

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



CEVAP YÜZEY YÖNTEMİ MODELLENMESİ İLE SENTETİK
ATIKSULARDAKİ RENK KİRLİLİĞİN GİDERİMİNİN
İNCELENMESİ

SEVİM ALYA CİHAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Baybars Ali FİL (Tez Danışmanı)
Prof. Dr. Burhanettin FARİZOĞLU
Prof. Dr. Taner YONAR

BALIKESİR, HAZİRAN- 2024

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**CEVAP YÜZEY YÖNTEMİ MODELLENMESİ İLE SENTETİK ATIKSULARDAKİ RENK KİRLİLİĞİN GİDERİMİNİN İNCELENMESİ**” başlıklı tezde;

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

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

Sevim Alya CİHAN

ÖZET

**CEVAP YÜZEY YÖNTEMİ MODELLENMESİ İLE SENTETİK
ATIKSULARDAKİ RENK KİRLİLİĞİN GİDERİMİNİN İNCELENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
SEVİM ALYA CİHAN
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. BAYBARS ALİ FİL)

BALIKESİR, HAZİRAN- 2024

Gerçekleştirilen yüksek lisans tez çalışmasında sentetik olarak hazırlanan atıksuyun elektrooksidasyon prosesi kullanılarak arıtımı incelenmiştir. Sentetik atıksu tekstil sektöründe kullanılan Doracryl Yellow, Doracryl Red, Doracryl Blue akrilik türündeki katyonik boyalar ile hazırlanmıştır. Anot malzemesi olarak Ti/IrO₂/RuO₂ ve katot malzemesi olarak kaplanmamış titanyum kullanılarak elektrooksidasyon sistemi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada Design Expert programı kullanılarak deneysel şartlar bir modelleme üzerinden belirlenmiştir. Modellemede her boya için otuz deney planlanmıştır. Modelin oluşturduğu şartlar doğrultusunda yapılan deneylerin sonucu Design Expert programındaki üç boyutlu grafiklere dökülerek cevap yüzey yöntemi uygulanmıştır. Yapılan deneylerde akım yoğunluğu, pH, destek elektrolit konsantrasyonu (DEK) ve başlangıç boyar madde konsantrasyonu (C₀) parametreleri incelenmiştir. İletkenliği sağlamak amacıyla destek elektrolit türü (DET) olarak 5 mM, 10 mM ve 15 mM NaCl tercih edilmiştir. 15 dakikalık deneyler sonucunda elde edilen veriler kullanılarak modelleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Deneylerin sonucunda boyar madde giderim verimi ve enerji tüketim değerleri hesaplanmıştır. Renk giderim verimleri; akım yoğunluğu ve destek elektrolit konsantrasyonundaki artış ile artarken, pH ve başlangıç boyar madde konsantrasyonundaki artış ile azalmaktadır. Enerji tüketim değerlerinde de benzer eğilim görülmektedir.

ANAHTAR KELİMELELER: Elektrooksidasyon, Katyonik boyar madde, Cevap yüzey yöntemi

Bilim Kod / Kodları: 90319

Sayfa Sayısı: 98

ABSTRACT

INVESTIGATION OF COLOR POLLUTION REMOVAL IN SYNTHETIC WASTEWATERS BY RESPONSE SURFACE METHOD MODELING

MSC THESIS

SEVİM ALYA CİHAN

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
ENVIRONMENTAL ENGINEERING**

(SUPERVISOR: PROF. DR. BAYBARS ALİ FİL)

BALIKESİR, JUNE - 2024

In the conducted master's thesis, the treatment of synthetically prepared wastewater using the electro-oxidation process was investigated. The synthetic wastewater was prepared using cationic dyes of the acrylic type, including Doracryl Yellow, Doracryl Red, and Doracryl Blue, which are used in the textile industry. The electrooxidation system was carried out using Ti/IrO₂/RuO₂ as the anode material and uncoated titanium as the cathode material. In the study, experimental conditions were determined through modeling using the Design Expert program. Thirty experiments were planned for each dye in the modelling. The results of the experiments carried out in line with the conditions created by the model were poured into three-dimensional graphics in the Design Expert program and the response surface method was applied. In the experiments, current density, pH, supporting electrolyte concentration (SEC) and initial dye concentration (C₀) parameters were examined. In order to ensure conductivity, 5 mM, 10 mM and 15 mM NaCl were preferred as supporting electrolyte type (SET). A modeling study was carried out using the data obtained as a result of 15-minute experiments. As a result of the experiments, dye removal efficiency and energy consumption values were calculated. Color removal efficiency: While it increases with the increase in current density and supporting electrolyte concentration, it decreases with the increase in pH and initial dye concentration. A similar trend is observed in energy consumption values.

KEYWORDS: Electrooxidation, Cationic dye, Response surface method

Science Code / Codes: 90319

Page Number: 98

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1 Elektrokimyasal Arıtım Süreçleri	2
1.1.1 Elektrokimyasal Arıtım Prosesi.....	3
2. KURAMSAL KAVRAMLAR	6
2.1 Boyama Maddeleri	6
2.2 Boyar Maddelerin Sınıflandırılması	6
2.3 Katyonik (Bazik) Boyar Maddeler.....	7
2.4 Literatür Araştırması.....	8
3. MATERYAL ve METOT	11
3.1 Cevap Yüze Yöntemi	11
3.2 Box-Behnken Dizaynı.....	11
3.3 Kullanılan Boyar Maddeler.....	14
3.4 Kullanılan Malzemeler.....	15
3.5 Deneyin Yapılışı	15
3.6 Deney Düzenegi.....	16
3.7 Deneysel Hesaplamalar.....	18
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	21
4.1 Doracryl yellow XGFLS için yapılan çalışmalar.....	21
4.1.1 Akım Yoğunluğunun ve pH'nın Renk Giderimine Etkisi.....	28
4.1.2 Akım Yoğunluğunun ve DEK'in Renk Giderimine Etkisi	30
4.1.3 Akım Yoğunluğunun Boya Konsantrasyonunun Renk Giderimine Etkisi	31
4.1.4 pH'nın ve DEK'in Renk Giderimine Etkisi	32
4.1.5 pH'nın ve C ₀ 'ın Renk Giderimine Etkisi	33
4.1.6 DEK'İN ve C ₀ 'ın Renk Giderimine Etkisi.....	33
4.1.7 Enerji Tüketimine Etkisi Olan Parametrelerin Değerlendirilmesi	34
4.2 Doracryl Red XGRLS	36
4.2.1 Akım Yoğunluğunun ve pH'nın Renk Giderimine Etkisi.....	44
4.2.2 Akım Yoğunluğunun ve DEK'in Renk Giderimine Etkisi	45
4.2.3 Akım Yoğunluğunun ve C ₀ 'ın Renk Giderimine Etkisi	46
4.2.4 pH'nın ve DEK' in Renk Giderimine Etkisi	47
4.2.5 pH'nın ve C ₀ 'ın Renk Giderimine Etkisi	48
4.2.6 DEK'in ve C ₀ 'ın Renk Giderimine Etkisi	49
4.2.7 Akım Yoğunluğunun ve pH'nın Enerji Tüketimine Etkisi	51
4.2.8 Akım Yoğunluğunun ve DEK'in Enerji Tüketimine Etkisi.....	52
4.2.9 Akım Yoğunluğunun ve C ₀ 'ın Enerji Tüketimine Etkisi.....	53
4.2.10pH'nın ve DEK'in Enerji Tüketimine Etkisi	54

4.2.11pH'nın ve C ₀ 'ın Enerji Tüketimine Etkisi	55
4.2.12DEK'in ve C ₀ 'ın Enerji Tüketimine Etkisi.....	56
4.3 DORACRYL BLUE XFGRL	57
4.3.1 Akım Yoğunluğunu ve pH'nın Renk Giderimine Etkisi.....	65
4.3.2 Akım Yoğunluğunun ve DEK'in Renk Giderimine Etkisi	66
4.3.3 Akım Yoğunluğunun ve C ₀ 'ın Renk Giderimine Etkisi	67
4.3.4 pH'nın ve DEK'in Renk Giderimine Etkisi	68
4.3.5 pH'nın ve C ₀ 'ın Renk Giderimine Etkisi	69
4.3.6 DEK'in ve C ₀ 'ın Renk Giderimine Etkisi.....	70
4.3.7 Akım Yoğunluğunun ve pH'nın Enerji Tüketimine Etkisi.....	71
4.3.8 Akım Yoğunluğunun ve DEK'in Enerji Tüketimine Etkisi.....	72
4.3.9 Akım Yoğunluğu ve C ₀ 'ın Enerji Tüketimine Etkisi.....	73
4.3.10pH'nın ve DEK'in Enerji Tüketimine Etkisi.....	74
4.3.11pH'nın ve C ₀ 'ın Enerji Tüketimine Etkisi	75
4.3.12DEK'in ve C ₀ 'ın Enerji Tüketimine Etkisi.....	76
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	79
6. KAYNAKLAR (APA)	81
ÖZGEÇMİŞ	89

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1: Doğrudan elektrooksidasyon (b) Dolaylı elektrooksidasyon	4
Şekil 1.2: Elektrooksidasyon prosesi.....	5
Şekil 2.1: Boyar maddelerin sınıflandırılması.....	7
Şekil 2.2: Halı renklendirme işlemi.....	8
Şekil 3.1: Bir sistem veya prosese ait şematik gösterim.....	12
Şekil 3.2: Box-Behnken tasarımı geometrik görünümü	12
Şekil 3.3: Deney esnasından bir görüntü	16
Şekil 3.4: Deneylerde kullanılan güç kaynağı	17
Şekil 3.5: Doracryl blue XFGRL boyasının renk giderim evrelerindeki numune örnekleri	19
Şekil 3.6: Doracryl yellow XGFLS boyasının renk giderim aşamasındaki numune örnekleri	19
Şekil 3.7: Doracryl red XFRLS boyasının renk giderimi sırasındaki numune örnekleri	20
Şekil 4.1: Renk giderim veriminin gerçek-model arasındaki fark	26
Şekil 4.2: Enerji tüketiminin gerçek-model arasındaki fark.....	26
Şekil 4.3: Her bir değişkenin yalnız olarak renk giderim verimine tesirleri	28
Şekil 4.4: Her bir değişkenin yalnız olarak enerji tüketimine tesirleri.....	28
Şekil 4.5: Akım yoğunluğu ve pH'nın renk giderim verimi üzerindeki etkisinin incelendiği kontur grafiği	29
Şekil 4.6: Akım yoğunluğunun ve pH'nın renk giderim verimine etkisinin incelendiği cevap yüzey grafiği.....	29
Şekil 4.7: Akım yoğunluğunun destek elektrolit konsantrasyonunun renk giderim verimine etkisinin kontur grafiği	30
Şekil 4.8: Akım yoğunluğunun ve DEK'in renk giderim verimine etkisi.....	30
Şekil 4.9: Akım yoğunluğunun başlangıç boyar madde konsantrasyonunun renk giderim verimine etkisinin kontur grafiği	31
Şekil 4.10: Akım yoğunluğunun ve C_0 'a renk giderim verimine etkisi	31
Şekil 4.11: pH'nın destek elektrolit konsantrasyonunun renk giderim verimine etkisinin kontur grafiği	32
Şekil 4.12: pH'nın ve destek elektrolit konsantrasyonun renk giderimine etkisi.....	32
Şekil 4.13: pH'nın başlangıç boyar madde konsantrasyonuna renk giderim verimine etkisinin kontur grafiği	33
Şekil 4.14: pH'nın ve boya konsantrasyonunun renk giderimine etkisi.....	33
Şekil 4.15: Destek elektrolit konsantrasyonunun başlangıç boyar madde konsantrasyonunun renk giderim verimine etkisinin kontur grafiği.....	34
Şekil 4.16: Destek elektrolit konsantrasyonunun ve boya konsantrasyonun renk giderimine etkisi.....	34
Şekil 4.17: Akım yoğunluğunun ve pH'nın enerji tüketimine etkisinin kontur grafiği	35
Şekil 4.18: Akım yoğunluğu ve pH'nın enerji tüketiminin cevap yüzey yöntemi grafiği ..	35
Şekil 4.19: Elektrooksidasyon prosesi için optimum çalışma koşulları	36
Şekil 4.20: Renk giderim gerçek- model arasındaki fark	41
Şekil 4.21: Enerji tüketimi gerçek-model arasındaki fark.....	42
Şekil 4.22: Her bir değişkenin ayrı ayrı renk giderim verimine tesirleri.....	43
Şekil 4.23: Her bir değişkenin ayrı ayrı enerji tüketimine tesirleri	43
Şekil 4.24: Akım yoğunluğunun pH'nın renk giderim verimine etkisinin kontur grafiği...	44
Şekil 4.25: Akım yoğunluğunun ve pH'nın renk giderimine etkisi	44

Şekil 4.26: Akım yoğunluğunun destek elektrolit konsantrasyonunun renk giderim verimine etkisinin kontur grafiği	45
Şekil 4.27: Akım yoğunluğunun ve destek elektrolit türünün renk giderimine etkisi.....	46
Şekil 4.28: Akım yoğunluğunun başlangıç boyar madde konsantrasyonunun renk giderim verimine etkisinin kontur grafiği	47
Şekil 4.29: Akım yoğunluğunun ve boya konsantrasyonunun renk giderimine etkisi.....	47
Şekil 4.30: pH'nın destek elektrolit konsantrasyonunun boyar madde giderim verimine etkisinin kontur grafiği	48
Şekil 4.31: pH'nın ve destek elektrolit konsantrasyonunun renk giderimine etkisi.....	48
Şekil 4.32: pH'nın başlangıç boyar madde konsantrasyonunun renk giderim verimine etkisinin kontur grafiği	49
Şekil 4.33: pH'nın ve boya konsantrasyonunun renk giderimine etkisi.....	49
Şekil 4.34: Destek elektrolit konsantrasyonunun başlangıç boyar madde konsantrasyonunun renk giderim verimine etkisinin kontur grafiği.....	50
Şekil 4.35: Destek elektrolit konsantrasyonunun ve boya konsantrasyonunun renk giderimine etkisi	50
Şekil 4.36: Akım yoğunluğunun pH'nın enerji tüketimine etkisinin kontur grafiği	51
Şekil 4.37: Akım yoğunluğu ve pH'nın enerji tüketiminin cevap yüzey yöntemi grafiği ..	51
Şekil 4.38: Akım yoğunluğunun destek elektrolit konsantrasyonunun enerji tüketimine etkisinin kontur grafiği	52
Şekil 4.39: Akım yoğunluğu ve DEK'in enerji tüketiminin cevap yüzey yöntemi grafiği .	52
Şekil 4.40: Akım yoğunluğunun başlangıç boyar madde konsantrasyonunun enerji tüketimine etkisinin kontur grafiği	53
Şekil 4.41: Akım yoğunluğu ve C_0 'ın enerji tüketiminin cevap yüzey yöntemi grafiği	53
Şekil 4.42: pH'nın destek elektrolit konsantrasyonunun enerji tüketimine etkisinin kontur grafiği.....	54
Şekil 4.43: pH ve DEK'in enerji tüketiminin cevap yüzey yöntemi grafiği	54
Şekil 4.44: pH'nın başlangıç boyar madde konsantrasyonunun enerji tüketimine etkisinin kontur grafiği	55
Şekil 4.45: pH ve C_0 'ın enerji tüketiminin cevap yüzey yöntemi grafiği	55
Şekil 4.46: Destek elektrolit konsantrasyonunun başlangıç boyar madde konsantrasyonunun enerji tüketimine etkisinin kontur grafiği	56
Şekil 4.47: DEK'in ve C_0 'ın enerji tüketiminin cevap yüzey yöntemi grafiği.....	56
Şekil 4.48: Elektrooksidasyon prosesi için optimum çalışma koşulları	57
Şekil 4.49: Renk giderim veriminin gerçek-model arasındaki fark	62
Şekil 4.50: Enerji tüketiminin gerçek-model arasındaki fark.....	62
Şekil 4.51: Her bir değişkenin şahsi açıdan renk arıtım verimine tesirleri.....	64
Şekil 4.52: Her bir değişkenin şahsi açıdan enerji tüketimine tesirleri	64
Şekil 4.53: Akım yoğunluğunun pH'nın renk giderim verimine etkisinin kontur grafiği...	65
Şekil 4.54: Akım yoğunluğunun ve pH'nın renk giderimine etkisinin cevap yüzey yöntemi grafiği.....	66
Şekil 4.55: Akım yoğunluğunun destek elektrolit konsantrasyonunun renk giderim verimine etkisinin kontur grafiği	67
Şekil 4.56: Akım yoğunluğunun ve destek elektrolit konsantrasyonunun renk giderimine etkisi.....	67
Şekil 4.57: Akım yoğunluğunun başlangıç boyar madde konsantrasyonunun renk giderim verimine etkisinin kontur grafiği	68
Şekil 4.58: Akım yoğunluğunun ve boya konsantrasyonunun renk giderimine etkisi.....	68
Şekil 4.59: pH'nın destek elektrolit konsantrasyonunun renk giderim verimine etkisinin kontur grafiği	69

Şekil 4.60: pH'nın ve destek elektrolit konsantrasyonunun renk giderimine etkisi.....	69
Şekil 4.61: pH'nın başlangıç boyar madde konsantrasyonunun renk giderim verimine etkisinin kontur grafiği	70
Şekil 4.62: pH'nın ve boya konsantrasyonunun renk giderimine etkisi.....	70
Şekil 4.63: Destek elektrolit konsantrasyonunun başlangıç boyar madde konsantrasyonunun renk giderim verimine etkisinin kontur grafiği.....	71
Şekil 4.64: Destek elektrolit konsantrasyonunun ve boya konsantrasyonunun renk giderimine etkisi	71
Şekil 4.65: Akım yoğunluğunun pH'nın enerji tüketimine etkisinin kontur grafiği	72
Şekil 4.66: Akım yoğunluğunun pH'nın enerji tüketimine etkisinin cevap yüzey grafiği..	72
Şekil 4.67: Akım yoğunluğunun destek elektrolit konsantrasyonunun enerji tüketimine etkisinin kontur grafiği	73
Şekil 4.68: Akım yoğunluğunun destek elektrolit konsantrasyonunun enerji tüketim etkisinin cevap yüzey grafiği.....	73
Şekil 4.69: Akım yoğunluğunun başlangıç boyar madde konsantrasyonunun enerji tüketimine etkisinin kontur grafiği	74
Şekil 4.70: Akım yoğunluğunun başlangıç boyar madde konsantrasyonunun enerji tüketimine etkisinin cevap yüzey grafiği.....	74
Şekil 4.71: pH'nın destek elektrolit konsantrasyonunun enerji tüketimine etkisinin kontur grafiği.....	75
Şekil 4.72: pH'nın destek elektrolit türünün enerji tüketimine etkisinin cevap yüzey grafiği	75
Şekil 4.73: pH'nın başlangıç boyar madde konsantrasyonunun enerji tüketimine etkisinin kontur grafiği	76
Şekil 4.74: pH'nın başlangıç boyar madde konsantrasyonunun enerji tüketimine etkisinin cevap yüzey grafiği.....	76
Şekil 4.75: Destek elektrolit konsantrasyonunun başlangıç boyar madde konsantrasyonunun enerji tüketimine etkisinin kontur grafiği.....	77
Şekil 4.76: Destek elektrolit konsantrasyonunun başlangıç boyar madde konsantrasyonunun enerji tüketimine etkisinin cevap yüzey grafiği.....	77
Şekil 4.77: Elektrokoksidasyon prosesi için optimum çalışma koşulları	78

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1: Design expert deneysel şartların listesi	14
Tablo 3.2: Deneysel Parametreler	18
Tablo 4.1: Ampirik faaliyetler neticesinde kaydedilen sonuçlar	21
Tablo 4.2: Renk giderim veriminin model uyumsuzluğu	22
Tablo 4.3: Enerji tüketimlerinin model uyumsuzluğu	22
Tablo 4.4: Renk giderim veriminin ANOVA analizinden elde edilen sonuçlar	22
Tablo 4.5: Enerji tüketiminin ANOVA analiz sonuçları	23
Tablo 4.6: Renk arıtımı amacıyla tavsiye edilen kuadratik modelin uyumsuzluğunun testi	27
Tablo 4.7: Enerji tüketimi için önerilen lineer modelin uygunluğunun testi	27
Tablo 4.8: Ampirik faaliyetler sonrasında elde edilen sonuçlar	36
Tablo 4.9: Renk giderim veriminin model uyumsuzluğu	37
Tablo 4.10: Enerji tüketiminin model uyumsuzluğu	37
Tablo 4.11: Renk giderim veriminin ANOVA analiz sonuçları	38
Tablo 4.12: Enerji tüketiminin ANOVA analiz sonuçları	39
Tablo 4.13: Renk arıtımı amacıyla tavsiye edilen kuadratik modelin uyumluluğunun testi ..	42
Tablo 4.14: Tüketilen enerji için tavsiye edilen kuadratik modelin uyumluluğunun testi ..	43
Tablo 4.15: Ampirik faaliyetler neticesinde ulaşılan sonuçlar	57
Tablo 4.16: Renk giderim veriminin model uyumsuzluğu	58
Tablo 4.17: Enerji tüketiminin model uyumsuzluğu	58
Tablo 4.18: Renk giderim veriminin ANOVA analizi sonuçları	59
Tablo 4.19: Enerji tüketimi ANOVA analiz sonuçları	60
Tablo 4.20: Renk arıtımı amacıyla tavsiye edilen kuadratik modeli uyumluluğunun testi ..	63
Tablo 4.21: Enerji tüketimi için önerilen iki faktör etkileşimi modelinin uygunluğunun testi ..	63

SEMBOL LİSTESİ

A	: Amper
AKM	: Askıda Katı Madde
A_s	: Aktif Yüzey Alanı (cm ²)
BOİ	: Biyolojik Oksijen İhtiyacı
C₀	: Başlangıçta Atıksudaki Kirletici Konsantrasyonu (mg/L)
C_e	: Herhangi bir t Anında Atıksuda Kalan Kirletici Konsantrasyonu (mg/L)
DE	: Destek Elektrolit
DEK	: Destek Elektrolit Konsantrasyonu
DET	: Destek Elektrolit Türü
EF	: Elektroflotasyon
EK	: Elektrokoagülasyon
EO	: Elektrooksidasyon
g	: Gram
I	: Akım Şiddeti (Amper)
J	: Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)
k	: Reaksiyon Hız Sabiti
KH	: Karıştırma Hızı
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
kW	: Kilowatt
L	: Litre
M	: Molarite (Molar)
mA	: Mili Amper
M_A	: Molekül Ağırlığı (g/mol)
mg	: Miligram
SKKY	: Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği
T	: Sıcaklık
t	: Zaman
v	: Reaktördeki Toplam Çözelti Hacmi (m ³)
V	: Uygulanan Potansiyel Fark (Volt)
W	: Enerji Tüketimi (kW-saat/m ³)
η	: Arıtma Verimi
μS	: Mikro Siemens

ÖNSÖZ

Lisans eğitimim ve yüksek lisans eğitimim boyunca danışmanlığımı yapan saygı değer Prof. Dr. Baybars Ali FİL hocama emekleri, özverili yaklaşımı, anlayışlı tavrı, yol göstericiliğinden ve eğitim hayatıma sağladığı katkılardan dolayı teşekkürü bir borç bilirim. Balıkesir Üniversitesinin kıymetli hocalarına saygılarımı sunarım. Bu süreçte bana maddi ve manevi destek olan babam Yusuf CİHAN'a, annem Semiha CİHAN'a ve kız kardeşim Selin CİHAN'a minnet duyuyorum. Tez dönemimde bana destek olan nişanlım Ahmet ÇECE'ye çok teşekkür ederim.

Balıkesir, 2024

Sevim Alya CİHAN

1. GİRİŞ

Dünya üzerinde yaşamın var oluşsal etkinliği su ile başlamıştır. Su basit yapılu bir molekül ile başlayan serüvenine kompleks bileşikler oluşturarak devam eder (Sezgin and Elmacı, 2019). Örneğin elimizi yıkarken su ve sabuna ihtiyaç duyarız. Su ve sabun birleştiğinde kompleks yapılu bir bileşik oluşmaktadır (Gökmen, 2020). Oluşan bu bileşik artık kullanılmış, yapısı değişmiş ve atıksu diye adlandırılan kirletilmiş su olmuştur (Ekinci, 2019). Suyun bu denli önemli olduğu hayatımızda çok çabuk tüketmeye, kirletmeye ve yok etmeye programlanmış canlılar olan bizler ne yazık ki bunun farkında değiliz. İnsanların hayatta kalabilmesi için temel ihtiyaçları mevcuttur. Maslow teorisinin fizyolojik ihtiyaçlar kategorisinde yer alan su en temel gereksinimimizdir (Şengöz, 2022). Suyun var olmadığı bir dünyada yaşam düşünülemez. Dünyadaki hidrosfer tabakası %71'lik bir alan kaplamaktadır. Ancak bu alan içerisinde ihtiyacımız olan temiz ve kullanılabilir suyun oranı ise mevcutta sadece %3'tür (Tosun, 2022). İçme suyuna erişimimiz maalesef ki kısıtlıdır. Kısıtlı kaynaklarımızı en verimli ve doğru bir biçimde kullanarak yaşanan su sıkıntısını bir nebze de olsa azaltabiliriz. Küreselleşen dünyada nüfusun bilinçsizce çoğalması ve teknolojik gelişmeler ile insanlığa hizmet eden faaliyetlerin hızlı yükselişinin beraberinde getirdiği çevre sorunlarıyla karşı karşıyayız. Her geçen gün çevre felaketlerine yol açan bizler bu durumu göz ardı edip endüstriyel faaliyetlere ara vermeden devam ediyoruz (Fil, 2022). Dünya üzerinde yaşanan pandemi ile gözlemlenen kirletici parametrelerindeki azalış çevre için ne kadar olumsuz etmenler oluşturduğumuzu bir kez daha gözler önüne sermiştir. Pandemideki kısıtlamalar sonucunda hava kirliliğinde ve sanayi faaliyetleri nedeniyle oluşan atıksu miktarında azalma meydana gelmiştir (Sancar and Bostancı, 2020). Atıksu tanımı gereği görevini tamamlamış yapı bakımından içerisinde ağır metal, toksik madde, organik ve inorganik kirleticiler barındırabilen kullanılmış sulardır (Aydin, 2020). Atıksuyun kirlilik parametreleri değerlendirilirken KOİ, BOİ, AKM, TOK, patojenler, ağır metaller, toksik maddeler, inert maddeler vb. pek çok parametre göz önünde bulundurulur (Üçüncü, 2019). Atıksuların oluşum sürecinden arıtım sürecine kadar durumu incelenir deşarj standartları belirlenerek bertaraf edilir (Gazete, 2004). Atıksuyun arıtım yöntemleri suyun karakterizasyon işleminden sonra değerlendirilir. Atıksuyun cinsine göre arıtma fiziksel, kimyasal, biyolojik ve ileri arıtma yöntemleri ile uygulanabilir (Yüksekdağ et al., 2020). Fiziksel arıtım atıksuyun içinde kabaca bulunan iri taneli kirleticileri yüzdürme, eleme, ayıklama işlemleri olarak sıralanabilir. Fiziksel işlemlerde gözle görülebilen kirleticiler bertaraf edilir. Fiziksel işlemler genellikle arıtma tesislerinin girişlerine dizayn edilir

(Köker). Fiziksel işlemlerden sonra kimyasal işlemler uygulanır. Kimyasal işlemler ise atıksuyun molekül yapısını değiştiren kirleticilerin sudan ayrılması işlemidir. Su yapısal olarak bir oksijen ve iki hidrojen atomundan oluşur. Bu atomların belli bir düzenle birleşmesiyle su molekülleri oluşur. Su moleküllerine farklı grup bileşikler ya da moleküller eklenmesi durumunda yapısı değişir ve bu durum kirliliğe sebep olur. Bu yapısal değişiklikten kaynaklı kirliliği gidermek için farklı kimyasal çözeltiler ilave edilerek atıksudaki bağların koparılması sağlanır. Atıksudan ayrılan kirleticiler kimyasal koagülantlar aracılığıyla çöktürülerek sudan ayrıştırılırlar (A. E. Yılmaz et al., 2022). Çöktürme işleminden sonra sudaki patojenlerden kurtulmak için biyolojik arıtım sürecine geçilmektedir. Biyolojik arıtım proseslerinde organik madde muhteva eden atıksuda deşarj standartlarına göre belirtilen seviyeye getirilir. Biyolojik arıtımı aerobik ve anaerobik prosesler olarak ayırabiliriz. Biyolojik arıtmadan sonraki süreçte kalan çökelek yapının susuzlaştırılması hedeflenir (Elele, 2021). Çökelek yapıdaki çamurlar sudan ayrışır ve su en yakın alıcı ortama (deniz, göl, nehir vb.) deşarj edilir. Çamurlara ise depolama ya da arazide bertaraf işlemi uygulanır (Filibeli et al., 2022). Böylece arıtım süreçleri tamamlanır ve atıksu en zararsız haliyle su döngüsüne tekrar katılmış olur.

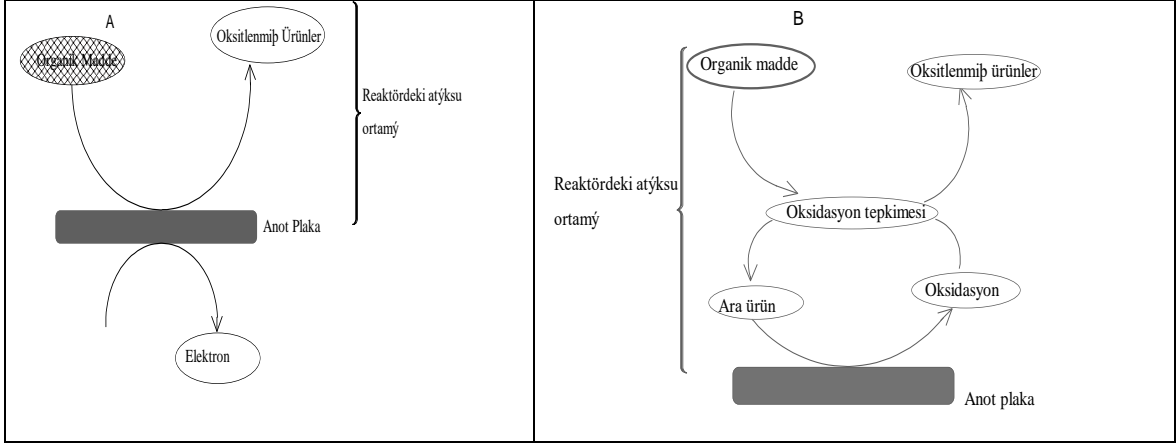
1.1 Elektrokimyasal Arıtım Süreçleri

Elektrokimyasal arıtım atıksu arıtımının ikinci basamağı olan kimyasal arıtımın alt kategorisinde yer almaktadır (Çolak, 2017). Elektrokimyasal arıtım kimyasal arıtmadan farklı olarak kimyasal madde kullanılmadan ya da eser miktarda kullanılarak gerçekleştirilmektedir (Kahraman and Şimşek, 2020). Elektrokimyasal süreçler de kendi içinde gruplara ayrılmaktadır. Elektrokoagülasyon, elektrooksidasyon, elektrodializ, elektrofenton, elektroflotasyon vb. diğer prosesleri sıralayabiliriz (Demiral, 2020). Elektrokimyasal arıtım süreçlerinde atık sudaki organik içerikli maddelerin sudan uzaklaştırılması hedeflenmekte ve atık suda ihtiva olan kirleticilerin; AKM (Askıda Katı Madde), KOİ (Kimyasal Oksijen İhtiyacı), renk, pH, bulanıklık, akım yoğunluğu, DET (Destek Elektrolit Türü) ve DEK (Destek Elektrolit Konsantrasyonu) gibi parametreleri incelenmektedir (Camcıoğlu, 2016). Elektrokimyasal süreçler bir bütün olarak değerlendirildiğinde geleneksel proseslere göre daha avantajlıdır. Modern teknolojinin getirdiği bu süreçlerin işletilmesine yönelik literatürde pek çok çalışma bulmak mümkündür (Solak, 2019). Yapılan çalışmalara istinaden elektrooksidasyon prosesinin daha detaylı

incelenmesi ve literatürdeki çalışmalara destek vermek amacıyla yüksek lisans tez çalışmamda bu konu üzerinde ağırlık verilmiştir.

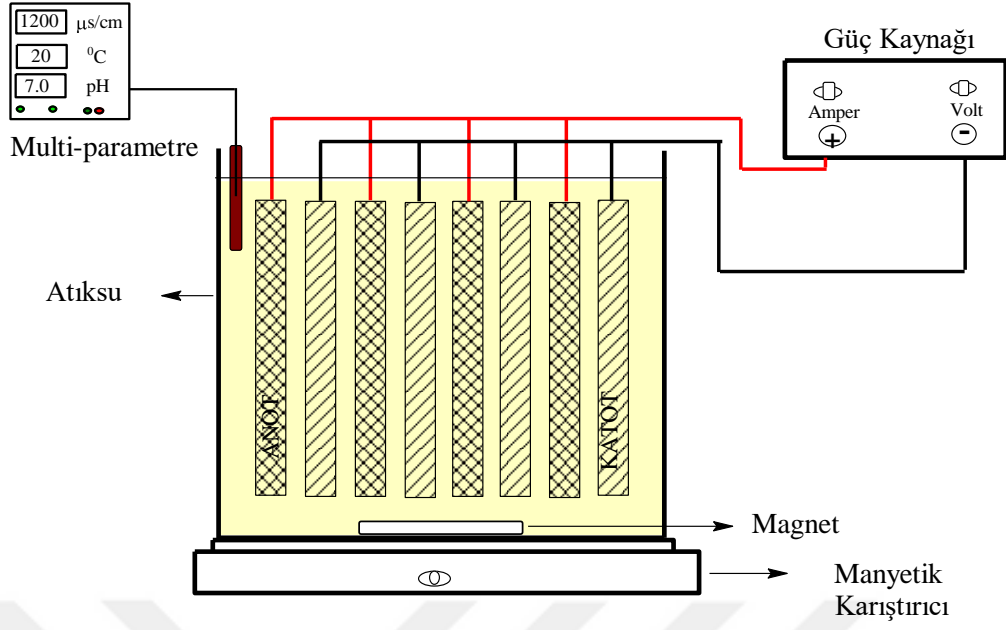
1.1.1 Elektrooksidasyon Arıtım Prosesi

Elektrokimyasal süreçlerin bir parçası da elektrooksidasyon prosesidir. Elektrooksidasyon proses olarak incelendiğinde anot ve katot arasındaki elektriksel gerilimden faydalanarak atıksudaki organik maddeler arasındaki bağları kopartarak doğrudan ya da dolaylı olarak oksijenin oksitleyici gücünü artırarak gerçekleştirilen bir arıtım türüdür (Keyikoğlu, 2018). Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen elektrooksidasyon prosesi için ceketli cam reaktör, güç kaynağı, anot, katot, karıştırıcı, su sirkülatörü vb. malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır (Kama, 2019). Elektrooksidasyon prosesinde kullanılan anotların ve katotların atıksu cinsine göre farklı türleri mevcuttur. Bor kaplı elmas, grafit, Ti/RuO₂, Ti/IrO₂/RuO₂, Ti/Pt, Ti/PbO₂, Ti/SnO₂, Sn-Pd-Ru, Ti/IrO₂ gibi malzemelerden üretilen anotlar kullanılmaktadır (Durmuş, 2019). Genel olarak ana malzeme Ti iken kaplama malzemesi değişmektedir. Atıksuyun cinsine göre kullanılan malzeme belirlenmektedir. Atıksuyun karakterizasyonu gerçekleştirildiğinde cinsi de belirlenmiş olmaktadır (Kurt et al., 2023). Böylelikle prosesin dizaynı yapılarak atıksu arıtımı gerçekleştirilebilmektedir. Dizayn edilen proseslerde çoğunlukla kullanılan anotlar, titanyum üzeri kaplama olarak tercih edilmektedir (Fil et al., 2012). Anotların yüzeyinin belli bir oranda çözünmesi beklenirken, katotların çözünmesi beklenmez. Prosesin dizaynında anot ve katot dizilimi pozitif kutuplu anotlar (+) negatif kutuplu (-) katotlar elektriksel akım geçebileceği şekilde konumlandırılır (Altay, 2020). Elektrooksidasyon doğrudan elektrooksidasyon ve dolaylı elektrooksidasyon olarak iki şekilde incelenir (Müslün and Ayhan, 2015). Doğrudan elektrooksidasyon Elektrotlar yüzeyinde meydana gelen doğrudan elektrooksidasyon, iki kademe de oluşabilmektedir. Birinci kademede kirleticilerin anot yüzeyine difüzyonu olayı olurken, ikinci kademede anot yüzeyine adsorpsiyonu meydana gelmektedir. Netice de bu metotta kirleticilerin bozunmasından elektron transfer hızı ve substrat kütle transferi alakalıdır (Güngördü, 2018). Dolaylı elektrooksidasyon tepkimeleri neticesinde hidrojen peroksit ve hipoklorit gibi güçlü oksitleyiciler meydana gelebilmektedir (Erden, 2018).



Şekil 1.1: Doğrudan elektrooksidasyon (a) Dolaylı elektrooksidasyon

Anot ve katot mesafeleri sisteme verilecek akım yoğunluğuna bağlı olarak hesaplanır. Anot ve katot arasındaki mesafe kısa tutulursa arıtım daha hızlı, mesafe uzun tutulursa ise daha yavaş gerçekleşir. Ayrıca artan mesafe sonucu potansiyel gerilim artacağından elektrik tüketimi artacaktır (Derel, 2022). Sistem çalıştırıldığında güç kaynağından çıkan elektriksel akım anotlardan ve katotlardan geçerek sudaki kirleticileri uzaklaştırır (Oduncu, 2017). Bu uzaklaştırma işlemi sırasında sistemin sıcaklığında artış gözlemlenir. Sıcaklığın aşırı artması arzu edilen biri durum olmadığından sistemin belirli sıcaklıklarda çalıştırılmasını sağlamak için su sirkülatörü devreye alınarak sıcaklık sabit tutulmaktadır (Elgün, 2022). Sıcaklığın sabit tutulması için ceketli cam reaktör tercih edilmektedir. Bunun sebebi reaktör içindeki atıksuyun sıcaklığı artarken, reaktörün dış kısmında su sirkülatöründen gelen suyun sistemin sıcaklığını dengelemesidir. Atıksuyun homojen olması istenmektedir (H. Öztürk, 2019). Olası floklaşma ve çökeltiliyi engelleme amacıyla karıştırma ünitesi sisteme dahil edilir. Karıştırma işleminde reaktörün içine karıştırma çubuğu konularak manyetik karıştırıcı ile homojen dağılım sağlanır (Tosun, 2022). Elektrooksidasyon proses olarak daha işlevsel ve daha verimli bir sistemdir. Elektrooksidasyon prosesinde hidroksil radikalleri oluştuğu için pH elektrolitik reaksiyonlara tesir etmektedir. Elektrooksidasyon prosesinde arıtım esnasında başlangıç pH'sı düşüş göstermektedir (Polat, 2020).



Şekil 1.2: Elektrokoksidasyon prosesi

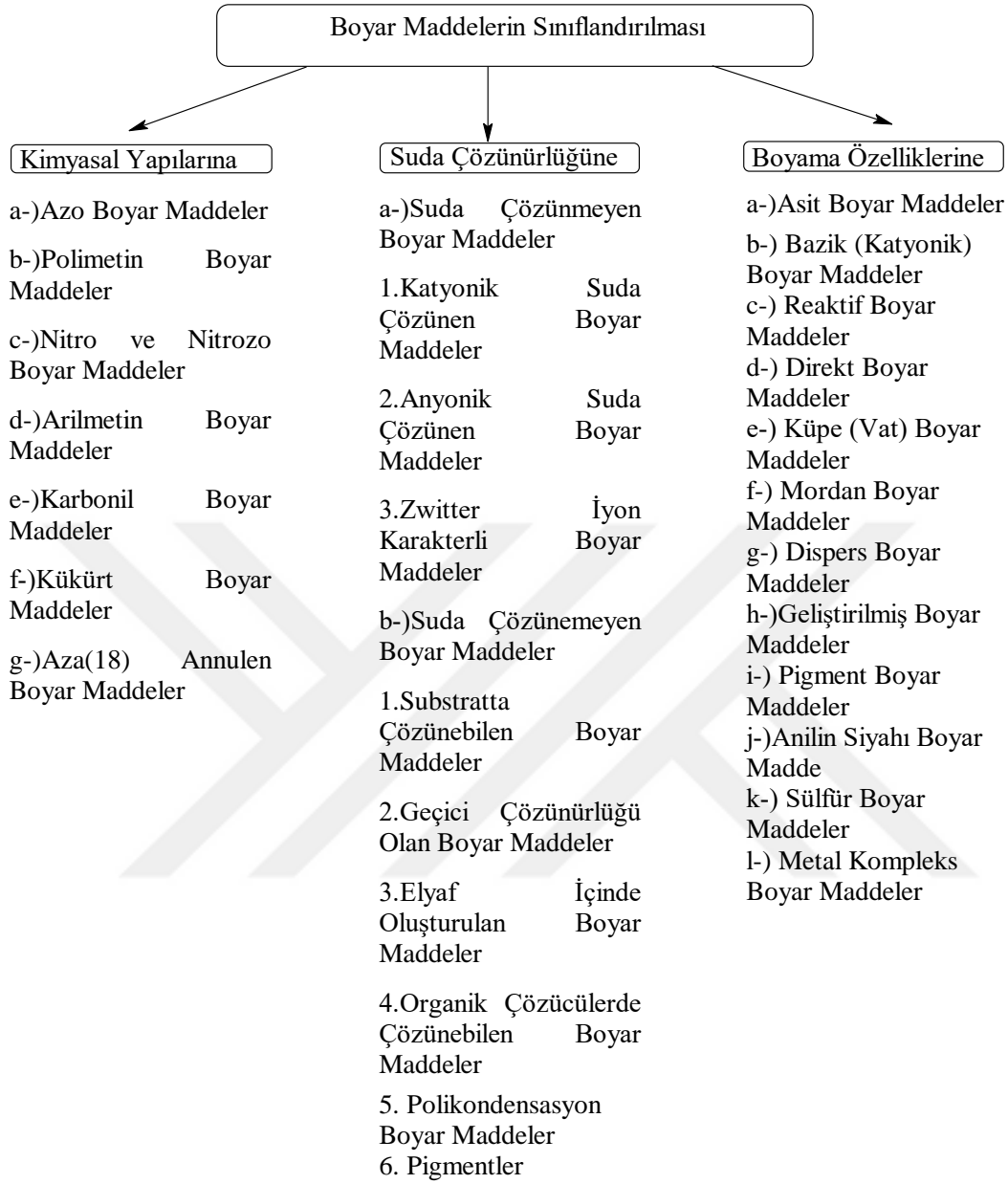
2. KURAMSAL KAVRAMLAR

2.1 Boyama Maddeleri

Etimolojik olarak kökeni Eski Türkçeye dayanan boya kelimesi Uygur yazıtlarında da bahsi geçen “bodü” kelimesinden türetilmiştir. Boya kavramının çağrıştırdığı diğer kavramlar ışık, renk ve pigment olarak düşünülebilir. Renk kavramı ise dilimize Fars dilinden geçiş yapmıştır (Kuyumcu, 2020). Işık; elektromanyetik tayfların insan gözünün algılayabildiği kısım içinde yer alan elektromanyetik radyasyon olarak tanımlanmaktadır (Houser et al., 2021). Işığın gözdeki retinaya düşmesiyle cisim üzerinden kırılıp yansıyan ışığın soğurularak algılanması renk olarak nitelenmektedir (Sims et al., 2021). İnsan gözü 380nm ve 780nm aralığındaki dalga boyuna sahip spektrumları algılayabilmektedir (Hipólito and Coelho, 2023). Bu aralıkta görülen elektromanyetik tayflar görünür ışık olarak adlandırılır (Austin et al., 2021). Renk skala olarak geniş bir aralığa sahiptir. Bizlerin algıladığı ana ve ara olmak üzere iki temel renk grubu vardır. Ana renkler olarak adlandırılan kırmızı, mavi, sarı ve ara renkler olarak adlandırılan turuncu, yeşil, mor olarak sıralanabilir. Işık aralığı olarak bakıldığında kırmızıdan mora kadar olan aralıktaki radyo dalgalarını algılayabilmekteyiz. En yüksek dalga boyuna sahip olan 780 nm dalga boyu kırmızı rengi, 380 nm dalga boyu ise mor rengi temsil etmektedir. Renk kartelası bizlere sunulan eşsiz bir cennet gibidir. Gözümüzün görüp beynimizin algılayabildiği hayatlarımızı eğlenceli, huzurlu, sıcak, soğuk, karamsar, mutlu vb. pek çok farklı hislerle yaşayabilmemizi sağlar (Gürel, 2015). Renkleri görünür kılma işi de boyanın görevidir. Boyalar hemen hemen her alanda kullanılan materyallerdir. Endüstriyel, zirai, inşaat, gıda, tekstil, kozmetik, deri, matbaa, mobilya, otomotiv, deniz ve hava ulaşım araçları, yalıtım boya olarak birçok sektörde kullanılmaktadır. Boyar maddeler kullanım alanına göre katı, sıvı, gaz formlarda bulunmaktadır.

2.2 Boyar Maddelerin Sınıflandırılması

Boyaları sınıflandırırken yapısı, kullanım alanı, rengi ve uygulama metotları dikkate alınmaktadır (D. Yılmaz, 2018). Boyar maddeleri boyama özelliklerine göre üç grupta inceleyebiliriz (Paçacı, 2017).

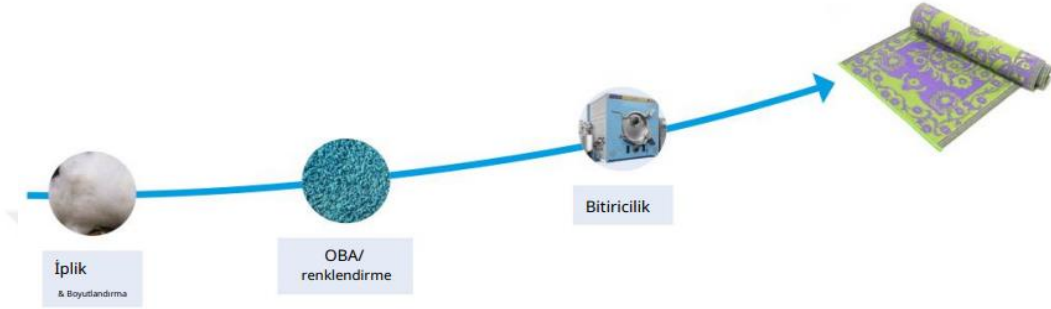


Şekil 2.1: Boyarmaddelerin sınıflandırılması (Balcı, 2022)

2.3 Katyonik (Bazik) Boyarmaddeler

İçerik olarak N ve S atomlarını pozitif yük taşıyıcı olarak bünyesinde barındırmaktadır (Yücel, 2021). Katyonik boyaların en yaygın kullanım yerleri naylon, pamuk, ipek gibi tekstil mamulleridir (Savcı, 2019). Katyonik boyaların en belirleyici özelliği parlaklığı ve renk şiddetidir (Taçi, 2022). Katyonik boyarmadde 80°C-90°C arasında poliakrilik elyaflara minimum zamanda nüfus eder ve kumaş boya ile bir bütün oluşturmaktadır (Ümmetoğlu,

2021). Genellikle tekstil endüstrisinde daha çok tercih edilen bu boyalar kullanılırken asetik asit ve tannik asit aracılığıyla uygulanır ve bu işlem sonucunda tuz oluşumu meydana gelmektedir (Karaçıray, 2019). Katyonik boyalar bazik yapıda olmaları sebebiyle elyaf maddesinin anyonik grup kısımları ile boyar maddenin katyonik kısımları, elyaf- boya tuzunu meydana getirir ve oluşan tuzun bağ yapısı iyoniktir (Yücel, 2021). Katyonik boyar maddeler, organik bazların hidroklorür formunda bulunan ve renkli bölümlerinde katyonik grupları muhteva eden maddelerdir (Alver, 2022).



Şekil 2.2: Halı renklendirme işlemi

2.4 Literatür Araştırması

Boyar maddeler tekstil, gıda, ziraat, inşaat, ilaç vb. pek çok farklı alanda kullanılmaktadır. Boyar maddelerin atıksudaki giderimi çeşitli yöntemlerle sağlanmaktadır. Giderim prosesleri olarak adsorpsiyon, koagülasyon, elektrodializ, elektrokoagülasyon, membran, elektrooksidasyon vb. tercih edilmektedir. Adsorpsiyon prosesi ile giderimde boyar maddenin adsorbana olan kimyasal birleşmeye yatkınlık göstermesinden kaynaklanmaktadır (Namal, 2017). Adsorpsiyonun üç çeşidi mevcuttur; fiziksel adsorpsiyon kimyasal adsorpsiyon ve iyonik adsorpsiyondur (Özer, 2020). Su ve atıksu arıtım sistemlerinde adsorpsiyon süreci deterjan bazlı ürünlerin sudan uzaklaştırılması, endüstriyel atıksularda kalıcı organik maddelerin ve rengin giderilmesi, atıksudaki fenol ve klor gibi maddelerin uzaklaştırılması vb. durumlarda kullanılmaktadır (Sönmez, 2014). Koagülasyon prosesinde reaktöre bir kimyasal madde (koagülant) ilave edilerek, su içerisinde kendi ağırlıkları ile çökelemeyen partiküllerin durgunluklarının bozulması amaçlanmaktadır (Yeşiltaş and Ersü, 2021). Koagülasyon fizikokimyasal arıtımın bir parçası olup ön arıtım yöntemi olarak kullanılmaktadır (Karaman, 2022). En yaygın uygulanan proseslerden olan koagülasyon

prosesinin ekonomik olduğu, işletiminin kolay ve enerji tüketimeinin az olduğu bilinse de halk sağlığı açısından kullanılan kimyasalların olumsuz etkilerinin olduğu bilinmektedir (Durna and Genç, 2021). Elektrodializ prosesinin temel bileşenleri anot, katot ve membrandır (Kaya, 2021). Elektrodializ prosesi işletilirken elektrik akımı ile iyonlar, iyon seçici membranlar doğrultusunda hareket ederler ve ayırım durumu meydana gelir (etin, 2006). Elektrodializ prosesi kendi içinde üç ana prosese ayrılır klasik elektrodializ, bipolar membranlı elektrodializ ve ters elektrodializ (F. İlhan, 2020). Elektrodializ proseslerinde konsantre akım için kullanılan sıvılar her defasında kullanılarak konsantre akımın minimizasyonu gerçeklemektedir (Fatih İlhan, 2018). Öteki membran proseslerinde kirleticiler ortamda kalıp, membran porlarından suyun geçmesi istenirken, elektrodializ prosesinde tam tersi bir süreç gözlemlenir. Elektrokoagülasyon (EK), kirleticilerin uzaklaştırılması için kullanılan bir elektrokimyasal ayırma yöntemidir ve sulu çözeltilerden elektrik akımı geçirilerek uygulanmaktadır (Popovic, 2020). Elektrolitik çözeltilerde çözünmüş veya askıda parçacıklar halinde bulunan kirleticileri, elektrik akımının uygulanmasıyla istikrarsızlaştırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrokoagülasyon düzeni, bir elektrolitik hücre ve kontrollü bir doğru akım güç kaynağına bağlanan bir dizi kurban metal elektrottan (genellikle Fe veya Al) oluşur (Das et al., 2022). Elektrokoagülasyon işlemi sırasında kirleticiler, elektrokimya, pıhtılaşma, çökeltme ve yüzdürme gibi bir dizi karmaşık reaksiyon mekanizmasıyla giderilir (Chen et al., 2021). Akım yoğunluğunun uygulanması, kurban anotların çözünmesi yoluyla alüminyum katyonlarının (Al^{+3}) oluşumuna ve çökmesine sebep olur (Bener et al., 2019). Çözünmüş metal iyonu ve hidrojen gazı anot ve katotta üretilmektedir (Asfaha et al., 2021). Elektrokoagülasyon yeterli bir teknik olmasına rağmen yüksek enerji maliyeti, elektrotların pasivasyonu, elektrotların değiştirilmesi vb. gibi dezavantajları vardır (Oza et al., 2021). Avantajları ise basit deney kurulumu ve işletimi, daha az arıtma süresi, kimyasal ilavesi olmaması, flokların daha hızlı çökeltilmesi ve daha az çamur oluşması, daha düşük elektrikle kirleticilerin uzaklaştırılmasında yüksek verimlilik gibi sıralanabilmektedir (Asaithambi et al., 2021). Membranlar, iki faz arasında bulunan yarı geçirgen bariyerler olarak tanımlanmaktadır (Efe, 2022). Su ve atık su arıtımında membran prosesler suyun ince bir sentetik membrandan geçirilerek içindeki kirleticilerden ayrılması işlemi olarak da adlandırılabilir. Su moleküllerinin geçişi membran porlarından sağlanırken kirleticiler membran porlarında tutulmaktadır (elik, 2022). Membranlar gözenek boyutlarına göre mikrofiltrasyon (MF), ultrafiltrasyon (UF), nanofiltrasyon (NF) ve ters ozmoz (RO) membranları olarak ayrılırlardır (Asif and Zhang, 2021). Membran endüstrisi řu anda

çoğunlukla standart polimerler veya inorganik malzemelerden (orijinal olarak membranlar için geliştirilmemiş) oluşan yerleşik malzemelerden ve faz ters çevirme, ara yüzey polimerizasyonu ve kaplama gibi kolayca ölçeklenebilir üretim süreçlerinden oluşan bir portföy kullanmaktadır (Nunes et al., 2020). Elektrooksidasyon prosesi (EO), yüksek voltajlı anotlarda oksijen ve klor gelişimi ile oksidasyon ajanlarının doğrudan ve dolaylı olarak üretildiği organik kirleticilerin yok edilmesi için kullanılan bir prosestir (Ghanbari et al., 2020). Elektrooksidasyon prosesi, pıhtılaştırıcıların/flokülanların kontrollü elektrolizi ile ender olarak çözünür metal elektrotlar kullanılarak elektrolitte metal hidroksit floklarının oluşmasını sağlamaktadır (Özyonar and Korkmaz, 2022). EO işlemi, kirleticilerin direkt elektrot üzerinde oksitlenerek veya dolaylı yoldan solüsyonda oksidanlar meydana getirerek uzaklaştırıldığı güncel ortaya çıkan bir işlemdir (Asfaha et al., 2021). Elektrooksidasyon prosesi çözelti içindeki hidroksil radikali (OH^{*}) gibi, su matrisinde bulunan organik bileşikler parçalayabilen ve bunların tam mineralizasyonunu sağlayan güçlü bir oksitleyici maddenin üretilmesine dayanmaktadır (Santos et al., 2022). Anot malzemesi olarak bor katkılı elmas (BDD), Ti/SnO₂, Sb/PbO₂, Ti/PbO₂, Ce/PbO₂, Ti/IrO₂, Ti/RuO₂, Ti/IrO₂/RuO₂, Ti/Pt, Sn-Pd-Ru tercih edilebilmektedir (Barisci and Suri, 2021). Elektrooksidasyon işlemleri kolay operasyona sahip, yüksek verimli teknolojiye sahiptir (Bampos et al., 2021). EO hala yüksek enerji tüketimi, yüksek ekonomik girdi ve yan ürünlerin kirlenmesi gibi doğal dezavantajları vardır ve bu da büyük ölçekli uygulamayı uygunsuz hale getirmektedir (Chang et al., 2020).

3. MATERYAL ve METOT

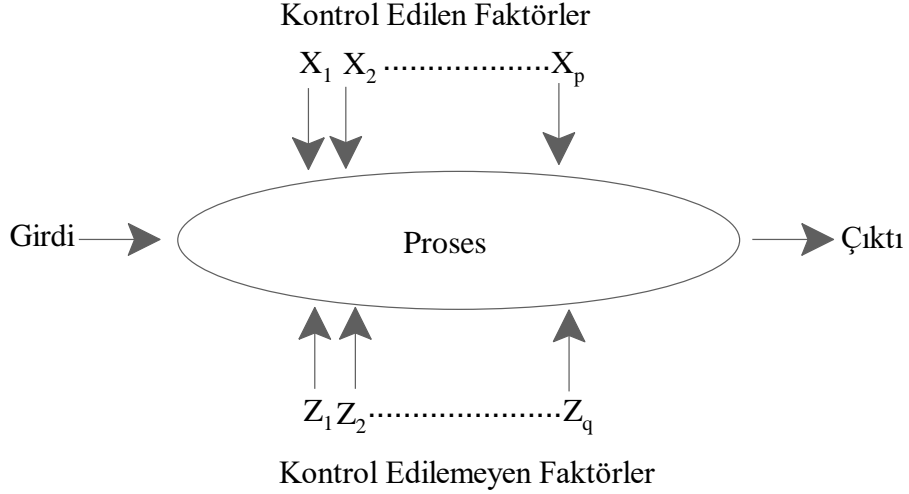
Yapılan bu tez çalışmasında yöntem olarak elektrooksidasyon prosesi çalışılmıştır. Elektrooksidasyon prosesi prensip olarak güç kaynağından çıkan akımın anot ve katot yüzeylerinden geçerek atıksuyu oksitleyip arıtması işlemidir. Atıksu laboratuvar ortamında hazırlanmıştır. Sentetik atıksuda arzu edilen iletkenliğin sağlanabilmesi için destek elektrolit olarak NaCl kullanılmıştır.

3.1 Cevap Yüzey Yöntemi

Genel olarak yapılan araştırmalarda sistem verimi incelenirken tüm parametreler sabit tutularak değerlendirme yapılmaktadır. Fakat böyle bir değerlendirme parametrelerin değerleri hakkında sağlıklı veriler vermemektedir (Süzen, 2015). Neticesinde en doğru deneysel verim, zaman, maliyet gibi parametrelere ulaşmak için uygun modelleme yapılmalıdır (Sivri, 2020). Cevap yüzey yöntemi proseslerin geliştirilmesi ve optimizasyonun elde edilmesi için matematiksel ve istatistiksel donelerin birlikte yürütülmesini hedefleyen bir metottur (Aktaş, 2020). Bu yöntemde belirleyici parametreler genellikle iki-sekiz arası devamlı aktif faktör olarak tanımlanmaktadır (Gülümser, 2021). Bağımsız unsurlar ve bağımlı değişken olan cevap arasındaki bağlantıyı bizlere sunan eğriyi modellemektedir. Unsurların, cevabı minimize veya maksimize edecek ya da belirli bir değerde olacak biçimde iyileştirilmesiyle elde edilmektedir (Gürbüz, 2015). Bu yöntem 1951 yılında ilk olarak Box ve Wilson tarafından öne sürülmüş ve iyileştirmeler yapılmıştır (Ş. E. Çebi, 2018). Bu metot, süreçleri etkileyen parametreler arasındaki etkileşimleri belirleyebilir, hangi etkileşimin daha etkin olduğunu belirleyebilir ve prosesin optimizasyonu için hangi parametreye daha duyarlı olduğunu belirleyebilir (Er, 2023).

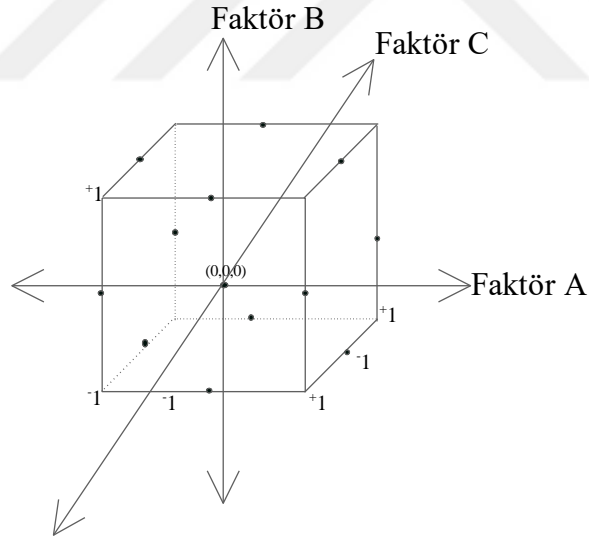
3.2 Box-Behnken Dizaynı

Box- Behnken dizaynı, çeşitli süreç faktörlerinden etkilenen cevapları optimize etmek için uygun bir matematiksel ve istatistiksel tekniktir (Kassem et al., 2022). Genel olarak yöntem, her işlem faktörü için üç seviye gerektirir ve gerekli deneyler, faktörlerin kombinasyonuna dayalı olarak yürütülür (Matias et al., 2022). Box-Behnken tasarımı, parametreler arasındaki karşılıklı etkileşimleri hesaba katması, küresel tasarımlar sağlaması ve deneylerin yalnızca üç boyutta yapılmasını gerektirmesi nedeniyle tercih edilmektedir (Song et al., 2021).



Şekil 3.1: Bir sistem veya prosese ait şematik gösterim (Sapayeva, 2023)

Dizayn oluşturulurken bağımsız değişkenleri belirleyen bir noktası merkez olarak seçilen ve 0 noktasını temsil etmektedir. Box-Behnken tasarımında bu değerden eşit mesafede var olan noktalar ise +1 ve -1 değerleri ile sembolize edilmektedir (Lam et al., 2023).



Şekil 3.2: Box-Behnken tasarımı geometrik görünümü (A. Çebi, Şubat, 2022)

Box-Behnken tasarımı, girdi faktörleri ile yanıt arasındaki ilişkiyi gösteren ikinci dereceden bir denklem oluşturmak için N deney öneren tipik bir ikinci dereceden yanıt yüzeyi tasarımıdır. Box-Behnken dizaynı, merkezi bir nokta ve küre üzerine bindirilmiş bir küpün kenarlarında yer alan birkaç orta noktadan oluşan küresel bir cevap yüzey yöntemidir (Li et al., 2019).

$$N = 2k \times (k - 1) + C_0 \quad (3.1)$$

N: Deney sayısı

k: Faktörlerin sayısı

C₀: Merkezi noktaların sayısıdır (Uykan, Şubat, 2022).

$$M = f(x_1, x_2, \dots, x_p) \pm \delta \quad (3.2)$$

Burada M tüm sistemi, x₁, x₂, ... x_p etki düzeyi ölçülen faktörleri, f cevap fonksiyonunu ve δ istatistiksel hatayı temsil etmektedir (Uykan, Şubat, 2022). Prosesleri optimize etmek için cevap yüzey regresyon analizi uygulamasında kullanılan kuadratik eşitlik modeli aşağıda verilmiştir (Uykan, Şubat, 2022).

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i x_i + \sum_{i=1}^p \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{p-1} \sum_{j=i+1}^p \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3.3)$$

Y: Sistem cevabını

x_i: Girdi faktörlerini

β₀: Model sabitini

β_{ii}: (i=1, 2, ..., p)

β_{ij}: (i=1, 2, ..., p; j=1, 2, ..., p) interaktif katsayıları

p: Faktör veya parametrelerin sayısını

ε: İstatistiksel hatayı temsil etmektedir.

Her bir bağımsız değişken aşağıdaki denkleme göre kodlanmıştır (Kösem, 2023).

$$X_i = \frac{X_i - X_0}{\Delta X} \quad (3.4)$$

x_i: Değişkenin boyutsuz değerini

X_i: Değişkenin gerçek değerini

X₀: Merkez noktada değişkenin gerçek değerini

ΔX: Değişim değerini temsil etmektedir (Kösem, 2023).

Box-Behnken tasarımı, sonuçları analiz ederek ve tahmine dayalı bir model oluşturarak deneysel koşullara dayalı bir yanıtı optimize etmek için kullanılabilir (Muthukumar et al., 2003). Blok kullanımı, model uyum tespiti eksikliği, sıralı tasarımlar oluşturma yeteneği ve ikinci dereceden modelin parametrelerinin tahmin edilmesi gibi birçok avantajı vardır (Abd-El-Aziz et al., 2022). Box-Behnken dizaynı interaktif parametrelerin etkilerini belirlenme ve

etki düzeyinin ölçülmesine, sistem cevapları ve proses parametreleri arasındaki ilişkiyi açıklamaktadır (Hassaan et al., 2023).

3.3 Kullanılan Boyar Maddeler

Archroma firmasına ait halı renklendirme işlemi sırasında kullanılan akrilik boya kullanılmıştır. Deneylerde akrilik toz boya kullanılmıştır. Katyonik akrilik boyalardan Doracryl yellow XGFLS, Doracryl red XFRLS, Doracryl blue XFGRL tercih edilmiştir. Atıksu hazırlama aşamasında öncelikle boyar maddenin dalga boyu taraması yapılmıştır. Bu tarama ilgili boyar maddenin hangi dalga boyunda ölçülmesi gerektiğini belirlemek için yapılmıştır. 1000 mL'lik balon joje içerisine 0,1 g boya ilave edilerek atıksu hazırlanmıştır. Her deney için deney şartları Design Expert programında belirlenmiştir. Yapılması planlanan deneyler için 30 setlik deney şartları oluşturulmuştur. Deneysel şartlar olarak akım yoğunluğu, boyar madde konsantrasyonu, pH ve destek elektrolit konsantrasyonu baz alınmıştır. Design Expert programı kullanılarak oluşturulan model aşağıda verilmiştir.

Tablo 3.1: Design expert deneysel şartların listesi

Std	Run	A-Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	B-pH	C-Destek Elektrolit Konsantrasyonu (mM NaCl)	D-Başlangıç Boyar Madde Konsantrasyonu (mg/L)
29	1	2,6	7	10	150
8	2	3,9	11	15	100
17	3	2,6	7	10	150
1	4	1,3	3	5	100
11	5	1,3	11	5	200
21	6	2,6	7	10	150
22	7	2,6	7	15	150
3	8	1,3	11	5	100
9	9	1,3	3	5	200
7	10	1,3	11	15	100
15	11	1,3	11	15	200
12	12	3,9	11	5	200
13	13	1,3	3	15	200
30	14	2,6	7	10	150
25	15	2,6	7	10	150
20	16	2,6	11	10	150
24	17	2,6	7	10	200
28	18	2,6	7	10	150
10	19	3,9	3	5	200
14	20	3,9	3	15	200
26	21	2,6	7	10	150

Tablo 3.1: (devam)

Std	Run	A-Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	B-pH	C-Destek Elektrolit Konsantrasyonu (mM NaCl)	D-Başlangıç Boyar Madde Konsantrasyonu (mg/L)
4	22	3,9	11	5	100
5	23	1,3	3	15	100
19	24	2,6	7	10	150
27	25	2,6	7	10	150
6	26	3,9	3	15	100
16	27	3,9	11	15	200
18	28	3,9	7	10	150
23	29	2,6	7	10	100
2	30	3,9	3	5	100

3.4 Kullanılan Malzemeler

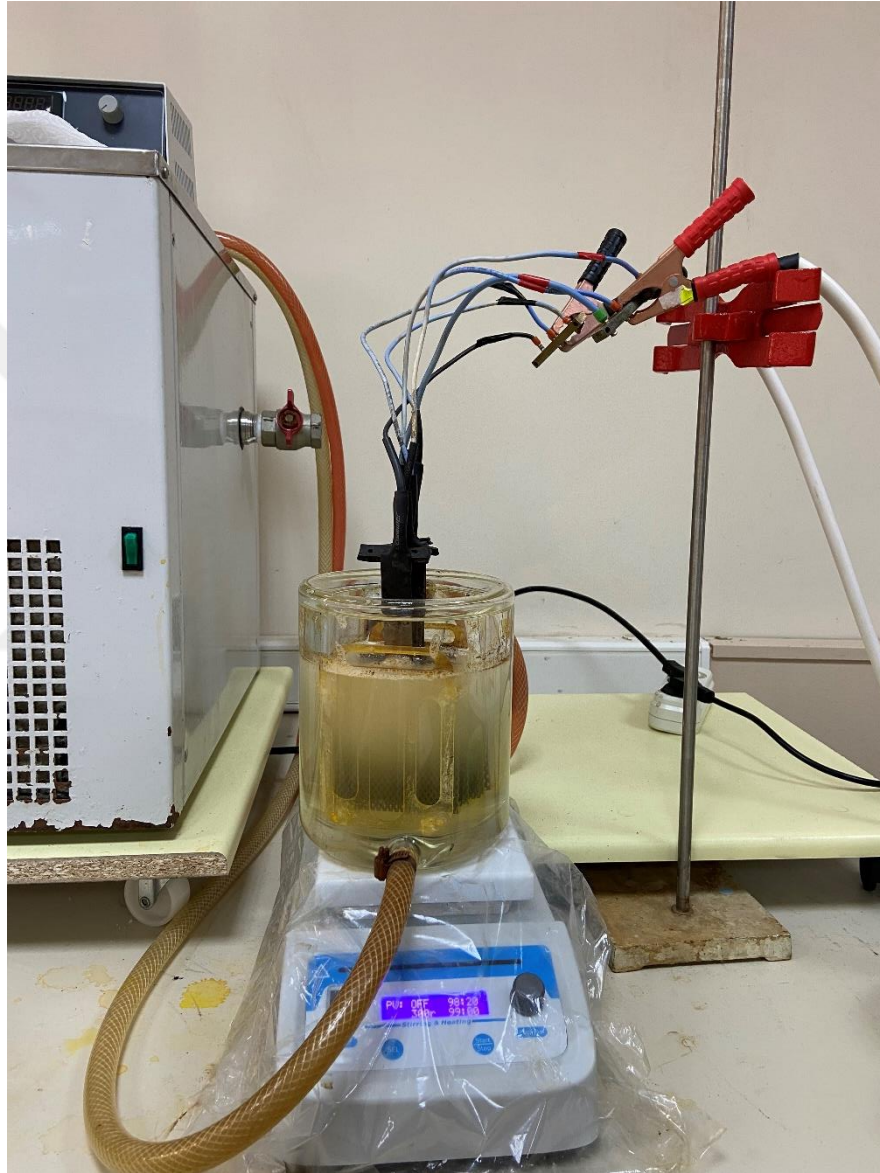
Model her boya için aynı deney şartlarını belirlemiştir. Kullanılan boya katyonik boyalar sınıfında yer almaktadır. Kullanılan üç boya için toplamda 90 deney gerçekleştirilmiştir. Deneyler gerçekleştirilirken kullanılan materyaller aşağıdaki gibi verilmiştir.

1. Güç Kaynağı (ALPHAWORLD)
2. Ceketli Cam Reaktör (2000 mL)
3. Su Sirkülatörü (NUMAN SM 1)
4. Manyetik Karıştırıcı
5. Anot ve katot platformu (Ti/IrO₂/RuO₂ anot, Kaplanmamış Titanyum katot)
6. pH metre (Thermo Orion)
7. İletkenlik Ölçer (Thermo Orion)
8. Sıcaklık Ölçer (Thermo Orion)
9. Balon joje
10. Cam tüpler
11. Saf Su
12. Katyonik Akrilik Boya (Archroma Akrilik)
13. Otomatik Pipet
14. Hassas Tartı
15. Spektrofotometre (Hach Lange DR 5000)

3.5 Deneyin Yapılışı

Yukarıdaki materyaller kullanılarak deneyler aşağıdaki prosedürlere göre yapılmıştır. Atıksu laboratuvar ortamında gözlemci tarafından hazırlanmıştır. Atıksu sentetik atıksu olarak

hazırlanmıştır. Atıksu içeriğinin hazırlanması için 1000 mL'lik saf su içerisine katyonik boya konulmakta ve iletkenliği sağlamak için NaCl tuzu ilave edilmektedir. Hazırlanan sentetik atıksu ceketli cam reaktöre aktarılır. Ceketli cam reaktörün içindeki sentetik atıksuya magnet atılarak suyun homojen karışması sağlanır. 15 dakika sonundaki alınan numuneler spektrofotometrede ölçülerek elde edilen sonuçlar modelde kullanılmıştır.



Şekil 3.3: Deney esnasından bir görüntü

3.6 Deney Düzenegi

Sentetik olarak hazırlanan atıksuyun içine 5'er mm aralıklarla 3 tane Ti/IrO₂/RuO₂ anot, 3 tane kaplanmamış titanyum katot yerleştirilmiştir. Toplamada 6 adet elek tipi ve boyutları

70 mm'ye 100 mm boyutlarında plakalarla arıtma işlemine geçilmiştir. Hesaplama yapılırken kullanılan plakaların ıslak yüzey alanları 1848 cm^2 olarak belirlendi. Akım yoğunluğu hesaplanırken aktif anodik yüzey alanı kullanılmaktadır. Aktif anodik yüzey alanı 770 cm^2 olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplar doğrultusunda optimum şartlar aşağıdaki şekilde bulunmuştur.



Şekil 3.4: Deneilerde kullanılan güç kaynağı

Tablo 3.2: Deneysel Parametreler

Deneysel Parametreler	-1	0	+1
Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	1,3	2,6	3,9
pH	3	7	11
Destek Elektrolit Konsantrasyonu (mM)	5	10	15
Boya Konsantrasyonu (mg/L)	100	150	200
Destek Elektrolit Türü	NaCl	NaCl	NaCl
Karıştırma Hızı (rpm)	300	300	300
Sıcaklık (°C)	20±1	20±1	20±1

3.7 Deneysel Hesaplamalar

Deneilerin sonucunda istenen veriler renk giderim verimi ve tüketilen enerji miktarının bulunmasıdır. Renk giderim işlemi 15. Dakikadaki sentetik atıksuda ne kadar boyar madde kaldığını bulmak için eşitlik 3.5'teki hesaplama yapılmaktadır.

$$\%Renk\ Giderimi = \left(\frac{C_0 - C_e}{C_0} \right) * 100 \quad (3.5)$$

C₀: Başlangıç Boyar Madde konsantrasyonu, mg/L

C_e: Çıkış konsantrasyonu, mg/L

Deneilerin gerçekleştiği esnada boyar maddenin giderilebilmesi için elektriksel akım kullanılmaktadır. Vektörel bir büyüklük olan akım yoğunluğu tanım olarak elektrik akımının kesit alana oranı olarak ifade edilebilir. Yapılan hesaplama eşitlik 3.6'da verilmiştir.

Akım Yoğunluğu;

$$J = \frac{I}{A} \quad (3.6)$$

J: Akım yoğunluğu mA/cm²

I: Akım Şiddeti mA (miliamper),

A: Aktif anot yüzey alanı (cm²),

Akım yoğunluğuna bağlı olan enerji tüketimi ise eşitlik 3.7'de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

Enerji Tüketimi;

$$W = \frac{V \cdot I \cdot t}{v} \quad (3.7)$$

V: Potansiyel fark (volt)

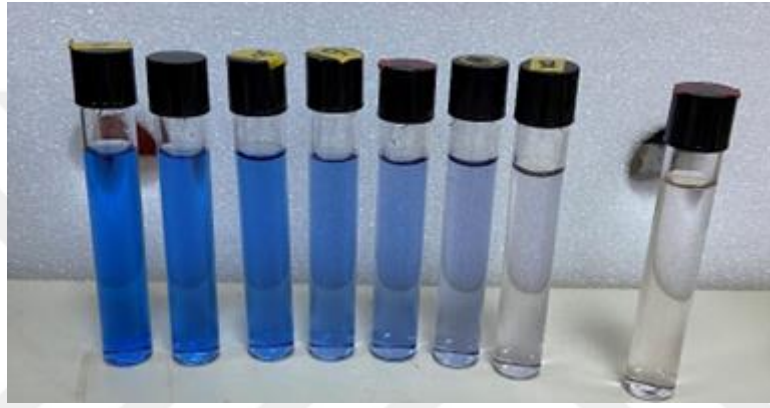
I: Akım şiddeti (amper)

W: Enerji tüketimi (kW-sa /m³)

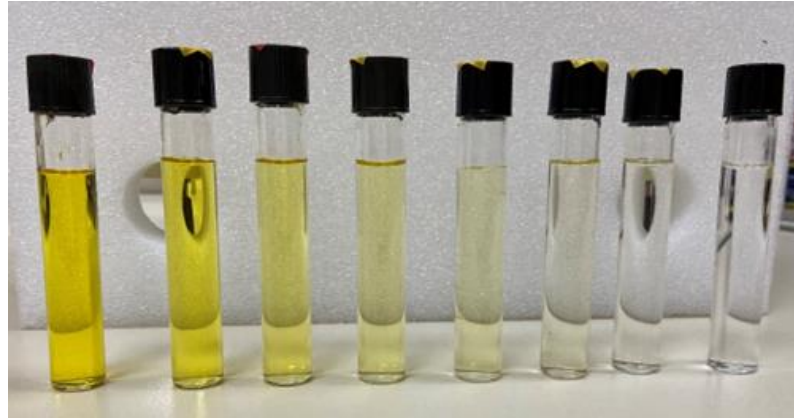
t: Zaman (saat)

v: Hacim (m³)

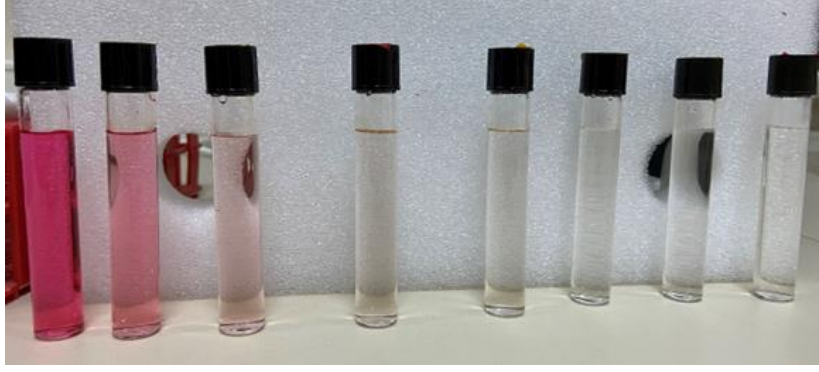
Yukarıdaki denklemde değerler yerine konularak hesaplanır.



Şekil 3.5: Doracryl blue XFGRL boyasının renk giderim evrelerindeki numune örnekleri



Şekil 3.6: Doracryl yellow XGFLS boyasının renk giderim aşamasındaki numune örnekleri



Şekil 3.7: Doracryl red XFRLS boyasının renk giderimi sırasındaki numune örnekleri



4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1 Doracryl yellow XGFLS için yapılan çalışmalar

Bu bölümde doracryl yellow XGFLS boyasının elektrooksidasyon prosesi kullanılarak renk giderimi ve enerji tüketimi araştırılmıştır. Doracryl yellow XGFLS boyar maddesinin elektrooksidasyon prosesi yardımıyla arıtımında deneysel dizayn matrisine dayanılarak gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde ulaşılan renk arıtım verimi ve enerji tüketim neticeleri tablo 4.1’de sunulmuştur.

Tablo 4.1: Ampirik faaliyetler neticesinde kaydedilen sonuçlar

Std	Ru n	Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	pH	Destek Elektrolit Konsantrasyonu (mM NaCl)	Başlangıç Boyar Madde Konsantrasyonu (mg/L)	Renk Giderim Verimi (%)	Enerji Tüketimi (kW-sa/m ³)
29	1	2,6	7	10	150	71,15	2,233
8	2	3,9	11	15	100	82,30	3,400
17	3	2,6	7	10	150	74,04	2,033
1	4	1,3	3	5	100	47,12	0,783
11	5	1,3	11	5	200	28,28	1,175
21	6	2,6	7	10	150	66,70	2,300
22	7	2,6	7	15	150	78,10	1,967
3	8	1,3	11	5	100	18,60	0,800
9	9	1,3	3	5	200	36,41	0,700
7	10	1,3	11	15	100	50,23	0,767
15	11	1,3	11	15	200	43,15	0,750
12	12	3,9	11	5	200	63,50	4,450
13	13	1,3	3	15	200	52,48	0,683
30	14	2,6	7	10	150	78,36	2,033
25	15	2,6	7	10	150	74,36	2,300
20	16	2,6	11	10	150	61,93	1,933
24	17	2,6	7	10	200	73,98	2,033
28	18	2,6	7	10	150	68,64	2,433
10	19	3,9	3	5	200	58,16	3,600
14	20	3,9	3	15	200	79,94	3,250
26	21	2,6	7	10	150	68,66	2,167
4	22	3,9	11	5	100	53,13	3,850
5	23	1,3	3	15	100	60,81	0,683
19	24	2,6	7	10	150	71,09	2,433
27	25	2,6	7	10	150	68,12	2,333
6	26	3,9	3	15	100	95,58	3,000
16	27	3,9	11	15	200	71,74	3,500
18	28	3,9	7	10	150	89,45	3,800
23	29	2,6	7	10	100	78,72	2,133
2	30	3,9	3	5	100	63,22	3,600

Tablo 4.1’de verilen değerler box-behnken dizaynı ile optimize edildiğinde, renk giderimi için kuadratik model, enerji tüketimi için lineer model olduğu görülmektedir. Enerji tüketimi ve renk arıtım verimi üzerine gerçekleştirilen model uyumsuzluğu testinin neticeleri Tablo 4.2 ve Tablo 4.3’te sunulmuştur.

Tablo 4.2: Renk giderim veriminin model uyumsuzluğu

Varyasyon Kaynağı	Kareler Toplamı	SD	Kareler Ortalaması	f Değeri	p Değeri	
Doğrusal	2261,04	17	133,00	9,49	0,0015	
İki Faktör Etkileşimi	1944,98	11	176,82	12,62	0,0007	
Kuadratik	200,46	7	28,64	2,04	0,1687	Önerilen
Kübik	4,83	1	4,83	0,3445	0,5734	
Saf Hata	112,07	8	14,01			

Tablo 4.3: Enerji tüketimlerinin model uyumsuzluğu

Varyasyon Kaynağı	Kareler Toplamı	SD	Kareler Ortalaması	f Değeri	p Değeri	
Doğrusal	0,7962	17	0,0468	2,08	0,1470	Önerilen
İki Faktör Etkileşimi	0,3857	11	0,0351	1,56	0,2708	
Kuadratik	0,1849	7	0,0264	1,17	0,4102	
Kübik	0,0047	1	0,0047	0,2098	0,6591	
Saf Hata	0,1802	8	0,0225			

Renk giderimi tahmini ve enerji tüketimi tahmini için meydana çıkarılan kuadratik model ve lineer model olarak gerçekleştirilen her bir tabirin modellemedeki tesiri anova analizi yapılarak tespit edilmiştir. Tablo 4.4 ve Tablo 4.5’te anova analizi sonuçları sunulmuştur.

Tablo 4.4: Renk giderim veriminin ANOVA analizinden elde edilen sonuçlar

Varyasyon Kaynağı	Kareler Toplamı	SD	Kareler Ortalaması	f Değeri	p Değeri	
Model	8385,57	14	598,97	28,75	< 0.0001	Önemli
A-Akım Yoğunluğu	3462,52	1	3462,52	166,19	< 0.0001	
B-pH	399,72	1	399,72	19,18	0,0005	
C-Destek Elektrolit Konsantrasyonu	1855,43	1	1855,43	89,05	< 0.0001	

Tablo 4.4: (devam)

Varyasyon Kaynağı	Kareler Toplamı	SD	Kareler Ortalaması	f Değeri	p Değeri	
D-Başlangıç Boyar Madde Konsantrasyonu	98,31	1	98,31	4,72	0,0463	
AB	57,57	1	57,57	2,76	0,1172	
AC	14,60	1	14,60	0,7008	0,4156	
AD	1,23	1	1,23	0,0592	0,8110	
BC	6,221E-09	1	6,221E-09	2,986E-10	1,0000	
BD	111,01	1	111,01	5,33	0,0357	
CD	131,65	1	131,65	6,32	0,0239	
A ²	0,9561	1	0,9561	0,0459	0,8333	
B ²	101,32	1	101,32	4,86	0,0435	
C ²	89,90	1	89,90	4,32	0,0554	
D ²	11,71	1	11,71	0,5619	0,4651	
Kalıntı	312,53	15	20,84			
Model Uyumsuzluğu	200,46	7	28,64	2,04	0,1687	Önemsiz
Saf Hata	112,07	8	14,01			
Toplam	8698,10	29				

28,75 olan model f-değeri, modelin anlamlı olduğunu ima etmektedir. Gürültü nedeniyle bu kadar büyük bir f-değerinin ortaya çıkma olasılığı yalnızca %0,01'dir.

0,0500'den küçük p-değerleri, model terimlerinin anlamlı olduğunu göstermektedir. Bu durumda A, B, C, D, BD, CD, B² anlamlı model terimleridir. 0,1000'den büyük değerler, model terimlerinin anlamlı olmadığını göstermektedir. Çok sayıda önemsiz model terimi varsa (hiyerarşiyi desteklemek için gerekenler hariç), model azaltma modelinizi geliştirebilmektedir.

Uyum eksikliği f-değerinin 2,04 olması, uyum eksikliğinin saf hataya göre önemli olmadığı anlamına gelmektedir. Bu kadar büyük bir uyum eksikliği f-değerinin gürültü nedeniyle ortaya çıkma olasılığı %16,87'dir. Anlamlı olmayan uyum eksikliği iyidir, modelin uymasını isteriz.

Tablo 4.5: Enerji tüketiminin ANOVA analiz sonuçları

Varyasyon Kaynağı	Kareler Toplamı	SD	Kareler Ortalaması	f Değeri	p Değeri	
Model	34,51	4	8,63	220,87	< 0.0001	Önemli

Tablo 4.5: (devam)

Varyasyon Kaynağı	Kareler Toplamı	SD	Kareler Ortalaması	f Değeri	p Değeri	
A-Akım Yoğunluğu	33,58	1	33,58	859,73	< 0.0001	
B-pH	0,2670	1	0,2670	6,83	0,0149	
C-Destek Elektrolit Konsantrasyonu	0,5829	1	0,5829	14,92	0,0007	
D-Başlangıç Boyar Madde Konsantrasyonu	0,0703	1	0,0703	1,80	0,1917	
Kalıntı	0,9764	25	0,0391			
Model Uyumsuzluğu	0,7962	17	0,0468	2,08	0,1470	Önemsiz
Saf Hata	0,1802	8	0,0225			
Toplam	35,48	29				

220,87 olan model f değeri, modelin anlamlı olduğunu ima etmektedir. Gürültü nedeniyle bu kadar büyük bir f-değerinin ortaya çıkma olasılığı yalnızca %0,01'dir.

0,0500'den küçük p değerleri, model terimlerinin anlamlı olduğunu göstermektedir. Bu durumda A, B, C anlamlı model terimleridir. 0,1000'den büyük değerler, model terimlerinin anlamlı olmadığını göstermektedir. Çok sayıda önemsiz model terimi varsa (hiyerarşiyi desteklemek için gerekenler hariç), model azaltma modelinizi geliştirebilmektedir.

2,08 olan uyum eksikliği f değeri, uyum eksikliğinin saf hataya göre anlamlı olmadığını ima eder. Gürültü nedeniyle bu kadar büyük bir uyumsuzluk f değerinin ortaya çıkma olasılığı %14,70'tir. Anlamlı olmayan uyum eksikliği iyidir, modelin uyması istenmektedir.

Gerçek faktörler açısından renk giderimi son denklem eşitlik 4.1'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} \% \text{ Renk Giderim Verimi} = & A \times 10,48767 + B \times 3,53018 + C \times 10,10621 - D \times 0,293045 + AB \times \\ & 0,364787 + AC \times 0,146970 - AD \times 0,004272 - BC \times 9,85914 + BD \times 0,13170 - CD \times 0,011474 - \\ & A^2 \times 0,505537 - B^2 \times 0,549673 - C^2 \times 0,331388 + D^2 \times 0,000933 \end{aligned} \quad (4.1)$$

Gerçek faktörler cinsinden denklem, her faktörün belirli seviyelerine verilecek yanıt hakkında tahminlerde bulunmak için kullanılabilir. Burada her faktör için seviyelerin orijinal birimlerinde belirtilmesi gerekir. Bu denklem, her faktörün göreceli etkisini belirlemek için

kullanılmamalıdır çünkü katsayılar, her faktörün birimlerini barındıracak şekilde ölçeklendirilir ve kesişim, tasarım alanının merkezinde değildir.

Kodlanmış faktörler açısından renk giderim son denklem eşitlik 4.2’de verilmiştir.

$$\begin{aligned} \% \text{ Renk Giderim Verimi} = & A \times 14,61 - B \times 4,97 + C \times 10,70 - D \times 2,34 + AB \times 1,90 + AC \times 0,9553 - \\ & AD \times 0,2777 - BC \times 0,0000 + BD \times 2,63 - CD \times 2,87 - A^2 \times 0,8544 - B^2 \times 8,79 - C^2 \times 8,28 + D^2 \times \\ & 2,33 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Kodlanmış faktörler cinsinden denklem, her faktörün belirli seviyelerine verilen yanıt hakkında tahminlerde bulunmak için kullanılabilir. Varsayılan olarak faktörlerin yüksek seviyeleri +1, düşük seviyeleri ise -1 olarak kodlanır. Kodlanmış denklem, faktör katsayılarını karşılaştırarak faktörlerin göreceli etkisini belirlemek için kullanışlıdır.

Gerçek faktörler açısından enerji tüketimi son denklem eşitlik 4.3’te verilmiştir.

$$\text{Enerji Tüketimi} = A \times 1,08216 + B \times 0,031359 - C \times 0,037070 + D \times 0,001250 \quad (4.3)$$

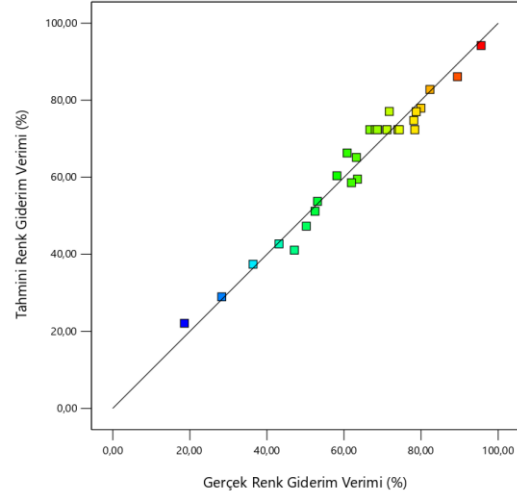
Gerçek faktörler cinsinden denklem, her faktörün belirli seviyelerine verilecek yanıt hakkında tahminlerde bulunmak için kullanılabilir. Burada her faktör için seviyelerin orijinal birimlerinde belirtilmesi gerekir. Bu denklem, her faktörün göreceli etkisini belirlemek için kullanılmamalıdır çünkü katsayılar, her faktörün birimlerini barındıracak şekilde ölçeklendirilir ve kesişim, tasarım alanının merkezinde değildir. Kodlanmış faktörler açısından enerji tüketimi son denklem eşitlik 4.4’te verilmiştir.

$$\text{Enerji Tüketimi} = A \times 1,41 + B \times 0,1254 - C \times 0,1853 + D \times 0,0625 \quad (4.4)$$

Kodlanmış faktörler cinsinden denklem, her faktörün belirli seviyelerine verilen yanıt hakkında tahminlerde bulunmak için kullanılabilir. Varsayılan olarak faktörlerin yüksek seviyeleri +1, düşük seviyeleri ise -1 olarak kodlanır. Kodlanmış denklem, faktör katsayılarını karşılaştırarak faktörlerin göreceli etkisini belirlemek için kullanışlıdır.

% Renk Giderim Verimi

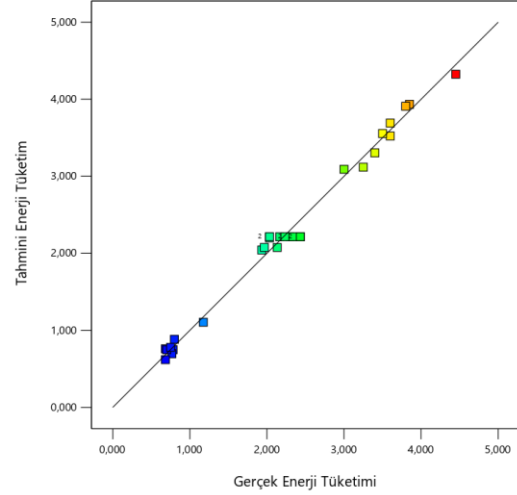
Color points by value of
% Renk Giderim Verimi:
18,60 95,58



Şekil 4.1: Renk giderim veriminin gerçek -model arasındaki fark

Enerji Tüketimi

Color points by value of
Enerji Tüketimi:
0,683 4,450



Şekil 4.2: Enerji tüketiminin gerçek- model arasındaki fark

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 değerlendirildiğinde kaydedilen gerçek değerler ve tahmini değerler kesişmektedir. Çıkan neticeler dikkate alınarak renk artım verimi ve enerji tüketimi bağlamında önerilen modelin uyumsuzluğunun tetkik edilmesi için Box-Behnken tasarım uygulanarak tespit edilmiştir. Tablo 4.6 ve Tablo 4.7 de sunulan kuadratik modelin ve lineer modelin uyumsuzluğunun sınanması maksadıyla kullanılan istatistiksel sonuçlar incelenmelidir.

Tablo 4.6: Renk arıtımı amacıyla tavsiye edilen kuadratik modelin uyumsuzluğunun testi

Std. Dev.	0,1976	R^2 (Belirtme Katsayısı)	0,9725
Ortalama	2,24	R^2_{adj} (Düzeltilmiş Belirtme Katsayısı)	0,9681
C.V.% (Varyasyon Katsayısı)	8,83	R^2_{pred} (Tahmini Belirtme Katsayısı)	0,9580
		Yeterli Hassasiyet	44,1263

0,7284'lük tahmini R^2 , normalde beklendiği gibi 0,9305'lik düzeltilmiş R^2 'ye yakın değildir; yani fark 0,2'den fazladır. Bu, büyük bir blok etkisine veya modeliniz ve/veya verilerinizle ilgili olası bir soruna işaret ediyor olabilir. Göz önünde bulundurulması gerekenler, model azaltma, yanıt dönüştürme, aykırı değerler vb.'dir. Tüm ampirik modeller, doğrulama çalışmaları yapılarak test edilmelidir. Yeterli hassasiyet sinyal-gürültü oranını ölçer. Oranın 4'ten büyük olması arzu edilir. 22.342 oranınız yeterli bir sinyale işaret ediyor. Bu model tasarım alanında gezinmek için kullanılabilir.

Tablo 4.7: Enerji tüketimi için önerilen lineer modelin uygunluğunun testi

Std. Dev.	0,1976	R^2 (Belirtme Katsayısı)	0,9725
Ortalama	2,24	R^2_{adj} (Düzeltilmiş Belirtme Katsayısı)	0,9681
C.V.% (Varyasyon Katsayısı)	8,83	R^2_{pred} (Tahmini Belirtme Katsayısı)	0,9580
		Yeterli Hassasiyet	44,1263

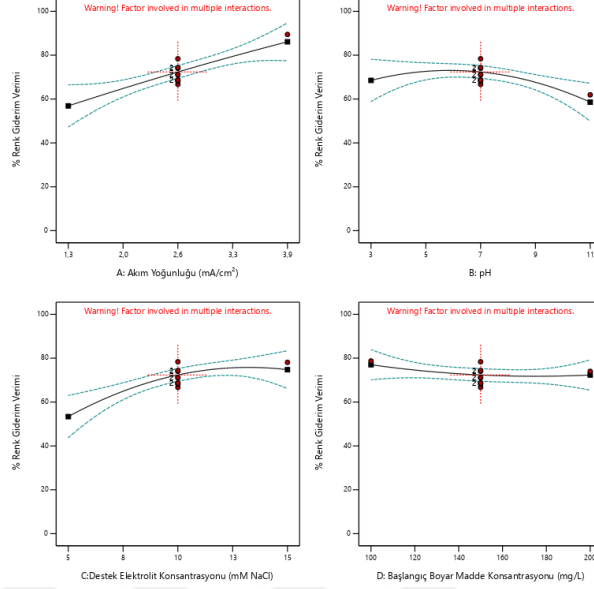
0,9580'lik tahmini R^2 , 0,9681'lik düzeltilmiş R^2 ile makul düzeyde uyum içindedir; yani fark 0,2'den azdır. Yeterli hassasiyet sinyal-gürültü oranını ölçer. Oranın 4'ten büyük olması arzu edilir. 44.126 oranınız yeterli bir sinyale işaret ediyor. Bu model tasarım alanında gezinmek için kullanılabilir.

Factor Coding: Actual

% Renk Giderim Verimi
● Design Points
-----95% CI Bands

Actual Factors

A = 2,6
B = 7
C = 10
D = 150



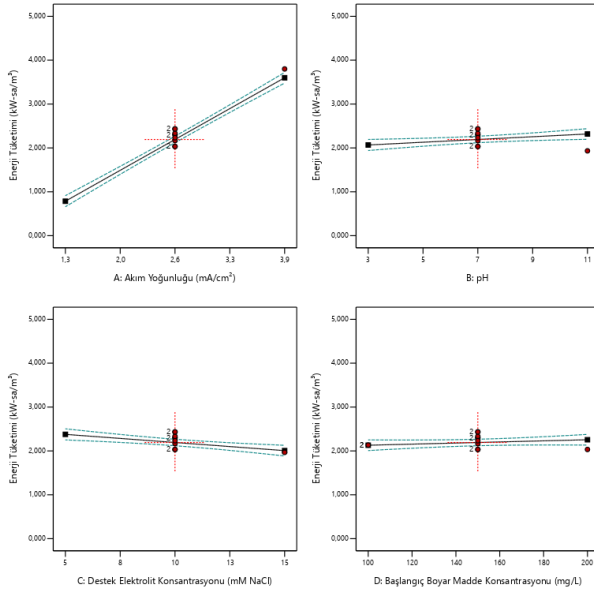
Şekil 4.3: Her bir değişkenin yalnız olarak renk giderim verimine tesirleri

Factor Coding: Actual

Enerji Tüketimi (kW-sa/m³)
● Design Points
-----95% CI Bands

Actual Factors

A = 2,6
B = 7
C = 10
D = 150

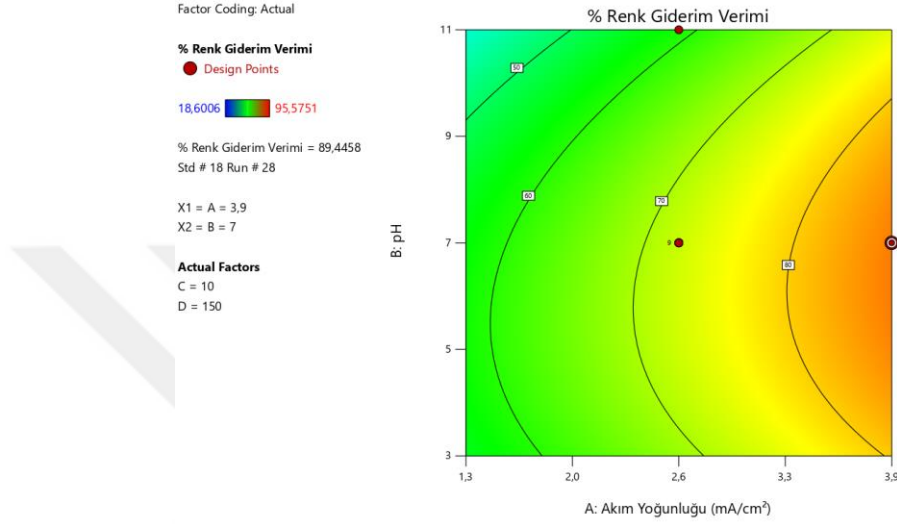


Şekil 4.4: Her bir değişkenin yalnız olarak enerji tüketimine tesirleri

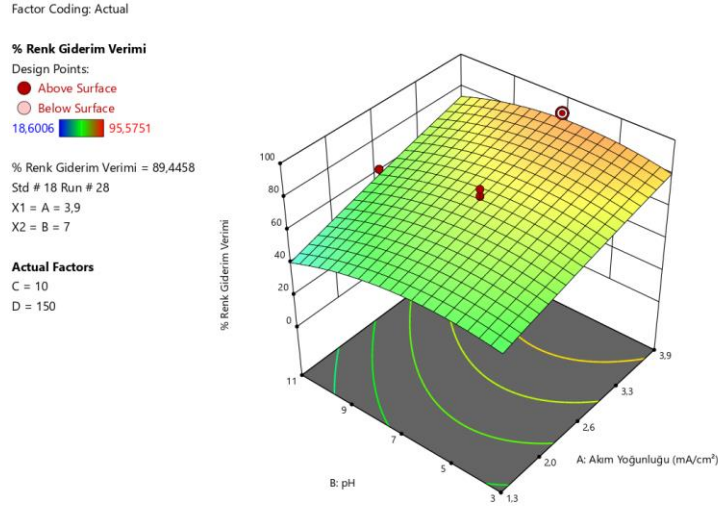
4.1.1 Akım Yoğunluğunun ve pH'nın Renk Giderimine Etkisi

Akım yoğunluğu elektrooksidasyon prosesi için en kritik parametredir. Akım yoğunluğu ve giderim verimi genellikle doğru orantılı olarak değişmektedir. Akım yoğunluğu artırıldıkça

giderim verimi artar. Yapılan deneylerde akım yoğunluğu $1,3 \text{ mA/cm}^2$, $2,6 \text{ mA/cm}^2$ ve $3,9 \text{ mA/cm}^2$ olarak seçilmiştir. Katyonik boyalarda pH azaldıkça renk gideriminin arttığı, pH arttıkça renk gideriminin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu gözlemlere dayanarak maksimum renk giderim verimi %89,45 olarak bulunmuştur. Çalışılan pH değerleri ise 3, 7 ve 11'dir. Karıştırma hızı ve çalışma sıcaklığı sabit tutulmaktadır. Şekil 4.5 ve 4.6'da görüldüğü üzere düşük pH ve yüksek akım yoğunluğunda giderim verimi en yüksektir.



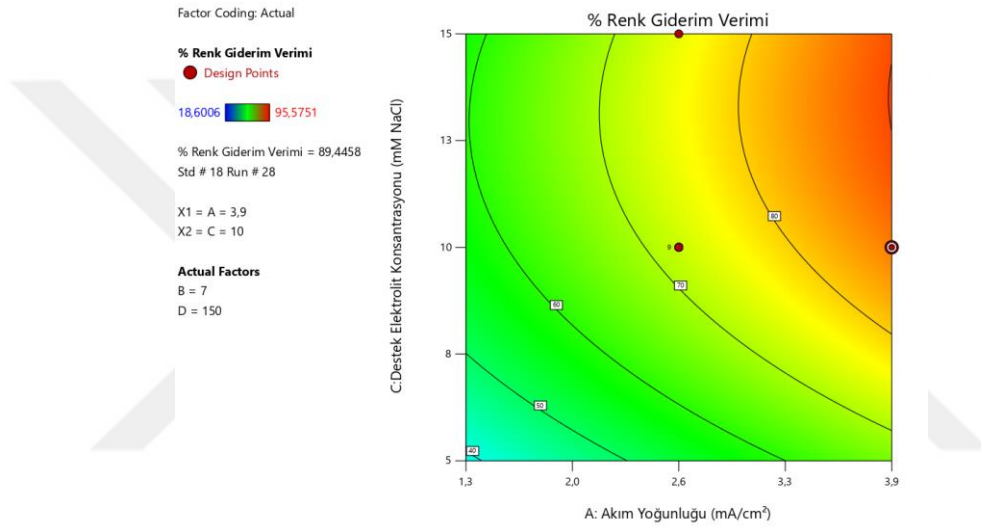
Şekil 4.5: Akım yoğunluğu ve pH'nın renk giderim verimi üzerindeki etkisinin incelendiği kontur grafiği



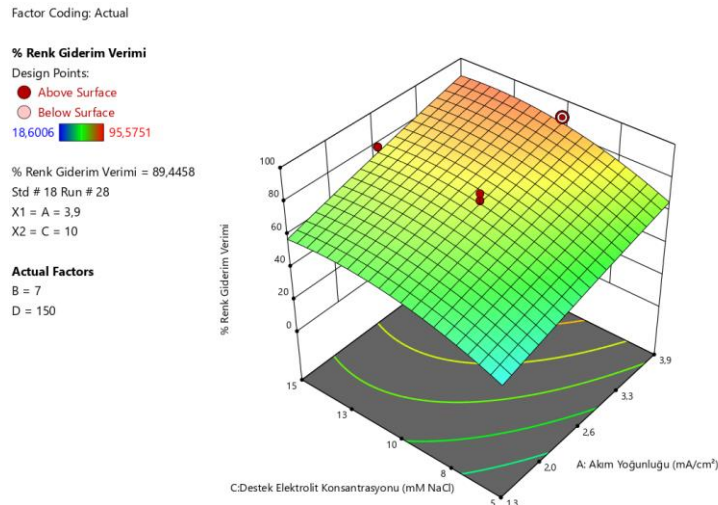
Şekil 4.6: Akım yoğunluğunun ve pH'nın renk giderim verimine etkisinin incelendiği cevap yüzey grafiği

4.1.2 Akım Yoğunluğunun ve DEK'in Renk Giderimine Etkisi

Destek elektrolit kullanılmasının amacı ortamın iletkenliğinin artırılmasıdır. İletkenlik ortamda bulunan yüklerin daha rahat taşınmasını ve giderimin artmasını sağlayan bağlayıcıdır. Destek elektrolit konsantrasyonu arttırıldığında ortamda bulunan yüklerde artmış olur ve akımın geçmesi gereken tanecik fazlalığından dolayı akımında arttırılması gerekmektedir. Şekil 4.7 ve 4.8'de deney sırasında pH 7, akım yoğunluğu 3,9 mA/cm², DEK ise 10 mM NaCl ve C₀ 150 mg/L olarak çalıştırıldığında maksimum renk giderim verimi %89,45 olarak gözlemlenmiştir.



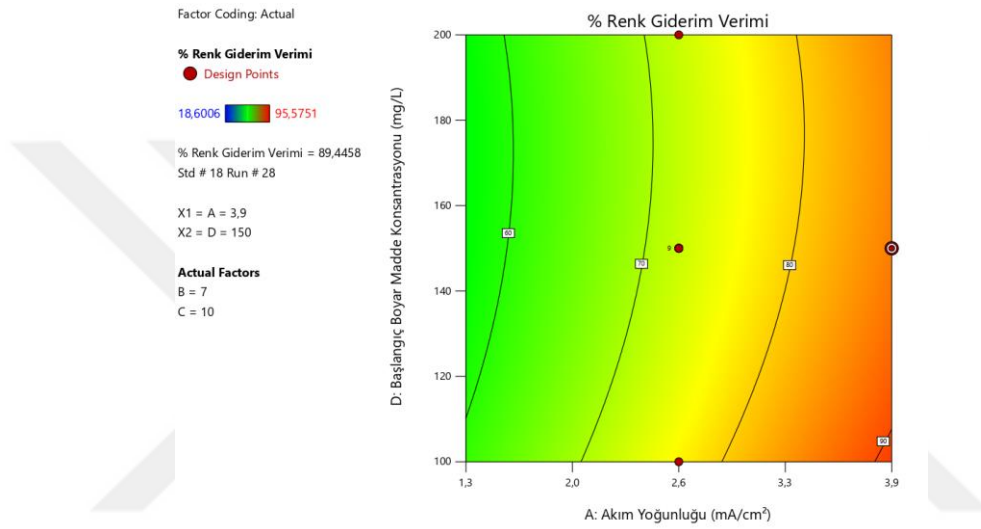
Şekil 4.7: Akım yoğunluğunun destek elektrolit konsantrasyonunun renk giderim verimine etkisinin kontur grafiği



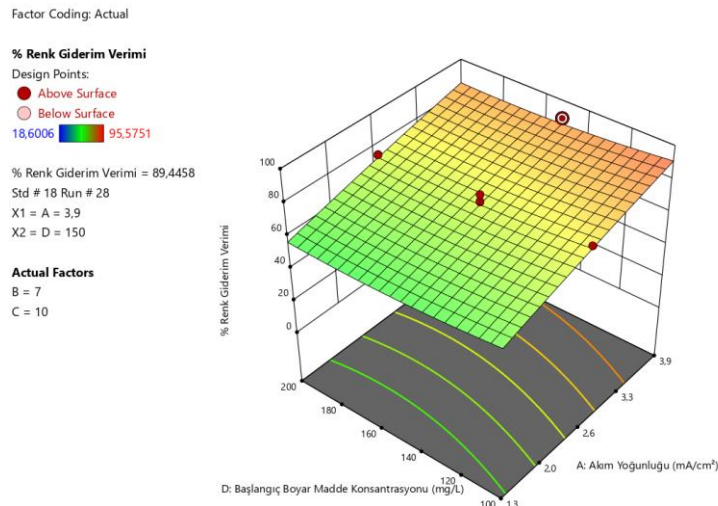
Şekil 4.8: Akım yoğunluğunun ve DEK'in renk giderim verimine etkisi

4.1.3 Akım Yoğunluğunun Boya Konsantrasyonunun Renk Giderimine Etkisi

Akım yoğunluğu ve boyar madde konsantrasyonunun incelediği Şekil 4.9 ve 4.10'da akım yoğunluğunu $3,9 \text{ mA/cm}^2$ olduğu, boyar madde konsantrasyonunun 100 mg/L olduğu deneysel şartlarda renk giderim veriminin en yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ortamda bulunan kirletici miktarı arttığı zaman giderimin sağlanması için sarf edilen elektriksel kuvvetinde artırılması gerekmektedir. Yapılan deneyde zaman içinde boyar madde konsantrasyonu artırılarak akım yoğunluğundaki değişimler kaydedilmiştir. Kaydedilen sonuçlara göre maksimum renk giderim verimi %89,45 olarak belirlenmiştir.



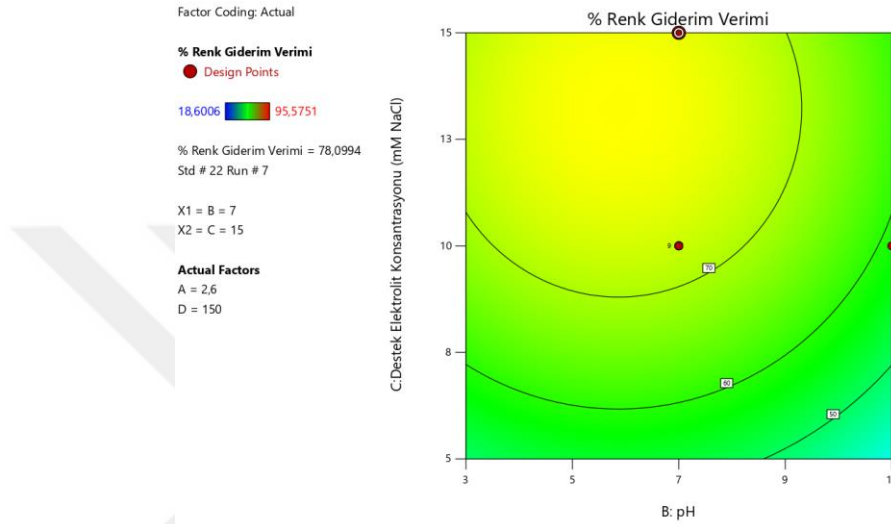
Şekil 4.9: Akım yoğunluğunun başlangıç boyar madde konsantrasyonunun renk giderim verimine etkisinin kontur grafiği



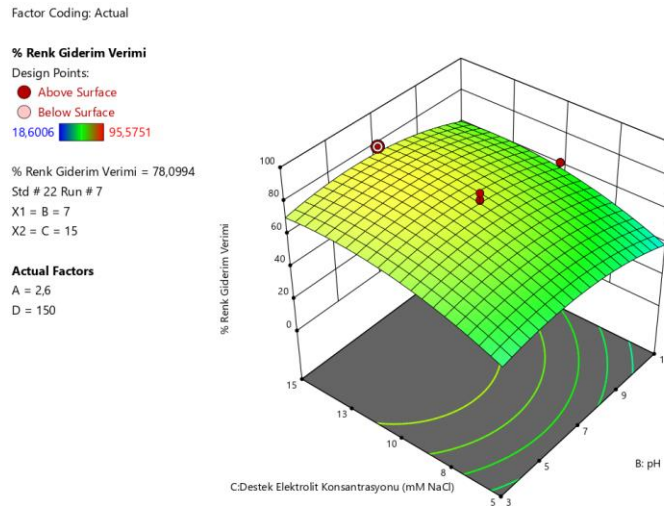
Şekil 4.10: Akım yoğunluğunun ve C_0 'a renk giderim verimine etkisi

4.1.4 pH'nın ve DEK'in Renk Giderimine Etkisi

Edinilen şekil 4.11 ve 4.12'den anlaşıldığı üzere destek elektrolit konsantrasyonunun pH'yı çok fazla etkilemediği görülmüştür. Grafiklerde keskin bir geçiş yoktur. Destek elektrolit türü olarak NaCl seçilmiştir. pH düşük tutularak destek elektrolit konsantrasyonu artırıldığında renk giderim veriminin daha iyi olduğu belirlenmiştir. pH 3, destek elektrolit konsantrasyonu 15 mM NaCl olarak seçildiğinde giderim verimi maksimuma ulaşır %78,01 olmuştur.



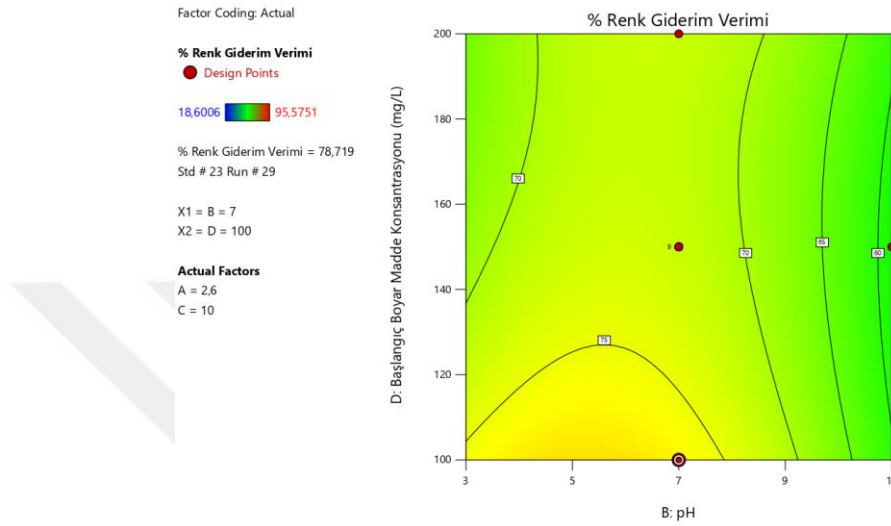
Şekil 4.11: pH'nın destek elektrolit konsantrasyonunun renk giderim verimine etkisinin kontur grafiği



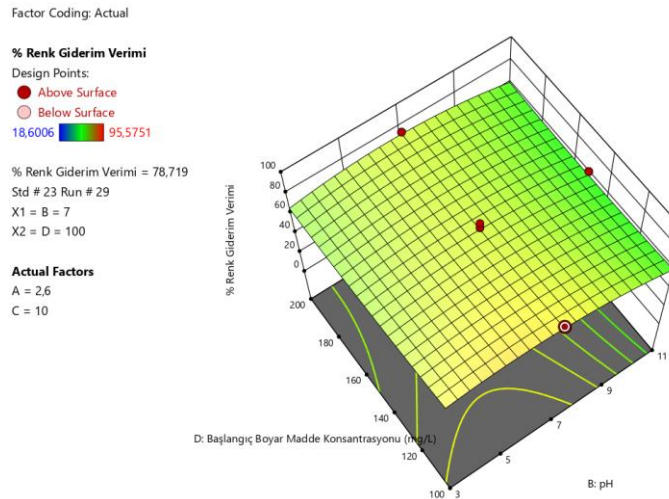
Şekil 4.12: pH'nın ve destek elektrolit konsantrasyonunun renk giderimine etkisi

4.1.5 pH'nın ve C₀'ın Renk Giderimine Etkisi

Şekil 4.13 ve 4.14'te belirtildiği gibi başlangıç boyar madde konsantrasyonunun pH'ya bariz bir etkisi yoktur. Bu deneysel çalışmadan edinilen bilgiler doğrultusunda düşük pH ve daha az kirletici miktarda giderimin gerçekleştirildiğidir. pH 3, boyar madde konsantrasyonu 100 mg/L olarak tayin edilirse giderimin meydana geldiği görülmüştür. Bu seçimler yöneliminde maksimum renk giderim verimi %78,719 tespit edilmiştir.



Şekil 4.13: pH'nın başlangıç boyar madde konsantrasyonuna renk giderim verimine etkisinin kontur grafiği

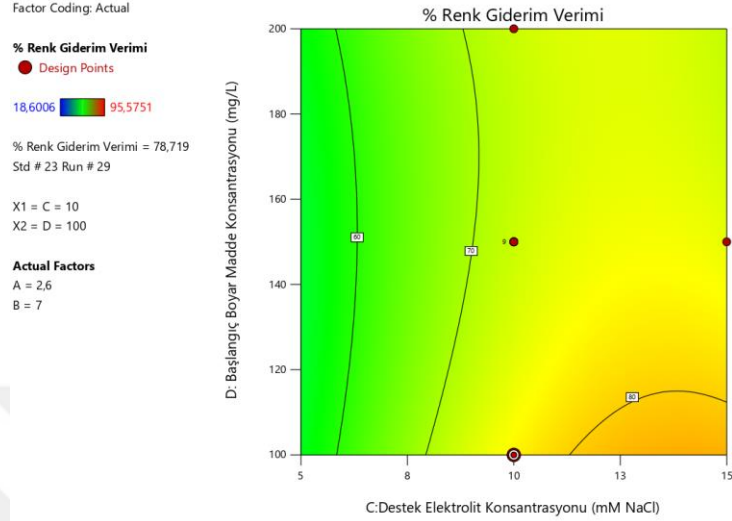


Şekil 4.14: pH'nın ve boya konsantrasyonunun renk giderimine etkisi

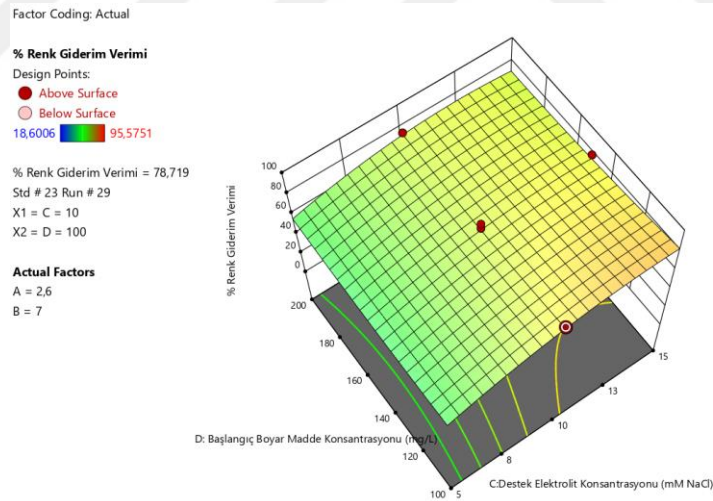
4.1.6 DEK'İN ve C₀'ın Renk Giderimine Etkisi

Destek elektrolit konsantrasyonunun boyar madde konsantrasyonuna renk giderimi için aşırı bir fark yaratmadığı şekil 4.15 ve 4.16'dan yorumlanmaktadır. Renk gideriminde etkili

parametreler olup birbirleri üzerinde keskin bir etkileri görülmemektedir. Destek elektrolit konsantrasyonu ortamda arttırıldığında iletkenliğinde artmasından kaynaklı, boyar madde konsantrasyonu da minimum düzeyde tutularak renk giderimi sağlanır. Maksimum verime ulaşmak için DEK 15 mM NaCl ve C₀ ise 100 mg/L ayarlanırsa verim %78,719 olmaktadır.



Şekil 4.15: Destek elektrolit konsantrasyonunun başlangıç boyar madde konsantrasyonunun renk giderim verimine etkisinin kontur grafiği

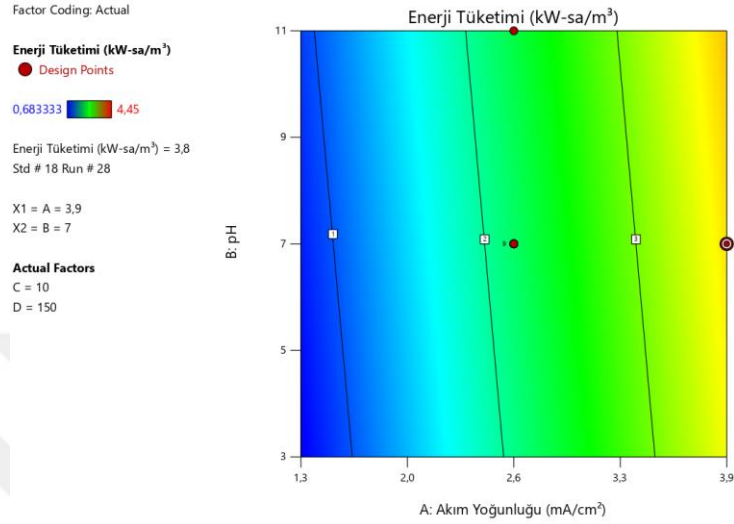


Şekil 4.16: Destek elektrolit konsantrasyonunun ve boya konsantrasyonunun renk giderimine etkisi

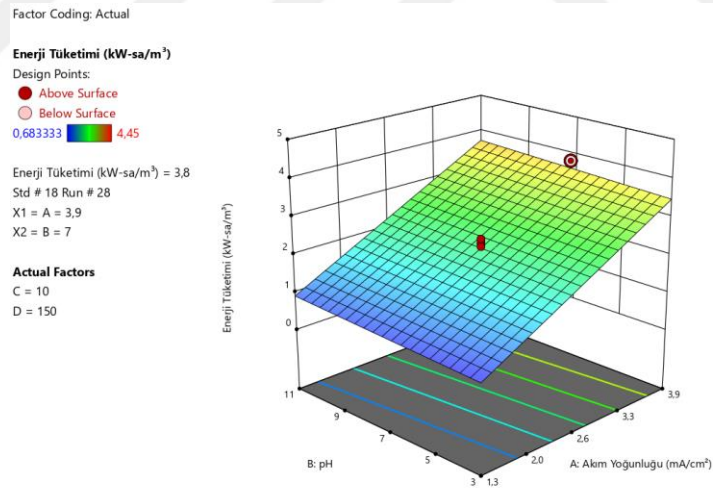
4.1.7 Enerji Tüketimine Etkisi Olan Parametrelerin Değerlendirilmesi

Yapılan deneylerde şekil 4.17 ve 4.18’de gözlemlenen akım yoğunluğu enerji tüketimi açısından bakıldığında en çok etkileyen parametredir. Enerji tüketimi elektrik sarfiyatından süre gelmektedir. Akım yoğunluğu arttıkça harcanan enerji tüketim miktarı da artmaktadır. Akım yoğunluğu 3,9 mA/cm², pH’nın 7, destek elektrolit konsantrasyonu 10 mM NaCl,

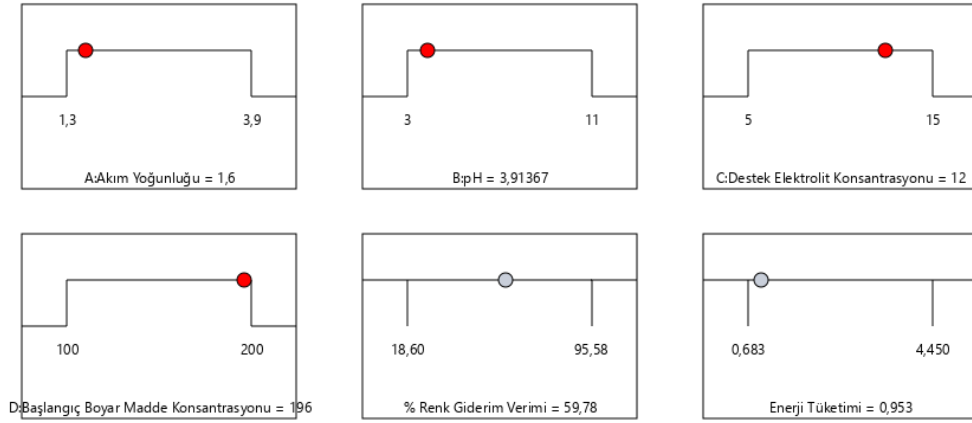
boyar madde konsantrasyonunun 150 mg/L olarak yapılan deney setlerinde enerji tüketiminin maksimum $3,8 \text{ kW-sa/m}^3$ 'e ulaştığı tespit edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda tüm parametrelerin etkisinin lineer (doğrusal) olduğu gözlemlenmiştir. Bu doğrultuda oluşan grafikler aşağıdaki gibidir. Sonuç doğrusal olduğu için etkileyen parametrelerin grafikleri de birbirleri ile aynı olduğundan tek bir grafik elde edilmiştir.



Şekil 4.17: Akım yoğunluğunun ve pH'nın enerji tüketimine etkisinin kontur grafiği



Şekil 4.18: Akım yoğunluğu ve pH'nın enerji tüketiminin cevap yüzey yöntemi grafiği



Desirability = 1,000
Solution 1 out of 100

Şekil 4.19: Elektrooksidasyon prosesi için optimum çalışma koşulları

4.2 Doracryl Red XGRLS

Bu bölümde doracryl red XGRLS boyasının elektrooksidasyon prosesi kullanılarak renk giderimi ve enerji tüketimi araştırılmıştır. Doracryl red XGRLS boyar maddesinin elektrooksidasyon prosesi yardımıyla bertarafında deneysel dizayn matrisine atfedilerek gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde meydana gelen renk arıtım verimi ve enerji tüketim neticeleri tablo 4.8’de belirtilmiştir.

Tablo 4.8: Ampirik faaliyetler sonrasında elde edilen sonuçlar

Std	Run	Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	pH	Destek Elektrolit Konsantrasyonu (mM NaCl)	Başlangıç Boyar Madde Konsantrasyonu (mg/L)	Renk Giderim Verimi (%)	Enerji Tüketimi (kW-sa/m ³)
25	1	2,6	7	10	150	76,59	1,067
1	2	1,3	3	5	100	45,58	0,383
14	3	3,9	3	15	200	83,05	1,650
6	4	3,9	3	15	100	92,82	1,500
16	5	3,9	11	15	200	38,54	1,575
22	6	2,6	7	15	150	77,47	0,983
21	7	2,6	7	10	150	70,58	1,117
19	8	2,6	7	10	150	68,78	1,133
5	9	1,3	3	15	100	84,44	0,358
11	10	1,3	11	5	200	20,09	0,367
30	11	2,6	7	10	150	67,82	1,117
12	12	3,9	11	5	200	37,80	1,550
29	13	2,6	7	10	150	85,75	1,117

Tablo 4.8: (devam)

Std	Run	Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	pH	Destek Elektrolit Konsantrasyonu (mM NaCl)	Başlangıç Boyar Madde Konsantrasyonu (mg/L)	Renk Giderim Verimi (%)	Enerji Tüketimi (kW-sa/m ³)
20	14	2,6	11	10	150	43,51	0,900
3	15	1,3	11	5	100	36,45	0,442
24	16	2,6	7	10	200	73,96	1,000
27	17	2,6	7	10	150	70,97	1,050
18	18	3,9	7	10	150	95,26	1,925
28	19	2,6	7	10	150	70,49	1,100
15	20	1,3	11	15	200	24,93	0,342
17	21	2,6	7	10	150	80,68	1,117
23	22	2,6	7	10	100	95,11	1,117
4	23	3,9	11	5	100	54,53	2,200
7	24	1,3	11	15	100	51,40	0,383
26	25	2,6	7	10	150	75,59	1,133
13	26	1,3	3	15	200	45,01	0,350
8	27	3,9	11	15	100	82,60	1,675
10	28	3,9	3	5	200	62,56	1,750
2	29	3,9	3	5	100	78,23	1,675
9	30	1,3	3	5	200	25,62	0,383

Tablo 4.8’de verilen değerler box-behnken dizaynı ile en iyi hale getirildiğinde, renk arıtımı ve enerji tüketimi için kuadratik modelin seçilebileceği görülmektedir. Enerji tüketimi ve renk giderim verimi üzerine gerçekleştirilen model uyumsuzluğu testinin neticeleri Tablo 4.9 ve Tablo 4.10’te gösterilmiştir.

Tablo 4.9: Renk giderim veriminin model uyumsuzluğu

Varyasyon Kaynağı	Kareler Toplamı	SD	Kareler Ortalaması	f Değeri	p Değeri	
Doğrusal	4622,96	17	271,94	7,49	0,0035	
İki Faktör Etkileşimi	4206,41	11	382,40	10,54	0,0013	
Kuadratik	429,49	7	61,36	1,69	0,2386	Önerilen
Kübik	113,36	1	113,36	3,12	0,1151	
Saf Hata	290,32	8	36,29			

Tablo 4.10: Enerji tüketiminin model uyumsuzluğu

Varyasyon Kaynağı	Kareler Toplamı	SD	Kareler Ortalaması	f Değeri	p Değeri	
Doğrusal	0,3494	17	0,0206	24,66	< 0.0001	

Tablo 4.10: (devam)

Varyasyon Kaynağı	Kareler Toplamı	SD	Kareler Ortalaması	f Değeri	p Değeri	
İki Faktör Etkileşimi	0,2022	11	0,0184	22,06	< 0.0001	
Kuadratik	0,1039	7	0,0148	17,82	0,0003	Önerilen
Kübik	0,0117	1	0,0117	14,08	0,0056	
Saf Hata	0,0067	8	0,0008			

Enerji tüketimi tahmini ve renk giderimi tahmini için gösterilen kuadratik modelde uygulanan her bir tabirin modellemedeki aksiyonu anova analizi kullanılarak saptanmıştır. Tablo 4.11 ve Tablo 4.12’te anova analizi verileri sunulmuştur.

Tablo 4.11: Renk giderim veriminin ANOVA analiz sonuçları

Varyasyon Kaynağı	Kareler Toplamı	SD	Kareler Ortalaması	f Değeri	p Değeri	
Model	13272,82	14	948,06	19,76	< 0.0001	Önemli
A-Akım Yoğunluğu	2521,67	1	2521,67	52,55	< 0.0001	
B-pH	1788,78	1	1788,78	37,28	< 0.0001	
C-Destek Elektrolit Konsantrasyonu	1328,89	1	1328,89	27,69	< 0.0001	
D-Başlangıç Boyar Madde Konsantrasyonu	2440,59	1	2440,59	50,86	< 0.0001	
AB	78,40	1	78,40	1,63	0,2206	
AC	12,51	1	12,51	0,2607	0,6171	
AD	15,98	1	15,98	0,3329	0,5725	
BC	125,04	1	125,04	2,61	0,1273	
BD	22,13	1	22,13	0,4611	0,5074	
CD	162,50	1	162,50	3,39	0,0856	
A ²	29,48	1	29,48	0,6144	0,4453	
B ²	756,55	1	756,55	15,77	0,0012	
C ²	121,36	1	121,36	2,53	0,1326	
D ²	136,26	1	136,26	2,84	0,1127	
Kalıntı	719,81	15	47,99			
Model Uyumsuzluğu	429,49	7	61,36	1,69	0,2386	Önemsiz
Saf Hata	290,32	8	36,29			
Toplam	13992,63	29				

19,76 olan model f-değeri, modelin anlamlı olduğunu ima etmektedir. Gürültü nedeniyle bu kadar büyük bir f-değerinin ortaya çıkma olasılığı yalnızca %0,01'dir.

0,0500'den küçük p-değerleri, model terimlerinin anlamlı olduğunu gösterir. Bu durumda A, B, C, D, B² anlamlı model terimleridir. 0,1000'den büyük değerler, model terimlerinin anlamlı olmadığını gösterir. Çok sayıda önemsiz model terimi varsa (hiyerarşiyi desteklemek için gerekenler hariç), model azaltma modelinizi geliştirebilir.

1,69 olan uyum eksikliği f-değeri, uyum eksikliğinin saf hataya göre önemli olmadığını ima eder. Gürültü nedeniyle bu kadar büyük bir uyumsuzluk f-değerinin ortaya çıkma olasılığı %23,86'dır. Anlamlı olmayan uyum eksikliği iyidir, modelin uymasını istiyoruz.

Tablo 4.12: Enerji tüketiminin ANOVA analiz sonuçları

Varyasyon Kaynağı	Kareler Toplamı	SD	Kareler Ortalaması	f Değeri	p Değeri	
Model	8,02	14	0,5725	77,64	< 0.0001	Önemli
A-Akım Yoğunluğu	7,04	1	7,04	954,40	< 0.0001	
B-pH	0,0133	1	0,0133	1,80	0,1994	
C-Destek Elektrolit Konsantrasyonu	0,0562	1	0,0562	7,62	0,0146	
D-Başlangıç Boyar Madde Konsantrasyonu	0,0327	1	0,0327	4,43	0,0526	
AB	0,0084	1	0,0084	1,14	0,3026	
AC	0,0251	1	0,0251	3,40	0,0851	
AD	0,0100	1	0,0100	1,36	0,2624	
BC	0,0039	1	0,0039	0,5297	0,4779	
BD	0,0734	1	0,0734	9,95	0,0066	
CD	0,0264	1	0,0264	3,58	0,0779	
A ²	0,0494	1	0,0494	6,70	0,0206	
B ²	0,0527	1	0,0527	7,15	0,0174	
C ²	0,0012	1	0,0012	0,1570	0,6975	
D ²	0,0015	1	0,0015	0,2003	0,6609	
Kalıntı	0,1106	15	0,0074			
Model Uyumsuzluğu	0,1039	7	0,0148	17,82	0,0003	Önemsiz
Saf Hata	0,0067	8	0,0008			
Toplam	8,13	29				

77,64 olan model f-değeri, modelin anlamlı olduğunu ima eder. Gürültü nedeniyle bu kadar büyük bir f-değerinin ortaya çıkma olasılığı yalnızca %0,01'dir.

0,0500'den küçük p-değerleri, model terimlerinin anlamlı olduğunu gösterir. Bu durumda A, C, BD, AÂ², BÂ² önemli model terimleridir. 0,1000'den büyük değerler, model terimlerinin anlamlı olmadığını gösterir. Çok sayıda önemsiz model terimi varsa (hiyerarşiyi desteklemek için gerekenler hariç), model azaltma modelinizi geliştirebilir.

17,82 olan uyum eksikliği f-değeri, uyum eksikliğin önemli olduğunu ima eder. Gürültü nedeniyle bu kadar büyük bir uyumsuzluk f-değerinin ortaya çıkma olasılığı yalnızca %0,03'tür. Önemli ölçüde uyum eksikliği kötüdür, modelin uymasını istiyoruz.

Gerçek faktörler açısından renk giderimi son denklem eşitlik 4.5'te verilmiştir.

$$\% \text{ Renk Giderim Verimi} = -A \times 2,97019 + B \times 21,78933 + C \times 12,75526 - D \times 1,05933 - AB \times 0,425681 - AC \times 0,136030 + AD \times 0,015373 - BC \times 0,139776 - BD \times 0,005880 - CD \times 0,012748 + A^2 \times 2,80721 - B^2 \times 1,50205 - C^2 \times 0,385016 + D^2 \times 0,003184 \quad (4.5)$$

Gerçek faktörler cinsinden denklem, her faktörün belirli seviyelerine verilecek yanıt hakkında tahminlerde bulunmak için kullanılabilir. Burada her faktör için seviyelerin orijinal birimlerinde belirtilmesi gerekir. Bu denklem, her bir faktörün göreceli etkisini belirlemek için kullanılmamalıdır çünkü katsayılar, her bir faktörün birimlerini barındıracak şekilde ölçeklendirilir ve kesişim, tasarım alanının merkezinde değildir.

Kodlanmış faktörler açısından renk giderimi son denklem eşitlik 4.6'da verilmiştir.

$$\% \text{ Renk Giderim Verimi} = -A \times 12,47 - B \times 10,50 + C \times 9,05 - D \times 11,64 - AB \times 2,21 - AC \times 0,8842 + AD \times 0,9993 - BC \times 2,80 - BD \times 1,18 - CD \times 3,19 + A^2 \times 4,74 - B^2 \times 24,03 - C^2 \times 9,63 + D^2 \times 7,96 \quad (4.6)$$

Kodlanmış faktörler cinsinden denklem, her faktörün belirli seviyelerine verilen yanıt hakkında tahminlerde bulunmak için kullanılabilir. Varsayılan olarak faktörlerin yüksek seviyeleri +1, düşük seviyeleri ise -1 olarak kodlanır. Kodlanmış denklem, faktör katsayılarını karşılaştırarak faktörlerin göreceli etkisini belirlemek için kullanışlıdır.

Gerçek faktörler açısından enerji tüketimi son denklem eşitlik 4.7'de verilmiştir.

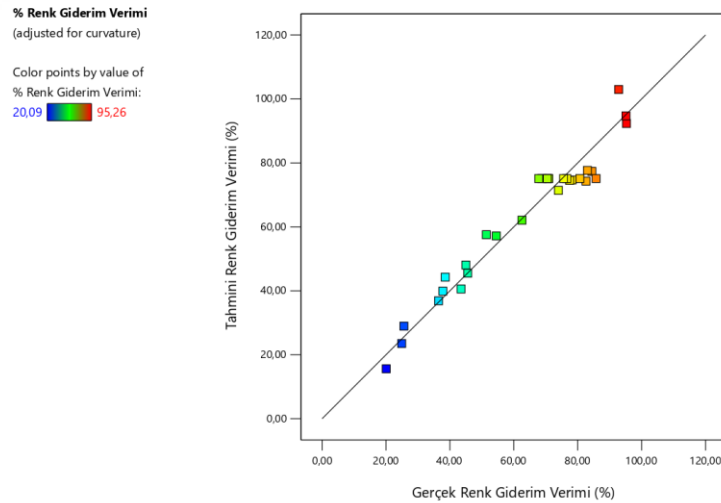
$$\begin{aligned} \text{Enerji Tüketimi} = & -A \times 0,003089 + B \times 0,229785 + C \times 0,008936 + D \times 0,004038 + AB \times \\ & 0,004407 - AC \times 0,006090 - AD \times 0,000385 - BC \times 0,000781 - BD \times 0,000339 + CD \times 0,000163 + \\ & A^2 \times 0,114929 - B^2 \times 0,012535 - C^2 \times 0,001189 - D^2 \times 0,000010 \end{aligned} \quad (4.7)$$

Gerçek faktörler cinsinden denklem, her faktörün belirli seviyelerine verilecek yanıt hakkında tahminlerde bulunmak için kullanılabilir. Burada her faktör için seviyelerin orijinal birimlerinde belirtilmesi gerekir. Bu denklem, her bir faktörün göreceli etkisini belirlemek için kullanılmamalıdır çünkü katsayılar, her bir faktörün birimlerini barındıracak şekilde ölçeklendirilir ve kesişim, tasarım alanının merkezinde değildir.

Kodlanmış faktörler açısından enerji tüketimi son denklem 4.8’de verilmiştir.

$$\begin{aligned} \text{Enerji Tüketimi} = & A \times 0,6588 + B \times 0,0286 - C \times 0,0589 - D \times 0,0426 + AB \times 0,0229 - AC \times \\ & 0,0396 - AD \times 0,0250 - BC \times 0,0156 - BD \times 0,0677 + CD \times 0,0406 + A^2 \times 0,1942 - B^2 \times 0,2006 - \\ & C^2 \times 0,0297 - D^2 \times 0,0262 \end{aligned} \quad (4.8)$$

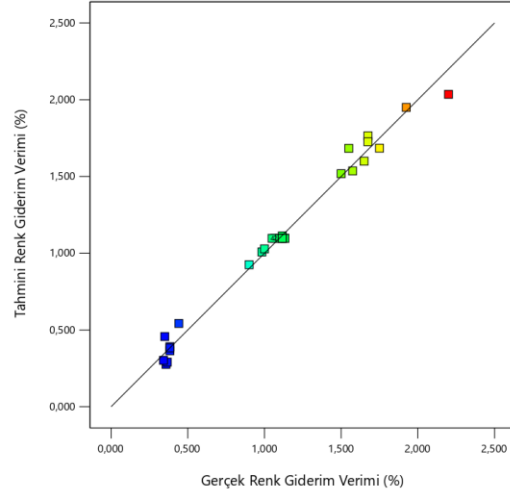
Kodlanmış faktörler cinsinden denklem, her faktörün belirli seviyelerine verilen yanıt hakkında tahminlerde bulunmak için kullanılabilir. Varsayılan olarak faktörlerin yüksek seviyeleri +1, düşük seviyeleri ise -1 olarak kodlanır. Kodlanmış denklem, faktör katsayılarını karşılaştırarak faktörlerin göreceli etkisini belirlemek için kullanışlıdır.



Şekil 4.20: Renk giderim gerçek-model arasındaki fark

Enerji Tüketimi
(adjusted for curvature)

Color points by value of
Enerji Tüketimi:
0,342 2,200



Şekil 4.21: Enerji tüketimi gerçek-model arasındaki fark

Şekil 4.20 ve Şekil 4.21 değerlendirildiğinde kazanılan tahmini değerler ve gerçek değerler çakışmaktadır. Elde edilen neticelerde enerji tüketimi ve renk arıtım verimi anlamında önerilen modelin uyumsuzluğunun tetkiki için Box-Behnken dizaynı uygulanmaktadır. Tablo 4.13 ve Tablo 4.14 de sunulan kuadratik modelin uyumluluğunun sınanması maksadıyla uygulanan istatistiksel neticeler araştırılmalıdır.

Tablo 4.13: Renk arıtımı amacıyla tavsiye edilen kuadratik modelin uyumluluğunun testi

Std. Dev.	6,93	R^2 (Belirtme Katsayısı)	0,9486
Ortalama	63,87	R^2_{adj} (Düzeltilmiş Belirtme Katsayısı)	0,9005
C.V.% (Varyasyon Katsayısı)	10,85	R^2_{pred} (Tahmini Belirtme Katsayısı)	0,6671
		Yeterli Hassasiyet	17,8316

0,6671'lik öngörülen R^2 , 0,9005'lik ayarlanmış R^2 'ye normalde beklendiği kadar yakın değildir; yani fark 0,2'den fazladır. Bu, büyük bir blok etkisine veya modeliniz ve/veya verilerinizle ilgili olası bir soruna işaret ediyor olabilir. Göz önünde bulundurulması gerekenler, model azaltma, yanıt dönüştürme, aykırı değerler vb.'dir. Tüm ampirik modeller, doğrulama çalışmaları yapılarak test edilmelidir.

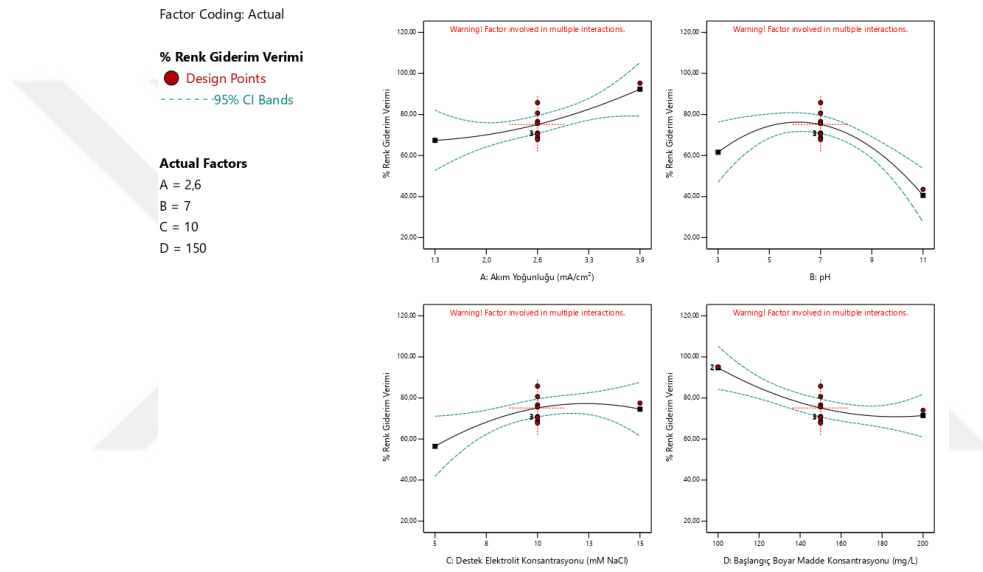
Yeterli hassasiyet sinyal/gürültü oranını ölçer. Oranın 4'ten büyük olması arzu edilir. 17.832 oranınız yeterli bir sinyale işaret ediyor. Bu model tasarım alanında gezinmek için kullanılabilir.

Tablo 4.14: Tüketilen enerji için tavsiye edilen kuadratik modelin uyumluluğunun testi

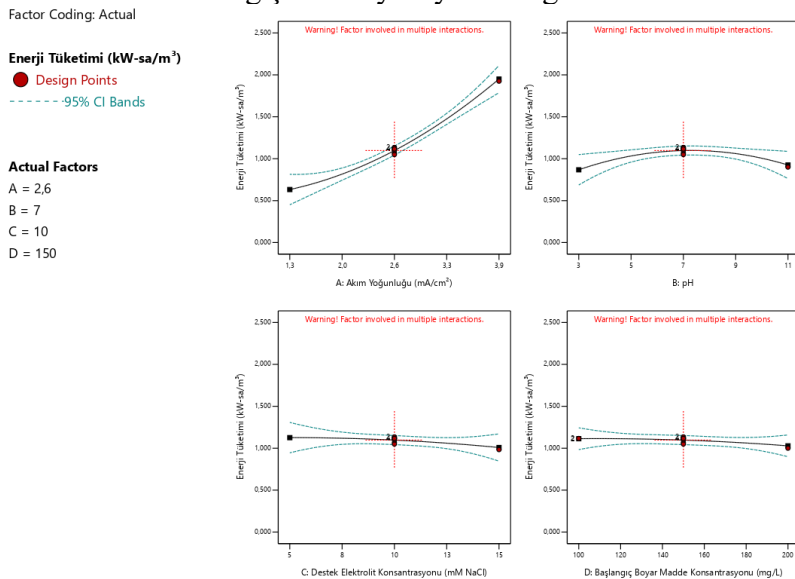
Std. Dev.	0,0859	R^2 (Belirtme Katsayısı)	0,9864
Ortalama	1,08	R^2_{adj} (Düzeltilmiş Belirtme Katsayısı)	0,9737
C.V.% (Varyasyon Katsayısı)	7,94	R^2_{pred} (Tahmini Belirtme Katsayısı)	0,8735
		Yeterli Hassasiyet	28,9745

0,8735'lik tahmini R^2 , 0,9737'lik düzeltilmiş R^2 ile makul düzeyde uyum içindedir; yani fark 0,2'den azdır

Yeterli hassasiyet sinyal-gürültü oranını ölçer. Oranın 4'ten büyük olması arzu edilir. 28.974 oranınız yeterli bir sinyale işaret ediyor. Bu model tasarım alanında gezinmek için kullanılabilir.



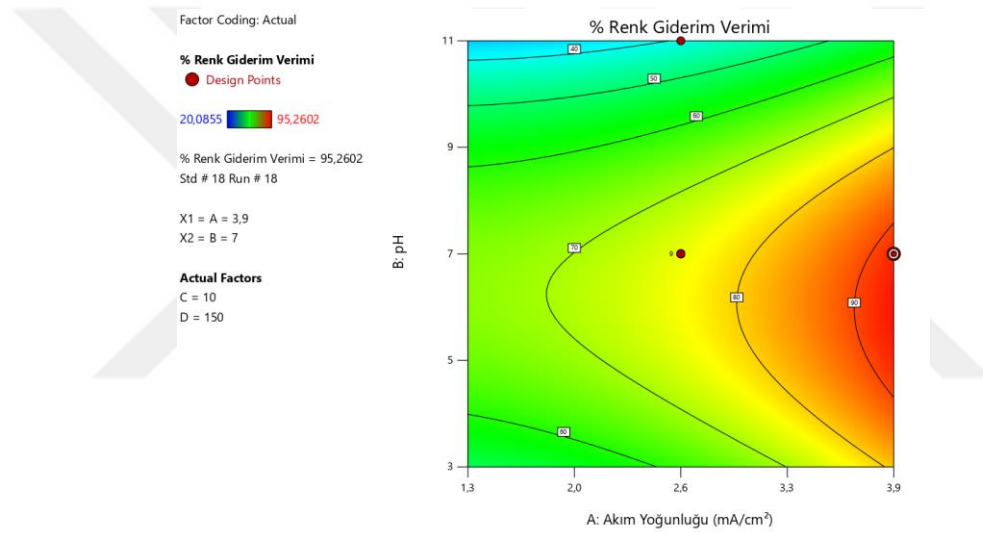
Şekil 4.22: Her bir değişkenin ayrı ayrı renk giderim verimine tesirleri



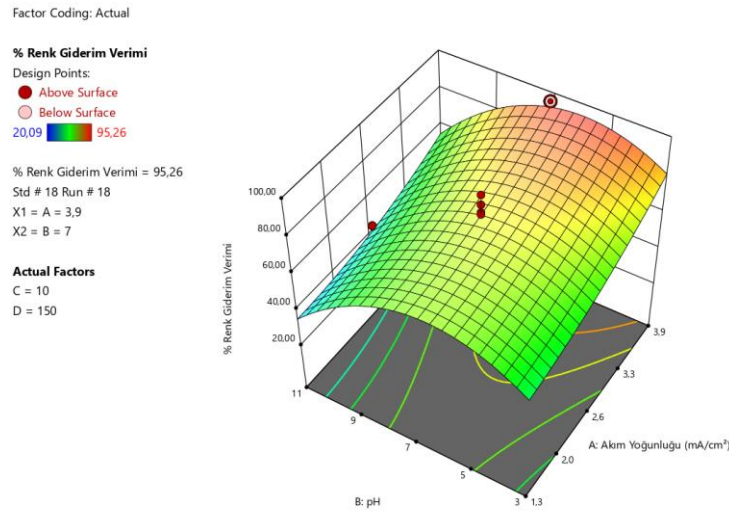
Şekil 4.23: Her bir değişkenin ayrı ayrı enerji tüketimine tesirleri

4.2.1 Akım Yoğunluğunun ve pH'nın Renk Giderimine Etkisi

Akım yoğunluğu elektrooksidasyon prosesi için en kritik parametredir. Akım yoğunluğu ve giderim verimi genellikle doğru orantılı olarak değişmektedir. Akım yoğunluğu artırıldıkça giderim verimi artar. Yapılan deneylerde akım yoğunluğu 1,3 mA/cm², 2,6 mA/cm² ve 3,9 mA/cm² olarak seçilmiştir. Katyonik boyalarda pH azaldıkça renk gideriminin arttığı, pH arttıkça renk gideriminin azaldığı gözlemlenmiştir. Çalışılan pH değerleri ise 3, 7 ve 11'dir. Karşıtıma hızı 300 rpm ve çalışma sıcaklığı 25 °C olarak ayarlanmıştır. Şekil 4.24 ve 4.25'te görüldüğü üzere akım yoğunluğu 3,9 mA/cm² olduğunda ve pH 7 olduğunda maksimum renk giderim verimi %95,26 olarak bulunmuştur.



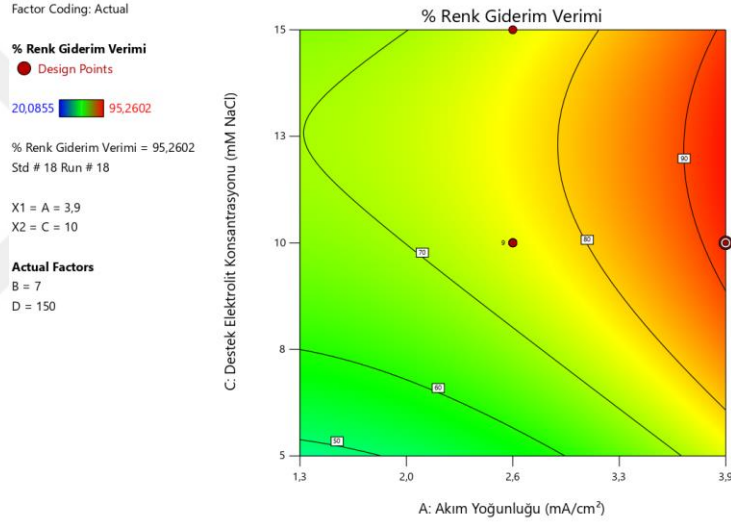
Şekil 4.24: Akım yoğunluğunun pH'nın renk giderim verimine etkisinin kontur grafiği



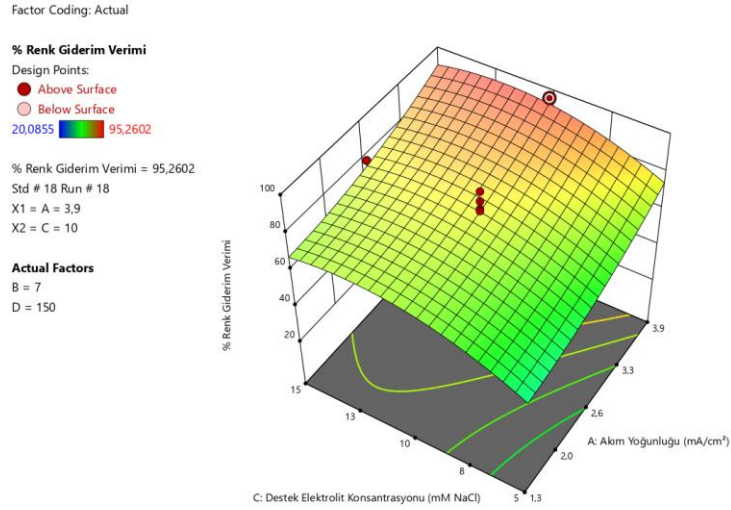
Şekil 4.25: Akım yoğunluğunun ve pH'nın renk giderimine etkisi

4.2.2 Akım Yoğunluğunun ve DEK'in Renk Giderimine Etkisi

Destek elektrolit kullanımı ortamdaki iletkenliği desteklediği için sıklıkla kullanılmaktadır. Kullanılan destek elektrolit türü NaCl tuzudur. Destek elektrolit konsantrasyonları 5 mM NaCl, 10 mM NaCl ve 15 mM NaCl olarak tercih edilmiştir. Akım yoğunluğu ve destek elektrolit konsantrasyonu arasındaki bağı dolaylı oksidasyona yarayan oksidantların yoğunluğundaki artış verimde yükselişe sebep olmuştur (Zhuo et al., 2020). Destek elektrolitin gücünün artırılması ile mevcut alandaki iletkenliğin artması doğru orantılıdır, açıklanan durumdan ötürü çözeltinin akıma ters yönlü gösterdiği kuvvet azaldığı için kolaylaşan elektron alışverişi sebebiyle verimin yükseldiği tespit edilmiştir (Sözüdoğru, 2022). Şekil 4.26 ve 4.27'de akım yoğunluğu 3,9 mA/cm² ve DEK 10 mM NaCl olarak değerlendirildiğinde verimin maksimum %95,26 olduğu gözlemlenmiştir.



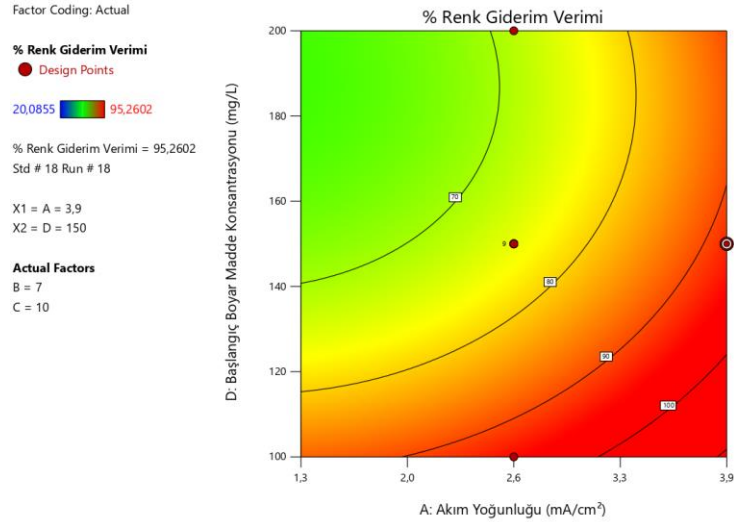
Şekil 4.26: Akım yoğunluğunun destek elektrolit konsantrasyonunun renk giderim verimine etkisinin kontur grafiği



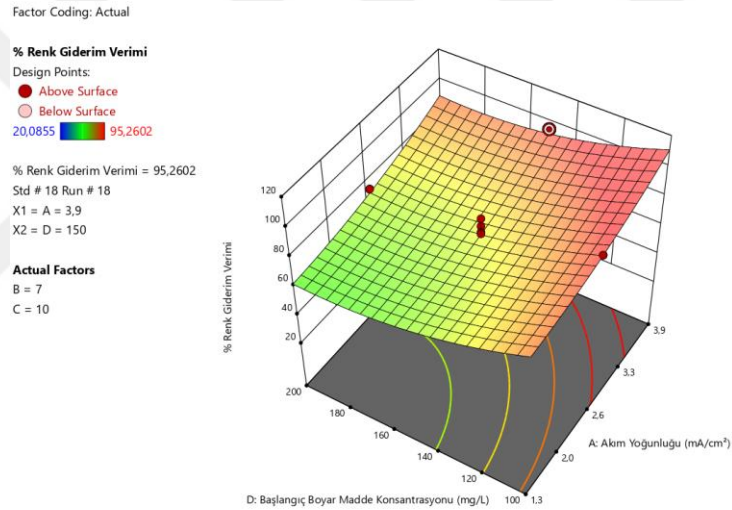
Şekil 4.27: Akım yoğunluğunun ve destek elektrolit türünün renk giderimine etkisi

4.2.3 Akım Yoğunluğunun ve C₀'m Renk Giderimine Etkisi

Boyar madde ortamdaki kirletici miktarından kaynaklanan giderilmek istenen bir durumdur. Ortamda bulunan kirleticilerin giderilmesi için elektrooksidasyon prosesi kullanılarak elektriksel kuvvet uygulanılmaktadır. Akım yoğunluğu artırılması ile verimde doğabilecek yükselişin nedeni; düzenekteki elektrotlar üzerine gereğinden fazla boyar madde taneciklerinin adsorbe olması ve elektrot üzerindeki adsorpsiyonu azaltarak hidroksil radikallerin çoğalmasına mani olmaktadır (Çakır, 2023). Eğer elektrotların yüzeyleri boyar madde ile kaplanırsa anot ve katottun oksidasyon icraatında düşüşe sebep olmaktadır (Fil, 2022). Şekil 4.28 ve 4.29'da akım yoğunluğu 3,9 mA/cm² ve boyar madde konsantrasyonu 150 mg/L olarak ayarladığında maksimum verime ulaşarak %95,26 olduğu belirlenmektedir.



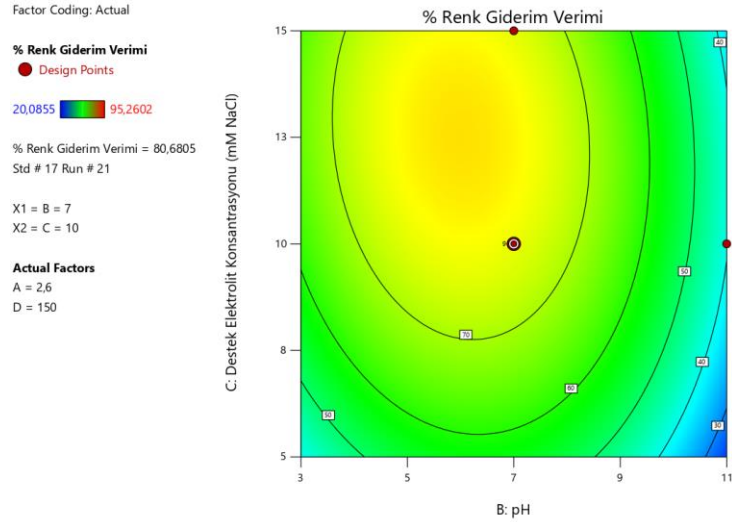
Şekil 4.28: Akım yoğunluğunun başlangıç boyar madde konsantrasyonunun renk giderim verimine etkisinin kontur grafiği



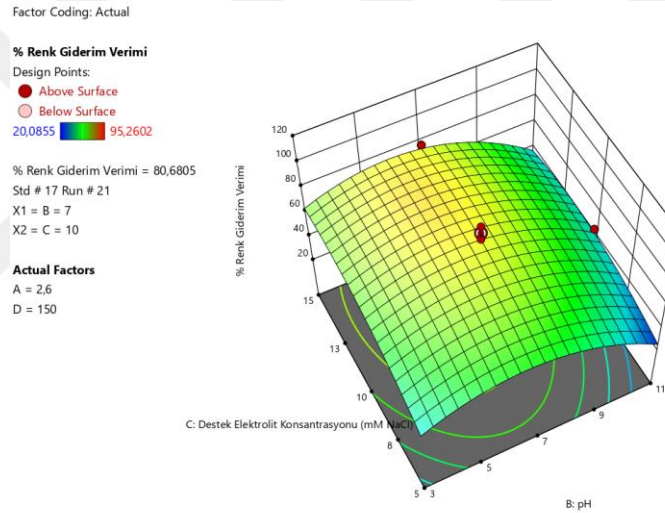
Şekil 4.29: Akım yoğunluğunun ve boya konsantrasyonunun renk giderimine etkisi

4.2.4 pH' nın ve DEK' in Renk Giderimine Etkisi

pH ve destek elektrolit konsantrasyonun elektrooksidasyon prosesi ile gideriminde birbirleri üzerindeki etkileri incelemiştir. Bu etkinin diğer parametrelere göre daha az etkili olduğu şekil 4.30 ve 4.31'de görülmektedir. Deneylerde pH' nın 3,7 ve 11, DEK' in 5 mM NaCl, 10 mM NaCl ve 15 mM NaCl değerleri çalışılmıştır. Karıştırma hızı 300 rpm ve sıcaklık 25⁰C olarak belirlenmiştir. Düşük pH'larda sistemin çalışması, DEK' in ortamda yoğunluğunun artırılması ile giderim performansının yükseldiği gözlemlenmiştir. pH 7 ve DEK 10 mM NaCl olduğunda %80,68 maksimum verim elde edilmiştir.



Şekil 4.30: pH'nın destek elektrolit konsantrasyonunun boyar madde giderim verimine etkisinin kontur grafiği

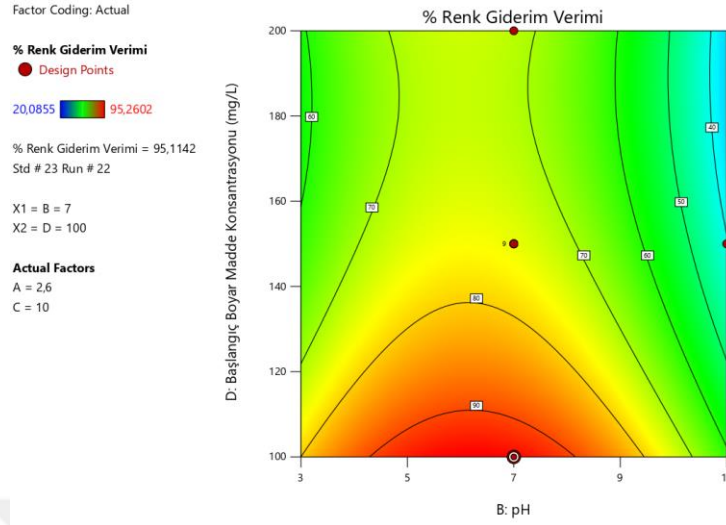


Şekil 4.31: pH'nın ve destek elektrolit konsantrasyonunun renk giderimine etkisi

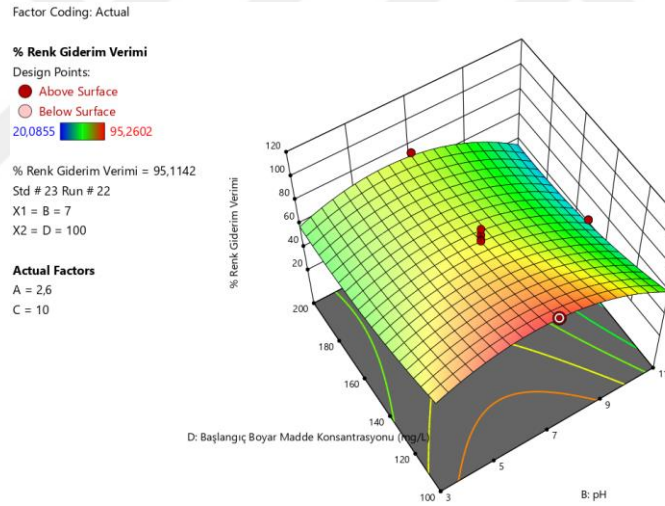
4.2.5 pH'nın ve C_0 'ın Renk Giderimine Etkisi

pH ve boyar madde konsantrasyonu birbirleri üzerindeki etkileri giderim verimi açısından şekil 4.32 ve 4.33'te ele alınmıştır. Benzer araştırmalara bakıldığında yüksek pH mertebelerinde reaksiyon mevcut alandaki hidroksil radikallerinin sıyrıcı etkisini taşıyan karbonat ve bikarbonat anyonlarındaki yükseliş boyar madde gideriminde azalışa sebep olabildiği gözlemlenmiştir (Palas et al., 2017). Katyonik özellik taşıyan boyanın ortama OH^- iyonu vermesinden dolayı giderilmesi için pH seviyesi düşürülerek ortama H^+ iyonu vermesi

istenmektedir (Salari et al., 2009). pH 7 ve boyar madde konsantrasyonu 100 mg/L olarak çalışıldığında maksimum verimin %95,11 olduğu görülmektedir.



Şekil 4.32: pH'nın başlangıç boyar madde konsantrasyonunun renk giderim verimine etkisinin kontur grafiği

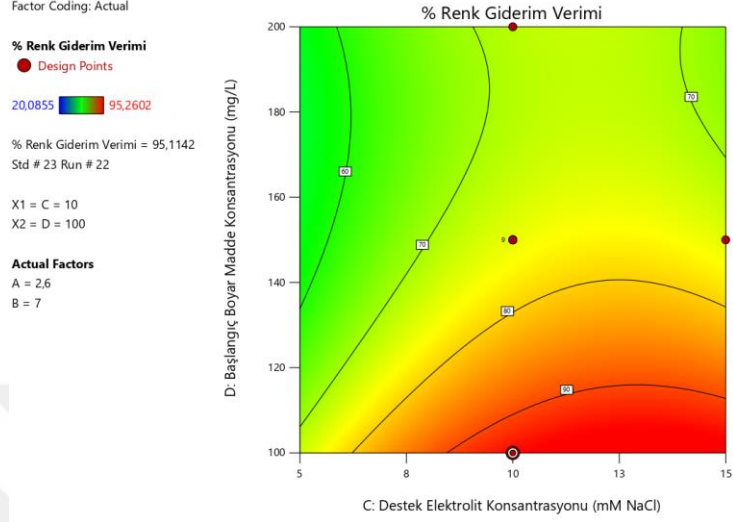


Şekil 4.33: pH'nın ve boya konsantrasyonunun renk giderimine etkisi

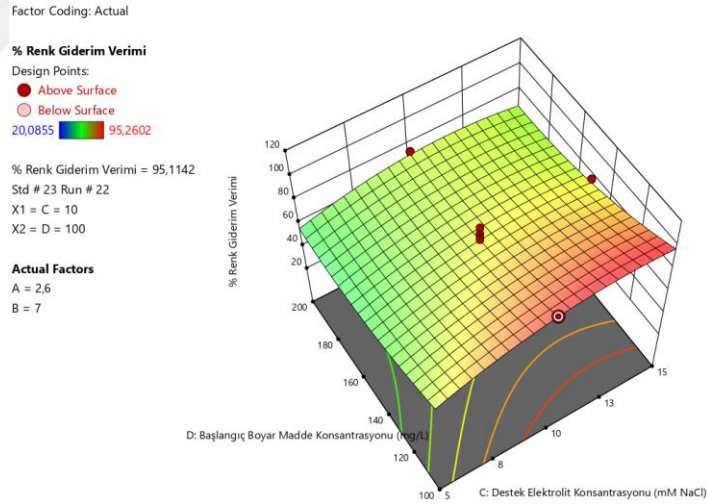
4.2.6 DEK'in ve C₀'ün Renk Giderimine Etkisi

Destek elektrolit konsantrasyonu ve boyar madde konsantrasyonu arasındaki bağ incelediğinde aşağıdaki grafiklere ulaşılmıştır. Şekil 4.34 ve 4.35'ten yorumlanacağı üzere ortamdaki DEK yoğunluğu arttırıldığında ve C₀ miktarı azaltıldığında giderimin arttığı anlaşılmaktadır. Yüksek boyar madde konsantrasyonuna sahip elektron, transfer edilirken gösterdiği karşı direnç, oksidasyon sonucu doğan boya partiküllerinin elektrot yüzeylerine adsorplanarak yüzey alanının azaltılmasıyla performansının düştüğü gözlemlenmiştir.

DEK'in ortamdaki varlığının çoğalması ile iletkenlik yukarı yönlü ilerleyerek elektron alışverişinin konforlu ve seri gerçekleşmesiyle verimin arttırıldığı tespit edilmiştir (Gazigil et al., 2022). DEK 10 mM NaCl ve C₀ 100 mg/L olarak hazırlanan deneylerde %95,11 ile maksimum verime ulaşılmıştır.



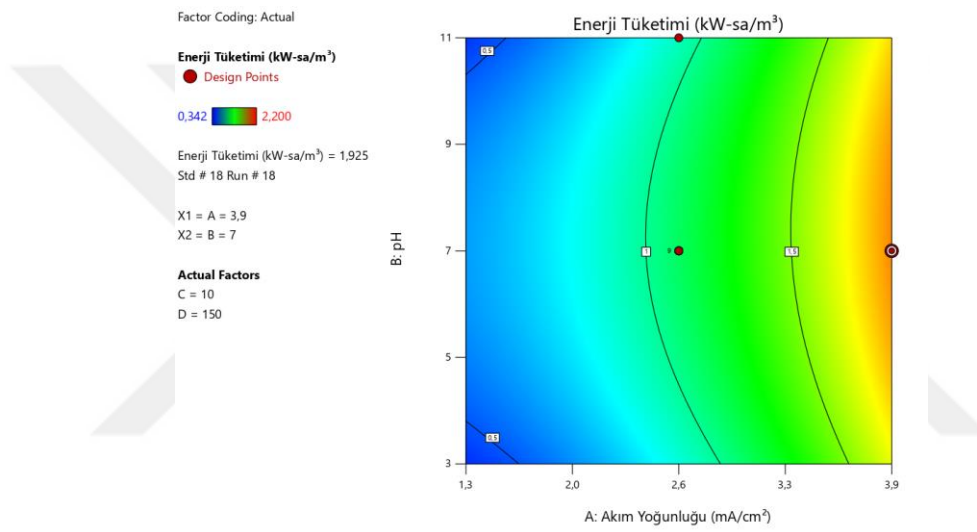
Şekil 4.34: Destek elektrolit konsantrasyonunun başlangıç boyar madde konsantrasyonunun renk giderim verimine etkisinin kontur grafiği



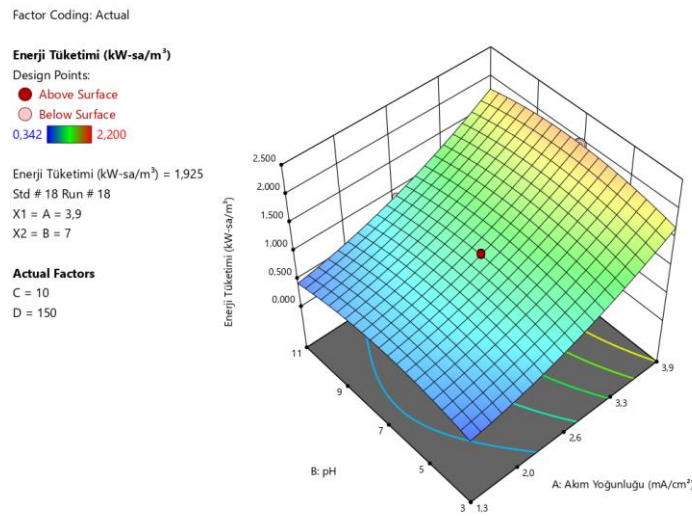
Şekil 4.35: Destek elektrolit konsantrasyonunun ve boya konsantrasyonunun renk giderimine etkisi

4.2.7 Akım Yoğunluğunun ve pH'nın Enerji Tüketimine Etkisi

Akım yoğunluğu ve pH enerji tüketiminde en önde gelen parametrelerdir. Akım yoğunluğu renk giderimini sağlamak için arttırıldığında tüketilen enerji miktarı da doğru orantılı artış göstermektedir. pH daha düşük seviyedeyken giderimin daha verimli olduğu sonucuna varılmıştır bu durum kimyasal sarfiyatını arttırmakla beraber enerji tüketiminde de artışa sebep olmaktadır (Erkmen and Adigüzel, 2022). Şekil 4.36 ve 4.37'deki deneylerde akım yoğunluğu 1,3 mA/cm², 2,6 mA/cm² ve 3,9 mA/cm², seçilmiş ve pH 3, 7 ve 11 seçilerek çalışılmıştır. Karıştırma hızı 300 rpm ve sıcaklık 25 °C olacak şekilde ayarlanmıştır. Maksimum enerji tüketiminin görüldüğü değer 1,925 kW-sa/m³ olarak saptanmıştır.



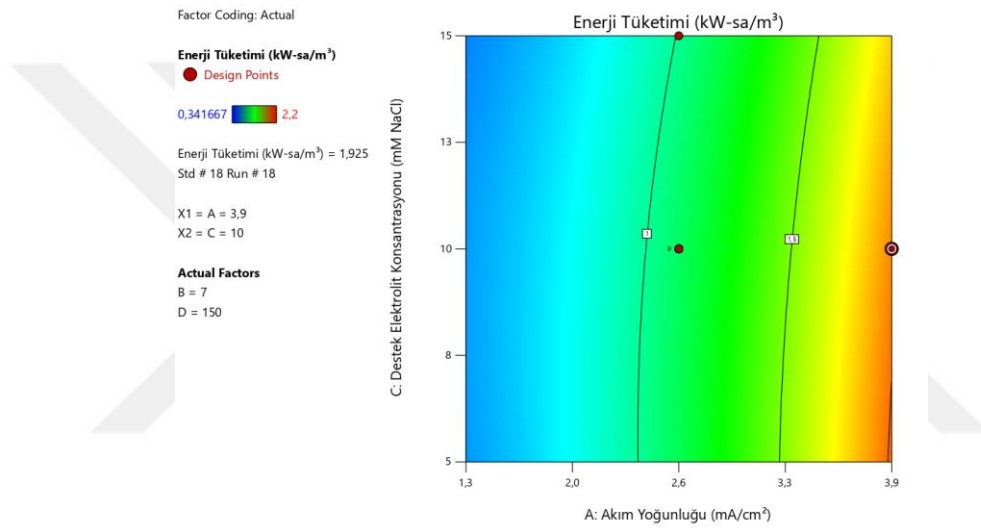
Şekil 4.36: Akım yoğunluğunun pH'nın enerji tüketimine etkisinin kontur grafiği



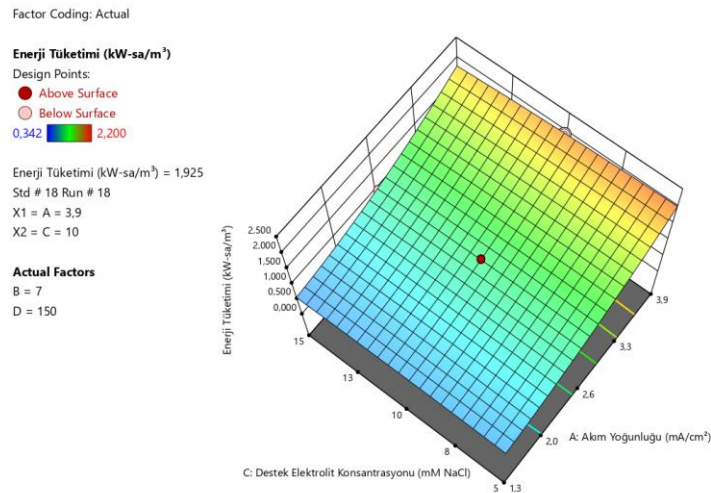
Şekil 4.37: Akım yoğunluğu ve pH'nın enerji tüketiminin cevap yüzey yöntemi grafiği

4.2.8 Akım Yoğunluğunun ve DEK'in Enerji Tüketimine Etkisi

Akım yoğunluğu ve destek elektrolit konsantrasyonu enerji tüketimini doğrudan etkileyen parametrelerdir. Şekil 4.38 ve 4.39'da anlaşıldığı gibi destek elektrolit ilavesi elektron alışverişini sağlayarak sisteme daha az akım verilmesini ve enerji tüketiminin az olmasını sağlamaktadır. DEK'in ortamdaki varlığı gereğinden fazla olursa, elektron daha fazla yol alacağı için direnç gelişebilir ve sisteme verilen akım sarfiyatı artacağı için tüketilen enerji miktarı artmış olmaktadır (Fil et al., 2023). DEK 5 mM NaCl, 10 mM NaCl ve 15 mM NaCl seçilmiş ve akım yoğunluğu 1,3 mA/cm², 2,6 mA/cm² ve 3,9 mA/cm² seçilere deneyler yapılmıştır. Maksimum enerji tüketimi 3,9 mA/cm² ve 10 mM NaCl olarak tercih edildiğinde 1,925 kW-sa/m³ olduğu belirlenmiştir.



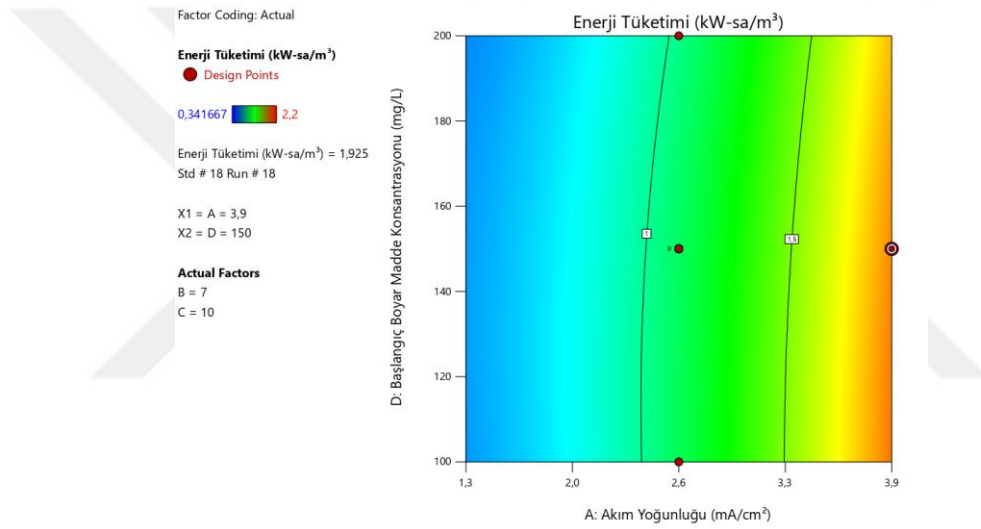
Şekil 4.38: Akım yoğunluğunun destek elektrolit konsantrasyonunun enerji tüketimine etkisinin kontur grafiği



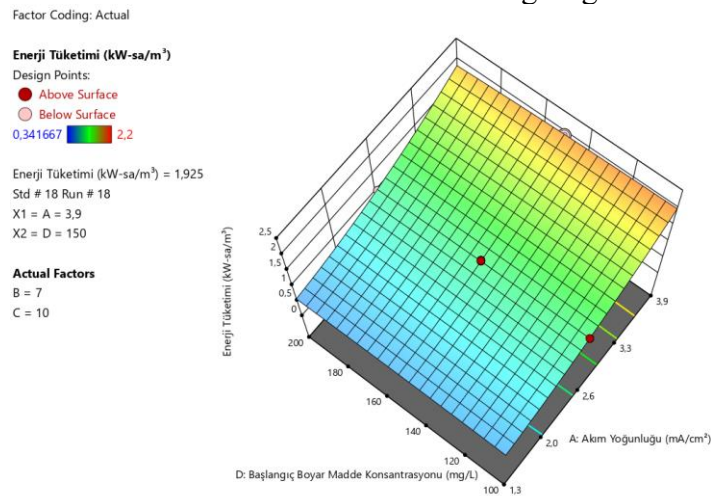
Şekil 4.39: Akım yoğunluğu ve DEK'in enerji tüketiminin cevap yüzey yöntemi grafiği

4.2.9 Akım Yoğunluğunun ve C_0 'ın Enerji Tüketimine Etkisi

Yapılan deneyler sonucu elde edilen grafikler aşağıdakiler gibidir. Şekil 4.40 ve 4.41'de görüldüğü gibi akım yoğunluğu ve boyar madde konsantrasyonu enerji tüketiminde doğrudan etkili parametrelerdir. EO prosesinde akım kullanılarak boyar madde giderimi sağlamış ve bunun sonucunda tüketilen enerji hesaplamıştır. Ortamdaki boyar madde miktarı ne kadar fazla ise harcanacak akım bu duruma eş olarak artacaktır. Akım yoğunluğu maksimum seviyelerde tutulduğunda, anot elektrotunda çözünmeler meydana gelmektedir. Bu olay boyar madde gideriminin artmasını sağlayacak olan hidroksi-katyonik komplekslerinin miktarında artışı meydana getirmektedir. Böylece sarfedilen akım miktarı artar ve enerji tüketiminde artış olmaktadır (A. Öztürk, 2022). Maksimum enerji tüketimi $3,9 \text{ mA/cm}^2$ ve 150 mg/L iken $1,925 \text{ kW-sa/m}^3$ değeri saptanmıştır.



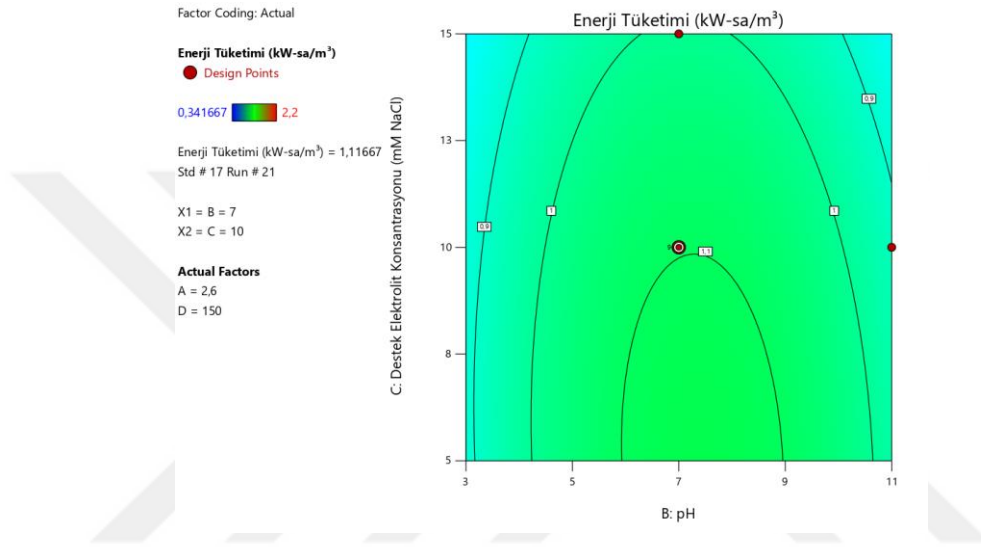
Şekil 4.40: Akım yoğunluğunun başlangıç boyar madde konsantrasyonunun enerji tüketimine etkisinin kontur grafiği



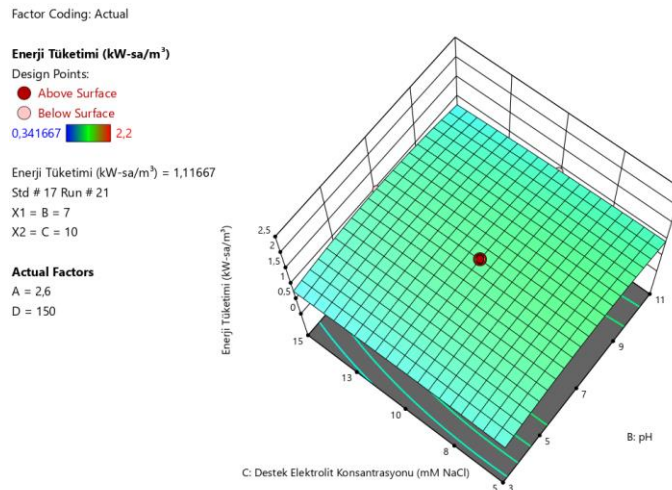
Şekil 4.41: Akım yoğunluğu ve C_0 'ın enerji tüketiminin cevap yüzey yöntemi grafiği

4.2.10 pH'nın ve DEK'in Enerji Tüketimine Etkisi

pH ve destek elektrolit konsantrasyonunun birbirleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı grafiklerden anlaşılmaktadır. Tek başlarına etkili olan parametreler birlikte iken o etkiyi yeterince gösterememiştir. Katyonik boya kullanıldığı için pH'nın düşük olması istenmektedir. DEK ilave edilerek iletkenliğin yeterince sağlanması ve harcanan akımın azaltılması planlanarak enerji tüketiminin azalacağı düşünülmektedir. Şekil 4.42 ve 4.43'teki şartlar gözetildiğinde maksimum enerji tüketimi pH 7 ve DEK 10 mM NaCl olduğu esnada 1,11 kW-sa/m³ olduğu belirlenmiştir.



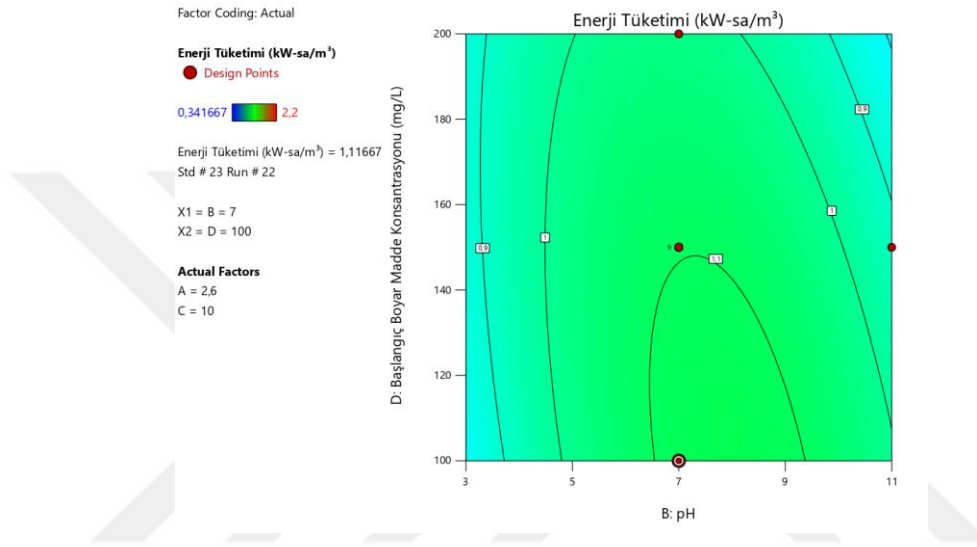
Şekil 4.42: pH'nın destek elektrolit konsantrasyonunun enerji tüketimine etkisinin kontur grafiği



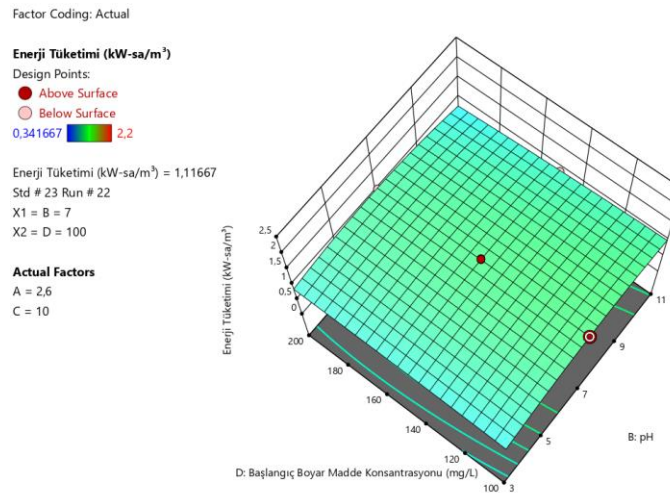
Şekil 4.43: pH ve DEK'in enerji tüketiminin cevap yüzey yöntemi grafiği

4.2.11 pH'nın ve C₀'ün Enerji Tüketimine Etkisi

pH ve boyar madde konsantrasyonu birlikte enerji tüketiminde bariz bir etkisinin olmadığı grafiklere bakıldığında görülmektedir. Aynı ayrı etkili olan parametreler beraberken aynı etkiyi gösterememektedir. Ortamda var olan kirletici miktarını azaltmak için sisteme elektriksel kuvvet uygulanarak giderimi sağlamak hedeflemektedir. Bu durumu da pH'nın düşük olması giderimi olumlu etkileyeceğinden enerji tüketimini de azaltacaktır (Günaşlan and Fil, 2023). Şekil 4.44 ve 4.45 incelediğinde enerji tüketiminin maksimum olduğu nokta pH'nın 7 ve C₀'ün 150 mg/L olduğu 1,11 kW-sa/m³ olarak tespit edilmiştir.



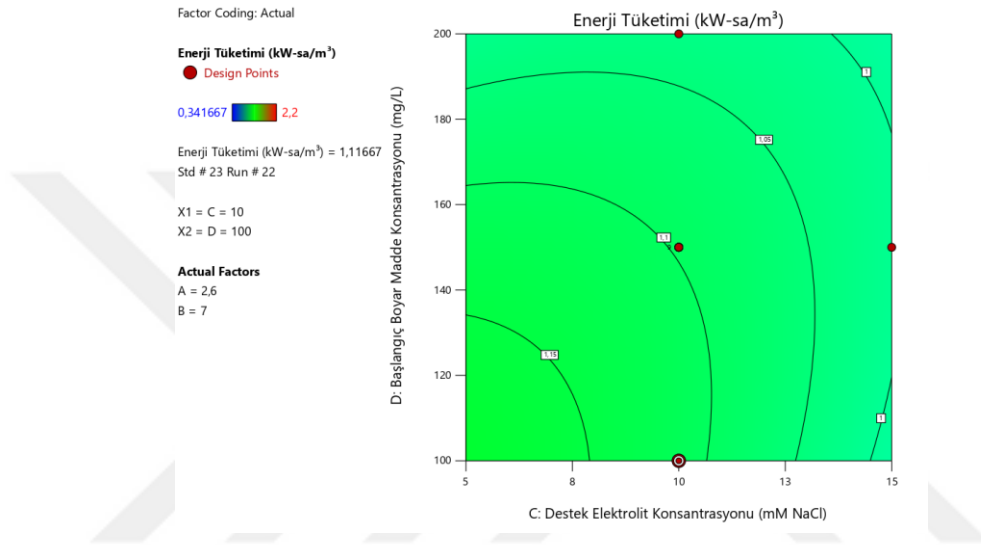
Şekil 4.44: pH'nın başlangıç boyar madde konsantrasyonunun enerji tüketimine etkisinin kontur grafiği



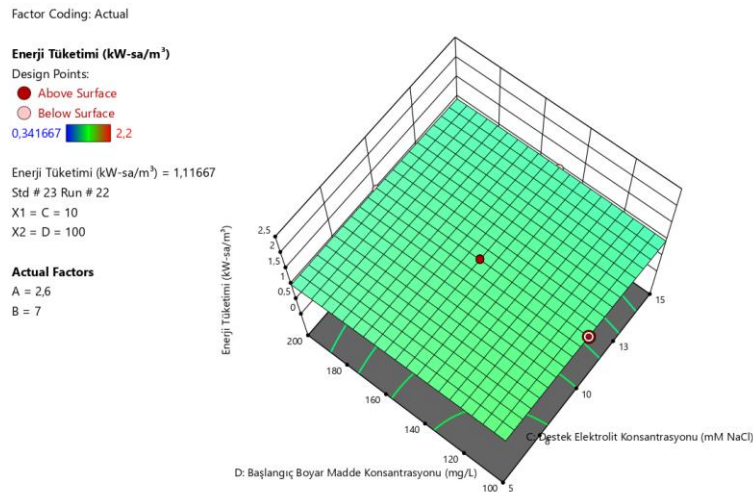
Şekil 4.45: pH ve C₀'ün enerji tüketiminin cevap yüzey yöntemi grafiği

4.2.12 DEK'in ve C₀'ın Enerji Tüketimine Etkisi

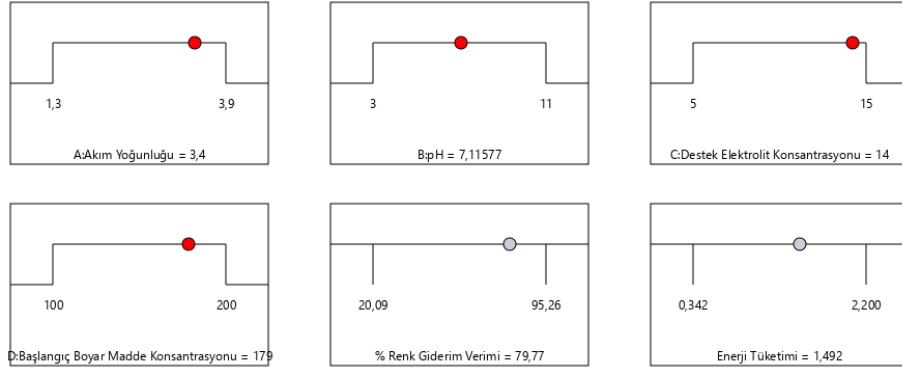
Grafikler okunduğunda iki parametrenin birlikte çalışırken azami bir fark yarattığı gözlemlenmiştir. Bu durumda DEK ilave edilerek sağlanmak istenen iletkenlik ile artan elektron alışverişi ve boyar madde miktarının azaltılmak istenmesi enerji tüketimi açısından olumludur (Mora-Gómez et al., 2020). Şekil 4.46 ve 4.47'deki deneylerde DEK 5 mM NaCl, 10 mM NaCl ve 15 mM NaCl iken, boyar madde konsantrasyonu 100 mg/L, 150 mg/L ve 200 mg/L olarak çalışılmıştır. Maksimum noktadaki enerji tüketimi ise DEK 10 mM NaCl ve 150 mg/L olduğunda 1,11 kW-sa/m³ elde edilmektedir.



Şekil 4.46: Destek elektrolit konsantrasyonunun başlangıç boyar madde konsantrasyonunun enerji tüketimine etkisinin kontur grafiği



Şekil 4.47: DEK'in ve C₀'ın enerji tüketiminin cevap yüzey yöntemi grafiği



Desirability = 1,000
Solution 1 out of 100

Şekil 4.48: Elektrooksidasyon prosesi için optimum çalışma koşulları

4.3 DORACRYL BLUE XFGRL

Bu bölümde doracryl blue XFGRL boyasının elektrooksidasyon prosesi kullanılarak renk giderimi ve enerji tüketimi araştırılmıştır. Doracryl blue XFGRL boyar maddesinin elektrooksidasyon prosesi yardımıyla gideriminde ampirik dizayn matrisi göz önünde bulundurularak uygulanan çalışmalar neticesinde ulaşılan renk artırım verimi ve enerji tüketim neticeleri tablo 4.15'te sunulmuştur.

Tablo 4.15: Ampirik faaliyetler neticesinde ulaşılan sonuçlar

Std	Run	Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	pH	Destek Elektrolit Konsantrasyonu (mM NaCl)	Başlangıç Boyar Madde Konsantrasyonu (mg/L)	Renk Giderim Verimi (%)	Enerji Tüketimi (kW-sa/m ³)
25	1	2,6	7	10	150	72,41	1,117
1	2	1,3	3	5	100	48,33	0,375
14	3	3,9	3	15	200	92,92	1,475
6	4	3,9	3	15	100	95,23	2,075
16	5	3,9	11	15	200	77,20	1,700
22	6	2,6	7	15	150	84,17	0,967
21	7	2,6	7	10	150	74,07	1,150
19	8	2,6	7	10	150	72,92	1,133
5	9	1,3	3	15	100	77,81	0,350
11	10	1,3	11	5	200	24,95	0,442
30	11	2,6	7	10	150	81,62	1,183
12	12	3,9	11	5	200	36,39	2,100
29	13	2,6	7	10	150	72,57	1,150
20	14	2,6	11	10	150	60,35	1,000

Tablo 4.15: (devam)

Std	Run	Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	pH	Destek Elektrolit Konsantrasyonu (mM NaCl)	Başlangıç Boyar Madde Konsantrasyonu (mg/L)	Renk Giderim Verimi (%)	Enerji Tüketimi (kW-sa/m ³)
3	15	1,3	11	5	100	25,95	0,442
24	16	2,6	7	10	200	65,65	1,133
27	17	2,6	7	10	150	66,57	1,150
18	18	3,9	7	10	150	84,98	2,100
28	19	2,6	7	10	150	80,66	1,133
15	20	1,3	11	15	200	29,28	0,367
17	21	2,6	7	10	150	77,33	1,150
23	22	2,6	7	10	100	81,66	1,117
4	23	3,9	11	5	100	73,68	2,525
7	24	1,3	11	15	100	26,96	0,367
26	25	2,6	7	10	150	91,97	1,100
13	26	1,3	3	15	200	59,45	0,367
8	27	3,9	11	15	100	50,77	1,775
10	28	3,9	3	5	200	54,66	1,875
2	29	3,9	3	5	100	84,67	1,875
9	30	1,3	3	5	200	21,20	0,350

Tablo 4.15'te verilen değerler box-behnken dizaynı ile optimize edildiğinde, renk giderimi için kuadratik model, enerji tüketimi için iki faktör etkileşimi modeli olduğu görülmektedir. Enerji tüketimi ve renk giderim verimi üzerine gerçekleştirilen model uyumsuzluğu test sonuçları Tablo 4.16 ve Tablo 4.17'te gösterilmiştir.

Tablo 4.16: Renk giderim veriminin model uyumsuzluğu

Varyasyon Kaynağı	Kareler Toplamı	SD	Kareler Ortalaması	f Değeri	p Değeri	
Doğrusal	5333,42	17	313,73	5,80	0,0081	
İki Faktör Etkileşimi	3819,29	11	347,21	6,42	0,0070	
Kuadratik	679,47	7	97,07	1,79	0,2151	Önerilen
Kübik	107,66	1	107,66	1,99	0,1960	
Saf Hata	432,80	8	54,10			

Tablo 4.17: Enerji tüketiminin model uyumsuzluğu

Varyasyon Kaynağı	Kareler Toplamı	SD	Kareler Ortalaması	f Değeri	p Değeri	
Doğrusal	0,5164	17	0,0304	53,93	< 0.0001	Önerilen
İki Faktör Etkileşimi	0,2508	11	0,0228	40,48	< 0.0001	Önerilen

Tablo 4.17: (devam)

Varyasyon Kaynağı	Kareler Toplamı	SD	Kareler Ortalaması	f Değeri	p Değeri	
Kuadratik	0,1736	7	0,0248	44,02	< 0.0001	
Kübik	0,0615	1	0,0615	109,12	< 0.0001	
Saf Hata	0,0045	8	0,0006			

Renk giderimi tahmini ve enerji tüketimi tahmini için sunulan kuadratik model ve iki faktör etkileşimi modelinde yararlanılan her bir terimin modellemedeki tesiri anova analizi yapılarak tespit edilmiştir. Tablo 4.18 ve Tablo 4.19’te yapılan anova analizi sunulmuştur.

Tablo 4.18: Renk giderim veriminin ANOVA analizi sonuçları

Varyasyon Kaynağı	Kareler Toplamı	SD	Kareler Ortalaması	f Değeri	p Değeri	
Model	13290,23	14	949,30	12,80	< 0.0001	Önemli
A-Akım Yoğunluğu	4045,59	1	4045,59	54,56	< 0.0001	
B-pH	2237,02	1	2237,02	30,17	< 0.0001	
C-Destek Elektrolit Konsantrasyonu	1258,28	1	1258,28	16,97	0,0009	
D-Başlangıç Boyar Madde Konsantrasyonu	593,71	1	593,71	8,01	0,0127	
AB	6,50	1	6,50	0,0877	0,7712	
AC	2,53	1	2,53	0,0341	0,8559	
AD	0,0610	1	0,0610	0,0008	0,9775	
BC	544,27	1	544,27	7,34	0,0162	
BD	291,28	1	291,28	3,93	0,0661	
CD	669,49	1	669,49	9,03	0,0089	
A ²	107,05	1	107,05	1,44	0,2482	
B ²	49,24	1	49,24	0,6641	0,4279	
C ²	10,75	1	10,75	0,1449	0,7088	
D ²	34,29	1	34,29	0,4624	0,5069	
Kalıntı	1112,27	15	74,15			
Model Uyumsuzluğu	679,47	7	97,07	1,79	0,2151	Önemsiz
Saf Hata	432,80	8	54,10			
Toplam	14402,50	29				

12,80 olan model f-değeri, modelin anlamlı olduğunu ima eder. Gürültü nedeniyle bu kadar büyük bir f-değerinin ortaya çıkma olasılığı yalnızca %0,01'dir.

0,0500'den küçük p-değerleri, model terimlerinin anlamlı olduğunu gösterir. Bu durumda A, B, C, D, BC, CD anlamlı model terimleridir. 0,1000'den büyük değerler, model terimlerinin anlamlı olmadığını gösterir. Çok sayıda önemsiz model terimi varsa (hiyerarşiyi desteklemek için gerekenler hariç), model azaltma modelinizi geliştirebilir.

1,79 olan uyum eksikliği f-değeri, uyum eksikliğinin saf hataya göre anlamlı olmadığını ima eder. Gürültü nedeniyle bu kadar büyük bir uyumsuzluk f-değerinin meydana gelme olasılığı %21,51'dir. Anlamlı olmayan uyum eksikliği iyidir, modelin uymasını istiyoruz.

Tablo 4.19: Enerji tüketimi ANOVA analiz sonuçları

Varyasyon Kaynağı	Kareler Toplamı	SD	Kareler Ortalaması	f Değeri	p Değeri	
Model	10,92	10	1,09	81,29	< 0.0001	Önemli
A-Akım Yoğunluğu	10,38	1	10,38	772,52	< 0.0001	
B-pH	0,0406	1	0,0406	3,02	0,0985	
C-Destek Elektrolit Konsantrasyonu	0,1667	1	0,1667	12,41	0,0023	
D-Başlangıç Boyar Madde Konsantrasyonu	0,0662	1	0,0662	4,93	0,0388	
AB	0,0244	1	0,0244	1,82	0,1936	
AC	0,0888	1	0,0888	6,60	0,0187	
AD	0,0745	1	0,0745	5,54	0,0295	
BC	0,0745	1	0,0745	5,54	0,0295	
BD	0,0007	1	0,0007	0,0546	0,8178	
CD	0,0027	1	0,0027	0,2019	0,6583	
Kalıntı	0,2553	19	0,0134			
Model Uyumsuzluğu	0,2508	11	0,0228	40,48	< 0.0001	Önemsiz
Saf Hata	0,0045	8	0,0006			
Toplam	11,18	29				

81,29 olan model f-değeri, modelin anlamlı olduğunu ima eder. Gürültü nedeniyle bu kadar büyük bir f-değerinin ortaya çıkma olasılığı yalnızca %0,01'dir.

0,0500'den küçük p-değerleri, model terimlerinin anlamlı olduğunu gösterir. Bu durumda A, C, D, AC, AD, BC anlamlı model terimleridir. 0,1000'den büyük değerler, model terimlerinin anlamlı olmadığını gösterir. Çok sayıda önemsiz model terimi varsa (hiyerarşiyi desteklemek için gerekenler hariç), model azaltma modelinizi geliştirebilir.

40,48 olan uyum eksikliği f-değeri, uyum eksikliğinin önemli olduğunu ima etmektedir. Gürültü nedeniyle bu kadar büyük bir uyumsuzluk f-değerinin ortaya çıkma olasılığı yalnızca %0,01'dir. Önemli ölçüde uyum eksikliği kötüdür, modelin uymasını istiyoruz.

Gerçek faktörler açısından renk giderimi son denklem eşitlik 4.9'da verilmiştir.

$$\% \text{ Renk Giderim Verimi} = A \times 39,57869 + B \times 1,82585 + C \times 2,37260 - D \times 0,046301 + AB \times 0,122582 - AC \times 0,061189 + AD \times 0,000950 - BC \times 0,291620 - BD \times 0,021334 - CD \times 0,025874 - A^2 \times 5,34931 - B^2 \times 0,383213 - C^2 \times 0,114571 - D^2 \times 0,001597 \quad (4.9)$$

Gerçek faktörler cinsinden denklem, her faktörün belirli seviyelerine verilecek yanıt hakkında tahminlerde bulunmak için kullanılabilir. Burada her faktör için seviyelerin orijinal birimlerinde belirtilmesi gerekir. Bu denklem, her bir faktörün göreceli etkisini belirlemek için kullanılmamalıdır çünkü katsayılar, her bir faktörün birimlerini barındıracak şekilde ölçeklendirilir ve kesişim, tasarım alanının merkezinde değildir.

Kodlanmış faktörler açısından renk giderimi son denklem eşitlik 4.10'da verilmiştir.

$$\% \text{ Renk Giderim Verimi} = A \times 15,80 - B \times 11,75 + C \times 8,81 - D \times 5,74 + AB \times 0,6374 - AC \times 0,3977 + AD \times 0,0618 - BC \times 5,83 + BD \times 4,27 + CD \times 6,47 - A^2 \times 9,04 - B^2 \times 6,13 - C^2 \times 2,86 - D^2 \times 3,99 \quad (4.10)$$

Kodlanmış faktörler cinsinden denklem, her faktörün belirli seviyelerine verilen yanıt hakkında tahminlerde bulunmak için kullanılabilir. Varsayılan olarak faktörlerin yüksek seviyeleri +1, düşük seviyeleri ise -1 olarak kodlanır. Kodlanmış denklem, faktör katsayılarını karşılaştırarak faktörlerin göreceli etkisini belirlemek için kullanışlıdır.

Gerçek faktörler açısından enerji tüketimi son denklem eşitlik 4.11'de verilmiştir.

$$\text{Enerji Tüketimi} = A \times 0,821171 + B \times 0,021731 + C \times 0,041657 + D \times 0,001800 + AB \times 0,007512 - AC \times 0,011458 - AD \times 0,001050 - BC \times 0,003411 + BD \times 0,000339 + CD \times 0,000163 + A^2 \times 0,114929 - B^2 \times 0,012535 - C^2 \times 0,000034 - D^2 \times 0,000052 \quad (4.11)$$

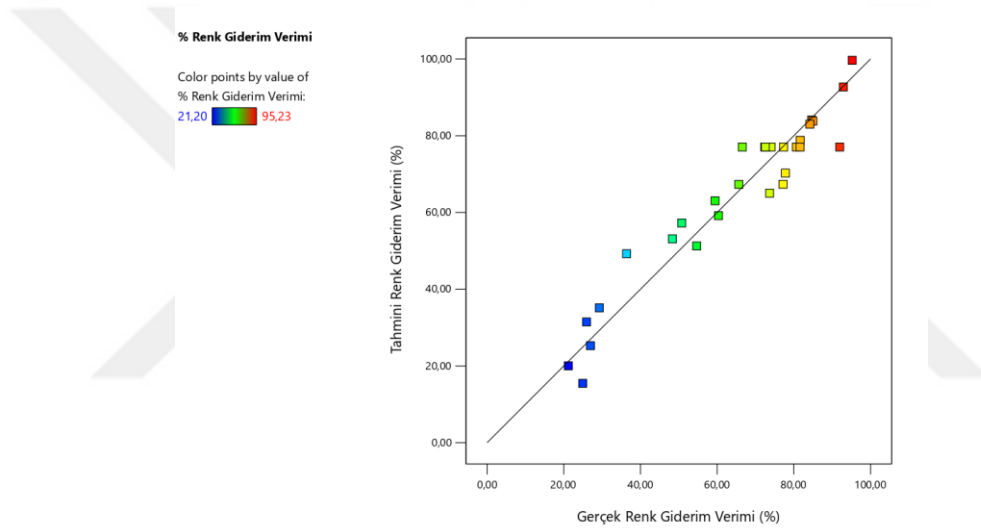
Gerçek faktörler cinsinden denklem, her faktörün belirli seviyelerine verilecek yanıt hakkında tahminlerde bulunmak için kullanılabilir. Burada her faktör için seviyelerin orijinal

birimlerinde belirtilmesi gerekir. Bu denklem, her bir faktörün göreceli etkisini belirlemek için kullanılmamalıdır çünkü katsayılar, her bir faktörün birimlerini barındıracak şekilde ölçeklendirilir ve kesişim, tasarım alanının merkezinde değildir.

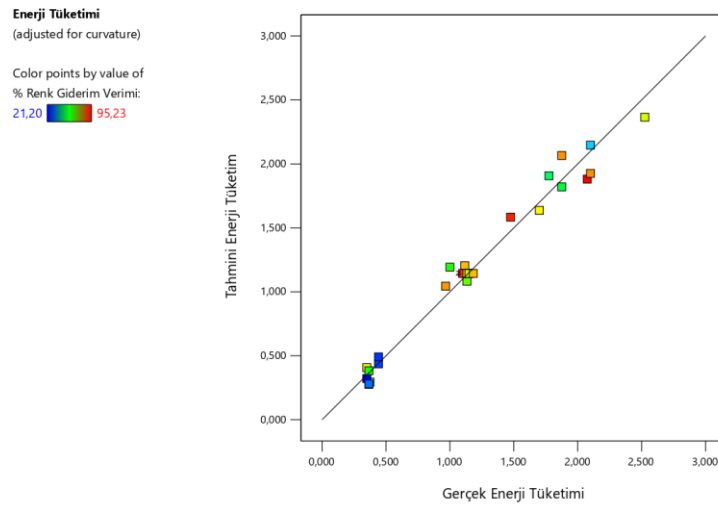
Kodlanmış faktörler açısından enerji tüketimi son denklem eşitlik 4.12’de verilmiştir.

$$\text{Enerji Tüketimi} = A \times 0,7822 + B \times 0,0489 - C \times 0,0991 - D \times 0,0606 + AB \times 0,0391 - AC \times 0,0745 - AD \times 0,0682 - BC \times 0,0682 + BD \times 0,0068 - CD \times 0,0130 \quad (4.12)$$

Kodlanmış faktörler cinsinden denklem, her faktörün belirli seviyelerine verilen yanıt hakkında tahminlerde bulunmak için kullanılabilir. Varsayılan olarak faktörlerin yüksek seviyeleri +1, düşük seviyeleri ise -1 olarak kodlanır. Kodlanmış denklem, faktör katsayılarını karşılaştırarak faktörlerin göreceli etkisini belirlemek için kullanışlıdır.



Şekil 4.49: Renk giderim veriminin gerçek - model arasındaki fark



Şekil 4.50: Enerji tüketiminin gerçek-model arasındaki fark

Şekil 4.49 ve Şekil 4.50 gözden geçirildiğinde, ulaşılan tahmini değerler ile gerçek değerlerin üst üste geldiği görülmektedir. Bu durum karşısında, renk arıtım verimi ve enerji tüketimi kapsamında önerilen modelin uyumluluğunun tetkik etmek amacıyla BBD yapılarak incelenmiştir. Tablo 4.20 de kuadratik modelin ve Tablo 4.21 de sunulan iki faktör etkileşimi modelinin uyumluluğunun sınanması gayesiyle kullanılan istatistiksel neticeler nitelendirilmelidir.

Tablo 4.20: Renk arıtımı amacıyla tavsiye edilen kuadratik modeli uyumluluğunun testi

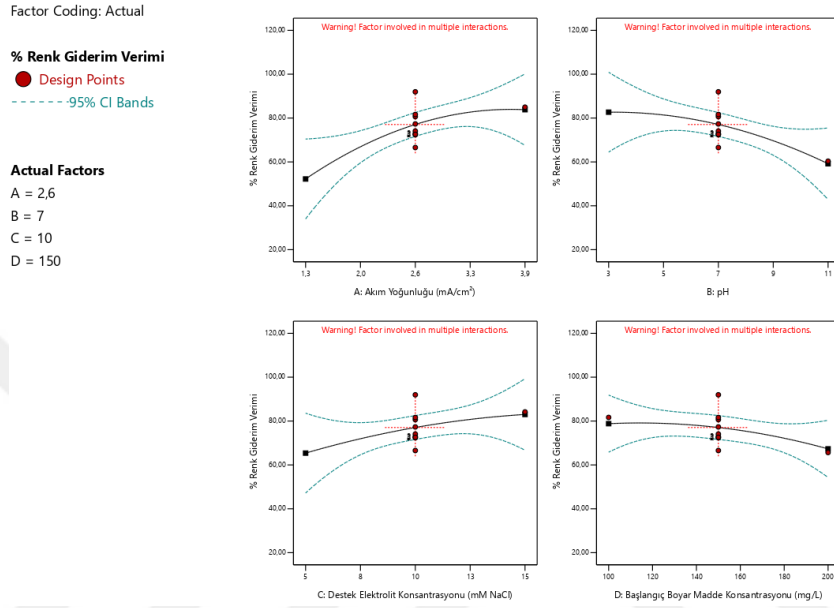
Std. Dev.	8,61	R^2 (Belirtme Katsayısı)	0,9228
Ortalama	64,88	R^2_{adj} (Düzeltilmiş Belirtme Katsayısı)	0,8507
C.V.% (Varyasyon Katsayısı)	13,27	R^2_{pred} (Tahmini Belirtme Katsayısı)	0,5149
		Yeterli Hassasiyet	13,8267

0,5149'luk tahmini R^2 , normalde beklendiği gibi 0,8507'lik düzeltilmiş R^2 'ye yakın değildir; yani fark 0,2'den fazladır. Bu, büyük bir blok etkisine veya modeliniz ve/veya verilerinizle ilgili olası bir soruna işaret ediyor olabilir. Göz önünde bulundurulması gerekenler, model azaltma, yanıt dönüştürme, aykırı değerler vb.'dir. Tüm ampirik modeller, doğrulama çalışmaları yapılarak test edilmelidir. Yeterli hassasiyet sinyal-gürültü oranını ölçer. Oranın 4'ten büyük olması arzu edilir. 13.827 oranınız yeterli bir sinyale işaret ediyor. Bu model tasarım alanında gezinmek için kullanılabilir.

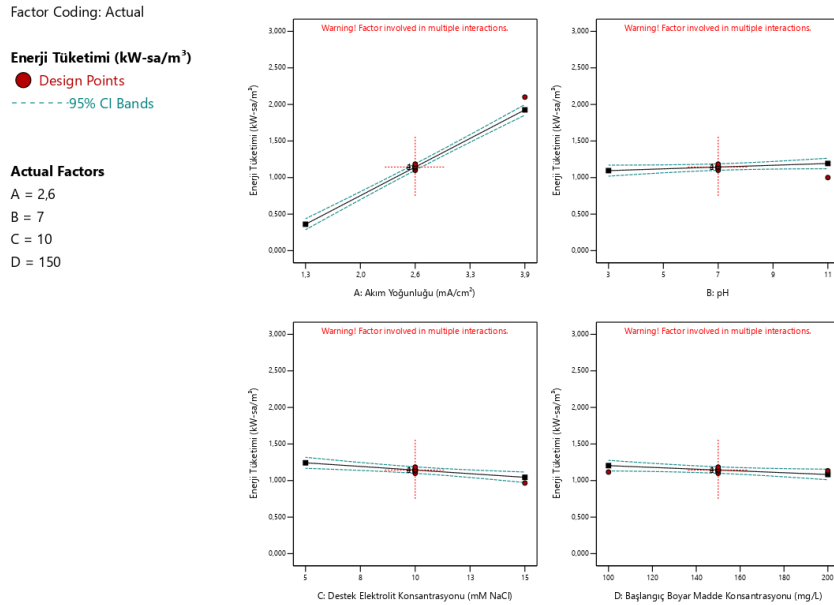
Tablo 4.21: Enerji tüketimi için önerilen iki faktör etkileşimi modelinin uygunluğunun testi

Std. Dev.	0,1159	R^2 (Belirtme Katsayısı)	0,9772
Ortalama	1,17	R^2_{adj} (Düzeltilmiş Belirtme Katsayısı)	0,9651
C.V.% (Varyasyon Katsayısı)	9,92	R^2_{pred} (Tahmini Belirtme Katsayısı)	0,8760
		Yeterli Hassasiyet	29,7415

0,8760'lık tahmini R^2 , 0,9651'lik düzeltilmiş R^2 ile makul düzeyde uyum içindedir; yani fark 0,2'den azdır. Yeterli hassasiyet sinyal-gürültü oranını ölçer. Oranın 4'ten büyük olması arzu edilir. 29.742 oranınız yeterli bir sinyale işaret ediyor. Bu model tasarım alanında gezinmek için kullanılabilir.



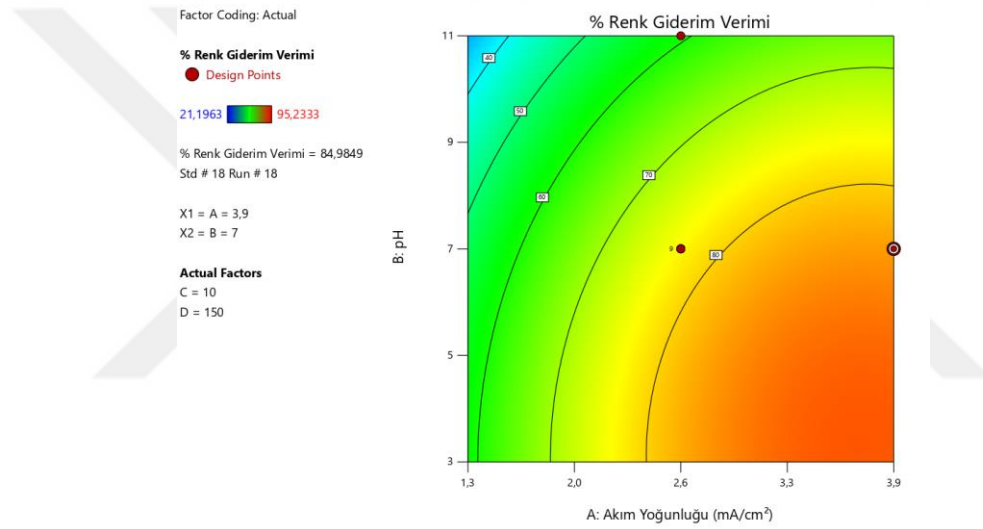
Şekil 4.51: Her bir değişkenin şahsi açıdan renk artım verimine tesirleri



Şekil 4.52: Her bir değişkenin şahsi açıdan enerji tüketimine tesirleri

4.3.1 Akım Yoğunluğunu ve pH'nın Renk Giderimine Etkisi

Grafiklere bakıldığında akım yoğunluğu ve pH EO prosesinde etken parametrelerdir. Şekil 4.53 ve 4.54 incelendiğinde ortamdaki kirleticileri arıtmak için uygulanan akım miktarı artırılmakta, pH ise düşük seviyelerde tutulmaktadır. Akım yoğunluğu artırıldıkça giderim verimi artar. Yapılan deneylerde akım yoğunluğu 1,3 mA/cm², 2,6 mA/cm² ve 3,9 mA/cm² olarak seçilmiştir. Katyonik boyalarda pH azaldıkça renk gideriminin arttığı, pH arttıkça renk gideriminin azaldığı gözlemlenmiştir. pH ise 3,7 ve 11 seviyelerinde çalışmıştır. Karıştırma hızı 300 rpm ve sıcaklık 25 °C'de tutulmaktadır. Grafikte görüldüğü üzere düşük pH ve yüksek akım yoğunluğunda giderim verimi en yüksektir. Maksimum renk giderim verimi %84,98 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.53: Akım yoğunluğunun pH'nın renk giderim verimine etkisinin kontur grafiği

Factor Coding: Actual

% Renk Giderim Verimi

Design Points:

● Above Surface

○ Below Surface

21,20 95,23

% Renk Giderim Verimi = 84,98

Std # 18 Run # 18

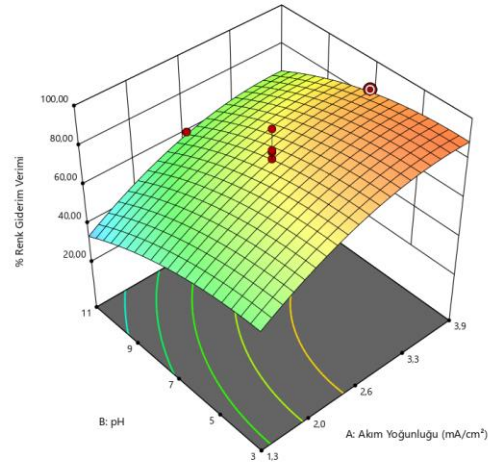
X1 = A = 3,9

X2 = B = 7

Actual Factors

C = 10

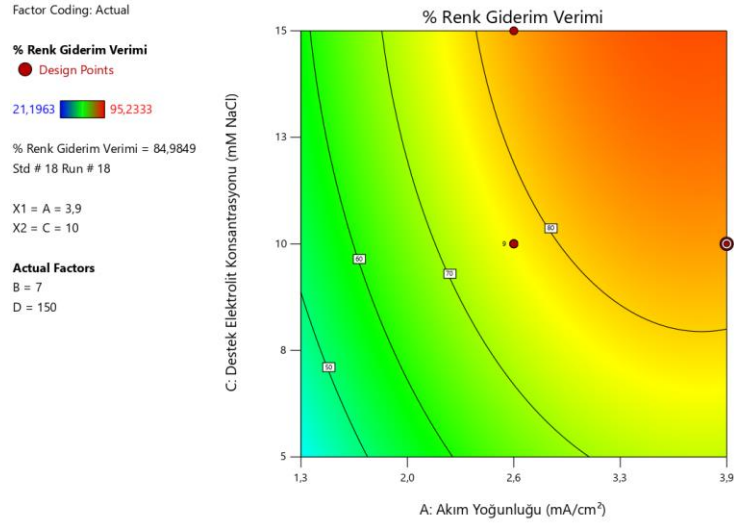
D = 150



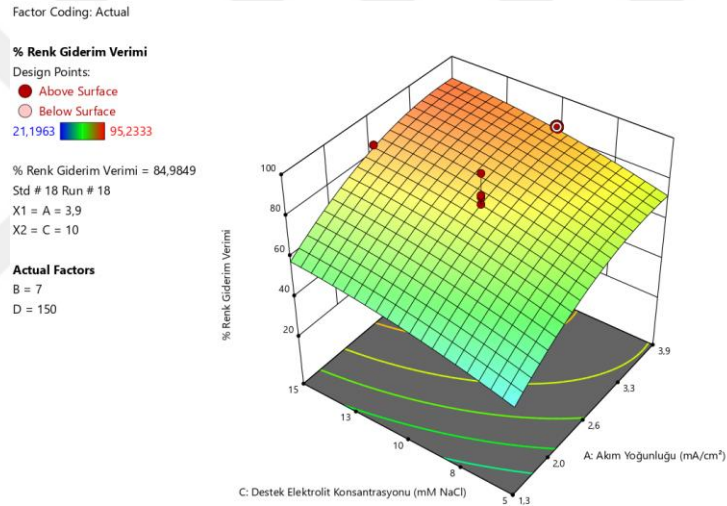
Şekil 4.54: Akım yoğunluğunun ve pH'nın renk giderimine etkisinin cevap yüzey yöntemi grafiği

4.3.2 Akım Yoğunluğunun ve DEK'in Renk Giderimine Etkisi

Şekil 4.55 ve 4.56 incelendiğinde çıkarılan sonuçlar akım yoğunluğu destek elektrolit konsantrasyonu renk giderimi açısından kıstas parametrelerdir. Destek elektrolit ilavesi ile ortamdaki iletkenlik sağlandığında sarf edilen akım miktarı artırılarak daha kısa sürede giderimin gerçekleştiği gözlemlenmiştir. DEK sayesinde ortamdaki elektron transferi hızlanır ve aktarımının daha rahat olmasına zemin hazırlamaktadır. Akım yoğunluğu artırıldığında renk giderim veriminde de doğru orantılı bir artış meydana gelmektedir. Akım yoğunluğu $2,6 \text{ mA/cm}^2$ ve DEK'in 10 mM NaCl olduğunda maksimum verimin $\%91,97$ olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.55: Akım yoğunluğunun destek elektrolit konsantrasyonunun renk giderim verimine etkisinin kontur grafiği

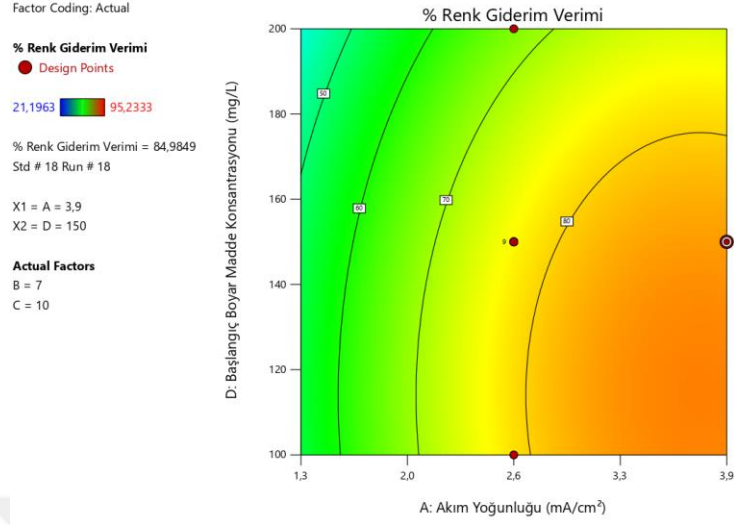


Şekil 4.56: Akım yoğunluğunun ve destek elektrolit konsantrasyonunun renk giderimine etkisi

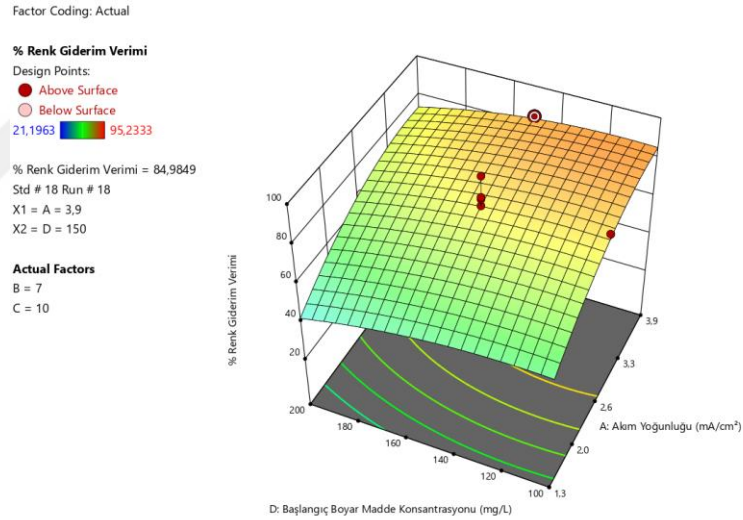
4.3.3 Akım Yoğunluğunun ve C_0 'ın Renk Giderimine Etkisi

Şekil 4.57 ve 4.58 yorumlandığında akım yoğunluğu ve boyar madde konsantrasyonu etken parametreler arasında yer almaktadır. Boyar madde miktarı ortamda ne kadar fazla ise gidermek için daha fazla akıma ihtiyaç duyulmaktadır. Anot ve katot arasındaki elektron aktarımı akımın itici kuvvetiyle doğrudan bağlantılıdır, elektron alışverişi ne kadar seri ve çok olur ise verimde de o kadar artış olmaktadır. (Değermenci, 2021). Akım yoğunluğu 2,6

mA/cm^2 ve boyar madde konsantrasyonu 150 mg/L olacak şekilde ayarladığında, maksimum verim %91,97 olduğu bildirilmektedir.



Şekil 4.57: Akım yoğunluğunun başlangıç boyar madde konsantrasyonunun renk giderim verimine etkisinin kontur grafiği

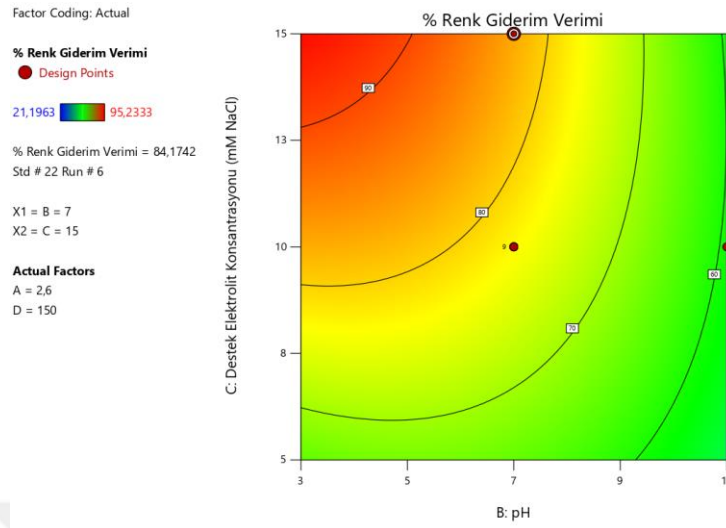


Şekil 4.58: Akım yoğunluğunun ve boya konsantrasyonunun renk giderimine etkisi

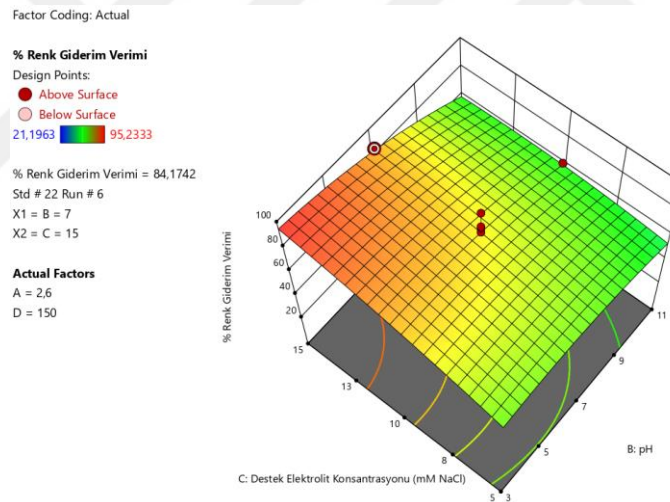
4.3.4 pH'nın ve DEK'in Renk Giderimine Etkisi

pH ve DEK'in birbirleri üzerindeki etkisi şekil 4.59 ve 4.60'ta incelenmektedir. Ortaya çıkan grafiklerde düşük pH'da ve yüksek DEK'te renk giderim veriminin daha fazla olduğu görülmektedir. pH'nın düşük olması, katyonik boyanın daha iyi aktive olması sebebiyle ortama asit ilavesi gerçekleştirilir (Mamián et al., 2009). DEK ilavesi ile iletkenlik artırılarak elektron transferi daha hızlı ve kolay olacağından renk giderimine olumlu katkı

sağlamaktadır (Wang et al., 2022). pH 7 ve DEK 10 mM NaCl seçilerek maksimum verim olan %91,97' ulaşmaktadır.



Şekil 4.59: pH'nın destek elektrolit konsantrasyonunun renk giderim verimine etkisinin kontur grafiği

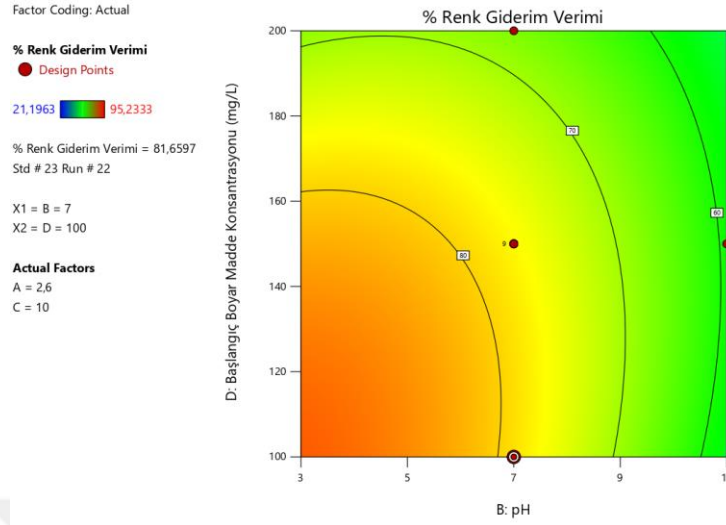


Şekil 4.60: pH'nın ve destek elektrolit konsantrasyonunun renk giderimine etkisi

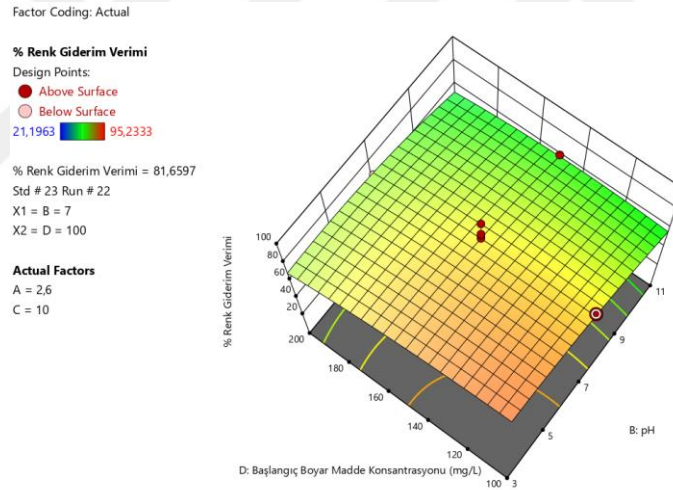
4.3.5 pH'nın ve C₀'ın Renk Giderimine Etkisi

Oluşan grafiklere bakıldığında pH ve boyar madde konsantrasyonunun ikili etkisi incelenmiştir. Boyar madde miktarının ortamda fazla oluşu kirliliği artırmaktadır. Boyar madde giderimini sağlamak için sisteme elektriksel güç uygulanmaktadır. Boyar maddenin katyonik yapıda olması ve bazik özellik göstermesinden dolayı ortama asit ilave edildiğinde renk giderim veriminde artış gözlenmektedir (Hasan et al., 2021). Şekil 4.61 ve 4.62'de pH

7 ve boyar madde konsantrasyonu 150 mg/L seçilirse maksimum verim %81,65 olduğu gözlenmektedir.



Şekil 4.61: pH'nın başlangıç boyar madde konsantrasyonunun renk giderim verimine etkisinin kontur grafiği

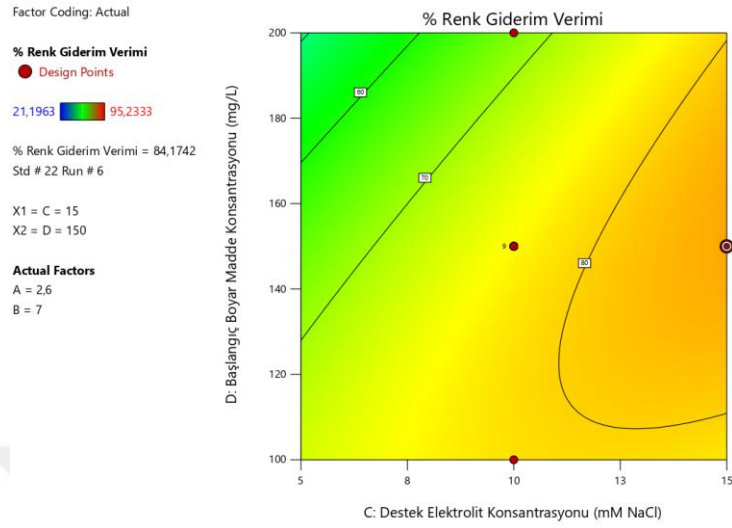


Şekil 4.62: pH'nın ve boyar konsantrasyonunun renk giderimine etkisi

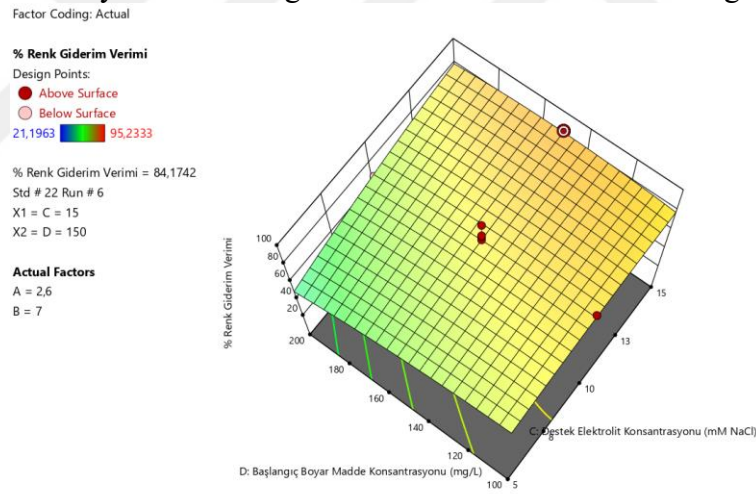
4.3.6 DEK'in ve C₀'ın Renk Giderimine Etkisi

DEK ve boyar madde konsantrasyonunun birbirleri üzerine olan etkileri aşağıdaki grafikleri oluşturmuştur. Grafikler incelendiğinde aşırı bir etki gözlemlenmemiştir. Boyar madde ortamda kirlenici olarak var olduğundan giderilmek istenmektedir. Boyar madde miktarı ne kadar fazla ise sisteme verilecek akım bu durumla doğru orantılıdır. Akımın daha kolay ve hızlı ilerleyebilmesi iletkenliği sağlaması için DEK ilavesi yapılmıştır. İletkenliğin ortamda

mevcut olması ile elektrotlar arası elektron alışverişi daha iyi sağlanarak arıtma verimine büyük katkı sağlamaktadır. Şekil 4.63 ve 4.64'te maksimum verim DEK 10 mM NaCl ve C_0 150 mg/L olduğunda %91,98'e ulaşan renk giderim verimi ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.63: Destek elektrolit konsantrasyonunun başlangıç boya madde konsantrasyonunun renk giderim verimine etkisinin kontur grafiği

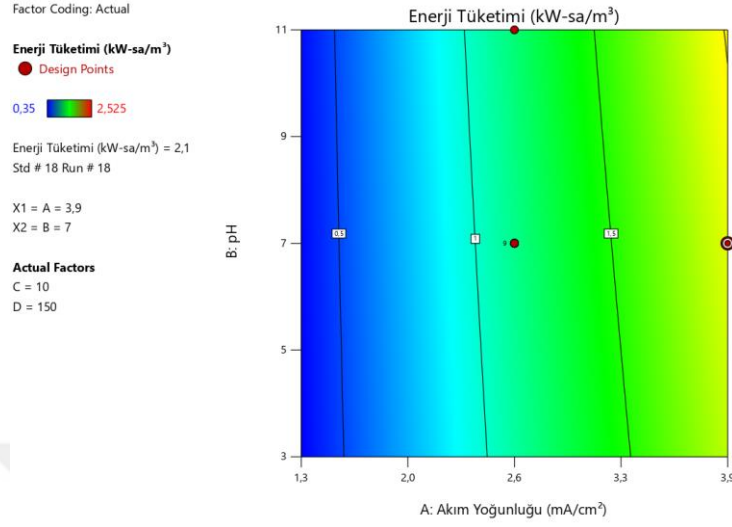


Şekil 4.64: Destek elektrolit konsantrasyonunun ve boya konsantrasyonunun renk giderimine etkisi

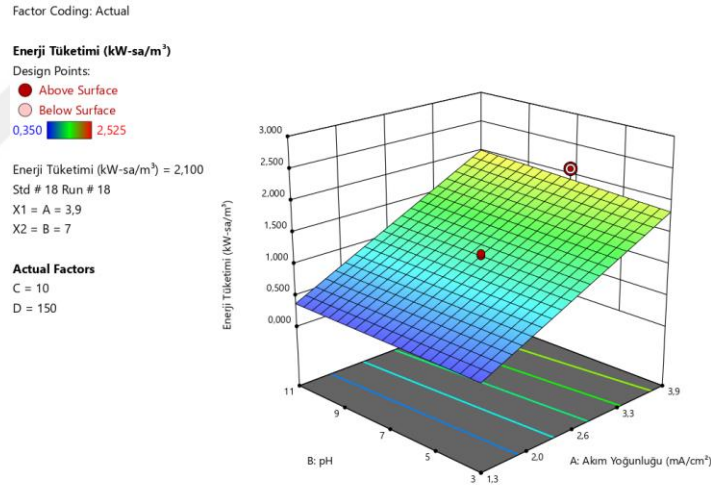
4.3.7 Akım Yoğunluğunun ve pH'nın Enerji Tüketimine Etkisi

Akım yoğunluğu enerji tüketiminde en çok öne çıkan parametrelerdir. Akım yoğunluğu doğrudan enerji tüketimini etkilemektedir. Sistemin çalışabilmesi için elektrik enerjisine ihtiyaç duyulmaktadır. Akım yoğunluğunun daha az harcanabilmesi için pH uygun seviyeye düşürülüp en iyi renk giderim verimi elde edilmeye çalışılmaktadır. Şekil 4.65 ve 4.66'da

yapılan deneylerde akım yoğunluğu $3,9 \text{ mA/cm}^2$ olarak prosese uygulandığında ve pH 7 seviyesinde tutulduğunda en yüksek enerji tüketimi olan $2,1 \text{ kW-sa/m}^3$ gözlemlenmektedir.



Şekil 4.65: Akım yoğunluğunun pH'nın enerji tüketimine etkisinin kontur grafiği

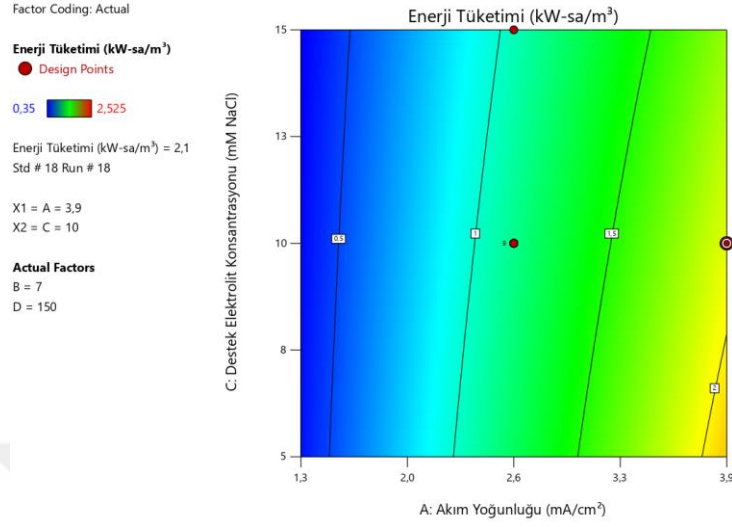


Şekil 4.66: Akım yoğunluğunun pH'nın enerji tüketimine etkisinin cevap yüzey grafiği

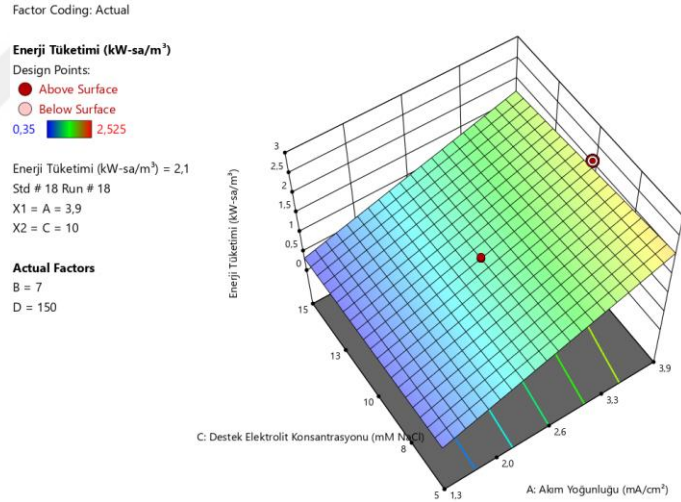
4.3.8 Akım Yoğunluğunun ve DEK'in Enerji Tüketimine Etkisi

Akım yoğunluğu ve destek elektrolit konsantrasyonu enerji tüketimde etkili bir rol oynamaktadır. Buradaki esas etken elektrik akımıdır. Destek elektrolit konsantrasyonunun bu süreçte iletkenliği artırması beklenir. İletkenliğin artması, ortamda elektron transferinin hızlanmasına ve akıma karşı olan direncin kırılmasına neden olmaktadır. DEK olarak NaCl

tuzu kullanılmıştır. Şekil 4.67 ve 4.68’de akım yoğunluğu $3,9 \text{ mA/cm}^2$ ve DEK 10 mM NaCl iken prosesin enerji tüketimi en yüksek mertebeye $2,1 \text{ kW-sa/m}^3$ ulaşmaktadır.



Şekil 4.67: Akım yoğunluğunun destek elektrolit konsantrasyonunun enerji tüketimine etkisinin kontur grafiği

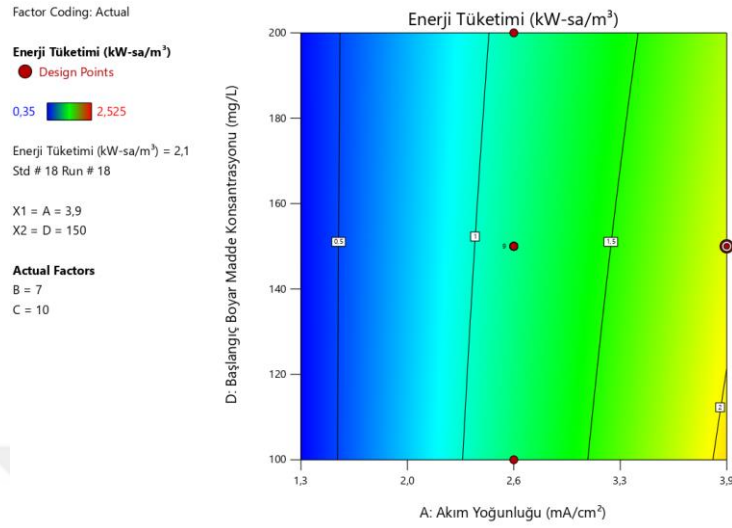


Şekil 4.68: Akım yoğunluğunun destek elektrolit konsantrasyonunun enerji tüketim etkisinin cevap yüzey grafiği

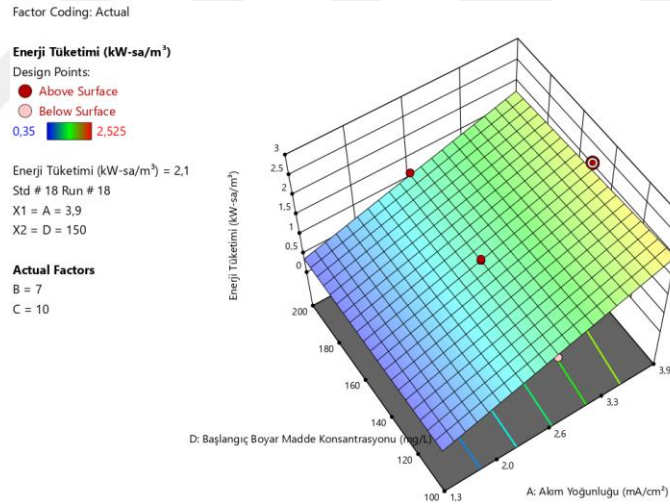
4.3.9 Akım Yoğunluğu ve C₀'ın Enerji Tüketimine Etkisi

Akım yoğunluğu ve başlangıç boyar madde konsantrasyonunun enerji tüketimine etkisi grafiklerde incelenmiştir. Şekil 4.69 ve 4.70'teki incelemeler sonucu her ikisinin de payının büyük olduğu gözlemlenmiştir. Akım yoğunluğu direkt olarak elektrik sarfiyatı demektir. Harcanan elektrik ne kadar fazla ise enerji tüketimi o kadar fazladır. Boyar madde ortamdaki

kirletici miktarı demektir. Boyar madde konsantrasyonunun yoğun olması giderimi güçleştirir ve harcanan akım değerini artırmaktadır. Akım yoğunluğu $3,9 \text{ mA/cm}^2$ ve C_0 150 mg/L olarak yapılan deneylerde enerji tüketimi pik noktası $2,1 \text{ kW-sa/m}^3$ 'e ulaşmaktadır.



Şekil 4.69: Akım yoğunluğunun başlangıç boyar madde konsantrasyonunun enerji tüketimine etkisinin kontur grafiği

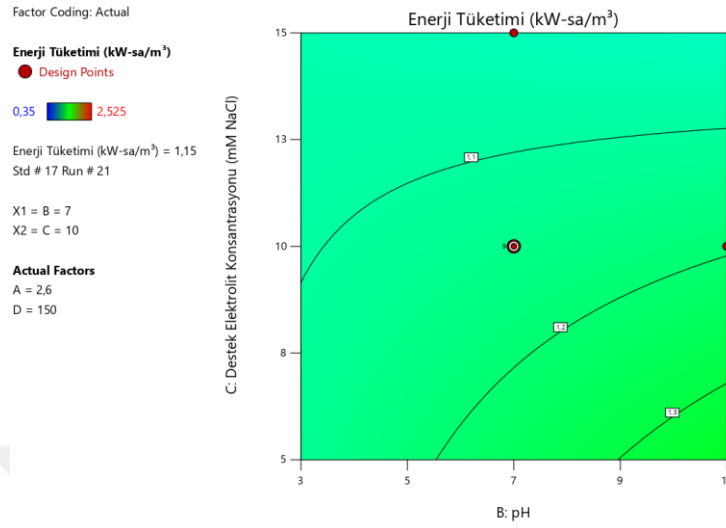


Şekil 4.70: Akım yoğunluğunun başlangıç boyar madde konsantrasyonunun enerji tüketimine etkisinin cevap yüzey grafiği

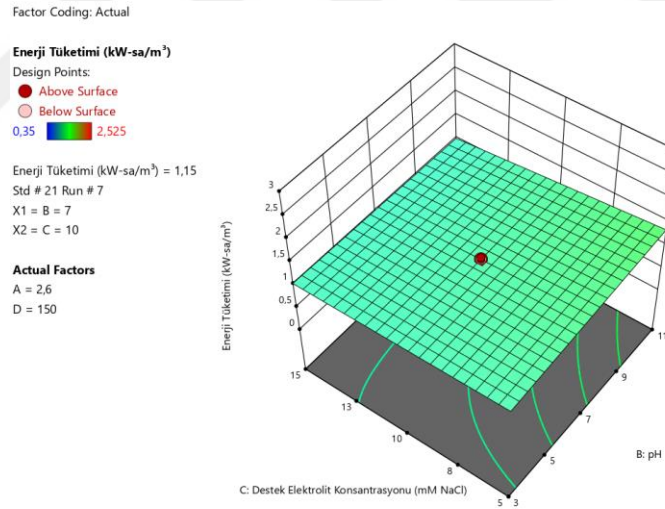
4.3.10 pH'nın ve DEK'in Enerji Tüketimine Etkisi

pH ve DEK enerji tüketimini etkileyen parametreler arasında yer almaktadır. Şekil 4.71 ve 4.72'de görüldüğü üzere enerji tüketimine her iki parametrenin etkileri çok fazla olmamaktadır. Boya katyonik içeriğe sahip olduğu için düşük pH'larda daha çok verim elde edilmektedir. DEK ilavesi ile iletkenliği sağlayıp elektron alışverişi hızlandırılarak sisteme

uygulanan akım azaltılmış olup enerji tüketim sarfıyatı minimize edilmektedir. pH 7 ve DEK 10 mM NaCl üzerinde çalışılan deneylerde maksimum enerji tüketimi 1.15 kW-sa/m³ olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.71: pH'nın destek elektrolit konsantrasyonunun enerji tüketimine etkisinin kontur grafiği

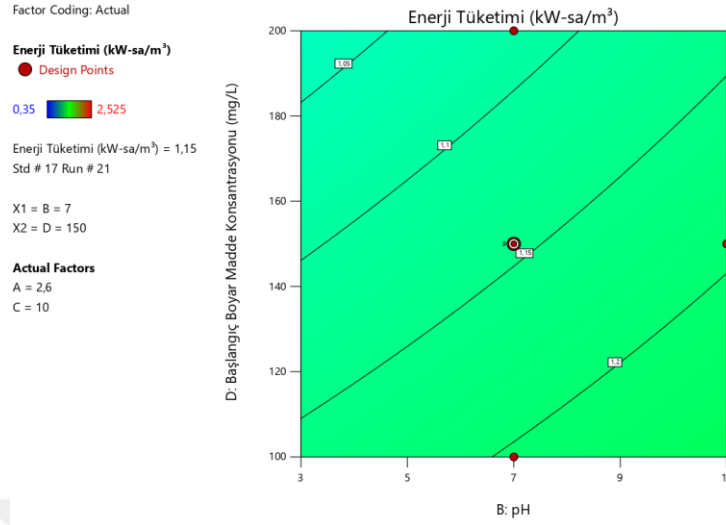


Şekil 4.72: pH'nın destek elektrolit türünün enerji tüketimine etkisinin cevap yüzey grafiği

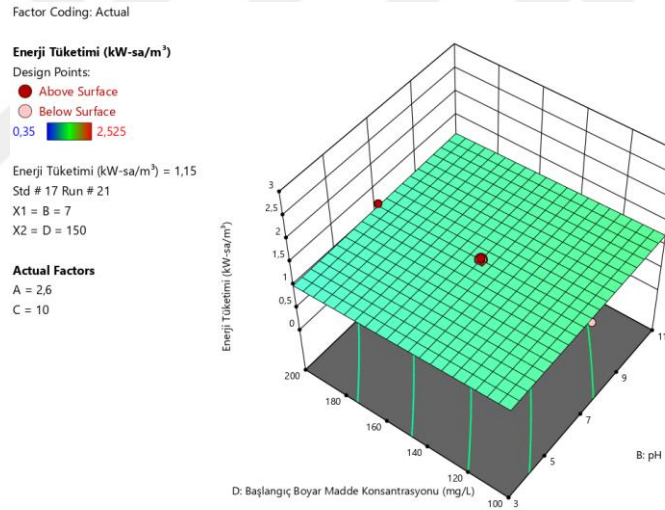
4.3.11 pH'nın ve C₀'ın Enerji Tüketimine Etkisi

Şekil 4.73 ve 4.74 incelendiğinde enerji tüketimini etkileyen pH ve boyar madde konsantrasyonunun etkileri görülmektedir. Enerji tüketimi akım ile ilişkilidir. Akımın az ya da çok sarf edilmesine destek olan pH seviyesi düşürülüp C₀ azaltılırsa enerji tüketimi

azalmaktadır. pH 7 ve C_0 150 mg/L olarak yapılan deneylerden elde edilen verilere göre enerji tüketiminin maksimum $1,15 \text{ kW-sa/m}^3$ olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 4.73: pH'nın başlangıç boyar madde konsantrasyonunun enerji tüketimine etkisinin kontur grafiği

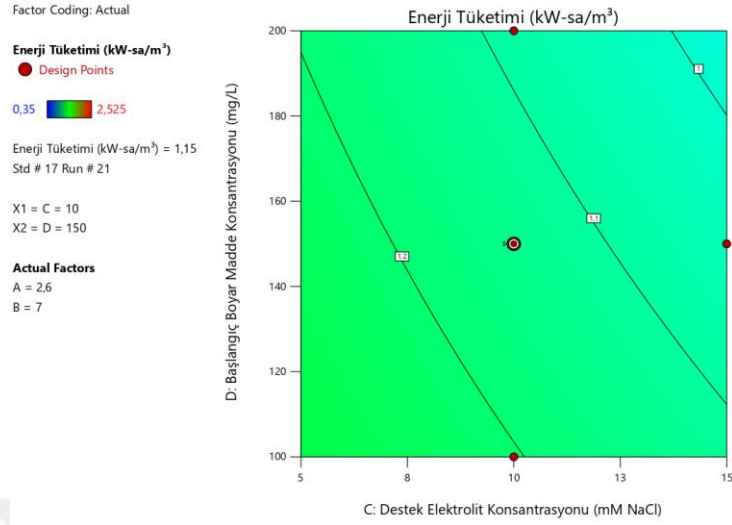


Şekil 4.74: pH'nın başlangıç boyar madde konsantrasyonunun enerji tüketimine etkisinin cevap yüzey grafiği

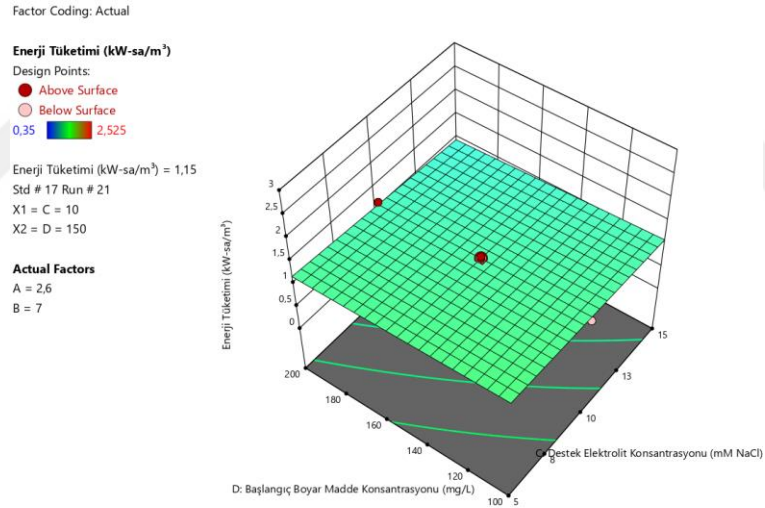
4.3.12 DEK'in ve C_0 'ın Enerji Tüketimine Etkisi

Şekil 4.75 ve 4.76 değerlendirildiğinde DEK ve C_0 'ın enerji tüketimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucu çok bariz bir fark yaratmadığı görülmüştür. DEK olarak NaCl tuzu kullanılmıştır. DEK süreçteki elektron transferini destekleyip hızlandırarak akıma karşı direnci azaltmaktadır. Boyar madde konsantrasyonu ortamdaki

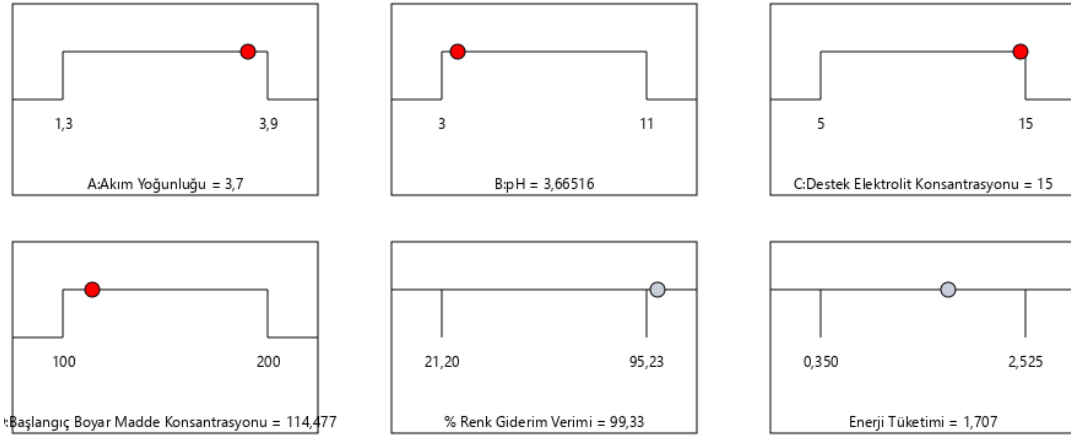
kirletici miktarı olarak açıklanabilmektedir. DEK 10 mM NaCl ve C_0 150 mg/L olarak değerlendirildiğinde maksimum enerji tüketimi $1,15 \text{ kW-sa/m}^3$ saptanmıştır.



Şekil 4.75: Destek elektrolit konsantrasyonunun başlangıç boyar madde konsantrasyonunun enerji tüketimine etkisinin kontur grafiği



Şekil 4.76: Destek elektrolit konsantrasyonunun başlangıç boyar madde konsantrasyonunun enerji tüketimine etkisinin cevap yüzey grafiği



Desirability = 1,000
Solution 1 out of 100

Şekil 4.77: Elektrooksidasyon prosesi için optimum çalışma koşulları

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Endüstri sektöründeki gelişmeler ile birlikte dünya genelinde boyar madde kullanımında artış olduğu bilinmektedir. Boyar maddeler günümüzde tekstil, ilaç, ziraat, gıda, kozmetik gibi pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Boyar maddelerde bulunan kirleticiler birleştiği diğer yapılarda bozunmalara sebep olan son derece ağır bir kirliliği meydana getirmektedir. Bu nedenle boyar maddelerin ayrıştırılıp uzaklaştırılması halk sağlığı ve çevre sağlığı açısından çok önemlidir. Kullanıldıktan sonra atıksu olarak karışımıza gelen boyar maddeler usulünce bertaraf edilmelidir. Boyar madde gideriminin çeşitli yolları mevcuttur. Literatür incelendiğinde fizikokimyasal süreçler, elektrokimyasal süreçler, membranlar vb. pek çok yöntem olduğu gözlemlenmiştir. En sık tercih edilen yöntemlerden biri olan ve benim de tezim için tercih etmiş olduğum yöntem elektrooksidasyon prosesidir. Elektrooksidasyon prosesinin uygulanabilirliği ile yüksek verim, yok denebilecek kadar az çamur üretimi, düşük işletme maliyeti gibi pek çok avantajı nedeniyle boyar madde gideriminde kullanılabilir bir elektrokimyasal yöntemdir (Biswas and Goel, 2022). Bu yöntemde, organik madde doğrudan elektron alışverişi yapılarak veya güçlü oksitleyici özelliklere sahip radikaller, özellikle hidroksil radikalleri ($\cdot\text{OH}$) üretilerek bozunur (Qiao and Xiong, 2021). Dezavantajları ise ilk yatırımın yüksek olması ve bazen elektrot kirlenmesinin meydana gelebilmesidir (Rajoria et al., 2021). Bu yüksek lisans tez çalışmasında elde edilen veriler doğrultusunda ortaya çıkan sonuç elektrooksidasyon prosesinin boyar madde gideriminde etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir. Modelleme yapılarak amaçlanan değerlere ulaşılmıştır. Box-Behnken metodu ile yapılan çalışmada anova analizlerinden yararlanılmaktadır. Cevap yüzey yönteminden faydalanılarak oluşan grafikler incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Bu tez çalışması ile yapılmak istenen modellemede şartlar değiştikçe renk giderim verimleri ve enerji tüketimlerinin nasıl etkilendiği araştırılmıştır. Cevap yüzey yöntemiyle akım yoğunluğu, pH, DEK ve C_0 parametreleri ile bu parametrelerin üç farklı seviyeleri ile 30 adet deney yapılmıştır. Deneyler, çevresel koşulların etkisinin minimuma indirgenebilmesi ve sistematik hatayı önleyebilmesi için karışık sıra ile yapılmıştır.

Tez çalışmasında kullanılan akrilik katyonik boyar maddeler halı boyama endüstrisinde kullanılmaktadır. Çalışılan üç boya doracryl yellow XGFLS, doracryl red XGRLS, doracryl blue XFGRL için çıkan veriler neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Tekstil endüstrisinde kullanılan boyar maddelerin oluşturduğu atıksuyun arıtılmasında elektrooksidasyon prosesinin uygulanmasının uygun olduğu tespit edilmiştir.
- Akım yoğunluğu arttırıldığında renk giderim verimi ve enerji tüketimi artmaktadır çünkü sistem elektrik enerjisi ile çalışmaktadır.
- Destek elektrolit konsantrasyonu prosese ilave edildiğinde iletkenliği arttırır. Bu sebeple elektrooksidasyon sisteminin daha verimli gerçekleşmesini sağlar ve boyar madde giderimi sürecinde enerji tüketiminin indirgemesinde yardımcı rol oynadığı belirlenmiştir.
- DEK ilave edilmediğinde iletkenliğin azalması sebebiyle akıma zıt yönlü bir direnç oluşmaktadır. Bu nedenle sistemin potansiyel farkının arttığı ve enerji tüketiminin yükseldiği anlaşılmıştır.
- Başlangıç boyar madde konsantrasyonu az olduğunda anot yüzeyine adsorbe olan ve dolaylı elektrooksidasyonun oluşmasına sebep olan boyar madde moleküllerinin az miktarda kalması durumunda renk giderim veriminin arttığı gözlemlenmiştir. Ortama eşit miktarda ilave edilen DEK iletkenlik değerini arttıracak ve başlangıç boyar madde konsantrasyonunun düşük olması, sistemde akımın daha rahat ilerlemesine potansiyel gerilimin azalmasına neden olup enerji tüketiminin daha az olacağı düşünülmektedir.
- Başlangıç boyar madde konsantrasyonu yüksek ise renk giderimi başladıktan belirli zaman sonra ayrışan boyar madde kompleksleri askıda kalarak katot ve anot yüzeyine asılır, çözelti yüzeyinde ise köpük meydana gelir, yüzey alanı azalan katot ve anotlar üzerindeki enerji aktarımı azalır ve güçleşir böylece renk giderim veriminin azalmasına direnci arttırarak enerji tüketiminin artmasına neden olmaktadır.
- Üst seviye renk giderim verimi ve alt seviye enerji tüketimi için gerekli en iyi koşullar değerlendirildiğinde pH'nın asidik düzeylere çekilmesi renk giderim veriminde artışa, enerji tüketiminde ise azalışa sebep olduğu gözlemlenmiştir.
- Yapılan incelemeler sonucunda laboratuvar ortamında pilot ölçekli olarak çalışılan deneylerden elde edilen veriler doğrultusunda endüstriyel tesislerde uygulanabilirliği saptanmıştır.

6. KAYNAKLAR (APA)

- Abd-El-Aziz, N. M., Hifnawy, M. S., El-Ashmawy, A. A., Lotfy, R. A. and Younis, I. Y. (2022). Application of Box-Behnken design for optimization of phenolics extraction from *Leontodon hispidulus* in relation to its antioxidant, anti-inflammatory and cytotoxic activities. *Scientific Reports*, 12(1), 8829.
- Aktaş, Y. (2020). *Ftalik asidin kromlu ve asidik ortamda kimyasal ve elektrokimyasal oksidasyonu*. (Kimya Anabilim Dalı Doktora Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin Üniversitesi, Mersin. (Tez No. 624373)
- Altay, M. (2020). *Kok Anotların Kullanıldığı Sabit Yatak Elektrokoksasyon Reaktörü İle Tekstil Atıksularının Arıtımı*. (Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli. (Tez No. 625361)
- Alver, Z. (2022). *Yeni dispers heterosiklik azo boyarmaddelerin sentezinde amino pirazollerin kullanımı*. (Kimya Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Pamukkale Üniversitesi Denizli. (Tez No. 799724)
- Asaithambi, P., Govindarajan, R., Yesuf, M. B., Selvakumar, P. and Alemayehu, E. (2021). Investigation of direct and alternating current–electrocoagulation process for the treatment of distillery industrial effluent: Studies on operating parameters. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(2), 104811.
- Asfaha, Y. G., Tekile, A. K. and Zewge, F. (2021). Hybrid process of electrocoagulation and electrooxidation system for wastewater treatment: a review. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100261.
- Asif, M. B. and Zhang, Z. (2021). Ceramic membrane technology for water and wastewater treatment: A critical review of performance, full-scale applications, membrane fouling and prospects. *Chemical Engineering Journal*, 418, 129481.
- Austin, E., Geisler, A. N., Nguyen, J., Kohli, I., Hamzavi, I., Lim, H. W. and Jagdeo, J. (2021). Visible light. Part I: Properties and cutaneous effects of visible light. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 84(5), 1219-1231.
- Aydin, S. (2020). *Erzurum biyolojik atıksu arıtma tesisi arıtma çamuru yönetiminin incelenmesi*. (Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum. (Tez No. 619131)
- Balcı, S. (2022). *Reactive yellow 145 boyar maddesinin elektrokimyasal oksidasyon yöntemi ile giderim performansının araştırılması*. (Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa. (Tez No. 731563)
- Bamos, G., Petala, A. and Frontistis, Z. (2021). Recent trends in pharmaceuticals removal from water using electrochemical oxidation processes. *Environments*, 8(8), 85.
- Barisci, S. and Suri, R. (2021). Electrooxidation of short-and long-chain perfluoroalkyl substances (PFASs) under different process conditions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105323.
- Bener, S., Bulca, Ö., Palas, B., Tekin, G., Atalay, S. and Ersöz, G. (2019). Electrocoagulation process for the treatment of real textile wastewater: Effect of operative conditions on the organic carbon removal and kinetic study. *Process Safety and Environmental Protection*, 129, 47-54.
- Biswas, B. and Goel, S. (2022). Electrocoagulation and electrooxidation technologies for pesticide removal from water or wastewater: A review. *Chemosphere*, 302, 134709.
- Camcıoğlu, Ş. (2016). *Kağıt endüstrisi atıksularının elektrokimyasal yöntemle arıtılması*. (Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı Doktora), Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara Üniversitesi, Ankara. (Tez No. 434760)

- Chang, H., Hu, R., Zou, Y., Quan, X., Zhong, N., Zhao, S. and Sun, Y. (2020). Highly efficient reverse osmosis concentrate remediation by microalgae for biolipid production assisted with electrooxidation. *Water research*, 174, 115642.
- Chen, R.-F., Wu, L., Zhong, H.-T., Liu, C.-X., Qiao, W. and Wei, C.-H. (2021). Evaluation of electrocoagulation process for high-strength swine wastewater pretreatment. *Separation and Purification Technology*, 272, 118900.
- Çakır, S. (2023). *Boyar madde içeren atıksuların arıtımında elektrooksidasyon uygulaması ve yüzey yanıt yöntemi ile optimizasyonu*. (Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir Üniversitesi Balıkesir. (Tez No. 827765)
- Çebi, A. (Şubat, 2022). *Biyodizel Atıksuyunun Asidifikasyon Prosesini Takip Eden Elektro-Aktif Persülfat Oksidasyonu İle Arıtımı: Box-Behnken Tasarımı Kullanılarak Proses Optimizasyonu*. (Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul. (Tez No. 707790)
- Çebi, Ş. E. (2018). *Gıda endüstrisi atık suyunun Al elektrot kullanarak elektrokoagülasyon prosesi ile arıtımının incelenmesi*. (Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli. (Tez No. 522367)
- Çelik, G. N. (2022). *Kağıt endüstrisi atıksularının çapraz akışlı ultrafiltrasyon membran sistemiyle arıtımı*. (Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir Üniversitesi Balıkesir. (Tez No. 758541)
- Çetin, B. (2006). *Bakır ve Nikel İyonlarının Hibrit İyon Değişimi - Elektrodializ Süreci ile Giderilmesi*. (Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir. (Tez No. 184121)
- Çolak, Z. (2017). *Adıyaman Kâhta Yüzüncü Yıl Göleti'ne deşarj edilen ilçe atıksuyunun elektroflotasyon yöntemiyle arıtılabilirliğinin araştırılması*. (Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Adıyaman Üniversitesi, Adıyaman. (Tez No. 457719)
- Das, P. P., Sharma, M. and Purkait, M. K. (2022). Recent progress on electrocoagulation process for wastewater treatment: A review. *Separation and Purification Technology*, 292, 121058.
- Değermenci, G. D. (2021). Removal of reactive azo dye using platinum-coated titanium electrodes with the electro-oxidation process. *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, 218, 436-443.
- Demiral, D. (2020). *Düzenli depolama alanı atıksularının elektrokimyasal yöntemler ile arıtılabilirliği*. (Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli. (Tez No. 664716)
- Derel, E. N. (2022). *Zeytin seperatör atıksuyunun elektrooksidasyon yöntemiyle arıtımının incelenmesi*. (Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir Üniversitesi Balıkesir. (Tez No. 710084)
- Durmuş, B. (2019). *Grafen bazlı elektrotlarla sudan organik kirleticilerin elektro oksidasyon ile arıtımı*. (Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli. (Tez No. 544502)
- Durna, E. and Genç, N. (2021). Lastik üretiminden kaynaklanan yüzey aktif madde içeren atık suların koagülasyon bazlı arıtma alternatiflerinin PROMETHEE yaklaşımı ile değerlendirilmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(1), 23-32.
- Efe, G. (2022). *Yük taşıyıcılı ekstraksiyon ile Cr+ 6 metal kationunun taşınma kinetiğinin incelenmesi*. (Kimya Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Pamukkale Üniversitesi Denizli. (Tez No. 759134)

- Ekinci, M. Ş. (2019). *Atıksu arıtma çamurlarının bertarafında solar kurutma sisteminin kullanımı*. (Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa. (Tez No. 594095)
- Elele, A. (2021). *Atık Aktif Çamurun Persülfat Oksidasyonu İle Kimyasal Dezentegrasyonu*. (Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa Uludağ University Bursa(Turkey). (Tez No. 699160)
- Elgün, C. (2022). *Kağıt endüstrisi atıksularının elektrooksidasyon yöntemiyle arıtılması*. (Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir Üniversitesi Balıkesir. (Tez No. 758342)
- Er, E. (2023). *Başta denim yıkama suları olmak üzere tekstil yıkama sonucu oluşan atıksuların sıfır atık/temiz üretim yaklaşımı ile geri kazanımı için taşınabilir bir proses tasarımı ve prototip geliştirilmesi*. (Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Doktora), Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa Uludağ University, Bursa (Turkey). (Tez No. 819366)
- Erden, G. (2018). Elektro-oksidadyon prosesi ile biyolojik çamur dezentegrasyonu. *Anadolu University Journal of Science and Technology C-Life Sciences and Biotechnology*, 7(2), 152-159.
- Erkmen, J. and Adigüzel, M. (2022). Acid red-20 sentetik endüstriyel boyar maddenin elektro-oksidadyon yöntemi ile sulu çözeltiden uzaklaştırılması. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(2), 363-371.
- Fil, B. A. (2022). Sentetik Atıksulardan Elektrooksidasyon Yöntemiyle Renk Gideriminin Araştırılmasında Başlangıç Boyar Madde Kirliliği ve Sıcaklığın Etkisi. *Türk Mühendislik Araştırma ve Eğitimi Dergisi*, 1(2), 80-85.
- Fil, B. A., Boncukcuoğlu, R., Yılmaz, A. E. and Bayar, S. (2012). Antep Fıstığı İşleme Atıksularının Elektrooksidasyon Yöntemiyle Ön Arıtım Çalışmaları. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 2(2), 29-36.
- Fil, B. A., Cihan, S. A., Günaşlan, S., Elgün, C. and Yılmaz, A. E. (2023). Treatment Method with Electrocoagulation in Wastewater that is Dominant with Zinc. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 42(3), 1030-1038.
- Filibeli, A., Azize, A. and Büyükkamaci, N. (2022). Arıtma Çamurlarının Yönetimi ve Maliyeti: Gediz Havzası Arıtma Çamuru Yönetimi Projesi. *Çevre İklim ve Sürdürülebilirlik*, 1(1), 79-90.
- Gazete, R. (2004). Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği. *TC Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Karar*, 8289.
- Gazigil, L., Er, E., Kestiöglu, O. E. and Yonar, T. (2022). Pilot-Scale Test Results of Electrodialysis Bipolar Membrane for Reverse-Osmosis Concentrate Recovery. *Membranes*, 12(1), 83.
- Ghanbari, F., Wu, J., Khatebasreh, M., Ding, D. and Lin, K.-Y. A. (2020). Efficient treatment for landfill leachate through sequential electrocoagulation, electrooxidation and PMS/UV/CuFe₂O₄ process. *Separation and Purification Technology*, 242, 116828.
- Gökmen, K. (2020). *Yüzey Aktif Madde İçeren Çamaşırhane Atık Sularının Elektrokoagülasyon Yöntemi ile Arıtımı Potansiyeli ve Geri Kazanımı*. (Kimya Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce. (Tez No. 625990)
- Gülümser, Ç. (2021). *İleri oksidadyon yöntemleriyle boyar madde içeren sulu çözeltilerin yeni fotokatalitik elektrotlar ile arıtılabilirliğinin incelenmesi*. (Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Doktora), Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli. (Tez No. 716681)

- Günaşlan, S. and Fil, B. A. (2023). *Ti/IrO₂/RuO₂ Anot Kullanılarak Organik İçerikli Gerçek Atıksulardan Renk Giderilmesinde pH ve Akım Yoğunluğunun Etkisi*. Paper presented at the International Conference on Scientific and Innovative Studies, Konya, Turkey.
- Güngördü, A. (2018). *Atıksulardan ileri arıtım yöntemleri ile antibiyotik giderimi*. (Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Doktora), Fen Bilimleri Enstitüsü, Anadolu Üniversitesi Eskişehir(Turkey). (Tez No. 510007)
- Gürbüz, G. (2015). *Deri endüstri atıksularının elektrokargülasyon ve elektrofenton yöntemleri ile arıtımında RSM kullanılarak proses optimizasyon*. (Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul. (Tez No. 442577)
- Gürel, C. (2015). *Tekstil atıksularından boyar maddelerin elektrokimyasal yükseltgeme ile giderimi*. (Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Anadolu Üniversitesi Eskişehir(Turkey). (Tez No. 198432)
- Hasan, M. M., Shenashen, M., Hasan, M. N., Znad, H., Salman, M. S. and Awual, M. R. (2021). Natural biodegradable polymeric bioadsorbents for efficient cationic dye encapsulation from wastewater. *Journal of Molecular Liquids*, 323, 114587.
- Hassaan, M. A., Elkatory, M. R., El-Nemr, M. A., Ragab, S., Mohamed, B. A. and El Nemr, A. (2023). Box-Behnken design and life cycle assessment for nickel oxide nanoparticles application in biomethane production. *Chemical Engineering Journal*, 474, 145924.
- Hipólito, V. and Coelho, J. M. (2023). *Blue light and eye damage: a review on the impact of digital device emissions*. Paper presented at the Photonics.
- Houser, K., Boyce, P., Zeitzer, J. and Herf, M. (2021). Human-centric lighting: Myth, magic or metaphor? *Lighting Research & Technology*, 53(2), 97-118.
- İlhan, F. (2018). Elektrodializ proseslerinden (KED/BMED) kaynaklanan konsantre akımın minimizasyonu ve yönetimi Management and minimization of concentrated stream from electro dialysis processes (CED/BMED). *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(3), 5.
- İlhan, F. (2020). *Geleceğin Dünyasında Membran Prosesler Ve Su/Atıksu Arıtımında Kullanımı*. Bursa: Ekin Yayınevi.
- Kahraman, Ö. and Şimşek, İ. (2020). Elektrokimyasal Arıtım Prosesi İle Kot Kumaşı Üretim Tesisi Atıksuyundan Koi Giderimi Ve Regresyon Yöntemi İle Optimizasyonu. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 23-36.
- Kama, B. (2019). *Tekstil atıksularının Ti/Ru-Ir elektrot kullanılarak elektrooksidasyon ile arıtımı*. (Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya (Turkey). (Tez No. 549001)
- Karaçıray, E. (2019). *Tekstil atık sularında farklı özellikteki boyar maddelerin membran biyoreaktör (MBR) sitesinde arıtımı*. (Biyoteknoloji Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik. (Tez No. 543874)
- Karaman, K. (2022). *Koagülasyon-flokülasyon yöntemi ile Kızılırmak nehri'ndeki fizikokimyasal kirleticilerin gideriminin araştırılması*. (Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Nevşehir. (Tez No. 748079)
- Kassem, A. A., Salama, A. and Mohsen, A. M. (2022). Formulation and optimization of cationic nanoemulsions for enhanced ocular delivery of dorzolamide hydrochloride using Box-Behnken design: In vitro and in vivo assessments. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 68, 103047.

- Kaya, S. (2021). *Karadeniz'in tuzsuzlaştırılmasında elektrodializ yönteminin denenmesi ve performansının değerlendirilmesi*. (Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Doktora), Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Samsun. (Tez No. 705051)
- Keyikoğlu, R. (2018). *Boyar maddelerin molekül ağırlığının elektrooksidasyon ve elektrokoagülasyon proseslerinde renk giderme verimine etkisi*. (Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa (Tez No. 486746)
- Köker, B. C., Meltem Yılmaz, Zinnur Selçuk, Sefa Furkan Mikroplastiklerin Atıksu Arıtma Tesislerindeki Etkileri ve Arıtma Yöntemleri. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 5(2), 84-91.
- Kösem, E. (2023). *Membran Biyoreaktör Çikişi Sızıntı Sularının Alternatif Anot-Katotkombinasyonlu Elektrokoagülasyon Prosesi İle Arıtımında Proses Optimizasyonu* (Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi İstanbul. (Tez No. 813289)
- Kurt, A., Shakir, F. and Yonar, T. (2023). The effect of various parameters on electrochemical removal of ampicillin with Sn/Sb/Ni-Ti anodes. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38(2).
- Kuyumcu, E. (2020). Renk kavramının Türkçedeki ifade özellikleri. *Akademik Tarih ve Düşünce Dergisi*, 7(1), 513-538.
- Lam, M. N.-T., Le, D.-H. and Nguyen, D.-L. (2023). Reuse of clay brick and ceramic waste in concrete: A study on compressive strength and durability using the Taguchi and Box–Behnken design method. *Construction and Building Materials*, 373, 130801.
- Li, H., van den Driesche, S., Bunge, F., Yang, B. and Vellekoop, M. J. (2019). Optimization of on-chip bacterial culture conditions using the Box-Behnken design response surface methodology for faster drug susceptibility screening. *Talanta*, 194, 627-633.
- Mamián, M., Torres, W. and Larmat, F. (2009). Electrochemical degradation of atrazine in aqueous solution at a platinum electrode. *Port Electrochim Acta*, 27(3), 371-379.
- Matias, J. A. L., Silva, I. B., da Silva, A. O., Oliveira, J. B., da Silva, D. R. and Morales, M. A. (2022). (Bi13Co11) Co2O4–Co3O4 nanocomposites: Approach to different fuels in sol-gel combustion synthesis using the Box-Behnken design. *Ceramics International*, 48(1), 481-494.
- Mora-Gómez, J., García-Gabaldón, M., Carrillo-Abad, J., Montañés, M.-T., Mestre, S. and Pérez-Herranz, V. (2020). Influence of the reactor configuration and the supporting electrolyte concentration on the electrochemical oxidation of Atenolol using BDD and SnO2 ceramic electrodes. *Separation and Purification Technology*, 241, 116684.
- Muthukumar, M., Mohan, D. and Rajendran, M. (2003). Optimization of mix proportions of mineral aggregates using Box Behnken design of experiments. *Cement and Concrete Composites*, 25(7), 751-758.
- Müslün, T. and Ayhan, Ü. (2015). Zeytinyağı üretim atıksularının özellikleri, çevresel etkileri ve arıtım Teknolojileri. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(2), 44-74.
- Namal, O. Ö. (2017). Tekstil endüstrisi atıksularının arıtımında kullanılan proseslerin araştırılması. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6, 388-396.
- Nunes, S. P., Culfaz-Emecen, P. Z., Ramon, G. Z., Visser, T., Koops, G. H., Jin, W. and Ulbricht, M. (2020). Thinking the future of membranes: Perspectives for advanced and new membrane materials and manufacturing processes. *Journal of Membrane Science*, 598, 117761.
- Oduncu, E. (2017). *Elektrokoagülasyon ve elektrooksidasyon yöntemi ile katı atık düzenli depolama sahası sızıntı suyunun arıtımı*. (Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı

- Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Anadolu Üniversitesi Eskişehir(Turkey). (Tez No. 458962)
- Oza, H., Singh, T. A. and Jampa, S. S. (2021). Removal of arsenic from aqueous solution using combined ultrasonic and electrocoagulation process. *Materials Today: Proceedings*, 47, 728-732.
- Özer, A. (2020). *Sarı Aliç Tohumlarından Manyetik Aktif Karbon Üretimi Ve Katyonik Boya Adsorpsiyonu Performansının İncelenmesi*. (Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans), Kimya Anabilim Dalı, Bingöl Üniversitesi, Bingöl. (Tez No. 629035)
- Öztürk, A. (2022). *Kirlenmiş topraklardan tekstil boyarmaddesinin elektrooksidasyon ile giderimi*. (Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans), Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bursa Teknik Üniversitesi Bursa (Tez No. 734927)
- Öztürk, H. (2019). *Elektrooksidasyon– elektrokoagülasyon hibrit prosesiyle fenol giderimi: Reaksiyon kinetiği ve metabolitlerin belirlenmesi*. (Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi,, Kocaeli. (Tez No. 544956)
- Özyonar, F. and Korkmaz, M. U. (2022). Sequential use of the electrocoagulation-electrooxidation processes for domestic wastewater treatment. *Chemosphere*, 290, 133172.
- Paçacı, T. (2017). *Aktive edilmiş doğal adsorbanlar ile sulu çözeltilerden boyar maddelerin giderilmesi*. (Kimya Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Bozok Üniversitesi, Yozgat (Tez No. 483440)
- Palas, B., Ersöz, G. and Atalay, S. (2017). Çevre dostu atıksu arıtımı yöntemleri ile mikrokirletici giderimi kinetiğinin incelenmesi: LaFeO₃ perovskit tipi katalizör varlığında metilen mavisinin Fenton benzeri oksidasyonu. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(4), 1181-1192.
- Polat, N. (2020). *Ağaç işleme atık sularının elektrokimyasal oksidasyon ile arıtılması*. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. (Tez No. 667531)
- Popovic, I. (2020). *Electrocoagulation in the separation process of used bentonite suspensions*. (Institute Of Constructive Engineering Chair Of Tunneling, Line Construction And Construction Operations Doktora Tezi), Faculty of Civil and Environmental Engineering, Ruhr University Bochum, Germany. (Tez No. 978-3-8440-7521-2)
- Qiao, J. and Xiong, Y. (2021). Electrochemical oxidation technology: A review of its application in high-efficiency treatment of wastewater containing persistent organic pollutants. *Journal of Water Process Engineering*, 44, 102308.
- Rajoria, S., Vashishtha, M. and Sangal, V. K. (2021). Review on the treatment of electroplating industry wastewater by electrochemical methods. *Materials Today: Proceedings*, 47, 1472-1479.
- Salari, D., Niaei, A., Khataee, A. and Zarei, M. (2009). Electrochemical treatment of dye solution containing CI Basic Yellow 2 by the peroxi-coagulation method and modeling of experimental results by artificial neural networks. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 629(1-2), 117-125.
- Sancar, O. and Bostancı, S. H. (2020). COVID-19 pandemi sürecinde karbon emisyonu üzerine bir tartışma. *Iğdır Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 269-292.
- Santos, M. C., Antonin, V. S., Souza, F. M., Aveiro, L. R., Pinheiro, V. S., Gentil, T. C., Lima, T. S., Moura, J. P., Silva, C. R. and Lucchetti, L. E. (2022). Decontamination of wastewater containing contaminants of emerging concern by electrooxidation and Fenton-based processes–A review on the relevance of materials and methods. *Chemosphere*, 135763.

- Sapayeva, R. (2023). *Sebze ve meyve kurutma işletmesinde kurutma parametrelerinin belirlenmesi: Bir işletme uygulaması*. (İşletme Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans), Sosyal Bilimler Enstitüsü, Balıkesir Üniversitesi Balıkesir. (Tez No. 817860)
- Savcı, S. (2019). *Boyar Madde Arıtım Alternatiflerine Genel Bir Bakış* (S. Savcı Ed.). Ankara: Iksad Publications.
- Sezgin, A. C. and Elmacı, İ. (2019). Moleküler gastronomi uygulamalarında lesitin. *Uluslararası Turizm, Ekonomi ve İşletme Bilimleri Dergisi*, 3(2), 57-65.
- Sims, P., Lai, Y.-Y. and Jory, T. (2021). A Review of Various Models for Classifying Light Source Color Rendition and Guide to Using Leds to Achieve Fidelity Color Rendering for Retail and Other Indoor Environments.
- Sivri, S. (2020). *Elektrooksidasyon Yöntemi İle Nonilfenoletoksilat-10 (NP10E) Arıtımı Ve Yüzey Yanıt Metodu İle Optimizasyonu*. (Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa Uludağ Üniversitesi Bursa. (Tez No. 621548)
- Solak, M. (2019). Hibrit Elektrokoagülasyon/Elektrooksidasyon Prosesleri ile Denim Ürün Üretim Atıksularının Arıtımı. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23(3), 780-786.
- Song, H., Chung, H. and Nam, K. (2021). Response surface modeling with Box-Behnken design for strontium removal from soil by calcium-based solution. *Environmental Pollution*, 274, 116577.
- Sönmez, N. A. (2014). *Sulardan adsorbsiyon yöntemi ile bor giderimi*. (Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Pamukkale Üniversitesi, Denizli. (Tez No. 410002)
- Sözüdoğru, O. (2022). Ti/IrO₂/RuO₂ Anot ve Paslanmaz Çelik Katot Kullanılarak Elektrooksidasyon Prosesi ile Metilen Mavisi Boyası Giderimi: İşletme Parametrelerinin Rolü. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 12(4), 2054-2063.
- Süzen, Y. (2015). *Tekstil endüstrisi boyar maddelerinin fenton oksidasyonu ile sulu ortamlardan giderimi ve yanıt yüzey yöntemiyle (YYY) optimizasyonu*. (Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir Üniversitesi Balıkesir. (Tez No. 421375)
- Şengöz, M. (2022). Maslow'un ihtiyaçlar hiyerarşisi modeli'nin bütünleşik bir süreç olarak yeniden yorumlanması. *Eğitim ve Toplum Araştırmaları Dergisi*, 9(1), 164-173.
- Taçı, S. (2022). *Endüstriyel atıksulardan üçlü boya karışımının elektrokoagülasyon yöntemi ile giderilmesi*. (Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi Sakarya. (Tez No. 708813)
- Tosun, D. (2022). *Sentetik atıksuda elektrooksidasyon yöntemi ile boyar madde giderimi*. (Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir. (Tez No. 757507)
- Uykan, B. (Şubat, 2022). *Kimyasal Koagülasyon İle Ön Arıtma Uygulanmış Sızıntı Suyunun Mikrodalga Yöntemi İle Aktive Edile Persülfat Oksidasyonu* (Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi İstanbul. (Tez No. 707796)
- Üçüncü, O. (2019). Atıksu Arıtımı, Atıksu Deşarjı, Su Kirliliği ve Halk Sağlığı: Trabzon İli Örneği. *Türk Hidrolik Dergisi*, 3(2), 14-29.
- Ümmetoğlu, D. (2021). *Sentetik iyon değiştirici reçineler kullanılarak sulu çözeltilerden bazı boyar maddeler ve Cr (VI) giderimi*. (Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans), Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya Teknik Üniversitesi, Konya. (Tez No. 704814)

- Wang, L., Jiang, H., Wang, H., Show, P. L., Ivanets, A., Luo, D. and Wang, C. (2022). MXenes as heterogeneous Fenton-like catalysts for removal of organic pollutants: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 108954.
- Yeşiltaş, H. K. and Ersü, Ç. B. (2021). Narenciye Atıksularının Arıtılabilirliğinde Koagülasyon-Flokülasyon Metodunun Uygulanabilirliği. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(3), 126-137.
- Yılmaz, A. E., Komesli, O., Komesli, Ş. and Çalik, S. (2022). Çevresel Büyük Risk Maden Atıksularının Kimyasal Çöktürme Yöntemi ile Arıtım Örneği. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 12(2), 654-662.
- Yılmaz, D. (2018). *Tekstil boyar maddelerinin elektrokimyasal ve spektroskopik karakterizasyonu*. (Kimya Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa Uludağ Üniversitesi Bursa(Turkey). (Tez No. 496283)
- Yücel, A. N. (2021). *Endüstriyel atıksularda bulunan çoklu boyar maddelerin elektrokoagülasyonla giderilmesi*. (Kimya Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya. (Tez No. 687669)
- Yüksekdağ, M., Gökınar, S. and Yelmen, B. (2020). Atıksu Arıtma Tesislerinde Arıtma Çamurları ve Bertaraf Uygulamaları. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*(18), 895-904.
- Zhuo, Q., Wang, J., Niu, J., Yang, B. and Yang, Y. (2020). Electrochemical oxidation of perfluorooctane sulfonate (PFOS) substitute by modified boron doped diamond (BDD) anodes. *Chemical Engineering Journal*, 379, 122280.