T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ
KOORDİNASYON BİRİMİ

TEKSTİL SANAYİİ ATIKSULARININ ELEKTROFENTON İLE ARITILABİLİRLİĞİ VE OPTİMİZASYONU

Proje No: FDA-2014-5597

Proje Türü: Kurum Dışı

SONUÇ RAPORU

Proje Yürütücüsü:
Prof. Dr. Yalçın Şevki YILDIZ
Çevre Mühendisliği Bölümü

Araştırmacı
Yrd. Doç. Dr. Ömür GÖKKUŞ
Çevre Mühendisliği Bölümü

Mart 2016

KAYSERİ

TEŞEKKÜR

Erciyes Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümünden çeşitli araştırmaların gerçekleştirildiği bu çalışma endüstriyel atıksuların arıtımında kullanılacak elektrokimyasal reaktör geliştirilmesi konusunda yapılmış bir proje olup, proje 2012 yılında TÜBİTAK ÇAYDAĞ grubu tarafından 112Y160 nolu proje numarası ile desteklenmiştir. TÜBİTAK ÇAYDAĞ grubuna projemize destek ve yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca FDA-2014-5597 kodlu proje çalışmalarımızın tamamlanmasında finansal katkı sağlayan Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkür ederim.

Prof. Dr. Yalçın Şevki YILDIZ
Proje Yürütücüsü

İÇİNDEKİLER

KAPAK SAYFASI i
TEŞEKKÜR iii
İÇİNDEKİLER iv
KISALTMALAR v
ŞEKİLLER LİSTESİ vii
TABLOLAR LİSTESİ ix
ÖZET xii
ABSTRACT xiv
1. GİRİŞ 1
2. MATERYAL VE METOT 9
3. TARTIŞMA VE SONUÇ 14
3.1. Gerçek Tekstil Atıksuyunun Temini ve Yapılan Ön Denemeler 14
3.2. Gerçek Tekstil Atıksularına Oksijenli Ortamda Farklı Elektrot Materyalleri ile Uygulanan EF Çalışma Sonuçları (I. Aşama Deneyler) 22
3.2.1. Grafit Katoda Ait I. Aşama Deney Sonuçları 22
3.2.2. Karbon Keçe Katoda Ait I. Aşama (Oksijenli Ortamda) Deney Sonuçları 35
3.2.3.Karbon Kumaş Katoda Ait I. Aşama Deney (Oksijenli Ortamda) Sonuçları 51
3.2.4. Birinci Aşama Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması (Oksijenli ortamda) 66
3.3. Gerçek Tekstil Atıksularına Oksijensiz Ortamda Farklı Elektrot Materyalleri ile Uygulanan EF Çalışma Sonuçları (II. Aşama Deneyler) 69
3.3.1. Grafit Katoda Ait II. Aşama Deney Sonuçları 70
3.3.2. Karbon Keçe Katoda Ait II. aşama Deney Sonuçları 84
3.3.3. Karbon Kumaş Katoda Ait II. Aşama Deney Sonuçları 96
3.3.4. İkinci Aşama Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması (Oksijensiz ortamda) 108
4. SONUÇ VE ÖNERİLER 110
5.KAYNAKLAR 112

KISALTMALAR

AKM : Askıda Katı Madde

ANOVA : Varyans (değişken) analizi

AŞ : Akım Şiddeti

BOI : Biyolojik Oksijen İhtiyacı

C_o : Başlangıç Atıksu Konsantrasyonu

EC : Elektrokoagulasyon

EF : Elektro-Fenton

FO : Fenton Oksidasyonu

KASKİ : Kayseri Su ve Kanalizasyon İdaresi

KOI : Kimyasal Oksijen İhtiyacı

$OH^{\cdot}$: Hidroksil Radikali

PTFE : Politetrafloroetilen

Q_h : Hava Akış Hızı

Q_{N2} : Azot Gazı Akış Hızı

RB 19 : Reaktif Blue 19

S/N : Sinyal – Gürültü Oranı

TOK : Toplam Organik Karbon

λ_{max} : Maksimum dalga boyu

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Denemelerde kullanılacak olan klasik elektrokimyasal reaktörü içeren deney sistemi 9

Şekil 2.2. EF Reaktörünün Görünümü 10

Şekil 3.1. EF prosesi için 0,1 – 0,5 A akım şiddeti aralığında H_2O_2 üretim miktarları 16

Şekil 3.2. EF Prosesi için 40 – 90 mA akım şiddeti aralığında H_2O_2 üretim miktarları 16

Şekil 3.3. RB 19 boyarmaddesinin renk indeks numarası, kimyasal formülü ve kimyasal yapısı 17

Şekil 3.4. 100 mg/L RB 19 Boyarmaddesinin 60 mA akım şiddetinde renk giderim sonuçları 18

Şekil 3.5. 100 mg/L RB 19 Boyarmaddesinin 60 mA akım şiddetinde TOK giderim sonuçları 18

Şekil 3.6. 1 g/l RB 19 boyarmaddesinin 60 mA akım şiddetinde renk giderim sonuçları 19

Şekil 3.7. 1 g/l RB 19 boyarmaddesinin 60 mA akım şiddetinde TOK giderim sonuçları 19

Şekil 3.8. Gerçek tekstil endüstrisi atıksuyu için KOI ve TOK arasında oluşturulan korelasyon 20

Şekil 3.9. Farklı hava akış hızlarında H_2O_2 üretimlerinin araştırılması 21

Şekil 3.10. Farklı hava akış hızlarında H_2O_2 üretimlerinin araştırılması denemesine ait enerji tüketim değerleri 21

Şekil 3.11. Gerçek tekstil atıksularına uygulanan EF işlemi süresinde zaman TOK giderim veriminin araştırılması 23

Şekil 3.12. Grafit Elektrotla EF Çalışmasında Renk Giderimi için S/N grafiği 30

Şekil 3.13. Grafit Elektrotla EF Çalışmasında TOK Giderimi için S/N grafiği 31

Şekil 3. 14. Grafit Elektrotla EF Çalışmasında Bulanıklık Giderimi için S/N grafiği 33

Şekil 3.15. Optimum koşullarda sistemin özgül enerji tüketimi 35

Şekil 3.16. Deneysel çalışmalarda kullanılan karbon keçe materyale ait farklı büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri 36

Şekil 3.17. Karbon keçe katot materyale ait akım şiddeti - H_2O_2 üretim miktarı ilişkisi 36

Şekil 3.18. Karbon Keçe elektrot kullanılarak H_2O_2 üretimi için farklı akım şiddetlerinin enerji tüketimleri 37

Şekil 3.19. Gerçek tekstil atıksularına uygulanan EF işlemi süresinde zaman TOK giderim veriminin araştırılması 38

Şekil 3.20. Karbon keçe katoda ait EF öncesi ve sonrası görünümler. 40

Şekil 3.21. Karbon Keçe Elektrotla EF Çalışmasında Renk Giderimi için S/N grafiği 46

Şekil 3.22. Karbon Keçe Elektrotla EF Çalışmasında TOK Giderimi için S/N grafiği..... 47
Şekil 3.23. Karbon Keçe Elektrotla EF Çalışmasında Bulanıklık Giderimi için S/N grafiği..... 49
Şekil 3.24. Karbon Keçe Elektrot ile I. Aşama Deneylerde Elde Edilen Optimum Koşullarda Enerji Tüketimleri 50
Şekil 3.25. Deneysel çalışmalarda kullanılan karbon kumaş materyale ait farklı büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri..... 51
Şekil 3.26. Karbon kumaş katot materyale ait akım şiddeti - H_2O_2 üretim miktarı ilişkisi 52
Şekil 3.27. Karbon Kumaş Elektrot Kullanılarak H_2O_2 Üretimi İçin Farklı Akım Şiddetlerinin Enerji Tüketimleri..... 53
Şekil 3.28. Gerçek tekstil atıksularına karbon kumaş katotla uygulanan EF işlemi süresinde zaman TOK giderim veriminin araştırılması 53
Şekil 3.29. Karbon kumaş katoda ait EF öncesi ve sonrası görünümler. 55
Şekil 3.30. Karbon Kumaş Elektrotla EF Çalışmasında Renk Giderimi için S/N grafiği..... 62
Şekil 3.31. Karbon Kumaş Elektrotla EF Çalışmasında TOK Giderimi için S/N grafiği..... 63
Şekil 3.32. Karbon Kumaş Elektrotla EF Çalışmasında Bulanıklık Giderimi için S/N grafiği..... 65
Şekil 3.33. Karbon Kumaş Elektrot ile I. Aşama Deneylerde Elde Edilen Optimum Koşullarda Enerji Tüketimleri..... 66
Şekil 3.34. Karbon kumaş ve karbon keçenin aynı büyütme oranında EF öncesi ve sonrası SEM görüntüleri..... 68
Şekil 3.35. Grafit elektrota ait farklı büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri..... 69
Şekil 3.36. Grafit Elektrotla EF Çalışmasında Renk Giderimi için S/N grafiği (II. Aşama deney)..... 79
Şekil 3.37. Grafit Elektrotla EF Çalışmasında TOK Giderimi için S/N grafiği (II. Aşama deney)..... 80
Şekil 3.38. Grafit Elektrotla EF Çalışmasında Bulanıklık Giderimi için S/N grafiği (II. Aşama deney) 82
Şekil 3.39. Grafit Elektrot ile II. aşama Deneylerde Elde Edilen Optimum Koşullarda Enerji Tüketimi 83
Şekil 3.40. Karbon keçe elektrotla EF çalışmasında renk giderimi için S/N grafiği (II. aşama deney) 92
Şekil 3.41. Karbon keçe elektrotla EF çalışmasında TOK giderimi için S/N grafiği (II. Aşama deney)..... 93
Şekil 3.42. Karbon keçe elektrotla EF çalışmasında bulanıklık giderimi için S/N grafiği (II. aşama deney) 95
Şekil 3.43. Karbon keçe elektrot ile II. aşama deneylerde elde edilen optimum koşullarda enerji tüketimleri 96
Şekil 3.44. Karbon kumaş elektrotla EF çalışmasında renk giderimi için S/N grafiği (II. aşama deney) 103

Şekil 3.45. Karbon kumaş elektrotla EF çalışmasında (II. aşama deney) TOK giderimi için S/N grafiği 104
Şekil 3.46. Karbon kumaş elektrotla EF çalışmasında bulanıklık giderimi için S/N grafiği (II. Aşama deney)..... 106
Şekil 3.48. Karbon kumaş elektrot ile II. aşama deneylerde elde edilen optimum koşullarda enerji tüketimleri 107

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1. 1. Tekstil Boyarmaddeleri Kullanılarak Hazırlanan Çözeltiler ile Yapılmış EF Uygulamaları ve Sonuçları 7
Tablo 1. 2. Tekstil Atıksuları ile Yapılmış EF Uygulamaları ve Sonuçları 8
Tablo 2. 1. Tekstil Atıksuyunun Kirlilik Parametreleri (Atıksu Karakterizasyonu) 11
Tablo 2. 2. Denemelerde kullanılacak deney tasarım matrisi..... 13
Tablo 3.1. Gerçek Tekstil Atıksuyu Kirletici Özellikleri 14
Tablo 3.2. Grafit katot ve demir anot ile saf su ortamında gerçekleştirilen EF reaksiyonuna ait veriler 15
Tablo 3.3. RB 19 boya maddesinin temel özellikleri 17
Tablo 3.4. Deneysel çalışmalarda kullanılacak parametrik değerler 20
Tablo 3.5. Deneysel çalışmalarda kullanılan parametrik değerler..... 22
Tablo 3.6. Grafit katotla Taguchi ortogonal dizisine (L_9) göre yürütülen deney sonuçları 23
Tablo 3.7. Grafit katotla Taguchi ortogonal dizisine (L_9) göre yürütülen deney sonuçları (detaylı) 25
Tablo 3.8. Grafit katotla EF çalışmasında renk giderimi için her bir parametrenin katkı yüzdesi 30
Tablo 3. 9. Grafit katotla oksijenli ortamda yürütülen denemelerde renk giderimi için belirlenen en uygun koşullar 31
Tablo 3.10. Grafit katotla EF çalışmasında TOK giderimi için her bir parametrenin katkı yüzdesi 32
Tablo 3.11. Grafit katotla oksijenli ortamda yürütülen denemelerde TOK giderimi için belirlenen en uygun koşullar 32
Tablo 3.12. Grafit katotla EF çalışmasında bulanıklık giderimi için her bir parametrenin katkı yüzdesi 33
Tablo 3.13. Grafit katotla oksijenli ortamda yürütülen denemelerde bulanıklık giderimi için belirlenen en uygun koşullar..... 34
Tablo 3.14. Deneysel çalışmalarda kullanılan parametrik değerler..... 37
Tablo 3.15. Karbon keçe katotla Taguchi ortogonal dizisine (L_9) göre yürütülen deney sonuçları 39
Tablo 3.16. Karbon keçe katotla Taguchi ortogonal dizisine (L_9) göre yürütülen deney sonuçları 41
Tablo 3.17. Karbon keçe katotla EF çalışmasında renk giderimi için her bir parametrenin katkı yüzdesi 46
Tablo 3. 18. Karbon keçe katotla oksijenli ortamda yürütülen denemelerde renk giderimi için belirlenen en uygun koşullar..... 47
Tablo 3.19. Karbon keçe katotla EF çalışmasında TOK giderimi için her bir parametrenin katkı yüzdesi 48
Tablo 3.20. Karbon keçe katotla oksijenli ortamda yürütülen denemelerde TOK giderimi için belirlenen en uygun koşullar..... 48

Tablo 3.21. Karbon keçe katotla EF çalışmasında bulanıklık giderimi için her bir parametrenin katkı yüzdesi 49
Tablo 3.22. Karbon keçe katotla oksijenli ortamda yürütülen denemelerde bulanıklık giderimi için belirlenen en uygun koşullar 50
Tablo 3.23. Deneysel çalışmalarda kullanılan parametrik değerler 52
Tablo 3.24. Karbon kumaş katotla Taguchi ortogonal dizisine (L_9) göre yürütülen deney sonuçları 54
Tablo 3.25. Karbon Kumaş katotla Taguchi ortogonal dizisine (L_9) göre (detaylı) 57
Tablo 3.26. Karbon Kumaşla EF çalışmasında renk giderimi için parametrelerin katkı yüzdeleri 62
Tablo 3.27. Karbon kumaş katotla oksijenli ortamda yürütülen denemelerde renk giderimi için belirlenen en uygun koşullar 63
Tablo 3.28. Karbon Kumaşla EF çalışmasında TOK giderimi için parametrelerin katkı yüzdeleri 64
Tablo 3.29. Karbon kumaş katotla oksijenli ortamda yürütülen denemelerde TOK giderimi için belirlenen en uygun koşullar 64
Tablo 3.30. Karbon Kumaşla EF çalışmasında bulanıklık giderimi için parametrelerin katkı yüzdeleri 65
Tablo 3.31. Karbon kumaş katotla oksijenli ortamda yürütülen denemelerde bulanıklık giderimi için belirlenen en uygun koşullar 66
Tablo 3.32. Farklı katot materyallerle oksijenli ortamda yürütülen deneysel sonuçların karşılaştırılması 67
Tablo 3.33. Deneysel çalışmalarda kullanılan parametrik değerler 70
Tablo 3.34. Grafit katotla Taguchi ortogonal dizisine (L_9) göre yürütülen II. aşama deney sonuçları 71
Tablo 3.35. Grafit katotla Taguchi ortogonal dizisine (L_9) göre yürütülen II. aşama deney sonuçları (detaylı) 73
Tablo 3.36. Grafit katot materyal ile EF çalışmasında II. aşama renk giderimi için parametrelerin katkı yüzdeleri 79
Tablo 3.37. Grafit katotla oksijensiz ortamda yürütülen denemelerde renk giderimi için belirlenen en uygun koşullar 80
Tablo 3. 38. Grafit katot materyal ile EF çalışmasında II. aşama TOK giderimi için parametrelerin katkı yüzdeleri 81
Tablo 3.39. Grafit katotla oksijensiz ortamda yürütülen denemelerde TOK giderimi için belirlenen en uygun koşullar 81
Tablo 3.40. Grafit katotla oksijensiz ortamda EF çalışmasında bulanıklık giderimi için parametrelerin katkı yüzdeleri 82
Tablo 3.41. Grafit katotla oksijensiz ortamda yürütülen denemelerde bulanıklık giderimi için belirlenen en uygun koşullar 83
Tablo 3.42. Deneysel çalışmalarda kullanılan parametrik değerler 84
Tablo 3.43. Karbon keçe katotla Taguchi ortogonal dizisine (L_9) göre yürütülen II. aşama deney sonuçları 85
Tablo 3.44. Karbon keçe katotla Taguchi ortogonal dizisine (L_9) göre yürütülen II. aşama deney sonuçları (detaylı) 86

Tablo 3.45. Karbon keçe katot materyal ile EF çalışmasında II. aşama renk giderimi için parametrelerin katkı yüzdeleri 92
Tablo 3.46. Karbon keçe katotla oksijensiz ortamda yürütülen denemelerde renk giderimi için belirlenen en uygun koşullar 93
Tablo 3.47. Karbon keçe katot materyal ile EF çalışmasında II. aşama TOK giderimi için parametrelerin katkı yüzdeleri 94
Tablo 3.48. Karbon keçe katotla oksijensiz ortamda yürütülen denemelerde TOK giderimi için belirlenen en uygun koşullar 94
Tablo 3.49. Karbon keçe katotla oksijensiz ortamda EF çalışmasında bulanıklık giderimi için parametrelerin katkı yüzdeleri 95
Tablo 3.50. Karbon keçe katotla oksijensiz ortamda yürütülen denemelerde bulanıklık giderimi için belirlenen en uygun koşullar 96
Tablo 3.51. Deneysel çalışmalarda kullanılan parametrik değerler 97
Tablo 3.52. Karbon kumaş katotla Taguchi ortogonal dizisine (L_9) göre yürütülen II. aşama deney sonuçları 97
Tablo 3.53. Karbon kumaş katotla Taguchi ortogonal dizisine (L_9) göre yürütülen II. aşama deney sonuçları (detaylı) 98
Tablo 3.54. Karbon kumaş katot materyal ile EF çalışmasında II. aşama renk giderimi için parametrelerin katkı yüzdeleri 103
Tablo 3.55. Karbon kumaş katotla oksijensiz ortamda yürütülen denemelerde renk giderimi için belirlenen en uygun koşullar 104
Tablo 3.56. Karbon kumaş katot materyal ile EF çalışmasında II. aşama TOK giderimi için parametrelerin katkı yüzdeleri 105
Tablo 3.57. Karbon kumaş katotla oksijensiz ortamda yürütülen denemelerde TOK giderimi için belirlenen en uygun koşullar 105
Tablo 3.58. Karbon kumaş katotla oksijensiz ortamda EF çalışmasında bulanıklık giderimi için parametrelerin katkı yüzdeleri 106
Tablo 3.59. Karbon kumaş katotla oksijensiz ortamda yürütülen denemelerde bulanıklık giderimi için belirlenen en uygun koşullar 107
Tablo 3.60. Farklı katot materyallerle oksijensiz ortamda yürütülen deneysel sonuçların karşılaştırılması 108
Tablo 3.61. I. ve II. Aşama Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması 109

ÖZET

Son yıllarda yoğun olarak ileri oksidasyon tekniklerinin atıksu arıtımında kullanımı çeşitli endüstriyel atıksulara uygulanmaya çalışılmaktadır. Elektro-Fenton (EF) işlemi; çok yönlülüğü, otomatik kontrole uygunluğu, enerji verimliliği, maliyet etkinliği çevre uygulamalarına uyumluluğu gibi avantajları barındırmaktadır.

İleri oksidasyon prosesleri arasında EF prosesi diğerlerine göre çevre dostu olması ve tam mineralizasyonu sağlayabilmesi gibi yönleri ile öne çıkmaktadır. EF prosesini içeren bu çalışmada gerekli olan hidrojen peroksit ve Fe(II) iyonları reaktör içerisinde grafit, karbon keçe ve karbon kumaş gibi karbon esaslı materyaller kullanılarak elektrokimyasal olarak üretilmektedir.

Hidrojen peroksit reaktörde çözünmüş oksijenin katot materyal üzerinde indirgenmesi yoluyla üretilmektedir, diğer taraftan ihtiyaç duyulan Fe(II) iyonları ise demir plaka elektrot ise anottan karşılanmaktadır. Çalışmada aynı zamanda mevcut elektrot konfigürasyonları için hidrojen peroksit üretimi engellenerek EF prosesinin etkinliği belirlenmiştir. EF proses performansını etkileyen akım yoğunluğu, kirletici konsantrasyonu ve hava akış hızı parametreleri Taguchi deneysel tasarım matrisi kullanılarak optimize edilmiştir.

Bu çalışmanın EF prosesinin tekstil sanayinde kullanımını konu alan diğer araştırmalardan farklılıkları, günümüzde kullanılabilecek başlıca katot malzemelerinin karşılaştırmalı olarak etkilerinin araştırılması ve Taguchi Metodu kullanılarak işletme parametrelerinin optimize edilmesi olarak özetlenebilir. Kullanılan katot materyalinin seçimi sistemin kalbini oluşturmaktadır. Sonuçlardan da görülebileceği üzere kullanılan katot materyali hidrojen peroksitin üretim verimliliği üzerinde doğrudan etkiye sahiptir.

Çalışma sonuçlarına göre grafit, karbon keçe ve karbon kumaşla yürütülen denemelerde sırasıyla 165, 204 ve 456 mg/L H_2O_2 üretim değerlerine ulaşılmıştır.

Oksijenli ortamda yürütülen deney sonuçlarına göre grafit katot materyal tekstil atıksuları için 350 dakikalık arıtım periyodunda %100 renk %99 bulanıklık ve %70 TOK giderimi elde edilmiştir. Karbon keçe için 400 dakikalık EF reaksiyonunda %99,5 renk, %100 bulanıklık ve %63 TOK giderimi elde edilmiştir. Son olarak karbon kumaş katot materyali %100 renk, %100 bulanıklık ve %70 TOK giderimine ulaşılmıştır.

Oksijensiz ortam EF proses sonuçlarına göre grafit katotla 350 dakikalık elektroliz süresinde %91 renk, %63 TOK ve %89 bulanıklık giderimi elde edilmiştir. Karbon keçe elektrotta ise 400 dakikalık elektroliz süresinde %98 renk, %63 TOK ve %32 bulanıklık giderimi elde edilmiştir. Diğer taraftan karbon kumaş elektrot kullanılarak 400 dakikalık elektroliz süresinde %100 renk, %67 TOK ve %62 bulanıklık giderimi elde edilmiştir.

Sonuçlara göre oksijenli ortamda yürütülen deneysel çalışma sonuçlarının oksijensiz ortamda elde edilen sonuçlara göre daha iyi olduğu anlaşılmaktadır. Oksijen varlığında katodik olarak üretilen H_2O_2 prosesin oksidasyon etkisini ortaya koyarak giderim verimlerinde pozitif etki yaratmıştır.

Sonuç olarak sistemde yeterli mineralizasyon verimleri elde edilebilirse yüksek TOK ve zor parçalanabilen kirleticiler içeren atıksuların arıtımı için EF'un prosesinin iyi bir arıtma alternatifi olabileceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: EF, Tekstil sanayi atıksuyu, Taguchi Metodu, katot materyali, Mineralizasyon

ABSTRACT

In recent years, application of advanced oxidation processes to wastewater treatment has been extensively studied for variety of industrial wastewater. Electro-Fenton process has many advantages such as versatility, automatic control compatibility, energy efficiency, cost-effectiveness.

Among the advanced oxidation processes (AOPs), especially electro-Fenton which is including properties of environmental friendly, providing the complete mineralization of refractory pollutants is a promising AOP. In this research including electro-Fenton process, necessary H_2O_2 and Fe ions were produced electrochemically into the reactor.

H_2O_2 is produced in the reactor from reduction of dissolved oxygen. In order to produce H_2O_2, graphite, carbon felt and carbon cloth were used as cathode material while required iron ions were met via iron plate anode. Additionally, efficiency of electro-Fenton has been determined by preventing the H_2O_2 production. Besides, the system was optimized by Taguchi Method for operation parameters such as current density (CD), pollutant concentration and air flow-rates.

The difference of this research, among the others conducted electro-Fenton on textile industry wastewaters can be summarized as noted below a comparative investigation for the effects of main cathode materials which can be used in the present and optimization of operating parameters by Taguchi Method. Selection of the electrode material is the heart of the treatment system. Therefore, the appropriate selection of its material is very important. As it can be also seen in the results, cathode material used in the system has direct effect on production efficiency H_2O_2.

Amounts of produced H_2O_2 by using graphite, carbon felt and carbon cloth cathodes were achieved 165, 204 and 456 mg/L, respectively.

According to experimental results that performed at oxygenated medium by graphite were obtained 100% color, 99% turbidity and 70% TOC in treatment period of 350 min. For carbon felt, 99.5% color, 100% turbidity and 63% TOC removals were obtained in EF process in 400 min of treatment period. Additionally, 100% color, 100% turbidity and 70% TOC removals were achieved by carbon cloth in EF process in 400 min.

According to experimental results performed by graphite at oxygen-free medium, 91% color, 89% turbidity and 63% TOC removals were obtained in the treatment period of 350 min. On the other hand, 98% color, 32% turbidity and 63% TOC removals were obtained for carbon felt in EF process in 400 min of treatment period. Finally, 100% color, 67% TOC and 62% turbidity were obtained by using carbon cloth cathode materials in 400 min.

It is understood from the study that experimental results obtained at oxygenated medium were better than oxygen-free medium. Cathodically produced H_2O_2 in the presence of oxygen was revealed the effects of oxidation process and also, it has a positive effect on removal rates of the process.

At the end of this study , if enough mineralization yields is obtained , treatment of wastewaters which have high TOC and refractory pollutants electro-Fenton is a favorable treatment alternative.

Keywords: Electro-Fenton, Textile industry wastewater, Taguchi method, Cathode material, Mineralization.

1. GİRİŞ

Tekstil endüstrilerinden kaynaklanan atıksular, üretim birimlerinde değişik özellikte boya kullanımı, yüzey aktif maddeler ve tekstil yardımcı maddelere bağlı olarak başta yüksek organik madde (KOİ) ile renk parametreleri olmak üzere değişken kirlilik parametrelerini içermektedir. Renk, atıksu deşarjında mevcut standartlara göre sınırlayıcı bir parametre olmamakla birlikte estetik açıdan bir problem yarattığı gibi suyun yeniden kullanım imkânını da kısıtlamaktadır (Gönder ve Barlas, 2005).

Oluşan atıksu miktarı ve kirlilik parametreleri dikkate alındığında tekstil endüstrisi atıksuları diğer endüstrilerden kaynaklanan atıksulara nazaran daha fazla kirletici özellik taşımaktadırlar (Birgül ve Solmaz, 2007). Aynı zamanda kullanılan hammaddeler, işletmenin üretim tipi, üretimde kullanılan teknoloji ve kullanılan kimyasal madde farklılıkları da kirleticilerin tür ve konsantrasyonlarında çeşitli değişikliklere neden olabilmektedir (Gökkuş, 2006). Proses suyu kullanımı amaçlı geri dönüşüm veya boya içeren atıksuların kontrolü konusunda giderek artan düzenlemeler nedeniyle ayırma ve ayrı arıtım şemaları konularında artan ilgi, yüksek boya içerikli atıksuların arıtımını daha da önemli hale getirmektedir (El-Dein ve diğ., 2006).

Boyalı atıksular çok düşük konsantrasyonlarda bile alıcı ortamlarda ciddi estetik ve ekolojik problemlere yol açmaktadırlar (Kim ve diğ., 2004). Boyalar yalnızca estetik problemlere değil, aynı zamanda biyolojik girişimlere, ışığa, sıcaklığa ve oksidasyona da direnç gösterirler. Renkleri, biyolojik olarak parçalanmamaları ve canlılar üzerinde potansiyel toksisite oluşturmaları nedeni ile atıksu arıtımında problemler yaratmaktadır (Kuo, 1992).

Tekstil endüstrisi için kirletici parametreler çok geniş bir yelpazede değişim göstermektedirler. Bu kirletici parametrelerin çeşitliliği atıksu arıtımı için değişik arıtma yöntemlerinin kullanımını gerektirebilmektedir (Köseoğlu, 2004).

Kimyasal çöktürme, aktif karbon adsorbsiyonu, doğal absorbentler, polikatalitik oksidasyon, ozonloma ve Fenton oksidasyonu tekstil atıksularından renk giderimi için pek çok araştırmaya konu olmuş arıtım yöntemleri arasındadır, ayrıca literatürde biyolojik arıtma esnasında renk giderimi konusunda yapılmış çalışmalar da bulunmaktadır. (Tantak and Chaudhari, 2006; Doğru, 2003).

Tekstil endüstrisi atıksularından renk ve KOI giderimi amacıyla kolay uygulanabilir ve oldukça başarılı bir yöntem olan Fenton prosesi, oksidasyon ve koagulasyon proseslerinin avantajlarına sahip olmakla birlikte aynı zamanda su içerisindeki oksijen miktarını da arıtabilen etkili bir arıtım

teknolojisidir. Metodun çok çeşitli karakterde boyalı atıksular için etkili bir renk giderimi sağladığı ayrıca ekolojik anlamda güvenli bir yöntem olduğu bilinmektedir. Bunun yanısıra Fenton proses mekanizmasında önemli bir rolü olan hidrojen peroksit, boyama proseslerinde yaygın olarak kullanılan bir ön arıtım ayıracı olup diğer yöntemlere göre arıtılan atıksuda ekonomik açıdan daha etkin bir oksidasyon elemanıdır (Kuo, 1992).

Fenton ayıracının oksidasyon verimliliği, asit ortamda hidrojen peroksidin demir katalizliğinde dekompozisyonu esnasında hidroksil radikallerinin ($OH^{\cdot}$) oluşumuna bağlıdır. Fenton prosesi ile atıksu arıtım süreci dahilinde meydana gelen hidroksil radikalleri yüksek oksidasyon potansiyelleri (2.8 eV) sayesinde kirletici maddeyi tamamıyla yok edebilmektedir (Muruganandham, M. and Swaminathan, M., 2004).

Farklı ileri oksidasyon prosesleri arasında Fenton ayıracı (H_2O_2 ve Fe^{+2}'nin kombinasyonu) son yıllarda kolay uygulanabilirliği ve düşük maliyeti nedeniyle farklı arıtım prosesleri için sıklıkla kullanılmıştır. Fenton ve foto-Fenton reaksiyonları H_2O_2, Fe^{+2} ve UV ışık kaynağı kullanılarak PCB benzeri klorlu, herbisitler, klorofenoller, perhalojenler, alkenler ve boyalı atıksular gibi bazı ayrışmaya karşı dirençli kirleticinin etkili şekilde mineralizasyonu sağlanmıştır (Swaminathan ve diğ., 2003). Fenton prosesinin en önemli avantajlarından birisi kullanılan kimyasalların çevreyle dost oluşudur (Kallel ve diğ., 2009).

Yöntem 1990'lı yılların ortalarında endüstriyel atıksularda organik ve inorganik yapılı kirliliklerin gideriminde kullanılmaya başlanmış ve KOI, BOI, AKM ve renk parametrelerinin giderilebildiği görülerek geliştirilmiştir (Chen, 2004).

Son yıllarda ise su ve atıksu arıtımı ile ilgili araştırmalar özellikle elektrokimyasal metotların kullanımı yönünde önemli ölçüde artmıştır. Araştırmacılar, yağ ve gres içeren atıksuların, boya ve tekstil endüstrisi atıksularının ve hatta içme suyu ile kullanma suyu eldesinde bu metotların kullanılması üzerinde yoğunlaşmaktadırlar. Bu teknolojilerin uygulanmasında arıtma tesisi için gerekli alan ihtiyacı büyük oranda azalmakta, kimyasal madde hemen hemen hiç kullanılmamakta veya çok az kullanılmakta ve sonuçta arıtma çamuru vb. kirleticilerin miktarı oldukça azalmaktadır (Akbulut ve diğ., 2003). Elektrokimyasal ileri oksidasyon proseslerinden birisi olan elektro-Fenton (EF) günümüzde pestisit, boya endüstrisi ve ilaç endüstrisi atıksuları gibi atıksuların arıtımında kolaylıkla uygulanabilmektedir. Bu yöntemde Fenton prosesinde etkin rol oynayan Fe^{+2} ve H_2O_2, katalitik Fe^{+3} ve çözünmüş oksijenin katodik redüksiyonundan elektrokimyasal olarak elde edilebilmektedir.

$$Fe^{+3} + e^{-} \rightarrow Fe^{+2} \quad (1)$$

$$O_{2(g)} + 2H^{+} + 2e^{-} \rightarrow H_2O_2 \quad (2)$$

Asidik koşullar altında, aşırı demir iyonlarının bulunduğu ve organik madde içeren sulu bir sisteme hidrojen peroksit ilave edilmesi halinde aşağıdaki redoks reaksiyonları meydana gelmektedir (Walling and Kato, 1971).

$$H_2O_2 + Fe^{+2} \rightarrow Fe^{+3} + HO^- + HO^\cdot \quad (3)$$

$$HO^\cdot + RH \rightarrow H_2O + R^\cdot \quad (4)$$

$$R^\cdot + Fe^{+3} \rightarrow R^+ + Fe^{+2} \quad (5)$$

$$R^+ + H_2O \rightarrow OH + H^+ \quad (6)$$

Reaksiyonlarda görüldüğü gibi oksidasyon için hidrojen peroksit, Fe (II) ve organik maddeleri kullanmaktadır (Birgül ve Solmaz, 2007). EF yönteminde arıtımı gerçekleştiren temel oksidasyon kaynağı olan hidroksil radikali ($OH^\cdot$) mineralizasyon (CO_2 ve H_2O'ye dönüşüm) aşamasına kadar hidrojensiz veya hidrojenli türevleri ile çok çeşitli organik kirleticileri oksitleme kapasitesine sahip güçlü bir oksidandır (Desoky ve diğ., 2010). Oluşan $OH^\cdot$ RH gibi doymamış boya molekülünü parçalayarak boya molekülündeki kromofor veya kromojen yapıyı yok ederler. Böylece bu boyalar kimyasal olarak bozunarak renksiz hale gelirler (Kuo, 1992). Sonuçta atıksuda rengi giderilen boya molekülleri yumaklaştırılıp çöktürülerek sudan ayrılmaktadır. Dolayısıyla proses hem oksidasyon hem de koagulasyon proseslerinin avantajlarına sahiptir (X.-J. Ma, H.-L. Xia, 2009). Oluşan $OH^\cdot$ radikalleri seçici olmayan organik bileşiklerle reaksiyona girme kapasitesine sahip olup, oldukça iyi oksitleyicilerdir ve CO_2, su ve inorganik iyonlar içerisinde tam olarak mineralize olurlar.

EF prosesinde görev alan $OH^\cdot$ radikallerini tek kaynağı Fenton oksidasyonu (FO) değildir. Bu yöntemde, $OH^\cdot$ radikalleri aşağıda verilen reaksiyon gereği anot yüzeyinde meydana gelen suyun hidrolizi ile de oluşabilmektedir. Proses içerisinde Fenton ayıraçlarının elektroliz ortamında oluşumu, O_2'nin ve Fe^{+3}'ün redüksiyonu ile katot yüzey üzerinde H_2O_2 ve Fe^{+2}'ye dönüşümüdür (Özcan, ve diğ., 2009). Ancak sistemde anotta çözünebilir elektrot kullanılması durumunda elektro oksidasyon verimi oldukça sınırlıdır (Boye ve diğ., 2003).

$$H_2O \rightarrow OH. + H^+ + e^- \quad (7)$$

EF yöntemi, hem H_2O_2 hem de Fe^{+2} iyonlarının katotta sürekli olarak oluşumunu mümkün kılarak Fenton reaksiyonuna göre $OH^\cdot$ oluşumunun daha rahat kontrol altında tutulabilmesini sağlar. Zira Yavuz'un (2007)'de yaptığı araştırmanın ilgi çekici sonuçlarından biriside reaktöre ilave edilen H_2O_2'nin proses boyunca kademeli olarak dozlanmasının giderme verimini artırıyor

olmasıdır. Aynı zamanda, H_2O_2 üretimi için gerek duyulan moleküler oksijen reaktördeki suyun anodik oksidasyonu ile tekrardan üretilebilmektedir (Desoky ve diğ., 2010).

Sonuçta, reaktördeki $OH^{\cdot}$ radikallerinin miktarı FO sistemine göre daha yüksek olacaktır. Bu olay, EF yönteminin verimliliğini arttıran en önemli unsurlardan birisidir. Sistemde, Fenton reaksiyonları sonucu oluşan Fe(III) iyonlarının katot yüzeyinde Fe(II)'ye indirgenmesi mümkündür. Bu durum, Fenton zincir reaksiyonlarını teşvik edeceği için, EF sistemlerinde klasik FO'ya oranla daha yüksek arıtma verimlerine ulaşılması sağlanmaktadır (Fockedey ve Lierde, 2002).

$$Fe^{+3} + e- \rightarrow Fe^{+2} \quad (8)$$

Ayrıca, hidroliz sırasında anotta oluşan aktif oksijen türleri, kimyasal ve fiziksel olarak anot yüzeyine tutunarak organik maddeleri oksitleyebilmektedir (reaksiyon (14) ve (15)). Bu olay, literatürde direkt oksidasyon olarak isimlendirilmektedir (Israilides ve diğ., 1997).

$$R + MO_x{+}1 \rightarrow RO + MO_x \quad (9)$$

$$R{+}\ MO_x\ (OH.)_2 \rightarrow CO_2 + zH^+ + ze^- + MO_x \quad (10)$$

Yukarıda verilen reaksiyonlara ek olarak, anot yüzeyinde ikincil reaksiyonlar yardımıyla meydana gelen Cl_2 / OCl^-, H_2O_2, O_3 gibi oksidantlar da reaktör içerisindeki organik kirleticileri oksitlemeyebilmektedir (indirekt oksidasyon olarak isimlendirilir) (Deng and Englehardt, 2006). Hidrojen peroksit çevre dostu bir kimyasal olup, genellikle alkali ortamda çözünmüş oksijenden katodik olarak üretilebilmektedir. Bu nedenle birçok araştırmacı oksidasyon kapasitesi çok yüksek olmamasına rağmen organik maddelerin giderimi için reaktör içerisinde (in-situ) elektrokimyasal olarak hidrojen peroksiti kullanmaktadırlar (Wang ve diğ., 2008). Elektro-kimyasal bir hücrede direkt ve indirekt oksidasyonun oluşum mekanizmaları henüz tam olarak bilinmemektedir. Buna karşın, Israilides ve diğ., (1997) tarafından yapılan bir çalışmada, muhtemel reaksiyonlar detaylı olarak tanımlanmaya çalışılmıştır. EF yönteminde gözlenen bir diğer arıtım mekanizması ise elektro-koagülasyondur (EC). EC'de, anodik olarak üretilen Fe(II) ve Fe(III) bileşenleri ortam pH'sına bağlı olarak $Fe(OH)_n$ türündeki yapılara dönüşür ve bu yapılar flokların polaritesine bağlı olarak elektrostatik ilgi veya kompleksleşme reaksiyonlarıyla, kirleticilerin (organik, kolloidal, bir kısım iyonik vb. türde) giderimi sağlanır (Mollah ve diğ., 2001).

$$4Fe(s) + 10H_2O + O_2 \rightarrow 4Fe(OH)_3 + 4H_2\ (g) \quad (11)$$

$$Fe(s) + 2H_2O \rightarrow Fe(OH)_2 + H_2 \quad (12)$$

Özcan ve diğ., 2008(a), EF prosesini kullanarak çok yaygın kullanım alanına sahip bir herbisit türü olan pikloram'ın degredasyonu ve mineralizasyonu üzerine yaptıkları çalışmada Fe^{+3} konsantrasyonu, uygulanan akım ve pikloram konsantrasyonunun degredasyon ve mineralizasyon üzerine önemli ölçüde etki ettiğini gözlemlemişlerdir.

EF yöntemi, yukarıda verilen birçok arıtım mekanizmalarının birlikte çalıştığı bir sistem gibi görünse de, elektro-kimyasal hücrede yöntemin verimini sınırlandıran parazit reaksiyonların meydana gelmesi de mümkündür. Özellikle, sistemde üretilen $OH^{\cdot}$ radikalleri ve dışarıdan eklenen H_2O_2, bu parazite reaksiyonlar ile tüketilebilmektedir (Diaz ve diğ., 2002).

$$H_2O_2, + Fe^{+3} \rightarrow Fe^{+2} + HO_2. + H^+ \quad (13)$$

$$H_2O_2, + OH^{\cdot} \rightarrow HO_2. + H_2O \quad (14)$$

$$Fe^{+3} + HO_2. \rightarrow Fe^{+2} + H^+ + O_2 \quad (15)$$

$$Fe^{+2} + HO_2. \rightarrow Fe^{+3} + HO_2\text{-} \quad (16)$$

Bu reaksiyonlar, genellikle reaktörde sağlanacak uygun Fe(II) / H_2O_2, ve Fe(III)/ H_2O_2, molar oranları ve pH ile azaltılabilmektedir. Parazit reaksiyonlara ek olarak, yüksek akım uygulamalarında, aşağıda verilen yarışmalı elektrot reaksiyonlarının reaksiyon (12) ve (13)'i engellemesi mümkündür. Bu durum, EF reaktöründeki organik madde giderimini azaltan bir diğer önemli faktör olarak kabul edilmektedir (Zang ve diğ., 2005).

$$2\ H_2O_2 \rightarrow 4H^+ + O_2 + 4e^- \quad (17)$$

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2 \quad (18)$$

Yukarıda da ifade edildiği gibi, EF yönteminde gerçeklesen kimyasal reaksiyonlar oldukça karmaşık ve kontrolü oldukça güçtür. Bu nedenle, optimum işletme koşullarının belirlenmesinin EF yönteminin verimliliğinin arttırılmasında büyük önemi vardır. Ayrıca akım, pH, sıcaklık ve destek elektrolit türü için optimum değerlerin belirlenmesinin kirleticinin degredasyon ve mineralizasyon hızı üzerinde büyük öneme sahiptir (Özcan ve diğ., 2008 (b)).

EF yönteminde OH. radikalleri çözelti içerisinde elektrokimyasal olarak üretilen H_2O_2 ve Fe+2'nin reaksiyonu sonucunda oluşmaktadır. Proseste çeşitli elektrotlar kullanılarak (grafit, karbon politetrafloroetilen (PTFE), oksijen gazı beslemeli katotlar) H_2O_2 elektrokimyasal olarak oksijenin iki elektron indirgenmesi yoluyla aşağıdaki eşitliklerde görüldüğü gibi üretilmektedir (Khataee ve diğ., 2009).

$$O_2 + 2e^- + 2H^+ \rightarrow H_2O_2 \quad (19)$$

Katotta oksijen indirgenmesi EF prosesi için büyük önem taşımaktadır ve oksijenin elektrokimyasal olarak indirgenmesi katot materyali ile doğrudan ilişkilidir. Bu anlamda karbon bazlı elektrot ve gaz difüzyon elektrodu, hidrojen peroksit üretimi amacıyla kullanılan ve yüksek akım verimliliğine sahip elektrotlar olarak rapor edilmektedir (Wang ve diğ., 2008).

EF yöntemi, kirliliği kısa sürede maksimum düzeyde azaltması, kolay ve düşük maliyetli teçhizatların kullanımı ve işletiminin kolay olması gibi avantajları nedeniyle su ve atıksu arıtımında yaygın olarak kullanılabilecek ve gelecekte çok farklı uygulama alanları bulacağı düşünülen umut verici bir arıtma teknolojisidir.

EF Sisteminin Avantajları

Bu prosesin, klasik Fenton uygulamaları ile karşılaştırıldığında öne çıkan pek çok avantajları vardır (Qiang, 2002). Bu avantajları şöyle sıralanabilir:

- ✓ H_2O_2 ihtiyaç duyuldukça yerinde ve sürekli üretilebilir. Bu nakliye ve depolamayı ortadan kaldırır.
- ✓ Seyreltik H_2O_2 çözeltisi işlem sırasında güvenliği arttırır.
- ✓ Üretim prosesi ılımlı sıcaklık ve basınçta basitçe gerçekleştirilir.
- ✓ Fe^{2+} katotta tekrar üretilebilir.
- ✓ Oksijen veya hava gönderilmesi tepkime çözeltisinin karışımını arttırır.

Prosesin Giderilebilir Dezavantajları

- ✓ H_2O_2 katot ara yüzeyinde birikebilir ve belki kısmen bozunabilir.
- ✓ Yüksek derişimlerde protonlar elektronlar ile yarışır ve hidrojen gazı açığa çıkar.

Her iki etkide H_2O_2 üretiminde akım verimini azaltır. Bu nedenle asidik çözeltilerde, katodik potansiyel ve çözelti pH'sı akım veriminin kontrolünde iki önemli faktördür (Gözmen, 2002).

Bu yöntemdeki tüm işlemler aynı anda ve bir kısmı çevrimsel olarak üretilirken, reaktöre kimyasal madde olarak sadece bir miktar Fe^{2+} ve O_2 gazı verilir. İşlenen atık suyun alıcı ortama verilmeden asitliğinin nötralize edilmesi, çok az bir H_2O_2 fazlalığının bulunması halinde bunun bozundurulması ve yine çok az (katalitik) miktarda kullanılan demir iyonlarının tekrar sisteme döndürülmesi için gerekli işlem koşullarının ve sistem dizaynının rahatlıkla oluşturulabileceği görülmüştür. (Kaplan, 2007). Aynı zamanda EF prosesi, atıksu arıtımı amacıyla tehlikeli

kimyasal madde kullanımına gerek duyulmadığı için çevre dostu bir teknolojidir ayrıca ayrışmaya karşı dirençli ve/veya toksik, organik mikro-kirleticilerle kirlenmiş suların arıtımı amacıyla kullanılabilecek etkin bir arıtma yöntemidir (Desoky ve diğ., 2010).

Konuyla ilgili yapılan araştırmalar incelendiğinde; çalışmaların boyarmaddelerle hazırlanmış sentetik atıksular kullanılarak yapılan ve tekstil sanayii atıksuları ile yürütülen araştırmalar olmak üzere iki ana kategoriye ayırmak mümkün olduğu görülmektedir. Literatürde boyar madde ve sentetik atıksular ile yapılmış çok sayıda araştırma mevcuttur. Bu tip bazı araştırmalar ve elde edilen sonuçlar. Tablo 1.1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. 1. Tekstil Boyarmaddeleri Kullanılarak Hazırlanan Çözeltiler ile Yapılmış EF Uygulamaları ve Sonuçları

Araştırmacı	Kullanılan Boyar Madde	Kullanılan Katot Materyali	Giderim Verimleri
Ruiz ve Diğ. 2011	Sentetik atıksu Acid Yellow 36 (AY36) Azo Boyası	Hava difüzyonlu katot	%100 renk giderimi %71 TOK giderimi
Kayan ve Diğ. 2010	Sentetik atıksu Acid red 9	Karbon keçe katot platin elek anot	%98 renk giderimi %80 TOK giderimi
Lei ve Diğ. 2010	Sentetik atıksu (azo dye cationic red X-GRL)	Aktif karbon fiber katot	%97.62 renk giderimi %41.86 TOK giderimi
Panizza ve Cerisola 2009	Sentetik atıksu Alizarin re	Gaz difüzyon katot	%90 KOI giderimi
Özcan ve Diğ. 2009	Sentetik Atıksu Acid Orange 7 (AO7) Azo Boyası	Karbon keçe katot	%92 TOK giderimi
Özcan ve diğ., 2008(c),	Basic Blue 3 Azo Boyası	Karbon sünger	%91.6 TOK giderimi
Zhang ve diğ., 2008,	Amaranth azo boyası	Modifiye edilmiş grafit katot	%80,3 TOK giderimi
Wang ve diğ. 2005	Acid Red 14	Aktif karbon fiber ve grafit katot	%100 renk giderimi %70 TOK giderimi

Tablo 1. 2 incelendiğinde EF prosesinin özellikle renk giderimi üzerinde son derece etkili iken, KOI ve TOK giderimin de nispeten zayıf kaldığı görülmektedir.

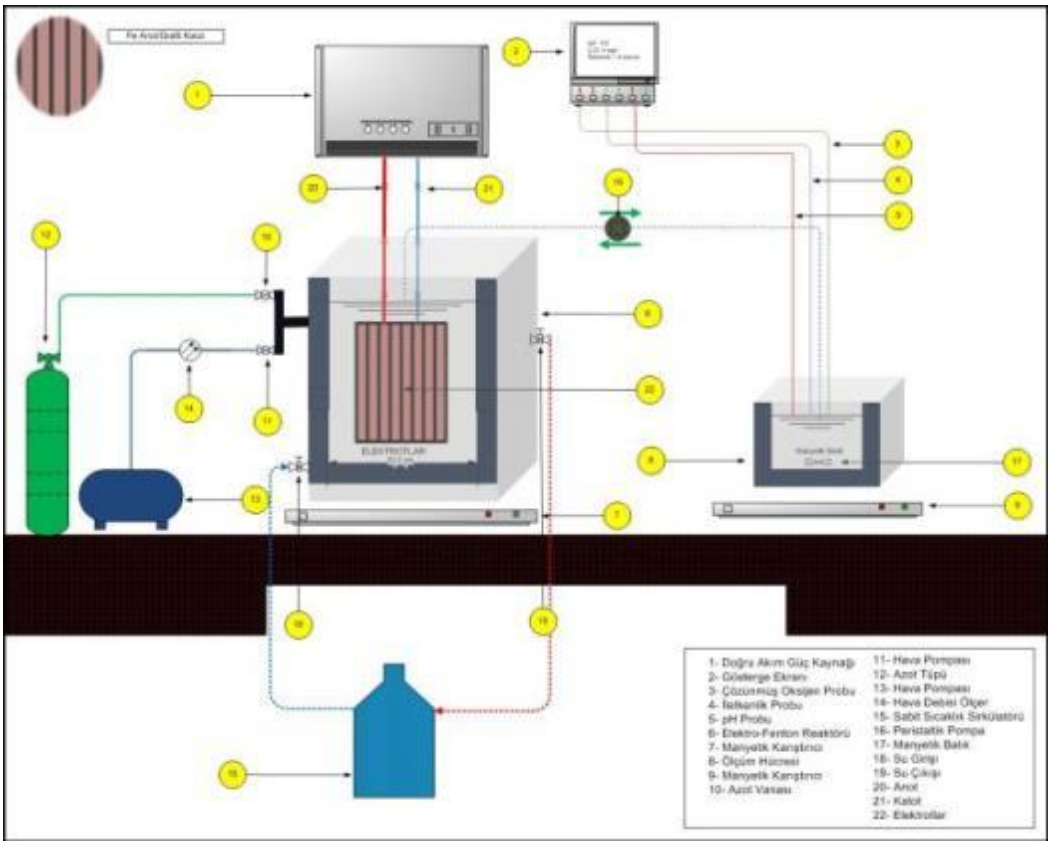
Daha önce belirtildiği üzere tekstil sanayi atıksuları ile yapılan çalışmalar literatürde son derece kısıtlıdır. Tablo 1.2'de EF tekniği ile tekstil sanayi atıksularının arıtılması üzerine yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

Tablo 1. 2. Tekstil Atıksuları ile Yapılmış EF Uygulamaları ve Sonuçları

Araştırmacı	**Kullanılan Atıksu**	**Katot Materyal**	**Giderim Verimleri**
Wang ve Diğ., 2010	Gerçek Tekstil Atıksuyu	Aktif karbon lif dokuma esaslı PAN (polyacrylonitrile)	%75,2 KOI giderimi
Wang ve Diğ., 2008	Gerçek Tekstil Atıksuyu	Grafit katot	%70,6 renk giderimi
Desoky ve Diğ., 2010	Gerçek Tekstil Atıksuyu	Camsı karbon katot ve platin elek anot	%100 renk giderimi %85 KOI giderimi

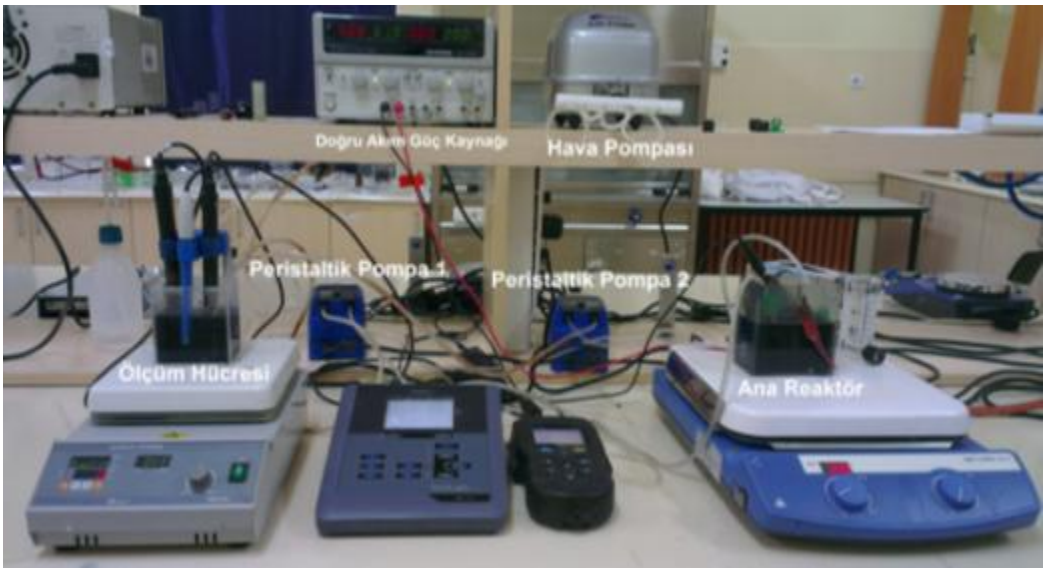
2. MATERYAL VE METOT

Araştırma Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan atıksu yerel bir tekstil endüstrisinden temin edilmiştir. Çalışmalarda kullanılan deney sistemi Şekil 2.1'de şematik olarak gösterilmektedir. Sistemde kullanılan elektrokimyasal hücre pleksi-glass malzemeden üretmiştir ve elektrotlar atıksuya daldırılmış demir anotlardan ve grafit, karbon keçe ve karbon kumaş gibi karbon esaslı materyallerin katot olarak kullanıldığı çeşitli konfigürasyonlardan oluşmuştur. Ayrıca reaktörün tabanında yer alan bir manyetik karıştırıcı vasıtasıyla hem çözünmüş oksijenin yüksek değerlerde tutulmuş hem de reaktör içeriği karıştırılarak homojenlik sağlanmıştır.



Şekil 2.1. Denemelerde kullanılacak olan klasik elektrokimyasal reaktörü içeren deney sistemi

Şekil 2.2'de deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği EF reaktör düzeneğinin bir görünümü verilmektedir.



Şekil 2.2. EF Reaktörünün Görünümü

Proje çalışmaları süresinde EF denemeleri iki aşamalı olarak yürütülmüştür. Deneysel çalışmaların I. aşamasında şekil 2.1'de görülen deney sistemi kullanılarak reaktör içeriği hava yardımıyla karıştırılmış ayrıca çözünmüş oksijen konsantrasyonu da istenilen değerde tutulmuştur. Böylece hem elektrokimyasal olarak hidrojen peroksit reaktörde üretilmiş hem de anottan ortama verilen demir(II) iyonları sayesinde EF reaksiyonu gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada, hazır kitler (kullanılan kitlerin ölçüm aralığı 1-10 mg H_2O_2/L'dir.) kullanılarak reaktörde üretilen H_2O_2 konsantrasyonu spektrofotometrik olarak ölçülmüş, bu sayede kullanılan elektrot konfigürasyonlarının birbirlerinden farkları ortaya konulmuştur.

Deneysel çalışmaların II. aşamasında ise koşullar yine aynı tutulmuştur, fakat bu kez reaktör içeriği havalandırılmayıp reaktörden azot gazı geçirilerek atıksuda çözünmüş oksijen konsantrasyonu mümkün olduğunca tüketilmiş ve böylece reaktörde hidrojen peroksit oluşumu engellenmiştir. Dolayısı ile eş koşullarda yapılan bu iki deney setinden salt olarak EF' un etkisi belirlenmiştir.

Yukarıda bahsedilen I. ve II. aşamada yapılan deney setleri demir anot ve bahsedilen farklı katot malzemeleri için optimize edilmiş olup, sistemin işletilebileceği en iyi koşullar belirlenmiştir.

Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere Kayseri'de denim kumaş üretimi yapan bir tekstil endüstrisi atıksu arıtma tesisi girişinden atıksu numunesi alınmış olup, Erciyes Üniversitesi

Çevre Mühendisliği laboratuvarlarında karakterizasyonu yapılarak atıksuyun kirletici özelliği ortaya konulmuştur (Tablo 2.1).

Tablo 2. 1. Tekstil Atıksuyunun Kirlilik Parametreleri (Atıksu Karakterizasyonu)

Kirlilik Parametresi	Birim	Değeri
pH	---	12,53
Bulanıklık	NTU	124
İletkenlik	ms/cm	20,47
AKM	mg/L	453,33
Filtre edilmiş KOI	mg/L	1925
Filtre edilmemiş KOI	mg/L	2233,34

Optimizasyon için akım yoğunluğu, kirletici konsantrasyonu ve hava akış hızı işletme parametreleri olarak seçilmiştir. Esas itibarı ile hava akış hızı reaktördeki çözünmüş oksijen konsantrasyonunu belirleyeceği için söz konusu parametre ve çözünmüş oksijen konsantrasyonu ilişkisi öncelikle ortaya koyulmuştur. Zira hava akış hızının belirli bir değerine kadar çözünmüş oksijen konsantrasyonunun artması, ardından bu kritik akış hızından sonra elektrokimyasal olarak elde edilen hidrojen konsantrasyonuna etkisi belirlenmiştir. Bu parametreler her elektrot konfigürasyonu için optimize edilmiş elektrot malzemeleri için en uygun çalışma koşulları belirlenmiştir.

Proje kapsamında takip edilen çalışma planı aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

1. Temin edilen atıksuyun laboratuvarda Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)[*], Toplam Organik Karbon (TOK), Bulanıklık, askıda katı madde, pH ve elektriksel iletkenlik değerlerinin belirlenerek karakterize edilmesi. Atıksu karakterizasyonu ve ön denemeler aşamasında eş zamanlı olarak yapılacak TOK ve KOİ ölçümleri sayesinde atıksuyun TOK ve KOİ derişimleri arasında korelasyon kurularak optimizasyon çalışmaları yürütülmüş ve daha sonraki aşamalarda mineralizasyon verimi sadece TOK ölçümleri üzerinden ifade edilmiştir.
2. Her iki aşama için sistem değişkenleri; Akım şiddeti (AŞ), Kirletici Konsantrasyonu (C_o) ve hava akış hızı (Q_h) olarak belirlenmiştir.

[*] KOİ ölçümlerinin, Su ve Atıksu Analizinde Standart Metotlar" adlı kaynakta bulunan 5220-D metoduna göre spektrofotometrik olarak hazır kitler ile yapılmıştır. (Standard Methods 1998).[*]

3. Öncelikle her elektrot konfigürasyonu için reaksiyon süresinin etkisi araştırılmıştır. Elektrokimyasal çalışmalarında öncelikle giderme veriminin hızlı bir şekilde arttığı daha sonra gerek arıtma süresinin gerekse enerji tüketiminin tedricen artmasına rağmen giderme veriminde diğer parametrelerdeki artışa oranla daha düşük bir iyileşmenin görüldüğü bir arıtma periyodu göze çarpmaktadır. Bu genel bir eğilim olup esasen sistem işletilirken bu periyodun yani platonun oluşmaya başladığı zaman aralığı dikkate alınmamıştır. Arıtma tekniğinin uygulanabilirliğini belirleyen en önemli parametrelerden birisi–belki de en önemlisi sistemin işletme maliyetidir. Bu sebeple sistemin maliyet avantajı sağlayabilmesi açısından bu platonun oluşmaya başladığı kritik noktalarda işletilmesi gerekliliği vardır. Bu sebeple en uygun bekletme süresinin belirlenmesi çalışmanın öncelikleri arasındadır. Zira bu parametre hem reaktör hacmi üzerinde etkili olması sebebiyle ilk yatırım maliyetini hem de birim elektriksel yük üzerinde etkili olması sebebiyle de işletme maliyeti üzerinde etkin bir parametredir.

   Kirletici konsantrasyonunun etkisinin araştırılması ise sistemin yerel ölçekli bir atıksudan daha ziyade evrensel ölçekli benzer endüstrilerin atıksularına uygulanabilmesi aşamasında önemli veriler sunulmuştur. Kirletici konsantrasyonunun belirli aralıklar dâhilinde sistem üzerindeki etkileri araştırıldığında ise arıtma teknolojisinin uygulama kolaylığı göze çarpmaktadır.
4. Temin edilen atıksu kullanılarak yukarıda bahsedilen işletme parametreleri dâhilinde farklı elektrot konfigürasyonları için deneyler yapılarak TOK, renk ve bulanıklık cinsinden giderme verimleri ölçülüp, aynı zamanda sistemin birim enerji tüketim değerleri hesaplanmıştır. Kullanılan elektrot konfigürasyonlarının birbirleriyle performans bazlı karşılaştırılması her bir sistem için üretilen H_2O_2 ve giderme verimleri üzerinden yapılmıştır. Atıksu numunesinde 200-1.000 nm alığında spektrum taraması yapılarak maksimum absorbans verdiği dalga boyu saptanmış ve renk ölçümleri, maksimum absorbans tekniğine dayalı olarak gerçekleştirilmiştir.
5. Yukarıda bahsedilen sistem parametrelerinin performans çıktısı üzerindeki katkıları ANOVA analizi kullanılarak belirlenecek ayrıca sistemin optimizasyonu “Taguchi Metodu” kullanılmıştır.

Bu çalışma için uygulanması planlanan Taguchi yönteminin diğer istatistik yöntemlerinden farkı; bir deneyi etkileyen parametreleri, kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen olmak üzere iki grupta incelenmesi ve çok sayıda parametreyi ikiden fazla seviyede incelemeye imkân sağlanmasıdır. Ayrıca, performans değerinin ortalamasını hedeflenen düzeye getirirken, hedef civarındaki değişkenliği minimum yapmasıdır. Bir başka farkı da laboratuar ortamında elde edilen sonuçların gerçek üretim ortamında da elde edilebilmesidir (Küçük 2005).

Deneysel çalışma sonunda belirlenecek optimum çalışma şartları, farklı çalışma ortamları veya farklı zamanlarda her zaman aynı veya birbirine çok yakın performans değerini verilmiştir. Bunun için kullanılacak optimizasyon kriteri, performans değeri etrafındaki değişkenliğin minimum düzeyde tutulmasını kontrol edebilmiştir. Taguchi'ye göre, böyle bir optimizasyon kriteri performans istatistiğidir.

Optimum şartlar belirlendiğinde, genellikle, bir doğrulama deneyi yapmak iyi bir uygulamadır. Bununla birlikte, optimum olmayan şartlarda yürütülen deney sonuçlarından optimum şartlardaki performansı tahmin etmek mümkündür. Deney tasarım matrisi Tablo 2.2 'de verildiği gibidir. Sistem parametreleri 3 seviyeli olarak incelenecek olup denemeler iki tekrarlı olarak yapılmıştır.

Tablo 2. 2. Denemelerde kullanılacak deney tasarım matrisi

P1	P2	P3
1	1	1
1	2	2
1	3	3
2	1	2
2	2	3
2	3	1
3	1	3
3	2	1
3	3	2

Çalışma boyunca ölçülen, izlenen ve değerlendirmeye tabi tutulan parametreler kısaca şu şekilde sıralanabilir.

- Reaktördeki elektriksel iletkenlik, pH, Çözünmüş oksijen değerleri ve sıcaklık
- Çıkış suyunun TOK, renk ve bulanıklık ve değerleri
- Reaktörün enerji tüketimi*
- Optimum koşullardaki çıkış suyunun TOK, renk ve bulanıklık konsantrasyonu

*Doğrulama deneyleri sonucunda belirlenecek olan optimum koşullarda sistemin özgül enerji tüketimi kw-h/m^3 cinsinden hesaplanıp, elde edilen sonuçlar işletme maliyeti hakkında önemli bir veri elde edilmiştir.

Arıtılmış su KOİ ve pH bazında kanala deşarj edilebilirlik açısından değerlendirilmiştir.

3. TARTIŞMA VE SONUÇ

3.1. Gerçek Tekstil Atıksuyunun Temini ve Yapılan Ön Denemeler

Kayseri'de denim kumaş üretimi yapan bir tekstil fabrikası ile atıksu temini konusunda gerekli görüşmeler yapılmış ve atıksu karakterizasyonu amacıyla tekstil atıksuyu numunesi alınmıştır. Temin edilen atıksu ile gerçekleştirilen atıksu karakterizasyonu sonuçları Tablo 3.1 'de verilmektedir.

Tablo 3.1. Gerçek Tekstil Atıksuyu Kirletici Özellikleri

Parametre	Değeri
pH	13,31
İletkenlik (mS/cm)	11,96
Bulanıklık (NTU)	34,80
Toplam KOI (mg/L)	3404,43
Çözünmüş KOI (mg/L)	3398,60
Askıda katı madde (mg/L)	323
TOK (mg/L)	1278,39
*Renk (abs)	2,500

* Renk parametresi atıksuyun maksimum absorbans taraması sonucunda maksimum absorbans verdiği dalga boyunda (λ_{max}=670 nm) gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca proje ön çalışmaları dâhilinde farklı akım şiddetlerinde H_2O_2 üretim denemeleri yürütülmüştür. Bu denemelerde 350 ml hacimli bir reaktör kullanılarak ve herhangi bir kirletici içermeyen çözelti ortamında 20 mM Na_2SO_4 destek elektrolit ilavesi ile iyonik şiddet oluşturulmuştur. Çözelti ortamında oluşan H_2O_2'in stabilitesini korumak için pH değeri NaOH veya H_2SO_4 çözeltileri kullanılarak 3'de sabit tutulmuştur. Anot malzemesi olarak proje önerisinde demir elektrot kullanılması önerilmiş olmasına rağmen, burada elektrot düzenlemesi olarak grafit katot ve platin tel anot kullanılmıştır. Ön denemelerde bu değişikliğe gidilmesinin sebebi ortamda Fe(II) iyonlarının bulunması durumunda Fenton reaksiyonu gerçekleşeceğinden üretilen H_2O_2'nin parçalanması sebebiyle analizinin yapılamayacağıdır.

Bilindiği üzere Fenton prosesinin oksidasyon reaksiyonu kompleks olup temel reaksiyonu;

$$Fe^{+2} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{+3} + OH^- + OH^{\cdot}$$ şeklindedir.

Proje çalışmalarında yalnızca H_2O_2 üretim çalışmalarına mahsus olarak Fenton reaksiyonu neticesinde Fe(II) iyonlarının ortamda bulunması halinde H_2O_2 parçalanmasını önlemek için (öngörü çalışmalarında küçük bir modifikasyon yaparak) platin tel anot kullanılmıştır. Böylelikle oluşan H_2O_2 nin miktar analizi net bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu modifikasyon ile işletme parametrelerinin H_2O_2 oluşumuna etkisini belirlemek mümkün olabilmektedir. Böylelikle elde edilen sonuçlar arıtım amaçlı uygun başlama noktaları için yol gösterici öngörüleri sağlamada kullanılacaktır. Aksi takdirde proje önerisinde belirtilen deney koşullarında (demir anot + karbon esaslı katot) üretilen H_2O_2'nin tespiti mümkün değildir. Bu amaçla yürütülen ön denemeye ait deneysel sonuçlar Tablo 3.2'de verildiği gibidir.

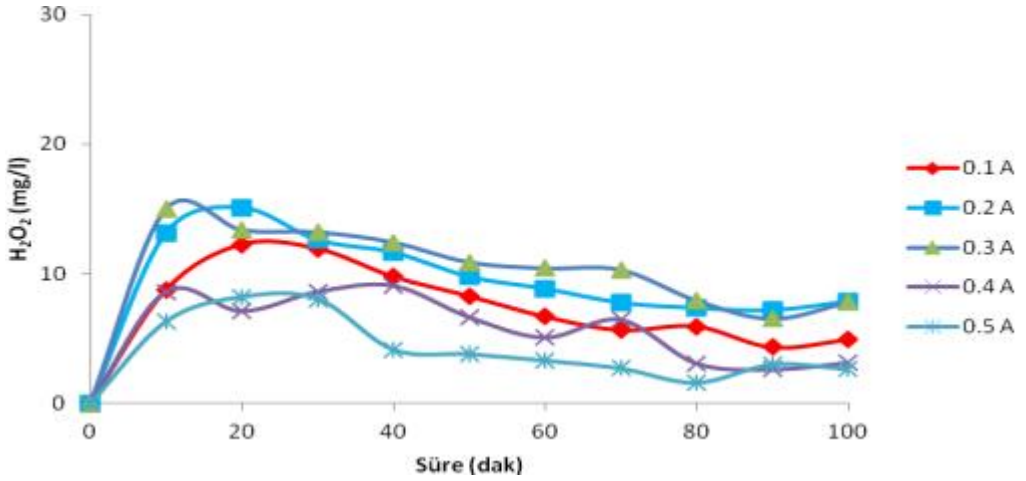
Tablo 3.2. Grafit katot ve demir anot ile saf su ortamında gerçekleştirilen EF reaksiyonuna ait veriler

Zaman (dk.)	Fe(II) (mg/L)	Fe(III) (mg/L)	Toplam Demir (mg/L)	H_2O_2 Miktarı (mg/L)
20	52,960	1,124	54,084	0,00
30	81,510	17,050	98,560	0,00
40	96,340	45,932	142,272	0,00
50	121,200	56,100	177,300	0,00
60	143,780	68,684	212,464	0,00
70	175,260	67,780	243,040	0,00
80	180,510	79,558	260,068	0,00
90	191,220	70,304	261,524	0,00
100	219,250	36,926	256,176	0,00

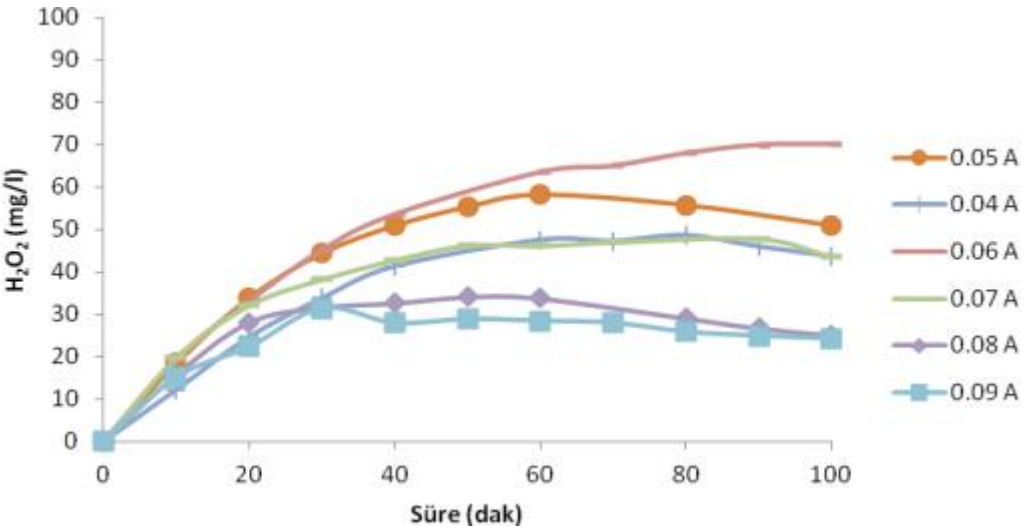
Tablo 3.2'deki veriler herhangi bir kirletici içermeyen çözelti ortamında 20 mM Na_2SO_4 destek elektrolit ilavesi ile grafit katot ve demir anot kullanılarak elde edilmiştir. Deneme esnasında, H_2O_2 analizleri hazır kit ölçümlerine dayalı olarak, Fe(II) analizleri standart metotlara göre fenantrolin metodu ile (spektrofotometrik) ve toplam demir analizleri ise atomik absorbsiyon spektrofotometresi ile gerçekleştirilmiştir. Bu sonuçlara göre toplam demir ve Fe (II) konsantrasyonları aralarındaki farktan Fe(III) konsantrasyonları belirlenmiştir. Gerçekleştirilen bu ön deneme ile EF prosesi esnasında H_2O_2'nin tespitinin mümkün olamayacağı görülmektedir. EF reaksiyonlarının başlangıcından itibaren H_2O_2 hidroksil radikali üretmek üzere Fe(II) katalizliğinde reaksiyona girerek parçalanmaktadır. Ancak oluşan H_2O_2, Fe(II)'yi radikal oluşumu için Fe(III) formuna dönüştürmekte olup

reaksiyonunun ilerleyen dakikalarında Fe(III) konsantrasyonundaki değişimle kendini göstermektedir.

H_2O_2 üretimlerinin tespit edilebilmesi amacıyla platin tel anot ve katot materyali olarak da grafit levha (8,0 x 12 cm) kullanılarak 0,1-0,5 A ve 40-90 mA akım şiddetlerinde uygun akım değerlerinin belirlenmesi amacıyla 100 dakikalık H_2O_2 üretimi denemeleri yürütülmüştür. Belirtilen şartlarda denemelere ait sonuçlar Şekil 3.1 ve 3.2 'de verilmektedir.



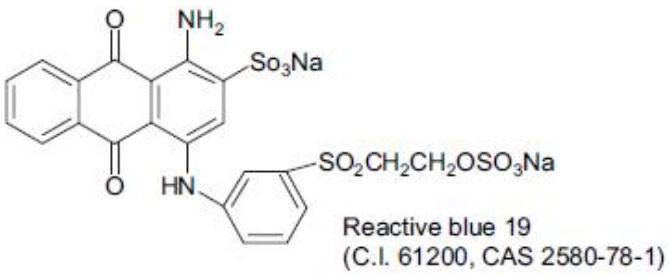
Şekil 3.1. EF prosesi için 0,1 – 0,5 A akım şiddeti aralığında H_2O_2 üretim miktarları



Şekil 3.2. EF Prosesi için 40 – 90 mA akım şiddeti aralığında H_2O_2 üretim miktarları

Gerçekleştirilen denemeler neticesinde eşit koşullar altında en yüksek H_2O_2 oluşumunun 60 mA akım şiddeti ile elde edildiği görülmektedir. Bir sonraki aşamada ise demir tel anot malzeme kullanılarak EF prosesi kullanılarak yine aynı şartlar altında ve 60 mA akım şiddeti ile

Reactive Blue 19 (RB 19) boyar maddesi ile sentetik olarak hazırlanmış tekstil atıksuyunun renk ve TOK giderim performansları değerlendirilmiştir. Boyarmaddeye ilişkin kimyasal özellikler ve karakterizasyon çalışması sonuçları aşağıdaki Şekil 3.3 ve Tablo 3.3'de verilmektedir.



Şekil 3.3. RB 19 boyarmaddesinin renk indeks numarası, kimyasal formülü ve kimyasal yapısı

Tablo 3.3. RB 19 boya maddesinin temel özellikleri

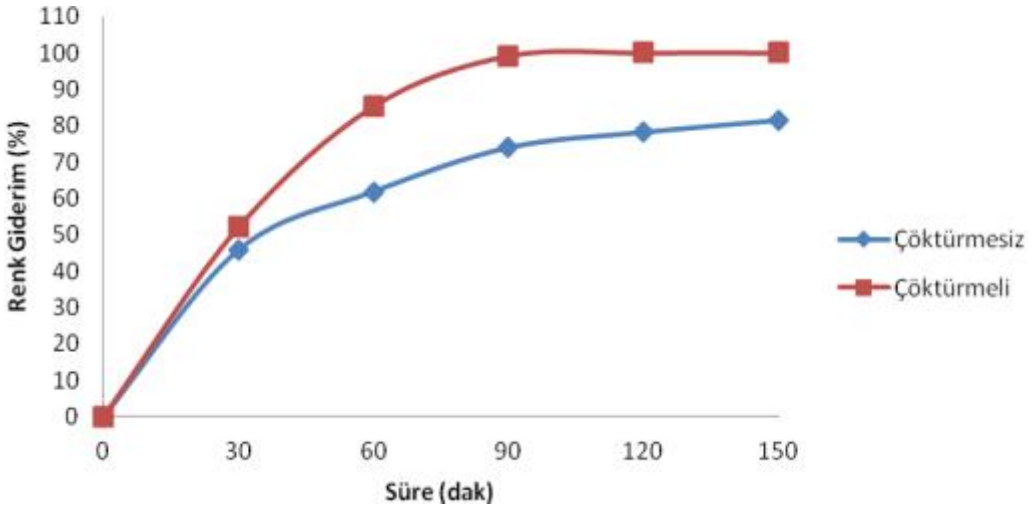
Parametreler	**Değerleri**
pH	6,15
[a]KOI (mg/L)	88,89
[a]TOK	63,76
[b]İletkenlik (µs/cm)	47.8
[a]Renk (abs)	1.336
λ_{max} (nm)	610

[a] 100 mg/L boya konsantrasyonu

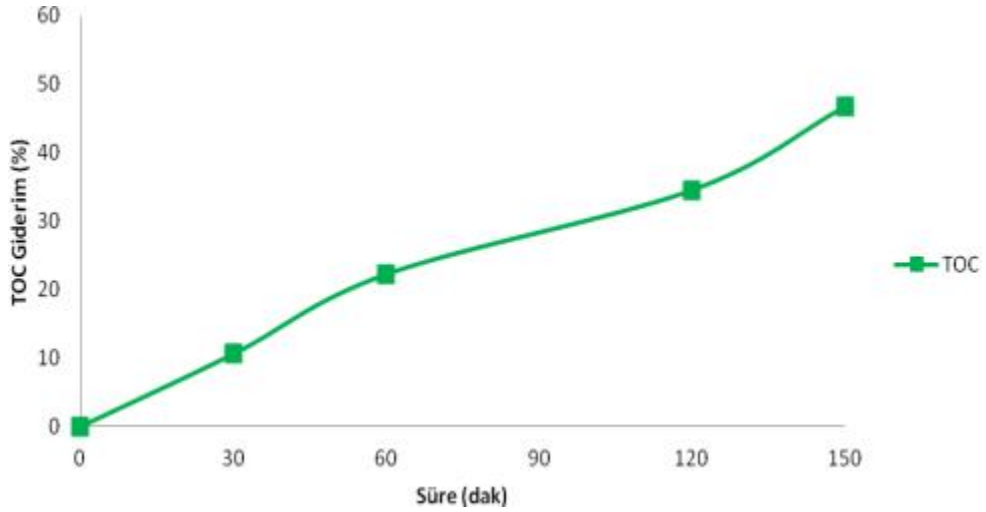
[b] 1000 mg/L boya konsantrasyonu, 20.8 ^{o}C

λ_{max}: maksimum absorbans verdiği dalga boyu

150 dakikalık EF reaksiyonları sonucunda 100 mg/L boya çözeltisi için %100 renk giderimi ve %46 TOK giderim verimlerine ulaşılmıştır. Yapılan ön denemeye ait sonuçlar şekil 3.4 ve 3.5 'te verilmektedir.



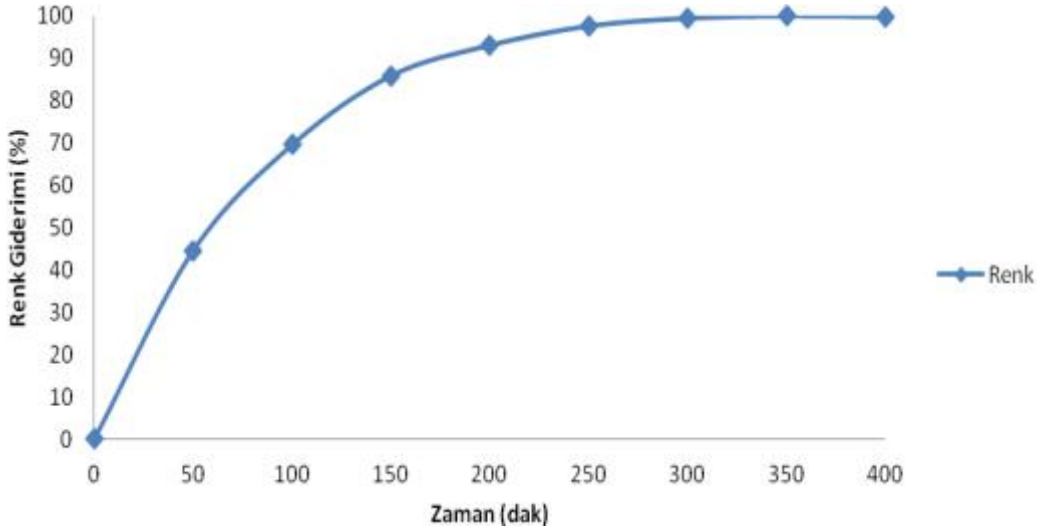
Şekil 3.4. 100 mg/L RB 19 Boyarmaddesinin 60 mA akım şiddetinde renk giderim sonuçları



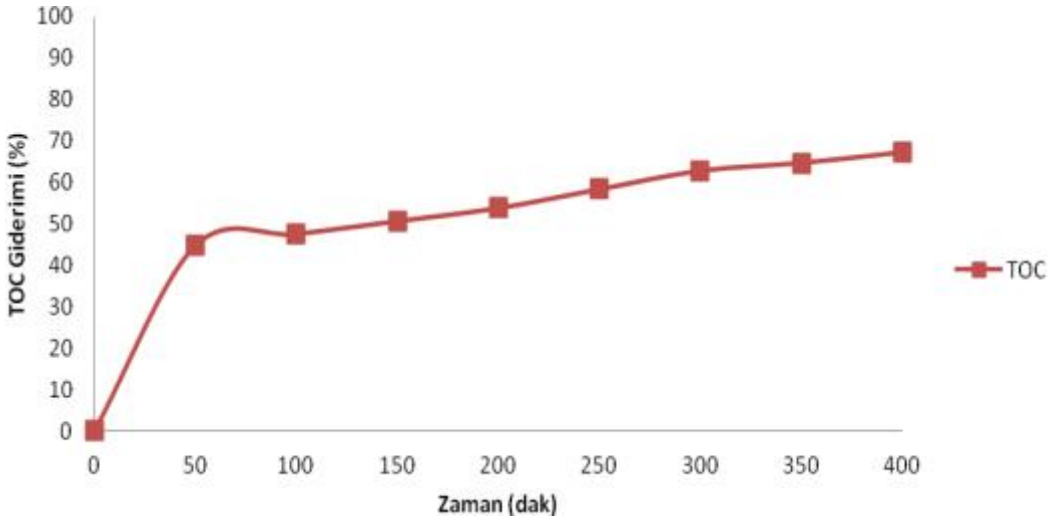
Şekil 3.5. 100 mg/L RB 19 Boyarmaddesinin 60 mA akım şiddetinde TOK giderim sonuçları

Ayrıca EF prosesi sonrasında arıtılmış atıksuyun pH değeri NaOH ile 11'e getirilerek Fenton prosesinin hem oksidasyon hem de kimyasal çöktürme adımlarının renk giderim verimleri üzerindeki etkileri ayrı ayrı değerlendirilmiştir (Şekil 3.4). Buna göre kimyasal çöktürme öncesinde renk giderim verimi %81 iken kimyasal çöktürme işlemi sonrasında %100'e ulaşmıştır.

Bir sonraki adımda boyarmadde konsantrasyonu 1g/L'ye arttırılmış ve EF işlemi aynı koşullarda 400 dakika olarak yürütülmüştür. Bu deneme ile yüksek boya konsantrasyonlarında renk ve TOK giderimlerinin araştırılması hedeflenmiştir. Yürütülen bu ön denemeye ait sonuçlar Şekil 3.6 ve 3.7'da verilmektedir.



Şekil 3.6. 1 g/l RB 19 Boyarmaddesinin 60 mA akım şiddetinde renk giderim sonuçları



Şekil 3.7. 1 g/l RB 19 Boyarmaddesinin 60 mA akım şiddetinde TOK giderim sonuçları

Şekil 3.6 ve 3.7 incelendiğinde belirtilen deney koşullarında rengin hemen hemen tamamının (%99,75), TOK'un ise %67 oranında giderildiği görülmektedir. Yine Şekil 3.7 incelendiğinde zamana bağlı olarak 400. Dakikada dahi TOK gideriminin devam ettiği (50. dakikada yaklaşık %45'lik giderim varken, 400. dakikada %67 olmaktadır) görülmektedir. Dolayısıyla projenin ilerleyen aşamalarında reaktör ve işletme koşullarında yapılacak iyileştirme ile hedeflenen arıtma verimine ulaşılması için gerekli olan reaksiyon süresi kısaltılmaya çalışılacaktır.

Projenin üçüncü iş paketinde sözü edilen parametrik seviyeler, yukarıda verilen bilgiler ışığında proses verimini etkileyen her bir faktörün uygun değerleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Ancak

ön denemelerde reaktör içerisindeki çözeltinin çözünmüş oksijen konsantrasyonunun bilinen bir hava debisinde doygunluk değerine getirilememesi nedeni ile hava akış hızı için herhangi bir parametrik derecelendirme yapılamamıştır. Bu bağlamda akım yoğunluğu ve başlangıç boya konsantrasyonu için Taguchi deneysel tasarımına (L_9) göre yürütülecek çalışmalarda kullanılacak parametrik seviyeler Tablo 3.4'de verildiği gibidir.

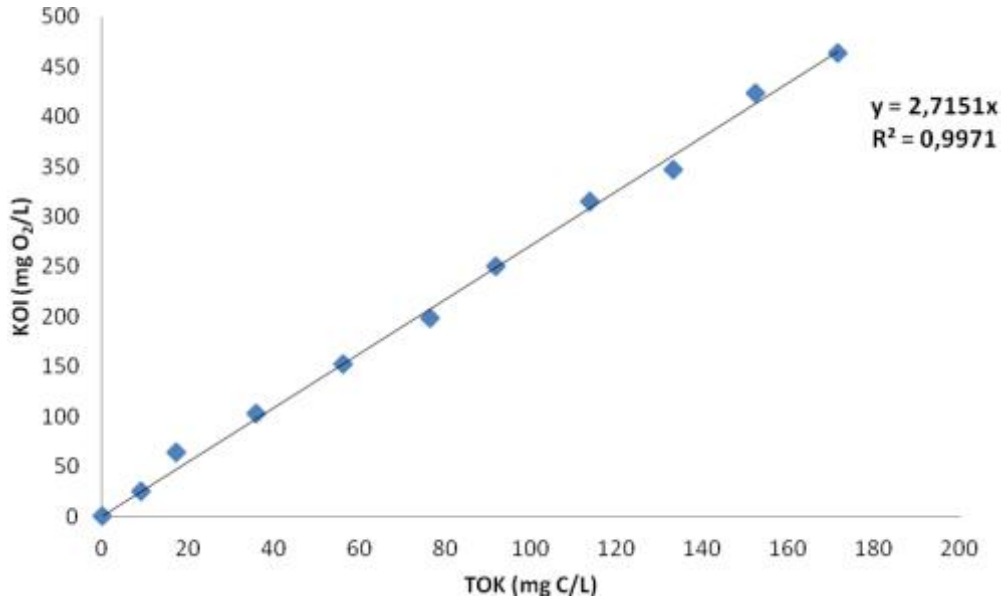
Tablo 3.4. Deneysel çalışmalarda kullanılacak parametrik değerler

Faktörler	**Düzeyler**		
	1	**2**	**3**
A: Akım Yoğunluğu (mA/cm^2)	0,416	0,625	0,833
B: Başlangıç atıksu konsantrasyonu (C_o) (mg/L)*	C_o	$\frac{C_o}{2}$	$\frac{C_o}{4}$
C: Hava Akış Hızı (L/dak)**	0,1	0,3	0,5

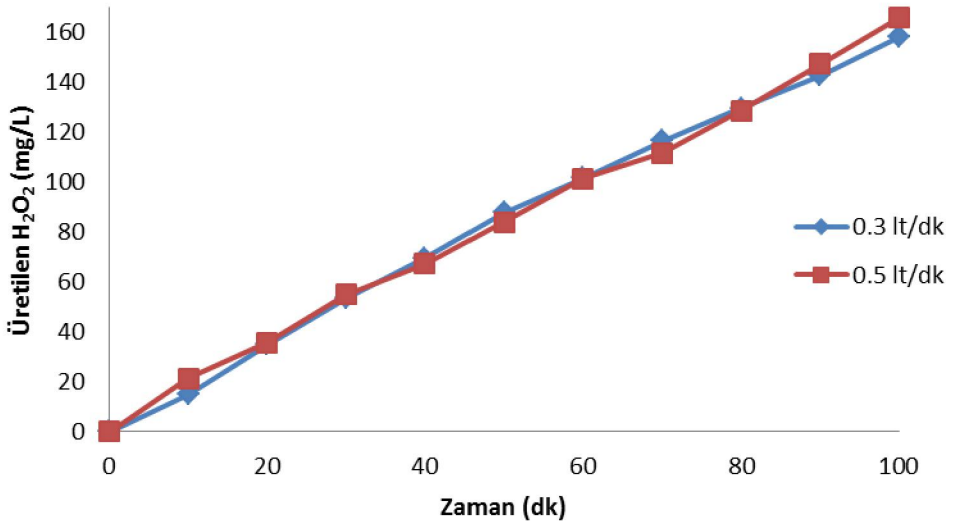
* TOK cinsinden ifade edilecektir

** Geçen hava debisinin reaktör hacmine oranı olarak verilmiştir.

Proje çalışmaları dâhilinde gerçek tekstil endüstrisi için yapılan eş zamanlı KOI ve TOK analiz sonuçları arasında bir ilişki kurulmuştur. Böylelikle proje çalışmalarının ilerleyen aşamalarında mineralizasyon verimleri TOK cinsinden belirlenmiştir. Ayrıca KOI ve TOK arasında kurulan korelasyon sayesinde sonuçların ayrıca KOI cinsinden ifade edilebilmesi mümkündür. KOI ve TOK arasında oluşturulan korelasyona ilişkin veriler şekil 3.8'de görülmektedir.

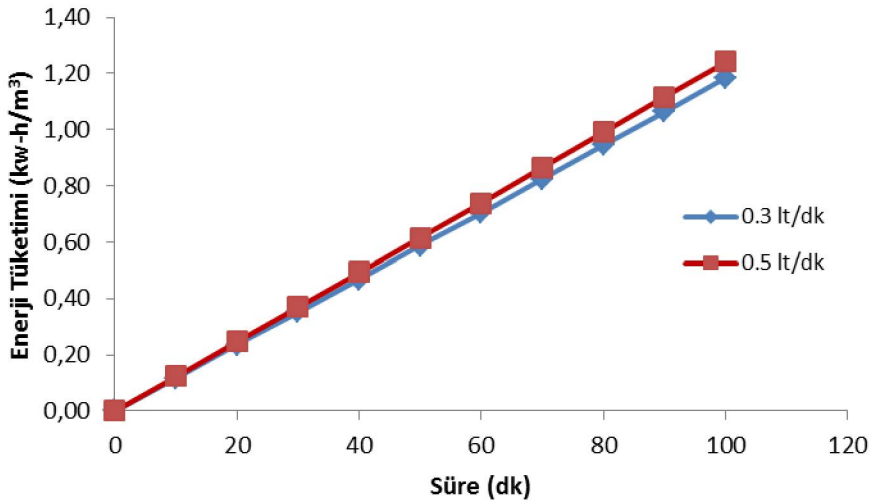


Şekil 3.8. Gerçek tekstil endüstrisi atıksuyu için KOI ve TOK arasında oluşturulan korelasyon



Şekil 3.9. Farklı hava akış hızlarında H_2O_2 üretimlerinin araştırılması [60 mA akım şiddeti, 1090 rpm karıştırma hızı, pH 3, 20 mM Na_2SO_4]

Şekil 3.9. incelendiğinde hava akış hızının arttırılmasıyla birlikte üretilen H_2O_2 miktarlarının da arttığı görülmektedir. 0,3 L/dak hava akış hızında 100 dakikada üretilen H_2O_2 miktarı yaklaşık olarak 157 mg/L iken aynı süre zarfında hava akış hızının 0,5 L/dak'ya çıkarılmasıyla birlikte H_2O_2 üretimi 165,5 mg/L'ye artmıştır. Şekil 3.10'de 0,3 ve 0,5 L/dak'lık hava akış debilerinde H_2O_2 üretimi deneyleri için hesaplanan enerji tüketim verileri görülmektedir.



Şekil 3.10. Farklı hava akış hızlarında H_2O_2 üretimlerinin araştırılması denemesine ait enerji tüketim değerleri [60 mA akım şiddeti, 1090 rpm karıştırma hızı, pH 3, 20 mM Na_2SO_4]

Şekil 3.10'da aynı akım şiddetlerinde yürütülen H_2O_2 üretim denemelerinde çözünmüş oksijenin 0,2 L/dak'lık artışıyla birlikte 100 dk'lık elektroliz işlemi sonucunda 8,5 mg/L H_2O_2 daha fazla üretildiği ancak diğer taraftan bunun 0,06 kW-h/m^3'lük enerji ihtiyacına neden olduğu görülmektedir.

3.2. Gerçek Tekstil Atıksularına Oksijenli Ortamda Farklı Elektrot Materyalleri ile Uygulanan EF Çalışma Sonuçları (I. Aşama Deneyler)

3.2.1. Grafit Katoda Ait I. Aşama Deney Sonuçları

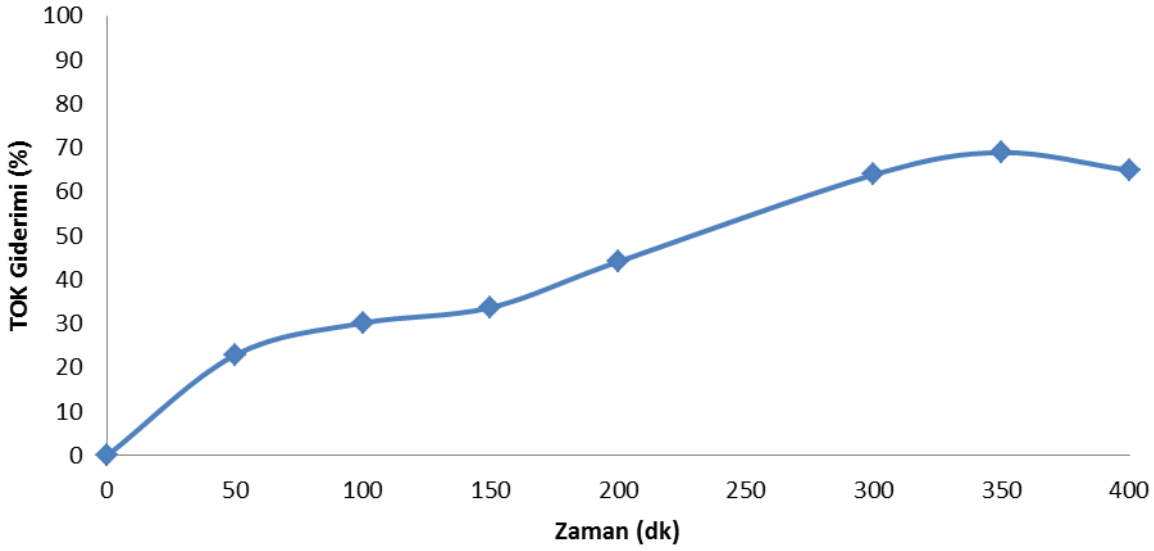
Proje çalışmalarında grafit katotla oksijenli ortamda yürütülen EF denemeleri çalışmaların ilk adımını oluşturmaktadır. Bu kısımda elde edilen veriler aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Gerçekleştirilen bu ön deneme ile tasarım matrisinde hava akış hızları için 0,1 – 0,3 ve 0,5 L/dak değerleri parametrik değerler olarak kabul edilmiştir. Buna göre akım yoğunluğu ve başlangıç boya konsantrasyonu için Taguchi deneysel tasarımına (L_9) göre yürütülecek çalışmalarda kullanılacak parametrik seviyeler Tablo 3.5'de verildiği gibidir.

Tablo 3.5. Deneysel çalışmalarda kullanılan parametrik değerler

Faktörler	**Düzeyler**		
	1	**2**	**3**
A: Akım şiddeti (mA)	60	80	100
B: Başlangıç atıksu konsantrasyonu (C_o) (mg/L)	C_o	$\frac{C_o}{2}$	$\frac{C_o}{4}$
C: Hava Akış Hızı (L/dak)	0,1	0,3	0,5

I. aşama deneylerin yapılması ve sistemin optimizasyonu yer almaktadır. Bu iş paketinde seçilen ilk elektrot malzemesi olarak grafit levha ile deneysel çalışmalara başlanmıştır. Bu iş paketinde H_2O_2 üretiminin en yüksek olduğu 60 mA akım şiddeti değerinde demir anot kullanılarak gerçek tekstil atıksuyunda TOK giderimi denemesi yapılmış ve Taguchi deneysel tasarım matrisine göre yürütülecek denemeler için en uygun elektroliz süresinin seçimi yapılmıştır. Şekil 3.11'de 400 dakikalık elektroliz süresince zamana karşı TOK giderim verimleri gösterilmektedir.



Şekil 3.11. Gerçek tekstil atıksularına uygulanan EF işlemi süresinde zaman TOK giderim veriminin araştırılması

Şekil 3.11'de görüldüğü üzere 400 dakika olarak yürütülen elektroliz işlemi süresince en uygun arıtma süresinin 350. dakika olduğu açıktır. Deneysel tasarım matrisine göre yürütülecek çalışmaların tamamı için sonuçlar 350. dakika esas alınarak ifade edilmiştir. Zaman-TOK ilişkisi araştırılırken 0,3 L/dak'lık hava akış hızı kullanılmıştır.

Yukarıda verilen bilgiler doğrultusunda grafit katot ve demir anot elektrotlarla gerçekleştirilen I. aşama deney sonuçları Tablo 3.6 'da verildiği gibidir.

Tablo 3.6. Grafit katotla Taguchi ortogonal dizisine (L_9) göre yürütülen deney sonuçları

Deney No	AŞ	C_o	Q_h	Renk Giderimi (%)		TOK Giderimi (%)		Bulanıklık Giderimi (%)	
				1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
1	1	1	1	42,97	51,13	11,95	12,13	31,43	47,84
2	1	2	2	79,51	71,20	65,69	64,93	33,03	30,43
3	1	3	3	100	73,53	70,65	54,22	99,79	21,20
4	2	1	2	42,60	51,43	8,74	13,69	34,25	13,46
5	2	2	3	71,52	68,57	34,33	23,47	24,66	88,19
6	2	3	1	100	100	75,74	72,21	100	100
7	3	1	3	57,35	66,35	21,29	13,84	14,88	12,00
8	3	2	1	100	100	76,09	78,64	100	99,72
9	3	3	2	100	100	77,02	73,20	100	100

AŞ: Akım şiddeti (mA)

C_o: Atıksu konsantrasyonu (-)

Q_h: Hava akış hızı (L/dak)

Grafit katot materyali ile gerçekleştirilen I. aşama deneylere ilişkin detaylı veriler tablo 3.7'de yer almaktadır.

Tablo 3.7. Grafit katotla Taguchi ortogonal dizisine (L_9) göre yürütülen deney sonuçları (detaylı)

	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)		KOİ (mg/L)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
DENEY NO 1	Başlangıç	3,00	3,00	9,77	16,43	7,33	9,67	1,052	1,064	830,40	817,60	56,00	55,60	3455,78	2219,87
	50	3,39	3,24	9,24	9,75	5,19	5,16	0,612	1,044	767,60	800,40	36,04	52,80	2684,69	2173,17
	100	4,06	3,68	8,99	9,38	5,00	5,84	0,760	0,792	788,80	756,00	44,00	42,80	2141,67	2052,62
	150	4,60	4,37	9,00	9,32	4,27	4,53	0,732	0,788	772,40	768,00	43,20	43,60	2539,16	2085,20
	200	5,21	5,36	8,91	9,35	4,62	3,81	0,900	0,748	797,60	743,60	51,60	42,40	2490,29	2018,95
	250	5,74	5,48	9,07	9,40	4,98	4,50	0,800	0,680	777,20	764,40	45,20	39,00	2305,66	2075,42
	300	5,95	5,90	8,87	9,36	4,97	4,70	0,752	0,660	772,80	747,60	44,80	40,80	2287,20	2029,81
	350	6,22	5,92	8,85	9,32	4,97	4,90	0,600	0,520	731,20	718,40	38,40	29,00	2189,46	1950,53

	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)		KOİ (mg/L)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
DENEY NO 2	Başlangıç	3,00	3,00	5,73	6,32	6,95	7,93	1,972	0,736	1192,80	821,20	47,60	37,04	3238,57	2229,64
	50	3,55	3,45	5,21	5,77	5,02	6,62	0,984	0,696	547,60	412,00	42,00	48,00	1486,79	1118,62
	100	4,45	4,29	5,09	5,51	5,04	6,45	0,840	0,620	529,60	413,20	37,76	42,40	1437,92	1121,88
	150	5,49	5,27	5,10	5,51	5,10	6,12	0,788	0,468	510,80	382,60	39,48	35,96	1386,87	1038,80
	200	5,91	6,02	5,11	5,50	5,24	5,90	0,564	0,368	466,00	348,04	32,28	37,20	1265,24	944,96
	250	6,05	5,96	5,11	5,50	5,29	6,36	0,524	0,272	444,40	333,20	32,72	36,04	1206,59	904,67
	300	6,40	6,05	5,09	5,45	5,25	6,30	0,452	0,256	444,80	312,72	32,00	37,48	1207,68	849,07
	350	6,45	6,26	5,09	5,40	5,18	6,08	0,404	0,212	409,20	287,96	31,88	36,88	1111,02	781,84

DENEY NO 3

Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)		KOI (mg/L)	
	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
Başlangıç	3,00	3,30	4,02	4,46	7,32	7,45	0,456	0,408	212,36	215,88	38,24	32,64	576,58	586,14
50	3,67	3,57	3,51	3,88	6,00	5,88	0,348	0,372	208,72	205,40	27,80	29,36	566,70	557,68
100	5,57	4,70	3,35	3,66	5,92	6,06	0,284	0,296	185,80	201,96	0,00	24,96	504,47	548,34
150	6,14	5,93	3,35	3,65	5,66	5,31	0,264	0,252	173,56	186,60	32,76	22,00	471,23	506,64
200	6,05	6,11	3,33	3,62	5,30	5,22	0,224	0,212	143,76	167,40	37,92	27,16	390,32	454,51
250	6,25	5,93	3,32	3,62	5,62	5,47	0,132	0,204	107,20	150,48	31,64	33,16	291,06	408,57
300	6,13	6,06	3,29	3,61	5,32	5,81	0,000	0,168	67,40	128,20	1,24	32,88	183,00	348,08
350	5,85	6,11	3,30	3,61	5,16	5,20	0,000	0,108	62,32	98,84	0,08	25,72	169,21	268,36

DENEY NO 4

Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)		KOI (mg/L)	
	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
Başlangıç	3,00	3,00	10,52	10,54	8,75	8,74	1,108	0,840	818,80	768,40	58,40	36,56	3039,83	2086,28
50	3,25	3,26	9,58	9,77	5,81	7,35	1,004	0,808	818,00	75,60	57,60	34,00	2135,15	205,26
100	3,85	3,80	9,35	9,27	5,40	6,35	1,104	0,792	816,80	769,60	61,20	48,80	1973,33	2089,54
150	4,58	4,60	9,11	9,22	4,55	5,58	0,992	0,736	804,40	778,80	57,60	44,00	2198,14	2114,52
200	5,34	5,57	9,28	9,39	5,04	5,84	0,976	0,612	804,00	741,60	56,40	38,40	2033,07	2013,52
250	5,89	5,91	9,30	9,40	4,82	5,86	0,784	0,480	776,00	700,00	49,60	34,52	1974,42	1900,57
300	5,96	5,92	9,34	9,33	5,02	5,90	0,676	0,436	727,20	673,20	45,20	32,92	1872,33	1827,81
350	5,99	6,19	9,46	9,20	4,88	5,23	0,636	0,408	747,20	663,20	38,40	31,64	1878,85	1800,65

DENEY NO 5	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)		KOI (mg/L)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
	Başlangıç	3,00	3,00	8,59	6,11	8,31	7,93	0,660	0,700	412,00	412,40	37,80	48,00	1118,62	1119,71
	50	3,50	3,13	6,53	5,77	6,62	7,05	608,000	0,548	397,72	407,60	44,40	39,60	1079,85	1106,67
	100	4,40	3,71	6,34	5,41	6,49	6,23	0,420	0,442	378,40	390,40	43,60	31,96	1027,39	1059,98
	150	5,24	4,90	6,36	5,31	6,33	5,96	0,412	0,376	362,64	375,60	29,80	28,44	984,60	1019,79
	200	5,83	5,70	6,41	5,32	6,28	5,93	0,296	0,284	354,20	347,68	23,88	24,36	961,69	943,99
	250	5,89	5,85	6,56	5,31	6,49	5,79	0,244	0,264	327,04	333,80	23,56	24,40	887,95	906,30
	300	6,03	5,93	6,59	5,28	6,03	5,95	0,240	0,220	317,68	320,56	30,80	22,00	862,53	870,35
	350	6,00	6,34	6,61	5,27	5,72	6,15	0,188	0,220	270,56	315,60	28,48	5,67	734,60	856,89

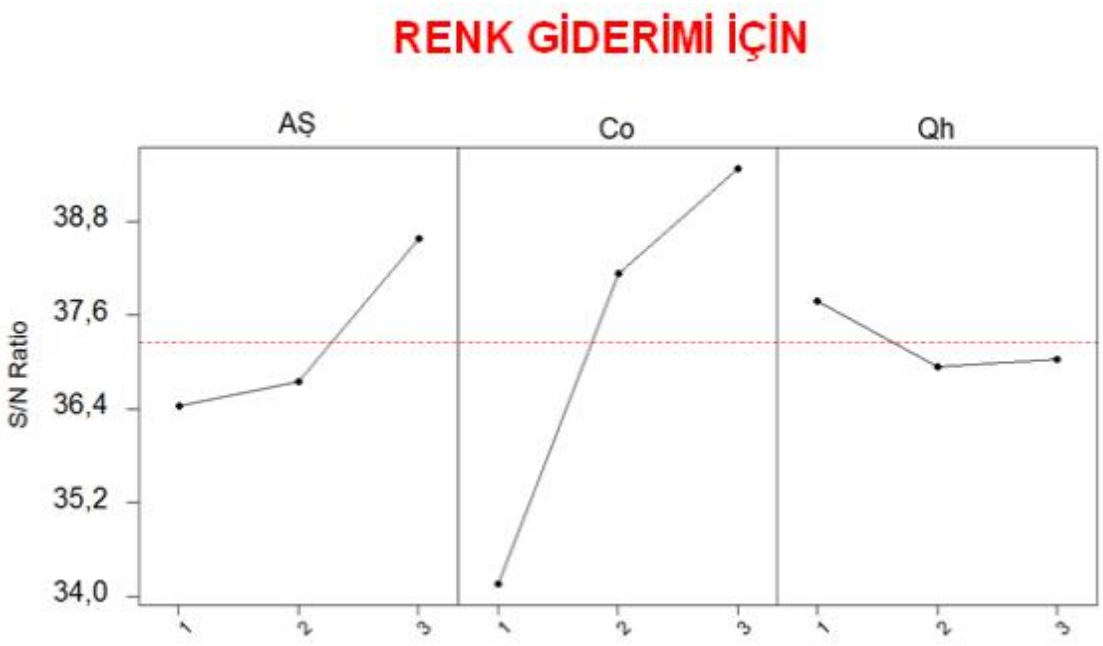
DENEY NO 6	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)		KOI (mg/L)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
	Başlangıç	3,00	3,00	3,41	7,37	7,33	7,46	0,464	0,216	220,32	197,48	34,48	28,72	598,19	536,18
	50	4,80	3,67	2,78	6,71	5,05	5,93	0,412	0,232	213,88	199,56	26,56	29,00	580,71	541,83
	100	6,25	5,58	2,77	6,56	4,66	5,60	0,300	0,128	170,76	159,88	44,00	31,72	463,63	434,09
	150	6,10	5,84	2,75	6,57	4,47	4,75	0,172	0,044	161,52	129,40	62,80	28,16	438,54	351,33
	200	6,02	6,02	2,54	6,55	3,76	4,39	0,000	0,000	64,08	100,00	5,04	23,36	173,98	271,51
	250	6,09	5,88	2,72	6,56	3,20	4,08	0,000	0,000	55,72	58,64	0,00	0,00	151,29	159,21
	300	6,16	5,98	2,72	6,55	4,02	2,80	0,000	0,000	56,76	54,96	0,00	0,00	154,11	149,22
	350	6,22	5,77	2,71	6,54	4,03	5,66	0,000	0,000	53,44	54,88	0,00	0,00	145,09	149,00

DENEY NO 7	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)		KOI (mg/L)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
	Başlangıç	3,00	3,00	10,76	10,13	8,99	8,24	0,844	1,272	764,80	768,80	26,88	38,68	2076,51	2087,37
	50	3,17	3,42	9,74	9,46	7,38	6,91	0,840	0,876	754,80	780,00	47,60	50,00	2049,36	2117,78
	100	3,81	4,18	9,11	9,03	6,65	6,10	0,708	1,160	749,20	815,20	54,00	50,40	2034,15	2213,35
	150	4,50	4,92	9,16	9,03	5,97	5,05	0,688	0,932	747,60	770,40	54,40	50,80	2029,81	2091,71
	200	5,03	5,72	9,19	9,18	5,84	5,10	0,504	0,712	727,60	730,40	48,00	43,20	1975,51	1983,11
	250	5,80	5,71	9,23	9,05	5,75	5,61	0,368	0,556	691,20	706,00	42,00	36,48	1876,68	1916,86
	300	6,14	5,86	9,05	9,13	4,40	5,30	0,364	0,512	621,20	685,60	40,40	36,84	1686,62	1861,47
	350	5,90	5,85	9,03	9,04	5,95	5,65	0,360	0,428	602,00	662,40	22,88	34,04	1634,49	1798,48

DENEY NO 8	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)		KOI (mg/L)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
	Başlangıç	3,00	3,00	5,90	5,89	7,71	8,01	0,916	1,040	224,88	484,00	24,20	28,84	610,57	1314,11
	50	3,95	4,05	5,02	5,02	5,19	5,33	0,772	0,912	200,84	454,00	48,40	54,00	545,30	1232,66
	100	5,84	5,83	4,97	4,99	4,04	2,99	0,576	0,696	151,56	397,92	38,76	48,40	411,50	1080,39
	150	5,83	5,74	4,99	4,98	4,10	4,10	0,472	0,516	98,24	326,40	55,20	62,00	266,73	886,21
	200	5,97	5,69	5,03	4,96	4,13	5,36	0,340	0,436	55,28	268,76	57,60	77,60	150,09	729,71
	250	5,93	5,96	5,08	4,93	4,13	4,71	0,240	0,332	54,24	208,08	54,00	83,20	147,27	564,96
	300	5,87	5,98	5,07	4,90	2,97	3,43	0,100	0,096	53,84	125,24	29,56	29,72	146,18	340,04
	350	5,83	5,89	5,07	4,91	1,94	3,00	0,000	0,000	53,76	103,40	0,00	0,08	145,96	280,74

DENEY NO 9	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)		KOI (mg/L)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
	Başlangıç	3,02	3,00	3,61	4,09	7,44	7054,00	0,456	0,452	454,00	228,04	16,28	34,60	1232,66	619,15
	50	4,33	4,51	2,94	3,18	6,03	6,77	0,328	0,308	424,40	210,12	24,44	19,00	1152,29	570,50
	100	5,90	5,87	3,03	3,18	4,70	6,47	0,232	0,208	373,88	151,08	33,36	26,08	1015,12	410,20
	150	5,70	5,78	3,02	3,16	5,14	6,25	0,112	0,140	317,12	129,92	29,04	30,16	861,01	352,75
	200	5,89	5,80	3,02	3,13	3,81	6,03	0,000	0,008	254,68	63,88	0,00	0,80	691,48	173,44
	250	5,80	8,50	3,03	3,15	3,65	6,71	0,000	0,004	198,76	59,36	0,00	0,00	539,65	161,17
	300	5,77	5,74	3,04	3,17	4,31	6,85	0,000	0,000	137,00	57,04	0,00	0,00	371,97	154,87
	350	5,77	5,63	3,04	3,22	4,53	6,72	0,000	0,000	104,32	61,12	0,00	0,00	283,24	165,95

Veriler Minitab sürüm 13.20 paket programı kullanılarak optimize edilmiştir. Tablo 3.7'de 2 tekrarlı olarak verilen sonuçlara göre S/N (signal/Noise) grafiği oluşturulduğunda yapılan denemelere göre renk giderimi için en uygun koşulların akım şiddeti için (AŞ) 3. parametrik düzey (100 mA); başlangıç atıksu konsantrasyonu (C_o) için en uygun koşulun 3. parametrik düzey (C_o/4); hava akış hızı için (Q_h) en uygun koşulun 1. parametrik düzey (0,1 L/dak) olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.12. Grafit Elektrotla EF Çalışmasında Renk Giderimi için S/N grafiği

Belirlenen bu optimum deney koşulları için ANOVA analizi yapıldığında grafit katot materyal ile renk giderimi çalışmasında her bir parametre için katkı yüzdeleri aşağıdaki gibidir.

Tablo 3.8. Grafit katotla EF çalışmasında renk giderimi için her bir parametrenin katkı yüzdesi

Parametre	Birimi	Katkı Oranı (%)
AŞ	mA	6,6
C_o	-	87,7
Q_h	L/dak	1
Hata	-	4,7

Tablo 3.8'de görüldüğü üzere renk giderimi için sistemde en baskın parametre %87,7 payla başlangıç atıksu konsantrasyonudur. Bunu %6,6'lık yüzde ile akım şiddeti ve yalnızca %1'lik payla hava akış hızı izlemektedir. Belirlenen optimum deney şartları için tahmin edilen ve

gözlemlenen giderim verimleri ise Tablo 3.9'deki gibidir.

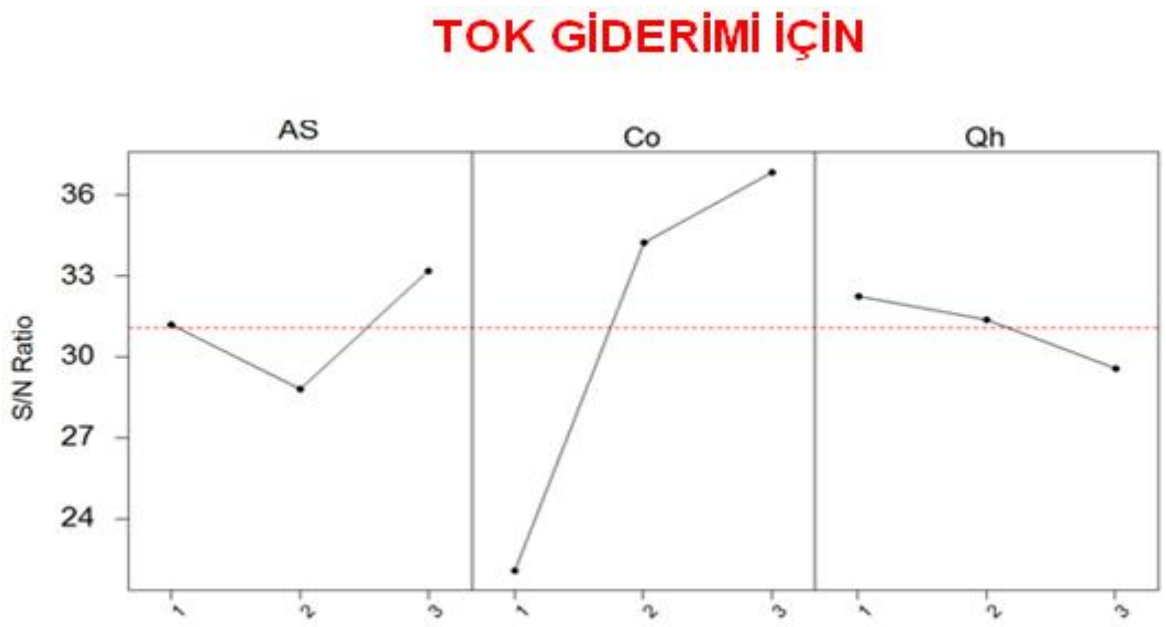
Tablo 3. 9. Grafit katotla oksijenli ortamda yürütülen denemelerde renk giderimi için belirlenen en uygun koşullar

Perf. Kriteri	AŞ (mA)		C_o		Q_h (L/dak)		Gözlenen (%)	Tahmin edilen (%)	Güven Aralığı (%)
	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri			
*Renk	3	100	3	$C_o/4$	1	0.1	100	100	89,38-100
**Renk	3	100	2	$C_o/2$	1	0.1	99.46	99.95	89,33-100

* Yapılması zorunlu doğrulama deneyi

** Alternatif olarak $C_o/2$ atıksu konsantrasyonunda denenen renk giderimi

Grafit katotla oksijenli ortamda renk verileri için sistem optimizasyonu tamamlandıktan sonra ikinci performans kriteri olan TOK için sistem optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla deneylerle ulaşılan veriler için analiz yapıldığında elde edilen S/N grafiği aşağıdaki gibidir.



Şekil 3.13. Grafit Elektrotla EF Çalışmasında TOK Giderimi için S/N grafiği

TOK giderimi için S/N grafikleri incelendiğinde en uygun koşulların renk giderimi için belirlenen düzeyler olduğu göze çarpmaktadır. Buna göre TOK giderimi için en uygun koşulların akım şiddeti için (AŞ) 3. parametrik düzey (100 mA); başlangıç atıksu konsantrasyonu (C_o) için en uygun koşulun 3. parametrik düzey ($C_o/4$); hava akış hızı için (Q_h) en uygun koşulun 1. parametrik düzey (0,1 L/dak) olduğu belirlenmiştir. Taguchi deneysel tasarım metodunun doğruluğunun teyit edilebilmesi için bu parametrik düzeylerde

TOK giderimi için 350 dakikalık EF işlemi uygulandığında %70,4 giderim sonucu elde edilmiştir.

Belirlenen bu optimum deney koşulları için ANOVA analizi yapıldığında grafit katot materyal ile TOK giderimi çalışmasında her bir parametre için katkı yüzdeleri Tablo 3.10'daki gibidir.

Tablo 3.10. Grafit katotla EF çalışmasında TOK giderimi için her bir parametrenin katkı yüzdesi

Parametre	Birimi	Katkı Oranı (%)
AŞ	mA	6,6
C_o	-	84,1
Q_h	L/dak	2,7
Hata	-	0

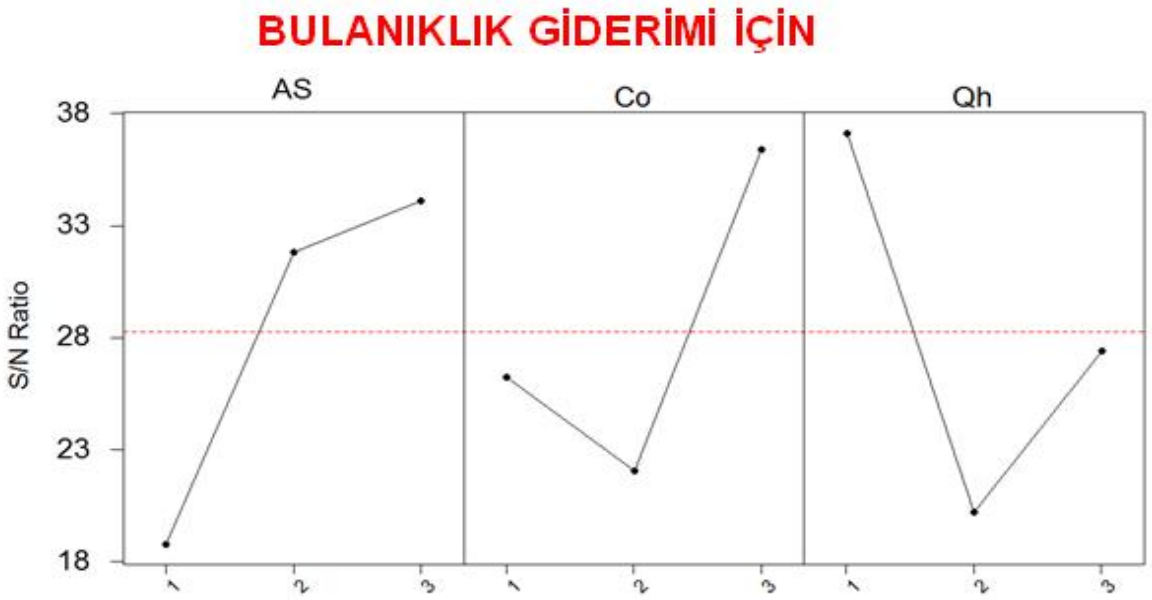
Tablo 3.10 göstermektedir ki, tıpkı renk gideriminde olduğu gibi EF sisteminde yine en baskın parametre başlangıç atıksu konsantrasyonudur (Katkı oranı %84,1). Bunu %6,6'lık yüzde ile akım şiddeti ve yalnızca %2,7'lik payla hava akış hızı izlemektedir.

Belirlenen optimum deney şartları için tahmin edilen ve gözlemlenen TOK giderim verimleri ise Tablo 3.11'de ki gibidir.

Tablo 3.11. Grafit katotla oksijenli ortamda yürütülen denemelerde TOK giderimi için belirlenen en uygun koşullar

Perf. Kriteri	AŞ (mA)		C_o		Q_h (L/dak)		Gözlenen (%)	Tahmin edilen (%)	Güven Aralığı (%)
	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri			
TOK	3	100	3	$C_o/4$	1	0,1	70,40	84,49	69,47-99,51

Deneysel çalışmalar için son performans kriteri olan bulanıklık verileri için gerçekleştirilen araştırma sonuçları da renk ve TOK giderim sonuçlarından pek farklı değildir. Bu amaçla deneylerle ulaşılan veriler için analiz yapıldığında elde edilen S/N grafiği aşağıdaki gibidir.



Şekil 3. 14. Grafit Elektrotla EF Çalışmasında Bulanıklık Giderimi için S/N grafiği

Bulanıklık verileri için S/N grafikleri incelendiğinde en uygun koşulların renk giderimi için belirlenen düzeyler olduğu görülmektedir. Buna göre TOK giderimi için en uygun koşulların akım şiddeti için (AŞ) 3. parametrik düzey (100 mA); başlangıç atıksu konsantrasyonu (C_o) için en uygun koşulun 3. parametrik düzey (C_o/4); hava akış hızı için (Q_h) en uygun koşulun 1. parametrik düzey (0,1 L/dak) olduğu belirlenmiştir. Taguchi deneysel tasarım metodunun doğruluğunun testi için bu parametrik düzeylerde bulanıklık giderimi için 350 dakikalık EF işlemi uygulandığında %98,81 giderim sonucu elde edilmiştir.

Belirlenen bu optimum deney koşulları için ANOVA analizi yapıldığında grafit katot materyal ile TOK giderimi çalışmasında her bir parametre için katkı yüzdeleri Tablo 3.12'deki gibidir.

Tablo 3.12. Grafit katotla EF çalışmasında bulanıklık giderimi için her bir parametrenin katkı yüzdesi

Parametre	Birimi	Katkı Oranı (%)
AŞ	mA	3
C_o	-	67,1
Q_h	L/dak	10,2
Hata	-	0

Tablo 3.12'de anlaşıldığına göre bulanıklık giderimi için EF sisteminde yine en baskın parametre başlangıç atıksu konsantrasyonudur (Katkı yüzdesi 67,1). Bunu %10,2'lik yüzde

ile akım şiddeti ve yalnızca %3'lük payla hava akış hızı izlemektedir.

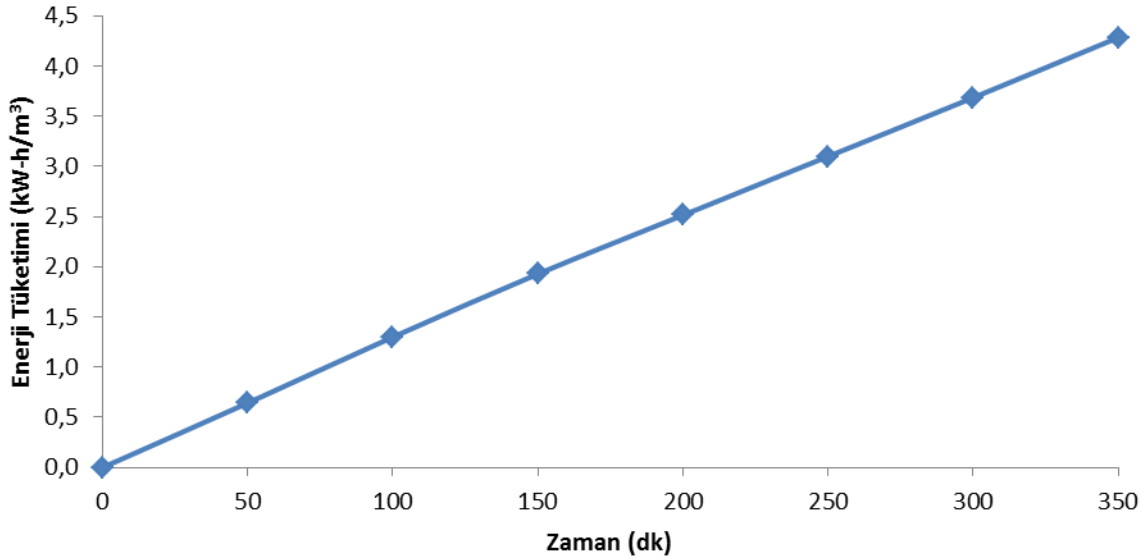
Belirlenen optimum deney şartları için tahmin edilen ve gözlemlenen bulanıklık giderim verimleri ise Tablo 3.13'deki gibidir.

Tablo 3.13. Grafit katotla oksijenli ortamda yürütülen denemelerde bulanıklık giderimi için belirlenen en uygun koşullar

Performans Kriteri	AŞ (mA)		C_o		Q_h (L/dak)		Gözlenen (%)	Tahmin edilen (%)	Güven Aralığı (%)
	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri			
Bulanıklık	3	100	3	$C_o/4$	1	0,1	98,80	100	89,38-100

Tüm performans kriterleri için deneysel olarak bulunan (gözlemlenen) sonuçlar belirtilen güven aralığında kalmaktadır. Elde edilen sonuçlar ve Taguchi optimizasyon metodu ile tahmin edilen sonuçların tutarlı olması sistemimizin çalışıyor olduğu anlamına gelmektedir. Fakat tüm performans kriterleri için başlangıç atıksu konsantrasyonunun sistemi yöneten en baskın parametre olduğu bir gerçektir. Başlangıç atıksu konsantrasyonunun tasarım matrisine dâhil edilme sebebi tekstil endüstrisi atıksularının kirlilik parametrelerinin günden güne hatta saatlik olarak dahi değişim göstermesidir. Dolayısıyla EF sistemini yöneten tüm parametrelerin yanı sıra atıksu konsantrasyonunun etkisinin de göz ardı edilmemesi gerekliliğidir.

Tüm performans kriterleri için belirlenen optimum koşullarda yürütülen doğrulama deneyinde elde edilmiş enerji tüketimleri ise Şekil 3.15'de verilmektedir.

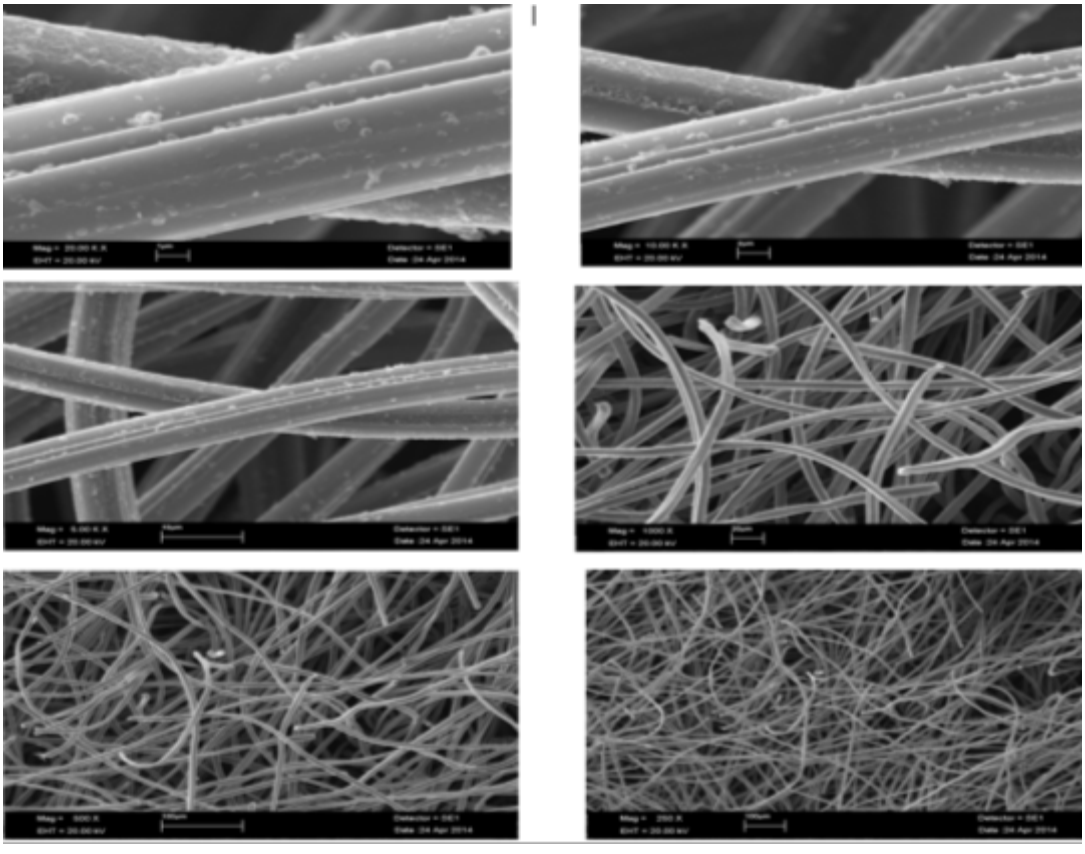


Şekil 3.15. Optimum koşullarda sistemin özgül enerji tüketimi (100 mA akım şiddeti; C_o/4 atıksu konsantrasyonu; 0,1 L/dak hava akış hızı)

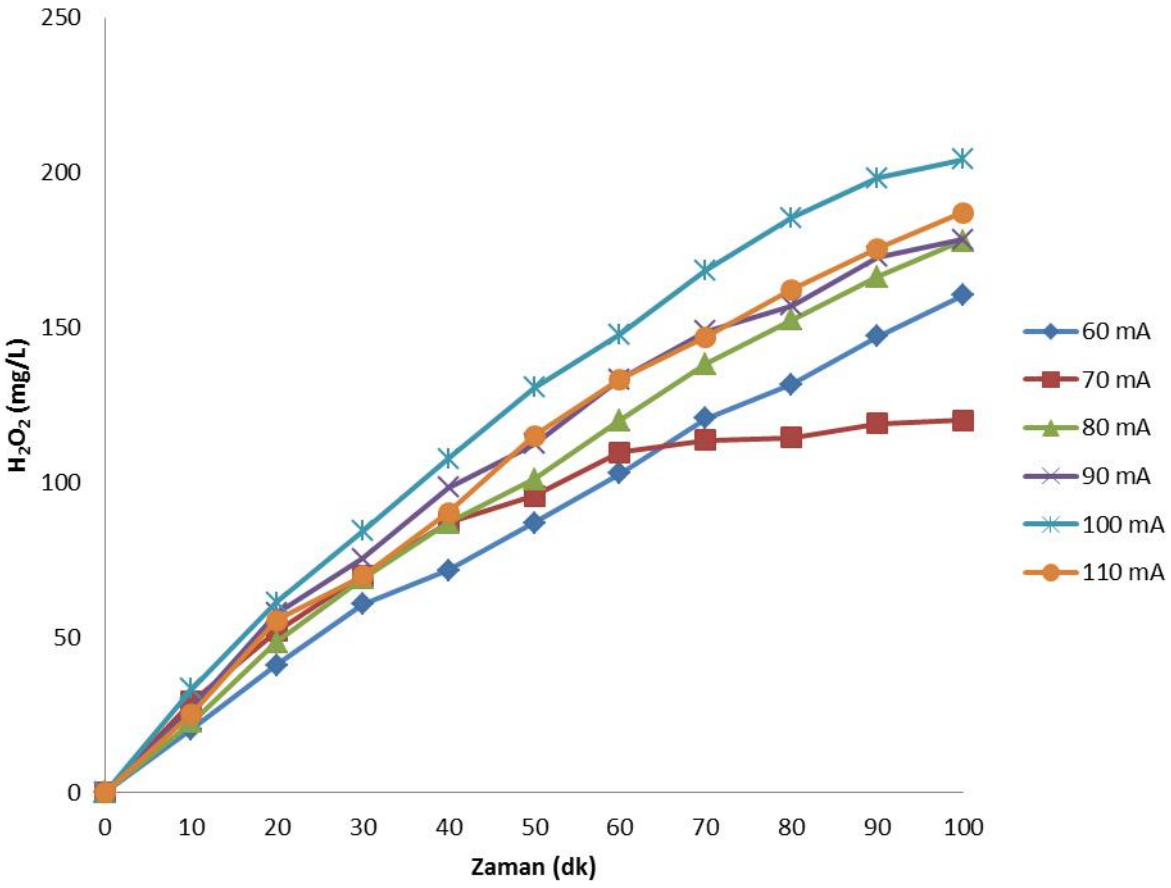
Şekil 3.15'e bakıldığında 350 dakikalık EF işlemi sonucunda yaklaşık olarak 4,28 kW-h/m^3'lük bir enerji tüketiminin olduğu görülmektedir.

3.2.2. Karbon Keçe Katoda Ait I. Aşama (Oksijenli Ortamda) Deney Sonuçları

Deneysel çalışmaların bu kısmında tıpkı grafit katot materyalde olduğu gibi platin tel anot malzeme kullanılarak herhangi bir kirletici içermeyen saf su ortamında ve 50 mM Na_2SO_4 destek elektrolitle iyonik şiddet oluşturulup farklı akım şiddetleri karbon keçenin H_2O_2 üretim sonuçları değerlendirilmiştir. Çalışmada akım şiddetleri 60 – 110 mA arasında değiştirilmiş ve en iyi H_2O_2 oluşum miktarının elde edildiği akım şiddetleri deneysel tasarım matrisine dâhil edilmiştir. Katot materyalin H_2O_2 üretimin miktarını etkileyen en önemli parametrelerden birisi kullanılan materyalin yüzey alanıdır. Bu anlamda karbon keçe grafite göre daha yüksek yüzey alanına sahip bir materyaldir. Karbon keçe materyalin spesifik yüzey alanının grafite göre daha yüksek olması ise daha yüksek miktarlarda H_2O_2 oluşturmasına imkan sağlamaktadır. Şekil 3.16.'da karbon keçeye ait değişik büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri verilmektedir.



Şekil 3.16. Deneysel çalışmalarda kullanılan karbon keçe materyale ait farklı büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri



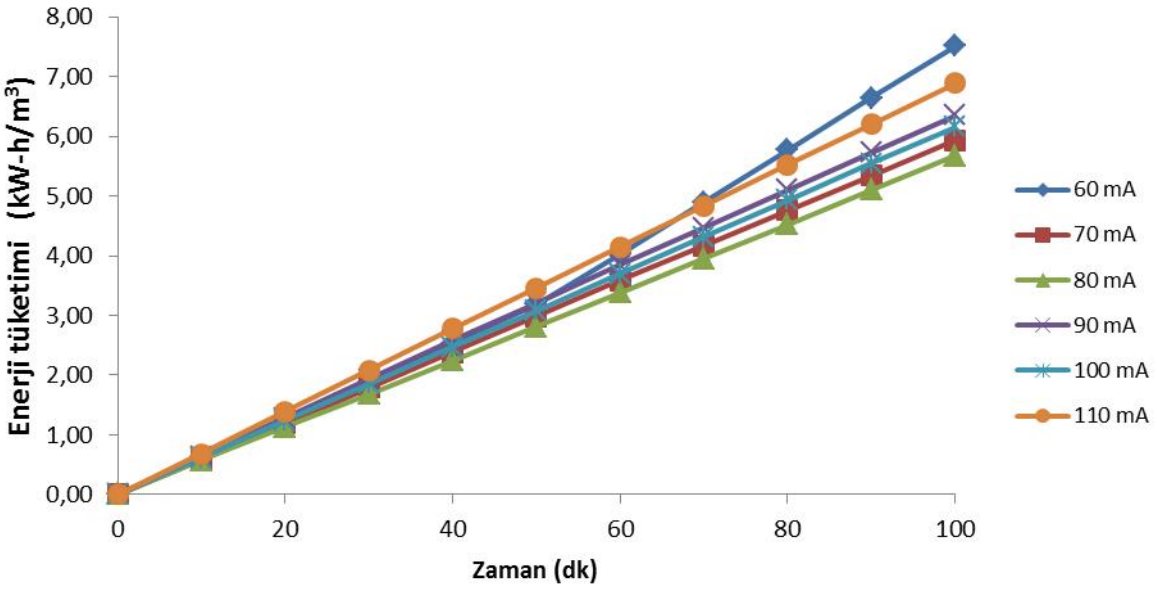
Şekil 3.17. Karbon keçe katot materyale ait akım şiddeti - H_2O_2 üretim miktarı ilişkisi

Şekil 3.17 incelendiğinde H_2O_2 üretim miktarının artan akım şiddeti ile arttığı görülmektedir. Ancak akım şiddeti için 110 mA değerinden itibaren H_2O_2 üretiminde azalma gerçekleştiği görülmektedir. Artan akım şiddetlerinde katotta meydana gelen H_2 gazı oluşumu H_2O_2 üretimini olumsuz şekilde etkilemektedir. Karbon keçe katot materyal için 100 mA akım şiddetinde, 0,3 L/dak sabit hava akış hızında üretilen maksimum H_2O_2 miktarı 204,23 mg/L'dir. Bu nedenle Taguchi deneysel tasarım matrisinde akım şiddeti için uygun aralıklar 80 – 100 mA olarak seçilmiştir. Buna göre Taguchi deneysel tasarımına (L_9) göre yürütülecek çalışmalarda kullanılacak parametrik seviyeler Tablo 3.14'de verildiği gibidir.

Tablo 3.14. Deneysel çalışmalarda kullanılan parametrik değerler

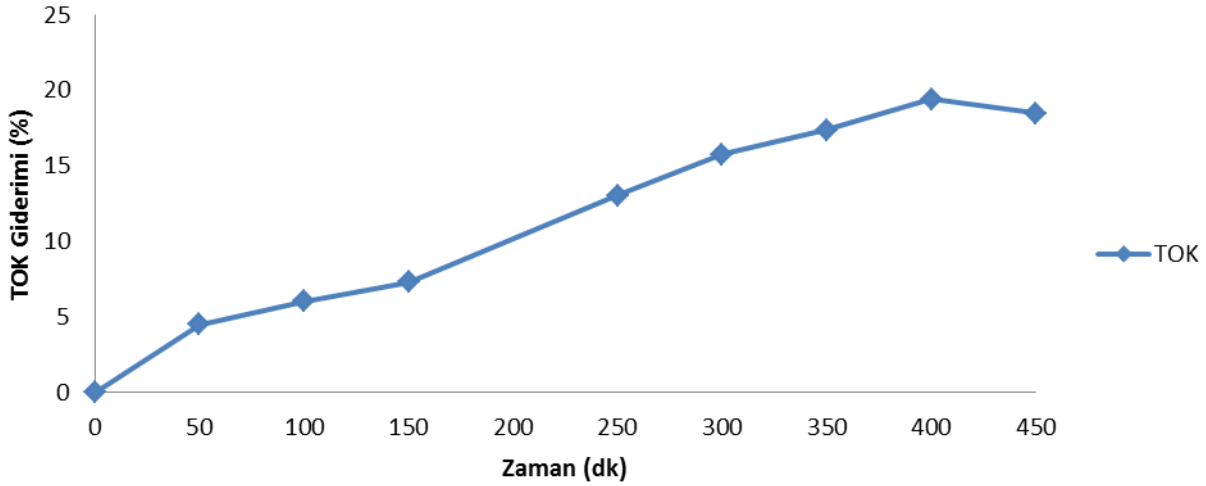
Faktörler	Düzeyler		
	1	2	3
A: Akım şiddeti (mA)	80	90	100
B: Başlangıç atıksu konsantrasyonu (C_o) (mg/L)	C_o	$\frac{C_o}{2}$	$\frac{C_o}{4}$
C: Hava Akış Hızı (L/dak)	0.1	0.3	0.5

Şekil 3.18.'de ise karbon keçe katot materyal kullanılarak H_2O_2 üretimi için uygulanan farklı akım şiddetleri için elde edilen enerji tüketim grafiği verilmektedir.



Şekil 3.18. Karbon Keçe elektrot kullanılarak H_2O_2 üretimi için farklı akım şiddetlerinin enerji tüketimleri

Karbon keçe için H_2O_2 üretiminin en yüksek olduğu 100 mA akım şiddeti değerinde demir anot kullanılarak gerçek tekstil atıksuyunda TOK giderimi denemesi yapılmış ve Taguchi deneysel tasarım matrisine göre yürütülecek denemeler için en uygun elektroliz süresinin seçimi yapılmıştır. Şekil 3.19'da 450 dakikalık elektroliz süresince zamana karşı TOK giderim verimleri gösterilmektedir.



Şekil 3.19. Gerçek tekstil atıksularına uygulanan EF işlemi süresinde zaman TOK giderim veriminin araştırılması

Şekil 3.19'da görüldüğü üzere 450 dakika olarak yürütülen elektroliz işlemi süresince en uygun arıtma süresinin 400. dakika olduğu açıktır. Deneysel tasarım matrisine göre yürütülecek çalışmaların tamamı için sonuçlar 400. dakika esas alınarak ifade edilmiştir. Zaman-TOK ilişkisi araştırılırken 0,3 L/dak'lık hava akış hızı ve C_o başlangıç atıksu konsantrasyonu kullanılmıştır.

Gerçek tekstil atıksuyu kullanılarak karbon keçe elektrot ile 100 mA'lik akım şiddeti altında 450 dakika süren denemenin sonucunda şekil 3.19'da görülen veriler elde edilmiştir. Şekil 3.19 incelendiğinde 400 dakikalık reaksiyon süresinde yaklaşık olarak %20'lik TOK giderim verimine ulaşıldığı görülmektedir. Bu giderim veriminin anlamlılığı deşarj standartları temelinde tartışılmalıdır. KASKİ (Kayseri Su ve Kanalizasyon İdaresi) Kanalizasyon Şebekesine Deşarj Limitlerine göre deşarj standardı yaklaşık 370 mg/L TOK eşdeğeri olarak belirlenmiştir. Şekil 3.19 'da kullanılan atıksuyun giriş TOK değeri 920 mg/L'dir. 400 dakikalık arıtma işlemi sonrasında çıkış suyu kirlilik değeri yaklaşık olarak 740 mg/L TOK değerine düşmektedir (%20 arıtma). Deşarj standardının 370 mg/L olduğu hatırlanırsa bu işletme koşullarında deşarj standardının sağlanması mümkün görülmemektedir. Ayrıca deney tasarım matrisinde en yüksek kirlilik değerlerini içeren koşullarda yapılan denemelerde (1, 4 ve 7 nolu denemeler) görüldüğü üzere elde edilebilen en yüksek verim %36 civarındadır (Tablo 3.15). Bu atıksu koşullarında prosesle deşarj standardı sağlanamamaktadır. Ancak daha düşük kirlilik konsantrasyonlarında (yaklaşık 650 mg/L TOK eşdeğerine kadar) proses bir arıtım alternatifi olabilirken daha yüksek konsantrasyonlarda uygulanabilirliğini yitirmektedir.

Yukarıda verilen bilgiler doğrultusunda karbon keçe katot ve demir anot elektrotlarla

gerçekleştirilen I. aşama deney sonuçları Tablo 3.15.'de verildiği gibidir.

Tablo 3.15. Karbon keçe katotla Taguchi ortogonal dizisine (L_9) göre yürütülen deney sonuçları

Deney No	**AŞ**	**C_o**	**Q_h**	**Renk Giderimi (%)**		**TOK Giderimi (%)**		**Bulanıklık Giderimi (%)**	
				1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
1	1	1	1	68,67	64,26	22,15	25,12	52,10	57,89
2	1	2	2	81,48	68,16	28,57	35,50	37,40	41,84
3	1	3	3	97,32	94,12	61,62	62,45	98,48	93,84
4	2	1	2	72,28	67,59	32,68	30,84	40,08	32,85
5	2	2	3	80,47	73,90	40,14	53,37	31,37	30,20
6	2	3	1	100	100	59,39	66,38	86,46	98,53
7	3	1	3	71,07	70,11	37,66	34,44	39,13	40,65
8	3	2	1	81,48	85,54	33,73	40,14	71,17	63,44
9	3	3	2	100	100	66,83	66,61	75,38	71,78

AŞ: Akım şiddeti (mA)

C_o: Atıksu konsantrasyonu (-)

Q_h: Hava akış hızı (L/dak)

Karbon keçe katot materyali ile gerçekleştirilen I. aşama deneylere ilişkin detaylı veriler Tablo 3.16.'da yer almaktadır. Ayrıca Şekil 3.20'de karbon keçe katot materyale ait elektroliz öncesi ve elektroliz sonrası görünümlere yer verilmiştir.



Şekil 3.20. Karbon keçe katoda ait EF öncesi ve sonrası görünümler.

Şekil 3.20'de karbon keçe elektrodun etkin yüzeyinin elektroliz sonunda neredeyse tamamının demir parçacıkları tarafından kaplandığı görülmektedir. Daha öncede belirtildiği üzere katot materyalin yüzey alanının H_2O_2 üretimi açısından ne denli önemli olduğu bilinmektedir. Bu nedenle EF reaksiyonunun ilerleyen aşamalarında demir iyonlarının ortamda fazla miktarda bulunması nedeniyle H_2O_2 üretiminin olumsuz yönde etkileneceği anlaşılmaktadır

Tablo 3.16. Karbon keçe katotla Taguchi ortogonal dizisine (L_9) göre yürütülen deney sonuçları

	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
DENEY NO 1	Başlangıç	3,00	3,00	9,85	13,71	6,96	2,97	2,988	2,904	541,80	657,60	171,6	159,6
	50	4,06	2,29	9,00	17,04	3,46	4,96	2,082	1,794	494,40	557,22	144,6	115,8
	100	4,79	3,14	9,23	14,47	3,36	3,52	1,254	1,728	504,54	553,26	85,8	100,8
	150	5,14	2,75	9,28	15,90	2,54	5,60	1,170	1,668	501,18	550,08	77,4	91,8
	200	5,96	2,96	9,38	14,70	2,69	5,30	1,110	1,680	475,08	547,14	73,2	78,0
	250	6,52	23,01	9,17	14,90	2,61	5,41	1,026	1,332	461,94	539,16	68,4	76,2
	300	6,90	3,24	9,23	13,73	2,62	5,40	1,002	1,614	455,40	530,58	74,4	75,6
	350	6,12	3,35	9,29	13,29	2,62	4,90	0,942	1,296	427,38	493,62	75,6	69,6
	400	6,75	3,78	9,41	12,8	2,26	4,54	0,936	1,038	421,80	492,42	82,2	67,2

	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
DENEY NO 2	Başlangıç	3,00	3,00	5,86	7,87	7,43	6,87	1,134	1,338	236,70	304,74	87,6	107,40
	50	3,65	4,22	5,23	7,37	4,49	4,95	0,846	1,146	216,30	264,72	63,00	97,38
	100	4,81	4,80	5,12	7,42	4,58	4,92	0,702	1,134	205,44	266,46	42,30	92,40
	150	6,44	6,49	5,12	7,47	4,29	5,66	0,564	1,122	221,76	257,46	42,12	91,80
	200	6,49	6,55	5,12	7,36	4,45	5,42	0,396	0,924	220,68	233,28	37,50	93,60
	250	6,63	6,56	5,17	7,48	4,36	5,74	0,300	0,606	213,66	230,22	36,90	106,80
	300	6,21	6,62	5,27	7,94	4,68	5,29	0,234	0,456	185,76	218,70	37,86	79,20
	350	6,28	6,47	5,23	7,52	4,29	5,39	0,222	0,450	180,90	212,22	42,78	53,76
	400	6,30	6,37	5,33	7,52	4,34	5,54	0,210	0,426	169,08	196,56	54,84	62,46

	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
DENEY NO 3	Başlangıç	3,00	3,00	6,44	3,91	5,99	4,70	0,672	0,612	164,76	183,90	47,52	49,68
	50	3,94	5,74	5,68	3,44	5,80	8,02	0,606	0,474	131,58	164,58	43,44	46,92
	100	5,48	5,96	5,62	3,56	6,07	7,65	0,564	0,420	128,46	160,38	44,04	36,72
	150	6,45	6,13	5,72	3,78	5,96	7,67	0,444	0,438	110,46	145,02	65,40	28,26
	200	6,07	6,24	5,68	3,96	6,00	6,97	0,414	0,414	106,80	135,30	58,80	31,14
	250	6,31	6,27	5,71	3,42	6,13	6,81	0,324	0,336	101,64	122,70	99,60	25,44
	300	6,13	5,92	5,70	3,47	6,09	6,51	0,156	0,264	89,22	109,08	119,40	22,14
	350	6,91	5,01	5,72	3,32	5,74	6,07	0,048	0,204	83,76	78,66	13,44	29,70
	400	6,53	6,58	5,95	3,41	5,66	6,45	0,018	0,036	63,24	69,06	0,72	3,06

	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
DENEY NO 4	Başlangıç	3,00	3,00	10,39	9,79	6,57	7,21	2,814	2,814	525,78	567,30	148,2	166,2
	50	3,57	3,94	9,52	9,24	5,91	2,03	1,176	1,956	402,00	471,30	80,4	136,8
	100	4,02	5,10	9,68	9,28	6,25	3,51	1,074	1,674	401,52	467,16	74,4	111,6
	150	4,61	5,58	9,76	9,39	5,21	3,62	0,990	1,428	404,28	468,66	69,0	90,0
	200	5,39	6,36	9,58	9,22	5,58	3,87	0,924	1,350	396,72	465,24	61,2	89,4
	250	6,41	6,30	9,66	9,39	5,97	3,94	1,014	1,254	409,74	452,46	73,8	93,6
	300	6,01	6,24	9,76	9,47	5,54	4,02	0,894	1,038	378,78	417,60	67,8	86,4
	350	6,35	6,48	9,66	9,37	5,06	4,19	0,792	0,918	349,74	461,76	67,8	84,6
	400	7,60	6,24	9,63	9,41	4,96	3,94	0,780	0,912	353,94	392,34	88,8	111,6

	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
DENEY NO 5	Başlangıç	3,00	3,00	7,63	5,73	5,47	8,02	1,536	1,632	302,22	324,78	91,80	89,40
	50	3,43	4,67	6,85	5,22	5,47	6,55	0,108	1,680	266,22	318,78	52,68	73,20
	100	4,66	4,96	6,60	5,28	5,40	6,25	0,798	0,954	245,64	263,82	54,90	63,00
	150	4,97	6,08	6,90	5,27	5,24	6,10	0,768	0,876	246,12	261,72	52,38	64,20
	200	6,10	7,56	6,67	5,28	5,43	6,06	0,486	0,636	219,24	242,70	41,28	61,80
	250	6,62	6,21	6,69	5,26	5,62	5,60	0,378	0,630	207,30	221,88	36,12	86,40
	300	6,15	7,78	6,60	2,29	5,49	5,61	0,378	0,456	188,34	192,78	48,72	75,60
	350	6,45	6,61	6,70	5,20	5,44	5,59	0,402	0,432	182,70	122,22	70,20	90,00
	400	6,64	7,45	6,64	5,26	5,26	6,04	0,300	0,426	180,90	151,44	63,00	62,40

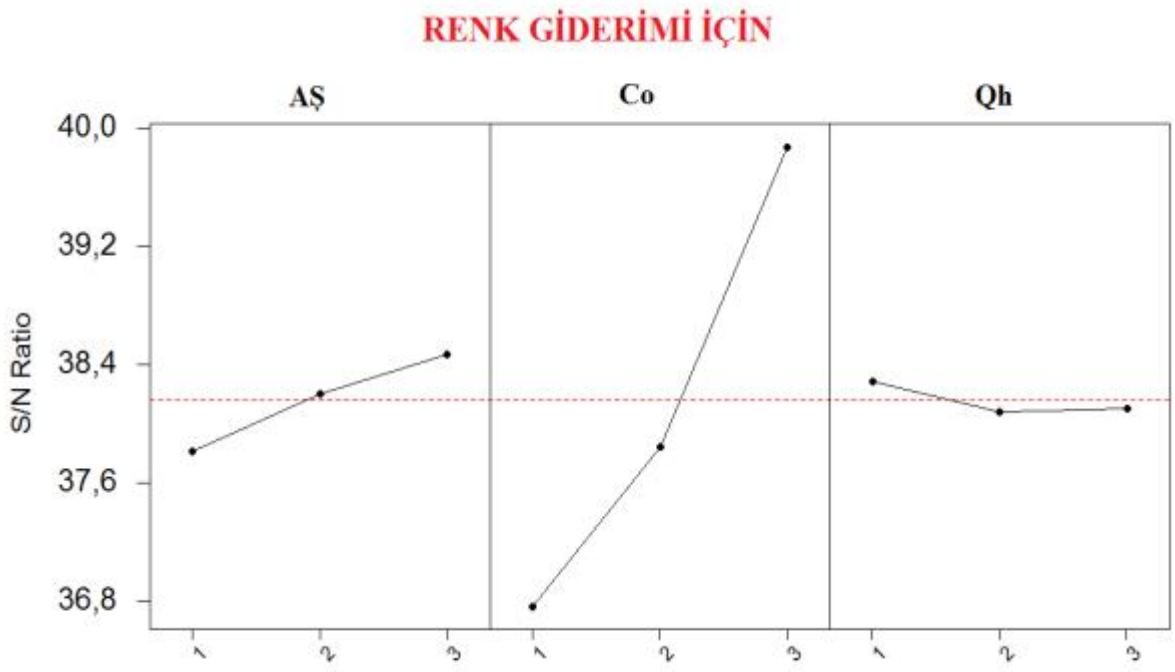
	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
DENEY NO 6	Başlangıç	3,00	3,00	8,78	5,44	5,83	7,67	0,882	0,882	149,82	160,62	56,70	65,40
	50	4,62	5,84	7,80	4,79	3,44	2,90	0,606	0,828	133,56	157,08	46,02	57,78
	100	4,80	6,89	7,67	4,75	3,94	1,87	0,480	0,630	123,78	133,56	35,46	63,00
	150	4,94	6,75	7,40	4,74	4,27	1,39	0,366	0,342	108,24	107,82	43,92	57,36
	200	6,15	6,63	7,85	4,79	1,26	0,86	0,348	0,150	97,14	82,44	55,08	39,24
	250	6,47	7,63	7,87	4,77	0,93	1,47	0,150	0,012	78,00	59,76	29,70	26,28
	300	6,60	6,24	7,85	4,75	0,78	0,28	0,000	0,006	69,54	56,82	1,62	3,42
	350	6,25	7,24	7,68	4,79	0,68	0,28	0,000	0,840	64,80	55,92	6,96	18,42
	400	7,17	7,34	7,99	4,80	0,61	1,12	0,000	0,000	60,84	54,00	7,68	0,96

	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
DENEY NO 7	Başlangıç	3,00	3,00	10,33	10,45	6,95	4,84	2,904	2,850	562,26	591,72	151,8	147,6
	50	2,94	4,40	9,46	9,89	6,07	7,09	1,446	1,374	489,60	470,16	139,2	132
	100	2,90	6,13	9,35	9,76	6,40	6,81	1,236	1,368	467,58	469,08	104,4	145,8
	150	3,98	5,69	9,36	9,84	6,21	6,96	1,236	1,236	461,64	470,52	83,4	126
	200	6,70	5,92	9,40	9,94	6,22	6,45	1,230	1,050	455,52	464,46	85,2	123,6
	250	6,38	6,72	9,37	9,87	4,47	6,47	1,140	1,056	432,96	467,22	85,2	95,4
	300	6,17	6,75	9,44	9,97	5,56	6,52	1,014	0,870	394,20	441,06	115,2	88,8
	350	6,00	6,72	9,33	9,87	5,46	6,42	0,942	0,870	375,72	430,74	105,6	73,8
	400	6,17	6,49	9,34	9,79	4,46	6,45	0,840	0,852	350,52	387,96	92,4	87,6

	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
DENEY NO 8	Başlangıç	3,00	3,00	9,31	6,06	6,48	6,97	1,134	1,452	255,60	218,52	76,80	111,6
	50	4,13	5,21	9,10	5,59	3,68	1,97	0,852	1,152	209,52	210,90	63,60	79,8
	100	4,51	6,94	9,38	5,68	4,22	1,08	0,630	0,822	199,80	206,70	48,66	56,4
	150	5,45	8,41	9,26	5,71	4,02	3,64	0,624	0,648	197,10	189,90	49,50	70,8
	200	5,67	6,88	9,47	5,69	4,04	3,43	0,504	0,642	187,86	180,96	41,58	108,0
	250	6,14	7,28	9,22	5,68	2,90	3,37	0,414	0,540	180,42	156,00	36,84	113,4
	300	6,25	6,78	9,03	5,59	4,16	3,28	0,318	0,264	180,60	148,80	27,60	68,4
	350	6,02	6,81	9,14	5,61	3,98	3,27	0,270	0,204	175,92	145,80	25,44	72,0
	400	6,42	6,81	9,31	5,51	3,21	3,14	0,210	0,210	169,38	130,80	22,14	40,8

	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
DENEY NO 9	Başlangıç	3,00	3,00	3,60	3,97	6,78	4,41	0,834	1,032	142,68	149,70	54,60	49,32
	50	4,27	7,07	3,79	5,77	6,24	7,94	0,600	0,558	140,64	145,14	52,32	46,50
	100	5,78	7,3	3,89	5,78	4,04	4,13	0,396	0,342	139,38	126,60	41,82	44,04
	150	5,43	5,92	3,54	5,77	3,89	3,38	0,324	0,258	115,86	100,80	46,80	58,08
	200	5,73	5,17	3,85	5,40	2,23	3,70	0,084	0,000	98,4	56,46	21,36	4,08
	250	5,67	6,80	3,93	5,76	2,86	2,48	0,000	0,000	61,86	55,92	25,14	1,56
	300	4,94	7,65	3,98	5,72	2,50	2,17	0,000	0,000	48,42	53,76	1,80	0,24
	350	5,93	6,89	3,89	5,47	1,70	2,01	0,000	0,000	48,816	52,14	1,74	1,02
	400	5,50	6,27	3,86	5,64	0,84	1,62	0,000	0,000	47,322	49,98	13,44	13,92

Tablo 3.15'de 2 tekrarlı olarak verilen sonuçlara göre S/N grafiği oluşturulduğunda (Şekil 3.21) yapılan denemelere göre karbon keçe katot ile renk giderimi için en uygun koşulların akım şiddeti için (AŞ) 3. parametrik düzey (100 mA); başlangıç atıksu konsantrasyonu (C_o) için en uygun koşulun 3. parametrik düzey (C_o/4); hava akış hızı için (Q_h) en uygun koşulun 1. parametrik düzey (0,1 L/dak) olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.21. Karbon Keçe Elektrotla EF Çalışmasında Renk Giderimi için S/N grafiği

Belirlenen bu optimum deney koşulları için ANOVA analizi yapıldığında karbon keçe katot materyal ile renk giderimi çalışmasında her bir parametre için katkı yüzdeleri aşağıdaki gibidir.

Tablo 3.17. Karbon keçe katotla EF çalışmasında renk giderimi için her bir parametrenin katkı yüzdesi

Parametre	**Birimi**	**Katkı Oranı (%)**
AŞ	mA	0,4
C_o	-	99
Q_h	L/dak	0,3
Hata	-	0,1

Tablo 3.17'de görüldüğü üzere renk giderimi için sistemde en baskın parametre %99,0 payla başlangıç atıksu konsantrasyonudur. Bunu %0,4'lük yüzde ile akım şiddeti ve %0,3'lik payla

hava akış hızı izlemektedir. Belirlenen optimum deney şartları için tahmin edilen ve gözlemlenen giderim verimleri ise Tablo 3.18'deki gibidir.

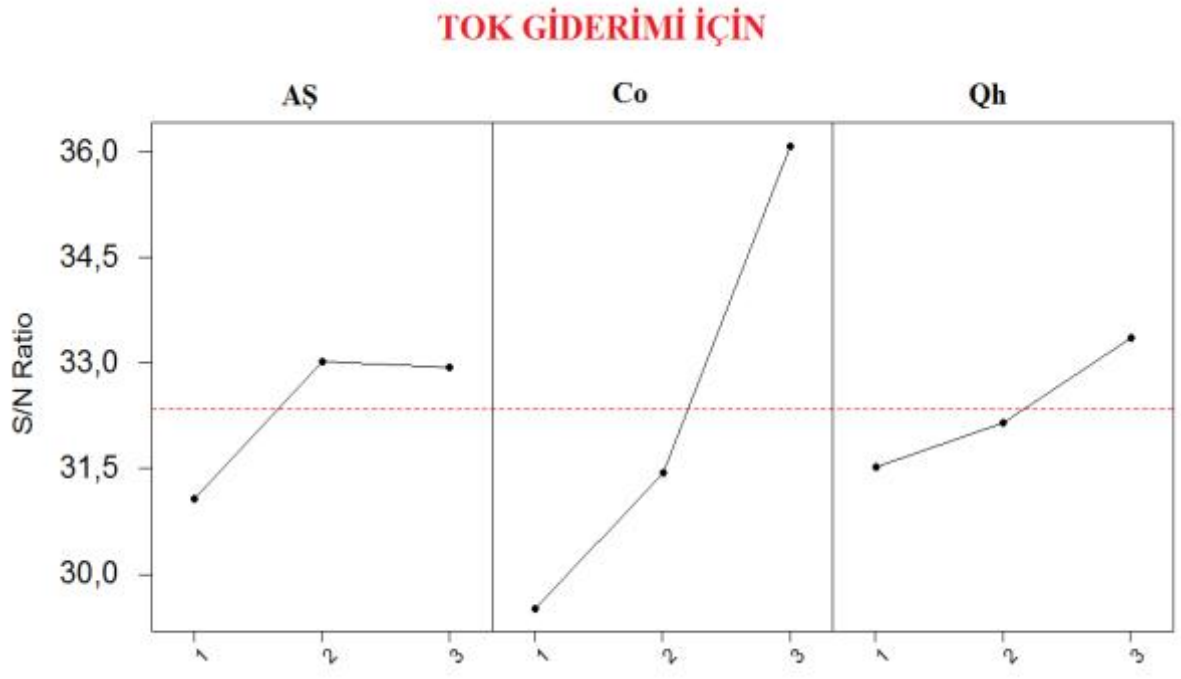
Tablo 3. 18. Karbon keçe katotla oksijenli ortamda yürütülen denemelerde renk giderimi için belirlenen en uygun koşullar

Perf. Kriteri	AŞ (mA)		C_o		Q_h (L/dak)		Gözlenen (%)	Tahmin edilen (%)	Güven Aralığı (%)
	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri			
*Renk	3	100	3	$C_o/4$	1	0,1	99,45	99,95	98,72 - 100
**Renk	1	80	3	$C_o/4$	1	0,1	100	99.73	98,50 - 100

* Yapılması zorunlu doğrulama deneyi

** Alternatif olarak 80 mA akım şiddetinde denenen renk giderimi

Karbon keçe katotla oksijenli ortamda renk verileri için sistem optimizasyonu tamamlandıktan sonra ikinci performans kriteri olan TOK için sistem optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla deneylerle ulaşılan veriler için analiz yapıldığında elde edilen S/N grafiği Şekil 3.22'de verilmektedir.



Şekil 3.22. Karbon Keçe Elektrotla EF Çalışmasında TOK Giderimi için S/N grafiği

Şekil 3.22 incelendiğinde en uygun koşulların renk giderimi için belirlenen düzeylerden farklı olduğu görülmektedir. Buna göre TOK giderimi için en uygun koşulların akım şiddeti için (AŞ) 2. parametrik düzey (90 mA); başlangıç atıksu konsantrasyonu (C_o) için en uygun koşulun 3.

parametrik düzey (C_o/4); hava akış hızı için (Q_h) en uygun koşulun 3. parametrik düzey (0,5 L/dak) olduğu belirlenmiştir.

Belirlenen bu optimum deney koşulları için ANOVA analizi yapıldığında karbon keçe katot materyal ile TOK giderimi çalışmasında her bir parametre için katkı yüzdeleri Tablo 3.19'daki gibidir.

Tablo 3.19. Karbon keçe katotla EF çalışmasında TOK giderimi için her bir parametrenin katkı yüzdesi

Parametre	Birimi	Katkı Oranı (%)
AŞ	mA	4,7
C_o	-	85,5
Q_h	L/dak	3
Hata	-	3,6

Tablo 3.19 göstermektedir ki, tıpkı renk gideriminde olduğu gibi EF sisteminde yine en baskın parametre başlangıç atıksu konsantrasyonudur (Katkı yüzdesi 85,5). Bunu %4,7'lik yüzde ile akım şiddeti ve yalnızca %3,6'lık payla hava akış hızı izlemektedir.

Belirlenen optimum deney şartları için tahmin edilen ve gözlemlenen TOK giderim verimleri ise Tablo 3.20.'deki gibidir.

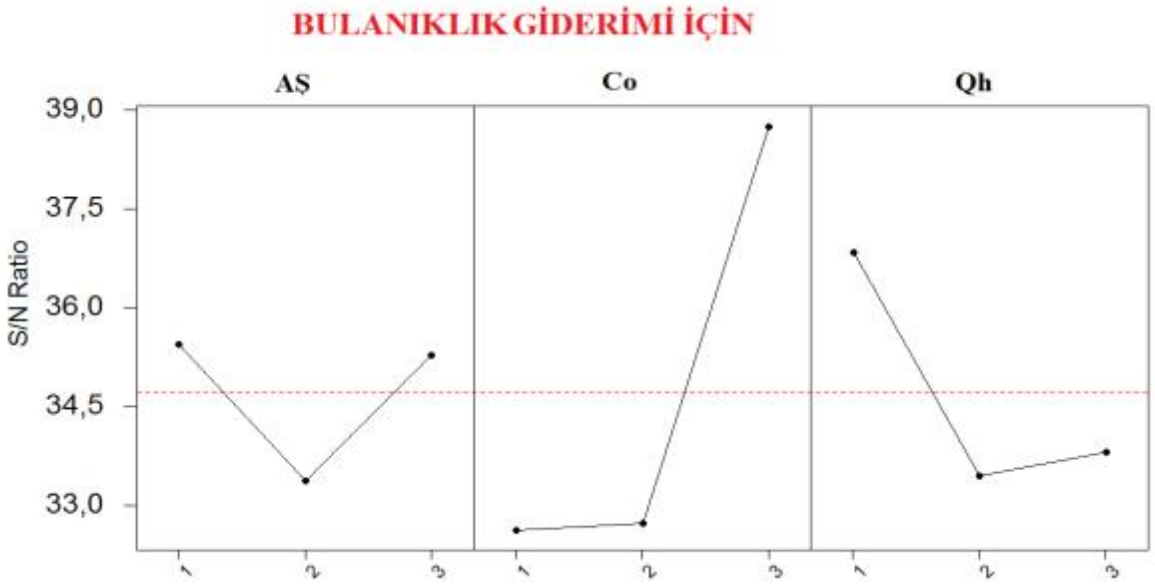
Tablo 3.20. Karbon keçe katotla oksijenli ortamda yürütülen denemelerde TOK giderimi için belirlenen en uygun koşullar

Perf. Kriteri	AŞ (mA)		C_o		Qh (L/dak)		Gözlenen (%)	Tahmin edilen (%)	Güven Aralığı (%)
	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri			
*TOK	2	90	3	Co/4	3	0,5	63,21	70,52	62,08 – 78,96
**TOK	1	80	3	Co/4	1	0,1	62,66	54,79	46,35 – 63,23

* Yapılması zorunlu doğrulama deneyi

** Alternatif olarak 80 mA akım şiddetinde ve 0,1 L/dak hava debisinde denenen renk giderimi

Deneysel çalışmalar için son performans kriteri olan bulanıklık verileri için gerçekleştirilen araştırma sonuçları için analiz yapıldığında elde edilen S/N grafiği Şekil 3.23'de verilmektedir.



Şekil 3.23. Karbon Keçe Elektrotla EF Çalışmasında Bulanıklık Giderimi için S/N grafiği

Bulanıklık verileri için S/N grafikleri incelendiğinde en uygun koşulların akım şiddeti için (AŞ) 1. parametrik düzey (80 mA); başlangıç atıksu konsantrasyonu (C_o) için en uygun koşulun 3. parametrik düzey (C_o/4); hava akış hızı için (Q_h) en uygun koşulun 1. parametrik düzey (0,1 L/dak) olduğu belirlenmiştir.

Belirlenen bu optimum deney koşulları için ANOVA analizi yapıldığında karbon keçe katot materyal ile bulanıklık giderimi çalışmasında her bir parametre için katkı yüzdeleri Tablo 3.21.'deki gibidir.

Tablo 3.21. Karbon keçe katotla EF çalışmasında bulanıklık giderimi için her bir parametrenin katkı yüzdesi

Parametre	**Birimi**	**Katkı Oranı (%)**
AŞ	mA	2
C_o	-	72,2
Q_h	L/dak	14
Hata	-	6,2

Tablo 3.21.'den anlaşıldığına göre bulanıklık giderimi için EF sisteminde yine en baskın parametre başlangıç atıksu konsantrasyonudur (Katkı payı %72,2). Bunu %14'lük yüzde ile

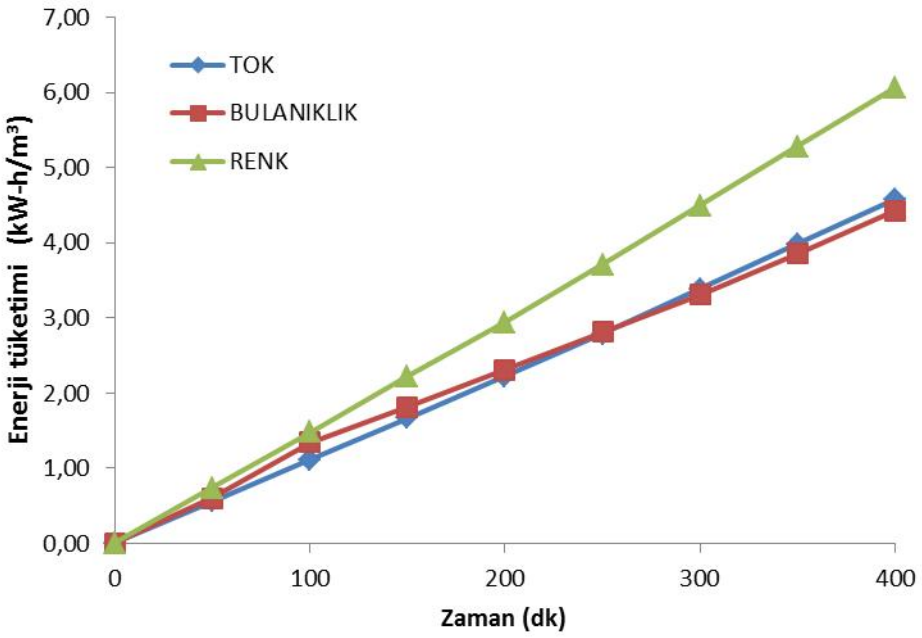
hava akış hızı ve yalnızca %2'lik payla akım şiddeti izlemektedir.

Belirlenen optimum deney şartları için tahmin edilen ve gözlemlenen bulanıklık giderim verimleri ise Tablo 3.22'deki gibidir.

Tablo 3.22. Karbon keçe katotla oksijenli ortamda yürütülen denemelerde bulanıklık giderimi için belirlenen en uygun koşullar

Perf. Kriteri	AŞ (mA)		C_o		Q_h (L/dak)		Gözlenen (%)	Tahmin edilen (%)	Güven Aralığı (%)
	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri			
Bulanıklık	1	80	3	$C_o/4$	1	0,1	100	97,10	80,14 - 100

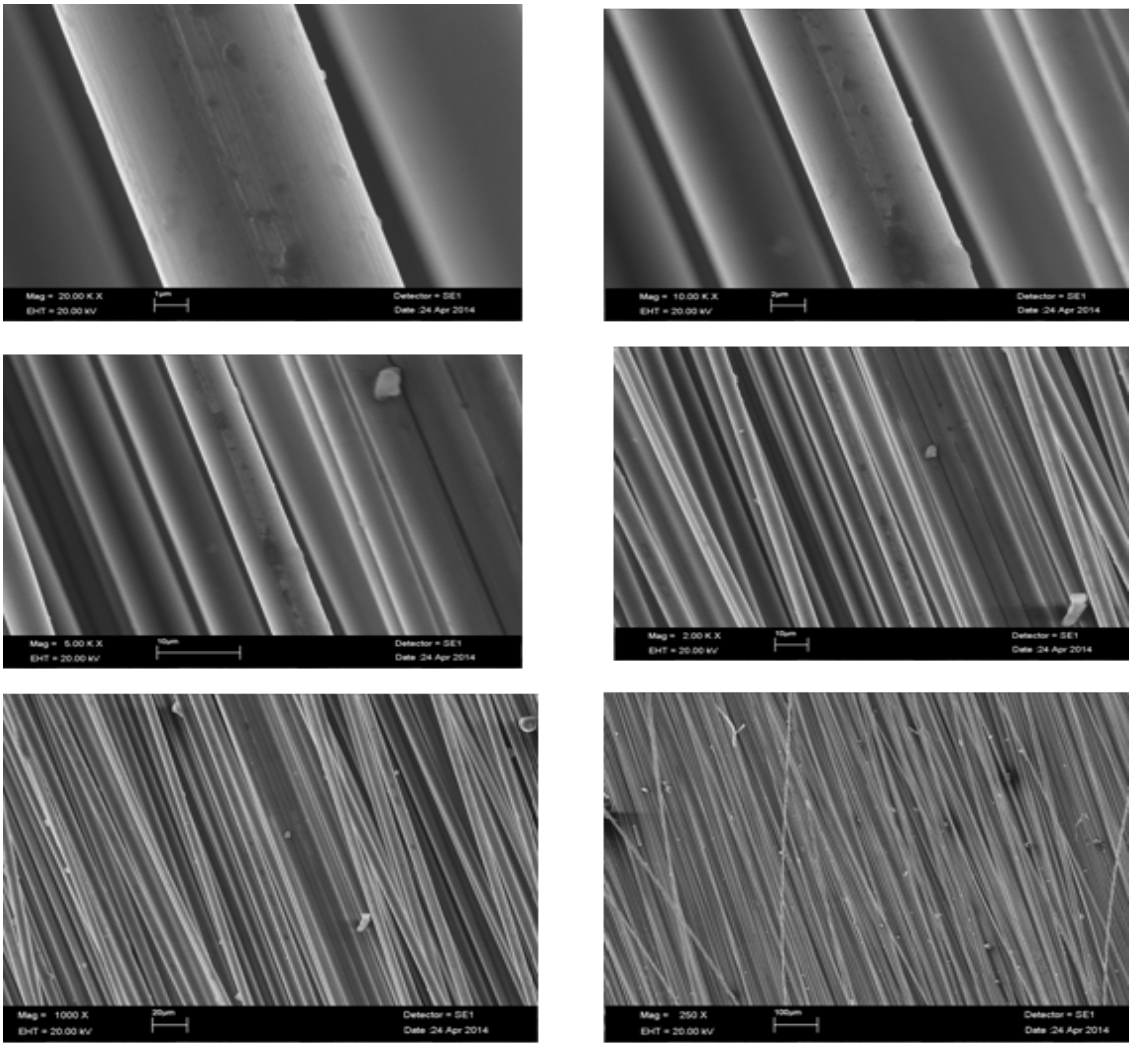
Tüm performans kriterleri için deneysel olarak bulunan (gözlemlenen) sonuçlar belirtilen güven aralığında kalmaktadır. Elde edilen sonuçlar ve Taguchi optimizasyon metodu ile tahmin edilen sonuçların tutarlı olması sistemimizin çalışıyor olduğu anlamına gelmektedir. Fakat tüm performans kriterleri için başlangıç atıksu konsantrasyonunun sistemi yöneten en baskın parametre olduğu bir gerçektir. Ayrıca tüm optimum koşullar için tüketilen enerji miktarları Şekil 3.24.'de verilmektedir.



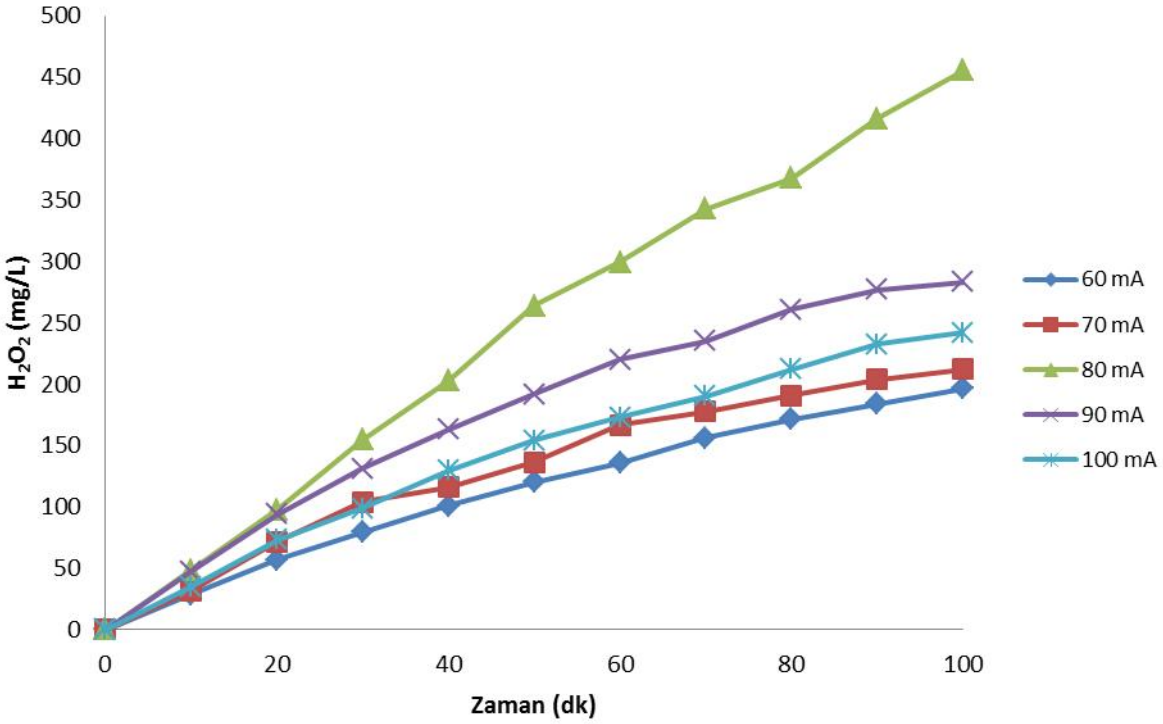
Şekil 3.24. Karbon Keçe Elektrot ile I. Aşama Deneylerde Elde Edilen Optimum Koşullarda Enerji Tüketimleri

3.2.3.Karbon Kumaş Katoda Ait I. Aşama Deney (Oksijenli Ortamda) Sonuçları

Bu başlık altında I. aşama deneylerde kullanılan son katot materyal olan karbon kumaş için yine benzer deneysel aşamalar sonuçlarıyla birlikte verilmektedir. İlk olarak platin tel anot malzeme kullanılarak 0,3 L/dak sabit hava akış hızında herhangi bir kirletici içermeyen saf su ortamında 50 mM Na_2SO_4 destek elektrolit ilavesi ile iyonik şiddet oluşturulup değişken akım şiddetlerinde karbon keçenin H_2O_2 üretim sonuçları değerlendirilmiştir. Çalışmada kullanılan akım şiddeti aralığı 60 – 100 mA arasında olup, en iyi H_2O_2 oluşum miktarının elde edildiği akım şiddetleri deneysel tasarım matrisine dâhil edilmiştir. Şekil 3.25.'de karbon kumaşa ait değişik büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri verilmektedir.



Şekil 3.25. Deneysel çalışmalarda kullanılan karbon kumaş materyale ait farklı büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri



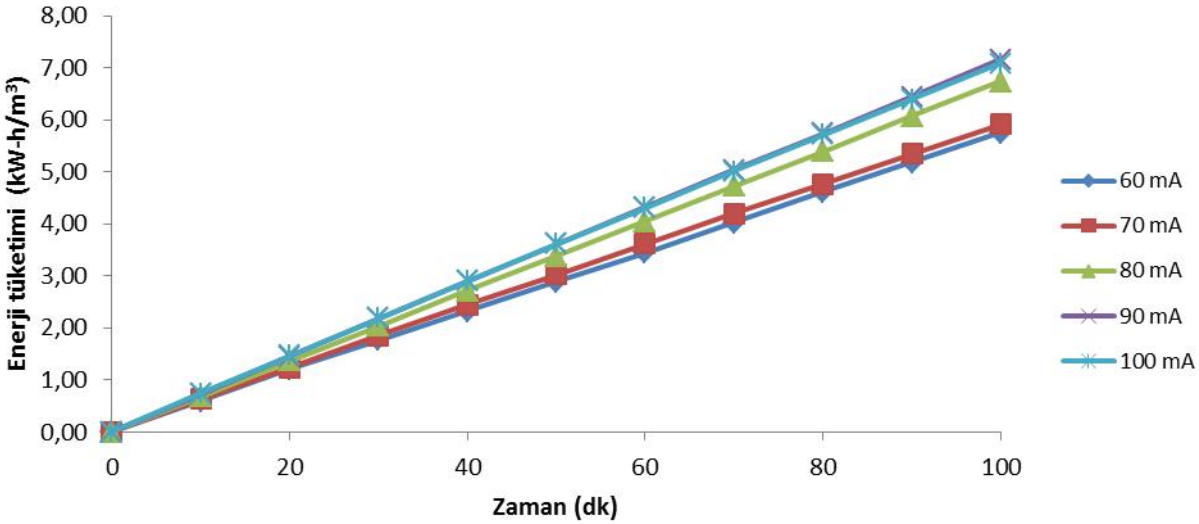
Şekil 3.26. Karbon kumaş katot materyale ait akım şiddeti - H_2O_2 üretim miktarı ilişkisi

Şekil 3.26. incelendiğinde H_2O_2 üretim miktarının artan akım şiddeti ile arttığı görülmektedir. Ancak akım şiddeti için en iyi H_2O_2 üretiminin 80 mA olduğu anlaşılmaktadır. Artan akım şiddetlerinde katotta meydana gelen H_2 gazı oluşumu H_2O_2 üretimini olumsuz şekilde etkilemektedir. Hava akış hızının 0,3 L/dak olarak sabit tutulduğu 80 mA akım şiddetinde karbon kumaş elektrotla gerçekleştirilen denemede ulaşılan maksimum H_2O_2 üretimi 455,64 mg/L'dir. Bu nedenle Taguchi deneysel tasarım matrisinde akım şiddeti için uygun aralıklar 80 – 100 mA olarak seçilmiştir. Buna göre Taguchi deneysel tasarımına (L_9) göre yürütülecek çalışmalarda kullanılacak parametrik seviyeler Tablo 3.23.'de verildiği gibidir.

Tablo 3.23. Deneysel çalışmalarda kullanılan parametrik değerler

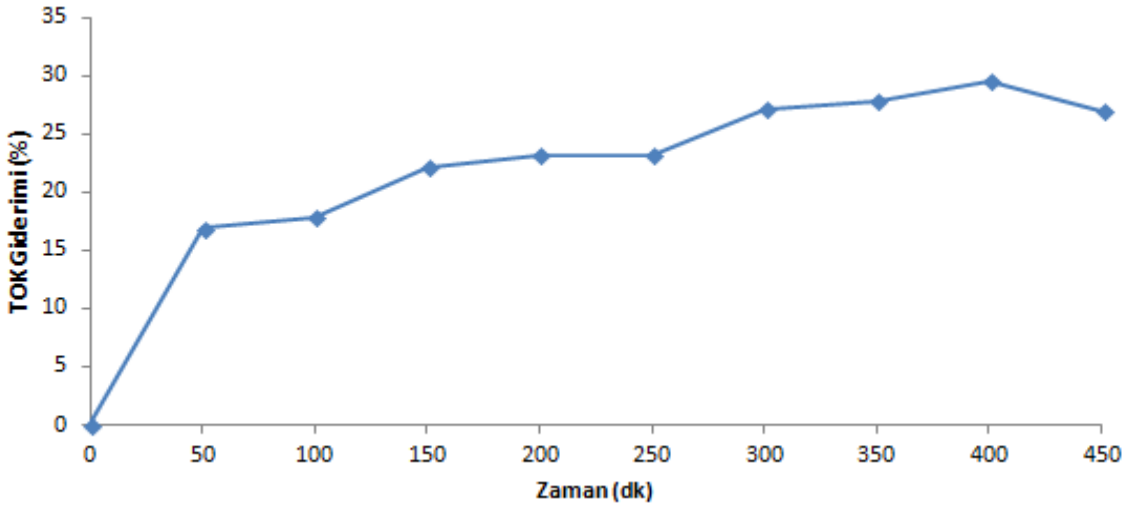
Faktörler	**Düzeyler**		
	1	**2**	**3**
A: Akım şiddeti (mA)	80	90	100
B: Başlangıç atıksu konsantrasyonu (C_o) (mg/L)	C_o	$\frac{C_o}{2}$	$\frac{C_o}{4}$
C: Hava Akış Hızı (L/dak)	0.1	0.3	0.5

Şekil 3.27.'de ise karbon kumaş materyal ile H_2O_2 üretim denemelerinde uygulanan akım şiddetleri için 100 dakikalık elektroliz süreleri için enerji tüketim miktarları gösterilmektedir.



Şekil 3.27. Karbon Kumaş Elektrot Kullanılarak H_2O_2 Üretimi İçin Farklı Akım Şiddetlerinin Enerji Tüketimleri

Karbon kumaş için H_2O_2 üretiminin en yüksek olduğu 80 mA akım şiddeti değerinde demir anot kullanılarak gerçek tekstil atıksuyunda TOK giderimi denemesi yapılmış ve Taguchi deneysel tasarım matrisine göre yürütülecek denemeler için en uygun elektroliz süresinin seçimi yapılmıştır. Şekil 3.28'de 450 dakikalık elektroliz süresince zamana karşı TOK giderim verimleri gösterilmektedir.



Şekil 3.28. Gerçek tekstil atıksularına karbon kumaş katotla uygulanan EF işlemi süresinde zaman TOK giderim veriminin araştırılması

Şekil 3.28.'de görüldüğü üzere 450 dakika olarak yürütülen elektroliz işlemi süresince en uygun arıtma süresinin 400. dakika olduğu açıktır. Deneysel tasarım matrisine göre yürütülecek çalışmaların tamamı için sonuçlar 400. dakika esas alınarak ifade edilmiştir. Zaman-TOK ilişkisi araştırılırken 0,3 L/dak'lık hava akış hızı kullanılmıştır.

Yukarıda verilen bilgiler doğrultusunda karbon kumaş katot ve demir anot elektrotlarla gerçekleştirilen I. aşama deney sonuçları Tablo 3.24.'de verildiği gibidir.

Tablo 3.24. Karbon kumaş katotla Taguchi ortogonal dizisine (L_9) göre yürütülen deney sonuçları

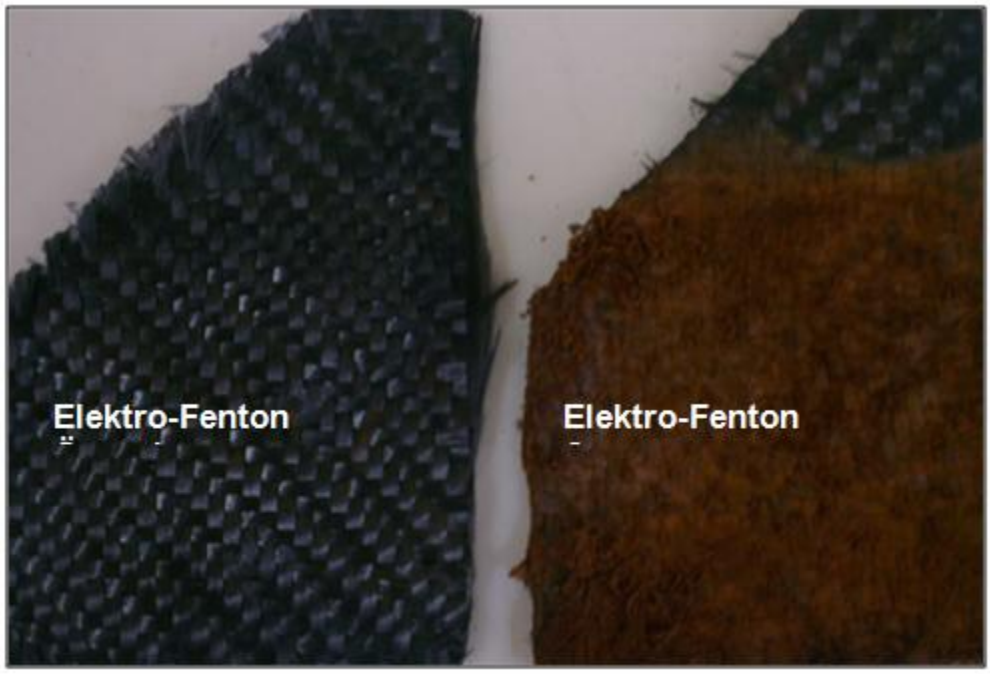
Deney No	AŞ	C_o	Q_h	Renk Giderimi (%)		TOK Giderimi (%)		Bulanıklık Giderimi (%)	
				1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
1	1	1	1	69,59	68,69	23,89	17,83	40,57	46,25
2	1	2	2	69,20	66,25	27,58	30,61	67,81	61,16
3	1	3	3	78,50	72,38	36,39	34,88	42,05	41,78
4	2	1	2	71,85	67,76	21,41	17,61	62,47	64,91
5	2	2	3	69,01	67,93	28,12	31,95	58,19	54,55
6	2	3	1	100,00	100,00	69,44	71,29	100,00	100,00
7	3	1	3	76,79	74,75	32,09	28,42	62,91	61,53
8	3	2	1	74,76	74,23	44,68	44,41	37,65	42,06
9	3	3	2	100,00	100,00	57,77	62,69	100,00	100,00

AŞ: Akım şiddeti (mA)

C_o: Atıksu konsantrasyonu (birimsiz)

Q_h: Hava akış hızı (L/dak)

Karbon kumaş katot materyali ile gerçekleştirilen I. aşama deneylere ilişkin detaylı veriler Tablo 3.25.'de yer almaktadır. Ayrıca şekil 3.29'de karbon kumaş katot materyale ait elektroliz öncesi ve elektroliz sonrası görünümlere yer verilmiştir



Şekil 3.29. Karbon kumaş katoda ait EF öncesi ve sonrası görünümler.

Tablo 3.25. Karbon Kumaş katotla Taguchi ortogonal dizisine (L_9) göre (detaylı)

	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
DENEY NO 1	Başlangıç	3,00	3,00	10,33	10,19	8,84	8,42	2,052	2,472	542,40	720,60	95,40	105,60
	50	3,64	3,96	10,21	10,09	6,41	5,36	1,212	1,428	428,16	656,40	81,00	106,20
	100	3,81	4,12	9,41	9,96	3,20	4,65	1,170	1,080	433,50	645,60	86,40	96,48
	150	3,98	4,36	9,21	9,46	2,71	3,94	1,062	1,014	427,26	621,00	73,20	58,86
	200	4,66	4,85	9,26	9,64	2,61	3,14	1,098	3,600	420,96	619,20	72,60	50,64
	250	5,35	4,96	9,76	9,52	2,94	2,70	1,062	0,894	430,02	601,20	69,60	63,00
	300	5,89	6,4	9,51	9,6	2,86	3,35	0,948	0,798	421,08	597,96	67,80	60,60
	350	6,02	6,21	9,46	9,46	2,71	2,86	0,810	0,786	418,92	599,04	60,60	47,64
	400	6,11	6,25	9,38	9,66	2,46	2,67	0,624	0,774	412,80	592,14	56,70	56,76

	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
DENEY NO 2	Başlangıç	3,00	3,00	8,41	6,51	8,28	7,68	1,422	1,440	348,90	382,08	117,60	103,20
	50	3,47	3,61	8,21	5,95	7,16	4,06	0,624	0,774	295,98	341,10	56,82	54,54
	100	3,60	4,42	7,74	5,9	5,14	4,72	0,612	0,648	284,82	332,04	41,22	50,76
	150	4,01	5,21	7,77	5,87	6,86	5,15	0,606	0,642	285,96	327,78	42,78	40,20
	200	4,69	6,16	7,45	5,93	6,34	5,64	0,558	0,588	276,42	313,08	38,88	39,48
	250	5,21	6,21	7,62	5,89	6,44	5,43	0,516	0,576	271,50	308,94	39,72	48,18
	300	6,06	6,25	7,72	5,76	6,31	5,36	0,492	0,540	261,18	292,26	42,12	47,88
	350	6,21	6,14	7,65	5,91	6,37	4,93	4,680	0,528	257,58	286,26	43,62	47,76
	400	6,17	6,44	7,59	5,93	6,41	5,26	0,438	0,486	252,66	265,14	37,86	40,08

	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
DENEY NO 3	Başlangıç	3,00	3,00	4,55	6,62	9,33	6,82	0,642	0,630	173,46	180,60	44,52	43,80
	50	3,40	3,94	4,46	6,20	6,47	6,77	0,336	0,390	156,84	159,96	31,26	30,66
	100	5,30	5,24	3,35	6,16	5,78	6,00	0,276	0,348	153,54	152,94	25,26	27,78
	150	5,40	6,56	3,27	6,02	5,21	5,61	0,204	0,264	146,10	146,04	21,54	23,88
	200	5,76	6,30	3,26	6,02	5,89	5,77	0,192	0,258	132,12	141,90	18,66	22,56
	250	5,99	6,81	3,44	6,02	5,94	6,05	0,156	0,240	125,34	137,22	21,36	23,46
	300	6,56	7,05	3,24	6,10	5,90	6,20	0,156	0,216	118,50	133,86	19,86	24,84
	350	6,21	6,86	3,21	6,14	5,81	6,14	0,150	0,186	108,06	124,92	24,54	28,50
	400	6,17	6,72	3,23	6,21	5,67	5,19	0,138	0,174	110,34	117,60	25,80	25,50

	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
DENEY NO 4	Başlangıç	3,00	3,00	12,70	11,60	7,61	8,27	1,812	2,550	681,00	654,60	106,80	130,80
	50	3,39	3,30	12,18	10,90	4,82	5,75	1,416	1,422	556,32	579,84	56,22	98,40
	100	3,90	3,92	11,94	10,76	5,78	5,64	1,068	0,954	539,58	558,96	44,04	91,80
	150	4,31	4,51	11,91	10,75	5,26	5,45	0,990	1,014	550,32	558,00	40,74	29,40
	200	4,76	5,51	11,92	10,54	5,44	5,39	0,606	0,930	554,40	582,84	49,80	73,80
	250	6,06	6,12	12,11	10,86	5,21	5,36	0,678	0,900	549,36	574,08	43,80	64,80
	300	6,28	6,08	12,09	10,85	5,42	5,15	0,642	0,894	556,56	554,70	43,50	54,66
	350	6,27	6,06	12,07	10,89	5,34	5,29	0,552	0,852	535,20	540,90	44,46	50,70
	400	6,34	5,97	12,07	10,79	5,32	5,20	0,510	0,822	535,20	539,34	40,08	45,90

	Süre (dakika)	pH	İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
DENEY NO 5	Başlangıç	3,00	6,79	6,10	7,66	7,95	1,278	1,104	352,74	346,50	86,40	79,20
	50	4,01	6,31	5,36	5,48	5,92	0,744	0,738	310,02	309,78	56,52	58,74
	100	6,56	6,19	5,34	5,68	5,87	0,576	0,540	304,02	296,76	55,92	38,10
	150	6,21	6,07	5,28	5,37	5,85	0,504	0,510	294,36	296,16	54,84	36,96
	200	6,24	6,17	5,24	5,24	5,76	0,504	0,474	279,90	281,34	42,90	42,00
	250	5,80	6,29	5,37	4,87	5,33	0,498	0,384	267,12	268,32	36,66	42,60
	300	7,14	6,28	5,33	5,18	5,44	0,444	0,366	264,36	264,42	48,30	62,40
	350	7,10	6,24	5,34	5,24	5,23	0,426	0,372	253,62	247,50	44,52	44,52
	400	6,54	6,11	5,35	5,55	5,37	0,396	0,354	253,56	235,80	36,12	36,00

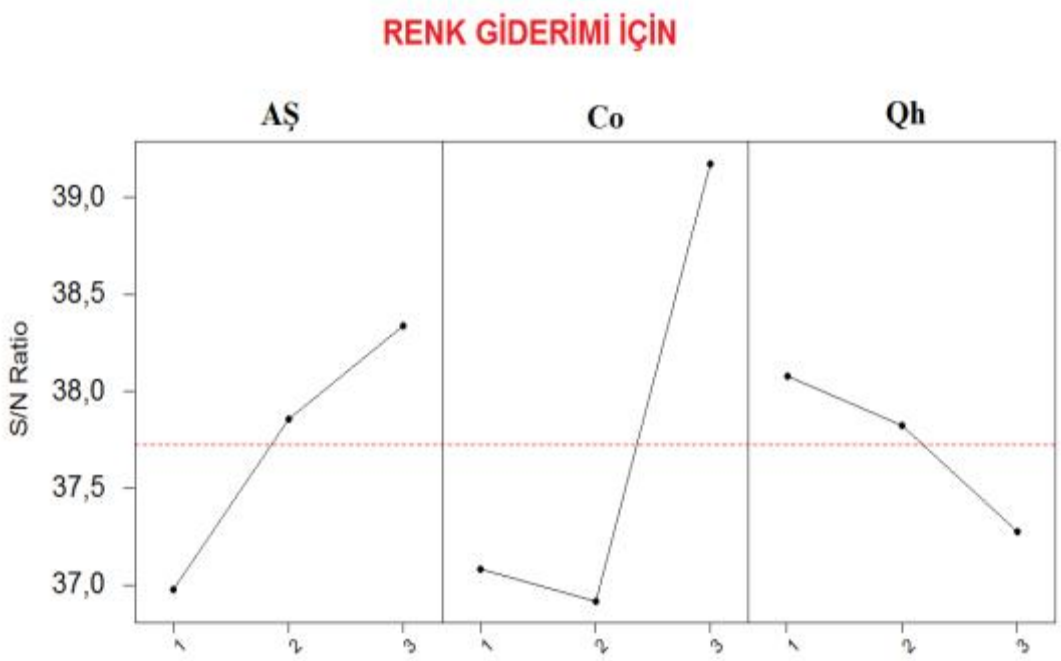
	Süre (dakika)	pH	İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
DENEY NO 6	Başlangıç	3,00	3,84	4,90	7,25	6,74	0,552	0,720	187,5	179,7	31,62	52,32
	50	4,74	3,29	4,24	3,70	2,92	0,396	0,630	166,98	158,52	36,3	54,12
	100	5,77	3,32	4,28	3,14	3,34	0,246	0,504	151,32	144,9	54,18	43,02
	150	6,59	3,29	4,24	2,54	3,00	0,216	0,600	137,4	134,28	55,8	39,24
	200	6,11	3,24	4,24	2,01	2,32	0,198	0,564	117,9	120,96	50,46	35,22
	250	5,27	3,25	4,23	2,40	2,01	0,138	0,522	107,16	118,26	0	25,5
	300	6,12	3,23	4,29	1,76	1,21	0,000	0,384	84,24	101,82	0	25,68
	350	6,47	3,29	4,26	1,99	0,49	0,000	0,210	56,04	85,26	0	28,14
	400	6,20	3,23	4,26	2,36	0,39	0,000	0,000	57,3	51,6	0	0

	Süre (dakika)	pH	İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
DENEY NO 7	Başlangıç	3,00	11,80	9,69	8,60	7,10	2,844	2,376	747,60	761,40	152,40	129,00
	50	3,49	11,62	9,61	5,45	6,81	1,128	1,284	575,34	643,20	38,52	79,20
	100	4,14	11,60	9,16	5,00	5,35	0,858	1,248	575,58	636,00	67,20	79,80
	150	5,19	11,39	9,21	5,23	5,30	0,882	1,212	573,06	602,40	67,80	75,00
	200	5,24	11,44	9,51	5,21	5,40	0,948	1,056	563,22	594,42	75,00	79,20
	250	6,55	11,38	9,32	5,54	5,29	0,738	1,050	544,50	594,36	57,24	67,20
	300	6,21	11,43	9,28	5,55	5,41	0,720	0,918	544,32	563,76	58,98	63,60
	350	6,46	11,42	9,36	5,14	5,25	0,696	0,780	530,58	558,66	56,94	56,70
	400	6,19	11,43	9,38	5,37	5,20	0,660	0,600	507,72	545,04	56,52	49,62

	Süre (dakika)	pH	İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
DENEY NO 8	Başlangıç	3,00	7,90	6,02	3,41	7,91	1,236	1,164	377,76	389,40	102,00	64,20
	50	3,81	7,78	5,35	3,60	4,08	0,780	0,558	316,38	325,26	56,46	56,70
	100	4,21	7,43	5,42	3,24	4,12	0,522	0,384	296,34	307,38	36,84	56,88
	150	6,09	7,49	5,39	2,79	2,96	0,516	0,366	296,10	287,70	44,94	52,26
	200	6,24	7,14	5,32	2,46	2,76	0,504	0,360	279,48	278,52	52,56	49,08
	250	7,02	7,83	5,38	1,78	2,59	0,462	0,336	260,52	261,06	72,00	45,24
	300	6,43	7,85	5,36	1,75	2,87	0,378	0,330	234,36	237,54	63,60	49,08
	350	6,67	7,46	5,30	1,87	2,76	0,354	0,306	215,16	224,22	70,20	47,40
	400	6,56	7,56	5,31	1,29	3,23	0,312	0,300	208,98	216,48	63,60	37,20

	Süre (dakika)	pH	İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
DENEY NO 9	Başlangıç	3,00	7,68	3,64	7,40	7,75	0,852	1,152	157,56	151,50	62,46	79,20
	50	4,14	7,09	2,97	5,07	5,18	0,372	1,104	153,12	148,86	33,36	54,78
	100	4,49	7,14	3,21	4,96	6,91	0,204	0,486	132,00	153,84	31,20	50,70
	150	6,81	7,21	2,92	3,10	4,42	0,150	0,474	116,82	121,14	29,94	49,50
	200	6,14	7,14	2,9	3,41	4,01	0,072	0,360	82,20	57,12	20,40	24,78
	250	6,19	7,12	2,94	2,94	3,15	0,012	0,270	71,94	57,06	0,00	51,72
	300	6,12	7,15	2,94	1,52	3,66	0,012	0,090	65,40	56,82	0,00	27,00
	350	6,27	7,19	2,81	1,44	3,74	0,012	0,066	68,82	56,76	0,00	25,80
	400	6,02	7,11	2,91	1,72	3,78	0,000	0,000	66,54	56,52	0,00	0,00

Tablo 3.24.'de 2 tekrarlı olarak verilen sonuçlara göre S/N grafiği oluşturulduğunda (Şekil 3.30) yapılan denemelere göre karbon kumaş katot ile renk giderimi için en uygun koşulların akım şiddeti için (AŞ) 3. parametrik düzey (100 mA); başlangıç atıksu konsantrasyonu (C_o) için en uygun koşulun 3. parametrik düzey (C_o/4); hava akış hızı için (Q_h) en uygun koşulun 1. parametrik düzey (0,1 L/dak) olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.30. Karbon Kumaş Elektrotla EF Çalışmasında Renk Giderimi için S/N grafiği

Belirlenen bu optimum deney koşulları için ANOVA analizi yapıldığında karbon kumaş katot materyal ile renk giderimi çalışmasında her bir parametre için katkı yüzdeleri aşağıdaki Tablo 3.26. gibidir.

Tablo 3.26. Karbon Kumaşla EF çalışmasında renk giderimi için parametrelerin katkı yüzdeleri

Parametre	**Birimi**	**Katkı Oranı (%)**
AŞ	mA	17
C_o	-	63,3
Q_h	L/dak	6
Hata	-	7,2

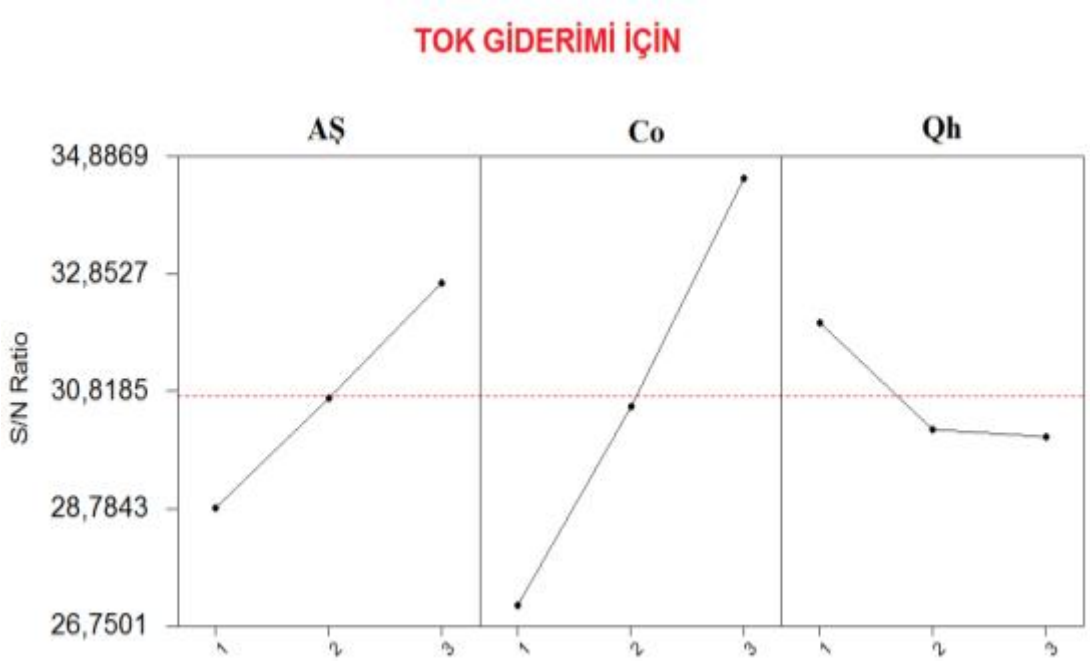
Tablo 3.26.'de görüldüğü gibi renk giderimi için sistemde en baskın parametre %63,3 payla başlangıç atıksu konsantrasyonudur. Bunu %17'lik yüzde ile akım şiddeti ve %6'lık payla hava akış hızı izlemektedir. Belirlenen optimum deney şartları için tahmin edilen ve

gözlemlenen giderim verimi ise Tablo 3.27.'deki gibidir.

Tablo 3.27. Karbon kumaş katotla oksijenli ortamda yürütülen denemelerde renk giderimi için belirlenen en uygun koşullar

Perfor. Kriteri	AŞ (mA)		C_o		Q_h (L/dak)		Gözlenen (%)	Tahmin edilen (%)	Güven Aralığı (%)
	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri			
Renk	3	100	3	$C_o/4$	1	0,1	100	99,94	90,38 - 100

Karbon kumaş katotla oksijenli ortamda renk verileri için sistem optimizasyonu tamamlandıktan sonra ikinci performans kriteri olan TOK için sistem optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla deneylerle ulaşılan veriler için analiz yapıldığında elde edilen S/N grafiği Şekil 3.31.'de sunulmaktadır.



Şekil 3.31. Karbon Kumaş Elektrotla EF Çalışmasında TOK Giderimi için S/N grafiği

TOK giderimi için S/N grafikleri incelendiğinde en uygun koşulların renk giderimi için belirlenen düzeyler olduğu göze çarpmaktadır. Buna göre TOK giderimi için en uygun koşulların akım şiddeti için (AŞ) 3. parametrik düzey (100 mA); başlangıç atıksu konsantrasyonu (C_o) için en uygun koşulun 3. parametrik düzey ($C_o/4$); hava akış hızı için (Q_h) en uygun koşulun 1. parametrik düzey (0,1 L/dak) olduğu belirlenmiştir.

Belirlenen bu optimum deney koşulları için ANOVA analizi yapıldığında grafit katot materyal ile TOK giderimi çalışmasında her bir parametre için katkı yüzdeleri Tablo 3. 28.'deki gibidir.

Tablo 3.28. Karbon Kumaşla EF çalışmasında TOK giderimi için parametrelerin katkı yüzdeleri

Parametre	Birimi	Katkı Oranı (%)
AŞ	mA	17
C_o	-	63,3
Q_h	L/dak	6
Hata	-	7,2

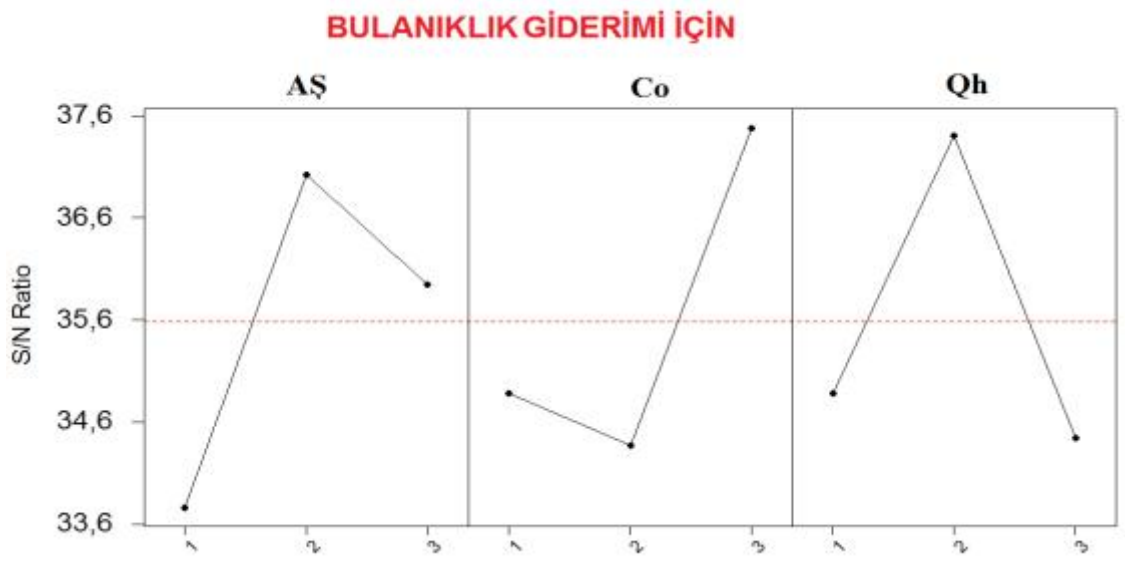
Tablo 3.28. EF sisteminde TOK açısından da yine en baskın parametre başlangıç atıksu konsantrasyonudur (Katkı oranı %62,6). Bunu %16,1'lık yüzde ile akım şiddeti ve %9,9'luk payla hava akış hızı izlemektedir.

Belirlenen optimum deney şartları için tahmin edilen ve gözlemlenen TOK giderim verimi ise Tablo 3.29. 'deki gibidir.

Tablo 3.29. Karbon kumaş katotla oksijenli ortamda yürütülen denemelerde TOK giderimi için belirlenen en uygun koşullar

Perf. Kriteri	AŞ (mA)		C_o		Q_h (L/dak)		Gözlenen (%)	Tahmin edilen (%)	Güven Aralığı (%)
	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri			
TOK	3	100	3	$C_o/4$	1	0.1	69,84	70,40	58,56 – 82,25

Son performans kriteri olan bulanıklık verileri için gerçekleştirilen araştırma sonuçları renk ve TOK giderim sonuçlarına göre değişiklik göstermektedir. Bu amaçla deneylerle ulaşılan veriler için analiz yapıldığında elde edilen S/N grafiği Şekil 3.32.'de verilmektedir.



Şekil 3.32. Karbon Kumaş Elektrotla EF Çalışmasında Bulanıklık Giderimi için S/N grafiği

Bulanıklık verileri için S/N grafikleri incelendiğinde en uygun koşulların akım şiddeti için (AŞ) 2. parametrik düzey (90 mA); başlangıç atıksu konsantrasyonu (C_o) için en uygun koşulun 3. parametrik düzey (C_o/4); hava akış hızı için (Q_h) en uygun koşulun 2. parametrik düzey (0,3 L/dak) olduğu belirlenmiştir.

Belirlenen bu optimum deney koşulları için ANOVA analizi yapıldığında karbon kumaş katot materyal ile bulanıklık giderimi çalışmasında her bir parametre için katkı yüzdeleri Tablo 3.30'deki gibidir.

Tablo 3.30. Karbon Kumaşla EF çalışmasında bulanıklık giderimi için parametrelerin katkı yüzdeleri

Parametre	**Birimi**	**Katkı Oranı (%)**
AŞ	mA	16,2
C_o	-	26,6
Q_h	L/dak	13,8
Hata	-	23,0

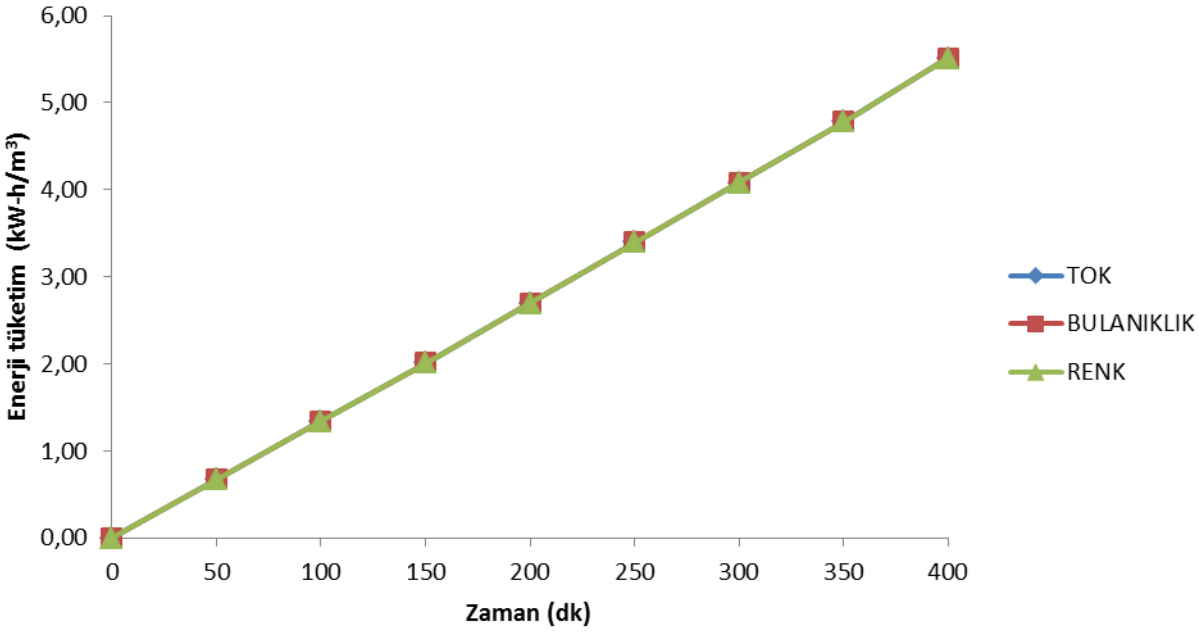
Bulanıklık giderimi için EF sisteminde en etkili parametre başlangıç atıksu konsantrasyonudur (katkı payı %26,6). Bunu %16,2'lik yüzde ile akım şiddeti ve %13,8'lik payla hava akış hızı izlemektedir.

Belirlenen optimum deney şartları için tahmin edilen ve gözlemlenen bulanıklık giderim verimleri ise Tablo 3.31'deki gibidir.

Tablo 3.31. Karbon kumaş katotla oksijenli ortamda yürütülen denemelerde bulanıklık giderimi için belirlenen en uygun koşullar

Perf. Kriteri	AŞ (mA)		C_o		Q_h (L/dak)		Gözlenen (%)	Tahmin edilen (%)	Güven Aralığı (%)
	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri			
Bulanıklık	2	90	3	$C_o/4$	2	0,3	100	99,94	69,96 – 100

Tüm performans kriterleri için deneysel olarak bulunan (gözlemlenen) sonuçlar belirtilen güven aralığında kalmaktadır. Elde edilen sonuçlar ve Taguchi optimizasyon metodu ile tahmin edilen sonuçların tutarlı olması sistemimizin çalışıyor olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca tüm optimum koşullar için tüketilen enerji miktarları şekil 3.33.'de verilmektedir.



Şekil 3.33. Karbon Kumaş Elektrot ile II. Aşama Deneylerde Elde Edilen Optimum Koşullarda Enerji Tüketimleri

3.2.4. Birinci Aşama Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması (Oksijenli ortamda)

Sonuçların daha net bir biçimde karşılaştırılabilmesi için çalışmada kullanılan tüm katot materyallerin ve bu materyaller kullanılarak farklı kirlilik parametreleri için optimum koşullarda elde edilen giderim verimlerinin tek bir tabloda gösterimi daha uygun olacaktır. I. aşama deney sonuçları için elde edilen sonuçlar Tablo 3.32.'de özetlemektedir.

Tablo 3.32. Farklı katot materyallerle oksijenli ortamda yürütülen deneysel sonuçların karşılaştırılması

Katot	Parametreler için optimum koşullar				Kirlilik Parametreleri için Giderim Verimleri (%)		
	Parametre	A.Ş. (mA)	C_o	Q_h (L/dak)	Renk	TOK	Bulanıklık
Grafit	Renk	100	$C_o/4$	0,1	100	70,40	98,80
	TOK	100	$C_o/4$	0,1			
	Bulanıklık	100	$C_o/4$	0,1			
Karbon Keçe	Renk	100	$C_o/4$	0,1	99,45	63,21	100
	TOK	90	$C_o/4$	0,5			
	Bulanıklık	80	$C_o/4$	0,1			
Karbon Kumaş	Renk	100	$C_o/4$	0,1	100	69,84	100
	TOK	100	$C_o/4$	0,1			
	Bulanıklık	90	$C_o/4$	0,3			

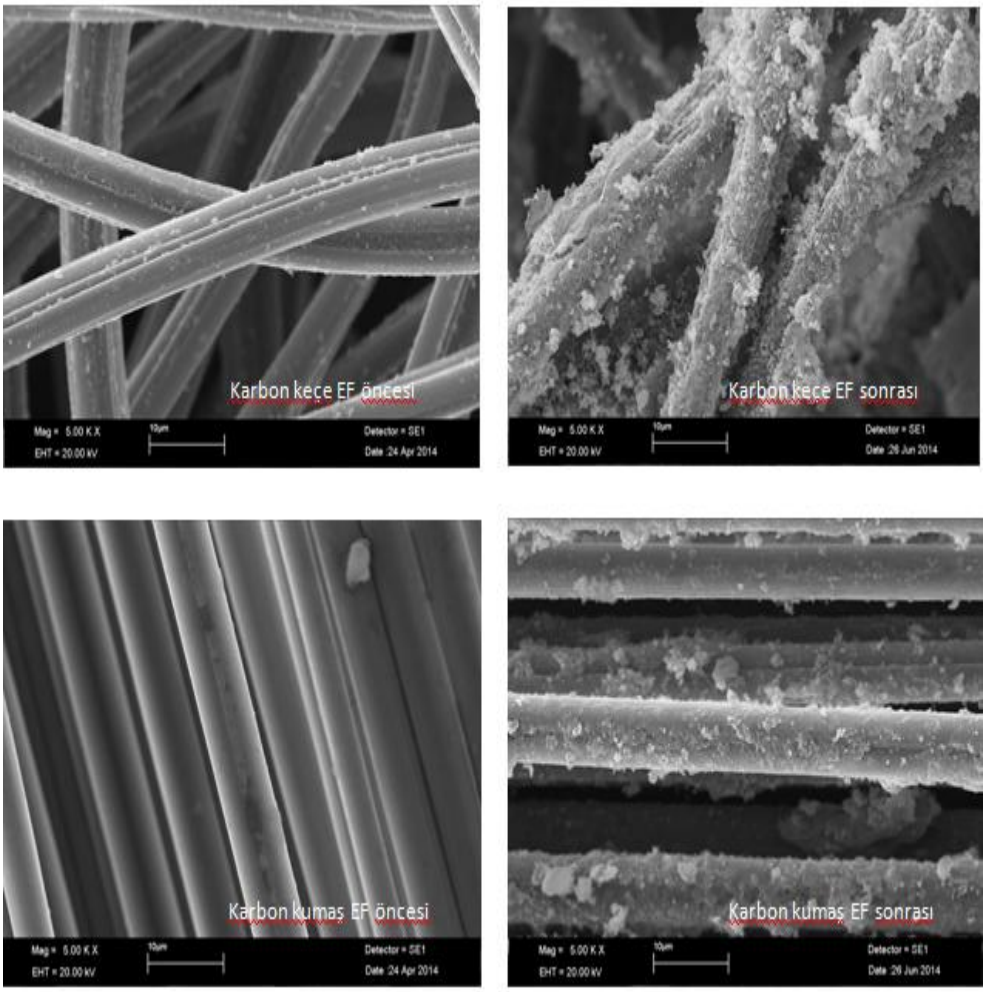
Tablo 3.32. de görüldüğü üzere renk ve bulanıklık parametreleri için giderim sonuçları tüm katot materyaller için neredeyse tamamının giderildiğini göstermektedir. TOK parametresi içinse sonuçlar değerlendirildiğinde en iyi giderim verimini grafitin sağladığı (%70,40) ve bunu sırasıyla karbon kumaş (%69,84) ve karbon keçenin (%63,21) izlediği görülmektedir. Elde edilen TOK giderimleri için sonuçlar beklenilenden farklıdır. Organik karbon açısından en iyi giderim veriminin karbon kumaş katotla elde edilmesi düşünülmekteydi ancak grafit katot materyal TOK giderimi açısından en iyi sonucu vermiştir. Bu durumun muhtemel sebebi şu şekilde açıklanabilir. İleri oksidasyon proseslerinden birisi olan EF prosesinde arıtım performansı önemli ölçüde kullanılan katot materyalin H_2O_2 üretimi ile ilgilidir.

H_2O_2'in elektrokimyasal hücre içerisinde oluşturulduğu EF çalışmalarında yaygın olarak Fe^{+2} veya Fe^{+3} katalizörü sisteme dışarıdan ilave edilmektedir. Ancak proje çalışmamızda, EF prosesinde katalizör olarak etki gösteren demir sistem içerisinde anodik olarak üretilmektedir.

Taguchi matrisinde H_2O_2 üretimi için belirlenen akım şiddeti değerlerinde oluşan H_2O_2 miktarına oranla çok daha yüksek miktarlarda Fe^{+2} üretimi gerçekleştiği için elektrokimyasal sistemin arıtım şekli elektrooksidasyondan ziyade elektrokoagulasyon yönünde hareket

etmeye başlamaktadır. Bu nedenle TOK giderim verimleri de katot materyalin yapısından önemli ölçüde etkilenmemektedir. Proje raporunda şekil 3.34 ve şekil 3.35 e bakıldığında EF reaksiyonlarının sonunda katot materyalin yüzeyinin neredeyse tamamının demir parçacıkları ile kaplandığı görülmektedir. Bu durum kullanılan katot materyalinin pasifize olması sebebiyle H_2O_2 üretim performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Ancak grafit levha olarak kullanılan katot materyal için böylesi bir durum söz konusu değildir.

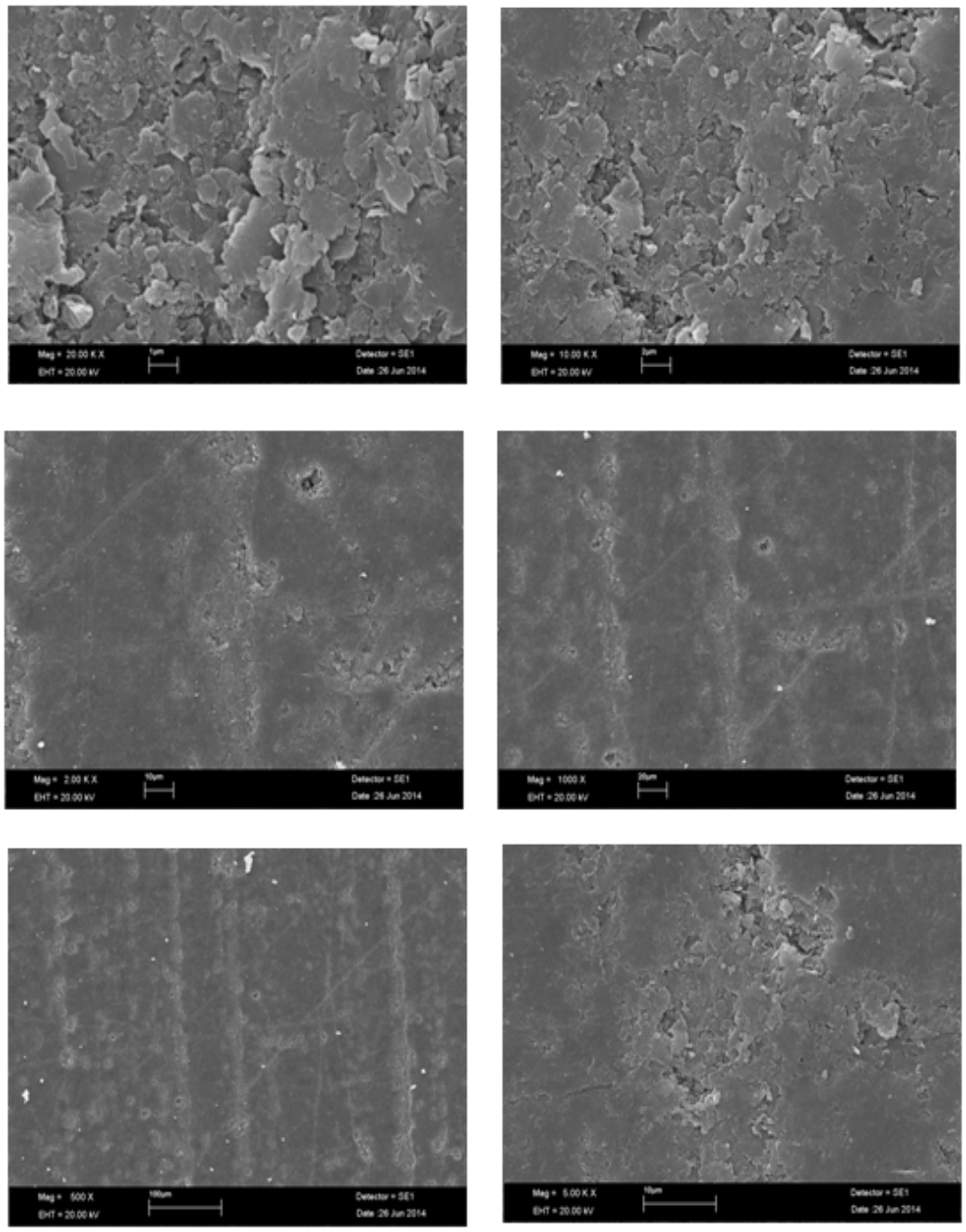
Grafit düz yüzeye sahip bir malzeme olduğu için elektroliz esnasında demir parçacıklarının yüzeyde birikmesi gibi bir durum söz konusu değildir. Aşağıda şekil 3.34'de karbon keçe ve karbon kumaşa ait EF öncesi ve EF sonrası SEM görüntüleri verilmektedir.



Şekil 3.34. Karbon kumaş ve karbon keçenin aynı büyütme oranında EF öncesi ve sonrası SEM görüntüleri

Grafit elektrot yüzeyinin düz yüzeyli olması H_2O_2 üretimi bakımından bir dezavantaj gibi görülmesine rağmen anodun demir olduğu ve yoğun demir konsantrasyonunda yürütülmüş EF prosesi açısından bir avantaj haline dönüşmüştür. TOK giderimi açısından en iyi giderim

verimi bu nedenle grafit katot materyal ile elde edilmiştir. Şekil 3.35'da grafit elektrota ait değişik büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri verilmektedir.



Şekil 3.35. Grafit elektrota ait farklı büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri

3.3. Gerçek Tekstil Atıksularına Oksijensiz Ortamda Farklı Elektrot Materyalleri ile Uygulanan EF Çalışma Sonuçları (II. Aşama Deneyler)

Bu bölümde üç farklı katot materyal (grafit, karbon keçe ve karbon kumaş) ile oksijenli ortamda H_2O_2 üretmek üzere planlanan I. aşama deney sonuçlarına yer verilmektedir.

Çalışmanın bundan sonraki kısımlarında atıksu ortamından elektroliz süresi boyunca Taguchi deneysel matrisi ile planlanmış hava akış hızlarına eşdeğer debide N_2 gazı geçirilmek suretiyle ortamdan mevcut O_2 sıyrılmış ve O_2'nin katodik olarak indirgenmesi sayesinde H_2O_2 üretimi sonlandırılmıştır.

Burada amaç Fenton reaktiflerinden birisi olan H_2O_2'nin ortamda yokluğu halinde elde edilecek renk, bulanıklık ve TOK giderimlerinin I. aşama deney sonuçları ile karşılaştırılarak aradaki farkın yorumlanmasıdır. II. aşama deneylerde deneysel prosedür I. aşama deneylerle aynı olup yalnızca ortamdan kuru hava yerine N_2 gazı geçirilmesidir. Çalışmaya grafit katot materyal ile başlanmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir.

3.3.1. Grafit Katoda Ait II. Aşama Deney Sonuçları

Çalışmada deneysel parametreler için düzeyler grafit katotla yapılan I. aşama (oksijenli) deneylerde kullanılan düzeylerle eşdeğerdir. Buna göre çalışmada kullanılan proses değişkenleri ve bunların parametrik seviyeleri Tablo 3.33.'de verildiği gibidir.

Tablo 3.33. Deneysel çalışmalarda kullanılan parametrik değerler

Faktörler	**Düzeyler**		
	1	**2**	**3**
A: Akım şiddeti (mA)	60	80	100
B: Başlangıç atıksu konsantrasyonu (C_o) (mg/L)	C_o	$\frac{C_o}{2}$	$\frac{C_o}{4}$
C: Gaz Akış Hızı (L/dak) (Azot Gazı için)	0,1	0,3	0,5

Tablo 3.33'de verilen parametrik değerlere göre oksijensiz ortamda yürütülen deney sonuçları Tablo 3.34'de iki tekrarlı olarak sunulmaktadır.

Tablo 3.34. Grafit katotla Taguchi ortogonal dizisine (L_9) göre yürütülen II. aşama deney sonuçları

Deney No	AŞ	C_o	Q_h	Renk Giderimi (%)		TOK Giderimi (%)		Bulanıklık Giderimi (%)	
				1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
1	1	1	1	60,00	64,31	15,37	15,07	50,11	54,65
2	1	2	2	68,45	63,10	23,47	21,77	49,51	45,23
3	1	3	3	100,00	100,00	60,15	61,53	89,02	89,30
4	2	1	2	78,17	76,45	23,46	21,60	46,82	46,71
5	2	2	3	90,91	92,67	48,16	55,93	45,46	52,45
6	2	3	1	95,77	91,43	66,45	68,06	94,65	90,60
7	3	1	3	64,12	69,70	13,54	15,94	43,04	48,05
8	3	2	1	95,71	97,16	52,92	58,50	89,66	97,05
9	3	3	2	73,64	75,32	66,69	68,17	73,53	72,12

AŞ: Akım şiddeti (mA)

C_o: Atıksu konsantrasyonu (birimsiz)

Q_h: N_2 gazı akış hızı (L/dak)

Ayrıca grafit katot materyali ile gerçekleştirilen II. aşama deneylere ilişkin detaylı veriler Tablo 3.35'de yer almaktadır

Tablo 3.35. Grafit katotla Taguchi ortogonal dizisine (L_9) göre yürütülen II. aşama deney sonuçları (detaylı)

	Süre (dakika)	pH		İletkenlik		Çözünmüş Oksijen		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
DENEY NO 1	Başlangıç	3,00	3,00	10,07	9,92	7,34	8,77	1,95	1,866	788,40	764,40	105,60	95,40
	50	3,46	4,14	9,62	9,41	0,16	0,08	1,146	0,81	736,80	711,00	88,80	84,60
	100	3,96	5,54	9,65	9,32	0,11	0,11	1,044	1,062	714,00	692,4	83,40	70,80
	150	4,73	5,78	9,56	9,46	0,09	0,09	0,095	0,684	705,60	679,8	75,00	67,20
	200	5,51	5,9	9,55	9,42	0,08	0,10	0,906	0,762	694,20	687,6	70,20	56,40
	250	5,94	6,46	9,66	9,43	0,14	0,14	0,858	0,714	691,20	670,8	52,80	55,38
	300	6,72	7,14	9,76	9,44	0,12	0,11	0,786	0,660	673,80	658,2	54,72	53,04
	350	7,07	7,45	9,69	9,54	0,12	0,12	0,780	0,666	667,20	649,2	52,68	43,26

	Süre (dakika)	pH		İletkenlik		Çözünmüş Oksijen		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
DENEY NO 2	Başlangıç	3,00	3,00	6,19	6,34	7,63	7,17	1,008	1,122	386,46	390,06	110,40	65,40
	50	3,96	3,73	5,58	5,72	0,13	0,11	0,756	0,564	352,26	353,94	54,60	42,72
	100	4,20	4,64	5,53	5,60	0,11	0,06	0,624	0,558	351,30	346,50	45,42	38,94
	150	4,60	4,86	5,49	5,54	0,09	0,08	0,606	0,576	351,06	344,10	46,38	43,98
	200	5,57	7,78	5,50	5,71	0,09	0,06	0,51	0,522	348,66	332,16	37,80	41,22
	250	5,96	7,90	5,41	5,70	0,11	0,11	0,468	0,420	342,42	325,02	37,80	40,14
	300	6,88	8,51	5,65	5,73	0,14	0,14	0,462	0,420	324,90	312,96	64,20	36,06
	350	7,59	8,10	5,65	5,68	0,11	0,03	0,318	0,414	295,74	305,16	55,74	35,82

DENEY NO 3	Süre (dakika)	pH		İletkenlik		Çözünmüş Oksijen		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
	Başlangıç	3,00	3,00	3,78	3,75	7,29	7,5	0,510	0,510	195,6	192,78	31,68	35,88
	50	4,76	5,34	3,08	3,14	0,15	0,09	0,414	0,408	185,4	183,54	29,52	29,76
	100	5,27	6,45	3,09	3,14	0,09	0,08	0,306	0,390	177,66	170,04	23,64	23,10
	150	8,00	6,21	3,11	3,10	0,07	0,08	0,288	0,324	176,22	163,38	21,78	20,76
	200	8,13	7,69	3,12	3,11	0,07	0,11	0,186	0,204	139,02	152,58	20,40	19,26
	250	8,00	7,21	3,14	3,14	0,12	0,12	0,300	0,126	101,76	98,64	10,98	13,14
	300	8,14	7,99	3,15	3,01	0,15	0,09	0,000	0,054	87,36	82,02	5,88	10,14
	350	7,93	9,21	3,12	2,94	0,10	0,04	0,000	0,000	77,94	74,16	3,48	3,84

DENEY NO 4	Süre (dakika)	pH		İletkenlik		Çözünmüş Oksijen		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
	Başlangıç	3,00	3,00	11,12	11,56	8,74	6,27	1,704	1,962	766,20	736,20	79,20	102,00
	50	3,35	3,60	10,67	11,14	0,20	0,26	0,738	0,099	645,00	658,20	68,40	80,40
	100	4,63	4,21	10,67	11,02	0,13	0,13	0,600	1,026	639,60	647,40	53,88	84,00
	150	5,43	4,65	10,50	11,00	0,19	0,09	0,762	0,846	631,80	635,40	63,00	63,00
	200	6,16	4,81	10,71	10,00	0,11	0,10	0,720	0,690	627,60	626,40	56,28	60,60
	250	7,47	5,21	10,75	10,86	0,11	0,14	0,588	0,696	622,20	628,20	52,68	55,56
	300	7,42	6,24	10,85	10,98	0,11	0,09	0,438	0,636	603,60	613,80	50,16	55,26
	350	7,63	7,29	10,94	10,86	0,10	0,02	0,372	0,462	586,44	577,20	42,12	54,36

	Süre (dakika)	pH		İletkenlik		Çözünmüş Oksijen		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
DENEY NO 5	Başlangıç	3,00	3,00	10,12	5,90	8,03	7,86	0,924	0,900	377,10	379,86	64,80	51,48
	50	3,37	4,23	9,35	5,37	0,10	0,17	0,684	0,486	353,46	334,44	46,56	45,30
	100	3,81	4,94	9,30	5,46	0,10	0,16	0,636	0,534	345,48	325,98	44,76	37,02
	150	4,50	6,36	9,33	5,39	0,12	0,17	0,576	0,384	340,98	297,30	36,60	27,30
	200	4,94	6,49	9,31	5,40	0,09	0,14	0,390	0,252	296,58	244,80	38,94	47,52
	250	5,95	8,05	9,44	5,37	0,12	0,06	2,760	0,150	266,58	194,34	40,20	54,12
	300	6,21	8,54	9,48	5,39	0,11	0,06	0,198	0,078	224,88	186,72	46,14	33,78
	350	6,79	8,54	9,53	5,40	0,11	0,06	0,084	0,066	195,48	167,40	35,34	24,48

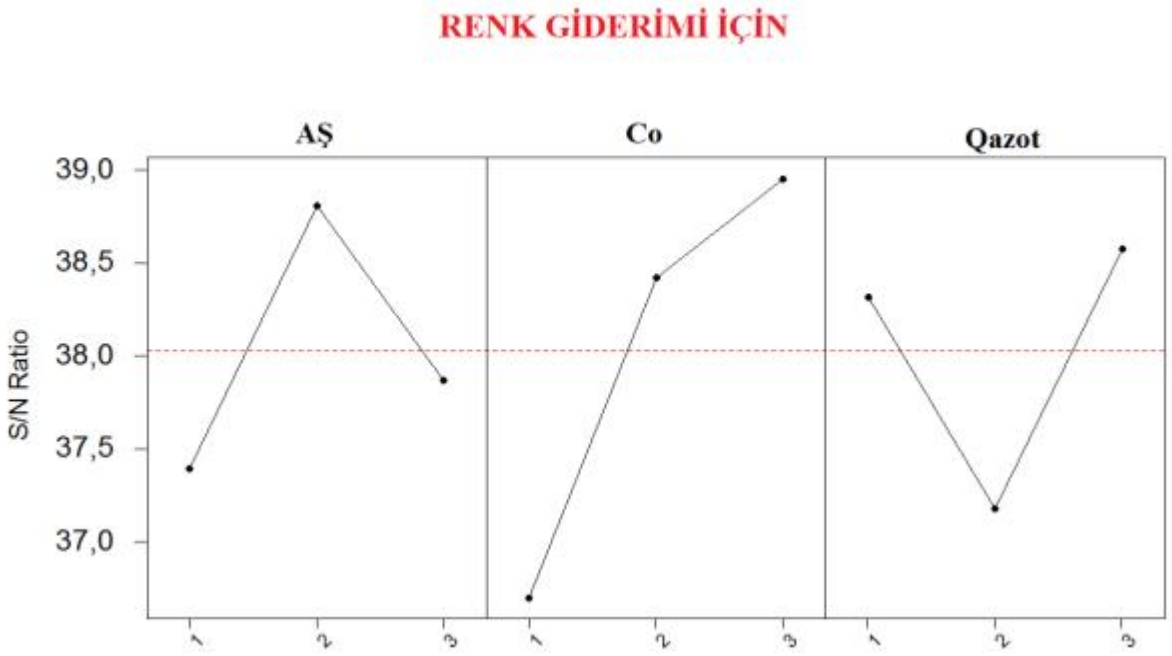
	Süre (dakika)	pH		İletkenlik		Çözünmüş Oksijen		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
DENEY NO 6	Başlangıç	3,00	3,00	5,75	3,58	3,96	7,52	0,426	0,420	195,48	177,54	29,16	31,26
	50	3,18	4,42	5,51	3,02	0,24	0,62	0,414	0,330	173,34	174,72	27,84	27,54
	100	6,35	4,97	5,47	3,06	0,11	0,41	0,258	0,288	153,36	167,34	22,26	20,82
	150	5,08	5,61	5,23	3,00	0,15	0,11	0,054	0,228	95,58	155,94	10,56	16,50
	200	5,44	6,44	5,27	3,01	0,11	0,14	0,030	0,168	76,20	133,74	2,28	16,20
	250	7,38	8,44	5,28	2,95	0,11	0,11	0,024	0,066	72,36	106,32	1,92	11,16
	300	8,34	8,27	5,27	2,90	0,13	0,09	0,018	0,084	70,80	93,60	1,68	11,64
	350	9,43	8,49	5,27	2,87	0,12	0,07	0,018	0,036	65,58	56,70	1,56	2,94

	Süre (dakika)	pH		İletkenlik		Çözünmüş Oksijen		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
DENEY NO 7	Başlangıç	3,00	3,00	6,09	8,097	5,44	9,28	2,040	1,782	753,60	741,60	94,80	79,80
	50	3,38	4,00	5,84	8,240	0,20	0,15	1,218	0,882	675,60	670,20	85,20	61,80
	100	4,02	4,26	5,76	8,360	0,10	0,14	1,014	0,768	683,40	666,60	73,20	56,76
	150	8,68	5,36	5,56	8,400	0,13	0,13	0,984	0,0774	661,20	657,00	75,60	61,80
	200	8,94	5,94	5,54	8,390	0,11	0,12	0,780	0,570	661,20	642,60	57,00	42,84
	250	7,44	7,30	5,55	8,600	0,16	0,14	0,756	0,594	672,60	633,60	54,12	46,02
	300	7,84	7,44	5,56	8,600	0,11	0,11	0,762	0,606	654,00	624,60	56,10	45,90
	350	7,89	7,61	5,54	8,600	0,10	0,10	0,732	0,540	651,60	623,40	54,00	41,46

	Süre (dakika)	pH		İletkenlik		Çözünmüş Oksijen		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
DENEY NO 8	Başlangıç	3,00	3,00	6,49	5,90	7,45	7,88	0,978	0,846	368,94	352,74	56,28	50,82
	50	4,17	6,36	6,17	5,37	0,11	0,16	0,576	0,780	342,96	348,00	46,20	40,02
	100	8,27	7,49	5,91	5,38	0,04	0,12	0,522	0,612	334,74	340,56	42,12	42,00
	150	8,00	9,00	5,96	5,42	0,09	0,11	0,480	0,444	326,76	327,00	34,26	26,58
	200	8,11	8,64	5,98	5,40	0,06	0,13	0,180	0,354	257,16	286,20	27,78	39,00
	250	8,14	7,93	5,94	5,36	0,08	0,08	0,150	0,120	241,92	161,28	20,70	1,62
	300	8,18	8,44	5,86	5,30	0,04	0,07	0,078	0,036	218,16	148,68	14,88	1,74
	350	8,52	8,95	5,76	5,25	0,01	0,07	0,042	0,024	173,70	146,40	5,82	1,50

DENEY NO 9	Süre (dakika)	pH		İletkenlik		Çözünmüş Oksijen		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
	Başlangıç	3,00	3,00	4,66	5,10	6,87	6,89	0,660	0,462	189,48	187,68	32,64	27,12
	50	4,15	4,76	4,03	4,49	0,07	0,14	0,588	0,402	182,46	173,22	31,26	28,38
	100	7,10	5,40	4,01	4,50	0,07	0,11	0,492	0,294	181,62	156,42	30,00	21,30
	150	8,00	7,00	4,04	4,53	0,09	0,09	0,462	0,126	158,64	84,72	37,26	15,54
	200	8,11	7,49	4,05	4,52	0,09	0,08	0,390	0,120	124,26	82,68	27,36	14,34
	250	8,47	7,58	4,02	4,54	0,09	0,11	0,366	0,114	100,68	66,96	25,38	8,64
	300	8,34	7,55	4,04	4,33	0,03	0,18	0,306	0,114	77,52	65,76	21,90	7,92
	350	9,60	8,12	3,61	4,14	0,01	0,11	0,174	0,114	63,12	59,73	8,64	7,56

Tablo 3.34'de 2 tekrarlı olarak verilen sonuçlara göre S/N grafiği oluşturulduğunda (Şekil 3.36) yapılan denemelere göre grafit katot ile renk giderimi için en uygun koşulların akım şiddeti için (AŞ) 2. parametrik düzey (80 mA); başlangıç atıksu konsantrasyonu (C_o) için en uygun koşulun 3. parametrik düzey (C_o/4); azot gazı akış hızı için (Q_{N2}) en uygun koşulun 3. parametrik düzey (0,5 L/dak) olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.36. Grafit Elektrotla EF Çalışmasında Renk Giderimi için S/N grafiği (II. aşama deney)

Belirlenen bu optimum deney koşulları için ANOVA analizi yapıldığında grafit katot materyal ile II. aşama renk giderimi çalışmasında her bir parametre için katkı yüzdeleri aşağıdaki Tablo 3.36'daki gibidir.

Tablo 3.36. Grafit katot materyal ile EF çalışmasında II. aşama renk giderimi için parametrelerin katkı yüzdeleri

Parametre	Birimi	Katkı Oranı (%)
AŞ	mA	7
C_o	-	34,7
Q_h	L/dak	13,4
Hata	-	23,7

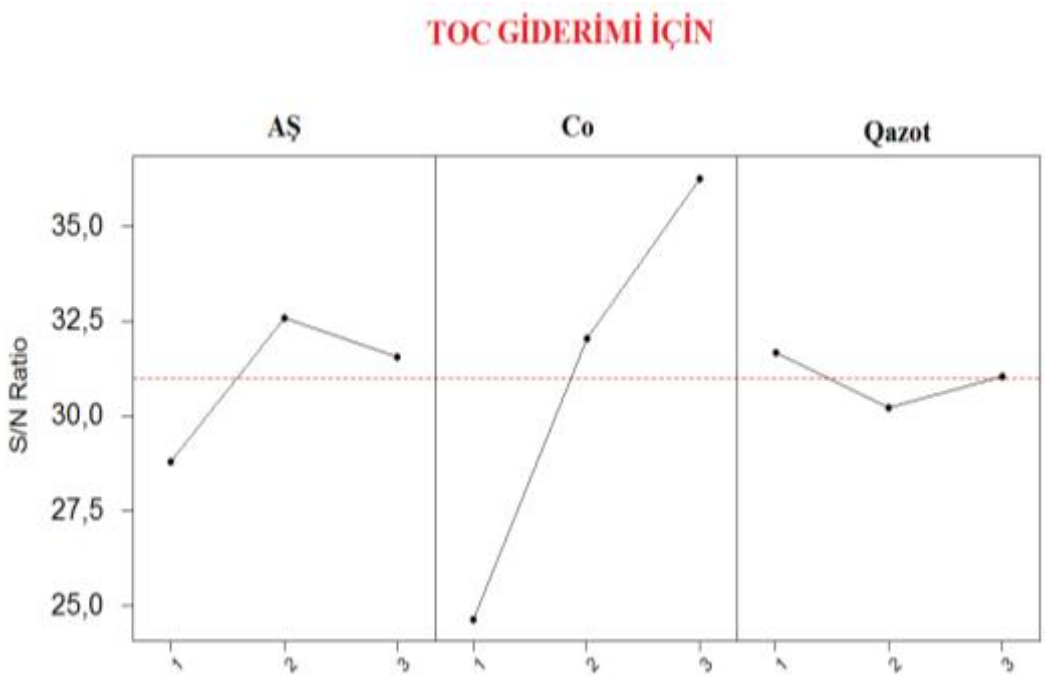
Tablo 3.36.'da görüldüğü gibi renk giderimi için sistemde en baskın parametre %34,7 payla

başlangıç atıksu konsantrasyonudur. Bunu %13,4'lük yüzde ile azot gaz debisi ve %7'lık payla hava akış hızı izlemektedir. Belirlenen optimum deney şartları için tahmin edilen ve gözlemlenen giderim verimi ise Tablo 3.37.'deki gibidir.

Tablo 3.37. Grafit katotla oksijensiz ortamda yürütülen denemelerde renk giderimi için belirlenen en uygun koşullar

Perf. Kriteri	AŞ (mA)		C_o		Q_h (L/dak)		Gözlenen (%)	Tahmin edilen (%)	Güven Aralığı (%)
	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri			
Renk	2	80	3	$C_o/4$	3	0,5	91,02	99,52	79,81 - 100

Grafit katotla oksijensiz ortamda renk verileri için sistem optimizasyonu tamamlandıktan sonra ikinci performans kriteri olan TOK için sistem optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla deneylerle ulaşılan veriler için analiz yapıldığında elde edilen S/N grafiği Şekil 3.37.'da verilmektedir.



Şekil 3.37. Grafit Elektrotla EF Çalışmasında TOK Giderimi için S/N grafiği (II. Aşama deney)

TOK giderimi için S/N grafikleri incelendiğinde en uygun koşulların akım şiddeti için (AŞ) 2. parametrik düzey (80 mA); başlangıç atıksu konsantrasyonu (C_o) için en uygun koşulun 3. parametrik düzey ($C_o/4$); hava akış hızı için (Q_{N2}) en uygun koşulun 1. parametrik düzey (0,1 L/dak) olduğu belirlenmiştir. Belirlenen bu optimum deney koşulları için ANOVA analizi yapıldığında grafit katot materyal ile TOK giderimi çalışmasında her bir parametre için katkı yüzdeleri Tablo 3.38.'de gibidir.

Tablo 3. 38. Grafit katot materyal ile EF çalışmasında II. aşama TOK giderimi için parametrelerin katkı yüzdeleri

Parametre	Birimi	Katkı Oranı (%)
AŞ	mA	8
C_o	-	80,8
Q_h	L/dak	1,5
Hata	-	5,1

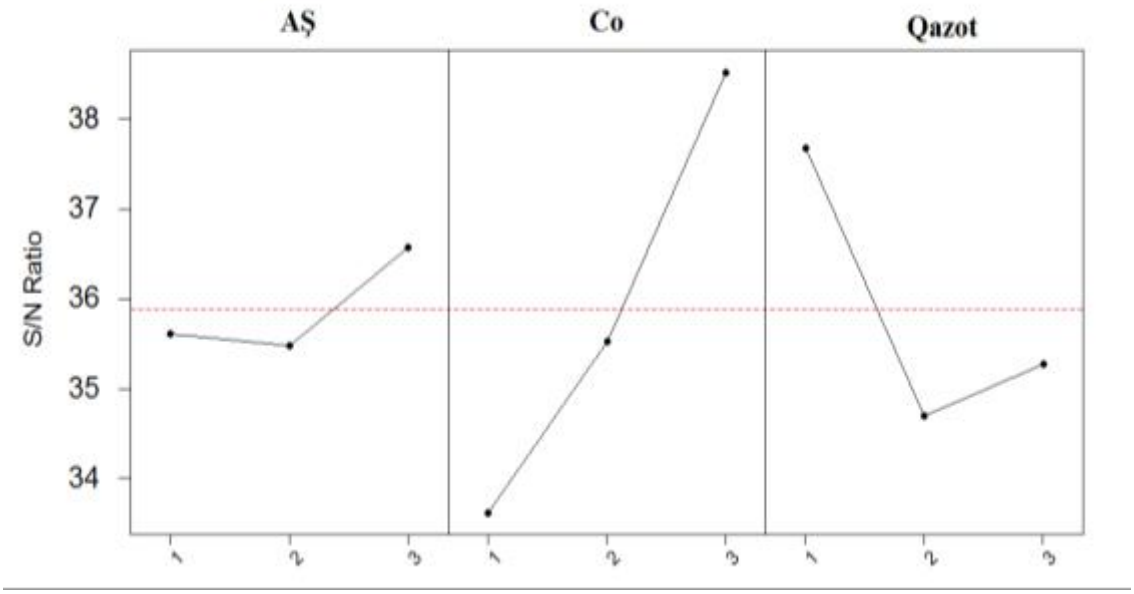
Tablo 3.38.'de görüldüğü gibi renk giderimi için sistemde en baskın parametre %80,8 payla başlangıç atıksu konsantrasyonudur. Bunu %8,0'lık yüzde ile akım şiddeti ve %1,5'lik payla azot gazı debisi izlemektedir. Belirlenen optimum deney şartları için tahmin edilen ve gözlemlenen giderim verimi ise Tablo 3.39.'daki gibidir.

Tablo 3.39. Grafit katotla oksijensiz ortamda yürütülen denemelerde TOK giderimi için belirlenen en uygun koşullar

Perf. Kriteri	AŞ (mA)		C_o		Q_h (L/dak)		Gözlenen (%)	Tahmin edilen (%)	Güven Aralığı (%)
	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri			
TOK	2	80	3	$C_o/4$	1	0,1	63,20	74,28	60,09 – 88,47

Grafit katotla oksijensiz ortamda TOK verileri için sistem optimizasyonu tamamlandıktan sonra diğer performans kriteri olan bulanıklık için sistem optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla deneylerle ulaşılan veriler için analiz yapıldığında elde edilen S/N grafiği Şekil 3.38.'deki gibidir.

BULANIKLIK GİDERİMİ İÇİN



Şekil 3.38. Grafit Elektrotla EF Çalışmasında Bulanıklık Giderimi için S/N grafiği (II. aşama deney)

Bulanıklık verileri için S/N grafikleri incelendiğinde en uygun koşulların akım şiddeti için (AŞ) 3. parametrik düzey (100 mA); başlangıç atıksu konsantrasyonu (C_o) için en uygun koşulun 3. parametrik düzey (C_o/4); hava akış hızı için (Q_h) en uygun koşulun 1. parametrik düzey (0.1 L/dak) olduğu belirlenmiştir.

Belirlenen bu optimum deney koşulları için ANOVA analizi yapıldığında grafit katot materyal ile oksijensiz ortamda bulanıklık giderimi çalışmasında her bir parametre için katkı yüzdeleri Tablo 3.40.'da gibidir.

Tablo 3.40. Grafit katotla oksijensiz ortamda EF çalışmasında bulanıklık giderimi için parametrelerin katkı yüzdeleri

Parametre	Birimi	Katkı Oranı (%)
AŞ	mA	8
C_o	-	80,8
Q_h	L/dak	1,5
Hata	-	5,1

Bulanıklık giderimi için EF sisteminde en etkili parametre yine her zamanki gibi başlangıç

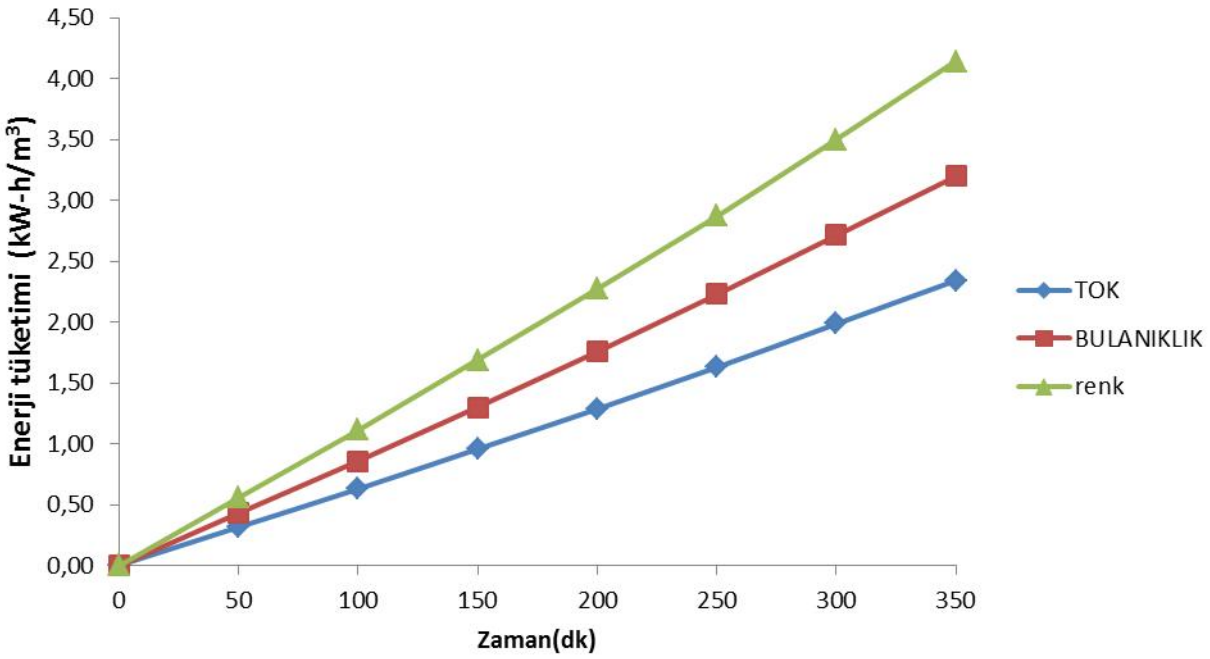
atıksu konsantrasyonudur (Katkı payı %52,1). Bunu %22,2'lik yüzde ile azot gazı debisi ve yalnızca %0,2 'lik payla akım şiddeti izlemektedir.

Belirlenen optimum deney şartları için tahmin edilen ve gözlemlenen bulanıklık giderim verimleri ise Tablo 3.41. 'daki gibidir.

Tablo 3.41. Grafit katotla oksijensiz ortamda yürütülen denemelerde bulanıklık giderimi için belirlenen en uygun koşullar

Perf. Kriteri	AŞ (mA)		C_o		Q_h (L/dak)		Gözlenen (%)	Tahmin edilen (%)	Güven Aralığı (%)
	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri			
Bulanıklık	3	100	3	$C_o/4$	1	0,1	89,12	95,78	74,12 - 100

Tüm performans kriterleri için deneysel olarak bulunan (gözlemlenen) sonuçlar belirtilen güven aralığında kalmaktadır. Elde edilen sonuçlar ve Taguchi optimizasyon metodu ile tahmin edilen sonuçların tutarlı olması sistemimizin çalışıyor olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca tüm optimum koşullar için tüketilen enerji miktarları Şekil 3.39.'de verilmektedir.



Şekil 3.39. Grafit Elektrot ile II. Aşama Deneylerde Elde Edilen Optimum Koşullarda Enerji Tüketimi

3.3.2. Karbon Keçe Katoda Ait II. aşama Deney Sonuçları

Çalışmanın bu bölümünde ise atıksu ortamından elektroliz süresi boyunca Taguchi deneysel matrisi ile planlanmış hava akış hızlarına eşdeğer debide N_2 gazı geçirilmek suretiyle ortamdan mevcut O_2 sıyrılmış ve O_2'nin katodik olarak indirgenmesi sayesinde H_2O_2 üretimi sonlandırılmıştır. Burada amaç Fenton reaktiflerinden birisi olan H_2O_2'nin ortamda yokluğu halinde elde edilecek renk, bulanıklık ve TOK giderimlerinin I. aşama deney sonuçları ile karşılaştırılarak aradaki farkın yorumlanmasıdır.

II. aşama deneylerde deneysel prosedür I. aşama deneylerle aynı olup yalnızca ortamdan kuru hava yerine N_2 gazı geçirilmesidir. Karbon keçe katot materyali için elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir.

Çalışmada deneysel parametreler için düzeyler karbon keçe katotla yapılan I. aşama (oksijenli) deneylerde kullanılan düzeylerle eşdeğerdir. Buna göre çalışmada kullanılan proses değişkenleri ve bunların parametrik seviyeleri Tablo 3.42.'de verildiği gibidir.

Tablo 3.42. Deneysel çalışmalarda kullanılan parametrik değerler

Faktörler	**Düzeyler**		
	1	**2**	**3**
A: Akım şiddeti (mA)	80	90	100
B: Başlangıç atıksu konsantrasyonu (C_o) (mg/L)	C_o	$\frac{C_o}{2}$	$\frac{C_o}{4}$
C: Gaz Akış Hızı (L/dak) (Azot Gazı için)	0.1	0.3	0.5

Tablo 3.42.'da verilen parametrik değerlere göre oksijensiz ortamda yürütülen deney sonuçları Tablo 3.43.'de iki tekrarlı olarak sunulmaktadır.

Tablo 3.43. Karbon keçe katotla Taguchi ortogonal dizisine (L_9) göre yürütülen II. aşama deney sonuçları

Deney No	AŞ	C_o	Q_{N2}	Renk Giderimi (%)		TOK Giderimi (%)		Bulanıklık Giderimi (%)	
				1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
1	1	1	1	64,52	63,59	33,01	34,77	16,25	15,44
2	1	2	2	93,43	99,12	48,83	49,04	10,23	11,01
3	1	3	3	100,00	98,25	62,99	60,47	4,20	5,14
4	2	1	2	35,27	35,86	50,53	50,64	16,54	16,46
5	2	2	3	97,17	99,24	61,55	61,14	11,92	12,03
6	2	3	1	100,00	100,00	63,69	61,77	1,82	1,83
7	3	1	3	67,77	66,16	51,68	51,32	8,20	8,11
8	3	2	1	97,98	96,26	54,59	55,97	6,29	6,42
9	3	3	2	98,98	99,01	66,57	66,96	11,04	10,90

AŞ: Akım şiddeti (mA)

C_o: Atıksu konsantrasyonu (birimsiz)

Q_h: N_2 gazı akış hızı (L/dak)

Ayrıca karbon keçe katot materyali ile gerçekleştirilen II. aşama deneylere ilişkin detaylı veriler Tablo 3.44.'de yer almaktadır.

Tablo 3.44. Karbon keçe katotla Taguchi ortogonal dizisine (L_9) göre yürütülen II. aşama deney sonuçları (detaylı)

	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
DENEY NO 1	Başlangıç	3,00	3,00	8,64	8,66	7,01	8,66	1,116	1,104	571,68	663,00	96,0	237,0
	50	5,41	4,91	8,60	8,70	0,74	0,69	3,300	0,750	513,72	551,04	150,0	201,0
	100	6,34	5,39	9,02	8,71	0,31	0,47	1,014	0,510	497,46	551,46	180,0	210,6
	150	6,58	6,07	8,76	8,77	0,12	0,22	0,984	0,474	491,88	523,50	155,4	228,6
	200	6,69	6,92	8,76	8,74	0,12	0,14	0,840	0,456	495,72	485,34	171,6	212,4
	250	7,24	7,41	8,81	8,41	0,11	0,11	0,780	0,408	463,44	451,92	233,4	233,4
	300	7,49	7,57	8,82	8,43	0,13	0,13	0,732	0,414	438,66	447,60	105,6	231,0
	350	7,89	7,44	8,93	8,40	0,10	0,13	0,594	0,414	392,70	438,84	93,6	205,2
	400	7,23	7,17	9,03	9,00	0,08	0,07	0,396	0,402	382,98	432,48	80,4	200,4

	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
DENEY NO 2	Başlangıç	3,00	3,00	5,56	4,56	7,21	6,98	1,188	0,684	267,60	322,74	264,0	136,2
	50	4,76	6,59	5,41	5,34	0,94	0,13	0,528	0,582	246,48	313,08	263,4	131,4
	100	6,49	7,21	5,48	5,37	0,24	0,11	0,468	0,408	235,74	300,18	265,2	147,0
	150	7,42	7,36	5,54	5,40	0,11	0,14	0,396	0,414	240,78	300,60	261,6	146,4
	200	7,86	7,49	5,44	5,45	0,13	0,17	0,396	3,840	234,78	104,58	258,6	151,8
	250	7,44	7,96	5,55	5,39	0,11	0,13	3,120	0,372	219,84	267,54	263,4	150,6
	300	7,00	7,46	5,47	5,34	0,11	0,14	0,174	3,480	189,60	241,08	252,6	134,4
	350	7,49	7,61	5,51	5,44	0,13	0,12	0,114	0,480	180,54	204,30	243,0	147,6
	400	6,95	7,69	5,39	5,50	0,04	0,11	0,078	0,006	136,92	164,46	237,0	121,2

DENEY NO 3	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
	Başlangıç	3,00	3,00	2,89	4,14	4,65	5,14	0,306	0,342	166,02	151,62	199,8	256,8
	50	6,69	6,05	2,88	2,96	0,28	0,59	0,294	2,040	160,26	129,42	240,6	255,6
	100	8,25	6,17	2,81	2,96	0,21	0,48	0,210	0,186	148,56	113,94	195,6	253,8
	150	9,49	6,44	2,84	2,91	0,19	0,28	0,180	0,168	142,32	99,42	190,8	255,0
	200	7,80	7,24	2,52	2,93	0,11	0,13	0,018	0,018	81,42	83,94	200,4	249,6
	250	7,80	7,49	2,50	2,94	0,12	0,12	0,006	0,018	69,42	76,02	189,0	297,6
	300	7,84	7,81	2,51	2,84	0,14	0,14	0,018	0,006	68,94	68,40	196,8	244,8
	350	8,32	7,26	2,54	2,87	0,09	0,11	0,000	0,006	62,04	65,76	200,4	243,6
	400	7,59	7,56	2,54	2,96	0,08	0,09	0,000	0,006	61,44	59,94	191,4	243,6

DENEY NO 4	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
	Başlangıç	3,00	3,00	9,62	8,84	2,94	7,18	1,344	1,188	590,58	462,54	243,0	196,8
	50	3,46	4,00	9,41	8,71	0,20	0,95	1,224	1,128	547,92	456,60	293,4	189,6
	100	4,56	6,47	9,34	8,60	0,11	0,32	0,900	1,080	535,50	421,80	273,6	185,4
	150	6,52	7,00	9,48	8,54	0,10	0,10	0,894	0,972	524,70	395,40	282,0	183,0
	200	7,41	7,21	8,94	8,60	0,12	0,11	0,870	0,900	468,00	355,80	249,6	180,6
	250	7,38	8,25	8,83	8,71	0,06	0,12	0,924	6,858	398,40	348,60	231,6	177,0
	300	7,32	8,01	8,84	8,65	0,07	0,13	0,894	0,936	321,36	312,00	225,0	165,6
	350	7,49	8,89	8,94	8,60	0,04	0,09	0,936	0,870	300,60	261,00	236,4	171,6
	400	7,94	7,21	8,94	8,59	0,06	0,12	0,870	0,762	292,14	228,30	202,8	164,4

DENEY NO 5	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
	Başlangıç	3,00	3,00	6,97	8,43	7,86	8,44	0,636	0,792	380,40	284,58	221,4	189,6
	50	4,85	4,41	5,70	7,61	0,47	0,30	0,294	0,720	348,84	256,50	214,2	261,6
	100	5,86	5,84	5,76	7,65	0,19	0,24	0,234	0,498	330,36	219,96	226,8	206,4
	150	7,09	7,00	5,81	7,64	0,14	0,19	0,252	0,516	305,52	214,02	229,2	244,8
	200	7,31	7,45	5,86	7,78	0,10	0,12	0,084	0,012	265,26	214,02	222,6	24,3
	250	7,54	7,84	5,86	7,79	0,20	0,11	0,078	0,012	226,26	129,60	218,4	271,2
	300	7,49	7,94	5,69	7,65	0,07	0,14	0,084	0,012	191,46	124,80	227,4	178,8
	350	8,01	7,21	5,66	7,77	0,01	0,11	0,048	0,006	170,22	118,20	200,4	172,8
	400	7,52	7,14	5,69	7,64	0,01	0,09	0,018	0,006	146,28	110,58	195,0	166,8

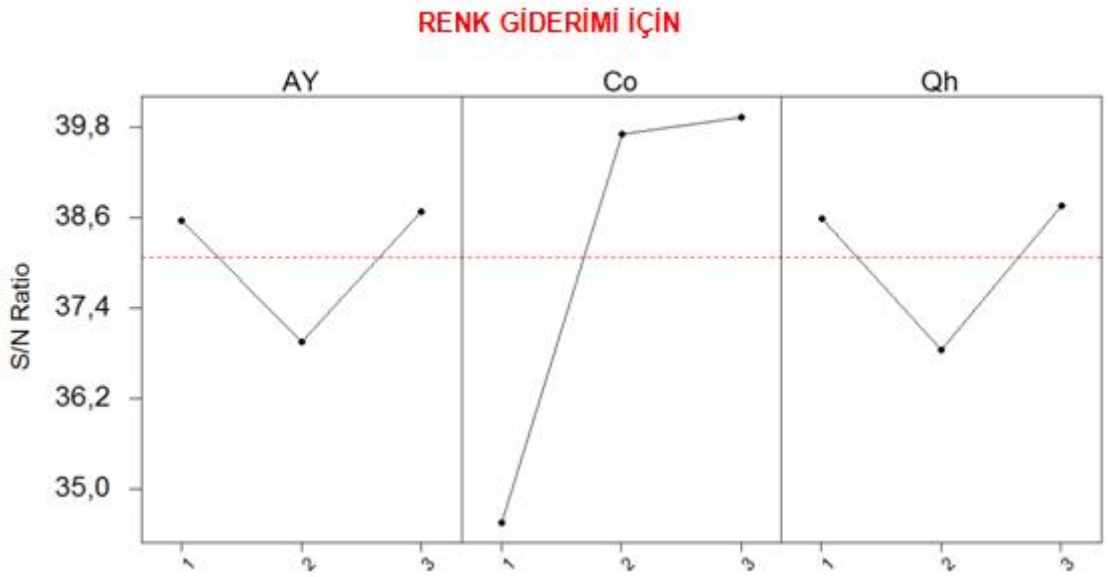
DENEY NO 6	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
	Başlangıç	3,00	3,00	3,87	3,96	1,42	6,76	0,318	0,366	161,76	138,12	197,4	262,8
	50	4,69	4,97	3,67	3,44	0,20	0,19	0,156	0,336	136,38	119,10	207,0	267,6
	100	5,93	5,71	3,70	3,01	0,12	0,14	0,168	0,246	120,48	94,98	219,0	288,0
	150	6,41	6,74	3,71	3,04	0,10	0,13	0,180	0,126	129,24	72,12	198,6	297,0
	200	6,72	7,11	3,71	311,00	0,11	0,11	0,006	0,060	90,00	54,89	197,4	285,6
	250	6,80	7,69	3,67	3,05	0,10	0,14	0,006	0,006	76,20	52,71	196,2	247,8
	300	6,90	7,64	3,67	3,11	0,10	0,16	0,006	0,006	60,72	52,83	200,4	279,6
	350	7,43	8,03	3,64	3,00	0,07	0,11	0,000	0,006	62,28	53,01	197,4	267,0
	400	7,49	8,04	3,68	2,80	0,05	0,01	0,000	0,000	58,74	52,80	193,8	258,0

DENEY NO 7	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
	Başlangıç	3,00	3,00	11,20	15,60	6,04	9,84	1,266	2,376	599,58	636,00	219,6	318,0
	50	3,55	4,24	8,37	10,34	0,49	0,30	0,894	2,076	531,96	588,90	199,2	306,0
	100	4,69	5,21	8,94	10,14	0,14	0,19	0,732	1,542	507,90	569,16	200,4	315,6
	150	6,41	6,01	8,47	10,09	0,12	0,11	0,570	1,110	505,74	525,36	213,6	319,2
	200	6,91	6,71	8,39	10,11	0,14	0,10	4,560	0,942	473,82	483,66	225,6	297,6
	250	7,02	6,44	8,41	10,41	0,10	0,14	4,920	0,888	385,44	468,00	207,6	299,4
	300	7,21	6,91	8,45	10,14	0,11	0,11	0,456	0,834	324,60	427,38	214,8	294,6
	350	7,45	6,82	8,46	9,96	0,09	0,17	0,438	0,810	300,60	361,08	203,4	291,6
	400	7,91	7,06	8,45	9,71	0,09	0,09	0,408	0,804	289,74	309,60	201,6	292,2

DENEY NO 8	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
	Başlangıç	3,00	3,00	5,74	11,22	1,97	1,72	0,594	1,122	293,34	321,60	181,2	280,2
	50	5,65	5,44	4,91	8,94	0,49	0,69	0,468	1,074	238,44	309,60	174,0	233,4
	100	7,24	6,51	5,48	8,86	0,19	0,05	0,336	1,110	240,00	301,80	174,0	270,6
	150	8,21	7,41	5,49	8,89	0,21	0,30	0,312	0,846	196,80	294,00	177,6	261,6
	200	8,98	7,39	5,41	8,76	0,12	0,11	1,560	0,828	170,82	280,80	189,0	275,4
	250	8,13	7,28	5,43	7,67	0,12	0,08	0,156	0,456	170,52	264,60	207,6	270,6
	300	8,29	7,68	5,44	8,90	0,13	0,12	0,036	0,216	147,60	215,40	206,4	265,2
	350	8,15	7,59	5,46	8,90	0,19	0,08	0,030	0,258	143,40	171,00	172,2	264,6
	400	8,51	7,51	5,41	8,91	0,09	0,07	0,012	0,042	133,20	141,60	169,8	262,2

DENEY NO 9	Süre (dakika)	pH		İletkenlik		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
	Başlangıç	3,00	3,00	4,94	5,19	1,69	1,62	0,588	0,606	146,64	171,60	179,4	187,2
	50	6,58	5,94	4,06	4,91	0,15	0,20	0,534	0,516	124,20	158,40	190,2	205,2
	100	7,94	7,74	4,02	4,79	0,11	0,14	0,210	0,360	119,94	148,80	168,6	189,6
	150	8,46	7,49	4,06	4,81	0,10	0,11	0,300	0,180	88,14	133,80	166,2	185,4
	200	7,83	7,79	3,98	4,99	0,10	0,12	0,060	0,240	73,68	153,60	165,6	177,6
	250	7,53	8,08	3,88	4,99	0,10	0,15	0,060	0,240	55,92	129,60	173,4	171,6
	300	7,11	8,24	3,86	4,84	0,13	0,14	0,060	0,240	49,02	106,80	177,6	181,2
	350	7,42	8,64	3,96	4,80	0,09	0,12	0,060	0,060	52,08	92,40	163,8	173,4
	400	8,89	8,94	3,61	4,71	0,10	0,08	0,006	0,006	49,02	56,70	159,6	166,8

Tablo 3.43'de 2 tekrarlı olarak verilen sonuçlara göre S/N grafiği oluşturulduğunda (Şekil 3.40.) yapılan denemelere göre karbon keçe katot ile renk giderimi için en uygun koşulların akım şiddeti için (AŞ) 3. parametrik düzey (100 mA); başlangıç atıksu konsantrasyonu (C_o) için en uygun koşulun 3. parametrik düzey (C_o/4); azot gazı akış hızı için (Q_{N2}) en uygun koşulun 3. parametrik düzey (0,5 L/dak) olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.40. Karbon keçe elektrotla EF çalışmasında renk giderimi için S/N grafiği (II. aşama deney)

Belirlenen bu optimum deney koşulları için ANOVA analizi yapıldığında karbon keçe katot materyal ile II. aşama renk giderimi çalışmasında her bir parametre için katkı yüzdeleri aşağıdaki gibidir.

Tablo 3.45. Karbon keçe katot materyal ile EF çalışmasında II. aşama renk giderimi için parametrelerin katkı yüzdeleri

Parametre	**Birimi**	**Katkı Oranı (%)**
AŞ	mA	2,8
C_o	-	84,4
Q_{N2}	L/dak	4,3
Hata	-	4,5

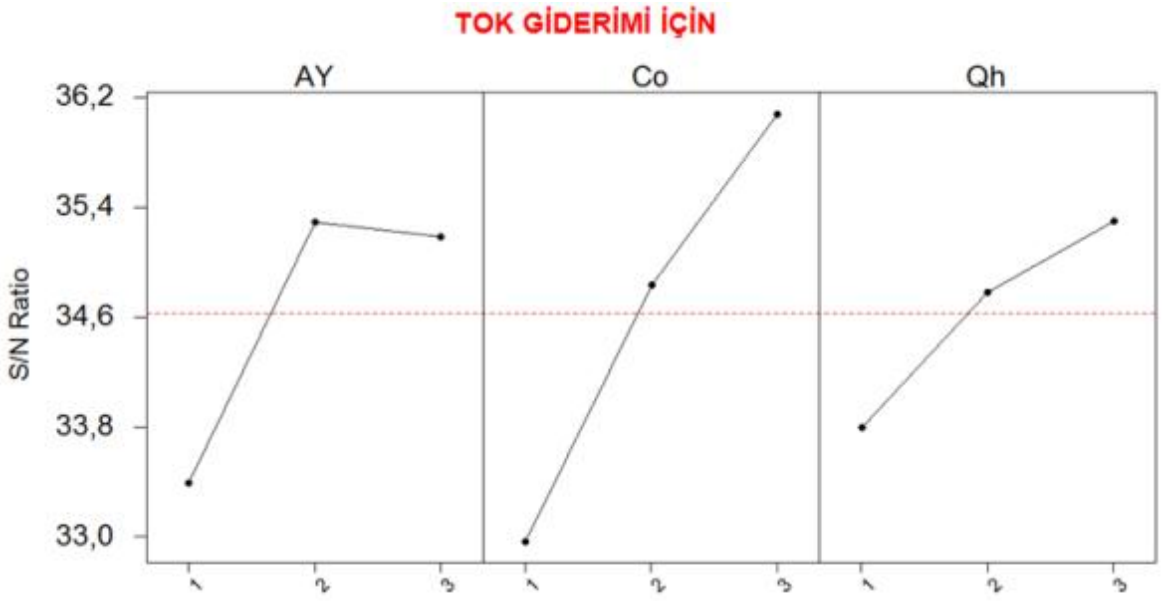
Tablo 3.45.'de görüldüğü gibi renk giderimi için sistemde en baskın parametre %84,4 payla

başlangıç atıksu konsantrasyonudur. Bunu %4,3'lük yüzde ile azot gaz debisi ve %2,8'lik payla hava akış hızı izlemektedir. Belirlenen optimum deney şartları için tahmin edilen ve gözlemlenen giderim verimi ise Tablo 3.46'daki gibidir.

Tablo 3.46. Karbon keçe katotla oksijensiz ortamda yürütülen denemelerde renk giderimi için belirlenen en uygun koşullar

Performans Kriteri	AŞ (mA)		C_o		Q_{N2} (L/dak)		Gözlenen (%)	Tahmin edilen (%)	Güven Aralığı (%)
	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri			
Renk	3	100	3	$C_o/4$	3	0,5	97,80	99,78	86,38 - 100

Karbon keçe katotla oksijensiz ortamda renk verileri için sistem optimizasyonu tamamlandıktan sonra ikinci performans kriteri olan TOK için sistem optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla deneylerle ulaşılan veriler için analiz yapıldığında elde edilen S/N grafiği Şekil 3.41.'de verilmektedir.



Şekil 3.41. Karbon keçe elektrotla EF çalışmasında TOK giderimi için S/N grafiği (II. Aşama deney)

TOK giderimi için S/N grafikleri incelendiğinde en uygun koşulların akım şiddeti için (AŞ) 2. parametrik düzey (80 mA); başlangıç atıksu konsantrasyonu (C_o) için en uygun koşulun 3. parametrik düzey ($C_o/4$); hava akış hızı için (Q_{N2}) en uygun koşulun 3. parametrik düzey (0,5 L/dak) olduğu belirlenmiştir.

Belirlenen bu optimum deney koşulları için ANOVA analizi yapıldığında karbon keçe katot materyal ile TOK giderimi çalışmasında her bir parametre için katkı yüzdeleri Tablo 3.47.'deki gibidir.

Tablo 3.47. Karbon keçe katot materyal ile EF çalışmasında II. aşama TOK giderimi için parametrelerin katkı yüzdeleri

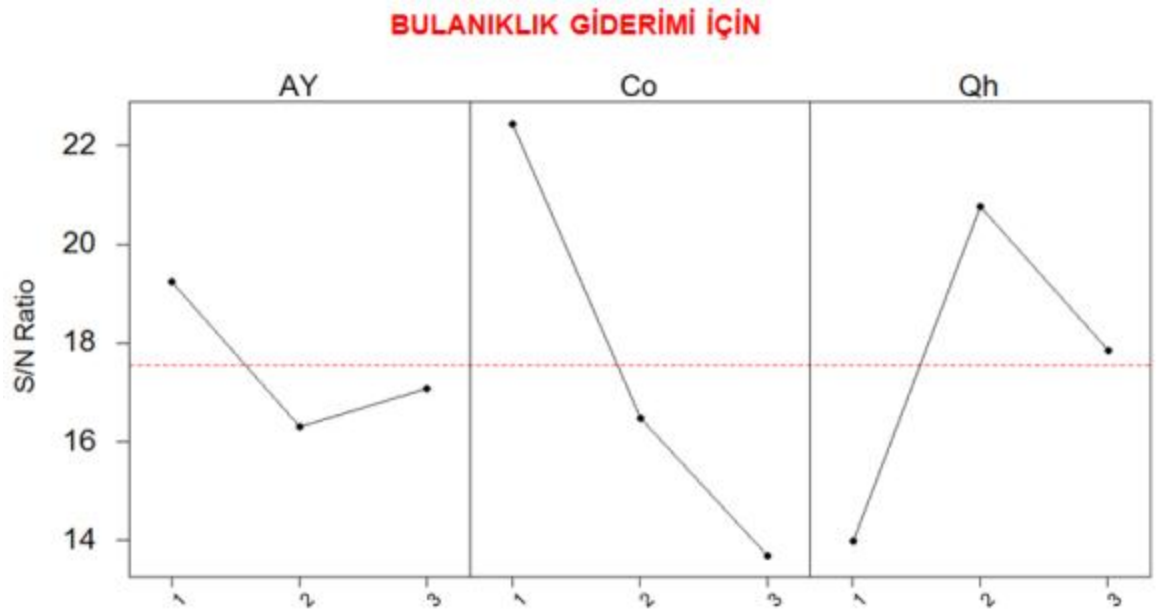
Parametre	**Birimi**	**Katkı Oranı (%)**
AŞ	mA	24,4
C_o	-	62,5
Q_{N2}	L/dak	11,3
Hata	-	1

Tablo 3.47.'de görüldüğü gibi TOK giderimi için sistemde en baskın parametre %62,5 payla başlangıç atıksu konsantrasyonudur. Bunu %24,4'lük yüzde ile akım şiddeti ve %11,3'lük payla azot gazı debisi izlemektedir. Belirlenen optimum deney şartları için tahmin edilen ve gözlemlenen giderim verimi ise Tablo 3.48'deki gibidir.

Tablo 3.48. Karbon keçe katotla oksijensiz ortamda yürütülen denemelerde TOK giderimi için belirlenen en uygun koşullar

Performans Kriteri	**AŞ (mA)**		**C_o**		**Q_{N2} (L/dak)**		**Gözlenen (%)**	**Tahmin edilen (%)**	**Güven Aralığı (%)**
	Düzey	**Değeri**	**Düzey**	**Değeri**	**Düzey**	**Değeri**			
TOK	2	90	3	$C_o/4$	3	0,5	63,20	74,28	60,09 – 88,47

Karbon keçe katotla oksijensiz ortamda TOK verileri için sistem optimizasyonu tamamlandıktan sonra diğer performans kriteri olan bulanıklık için sistem optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla deneylerle ulaşılan veriler için analiz yapıldığında elde edilen S/N grafiği Şekil 3.42'deki gibidir.



Şekil 3.42. Karbon keçe elektrotla EF çalışmasında bulanıklık giderimi için S/N grafiği (II. aşama deney)

Bulanıklık verileri için S/N grafikleri incelendiğinde en uygun koşulların akım şiddeti için (AŞ) 1. parametrik düzey (80 mA); başlangıç atıksu konsantrasyonu (C_o) için en uygun koşulun 1. parametrik düzey (C_o); hava akış hızı için (Q_h) en uygun koşulun 2. parametrik düzey (0,3 L/dak) olduğu belirlenmiştir.

Belirlenen bu optimum deney koşulları için ANOVA analizi yapıldığında karbon keçe katot materyal ile oksijensiz ortamda bulanıklık giderimi çalışmasında her bir parametre için katkı yüzdeleri Tablo 3.49.'daki gibidir.

Tablo 3.49. Karbon keçe katotla oksijensiz ortamda EF çalışmasında bulanıklık giderimi için parametrelerin katkı yüzdeleri

Parametre	**Birimi**	**Katkı Oranı (%)**
AŞ	mA	0
C_o	-	41,8
Q_{N2}	L/dak	6,7
Hata	-	27,5

Bulanıklık giderimi için EF sisteminde en etkili parametre yine her zamanki gibi başlangıç

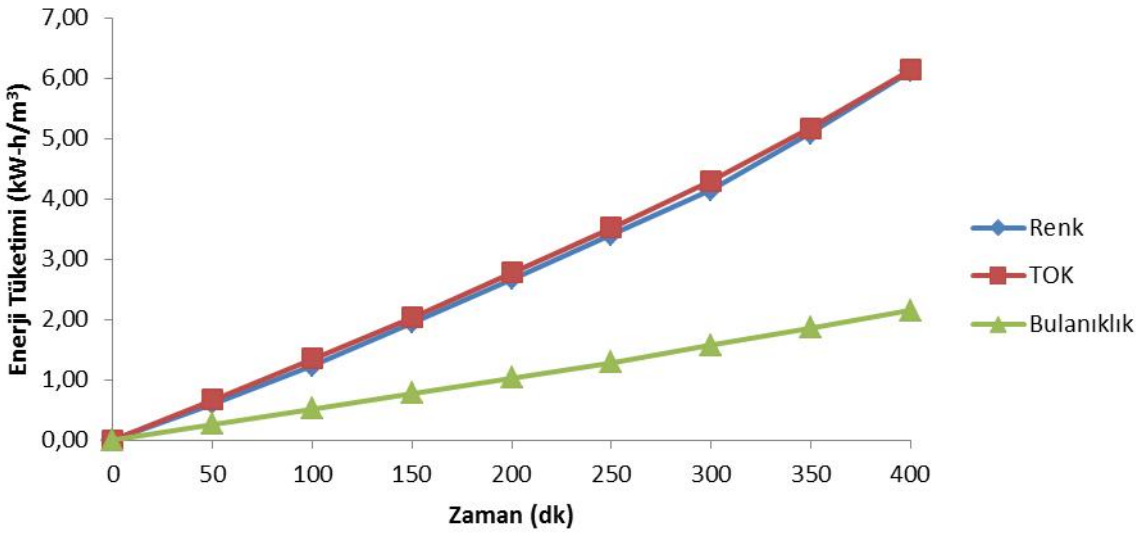
atıksu konsantrasyonudur (%41,8). Bunu %6,7'lik yüzde ile azot gazı debisi izlemektedir. Diğer taraftan bu çalışmada akım şiddetine ait herhangi bir katkı yüzdesi hesaplanamamaktadır.

Belirlenen optimum deney şartları için tahmin edilen ve gözlemlenen bulanıklık giderim verimleri ise Tablo 3.50.'deki gibidir.

Tablo 3.50. Karbon keçe katotla oksijensiz ortamda yürütülen denemelerde bulanıklık giderimi için belirlenen en uygun koşullar

Performans Kriteri	AŞ (mA)		C_o		Q_{N2} (L/dak)		Gözlenen (%)	Tahmin edilen (%)	Güven Aralığı (%)
	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri			
Bulanıklık	1	80	1	C_o	2	0,3	32,19	22,04	15,11 – 28,97

Elde edilen sonuçlar ve Taguchi optimizasyon metodu ile tahmin edilen sonuçların tutarlı olması sistemimizin çalışıyor olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca tüm optimum koşullar için tüketilen enerji miktarları Şekil 3.43.'de verilmektedir.



Şekil 3.43. Karbon keçe elektrot ile II. aşama deneylerde elde edilen optimum koşullarda enerji tüketimleri

3.3.3. Karbon Kumaş Katoda Ait II. Aşama Deney Sonuçları

Çalışmada deneysel parametreler için düzeyler karbon kumaş katotla yapılan I. aşama (oksijenli) deneylerde kullanılan düzeylerle eşdeğerdir. Buna göre çalışmada kullanılan

proses değişkenleri ve bunların parametrik seviyeleri Tablo 3.51'de verildiği gibidir.

Tablo 3.51. Deneysel çalışmalarda kullanılan parametrik değerler

Faktörler	Düzeyler		
	1	2	3
A: Akım şiddeti (mA)	80	90	100
B: Başlangıç atıksu konsantrasyonu (C_o) (mg/L)	C_o	$\frac{C_o}{2}$	$\frac{C_o}{4}$
C: Gaz Akış Hızı (L/dak) (Azot Gazı için)	0,1	0,3	0,5

Tablo 3.51.'de verilen parametrik değerlere göre oksijensiz ortamda yürütülen deney sonuçları Tablo 3.52.'de iki tekrarlı olarak sunulmaktadır.

Tablo 3.52. Karbon kumaş katotla Taguchi ortogonal dizisine (L_9) göre yürütülen II. aşama deney sonuçları

Deney No	AŞ	C_o	Q_{N2}	Renk Giderimi (%)		TOK Giderimi (%)		Bulanıklık Giderimi (%)	
				1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
1	1	1	1	45,00	46,73	20,93	25,93	53,04	52,40
2	1	2	2	44,55	44,40	22,71	17,15	17,06	15,45
3	1	3	3	97,22	98,29	61,01	56,63	17,08	19,02
4	2	1	2	50,12	47,59	13,35	11,27	30,23	31,69
5	2	2	3	86,60	84,80	22,86	26,65	13,84	17,66
6	2	3	1	98,13	97,52	46,78	49,15	8,22	9,20
7	3	1	3	73,93	74,38	34,11	30,60	51,26	51,40
8	3	2	1	85,35	84,29	51,67	55,37	37,10	35,25
9	3	3	2	100,00	100,00	65,00	68,59	25,06	27,48

AŞ: Akım şiddeti (mA)

C_o: Atıksu konsantrasyonu (birimsiz)

Q_{N2}: N_2 gazı akış hızı (L/dak)

Ayrıca karbon kumaş katot materyali ile gerçekleştirilen II. aşama deneylere ilişkin detaylı veriler Tablo 3.53.'de yer almaktadır.

Tablo 3.53. Karbon kumaş katotla Taguchi ortogonal dizisine (L_9) göre yürütülen II. aşama deney sonuçları (detaylı)

	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
DENEY NO 1	Başlangıç	3,00	3,00	16,33	12,14	8,89	8,50	2,520	2,568	1164,00	1150,20	375,6	363,0
	50	4,17	3,84	12,04	11,90	0,60	0,58	2,412	2,214	1161,00	1125,60	306,6	355,2
	100	4,89	4,64	12,09	11,86	0,30	0,31	2,502	2,172	1142,40	1104,00	190,2	333,0
	150	6,03	6,01	9,58	11,95	0,48	0,58	2,322	2,166	1071,60	1015,80	201,6	99,0
	200	6,08	6,03	9,65	11,99	0,28	0,64	2,316	2,160	919,80	953,40	300,6	387,0
	250	6,07	6,07	9,73	12,08	0,11	0,15	1,962	2,094	879,60	919,80	186,6	433,2
	300	6,28	6,21	9,76	12,08	0,10	0,10	1,662	1,308	836,40	879,60	253,2	252,0
	350	6,45	6,44	9,71	12,04	0,12	0,14	1,626	1,368	819,60	808,80	253,8	226,8
	400	7,11	6,93	9,64	11,98	0,14	0,11	1,386	1,368	789,60	804,00	176,4	172,8

	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
DENEY NO 2	Başlangıç	3,00	3,00	8,28	7,99	7,65	4,20	1,266	1,554	628,20	464,94	256,8	264,0
	50	4,96	4,80	5,98	5,41	0,20	0,22	1,272	1,290	609,60	476,76	241,2	258,6
	100	5,49	6,84	5,81	5,24	0,21	0,19	1,080	1,146	597,60	441,60	223,2	217,8
	150	6,71	7,62	6,06	5,39	0,14	0,10	0,966	0,990	588,66	435,36	225,6	198,0
	200	7,34	7,96	60,10	5,31	0,10	0,10	0,966	0,984	593,34	412,50	231,6	190,2
	250	7,49	7,36	6,07	5,30	0,09	0,08	0,900	0,888	573,30	407,04	244,2	196,2
	300	7,63	7,49	6,04	5,39	0,08	0,06	0,822	0,876	562,56	398,88	268,2	190,8
	350	7,57	8,54	6,13	5,47	0,03	0,04	0,714	0,864	548,58	358,68	243,0	187,2
	400	7,55	8,36	6,13	5,52	0,06	0,04	0,702	0,864	485,52	354,18	213,0	223,2

DENEY NO 3	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
	Başlangıç	3,00	3,00	4,71	3,56	7,11	2,64	0,648	0,702	302,52	282,24	242,4	268,2
	50	6,74	6,47	3,20	3,24	0,26	0,21	0,594	0,678	281,28	318,12	226,8	247,2
	100	6,91	7,39	3,24	3,29	0,14	0,16	0,492	0,558	269,40	285,36	219,6	229,2
	150	7,44	7,80	3,26	3,09	0,16	0,09	0,102	0,282	237,36	273,66	237,6	252,6
	200	7,82	7,96	3,22	3,11	0,18	0,10	0,066	0,168	189,54	144,54	200,4	240,6
	250	7,94	8,76	3,20	3,10	0,11	0,21	0,012	1,800	165,96	114,84	205,8	233,4
	300	8,11	8,94	3,20	3,15	0,09	14,00	0,018	0,084	162,66	110,52	208,8	200,4
	350	8,00	8,34	3,22	2,98	0,08	0,04	0,012	0,180	157,86	111,42	219,6	202,2
	400	8,23	8,44	3,14	3,01	0,04	0,06	0,018	0,012	117,96	111,78	201,0	217,2

DENEY NO 4	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
	Başlangıç	3,00	3,00	16,51	15,17	8,81	4,61	2,538	2,370	1141,20	1288,80	315,6	365,4
	50	4,33	4,01	10,96	9,94	0,71	0,42	2,304	2,652	1120,20	1269,60	291,0	267,0
	100	5,01	5,17	10,96	9,62	0,31	0,37	1,962	2,136	1106,40	1206,00	259,8	361,2
	150	6,07	6,59	11,09	9,61	0,32	0,20	2,118	1,830	1078,20	1186,80	249,6	319,2
	200	6,05	6,71	11,16	9,61	0,13	0,14	1,518	1,782	1072,80	1171,80	273,6	308,4
	250	6,10	7,26	11,02	9,80	0,07	0,08	1,733	1,620	1044,60	1185,60	264,6	281,4
	300	6,96	7,44	11,20	9,76	0,06	0,06	1,266	3,300	1038,60	1137,60	247,2	295,2
	350	7,24	7,59	11,19	9,91	0,09	0,03	1,272	1,410	990,00	1114,80	240,6	273,6
	400	8,09	7,64	11,21	9,99	0,08	0,02	1,266	1,242	988,80	1103,40	220,2	249,6

DENEY NO 5	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
	Başlangıç	3,00	3,00	8,37	7,67	7,06	2,61	1,254	1,224	863,40	622,20	212,4	228,0
	50	5,68	5,22	5,45	7,24	0,20	0,31	1,038	1,188	854,40	604,80	178,8	233,4
	100	6,40	6,17	5,61	7,28	0,17	0,25	0,834	0,984	832,80	592,62	232,8	239,4
	150	7,60	7,39	5,63	7,31	0,12	0,10	0,702	0,804	783,60	568,74	159,6	222,6
	200	8,39	7,91	5,60	7,34	0,15	0,10	0,702	0,828	800,40	547,20	155,4	256,2
	250	8,27	7,97	5,65	7,35	0,14	0,04	0,078	0,264	750,60	525,48	163,8	234,0
	300	8,16	8,02	5,65	7,36	0,10	0,09	0,384	0,204	739,20	496,68	146,4	225,0
	350	8,01	7,76	5,62	7,36	0,04	0,04	0,156	0,198	738,60	417,42	175,2	126,0
	400	8,21	8,80	5,59	7,40	0,05	0,04	0,168	0,186	555,60	394,32	183,0	187,7

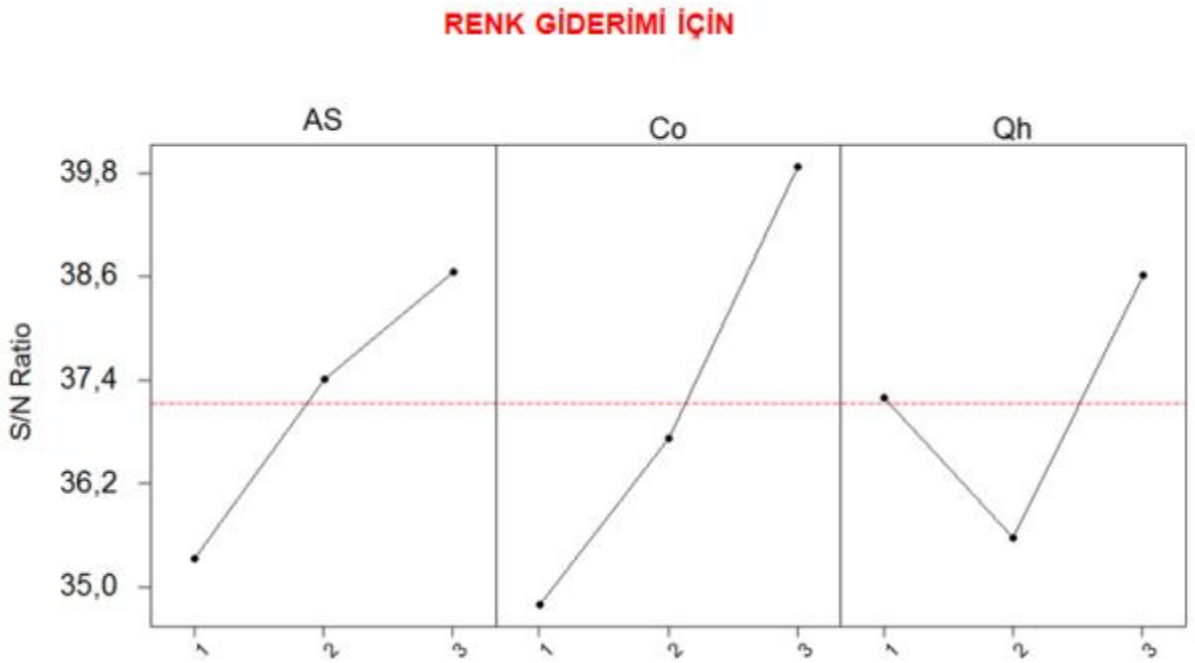
DENEY NO 6	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
	Başlangıç	3,00	3,00	4,50	4,20	6,70	5,40	0,642	0,726	277,32	330,36	219,0	255,0
	50	5,41	7,03	3,70	3,31	0,27	0,30	0,576	0,720	252,84	325,08	335,4	239,4
	100	7,37	7,49	3,65	3,29	0,21	0,21	0,498	0,552	226,02	261,30	227,4	237,0
	150	7,45	7,11	3,69	3,28	0,09	0,14	0,474	0,522	224,76	287,82	201,0	225,6
	200	7,65	8,31	3,61	3,30	0,17	0,09	0,498	0,462	206,28	225,84	242,4	201,0
	250	7,60	8,60	3,62	3,44	0,14	14,00	0,492	0,114	188,28	189,00	277,8	237,6
	300	7,68	9,70	3,64	3,19	0,11	0,06	0,408	0,042	159,00	179,88	224,4	197,4
	350	7,92	9,41	3,62	3,24	0,09	0,09	0,234	0,036	147,66	160,20	237,6	195,6
	400	8,71	7,48	3,62	3,02	0,07	0,08	0,012	0,018	124,38	152,28	201,0	231,5

DENEY NO 7	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
	Başlangıç	3,00	3,00	16,16	15,70	9,17	7,17	2,394	2,436	1185,60	1294,80	332,4	386,4
	50	4,93	4,26	9,76	9,86	0,22	0,17	1,890	2,292	1103,40	1232,40	264,0	370,8
	100	6,00	5,17	9,76	10,52	0,19	0,10	1,452	1,746	967,80	1199,40	242,4	286,2
	150	6,72	6,11	9,86	10,24	0,09	0,09	1,170	1,536	1023,60	1153,80	167,4	281,4
	200	6,96	6,84	9,84	10,21	0,04	0,11	1,200	1,218	957,60	1131,60	115,2	252,0
	250	7,48	7,12	9,88	10,17	0,07	0,10	1,128	1,230	942,60	1107,00	145,8	239,4
	300	7,98	7,41	9,98	10,19	0,06	0,11	0,942	1,164	789,00	1056,60	141,6	234,0
	350	7,52	7,63	9,91	10,21	0,09	0,09	0,606	1,026	787,20	951,00	159,0	246,0
	400	7,64	7,73	10,11	10,39	0,04	0,08	0,624	0,624	646,80	729,60	162,0	187,8

DENEY NO 8	Süre (dakika)	pH		İletkenlik (ms/cm)		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
	Başlangıç	3,00	3,00	8,80	8,18	8,42	6,23	1,188	1,260	566,10	646,80	297,6	292,8
	50	4,91	5,71	5,18	5,38	0,19	0,33	1,122	1,230	520,56	566,52	279,0	248,4
	100	6,11	6,74	5,19	5,29	0,09	0,17	0,774	1,254	505,62	517,44	292,2	294,6
	150	6,76	7,54	5,27	5,39	0,10	0,09	0,888	1,128	453,54	493,44	261,6	290,2
	200	6,46	7,96	5,40	5,40	0,18	14,00	0,684	1,026	467,34	435,24	285,6	281,4
	250	7,51	8,11	5,30	5,49	0,14	0,09	0,360	0,510	417,00	321,24	262,2	232,8
	300	7,92	8,06	5,35	5,49	0,19	10,00	0,246	0,246	331,02	294,36	240,0	225,0
	350	7,64	8,19	5,39	5,60	0,11	0,08	0,180	0,234	337,08	268,74	219,6	192,6
	400	7,07	8,11	5,41	5,83	0,08	0,06	0,174	0,198	235,74	254,52	187,2	189,6

DENEY NO 9	Süre (dakika)	pH		İletkenlik		Çözünmüş Oksijen (mg/L)		Renk (Abs)		Toplam Organik Karbon (mg/L)		Bulanıklık (NTU)	
		1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme	1. Deneme	2. Deneme
	Başlangıç	3,00	3,00	4,42	4,20	6,98	4,89	0,804	0,750	269,76	278,88	239,4	259,8
	50	6,41	7,23	4,38	4,30	0,21	0,17	0,564	0,696	205,44	261,60	204,6	246,0
	100	7,75	9,25	4,33	4,29	0,12	0,07	0,054	0,636	107,88	238,98	227,4	242,4
	150	7,41	8,21	4,44	4,31	0,10	0,07	0,048	0,174	101,58	162,18	143,4	237,0
	200	7,95	8,75	4,40	4,29	0,10	0,10	0,042	0,054	86,64	119,94	130,2	211,8
	250	8,01	8,91	4,34	4,28	0,09	0,15	0,000	0,042	77,22	91,26	141,6	220,2
	300	7,96	8,88	4,24	4,26	0,04	0,14	0,000	0,048	78,12	85,14	214,8	213,0
	350	8,86	9,27	4,30	4,26	0,06	0,11	0,000	0,036	79,50	83,76	207,6	204,0
	400	9,96	9,29	4,24	4,26	0,07	0,13	0,000	0,000	75,36	79,44	179,4	188,4

Tablo 3.52.'de 2 tekrarlı olarak verilen sonuçlara göre S/N grafiği oluşturulduğunda (Şekil 3.44) yapılan denemelere göre karbon kumaş katot ile renk giderimi için en uygun koşulların akım şiddeti için (AŞ) 3. parametrik düzey (100 mA); başlangıç atıksu konsantrasyonu (C_o) için en uygun koşulun 3. parametrik düzey ($C_o/4$); azot gazı akış hızı için (Q_{N2}) en uygun koşulun 3. parametrik düzey (0,5 L/dak) olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.44. Karbon kumaş elektrotla EF çalışmasında renk giderimi için S/N grafiği (II. aşama deney)

Belirlenen bu optimum deney koşulları için ANOVA analizi yapıldığında karbon kumaş katot materyal ile II. aşama renk giderimi çalışmasında her bir parametre için katkı yüzdeleri aşağıdaki gibidir.

Tablo 3.54. Karbon kumaş katot materyal ile EF çalışmasında II. aşama renk giderimi için parametrelerin katkı yüzdeleri

Parametre	**Birimi**	**Katkı Oranı (%)**
AŞ	mA	19,5
C_o	-	62,9
Q_{N2}	L/dak	15,7
Hata	-	1,0

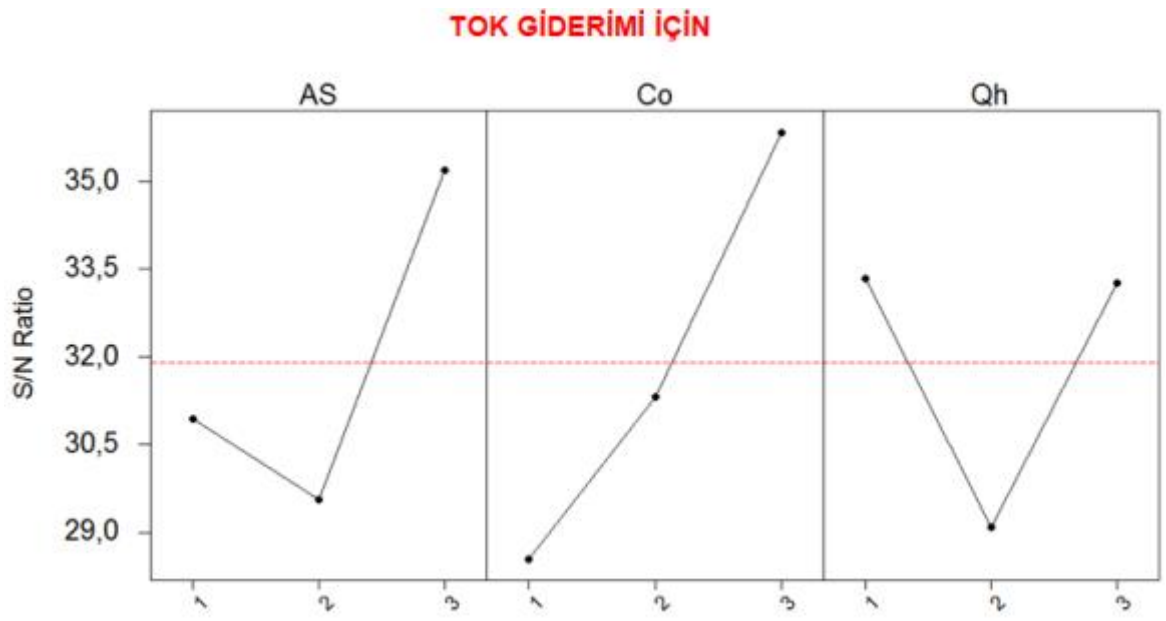
Tablo 3.54.'de görüldüğü gibi renk giderimi için sistemde en baskın parametre %62,9 payla

başlangıç atıksu konsantrasyonudur. Bunu %19,5'lik yüzde ile akım şiddeti ve %15,7'lik payla hava akış hızı izlemektedir. Belirlenen optimum deney şartları için tahmin edilen ve gözlemlenen giderim verimi ise Tablo 3.55.'deki gibidir.

Tablo 3.55. Karbon kumaş katotla oksijensiz ortamda yürütülen denemelerde renk giderimi için belirlenen en uygun koşullar

Performans Kriteri	AŞ (mA)		C_o		Q_{N2} (L/dak)		Gözlenen (%)	Tahmin edilen (%)	Güven Aralığı (%)
	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri			
Renk	3	100	3	$C_o/4$	3	0,5	100	99,91	93,48 - 100

Karbon kumaş katotla oksijensiz ortamda renk verileri için sistem optimizasyonu tamamlandıktan sonra ikinci performans kriteri olan TOK için sistem optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla deneylerle ulaşılan veriler için analiz yapıldığında elde edilen S/N grafiği Şekil 3.45.'de verilmektedir.



Şekil 3.45. Karbon kumaş elektrotla EF çalışmasında (II. aşama deney) TOK giderimi için S/N grafiği

TOK giderimi için S/N grafikleri incelendiğinde en uygun koşulların akım şiddeti için (AŞ) 3. parametrik düzey (100 mA); başlangıç atıksu konsantrasyonu (C_o) için en uygun koşulun 3. parametrik düzey ($C_o/4$); hava akış hızı için (Q_{N2}) en uygun koşulun 1. parametrik düzey (0,1 L/dak) olduğu belirlenmiştir.

Belirlenen bu optimum deney koşulları için ANOVA analizi yapıldığında karbon kumaş katot materyal ile TOK giderimi çalışmasında her bir parametre için katkı yüzdeleri Tablo 3.56.'deki gibidir.

Tablo 3.56. Karbon kumaş katot materyal ile EF çalışmasında II. aşama TOK giderimi için parametrelerin katkı yüzdeleri

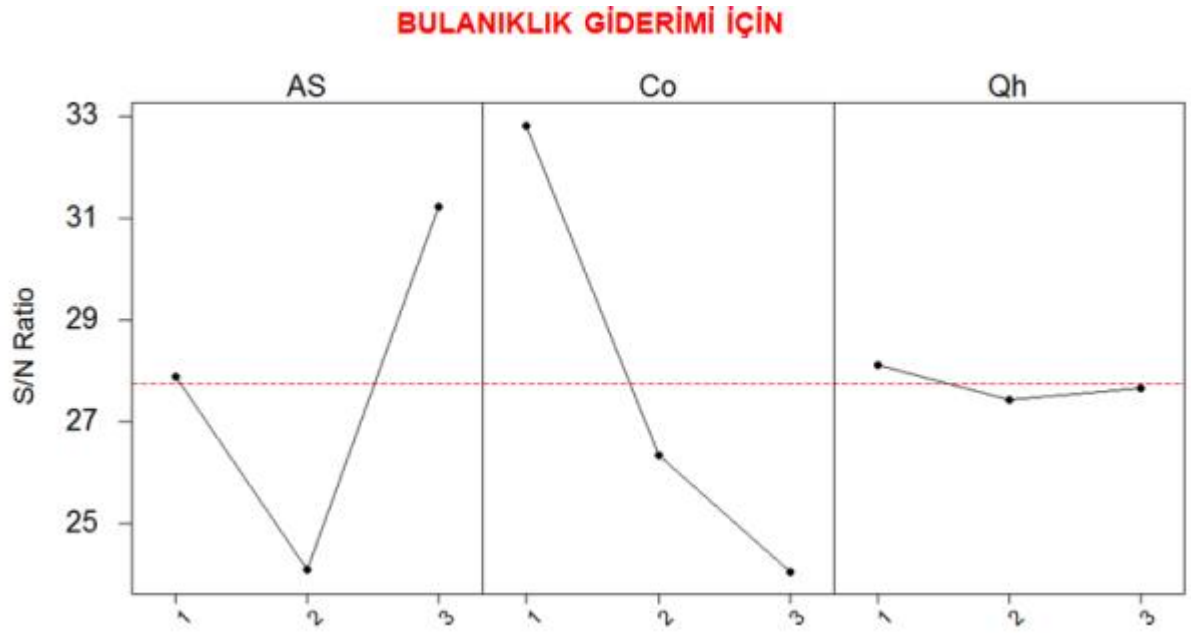
Parametre	Birimi	Katkı Oranı (%)
AŞ	mA	26,8
C_o	-	63,6
Q_{N2}	L/dak	3,0
Hata	-	3,5

Tablo 3.56.'de görüldüğü gibi TOK giderimi için sistemde en baskın parametre %63,6 payla başlangıç atıksu konsantrasyonudur. Bunu %26,8'lik yüzde ile akım şiddeti ve %3,0'lık payla azot gazı debisi (Q_{N2}) izlemektedir. Belirlenen optimum deney şartları için tahmin edilen ve gözlemlenen giderim verimi ise Tablo 3.57.'deki gibidir.

Tablo 3.57. Karbon kumaş katotla oksijensiz ortamda yürütülen denemelerde TOK giderimi için belirlenen en uygun koşullar

Performans Kriteri	AŞ (mA)		C_o		(Q_{N2}) (L/dak)		Gözlenen (%)	Tahmin edilen (%)	Güven Aralığı (%)
	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri			
TOK	3	100	3	$C_o/4$	1	0,1	66,80	76,11	66,14 – 86,08

Karbon kumaş katotla oksijensiz ortamda TOK verileri için sistem optimizasyonu tamamlandıktan sonra diğer performans kriteri olan bulanıklık için sistem optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla deneylerle ulaşılan veriler için analiz yapıldığında elde edilen S/N grafiği Şekil 3.46.'daki gibidir.



Şekil 3.46. Karbon kumaş elektrotla EF çalışmasında bulanıklık giderimi için S/N grafiği (II. Aşama deney)

Bulanıklık verileri için S/N grafikleri incelendiğinde en uygun koşulların akım şiddeti için (AŞ) 3. parametrik düzey (100 mA); başlangıç atıksu konsantrasyonu (C_o) için en uygun koşulun 1. parametrik düzey (C_o); hava akış hızı için (Q_{N2}) en uygun koşulun 1. parametrik düzey (0,1 L/dak) olduğu belirlenmiştir.

Belirlenen bu optimum deney koşulları için ANOVA analizi yapıldığında karbon kumaş katot materyal ile oksijensiz ortamda bulanıklık giderimi çalışmasında her bir parametre için katkı yüzdeleri Tablo 3.58.'deki gibidir.

Tablo 3.58. Karbon kumaş katotla oksijensiz ortamda EF çalışmasında bulanıklık giderimi için parametrelerin katkı yüzdeleri

Parametre	**Birimi**	**Katkı Oranı (%)**
AŞ	mA	27,9
C_o	-	62,8
(Q_{N2})	L/dak	4,3
Hata	-	2,7

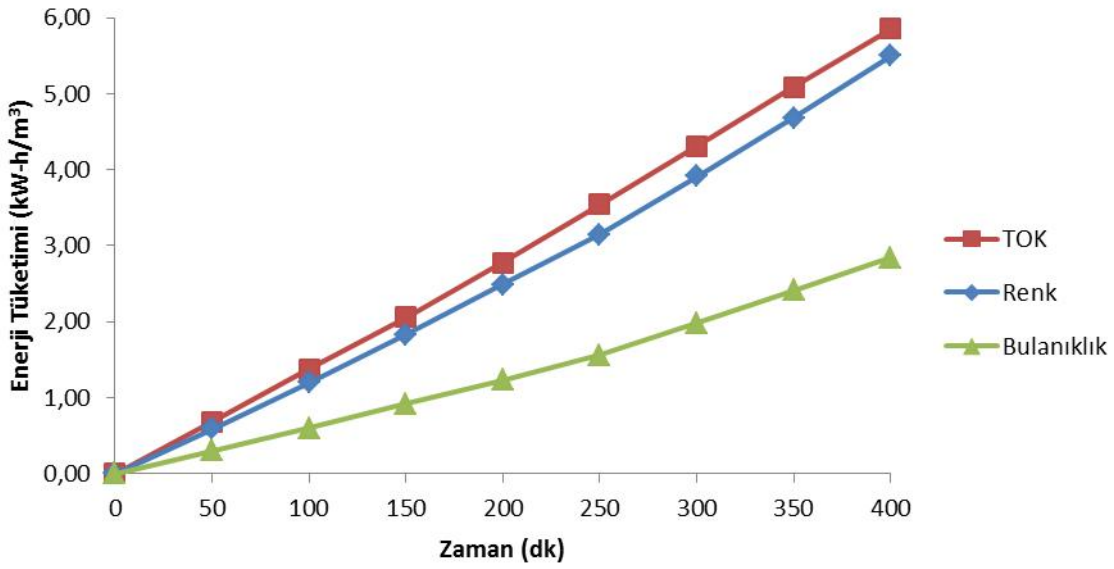
Bulanıklık giderimi için EF sisteminde en etkili parametre yine her zamanki gibi başlangıç atıksu konsantrasyonudur (%62,8). Bunu %27,9'luk yüzde ile akım şiddeti izlemektedir. Son olarak ise azot gazı debisi toplam sistem performansı içerisinde yalnızca %4,3'lük bir paya sahiptir.

Belirlenen optimum deney şartları için tahmin edilen ve gözlemlenen bulanıklık giderim verimleri ise Tablo 3.59.'deki gibidir.

Tablo 3.59. Karbon kumaş katotla oksijensiz ortamda yürütülen denemelerde bulanıklık giderimi için belirlenen en uygun koşullar

Performans Kriteri	AŞ (mA)		C_o		(Q_{N2}) (L/dak)		Gözlenen (%)	Tahmin edilen (%)	Güven Aralığı (%)
	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri	Düzey	Değeri			
Bulanıklık	3	100	1	C_o	1	0,1	62,37	60,58	53,51 – 67,66

Elde edilen sonuçlar ve Taguchi optimizasyon metodu ile tahmin edilen sonuçların tutarlı olması sistemimizin çalışıyor olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca tüm optimum koşullar için tüketilen enerji miktarları şekil 3.47'de verilmektedir.



Şekil 3.48. Karbon kumaş elektrot ile II. aşama deneylerde elde edilen optimum koşullarda enerji tüketimleri

3.3.4. İkinci Aşama Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması (Oksijensiz ortamda)

Sonuçların daha net bir biçimde karşılaştırılabilmesi için çalışmada kullanılan tüm katot materyallerin ve bu materyaller kullanılarak farklı kirlilik parametreleri için optimum koşullarda elde edilen giderim verimlerinin tek bir tabloda gösterimi daha uygun olacaktır. I. aşama deney sonuçları için elde edilen sonuçlar Tablo 3.60.'de özetlemektedir.

Tablo 3.60. Farklı katot materyallerle oksijensiz ortamda yürütülen deneysel sonuçların karşılaştırılması

Katot Materyal	**Parametreler için optimum koşullar**				**Kirlilik Parametreleri için Giderim Verimleri (%)**		
	Parametre	**A.Ş. (mA)**	**C_o**	**Q_h (L/dak)**	**Renk**	**TOK**	**Bulanıklık**
Grafit	Renk	80	$C_o/4$	0,5	91,02	63,20	89,12
	TOK	80	$C_o/4$	0,1			
	Bulanıklık	100	$C_o/4$	0,1			
Karbon Keçe	Renk	90	$C_o/4$	0,5	97,80	63,10	32,19
	TOK	80	$C_o/4$	0,5			
	Bulanıklık	100	C_o	0,3			
Karbon Kumaş	Renk	100	$C_o/4$	0,5	100	66,80	62,37
	TOK	100	$C_o/4$	0,1			
	Bulanıklık	100	C_o	0,1			

Tablo 3.60'da görüldüğü tüm katot materyaller ile oksijensiz ortamda yürütülen deneysel çalışmalara ait giderim verimleri oksijenli ortamda yürütülen deneysel sonuçlara göre daha düşüktür. Ancak sistem oksijensiz ortamda reaksiyon süresince pH değerlerinin sürekli artışına bağlı olarak kimyasal koagulasyon yönünde hareket ederek atıksuda renk, TOK ve bulanıklık anlamında giderim gerçekleştirmiştir. Özellikle grafit elektrot kullanılarak oksijensiz ortamda yürütülen denemelerde tüm su kalite parametreleri için oksijenli ortam sonuçlarına göre (Tablo 3.32) çok daha düşük giderim verimlerine ulaşılmıştır. Bunun temel sebebi ise ortamda oksijen varlığında elektrokimyasal olarak üretilen H_2O_2'nin Fe^{+2} katalizliğinde gerçekleştirildiği Fenton reaksiyonlarıdır. Diğer taraftan Fe^{+2}'nin aşırı miktarları nedeniyle karbon keçe ve karbon kumaş materyallerin etkin yüzeylerinin demirle kaplanması oksijenli ve oksijensiz denemeler arasındaki farkı tam anlamıyla ortaya koyamamakla birlikte denemeler arasında ancak küçük farklılıklar şeklinde gözlemlenebilmektedir.

Tablo 3.61'de I. ve II. aşama deney sonuçlarının tamamı bir arada görülebilmektedir. Böylelikle proje çalışmalarında elde edilen verilerin çok daha rahat bir şekilde anlaşılabilmesi mümkün olacaktır.

Tablo 3.61. I. ve II. Aşama Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Katot	Artım Süresi (dak)	Parametre	Kirlilik Parametreleri için Giderim Verimleri (%)	
			I. Aşama	II. Aşama
Grafit	350	Renk	100	91,02
		TOK	70,40	63,20
		Bulanıklık	98,80	89,12
Karbon Keçe	400	Renk	99,45	97,80
		TOK	63,21	63,10
		Bulanıklık	100	32,19
Karbon Kumaş	400	Renk	100	100
		TOK	69,84	66,80
		Bulanıklık	100	62,37

Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında oksijenli ve oksijensiz ortamda yürütülen deneysel çalışmalarda tüm karbonlu materyaller için hemen hemen benzeri bir durum ortaya çıkmaktadır. Tüm katot materyaller için oksijenli ortamda yürütülen çalışma sonuçları oksijensiz ortamda yürütülen çalışmalara göre daha iyi sonuçlar vermektedir. Ancak bu farklılık grafit katotta kendisini daha fazla göstermektedir. Grafit katodun aksine karbon keçe ve karbon kumaş aktif yüzeylerinin geniş olması nedeniyle oluşan demir çamurlarına en fazla maruz kalan katot grubudur. Hidrojen peroksit üretimi açısından oldukça büyük üstünlük sağlamasına rağmen gerçek atıksu uygulamalarında bu üstünlük neredeyse bir dezavantaja dönüşmekte ve bu nedenle I. ve II. aşama deneyler arasında önemli farklılıklar görülememektedir. Diğer taraftan grafit ise düz bir yüzey yapısına sahip olması nedeniyle oluşan demir çamurlarından nispeten daha az etkilenmekte bu sebeple arıtma sonuçları açısından diğer karbonlu materyallere göre daha yüksek arıtım sonuçları verebilmektedir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada ülkemizde olduğu gibi ve dünya ekonomisinde de önemli bir paya sahip tekstil endüstrilerinin en büyük dezavantajlı yönünü oluşturan yüksek renk ve kirlilik yüküne sahip atıksularının EF prosesi ile arıtılabilirliği araştırılmıştır. Çalışma süresince sistemde kullanılan katot materyallerin ve proses işletme şartlarının değiştirilmesi ile bu tip atıksularının temel kalite parametreleri arasında yer alan renk, TOK ve bulanıklık giderim verimleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca klasik yöntemlerle (bir değişkenin değerlerini değiştirip diğer değişkenleri sabit tutmak şeklinde) optimum koşulları araştırılması yerine zaman ve maliyet açısından oldukça etkin bir optimizasyon tekniği olan Taguchi deneysel tasarım matrisinin EF sistemine uygun olup olmadığı değerlendirilmiştir. Kullanılan deneysel tasarım matrisi sayesinde optimize edilen tüm sistem değişkenlerinin ayrı ayrı sistem üzerindeki katkı payları ortaya konularak optimizasyon çalışması daha yararlı hale dönüştürülmüştür. Son olarak ise kullanılan katot materyaller de dahil olmak üzere tüm sistem değişkenlerinin enerji tüketim hesaplamaları yapılarak sistem koşullarının proses işletme maliyeti üzerindeki farklı etkileri değerlendirilmeye çalışılmıştır.

Proje çalışmaları kapsamında EF proses performansı üzerinde hayati öneme sahip oksijene doygun ortam koşullarının temin edilebilmesi amacıyla kullanılan oksijen kaynağının varlığında yada yokluğunda EF prosesinin nasıl bir arıtım davranışı sergilediği iki aşamalı bir deney seti ile değerlendirilmiştir. Oksijenin ortamda mevcudiyeti kullanılan katot materyali ile doğrudan ilişkili olarak sistemde elektrokimyasal H_2O_2 üretiminin gelişimine neden olmaktadır. Deneysel çalışmalar esnasında farklı akım şiddetleri ve değişken katot tipleri kullanılarak 100 dakikalık elektroliz süresinde üretilen H_2O_2 miktarları aşağıda verilmektedir.

Katot Türü	Akım Şiddeti (mA)	Hava Akış Hızı (L/dak)	Destek Elektrolit Türü ve Konsantrasyonu	Üretilen H_2O_2 miktarı (mg/L)
Grafit	60	0,5	Na_2SO_4 (20 mM)	165,53
Karbon Keçe	100	0,3	Na_2SO_4 (50 mM)	204,23
Karbon Kumaş	80	0,3	Na_2SO_4 (50 mM)	455,64

Bu deney setlerinin ilkinde farklı hava akış hızlarında farklı her bir katot materyal için renk, TOK ve bulanıklık giderim verimleri L_{16} Taguchi ortogonal deney matrisi kullanılarak değişken akım şiddetlerinde araştırılmıştır.

I. aşama deney sonuçlarına göre grafit katot materyal tekstil atıksuları için optimum 350 dakikalık arıtım periyodunda rengin tamamını bulanıklığın %99'unu ve TOK parametresi için %70'lik bir kısmını giderebilmektedir. Karbon keçe I. aşama deney sonuçlarına göre optimum 400 dakikalık elektroliz süresinde %99,5 renk, %100 bulanıklık ve yaklaşık olarak %63 TOK giderimi elde edilmiştir. Son olarak karbon kumaş katot materyali ile renk ve bulanıklık tamamıyla giderilmekle birlikte %70 civarında TOK giderimine ulaşılmıştır.

II. aşama deneysel verilerine göre ortamda oksijen bulunmaması hali EF proses performansında azalışlar şeklinde gözlenmiştir. Buna göre grafit katotla 350 dakikalık elektroliz süresinde elde edilen sonuçlar %91 renk, %63 TOK ve %89 bulanıklık giderimi şeklindedir. Karbon keçe elektrotta ise optimum 400 dakikalık elektroliz süresinde %98 renk, %63 TOK ve %32 bulanıklık giderimi elde edilmiştir. Diğer taraftan karbon kumaş elektrot kullanılarak 400 dakikalık elektroliz süresinde rengin tamamı, %67 TOK ve %62 bulanıklık giderimi elde edilmiştir.

Elde edilen veriler ışığında grafit elektrodun gerçek endüstriyel atıksu uygulamalarında kullanılan diğer yüksek yüzey alanına sahip karbon materyallere göre daha uygun olduğu ve oluşan çamurdan önemli ölçüde etkilenmediği söylenilebilir. Diğer taraftan H_2O_2 oluşumu bakımından ise karbon kumaş materyalin grafit ve karbon keçe materyale göre çok daha iyi sonuçlar verdiği açıktır. Fakat her ne sebeple olursa olsun tüm elektroliz koşulları için çözelti ortamındaki pH artışına bağlı olarak meydana gelen kimyasal koagulasyon etkisi göz ardı edilemeyecek kadar büyüktür. Gelecekteki çalışmalarda anodik olarak üretilen demir miktarının arttırılmasıyla Fenton benzeri oksidatif proseslerin etkinlik düzeylerinin arttırılmasına yönelik yapılacak çalışmaların özellikle KOI ve TOK gibi parametreler açısından sistem performansını önemli ölçüde etkileyeceği düşünülmektedir.

5.KAYNAKLAR

Akbulut, H.Y., Karpuzcu, M., Cihan, F., Dimoglo, A., Petrol İçeren Atıksuların Elektrokimyasal Yöntemlerle Arıtılması. "5. Ulusal Cevre Mühendisliği Kongresi", (2003), s.164-177.

Arıcı Y., Tekstil Endüstrisinde Reaktif Boyarmaddelerden Kaynaklanan Rengin Fenton Prosesi ile Giderilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2000.

Birgül, A., Akal Solmaz, S.K., "Tekstil Endüstrisi Atıksuları Üzerinde İleri Oksidasyon ve Kimyasal Arıtma Prosesleri Kullanılarak KOI ve Renk Gideriminin Araştırılması", Ekoloji Dergisi, 15 (2007) 72-80.

Boye, B., Dieng, M.M., Brillas, E. Anodic Oxidation, Electro-Fenton And Photoelectro-Fenton Treatments Of 2,4,5-Trichlorophenoxyacetic Acid, Journal of Electroanalytical Chemistry, 557 (2003) 135-146.

Chen, G. Electrochemical Technologies in Wastewater Treatment, Separation and Purification Technology, 38 (2004) 11-41

Demirci, C., Pamuklu Tekstil Endüstrisi Atıksularındaki Rengin Foto-Fenton Prosesiyle Giderimi, 47 sf., Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Elazığ, 2007.

Deng, Y. and Englehardt, J.D. Electrochemical Oxidation for Landfill Leachate Treatment, Waste Management, 27 (2007) 380-388.

Desoky, H.S.E., Ghoneim M.M., Sheikh, R.E., Zidan, M.Z. Oxidation of Levafix CA Reactive Azo-Dyes in Industrial Wastewater of Textile Dyeing by Electro-Generated Fenton's Reagent, Journal of Hazardous Materials, 175 (2010) 858-865.

Diaz, C.B., Nunez, F.U., Campos, E., Pardave, M.P. and Romo, M.R. A Combined Electrochemical-Irradiation Treatment of Highly Colored and Polluted Industrial Wastewater, Radiation Physics and Chemistry, Water Research, 67 (2003) 657-663.

Dikmen, F. Tekstil Atıksularında Ozonla Renk Giderimi Üzerine Bir Çalışma, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 75. İstanbul, 1998.

Doğru, E., Tekstil Endüstrisi Atıksularında Ozon ile Renk Giderimi, 87 sf., Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Bursa, 2003.

El-Dein, A.M., Libra, J. and Wiesmann U., Cost Analysis for the Degradation of Highly Concentrated Textile Dye Wastewater with Chemical Oxidation H_2O_2/UV and Biological Treatment, Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 81 (2006) 1239–1245.

Fockedey, E. and Lierde, A.V. Coupling of anodic and cathodic reactions for phenol electro-oxidation using three-dimensional electrodes*, Water Research,* 36 (2002) 4169-4175.

Gökkuş, Ö. Dispers Boyarmadde İçeren Tekstil Atıksularında Renk Giderimi, 74 sf., Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Sivas, 2006.

Gönder, Z.B., Barlas, H., Fenton Prosesi ile Renkli Atıksulardan Renk ve KOİ Giderimi, II. Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongresi MBGAK 2005, 562-567, İstanbul 17–19 Kasım 2005.

Gönder, Z.B., Fenton Prosesi ve İyon Değişimi Kombinasyonu ile Renkli Atıksuların Arıtımı, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 87, İstanbul, 2004.

Gözmen, B., 2002. Sulu Ortamda Refrakter Toksik Organik Bileşiklerin Elektrokimyasal Fenton Tepkimesi Aracılığı ile Parçalanmalarının İncelenmesi ve Değişik Çalışma Elektrotlarının Etkinliklerinin Kıyaslanması. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi, Adana.

H. Zhang, H.J. Choi, C.P. Huang, Optimization of Fenton process for the treatment of landfill leachate, J. Hazard. Mater. 125 (2005) 166–174.

Israilides, C.J., Vlyssides, A.G., Mourafeti, V.N. and Karvouni, G. Olive oil wastewater treatment with the use of an electrolysis system, Bioresource Technology, 61 (1997) 163-170.

Kallel, M., Belaid, C., Boussahel, R., Ksibi, M., Montiel, A., Elleuch, B., Olive Mill Wastewater Degradation by Fenton Oxidation with Zero-Valent Iron and Hydrogen Peroxide, Journal of Hazardous Materials, 163 (2009) 550–554.

Kapdan, İ.K., Öztekin, R., Anaerobik Kesikli Beslemeli Reaktör Sisteminde Sentetik Atıksudan Renk Giderimi, V. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi, Ankara 452-462, 1-4 Ekim 2003.

Kaplan, F., 2007. Zeytin Karasuyundaki Toksik Fenolik Bileşiklerin, Farklı Karbon Elektrotlar Kullanılarak, Elektro-Fenton Yöntemi ile Parçalanmaları, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, 80 sf., Adana.

Karapınar Kapdan, İ., Kargı, F. Atıksulardan Tekstil Boyarmaddelerinin Adsorbsiyonlu Biyolojik Arıtım ile Giderimi, Turk J Engin Environ Sci, 24 (2000) 161-169.

Khataee, A.R., Vatanpour, V., Amani Ghadim, A.R. Decolorization of C.I. Acid Blue 9 solution by UV/Nano-TiO_2, Fenton, Fenton-like, electro-Fenton and electrocoagulation processes: A comparative study, Journal of Hazardous Materials 161 (2009) 1225–1233.

Kim T., Park C., Yang J. and Kim S. “Comparison of Disperse and Reactive Dye Removals by Chemical Coagulation and Fenton Oxidation”, Journal of Hazardous Materials, 112 (2004) 95-103.

Kocaer, F. O., Alkan, U., Boyar Madde İçeren Tekstil Atıksularının Arıtım Alternatifleri, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 7 (1) (2002) 47-55.

Köseoğlu, G., Tekstil Endüstrisi Atıksularındaki Renk Sorununun İleri Aktif Çamurlu Ardışık Kesikli Biyoreaktör ile Giderilmesi, 134 sf., Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 2004.

Küçük, Ö., Kocakerim, M.M., Çopur, M., Yartaşı A., 2005. Optimization of Dissolution of Ulexite in $(NH_4)_2SO_4$ Solutions. Canadian Metallurgical Quarterly, 44, 1-6.

Kuo W.G., "Decoloriziting Dye Wastewater with Fenton Reagent", Water Research, 26 (1992) 881-886.

Ma, X.J., Xia, H. L., Treatment of Water-Based Printing Ink Wastewater by Fenton Process Combined with Coagulation, Journal of Hazardous Materials, 162 (2009) 386–390.

Mollah M.Y.A., Schennach R., Parga J.R., et. al., "Electrocoagulation (EC) – Science and Application", Journal of Hazardous Materials, B84, 29-41, 2001.

Muruganandham, M., Swaminathan, M., Decolourisation of Reactive Orange 4 by Fenton and Photo-Fenton Oxidation Technology, Dyes and Pigments 63 (2004) 315-321.

Özcan, A., Şahin, Y., Koparal, A.S., Oturan, M.A. A Comparative Study on the Efficiency of Electro-Fenton Process in the Removal of Propham from Water, Applied Catalysis B: Environmental 89 (2009) 620–626.

Özcan, A., Şahin, Y., Koparal, A.S., Oturan, M.A. Carbon Sponge as a New Cathode Material for the Electro-Fenton Process: Comparison with Carbon Felt Cathode and Application to Degradation of Synthetic Dye Basic Blue 3 in Aqueous Medium, Journal of Electroanalytical Chemistry, 616 (2008(c)) 71–78.

Özcan, A., Şahin, Y., Koparal, A.S., Oturan, M.A. Degradation of Picloram by the Electro-Fenton Process, Journal of Hazardous Materials, 153 (2008a) 718–727.

Özcan, A., Şahin, Y., Koparal, A.S., Oturan, M.A. Propham Mineralization in Aqueous Medium by Anodic Oxidation using Boron-Doped Diamond Anode: Influence of Experimental Parameters on Degradation Kinetics and Mineralization Efficiency, Water Research, 42 (2008b) 2889 – 2898.

Phadke, M.S., Quality Engineering Using Robust Design, Prentice Hall: pp. 61-292. New Jersey. 1989.

Qiang, Z.; Chang, J.-H.; Huang, C.-P.Electrochemical Generation of Hydrogen Peroxide from Dissolved Oxygen in Acidic Solutions Water Res. 36 (2002) 85-94.

Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R. and Nigam, P., Remediation of Dyes in Textile Effluent: A Critical Rewiev on Current Treatment Technologies With a Proposed Alternative, Bioresource Technoloy, 77 (2001) 247-255.

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater APHA, AWWA and WPCF, American Public Health Association, 20 th ed., Washington DC, 1998.

Swaminathan, K., Sandhya, S., Sophia, A. C., Pachhade, K. and Subrahmanyam, Y. V., Decolorization and Degradation of H-acid and Other Dyes Using Ferrous–Hydrogen Peroxide System, Chemosphere, 50 (5) (2003) 619-625.

Tantak, N.P., Chaudhari, S., Degradation of Azo Dyes by Sequential Fenton's Oxidation and Aerobic Biological Treatment, Journal of Hazardous Materials, 136 (2006) 698–705.

Tünay O., Kabdaşlı I., Orhon D., and Eremektar G., Color Removal from Textile Wastewater. Water Science Technology, 11, (34), 9-16, 1996.

Van der Zee, F.P., Anaerobic Azo Dye Reduction, Doctoral Thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 142 pages, 2002.

Walling, C. And Kato, S., "The Oxidation of Alcohols by Fenton's Reagent:the Effect of copper Ion", Journal of American Chemical Society, 93 (1971) 4275-4281.

Wang, C.T., Hu, J.L., Chou, W.L., Kuo, Y.M., Removal of Color from Real Dyeing Wastewater by Electro-Fenton Technology Using a Three-Dimensional Graphite Cathode, Journal of Hazardous Materials, 152 (2008) 601-606.

Yavuz, Y., EC and EF processes for the treatment of alcohol distillery wastewater Separation and Purification Technology 53 (2007) 135–140.

Zhang, G., Yang, F., Gao, M., Fang, X., Liu, L. Electro-Fenton Degradation of Azo Dye Using polypyrrole/anthraquinonedisulphonate Composite Film Modified Graphite Cathode in Acidic Aqueous Solutions, Electrochimica Acta, 53 (2008) 5155–516.