

**ELEKTROKİMYASAL REJENERASYONLU
ADSORPSİYON PROSESİNİN ÇEŞİTLİ ATIK
YÜKLERİNİN GİDERİMİNDE DENENMESİ VE
UYGULANABİLİR SİSTEM TASARIMININ
ARAŞTIRILMASI**

Leyla GAZİGİL



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTROKİMYASAL REJENERASYONLU ADSORPSİYON PROSESİNİN
ÇEŞİTLİ ATIK YÜKLERİNİN GİDERİMİNDE DENENMESİ VE
UYGULANABİLİR SİSTEM TASARIMININ ARAŞTIRILMASI**

Leyla GAZİGİL
0000-0002-8798-8933

Prof. Dr. Taner YONAR
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2023
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Leyla GAZİGİL tarafından hazırlanan “ELEKTROKİMYASAL REJENERASYONLU ADSORPSİYON PROSESİNİN ÇEŞİTLİ ATIK YÜKLERİNİN GİDERİMİNDE DENENMESİ VE UYGULANABİLİR SİSTEM TASARIMININ ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Taner YONAR

Başkan	:	Prof. Dr. Taner YONAR 0000-0002-0387-0656 Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza
Üye	:	Prof. Dr. Feza KARAER 0000-0002-2986-0114 Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza
Üye	:	Prof. Dr. Melike YALILI KILIÇ 0000-0001-7050-6742 Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza
Üye	:	Prof. Dr. Orhan Taner CAN 0000-0003-3386-975X Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza
Üye	:	Prof. Dr. Baybars Ali FİL 0000-0003-3085-224X Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Ali KARA
Enstitü Müdürü
.../.../...

B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

16/06/2023

Leyla GAZİGİL

TEZ YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Prof. Dr. Taner YONAR
16.06.2023

Leyla GAZİGİL
16.06.2023

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

ÖZET

Doktora Tezi

ELEKTROKİMYASAL REJENERASYONLU ADSORPSİYON PROSESİNİN ÇEŞİTLİ ATIK YÜKLERİNİN GİDERİMİNDE DENENMESİ VE UYGULANABİLİR SİSTEM TASARIMININ ARAŞTIRILMASI

Leyla GAZİGİL

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Taner YONAR

Yaygın kullanımı olan aktif karbon pek çok kirleticinin (kalıcı, toksik, vb) giderimin de dünya genelinde kullanılmaktadır. Aktif karbon temininde ülkemiz maalesef tamamen dışa bağımlı durumdadır. Doygunluğa erişen aktif karbon ise tehlikeli atık olarak değerlendirilmekte 06 13 02 atık kodu ile bertaraf edilmektedir. Böylelikle ülkemizin kısıtlı olan kaynakları da verimsiz bir şekilde kayba uğramaktadır. Aktif karbon dünya genelinde yaygın olarak termal rejenerasyon yöntem ile rejenere edilmektedir. Ancak şu an için ülkemizde bu tarz hizmet verebilecek bir altyapı aktif olarak mevcut değildir. Bu noktada da en uygun rejenerasyon alternatifi ise elektrokimyasal rejenerasyon olarak durmaktadır. Çalışmanın amacı yerinde rejenerasyon yöntemlerinde biri olan elektrokimyasal olarak aktif karbonun rejenerasyonu için optimum faktörlerin ortaya çıkarılmasıdır. Bu kapsamda hem laboratuvar ortamında metilen mavisi ile doyurulan aktif karbon hem de piyasadan doygun olarak elde edilmiş aktif karbonun en iyi rejenerasyon veriminin elde edilmesi için elektrokimyasal yöntemde etkin olan parametreler (elektrolit türü ve konsantrasyonu, pH, akımsal yoğunluk ve rejenerasyon süresi) incelendi ve optimize edildi. Elektrokimyasal rejenerasyonda anot ve katot olarak 2,5x4x4 cm ebatlarında Sn/Sb/Ni-Ti ve 5x5 cm ebatlarında Pi/Ti kullanılmıştır. Elektrokimyasal rejenerasyondan sonra aktif karbonun performansını değerlendirmek için metilen mavisi ile adsorpsiyon testleri yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen deneysel veriler Freundlich ve Langmuir izoterm modellerini test etmek için kullanılmış ve deneysel sonuçların Langmuir izotermi ile iyi bir uyum gösterdiği görülmüştür. Optimum şartlar her iki aktif karbon için de: 0,1 M 50 mA/cm², 4 saat, 13 g aktif karbon ve 200 ml elektrolit hacmi ile elde edilmiştir. Optimum pH ise her iki elektrolit türünde doğal pH değeri elde edilmiştir. Her iki aktif karbon için optimum şartlar tespit edildikten sonra adsorpsiyon-rejenerasyon döngüsüne 6 defa tabi tutulmuştur ve 6. döngü sonrasında giderim verimleri sırasıyla KBr ve NaBr elektrolitleri için % 83,83 ve % 68,55 olarak görülmüştür. Ayrıca araştırmada optimum koşullar altında metilen mavisine doyulan ve piyasadan doygun olarak elde edilen aktif karbonlar için elektrik enerjisi tüketimi sırasıyla 1,12 ve 1,16 kWh/kg olarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrokimyasal rejenerasyon, aktif karbon, optimizasyon
2023, xvi + 75 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

INVESTIGATION OF THE ELECTROCHEMICALLY REGENERATED ADSORPTION PROCESS ON REMOVAL OF VARIOUS WASTE LOADS AND THE FEASIBLE SYSTEM DESIGN

Leyla GAZİGİL

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Environmental Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Taner YONAR

Activated carbon, which is widely used, is used worldwide for the removal of many pollutants (permanent, toxic, etc.). Unfortunately, our country is completely dependent on foreign countries for the supply of activated carbon. Activated carbon that reaches saturation is considered as hazardous waste and is disposed of with waste code 06 13 02. Thus, the limited resources of our country are lost in an inefficient way. Activated carbon is widely regenerated by thermal regeneration method worldwide. However, there is currently no infrastructure that can provide such services in our country. At this point, the most suitable regeneration alternative is electrochemical regeneration. The aim of the study is to determine the optimum factors for the electrochemical regeneration of activated carbon, which is one of the in-situ regeneration methods. In this context, the effective parameters (electrolyte type and concentration, pH, current density and regeneration time) in the electrochemical method were examined and optimised in order to obtain the best regeneration efficiency of both activated carbon saturated with methylene blue in the laboratory environment and activated carbon saturated from the market. Sn/Sb/Ni-Ti with dimensions of 2.5x4x4 cm and Pi/Ti with dimensions of 5x5 cm were used as anode and cathode in electrochemical regeneration. After electrochemical regeneration, adsorption tests with methylene blue were carried out to evaluate the performance of activated carbon. The experimental data obtained as a result of the studies were used to test the Freundlich and Langmuir isotherm models and the experimental results showed good agreement with the Langmuir isotherm. Optimum conditions were obtained for both activated carbons: 0.1 M 50 mA/cm², 4 h, 13 g activated carbon and 200 ml electrolyte volume. The optimum pH was obtained at natural pH value in both electrolyte types. After the optimum conditions were determined for both activated carbons, they were subjected to adsorption-regeneration cycle 6 times and the removal efficiencies after the 6th cycle were 83.83% and 68.55% for KBr and NaBr electrolytes, respectively. In addition, under optimum conditions, electrical energy consumption for activated carbons saturated with methylene blue and activated carbons obtained from the market was 1.12 and 1.16 kWh/kg, respectively.

Key words: Electrochemical regeneration, activated carbon, optimization
2023, xvi + 75 pages.

TEŞEKKÜR

Doktora tezimin tamamlama sürecinde danışmanım Sayın Prof. Dr. Taner Yonar'a sıklı denetimi ve değerli bilgi birikiminin benimle paylaştığı için teőekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitesinde yer alan sayın jüri iyeleri hocalarım Prof. Dr. Melike Yalılı Kılıç ve Prof. Dr. Orhan Taner Can'a tez çalışmasının gelişmesinde ve ilerlemesinde katıkları emekler için teőekkürlerimi sunarım.

Benimle beraber çalışarak tezimin başarılı bir Şekilde tamamlanmasında ve yazım kontrol aşamasında verdikleri öneriler için Eren Er'e ve Arş. Gör. Burak alışkan'a teőekkürlerimi sunarım.

Moral ve motivasyonumu yüksek tutmamı sağlayan ve hayatımın her aşamasında hep yanımda olan annem Dilber Gazigil, babam İşkender Gazigil, kardeşim Rüstem Gazigil ve eşi Günel Gazigil'e teőekkürlerimi sunarım.

Leyla GAZİGİL
16/06/2023

İçindekiler

ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Aktif Karbon Adsorpsiyon Temelleri.....	3
2.2. Aktif Karbon Rejenerasyon Yöntemleri.....	5
2.2.1. Termal rejenerasyon.....	5
2.2.2. Kimyasal rejenerasyon.....	7
2.2.3. Buhar rejenerasyon.....	8
2.2.4. Ultrasonik rejenarasyon.....	8
2.3. Elektrokimyasal Rejenerasyonun Temel Esasları.....	9
2.4. Literatürde Elektrokimyasal Yöntemle Aktif Karbon Rejenerasyonu.....	12
3. MATERYAL ve METOD.....	19
3.1. Materyal.....	19
3.1.1. Aktif karbonun hazırlanışı.....	19
3.1.2. Çalışmada kullanılan metilen mavisinin özellikleri.....	19
3.1.3. Sn/Sb/Ni/ ile kafesin kaplanması ve katodun hazırlanışı.....	20
3.1.4. Çalışmada kullanılan kimyasallar.....	23
3.1.5. Deney Sistemi.....	23
3.2. Metod.....	26
3.2.1. Metilen mavisinin dalga boyunun tespiti.....	26
3.2.2. Adsorpsiyon izoterminin belirlenmesi.....	26
3.2.3. Optimum elektrolit türünün belirlenmesi.....	27
3.2.4. Optimum elektrolit konsantrasyonunun belirlenmesi.....	28
3.2.5. Optimum pH'nın belirlenmesi.....	28
3.2.6. Optimum akım yoğunluğunun belirlenmesi.....	29
3.2.7. Optimum rejenerasyon süresinin belirlenmesi.....	29
3.2.8. Optimum döngü sayısının belirlenmesi.....	29
3.2.9. Enerji Tüketiminin Hesaplanması.....	29
3.2.10. Kinetik değerlendirme.....	30
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	31
4.1. Optimum Elektrolit Türünün Belirlenmesi.....	31
4.2. Optimum Elektrolit Konsantrasyonunun Belirlenmesi.....	43
4.3. Optimum pH'nın belirlenmesi.....	47
4.4. Optimum Akım Yoğunluğunun Belirlenmesi.....	52
4.5. Optimum Rejenerasyon Süresinin Belirlenmesi.....	54
4.6. Optimum Döngü Sayısının Belirlenmesi.....	59
4.7. Enerji Tüketiminin Hesaplanması.....	61
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	63
KAYNAKLAR	68
ÖZGEÇMİŞ.....	74

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
~	Yaklaşık
SiO ₂	Silika jel
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
°C	Santigrat derece
CO ₂	Karbondioksit
kHz	Kilohertz
H ₂ O	Su
NaCl	Sodyum klorür
w/w	Ağırlıkça yüzde
M	Molarite
H ₂ SO ₄	Sülfürik asit
g	gram
Ti/KMO	Titanyum/karışık metal oksit
Pt/Ti	Pilatin/titanyum
RuO ₂ /Ti	Rutenyum oksit/titanyum
IrO ₂ /Ti,	İridyum oksit/titanyum
K	Kelvin
Kg	Kilogram
KFK	Karbon fiber kumaş
PbO ₂	Kurşun oksit
SnO ₂	Kalay oksit
Pt	Platin
mA	Miliamper
cm ²	Santimetre kare
ml	mililitre
dk	dakika
Na ₂ SO ₄	Sodyum sülfat
cm	Santimetre
rpm	dakikadaki devir sayısı (Revolutions per minute)
Cr(VI)	Hekzavalent Krom
V	Volt
A	Amper
mS	milisiemens
NaOH	Sodyum hidroksit
nm	nanometre
DC	Direkt akım (direct current)
K ₂ SO ₄	Potasyum sülfat
KCl	Potasyum klorür
KI	Potasyum iyodür
NaI	Sodyum iyodür
KBr	Potasyum bromür
NaBr	Sodyum bromür
KF	Potasyum florür
NaF	Sodyum florür
H ₂ O ₂	Hidrojen peroksit

Kısaltmalar	Açıklama
İOP	İleri oksidasyon prosesleri
AK	Aktif karbon
GAK	Granüler aktif karbon
FTIR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (Fourier Transform Infrared Spektrofotometre)
BET	Brunauer, Emmet ve Teller
OM	Optik mikroskopi
SEM	Taramalı elektron mikroskobu (scanning electron microscope)
kWh	Kilovatsaat
kW	Kilovat
BDD	Bor kaplı elmas (boron-doped diamond)
E-PDS	Elektro-peroksidisülfat
EDTA	Etilendiamin tetraasetik asit
MM	Metilen mavisi
ABS	Absorbans
•OH	Hidroksil radikali

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Sıvı faz üzerinde adsorpsiyon süreci (Öztürk, 2017).....	4
Şekil 2.2. Aktif karbonun yapısı.	4
Şekil 2.3. Termal rejenerasyonun genel sınıflandırması.....	7
Şekil 2.4. Aktif karbon rejenerasyonu için ultrasonik sistemin şemati diyagramı	9
Şekil 2.5. Aktif karbonun elektrokimyasal rejenerasyonunda oluşan mekanizmaları (McQuillan vd., 2018).....	11
Şekil 2.6. Aktif karbonun elektrokimyasal rejenerasyon prosesi (Zanella vd., 2017)	13
Şekil 3.1. Piyasadan elde edilen kirli aktif karbon.....	19
Şekil 3.2. Metilen mavisinin moleküler yapısı	20
Şekil 3.3. Kaplama işlemine hazırlanan Sn/Sb/Ni kafesi.....	21
Şekil 3.4. a) kaplanmamış Sn/Sb/Ni kafesi, b) kaplanmasını tamamlanan Sn/Sb/Ni kafesi.....	21
Şekil 3.5. a) kaplanmamış katot malzemesi (Ti), b) kaplanmasını tamamlanan katot malzemesi (Pt/Ti)	22
Şekil 3.6. Kesikli adsorpsiyon sistemi	24
Şekil 3.7. Elektrokimyasal deney düzeneği a) doymuş aktif karbonun elektrokimyasal rejenerasyonu, b) sadece elektrolit etkisiyle gerçekleşen doymuş aktif karbon rejenerasyonu	25
Şekil 3.8. Elektrokimyasal deney düzeneğinin şematik görünümü	25
Şekil 3.9. Metilen mavisinin kalibrasyon eğrisi.....	26
Şekil 3.10. Langmuir adsorpsiyon izotermi	27
Şekil 4.1. Metilen Mavisi ile doyurulmuş aktif karbonun 0,1 M Na ₂ SO ₄ ve K ₂ SO ₄ deki rejenerasyon sonrası aktif karbonun ve akım geçmediği aktif karbonun rejenerasyon verimi-zaman grafiği (50 mA/cm ² , 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)	32
Şekil 4.2. Metilen Mavisi ile doyurulmuş aktif karbonun 0,1 M NaCl ve KCl deki rejenerasyon sonrası aktif karbonun ve akım geçmediği aktif karbonun rejenerasyon verimi-zaman grafiği (50 mA/cm ² , 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)	33
Şekil 4.3. Metilen Mavisi ile doyurulmuş aktif karbonun 0,1 M NaI ve KI deki rejenerasyon sonrası aktif karbonun ve akım geçmediği aktif karbonun rejenerasyon verimi-zaman grafiği (50 mA/cm ² , 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)	33
Şekil 4.4. Metilen Mavisi ile doyurulmuş aktif karbonun 0,1 M NaBr ve KBr deki rejenerasyon sonrası aktif karbonun ve akım geçmediği aktif karbonun rejenerasyon verimi-zaman grafiği (50 mA/cm ² , 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)	34
Şekil 4.5. Metilen Mavisi ile doyurulmuş aktif karbonun 0,1 M NaF ve KF deki rejenerasyon sonrası aktif karbonun ve akım geçmediği aktif karbonun rejenerasyon verimi-zaman grafiği (50 mA/cm ² , 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)	34
Şekil 4.6. Metilen Mavisi ile doyurulmuş aktif karbonun 0,1 M deki farklı elektrolit türlerinin rejenerasyon verimi-zaman grafiği (50 mA/cm ² , 13 g aktif	

	karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)	35
Şekil 4.7.	Piyasadan doygun olarak elde edilmiş aktif karbonun akım geçmeyen 0,1 M deki Na ₂ SO ₄ ve K ₂ SO ₄ elektrolit türlerinin rejenerasyon verimi- zaman grafiği (13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat).....	37
Şekil 4.8.	Piyasadan doygun olarak elde edilmiş aktif karbonun akım geçmeyen 0,1 M deki NaCl ve KCl elektrolit türlerinin rejenerasyon verimi-zaman grafiği (13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)	37
Şekil 4.9.	Piyasadan doygun olarak elde edilmiş aktif karbonun akım geçmeyen 0,1 M deki NaI ve KI elektrolit türlerinin rejenerasyon verimi-zaman grafiği (13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)	38
Şekil 4.10.	Piyasadan doygun olarak elde edilmiş aktif karbonun akım geçmeyen 0,1 M deki NaBr ve KBr elektrolit türlerinin rejenerasyon verimi-zaman grafiği (13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)	38
Şekil 4.11.	Piyasadan doygun olarak elde edilmiş aktif karbonun akım geçmeyen 0,1 M deki NaF ve KF elektrolit türlerinin rejenerasyon verimi-zaman grafiği (13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)	39
Şekil 4.12.	Piyasadan doygun olarak elde edilmiş aktif karbonun 0,1 M deki farklı elektrolit türlerinin rejenerasyon verimi-zaman grafiği (50 mA/cm ² , 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)	40
Şekil 4.13.	Metilen Mavisi ile doyurulmuş aktif karbonun 0,1 M deki farklı elektrolit türlerinin ln (Ct/C0)-zaman grafiği (50 mA/cm ² , 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)	41
Şekil 4.14.	Piyasadan doygun olarak elde edilmiş aktif karbonun 0,1 M deki farklı elektrolit türlerinin ln (Ct/C0)-zaman grafiği (50 mA/cm ² , 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)	41
Şekil 4.15.	Metilen Mavisi ile doyurulmuş aktif karbonun optimum elektrolit konsantrasyonunun belirlenmesi (50 mA/cm ² , 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)	44
Şekil 4.16.	Metilen Mavisi ile doyurulmuş aktif karbonun optimum elektrolit konsantrasyonunun belirlenmesi (13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)	45
Şekil 4.17.	Piyasadan doygun olarak elde edilmiş aktif karbonun optimum elektrolit konsantrasyonunun belirlenmesi (50 mA/cm ² , 13 g aktif karbon miktarı,	

	200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)	46
Şekil 4.18.	Piyasadan doygun olarak elde edilmiş aktif karbonun optimum elektrolit konsantrasyonunun belirlenmesi (13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat).....	46
Şekil 4.19.	Metilen Mavisini ile doyurulmuş aktif karbonun optimum pH (4-10) değerlerinin rejenerasyon verimi-zaman grafiği (0.1 M KBr, 50 mA/cm ² , 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi).....	49
Şekil 4.20.	Metilen Mavisini ile doyurulmuş aktif karbonun akım geçmeyen optimum pH (4-10) değerlerinin rejenerasyon verimi-zaman grafiği (0.1 M KBr, 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi).....	49
Şekil 4.21.	Piyasadan doygun olarak elde edilmiş aktif karbonun optimum pH (4-10) değerlerinin rejenerasyon verimi-zaman grafiği (0.1 M NaBr, 50 mA/cm ² , 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi).....	50
Şekil 4.22.	Piyasadan doygun olarak elde edilmiş aktif karbonun akım geçmediği optimum pH (4-10) değerlerinin rejenerasyon verimi-zaman grafiği (0,1 M NaBr, 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi).....	51
Şekil 4.23.	Metilen Mavisini ile doyurulmuş aktif karbonun optimum akım yoğunluğunun tespit edilmesi (0.1 M KBr, doğal pH, 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)	53
Şekil 4.24.	NaBr nin farklı akım yoğunluk değerlerinin rejenerasyon verimi-zaman grafiği (0.1 M NaBr, 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi).....	54
Şekil 4.25.	Metilen mavisini ile doyurulan aktif karbonun farklı zaman değerlerinin rejenerasyon verimi-zaman grafiği (0.1 M KBr, 50 mA/cm ² , 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi)	56
Şekil 4.26.	Metilen mavisini ile doyurulan aktif karbonun akım geçmeyen farklı zaman değerlerinin rejenerasyon verimi-zaman grafiği (0.1 M KBr, 50 mA/cm ² , 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi).....	56
Şekil 4.27.	Piyasadan doygun olarak elde edilen aktif karbonun farklı zaman değerlerinin rejenerasyon verimi-zaman grafiği (0.1 M NaBr, 50 mA/cm ² , 13 g aktif karbon miktarı, 200ml elektrolit hacmi).....	57
Şekil 4.28.	Piyasadan doygun olarak elde edilen aktif karbonun akım geçmediği farklı zaman değerlerinin rejenerasyon verimi-zaman grafiği (0.1 M NaBr, 13 g aktif karbon miktarı, 200ml elektrolit hacmi).....	58
Şekil 4.29.	Döngü sayısının tespiti (0,1 M KBr, 50 mA/cm ² , 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, rejenerasyon süresi 4 saat).....	60
Şekil 4.30.	Döngü sayısının tespiti (0,1 M NaBr, 50 mA/cm ² , 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, rejenerasyon süresi 4 saat)	60
Şekil 4.31.	Metilen mavisini ile doyulan aktif karbonun optimum şartlar altındaki enerji tüketimi-zaman grafiği (0.1 M NaBr, 13 g aktif karbon miktarı, 200ml elektrolit hacmi)	62
Şekil 4.32.	Piyasadan doygun olarak elde edilen aktif karbonun optimum şartlar altındaki enerji tüketimi-zaman grafiği (0,1 M KBr, 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi)	62

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Sn/Sb/Ni ile kaplanan kafesin ağırlıkça artışı.....	22
Çizelge 3.2. Kaplanan katodun ağırlıkça artışı	22
Çizelge 4.1. Metilen Mavisi ile doyurulan aktif karbonun rejenerasyon öncesi ve sonrası değerleri. Optimum elektrolit türünün belirlenmesinde.	36
Çizelge 4.2. Piyasadan doygun olarak temin edilen aktif karbonun rejenerasyon öncesi ve sonrası değerleri. Optimum elektrolit türünün belirlenmesinde	39
Çizelge 4.3. Metilen mavisi ile doyurulan aktif karbonun birinci-derece kinetik verileri, R ² ve rejenerasyon giderim verimleri	42
Çizelge 4.4. Piyasadan doygun olarak elde edilen aktif karbonun birinci-derece kinetik verileri, R ² ve rejenerasyon giderim verimleri.....	42
Çizelge 4.5. Metilen Mavisi ile doyurulan aktif karbonun rejenerasyon öncesi ve sonrası değerleri. Optimum elektrolit konsantrasyonu tespit edilirken.....	45
Çizelge 4.6. Piyasadan doygun olarak elde edilen aktif karbonun rejenerasyon öncesive sonrası değerleri. Optimum elektrolit konsantrasyonu tespit edilirken.....	47
Çizelge 4.7. Metilen Mavisi ile doyurulan aktif karbonun rejenerasyon öncesi ve sonrası değerleri. Optimum pH tespit edilirken.....	50
Çizelge 4.8. Piyasadan doygun elde edilen aktif karbonun rejenerasyon öncesi ve sonrası değerleri. Optimum pH tespit edilirken.....	51
Çizelge 4.9. Metilen Mavisi ile doyurulan aktif karbonun rejenerasyon öncesi ve sonrası değerleri. Optimum akım yoğunluğu tespit edilirken.....	53
Çizelge 4.10. Piyasadan doygun elde edilen aktif karbonun rejenerasyon öncesi ve sonrası değerleri. Optimum akım yoğunluğu tespit edilirken.....	54
Çizelge 4.11. Metilen Mavisi ile doyurulan aktif karbonun rejenerasyon öncesi ve sonrası değerleri. Optimum rejenerasyon süresi tespit edilirken	57
Çizelge 4.12. Piyasadan doygun olarak elde edilen aktif karbonun rejenerasyon öncesi ve sonrası değerleri. Optimum rejenerasyon süresi tespit edilirken .	58

1. GİRİŞ

İnsanoğlu tarafından uzun yıllardır aktif karbon yüksek adsorpsiyon kapasitesinden dolayı su ve atıksu arıtımında birçok amaç için farklı uygulamalarda kullanılmıştır (L. Wang & Balasubramanian, 2009). Gazların arıtımı ve saflaştırılmasında, su ve atıksudaki tehlikeli organik ve inorganik birleşiklerin uzaklaştırılmasında, istenmeyen renk, tat ve koku giderim proseslerinde, karışımların ayrılmasında, gıda endüstrisindeki saflaştırma işlemlerinde savunma sanayisinde, sağlık sektöründe ve koruyucu kıyafet üretimi gibi birçok kullanım alanına sahip olan aktif karbon (Sun vd., 2013), kullanıldıktan sonra Avrupa Atık Kataloğu ve ulusal atık listesinde "06 13 02" kodu ile tehlikeli atık olarak değerlendirilmektedir. Ülkemizde de yaygın olarak kullanımı olan aktif karbonun temini maalesef tamamen dışa bağımlı durumdadır. Bundan dolayı ülkemizin kısıtlı olan kaynakları da verimsiz bir şekilde kayba uğramaktadır. Bu çalışmadaki ana amaç, kullanım sonrası oluşan atık aktif karbonun tekrar ülke ekonomisine en uygun ve ekonomik olarak geri kazandırılması ve dış ticaret açığının kapanmasına katkı sunulmasıdır.

Geçmişteki uygulamalar da aktif karbon doygunluk sınırına ulaştığı zaman çoğunlukla vahşi depolama yöntemleri ile bertaraf edilmiştir. Aktif karbon üretiminin zor ve maliyetli olması ve çevre üzerindeki tehlikeli etkileri artıkça rejenerasyon yöntemlerinin geliştirilmesi önem kazanmıştır (Yuen & Hameed, 2009). Ayrıca aktif karbon üretiminin, atık oluşumunun ve işletme maliyetlerinin azalmasını sağlanabilmesinde aktif karbon rejenerasyonu sürdürülebilir ve etkin bir yaklaşımdır (Aslım, 2019). En bilinen rejenerasyon yöntemleri; termal rejenerasyon, buhar rejenerasyon, ultrasonik rejenerasyon, mikrobiyal rejenerasyon ve kimyasal rejenerasyondur (Türkoğlu, 2010). Bu yöntemlerin; yüksek enerji tüketimi, aktif karbonun yüzey alanını aşındırması, uzun süren rejenerasyon süresi gibi birçok kısıtlamaları mevcuttur (Alvarez-Pugliese vd., 2019; Tongur, 2020). Bu sorunların üstesinden geldiği düşünölen elektrokimyasal rejenerasyon yöntemi, düşük maliyetli ve çalıştırılması kolay olduğu için umut verici bir alternatif olarak dikkatleri üzerine çekmektedir (Santos, Duarte, Tonholo, vd., 2020). Aktif karbonunun rejenerasyonu dünyada en yaygın olarak termal rejenerasyon yöntemi ile

yapılmaktadır. İmkân dâhilinde yapılan araştırmalar sonucunda şu an için ÷lkemizde bu tarz hizmet verebilecek aktif bir altyapının mevcut olmadığı gör÷lmüştür.

Bu çalışma, elektrokimyasal rejenerasyonun aktif karbonun termal rejenerasyon yöntemine alternatif olarak kullanılabilir bir yöntem olup olmadığını araştırmaktadır. Elektrokimyasal rejenerasyonun önemi, çeşitli yönlerden ortaya çıkmaktadır. Bunlar arasında ilk olarak enerji tüketimi açısından termal rejenerasyona kıyasla daha düşük seviyede çalışması bulunur. Elektrokimyasal rejenerasyon süreci, aktif karbonun adsorbe ettiği kirleticilerden daha az enerji kullanarak arındırılmasını sağlar. Bu da enerji maliyetlerini düşürür ve ekonomik açıdan daha sürdürülebilir bir seçenek sunar. Ayrıca, elektrokimyasal rejenerasyon daha kontrollü bir süreçtir. Aktif karbon üzerinde gerçekteşen elektrokimyasal reaksiyonlar, belirli parametreler altında yönetilebilir şekilde ayarlanabilir.

Bu doktora tez kapsamında laboratuvar ortamında metilen mavisi ile doyurulan ve bir tekstil işletmesinde şebeke suyunu proses suyuna çevirmek için kullanılmış doymuş aktif karbonun elektrokimyasal yöntemle rejenerasyonu amaçlamıştır. Araştırmada, aktif karbonun elektrokimyasal rejenerasyonuna etkisi olan temel değişkenlerden; pH, elektrolit türü ve konsantrasyonu, akım yoğunluğu ve rejenerasyon süresi incelenmiş ve optimum şartları belirlenmiştir. Optimum şartlarda döngü sayısı ve enerji tüketimi analiz edilmiştir.

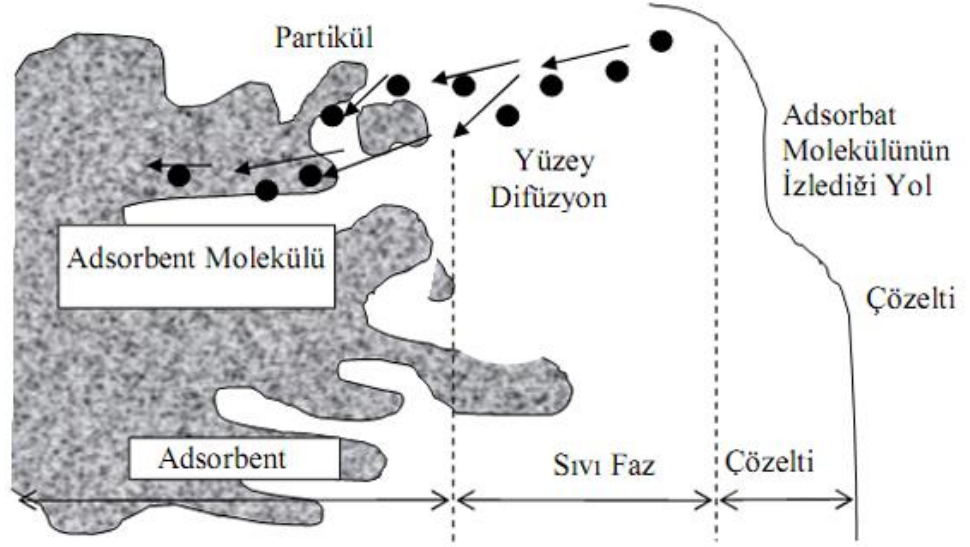
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Aktif Karbon Adsorpsiyon Temelleri

Adsorpsiyon, su ve atıksu arıtımında alternatif bir arıtım prosesi olarak uzun yıllardır kullanılmaktadır (L. Wang & Balasubramanian, 2009). Adsorpsiyon genel olarak, gaz-katı, sıvı-sıvı ve sıvı-gaz gibi iki faz arasında moleküler veya atomik film oluşturması ile meydana gelebilmektedir (Sakin & Dilekoğlu, 2018). Adsorpsiyon prosesinde aktif karbon gibi malzemelere adsorbent, adsorbent üzerinde biriken kirletici maddeye de adsorbat olarak ifade edilmektedir (Türkoğlu, 2010). Adsorbat adsorbent üzerine dört farklı yolla etkileşime girebilir. Bunlar kimyasal, fiziksel, biyolojik ve iyonik adsorpsiyon olarak isimlendirilmektedir (Tang vd., 2023).

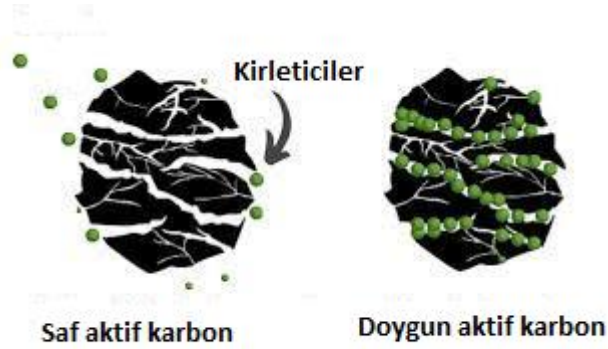
Adsorpsiyon süreci çözünmüş maddenin (adsorbat) öncelikle adsorbent etrafındaki sıvı film tabasını geçerek film difüzyonunu, sonrasında ise adsorbentın gözeneklerinin iç kısımlarına girerek partikül difüzyonunu gerçekleştirmektedir. Bu süreçlerin devamında da adsorbent üzerine adsorbat bağlanmaktadır (Şahin, 2009). Şekil 2.1'de adsorpsiyon sürecinin şematik görünümü mevcuttur.

Adsorpsiyonu etkilen faktörler; aktif karbonun özellikleri (partikül boyutu, yüzey alanı, porozite vb.), adsorbatın özellikleri (konsantrasyon, polarite, moleküler boyut vb.) ve işletme şartları (akış hızı, basınç, sıcaklık vb.) olarak sayabiliriz (Jaya Rajan & Indira Anish, 2022).



Şekil 2.1. Sıvı faz üzerinde adsorpsiyon süreci (Öztürk, 2017)

Adsorbent olarak özgül yüzey alanı 10 ile 1500 m²/g arasında değişen malzemeler kullanılabilir. Çoğunlukla kullanılan adsorbent malzemeleri; zeolit mineralleri, kil mineralleri, silika jel (SiO₂), perlit, reçineler, aktif alümina (Al₂O₃), ve aktif karbondur (Şekil 2.2) (Demir & Yalçın, 2014). Dünyada ve ülkemizde geniş yüzey alanına sahip ve adsorpsiyon kapasitesi yüksek olmasında dolayı en çok tercih edilen adsorbent maddesi aktif karbondur (Şekil 2.2) (Özkılıç, 2019).



Şekil 2.2. Aktif karbonun yapısı.

2.2. Aktif Karbon Rejenerasyon Yöntemleri

Aktif karbon, su ve atıksulardan organik madde uzaklaştırılmasında etkin bir yöntem olmasına rağmen sahip olduğu yüzey alanı sonludur ve işlemler sonrasında adsorbat ile doygunluk seviyesine gelmesi kaçınılmazdır. Bir yüzey giderim yöntemi olan adsorpsiyon işleminin bu aşamadan sonra gerçekleşmesi yavaşlar veya durur. Doygunluk seviyesine ulaşan aktif karbonun verimini artırmak için yenilenmesi gerekmektedir (Santos vd., 2022). Kullanılmış ve doygunluğa ulaşmış aktif karbonun değiştirilmesi yerine rejenerasyon edilmesi neticesinde atık malzeme oluşumunun azaltılması sağlanmış olacaktır. Böylelikle çevre kirliliği önlenmiş ve aktif karbon kaynakları korunmuş olur (Bunker vd., 2023). Rejenerasyon, aktif karbondaki adsorbatın çıkarılması için kullanılan bir işlemdir ve genellikle yüksek sıcaklık ve/veya buhar kullanılarak yapılır.

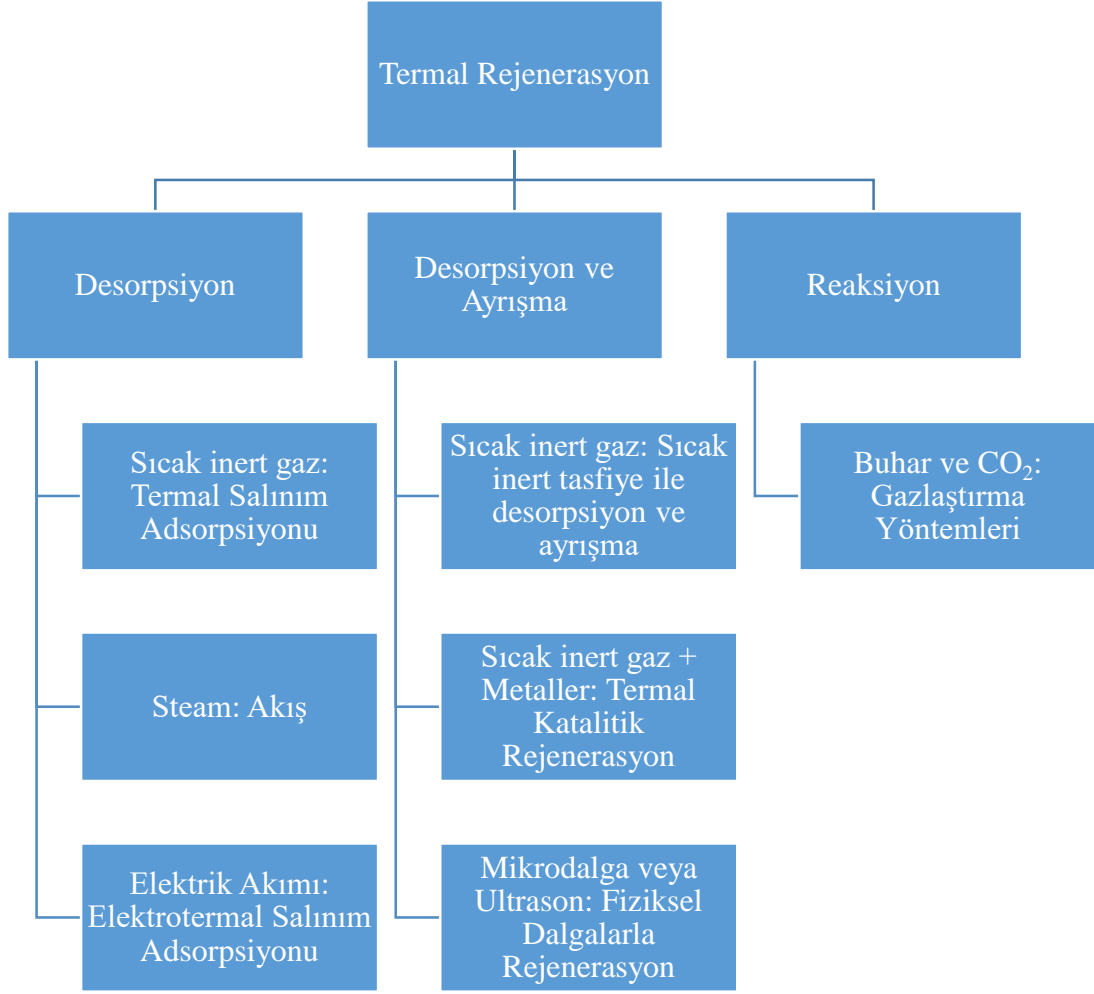
Doygunluğa ulaşmış aktif karbonun yeniden kullanılabilir olabilmesi için yüzeyindeki kirleticilerin ya tamamının ya da büyük bir çoğunluğunun giderilmesi gereklidir. İdeal bir rejenerasyon işleminde aktif karbon üzerindeki kirleticiyi tamamen yok etmeli ve aktif karbona her hangi bir zarar gelmemelidir (Narbaitz & Cen, 1994). Aktif karbon rejenerasyonu kirleticilerin giderilmesi için etkili bir yöntemdir, ancak uygun şekilde tasarlanmadığında veya işletilmediğinde, ekonomik veya çevresel sorunlara neden olabilir. Bu nedenle, aktif karbon adsorpsiyonunun temellerinin ve işletme koşullarının iyi anlaşılması çok önemlidir. Bu amaç için başta termal rejenerasyon olmak üzere birçok yöntem geliştirilmiştir. En çok tercih edilen yöntemler alt başlıklarda daha açık olarak ifade edilmiştir.

2.2.1. Termal rejenerasyon

Termal rejenerasyon yöntemi, adsorbentlerin yapısını bozmadan adsorbent üzerine adsorbe olmuş maddelerin 600 °C 'nin üzerinde (600-900 °C) sıcaklığa çıkarılmasına dayanmaktadır (Salvador vd., 2015). Bu yöntemle yüksek sıcaklıkta adsorbent üzerindeki uçucu organik maddelerin çoğu ve uçucu olmayan organik maddelerin bir kısmı giderilmektedir. Yöntem sonunda ortamdaki kirleticiler su ve CO₂ dönüşmektedir (El Gamal vd., 2018). Termal rejenerasyonun genel sınıflandırmaları Şekil 2.3 'de gösterilmektedir.

Bu yöntemin temel dezavantajları şöyle sıralana bilinir;

- Yüksek sıcaklık ve basınca ihtiyaç duyması (Salvador vd., 2013)
- Aktif karbonun % 5-10 arasında yük kaybına sebep olması (Ülkeryıldız Balçık vd., 2020)
- Yüksek enerji tüketimini sebep olduğu için maliyeti artırması (Panizza & Cerisola, 2004)
- Yerinde rejenerasyona imkân sağlamaması
- Kirlenici maddeler ve partikül maddelerin kontrolsüz bir şekilde çevreye salınması (El Gamal vd., 2018)
- Termal rejenerasyon yöntemi, yüksek sıcaklık ve enerji gerektirdiği için çevreye olumsuz etkileri olduğu düşünülmektedir. Elektrokimyasal rejenerasyonun gerçekleşmesi için daha düşük sıcaklığa ve daha az enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Bu da sürdürülebilirlik açısından önemli bir faktördür.



Şekil 2.3. Termal rejenerasyonun genel sınıflandırması.

2.2.2. Kimyasal rejenerasyon

Kimyasal rejenerasyon yöntemi, asidik veya alkali olan çözeltiler içerisinde kullanılmış aktif karbonun daldırılmasına dayanmaktadır (Lu vd., 2011). Aktif karbon miktarı işlem öncesinde ve sonrasında tartılarak ortamdan uzaklaştırılan kirletici kütle farkı ile ölçülür. Bu yöntemin verimi adsorbanların kimyasal çözeltilerle çözünürlüğüne bağlıdır. Adsorbe edilen kirleticiler adsorbent üzerinden giderildikten sonra adsorbent üzerindeki çözeltilerden de arındırılması gerekmektedir. Bu da ek bir maliyete sebep olmaktadır. Ayrıca çözelti içerisinde daldırıldığı için gözenekler içerisindeki kirleticilerin tam olarak giderimi söz konusu değildir (Mohammad, 2016). Yapılan çalışmalarda bu yöntemle gerçekleştirilen rejenerasyon verimliliğinin en fazla % 70 civarı olduğu belirtilmektedir (Zhang, 2002) .

2.2.3. Buhar rejenerasyon

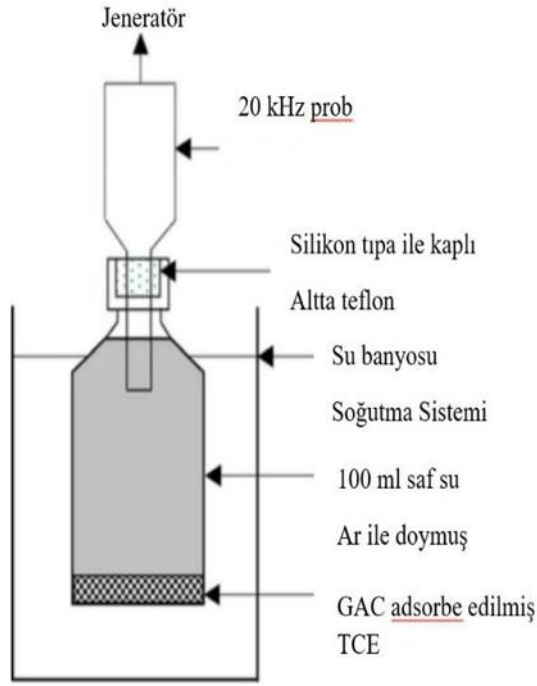
Bu yöntemde adsorban doğrudan hava, su veya süperkritik akışkan buharına maruz bırakılmaktadır (Shan vd., 2013). Yıllardır özellikle endüstride adsorbanların rejenerasyonu için yaygın olarak tercih edilmektedir. Atık su arıtma tesisinde doymuş aktif karbonun bu yöntemle rejenerasyonu aşağıdaki adımlarla gerçekleşir;

- (i) Aktif karbonun termal ayrışması,
- (ii) Buharla aktif karbonun oksidatif ayrışması,
- (iii) Adsorbatın buharlaşması veya süblimasyonu,
- (iv) Adsorbatın termal ayrışması ve karbonizasyonu,
- (v) Karbonize olmuş maddenin buharla oksidatif ayrışması (El Gamal vd., 2018).

Gerekli kurulum malzemeleri nedeniyle buhar rejenerasyonunun diğer yöntemlere göre daha ucuz olmasına rağmen sadece uçucu organik maddeleri aktif karbondan uzaklaştırmada etkili olmaktadır (Cabal vd., 2009).

2.2.4. Ultrasonik rejenerasyon

Şekil 2.3'de gösterilen ultrasonik rejenerasyon sistemi, desorpsiyon prosesi sırasında ikincil kimyasalların eklenmesini içermeyen temiz bir rejenerasyon sistemi olarak kabul edilir. Ultrasonik rejenerasyon mekanizması, kirletici maddeyi adsorban yüzeyden çıkaran bir akustik kavitezyon fenomeni olarak tanımlanır. Bu işlem, sulu ortama enerji dalgaları (kavitezyon açısından) gönderen ultrasonik bir sistem tarafından başlatılır. Bu enerji dalgaları, adsorbe edilen kirleticinin katıdan sıvı faza ekstraksiyonuna ve kütle transferine neden olan bir girdap olarak adsorban gözeneklerine yayılır. Ultrasonik rejenerasyonun, bir termal reaktör ile birleştirildiğinde desorpsiyon işlemlerinde daha verimli olduğu gösterilmiştir. Ultrasonik rejenerasyon yöntemi kullanılarak aktif karbon üzerindeki çözücülerin, organiklerin ve boyaların desorpsiyonu daha önce çalışılmıştır ve adsorban yenilenebilirliği yaklaşık % 65 olarak kaydedilmiştir (Mohammad, 2016).



Şekil 2.4. Aktif karbon rejenerasyonu için ultrasonik sistemin şematik diyagramı.

2.3. Elektrokimyasal Rejenerasyonun Temel Esasları

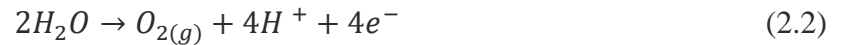
Elektrokimyasal teknolojiler, 1889 yılında İngiltere'de geliştirilmiş ve atık suyu arıtmak için elektrokoagülasyon yöntemi olarak kullanılmıştır. Bu yöntem temelde değerli maddelerin geri kazanımını amaçlamıştır. Yöntemin kullanımının artmasıyla beraber farklı elektrot malzemeleri kullanılarak daha da geliştirilmiş ve 20. yüzyılın başlarında sahada kullanılmaya başlanmıştır (Kannan vd., 2006).

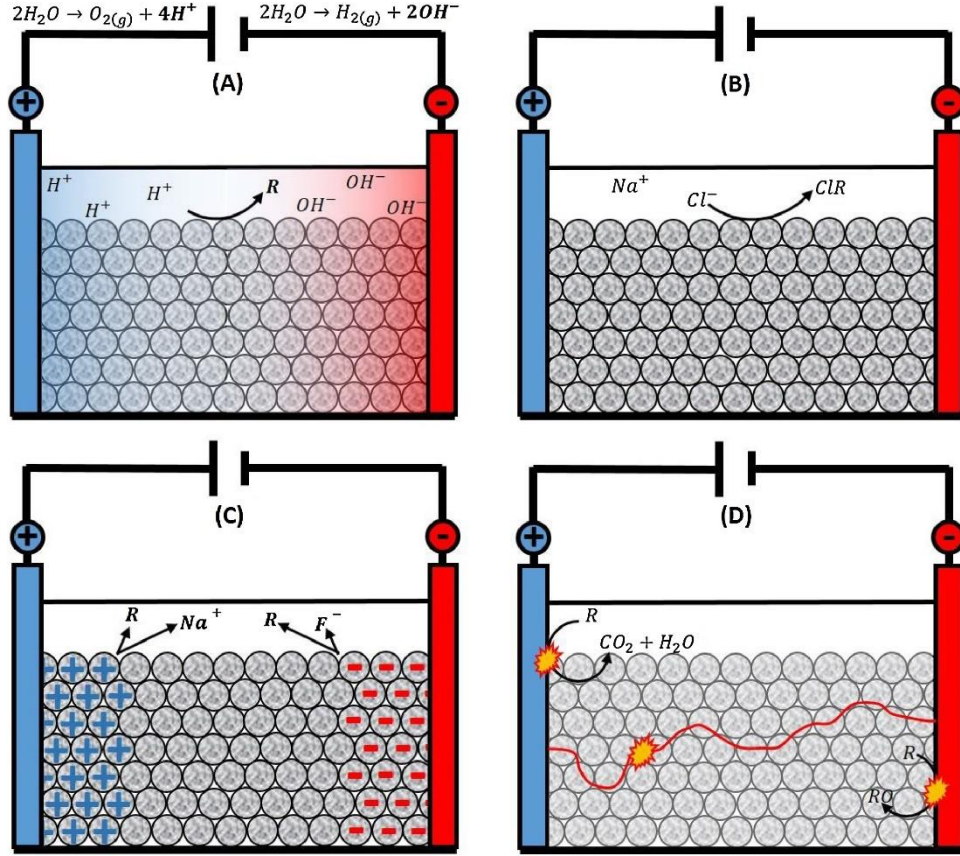
Günümüzde su ve atık su için elektrokimyasal arıtma prosesleri elektroflotasyon, elektrokoagülasyon ve elektrooksidasyon gibi teknikleri içermektedir. Ayrıca elektrokimyasal yöntem doymuş aktif karbonun rejenerasyonu içinde kullanılmaktadır. Elektrokimyasal rejenerasyonda, elektrokimyada olduğu gibi, aktif karbonun anot materyal gibi kullanımı aktif karbonun yüzeyinde tutulan kirleticilerin nihai ürünlere (CO_2 , H_2O vd.) dönüştürülerek uzaklaştırılması ve çevreye olacak kirlilik yükünün minimize edilmesi imkânını da sunmaktadır. Elektrokimyasal rejenerasyonun avantajlarından bazıları şunlardır: rejenerasyon oda sıcaklığında bile gerçekleştiği için daha az enerji tüketilir (Berenguer vd., 2010a) ve geleneksel yöntemlere kıyasla

rejenerasyon daha hızlı gerçekleşir (McQuillan vd., 2018). Diğer yandan yerinde rejenerasyon potansiyeli de kullan-rejenere et-kullan döngüsünü mümkün kılarak yüksek olan işletme maliyetini de çok düşük seviyelere indirgemesi mümkün görülmektedir. Elektrokimyasal rejenerasyon sürecini etkileyen faktörler: uygulanan akım, kullanılan elektrolit, pH, elektrotlar arası mesafe, uygulanan yük ve aktif karbonun elektrokimyasal reaktöre yerleştirilme şeklidir (W. Zhou vd., 2021).

Geleneksel rejenerasyon proseslerinin aksine elektrokimyasal rejenerasyon mekanizmaları elektrokimyasal sistemlerde elektrik alanı oluşturur (W. Zhou vd., 2021). Elektrokimyasal arıtma sisteminin diğer bir avantajı, geleneksel arıtma sistemine kıyasla çamur oluşturmaması ve düşük elektrik enerjisi tüketimidir. Elektrokimyasal proseste arıtma işlemi, kirletici oksidasyon veya redüksiyon yoluyla yok edildiğinden hücrenin anot ve katot arasındaki elektriksel alana bağlıdır (L. K. Wang vd., 2016).

Doymuş aktif karbon rejenerasyonu iki aşamada gerçekleşmektedir. Birincisinde, doymuş aktif karbon yüzeyinde desorpsiyon başlar ve aktif karbon yüzeyi tamamen kirleticiden arındırılana kadar devam eder (Şekil 2.5 (A)–(C)). Bu aşamada doğal pH 2.1. denklemin de gösterilen reaksiyona göre artabilir (Nienhauser vd., 2022). İkincisinde ise elektrotlarda ve aktif karbon boşluklarında meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonlarla kirleticilerin sistemden tamamen uzaklaştırılmasıdır (Şekil 2.5 (D)). Denklem 2.2’de ki reaksiyona göre kirleticilerin bozunma meydana gelebilir (Ersan vd., 2023). Kısaca, bozunma döngülerini tekrarlayarak, kirletici maddeler mineralleştirilebilir veya metan, H₂O ve CO₂ gibi nihai ürünlere indirgenebilir (Nienhauser vd., 2022). İdeal bir aktif karbon rejenerasyonu her iki aşamanın da gerçekleşmesiyle oluşur (McQuillan vd., 2018).





Şekil 2.5. Aktif karbonun elektrokimyasal rejenerasyonunda oluşan mekanizmaları. (McQuillan vd., 2018).

Genel olarak, çoğu elektrokimyasal arıtma hücresi, elektrotların ve katotların bir arada bulunması gibi ana unsurları birleştirerek yerinde çalışmayı kolaylaştırır.

Elektrokimyasal arıtma süreci, diğer atık su arıtma mekanizmalarına göre daha az toksik ve çevre dostu olarak kabul edilir çünkü kirleticileri katı atık oluşturmadan CO_2 ve H_2O 'ya oksitlemektedir. Elektrokimyasal arıtmayı araştıran çeşitli çalışmalar dikkate değer sonuçlar ortaya koymuştur (Feng vd., 2013). Elektrokimyasal arıtma yöntemleri kullanılarak kirleticilerin giderilmesi ve suyun arıtılması, adsorpsiyon ile geliştirildiğinde umut verici sonuçlar göstermiştir. Elektrokimyasal oksidasyon, daha önce ileri oksidasyon prosesleri yönteminde gösterildiği gibi hem atık su arıtımında hem de adsorban rejenerasyonunda kabul edilebilir (Mohammad, 2016). Örneğin Berenguer ve arkadaşların 2010 'da yaptıkları çalışma da fenol ile doyurulmuş aktif karbonun rejenerasyonu için termal, kimyasal ve elektrokimyasal rejenerasyon yöntemleri

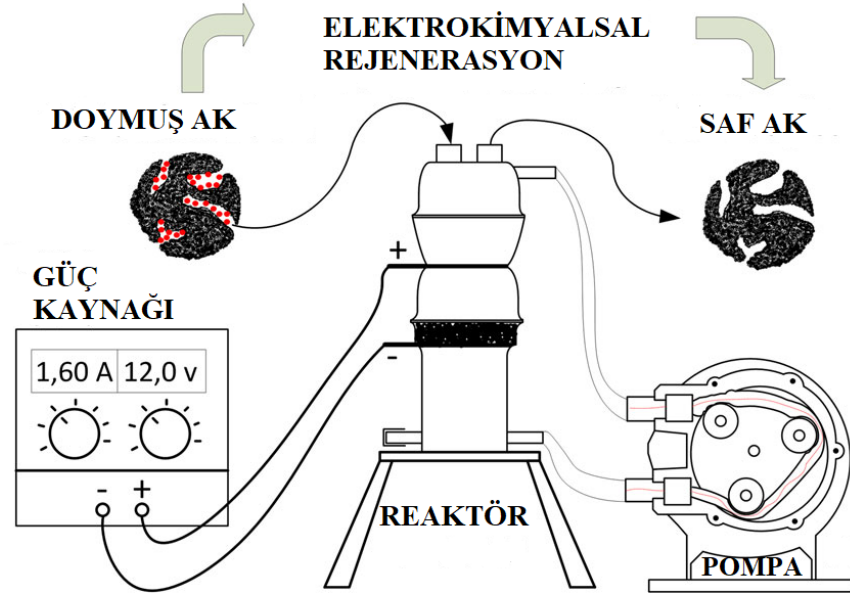
karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda termal, kimyasal ve elektrokimyasal rejenerasyon için ortaya koydukları gözlemleri şunlardır;

- Elektrokimyasal rejenerasyon aktif karbonun rejenerasyonu için kullanılabilir en etkili rejenerasyon yöntemi olduğu sonucuna varmışlardır. Çünkü 3 saatlik kısa bir sürede hem % 84 giderim verimine ulaşmıştır hem de aktif karbonun yapısında bozulma meydana gelmemiştir.
- Termal rejenerasyonda da elektrokimyasal rejenerasyon ile aynı giderim sonuçları elde edilmiş olsa da bu verimi elde edebilmek için 450-600 °C 'lik sıcaklığa çıkarılması gerektiğini ifade etmişlerdir.
- NaOH kullanılarak gerçekleştirilen kimyasal rejenerasyonda ise giderim veriminin % 60 'ın altında olduğu için diğer iki yöntemle göre daha az etkili olduğunu ortaya koymuşlardır.
- Aktif karbonu kullanan endüstriyelere için elektrokimyasal rejenerasyonun kullanımına yararlı olacağını ifade etmişlerdir (Berenguer vd., 2010b).

2.4. Literatürde Elektrokimyasal Yöntemle Aktif Karbon Rejenerasyonu

Aktif karbonun elektrokimyasal rejenerasyonu sağladığı kolaylıklardan dolayı uzun süredir araştırılmaktadır. Özellikle gelişen teknolojiyle beraber hem rejenerasyon verimi artmıştır hem de maliyetin giderek daha da düştüğü gözlemlenmiştir. Diğer yöntemlerin dezavantajları göz önüne alındığında aktif karbonun rejenerasyonu için elektrokimyasal yöntemle doğru eğilim başlamıştır.

Zanella ve arkadaşları (2017), fenol ile doyurulmuş aktif karbonun elektrokimyasal yöntemle rejenerasyonunu amaçlamışlardır. Şekil 2.6'da ki proses için optimum şartları yaptıkları denemeler sonucunda; akımı 1.6 A, NaCl konsantrasyonunu % 3 (w/w), rejenerasyon süresini 120 dakika olarak tespit etmişlerdir. Bu şartlar altında rejenerasyon verimini % 100 bulmuşlardır (Zanella vd., 2017).



Şekil 2.6. Aktif karbonun elektrokimyasal rejenerasyon prosesi (Zanella vd., 2017)

Başka bir araştırmada, çinko ile doyurulmuş granül aktif karbonunun (GAK) elektrokimyasal rejenerasyon ve asit yıkama (kimyasal rejenerasyon) yöntemleriyle karşılaştırılmasını amaçlamışlardır. Bu iki yöntem ile yapılan çalışmalarda optimum şartlar altında giderim verimleri sırasıyla % 88 ve % 25,3 olarak bulunmuştur. Bu bulgular sonucunda GAK rejenerasyonu için elektrokimyasal yöntemin daha etkili ve uygun olduğu ifade etmişlerdir (Weng vd., 2014).

Zhou ve arkadaşları (2019)'da reaktif mavi 19 yüklü GAK rejenerasyonu için düşük bakım gerektiren, "kendi kendini temizleyen" bir elektrokimyasal yaklaşımı değerlendirmişlerdir. Bu amaçla, Ti/karışık metal oksit (Ti/KMO) anot kullanılarak kesikli deneyler gerçekleştirmişlerdir. Sonuçları uzun süreli elektrokimyasal işlemin (12 saat boyunca), % 88,7'ye kadar rejenerasyon verimliliği sağlayacağını göstermiştir. Adsorpsiyon-rejenerasyon döngüsünü 10 kez tekrar etkilerinde bile ulaştıkları rejenerasyon verimi % 52,3'tür (W. Zhou vd., 2019).

Gomez ve arkadaşları (2021) yılında yaptıkları çalışmada içme suyu arıtma tesisinden elde ettikleri doymuş aktif karbonu Pt/Ti anot ve Pt/Ti ve paslanmaz çelik katot kullanarak 6 gramlık ve 3,5 kilogramlık iki farklı reaktörde elektrokimyasal olarak rejenerasyonunu araştırmışlardır. Reaktörlerin farklı konfigürasyon ve akım

yoğunluğunu incelemişlerdir. Sonuç olarak 6 g'lık reaktörde 0,05 M H₂SO₄ kullanıldığında 8 saatin sonundaki rejenerasyon verimini % 96 olarak bulmuşlardır. 3,5 kg'lık reaktörde ise rejenerasyon verimini % 95 olduğunu ifade etmişlerdir ve aktif karbonun elektrokimyasal rejenerasyonu termal rejenerasyona göre daha ucuz ve daha sürdürülebilir olacağını vurgulamışlardır (Ferrández-Gómez, Ruiz-Rosas, vd., 2021)

Su arıtma tesisinden elde edilen doymuş aktif karbonun elektrokimyasal rejenerasyonu araştıran bir diğer çalışmada Ferrandez ve arkadaşlarının 2021 yılında yaptıkları araştırmadır. Doymuş aktif karbon ağırlığı 10 ve 15 kg'dır. Her iki durumda da optimum şartlar da rejenerasyon verimi yaklaşık % 95 olarak elde etmişlerdir. Bu sonuç ile gelecekteki endüstriyel uygulamalar için termal rejenerasyona alternatif olarak umut verici bir ölçeklendirme seçeneği sunduğunu ortaya koymuşlardır. Çalışmada ayrıca Pt/Ti, RuO₂/Ti ve IrO₂/Ti anotları arasında bir karşılaştırma yapılmış ve test edilen anotlar arasında önemli bir fark olmadığını ifade etmişlerdir. RuO₂/Ti ve IrRO₂/Ti, ekonomik bir alternatif olarak Pt/Ti anodunun yerine kullanılabileceğini önermişlerdir (Ferrández-Gómez, Cazorla-Amorós, vd., 2021).

Doymuş karbon fiber kumaşın (KFK) elektrokimyasal rejenerasyon verimi üzerine anot ve katot bölgelerinin etkisi incelemek için Santos ve arkadaşları 2022 'de çalışma yapmışlardır. Rejenere edilen KFK daha sonra Metilen mavisi (MM) ile adsorpsiyon deneyleri yapılarak rejenerasyon verimlerini değerlendirmiş ve adsorbent karakteristiğindeki değişiklikleri rejenerasyon öncesi ve sonrası yapılan FTIR, BET, optik mikroskopi (OM) ve SEM ile analiz etmişlerdir. KFK 0,1 A akımda sırasıyla anodik ve katodik akımlara maruz bırakıldığında yaklaşık % 79 ve % 84 maksimum verim elde etmişlerdir. Ayrıca, adsorbent 2 saat boyunca 0,1 A akımda katodik işleme adsorpsiyon-rejenerasyon döngüleri boyunca stabilite göstermiş ve malzemenin adsorpsiyon kapasitesi 8 ardışık döngü sonunda neredeyse % 80 civarında geri kazanmışlardır. Sonuç olarak katodik işlemin daha yüksek ve uzun süreli verimliliğini açıklamaya izin verdiği sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca, araştırmada elektrik enerji tüketimi katodik ve anodik için sırasıyla 2,3 ve 2,1 kWsa/kg olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, elektrokimyasal yöntemin karbon adsorbanları birkaç arıtma döngüsü için yeniden kullanılabilir hale

getirebilen ekonomik ve çevresel açıdan uygun bir teknik olduğunu göstermişlerdir (Santos vd., 2022).

Acuna ve arkadaşlarının 2020 yılında yaptıkları çalışmada metilen mavisi ile sentetik olarak doyurulan granül aktif karbonun rejenerasyonu için elektrokimyasal bir prosesin performansını bor katkılı elmas anotlar kullanmışlardır. Reaktörde üç farklı konfigürasyon test etmişler: 1) akışkan yatak, 2) bölünmüş hücreli dolgulu yatak ve 3) bölünmemiş hücreli dolgulu yatak. Çalışmada elektrolit olarak 0,1 M NaCl kullanılmış ve elektrokimyasal rejenerasyona etkisi olduğu düşünülen üç parametrenin etkileri değerlendirmişler: akım yoğunluğunu, başlangıç pH'sını ve rejenerasyon süresini. En iyi sonuç bölünmüş hücreli dolgu yataklı reaktörde 24 saat rejenerasyon süresinde ve 6 mA/cm² akım yoğunluğunda % 76 olduğunu ortaya koymuşlardır. Çalışmada bir diğer değinilen husus ise elektrik enerji tüketim hesabıdır. Bir ton başına saatte 1530 kW enerjisi tüketimi elde etmişlerdir (Acuña-Bedoya vd., 2020).

Bor katkılı elmas anot kullanılan bir diğer inceleme ise Xing ve arkadaşlarının 2023 yılında yaptıkları çalışmadır. Granüler aktif karbonu p-nitrofenol (p-NO₂) ile doyurulmuş ve elektrokimyasal rejenerasyonun etkisi ortaya koymuşlardır. Araştırmada akım yoğunluğu, rejenerasyon süresi, pH değeri, elektrolit konsantrasyonu ve akış hızı gibi parametreler sistematik olarak incelemişlerdir. Optimize edilmiş deneysel koşullar altında, GAK'ın rejenerasyon verimliliği, beş kez adsorpsiyon-rejenerasyon döngüsünden sonra önemli bir düşüş olmadığını ifade etmişlerdir. Farklı anot malzemelerinin rejenerasyon süreci üzerindeki etkileri analiz edilmiş ve BDD anodunun, PbO₂, SnO₂ ve Pt anotlara kıyasla üstün performans gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Sonuç olarak akım yoğunluğu 25 mA/cm², rejenerasyon süresi 60 dk, pH değeri 12, elektrolit konsantrasyonu 0,1 M ve akış hızı 150 ml/dk olarak optimize edilen deneysel koşullar altında RE % 81,6 olarak elde etmişlerdir. BDD anot sisteminde elektrokimyasal rejenerasyonun pratik uygulamalar için büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermişlerdir (Xing vd., 2023).

Aktif karbonun elektrokimyasal yöntemle rejenerasyonunu amaçlayan başka bir çalışmada Cardoso ve arkadaşlarının (2023) yaptıkları incelemedir. Anot olarak bor

katkılı elmas katot olarak ise paslanmaz çelik kullanmışlardır. Aktif karbon kafein ile doyurulduktan sonra optimum şartlar (0,01 M NaCl, 0,05A ve 48 saat) altında % 87 'lik bir giderim verimine ulaşmışlardır. Beş kez tekrarlanan adsorpsiyon-rejenerasyon döngüsü sonrasında % 80'lik rejenerasyon verimini tespit etmişlerdir. Son olarak, elektrokimyasal rejenerasyon sırasında oluşan ara ürünleri de tanımlamışlardır. Bu çalışma ile kafeine doymuş bir AK'nın elektrokimyasal rejenerasyonu için gerçek bir alternatif olduğunu göstermişlerdir (Cardoso vd., 2023).

Bor katkılı elmas ve paslanmaz çelik elektrotlarının sırasıyla anot ve katot olarak kullanıldığı diğer bir araştırmada Alvarez ve arkadaşları (2019) tarafından yapılmıştır. GAK diklofenak ile doyurulmuş ve elektrolit olarak 0,1 M Na₂SO₄ kullanmışlardır. En iyi verimi 20 mA/cm² akım yoğunluğunda 5 saatlik rejenerasyon süresinde % 87 olarak tespit etmişlerdir. Beşinci döngü sonunda rejenerasyon verimini % 83 olduğunu ifade etmişler. Buna ek olarak enerji tüketimi ve arıtma maliyeti sırasıyla 3,8 kWsa/kg ile 0,25 kg/GAK \$ olarak hesaplamışlardır (Alvarez-Pugliese vd., 2019).

Ye ve arkadaşlarının 2022'de yaptıkları çalışmada 9,10-antrakınon-2-sülfonik asit/polipirol modifiye grafit plaka (AQS/PPy-GP) katot kullanılarak elektrokimyasal bir rejenerasyon sisteminde Rhodamine B (RhB) doyurulmuş GAK rejenerasyon verimliliği araştırmışlardır. Rejenerasyon parametrelerini optimize etmek için Box-Behnken tasarımına dayalı yanıt yüzeyi yöntemini kullanılmış ve bağımsız değişkenlerin optimum koşullarını ortaya koymuşlardır. Çalışmada ortaya çıkan optimum koşullar altında; uygulanan akım: 155 mA, destekleyici elektrolit konsantrasyonu: 0,13 M ve rejenerasyon süresi: 7 saat sonundaki rejenerasyon verimini % 81,6 olarak tespit etmişlerdir. Sekizinci rejenerasyon - adsorpsiyon döngünün sonucunda rejenerasyon verimliliği % 76,6 olarak bulmuşlardır. Böylece bu araştırma ile AQS/PPy-GP katoda dayalı elektrokimyasal rejenerasyon, doymuş aktif karbonların arıtılmasında pratik endüstriyel uygulamalara sahip olabileceğini ifade etmişlerdir (Ye vd., 2022).

Liu ve arkadaşlarının 2020'de yaptıkları çalışmada fenol ile doyurulmuş aktif karbon fiberin yeni bir elektro-peroksidisülfat (E-PDS) işlemiyle rejenerasyonunu araştırmışlardır. Geleneksel elektrokimyasal rejenerasyonla karşılaştırıldığı zaman bu

işlemlerle daha düşük enerji tüketimi elde etmişlerdir. Hem anot hem de katot olarak Pt kaplı titanyum (5 cm x 3,5 cm) kullanmışlardır. Geleneksel elektrokimyasal rejenerasyonda elektrolit solüsyonu olarak Na₂SO₄ (0,20 M), elektro-peroksidisülfat rejenerasyonunda elektrolit solüsyonu olarak peroksidisülfatla gerçekleştirmişlerdir. Tüm deneyler sabit sıcaklık (298 K) ve 800 rpm altında yapmışlardır. Bununla birlikte, aktif karbon fiberin adsorpsiyon kapasitesi, E-PDS işlemindeki üç rejenerasyon döngüsünden sonra % 40 'ın üzerinde olduğunu ifade etmişlerdir. Bu nedenle, E-PDS süreci, organik kirleticilerle doymuş karbonların yenilenmesi için potansiyel olarak uygulanabilir bir yaklaşım olarak daha fazla değerlendirme için umut vaat ettiği sonucuna varmışlardır (Liu vd., 2020).

Zhang (2002) de yaptığı çalışmada hindistan cevizinden elde edilmiş aktif karbonu fenol ile doydurmuş ve elektrokimyasal olarak rejenerasyonunu için optimum şartları araştırmışlardır. 1,8 cm elektrot mesafesinde, 50 mA, % 1 NaCl elektrolit konsantrasyonu ve 5 saatlik rejenerasyon süresinin en iyi giderim verimine ulaşmışlardır (% 85,2). Yaptığı çalışmanın deneysel sonuçları elektrokimyasal yöntemin fenol ile doymuş aktif karbonu rejenere etmek için kullanılabileceğini göstermişlerdir. Ayrıca elektrokimyasal rejenerasyon verimliliğinin; elektrolit konsantrasyonu, rejenerasyon akımı yoğunluğu ve rejenerasyon süresi gibi çeşitli işletim değişkenlerine bağlı olduğunu ifade etmişlerdir (Zhang, 2002).

Karabacakoğlu ve Savlak (2014)'ın yaptıkları araştırmada Cr(VI) ile doymuş granül ve toz aktif karbonların rejenerasyonunu elektrokimyasal yöntemle ile gerçekleştirmişlerdir. Hücre voltajı, elektrolit konsantrasyonu, pH ve rejenerasyon süresi gibi çalışma parametrelerinin rejenerasyon verimliliği ve enerji tüketimi üzerindeki etkilerini belirlemişlerdir. İzoterm deneylerinin verileri Langmuir, Freundlich ve Redlich-Peterson modellerine uygunluğunu incelemişlerdir. Saf ve rejenere aktif karbonların yüzey karakterizasyonu BET, SEM ve Boehm titrasyon yöntemleri kullanılarak araştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda her iki karbonunda Langmuir izoterm modeline uyum sağladığı ifade edilmişlerdir. Çalışmadaki elektrokimyasal rejenerasyonun optimum şartları; 1.5 V, % 2 NaCl ve pH 3,6 olarak tespit etmişler ve bu sonuçlara göre her iki aktif karbonun rejenerasyon verimini % 70 olarak tespit etmişlerdir. Ayrıca optimum rejenerasyon

koşullarında toz aktif karbon ve granürel aktif karbon için enerji tüketimlerini sırasıyla 0,182 ve 0,131 kWsa/kg olarak hesaplamışlardır (Karabacakoğlu & Savlak, 2014).

You ve arkadaşlarının 2013'te yaptıkları çalışmada etilendiamin tetraasetik asit (EDTA) ile doyurulmuş aktif karbonun elektrokimyasal olarak rejenere edilmesi için optimum şartların belirlemesini üç boyutlu bir reaktörde incelemiştir. Yaptıkları çalışmanın sonucunda çalışmanın optimum koşullarını; 100-300 mA akım yoğunluğu, 1,39 mS/cm elektrik iletkenliği, 60 dakika elektroliz süresi ve pH 6-8 olarak tespit etmişlerdir. Optimum şartlar altında rejenere edilmiş aktif karbon % 95'lik toplam organik karbon giderim sağladığını ifade etmişlerdir. Aktif karbon içerisinde adsorbe olan EDTA'nın glisine dönüştüğü ve adsorpsiyon-rejenerasyon döngüsünün birçok kez tekrarlanmasından dolayı aktif karbonun adsorbent özelliğinin bozulduğu kanısına varmışlardır (You vd., 2013).

Weng ve Hsu (2008) yılında yaptıkları araştırmada atık su arıtma tesisinden elde edikleri granüler aktif karbonun elektrokimyasal olarak rejenerasyonunu araştırmışlardır. Çalışma kapsamında rejenerasyon süresi, voltaj gradyanı ve elektrolit gibi rejenerasyon parametrelerinin etkilerini incelemiştir. Elektrokimyasal rejenerasyonunun performansını, MM adsorpsiyon testleri ile değerlendirmişlerdir. Voltajın artırılması ve rejenerasyon süresinin uzatılması rejenerasyon verimliliğini artırdığı ifade etmişlerdir. Çalışmada optimum koşulları: 0,1 M NaCl, 24 saat ve 5 V/cm olduğunu tespit etmişlerdir. Optimum koşullar altındaki giderim verimini ise % 91,1'dir. Enerji tüketim maliyetinin ise 39 ABD \$/ton olarak bulmuşlardır ve bu maliyet ile termal, ultrasonik ve kimyasal rejenerasyonlarıyla karşılaştırmışlardır, elektrokimyasal rejenerasyonun etkili ve ekonomik olduğunu ortaya koymuşlardır (Weng & Hsu, 2008).

3. MATERYAL ve METOD

3.1. Materyal

3.1.1. Aktif karbonun hazırlanışı

Çalışmada hem saf aktif karbon hem de piyasadan doygun olarak elde edilmiş aktif karbon kullanılmıştır. Saf aktif karbon ilk önce elendi daha sonra saf suyla iyice yıkanarak kuruyana kadar oda sıcaklığında bekletildi, doymuş aktif karbonun ise hiçbir işlem yapılmadan sadece içerisindeki çakıl taşlarından ayıklanarak direk olarak deneylerde kullanılmak üzere hazır hale getirildi. Burada saf aktif karbon kurutulurken termal etkilerden kaçınmak adına herhangi bir ısı işlem uygulanmamıştır.



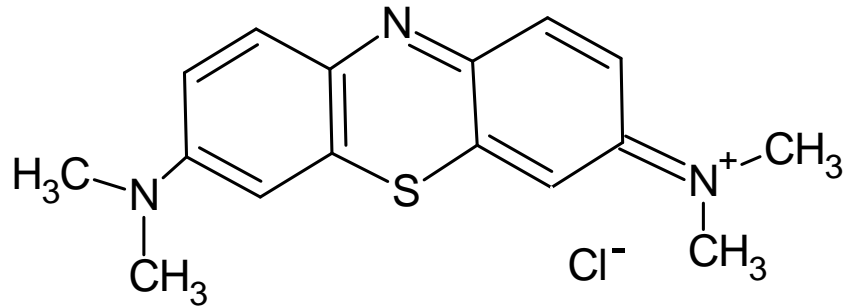
Şekil 3.1. Piyasadan elde edilen kirli aktif karbon

3.1.2. Çalışmada kullanılan metilen mavisinin özellikleri

Çalışmadaki adsorpsiyon deneylerinde analitik saflıkta olan Fluka markasına ait Metilen Mavisi boyası tercih edilmiştir. Metilen mavisinin kimyasal formülü $C_{16}H_{18}ClN_3S$ olup moleküler yapısı Şekil 3.2’de görülmektedir. Metilen mavisini genel olarak yün, ipek, pamuk, deri ve kâğıt gibi malzemelerin boyanması için boya sanayisinde (Özüsoy, 2022),

beton ve harç kalite kontrol testlerinde renklendirici olarak beton ve harç kalite kontrolünde, bakteriyel enfeksiyonların teşhisi ve DNA boyama işlemleri için biyoloji ve tıpta ve yeni oluşan balık yumurtalarının mantar ve bakterilerden korunması için kullanılmaktadır (Sakin & Dilekoğlu, 2018). Ayrıca adsorpsiyon denemelerinde metilen mavisinin tercih edilmesi sebepleri şöyle sıralanabilir;

- Görsel olarak kolayca tespit edilebilen mavi bir renge sahip olması böylelikle görsel olarak izlenebilirliğini kolaylaştırması,
- Geniş yüzey alanına sahip adsorbanlarla etkileşime girerek yüksek miktarda adsorbe edilebilir olması,
- Birçok adsorbanın yüzeylerine kolayca tutunabilme yeteneğine sahip olması,
- Kolayca temin edilebilir ve ekonomik bir bileşik olması (Baytar & Ceyhan, 2018).



Şekil 3.2. Metilen mavisinin moleküler yapısı

3.1.3. Sn/Sb/Ni/ ile kafesin kaplanması ve katodun hazırlanışı

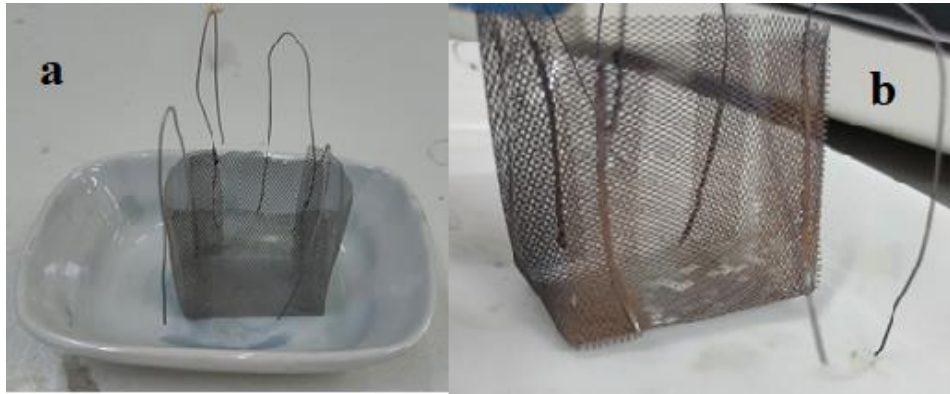
Aktif karbonun içine bırakılan kafes için titanyum telden 2,5 x 4 x 4 cm ölçülerinde kesilerek dikdörtgen haline getirilen malzeme dört bir köşesinden titanyum tel ile puntalandı (Şekil 3.3). Titanyum tel örgüsünden dikdörtgen (5 x 5 cm) olarak kesilen malzeme tam orta noktasından titanyum tel ile puntalandı. Üzerindeki kirden arındırılmak için puntalama işlemi sonrasında % 10'luk oksalik asitte 30 dakika boyunca bekletildi, daha sonra ultra saf suyla yıkandı ve ultrasonik banyoda 1-1,5 dakika boyunca bekletildi.

Kafes kaplama prosesi ise 500:8:1 molar oranındaki Sn/Sb/Ni/ piroliz solüsyonu içinde 2 dakika bekletildikten sonra önceden ısıtılarak 103 °C ye getirilen etüvde 15 dakika

bekletildi. Etüvden çıkan örgüler 520 °C dereceye ayarlı olan kül fırınına atıldı ve 15 dakika bekletildi. İlk kaplama döngüsü titanyum örgüler fırında 20 dakika beklemişken diğer döngülerde 15 dakikadır. Kaplama işlemi tamamlanabilmesi için döngü 20 kez tekrarlandı. Son döngüde ise kül fırında 75 dakika muamele edildi. İlk döngüsünü tamamlayan anot kafesinin görünümü Şekil 3.4'te gösterilmektedir. Ayrıca Sn/Sb/Ni/ ile kaplanma sonrasındaki 1, 5, 10, 15 ve 20. döngülerdeki ağırlıkları Çizelge 3.1. de gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Kaplama işlemine hazırlanan Sn/Sb/Ni kafesi

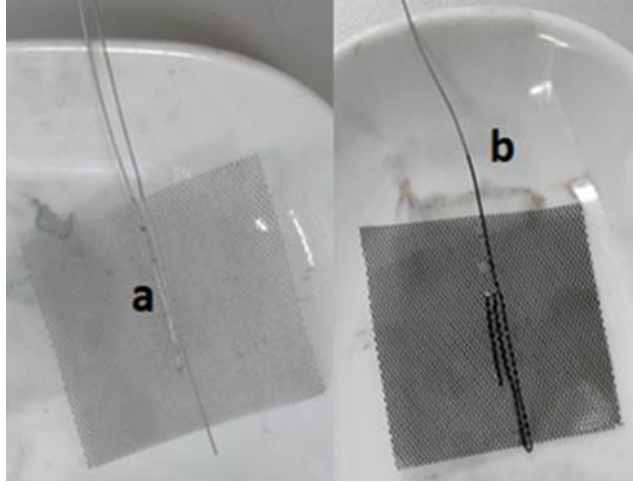


Şekil 3.4. a) kaplanmamış Sn/Sb/Ni kafesi, b) kaplanmasını tamamlanan Sn/Sb/Ni kafesi

Çizelge 3.1. Sn/Sb/Ni ile kaplanan kafesin ağırlıkça artışı.

Döngü Sayısı	Ağırlık(g)
1	1,330
5	1,339
10	1,359
15	1,483
20	1,580

Katot kaplama prosesi ise 5 x 5 cm ebatlarında kesilen titanyum tel kurşun asetat ve kloroplatinik asit ile hazırlanmış solisyon içerisinde creadle ile koyulur ve mavi uç katoda kırmızı uç creadle bağlanır. 3 dakika 0,68 A'de 2 dakika 1,36 A'de akım verilir ve 105 °C deki etüvde 2 dakika durduktan sonra 550 °C de ısıtılmış kül fırında 75 dakika bekletildi. Kaplanmış ve kaplanmamış katot arasındaki fark Şekil 3.5'te belirtilmiştir.



Şekil 3.5. a) kaplanmamış katot malzemesi (Ti), b) kaplanmasını tamamlanan katot malzemesi (Pt/Ti)

Çizelge 3.2. Kaplanan katodun ağırlıkça artışı

Katot Kaplaması	İlk Tartım(g)	İkinci Tartım(g)
Katot	0.4329	0.4485

3.1.4. Çalışmada kullanılan kimyasallar

Anot ve katot kaplanmasında, pH ayarlanmasında (NaOH, H₂SO₄) ve elektrolit için kullanılan bütün kimyasallar analitik saflıkta ve Merck markadır. Aktif karbonu doyurmak için kullanılan metilen mavisi boya analitik saflıkta ve Fluka markadır. Çalışma boyunca çözeltilerin hazırlanması, seyreltmelerin yapılması ve analizler için ise ultra saf su kullanılmıştır.

3.1.5. Deney Sistemi

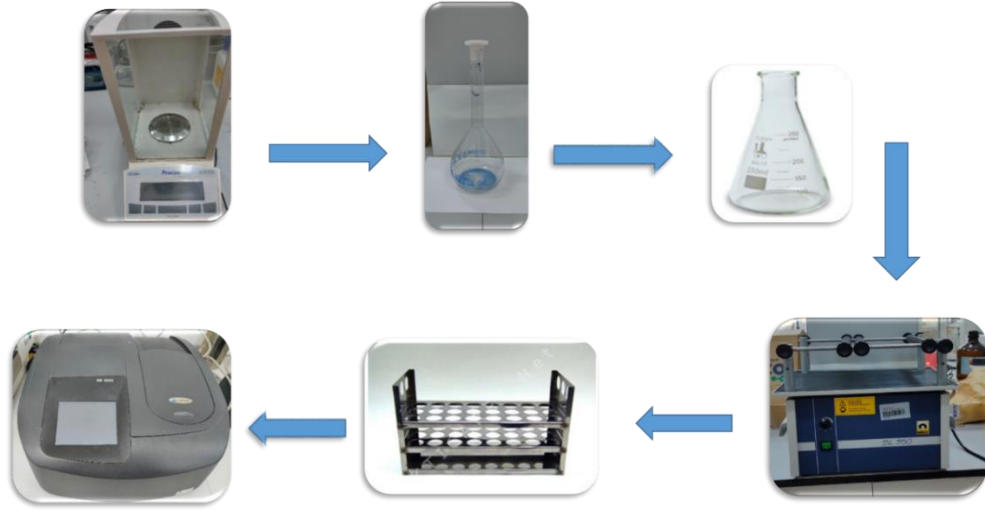
Adsorpsiyon Çalışmaları

Adsorpsiyon denemeleri kesikli çalışan bir sistemde (Şekil 3.6) tartma (Precisa XB 220 A) , karıştırma ve spektrofotometre (Hach Lange DR5000) de okuma işlemlerine tabi tutularak yürütüldü. Deneylerde boya çözeltileri hazırlamak için hassas terazide ölçülen 1 gramlık metilen mavisi 1 litrelik balon jöjeye konularak üzeri saf suyla tamamlanıp, stok çözeltisi hazırlanmıştır. Çözeltiden alınan örnekler çalışılması planlan konsantrasyon değerlerine ultra saf su ile seyreltilerek elde edilmiştir. Giderim verimi hesabı aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır.

$$Giderim Verimi(\%) = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100 \quad (3.1)$$

C_0 ve C_t başlangıç ve t anındaki metilen mavisinin konsantrasyonları (mg/L).

Aktif karbon doygunluğu ve giderim veriminin tespiti için adsorpsiyon deneyleri, kontrollü sıcaklık ve karıştırma hızı altında bir orbital çalkalayıcı üzerinde çalkalanan 250 ml'lik erlenler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 12,5 mg/L'lik konsantrasyona sahip metilen mavisi çözeltisine 0,5 g aktif karbon ilave edilmiş ve karıştırma başlatılmıştır. 15, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180 ve 210 dakikalarda örnekler alınarak 664 nm dalga boyunda spektrofotometre yardımıyla okunmuştur.



Şekil 3.6. Kesikli adsorpsiyon sistemi

Elektrokimyasal Rejenerasyon Çalışmaları

Şekil 3.7’de düzeneği ve Şekil 3.8’de şematik görünümü olan sistemde deneysel çalışmalar 250 ml hacme sahip beher içerisine 200 ml elektrolit, kafes hücresi ve katot plaka yerleştirilerek gerçekleştirilmiştir. Kafes şeklinde tasarlanan anot hücresi içerisine 13 gram metile mavisiyle doyurulmuş veya piyasadan doygun olarak elde edilmiş aktif karbon konulmuştur.

Beher içerisine seçilen elektrolit türünde ve konsantrasyonunda hazırlanmış çözelti ilave edilmiştir. DC güç kaynağı (0–30 V gerilim ve 0–3 A akım ayarlı, WON ODP3033) sabit akıma ayarlanmıştır. Homojenizasyon, beher içerisine atılan manyetik balık karıştırıcı ile sağlanmıştır. Rejenerasyon deneyleri boyunca çalışma bu şekilde devam ettirilmiştir.

Rejenerasyon verimini hesaplamak için aşağıdaki denklemden yararlanılmıştır (Acuña-Bedoya vd., 2020).

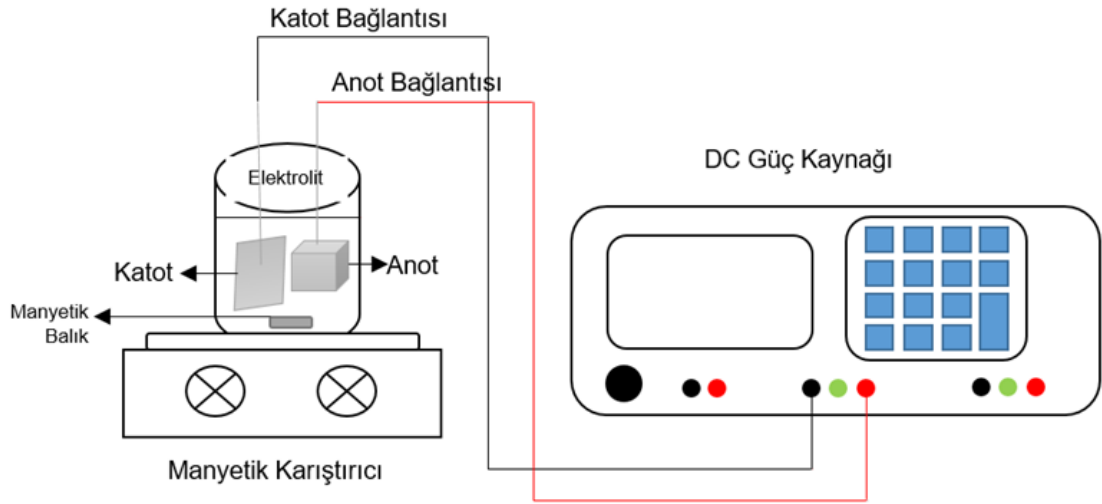
$$RE(\%) = \frac{q_r}{q_i} \times 100 \quad (3.2)$$

RE , Rejenerasyon verimi, q_r ; Elektrokimyasal rejenerasyondan sonra aktif karbonun adsorpsiyon kapasitesi, q_i ; İşlenmiş aktif karbonun adsorpsiyon kapasitesi.

Ayrıca tüm deneylerde rejenerasyon verimi ortaya konulurken sadece elektrolitin etkisini ortaya koymak için 200 ml elektrolit içerisine aynı şartlarda 13 g doymun aktif karbon atılarak deneyler yürütülmüştür (Şekil 3.7 b).



Şekil 3.7. Elektrokimyasal deney düzeneği a) doymun aktif karbonun elektrokimyasal rejenerasyonu, b) sadece elektrolit etkisiyle gerçekleşen doymun aktif karbon rejenerasyonu

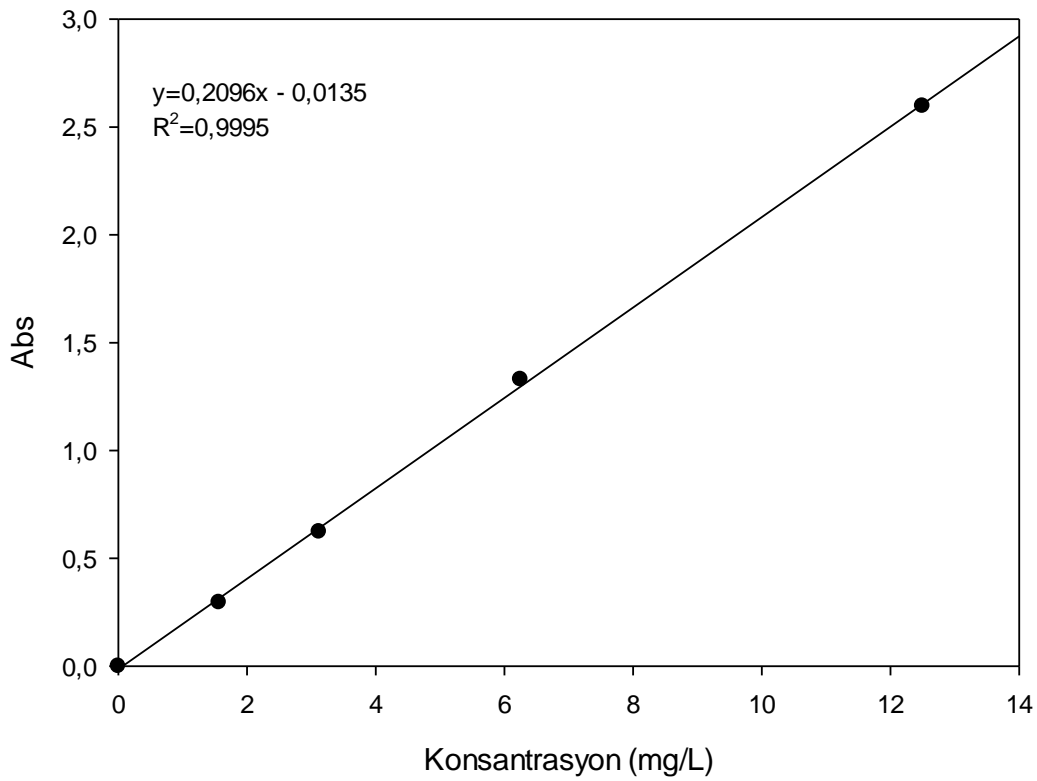


Şekil 3.8. Elektrokimyasal deney düzeneğinin şematik görünümü

3.2. Metod

3.2.1. Metilen mavisinin dalga boyunun tespiti

1000 mg/L'lik stok çözeltisinden seyreltilerek hazırlanan 1,25 mg/L, 2,5 mg/L, 5 mg/L, 10 mg/L ve 12,5 mg/L çözeltilerle uygun okuma dalga boyunu belirlemek için spektrofotometrede okutulmuştur. Spektrofotometre taraması sonucunda bulunan en iyi dalga boyunun 664 nm olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.9).

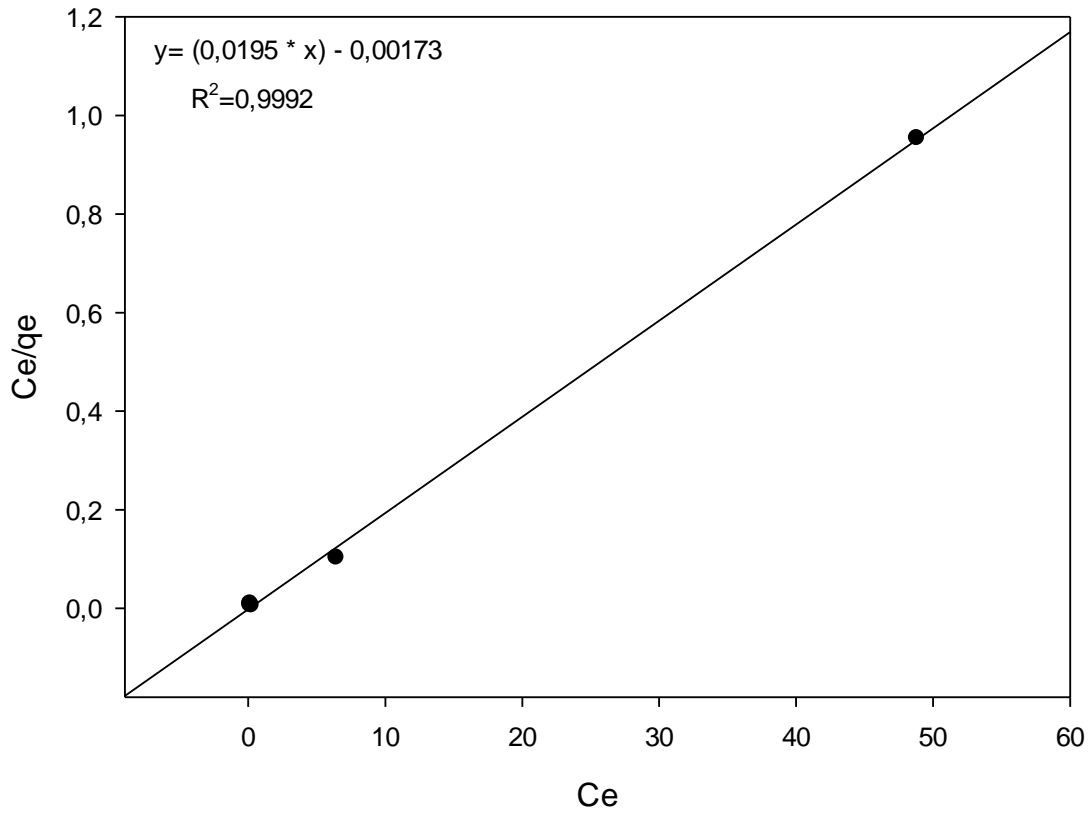


Şekil 3.9. Metilen mavisinin kalibrasyon eğrisi

3.2.2. Adsorpsiyon izoterminin belirlenmesi

Adsorbent tarafından adsorbe edilecek maksimum yükü belirlemek için izoterm çalışmaları yapılmıştır. Bu değerlerin Langmuir ve Freundlich izotermine uygunluğu değerlendirilmiştir. Langmuir izoterm modeli bir adsorban üzerine tek tabakayı ifade ederken (Trellu vd., 2018) Freundlich izoterm modeli ise adsorban üzerinde çoklu tabakayı ifade etmektedir (Kundu vd., 2018). 1000 mg/L'lik stok çözeltisinden

seyreltilerek hazırlanan 100 mg/L'lik çözeltiye 0,1, 0,15, 0,25, 0,5 ve 0,75 g adsorbent eklenecek deney 24 saat kesintisiz olarak sürdürülmüştür. İzoterm en küçük kareler metoduna göre hesaplanmıştır ve korelasyon sabitlerinin (R^2 değerleri) büyüklüklerine göre uygun olan izoterm seçilmiştir. R^2 'nin 1'e yakınlığı uygunluğun ölçüsüdür (Ye vd., 2022). Langmuir ve Freundlich izotermelerinin R^2 değerleri sırasıyla 0,9992 ve 0,6071 olarak tespit edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda Langmuir izoterminin 1'e daha yakın olduğundan bu çalışma için uygun izoterm Langmuir izoterminin olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Langmuir adsorpsiyon izoterminin

3.2.3. Optimum elektrolit türünün belirlenmesi

Bu çalışma ile daha önce çokça çalışılan elektrolit türlerine farklılık kazandırılmış ve farklı etkin elektrolit türü ortaya konulmuştur. Na_2SO_4 , K_2SO_4 , $NaCl$, KCl , KI , NaI , KBr , $NaBr$, KF ve NaF tuz türleri ile yapılan çalışma, metilen mavisi ile doyurulan ve piyasadan temin edilen doymuş aktif karbon ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.7'de düzeneği

gösterilen sistemde deneysel çalışmalar 250 ml hacme sahip beher içerisine kafes hücresi ve katot plaka yerleştirilerek gerçekleştirilmiştir. Kafes şeklinde tasarlanan anot hücresi içerisine 13 gram aktif karbon ilave edilmiştir. Beher içerisine 0,1 M konsantrasyona sahip; Na₂SO₄, K₂SO₄, NaCl, KCl, KI, NaI, KBr, NaBr, KF ve NaF elektrolit çözeltisi ilave edilmiştir. Deneysel ayarlanabilir DC güç kaynağı ile sabit 50 mA/cm² akım yoğunluğunda, doğal pH'da ve 4 saat rejenerasyon süresinde gerçekleştirilmiştir. Homojenizasyon, beher içerisine atılan manyetik balık karıştırıcı ile sağlanmıştır. Adsorpsiyon deneyleri 1000 mg/L'lik stok metilen mavisi çözeltisinden seyreltilerek hazırlanmıştır. Stok çözeltisinden 12,5 mg/L konsantrasyona sahip metilen mavisi hazırlanarak 250 ml'lik erlene 100 ml konulmuştur. Erlenin içerisine 0,5 g rejenere edilmiş aktif karbon ilave edildikten sonra; 15, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180 ve 210'nuncu dakikalarda örnekler alınarak daha önceden tespit edilen 664 nm dalga boyunda okunmuştur.

3.2.4. Optimum elektrolit konsantrasyonunun belirlenmesi

Optimum elektrolit türü belirlendikten sonra optimum elektrolit konsantrasyonunu belirleme çalışmaları yapılmıştır. Hem metilen mavisine doyurulan aktif karbon için hem de piyasadan doymuş olarak elde edilen aktif karbonla yapılan denemeler Şekil 3.8'de şematik görünümü mevcut olan elektrokimyasal rejenerasyon düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. 0,05, 0,1, 0,2, 0,3 ve 0,4 M konsantrasyona sahip metilen mavisi ile doyurulan aktif karbon için KBr, piyasadan doymuş olarak elde edilen aktif karbon için ise NaBr elektrolitiyle gerçekleştirilmiştir. Çalışma, 50 mA/cm², 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve 4 saat rejenerasyon süresinde gerçekleştirilmiştir ve optimum konsantrasyon miktarını tespit etmeyi amaçlanmıştır.

3.2.5. Optimum pH'nın belirlenmesi

Her iki aktif karbonun rejenerasyon verimliliğini en üst düzeye çıkaran koşulları belirlemek için pH 4 ile 10 arasında farklı değerlerinde araştırma yapılmıştır. Deneylerde pH'yı istenilen aralıklarda ayarlamak için seyreltik veya derişik sodyum hidroksit (NaOH) ve sülfürik asit (H₂SO₄) kimyasalları kullanılmıştır. Başlangıç elektrolit pH'sı 4, 5, 6,7 ve 8, 9 ve 10 değerlerine ayarlanarak gerçekleştirilmiştir. 0,1 M KBr ve 0,1 M NaBr

elektrolitleri kullanılarak 50 mA/cm², 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi ve 4 saat rejenerasyon süresinde deneyler yapılmıştır.

3.2.6. Optimum akım yoğunluğun belirlenmesi

Çalışma kapsamında her iki aktif karbon için 4 farklı akım yoğunluğunda (25, 37,5, 50, 62,5 mA/cm²) denemeler sürdürülmüştür. Optimum akım yoğunluğun belirlenmesi için Şekil 3.7’de gösterilen düzenekteki kafes içerisine 13 g aktif karbon, 0,1 M KBr veya 0,1 M NaBr elektrolitlerinde 200 ml hacimde, doğal pH’da ve 4 saat rejenerasyon süresinde uygulanmıştır.

3.2.7. Optimum rejenerasyon süresinin belirlenmesi

Çalışmada optimum rejenerasyon süresinin belirlenebilmesi için daha öncede tespit edilen şartlar sabit tutularak 13g aktif karbon, 50 mA/cm² akım yoğunluğunda, 0,1 M KBr ve NaBr den 200 ml hacimde ve doğal pH değerinde her iki aktif karbon için 1, 2, 3 ve 4 saat boyunca Şekil 3.7’deki düzenekte deneyler yürütülmüştür.

3.2.8. Optimum döngü sayısının belirlenmesi

Elektrokimyasal rejenerasyonu etkileyen parametrelerin optimum şartları tespit edildikten sonra hem metilen mavisi ile doyurulan hem de piyasadan doygun olarak elde edilen aktif karbon için döngü sayısı tespit edilmiştir. Şekil 3.8’deki düzenekte elektrolit miktarı 0,1 M ve 200 ml hacimde, doğal pH’da, 50 mA/cm² akım yoğunluğunda ve 4 saatlik rejenerasyon süresiyle rejenerasyon-adsorpsiyon döngüsüne 6 kez tabi tutulmuştur. Her testin başlangıcında doğal pH’da 200 ml’de yeni bir 0,1 M KBr ve NaBr çözeltisi hazırlanmıştır.

3.2.9. Enerji Tüketiminin Hesaplanması

Elektrokimyasal sistemlerde önemli etkenlerden birisi de enerji tüketimi hesabının ortaya konulmasıdır. Bunun için çalışmanın son adımında optimum şartlar altındaki enerji tüketimi aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$EC \left(\frac{kWsa}{kg} \right) = \frac{U.I.t}{w.1000} \quad (3.3)$$

Burada EC enerji tüketimi, U elektrokimyasal hücrenin ortalama voltajı (V), I uygulanan akım (A), t rejenerasyon süresi (saat) ve w AC kütlesidir (kg).

3.2.10. Kinetik değerlendirme

Aktif karbonun elektrokimyasal rejenerasyonun araştırılmasında yalancı-birinci derece kinetiğine uygunluğunun araştırılması için aşağıdaki denklemden oluşturulan eğrinin eğimden kinetik kat sayısı tespit edilmiştir;

$$\ln \frac{C_t}{C_0} = k_d \times t \quad (3.4)$$

C_t ve C_0 : t anındaki ve başlangıç anındaki giderim verim, k_d : yalancı-birinci derece giderim verim oranı sabiti (1/dakika), t giderim verimi anındaki zaman.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu doktora çalışması ile hem laboratuvar ortamında metilen mavisine doyurulmuş hem de piyasadan doygun olarak elde edilmiş aktif karbonun elektrokimyasal rejenerasyon yönteminde elektrolit türü, elektrolit konsantrasyonu, uygulanan akım yoğunluğu, pH ve rejenerasyon süresi gibi bağımsız değişkenlerin etkileri değerlendirildi ve optimize edildi. Ayrıca adsorpsiyon-rejenerasyon döngüsüne tabi tutulan rejenere edilmiş aktif karbonların döngü sayısı araştırıldı. Optimum şartlar altında ihtiyaç duyulan enerji tüketim miktarı ortaya konuldu. Aktif karbonun elektrokimyasal rejenerasyon verimini artırabilmek için optimum şartların belirlenmesi önemli bir husustur (Garcia-Rodriguez vd., 2020).

4.1. Optimum Elektrolit Türünün Belirlenmesi

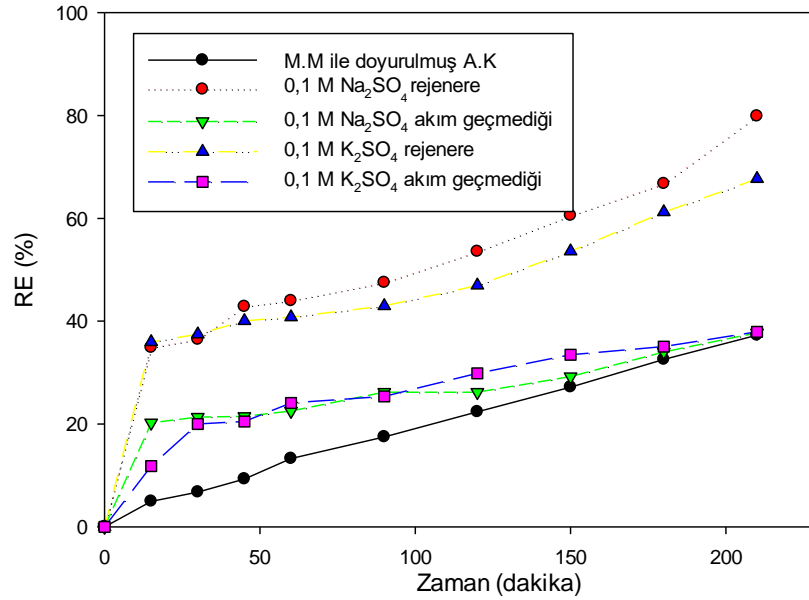
Elektrolit türü elektrokimyasal yöntemlerde kirleticilerin oksidasyonunda/mineralizasyonunda önemli bir rol oynadıkları için tespit edilmesi gerekmektedir (Ramos vd., 2019; Santos, Duarte, Tavares, vd., 2020). Bu çalışmada optimum elektrolitin türü ortaya koya bilmek için 10 (Na_2SO_4 , K_2SO_4 , NaCl , KCl , KI , NaI , KBr , NaBr , KF ve NaF) farklı elektrolit 0,1 M'de ve 200 ml hacimde 4 saatlik rejenerasyon süresine tabi tutularak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sadece elektrolitin etkisi ortaya koyulması için elektrik verilmeden aynı şartlarda deneylerde yapılmıştır. Şekil 4.1'den Şekil 4.5'e kadar her elektrolit için hem elektrik verilerek hem de elektrik verilmeden grafiklileri mevcuttur.

Bu grafiklere bakıldığı zaman metilen mavisini ile doyurulan aktif karbonun giderim verimi ile elektrik verilmeden yapılan deneyler arasında rejenerasyon giderim verimi neredeyse yok denilecek kadar azdır. Na_2SO_4 , K_2SO_4 , NF ve KF destek elektrolitlerin giderim verimi diğer elektrolitlere göre çok düşük olduğu tespit edilmiştir. Diğer elektrolitler % 90 üzeri giderim verimi olduğu ortaya konulurken Na_2SO_4 , K_2SO_4 , NF ve KF elektrolitlerin giderim verimleri sırasıyla % 79,87, % 67,68, % 66,89 ve % 69,25 olarak tespit edilmiştir.

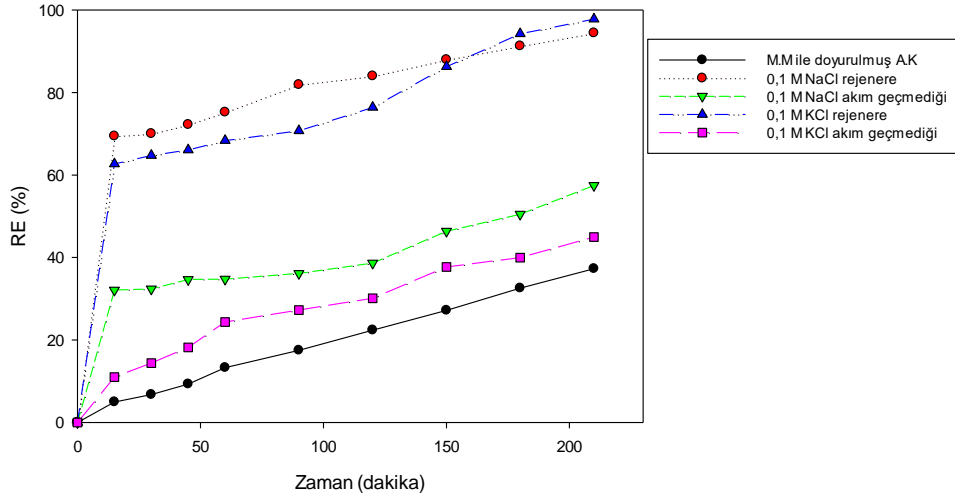
Literatürde aktif karbonun elektrokimyasal rejenerasyonu için NF ve KF elektrolitleri ile ilgili her hangi bir çalışmaya rastlanmazken Na_2SO_4 ve K_2SO_4 ile yapılan çalışmalarda

genellikle giderim verimi düşük çıkmaktadır. Bunun sebebini organik kirleticilerin oksidasyon hızını engelleyen çözelti içindeki radikalleri tüketen iyonlarından kaynaklanabileceğini iddia etmişlerdir (McQuillan vd., 2018; Shi vd., 2020; Zhang, 2002).

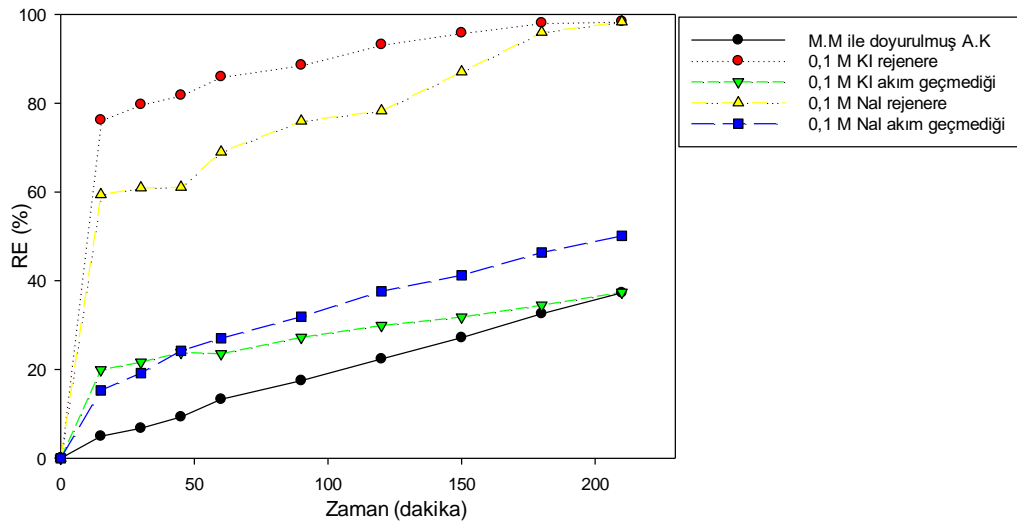
Grafikler tek tek incelendiği zaman Şekil 4.6’da verildiği gibi en iyi giderim veriminin % 99,73 ile KBr elektrolitinde ve en düşük giderim veriminin % 66,89 ile KF destek elektrolitinde olduğu ortaya konulmuştur. Genel olarak giderim verimlerini yüksek çıkmasının sebebi metilen mavisinin kolay mineralizasyon olduğu söylene bilinir. Bouaziz ve arkadaşlarının (2014) metilen mavisini ile doyurulan aktif karbonu BDD anodu kullanarak elektrokimyasal rejenerasyonunu incelemişler ve % 97’lik bir giderim verimlerine ulaşmışlardır ve tam bir parçalanma olduğunu ifade etmişler (Bouaziz vd., 2014). NaCl ve KCl giderim verimlerinin yüksek çıkma sebebinin Dai ve arkadaşları (2017) tarafından belirtildiği gibi serbest klor, hipokloröz asit veya hipoklorit iyonları gibi aktif klor türlerinin neden olduğu dolaylı oksidasyon reaksiyonlarından kaynaklanabilir (Dai vd., 2017).



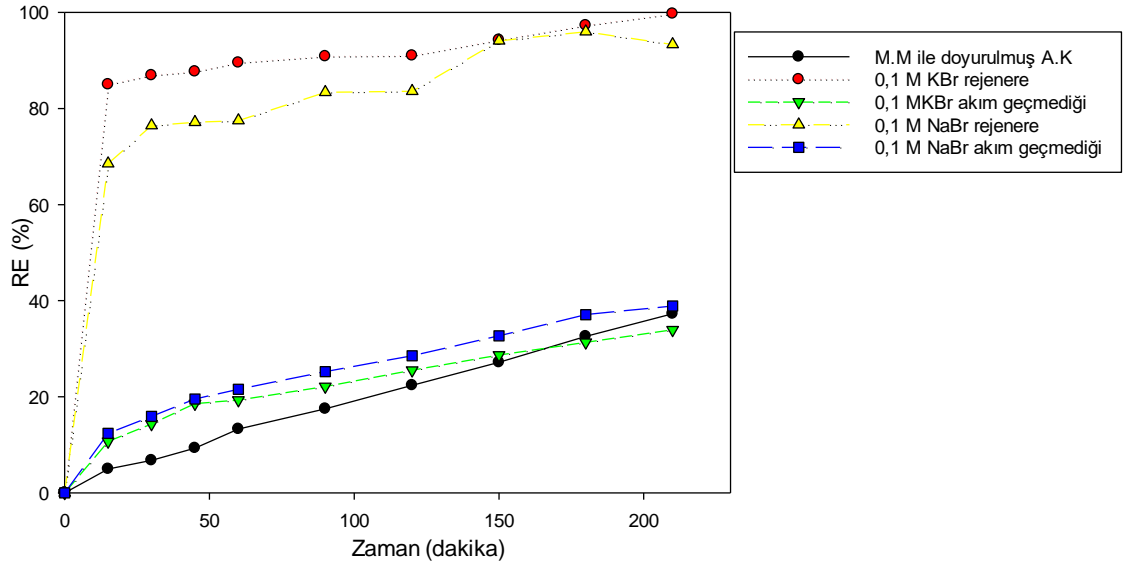
Şekil 4.1. Metilen Mavisini ile doyurulmuş aktif karbonun 0,1 M Na₂SO₄ ve K₂SO₄ deki rejenerasyon verimi-zaman grafiği (50 mA/cm², 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)



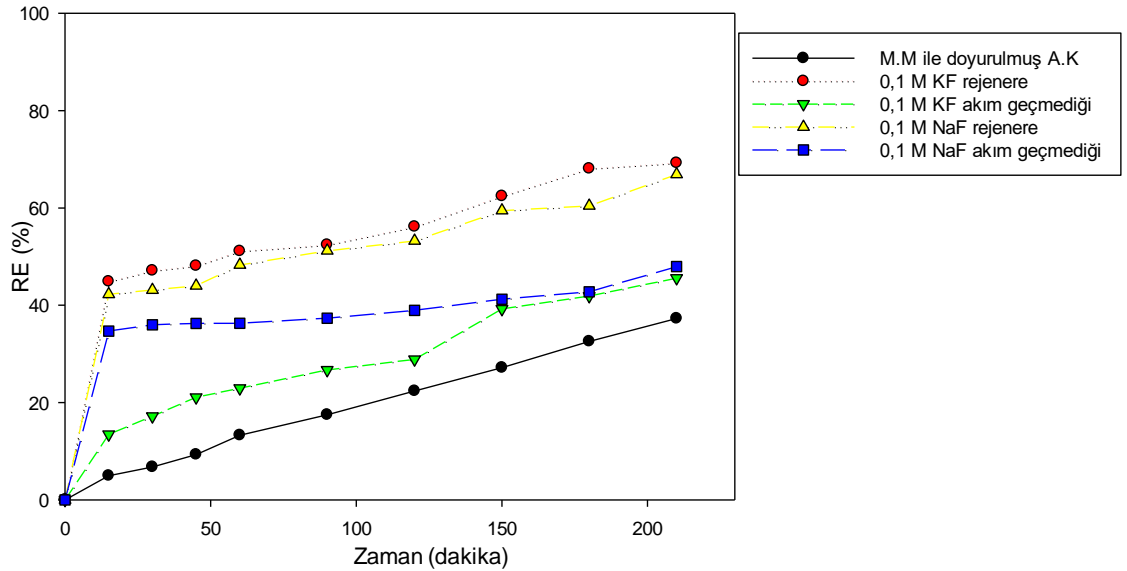
Şekil 4.2. Metilen Mavisi ile doyurulmuş aktif karbonun 0,1 M NaCl ve KCl deki rejenerasyon sonrası aktif karbonun ve akım geçmediği aktif karbonun rejenerasyon verimi-zaman grafiği (50 mA/cm², 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)



Şekil 4.3. Metilen Mavisi ile doyurulmuş aktif karbonun 0,1 M NaI ve KI deki rejenerasyon sonrası aktif karbonun ve akım geçmediği aktif karbonun rejenerasyon verimi-zaman grafiği (50 mA/cm², 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)

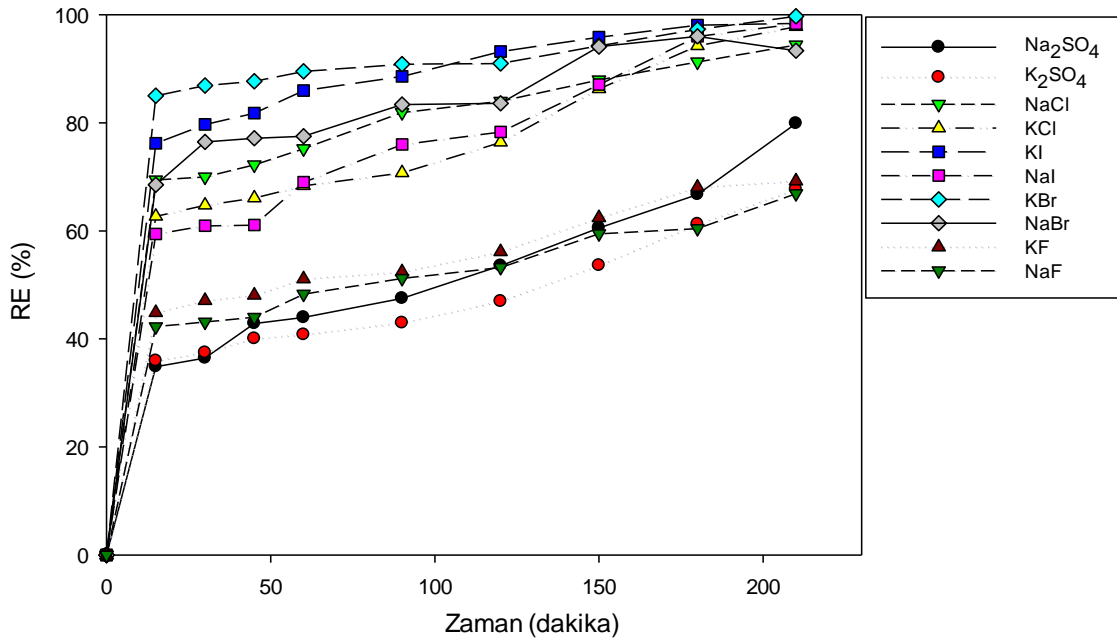


Şekil 4.4. Metilen Mavisi ile doyurulmuş aktif karbonun 0,1 M NaBr ve KBr deki rejenere sonrası aktif karbonun ve akım geçmediği aktif karbonun rejenerasyon verimi-zaman grafiği (50 mA/cm², 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)



Şekil 4.5. Metilen Mavisi ile doyurulmuş aktif karbonun 0,1 M NaF ve KF deki rejenere sonrası aktif karbonun ve akım geçmediği aktif karbonun rejenerasyon verimi-zaman grafiği (50 mA/cm², 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)

Şekil 4.6'da görülen grafikte metilen mavisi ile doyurulan aktif karbonun rejenerasyonunda etkisi araştırılan tüm elektrolitlerin 50 mA/cm², 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat şartlar altındaki rejenerasyon verim sonucu elde edilmiştir. Grafiğe göre en yüksek değer % 99,73 ile KBr Elektrolitinde elde edilmiştir. Çalışmanın metilen mavisi ile yapılan araştırmasında bu destek elektroliti ile sürdürülmüştür.



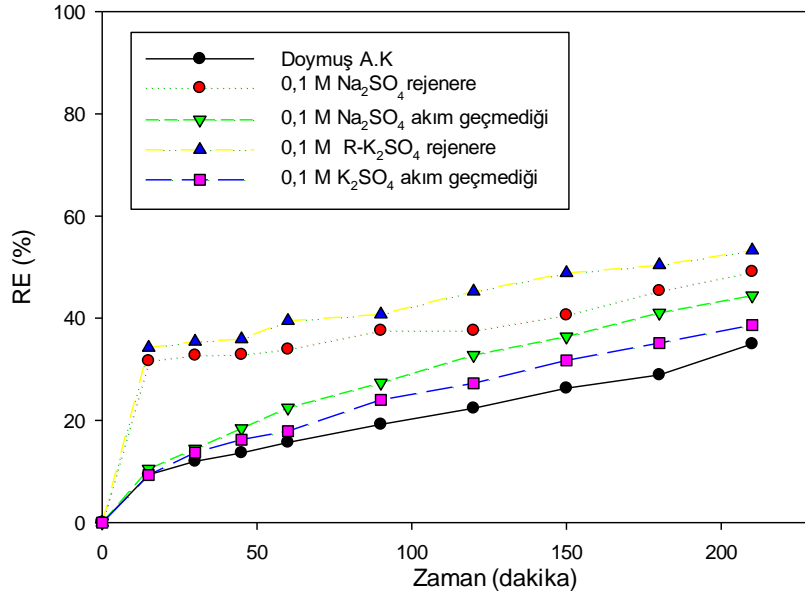
Şekil 4.6. Metilen Mavisi ile doyurulmuş aktif karbonun 0,1 M deki farklı elektrolit türlerinin rejenerasyon verimi-zaman grafiği (50 mA/cm², 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)

Çizelge 4.1'de metilen mavisi ile doyurulmuş aktif karbonun rejenerasyonunda deney şartlarından önce ve sonrasında meydana gelen voltaj, pH ve sıcaklık değişimleri mevcuttur. Özellikle sıcaklık artışları dikkat çekmektedir.

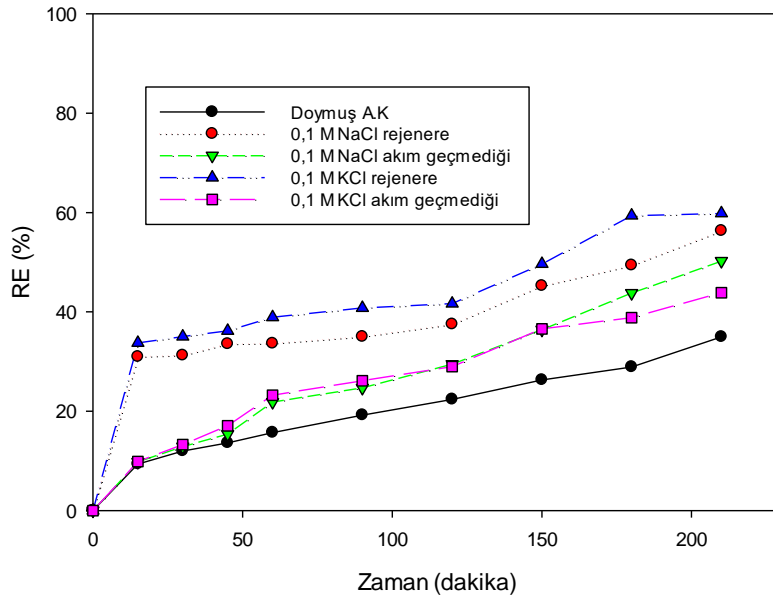
Çizelge 4.1. Metilen Mavisi ile doyurulan aktif karbonun rejenerasyon öncesi ve sonrası değerleri. Optimum elektrolit türünün belirlenmesinde

Denen Elektrolit Türleri (0,1 M)	Başlangıç Volt	Bitiş Volt	Başlangıç pH	Bitiş pH	Başlangıç Sıcaklık (°C)	Bitiş Sıcaklık (°C)	4 saatlik rejenerasyon süresi
Na ₂ SO ₄	5,205	5,026	8,52	8,63	22,4	33,9	
K ₂ SO ₄	5,471	5,308	7,45	8,35	18,4	30,2	
NaCl	6,751	6,74	8,39	7,31	24	35	
KCl	6,901	5,64	8,11	7,5	18,9	31,4	
KI	5,366	5,236	6,15	12,76	27,9	33,9	
NaI	4,652	3,985	8,59	12,55	23,8	33,1	
KBr	4,623	5,211	8,23	9,28	25,1	34,6	
NaBr	5,519	6,358	8,08	8,7	25,7	37,8	
KF	5,39	5,955	9,15	10,42	22,3	31,1	
NaF	5,205	6,073	9,41	10,42	23,6	31,4	

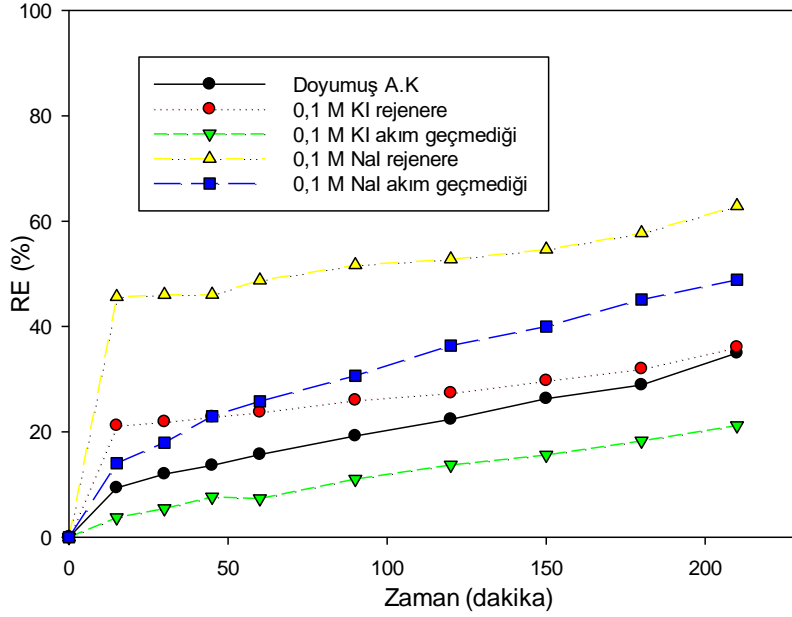
Şekil 4.7 ve Şekil 4.11 arasında ki grafiklerde piyasadan doygun olarak elde edilmiş aktif karbon rejenerasyonu için kullanılan destek elektrolitlerin hem elektrik verilerek hem de elektrik verilmeden yapılan deneylerin sonuç grafikleri mevcuttur. Elektrik verilmeden gerçekleştirilen deneyler bu grafiklerde de rejenerasyon verimine katkısı yok denecek kadar azdır. Piyasadan doygun olarak elde edilen aktif karbonla yapılan çalışmalarda NaBr ve KBr hariç genel olarak elektrolitlerin etkisi metilen mavisine doyurulmuş aktif karbon kadar yüksek olmadığı gözükmemektedir. En düşük giderim verimi % 36,06 ile KI elektrolitinde görülmektedir. Na₂SO₄ (% 49,12) ve K₂SO₄ (% 53,31) daha önceki çalışmalarda ifade edilenlerle paralel olarak düşük rejenerasyon verimine sahiptirler. Piyasada erişilebilirliği, çözünürlüğü ve düşük maliyeti nedeniyle yaygın kullanıma sahip NaCl ve KCl elektrolitleri bu çalışmada sırasıyla % 56,35 ve % 59,84 rejenerasyon verimi elde edilmiştir.



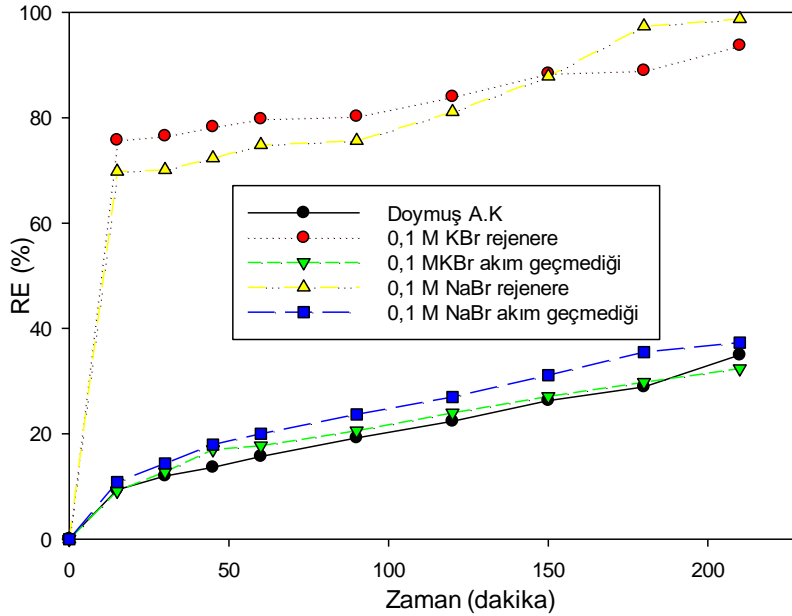
Şekil 4.7. Piyasadan doymuş olarak elde edilmiş aktif karbonun akım geçmeyen 0,1 M deki Na₂SO₄ ve K₂SO₄ elektrolit türlerinin rejenerasyon verimi-zaman grafiği (13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)



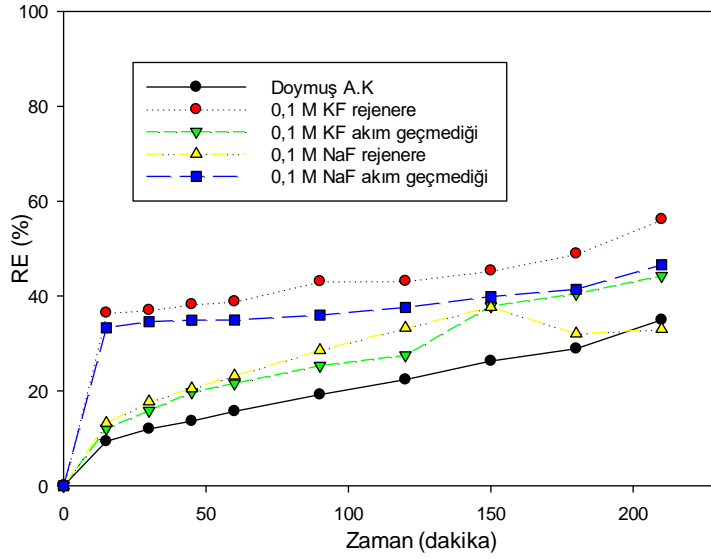
Şekil 4.8. Piyasadan doymuş olarak elde edilmiş aktif karbonun akım geçmeyen 0,1 M deki NaCl ve KCl elektrolit türlerinin rejenerasyon verimi-zaman grafiği (13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)



Şekil 4.9. Piyasadan doygun olarak elde edilmiş aktif karbonun akım geçmeyen 0,1 M deki NaI ve KI elektrolit türlerinin rejenerasyon verimi-zaman grafiği (13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)



Şekil 4.10. Piyasadan doygun olarak elde edilmiş aktif karbonun akım geçmeyen 0,1 M deki NaBr ve KBr elektrolit türlerinin rejenerasyon verimi-zaman grafiği (13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)



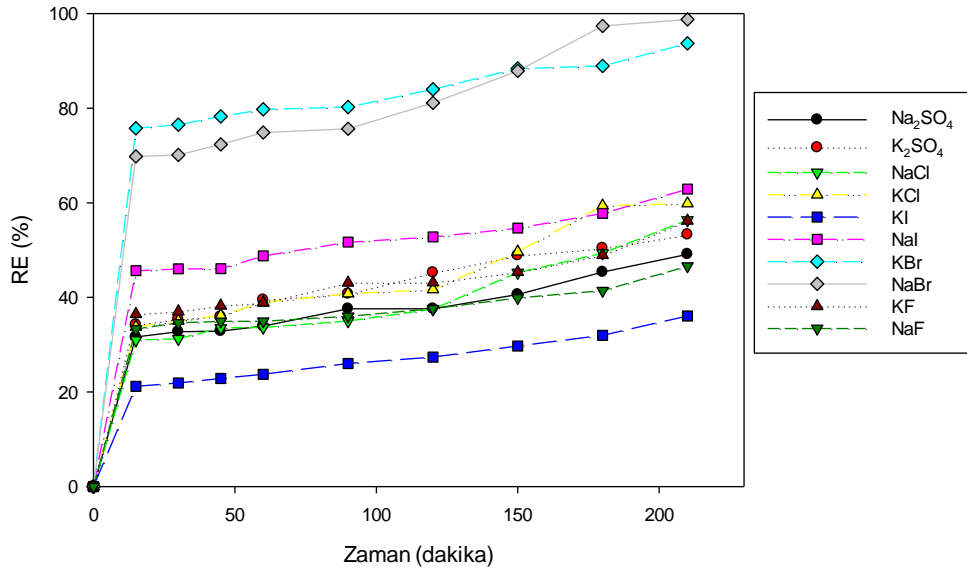
Şekil 4.11. Piyasadan doymun olarak elde edilmiş aktif karbonun akım geçmeyen 0,1 M deki NaF ve KF elektrolit türlerinin rejenerasyon verimi-zaman grafiği (13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)

Çizelge 4.2’de Piyasadan doymun olarak elde edilmiş aktif karbonun optimum elektrolit tespiti için yapılan deneylerin öncesinde ve sonrasındaki voltaj, pH ve sıcaklık değişimleri mevcuttur. Burada da sıcaklık artışları dikkat çekmektedir.

Çizelge 4.2. Piyasadan doymun olarak temin edilen aktif karbonun rejenerasyon öncesi ve sonrası değerleri. Optimum elektrolit türünün belirlenmesinde

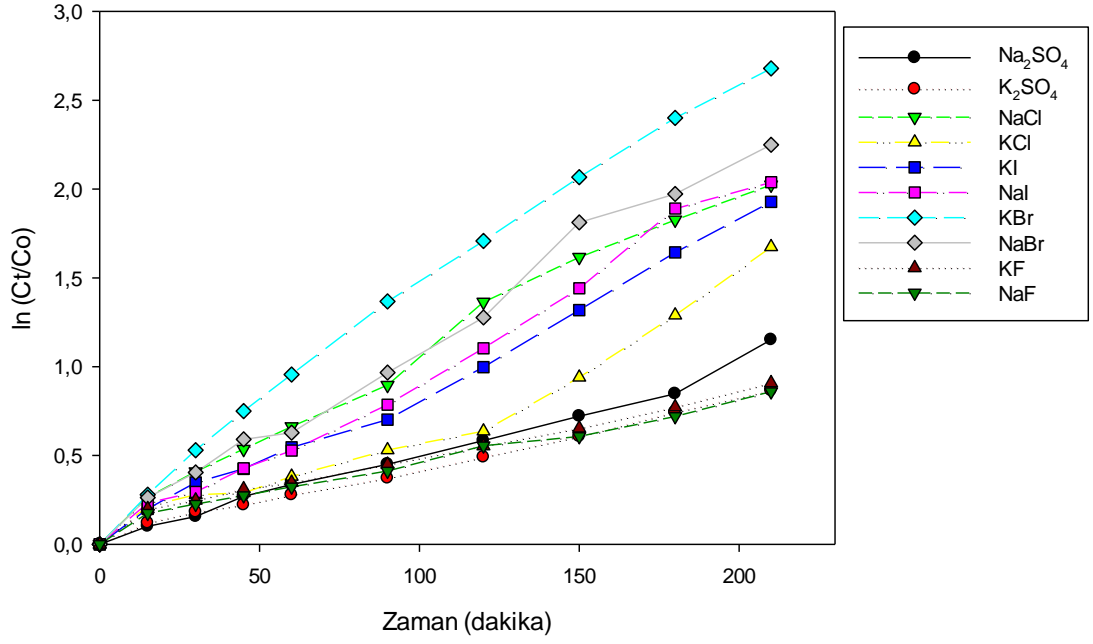
Denen Elektrolit Türleri (0,1 M)	Başlangıç Volt	Bitiş Volt	Başlangıç pH	Bitiş pH	Başlangıç Sıcaklık (°C)	Bitiş Sıcaklık (°C)	4 saatlik rejenerasyon süresi
Na ₂ SO ₄	6,763	5,561	8,77	8,88	22,65	34,15	
K ₂ SO ₄	5,816	5,909	7,7	8,6	18,65	30,45	
NaCl	7,857	7,565	8,64	7,56	24,25	35,25	
KCl	9,723	8,19	8,36	7,75	19,15	31,65	
KI	4,679	6,748	6,4	13,01	28,15	34,15	
NaI	7,246	8,335	8,84	12,8	24,05	33,35	
KBr	7,692	7,486	8,48	9,53	25,35	34,85	
NaBr	4,781	5,331	7,79	8,95	25,95	38,05	
KF	7,808	8,024	9,4	10,67	22,55	31,35	
NaF	9,079	8,932	9,66	10,67	23,85	31,65	

Şekil 4.12’de görüldüğü gibi en yüksek verime NaBr (% 98,78) ile ulaşılmıştır buna en yakın değer % 93,35 giderim verimi ile KBr olmuştur. Bu yüksek giderime Br⁻ iyonun sahip olduğu (78,1) iyonik iletkenlik sonucu olabileceği düşünülmektedir. Her iki aktif karbonda da yüksek rejenerasyon verimine Br⁻ iyonunda elde edilmesi bu öneriyi desteklemektedir. Çalışmalara en yüksek rejenerasyon giderim verimine sahip olan NaBr elektroliti ile devam edilmiştir.

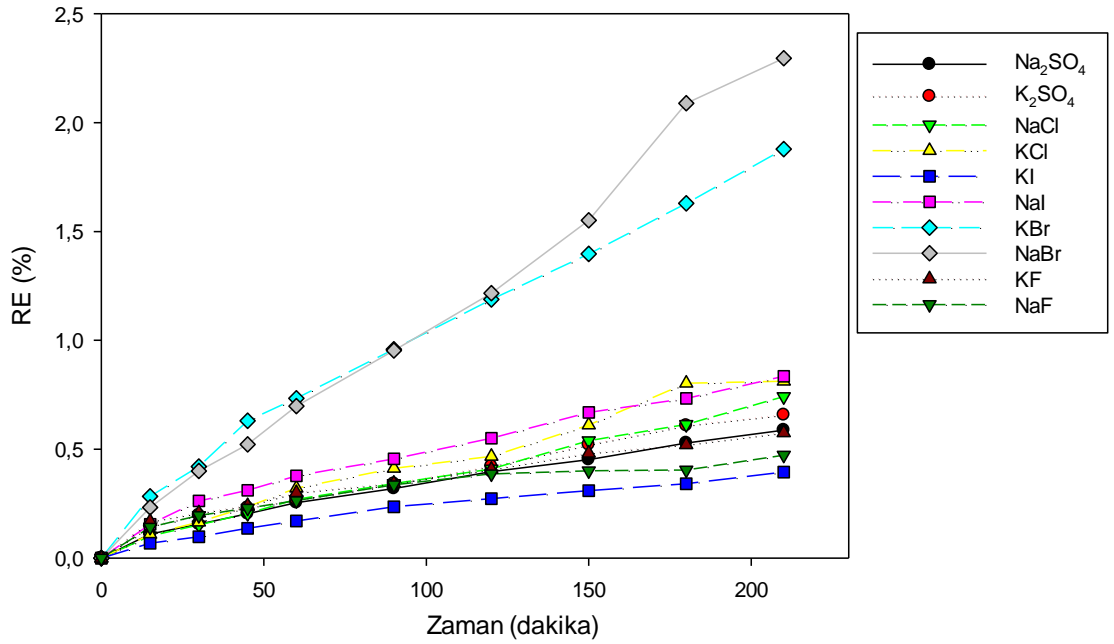


Şekil 4.12. Piyasadan doygun olarak elde edilmiş aktif karbonun 0,1 M deki farklı elektrolit türlerinin rejenerasyon verimi-zaman grafiği (50 mA/cm², 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)

Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’te her iki aktif karbon için birinci-derece kinetik katsayılarının değişimleri görülmektedir. Burada da Şekil 4.6. ve Şekil 4.7. ki durum ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.13. Metilen Mavisi ile doyurulmuş aktif karbonun 0,1 M deki farklı elektrolit türlerinin $\ln(Ct/C_0)$ -zaman grafiği (50 mA/cm^2 , 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)



Şekil 4.14. Piyasadan doygun olarak elde edilmiş aktif karbonun 0,1 M deki farklı elektrolit türlerinin $\ln(Ct/C_0)$ -zaman grafiği (50 mA/cm^2 , 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)

Ayrıca elektrolit türü değişimi ile elde edilen birinci derece kinetik verileri ve rejenerasyon giderim verimleri Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te sunulmuştur. En yüksek verime sahip değerler kalın olarak belirtilmiştir. Buda daha önce ortaya konulan veriler ile örtüşmektedir.

Çizelge 4.3. Metilen mavisi ile doyurulan aktif karbonun birinci-derece kinetik verileri, R^2 ve rejenerasyon giderim verimleri

Elektrolit Türü 0,1 M	$k_d(1/dk)$	R^2	Elektrolit Giderim Verimi %
NaF	0,0041	0,9803	66,9
K ₂ SO ₄	0,0041	0,9949	67,68
KF	0,0043	0,978	69,25
Na ₂ SO ₄	0,0055	0,9859	79,88
KCl	0,008	0,9505	99,83
KI	0,0092	0,9917	98,43
NaCl	0,0096	0,9905	94,43
NaI	0,0097	0,9908	98,34
NaBr	0,0107	0,9915	99,74
KBr	0,0128	0,9931	99,65

Çizelge 4.4. Piyasadan doymun olarak elde edilen aktif karbonun birinci-derece kinetik verileri, R^2 ve rejenerasyon giderim verimleri

Elektrolit Türü 0,1 M	$k_d(1/dk)$	R^2	Elektrolit Giderim Verimi %
Na ₂ SO ₄	0,0028	0,9774	49,13
K ₂ SO ₄	0,0031	0,9938	53,31
NaCl	0,0035	0,9873	56,36
KCl	0,0039	0,9844	59,84
KI	0,0019	0,9674	36,06
NaI	0,0040	0,9909	62,89
KBr	0,0089	0,9925	93,73
NaBr	0,0105	0,9788	98,78
KF	0,0027	0,9299	56,21
NaF	0,0019	0,9719	46,61

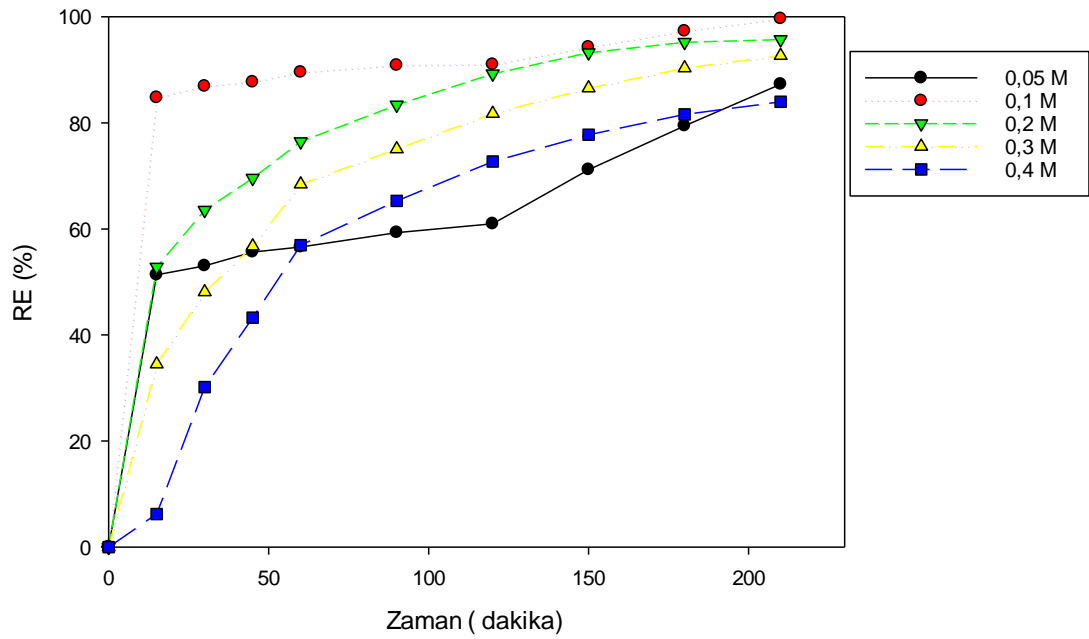
4.2. Optimum Elektrolit Konsantrasyonunun Belirlenmesi

Destek elektrolitin türü belirlendikten sonra optimum konsantrasyonu tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla her iki aktif karbon için daha önce verilen şartlar sabit tutularak KBr ve NaBr konsantrasyonları değiştirilerek çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bunun için 0,05, 0,1, 0,2, 0,3 ve 0,4 M değişken konsantrasyonlar kullanılmıştır. Ayrıca elektrik olmadan sadece elektrolit konsantrasyonun rejenerasyon verimine bir etkisi olup olmadığı da incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda her iki aktif karbon için de elektriksiz olarak yapılan deneylerde giderim veriminin çok düşük olduğunu tespit edilmiştir. Bununla birlikte tek başına yeterli olmadığı açıkça görülmektedir (Şekil 4.16 ve Şekil 4.18). Şekil 4.15'te görüldüğü gibi KBr elektrolit konsantrasyonu 0,05 M'den 0,1 M'ye artırıldığı zaman giderim verimi % 87,28'den % 99,65'e yükselmiştir. KBr elektrolitinin konsantrasyonun artırılmasıyla giderim verimi düşmüştür. En düşük giderim verimine en yüksek elektrolit konsantrasyonunda elde edilmiştir. Şekil 4.17'da görüldüğü gibi NaBr elektroliti içinde durum aynıdır. Elektrolitin 0,05 M dan 0,1 M artmasıyla giderim verimi % 86,32'den % 98,78' artmaktadır. Elektrolit konsantrasyon değerinin artmasıyla giderim verimi düştüğü gözlemlenmektedir.

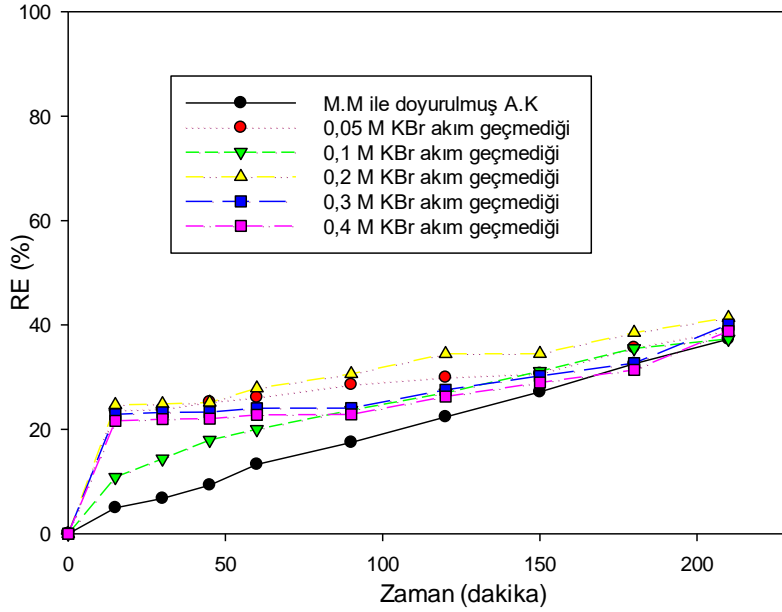
Her iki aktif karbon içinde en yüksek giderim verimleri 0,1 M KBr ve 0,1 M NaBr elektrolitlerinde elde edilmiştir. En düşük giderim verime ise her iki aktif karbonda da en yüksek molarite olan 0,4 M'de % 83,97 (KBr) ve % 57,23 (NaBr) olarak tespit edilmiştir. Benzer sonuçlar Zang'ın rejenerasyon süresi ve rejenerasyon akımı sırasıyla 5 saat ve 50 mA'de gerçekleştirdikleri farklı NaCl konsantrasyonunu çalıştığı araştırmada da konsantrasyon % 0,01'den % 1'e yükseldikçe rejenerasyon verimliliği üzerindeki etkisi önemli derecede arttığı ama konsantrasyon değerini % 2'e çıkarıldığı zaman giderim veriminin düştüğünü ve solüsyonun renginde değişiklik olduğunu görmüşlerdir (Zhang, 2002).

Elektrolit konsantrasyonunda ki değişiklik, iyon değişim hızını ve elektrotlar ile elektrolit arasındaki elektrostatik direncin azalmasını doğrudan etkiler, sonuç olarak katot ve aktif karbon partiküllerinin yüzeyinde oksijenin H₂O₂'ye indirgenmesi gibi elektrokimyasal reaksiyonları iyileştirerek oksidasyon sisteminin performansını artırır (Asgari vd., 2021).

Genel olarak elektrolitin konsantrasyonu artıkça rejenerasyon verimi artışı düşünülse de yüksek konsantrasyonlara çıkıldıkça anodun veya katodun elektrolit tarafından kaplanmasından dolayı verimin düşme olasılığı vardır. Uygulanan voltaj, elektrolit konsantrasyonunun artmasıyla kademeli olarak azalır ve elektrolitik reaksiyonun itici gücünü azaltır. Bu nedenle elektrolit konsantrasyonu artıkça elektrot yüzeyinde adsorbe edilen iyonların aktif bölgeyi işgal ederek $\bullet\text{OH}$ üretimini engellemiş ve giderim verimini düşürmüş olabilir (Ye vd., 2022). Çalışmanın devamında elektrolit konsantrasyonu olarak optimum belirlenen 0,1 M KBr ve NaBr kullanılmıştır.



Şekil 4.15. Metilen Mavisi ile doyurulmuş aktif karbonun optimum elektrolit konsantrasyonunun belirlenmesi (50 mA/cm², 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)

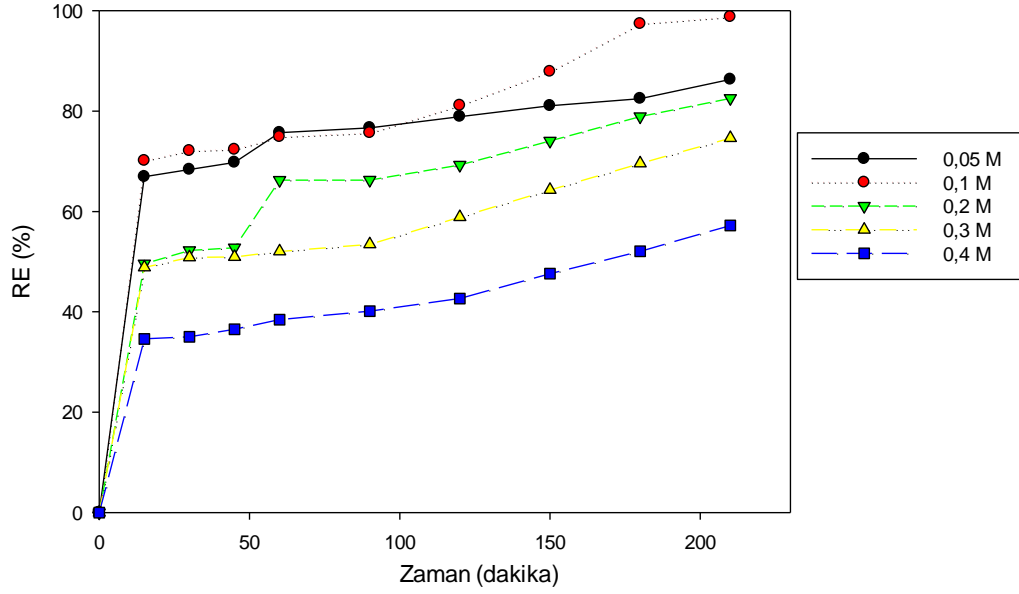


Şekil 4.16. Metilen Mavisi ile doyurulmuş aktif karbonun optimum elektrolit konsantrasyonunun belirlenmesi (13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)

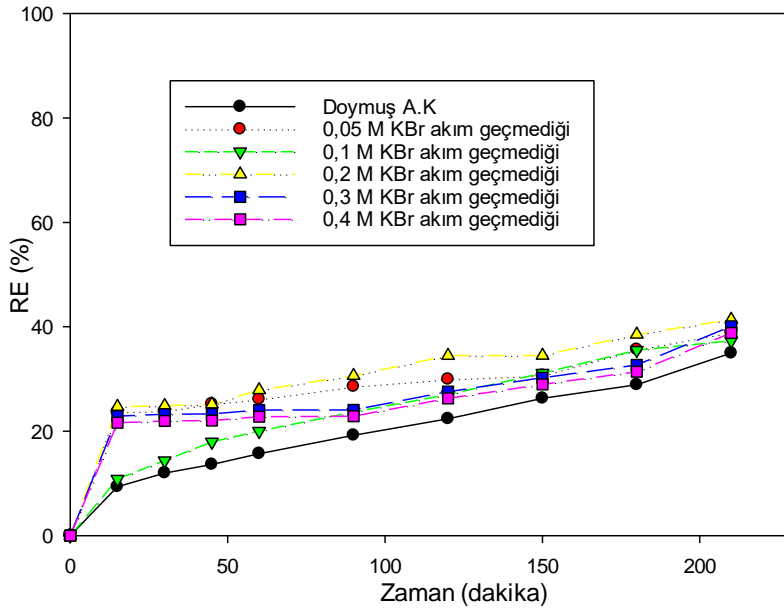
Çizelge 4.5. ve Çizelge 4.6. görüldüğü gibi rejenerasyon sırasında özellikle sıcaklıkta artış görülmektedir. En yüksek voltaj değişimi 0,05 M ve en düşük voltaj değişimi 0,4 M konsantrasyon elde edilmiştir.

Çizelge 4.5. Metilen Mavisi ile doyurulan aktif karbonun rejenerasyon öncesi ve sonrası değerleri. Optimum elektrolit konsantrasyonu tespit edilirken

Elektrolit Miktarları	Başlangıç Volt	Bitiş Volt	Başlangıç pH	Bitiş pH	Başlangıç Sıcaklık (°C)	Bitiş Sıcaklık (°C)	4 saatlik rejenerasyon süresi
0,05 M	9,16	7,983	8,66	7,98	21,8	39,2	
0,1 M	4,623	5,211	8,23	9,28	25,1	34,6	
0,2 M	4,409	4,052	8,86	9,29	20,5	30,5	
0,3 M	4,185	4,202	8,87	9,25	21,7	30,7	
0,4 M	3,828	3,986	8,87	9,27	21,7	29,9	



Şekil 4.17. Piyasadan doymuş olarak elde edilmiş aktif karbonun optimum elektrolit konsantrasyonunun belirlenmesi (50 mA/cm², 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)



Şekil 4.18. Piyasadan doymuş olarak elde edilmiş aktif karbonun optimum elektrolit konsantrasyonunun belirlenmesi (13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)

Çizelge 4.6. Piyasadan doygun olarak elde edilen aktif karbonun rejenerasyon öncesi ve sonrası değerleri. Optimum elektrolit konsantrasyonu tespit edilirken

Elektrolit Miktarları	Başlangıç Volt	Bitiş Volt	Başlangıç pH	Bitiş pH	Başlangıç Sıcaklık (°C)	Bitiş Sıcaklık (°C)	4 saatlik rejenerasyon süresi.
0,05 M	15,87	14,47	7,4	8,72	25,54	34,6	
0,1 M	4,781	5,331	7,79	8,95	25,95	38,05	
0,2 M	6,081	5,904	7,6	8,03	19,24	29,24	
0,3 M	5,777	5,733	7,61	7,99	20,44	29,44	
0,4 M	4,441	4,537	7,61	8,01	20,44	28,64	

4.3. Optimum pH'nın belirlenmesi

Borja ve arkadaşlarının 2021'de yaptığı çalışmada ifade ettikleri gibi pH, bazı organik kirleticilerin aktif karbon desorpsiyonuna yardımcı olduğu için elektrokimyasal rejenerasyonda bakılması gereken önemli parametrelerden biridir (Ferrández-Gómez, Cazorla-Amorós, vd., 2021).

Bu doktora çalışması kapsamında optimum pH'yı belirlemek için 4 ile 10 değerleri arasında hem alkali hem de asidik ortamda her iki aktif karbon için deneyler gerçekleştirildi. Şekil 4.19 ve Şekil 4.21'de görüldüğü gibi en yüksek rejenerasyon verimine KBr ve NaBr elektrolitlerin doğal pH'larına yakın olan pH 8'de gözlemlenmektedir. Genel olarak Şekil 4.19. ve Şekil 4.21'de bakıldığı zaman Pi ve arkadaşlarının (2022) ifade edtikleri gibi aktif karbonun çok çeşitli pH koşulları altında yüksek rejenerasyon kabiliyetine sahip olduğunu ve rejenerasyon etkisinin alkali koşullar altında daha iyi olduğunu görülmektedir (Pi vd., 2022). McQuillan ve arkadaşlarının (2018) yapmış oldukları çalışmadaki gibi genel olarak yüksek pH değerlerinin desorpsiyon, düşük pH değerlerinin ise oksidasyon reaksiyonlarını geliştirdiğinden bahsetmişlerdir (McQuillan vd., 2018).

Ayrıca aktif karbonun elektrokimyasal rejenerasyon ile ilgili çalışmalar göstermiştir ki bazen düşük pH=2~4 (Narbaitz & Karimi-Jashni, 2012) değerlerinde bazen ise yüksek pH=13 değerlerinde daha iyi verim alınabilir (Narbaitz & McEwen, 2012). Berenguer ve arkadaşları fenol ile doyurmuş aktif karbonla yaptıkları çalışmada bu çalışmaya

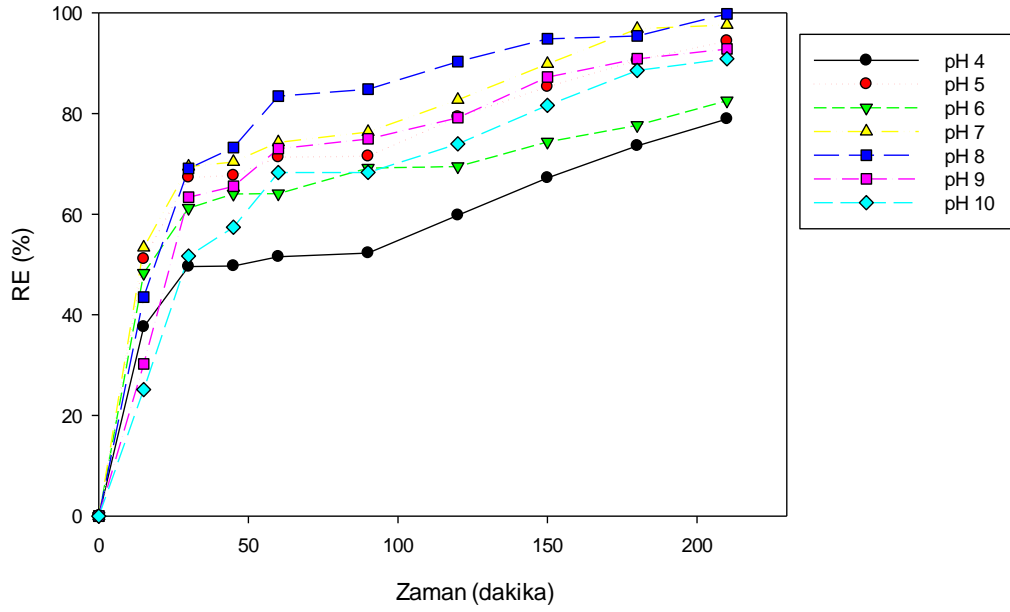
benzer olarak alkali ortamda % 90'lık maksimum verim elde etmişler (Berenguer vd., 2010a).

Çalışmanın bundan sonraki aşamalarında herhangi bir pH aralması yapılmamıştır ve her iki elektrolit için doğal pH (KBr=8,23, NaBr=7,79) ile devam edilmiştir. Çünkü pH 8 de elde edilen değer ile doğal pH'da elde edilen giderim verimi arasında ki fark yok denecek kadar azdır.

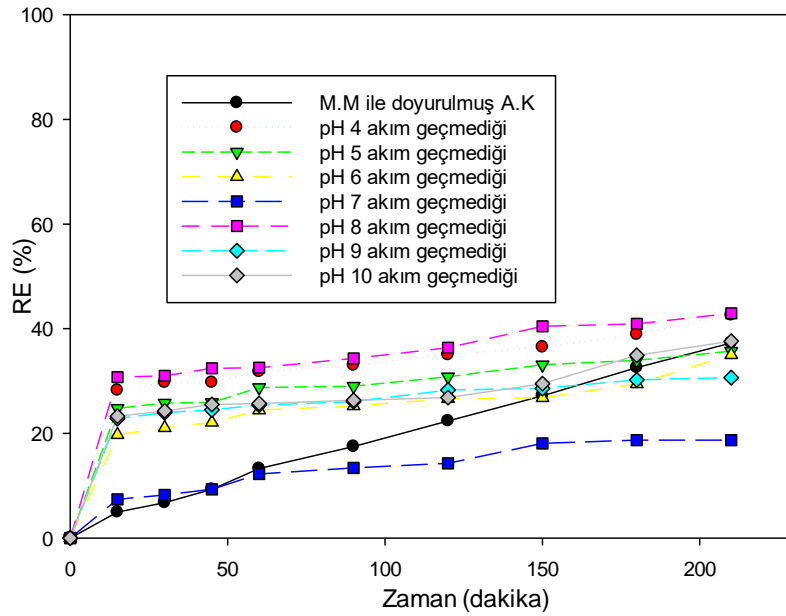
Şekil 4.21 ve Şekil 4.22' de ise elektriksiz ortamda pH etkisi araştırılmıştır. Her ne kadar ihmal edilebilecek seviyelerde de olsa bu grafiklerde de en iyi verim pH 8'de olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8'te rejenerasyon sonrası ve öncesindeki çalışma koşullarındaki değişimler sunulmaktadır.

Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8'te gösterildiği gibi proses sırasında çözelti pH'ında değişiklikler gözlenmiştir. pH 10 hariç diğer bütün pH değerleri başlangıç pH'sına göre artış sağlamıştır. Bu davranış OH^- ve H^+ iyonları aktif karbon üzerinde adsorbe edilebilir ve aktif karbon ile temas etmeyen elektrotun reaksiyonu H^+ (anot) veya OH^- (katot) iyonları üretmeye devam ettiğinden pH artışına veya düşüşüne neden olabilir (Acuña-Bedoya vd., 2020; McQuillan vd., 2018).



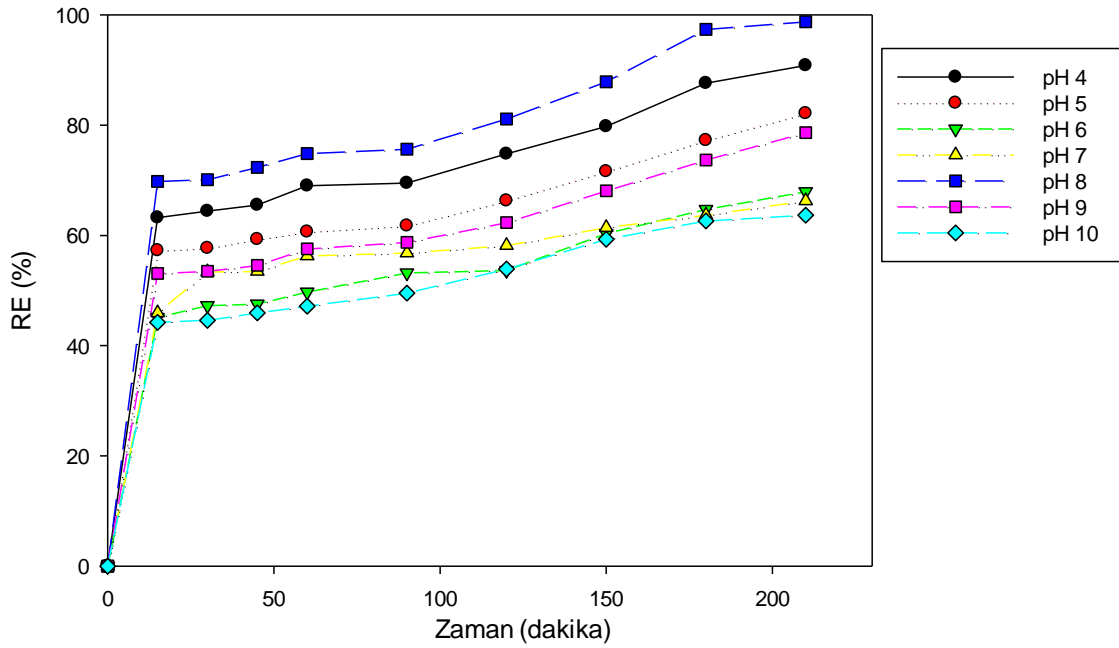
Şekil 4.19. Metilen Mavisi ile doyurulmuş aktif karbonun optimum pH (4-10) değerlerinin rejenerasyon verimi-zaman grafiği (0.1 M KBr, 50 mA/cm², 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi)



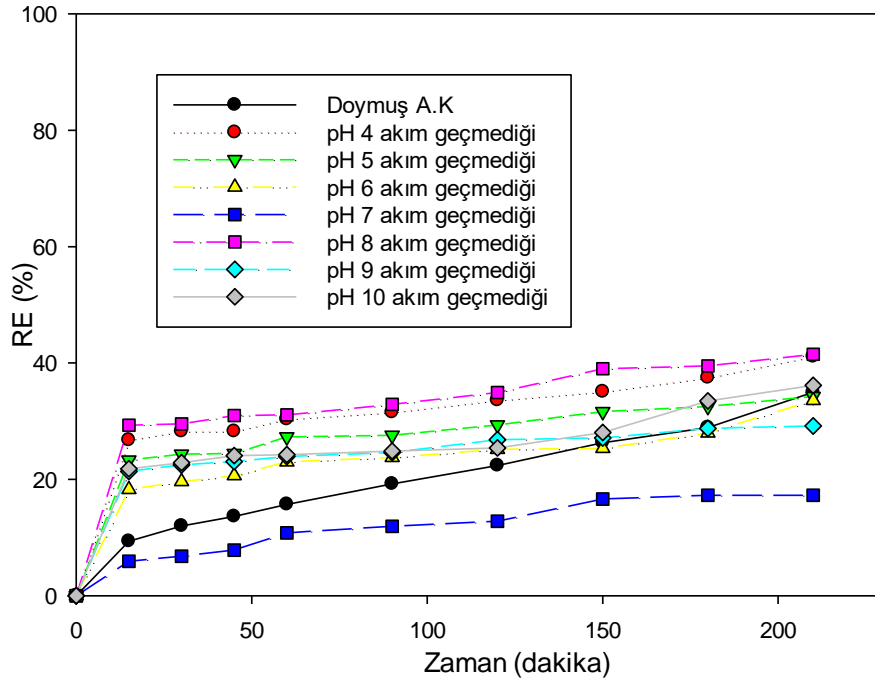
Şekil 4.20. Metilen Mavisi ile doyurulmuş aktif karbonun akım geçmeyen optimum pH (4-10) değerlerinin rejenerasyon verimi-zaman grafiği (0.1 M KBr, 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi)

Çizelge 4.7. Metilen Mavisi ile doyurulan aktif karbonun rejenerasyon öncesi ve sonrası değerleri. Optimum pH tespit edilirken

pH değerleri	Başlangıç Volt	Bitiş Volt	Başlangıç pH	Bitiş pH	Başlangıç Sıcaklık (°C)	Bitiş Sıcaklık (°C)	4 saatlik rejenerasyon süresi
4	3,89	4,02	4	8,85	20,5	30	
5	5,454	5,554	5	7,36	21,7	29,5	
6	5,418	5,516	6	8,36	21,7	28,3	
7	5,216	5,579	7	8,93	21,08	29,4	
8	6,166	6,058	8	7,77	20,72	30,02	
9	5,325	5,518	9	8,98	20,36	30,89	
10	5,506	6,093	10	9,26	20	28,25	



Şekil 4.21. Piyasadan doygun olarak elde edilmiş aktif karbonun optimum pH (4-10) değerlerinin rejenerasyon verimi-zaman grafiği (0.1 M NaBr, 50 mA/cm², 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi)



Şekil 4.22. Piyasadan doygun olarak elde edilmiş aktif karbonun akım geçmediği optimum pH (4-10) değerlerinin rejenerasyon verimi-zaman grafiği (0,1 M NaBr, 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi)

Çizelge 4.8. Piyasadan doygun elde edilen aktif karbonun rejenerasyon öncesi ve sonrası değerleri. Optimum pH tespit edilirken

pH değerleri	Başlangıç Volt	Bitiş Volt	Başlangıç pH	Bitiş pH	Başlangıç Sıcaklık (°C)	Bitiş Sıcaklık (°C)	4 saatlik rejenerasyon süresi
4	7,024	8,183	4	8,5	21,856	35,70	
5	6,33	6,665	5	8,79	23,056	34,00	
6	9,029	9,068	6	8,54	23,056	30,10	
7	6,286	6,584	7	8,95	22,436	30,76	
8	6,681	6,874	8	8,99	21,716	31,38	
9	9,889	9,334	9	8,88	21,716	32,25	
10	8,74	8,756	10	9,04	21,356	29,61	

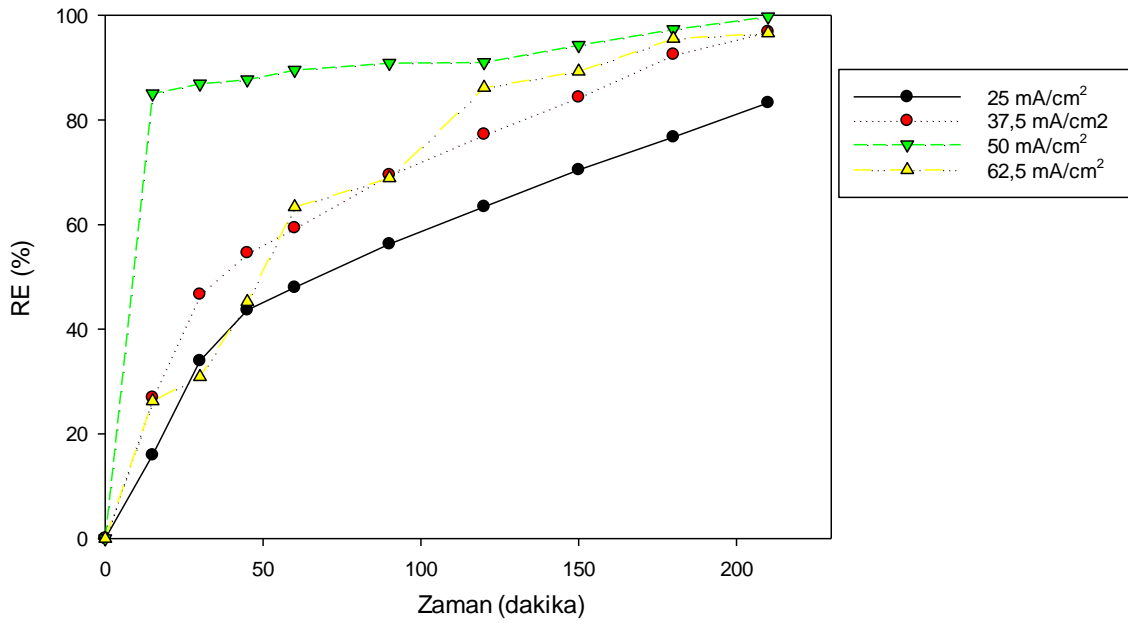
4.4. Optimum Akım Yoğunluğunun Belirlenmesi

Elektrokimyasal rejenerasyonda sadece akım yoğunluğunun artırılması durumunda bile rejenerasyon veriminin artabileceği ve daha iyi sonuç alınabileceği görülmektedir, bu da akım yoğunluğunu elektrokimyasal rejenerasyonda önemli bir parametre haline getirmektedir (Karimi-Jashni, 2002). Ayrıca akım yoğunluğundaki artışların aktif karbon rejenerasyon verimliliğinde artışa ve rejenerasyon süresinde de azalmaya neden olduğu iyi bilinmektedir (Garcia-Rodriguez vd., 2020). Sun ve ark. aktif karbonun rejenerasyon verimliliğindeki etkisi için yaptıkları çalışma buna örnektir. Giderim veriminin 1,0 A'de 180 dakikada % 90 ve 3,0 A'de 100 dakikada çalıştırıldığında ise % 98'e ulaşabileceğini kanıtlamışlardır buda enerji tüketiminde tasarruf sağlayabileceğini göstermiştir (Sun vd., 2013). Örneğin, Brown ve Roberts' in yaptığı çalışmada karbon bazlı bir adsorbanın rejenerasyon verimliliğinin artan akımla istikrarlı bir şekilde arttığını, ancak daha sonra akım yoğunluğu 20 mA/cm²'lik değerden sonra azalmaya başladığını gözlemişlerdir (Brown & Roberts, 2007).

Çalışma kapsamında her iki aktif karbon içinde gerçekleşen farklı akım yoğunluğu da 25, 37,5, 50 ve 62,5 mA/cm² rejenerasyon verimi grafiği Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'de görülmektedir. Her iki aktif karbon için en etkin verimliliğe 50 mA/cm² deki akım yoğunluğunda ulaşılmıştır. En düşük verimlilik ise yine her iki aktif karbon da 25 mA/cm²'te olduğu gözlemlenmiştir. Deneysel sonuç, aktif karbonun rejenerasyon veriminin rejenerasyon akımı yoğunluğunun artmasıyla lineer olarak arttığını göstermektedir, bu sonuç Faraday yasası ile uyumludur (Zhang, 2002).

Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'de görüldüğü üzere akım yoğunluğu arttıkça giderim verimi arttı ama 62,5 mA/cm² ulaştığı zaman giderim veriminin düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durum ya aktif karbonun parçalanma ihtimalinden dolayı ya da H₂O₂ yeniden O₂'ye dönüştürüldüğü ve •OH oluşumunu engellediği veya •OH yüksek akımlarda O₂'ye dönüştürüldüğü için ortaya çıkmış olabilir (Ye vd., 2022; You vd., 2013). Ayrıca optimum akım yoğunluğu aşıldıktan sonra özellikle elektrotlarda hidrojen ve oksijen

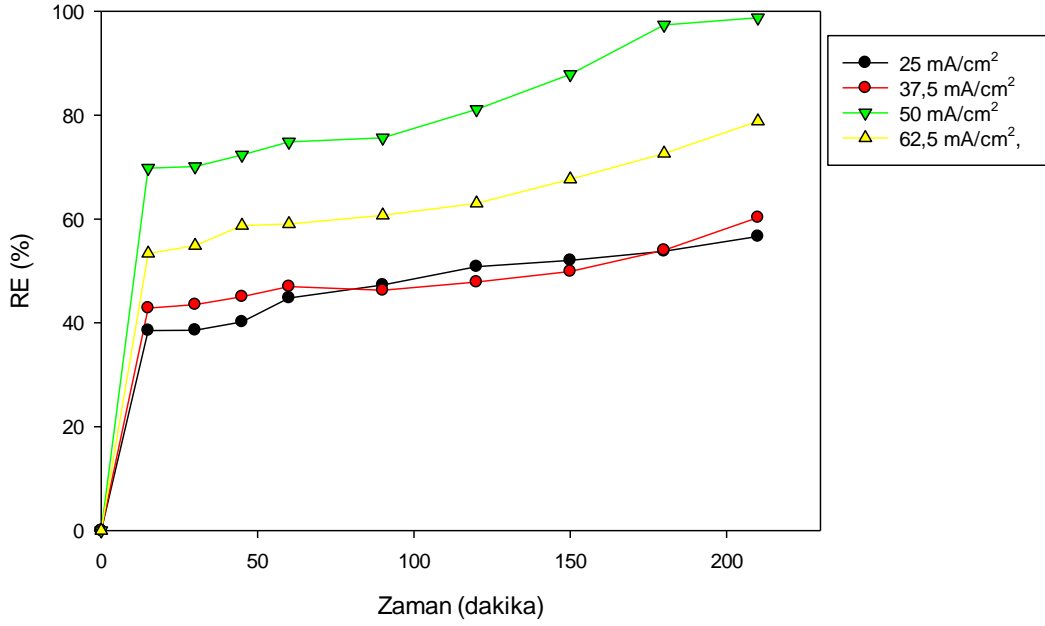
oluşumuna yönelik çözelti bozunması gibi artan yan reaksiyonlardan dolayı giderim veriminin stabilizesine veya düşmesine sebep olabilir (McQuillan vd., 2018). Yüksek akım yoğunlukları fazla kirleticilerin uzaklaştırılmasına neden olsa da, bu durum elektrik enerjisi tüketimi artıracığı içinde uygun değildir (Can vd., 2014). Ayrıca Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10'da aktif karbonun rejenerasyonu sırasında başlangıç ve bitiş sonrası değerleri gösterilmektedir.



Şekil 4.23. Metilen Mavisi ile doyurulmuş aktif karbonun optimum akım yoğunluğunun tespit edilmesi (0.1 M KBr, doğal pH, 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat)

Çizelge 4.9. Metilen Mavisi ile doyurulan aktif karbonun rejenerasyon öncesi ve sonrası değerleri. Optimum akım yoğunluğu tespit edilirken

Akım Yoğunluk değerleri	Başlangıç Volt	Bitiş Volt	Bitiş pH	Başlangıç Sıcaklık (°C)	Bitiş Sıcaklık (°C)	4 saatlik rejenerasyon süresi
25 mA/cm ²	4,591	4,755	9,85	20,2	27,2	
30 mA/cm ²	5,225	5,116	9,25	20	28,06	
50 mA/cm ²	4,623	5,211	9,28	25,1	34,6	
62,5 mA/cm ²	6,765	6,323	7,89	20,2	38	



Şekil 4.24. NaBr nin farklı akım yoğunluk değerlerinin rejenerasyon verimi-zaman grafiği (0.1 M NaBr, 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi)

Çizelge 4.10. Piyasadan doygun elde edilen aktif karbonun rejenerasyon öncesi ve sonrası değerleri. Optimum akım yoğunluğu tespit edilirken

Akım Yoğunluk değerleri	Başlangıç Volt	Bitiş Volt	Bitiş pH	Başlangıç Sıcaklık (°C)	Bitiş Sıcaklık (°C)	4 saatlik rejenerasyon süresi
25 mA/cm ²	5,812	5,998	9,2	21,59	26,95	
30 mA/cm ²	5,952	5,809	9,38	22,54	29,87	
50 mA/cm ²	4,781	5,331	8,95	25,95	38,05	
62,5 mA/cm ²	9,257	8,312	8,95	20,25	37	

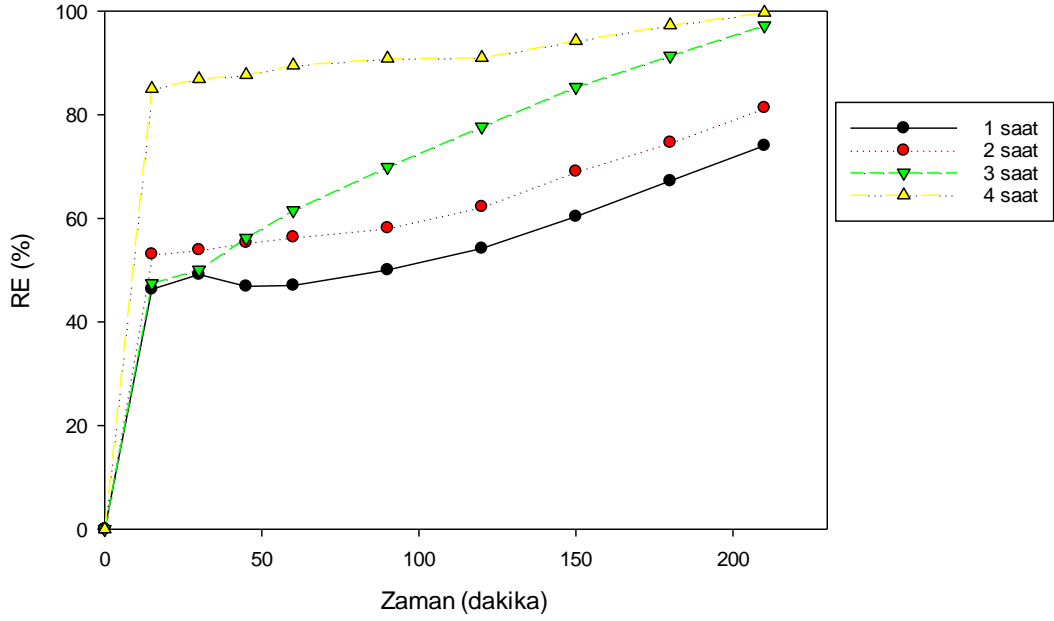
4.5. Optimum Rejenerasyon Süresinin Belirlenmesi

Rejenerasyon süresi prosesin ekonomik olması için en önemli parametrelerden biridir (M. H. Zhou & Lei, 2006). Her iki aktif karbon için farklı zamanlarda rejenerasyon edilerek optimum çalışma süresinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Şekil 4.25’de görüldüğü gibi sırasıyla 1, 2, 3 ve 4 saatlik rejenerasyon süresi altında sırasıyla % 74,04, % 81,36, % 97,21 ve % 99,73 giderim verimi elde edilmiştir. Şekil 4.26’da görüldüğü gibi sırasıyla 1, 2, 3 ve 4 saatlik rejenerasyon süresi altında sırasıyla % 50,78, % 69,59, % 70,82 ve % 98,78. Bu sonuçlar rejenerasyon verimi için rejenerasyon süresinin önemini ortaya

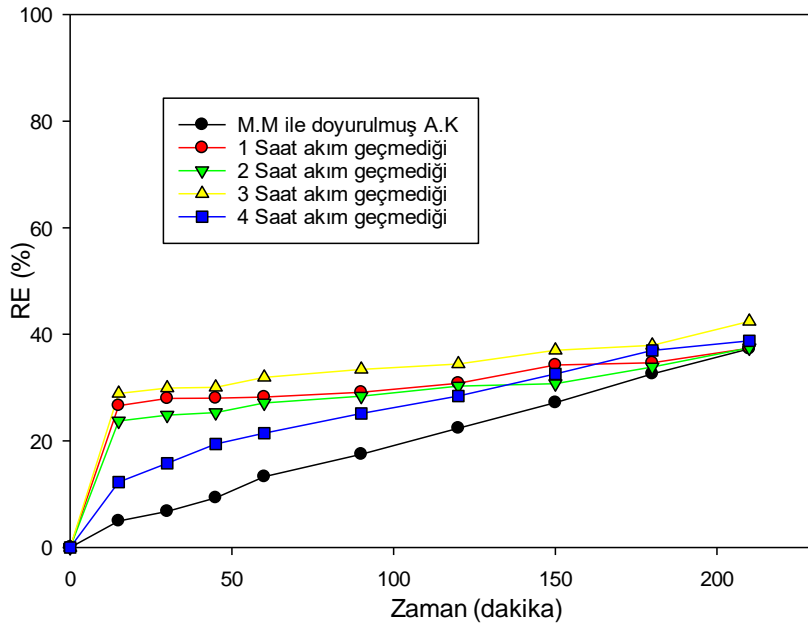
koymuştur. Rejenerasyon süresi uzadığı zaman genel olarak rejenerasyon veriminde artmaktadır. Bu sonuçlar, daha uzun rejenerasyon süresinin daha yüksek rejenerasyon verimliliği ile sonuçlandığını öne süren elektrokimyasal yöntemlerle ilgili diğer çalışmalar ile tutarlıdır (Chen vd., 2019; McQuillan vd., 2018; Narbaitz & Karimi-Jashni, 2009; Salvador vd., 2013; L. Wang & Balasubramanian, 2009). Daha uzun elektroliz sürelerinde sürecin iki ana adımda gerçekleştiğini düşündürmektedir; birincisi daha yüzeysel olarak adsorbe edilen kirleticinin uzaklaştırma reaksiyonu, ikincisi ise yavaş difüzyon nedeniyle daha uzun bir rejenerasyon süresi gerektiren aktif karbonu daha dar mikro gözeneklerine adsorbe edilen kirleticinin uzaklaştırılmasıdır (Ferrández-Gómez, Ruiz-Rosas, vd., 2021). Yine de literatürdeki veriler ile karşılaştırıldığı zaman örneğin Acuña-Bedoya ve arkadaşlarının (2020) çalışmasında, % 76 aktif karbon rejenerasyonu elde etmek için 24 saatlik bir rejenerasyon süresi gerekmiştir (Acuña-Bedoya vd., 2020) ve Zhou ve arkadaşları (2019) 12 saat sonra % 88,7 rejenerasyon verimliliğine ulaşmıştır (W. Zhou vd., 2019) rejenerasyon süresinin kısa olması ümit verici bir durumdur.

Bununla birlikte rejenerasyon süresinin daha fazla artmasıyla oksidasyon yan ürünleri artığından verimliliği azalabilir (Berenguer vd., 2010a). Yüksek rejenerasyon süreleri büyük enerji tüketimine neden olacağından yüksek maliyetler ortaya çıkacaktır (Ferrández-Gómez, Ruiz-Rosas, vd., 2021).

Ayrıca Şekil 4.26 ve 4.27’de görüldüğü gibi elektriksiz ortamda giderim verimi yok denecek kadar azdır. Çizelge 4.12 ve 4.13’de rejenerasyon öncesi ve sonrası değerler sunulmaktadır.



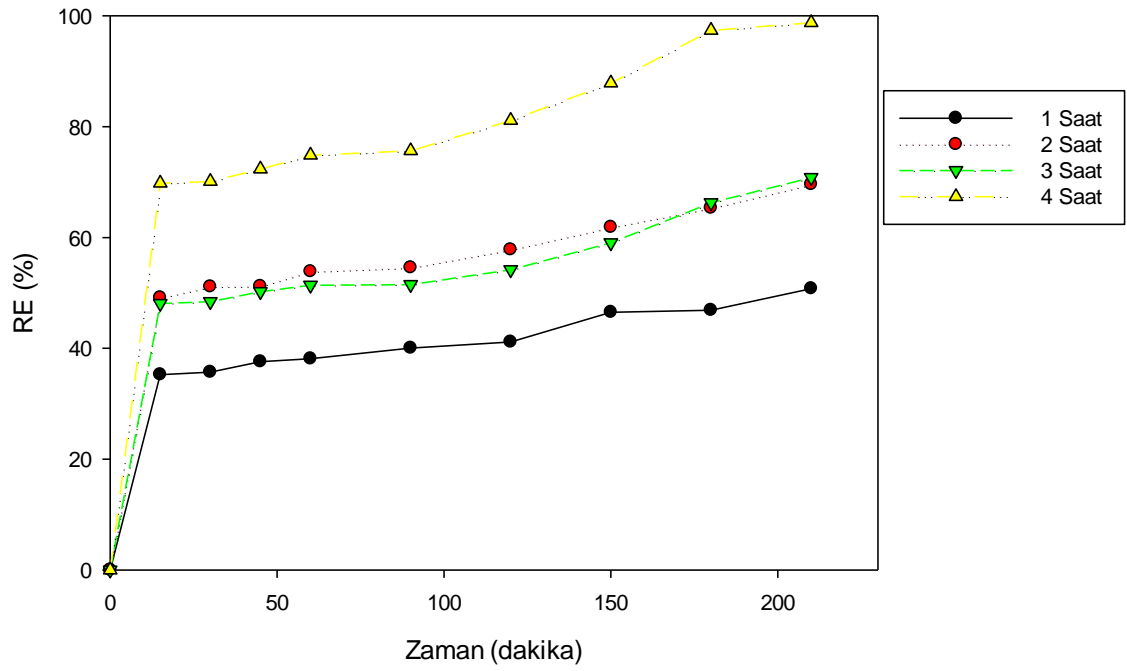
Şekil 4.25. Metilen mavisi ile doyurulan aktif karbonun farklı zaman değerlerinin rejenerasyon verimi-zaman grafiği (0.1 M KBr, 50 mA/cm², 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi)



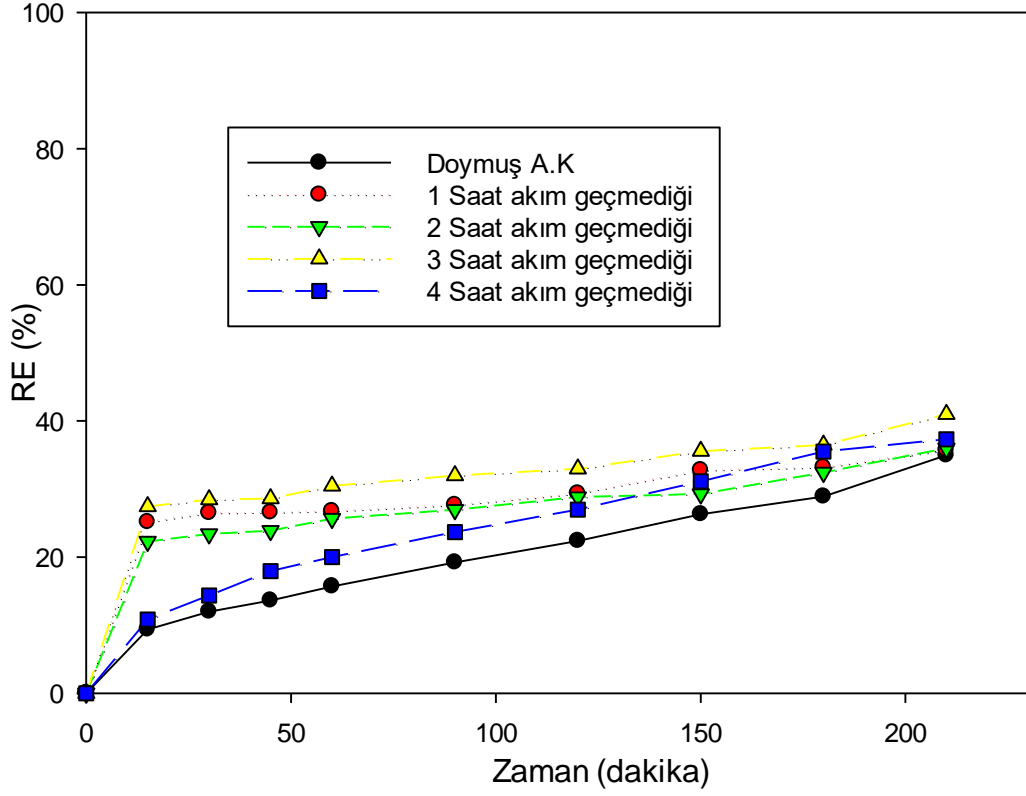
Şekil 4.26. Metilen mavisi ile doyurulan aktif karbonun akım geçmeyen farklı zaman değerlerinin rejenerasyon verimi-zaman grafiği (0.1 M KBr, 50 mA/cm², 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi)

Çizelge 4.11. Metilen Mavisi ile doyurulan aktif karbonun rejenerasyon öncesi ve sonrası değerleri. Optimum rejenerasyon süresi tespit edilirken

Rejenerasyon Süresi (saat)	Başlangıç Volt	Bitiş Volt	Bitiş pH	Başlangıç Sıcaklık (°C)	Bitiş Sıcaklık (°C)
1	8,117	7,747	9,2	19,6	28,6
2	5,231	5,321	9,38	20,1	29,1
3	5,125	6,013	8,9	20	33,2
4	4,623	5,211	9,28	25,1	34,6



Şekil 4.27. Piyasadan doygun olarak elde edilen aktif karbonun farklı zaman değerlerinin rejenerasyon verimi-zaman grafiği (0.1 M NaBr, 50 mA/cm², 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi)



Şekil 4.28. Piyasadan doymuş olarak elde edilen aktif karbonun akım geçmediği farklı zaman değerlerinin rejenerasyon verimi-zaman grafiği (0.1 M NaBr, 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi)

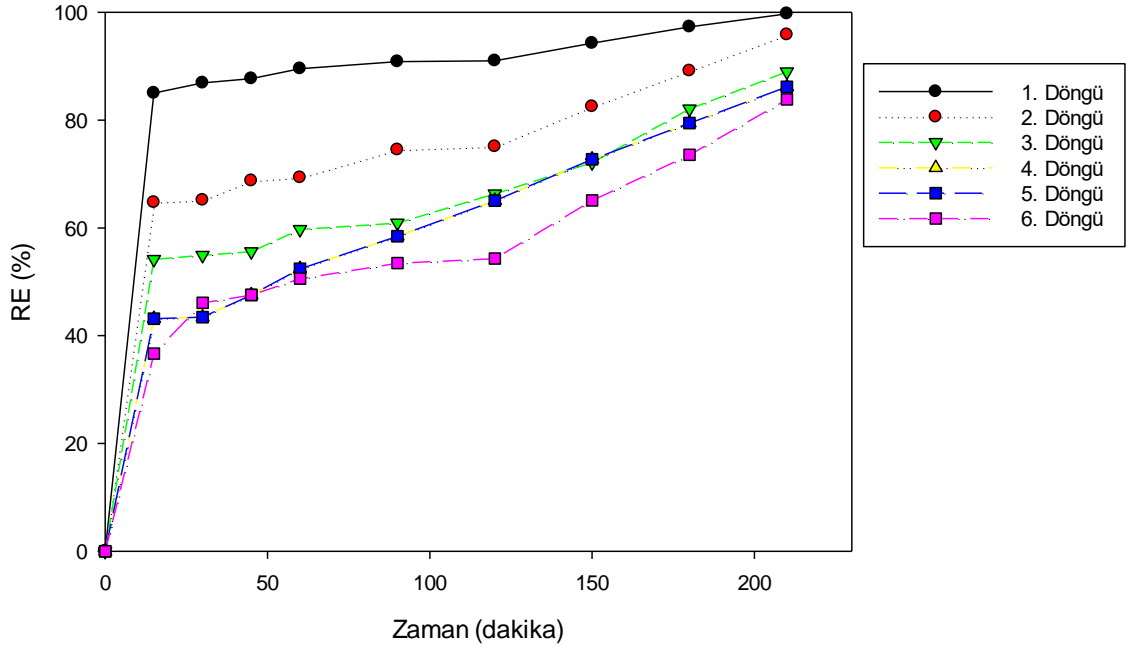
Çizelge 4.12. Piyasadan doymuş olarak elde edilen aktif karbonun rejenerasyon öncesi ve sonrası değerleri. Optimum rejenerasyon süresi tespit edilirken

Rejenerasyon Süresi (saat)	Başlangıç Volt	Bitiş Volt	Bitiş pH	Başlangıç Sıcaklık (°C)	Bitiş Sıcaklık (°C)
1	6,802	6,847	9,2	19,6	28,6
2	7,987	8,196	9,38	20,1	35,5
3	7,474	6,876	8,9	20	33,2
4	4,781	5,331	8,95	25,95	38,05

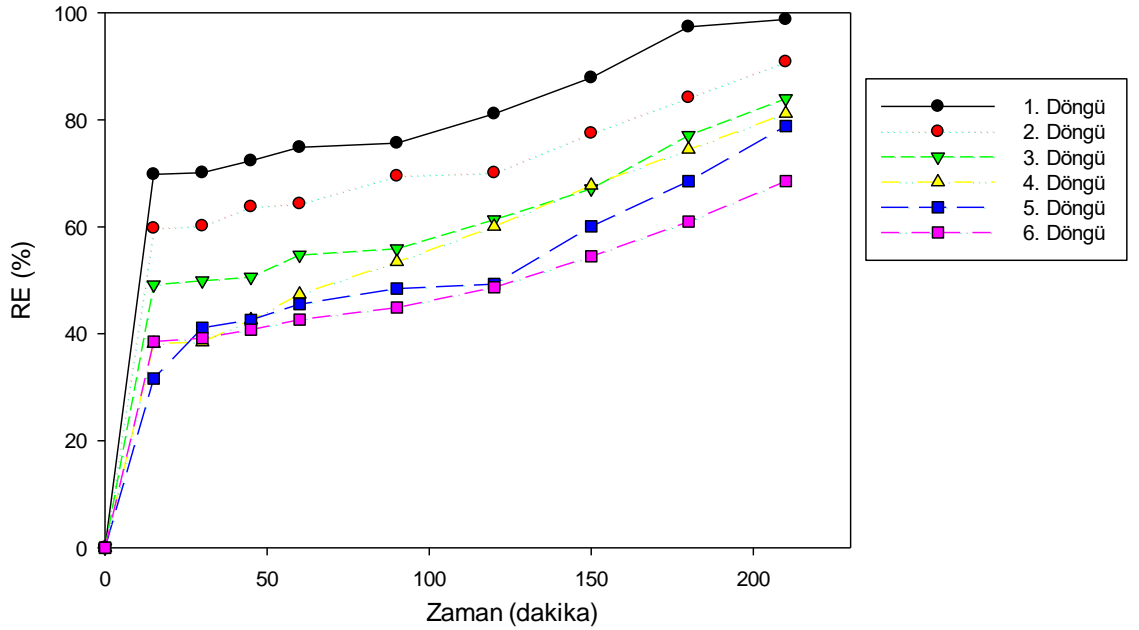
4.6. Optimum Döngü Sayısının Belirlenmesi

Optimum şartlar belirlendikten sonra önemli bir ticari etkiye sahip olan döngü sayısı da çalışmada incelenmiştir. Aktif karbonun tekrarlanan rejenerasyonu aynı çalışma koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Her iki aktif karbonun rejenerasyonunda elektrokimyasal işlemin etkinliği 6 ardışık adsorpsiyon/rejenerasyon döngüsü boyunca izlenmiştir. Şekil 4.29 ve Şekil 4.30' da sunulan sonuçlar, genel olarak, ilk döngüde oldukça önemli yüksek rejenerasyon veriminin elde edildiğini ancak rejenerasyon sürecinin verimliliğinin daha sonraki döngülerde azaldığını tespit edilmiştir. İlk rejenerasyon döngüsü sonrasında aktif karbonun yapısında bozulmalara sebep olduğu için rejenerasyon verimi giderek düşmüş olabilir (Zhang vd., 2002). Bu çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 4.29'da sırasıyla döngü sonrası rejenerasyon giderim verimleri % 99,73, % 95,85, % 88,97, % 86,18, % 86,18 ve % 83,83 iken Şekil 4.30' ki durum % 98,78, % 90,85, % 83,97, % 81,18, % 78,83 ve % 68,55'dir.

Bu sonuçlar, elektrokimyasal rejenerasyon yönteminin tekrarlanan döngülerde bile nispeten yüksek bir verimlilikte tutulabileceğini göstermektedir. Zhou ve Lei 2006' da yaptıkları çalışmada ilk rejenerasyonda % 89,4'lük bir giderim elde ederken 5'inci rejenerasyonda % 77,7'lik bir giderim elde ettiklerini ifade etmişlerdir (M. H. Zhou & Lei, 2006). Elektrokimyasal yöntemle aktif karbon rejenerasyonu 8 döngüyle araştıran Santos ve arkadaşları ilk döngüde uygulanan akım türüne (anodik veya katodik) bakılmaksızın, sırasıyla % 79 ve % 84 rejenerasyon verimini elde ettiklerini ifade etmişlerdir. Ancak rejenerasyon sürecinin verimliliğinin azalarak anodik veya katodik döngü için 8 döngüden sonra sırasıyla % 13 ve % 67 değerlerine ulaştığını görmüşlerdir (Santos vd., 2022). Bu doktora çalışmasında elde edilen verilerde literatür ile uyum sağlamaktadır. Belki de her döngüden sonra aktif karbon mikro gözeneklerin yok olmasından dolayı yüzey alanının azalmasına neden olduğu için giderim verimi giderek düşmüş olabilir (L. Wang & Balasubramanian, 2009).



Şekil 4.29. Döngü sayısının tespiti (0,1 M KBr, 50 mA/cm², 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, rejenerasyon süresi 4 saat)

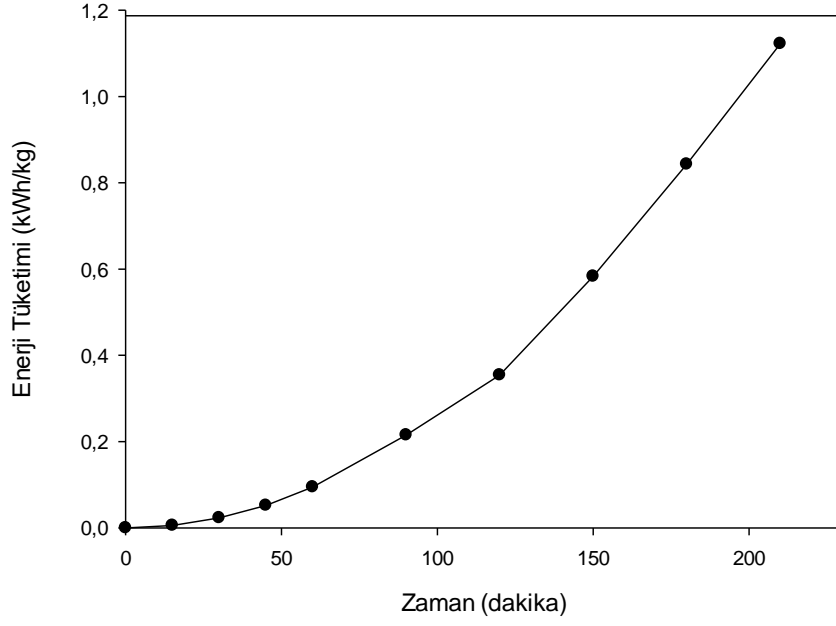


Şekil 4.30. Döngü sayısının tespiti (0,1 M NaBr, 50 mA/cm², 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, rejenerasyon süresi 4 saat)

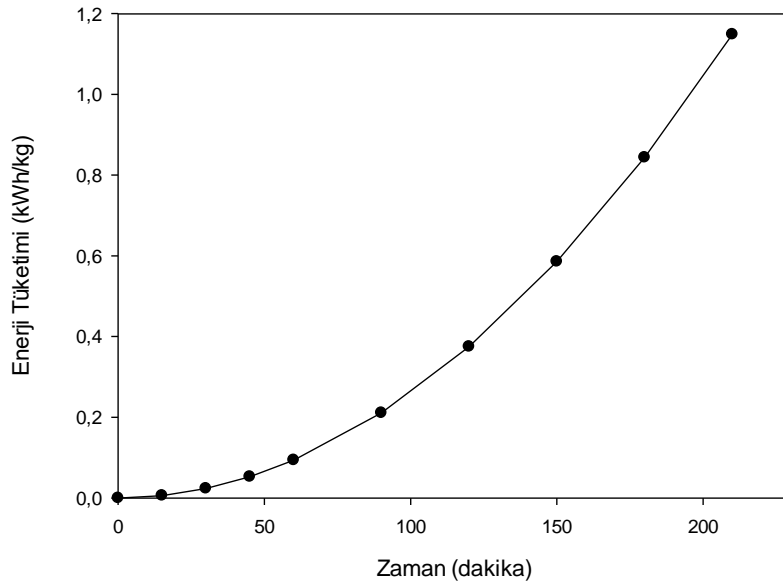
4.7. Enerji Tüketiminin Hesaplanması

Son olarak optimum şartlar altındaki rejenera adsorbanın kilogram başına enerji tüketimi her iki aktif karbon türü için incelenmiştir. Enerji tüketimi hesabı metilen mavisi ile doyurulan ve piyasadan doygun olarak elde edilen aktif karbon için 5,211 V ve 5,331 V altında sırasıyla 1,12 ve 1,16 kWsa/kg olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.31 ve Şekil 4.32 'de görüldüğü gibi her iki karbon için zamanla enerji tüketim hesabı artmaktadır. Aktif karbonun elektrokimyasal rejenerasyonu için farklı çalışmalarda da benzer sonuçlar bulunmuştur (Alvarez-Pugliese vd., 2019; Brown & Roberts, 2007; de Mello vd., 2022).

Günümüzde endüstriyel olarak kullanılan termal rejenerasyonun etkili sıcaklığını korumak için gereken yüksek enerji tüketimi nedeniyle pahalı bir süreç olduğu göz önüne alındığında, bu veriler ile aktif karbonun elektrokimyasal rejenerasyon sisteminin uygulanabilirliğini doğrulamak için çok önemlidir (Ohyama vd., 2009; Trelu vd., 2018). Mikrodalga rejenerasyon yöntemi kullanılarak Pan ve diğerleri (2016) tarafında geliştirilen ve sadece % 85'lik bir rejenerasyon verimi elde edebilmek için 928 kWsa/kg elektrik enerjisi tüketimi hesaplamışlardır (Pan vd., 2016). Bu çalışmada elde edilen veriler Pan ve diğerleri (2016) tarafından yapılan çalışma ile karşılaştırıldığı zaman daha avantajlı olduğu ortaya konulmaktadır. Ayrıca aktif karbonun taşıma aşamasındaki tasarruflar göz önüne alındığında elektrokimyasal yöntemini diğer yöntemlere göre daha ekonomik hale getirmektedir (Acuña-Bedoya vd., 2020).



Şekil 4.31. Metilen mavisi ile doyulan aktif karbonun optimum şartlar altındaki enerji tüketimi-zaman grafiği (0.1 M NaBr, 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi)



Şekil 4.32. Piyasadan doygun olarak elde edilen aktif karbonun optimum şartlar altındaki enerji tüketimi-zaman grafiği (0,1 M KBr, 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi)

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışması ile Sn/Sb/Ni/-Ti kafes anodu ve Pt-Ti katodu kullanılarak hem metilen mavisi ile doyurulmuş hem de piyasadan doygun olarak elde edilmiş aktif karbonun elektrokimyasal rejenerasyonu için gerekli olan optimum şartlar incelenmiştir. Optimum şartlar belirlendikten sonra adsorpsiyon rejenerasyon döngü sayısı ortaya konulmuştur. Çalışmanın son basamağında her iki aktif karbon için optimum şartlar altındaki enerji tüketim hesaplanmıştır. Böylelikle güncel olarak kullanılan termal rejenerasyon için alternatif bir rejenerasyon yöntemi ortaya konulması amaçlanmıştır.

Çalışmada elektrolit türü, elektrolit konsantrasyonu, başlangıç pH, akım yoğunluğu, rejenerasyon süresi ve rejenerasyon döngü sayısı gibi işletme parametrelerinin aktif karbonun rejenerasyonu üzerindeki giderim verimliliği etkileri detaylı olarak araştırılmış ve açıklanmıştır.

Metilen mavisi ile doyurulan aktif karbonun rejenerasyonu çalışması neticesinde elde edilen sonuçlar

- Deneyleerde ilk olarak etkin elektrolit türünün tespit çalışmaları yapılmıştır. Metilen mavisi ile doyurulan aktif karbon çalışmasında optimum elektrolit türünün belirlenmesi için 50 mA/cm^2 , 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat sabit tutularak 10 (Na_2SO_4 , K_2SO_4 , NaCl , KCl , KI , NaI , KBr , NaBr , KF ve NaF) farklı elektrolit türünün 0,1 M konsantrasyonun da hem elektrik verilerek hem de elektrik verilmeden etkileri incelenmiştir. En yüksek rejenerasyon verimine % 99,73 ile KBr ' de elektrolitinde elde edilirken en düşük giderim verimine ise % 66,89 ile NaF elektrolitinde elde edilmiştir.
- Optimum elektrolit türü belirlendikten sonra optimum elektrolit konsantrasyon tespiti çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu araştırma kapsamında KBr elektroliti 0,05, 0,1, 0,2, 0,3 ve 0,4 M konsantrasyonu denenmiştir. En iyi rejenerasyon verimine 0,1 M elektrolit konsantrasyonun elde edilirken en düşük rejenerasyon

verimin ise % 83,97 ile en yüksek konsantrasyon değeri olan 0,4 M'de olduğu görülmüştür.

- Elektrokimyasal rejenerasyonu etkileyen parametreler arasında olan başlangıç pH'in optimum değerinin tespiti için 4, 5, 6, 7, 8, 9 ve 10 pH değerlerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Araştırma aşamasında çalışma koşulları; 0,1 M KBr, 50 mA/cm², 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi sabit tutularak incelenmiştir. Çalışma sonucunda en yüksek rejenerasyon verimine % 98,78 ile pH 8' elde edilmiştir. Doğal pH olan 8,23'te elde edilen rejenerasyon verimi % 99,73 olduğu için çalışmalarda herhangi bir pH ayarlaması yapılmadan doğal pH ile devam edilmiştir.
- Sn/Sb/Ni-Ti anodu ve Pt/Ti katodu kullanıldığı elektrokimyasal yöntem ile aktif karbon rejenerasyonunda akım yoğunluğu parametresinin optimize çalışmaları yapılmıştır. Akım yoğunluğun etkisinin araştırılması için 25 mA/cm² ile 62,5 mA/cm² arasında ki farklı değerlerde gerçekleştirilmiştir. Yüksek rejenerasyon verimine 50 mA/cm²'de olduğu tespit edilmiştir. En düşük rejenerasyon verimine % 83,27 ile 25 mA/cm² akım yoğunluğunda bulunmuştur. En yüksek akım yoğunluğu olan 62,5 mA/cm² ise rejenerasyon verimi % 96,60 olduğu görülmüştür. Yüksek akımın hem maliyet olarak getirisi olduğu hem de düşük verim elde edilmesinden dolayı çalışma da ki optimum akım yoğunluğuna 50 mA/cm² olarak karar verilmiştir.
- Çalışmada optimizasyon parametrelerinden bir tanesi de aktif karbon rejenerasyonun süresidir. Optimum rejenerasyon süresinin tespit etmek için çalışma kapsamında 0,1 M KBr, 50 mA/cm², 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi sabit tutularak rejenerasyon süresi 1 ile 4 saat arasında gerçekleştirilmiştir. Rejenerasyon süresi artıkça rejenerasyon giderim verimi %74,04'ten % 99,73'e artmıştır. En düşük giderim verimine en kısa sürede görülmesi birçok çalışma ile ortaya konulmuştur.
- Sürdürülebilir bir adsorpsiyon-rejenerasyon sürecinin ortaya konulabilmesi için yapılan diğer çalışma ise döngü sayısının tespitidir. Bunda önceki adamlarda belirlenen optimum şartlar altında (0,1 M KBr, 50 mA/cm², 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, rejenerasyon süresi 4 saat ve doğal pH) döngü

sayısı tespit edilmiştir. Toplam 6 adsorpsiyon-rejenerasyon döngüsü sonucunda giderim verimi % 99,73'ten % 83,83'e düştüğü görülmüştür

- Optimum şartlar belirlendikten sonra yapılan son araştırma aktif karbonların elektrokimyasal rejenerasyonu için gerekli enerji tüketimi hesabının ortaya konulmasıdır. Metilen mavisi ile doyurulan aktif karbon için 5,211 V altında ki enerji tüketimi 1,12 kWsa/kg olarak hesaplanmıştır.

Piyasadan doymun olarak elde edilmiş aktif karbonun rejenerasyonu neticesinde elde edilen sonuçlar

- Metilen mavisi ile doyurulmuş aktif karbon çalışmasında olduğu gibi piyasadan doymun olarak elde edilmiş aktif karbonda da ilk aşama olarak optimum elektrolit türünün tespiti araştırmaları yapılmıştır. Bu kapsamda 50 mA/cm², 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, doğal pH ve rejenerasyon süresi 4 saat olarak sabit tutularak Na₂SO₄, K₂SO₄, NaCl, KCl, KI, NaI, KBr, NaBr, KF ve NaF elektrolitin rejenerasyon verimi üzerine etkileri araştırılmıştır. Elektrolit türlerinin rejenerasyon verimleri sırasıyla % 49,13, % 53,31, % 56,36, %59,84, % 36,06, % 62,89, % 93,73, % 98,78, % 56,21 ve % 46,61 olarak tespit edilmiştir. En yüksek rejenerasyon verimine % 98,78 ile NaBr elektrolitinde ve buna en yakın değer % 93,73 ile KBr elektrolitinde olduğu görülmüştür. Çalışmanın diğer aşamalarında NaBr elektroliti ile devam edilmiştir.
- Çalışma kapsamında 0,05, 0,1, 0,2, 0,3 ve 0,4 M'ye sahip NaBr elektrolitin farklı konsantrasyonu denemeleri yapılmıştır. En iyi verim % 98,78 ile 0,1 M de belirlenirken en düşük verim ise % 57,23 ile 0,4 M'de tespit edilmiştir.
- Aktif karbonun elektrokimyasal yöntemi ile rejenerasyonu araştırma kapsamında optimum başlangıç pH değerini belirlemek için doğal pH dahil olmak üzere 8 farklı (4, 5, 6, 7, 8, 9 ve 10) pH değerinde çalışmalar yapılmıştır. Araştırma aşamasında çalışma koşulları; 0,1 M NaBr, 50 mA/cm², 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi sabit tutularak incelenmiştir. Çalışma sonucunda pH= 8 de % 98,78 giderim verimi olduğu gözlemlenirken doğal pH olan 7,79 da ki giderim verimi de pH 8 ile benzerlik göstermiştir. Dolayısıyla her hangi bir

başlangıç pH ayarı yapılmadan bundan sonra ki araştırmalara doğal pH ile devam edilmiştir.

- Akım yoğunluğunun aktif karbon rejenerasyonu üzerinde ki etkisini araştırmak için 25, 37,5, 50 ve 62,5 mA/cm² farklı akım yoğunluğu altında çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Akım yoğunluğu artıkça rejenerasyon verimi sırasıyla % 56,67, % 60,29, % 98,7 ve % 78,83 olarak tespit edilmiştir. Yüksek akım yoğunluğunda düşük giderim verimi elde edildiği için çalışmalara 50 mA/cm² akım yoğunluğunda gerçekleştirilmiştir.
- Piyasadan doygun olarak elde edilmiş aktif karbon rejenerasyonu için etkin değeri araştırılan bir diğer faktör ise rejenerasyon süresidir. Rejenerasyon süresi 1 saatten 4 saate çıkıldığı zaman rejenerasyon giderim NaBr elektroliti için % 50,78'den % 98,78'e yükselmiştir. Uzun rejenerasyon sürelerinde elektrolitin rengi şeffaf renkten koyu kahverengine doğru arttığı gözlemlenmiştir. Bu durumun aktif karbonun parçalanmasından dolayı olma ihtimali vardır.
- Optimum şartlar belirlendikten sonra piyasadan doygun olarak elde edilmiş aktif karbon için optimum şartlar altında adsorpsiyon-rejenerasyon deneylere tabi tutulmuştur. Bu işlem 6 kere tekrarlanmıştır. Her döngüden sonra giderim veriminin azaldığı tespit edilmiştir. Giderim verimi 6. döngüden sonra NaBr destek elektroliti için % 98,78'den % 68,55'e düşmüştür. Bu durum aktif karbon üzerindeki por çaplarının her döngüden sonra daha da bozunmasından kaynaklanmış olabilir.
- NaBr elektroliti ile gerçekleştirilen aktif karbon rejenerasyonu için optimum şartlar (0,1 M KBr, 50 mA/cm², 13 g aktif karbon miktarı, 200 ml elektrolit hacmi, rejenerasyon süresi 4 saat, doğal pH) belirlendikten sonra yapılan son araştırma aktif karbonun elektrokimyasal rejenerasyonu için gerekli enerji tüketimi hesabının ortaya konulmasıdır. Piyasadan doygun olarak elde edilen aktif karbon için 5,331 V altında ki enerji tüketimi 1,16 kWsa/kg olarak hesaplanmıştır.

Esasen aktif karbonun kendisi de iyi bir anot materyali olup elektrokimyada yaygın kullanım alanlarına sahiptir (grafit, grafen, BDD anot vs.). Bu özelliği aynı zamanda bize adsorpsiyon prosesi sonucu oluşan atık aktif karbonun rejenere edilerek kullanım fırsatını olarak sunmaktadır. Günümüzde kullanımı yüksek olan rejenerasyon yöntemleri

düşünüldüğü zaman ya pahalı yada verimsiz olması yanında tutulan kirleticilerin konsantrasyonuna göre tekrar çevreye sorun olma potansiyeli teşkil etmektedir.

Bu çalışma ile Sn/Sb/Ni-Ti kafes anodu ve Pt/Ti katodu kullanılarak aktif karbonun elektrokimyasal giderimi için umut verici bir teknik olduğu sonucuna varılmıştır. Bu veriler ışığında elektrokimyasal rejenerasyonun piyasada kullanılan yöntemlere alternatif olabileceği ifade edilebilir. Ayrıca termal rejenerasyon yöntemine alternatif olarak endüstriyel ölçeklerde de elektrokimyasal rejenerasyon yöntemi kullanılabileceği düşünülmektedir. Araştırmalarda genelde kullanılan BDD anot ve elektrolit türü ise NaCl'dir, bu çalışma ile araştırmalarda kullanılan anot ve elektrolit çeşitlerine zenginlik kazandırılmıştır.

Sonuç olarak, elektrokimyasal rejenerasyon yöntem ile aktif karbon rejenerasyonunun daha verimli, kontrollü ve çevre dostu bir şekilde gerçekleşmesi sağlanmıştır. Daha düşük enerji tüketimi, kontrol edilebilirlik ve çevresel etkilerin azalması gibi avantajlarıyla elektrokimyasal rejenerasyon, aktif karbonun rejenerasyon sürecinde önemli bir yer tuttuğu ortaya konulmuştur. Ülkemizde bu yöntemin henüz yaygın olarak kullanılmaması, bu potansiyelin henüz tam anlamıyla keşfedilmemiş olmasından kaynaklıdır.

Çalışmanın amacı aktif karbonların elektrokimyasal rejenerasyonu olduğu için elektrolit çözeltisinde gerçekleşen reaksiyonlar araştırılmamıştır. Çalışmanın bu aşaması daha sonra ki araştırmalarda kapsamlı olarak incelenerek ortaya konulmasına biliniyor.

Ayrıca bu doktora çalışması sırasında deneyler laboratuvar ortamında gerçekleştirildiği için gerçek bir sistemde görülmeyen ve tespiti bu çalışmayla ortaya net bir şekilde ortaya konulamayan sorunlarla karşılaşmak mümkündür. Bu sorunların net bir şekilde ortaya konulabilmesi için bu çalışmada ki gibi kesikli değil sürekli çalışılan bir adsorpsiyon-rejenerasyon sisteminde çalışan pilot bir sistemin kurularak incelenmesine gerek vardır.

KAYNAKLAR

- Acuña-Bedoya, J., Comas-Cabrales, J. A., Alvarez-Pugliese, C. E., & Marriaga-Cabrales, N. (2020). Evaluation of electrolytic reactor configuration for the regeneration of granular activated carbon saturated with methylene blue. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104074. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104074>
- Alvarez-Pugliese, C. E., Acuña-Bedoya, J., Vivas-Galarza, S., Prado-Arce, L. A., & Marriaga-Cabrales, N. (2019). Electrolytic regeneration of granular activated carbon saturated with diclofenac using BDD anodes. *Diamond and Related Materials*, 93, 193–199. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2019.02.018>
- Asgari, G., Seid-mohammadi, A., Rahmani, A., Samadi, M. T., Salari, M., Alizadeh, S., & Nematollahi, D. (2021). Diuron degradation using three-dimensional electro-peroxone (3D/E-peroxone) process in the presence of TiO₂/GAC: Application for real wastewater and optimization using RSM-CCD and ANN-GA approaches. *Chemosphere*, 266, 129179. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129179>
- Aslım, İ. (2019). *İlaç Aktif Maddelerle Yüklenmiş Aktif Karbonun Biyorejenerasyonunda Çamur Yaşının Etkisinin Araştırılması*. İstanbul Üniversitesi.
- Baytar, O., & Ceyhan, A. A. (2018). Metilen Mavisinin Magnetik NiFe₂O₄/Aktif Karbon Nanokompoziti İle Adsorpsiyonu: Kinetik Ve İzoterm. *Selcuk University Journal of Engineering ,Science and Technology*, 6(2), 227–241. <https://doi.org/10.15317/Scitech.2018.129>
- Berenguer, R., Marco-Lozar, J. P., Quijada, C., Cazorla-Amorós, D., & Morallón, E. (2010a). Electrochemical regeneration and porosity recovery of phenol-saturated granular activated carbon in an alkaline medium. *Carbon*, 48(10), 2734–2745. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.03.071>
- Berenguer, R., Marco-Lozar, J. P., Quijada, C., Cazorla-Amorós, D., & Morallón, E. (2010b). Comparison among Chemical, Thermal, and Electrochemical Regeneration of Phenol-Saturated Activated Carbon. *Energy & Fuels*, 24(6), 3366–3372. <https://doi.org/10.1021/ef901510c>
- Bouaziz, I., Chiron, C., Abdelhedi, R., Savall, A., & Groenen Serrano, K. (2014). Treatment of dilute methylene blue-containing wastewater by coupling sawdust adsorption and electrochemical regeneration. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(14), 8565–8572. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2785-z>
- Brown, N. W., & Roberts, E. P. L. (2007). Electrochemical pre-treatment of effluents containing chlorinated compounds using an adsorbent. *Journal of Applied Electrochemistry*, 37(11), 1329–1335. <https://doi.org/10.1007/s10800-007-9376-3>
- Bunker, B., Dvorak, B., & Aly Hassan, A. (2023). Thermal Regeneration of Activated Carbon Used as an Adsorbent for Hydrogen Sulfide (H₂S). *Sustainability*, 15(8), 6435. <https://doi.org/10.3390/su15086435>
- Cabal, B., Tsyntsarski, B., Budinova, T., Petrov, N., Parra, J. B., & Ania, C. O. (2009). Improved phenol adsorption on carbons after mild temperature steam reactivation. *Journal of Hazardous Materials*, 166(2–3), 1289–1295. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.12.041>
- Can, B. Z., Boncukcuoglu, R., Yilmaz, A. E., & Fil, B. A. (2014). Effect of some operational parameters on the arsenic removal by electrocoagulation using iron electrodes. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 12(1), 1–10. <https://doi.org/10.1186/2052-336X-12-95>

- Cardoso, R., Muniz, D., Lucena Matos, C., Caliman, J., & Linares, J. J. (2023). The challenging removal of emerging pollutants: electrochemical regeneration to recover the adsorption capacity of a caffeine-saturated activated carbon. *Chemical Papers*. <https://doi.org/10.1007/s11696-023-02809-0>
- Chen, W., Dong, J., Zhou, S., Zhang, C., & Fu, D. (2019). Electrochemical mineralization of 1-naphthol and 2-naphthol using boron-doped diamond anodes: Factor analysis and mechanisms study. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 850. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2019.113399>
- Dai, Y. D., Yuan, C., Huang, C. P., & Chiang, P. C. (2017). Regeneration of spent carbon nanotubes by electrochemical oxidation over RuO₂/Ti electrode. *Separation and Purification Technology*, 178, 207–214. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.01.021>
- de Mello, R., Motheo, A. J., Sáez, C., & Rodrigo, M. A. (2022). Combination of granular activated carbon adsorption and electrochemical oxidation processes in methanol medium for benzene removal. *Electrochimica Acta*, 425, 140681. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2022.140681>
- Demir, E., & Yalçın, H. (2014). Adsorbentler: Sınıflandırma, Özellikler, Kullanım ve Öngörüler. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 7(2), 70–79.
- El Gamal, M., Mousa, H. A., El-Naas, M. H., Zacharia, R., & Judd, S. (2018). Bio-regeneration of activated carbon: A comprehensive review. *Separation and Purification Technology*, 197, 345–359. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.01.015>
- Ersan, G., Cerrón-Calle, G. A., Ersan, M. S., & Garcia-Segura, S. (2023). Opportunities for in situ electro-regeneration of organic contaminant-laden carbonaceous adsorbents. *Water Research*, 232, 119718. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119718>
- Feng, L., van Hullebusch, E. D., Rodrigo, M. A., Esposito, G., & Oturan, M. A. (2013). Removal of residual anti-inflammatory and analgesic pharmaceuticals from aqueous systems by electrochemical advanced oxidation processes. A review. *Chemical Engineering Journal*, 228, 944–964. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.05.061>
- Ferrández-Gómez, B., Cazorla-Amorós, D., & Morallón, E. (2021). Feasibility of electrochemical regeneration of activated carbon used in drinking water treatment plant. Reactor configuration design at a pilot scale. *Process Safety and Environmental Protection*, 148, 846–857. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.02.007>
- Ferrández-Gómez, B., Ruiz-Rosas, R., Beaumont, S., Cazorla-Amorós, D., & Morallón, E. (2021). Electrochemical regeneration of spent activated carbon from drinking water treatment plant at different scale reactors. *Chemosphere*, 264, 128399. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128399>
- Garcia-Rodriguez, O., Villot, A., Olvera-Vargas, H., Gerente, C., Andres, Y., & Lefebvre, O. (2020). Impact of the saturation level on the electrochemical regeneration of activated carbon in a single sequential reactor. *Carbon*, 163, 265–275. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.02.041>
- Jaya Rajan, M., & Indira Anish, C. (2022). Role of Activated Carbon in Water Treatment. İçinde *Water Quality - New Perspectives [Working Title]*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.108349>
- Kannan, N., Karthikeyan, G., & Tamilselvan, N. (2006). Comparison of treatment potential of electrocoagulation of distillery effluent with and without activated Areca

- catechu nut carbon. *Journal of Hazardous Materials*, 137(3), 1803–1809. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.05.048>
- Karabacakoglu, B., & Savlak, Ö. (2014). Electrochemical Regeneration of Cr(VI) Saturated Granular and Powder Activated Carbon: Comparison of Regeneration Efficiency. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(33), 13171–13179. <https://doi.org/10.1021/ie500161d>
- Karimi-Jashni, A. (2002). *Electrochemical reactivation of granular activated carbon*. University of Ottawa.
- Kundu, S., Chowdhury, I. H., & Naskar, M. K. (2018). Hierarchical Porous Carbon Nanospheres for Efficient Removal of Toxic Organic Water Contaminants of Phenol and Methylene Blue. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 63(3), 559–573. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.7b00745>
- Liu, Z., Ren, B., Ding, H., He, H., Deng, H., Zhao, C., Wang, P., & Dionysiou, D. D. (2020). Simultaneous regeneration of cathodic activated carbon fiber and mineralization of desorbed contaminations by electro-peroxydisulfate process: Advantages and limitations. *Water Research*, 171(1154562), 115456. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115456>
- Lu, P. J., Lin, H. C., Yu, W. Te, & Chern, J. M. (2011). Chemical regeneration of activated carbon used for dye adsorption. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 42, 305–311. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2010.06.001>
- McQuillan, R. V., Stevens, G. W., & Mumford, K. A. (2018). The electrochemical regeneration of granular activated carbons: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 355, 34–49. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.04.079>
- Mohammad, H. (2016). *Advanced Oxidation for Wastewater Treatment by Adsorption with Electrochemical Regeneration*. Manchester University.
- Narbaitz, R. M., & Cen, J. (1994). Electrochemical regeneration of granular activated carbon. *Water Research*, 28(8), 1771–1778. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)90250-X](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)90250-X)
- Narbaitz, R. M., & Karimi-Jashni, A. (2009). Electrochemical regeneration of granular activated carbons loaded with phenol and natural organic matter. *Environmental Technology*, 30(1), 27–36. <https://doi.org/10.1080/09593330802422803>
- Narbaitz, R. M., & Karimi-Jashni, A. (2012). Electrochemical reactivation of granular activated carbon: Impact of reactor configuration. *Chemical Engineering Journal*, 197, 414–423. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.05.049>
- Narbaitz, R. M., & McEwen, J. (2012). Electrochemical regeneration of field spent GAC from two water treatment plants. *Water Research*, 46(15), 4852–4860. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.05.046>
- Nienhauser, A. B., Ersan, M. S., Lin, Z., Perreault, F., Westerhoff, P., & Garcia-Segura, S. (2022). Boron-doped diamond electrodes degrade short- and long-chain per- and polyfluorinated alkyl substances in real industrial wastewaters. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(2), 107192. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107192>
- Ohyama, K., Kishikawa, N., Matayoshi, K., Adutwum, L. A., Wada, M., Nakashima, K., & Kuroda, N. (2009). Sensitive determination of 1- and 2-naphthol in human plasma by HPLC-fluorescence detection with 4-(4,5-diphenyl-1H-imidazol-2-yl)benzoyl chloride as a labeling reagent. *Journal of Separation Science*, 32(13), 2218–2222. <https://doi.org/10.1002/jssc.200900056>
- Özkılıç, M. A. (2019). *Nohuttan Elde Edilen Aktif Karbon Üzerine Basic Yellow 28*

- Adsorpsiyonu*. Kocaeli Üniversitesi.
- Öztürk, T. (2017). Adsorpsiyon Yöntemi ile Reaktif Boyarmadde Gideriminde Çeşitli Adsorbentlerin Etkinliğinin Değerlendirilmesi. İçinde *NKUBAP* (C. 87).
- Özüsoy, M. (2022). *Atık Biyokütleden Elde Edilen Aktif Karbonun Metilen Mavisi Adsorpsiyonunda Kullanımı*. Afyon Kocatepe üniversitesi.
- Pan, R. R., Fan, F. L., Li, Y., & Jin, X. J. (2016). Microwave regeneration of phenol-loaded activated carbons obtained from *Arundo donax* and waste fiberboard. *RSC Advances*, 6(39), 32960–32966. <https://doi.org/10.1039/C6RA01642A>
- Panizza, M., & Cerisola, G. (2004). Influence of anode material on the electrochemical oxidation of 2-naphthol: Part 2. Bulk electrolysis experiments. *Electrochimica Acta*, 49(19), 3221–3226. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2004.02.036>
- Pi, Z., Hou, K., Yao, F., He, L., Chen, S., Tao, Z., Zhou, P., Wang, D., Li, X., & Yang, Q. (2022). In-situ regeneration of tetracycline-saturated hierarchical porous carbon by peroxydisulfate oxidation process: Performance, mechanism and application. *Chemical Engineering Journal*, 427, 131749. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131749>
- Ramos, J. M. P., Pereira-Queiroz, N. M., Santos, D. H. S., Nascimento, J. R., Carvalho, C. M. de, Tonholo, J., & Zanta, C. L. P. S. (2019). Printing ink effluent remediation: A comparison between electrochemical and Fenton treatments. *Journal of Water Process Engineering*, 31, 100803. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100803>
- Şahin, G. (2009). *Doğal Organik Maddelerin Adsorpsiyon Yöntemi ile Giderimi*. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Sakin, E., & Dilekoğlu, M. F. (2018). Adsorption Removal of Methylene Blue (MB) Dye from Aqueous Solution by Biochar Prepared from Almond Shells. *I. International GAP Agriculture and Livestock Congress*, 652–655.
- Salvador, F., Martin-Sanchez, N., Sanchez-Hernandez, R., Sanchez-Montero, M. J., & Izquierdo, C. (2015). Regeneration of carbonaceous adsorbents. Part I: Thermal Regeneration. *Microporous and Mesoporous Materials*, 202, 259–276. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2014.02.045>
- Salvador, F., Martin-Sanchez, N., Sanchez-Montero, M. J., Montero, J., & Izquierdo, C. (2013). Regeneration of activated carbons contaminated by phenol using supercritical water. *Journal of Supercritical Fluids*, 74, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2012.11.025>
- Santos, D. H. S., Duarte, J. L. S., Tavares, M. G. R., Tavares, M. G., Friedrich, L. C., Meili, L., Pimentel, W. R. O., Tonholo, J., & Zanta, C. L. P. S. (2020). Electrochemical degradation and toxicity evaluation of reactive dyes mixture and real textile effluent over DSA® electrodes. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 153, 107940. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.107940>
- Santos, D. H. S., Duarte, J. L. S., Tonholo, J., Meili, L., & Zanta, C. L. P. S. (2020). Saturated activated carbon regeneration by UV-light, H₂O₂ and Fenton reaction. *Separation and Purification Technology*, 250(March), 117112. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117112>
- Santos, D. H. S., Santos, J. P. T. S., Duarte, J. L. S., Oliveira, L. M. T. M., Tonholo, J., Meili, L., & Zanta, C. L. P. S. (2022). Regeneration of activated carbon adsorbent by anodic and cathodic electrochemical process. *Process Safety and Environmental Protection*, 159, 1150–1163. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.01.083>
- Shan, I. K., Pre, P., & Alappat, B. J. (2013). Steam Regeneration of Adsorbents: An Experimental and Technical Review. *Chemical Science Transactions*, 2(4).

<https://doi.org/10.7598/cst2013.545>

- Shi, H., Wang, Q., Ni, J., Xu, Y., Song, N., & Gao, M. (2020). Highly efficient removal of amoxicillin from water by three-dimensional electrode system within granular activated carbon as particle electrode. *Journal of Water Process Engineering*, 38, 101656. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101656>
- Sun, H., Liu, Z., Wang, Y., & Li, Y. (2013). Electrochemical in situ regeneration of granular activated carbon using a three-dimensional reactor. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 25(S1), S77–S79. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(14\)60630-6](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(14)60630-6)
- Tang, J.-Y., Xiong, Y.-S., Li, M.-X., Jia, R., Zhou, L.-S., Fan, B.-H., Li, K., Li, W., Li, H., & Lu, H.-Q. (2023). Hyperbranched polyethyleneimine-functionalised chitosan aerogel for highly efficient removal of melanoidins from wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 447, 130731. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130731>
- Tongur, T. (2020). *Yüksek Polariteli Bazı Pestisitlerin Sulu Çözeltilerden Aktif Karbon Kumaşı Üzerine Adsorpsiyon ve Elektrosorpsiyon ile Uzaklaştırılmasının Spektrofotometrik Yöntemle İncelenmesi*. Akdeniz Üniversitesi.
- Trellu, C., Oturan, N., Keita, F. K., Fourdrin, C., Pechaud, Y., & Oturan, M. A. (2018). Regeneration of activated carbon fiber by the electro-fenton process. *Environmental Science and Technology*, 52(13), 7450–7457. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01554>
- Türkoğlu, S. (2010). *Sudaki Fenolik Kirleticilerin Farklı Adsorplayıcılara Adsorpsiyonu ve Katinin Mikrodalga Rejenerasyonu*. Ankara Üniversitesi.
- Ülkeryıldız Balçık, E., Torun, M., & Şahin Nadeem, H. (2020). Gıda Atıklarından Aktif Karbo Üretimi ve Aktif Karbonun Gıda Endüstrisinde Uygulamaları. *Gıda / the Journal of Food*, 45(2), 217–229. <https://doi.org/10.15237/gida.gd19127>
- Wang, L., & Balasubramanian, N. (2009). Electrochemical regeneration of granular activated carbon saturated with organic compounds. *Chemical Engineering Journal*, 155(3), 763–768. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.020>
- Wang, L. K., Hung, Y.-T., & Shammas, N. K. (2016). *Advanced Physicochemical Treatment Technologies*.
- Weng, C. H., & Hsu, M. C. (2008). Regeneration of granular activated carbon by an electrochemical process. *Separation and Purification Technology*, 64(2), 227–236. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2008.10.006>
- Weng, C. H., Lin, Y. T., & Hsu, S. C. (2014). Electrochemical Regeneration of Zn-Saturated Granular Activated Carbon from Electroplating Wastewater Plant. *Separation Science and Technology (Philadelphia)*, 49(4), 506–512. <https://doi.org/10.1080/01496395.2013.853083>
- Xing, X., Tang, J., Yao, S., Chen, H., Zheng, T., & Wu, J. (2023). Electrochemical regeneration of granular activated carbon saturated by p-nitrophenol in BDD anode system. *Process Safety and Environmental Protection*, 170, 207–214. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.082>
- Ye, X., Cai, W., Lu, D., Liu, R., Wu, Y., & Wang, Y. (2022). Electrochemical regeneration of granular activated carbon using an AQS (9,10- anthraquinone-2-sulfonic acid)/PPy modified graphite plate cathode. *Chemosphere*, 308. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136189>
- You, X. Y., Chai, L. Y., Wang, Y. Y., Su, Y. R., Zhao, N., & Shu, Y. De. (2013). Regeneration of activated carbon adsorbed EDTA by electrochemical method. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23(3), 855–860.

[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(13\)62539-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62539-X)

- Yuen, F. K., & Hameed, B. H. (2009). Recent developments in the preparation and regeneration of activated carbons by microwaves. *Advances in Colloid and Interface Science*, 149(1–2), 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.12.005>
- Zanella, O., Bilibio, D., Priamo, W. L., Tessaro, I. C., & Féris, L. A. (2017). Electrochemical regeneration of phenol-saturated activated carbon—proposal of a reactor. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 38(5), 549–557. <https://doi.org/10.1080/09593330.2016.1202327>
- Zhang, H. (2002). Regeneration of exhausted activated carbon by electrochemical method. *Chemical Engineering Journal*, 85(1), 81–85. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(01\)00176-0](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(01)00176-0)
- Zhang, H., Ye, L., & Zhong, H. (2002). Regeneration of phenol-saturated activated carbon in an electrochemical reactor. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 77(11), 1246–1250. <https://doi.org/10.1002/jctb.699>
- Zhou, M. H., & Lei, L. C. (2006). Electrochemical regeneration of activated carbon loaded with p-nitrophenol in a fluidized electrochemical reactor. *Electrochimica Acta*, 51(21), 4489–4496. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2005.12.028>
- Zhou, W., Meng, X., Ding, Y., Rajic, L., Gao, J., Qin, Y., & Alshwabkeh, A. N. (2019). “Self-cleaning” electrochemical regeneration of dye-loaded activated carbon. *Electrochemistry Communications*, 100(February), 85–89. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2019.01.025>
- Zhou, W., Meng, X., Gao, J., Zhao, H., Zhao, G., & Ma, J. (2021). Electrochemical regeneration of carbon-based adsorbents: a review of regeneration mechanisms, reactors, and future prospects. *Chemical Engineering Journal Advances*, 5, 100083. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.100083>

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Leyla Gazigil
Doğum Yeri ve Tarihi : Özbekistan /11.12.1984
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Iğdır Anadolu Lisesi
Lisans : Atatürk Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans : Atatürk Üniversitesi Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Bitlis Eren Üniversitesi
Bursa Uludağ Üniversitesi

İletişim (e-posta) : leylagazigil@gmail.com

Yayımları :

Can, O. T., & Gazgil, L. (2019). Elektrokoagülasyon ile Sulardan Renk Giderimine Elektrotlar Arası Mesafe ve Potansiyel Farkı Değişiminin Etkisi. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 8(4), 1415–1421. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.541056>

Can, O. T., Gazigil, L., & Keyikoglu, R. (2022). Treatment of intermediate landfill leachate using different anode materials in electrooxidation process. Environmental Progress & Sustainable Energy, 41(1). <https://doi.org/10.1002/ep.13722>

Demir Yetiş, A., Gazigil, L., Yetiş, R., & Çelikezen, B. (2019). Hayvansal Atık Kaynaklı Biyogaz Potansiyeli: Bitlis Örneği. Academic Platform Journal of Engineering and Science, 7(1), 1–1. <https://doi.org/10.21541/apjes.405308>

Demir Yetiş, A., Şahin Bal, S., Karatepe, Ş., Durmaz Bekmezci, H., Gazigil, L., & Yetiş, R. (2016). Investigation of the alpha and beta radioactivity in drinkingwater a case study from the rahva area. Applied Science Reports, 14, 159–162.

Gazigil, L., Er, E., Kestiöglu, O. E., & Yonar, T. (2022). Pilot-Scale Test Results of Electrodialysis Bipolar Membrane for Reverse-Osmosis Concentrate Recovery. *Membranes*, 12(1), 83. <https://doi.org/10.3390/membranes12010083>

Gazigil, L., Er, E., & Yonar, T. (2023). Determination of the optimum conditions for electrochemical regeneration of exhausted activated carbon. *Diamond and Related Materials*, 133, 109741. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.109741>

Rüstemli, S., Polat Dautov, Ç., & Gazigil, L. (2018). Indoor and Outdoor air quality detection using programmable microprocessor and sensor technologies. *European Journal of Engineering Research and Science*, 3(12), 8–12.