

Farklı Elektrot Türlerinin Kullanıldığı Elektrokimyasal Prosesler ile Organik Atıksulardan Renk Giderim Veriminin Belirlenmesi ve İşletme Parametrelerinin Optimizasyonu

Oğuz Şahiner^{1*}, Murat Solak

Özet: Avrupa Birliği üyesi ülkeler endüstriyel atıksularda renk parametresinin analizinde EN ISO 7887'de belirlenen standartlar çerçevesinde renklilik sayısı (RES) yöntemini kullanmaktadır. Çalışmada, maya üreten işletmenin deşarj atıksuyunun RES birimi olarak titanyum ve paslanmaz çelik elektrotlar kullanılarak elektrokimyasal prosesle renk giderim verimi araştırılmıştır. Akım yoğunluğu, pH ve elektroliz süresi gibi işletme parametrelerinin RES436, RES525 ve RES620 renk parametrelerinin giderimi üzerindeki etkileri Yanıt Yüzey Metodu (YYM) ile optimize edilmiştir.

Keywords: Maya endüstrisi deşarj atıksuyu, elektrokimyasal arıtma, titanyum elektrot, paslanmaz çelik elektrot, optimizasyon, yanıt yüzey metodolojisi.

Determination of Color Removal Efficiency from Organic Wastewaters with an Electrochemical Processes Using Different Electrode Types and Optimization of Operational Parameters

Abstract: European Union member countries use the spectral absorption coefficient (SAC) method within the framework of the standards set in EN ISO 7887 in the analysis of the color parameter in industrial wastewaters. In the study, the color removal efficiency of the discharge wastewater of the yeast production industry was investigated as SAC unit by electrochemical process using titanium and stainless steel electrodes. The effects of operating parameters such as pH, current density and electrolysis time on the removal of SAC436, SAC525 and SAC620 color parameters were optimized by the Response Surface Method (RSM).

Keywords: Yeast industry discharge wastewater, electrochemical treatment, titanium electrode, stainless steel electrode, optimization, response surface methodology.

¹**Address:** Düzce Üniversitesi, Türkiye.

***Corresponding author:** oguzsahiner@duzce.edu.tr

Citation: Şahiner, O., Solak, M. (2021). Farklı Elektrot Türlerinin Kullanıldığı Elektrokimyasal Prosesler ile Organik Atıksulardan Renk Giderim Veriminin Belirlenmesi ve İşletme Parametrelerinin Optimizasyonu. Bilge International Journal of Science and Technology Research, 5(special issue): 20-30.

1. GİRİŞ

Gıda endüstrisi, artan temel ihtiyaçların karşılanması için stratejik öneme sahip, üretimin her aşamasında yüksek miktarlarda su ihtiyacı olan ve buna bağlı olarak da atıksu üretimi oldukça yüksek olan endüstriyel üretim alanlarından biridir. Gıda endüstrisi alanında faaliyet gösteren maya üretim tesisleri dünyada ve ülkemizde önemli bir yere

sahiptir (Balçoğlu, 2013). Ekmek mayası üretiminde, şeker fabrikalarının yan ürünü olan melas, endüstriyel sürdürülebilirlik yaklaşımlarından biri olan endüstriyel simbiyoz örneği olarak maya endüstrisinin hammaddesi olarak kullanılmaktadır.

Maya endüstrisi atıksuları, kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ), toplam organik karbon

(TOK), azot, fosfor, renk gibi yüksek konsantrasyonlarda kirletici içeriğe sahiptir (Balçoğlu, 2013). Maya üretimi süreçlerinde ortaya çıkan atıksulardaki yoğun renk (koyu kahverengi) içeriği, biyopolimer kompleksi olan, biyokimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan melanoidden kaynaklanmaktadır. Bu içeriklerin parçalanması oldukça zordur (Alkan, 2010). Bu tür atıksuların arıtımında biyolojik, kimyasal arıtma teknikleri kullanılmaktadır. Biyolojik prosesler, atıksudaki organik maddeleri parçalayan mikroorganizma yumaklarının çöktürme havuzunda çöktürerek giderimi üzerine tasarlanmıştır. Konvansiyonel biyolojik prosesler; Aktif çamur prosesleri, damlatmalı filtreler ve döner biyolojik disklerdir (Aydın, 2020). Ayrıca kimyasal koagülasyon, kimyasal çöktürme, elektrokoagülasyon ve fenton prosesi gibi prosesler de organik içerikli kirleticilerden renk gideriminde kullanılan proseslerdir (Haksevenler vd. 2014). Elektrokimyasal prosesler, kimyasal proseslere ve çeşitli kirleticilerin gideriminde kullanılan proseslere alternatif olabilecek ve son dönemlerde önemi artmış olan bir arıtma tekniğidir (Cansu, 2018). Elektrokimyasal arıtım prosesleri içerdikleri mekanizma anlamında koagülasyon, adsorbsiyon, absorpsiyon, çöktürme flotasyon, oksidasyon gibi proseslerin bir ya da bir kaçını kapsayabilmektedir (Ihara vd, 2004; İlhan vd. 2007). Elektrooksidasyon (EO) prosesi çözünmeyen bir anot malzeme kullanılarak organik maddelerin oksitlenmesini sağlamaktadır (Fil, 2004; Kul, 2005). EO prosesinde yaygın şekilde kullanılan elektrotlar grafit (Kannan vd. 1995), titanyum (Xion vd. 2003), paslanmaz çelik (Bejankiwar vd. 2005), bor kaplı elmas (Martínez-Huitl vd. 2008) gibi çözünmeyen elektrotlardır. EO prosesi temel olarak doğrudan veya dolaylı oksidasyon olmak üzere 2 farklı proses olarak gerçekleştirilir. Doğrudan oksidasyon (Anodik oksidasyon) prosesinde; kirleticiler anot yüzeyinde adsorbe edilir ve daha sonra anodik elektron transfer reaksiyonu ile ayrıştırılır. Dolaylı oksidasyon prosesinde reaksiyon hipoklorit / klor, ozon ve hidrojen peroksit gibi güçlü oksidantlar ile gerçekleşir (Alfredo vd. 2014).

Bu çalışmada paslanmaz çelik ve titanyum elektrotlar kullanılmıştır. Bu elektrotların kullanıldığı EO prosesi ile maya üretimi süreçlerinde ortaya çıkan, işletmenin arıtma tesislerinde arıtılarak deşarj standartlarına getirdiği ve alıcı ortama deşarj edilen atıksu alınarak, renk parametresi açısından tekrar kazanılabilirliğinin belirlenmesi için RES parametresi olarak renk giderim verimleri incelenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Atıksu Karakterizasyonu

DeneySEL çalışmalarda kullanılan atıksu maya üretim fabrikasının arıtma tesisi çıkışından alınmıştır (deşarj suyu). Ham atıksu karakterizasyonu Çizelge 1'de görülmektedir.

Çizelge 1. Ham atıksu karakterizasyonu

Parametre	Değer/ Konsantrasyon	Parametre	Değer/ Konsantrasyon
pH	7,66±0,2	Renk (m ⁻¹)	
İletkenlik (mS/cm)	6,43	RES436 (m ⁻¹)	6,81
TDS (mg/L)	3,97	RES525 (m ⁻¹)	5,21
KOİ (mg/L)	300±10	RES620 (m ⁻¹)	4,14

2.2. Optimizasyon Çalışmaları

Çalışmada model reaktör ile maya üretimi yapan ve SKKY kapsamındaki Yönetmelik değerlerini sağlayan bir işletmenin deşarj noktasından atıksu numunesi alınmıştır. Alınan atıksu numunesinden renk giderimi üzerine elektroliz süresi, pH ve akım yoğunluğu gibi işletme parametrelerinin etkisi araştırılmıştır. Araştırmalarda parametre aralıkları literatür taraması ve ön deneysel çalışmalar ile belirlenmiştir. Parametrelerin etkin giderim aralıklarını belirlemek amacıyla, pH 4,5-10,5, akım yoğunluğu 90-150 A/m² ve elektroliz süresi 30-60 dk. aralığında olacak şekilde istatistiksel analize göre hazırlanan deney serisi uygulanmıştır (Çizelge 2). Optimizasyon çalışmalarında Yanıt Yüzey Metodu kullanılmıştır. 3D grafikler ve ANOVA analizi Design Expert programı ile hazırlanmıştır.

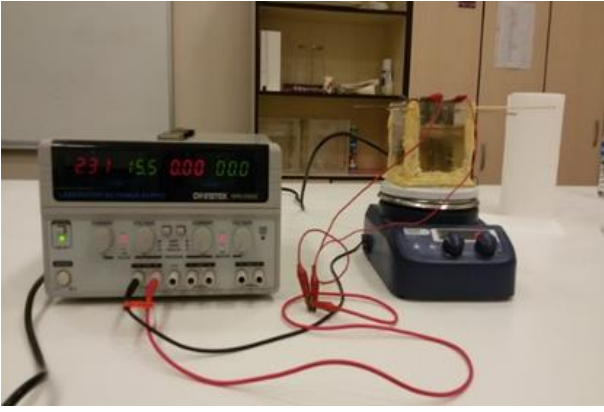
Çizelge 2. Farklı elektrot türleri için aralıklar

Faktörler	Titanyum	Paslanmaz Çelik
pH	4,5-9,5	4,5-9,5
Akım Yoğunluğu (A/m ²)	80-140	60-120
Elektroliz Süresi (dk.)	30-60	15-75

2.3. Deney Düzenegi

Renk gideriminin elektrokimyasal proses ile yapıldığı deneysel çalışmalarda, voltaj ve akım kontrolü DC güç kaynağı ile sağlanmıştır. Deneylerde kullanılan model reaktörün hacmi 500 ml'dir. Elektrotların boyutları 50*80*0.5 mm olup, su içerisinde elektroliz işleminin gerçekleştiği bölümün boyutları 50*55 mm'dir (165 cm² aktif yüzey alanına sahip elektrotlar için 90, 120 ve 150 A/m² akım yoğunlukları için hesaplanan ve sisteme verilen akım sırasıyla, 1,5A, 2A ve 2,5 A'dir).

Elektrokimyasal proses ile maya endüstrisi deşarj atıksularından renk giderimi çalışmasında kullanılan prosesin şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. EO prosesinin şematik gösterimi

2.4. Metot

2.4.1. Renk tayini

Maya endüstrisi arıtma sonrası deşarj sularından renk giderim veriminin belirlenmesi amacıyla RES metodu kullanılmıştır. Bu metot ile ölçümde 3 farklı renk analizi gerçekleştirilmektedir (Remazol Yellow RR gran için 436 nm, Remazol Red RR gran için 525 nm, Remazol Blue RR gran için 620 nm dalga boylarında ölçüm yapılır). Sonuçlar m^{-1} birimi olarak RES-436, RES-525 ve RES-620 şeklinde belirlenmektedir ((EN ISO 7887) (EPA 2009)).

Hach Lange DR6000 model spektrofotometrede 436, 525, 620 nm dalga boylarında numunenin absorbans değerleri okunmuş, bu absorbans değerleri Denklem 1'de yerine konularak, RES 436, RES 525, RES 636 değerleri hesaplanmıştır.

$$RES = \frac{A}{d} \cdot f \quad (1)$$

A: λ dalga boyunda çözeltinin absorbansı (cm^{-1})
d : Küvet kalınlığı (mm)
f: Spektral absorbans değeri m^{-1} birimi için faktör, $f=1000$
RES(λ): λ dalga boyundaki renklilik sayısı (RES) değeri (m^{-1})

2.4.2. KOİ, pH, iletkenlik tayini

KOİ analizi SM 5220-D metoduna göre Hach DR6000 model spektrofotometre kullanılarak, pH ve iletkenlik ölçümleri elektrometrik metoda (Standard Metod 4500-H⁺) göre Hanna model cihaz ile belirlenmiştir (APHA, 2005).

3. BULGULAR

Titanyum Elektrot bağlı Elektrokimyasal Proses için optimizasyon çalışmalarında elde edilen RES436, RES525 ve RES620 renk parametreleri için ANOVA analizi sonuçları Çizelge 3'te verilmiştir.

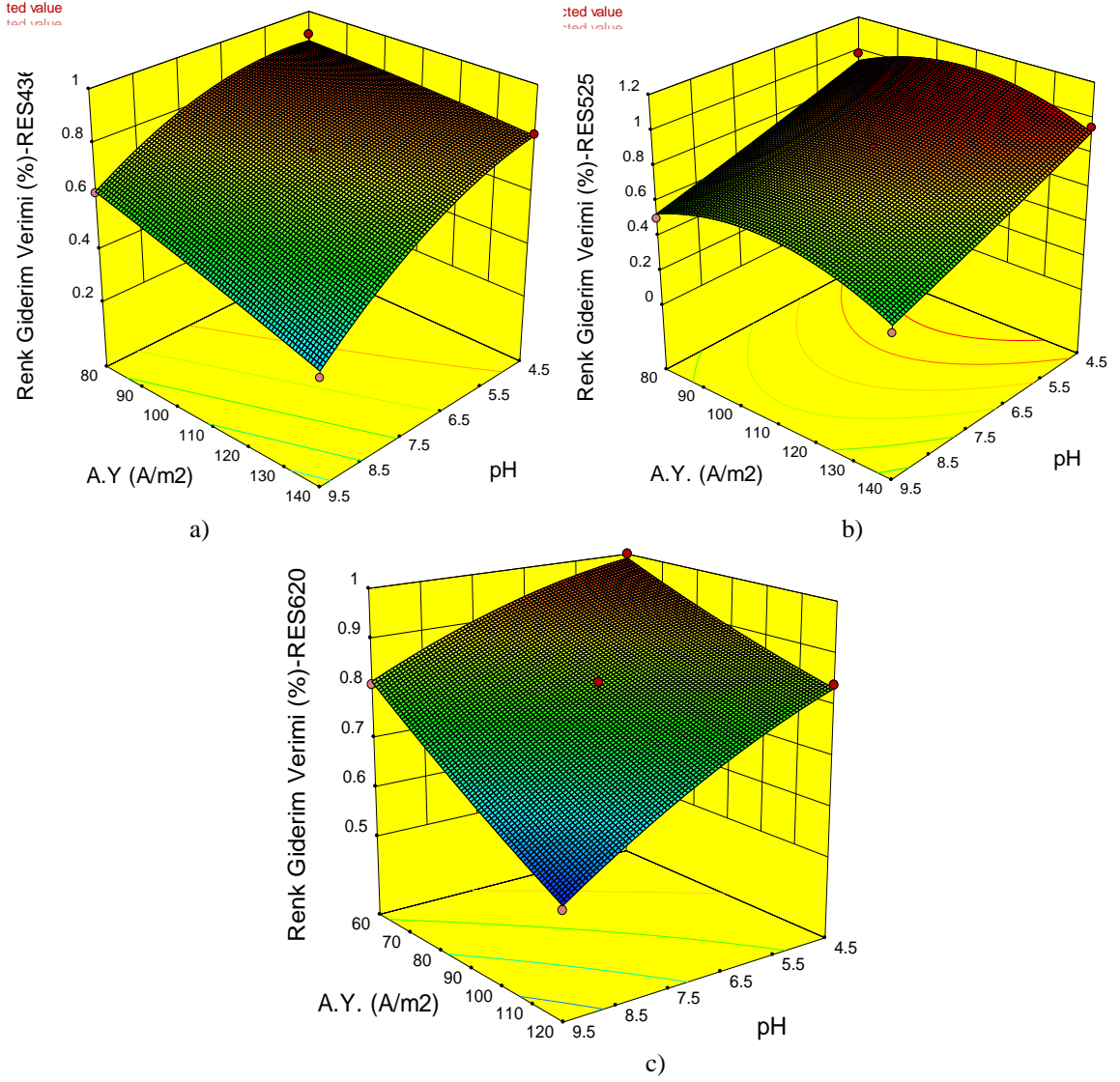
ANOVA analizinde, p değerlerine bakıldığında, RES436 renk değeri için pH ve akım yoğunluğu parametrelerinin elektroliz süresine göre daha etkin olduğu söylenebilir ($p<0,05$). RES525 renk değeri için sadece pH değerinin etkin olduğu, RES620 renk değeri için de pH ve akım yoğunluğu parametrelerinin prosesi etkileyen parametreler olduğu belirlenmiştir. 3D grafiklerde de bu tespitler görülmektedir.

Quadratik modele uyumlu olduğu belirlenen istatistiksel analiz sonucunda R^2 değerleri RES436 için 0.99, RES525 için 0.99 ve RES620 için 0.98'dir.

Şekil 2'de RES436, RES525 ve RES620 renk giderim verimleri için pH ve akım yoğunluğu parametrelerinin etkisi görülmektedir. Buna göre, pH değerinin tüm renk parametreleri gideriminde etkin olduğu görülmüştür. Akım yoğunluğunun artması bir noktaya kadar RES525 renk giderim verim artışı ile paralel hareket etmiş yaklaşık 100 A/m² akımdan sonra giderim verimi duraklamıştır. RES436 ve RES620 renk gideriminde akım yoğunluğunun artması ANOVA analizinde de görüldüğü üzere giderim verimini olumsuz yönde etkilemiştir. Titanyum elektrot ile tekstil endüstrisi atıksuyunun elektrokimyasal yöntem ile arıtılmasının incelenmiş olduğu bir çalışmada, 18 dakikalık elektroliz süresinden sonra KOİ, BOİ ve renk parametreleri için giderim verimi %80'in üzerinde olduğu belirlenmiştir (Kocaer vd. 2002; Vlyssides vd. 2000).

Çizelge 3. Titanyum için ANOVA analizi sonuçları

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value
RES 436					
Model	0.59	9	0.066	49.66	0.0002
A-pH	0.25	1	0.25	189.51	<
B-A.Y	0.054	1	0.054	40.94	0.0014
C-E.S.	2.000E-004	1	2.000E-004	0.15	0.7141
AB	9.025E-003	1	9.025E-003	6.79	0.0480
AC	2.500E-005	1	2.500E-005	0.019	0.8963
BC	0.021	1	0.021	15.81	0.0106
A ²	0.024	1	0.024	18.33	0.0079
B ²	1.442E-004	1	1.442E-004	0.11	0.7553
C ²	0.24	1	0.24	182.29	<
Residual	6.650E-003	5	1.330E-003		
Lack of Fit	6.650E-003	3	2.217E-003		
Pure Error	0.000	2	0.000		
Cor Total	0.60	14			
R ²	0.99				
Adj R ²	0.97				
RES 525					
Model	1.11	9	0.12	53.39	0.0002
A-pH	0.37	1	0.37	159.86	<
B-A.Y	4.050E-003	1	4.050E-003	1.75	0.2431
C-E.S.	0.011	1	0.011	4.86	0.0786
AB	9.000E-004	1	9.000E-004	0.39	0.5601
AC	3.600E-003	1	3.600E-003	1.56	0.2675
BC	0.096	1	0.096	41.54	0.0013
A ²	1.641E-004	1	1.641E-004	0.071	0.8006
B ²	0.093	1	0.093	40.01	0.0015
C ²	0.56	1	0.56	240.70	<
Residual	0.012	5	2.313E-003		
Lack of Fit	0.011	3	3.833E-003	115.00	0.0086
Pure Error	6.667E-005	2	3.333E-005		
Cor Total	1.12	14			
R ²	0.99				
Adj R ²	0.97				
RES 620					
Model	0.66	9	0.073	33.10	0.0006
A-pH	0.44	1	0.44	197.34	<
B-A.Y	0.017	1	0.017	7.73	0.0389
C-E.S.	2.000E-004	1	2.000E-004	0.090	0.7759
AB	0.026	1	0.026	11.56	0.0193
AC	2.500E-005	1	2.500E-005	0.011	0.9195
BC	6.250E-004	1	6.250E-004	0.28	0.6180
A ²	0.17	1	0.17	78.86	0.0003
B ²	1.131E-003	1	1.131E-003	0.51	0.5069
C ²	3.692E-004	1	3.692E-004	0.17	0.7000
Residual	0.011	5	2.215E-003		
Lack of Fit	0.011	3	3.692E-003		
Pure Error	0.000	2	0.000		
Cor Total	0.67	14			
R ²	0.98				
Adj R ²	0.95				



Şekil 2. Titanyum elektrotlar kullanılarak yapılan EO prosesinde akım yoğunluğu ve pH parametrelerinin renk giderim verimine etkisi a) RES 436 b) RES 525 c) RES 620 (Elektroliz Süresi: 45 dk.)

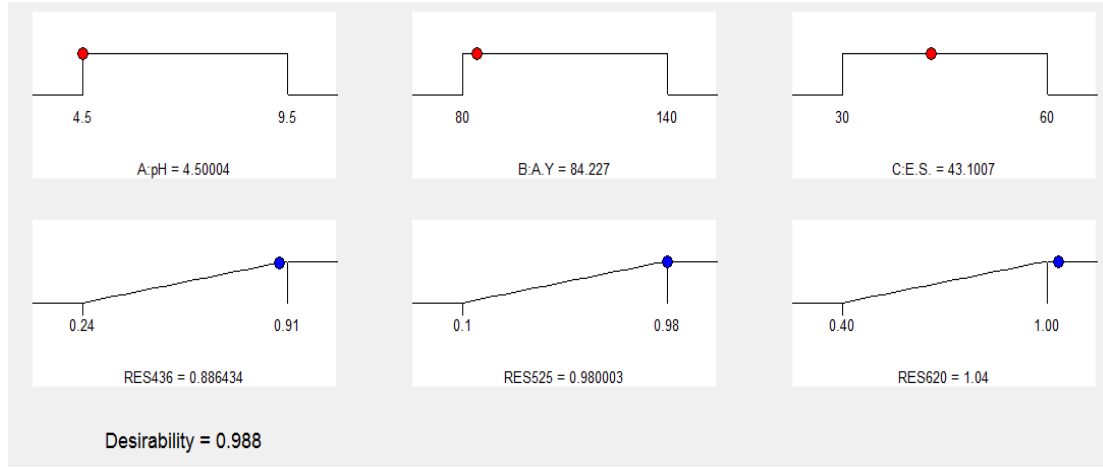
Yapılan çalışma sonucunda elde edilen denklemler Çizelge 4’te verilmiştir.

Çizelge 4. Farklı renk değerleri için belirlenen eşitlikler

RES436		RES525		RES620	
+0.76		+0.87		+0.98	
-0.18	* A	-0.21	* A	-0.23	* A
-0.083	* B	-0.023	* B	+0.046	* B
-5.000E-003	* C	+0.037	* C	+5.000E-003	* C
-0.047	* AB	-0.015	* AB	+0.080	* AB
+2.500E-003	* AC	-0.030	* AC	-2.500E-003	* AC
+0.072	* BC	+0.16	* BC	-0.013	* BC
-0.081	* A ²	+6.667E-003	* A ²	-0.22	* A ²
-6.250E-003	* B ²	-0.16	* B ²	+0.018	* B ²
-0.26	* C ²	-0.39	* C ²	-0.010	* C ²

Şekil 3'te maksimum RES436, RES525 ve RES620 renk giderim verimi için optimum pH değeri 4.57, akım yoğunluğu 139.84 A/m², elektroliz süresi 58 dk. olarak

tespit edilmiştir. Optimum koşullarda RES436 giderim verimi yaklaşık % 97 olarak, RES525 ve RES620 renk giderim verimleri ise % 99'un üzerinde olduğu tespit edilmiştir.

**Şekil 3.** Renk giderim verimlerini maksimize eden optimum değerler

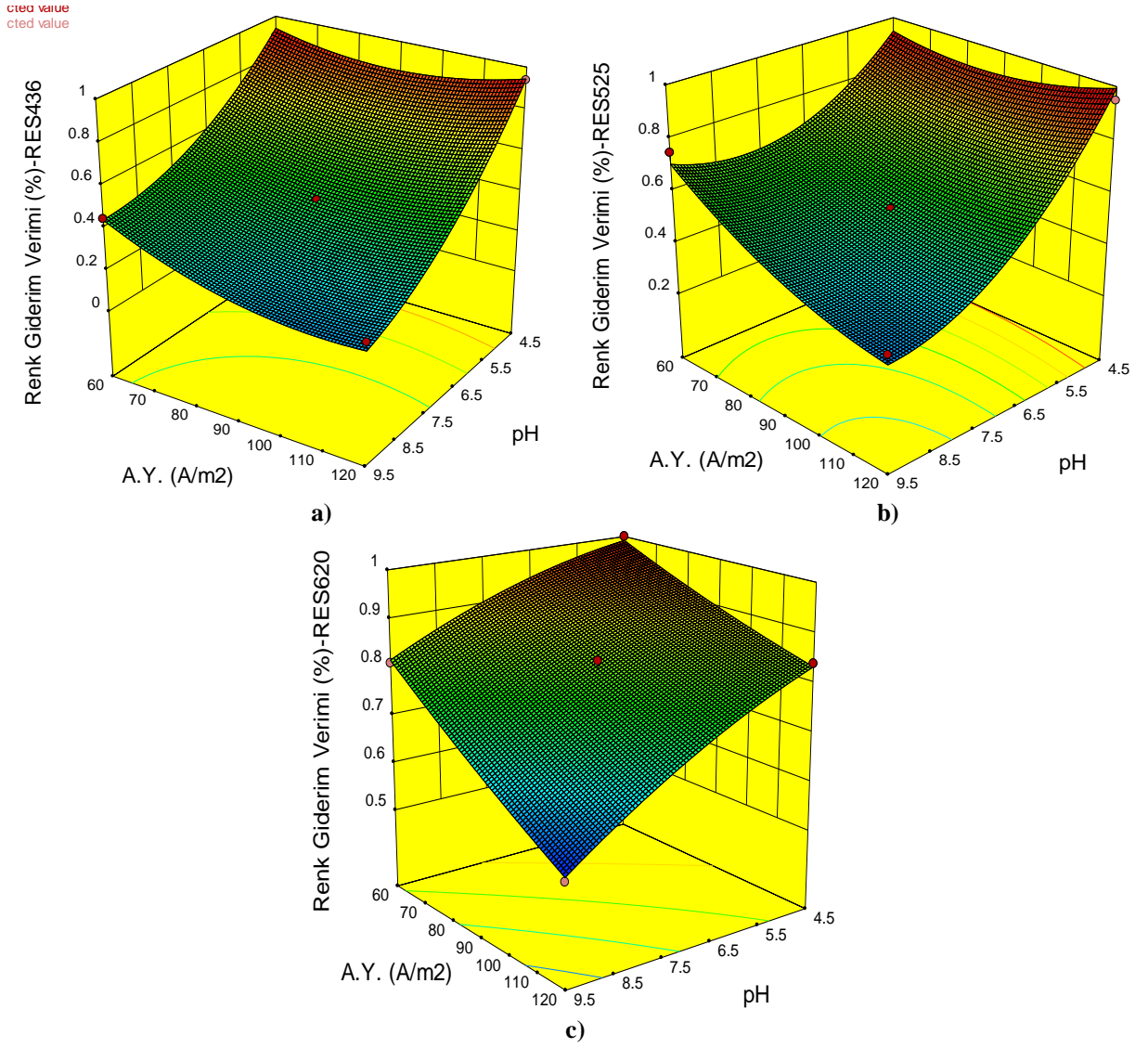
Paslanmaz çelik elektrot bağlı elektrokimyasal proses için deneysel çalışma sonucunda elde edilen RES436, RES525 ve RES620 renk parametreleri için ANOVA analizi sonuçları Çizelge 5'te görülmektedir. Quadratik modele uyumlu olarak belirlenen istatistiksel analiz sonucunda R² değerleri RES436 için 0.99, RES525 için 0.97 ve RES620 için 0.99 olarak tespit edilmiştir.

ANOVA analizinde, RES436 renk değeri için akım yoğunluğu, pH, ve elektroliz süresi parametrelerinin p değerlerine bakıldığında, pH ve akım yoğunluğu parametrelerinin elektroliz süresine göre daha etkin olduğu görülmektedir (p<0,05). RES525 renk değeri için sadece pH değerinin etkin olduğu, RES620 renk değeri için de pH ve akım yoğunluğu parametrelerinin prosesi etkileyen parametreler olduğu belirlenmiştir. 3D grafiklerde de bu tespitler görülmektedir.

Şekil 4'te RES436, RES525 ve RES620 renk giderim verimleri için pH ve akım yoğunluğu parametrelerinin

etkisi görülmektedir. Buna göre, pH değerinin tüm renk parametreleri gideriminde etkin olduğu, özellikle pH <5 olması durumunda renk giderim verimleri >%80 olarak tespit edilmiştir. RES436, RES525 ve RES620 renk giderim verimleri için akım yoğunluğu parametrelerinin artması giderim verimini olumsuz etkilemiştir. Çeliğin katot olarak, alüminyum ve demirin anot olarak kullanıldığı bir

elektrokimyasal processte tekstil endüstrisinde kullanılan boyar madde bulunan numuneden renk giderimi incelenmiş olup; Elektroliz süresi, pH ve akım yoğunluğu gibi değişken parametrelerin renk giderim verimi üzerine etkileri araştırılmıştır. Akım yoğunluğu 2,5 mA/cm² olduğunda renk giderimi %20 iken, akım yoğunluğu 12.5 mA/cm² olduğunda renk giderimi %98 olarak gerçekleşmiştir. Bu proses için optimum akım yoğunluğu 11,25 mA/cm² olarak belirlenmiştir. pH'ın <2 olması durumunda en düşük giderim verimi elde edilmiştir. 5-9 arası renk giderim veriminde bir değişiklik olmazken, ph 9 dan sonra giderim verimi artmıştır (Daneshvar vd. 2007).



Şekil 4. Paslanmaz çelik elektrotlar kullanılarak yapılan EO prosesinde akım yoğunluğu ve pH parametrelerinin renk giderim verimine etkisi. a) RES 436 b) RES 525 c) RES 620 (Elektroliz Süresi: 30 dk.)

Çizelge 5. Paslanmaz Çelik için ANOVA analizi sonuçları

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	P-value
RES 436					
Model	0.59	9	0.066	49.66	0.0002
A-pH	0.25	1	0.25	189.51	<
B-A.Y	0.054	1	0.054	40.94	0.0014
C-E.S.	2.000E-004	1	2.000E-	0.15	0.7141
AB	9.025E-003	1	9.025E-	6.79	0.0480
AC	2.500E-005	1	2.500E-	0.019	0.8963
BC	0.021	1	0.021	15.81	0.0106
A²	0.024	1	0.024	18.33	0.0079
B²	1.442E-004	1	1.442E-	0.11	0.7553
C²	0.24	1	0.24	182.29	<
Residual	6.650E-003	5	1.330E-		
Lack of Fit	6.650E-003	3	2.217E-		
Pure Error	0.000	2	0.000		
Cor Total	0.60	14			
R²	0.99				
Adj R²	0.97				
RES 525					
Model	1.11	9	0.12	53.39	0.0002
A-pH	0.37	1	0.37	159.86	<
B-A.Y	4.050E-003	1	4.050E-	1.75	0.2431
C-E.S.	0.011	1	0.011	4.86	0.0786
AB	9.000E-004	1	9.000E-	0.39	0.5601
AC	3.600E-003	1	3.600E-	1.56	0.2675
BC	0.096	1	0.096	41.54	0.0013
A²	1.641E-004	1	1.641E-	0.071	0.8006
B²	0.093	1	0.093	40.01	0.0015
C²	0.56	1	0.56	240.70	<
Residual	0.012	5	2.313E-		
Lack of Fit	0.011	3	3.833E-	115.00	0.0086
Pure Error	6.667E-005	2	3.333E-		
Cor Total	1.12	14			
R²	0.99				
Adj R²	0.97				
RES 620					
Model	0.66	9	0.073	33.10	0.0006
A-pH	0.44	1	0.44	197.34	<
B-A.Y	0.017	1	0.017	7.73	0.0389
C-E.S.	2.000E-004	1	2.000E-	0.090	0.7759
AB	0.026	1	0.026	11.56	0.0193
AC	2.500E-005	1	2.500E-	0.011	0.9195
BC	6.250E-004	1	6.250E-	0.28	0.6180
A²	0.17	1	0.17	78.86	0.0003
B²	1.131E-003	1	1.131E-	0.51	0.5069
C²	3.692E-004	1	3.692E-	0.17	0.7000
Residual	0.011	5	2.215E-		
Lack of Fit	0.011	3	3.692E-		
Pure Error	0.000	2	0.000		
Cor Total	0.67	14			
R²	0.98				
Adj R²	0.95				

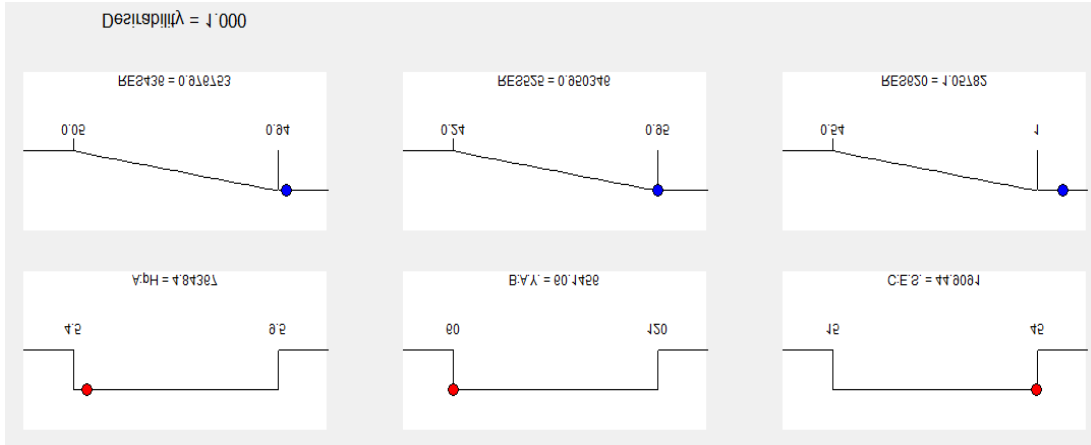
Yapılan çalışma sonucunda elde edilen denklemler Çizelge 6'da görülmektedir

Çizelge 6. Farklı renk değerleri için belirlenen eşitlikler

RES436		RES525		RES620	
+0.44		+0.53		+0.81	
-0.31	* A	-0.22	* A	-0.11	* A
-0.058	* B	-0.079	* B	-0.11	* B
+0.12	* C	+0.12	* C	+0.034	* C
-0.060	* AB	-0.10	* AB	-0.028	* AB
+0.035	* AC	+0.073	* AC	-7.500E-003	* AC
-0.035	* BC	-0.030	* BC	+0.015	* BC
+0.11	* A ²	+0.16	* A ²	-0.024	* A ²
+0.084	* B ²	+0.062	* B ²	+8.333E-003	* B ²
-0.026	* C ²	-0.023	* C ²	+0.048	* C ²

Şekil 5'te maksimum RES436, RES525 ve RES620 renk giderim verimi için optimum pH değeri 4,84, akım yoğunluğu 60,15 A/m², elektroliz süresi 44 dk. olarak tespit

edilmiştir. Optimum koşullarda RES436 giderim verimi yaklaşık %97, RES525 giderim verimi yaklaşık % 95 ve RES620 renk giderim verimi > %99.99 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5. Renk giderim verimlerini maksimize eden optimum değerler.

Optimize edilen koşullarda maya endüstrisi arıtım sonrası deşarj suyunun (deneysel çalışmalarda kullanılan ham

atıksu) ve EO prosesi sonrası atıksudaki renk değişimi Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6. İşletmenin deşarj atıksuyu ve EO prosesi ile artırılmış s**4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR**

Yanıt yüzey metodu ile yapılan elektrokimyasal proseslerin optimizasyon çalışmalarında titanyum elektrot için akım yoğunluğunun 84.23 A/m², pH değerinin 4.55 ve elektroliz süresinin 43 dk. olduğu optimum şartlarda RES436, RES525, RES620 renk giderim verimleri sırasıyla % 89, % 98, % 99,99 olarak tespit edilmiştir. Paslanmaz çelik elektrot için pH değerinin 4.84, akım yoğunluğu 60.15 A/m², elektroliz süresi 45 dk. olduğu optimum şartlarda RES436, RES525, RES620 renk giderim verimleri sırasıyla % 98, % 95, % 99,99 olarak tespit edilmiştir.

İstatistiksel analiz sonucunda quadratik modele uyumlu olduğu belirlenen modelin, R² değerleri titanyum elektrotta RES436 için 0.99, RES525 için 0.99 ve RES620 için 0.98 olarak, paslanmaz çelik elektrotta RES436 için 0.99, RES525 için 0.97 ve RES620 için 0.99 olarak bulunmuştur. Akım yoğunluklarına bağlı olarak prosesin enerji tüketimleri ise sırasıyla, 34,2-122,2 kWsa/m³ ve 4,64-42,86 kWsa/m³ aralığında değişim göstermiştir. Aynı giderim verimleri için paslanmaz çelik elektrodunun kullanımının, titanyum elektrot kullanımına göre enerji maliyeti açısından daha uygun olacağı düşünülmektedir.

Titanyum ve paslanmaz çelik elektrotların kullanıldığı elektrokimyasal proseslerin maya endüstrisi deşarj sularındaki rengi oluşturan ve giderimi oldukça kompleks olan melanoidlerin parçalanarak giderilmesinde oldukça etkin olduğu belirlenmiştir. Özellikle, deşarj suyunun tüm renk parametreleri için giderim verimi > %89'dur. Bu durumda işletme tarafından artıldıktan sonra deşarj edilen suyun elektrokimyasal prosesler ile tekrar kullanım açısından arıtılabileceği ve arıtılan suyun işletmede tekrar kullanımı için uygulanan prosesler üzerine renk haricinde farklı parametreler ile de değerlendirmeler yapılması gerektiği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Alfredo G., Veronica M., Ivan G. M., Perla T. A., Monserrat C., Ivonne L. (2014). Industrial wastewater treatment by electrocoagulation–electrooxidation processes powered by solar cells, *Fuel* 149 (2015) 46–54.

Alkan R., 2010, Melanoidin içeren atık suların renginin mikroorganizmalarla giderilmesi, *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 2, 89-94.

APHA. (2005). American Public Health Association (APHA), Standard Methods for the Examination of Waste and Wastewater (19th ed.), Washington.

Aydın S., (2020). Erzurum biyolojik atıksu arıtma tesisi arıtma çamuru yönetiminin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye.

Balcıoğlu G., (2013). Biyolojik olarak artırılmış ekmekek mayası endüstrisi atıksularının ileri arıtım alternatiflerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.

Bejankiwar R., Lalman J., A., Seth R., Biswas N., (2005). Electrochemical degradation of 1,2-dichloroethane (DCA) in a synthetic groundwater medium using stainless-steel electrodes, *Water Research*, 39, 4715–4724.

Cansu E., (2018). Atık aktif çamurun elektrooksidasyon yöntemi ile ön arıtımının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye.

Chen G., (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment, *Separation and Purification Technology*, 38 (1), 11-41.

Daneshvar N., Khataee A., R., Amani G., A., R., Rasoulifard M., H., (2007). Decolorization of C.I. Acid Yellow 23 solution by electrocoagulation process: Investigation of operational parameters and evaluation of specific electrical energy consumption (SEEC), *Journal of Hazardous Materials*, 148, pp. 566–572.

Demir N., M., (2012). İleri biyolojik arıtma proseslerinde nütrient giderimi ve mikroorganizma türlerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Türkiye.

EPA (2009). <http://water.epa.gov/drink/contaminants/upload/mcl-2.pdf> Europa Norm, 1994. EN ISO 7887.(Erişim Tarihi:02.06.2021).

Haksevenler G., B., H., Doğruel S., Alaton A., İ., 2019. Kimyasal arıtma proseslerinin karasuyun boyutsal dağılımı üzerindeki etkilerinin incelenmesi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Cilt 24, Sayı 3.

Ihara I., Kanamura K., Shimada E., et.al., (2004). High gradient magnetic separation combined with electrocoagulation and electrochemical oxidation for the treatment of landfill leachate, *Ieee Transactions On Applied Superconductivity*, 14-2, 1558-1560.

İlhan F., Kurt U., Apaydın Ö., Arslankaya E., Gönüllü M., T., (2007). Elektrokimyasal arıtım ve uygulamaları” TÜRKAY 2007 AB sürecinde Türkiye’de katı atık yönetimi ve çevre sorunları sempozyumu.

Kannan K., Sivadurai S., N., John Brechmans, L., Vijayavalli R., 1995. Removal of phenolic compounds by electrooxidation method, *J. Environ. Sci. Health*, A 30, 2185.

Karaoğlu M., H., (2007). Sulu çözeltilerden bazı boyarmaddelerin fizikokimyasal yöntemlerle giderimi, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, Türkiye.

Kocaer F., O., Alkan U., (2002). Boyar madde içeren tekstil atıksularının arıtım alternatifleri, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 7, Sayı 1.

Kul S., (2005). Zeytin karasuyunun elektrooksidasyon yöntemi ile arıtımının incelenmesi, Doktora Tezi,

Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,
Erzurum, Türkiye.

Martínez-Huitle C., A., Alfaro M., A., Q., (2008). Elmas elektrodun son çevresel uygulamaları: Kritik inceleme, *J. Environ. Eng. Manage.*, 18 (3), 155-172.

Stone C., (1998). *Yeast Products in the Feed Industry*, Diamond V Mills, Inc. Cedar Rapids, Iowa, 3-15.

Ünal T., (2011). Ekmek mayası endüstrisi seperasyon prosesi atıksularında ozon ve ozon/hidrojen peroksit oksidasyonu ile renk giderimi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.

Xion Y., He C., Karlsson H., T., Zhu X., (2003). Performance of three-phase three-dimensional

electrode reactor for the reduction of COD in simulated wastewater-containing phenol, *Chemosphere*, 50, 131–136.

Vardar B.,(2006). Tekstil endüstrisi reaktif boya banyolarının elektrokimyasal yöntemler ile arıtımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.

Vlyssides A., G., Papaioannou D., Loizidou M., Karlis P., K., Zorpas A., A., (2000). Testing an electrochemical method for treatment of textile dye wastewater, *waste management*, 20, 569-574.

Yılmaz E., (2014). Maya endüstrisi atıksuyunun ses ötesi dalgalarla arıtılması, Yüksek Lisans Tezi, Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çorum, Türkiye.