, DHK: Düzeltilmiş hata kareleri toplamı, DOK: Düzeltilmiş ortalama kareler toplamı, VIF: Varyasyon enflasyon faktörü.

Sonuçlar, RS hariç ($p > 0.8$) tüm açıklayıcı değişkenlerin doğrusal etkilerinin giderimler üzerinde etkili olduklarını göstermiştir ($p < 0.001$). KD'nin ve B'nin ikinci mertbe etkilerinin de giderimler üzerinde etkili oldukları ($p < 0.003$); ilaveten, ilginç bir biçimde doğrusal etkisi anlamlı olmayan RS'nin ikinci mertbe üssel etkisinin de

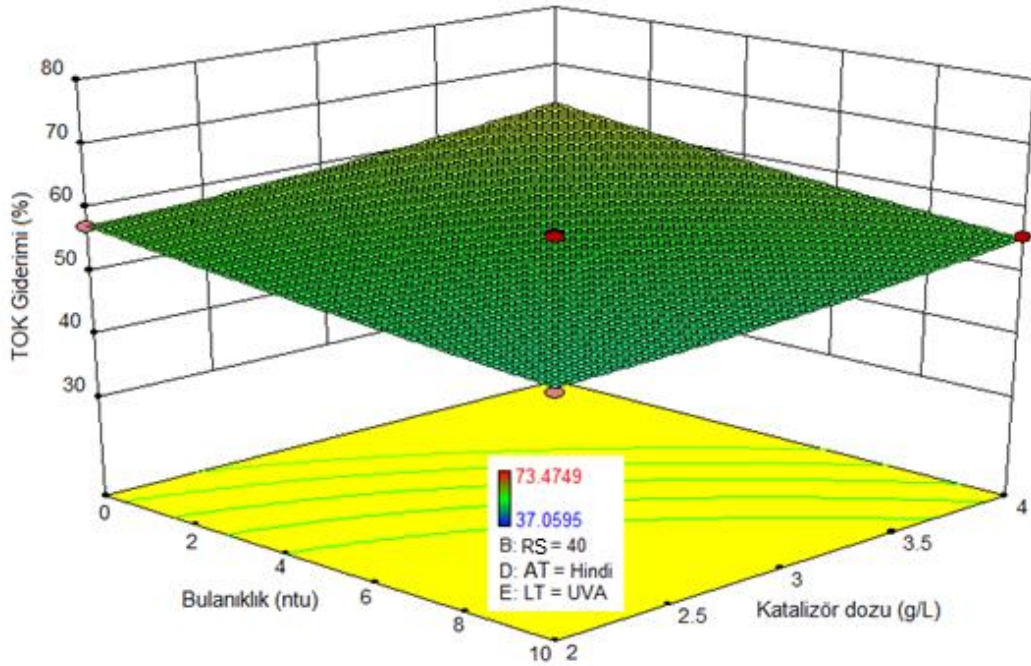
tüm giderimler üzerinde anlamlı bir etki yarattığı belirlenmiştir ($p < 0.003$). Ayrıca KD ile B arasında renk (Şekil 5.3a, $p = 0.017$), KOİ (Şekil 5.3b, $p = 0.019$) ve TOK (Şekil 5.3c, $p = 0.022$) giderimleri üzerinde anlamlı etkisi olan ikili etkileşimler olduğunu göstermiştir. Bu ikili etkileşimler farklı ışık kaynakları ile TiO_2 'in çözelti ortamında etkinleşmesini ve ışık kaynaklarından kopan fotonların katalizöre ulaşmasında bulanıklığın etkilerini ortaya koymaktadır. Dolayısı ile TiO_2 destekli fotokatalitik bozunmanın karmaşık bir yapıda işlediği görülmüştür. Toplam giderim maliyeti noktasında ise sadece KD'nin ve RS'nin doğrusal etkilerinin anlamlı bir fark oluşturduğu belirlenmiştir ($p < 0.001$). TY-VA'ne müteakip %95 güven aralığında gerçekleştirilen Tukey çoklu karşılaştırmasının sonuçları da Çizelge 5.7'de verilmiştir.



Şekil 5.3. (a) Box-Behnken tasarımı (BBT) ile renk giderimi üzerine bulanıklık ve katalizör dozunun etkisi.



Şekil 5.2. (b) Box-Behnken tasarımı (BBT) ile KOİ giderimi üzerine bulanıklık ve katalizör dozunun etkisi.



Şekil 5.3. (c) Box-Behnken tasarımı (BBT) ile TOK giderimi üzerine bulanıklık ve katalizör dozunun etkisi.

Çizelge 5.7. BBT'ye ait TY-VA Tukey çoklu karşılaştırma sonuçları.

Seviyeler	Yanıt değişkenleri								
	Renk giderimi (%)			KOİ giderimi (%)			TOK giderimi (%)		
KD (g/L)	N	Ortalama	Grup*	N	Ortalama	Grup*	N	Ortalama	Grup*
4	25	78.4±7.8	A	25	66.7±6.7	A	25	58.2±6.1	A
3	40	64.4±5.2	B	40	53.3±5.8	B	40	45.2±5.5	B
2	25	51.4±4.3	C	25	50.7±4.1	C	25	32.9±3.9	C
B (NTU)	N	Ortalama	Grup*	N	Ortalama	Grup*	N	Ortalama	Grup*
0	25	79±7.7	A	25	67.2±6.3	A	25	58.6±5.8	A
5	40	64.5±5.3	B	40	53.4±4.7	B	40	45.3±4.2	B
10	25	50.7±4.6	C	25	40.2±3.2	C	25	32.5±2.7	C
AT	N	Ortalama	Grup*	N	Ortalama	Grup*	N	Ortalama	Grup*
Hindi	45	82.1±10.1	A	45	69.8±8.9	A	45	60.9±7.7	A
Tavuk	45	67.1±5.6	B	45	57.1±4.5	B	45	49.8±3.9	B
LT	N	Ortalama	Grup*	N	Ortalama	Grup*	N	Ortalama	Grup*
UVA	30	84.6±11.4	A	30	71.9±10.1	A	30	62.8±8.9	A
UVC	30	74.6±7.8	B	30	63.5±6.4	B	30	55.3±5.9	B
Floresan	30	64.6±5.5	C	30	54.9±4.8	C	30	47.9±4.1	C

N: Gözlem sayısı. * Aynı harfi paylaşmayan ortalamalar önemli ölçüde farklıdır.

Sonuçlar, LT, KD, B ve AT'ne ait tüm seviyelerinin renk, KOİ ve TOK giderimleri üzerinde anlamlı farklar oluşturduğunu göstermektedir (Çizelge 5.7). Toplam giderim maliyetinin sadece KD'nin ve RS'nin doğrusal bir fonksiyonu olduğu göz önünde tutularak sonuçlar Çizelge 5.7'ye dâhil edilmemiştir. Toplam giderim maliyeti üzerine RS'nin ve KD'nin tüm seviyelerinin önemli ölçüde farklı olduğu belirlenmiştir. Son olarak BBT'na istinaden türetilen ÇD(O)R modelleri Çizelge 5.8'de verilmiştir.

Üçüncü mertebe ve üzeri model ifadeleri gerek otokorelasyon gerekse çoklu eşdoğrudaşlık gibi istenmeyen durumlar göz önünde alınarak irdelenmemiştir. ÇD(O)R'nun altyapısında bulunan; normal dağılım, otokorelasyon, çarpıklık ve basıklık ile çoklu eşdoğrudaşlık gibi kıstasların kontrolü yapıp gerekli ön şartları sağladıkları belirlendikten sonra regresyon çalışmalarına geçilmiş; ancak, bu ön şartların testlerini gösteren iptidai sonuçlar verilmemiştir.

Türetilen ÇD(O)R modelleri bir adet iki seviyeli kategorik değişken (AT), bir adet üç seviyeli kategorik değişken (LT) ve iki adet üç seviyeli sayısal değişkenin (B ve KD) doğrusal, ikili etkileşim ve ikinci mertebe üssel etkilerini içermektedir. Bu bağlamda, türetilen ÇD(O)R modellerindeki kategorik değişkenler, her kategorik değişken seviyesinin bir eksiği olacak şekilde modele dâhil edilmiş ve hariç bırakılan seviyeler referans olarak ayrılmıştır. Bu seviyeler lambda tipi için UVC lambda ve atık su tipi için hindi atık suyudur.

Çizelge 5.8. BBT'ye istinaden en iyi uyumlu ÇD(O)R modelleri ($n = 90$).

YD	ÇD(O)R modeli	R^2 (%)	$R^2_{düz}$ (%)	R^2_{tah} (%)	SH
Renk (%)	$= 69.09 + 4.61 \cdot KD - 0.430 \cdot B$ $- 7.4576 \cdot AT_{Tavuk} - 8.988 \cdot LT_{Floresan}$ $+ 7.562 \cdot LT_{UVA} + 1.183 \cdot KD \cdot KD$ $- 0.001571 \cdot RS \cdot RS + 0.02465 \cdot B \cdot B$ $+ 0.0935 \cdot KD \cdot B - 0.294 \cdot KD \cdot LT_{Floresan}$ $+ 0.669 \cdot KD \cdot LT_{UVA}$		99.36	99.17	0.939
KOI (%)	$= 58.93 + 3.99 \cdot KD - 0.365 \cdot B$ $- 6.3508 \cdot AT_{Tavuk} - 7.686 \cdot LT_{Floresan}$ $+ 6.465 \cdot LT_{UVA} + 1.020 \cdot KD \cdot KD$ $- 0.001310 \cdot RS \cdot RS + 0.02173 \cdot B \cdot B$ $+ 0.0778 \cdot KD \cdot B - 0.241 \cdot KD \cdot LT_{Floresan}$ $+ 0.562 \cdot KD \cdot LT_{UVA}$		99.37	99.17	0.937
TOK (%)	$= 51.51 + 3.546 \cdot KD - 0.318 \cdot B$ $- 5.5428 \cdot AT_{Tavuk} - 6.737 \cdot LT_{Floresan}$ $+ 5.666 \cdot LT_{UVA} + 0.902 \cdot KD \cdot KD$ $- 0.001119 \cdot RS \cdot RS + 0.01963 \cdot B \cdot B$ $+ 0.0663 \cdot KD \cdot B - 0.203 \cdot KD \cdot LT_{Floresan}$ $+ 0.483 \cdot KD \cdot LT_{UVA}$		99.37	99.17	0.616
Maliyet (\$/L)	$= 0.0135 + 0.05700 \cdot KD + 0.02460 \cdot RS$	99.99		99.99	0.001

Bu bağlamda renk, KOİ ve TOK giderimleri için türetilen ÇD(O)R modellerinin bu yanıt değişkenlerindeki değişkenliği %99.36 ile %99.37 arasında açıklayabildiği ve yanıt değişkenlerini %99.17 oranında tahmin edebildiği görülmektedir. Dahası, toplam giderim maliyeti için türetilen ÇDR modeli bu yanıt değişkenindeki değişkenliği %99.99 oranında açıklayabilmiş ve bu yanıt değişkenini %99.99 oranında tahmin edebilmiştir. Durbin-Watson istatistiğinin türetilen tüm ÇD(O)R modellerinde 1.93 ile 2.02 aralığında olması otokorelasyonun olmadığını göstermiştir.

5.2.2. MKT

MKT'nin önermiş olduğu deneyler Çizelge 5.9'da verilmiştir. BBT'nin aksine MKT en az iki sayısal değişken seviyesine uygun olduğu için RS bu deneme tasarımında kullanılmamıştır. Bu durum MKT'nin kübik tasarıma ilaveten yıldız nokta denilen uç şartlarda ekstra deneysel gözlemler istemesinden kaynaklanmaktadır. Dört ve altındaki açıklayıcı değişken sayısında yıldız nokta seviye olarak 1.41 olarak alınmakta ve MKT'deki açıklayıcı değişken seviyeleri buna göre belirlenmektedir.

Çizelge 5.9. MKT'ye ait deney listesi ($n = 78$).

Deney sırası	Açıklayıcı Değişkenler				Yanıt Değişkenleri			
	KD (mg/L)	B (NTU)	AT	LT	Renk (%)	KOİ (%)	TOK (%)	Maliyet (\$/L)
1	3	5.86	Tavuk	UVA	76.86	65.33	56.91	0.01409
2	3	5.86	Hindi	UVA	91.86	78.08	68.02	0.01409
3	3	5.86	Tavuk	UVC	66.86	56.83	49.51	0.01409
4	4	10	Tavuk	Floresan	65.00	55.25	48.13	0.01409
5	3	5.86	Tavuk	UVC	66.86	56.83	49.51	0.01414
6	4.41	5.86	Hindi	Floresan	76.86	65.33	56.91	0.01406
7	4	10	Tavuk	UVC	75.00	63.75	55.53	0.01409
8	3	5.86	Tavuk	UVC	66.86	56.83	49.51	0.01415
9	1.58	5.86	Tavuk	Floresan	52.86	45.00	39.26	0.01414
10	4.41	5.86	Hindi	UVA	96.86	82.33	71.72	0.01409
11	2	1.72	Tavuk	UVA	69.72	59.37	51.81	0.01409
12	3	5.86	Hindi	Floresan	71.86	61.17	53.37	0.01415
13	3	5.86	Hindi	UVC	81.86	69.71	60.83	0.01406
14	3	5.86	Tavuk	UVA	76.86	65.43	57.09	0.01404
15	3	5.86	Tavuk	UVC	66.86	56.94	49.69	0.01415
16	3	0.005	Hindi	UVC	76.01	64.70	56.45	0.01415
17	3	0.005	Tavuk	UVC	61.01	51.94	45.32	0.01406
18	2	1.72	Hindi	UVA	84.72	72.14	62.97	0.01406
19	3	0.005	Tavuk	UVA	71.01	60.45	52.74	0.01409
20	3	11.71	Tavuk	Floresan	62.71	53.31	46.44	0.01409
21	3	5.86	Tavuk	Floresan	56.86	48.40	42.23	0.01409
22	2	1.72	Tavuk	UVC	59.72	50.85	44.38	0.01409
23	3	5.86	Tavuk	UVA	76.86	65.43	57.09	0.01409
24	3	11.71	Hindi	Floresan	77.71	66.17	57.74	0.01409
25	3	5.86	Tavuk	Floresan	56.86	48.42	42.26	0.01409
26	4.41	5.86	Tavuk	UVA	81.86	69.70	60.82	0.01406
27	4	10	Hindi	UVC	90.00	76.63	66.86	0.01409
28	3	11.71	Tavuk	UVC	72.71	61.81	53.84	0.01409
29	1.58	5.86	Hindi	UVA	87.86	74.68	65.06	0.01404
30	3	5.86	Tavuk	Floresan	56.86	48.33	42.10	0.01409
31	3	11.71	Tavuk	UVA	82.71	70.31	61.25	0.01409
32	1.58	5.86	Hindi	UVC	77.86	66.28	57.83	0.01409
33	3	5.86	Tavuk	Floresan	56.86	48.33	42.10	0.01406
34	4	1.72	Hindi	UVC	81.72	69.59	60.73	0.01414
35	4	1.72	Hindi	UVA	91.72	78.08	68.13	0.01406
36	1.58	5.86	Tavuk	UVA	72.86	61.93	53.95	0.01409
37	1.58	5.86	Tavuk	UVC	62.86	53.43	46.54	0.01409
38	4	1.72	Tavuk	UVC	66.72	56.80	49.55	0.01409
39	3	5.86	Hindi	Floresan	71.86	61.19	53.41	0.01409
40	3	5.86	Hindi	Floresan	71.86	61.18	53.39	0.01409
41	2	10	Hindi	Floresan	73.00	62.05	54.05	0.01406
42	3	0.005	Hindi	Floresan	66.01	56.10	48.87	0.01409
43	4.41	5.86	Tavuk	UVC	71.86	61.19	53.40	0.01415
44	2	10	Tavuk	Floresan	58.00	49.38	43.08	0.01414
45	4.41	5.86	Tavuk	Floresan	61.86	52.68	45.98	0.01409
46	2	1.72	Hindi	Floresan	64.72	55.01	47.92	0.01414

Çizelge 5.9 (devam)

Deney sırası	Açıklayıcı Değişkenler				Yanıt Değişkenleri			
	KD (mg/L)	B (NTU)	KD (mg/L)	B (NTU)	KD (mg/L)	B (NTU)	KD (mg/L)	B (NTU)
47	3	0.005	Tavuk	Floresan	51.01	43.43	37.89	0.01404
48	3	0.005	Hindi	UVA	86.01	73.10	63.68	0.01409
49	1.58	5.86	Hindi	Floresan	67.86	57.68	50.25	0.01409
50	3	11.71	Hindi	UVC	87.71	74.56	64.95	0.01409
23	3	5.86	Tavuk	UVA	76.86	65.43	57.09	0.01409
51	4	1.72	Tavuk	Floresan	56.72	48.29	42.13	0.01409
52	2	10	Hindi	UVA	93.00	79.17	69.07	0.01409
53	3	11.71	Hindi	UVA	97.71	83.21	72.61	0.01409
54	3	5.86	Tavuk	UVC	66.86	56.83	49.51	0.01409
55	2	1.72	Tavuk	Floresan	49.72	42.33	36.93	0.01404
56	3	5.86	Hindi	UVC	81.86	69.69	60.80	0.01409
57	4	10	Tavuk	UVA	85.00	72.38	63.17	0.01409
58	3	5.86	Tavuk	Floresan	56.86	48.41	42.23	0.01414
59	3	5.86	Hindi	UVC	81.86	69.71	60.84	0.01415
60	3	5.86	Tavuk	UVA	76.86	65.45	57.12	0.01414
61	3	5.86	Hindi	UVA	91.86	78.21	68.25	0.01409
62	3	5.86	Hindi	UVC	81.86	69.69	60.80	0.01414
63	3	5.86	Hindi	UVA	91.86	78.08	68.02	0.01414
64	4.41	5.86	Hindi	UVC	86.86	73.94	64.51	0.01406
65	3	5.86	Hindi	UVA	91.86	78.22	68.26	0.01406
66	4	10	Hindi	Floresan	80.00	68.10	59.42	0.01406
67	4	1.72	Hindi	Floresan	71.72	61.07	53.30	0.01414
68	2	1.72	Hindi	UVC	74.72	63.62	55.51	0.01409
69	2	10	Tavuk	UVA	78.00	66.41	57.95	0.01404
70	2	10	Tavuk	UVC	68.00	57.80	50.35	0.01404
71	4	1.72	Tavuk	UVA	76.72	65.21	56.81	0.01414
72	3	5.86	Hindi	Floresan	71.86	61.08	53.21	0.01409
73	3	5.86	Tavuk	UVA	76.86	65.33	56.91	0.01409
74	2	10	Hindi	UVC	83.00	70.55	61.46	0.01409
75	4	10	Hindi	UVA	99.99	84.99	74.04	0.01406
76	3	5.86	Hindi	UVA	91.86	78.08	68.02	0.01414
77	3	5.86	Hindi	Floresan	71.86	61.08	53.21	0.01409
78	4	1.72	Tavuk	Floresan	81.86	69.58	60.61	0.01409

Bu bağlamda Çizelge 5.9'daki şartlarda gerçekleştirilen deneylere istinaden elde edilen GDM-VA sonuçları Çizelge 5.10'da verilmiştir. Çizelge 5.10'da görüldüğü üzere KD'nun ($p < 0.001$), B'lığın ($p < 0.001$) ve AT ile LT'lerinin ($p < 0.001$) doğrusal etkilerinin dışında KD ($p < 0.001$) ve B'lığın ($p < 0.048$) ikinci mertebe üssel etkilerinin de renk, KOİ ve TOK giderimleri üzerinde oldukça etkili oldukları görülmektedir. Ancak, bu etkiler dışında giderim verimleri üzerinde anlamlı herhangi bir ikili etkileşim tespit edilememiştir ($p > 0.05$). Dolayısı ile MKT'nin sonuçlarında herhangi bir 3D cevap yüzey grafiği kullanılmamıştır. Toplam giderim maliyetinde ise ilginç bir biçimde KD dâhil hiçbir anlamlı doğrusal etki bulunamadığı

gibi herhangi bir anlamlı ikili etkileşim ya da ikinci mertebe üssel bir etki de bulunamamıştır ($p > 0.05$).

Çizelge 5.10. MKT'a ait GDM-VA sonuçları.

YD	Kaynak	Sd	DHK	DOK	F değeri	p	VEF
Renk (%)	Model	16	10949.6	684.35	21320.07	0.001	
	KD	1	535.7	535.72	16689.7	0.001	1
	B	1	822.6	822.62	25627.68	0.001	1
	AT	1	4387.4	4387.35	136682.7	0.001	1
	LT	2	5199.8	2599.9	80996.78	0.001	1.33
	KD*KD	1	4.1	4.07	126.9	0.001	1.02
	B*B	1	0.2	0.16	5.06	0.028	1.02
KOİ (%)	Model	16	7922.75	495.17	18764.56	0.001	
	KD	1	389.61	389.61	14764.22	0.001	1
	RS	1	590.95	590.95	22394.24	0.001	1
	AT	1	3176.46	3176.46	120372.3	0.001	1
	LT	2	3762.69	1881.35	71293.7	0.001	1.33
	KD*KD	1	2.98	2.98	112.81	0.001	1.02
	B*B	1	0.13	0.13	4.77	0.033	1.02
Maliyet (\$/L)	Model	16	0.026815	0.001676	0.79	0.009	
	KD	1	0.002112	0.002112	5.06	0.002	1
	B	1	0.000609	0.000609	4.29	0.004	1
TOK (%)	Model	16	6021.32	376.33	13911.39	0.001	
	KD	1	297.65	297.65	11002.69	0.001	1
	B	1	445.81	445.81	16479.74	0.001	1
	AT	1	2415.6	2415.6	89294.17	0.001	1
	LT	2	2859.85	1429.93	52858.22	0.001	1.33
	KD*KD	1	2.29	2.29	84.49	0.001	1.02
	B*B	1	0.1	0.1	3.78	0.047	1.02

Sd: Serbestlik derecesi, YD: Yanıt değişkeni, DHK: Düzeltilmiş hata kareleri toplamı, DOK: Düzeltilmiş ortalama kareler toplamı, VEF: Varyasyon enflasyon faktörü.

TY-VA sonuçlarına müteakip gerçekleştirilen %95 güven aralığındaki Tukey çoklu karşılaştırmalarının sonuçları ise Çizelge 5.11'de sunulmuştur.

Çizelge 5.11. MKT'ye ait TY-VA Tukey çoklu karşılaştırma sonuçları.

Seviyeler	Yanıt değişkenleri								
	Renk giderimi (%)			KOİ giderimi (%)			TOK giderimi (%)		
KD (g/L)	N	Ortalama	Grup*	N	Ortalama	Grup*	N	Ortalama	Grup*
4.41	6	77.4±7.2	A	6	63.5±6.5	A	6	55.8±5.5	A
4	12	75.4±7.1	A	12	62.6±6.4	A	12	55.1±5.4	A
3	42	61.4±5.3	B	42	52.2±4.6	B	42	42.1±3.5	B
2	12	50.4±3.5	C	12	50.7±2.8	C	12	30.9±1.9	C
1.58	6	48.4±3.4	C	6	48.8±2.7	C	6	29.1±1.8	C
B (NTU)	N	Ortalama	Grup*	N	Ortalama	Grup*	N	Ortalama	Grup*
0.005	6	78.2±7.6	A	6	65.2±6.7	A	6	58.4±5.6	A
1.72	12	77±7.5	A	12	64.2±6.6	A	12	56.5±5.5	A
5.86	42	61.5±5.7	B	42	51.3±4.8	B	42	43.2±3.9	B
10	12	47.7±3.8	C	12	38.2±2.9	C	12	30.5±3.1	C
11.71	6	45.5±3.6	C	6	37.2±2.7	C	6	28.8±3.0	C
AT	N	Ortalama	Grup*	N	Ortalama	Grup*	N	Ortalama	Grup*
Hindi	39	80.1±10.9	A	39	65.8±9.8	A	39	58.9±8.9	A
Tavuk	39	65.1±5.6	B	39	53.1±4.5	B	39	47.7±5.4	B
LT	N	Ortalama	Grup*	N	Ortalama	Grup*	N	Ortalama	Grup*
UVA	26	81.5±11.2	A	26	68.9±10.4	A	26	60.7±9.8	A
UVC	26	71.5±7.4	B	26	59.4±6.6	B	26	53.3±6.5	B
Floresan	26	61.5±3.5	C	26	50.9±2.7	C	26	45.9±2.4	C

N: Gözlem sayısı. * Aynı harfi paylaşmayan ortalamalar önemli ölçüde farklıdır.

Çizelge 5.11, yıldız noktalarda alınan ölçümlerin renk, KOİ ve TOK giderimleri üzerinde anlamlı bir fark oluşturmadığını; ancak, bunun dışındaki diğer tüm açıklayıcı değişken seviyelerinin renk, KOİ ve TOK giderimleri üzerinde anlamlı farklar oluşturduğunu göstermektedir. Toplam giderim maliyetinde ise hiçbir açıklayıcı değişkenin seviyeleri arasında anlamlı fark bulunamadığı için bu sonuçlar Çizelge 5.11'e dâhil edilmemiştir.

Son olarak MKT kullanılarak elde edilen ÇDOR modelleri Çizelge 5.12'de verilmiştir. ÇD(O)R modelleri hem her yanıt değişkenindeki değişkenliği ifade etmek hem de ilgili yanıt değişkenini tahmin etmek amacı ile türetilmiştir. Regresyon çalışmasından önce normal dağılım, otokorelasyon, çarpıklık ve basıklık ile çoklu eşdoğrudaşlık gibi bazı kabullerin kontrolü yapıp gerekli ön şartları sağlayıp sağlamadıkları test edilmiştir. Elde edilen olumlu sonuçlardan sonra regresyon çalışmalarına geçilmiş; ancak, bu ön şartların testlerini gösteren iptidai sonuçlar verilmemiştir.

Çizelge 5.12. MKT sonuçlarına göre en iyi uyumlu ÇDOR modelleri ($n = 78$).

YD	ÇDOR modeli	$R^2_{düz}$ (%)	R^2_{tah} (%)	SH
Renk (%)	$61.413 + 1.467 \cdot KD + 0.9576 \cdot B - 7.5008 \cdot AT_{Tavuk}$ $- 10.001 \cdot LT_{Floresan} + 10.002 \cdot LT_{UVA} + 0.3124 \cdot KD \cdot KD$ $+ 0.00364 \cdot B \cdot B - 0.00010 \cdot KD \cdot B$ $+ 0.0002 \cdot KD \cdot AT_{Tavuk} + 0.0002 \cdot KD \cdot LT_{Floresan}$ $- 0.0004 \cdot KD \cdot LT_{UVA} + 0.00005 \cdot B \cdot AT_{Tavuk}$ $+ 0.00005 \cdot B \cdot LT_{Floresan} - 0.00010 \cdot B \cdot LT_{UVA}$ $- 0.0001 \cdot AT_{Tavuk} \cdot LT_{Floresan} + 0.0003 \cdot AT_{Tavuk} \cdot LT_{UVA}$	99.98	99.96	0.179
KOI (%)	$52.268 + 1.245 \cdot KD + 0.8092 \cdot B - 6.3665 \cdot AT_{Tavuk}$ $- 8.530 \cdot LT_{Floresan} + 8.524 \cdot LT_{UVA} + 0.2671 \cdot KD \cdot KD$ $+ 0.00320 \cdot B \cdot B + 0.00028 \cdot KD \cdot B$ $- 0.0007 \cdot KD \cdot AT_{Tavuk} + 0.0029 \cdot KD \cdot LT_{Floresan}$ $- 0.0132 \cdot KD \cdot LT_{UVA} - 0.00219 \cdot B \cdot AT_{Tavuk}$ $+ 0.00220 \cdot B \cdot LT_{Floresan} + 0.00350 \cdot B \cdot LT_{UVA}$ $+ 0.0086 \cdot AT_{Tavuk} \cdot LT_{Floresan} + 0.0102 \cdot AT_{Tavuk} \cdot LT_{UVA}$	99.97	99.96	0.162
TOK (%)	$TOK (\%) = 45.591 + 1.083 \cdot KD + 0.7006 \cdot B$ $- 5.5378 \cdot AT_{Tavuk} - 7.456 \cdot LT_{Floresan} + 7.446 \cdot LT_{UVA}$ $+ 0.2340 \cdot KD \cdot KD + 0.00289 \cdot B \cdot B + 0.00057 \cdot KD \cdot B$ $- 0.0014 \cdot KD \cdot AT_{Tavuk} + 0.0050 \cdot KD \cdot LT_{Floresan}$ $- 0.0230 \cdot KD \cdot LT_{UVA} - 0.00390 \cdot B \cdot AT_{Tavuk}$ $+ 0.00384 \cdot B \cdot LT_{Floresan} + 0.00625 \cdot B \cdot LT_{UVA}$ $+ 0.0154 \cdot AT_{Tavuk} \cdot LT_{Floresan} + 0.0178 \cdot KD \cdot LT_{UVA}$	99.97	99.95	0.164
Maliyet (\$/L)	Maliyet (\$) = $0.0139 + 0.0702 \cdot KD + 0.00420 \cdot B$	97.19	97.17	0.046

Türetilen ÇDOR modelleri bir adet iki seviyeli kategorik değişken (AT), bir adet üç seviyeli kategorik değişken (LT) ve iki adet üç seviyeli sayısal değişkenin (B ve KD) doğrusal, ikili etkileşim ve ikinci mertebe üssel etkilerini içermektedir. Bu bağlamda, türetilen ÇDOR modellerindeki kategorik değişkenler, her kategorik değişken seviyesinin bir eksiği olacak şekilde modele dâhil edilmiş ve hariç bırakılan seviyeler referans olarak ayrılmıştır. Bu seviyeler LT için UVC lamba ve AT için hindi atık suyudur. Bu bağlamda renk, KOİ ve TOK giderimleri için türetilen ÇDOR modellerinin bu yanıt değişkenlerindeki değişkenliği %99.97 ile %99.98 arasında açıklayabildiği ve yanıt değişkenlerini %99.95 ile %99.96 arasında tahmin edebildiği görülmektedir. Renk, KOİ ve TOK giderimi için türetilen ÇDOR modellerinin Durbin-Watson istatistiği 1.96 ile 2.04 arasında değişirken, toplam maliyet için bu değer 1.13 olarak elde edilmiştir.

5.2.3. TDY

TDY, etkisi incelenecek açıklayıcı değişken sayısına göre hem eleme hem de optimizasyon tasarımı olarak kullanılabilen melez bir deneme tasarımıdır. Başlangıçta eleme tasarımı olarak kullanılması planlanan TDY'nın, PBT ve KFT'in benzer ve tutarlı sonuçlar vermesi üzerine etkileşim tasarımı olarak değerlendirilmesi kararlaştırılmıştır. Bu bağlamda TDY toplamda 18 deneylik bir çalışma planı ortaya koymuş ve tasarlanan deneyler Çizelge 5. 13'te verilmiştir.

Çizelge 5.13. TDY'ye ait deney listesi ($n = 18$).

Deney sırası	Açıklayıcı Değişkenler				Yanıt Değişkenleri			
	AT	B (NTU)	KD (g/L)	LT	Renk (%)	KOİ (%)	TOK (%)	Maliyet (\$/L)
1	Tavuk	0	2	Floresan	47.16	40.09	34.92	0.01406
2	Tavuk	5	3	Floresan	55.52	47.19	41.11	0.01409
3	Tavuk	10	4	Floresan	64.46	54.79	47.73	0.01414
4	Tavuk	0	2	UVA	68.01	57.81	50.36	0.01406
5	Tavuk	5	3	UVA	75.12	63.85	55.62	0.01409
6	Tavuk	10	4	UVA	84.54	71.86	62.60	0.01414
7	Tavuk	0	3	UVC	60.14	51.20	44.67	0.01409
8	Tavuk	5	4	UVC	68.87	58.64	51.18	0.01414
9	Tavuk	10	2	UVC	66.98	57.02	49.75	0.01406
10	Hindi	0	4	Floresan	69.01	58.77	51.29	0.01414
11	Hindi	5	2	Floresan	67.05	57.09	49.81	0.01406
12	Hindi	10	3	Floresan	75.34	64.14	55.96	0.01409
13	Hindi	0	3	UVA	85.17	72.39	63.06	0.01409
14	Hindi	5	4	UVA	94.12	80.12	69.90	0.01414
15	Hindi	10	2	UVA	92.28	78.58	68.58	0.01406
16	Hindi	0	4	UVC	79.26	67.47	58.87	0.01414
17	Hindi	5	2	UVC	77.77	66.23	57.80	0.01406
18	Hindi	10	3	UVC	85.52	72.81	63.54	0.01409

İlgili deneyler neticesinde elde edilen GDM-VA sonuçları Çizelge 5.14'te verilmiştir. Çizelge 5.14, AT ve LT'nin tüm giderimler üzerinde son derece etkili olduklarını ($p < 0.001$) ortaya koymaktadır. Ancak, ilginç bir biçimde ve BBT ile MKT'nın aksine, KD'nun tüm giderim verimleri üzerinde anlamsız olduğunu belirtmiştir ($p > 0.05$). Ayrıca B'lığın da renk ($p = 0.038$), KOİ ($p = 0.03$) ve TOK ($p = 0.025$) için nispeten anlamlı olarak bulunmuştur. İlaveten hiçbir anlamlı ikili etkileşim ya da ikinci mertebe üssel etki de bulunamamıştır ($p > 0.05$). Dolayısı ile 3D cevap yüzey grafikleri tıpkı MKT da olduğu gibi TDY de için kullanılmamıştır. Ayrıca, yine BBT ve MKT'nın aksine, toplam giderim maliyeti üzerine KD'nun anlamsız olduğunu ($p > 0.05$); ancak, LT ve AT'nin oldukça etkili oldukları ($p = 0.001$)

görülmüştür. İlâveten B’lığın da nispeten toplam giderim maliyeti üzerine etkili olduğunu göstermiştir ($p = 0.038$).

Çizelge 5.14. TDY’ye ait GDM-VA sonuçları.

YD	Kaynak	Sd	DHK	DOK	F değeri	p	VIF
Renk (%)	Model	14	2668.24	190.589	2189.54	0.001	
	B	1	1.1	1.097	12.6	0.038	99.07
	AT	1	24.28	24.282	278.96	0.001	36.26
	LT	2	53.22	26.608	305.68	0.001	32.64
KOİ (%)	Model	14	1936.57	138.327	2177.08	0.001	
	B	1	0.96	0.956	15.04	0.03	99.07
	AT	1	17.67	17.675	278.18	0.001	36.26
	LT	2	38.18	19.089	300.44	0.001	32.64
TOK (%)	Model	14	1476.47	105.462	2159.88	0.001	
	B	1	0.86	0.864	17.7	0.025	99.07
	AT	1	13.52	13.515	276.79	0.001	36.26
	LT	2	28.77	14.383	294.56	0.001	32.64
Maliyet (\$/L)	Model	14	2668.24	190.589	2189.54	0.001	
	B	1	1.1	1.097	12.6	0.038	99.07
	AT	1	24.28	24.282	278.96	0.001	36.26
	LT	2	53.22	26.608	305.68	0.001	32.64

Sd: Serbestlik derecesi, YD: Yanıt değişkeni, DHK: Düzeltilmiş hata kareleri toplamı, DOK: Düzeltilmiş ortalama kareler toplamı, VIF: Varyasyon enflasyon faktörü.

Bu bağlamda TDY için elde edilen TY-VA Tukey çoklu karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.15’te verilmiştir.

Çizelge 5.15. TDY için TY-VA Tukey çoklu karşılaştırma sonuçları.

Seviyeler	Yanıt değişkenleri								
	Renk giderimi (%)			KOİ giderimi (%)			TOK giderimi (%)		
	N	Ortalama	Grup*	N	Ortalama	Grup*	N	Ortalama	Grup*
B (NTU)	6	73±6.7	A	6	63.7±6.5	A	6	55.2±5.5	A
5	6	62.5±5.8	B	6	53.2±5.6	B	6	44.7±4.7	B
10	6	48.7±4.9	C	6	39.4±4.6	C	6	30.9±3.9	C
AT	N	Ortalama	Grup*	N	Ortalama	Grup*	N	Ortalama	Grup*
Hindi	9	79.1±8.9	A	9	69.8±7.3	A	9	61.3±6.3	A
Tavuk	9	65.1±7.8	B	9	55.8±5.2	B	9	47.3±4.7	B
LT	N	Ortalama	Grup*	N	Ortalama	Grup*	N	Ortalama	Grup*
UVA	6	81.5±10.5	A	6	72.2±8.5	A	6	62.75±6.2	A
UVC	6	72.4±9.4	B	6	63.1±7.8	B	6	55.34±5.5	B
Floresan	6	60.3±8.3	C	6	51±6.8	C	6	47.92±4.9	C

N: Gözlem sayısı. * Aynı harfi paylaşmayan ortalamalar önemli ölçüde farklıdır.

Çizelge 5.14’e istinaden anlamlı bulunan tüm açıklayıcı değişkenlerin seviyelerinin renk, KOİ ve TOK giderimi üzerinde anlamlı farklar oluşturduğu

belirlenmiştir (Çizelge 5.15). Toplam giderim maliyetinde ise lamba tipinin ve atık su tipinin bütün seviyelerinin anlamlı bir biçimde farklı oldukları, ilaveten bulanıklığa ait bütün seviyelerin de anlamlı bir biçimde farklı olduğu belirlenmiştir. TDY neticesinde türetilen ÇDR modelleri ise Çizelge 5.16’da verilmiştir.

Çizelge 5.16. TDY neticesinde türetilen ÇDR modelleri.

YD	ÇDR modeli	$R^2_{düz}$ (%)	R^2_{tah} (%)	SH
Renk (%)	$= 58.18 + 0.602*B - 13.987*AT_{Tavuk} + 0.01*LT_{Floresan} + 22.377*LT_{UVA}$	99.94	99.91	0.295
KOİ (%)	$= 49.76 + 0.562*B - 11.933*AT_{Tavuk} + 0.01*LT_{Floresan} + 18.933*LT_{UVA}$	99.94	99.91	0.252
TOK (%)	$= 43.62 + 0.534*B - 10.435*AT_{Tavuk} + 0.01*LT_{Floresan} + 16.414*LT_{UVA}$	99.94	99.91	0.221
Maliyet (\$/L)	$= 19.75 + 0.0000001*B - 0.0000001*AT_{Tavuk} + 0.01*LT_{Floresan} - 10.00*LT_{UVA}$	99.99	99.99	0.001

ÇDR çalışmalarına geçmeden önce altyapısal varsayımların kontrolü sağlanmıştır. Bunlar; verilerin normal dağılım sergilediği, otokorelasyon ($1.86 < DW < 2.14$) ve çoklu eşdoğrudaşlık içermediği (Çizelge 5.16), çarpıklık ve basıklık gibi betimleyici istatistiklerin ± 1.92 sınırı içerisinde yer almaları ile doğrulanmıştır. Bu ön şartları sağladıkları belirlendikten sonra ÇDR çalışmalarına geçilmiş; ancak, bu iptidai ön şartların görsel sonuçları ayrıca verilmemiştir.

Türetilen ÇDR modelleri bir adet iki seviyeli kategorik değişken (atık su tipi), bir adet üç seviyeli kategorik değişken (lamba tipi) ve iki adet üç seviyeli sayısal değişkenin (bulanıklık) doğrusal etkilerini içermektedir. Bu bağlamda, türetilen ÇDR modellerindeki kategorik değişkenler, her kategorik değişken seviyesinin bir eksiği olacak şekilde modele dâhil edilmiş ve hariç bırakılan seviyeler referans olarak ayrılmıştır. Bu seviyeler lamba tipi için UVC lamba ve atık su tipi için hindi atık suyudur. Bu bağlamda renk, KOİ ve TOK giderimleri için türetilen ÇDR modellerinin bu yanıt değişkenlerindeki değişkenliği %99.94 oranında açıklayabildiği ve yanıt değişkenlerini %99.91 oranında tahmin edebildiği görülmektedir. Öte yandan toplam giderim maliyeti için türetilen ÇDR modeli bu yanıt değişkenindeki değişkenliğin %99.99’nu açıklayabilmiş ve %99.99 oranında tahmin edebilmiştir.

5.2.4. D-opt

İncelenen son etkileşim tasarımı olan D-opt'a ait deneyler, Çizelge 5.17'de gösterildiği şekilde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5.17. D-opt tasarımına ait deney çizelgesi ($n = 20$).

DeneySEL sıra	Açıklayıcı değişkenler				Yanıt Değişkenleri			
	Katalizör dozu (g/L)	Bulanıklık (NTU)	Atık su tipi	Lamba tipi	Renk (%)	KOİ (%)	TOK (%)	Maliyet (\$/L)
1	3.80	1.00	Tavuk	UVA	75.30	64.01	55.76	0.01413
2	2.00	10.00	Tavuk	UVC	68.00	57.80	50.35	0.01406
3	4.00	6.35	Hindi	Floresan	76.35	65.02	56.74	0.01414
4	2.00	0.00	Hindi	UVA	83.00	70.67	61.66	0.01406
5	3.80	1.00	Tavuk	UVA	75.30	64.01	55.76	0.01413
6	4.00	2.80	Hindi	UVA	92.80	79.00	68.93	0.01414
7	4.00	10.00	Hindi	UVA	97.55	82.92	72.23	0.01414
8	3.30	10.00	Hindi	UVC	87.55	74.53	65.03	0.01411
9	4.00	0.00	Hindi	UVC	80.00	68.12	59.45	0.01414
10	3.28	10.00	Tavuk	Floresan	62.55	53.17	46.32	0.01411
11	4.00	6.43	Tavuk	UVC	71.43	60.72	52.89	0.01414
12	2.72	0.00	Tavuk	UVC	60.52	51.44	44.81	0.01409
13	2.00	10.00	Hindi	Floresan	73.00	62.15	54.22	0.01406
14	2.20	9.00	Tavuk	UVA	77.50	65.97	57.56	0.01406
15	4.00	0.00	Tavuk	Floresan	55.00	46.83	40.87	0.01414
16	2.00	3.75	Tavuk	Floresan	51.75	44.06	38.44	0.01406
17	2.75	0.00	Hindi	Floresan	65.60	55.86	48.76	0.01409
18	3.00	5.00	Hindi	UVA	91.50	77.90	67.98	0.01409
19	2.00	3.68	Hindi	UVC	76.69	65.18	56.78	0.01406
20	3.00	5.00	Hindi	UVA	91.50	77.78	67.75	0.01409

D-opt deneyleri neticesinde elde edilen GDM-VA sonuçları Çizelge 5.18'de verilmiştir. Çizelge 5.18 göz önüne alındığında, tüm doğrusal etkilerin giderimler üzerinde etkili oldukları ($p < 0.001$) görülmektedir. D-opt'a istinaden sadece KD'nun toplam giderim maliyeti üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir ($p = 0.037$). Çizelge 5.18, LT ve AT'nin renk ($p = 0.002$), KOİ ($p = 0.001$) ve TOK ($p = 0.001$) giderimleri üzerinde etkili olduğunu göstermiştir. Öte yandan KD'nun ($p > 0.05$) ve B da ($p > 0.05$) nispeten tüm giderim verimleri üzerinde etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca renk giderimi üzerine KD ve B ikili etkileşiminin ($p < 0.001$), LT ve AT etkileşiminin ($p < 0.001$) ve KD'nun ikinci mertbe üssel etkisinin ($p < 0.001$) son derece anlamlı olduğu belirlenmiştir. Ancak, bu ikili etkileşimlerin ya da üssel etkilerin hiçbirisinin KOİ ve TOK giderimleri üzerinde etkili olmadıkları ($p > 0.05$) görülmüştür.

Çizelge 5.18. D-opt için GDM-VA sonuçları.

YD	Kaynak	df	DHK	DOK	F değeri	p	VIF
Renk (%)	Model	14	1476.47	105.462	2159.88	0.001	
	KD	1	0.86	0.864	17.7	0.025	59.91
	B	1	0.04	0.037	0.75	0.045	45.09
	AT	1	0.12	0.122	2.49	0.002	31.13
	LT	1	0.24	0.242	4.95	0.002	27.07
KOİ (%)	Model	16	2228.34	139.271	2072.85	0.001	
	KD	1	2.49	2.493	37.11	0.009	59.91
	B	1	10.03	10.027	149.23	0.001	45.09
	AT	1	24.66	24.66	367.03	0.001	31.13
	LT	2	46.44	23.219	345.58	0.001	27.07
TOK (%)	Model	16	1694.4	105.9	1430.1	0.001	
	KD	1	1.9	1.902	25.69	0.015	59.91
	B	1	7.75	7.745	104.59	0.002	45.09
	AT	1	18.3	18.304	247.18	0.001	31.13
	LT	2	35.9	17.948	242.38	0.001	27.07
Maliyet (\$/L)	Model	14	1476.47	105.462	2159.88	0.001	
	KD	1	0.86	0.864	17.7	0.025	59.91

Sd: Serbestlik derecesi, YD: Yanıt değişkeni, DHK: Düzeltilmiş hata kareleri toplamı, DOK: Düzeltilmiş ortalama kareler toplamı, VIF: Varyasyon enflasyon faktörü.

TY-VA'ne müteakip uygulanan Tukey çoklu karşılaştırmasına ait sonuçlar Çizelge 5.19'da verilmiştir.

Çizelge 5.19. D-opt için TY-VA Tukey çoklu karşılaştırma sonuçları.

Seviyeler	Yanıt değişkenleri								
	Renk giderimi (%)			KOİ giderimi (%)			TOK giderimi (%)		
KD (g/L)	N	Ortalama	Grup*	N	Ortalama	Grup*	N	Ortalama	Grup*
4	6	78.4±7.6	A	6	68.4±6.4	A	6	58.4±5.1	A
3.8	2	74.4±7.6	A, B	2	64.4±6.4	A, B	2	54.4±5.1	A, B
3.3	1	66.4±6.7	B	1	56.4±5.5	B	1	46.4±4.2	B
3.28	1	65.4±6.7	B	1	55.4±5.5	B	1	45.4±4.2	B
3	2	60.2±5.6	B,C	2	50.2±4.4	B,C	2	40.2±3.1	B,C
2.75	1	55.2±5.3	C	1	45.2±4.1	C	1	35.2±2.8	C
2.72	1	54.9±5.3	C	1	44.9±4.1	C	1	34.9±2.8	C
2.2	1	48.3±4.7	C, D	1	38.3±3.5	C, D	1	28.3±2.2	C, D
2	5	36.3±4.5	D	5	26.3±3.3	D	5	16.3±2	D
AT	N	Ortalama	Grup*	N	Ortalama	Grup*	N	Ortalama	Grup*
Hindi	39	82.9±11.2	A	39	69.8±7.8	A	39	60.9±5.1	A
Tavuk	39	67.9±7.9	B	39	57.1±5.9	B	39	49.7±4.3	B
LT	N	Ortalama	Grup*	N	Ortalama	Grup*	N	Ortalama	Grup*
UVA	26	84.6±12.2	A	26	71.9±9.8	A	26	62.7±7.6	A

Çizelge 5.19 (devam)

Seviyeler	Yanıt değişkenleri								
	Renk giderimi (%)			KOİ giderimi (%)			TOK giderimi (%)		
B (NTU)	N	Ortalama	Grup*	N	Ortalama	Grup*	N	Ortalama	Grup*
0	5	79±7.6	A	5	69.0±6.4	A	5	59.0±5.1	A
1	2	71.5±7.6	B	2	61.5±6.4	B	2	51.5±5.1	B
2.8	1	60.7±6.7	C	1	50.7±5.5	C	1	40.7±4.2	C
3.68	1	50.8±6.7	D	1	40.8±5.5	D	1	30.8±4.2	D
3.75	1	50.1±5.6	D	1	40.2±4.4	D	1	30.2±3.1	D
5	2	44.3±5.3	E	2	34.4±4.1	E	2	24.4±2.8	E
6.35	1	39.1±5.3	E	1	29.2±4.1	E	1	19.2±2.8	E
6.43	1	37.8±4.7	E	1	27.9±3.5	E	1	17.9±2.2	E
9	1	27.1±4.5	F	1	17.1±3.3	F	1	7.1±2	F
10	5	25.1±4.2	F	5	15.2±3.2	F	5	5.2±0.7	F

Çizelge 5.19, D-opt’da yer alan LT ve AT’ne ait tüm seviyelerin önemli ölçüde farklar içerdiğini; ancak, bu durumun KD ve B için geçerli olmadığını göstermiştir. Son olarak D-opt’na istinaden türetilen ÇDR modelleri ise Çizelge 5.20’de verilmiştir.

Çizelge 5.20. D-opt’na istinaden türetilen ÇDR modelleri ($n = 20$).

YD	ÇDR modeli	R^2 (%)	R^2_{tah} (%)	SH
Renk (%)	$= 50.97 + 6.484 \cdot KD + 1.4125 \cdot B - 14.805 \cdot AT_{Tavuk} + 0.01 \cdot LT_{Floresan} + 21.653 \cdot LT_{UVA}$	99.96	58.42	0.253
KOİ (%)	$= 43.34 + 5.525 \cdot KD + 1.2112 \cdot B - 12.452 \cdot AT_{Tavuk} + 0.01 \cdot LT_{Floresan} + 18.577 \cdot LT_{UVA}$	99.94	42.18	0.259
TOK (%)	$= 37.76 + 4.826 \cdot KD + 1.064 \cdot B - 10.728 \cdot AT_{Tavuk} + 0.01 \cdot LT_{Floresan} + 16.337 \cdot LT_{UVA}$	99.92	22.80	0.272
Maliyet (\$/L)	$= 0.0139 + 0.057 \cdot KD$	99.99	99.99	0.001

ÇDR çalışmalarına geçmeden önce verilerin normal dağılım sergilediği, otokorelasyon ($1.71 < DW < 1.96$) ve çoklu eşdoğrudaşlık (Çizelge 5.20) içermediği, çarpıklık ve basıklık gibi betimleyici istatistiklerin ± 1.92 sınırı içerisinde yer aldıkları kabullerin kontrolü yapılmıştır. Bu ön şartları sağladıkları belirlendikten sonra regresyon çalışmalarına geçilmiş; ancak, bu ön şartların testlerini gösteren iptidai sonuçlar verilmemiştir.

Türetilen ÇDR modelleri bir adet iki seviyeli kategorik değişken (AT), bir adet üç seviyeli kategorik değişken (LT) ve iki adet üç seviyeli sayısal değişkenin (B ve KD) doğrusal, ikili etkileşim ve ikinci mertebe üssel etkilerini içermektedir. Bu bağlamda, türetilen ÇDR modellerindeki kategorik değişkenler, her kategorik değişken seviyesinin bir eksiği olacak şekilde modele dâhil edilmiş ve hariç bırakılan

seviyeler referans olarak ayrılmıştır. Bu seviyeler lamba tipi için UVC lamba ve atık su tipi için hindi atık suyudur. Bu bağlamda renk, KOİ ve TOK giderimleri için türetilen ÇDR modellerinin bu yanıt değişkenlerindeki değişkenliği %99'un üzerinde açıklayabilmiş; ancak tahminsel gücü %20 ile %60 arasında kalmıştır. İlaveten toplam giderim maliyeti için türetilen ÇDR %99.99 oranında hem toplam giderim maliyetindeki değişkenliği açıklayabilmiş hem de toplam giderim maliyetini tahmin edebilmiştir.

5.3. Uyumluluk (U, %)

Optimum eleme tasarımının belirlenmesindeki kritik rolü göz önüne alındığında uyumluluğun ayrı bir başlıkta ele alınması gerekliliği doğmuştur. ÇD(O)R modellerinde, yanıt değişkenini ifade etmek ($R^2_{düz}$) ve tahmin etmek (R^2_{tah}) için deneysel veriler rastgele bir biçimde sırası ile %70 ve %30 oranında kullanılmıştır. Uyumluluk (U, %) (bkz. Bölüm 4.7) ise, tamamen bağımsız veri setleri ile ÇD(O)R modellerini sınamak için kullanılan bir yöntemdir. Bu bağlamda her bir etkileşim tasarımı için, kendine ait toplam deney sayısının %50'si kadar bağımsız veri setleri oluşturulmuş deneyler ve elde edilen sonuçlar, BBT, MKT, TDY ve D-opt için sırası ile Çizelge 5.21, 5.22, 5.23 ve 5.24'te verilmiştir.

Çizelge 5.21. BBT temelli ÇD(O)R modelleri için oluşturulan bağımsız veri seti ve elde edilen sonuçlar.

Deneysel sıra	Açıklayıcı Değişkenler					Yanıt Değişkenleri			
	KD (g/L)	RS (dk)	B (NTU)	AT	LT	Renk (%)	KOİ (%)	TOK (%)	Maliyet (\$/L)
1	3.00	40.00	5.00	Tavuk	Floresan	55.05	46.79	40.76	0.01446
2	3.00	60.00	0.00	Tavuk	Floresan	50.22	42.69	37.19	0.01481
3	2.00	40.00	0.00	Tavuk	Floresan	50.15	42.69	37.25	0.01442
4	3.00	60.00	10.00	Tavuk	Floresan	60.12	51.10	44.52	0.01481
5	2.00	40.00	10.00	Tavuk	Floresan	60.65	51.64	45.07	0.01442
6	3.00	40.00	5.00	Tavuk	Floresan	55.31	47.01	40.95	0.01446
7	4.00	40.00	0.00	Tavuk	Floresan	54.47	46.30	40.33	0.01450
8	3.00	20.00	10.00	Tavuk	Floresan	60.61	51.52	44.88	0.01411
9	4.00	40.00	0.00	Hindi	Floresan	69.47	59.16	51.63	0.01450
10	2.00	40.00	10.00	Hindi	Floresan	75.65	64.30	56.02	0.01442
11	3.00	60.00	10.00	Hindi	Floresan	75.12	63.95	55.79	0.01481
12	3.00	40.00	5.00	Hindi	Floresan	70.05	59.54	51.87	0.01446
13	4.00	60.00	5.00	Hindi	Floresan	74.72	63.63	55.53	0.01484
14	4.00	20.00	5.00	Hindi	Floresan	72.96	62.12	54.21	0.01415

Çizelge 5.21 (devam)

Deneyisel sıra	Açıklayıcı Değişkenler					Yanıt Değişkenleri			
	KD (g/L)	RS (dk)	B (NTU)	AT	LT	Renk (%)	KOİ (%)	TOK (%)	Maliyet (\$/L)
15	2.00	40.00	0.00	Hindi	Floresan	65.15	55.38	48.24	0.01442
16	2.00	20.00	5.00	Tavuk	UVA	72.17	61.34	53.44	0.01407
17	3.00	40.00	5.00	Tavuk	UVA	75.08	63.82	55.59	0.01446
18	3.00	40.00	5.00	Tavuk	UVA	74.98	63.73	55.52	0.01446
19	2.00	40.00	0.00	Tavuk	UVA	67.21	57.23	49.95	0.01442
20	2.00	60.00	5.00	Tavuk	UVA	72.09	61.39	53.58	0.01477
21	3.00	60.00	10.00	Tavuk	UVA	80.01	68.12	59.44	0.01481
22	3.00	40.00	5.00	Tavuk	UVA	75.11	63.96	55.82	0.01446
23	2.00	40.00	0.00	Hindi	UVA	82.21	69.99	61.06	0.01442
24	4.00	60.00	5.00	Hindi	UVA	94.17	80.17	69.94	0.01484
25	3.00	40.00	5.00	Hindi	UVA	90.08	76.69	66.91	0.01446
26	2.00	40.00	10.00	Hindi	UVA	92.12	78.45	68.47	0.01442
27	3.00	40.00	5.00	Hindi	UVA	90.01	76.64	66.87	0.01446
28	3.00	40.00	5.00	Hindi	UVA	90.17	76.64	66.77	0.01446
29	3.00	60.00	0.00	Hindi	UVA	84.66	71.96	62.69	0.01481
30	2.00	60.00	5.00	Hindi	UVA	87.11	74.04	64.50	0.01477
31	3.00	40.00	5.00	Tavuk	UVC	65.36	55.56	48.40	0.01446
32	3.00	20.00	0.00	Tavuk	UVC	60.31	51.34	44.79	0.01411
33	4.00	20.00	5.00	Tavuk	UVC	69.18	58.89	51.38	0.01415
34	4.00	40.00	0.00	Tavuk	UVC	64.22	54.67	47.70	0.01450
35	2.00	40.00	10.00	Tavuk	UVC	67.61	57.56	50.22	0.01442
36	3.00	20.00	10.00	Tavuk	UVC	70.76	60.25	52.57	0.01411
37	2.00	40.00	0.00	Tavuk	UVC	64.21	54.58	47.54	0.01442
38	2.00	60.00	5.00	Tavuk	UVC	62.26	52.92	46.10	0.01477
39	2.00	20.00	5.00	Hindi	UVC	77.26	65.78	57.40	0.01407
40	3.00	40.00	5.00	Hindi	UVC	80.36	68.31	59.50	0.01446
41	3.00	20.00	10.00	Hindi	UVC	85.76	73.03	63.73	0.01411
42	4.00	60.00	5.00	Hindi	UVC	84.18	71.55	62.33	0.01484
43	4.00	40.00	0.00	Hindi	UVC	79.22	67.34	58.66	0.01450
44	2.00	40.00	10.00	Hindi	UVC	82.61	70.35	61.40	0.01442
45	2.00	20.00	5.00	Hindi	UVC	77.26	65.78	57.40	0.01407

Çizelge 5.21, toplam 90 adet deney içeren BBT için gerçekleştirilen 45 deneyi ve elde edilen sonuçları göstermektedir. Sonuç olarak renk, KOİ ve TOK giderimleri için 98.2% ile 98.3% ve toplam giderim maliyeti için 99.9% oranında uyumluluk değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 5.22. MKT temelli ÇD(O)R modeli için bağımsız veri seti.

Deneysel sıra	Açıklayıcı Değişkenler				Yanıt Değişkenleri			
	KD (g/L)	B (NTU)	AT	LT	Renk (%)	KOİ (%)	TOK (%)	Maliyet (\$/L)
1	4.00	10.00	Tavuk	Floresan	65.00	55.25	48.13	0.01409
2	4.41	5.86	Hindi	Floresan	76.86	65.33	56.91	0.01406
3	1.59	5.86	Tavuk	Floresan	52.86	45.00	39.26	0.01414
4	3.00	5.86	Hindi	Floresan	71.86	61.17	53.37	0.01415
5	3.00	11.71	Tavuk	Floresan	62.71	53.31	46.44	0.01409
6	3.00	5.86	Tavuk	Floresan	56.86	48.40	42.23	0.01409
7	3.00	11.71	Hindi	Floresan	77.71	66.17	57.74	0.01409
8	3.00	5.86	Tavuk	Floresan	56.86	48.42	42.26	0.01409
9	3.00	5.86	Tavuk	Floresan	56.86	48.33	42.10	0.01409
10	3.00	5.86	Tavuk	Floresan	56.86	48.33	42.10	0.01406
11	3.00	5.86	Hindi	Floresan	71.86	61.19	53.41	0.01409
12	3.00	5.86	Hindi	Floresan	71.86	61.18	53.39	0.01409
13	2.00	10.00	Hindi	Floresan	73.00	62.05	54.05	0.01406
14	3.00	5.86	Tavuk	UVA	76.86	65.33	56.91	0.01409
15	3.00	5.86	Hindi	UVA	91.86	78.08	68.02	0.01409
16	4.41	5.86	Hindi	UVA	96.86	82.33	71.72	0.01409
17	2.00	1.72	Tavuk	UVA	69.72	59.37	51.81	0.01409
18	3.00	5.86	Tavuk	UVA	76.86	65.43	57.09	0.01404
19	2.00	1.72	Hindi	UVA	84.72	72.14	62.97	0.01406
20	3.00	0.01	Tavuk	UVA	71.01	60.45	52.74	0.01409
21	3.00	5.86	Tavuk	UVA	76.86	65.43	57.09	0.01409
22	4.41	5.86	Tavuk	UVA	81.86	69.70	60.82	0.01406
23	1.59	5.86	Hindi	UVA	87.86	74.68	65.06	0.01404
24	3.00	11.71	Tavuk	UVA	82.71	70.31	61.25	0.01409
25	4.00	1.72	Hindi	UVA	91.72	78.08	68.13	0.01406
26	1.59	5.86	Tavuk	UVA	72.86	61.93	53.95	0.01409
27	3.00	5.86	Tavuk	UVC	66.86	56.83	49.51	0.01409
28	3.00	5.86	Tavuk	UVC	66.86	56.83	49.51	0.01414
29	4.00	10.00	Tavuk	UVC	75.00	63.75	55.53	0.01409
30	3.00	5.86	Tavuk	UVC	66.86	56.83	49.51	0.01415
31	3.00	5.86	Hindi	UVC	81.86	69.71	60.83	0.01406
32	3.00	5.86	Tavuk	UVC	66.86	56.94	49.69	0.01415
33	3.00	0.01	Hindi	UVC	76.01	64.70	56.45	0.01415
34	3.00	0.01	Tavuk	UVC	61.01	51.94	45.32	0.01406
35	2.00	1.72	Tavuk	UVC	59.72	50.85	44.38	0.01409
36	4.00	10.00	Hindi	UVC	90.00	76.63	66.86	0.01409
37	3.00	11.71	Tavuk	UVC	72.71	61.81	53.84	0.01409
38	1.59	5.86	Hindi	UVC	77.86	66.28	57.83	0.01409
39	4.00	1.72	Hindi	UVC	81.72	69.59	60.73	0.01414

Bu bağlamda ÇD(O)R modelleri ile bağımsız veri seti arasında renk, KOİ ve TOK giderimleri için 98.1% ile 98.3% ve toplam giderim maliyeti için 99.9% oranında uyumluluk tespit edilmiştir.

Benzer bir biçimde TDY ile türetilen ÇD(O)R modelleri ile bağımsız veri setlerinden elde edilen sonuçlar arasında renk, KOİ ve TOK giderimleri için 86.9% ile 94.4% ve toplam giderim maliyeti için 99.9% oranında uyumluluk belirlenmiştir.

Çizelge 5.23. TDY temelli ÇD(O)R modeli için bağımsız veri seti.

Deneyssel sıra	Açıklayıcı Değişkenler				Yanıt Değişkenleri			
	AT	B (NTU)	KD (g/L)	LT	Renk (%)	KOİ (%)	TOK (%)	Maliyet (\$/L)
1	Tavuk	0.00	4.00	Floresan	69.01	58.77	51.29	0.01414
2	Tavuk	5.00	2.00	Floresan	67.05	57.09	49.81	0.01406
3	Hindi	5.00	3.00	Floresan	55.52	47.19	41.11	0.01409
4	Hindi	0.00	2.00	UVA	68.01	57.81	50.36	0.01406
5	Hindi	5.00	3.00	UVA	75.12	63.85	55.62	0.01409
6	Tavuk	5.00	4.00	UVA	94.12	80.12	69.90	0.01414
7	Tavuk	0.00	4.00	UVC	79.26	67.47	58.87	0.01414
8	Hindi	5.00	4.00	UVC	68.87	58.64	51.18	0.01414
9	Hindi	10.00	2.00	UVC	66.98	57.02	49.75	0.01406

D-opt için ise ilgili yanıt değişkenlerini tahmin eden ÇD(O)R modelleri için uyumluluk renk, KOİ ve TOK giderimlerinde 40.3% ile 48.7% arasında değişmektedir. Ancak, maliyet için elde edilen uyumluluk sonucu 99.9% olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.24. D-opt temelli ÇD(O)R modeli için bağımsız veri seti.

Deneyssel sıra	Açıklayıcı Değişkenler				Yanıt Değişkenleri			
	KD (g/L)	B (NTU)	AT	LT	Renk (%)	KOİ (%)	TOK (%)	Maliyet (\$/L)
1	4.00	6.35	0.00	0.00	76.35	65.02	56.74	0.01414
2	3.29	10.00	1.00	0.00	62.55	53.17	46.32	0.01411
3	2.00	10.00	0.00	0.00	73.00	62.15	54.22	0.01406
4	3.80	1.00	1.00	2.15	75.30	64.01	55.76	0.01413
5	2.00	0.00	0.00	2.15	83.00	70.67	61.66	0.01406
6	3.80	1.00	1.00	2.15	75.30	64.01	55.76	0.01413
7	4.00	2.80	0.00	2.15	92.80	79.00	68.93	0.01414
8	2.00	10.00	1.00	1.00	68.00	57.80	50.35	0.01406
9	3.30	10.00	0.00	1.00	87.55	74.53	65.03	0.01411
10	4.00	0.00	0.00	1.00	80.00	68.12	59.45	0.01414

5.4. Optimum Eleme Tasarımının Seçimi

Farklı DT'lerin renk, KOİ ve TOK giderimleri ile toplam giderim maliyetini incelemadaki hassasiyetleri önceki kısımlarda kapsamlı bir biçimde irdelenmiştir (bkz. Bölüm 5.1, 5.2 ve 5.3). Sonuçlar, ilgili açıklayıcı değişkenlerin hem doğrusal, hem ikili etkileşim hem de ikinci mertebe üssel etkilerini ortaya koymada ve ifade etmede son derece önemli rol oynamıştır. Öte yandan 3D cevap yüzey grafikleri, GDM-VA, TY-VA ve Tukey çoklu karşılaştırma sonuçları ile deneme tasarımlarının çıktıları tek tek görsel ve nicel olarak ele alınmıştır. Ayrıca, ÇD(O)R kullanılarak ilgili yanıt değişkenleri hem tahmin edilmeye çalışılmış hem de içlerindeki değişkenlik ifade edilmeye çalışılmıştır.

Bu kısımda ise daha önceki kısımlarda detaylı bir biçimde tanımlanan istatistiksel kriterlere istinaden (bkz. Bölüm 4.6) bir deneme tasarımı optimizasyonu yapılmaya çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.25'te verilmiştir. Sonuçlar renk, KOİ ve TOK giderimleri için optimum eleme ve etkileşim tasarımlarının sırası ile PBT ve MKT olduğunu ortaya koymuştur. Toplam giderim maliyeti için ise KFT ve TDY sırası ile optimum eleme ve etkileşim tasarımları olarak belirlenmiştir (Çizelge 5.25).

Çizelge 5.25. Optimum deneme tasarımlarının seçimi.

Tasarım	YD	n	SSE	k	AICp	AICc	BICp	APCp	R^2_{tah} (%)	U (%)	Maliyet (\$/L)	p	AD	T
PBT	Renk	12	1.54	8	-8.64	39.36	-4.76	0.64	98.8					✓
	KOİ	12	1.042	8	-13.33	34.67	-9.45	0.43	98.86					✓
	TOK	12	0.747	8	-17.32	30.68	-13.44	0.31	98.92					✓
	Maliyet	12	0.00287	8	-84.06	-36.06	-80.18	0.00	99.17		0.1447			
KFT	Renk	16	109.07	8	46.71	67.28	52.89	20.45	76.32					
	KOİ	16	78.56	8	41.46	62.03	47.64	14.73	76.42					
	TOK	16	61.96	8	37.66	58.23	43.84	11.62	76.52					
	Maliyet	16	0.000001	8	-249.41	-228.84	-243.23	0.00	99.99		0.1881			✓
TDY	Renk	18	84.22	7	41.78	52.98	48.01	10.63	93.93	86.9		0.01	6	
	KOİ	18	61.21	7	36.03	47.23	42.26	7.73	93.92	91.9		0.01	6	
	TOK	18	46.76	7	31.18	42.38	37.42	5.90	93.90	94.4		0.01	6	
	Maliyet	18	0.00000001	2	-379.60	-378.80	-377.82	0.00	99.99	99.99	0.2537	0.001	1	✓
BBT	Renk	90	103.2	8	28.32	30.10	48.32	1.37	99.45	98.3		0.001	7	
	KOİ	90	74.23	8	-1.34	0.44	18.66	0.99	99.37	98.2		0.001	7	
	TOK	90	56.44	8	-26.00	-24.22	-6.00	0.75	99.17	98.2		0.001	7	
	Maliyet	90	0.000001	3	-1642.4	-1642.1	-1634.9	0.00	99.99	99.99	1.2999	0.001	2	
MKT	Renk	78	0.01	20	-659.03	-644.29	-611.89	0.00	99.96	98.1		0.001	8	✓
	KOİ	78	0.21	11	-439.55	-435.55	-413.63	0.00	99.96	98.1		0.001	8	✓
	TOK	78	1.13	9	-312.29	-309.64	-291.08	0.02	99.95	98.2		0.001	8	✓
	Maliyet	78	0.1718	8	-461.21	-459.13	-442.36	0.00	99.99	99.99	1.0994	0.009	1	
D-Opt	Renk	20	93.2	7	44.78	54.11	51.75	9.68	58.42	40.3		0.01	6	
	KOİ	20	68.37	7	38.58	47.92	45.55	7.10	42.18	46.5		0.01	6	
	TOK	20	52.74	7	33.39	42.73	40.36	5.48	22.80	48.7		0.001	6	
	Maliyet	20	0.000000001	2	-470.4	-469.7	-468.4	0.00	99.99	99.99	0.2811	0.001	1	

AD: Açıklayıcı değişkenlerin sayısı, YD: Yanıt değişkenleri.

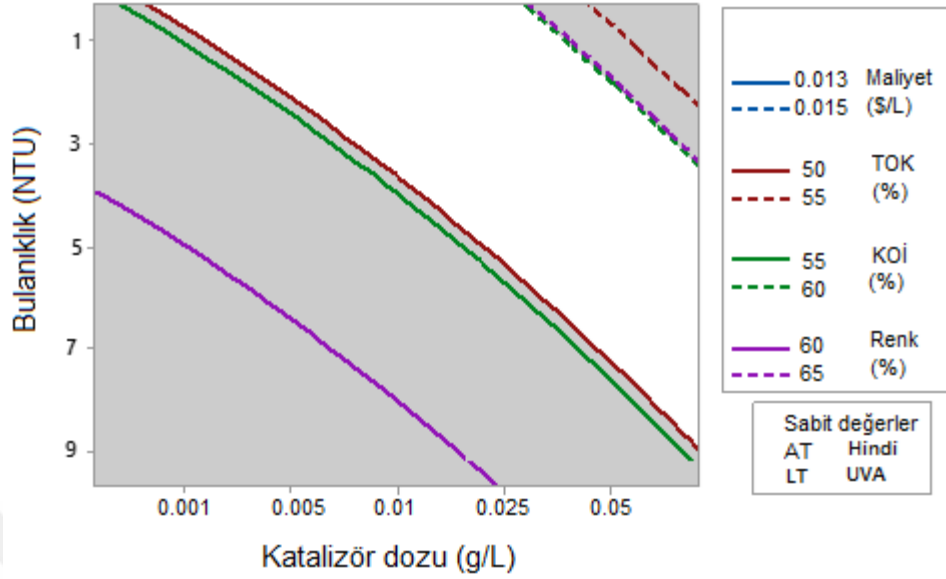
5.5. Optimizasyon

Optimizasyon sürecindeki ana hedef olası bir pilot ölçekli veya endüstriyel uygulamayı başta mali çıktılar olmak üzere kirlетici parametreleri açısından fizibilitesini irdelemektir. Bu bağlamda, ilgili literatürdeki gibi yanıt değişkenlerini maksimize ya da minimize etmeye dayalı bir optimizasyon yaklaşımı yerine daha makul ve gerçekçi bir senaryo üzerinden takip eden şekilde optimizasyon süreci yürütölmüştür: İkincil atık su kalitesinin 50 mg/L O₂ KOİ değerini karşılamasının yeterli olduğu (1), bu şartlara indirgenmiş atık suyun akarsu alıcı ortamına deşarj edileceği (2) ve bu noktadan sonra bu değerlerin eser miktarlara düşeceği (3) öngörüsü ile optimizasyon işlemi hem eş zamanlı hem de tek parametrelili sayısal teknikleri kullanılarak irdelenmiştir.

Bu bağlamda her iki optimizasyonda da ikincil atık su kalitesini (KOİ = 50 mg/L O₂) sağlamak adına renk, KOİ ve TOK giderimleri sırası ile %63, %57 ve %50 olarak belirlenmiştir. Bu şartları verebilecek ve en düşük maliyeti sunan işletme parametreleri ilgili optimizasyon teknikleri ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar takip eden kısımda sunulmuştur.

5.5.1. Eş zamanlı Optimizasyon

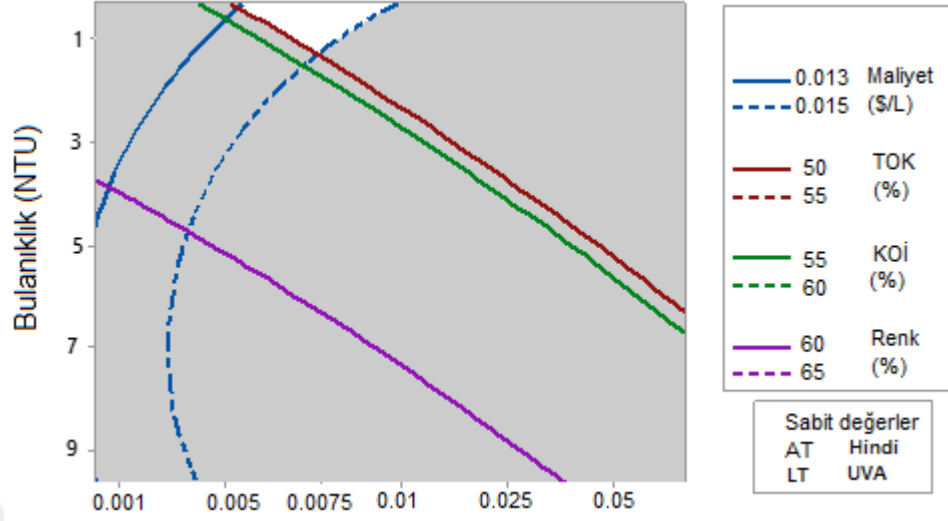
Eş zamanlı optimizasyonun amacı renk, KOİ ve TOK giderimlerini ulaşabilecekleri maksimum deneysel değerlere yaklaştırırken, toplam giderim maliyetini ise olabilecek en küçük değerde tutabilmektir. Bu bağlamda M17 ile gerçekleştirilen eş zamanlı optimizasyona sonuçlar Şekil 5.4’de verilmiştir.



Şekil 5.4. M17 ile renk, KOİ ve TOK giderimleri için eş zamanlı optimizasyon.

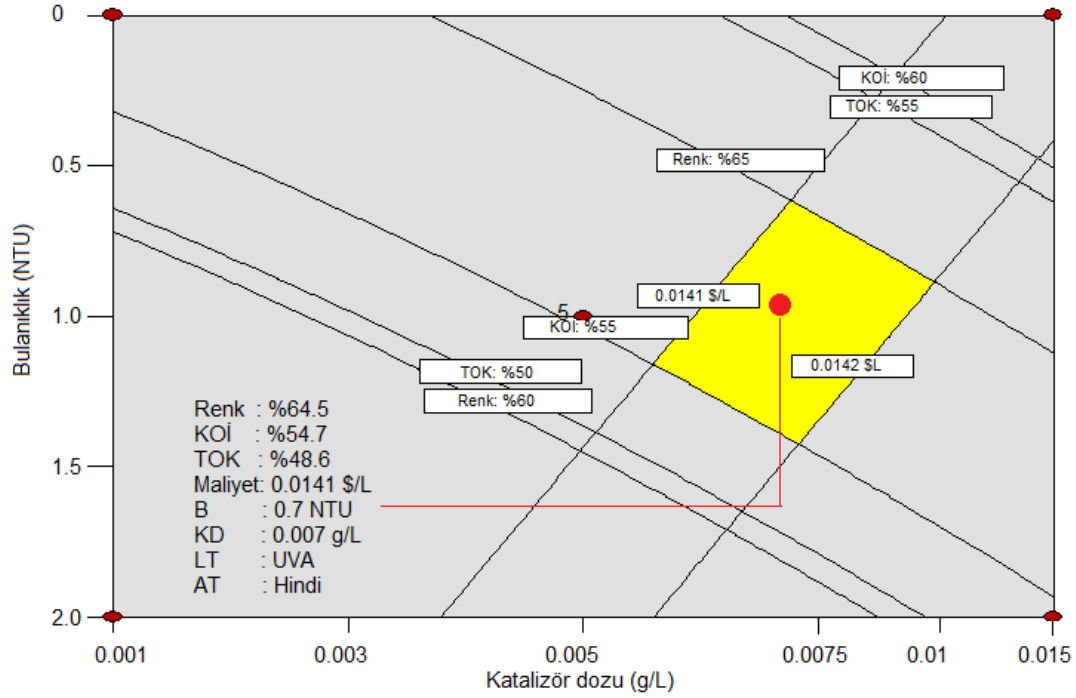
Şekil 5.4, her bir yanıt değişkeninin alt ve üst sınır değerlerini bulanıklık (B) ve katalizör dozuna (KD) bağlı olarak göstermektedir. Şekil 5.4'teki beyaz zeminli alan, eş zamanlı optimizasyonun şartlarının sağlandığı mümkün işletme şartlarını ortaya koymaktadır. Bu çıktılara ulaşırken sabit tutulan kategorik değişken seviyeleri atık su tipi için hindi, lamba tipi için ise UVA lambadır. Grafiğin lejantlarına bakıldığında 0.013-0.015 \$/L atık su aralığında seyreden maliyetin bu şartlarda eş zamanlı optimizasyona dâhil edilemediği görülmektedir. Dolayısı ile bu durum, eşzamanlı optimizasyonda işletme şartlarına ait aralıkların belirlenmesinin önemini açıkça ortaya koymaktadır.

İleri arıtım parametrelerine ait deneyler gerçekleştirilirken elde edilen minimum ve maksimum deneysel maliyetler optimum etkileşim tasarımı olarak belirlenen MKT'de 0.013 ve 0.015 \$/L'dir. Dolayısı ile maliyet aralığının en sık seyrettiği 0.014-0.0141 \$/L bandına getirilmesi ile eş zamanlı optimizasyon sağlanmıştır (Şekil 5.5). Şekil 5.5, renk, KOİ ve TOK giderimlerini sırası ile %60-65, %55-60 ve %50-55 bandına getirirken, maliyeti ise 0.014-0.0141 \$/L aralığında tutmayı başarmıştır. Bu çıktıları yerine getiren açıklayıcı değişken seviyeleri yani optimum işletme şartları ise 0.005-0.01 g/L TiO_2 konsantrasyonu ve 0-1 NTU aralığında ki B'dir (UVA lamba ve hindi atık suyu sabit şartlarında).



Şekil 5.5. Renk, KOİ ve TOK giderimi ile toplam giderim maliyetinin M17 ile eş zamanlı optimizasyonu.

Eş zamanlı optimizasyon, bu tez çalışmasındaki deneylerin planlanmasında sıklıkla yararlanılan DE programı ile de uygulanmış ve bu iki yaygın programın sonuçları göz önüne alınarak hassasiyetleri karşılaştırılmıştır. DE ile yapılan eş zamanlı optimizasyon sonucunda ise Şekil 5.6’da verilen bindirmeli kontur grafiği elde edilmiştir. Renk, KOİ ve TOK giderimleri sırası ile %60-65, %55-60 ve %50-55, toplam giderim maliyeti ise 0.0141-0.0142 \$/L atık su aralığına ayarlandığında, elde edilen eş zamanlı optimizasyon sonuçları Şekil 5.6’da verilmiştir (UVA lamba ve hindi atık suyu sabit şartlarında). Şekil 5.6, M17 kullanılarak elde edilen eş zamanlı optimizasyon sonuçlarına benzer sonuçlar önermiştir (Şekil 5.5). Şekil 5.6’daki sarı zeminli alanlar tüm yanıt değişkenleri için eş zamanlı optimizasyonun sağlandığı, gri zeminli alanlar ise eş zamanlı optimizasyonun sağlanmadığı işletme şartlarını göstermektedir.



Şekil 5.6. Renk, KOİ ve TOK giderimleri ile toplam giderim maliyetinin DE ile eş zamanlı optimizasyonu.

Şekil 5.6, hindi atık suyu, UVA lamba, 0.7 NTU ve 0.007 g/L TiO_2 şartlarında, renk, KOİ ve TOK giderimlerini sırası ile %64.5, %54.7 ve %48.6 olarak elde ederken toplam maliyeti ise 0.0141 \$/L olarak belirlemiştir. Önerilen bu sonuçların M17 ile gerçekleştirilen eş zamanlı optimizasyon sonuçlarına çok yakın olduğu net bir biçimde görülmektedir. Bu sonuçlar hem M17 ile hem de DE ile eş zamanlı optimizasyonun başarılı bir biçimde gerçekleştirildiğini ortaya koymaktadır.

5.5.2. Tek Parametrelili Sayısal Optimizasyon

Tek parametrelili sayısal optimizasyonun eş zamanlı optimizasyondan farkı tüm yanıt değişkenlerinin ayrı ayrı maksimize ya da minimize edilmesidir. Bu bağlamda hem M17 hem de DE kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon neticesinde elde edilen sonuçlar Çizelge 5.26'da verilmiştir. Sonuçların, eşzamanlı optimizasyon ile büyük benzerlikler gösterdiği açık bir biçimde görülmektedir

Çizelge 5.26. M17 ile elde edilen tekli sayısal optimizasyon sonuçları.

Açıklayıcı değişkenler	Kullanılan program	M17	DE
	KD (g/L)	0.01	0.01
	B (NTU)	0	0
	AT	Hindi	Hindi
	LT	UVA	UVA
Yanıt değişkenleri	Maliyet (\$/L)	0.014	0.014
	TOK (%)	48.9	47.8
	KOİ (%)	54.8	55.1
	Renk (%)	59.7	60.3
	İstenilebilirlik	0.965	0.955

5.6. Validasyon (Doğrulama)

Hem M17 hem de DE ile belirlenen optimum şartlarda (0-1 NTU, hindi atık suyu, UVA lamba ve 0.01 g/L TiO₂) üç adet validasyon deneyi gerçekleştirmiş ve renk, KOİ ve TOK giderim verimleri sırası ile %61.5 ± 0.2, %58.3 ± 0.5 ve %52.7 ± 0.8 olarak bulunmuştur. Bu şartları sağlayan toplam giderim maliyeti ise 0.014 \$/L ± 0.001 olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar, tahmin edilen değerler ile deneysel olarak elde edilen sonuçlar arasında oldukça büyük bir uyum olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Bu sonuçlardan hareketle hem DE'nin hem de M17'nin;

- Renk, KOİ ve TOK giderimleri ile toplam maliyetin gerek eş zamanlı gerekse tek parametrelili sayısal optimizasyonuna başarılı bir biçimde uygulandığını,
- CYM'nin TiO₂ destekli fotokatalitik bozunma süreci ile kanatlı et kesimhanesi çıkış sularının arıtımında işletme parametrelerinin optimizasyonunda son derece başarılı olduğunu,
- Optimize şartlarda yapılan validasyon deneyleri ile tahmin edilen sonuçlar arasında çok iyi bir uyum olduğunu çıkarımlarına ulaşılabilir.

5.7. Optimizasyon Tekniklerinin Karşılaştırılması

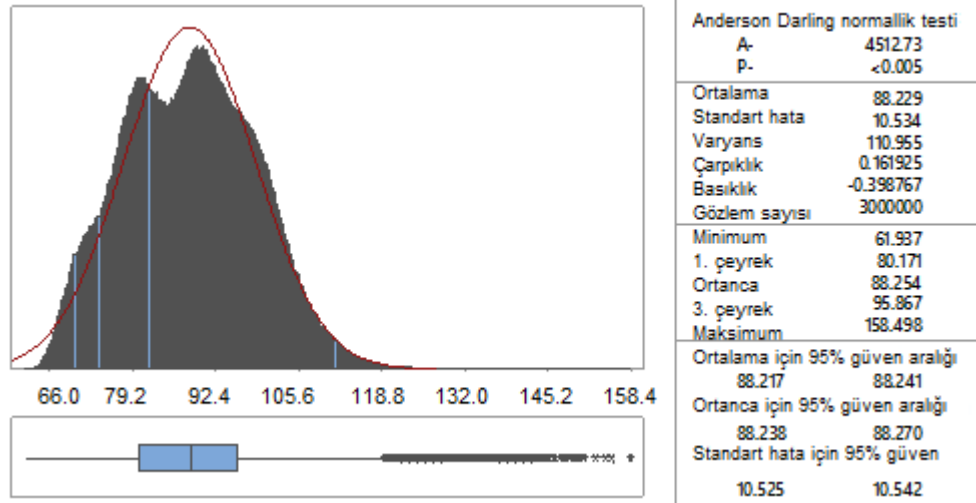
Kullanılan iki farklı optimizasyon tekniği sayesinde hem eş zamanlı hem de ayrı ayrı olarak renk, KOİ ve TOK giderimleri maksimize, toplam giderim maliyeti ise minimize edilmeye çalışılmıştır. Bu bağlamda DT'lerin elde edilmesinde hemen hemen aynı oranlarda kullanılan ve ilgili literatürde de sıklıkla tercih edilen iki farklı istatistiksel analiz programı olan M17 ve DE'den yararlanılmıştır. Bu bağlamda elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

- M17 ile elde edilen eş zamanlı optimizasyon sonuçları; 0.005-0.01 g/L TiO_2 , 0-1 NTU, hindi atık suyu ve UVA lambadır.
- Bu şartlarda renk, KOİ ve TOK giderimi ile toplam giderim maliyeti için sırası ile %60-65, %55-60, %50-55 ve 0.0141-0.0142 \$/L değerleri öngörülmüştür.
- DE ile edilen eş zamanlı optimizasyon sonuçları ise yaklaşık 0.7 NTU ve 0.007 TiO_2 , hindi atık suyu ve UVA lambadır.
- Bu şartlarda renk, KOİ ve TOK giderimi ile toplam giderim maliyeti için sırası ile %64.5, %54.7, %48.6 ve 0.0141 \$/L değerleri öngörülmüştür.
- Bu bağlamda iki farklı programın eş zamanlı optimize edilmiş işletme şartlarının son derece yakın olduğu görülmektedir.

Tek parametrelili sayısal optimizasyonda ise her iki programın önerdiği işletme şartlarında büyük benzerlik görülmüştür. Hemen hemen her iki programda da %60 renk, %55 KOİ ve %48 TOK giderimi ön görülmüş ve bu tahminler hindi atık suyu, UVA lamba, 0 NTU ve 0.01 g/L TiO_2 için elde edilmiştir. Bu şartlarda toplam giderim maliyeti ise 0.014 \$/L olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, hem eş zamanlı hem de tek parametrelili sayısal optimizasyonun TiO_2 destekli fotokatalitik bozunma ile kanatlı et kesimhanesi çıkış sularının ileri arıtımında, işletme parametrelerinin optimizasyonunun başarılı bir biçimde gerçekleştirildiğini göstermektedir.

5.8. Belirsizlik Analizleri

Sayısal açıklayıcı değişkenler olan KD ve B'nin dağılım tiplerini belirlemek adına; normal, Box-Cox, lognormal, 3-parametre lognormal, üssel, 2 parametrelili üssel, Weibull, 3 parametrelili Weibull, en küçük uç değer, en büyük uç değer, Gamma, 3 parametrelili Gamma, lojistik, loglojistik, ve 3 parametrelili loglojistik olmak üzere 14 dağılım tipi uygulanmıştır. Bunlar arasından hem KD ($p = 0.15$, $AD = 410.45$) hem de B ($p = 0.10$, $AD = 380.25$) için Weibull dağılımı en uygun olarak belirlenmiştir. Weibull dağılımının istatistiksel karakteristikleri olan şekil ve ölçek değerleri KD için sırasıyla 4.29 ve 3.30, B içinse sırasıyla 1.22 ve 6.08 olarak belirlenmiştir. Kategorik değişkenler olan AT ve LT içinse doğrudan Discrete dağılım kullanılmıştır. Discrete dağılım içerisinde kategorik değişkenlerin seviyeleri için takip eden rakamsal kodlamalar yapılmıştır: AT için tavuk (0) ve hindi (1); LT için floresan (0), UVC (1) ve UVA (2). Şekil 5.7 ve Çizelge 5.27, sırası ile MC ile elde edilmiş ve deneysel olarak elde edilmiş renk giderimi değerlerine ait betimleyici istatistikleri göstermektedir.



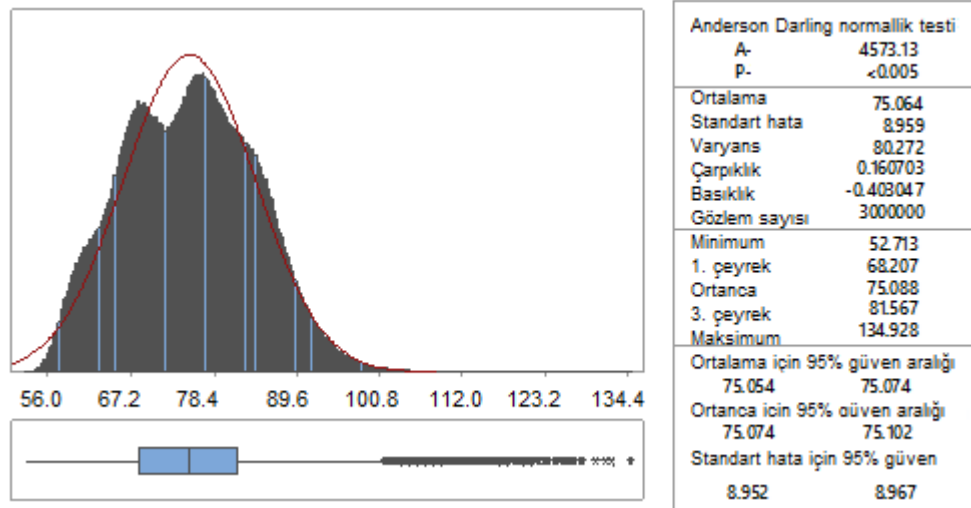
Şekil 5.7. MKT temelli türetilen ÇDOR modeline ait renk giderimi (%) için elde edilen MC temelli histogram sonuçları.

Çizelge 5.27. Deneysel renk giderimine ait betimleyici istatistikler.

Değişken	Gözlem	Ortalama	Standart hata	Varyans	Basıklık	Çarpıklık
Renk (%)	78	74.59	11.93	142.23	0	-0.63

MC sonucunda, p değerinin 0.05'ten küçük olması (< 0.005) ve AD istatistiğinin büyük olması renk giderimi değerlerinin normal dağılıma uymadığını göstermektedir. İlâveten standart hatanın her ikisinde de birbirine ve %10'a yakın çıkması renk giderimi içerisinde yer alan belirsizliklere işaret etmektedir. Ayrıca MC temelli deneysel ortalama renk giderimi (%88.229) ile ortalama renk giderimi (%74.59) arasında tutarlılık gözükmemektedir.

KOİ giderimi için de durum renk giderimi ile paralellik göstermektedir (Şekil 5.8, Çizelge 5.28). Deneysel ve MC ile elde edilmiş standart hatalar birbirine yakın çıkmıştır (%9). Standart hatanın %9 civarında olması, nispeten KOİ gideriminin de bazı belirsizlikler içerdiğine işaret etmektedir. MC ile elde edilen ortalama KOİ giderimi olan %75.064 değeri ile deneysel ortalama KOİ giderimi olan %63.46 arasında renk giderimine göre nispeten daha az bir fark bulunmaktadır.

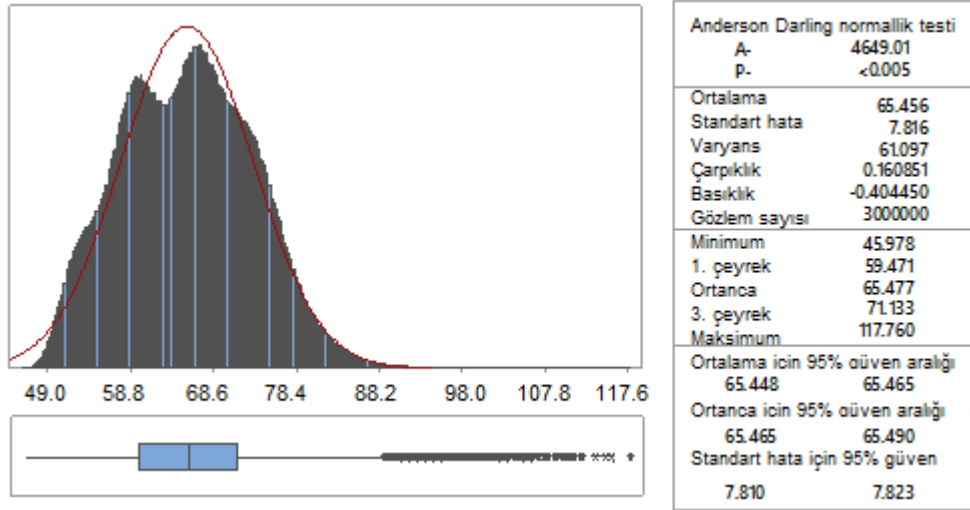


Şekil 5.8. MKT temelli türetilen ÇDOR modeline ait KOİ giderimi için elde edilen MC temelli histogram sonuçları.

Çizelge 5.28. Deneysel KOİ giderimine ait betimleyici istatistikler.

Değişken	Toplam gözlem	Ortalama	Standart hata	Varyans	Basıklık	Çarpıklık
KOİ (%)	78	63.46	9.14	102.91	0	-0.64

Şekil 5.9 ve Çizelge 5.29 TOK giderimine ait ÇD(O)R modeline ve MC'na ait elde edilen sonuçların betimleyici istatistiklerini hem görsel hem de tablolaştırılmış bir biçimde sunmaktadır. Sonuçlar; renk ve KOİ giderimi ile benzerlik göstermektedir. En önemli farklılık, diğer benzerliklerin dışında, standart hatanın %7'ye kadar düşmüş olmasıdır ki, bu durum; renk, KOİ ve TOK sıralamasında en az hatanın şu ana kadar TOK için türetilen ÇD(O)R modeline ait olduğunu göstermektedir. MC ile elde edilen ortalama TOK giderimi %65.456 ile deneysel ortalama TOK giderimi %55.33 arasında renk ve KOİ giderimine nazaran daha az bir fark vardır.



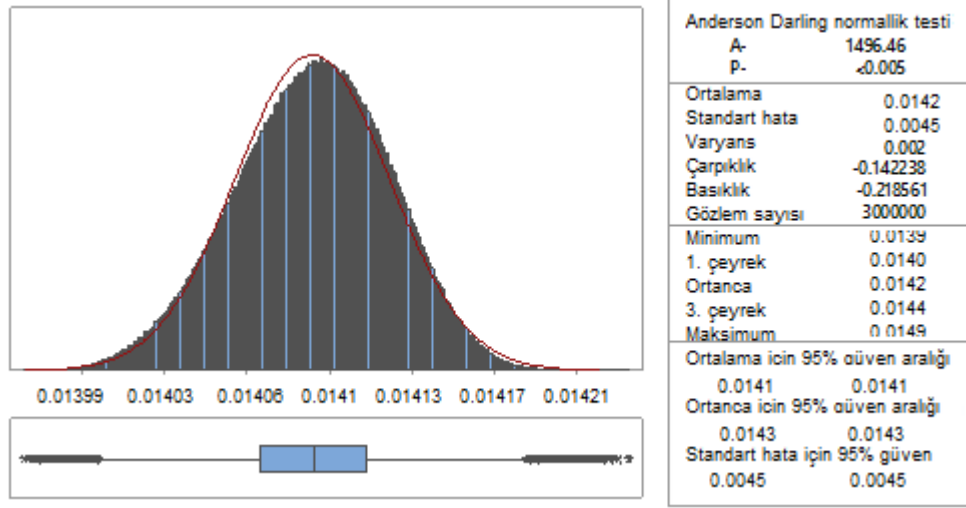
Şekil 5.9. TOK giderimi için elde edilen MC temelli histogram sonuçları.

Çizelge 5.29. Deneysel TOK giderimine ait betimleyici istatistikler.

Değişken	Toplam gözlem	Ortalama	Standart hata	Varyans	Basıklık	Çarpıklık
TOK (%)	78	55.33	8.84	78.22	0	-0.64

Son olarak toplam giderim maliyeti için elde edilen deneysel veriler ve MC ile türetilen tahminler Çizelge 5.30 ve Şekil 5.10'de verilmiştir. Standart hatanın 0.0045 \$/L gibi son derece küçük bir değerde olması toplam giderim maliyeti içerisinde çok az bir belirsizlik olduğuna işaret etmektedir. Bu durumun, daha önce karakteristikleri detaylı bir biçimde incelenen ÇDOR modelleri göz önüne alındığında (bkz. Bölüm

5.6), toplam giderim maliyetinin diğer yanıt değişkenlerinin aksine bir ÇDR modeli ile ifade edilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. MC'ye istinaden ortalama toplam giderim maliyeti 0.0142 \$/L olarak belirlenmiştir. Deneysel ortalama toplam giderim maliyeti de yine aynı şekilde 0.0141 \$/L'dir. Bu sonuçlar hem toplam giderim maliyeti içerisinde bir belirsizlik olmadığına hem de sonuçların birbirleri ile uyum içerisinde olduğuna dikkat çekmektedir.



Şekil 5.10. Toplam giderim maliyeti için elde edilen MC temelli histogram sonuçları.

Çizelge 5.30. Deneysel toplam giderim maliyetine ait betimleyici istatistikler.

Değişken	Toplam gözlem	Ortalama	Standart hata	Varyans	Basıklık	Çarpıklık
Maliyet (\$/L)	78	0.0141	0.0045	0.00203	0	-0.52

6. TARTIŞMA

6.1. Eleme Tasarımları

6.1.1. PBT

12 deneylik PBT sonuçları, renk, KOİ ve TOK giderimleri üzerine etkisi incelenen yedi açıklayıcı değişkenden, AT, LT, KD ve B'ğin etkili olduğunu ($p < 0.001$); ancak, başlangıç pH'sı, reaksiyon süresi ve havalandırmanın etkisiz olduğunu ($p > 0.05$) göstermiştir. Çizilen pareto grafikleri anlamlı bulunan açıklayıcı değişkenleri önem sırasına göre AT, LT, B ve KD olarak sıralamıştır. Toplam giderim maliyeti içinse RS ve KD dışında hiçbir anlamlı etki bulunamamıştır ($p < 0.001$).

İlgili literatürde bir eleme tasarımı olan PBT ile fotokatalitik bozunma sürecini bir araya getiren az sayıdaki çalışmalardan birisi Ghasemi vd. (2015) tarafından denenmiştir. Ghasemi vd. (2015), kendi sentezledikleri sıra dışı bir katalizör eşliğinde foto-Fenton süreci ile metil turuncusu boyasının giderimini incelemişlerdir. Başlangıç metil turuncu konsantrasyonu, peroksit dozu, sıcaklık, reaksiyon süresi, başlangıç pH'sı ve katalizör dozunun etkilerini eş zamanlı olarak incelemek için PBT'nden yararlanmışlardır. Sonuçları hem VA hem de pareto grafikleri ile inceleyen Ghasemi vd. (2015), anlamsız olduğunu belirledikleri sıcaklık dışında geriye kalan açıklayıcı değişkenlerin etkilerini incelemek için BBT kullanmışlardır. Ghasemi vd. (2015)'nin gerek PBT'nı gerek kullanım amacı, gerekse PBT'nı uygulama yöntemi ve elde ettikleri sonuçlar göz önüne alındığında, bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar ile iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

6.1.2. KFT

16 deneylik KFT da PBT ile aynı amaç doğrultusunda kullanılmış ve benzer sonuçlar elde edilmiştir. Renk, KOİ ve TOK giderimleri üzerine AT, LT, B ve KD'nu önem sırası çoktan aza olacak şekilde anlamlı olarak bulunmuştur ($p < 0.001$). Öte yandan RS, pH ve H'nın bu yanıt değişkenleri üzerinde etkisiz oldukları belirlenmiştir ($p > 0.05$).

Sakkas vd. (2010), Kongo kırmızısı boyasının sulu çözeltilerden fotokatalitik bozunma ile uzaklaştırılmasını incelerken KFT'dan yararlanmıştır. Başlangıç pH'sı, boya konsantrasyonu, peroksit dozu, TiO_2 dozu ve ışık yayınımları olmak üzere beş tane olan açıklayıcı değişkenlerin etkilerini toplam 10 deney ile incelemişlerdir. Sonuç olarak sadece TiO_2 ($p = 0.021$) ve peroksit ($p = 0.047$) konsantrasyonlarının fotokatalitik sürecin verimine etkili olduğunu belirtip anlamlı bulunan parametreleri MKT'a aktarmışlardır.

Fernandez vd. (2009), üç farklı reaktif boyanın fotokatalitik bozunma süreci ile sulu çözeltilerden giderimini KFT yardımı ile incelemişlerdir. KFT'da kullandıkları açıklayıcı değişkenler, boya tipi, başlangıç boya konsantrasyonu, başlangıç boya pH'sı ve katalizör dozudur. Elde ettikleri sonuçlar doğrultusunda pH'nın en önemli katalizör dozunun ise tek anlamsız açıklayıcı değişken olduğunu pareto grafikleri ile belirlemişlerdir.

Poblete vd. (2011), fotokatalitik bozunma ile sızıntı sularının giderimi inceledikleri çalışmalarında KFT'dan yararlanmışlardır. Etkisi incelenecek açıklayıcı değişkenler olarak katalizör tipi, yükseltgenabilir bileşik tipi, katalizör yüklemesi, reaksiyon süresi ve pH'ı belirledikleri çalışmalarında, tüm faktörlerin anlamlı olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca farklı sızıntı suyu tiplerinin en önemli açıklayıcı değişken olduğunu ve giderim veriminin doğrudan bu açıklayıcı değişkene bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

KFT ile ilgili elde edilen sonuçların benzer çalışmalardaki sonuçlar ile uyum içerisinde olduğu açık bir biçimde görülmektedir (Fernandez vd., 2009, Sakkas vd.,

2010, Poblete vd., 2011). Bu durum KFT'nin oldukça etkili bir eleme tasarımı olduğunu ortaya koymaktadır.

6.2. Etkileşim Tasarımları

6.2.1. BBT

Bir CYM olan BBT neticesinde LT, AT, B ve KD'nun doğrusal etkileri renk, KOİ ve TOK giderimleri üzerinde son derece etkili bulunmuştur ($p < 0.001$). Öte yandan KD ($p < 0.001$) ve B'lığın ($p < 0.004$) ikinci merteye etkilerinin de renk, KOİ ve TOK giderimleri üzerinde anlamlı oldukları belirlenmiştir. İlaveten her ne kadar doğrusal etkisi anlamlı olmasa da ($p > 0.05$) RS'nin ikinci merteye etkisi ($p < 0.0048$) renk, KOİ ve TOK giderimleri üzerinde etkili olmuştur. Dahası KD ile B arasında renk, KOİ ve TOK giderimleri üzerine etkili bir ikili etkileşim tespit edilmiştir ($p < 0.028$). Toplam giderim maliyeti üzerine ise sadece KD ve RS'nin doğrusal etkilerinin anlamlı olduğu belirlenmiştir ($p < 0.001$). Tüm bu sonuçlar bir CYM olan BBT'nin açıklayıcı değişkenlerin yanıt değişkenleri üzerindeki doğrusal, ikili etkileşim ve ikinci merteye üssel etkilerini incelemeye son derece etkili olduğunu göstermektedir.

Sahoo ve Gupta (2012), metil mavisi boyasının fotokatalitik bozunma ile gideriminde bir CYM olan BBT tasarımından yararlanmışlardır. Etkisini inceledikleri parametreler olan KD, pH ve başlangıç boya konsantrasyonunun sadece doğrusal etkilerinin değil, aynı zamanda tüm ikinci merteye üssel ve tüm ikili etkileşimlerinin de giderim üzerinde etkili olduklarını belirtmişlerdir. Sonuç olarak CYM'nu uygulamanın etkin bir yolu olarak BBT'nı araştırmacılara tavsiye etmişlerdir.

Das vd. (2014), klorheksidin kimyasalının sulu çözeltilerden fotokatalitik bozunma ile gideriminde BBT'ndan yararlanmış ve giderimi istatistiksel olarak modellemişlerdir. Çalışmalarında pH, KD ve başlangıç klorheksidin konsantrasyonunun etkilerini incelemişlerdir. BBT'nın sonuçlarına binaen tüm doğrusal etkilerin anlamlı olmasına ilaveten KD'nun ikinci merteye üssel etkisi dışında herhangi

bir üssel etki bulamamışlardır. Ayrıca KD ile başlangıç kloroheksidin konsantrasyonu arasında giderim üzerinde etkili ikili bir etkileşim tespit etmişlerdir. Sonuç olarak BBT'nı son derece pratik ve başarılı bulmuşlardır.

Azri vd. (2016), sentezledikleri sıradışı bir katalizör ile kompleks bir kimyasal fotokatalitik bozunma süreci ile gidermeye çalışmışlardır. Bu süreçte BBT'ndan deneylerin planlanması ve verilerin istatistiksel olarak incelenmesi aşamasında yararlanmışlardır. Sonuç olarak BBT'nın son derece başarılı olduğunu belirtmişlerdir. İlgili literatür ile tez çalışmasının bu kısmında elde edilen sonuçlar arasında büyük bir uyum görülmektedir (Sahoo ve Gupta, 2012, Das vd., 2014, Azri vd., 2016). Ayrıca bu uyum, BBT'nın CYM'nun uygulanmasında son derece etkin bir yol olduğunu göstermektedir.

6.2.2. MKT

Diğer bir CYM olan MKT neticesinde LT, AT, B ve KD'nun doğrusal etkilerinin renk, KOİ ve TOK giderimleri üzerinde anlamlı oldukları tespit edilmiştir ($p < 0.001$). Öte yandan KD ($p < 0.001$) ve B'lığın ($p < 0.024$) ikinci mertebe etkilerinin de renk, KOİ ve TOK giderimleri üzerinde anlamlı oldukları belirlenmiştir. Ancak tüm bu etkiler dışında renk, KOİ ve TOK giderimleri üzerinde etkili herhangi bir ikili etkileşim tespit edilemediği gibi toplam giderim maliyeti üzerine etkisi olan hiçbir açıklayıcı değişken de bulunamamıştır ($p > 0.05$). MKT, yıldız noktalar olarak belirtilen uç şartlarda gözlem yaparak toplamda diğer bir CYM olan BBT'ndan 12 tane daha az deney önermiş ve böylece toplamda 283.36 \$/L daha az bir maliyetle bu sonuçlara ulaşmıştır.

Yu vd. (2016), fotokatalitik bozunma ile metilen mavisinin sulu çözeltilerden giderimini incelemiş ve çalışmalarında MKT'dan yararlanmışlardır. Başlangıç boya konsantrasyonu, KD ve pH'ın etkilerini inceledikleri çalışmalarında, tüm doğrusal etkilerin anlamlı olduğunu belirtmişlerdir. İlaveten KD'nun ikinci mertebe üssel etkisinin ve KD ile başlangıç boya konsantrasyonu arasındaki ikili etkileşimin giderim üzerinde son derece anlamlı olduğunu belirtmişlerdir. Buldukları sonuçlara ve türetilen

tahmini değerlere dayalı olarak MKT'ın, çalışmalarındaki giderimin istatistiksel modellemesinde son derece başarılı olduğu belirtmişlerdir.

Sakkas vd. (2010), fotokatalitik bozunma süreci ile Kongo kırmızısı boyasının giderimini MKT'dan yararlanarak incelemişlerdir. Kurdukları MKT içerisinde peroksit dozu ve katalizör olarak kullanılan TiO_2 dozu iki açıklayıcı değişken olarak yer almıştır. Elde ettikleri sonuçlar, açıklayıcı değişkenlerin tüm doğrusal, ikili etkileşim ve ikinci merteye üssel etkilerinin giderim üzerinde anlamlı olduğunu göstermiştir. Bu noktadan hareketle bir CYM olan MKT'ın deney planlanmasında ve sonuçların irdelenmesinde son derece yararlı olduğunu belirtmişlerdir. İlgili literatür ile tez çalışmasının bu kısmında elde edilen sonuçlar arasında büyük bir uyum görülmektedir (Sakkas vd., 2010, Yu vd., 2016). Ayrıca bu uyum, BBT'nin CYM'nun uygulanmasında son derece etkin bir yol olduğunu göstermektedir.

6.2.3. TDY

TDY ile renk, KOİ ve TOK giderimleri zerine B, AT ve LT'nin etkili oldukları belirlenmiştir ($p < 0.001$). Ancak, hem eleme tasarımları olan PBT ve KFT hem de CYM olan BBT ve MKT'ın aksine, ilginç bir biçimde, KD'nun anlamsız olduğu ve renk, KOİ ve TOK giderimleri üzerinde etkili olmadığı belirtmiştir ($p > 0.05$). Bununla birlikte hiçbir anlamlı ikili etkileşim ya da ikinci merteye üssel etkinin de renk, KOİ ve TOK giderimleri üzerinde etkili olmadığını göstermiştir ($p > 0.05$).

Chong vd. (2009), Kongo kırmızısı boyasının sulu çözeltilerden giderimini fotokatalitik bozunma süreci ile incelerken TDY'ndan yararlanmışlardır. Etkisi incelenecek açıklayıcı değişkenleri katalizör dozu, pH, havalandırma hızı ve başlangıç boya konsantrasyonu olarak belirlemişlerdir. TDY'nın normalde 81 deney ile etkisi incelenebilecek açıklayıcı değişkenlerin sadece 9 deney ile yapılabilmesinin büyük bir katkı olduğunu belirtirken, ayrıca bu tez çalışmasının havalandırmanın etkileri üzerine olan çıktılarına paralel bir biçimde havalandırmanın etkisiz olduğunu belirtmişlerdir.

Öte yandan en önemliden en az önemliye doğru olacak şekilde açıklayıcı değişkenleri boya konsantrasyonu, katalizör dozu ve pH olarak sıralamışlardır.

Chong vd. (2010) TDY ve CYM'nu kombine bir biçimde ele aldıkları çalışmalarında katalizör dozu, pH, havalandırma hızı ve başlangıç boya konsantrasyonunun modifiye TiO₂ destekli fotokatalitik bozunma süreci ile Kongo kırmızısı boyasının sulu çözeltilerden gideriminde incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar tüm açıklayıcı değişkenlerin giderim üzerinde etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca sinyal gürültü oranını kullanarak en önemli açıklayıcı değişkenin KD olduğunu belirtmişlerdir.

Ahmed vd. (2016), kloro ksilenol maddesinin sulu çözeltilerden giderimini güneş ışığı temelli bir fotokatalitik sistemde ve kendi sentezlerikleri farklı türlerdeki katalizörler ile incelerken TDY'ndan yararlanmışlardır. Etkisi incelenen açıklayıcı değişkenler katalizör dozu, başlangıç organik madde konsantrasyonu ve başlangıç pH'sı olarak belirlenmiştir. Deneylerin sonunda TDY sadece başlangıç organik madde konsantrasyonunun giderim üzerinde etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Sohrabi vd. (2017) fotokatalitik bozunma ile kombine halde kullandıkları Fenton sürecini kullanarak sulu çözeltilerden reaktif boya giderimini incelemişlerdir. Dört açıklayıcı değişken ve dört farklı seviye için kurdukları TDY ile toplamda 16 deney ile süreci test etmişlerdir. Neticede, etkisi incelenen tüm açıklayıcı değişkenlerin anlamlı olduğunu ayrıca sinyal/gürültü oranını kullanarak da ikili etkileşimlerin önemli olduklarını belirtmişlerdir. İlaveten etkileşim matrisi grafiklerini çizdirerek açıklayıcı değişkenlerin tüm ikili etkileşimlerine ait bütün kombinasyonları görsel olarak ifade etmişlerdir. Tüm bu literatür bilgisi ışığında, TDY üzerine elde edilen sonuçların benzer çalışmaların sonuçları ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir (Chong vd., 2009, Chong vd., 2010, Ahmed vd., 2016, Sohrabi vd., 2017).

6.2.4. D-opt

D-opt, her bir açıklayıcı değişken için toplam deney sayısı kadar farklı seviyeler belirleyerek gözlem almayı ve buna bağlı olarak yanıt değişkenlerindeki değişkenliği gözlemlemeyi hedeflemiştir. 18 deneylik bir çalışma sonucunda sadece LT, AT, KD ve B'lığın renk, KOİ ve TOK giderimleri üzerinde etkili olduğunu göstermiştir ($p < 0.001$). Ancak, tıpkı TDY gibi, her hangi anlamlı bir ikili etkileşim ya da ikinci mertebe üssel etki bulunamamıştır ($p > 0.05$).

Körbahtı ve Rauf (2008), toludin mavisinin fotokatalitik bozunma ile giderimini CYM ve D-opt'ni birlikte kullanarak incelemiştir. D-opt'ndan özellikle CYM'nun alt ve üst sınırlarının belirlenmesinde yararlanmışlardır. Elde ettikleri şartları CYM'na aktardıktan sonra boya konsantrasyonu, katalizör konsantrasyonu ve başlangıç pH'sının giderim üzerinde etkili olduğunu ve bu üç açıklayıcı değişkenin ikinci mertebe üssel etkilerinin de giderim üzerinde etkili olduğunu belirtmişlerdir. Ancak giderim üzerinde etkili herhangi bir ikili etkileşim bulamamışlardır.

Gricic vd. (2010), Fenton etkileşimli fotokatalitik bozunma sürecinde farklı reaktif boyaların giderimini CYM ve kısmen D-opt kullanarak incelemişlerdir. Bu çalışma, gerek içerdiği açıklayıcı değişkenlerden birisinin kategorik olması gerekse incelenen yanıt değişkenlerinden birisinin TOK olması sebebiyle diğer literatür çalışmalarından farklıdır. Çalışmalarındaki açıklayıcı değişkenlerden sayısal olanlar Fe^{+2} dozu, oksidant/katalizör molar oranı ve başlangıç boya konsantrasyonu iken, tek kategorik değişken ise oksidant tipi olup seviyeleri ise peroksit, potasyum per sülfat ve ikisinin birebir mol oranında karışımıdır. Değişimleri incelenen yanıt değişkenleri ise TOK giderimi (%), iki farklı dalga boyundaki absorbans değişimi (%), ve iki farklı kinetik sabitidir (dk^{-1}). Sonuç olarak farklı yanıt değişkenleri üzerinde farklı açıklayıcı değişkenlerin doğrusal, ikili etkileşim ve ikinci mertebe üssel etkilerinin anlamlı olduklarını belirlemişlerdir.

Jafarzadeh vd. (2011), modifiye TiO_2 eşiliğinde fotokatalitik bozunma ile fenol giderimini inceledikleri çalışmalarında D-opt ve CYM eş zamanlı olarak

kullanmışlardır. Başlangıç pH'sı, başlangıç fenol konsantrasyonu, reaksiyon sıcaklığı, reaksiyon süresi, UV ışık yoğunluğu, katalizör kalsinasyon sıcaklığı ve katalizör dozunun etkilerini klasik M17 ya da DE programları yerine MODDE 8.0.2 kullanarak incelemişlerdir. Optimum işletme şartları olarak 10.7 pH, 0.5 mM başlangıç fenol konsantrasyonu, 27 °C, 6.5 saat reaksiyon süresi, 250 W UV ışık yoğunluğu, 600 °C kalsinasyon sıcaklığı ve 6 g/L katalizör dozunu belirlemişlerdir. İlgili literatür sonuçlarının işaret ettiği en önemli noktalardan birisi D-opt'nın tek başına kullanılmak yerine CYM ile birlikte kullanılmasıdır. Bu bağlamda, bu tez çalışması içerisinde renk, KOİ ve TOK giderimleri üzerine en etkisiz sonuçların D-opt'ndan elde edilmiş olması bu şekilde açıklanabilir. Sonuç olarak, elde edilen sonuçların ilgili literatürle nispeten bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

6.3. İşletme Parametrelerinin Etkileri

6.3.1. Renk, KOİ ve TOK Giderimleri

Deneyssel olarak elde edilen giderimler içerisinde sürekli olarak renk (%) > KOİ (%) > TOK (%) sıralaması ile karşılaşılmaktadır. Bu durum renk, KOİ ve TOK terimlerinin tanımları ve kapsamaları ile açıklanabilir. Renk, merkezdeki organik bileşiğin etrafında bağlı bir kromofor gruba işaret etmektedir. Bu bağlamda renk gideriminin (%) KOİ gideriminden (%) yüksek olması halihazırda beklenen bir durumdur. Zira, KOİ; yüksek sıcaklık ve düşük pH'da kimyasal olarak oksidize edilebilen organik bileşiklerin CO₂'ye dönüşene kadar ihtiyaç duyduğu O₂'nin eşdeğerliğidir. TOK gideriminin (%) daha da düşük olması ise, KOİ içeriğine girmeyen ve kimyasal olarak oksidize olmayan direçli bazı organik bileşiklerden ve biyokimyasal olarak parçalanabilir, zayıf indirgenmiş inorganik bileşiklerden kaynaklanmaktadır. Bu noktada, herhangi bir ileri karakterizasyon yapılmamasına rağmen, atık su karakterizasyonunda yapılan bazı kabullerin de göz önünde tutulması gerekmektedir (bkz. Bölüm 4.1).

Etkileşim tasarımlarının açıklayıcı değişkenlerin etkilerini incelerken işaret ettiği en önemli noktalardan birisi de KD-B ve KD-LT ikili etkileşimleridir. B ile renk, KOİ ve TOK giderimleri üzerine negatif bir korelasyon tespit edilmiştir ($p = 0.004$, $r = -0.299$). KD ile renk, KOİ ve TOK giderimleri arasında ise pozitif bir korelasyon tespit edilmiştir ($p = 0.002$, $r = 0.185$). Bu durum artan KD'nun ve azalan B'nin renk, KOİ ve TOK giderimlerinde bir artış yaratacağını göstermektedir.

Azalan B, UV ışınların katalizör yüzeyine daha rahat ulaşmasını sağlar. Bu durum ise yarı iletken bir katalizör olan TiO_2 'nin daha çabuk aktive olmasına neden olur. Bu durum göz önüne alınarak artan B'nin oluşturabileceği olumsuzluklar, belli bir noktaya kadar KD'nin arttırılması ile bertaraf edilebilir. Yani yüksek B kaynaklı ilerlemekte zorlanan UV ışınları, süspansiyon ortamında artan KD vasıtası ile dolaylı olarak yine katalizör yüzeyine ulaştırılabilir. Deneylerde kullanılan ışık kaynağı sabit olduğundan dolayı sadece artan KD ile yeterli aktivasyonun sağlanabilmesi mümkündür. Bu durum, kapsamlı bir biçimde sunulan ilgili literatür taraması ile büyük bir uyum içerisinde (bkz. Bölüm 2.1).

6.3.2. Toplam Giderim Maliyeti

Toplam giderim maliyeti üzerine, PBT neticesinde RS, KD ve nispeten LT'nin, KFT neticesinde ise sadece RS ve KD'nin anlamlı etki yarattığı tespit edilmiştir (Şekil 5.1d, 5.2d). Bu noktadan hareketle, etkileşim tasarımları içerisinde sadece BBT'nda RS kullanılmış; ancak diğer etkileşim tasarımlarında RS kullanılmamıştır. Genel olarak ortaya çıkan sonuç, toplam giderim maliyeti üzerinde en etkili olan açıklayıcı değişkenin KD olduğudur. Zaten, toplam giderim maliyetinin ifade edilmeye ve tahmin edilmeye çalışıldığı pek çok ÇD(O)R modellerinde de bu yanıt değişkeni KD'ye bağlı doğrusal bir ÇDR model ifadesi olarak elde edilmiştir.

İlgili literatürde, fotokatalitik bozunma ile kanatlı et kesimhanesi çıkış sularının arıtımını maliyet analizi ile bir araya getiren çalışma sayısı yok denecek kadar azdır. Bu çalışmalardan birinde Asha vd. (2015), kanatlı et kesimhanesi çıkış sularını granüler

formdaki aktif karbon ile modifiye edilmiş TiO_2 eşliğinde fotokatalitik bozunma sürecinde kesikli ve sürekli olarak incelemiştir. İlgili atık suyun karakterizasyonu sonucunda toplam, askıda, uçucu ev sabit katı maddenin sırası ile 1200, 200, 400 ve 800 mg/L olduğunu ayrıca başlangıç pH'sının 6.5 ve BOİ değerinin ise 1000 mg/L olduğunu belirtmişlerdir. Hem kesikli hem de sürekli (60 mL/dk akış hızında) fotokatalitik sürecin muazzam değerlere ulaştığını belirtmişlerdir. Sadece 6 dk sonunda kesikli sistemde %100'lük toplam uçucu katı giderimi elde edildiğini ve bunun maliyetinin 0.68 \$/kg toplam uçucu katı olduğunu belirtmişlerdir. Sürekli sistemde ise aynı süre sonunda ve dört saatlik hidrolik alıkonma süresi sonunda %63'lük bir toplam uçucu katı giderimi olduğunu ve bunun maliyetinin ise 62.16 \$/kg toplam uçucu katı olduğunu belirtmişlerdir. Ekonomik analizlerin, maliyetin reaksiyon süresinin bir fonksiyonu olduğunu ve maliyeti düşürmek için reaksiyon süresinin azaltılması gerektiğini göstermiştir. Özellikle maliyet hesabında takip eden denklemleri kullanmışlardır (6.1, 6.2).

$$\text{Toplam tüketilen enerji (kWh)} = \frac{\text{Kullanılan enerji (W)} \times \text{RS (dk)}}{1000 \times 60} \quad (6.1)$$

$$\text{Toplam işletme maliyeti} \left(\frac{\$}{\text{kg}} \right) =$$

$$\frac{\text{Toplam tüketilen enerji (kWh)} \times \text{Enerjinin birim fiyatı} \left(\frac{\$}{\text{kWh}} \right)}{(\text{Uçucu katı madde}_{\text{başlangıç}} - \text{Uçucu katı madde}_{\text{son}}) \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times \text{çalışma hacmi (L)}} \quad (6.2)$$

Bu denklemler içerisinde tüketilen enerjiyi; mekanik karıştırıcı, UV lamba ve pompa için sarf edilen enerji olarak tanımlamışlar ve harici hiçbir kalemi maliyet içerisine eklememişlerdir. Bu noktada, bu tez çalışmasında türetilen maliyet hesabı (bkz. Bölüm 4.6) ilgili literatür ile büyük bir benzerlik göstermektedir. Asha vd. (2015) toplam uçucu katı madde giderimini inceledikleri için bu yanıt değişkeni üzerine etki eden kalemleri maliyete dâhil etmiştir. Toplam giderim maliyeti denkleminde de (bkz. Bölüm 4.6) benzer bir biçimde harcanan enerji ve ilaveten sarf/kimyasal maddeler hesaba katılmıştır. Her iki denklemde de ilk alım maliyeti ve işletmeye alma giderleri gibi kalemlerin hesaba alınmadığı görülmektedir.

Modenes vd. (2012), tabakhane atık suyunun arıtımını elektrokoagülasyon, Fenton, fotokatalitik ve üç sürecin birlikte kullanıldığı kombine süreçle incelemişler ve süreçlerin maliyet analizini yaparak hem birbirleri ile hem de var olan güncel uygulamalar ile kıyaslamışlardır. Modenes vd. (2012) çalışmalarında bir sanayi tesisi için yapılan ekonomik analizi şu şekilde tanımlamışlardır: toplam işletme maliyeti; elektrik enerjisi ve malzeme (kimyasal reaktifler) tüketimine (1), daha sonra çamur taşıma ve bertaraf maliyetleri gibi doğrudan maliyet kalemleri (2) ile bakım gibi dolaylı maliyet unsurları (3) ve önemli ekipmanların amortismanını (4) kapsamaktadır. Bunların tamamı, her bir ülkedeki mal ve hizmet fiyatlarına göre ekonomik verileri kullanarak hesaplanmaktadır. Entegre bir foto-Fenton-elektrokoagülasyon işleminin laboratuvar ölçekli optimum işletim verilerine dayanarak, yalnızca doğrudan maliyet kalemleri dikkate alınarak bir maliyet analizi gerçekleştirmişlerdir.

Foto-Fenton reaktörünün toplam giderim maliyetini $54.43 \text{ \$}/\text{m}^3 \pm 0.10$ olarak belirlemişlerdir (0.4 g/L Fe^{2+} , $15 \text{ g/L H}_2\text{O}_2$, $1 \text{ kg FeSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O} = 0.44 \text{ \$}$, $1 \text{ L H}_2\text{O}_2$ (30% v/v) = $1.19 \text{ \$}$ sabit şartlarında). Ayrıca 8.3 pH ayarı için NaOH'ten 0.4 g gerektiği ve maliyetinin $15 \text{ \$}/\text{kg}$ olduğu göz önüne alındığında $0.006 \text{ \$}/\text{m}^3$ gibi oldukça küçük bir etkisi olduğundan ihmal etmişlerdir. Elektrokoagülasyon sürecinin maliyetini ise denklem (6.3) eşliğinde hesaplamışlardır.

$$\text{Maliyet} \left(\frac{\text{\$}}{\text{m}^3} \right) = \left\{ \left[\left(\frac{jVA_e t_{\text{op}}}{V_{\text{eff}}} \right) \times \text{EEP} \right] + \left[\left(\frac{jMA_e t_{\text{op}}}{nF} \epsilon_f \right) \times \frac{\text{EMP}}{V_{\text{eff}}} \right] \right\} \quad (6.3)$$

Burada V_{eff} ; arıtılan atık su hacmini (L), F ; Faraday sabitini ($96,487 \text{ C/mol}$), ϵ_f ; görünür Faradik verimi (1.85), j ; akım yoğunluğunu (71.1 A/m^2), V uygulanan voltajı (10 V), A_e etkin alanı (56.25 m^2), t_{op} ; arıtma süresini (s), EEP; elektrik enerji maliyetini ($0.14 \text{ \$}/\text{kWh}$) ve EMP ise elektrot malzeme maliyetini ($6 \text{ \$}/\text{kg}$ alüminyum) göstermektedir. Bu noktada $1.36 \text{ \$}/\text{m}^3$ değerini elektrokoagülasyon süreci için elde ederken, kombine süreç için $55.79 \text{ \$}/\text{m}^3 \pm 0.15$ toplam giderim maliyeti elde etmişlerdir. Elde ettikleri elektrokoagülasyon sonuçlarının güncel endüstriyel uygulama maliyetleri ile rekabet edebilecek düzeyde olduğunu belirtirken, fotokatalitik bozunma süreci ve fotokatalitik bozunma etkileşimli süreçlerin maliyeti ciddi anlamda arttırdığını belirtmişlerdir.

Gmurek vd. (2015), parabenlerin fotokatalitik bozunma ile giderimini inceledikleri çalışmalarında maliyet analizi de yapmışlardır. Bu bağlamda gerçekleşen enerji tüketimini şu şekilde hesaplamışlardır (6.4).

$$\text{Enerji tüketimi} = \frac{P \times t}{V \times \sum C_o^{\text{EDCs}}} \quad (6.4)$$

Burada P; fotokimyasal sürecin elektrik gücünü (kW), V; reaktördeki çözelti hacmini (L), t; reaksiyon süresini (sa) ve C_o^{EDCs} ise her bir endokrin bozunma ürününün başlangıç konsantrasyonunu göstermektedir (mg/L). Elde ettikleri sonuçlara göre H_2O_2/UV sürecinin UV sürecine göre daha düşük maliyetli olduğunu belirtmişlerdir. Toplam arıtma maliyetinin ise enerji tüketimi ile elektrik maliyetinin çarpımı ile elde edilebileceğini belirtmişlerdir. Bu bağlamda H_2O_2/UV süreci ile yaklaşık 1.35 \$/g olan maliyet, UV süreci ile yaklaşık 10.5 \$/g olarak hesaplamışlardır. Ayrıca 1 g endokrin bozunma ürününün için 3.6 kWh enerji tüketiminin toplamda %25’lik bir TOK ve %17.5’lik bir KOİ giderimi elde ettiğini belirtmişlerdir.

Pirkarami ve Olya (2017), reaktif kırmızı 120 boyasının endüstriyel atık sulardan giderimini fotokatalitik bozunma süreci ile incelemişler ve maliyet analizi için takip eden eşitliği temel alarak yeni bir toplam giderim maliyeti türetmeye çalışmışlardır (6.5).

$$\text{Maliyet} \left(\frac{\$}{m^3} \right) = \frac{U \times I \times t}{v} \quad (6.5)$$

Burada U; işletme voltajı (V), I; işletme akımı (A), T; reaksiyon süresi (dk) ve v; reaktör hacmini (m^3) göstermektedir. Enerji maliyeti ve elektrolit materyalin maliyetini, toplam giderim maliyetinin içerisindeki ana kalemler olarak belirledikleri çalışmalarında işletme maliyetini şu şekilde hesaplamışlardır (6.6).

$$\text{İşletme maliyeti} \left(\frac{\$}{m^3} \right) = \{(a \times ENC) + (b \times CC)\} \quad (6.6)$$

Burada ENC; enerji tüketimini (kWh/m^3), CC; kimyasal tüketimini (kg/m^3), a; elektrik enerjisinin birim fiyatını (0.042 \$/kWh) ve b ise ortalama kimyasal birim

fiyatını göstermektedir (5.7 \$/kg). Elektrik enerjisinin maliyetini ise yukarıda verilen (6.5) eşitliği sayesinde hesaplamışlardır. Önceki çalışmalarında belirledikleri optimum şartlarda gerçekleştirdikleri deneyler neticesinde 1 m³ atık suyun arıtımı için 3.48 kWh enerji harcandığını ve 15 mg/L NaCl kullandıklarını belirtmişlerdir. Bu bilgiler ışığında toplam giderim maliyetini 1.86 \$/m³ olarak hesaplamışlardır. Ayrıca çalışmalarında aslında elektrik kullanmadıklarını ve bu hesabı sanki elektrik kullanıyormuş gibi hesapladıklarını belirtip, çalışmalarında kullandıkları yakıt hücresinin toplamda %15'lik bir kar sağladığını belirtmişlerdir.

İlgili literatür gerek tek başına gerekse kombine süreçlerle sentetik ya da endüstriyel atık su arıtımında fotokatalitik bozunma sürecinin nispeten incelendiğini göstermektedir. Bu bağlamda tüm çalışmalar, lamba maliyeti, reaktör maliyeti vb. ilk alım maliyeti ile işletmeye alma gibi giderleri toplam giderim maliyetinin dışında bırakmışlardır. Bu bağlamda bu tez çalışmasında türetilen toplam giderim maliyeti denklemi (bkz. Bölüm 4.6) literatürle iyi bir uyum içerisindedir.

İlaveten, ilgili literatür yalnız başına kullanılan fotokatalitik bozunma sürecinin atık su arıtma maliyetinin nispeten diğer İOS'lerine göre daha yüksek olduğuna işaret etmektedir. Ancak, daha yüksek giderim ve daha düşük maliyet değerlerine fotokatalitik etkileşimli kombine süreçlerle elde edilebildiği açıkça görülmektedir. Bu bağlamda bu tez çalışmasında elde edilen kanatlı et kesimhanesi çıkış sularının ileri arıtım maliyeti 0.0141 \$/L $\pm$ 0.0045 olarak belirlenmiştir. Bu maliyet değerinin endüstriyel uygulamalar için cazip olduğu düşünülmektedir. İlaveten toplam giderim maliyeti için elde edilen sonuçların ilgili literatür ile rekabet edebilecek düzeyde olduğu görülmektedir.

6.4. Belirsizlik Analizleri

Elde edilen belirsizlik analizi sonuçları renk, KOİ ve TOK giderimleri ile toplam giderim maliyetinin normal dağılıma uymadığını göstermektedir ($p < 0.005$). Elde edilen standart hatalara bakıldığında renk giderimi için %10, KOİ giderimi için

%9, TOK giderimi için %7 ve toplam giderim maliyeti için 0.0045 \$/L standart hatanın ilgili yanıt değişkenleri içerisinde var olduğunu göstermektedir. Öte yandan, her bir yanıt değişkeninin deneysel olarak elde edilen ortalamasının, her bir yanıt değişkeni için MC-temelli türetilen ortalama yanıt değişkeni aralıkları içerisinde yer aldığı görülmektedir. Ayrıca bu durum standart hatalar için de geçerlidir. İlgili literatürde fotokatalitik bozunma, DT, ÇD(O)R ve belirsizlik analizini bir araya getiren her hangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bu bağlamda güncel literatürde elde edilen bazı çalışmalar ve sonuçları gerek uygulama yolu gerekse sonuçların yorumlanması açısından şu şekildedir:

Pan ve Pandey (2016), çalışmalarında akışkan yatak gazlaştırma ünitesinin iki yanıt değişkenini ifade etmeye çalışırken aynı zamanda bu modellerin kestiricilerinin içerdikleri belirsizlikleri de bir araya getirmeyi hedeflemişlerdir. Çalışmalarında Bayesian temelli Monte Carlo simülasyonunu (MCMC) kullanılmışlardır. Çalışmalarında etkisini inceledikleri ağırlıkça C, N, O ve kül içeriğinin belirsizliğin kaynaklandığı açıklayıcı değişkenler olduğunu belirtmişlerdir. Bu bağlamda çalışmalarının yanıt değişkenleri olan sentez gazı üretim veriminde ve düşük ısıl değerinde sırası ile %11 ve 123 kcal/kg değerlerinde standart hataların olduğunu belirtmişlerdir.

Buyukada (2016a), çalışmasında fıstık kabuğu ile kömürün yanmasını, ısıtma hızı, sıcaklık ve karışım oranının bir fonksiyonu olarak incelemiş ve kütle kaybı ile kütle kaybı hızını bunların bir fonksiyonu olarak modellemiştir. Türettiği çoklu doğrusal olmayan regresyon modellerinden sonra, rastgele türettiği 100,000 veri için modeli tahmin ettirmiş ve sonuçları MC ile incelemiştir. Ancak yanıt değişkenleri için her hangi bir uygulama yapmamıştır. Sonuçların yanıt değişkeni olan kütle kaybı (%) için $\pm\%10$ hata içerdiğini belirtmiştir.

Buyukada (2017a), fındık kabuğu ile kömür karışımlarının birlikte yanmasını incelediği çalışmasında kütle kaybı yüzdesini, deney planlamasını bir cevap yüzey metodu olan BBT ile yaptığı çalışmasında istatistiksel olarak modellemiş ve belirsizlik analizi uygulamıştır. Rastgele 100,000 simülasyon verisi ile test ettiği modelin

betimleyici istatistik değerleri ile iyi bir uyum içerisinde olduğunu ve yanıt değişkeni olan kütle kaybı için standart hatanın $\pm\%5$ olduğunu belirtmiştir. Sonuç olarak stokastik yöntemlerle yakalamanın mümkün olmadığı belirsizlikleri tanımlamak için Monte Carlo simülasyonunun etkin bir yöntem olduğunu belirtmiştir.

Liu vd. (2017), kağıt fabrikası çamuru ile tekstil boyama çamurunun birlikte yanma sürecini karışım oranı, ısıtma hızı ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak incelemişler ve modellemişlerdir. Yanıt değişkeni olarak belirledikleri kütle kaybı oranı (%) ve hızını (mg/dk) inceledikleri çalışmalarında son olarak yanıt değişkenlerindeki belirsizliği ifade etmek için MC kullanmışlardır. Sonuç olarak deterministik ampirik modellerin stokastik belirsizlik analizinde ortalama kütle kaybında %15.6, ortalama kütle kaybı hızında ise %50 oranında bir aşırılık tespit etmişlerdir.

Liu vd. (2017), arıtma çamuru ve su sümbülünün birlikte yanmasını inceledikleri çalışmalarında, türettikleri en iyi uyumlu regresyon modeline MC uygulayarak belirsizlikleri ifade etmeye çalışmışlardır. Modeldeki tek sürekli kestirici olan sıcaklık için türettikleri dataların 2-parametrelili Weibull dağılımına uyduğunu belirledikten sonra (şekil = 1.83157, ölçü = 603.1703) 50 kez rastgele data türetmişlerdir. Sonuçta, modelin tahminlerindeki ortalama kütle kaybı (%), ortalama ölçülenden sadece %1 daha yüksek, MC ile elde edilenden ise %19 daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Tüm bu literatür sonuçları, bu tez çalışmasında uygulanan MC temelli belirsizlik analizi ile iyi bir uyum göstermektedir. Ayrıca bulunan sonuçların yorumlanması noktasında da yine yakın literatür ile benzerlik gösterdiği görülmektedir. Bu bilgiler ışığında bu tez çalışmasındaki belirsizlik analizinin iyi bir biçimde uygulandığı söylenbilir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, kanatlı kesimhanesi arıtma tesisi çıkış sularının TiO_2 destekli fotokatalitik bozunma ile ileri arıtımının ve toplam giderim maliyetinin farklı DT'ları kullanılarak ampirik modellemesi, optimizasyonu, validasyonu ve belirsizlik analizi hedeflenmiştir. Bu bağlamda ilgili literatürde ilk defa bir DT optimizasyonu da ayrıca amaçlanmıştır. Buna bağlı olarak tez çalışmasının başında önerilen hipotezler (H) ile elde edilen sonuçların (S) mukayesesi şu şekilde sıralanabilir:

- H1) TiO_2 eşliğinde fotokatalitik bozunma ile kanatlı kesimhanesi çıkış sularının daha da arıtılabileceği ve bu durumun ekosistem tahribatını azaltacağı düşünülmektedir; çünkü ilgili literatürde fotokatalitik bozunma süreci ile elde edilmiş iyi sonuçlar bulunmaktadır. Bu bağlamda süreçten önce ve süreçten sonra ilgili atık su numunelerinin renk, KOİ ve TOK değerleri belirlenerek giderimleri (%) hesaplanacak ve birbirleri ile kıyaslanacaktır.
- S1) TiO_2 eşliğinde fotokatalitik bozunma ile kanatlı kesimhanesi çıkış sularının ileri arıtımında %99 renk, %85 KOİ ve %74 TOK giderimleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar, 4 g/L TiO_2 , hindi atık suyu, UVA lamba ve 0-1 NTU bulanıklık için elde edilmiş değerlerdir. Bu sonuçlar birinci hipotezin başarı ile doğrulandığını göstermektedir.
- H2) Ayrıca bu ileri arıtımın olası ekonomik çıktıları olacağı düşünülmektedir; zira yeniden kullanıma uygun endüstriyel suyun, satın alınma maliyeti üzerinden bir kazanç sağlayabilmesi muhtemeldir. Bu bağlamda endüstriyel suyun birim satın alınma maliyeti ile önerilen sürecin birim bazda su arıtma maliyetleri karşılaştırılacaktır.
- S2) Deneysel çalışma süresince elde edilen ortalama ileri arıtım maliyeti 0.0141 \$/L $\pm$ 0.0045 olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda, Bolu ilindeki yerel endüstriyel

işletmelerin temin ettiği suyun 19 t/m^3 maliyete sahip olduğu göz önüne alındığında fotokatalitik bozunma sürecinin oldukça iyi bir maliyet sunduğu görülmektedir. Bu maliyetin, atık su tesislerini iyileştirmeyi düşünen işletmelere katkı sunacağı düşünülmektedir. Ayrıca, literatürdeki benzer süreçler ile kıyaslama yapıldığında (bkz. Bölüm 6.3.2) toplam giderim maliyetinin oldukça iyi olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar tezin ikinci hipotezinin karşılandığı göstermektedir.

- H3) Farklı açıklayıcı değişkenlerin (LT, AT, KD, RS, pH, H ve B) süreç verimi üzerinde farklı etkileri olacağı düşünülmektedir. Dolayısı ile açıklayıcı değişkenlerin seviyeleri arasında anlamlı farklar olup olmadığı belirlenecektir.
- S3) LT, AT, KD ve B'nin renk, KOİ ve TOK giderimleri üzerinde son derece etkili oldukları ($p < 0.001$); ancak RS, pH ve H'nin etkili olmadıkları ($p > 0.05$) GDM-VA ile belirlenmiştir. Öte yandan toplam giderim maliyeti üzerinde en önemli parametrenin KD olduğu yine GDM-VA ile belirlenmiştir ($p < 0.001$). Bu noktada bu tez çalışmasında kapsam dışı bırakılmal TiO_2 'nin rejenerasyonu konusu, ilerleyen çalışmalarda üzerinde muhakkak durulması gereken bir hal almaktadır. Ayrıca, tüm bu açıklayıcı değişkenlere ait seviyeler arasında anlamlı düzeyde farklılıklar olduğu TY-VA'ne müteakip yapılan Tukey oklu karşılaştırmaları ile gösterilmiştir. İlaveten üç seviyeli bir kategorik değişken olan LT'nin seviyelerinden birisi olan floresan lamba, fotokatalitik sürecin tasarlanması esnasında olası bir pilot ölçekli uygulamayı test etmek ve alınabilecek olası bir olumlu sonuca binaen potansiyel bir endüstriyel uygulamayı irdeleyebilmek adına gün ışığına en yakın dalga boyunda seçilmiştir. Bu bağlamda en düşük renk, KOİ ve TOK giderimi değerlerinin bu lamba tipinde elde edilmiş olması makul mali çıktılar ile birlikte göz önüne alındığında mevcut sistemin endüstriyel uygulamalara müsait olduğu bellidir. Bu bilgiler doğrultusunda üçüncü hipotezin doğrulandığı görülmektedir.

- H4) Deneme tasarımları kullanılarak veri toplama işleminin gerçekleştirilmesinin deney sayısına bağlı maliyeti düşüreceği öngörülmektedir. Çalışma sonunda

önerilen DT yolu ile olası rastgele bir deneysel planlamanın deney sayıları kıyaslanarak bu hipotez test edilecektir.

S4) Bu tez çalışmasında DT'ları yerine rastgele deneysel planlama uygulansaydı aynı sonuçlara ulaşmak için toplam beş sayısal açıklayıcı değişken ve her birisinin iki seviyesine bağlı 25, ve iki kategorik açıklayıcı değişkenin her birisinin iki seviyesi için toplamda 100 deneyin sadece eleme işlemi için yapılması söz konusu olacaktı. Ancak PBT ile sadece 12, KFT ile de sadece 16 deneyde bu işlemler gerçekleştirilmiştir. Öte yandan, eleme tasarımları neticesinde anlamlı bulunan açıklayıcı değişkenler için durum şu şekilde olacaktı: üç sayısal açıklayıcı değişkenin her birisinin üç seviyesi için 27 ve anlamlı bulunan iki kategorik açıklayıcı değişkenin birinin üç diğlerinin iki seviyesi için toplamda 162 deney gerekmektedir. Ancak, BBT ile 90 deneyle aynı işlem gerçekleştirilmiştir. Diğer etkileşim DT'larında iki tane iki seviyeli sayısal açıklayıcı değişken olduğu için toplam deney sayısının 96 olması gerekmektedir. Bu bağlamda TOA için 18, D-opt için 20 ve MKT 78 deney yapılmıştır. Tüm bu sayısal sonuçlar, DT'larının deney sayısının azaltılmasını ve buna bağlı deneysel maliyetin de düşürüldüğünü ortaya koyarken dördüncü hipotezi de doğrulamaktadır.

H5) Amaca yönelik avantajları düşünüldüğünde farklı DT'larının farklı yanıt değişkenleri için optimum sonuçları vereceği düşünülmektedir. Bu durum sadece, ilgili literatürde ilk defa yapılacak olan, bir DT optimizasyonu ile belirlenebilir.

S5) Pek çok istatistiksel seçim kıstasının eş zamanlı olarak irdelenmesi neticesinde renk, KOİ ve TOK giderimleri için PBT, toplam giderim maliyeti için ise KFT optimum eleme tasarımları olarak belirlenmiştir. Aynı seçim prosedürü eşliğinde renk, KOİ ve TOK giderimleri için MKT, toplam giderim maliyeti için ise TDY optimum etkileşim tasarımları olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar beşinci hipotezi desteklemektedir. Bu tez çalışmasından sonra, kanatlı et kesimhanesi arıtma tesisi çıkış sularından renk, KOİ ve TOK giderimlerini TiO₂ destekli fotokatalitik bozunma ile incelemek isteyen araştırmacılar, istedikleri açıklayıcı değişkenleri

PBT ile elekten geçirebilir ve MKT ile ikili etkileşimlerini irdeleyebilir. Benzer bir durum, aynı sıra ile KFT ve TDY olarak toplam maliyet için de geçerlidir.

- H6) Benzer çalışmalara ışık tutması ve/veya endüstriyel işletmelere yardımcı olabilmesi adına deneysel verilere istinaden yanıt değişkenleri için tahmin gücü yüksek ÇD(O)R modelleri türetilecek, doğrulaması (validasyonu) yapılacak ve bağımsız veri setleri ile uyumluluğu test edilecektir. Regresyon katsayıları göz önüne alınarak bu hipotez test edilecektir.
- S6) Deneysel verilere istinaden türetilen ÇD(O)R modelleri yanıt değişkenlerindeki değişkenliği (R^2 , $R^2_{düz}$) genellikle %99'un üzerinde açıklayabilmiş ve yanıt değişkenlerini (R^2_{tah}) %99'un üzerinde tahmin edebilmişlerdir. İlaveten her bir DT için normaldeki deney sayısının %50'si kadar bağımsız deney ile gerçekleştirilen uyumluluk sonuçlarında genellikle %98-%99 aralığında değişmektedir. Tüm bu sayısal sonuçlar hem türetilen ÇD(O)R modellerinin gücünü ortaya koymakta hem de altıncı hipotezi doğrulamaktadır.
- H7) Renk, KOİ ve TOK giderimleri ile toplam giderim maliyetinin hem eş zamanlı hem de sayısal tek parametrelili optimizasyonu yapılarak hem optimum işletme şartları belirlenmeye çalışılacak hem de bu iki farklı teknik birbiri ile kıyaslanacaktır. Bu bağlamda her iki optimizasyon tekniği ile elde edilen şartlarda deneyler gerçekleştirilerek hangisinin sonucu daha iyi kestirebildiği test edilecektir.
- S7) CYM ile dört yanıt değişkeninin eş zamanlı optimizasyonu neticesinde UVA lamba, 0-1 NTU bulanıklık ve 0.01 g/L TiO_2 değerleri optimum açıklayıcı değişken seviyeleri olarak belirlenmiştir. CYM, bu şartlarda yapılacak deneylerin hindi kesimhanesi atık suyu renk, KOİ ve TOK giderimleri ile toplam giderim maliyetini sırası ile yaklaşık olarak %65, %55, %50 ve 0.0141 \$/L olacağını öngörmüştür. CYM optimize şartlarında yapılan validasyon deneyleri neticesinde renk, KOİ ve TOK giderimleri ve maliyet sırası ile yaklaşık %65, %54, %49 ve 0.0142 \$/L olarak elde edilmiştir. İkincil bir yol olarak tekli sayısal optimizasyon denenmiş ve her bir yanıt değişkeni ayrı ayrı maksimizasyon ve

minimizasyon süreçlerinde ele alınmıştır. Bu bağlamda hindi atık suyu, UVA lamba, 0.01 g/L TiO₂ ve 0 NTU bulanıklık optimum şartlar olarak belirlenmiştir. Her iki programda bu seviyelerde gerçekleşecek deneylerde yaklaşık olarak %65 renk, 55% KOİ ve %50 TOK giderimine ulaşılabileceğini ve topla giderim maliyetinin 0.0141 \$/L olacağını belirtmiştir. Bu durumu test etmek için optimize şartlarda yapılan validasyon deneylerinde çok küçük sapmalar dâhilinde aynı değerler yakalanmıştır. Sonuçlar, CYM'nun TiO₂ destekli fotokatalitik bozunma sürecine ait işletme parametrelerini optimize etme de son derece etkili olduğunu göstermiştir. Eş zamanlı optimizasyonun gerekli olmadığı durumlarda tekli sayısal optimizasyonun daha başarılı bir alternatif olduğu belirlenmiştir. Tüm bu sonuçlar ışığında yedinci hipotezin net bir biçimde doğrulandığı görülmektedir.

- H8) Son olarak, türetilen ÇD(O)R model ifadelerinin açıklayamadığı ve/veya açıklamakta zorlandığı kısımlar olacağı ön görülmektedir, zira dinamik bir sistemi %100 ifade edebilmek mümkün değildir. Bu bağlamda MC temelli belirsizlik analizi ile rastgele veriler türetilip ÇD(O)R tahmin ettirilecek ve elde edilen ortalama sonuçlar üzerinden standart hataya bağlı olarak bu hipotez test edilecektir.
- S8) Yapılan belirsizlik analizi neticesinde renk, KOİ ve TOK giderimleri ile toplam giderim maliyeti için ÇD(O)R temelli tahminsel ortalama değerin, MC-temelli ortalama değerler içerisinde yer aldıkları görülmüştür. İlaveten tüm yanıt değişkenlerinin normal dağılıma uymadıkları belirlenmiştir ($p < 0.005$). Bu bağlamda renk gideriminin %10, KOİ gideriminin %9, TOK gideriminin %7 ve toplam giderim maliyetinin ise 0.0045 \$/L standart hata içerdikleri belirlenmiş ve bu şekilde bu yanıt değişkenlerinin içerdikleri belirsizlikler açıklanmaya çalışılmıştır. Bu sonuçların sekizinci hipotezi doğrular nitelikte olduğu görülmektedir.

7.2. Öneriler

- 1) Optimum etkileşim tasarımları için deney tekrarı ve örnekleme sayısının arttırılabilir,
- 2) KD'nin toplam giderim maliyeti içerisindeki önemi göz önüne alındığında bu tez çalışmasında kapsam dışı bırakılan rejenerasyon konusuna odaklanılabilir,
- 3) Basit bir süreç ile sentezlenebilen TiO_2 'in doğal ya da bazı elementlerle modifiyeli tipleri sentezlenerek verim ve toplam giderim maliyetine olan etkileri incelenebilir,
- 4) Disiplinler arası bir çalışma ekibi ile gerçekleşen reaksiyonun mekanizması incelenebilir ve olası ana ve yan ürünler tespit edilebilir,
- 5) İleriki çalışmalarda Bayesian temelli Markov Chain Monte Carlo simülasyonu ve/veya Sobol varyans ayrışması kullanılarak hassasiyet analizi ve ileri düzey belirsizlik analizleri bir araya getirilebilir ve benzer çalışmaların kapsamı daha da derinleştirilebilir.

8. KAYNAKLAR

- Ahmed JM, Kadhum AAH, Ba-Abbad MM ve Al-Amiery AA, (2016) "Optimization of Solar Photocatalytic Degradation of Chloroxyleneol Using TiO_2 , $\text{Er}^{3+}/\text{TiO}_2$, and $\text{Ni}^{2+}/\text{TiO}_2$ via the Taguchi Orthogonal Array Technique", 6(10), 163-179.
- Akaike H, (1974) "A new look at the statistical model identification", IEEE Transact Auto Cont 19(6): 716-723.
- Amemiya T, (1981) "Qualitative Response Models: A Survey", J Eco Literat, 19(4): 1483-1536.
- Amorim AKB, de Nardi IR ve Del Nery V (2007) "Water conservation and effluent minimization: Case study of a poultry slaughterhouse", Resour Conser Recyc, 51: 93-100.
- Asha RC ve Kumar M (2014) "Photocatalytic degradation of poultry wastewater using activated carbon-supported titanium dioxide" Des Wat Treat, 54: 3279-3290.
- Asha RC ve Kumar M (2016) "Sulfamethoxazole in poultry wastewater: Identification, treatability and degradation pathway determination in a membrane-photocatalytic slurry reactor", J Environ Sci Health Part A: Toxic Hazard Mater Environ Eng, 50: 1011-1019.
- Asha RC, Chandra BS, Shukla A, Reja VK, Adusumilli KA, Remya N ve Kumar M (2014) "Photocatalytic Treatment of Poultry Wastewater by hectorite- TiO_2 aqueous suspensions" International Conference on Chemical and Environmental Research (ICCER), 1-4 Mart 2014, Tamilnadu, Hindistan.
- Asha RC, Vishnuganth MA, Remya N, Selveraju N ve Kumar M (2015) "Livestock Wastewater Treatment in Batch and Continuous Photocatalytic Systems: Performance and Economic Analyses", Wat Air Soil Pollut, 226: 1-13.
- Azri N, Bakar WAWA ve Ali R, (2016) "Optimization of photocatalytic degradation of polybromobis diphenyl ether on trimetallic oxide $\text{Cu}/\text{Ni}/\text{TiO}_2/\text{PVC}$ catalyst using response surface methodology method", J Taiwan Inst Chem Eng, 62: 283-296.
- Behnajady MA, Modirshahla N, Daneshvar N ve Rabbani M, (2007a) "Photocatalytic degradation of an azo dye in a tubular continuous photoreactor with immobilized TiO_2 on glass plates", Chem Eng J, 1278: 67-176.

- Behnajady MA, Modirshahla N, Daneshvar N ve Rabbani M, (2007b) “Photocatalytic degradation of C.I. Acid Red 27 by immobilized ZnO on glass plates in continuous-mode”, J Hazard Mater, 140: 257–263.
- Bernardo JM ve Smith AFM, (1994) “Bayesian Theory”, Wiley, New York, USA, 1994.
- Beyaz Et Sanayicileri ve Damızlıkçıları Birliği Derneği (BESD-BİR) <http://www.besd-bir.org/haberler/turk-kanatli-eti-sektoru-ihracatta-dunyada-ilk-3-e-oyuyor>, 2014.
- Box G ve S Bisgaard, (1988) "Statistical Tools for Improving Designs", Mechanic Eng, 110(1): 32-40.
- Box GEP ve Behnken DW, (1960) “Some new three level designs for the study of quantitative variable”, Technometrics 2: 455-475.
- Box GEP ve Wilson KB, (1951) “On the Experimental Attainment of Optimum Conditions”, J Royal Stat Soc- B (Method.), 13(1): 1-45.
- Buyukada M, (2016a) “Co-combustion of peanut hull and coal blends: Artificial neural networks modeling, particle swarm optimization and Monte Carlo simulation”, Bioresour Technol, 216: 280–286.
- Buyukada M, (2016b) “Modeling of decolorization of synthetic reactive dyestuff solutions with response surface methodology by a rapid and efficient process of ultrasound-assisted ozone oxidation”, Des Water Treat, 57(32): 14973–14985.
- Buyukada M, (2016c) “Prediction of Photocatalytic Degradation and Mineralization Efficiencies of Basic Blue 3 Using TiO₂ by Nonlinear Modeling Based on Box–Behnken Design”, Arab J Sci Eng 41(7): 2631–2646.
- Buyukada M, (2017a) “Probabilistic uncertainty analysis based on Monte Carlo simulations of co-combustion of hazelnut hull and coal blends: Data-driven modeling and response surface optimization”, Bioresour Technol, 225: 106–112.
- Buyukada M, (2017b) “Uncertainty estimation by Bayesian approach in thermochemical conversion of walnut hull and lignite coal blends”, Bioresour Technol, 232: 87–92.
- Chaudhary A ve HaNTUsh MM, (2017), “Bayesian Monte Carlo and maximum likelihood approach for uncertainty estimation and risk management. Application to lake oxygen recovery model”, Water Res, 108: 301–311.

- Chen MJ, Lo SL, Lee YC ve Huang CC, (2015) "Photocatalytic decomposition of perfluorooctanoic acid by transition-metal modified titanium dioxide", *J Hazard Mater*, 288: 168-175.
- Chong MN, Jin B, Chow CWK ve Saint CP, (2009) "A new approach to optimise an annular slurry photoreactor system for the degradation of Congo Red: Statistical analysis and modelling", *Chem Eng J*, 152 (1), 158-166.
- Chong MN, Zhu HY ve Jin B, (2010) "Response surface optimization of photocatalytic process for degradation of Congo Red using H-titanate nanofiber catalyst", *Chem Eng J*, 156 (2), 278–285.
- Das R, Sarkar S ve Bhattacharjee C, (2014) "Photocatalytic degradation of chlorhexidine – A chemical assesment and prediction of optimal condition by response surface metodology", *J Wat Proc Eng*, 2: 79–86.
- Etaiw SH, El-bendary MM, (2012) "Degradation of methylene blue by catalytic and photo-catalytic processes catalyzed by the organotin-polymer [(Me₃Sn)₄Fe(CN)₆]", *App Vatal B: Environ* 126: 326–333.
- Evrendilek GA, Avsar YK ve Evrendilek F, (2016) "Modelling stochastic variability and uncertainty in aroma active compounds of PEF-treated peach nectar as a function of physical and sensory properties, and treatment time", *Food Chem*, 190:634-642.
- Fernández C, Larrechi MS ve Callao MP, (2009) "Study of the influential factors in the simultaneous photocatalytic degradation process of three textile dyes", *Talanta*, 79(5): 1292-1297.
- Ghasemi E, Ziyadi H, Afshar AM ve Sillanpaa M, (2015) "Iron oxide nanofibers: A new magnetic catalyst for azo dyes degradation in aqueous solution", *Chem Eng J*, 264: 146-151.
- Gibbons JD, (1986) " Tests of randomness", *Encycl Stat Sci*, 7: 555-562.
- Gmurek M, Rossi AF, Martins RC, Quinta-Ferreira RM ve Ledakowicz S, (2015) "Photodegradation of single and mixture of parabens – Kinetic, by-products identification and cost-efficiency analysis", *Chem Eng J*, 276: 303-314.
- Gnaser H, Savina MR, Calaway WF, Tripa CE, Verkoyin IV ve Pellin MJ, (2005) "Photocatalytic degradation of methylene blue on nanocrystalline TiO₂: Surface mass spectrometry of reaction intermediates" *Inter J Mass Spect*, 245: 61–67.
- Grcic I, Vujevic D ve Koprivanac N, (2010) "The use of D-optimal design to model the effects of process parameters on mineralization and discoloration kinetics of Fenton-type oxidation", *Chem Eng J*, 157(2-3): 408-419.

- Gupta VK, Jain R, Nayak A, Agarwal S ve Shrivastava M, (2011) "Removal of the hazardous dye-Tartrazine by photodegradation on titaniumdioxide surface", Mater Sci Eng C, C31: 1062–1067.
- Haitao L, Ruihua L, Yang L, Hui H, Hang Y, Hai M, Suoyuan L, Shuit-Tong L ve Zhenhui K, (2012) "Carbon quaNTUm dots/Cu₂O composites with protruding nanostructures and their highly efficient (near) infrared photocatalytic behavior", J Mater Chem, 22: 17470–17477.
- Hoogerbrugge R, Stolker AAM, Elbert B ve Hogendoorn A, (2003) "A systematic approach for optimisation of supercritical-fluid extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons from earthworms", Anal Bioanal Chem 377(4): 715–722.
- Hurvich CM ve Tsai CL, (1989) "Regression and time series model selection in small samples", Biometrika, 76: 297-307.
- Jafarzadeh NK, Sharifnia S ve Hosseini SN, (2011) "Statistical optimization of process conditions for photocatalytic degradation of phenol with immobilization of nano TiO₂ on perlite granules", Korean J Chem Eng, 28(2): 531-538.
- Kashif N ve Ouyang F, (2008) "Parameters effect on heterogeneous photocatalysed degradation of phenol in aqueous dispersion of TiO₂", J Environ Sci, 21: 527–533.
- Körbahtı BK ve Rauf MA, (2008) "Response surface methodology (RSM) analysis of photoinduced decoloration of toluidine blue", Chem Eng J, 136(1): 25-30.
- Kuo CS, Lin CF ve Hong PA, (2015) "Photocatalytic degradation of methamphetamine by UV/TiO₂ – Kinetic, intermediates, and products", Water Researc, 74: 1–9.
- Liaoa QN, Jib F, Lia JC, Zhanc X ve Hu ZH, (2016) "Decomposition and mineralization of sulfaquinoxaline sodiumduring UV/H₂O₂ oxidation processes", Chem Eng J, 284: 494-502.
- Liu J, Huang L, Buyukada M ve Evrendilek F, (2017) "Response surface optimization, modeling and uncertainty analysis of mass loss response of co-combustion of sewage sludge and water hyacinth", App Therm Eng, 125: 328-335.
- Liu J, Xie W, Zhuo Z, Buyukada M ve Evrendilek F, (2017) "Thermochemical behaviors of textile dying sludge, paper mill sludge, and their blends during (co-)combustion", Thermochim Acta, 655: 101-105.
- Meshram S, Limaye R, Ghodke S, Nigam S, Sonawane S, Chikate R, (2011), "Continuous flow photocatalytic reactor ZnO-bentonite nanocomposite for degradation of phenol", Chem Eng J, 172: 1008–1015.

- Módenes AN, Espinoza-Quiñones FR, Borba FH ve Manenti DR, (2012) “Performance evaluation of an integrated photo-Fenton – Electrocoagulation process applied to pollutant removal from tannery effluent in batch system”, *Chem Eng J*, 197: 1-9.
- Montgomery DC, (1991) “Design and Analysis of Experiments,” ed. John Wily, New York, 1991.
- Nam SW, Yoon Y, Choi DJ, Zoh KD, (2015) “Degradation characteristics of metoprolol during UV/chlorination reaction and a factorial design optimization”, *J Hazard Mater*, 285: 453–463.
- Pan I ve Pandey DS, (2016) “Incorporating uncertainty in data driven regression models of fluidized bed gasification: a Bayesian approach”, *Fuel Process Technol*, 142: 305–314.
- Pardeshi SK, Patil AB, (2008) “A simple route for photocatalytic degradation of phenol in aqueous zinc oxide suspension using solar energy”, *Solar Energy*, 82: 700–705.
- Parilti NM, Demirel CSU, Bekbolet M, (2011) “Response surface methodological approach for the assesment of the photocatalytic degradation of NOM”, *J Photochem Photobio A: Chem*, 225(1): 26–35.
- Pirkarami A ve Olya ME, (2017) “Removal of dye from industrial wastewater with an emphasis on improving economic efficiency and degradation mechanism” *J Saudi Chem Soc*, 21: S179–S186.
- Poblete R, Otal E, Vilches LF, Vale J ve Fernández-Pereira C, (2011) “Photocatalytic degradation of humic acids and landfill leachate using a solid industrial by-product containing TiO₂ and Fe”, *App Catal B: Environ*, 102(1-2): 172-179.
- Rasoulifard MH, Dorraji MSS ve Taherkhani S, (2016) “Photocatalytic activity of zinc stannate: Preperation and modeling”, *J Taiwan Inst Chem Eng*, 58: 324-332.
- Sahoo C ve Gupta AK, (2012) “Optimization of photocatalytic degradation of methyl blue using silver ion doped titanium dioxide by combination of experimental design and response surface aproach”, *J Hazard Mater*, 215–216: 302–310.
- Sakkas VA, Islam Md. A, Stalikas C, Albanis TA, (2010) “Photocatalytic degradation using design of experiments: A review and example of the Congo red degradation”, *J Hazard Mater*, 175: 33–44.
- Shaykhi ZM ve Zinatizadeh AAL, (2014) “Statistical modeling of photocatalytic degradation of synthetic amoxicilin wastewater (SAW) in an immobilized TiO₂ photocatalytic reactor using response surface metodology (CYM)”, *J Taiwan Inst Chem Eng*, 45(4): 1717-1726.

- Shen Y, Han S, Xu Q, Wang Y, Xu Z, Zhao B ve Zhang Z, (2016) "Optimizing degradation of Reactive Yellow 167 by dielectric barrier discharge plasma combined with TiO₂ nano-particles prepared response surface methodology", J Taiwan Inst Chem Eng, 60: 302-312.
- Silva MK, Marquez RG, Machado NRCF ve Santos OAA, (2002) "Evaluation of Nb₂O₅ and Ag/Nb₂O₅ in the photocatalytic degradation of dyes from textile industries", Braz J Chem Eng, 19(4): 349-353.
- Sohrabi MR, Khavaran A, Shariati S ve Shariati S, (2017) "Removal of Carmoisine edible dye by Fenton and photo Fenton processes using Taguchi orthogonal array design" Arab J Chem, 10(S2): S3523-S3531.
- Taguchi G, (1986), "Introduction to Quality Engineering - Designing Quality into Products and Processes", Asian Productivity Organization, Tokyo, 1986.
- Taguchi G, (1987), "System of Experimental Design", Unipub/Kraus, International Publication, 1987.
- Umar M ve Aziz HA (2013) "Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants in Water", InTech Online Publish, Bölüm 8, 195-208.
- Wang M, Cao W, Wu Y, Lu H ve Li B, (2016) "Electrochemical oxidation of the poultry manure anaerobic digested effluents for enhancing pollutants removal by *Chlorella vulgaris*", 37: 1451-1460.
- Xu S, Ng J, Zhang X, Bai H ve Sun DD, (2011) "Adsorption and photocatalytic degradation of Acid Orange 7 over hydrothermally synthesized mesoporous TiO₂ nanotube", Col Surf A: Physc Eng Asp, 379: 169-175.
- Yetilmezsoy K ve Sakar S, (2008a) "Development of empirical models for performance evaluation of UASB reactors treating poultry manure wastewater under different operational conditions", 153: 532-543.
- Yetilmezsoy K ve Sakar S, (2008b) "Improvement of COD and color removal from UASB treated poultry manure wastewater using Fenton's oxidation", J Hazard Mater, 151: 547-558.
- Yetilmezsoy K, (2012a) "Fuzzy-logic modeling of Fenton's oxidation of anaerobically pretreated poultry manure wastewater", Environ Sci Pollut Researc, 19: 2227-2237.
- Yetilmezsoy K, (2012b) "Integration of kinetic modeling and desirability function approach for multi-objective optimization of UASB reactor treating poultry manure wastewater", Bioresour Technol, 118: 89-101.

- Yetilmezsoy K, Ilhan F, Sapcı-Zengin S, Sakar S ve Gonullu MT, (2009) “Decolorization and COD reduction of UASB pretreated poultry manure wastewater by electrocoagulation process: A post-treatment study”, 162: 120-132.
- Yogi C, Kojima K, Wada N, Tokumoto H, Takagi T, Mizoguchi T ve Tamiaki H, (2008) “Photocatalytic degradation of methylene blue by TiO₂ film and Au particles-TiO₂ composite film”, Thin Solid Films, 516(17), 5881-5884.
- Yu X, Huang L, Wei Y, Zhang J, Zhao Z, Dai W ve Yao B, (2015) “Controllable preparation, characterixation and performance of Cu₂O thin film and photocatalytic degradation of methylene blue using responce surface metodology”, Mater Res Bul 64: 410–417.
- Zhang J, Li Y, Huang G, Chen X ve Bao A, (2016) “Assessment of parameter uncertainty in hydrological model using a Markov-Chain-Monte-Carlo-based multilevel-factorial-analysis method”, J Hyrdo 538: 471–486.
- Zhang L, Fujian L, Zhang W, Li R, Zhong H, Zhao Y, Zhang Y ve Wang X, (2009) “Photo degradation of methyl orange by attapulgitite–SnO₂–TiO₂ nanocomposites”, J Hazard Mater, 171: 294–300.

9. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Musa BÜYÜKADA

Doğum Yeri ve Tarihi : Fatih 02/09/1987

Lisans Üniversite : Gazi Üniversitesi

Y. Lisans Üniversite : Abant İzzet Baysal Üniversitesi (AİBÜ)

Elektronik posta : musabuyukada@hotmail.com

İletişim Adresi : Çevre Mühendisliği Bölümü, AİBÜ, BOLU

Yayın Listesi : A, B, C

A. Uluslararası Yayınlar

[A1].**Buyukada, M.**, Evrendilek, F., 2015. Modeling Ultrasound-Assisted Decolorization Efficiency of Reactive Red 195 Using Soybean Cake. Asian J. Chem. 27(12), 4541–4548.

[A2].**Buyukada, M.**, 2015. Removal of Yellow F3R, Di Maria Brilliant Blue R and Reactive Brilliant Red M-3BE from Aqueous Solutions by a Rapid and Efficient Ultrasound-Assisted Process with a Novel Biosorbent of Cottonseed Cake: Statistical Modeling, Kinetic and Thermodynamic Studies. Arab. J. Sci. Eng. 40(8), 2153–2168.

[A3].**Buyukada, M.**, 2016. Modeling of decolorization of synthetic reactive dyestuff solutions with response surface methodology by a rapid and efficient process of ultrasound-assisted ozone oxidation. Des. Water Treat. 57(32), 14973–14985.

[A4].**Buyukada, M.**, Evrendilek, F., 2016. Modeling Efficiency of Dehydrated Sunflower Seed Cake as a Novel Biosorbent to Remove a Toxic Azo Dye. Chem. Eng. Commun. 203(6), 746–757.

- [A5]. **Buyukada, M.**, Evrendilek, F., 2016. Modeling ultrasound–assisted decolorization efficiency of Reactive Blue 19 and Reactive Yellow 145 from aqueous solutions by cottonseed cake. *Fres. Environ. Bullet.* 25(3), 692–705.
- [A6]. **Buyukada, M.**, 2016. Prediction of Photocatalytic Degradation and Mineralization Efficiencies of Basic Blue 3 Using TiO_2 by Nonlinear Modeling Based on Box–Behnken Design. *Arab. J. Sci. Eng.* 41(7), 2631–2646.
- [A7]. **Buyukada, M.**, 2016. Co-combustion of peanut hull and coal blends: Artificial neural networks modeling, particle swarm optimization and Monte Carlo simulation. *Bioresour. Technol.* 216, 280–286.
- [A8]. **Buyukada, M.**, 2017. Probabilistic uncertainty analysis based on Monte Carlo simulations of co-combustion of hazelnut hull and coal blends: Data-driven modeling and response surface optimization. *Bioresour. Technol.* 225, 106–112.
- [A9]. **Buyukada, M.**, 2017. Uncertainty estimation by Bayesian approach in thermochemical conversion of walnut hull and lignite coal blends. *Bioresour. Technol.* 232, 87–92.
- [A10]. **Buyukada, M.**, 2017. Data-driven nonlinear modeling studies on removal of Acid Yellow 59 using Si-doped multi-walled carbon nanotubes. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 14(10), 2215–2228.
- [A11]. **Buyukada, M.**, Evrendilek, F., 2017. Color and COD Removals by Photocatalytic Degradation: An Experimental Design Approach and Cost Analysis. *Sigma J. Eng. Nat. Sci.* SI8(3), 217–226.*
- [A12]. Liu, J.Y., Huang, L., **Buyukada, M.**, Evrendilek, F., 2017. Response surface optimization, modeling and uncertainty analysis of mass loss response of co-combustion of sewage sludge and water hyacinth. *App. Therm. Eng.* 125, 328–335.
- [A13]. Liu, J.Y., Xie, W., Zhuo, Z., **Buyukada, M.**, Evrendilek, F., 2017. Thermochemical behaviors of textile dying sludge, paper mill sludge, and their blends during (co-)combustion. *Thermochim. Acta* 655, 101–105.
- [A14]. Huang, L., Xie, C., Liu, J., Zhang, X., Chang, K., Kuo, J., Sun, J., Xie, W., Zheng, L., Sun, S., **Buyukada, M.**, Evrendilek, F., 2018. Influence of catalysts on co-combustion of sewage sludge and water hyacinth blends as determined by TG-MS analysis. *Bioresour. Technol.* 247, 215–225.

- [A15]. **Buyukada, M.**, Uzuner, S., Evrendilek, F., 2018. Utilization of (modified-) ground hazelnut shell for adsorption of azo-metal toxic dyes: Empirical and ANFIS modeling and optimization. *Chiang Mai J. Sci.* In press.
- [A16]. **Buyukada, M.**, Eryigit, M., Evrendilek, F., 2018. Concurrent optimization of decolorization, COD removal, and their costs in response to photocatalytic degradation integrating experimental designs, artificial immune system, and empirical modeling. *Chiang Mai J. Sci.* In press.*
- [A17]. Liu, J., Chen, J., Huang, L., Dang, X., Kuo, J., Zheng, Li., Chang, K., Sun, S., **Buyukada, M.**, Evrendilek, F., 2018. Thermodynamic behaviors of Cu in interaction with chlorine, sulfur, phosphorus and minerals during co-incineration of sewage sludge. *Chinese J. Chem. Eng.* In press.
- [A18]. Xie, W., Huang, J., Liu, J., Zhao, Y., Chang, K.L., Kuo, J., He, Y., Sun, J., Zheng, L., Xie, W., Sun, S., **Buyukada, M.**, Evrendilek F., 2018. Assessing thermal behaviors and kinetics of (co-)combustion of textile dyeing sludge and sugarcane bagasse. *App. Therm. Eng.* In press.
- [A19]. **Buyukada, M.**, Evrendilek, F., Karakaya, N., 2018. Ultrasound-assisted adsorption of toxic dyes by cottonseed cake: Artificial neural networks, regression models and response surface optimization. *Global Nest J.* In press.
- [A20]. Chen, J., Xie, C., Liu, J., He, W., Xie, Y., Zhang, X., Chang, K., Kuo, J., Sun, J., Zheng, L., Sun, S., **Buyukada, M.**, Evrendilek, F., 2018. Co-combustion of sewage sludge and coffee grounds under increased O₂/CO₂ atmospheres: Thermodynamic characteristics, kinetics and artificial neural network modeling. *Bioresour. Technol.* 250, 230–238.

B. Uluslararası Sempozyum

- [B1]. **Buyukada, M.**, Evrendilek, F., Karakaya, N., Optimizing Dye Adsorption Using Cottonseed Cake, Ultrasound, Box-Behnken, Neural Networks and Regressions. 1st International Black Sea Congress on Environmental Sciences (IBCESS), Oral presentation and full text published, 31 August–3 September 2016, Giresun, Turkey.
- [B2]. Evrendilek, G.A., **Buyukada, M.**, Evrendilek, F., Karakaya N., Assessing Potential of Pulsed Electric Fields for Wastewater Treatment. 1st International Black Sea Congress on Environmental Sciences (IBCESS), Poster presentation, 31 August–3 September 2016, Giresun, Turkey.

[B3]. **Buyukada, M.**, Evrendilek, F., Farklı Deneme Tasarımları Kullanarak Fotokatalitik Bozunma İle Atıksulardan Renk ve KOİ Giderim Verimlerinin İncelenmesi. Uluslararası Kentsel Su ve Atık Su Yönetimi (UKSAY/MASKI), Oral presentation and full text published, 26 – 28 October 2016, Malatya, Turkey. *

C. Ulusal Sempozyum

[C1]. Selen, V., **Buyukada, M.**, 2012. Reactive Yellow 145’in Sulu Çözeltilerden Uzaklaştırılması. 10. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi, Koç Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

[C2]. **Buyukada, M.**, Öksüz, B., Yıldız, F., Selen, V., 2012. Ultrases Destekli Sistemlerde Boyarmadde Giderimi. 10. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi, Koç Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

[C3]. Selen, V., **Buyukada, M.**, Özer, D., Dursun, G., 2012. Reactive Red 195 Boyarmaddesinin Ultrases Destekli Gideriminde Kinetik ve Termodinamik Parametrelerin Araştırılması. 10. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi, Koç Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

* A11, A16 ve B3 çalışmaları bu tez kapsamında çıkarılmıştır.

** Kasım 2017 itibari ile 50 atf.

Ödüller :

1) 2015, 2016, 2017, 2018 TÜBİTAK UBYT Ödülleri,

2) 2017 ve 2018 AİBÜ ARGE Vakfı A1 Sınıfı Yayın Teşvik Ödülleri.