

TEKSTİL ATIKSULARINDAN BOYAR  
MADDELERİN ELEKTROADSORPSİYONLA  
GİDERİMİ

YUSUF YAVUZ  
Yüksek Lisans Tezi

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı  
OCAK - 1998

Anadolu Üniversitesi  
Merkez Kütüphane

**TEKSTİL ATIKSULARINDAN BOYAR  
MADDELERİN ELEKTROADSORPSİYONLA  
GİDERİMİ**

Yusuf YAVUZ /

Anadolu Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı  
Çevre Teknolojileri Bilim Dalında  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
olarak hazırlanmıştır

Danışman : Doç. Dr. Ülker Bakır ÖĞÜTVEREN

Ocak - 1998

Anadolu Üniversitesi  
Merkez Kütüphanesi

Yusuf YAVUZ'un Yüksek Lisans tezi olarak hazırladığı Tekstil Atıksularından Boyar Maddelerin Elektroadsorpsiyonla Giderimi başlıklı tez 10.02.1998 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Lisansüstü Öğretim Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Üye (Tez Danışmanı)

Doc. Dr. Ülker BAKIR ÖĞÜTVEREN..

Üye

..Prof. Dr. Ögür İNEL.....

Üye

..Yrd. Doç. Dr. Ali Savaş KOPARAL.....

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
19.02.1998 tarih ve ..3/3..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

## ÖNSÖZ

Tekstil Atıksularından Boyar Maddelerin Elektroadsorpsiyonla Giderimi başlıklı bu çalışma, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Çalışmanın başlangıcından beri sürekli bilgi, hoşgörü, anlayış ve yardımlarını esirgemeyerek beni her zaman destekleyen, önerileriyle çalışmalarımı yönlendiren, değerli danışman hocam Sn. Doç. Dr. Ülker BAKIR ÖĞÜTVEREN'e,

Değerli görüş ve önerileri ile çalışmaya ışık tutan, bilgi ve önerilerini paylaşan ve çalışmaya yoğun katkıda bulunan hocam Sn Yrd. Doç. Dr. A. Savaş KOPARAL'a,

Çalışmalar sırasında Çevre Sorunları Uygulama ve Araştırma Merkezi'nin (ANAÇEVREM) teknik ve teknolojik alt yapı imkanlarını kullanma olanağı sağlayan ANAÇEVREM Müdürü hocam Sn. Prof. Dr. Serap KARA'ya,

Çalışmanın her aşamasında yanımda olan ve ilgi ve desteklerini her zaman hatırlayacak olduğum Çevre Sorunları Uygulama ve Araştırma Merkezi ve Çevre Mühendisliği Bölüm elemanlarına,

Bugüne değin tüm yaşantımda maddi manevi desteklerini hiç esirgemeyen ve gelecekte de yanımda olacaklarına inandığım değerli aileme, Seramik bölümü öğrencisi Serap İLÇİN'e ve tüm sevdiklerime

en içten teşekkürlerimi sunarım .

Yusuf YAVUZ  
Ocak 1998

## ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

**TEKSTİL ATIKSULARINDAN BOYAR  
MADDELERİN ELEKTROADSORPSİYONLA  
GİDERİMİ**

**YUSUF YAVUZ**

**Anadolu Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Ülker Bakır ÖĞÜTVEREN  
1998, Sayfa 132**

Bu çalışmada, tekstil atıksularından Elektroadsorpsiyon yöntemi ile boyar madde giderimi çalışılmış ve adsorban olarak aktif karbon/perlit karışımı (8:1 oranında) kullanılmıştır. Çalışmanın etkinliğini kanıtlayabilmek üzere kimyasal adsorpsiyon deneyleri de yapılmış ve iki yöntemin sonuçları karşılaştırılmıştır.

Elektroadsorpsiyon deneylerinde iki kutuplu damlamalı reaktör kullanılmıştır. “Acilan Blau” boyar maddesi ile hazırlanan model atıksuların arıtılması için başlangıç boyar madde derişimi, elektrotlar arası uzaklık, uygulanan gerilim, akış hızı ve destek elektrolit parametreleri denenmiştir. Deneysel çalışmalardan sonra, optimum koşullarda, Sarar tekstil endüstrisinden temin edilen atıksuyun arıtımı çalışılmıştır.

Sonuç olarak elektroadsorpsiyon ile adsorpsiyona göre daha iyi giderim sağlandığı ve elektroadsorpsiyon ile atıksulardan boyar maddelerin başarılı bir şekilde uzaklaştırıldığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler: Elektroadsorpsiyon, Adsorpsiyon, Boyar madde, Granüler aktif karbon (GAC), Tekstil atıksuyu**

## **ABSTRACT**

**Master of Science Thesis**

### **REMOVAL of DYE STUFFS FROM TEXTILE EFFLUENTS BY ELECTROADSORPTION**

**YUSUF YAVUZ**

**Anadolu University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Environmental Engineering Program**

**Supervisor: Assoc. Prof. Ülker Bakır ÖGÜTVEREN  
1998, Page 132**

In this work, removal of dye stuffs from textile effluents by electroadsorption has been studied and a mixture in the ratio of 8:1 of granulated activated carbon to perlite has been used as adsorbent. Chemical adsorption experiments has also been studied to prove the efficiency of the electrochemical adsorption and these two different methods have been compared.

Electroadsorption studies have been carried out in a bipolar trickle tower electrochemical reactor. The initial dye concentration, solution flow rate, applied potential, distance between the electrodes have been examined as the parameters to treat the solutions containing "Acilan Blau" as the dye stuff. The effects of the NaCl presence on the removal rate have also been investigated. After this experimental studies, in the optimum conditions, a waste water sample provided from Sarar Textile Industry has also been examined.

According to the experimental results, removal rates have been found higher than that of chemical adsorption. It has also been found that dye stuffs can be removed successfully from the waste water by electroadsorption using granular activated carbon.

**Keywords: Electroadsorption , Adsorption, Dye stuff, Granulated activated carbon (GAC), Textile waste water**

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
1. GİRİŞ VE AMAÇ.....	1
2. SU KİRLİLİĞİ.....	4
2.1. Alıcı Ortamın Kirlenmesine Neden Olan Kaynaklar.....	6
2.2. Su Kirlenmesi Türleri.....	7
2.3. Su Kirliliği ile İlgili Yasal Düzenlemeler.....	8
3. TEKSTİL ATIKSULARININ KARAKTERİSTİKLERİ.....	10
3.1. Tekstil Endüstrisi Atıksularının Arıtım Teknolojileri.....	12
3.1.1. Mekanik arıtım.....	13
3.1.2. Kimyasal arıtım.....	13
3.1.3. Biyolojik arıtım.....	14
3.2. Atıksulardan Boyar Madde Giderimi.....	14
3.2.1. Boyarmadde atıksularının alıcı ortamlardaki etkileri.....	16
4. ELEKTROKİMYASAL ATIKSU ARITIMI.....	18
4.1. Elektrokimya ve Elektrokimya Mühendisliği.....	18
4.2. Elektroadsorpsiyon.....	24

## İÇİNDEKİLER (Devam)

4.2.1. Elektrodsorpsiyonla boyar madde giderimi.....	27
4.2.2. Elektrodsorpsiyonla mikroorganizma giderimi.....	28
4.2.3. Elektrodsorpsiyonla ağır metal giderimi.....	31
4.2.3.1.Krom giderimi.....	31
4.2.3.2.Kadmiyum giderimi.....	33
4.2.3.3.Nikel giderimi.....	33
4.2.4. Siyanür giderimi.....	34
4.2.5. Elektrodsorpsiyonla organik madde giderimi.....	35
4.3. Elektrodsorpsiyon ile Yapılan Deneysel Çalışmalar.....	35
5. ADSORPSİYON.....	38
5.1. Giriş.....	38
5.2. Adsorpsiyon Türleri.....	41
5.3. Adsorpsiyon İzotermeleri.....	42
5.3.1. Langmuir izotermeleri.....	42
5.3.2. Freundlich izotermeleri.....	43
5.3.3. Brauner-Emmet-Teller (BET) izotermeleri.....	44
5.3.4. Temkin (Slygin-Frumkin) izotermeleri.....	44
5.4. Sıvı Çözeltilerden Adsorpsiyon.....	44
5.5. Adsorpsiyon Düzeneklerinin Türleri.....	47
5.6. Sabit Yataklı Kolonlarda Adsorpsiyon.....	48
5.7. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Adsorbanlar.....	49
5.7.1. Karbon ve karbonlu maddeler.....	50
5.7.2. Perlit.....	51
5.8. Adsorpsiyonun Uygulandığı Deneysel Çalışmalar.....	52



## İÇİNDEKİLER (Devam)

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	56
6.1. Yöntem.....	56
6.1.1. Kullanılan kimyasal maddeler.....	57
6.1.2. Kullanılan yardımcı araçlar.....	57
6.1.3. Boyar madde tayini.....	57
6.1.4. Standart çalışma doğrusunun çizilmesi ve derişim hesabı.....	60
6.1.5. Verim hesabında kullanılan eşitlikler.....	60
6.1.5.1. Yüzde giderim.....	60
6.1.5.2. Enerji tüketimi.....	60
6.2. Ön Deneme Çalışmaları.....	61
6.2.1. Adsorpsiyon izotermelerinin elde edilişii.....	61
6.3. Elektroadsorpsiyon Sonuçları .....	62
6.3.1. 5 cm'lik elektrot yatak derinliğinde elde edilen sonuçlar.....	62
6.3.2. 25 cm'lik elektrot yatak derinliğinde elde edilen sonuçlar.....	69
6.3.3. 45 cm'lik elektrot yatak derinliğinde elde edilen sonuçlar.....	82
6.4. Kimyasal Adsorpsiyon Sonuçları.....	87
6.5. Sarar Tekstil Endüstrisi Atıksuyu ile Gerçekleştirilen Deneysel Çalışma Sonuçları.....	98
7. BULGULARIN TARTIŞILMASI.....	100
7.1. Elektroadsorpsiyon ile Boyar Madde Gideriminde Deneysel Bulguların Tartışılması.....	100

## İÇİNDEKİLER (Devam)

7.1.1. Uygulanan gerilimin etkisi.....	100
7.1.2. Başlangıç derişiminin etkisi.....	100
7.1.3. Akış hızının etkisi.....	101
7.1.4. Destek elektrolitin etkisi.....	101
7.1.5. Elektrotlar arası mesafenin (yatak derinliği) etkisi.....	102
7.2. Kimyasal Adsorpsiyon ile Elektroadsorpsiyonun Karşılaştırılması.....	102
8. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	104
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	105
EKLER.....	112
EK 1. ROTAMETRE KALİBRASYONU.....	113
EK 2. STANDART ÇALIŞMA DOĞRUSU.....	114
EK 3. ÖRNEK HESAPLAMALAR.....	115

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
2.1. Hidrolojik çevrim	5
3.1. Yünlü tekstil endüstrisi boyahane atıksularının arıtımı için kullanılabilir alternatif arıtma yöntemleri	17
4.1. Elektrokimyasal reaktörde gerçekleşen olaylar ve kütle denklilikleri	21
4.2. Elektroadsorpsiyonda kullanılan bir flow-through hücre	26
4.3. Elektroadsorpsiyonda kullanılan bir flow-by hücre	26
4.4. Deneysel kullanılan reaktör	28
4.5. Akış sistemi ve elektrik bağlantıları (F; filtre ortamı, A; anot, C; katot, S; ayırıcı, P; pompa, P.S.; güç kaynağı, I; giriş, O; çıkış)	30
4.6. 1,5 V gerilim altında ( $40\text{cm}^3/\text{dk}$ ) hücreden geçen E. Coli % derişimi ( $1000\text{ cm}^3$ 'ten sonra gerilim kaynağı kapatılmıştır)	31
4.7. Poröz karbon elektrotların kullanıldığı elektroadsorbsiyon sürecinde su akış sistemi ve elektrik bağlantılarının şematik gösterimi	37
4.8. Karbon keçede adsorblanan alümina kümeleri (SEM; *10.000)	37
5.1. Çözültiden katı adsorpsiyonu için tipik bir izoterm	45
5.2. Çözültiden katı adsorpsiyonu için izotermelerin sınıflandırılması	46
5.3. Sabit yataklı adsorpsiyon kolonundan geçen çözelti hacmi ile çıkan çözeltideki çözünen derişiminin değışimi	49
6.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan iki kutuplu damlamalı reaktör	58
6.2. Elektroadsorbsiyon çalışmalarının gerçekleştirildiği deney düzeneği	59
6.3. 30 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değışimi ( $l= 5\text{cm}$ , 8:1)	65
6.4. 30 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değışimi ( $l= 5\text{cm}$ , 8:1, 0,1 M NaCl)	65
6.5. 30 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değışimi ( $l= 5\text{cm}$ , 8:1, 0,3 M NaCl)	66
6.6. 40 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değışimi ( $l= 5\text{cm}$ , 8:1)	66
6.7. 100 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değışimi ( $l= 5\text{cm}$ , 8:1)	67
6.8. Farklı derişimlerde destek elektrolit (NaCl) içeren 30 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değışimi ( $l= 5\text{cm}$ , $1,11 \times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{h}$ , 8:1)	67
6.9. Farklı derişimlerde başlangıç boyar maddesi içeren çözültüler için kalan derişimin gerilimle değışimi ( $l= 5\text{cm}$ , $1,11 \times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{h}$ , 8:1)	68

## ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

6.10. 30 mg/L başlangıç boyar maddesi içeren çözelti için farklı akış hızlarında enerji tüketiminin gerilimle değişimi ( $l= 5\text{cm}$ , $1,11 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$ , 8:1)	68
6.11. 30 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değişimi ( $l= 25\text{cm}$ , 8:1)	73
6.12. 30 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değişimi ( $l= 25\text{cm}$ , 8:1, 0,1 M NaCl)	74
6.13. 30 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değişimi ( $l= 25\text{cm}$ , 8:1, 0,3 M NaCl)	74
6.14. 40 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değişimi ( $l= 25\text{cm}$ , 8:1)	75
6.15. 40 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değişimi ( $l= 25\text{cm}$ , 8:1, 0,1 M NaCl)	75
6.16. 40 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değişimi ( $l= 25\text{cm}$ , 8:1, 0,3 M NaCl)	76
6.17. 100 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değişimi ( $l= 25\text{cm}$ , 8:1)	76
6.18. 100 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değişimi ( $l= 25\text{cm}$ , 8:1, 0,1 M NaCl)	77
6.19. 100 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değişimi ( $l= 25\text{cm}$ , 8:1, 0,3 M NaCl)	77
6.20. 30 mg/L çözelti ile yapılan deneyler sonucu elde edilen kalan derişimin hacimle değişimi (10 V)	80
6.21. 40 mg/L çözelti ile yapılan deneyler sonucu elde edilen kalan derişimin hacimle değişimi (10 V)	80
6.22. Farklı derişimlerde destek elektrolit (NaCl) içeren 30 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değişimi ( $l= 25\text{cm}$ , $1,11 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$ , 8:1)	81
6.23. Farklı derişimlerde başlangıç boyar maddesi içeren çözeltiler için kalan derişimin gerilimle değişimi ( $l= 25\text{cm}$ , $1,11 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$ , 0,1 M NaCl, 8:1)	81
6.24. Farklı derişimlerde başlangıç boyar maddesi içeren çözeltiler için enerji tüketiminin hacimle değişimi ( $l= 25\text{cm}$ , $1,86 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$ , 8:1)	82
6.25. 30 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değişimi ( $l= 45\text{cm}$ , 8:1)	84
6.26. 40 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değişimi ( $l= 45\text{cm}$ , 8:1)	85
6.27. 100 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değişimi ( $l= 45\text{cm}$ , 8:1)	85

## ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

6.28. Farklı derişimlerde başlangıç boyar maddesi içeren çözeltiler için kalan derişimin gerilimle değişimi ( $l= 45\text{cm}$ , $1,11 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$ , $0,1 \text{ M NaCl}$ , $8:1$ )	86
6.29. $30 \text{ mg/L}$ başlangıç boyar maddesi içeren çözeltiler için farklı akış hızlarında enerji tüketiminin gerilimle değişimi ( $l= 45\text{cm}$ , $1,11 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$ , $8:1$ )	86
6.30. $30 \text{ mg/L}$ başlangıç boyar maddesi içeren çözeltiler için farklı elektrot yatak derinliklerinde kalan derişimin gerilimle değişimi ( $1,11 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$ , $8:1$ )	87
6.31. Acılan Blau boyar maddesi içeren, $40 \text{ mg/L}$ 'lik çözeltilerin aktif karbon ile adsorpsiyonu sonucu elde edilen Freundlich izotermi	88
6.32. Acılan Blau boyar maddesi içeren, $40 \text{ mg/L}$ 'lik çözeltilerin aktif karbon ile adsorpsiyonu sonucu elde edilen Langmuir izotermi	88
6.33. $5 \text{ cm}$ yatak derinliğinde elde edilen adsorpsiyon deney sonuçları ( $8:1$ )	92
6.34. $25 \text{ cm}$ yatak derinliğinde elde edilen adsorpsiyon deney sonuçları ( $8:1$ )	92
6.35. $45 \text{ cm}$ yatak derinliğinde elde edilen adsorpsiyon deney sonuçları ( $8:1$ )	93
6.36. $30 \text{ mg/L}$ çözeltiler için kalan derişimin hacimle değişimi ( $l= 25 \text{ cm}$ , $8:1$ , $1,857 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$ )	94
6.37. $40 \text{ mg/L}$ çözeltiler için kalan derişimin hacimle değişimi ( $l= 25 \text{ cm}$ , $8:1$ , $1,857 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$ )	95
6.38. $5 \text{ cm}$ yatak derinliğinde elde edilen adsorpsiyon ve elektroadsorpsiyon ( $20\text{V}$ ) deney sonuçlarının karşılaştırılması ( $40 \text{ mg/L}$ , $8:1$ )	95
6.39. $25 \text{ cm}$ yatak derinliğinde elde edilen adsorpsiyon ve elektroadsorpsiyon ( $20\text{V}$ ) deney sonuçlarının karşılaştırılması ( $40 \text{ mg/L}$ , $8:1$ )	96
6.40. $45 \text{ cm}$ yatak derinliğinde elde edilen adsorpsiyon ve elektroadsorpsiyon ( $20\text{V}$ ) deney sonuçlarının karşılaştırılması ( $40 \text{ mg/L}$ , $8:1$ )	96
6.41. $30 \text{ mg/L}$ çözeltiler için adsorpsiyon ve elektroadsorpsiyon ( $10\text{V}$ ) deneylerinde kalan derişimin hacimle değişiminin karşılaştırılması	97
6.42. $40 \text{ mg/L}$ çözeltiler için adsorpsiyon ve elektroadsorpsiyon ( $10\text{V}$ ) deneylerinde kalan derişimin hacimle değişiminin karşılaştırılması	97
6.43. Tekstil endüstrisi atıksuyunun kullanıldığı deneylerde gerilimle %giderimin değişimi	99
EK 1.1.Çizelge EK 1.1'deki veriler yardımıyla elde edilen kalibrasyon doğrusu	113
EK 2.1.Standart çalışma doğrusu	114

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
3.1. Tekstil atıksuları ortalama karakteristikleri	11
3.2. Arıtma Sistemlerindeki Proseslerin Tahmini Kirlenici Giderme Verimleri	15
3.3. Balıklar üzerinde çeşitli boyaların etkileri	17
5.1. Başlıca adsorban tipleri ve kullanım alanları	40
6.1. 30 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 5cm, 8:1)	62
6.2. 30 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 5cm, 8:1, 0,1 M NaCl)	63
6.3. 30 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 5cm, 8:1, 0,3 M NaCl)	63
6.4. 40 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 5cm, 8:1)	64
6.5. 100 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 5cm, 8:1)	64
6.6. 30 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 25cm, 8:1)	69
6.7. 30 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 25cm, 8:1, 0,1 M NaCl)	69
6.8. 30 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 25cm, 8:1, 0,3 M NaCl)	70
6.9. 40 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 25cm, 8:1)	70
6.10. 40 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 25cm, 8:1, 0,1 M NaCl)	71
6.11. 40 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 25cm, 8:1, 0,3 M NaCl)	71
6.12. 100 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 25cm, 8:1)	72
6.13. 100 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 25cm, 8:1, 0,1 M NaCl)	72
6.14. 100 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 25cm, 8:1, 0,3 M NaCl)	73
6.15. 30 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (10 V, l= 25cm, 8:1, 1,857x10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /h)	78

## ÇİZELGELER DİZİNİ (Devam)

6.16. 40 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (10 V, l= 25cm, 8:1, 1,857x10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /h)	79
6.17. 30 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 45cm, 8:1)	83
6.18. 40 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 45cm, 8:1)	83
6.19. 100 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 45cm, 8:1)	84
6.20. 30 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 5cm, 8:1)	89
6.21. 40 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 5cm, 8:1)	89
6.22. 100 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 5cm, 8:1)	89
6.23. 30 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 25cm, 8:1)	90
6.24. 40 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 25cm, 8:1)	90
6.25. 100 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 25cm, 8:1)	90
6.26. 30 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 45cm, 8:1)	91
6.27. 40 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 45cm, 8:1)	91
6.28. 100 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 45cm, 8:1)	91
6.29. 30 mg/L çözelti ile elde edilen sonuçlar (l= 25 cm, 8:1, 1,857x10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /h)	93
6.30. 40 mg/L çözelti ile elde edilen sonuçlar (l= 25 cm, 8:1, 1,857x10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /h)	94
6.31. Tekstil endüstrisi atıksuyu ile gerçekleştirilen deney sonuçları	98
EK 1.1. Rotametre kalibrasyonunda kullanılan veriler	113
EK 2.1. Standart çalışma doğrusunun hazırlanmasında kullanılan derişim değerleri ve 625 nm dalga boyunda derişimlere karşılık gelen absorbands verileri	114

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<b>Bkz.</b>	Bakınız
<b>BET</b>	Brauner-Emmett-Teller izotermi
<b>BOİ</b>	Biyolojik Oksijen İstemi (mg/L)
<b>C</b>	Son derişim (mg/L)
<b>C<sub>den</sub></b>	Çözeltide adsorplanmadan kalan madde derişimi (mg/L)
<b>CMC</b>	Karboksi metil selüloz
<b>C<sub>o</sub></b>	Başlangıç derişimi (mg/L)
<b>DDVP</b>	Dimetil 2,2 dikronovinil fosfat (veya Dichlorvos)
<b>e<sup>-</sup></b>	Elektron
<b>FAC</b>	Lifli aktif karbon
<b>GAC</b>	Granüler Aktif Karbon
<b>I</b>	Reaktörden geçen akım (Amper, A)
<b>KOİ</b>	Kimyasal Oksijen İstemi (mg/L)
<b>K<sub>f</sub> ve n</b>	Freundlich adsorpsiyon sabitleri
<b>l</b>	Elektrot yatak derinliği (cm)
<b>LSD</b>	Light Scattering Detector
<b>m</b>	Adsorplayanın kütleşi (g)
<b>N</b>	Denge derişiminde bir gram adsorban başına adsorplanan maddenin mol sayısı
<b>N<sub>i</sub></b>	Molar kütle akısı
<b>N<sub>m</sub></b>	Adsorplanan maddenin adsorbanın tüm yüzeyini bir molekül kalınlığında bir tabaka ile kaplayabilmesi için bir gram adsorban tarafından adsorplanması gereken maddenin mol sayısı
<b>PAC</b>	Toz Aktif Karbon
<b>PCB</b>	Poliklorlanmış bifeniller
<b>P<sub>o</sub></b>	Buharın doygunluk basıncı



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (Devam)

<b>ppm</b>	parts per million
<b>ppb</b>	parts per billion
<b>PVA</b>	Polivinil alkol
<b>qden</b>	Dengede birim adsorban başına adsorplanan madde miktarı (mg/g)
<b>Q<sub>o</sub> ve b</b>	Langmuir adsorpsiyon sabitleri
<b>R. G.</b>	Resmi Gazete
<b>Re</b>	Reynold sayısı
<b>rpm</b>	Dakikadaki devir sayısı (revolution per minute)
<b>Sc</b>	Schmidt sayısı
<b>Sh</b>	Sherwood sayısı
<b>SEM</b>	Scanning Electron Microscopy
<b>SKKY</b>	Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği
<b>TAM</b>	Toplam Askıda Madde (mg/L)
<b>THMs</b>	Trihalometanlar
<b>V</b>	Toplam reaktör gerilimi (Volt)
<b>∇P</b>	Basınç gradyanı
<b>ρ</b>	Yoğunluk
<b>υ</b>	Reaktörden geçen çözeltinin akış hızı (m <sup>3</sup> /h)
<b>λ</b>	Dalga boyu (nm)
<b>x</b>	Adsorplanmış maddenin kütlesi veya hacmi

## 1. GİRİŞ VE AMAÇ

İçinde bulunduğumuz yüzyıl, insanlık tarihi boyunca en çok değişikliklerin olduğu bilim ve teknolojiye dev adımların atıldığı, toplumların gelişmişlik düzeylerinin yükseldiği, dünya nüfusunun hızla arttığı ve dolayısıyla da doğanın en fazla tahrip edildiği zaman birimi olarak hatırlanacaktır. Sanayi devriminin başlaması ve bilimdeki hızlı gelişmeler, insanoğlunun geçmişinden beri süregelen pek çok sorununa çözüm bulduğu gibi, beraberinde yeni ve çözümü daha zor sorunları da ortaya çıkarmıştır. Endüstrileşme ve teknolojinin çok kısa bir süre içerisinde insanların hayat standartlarını yükseltecek yenilikler üretmesi sonucu, insanoğlunun nüfusu, tarihin eski dönemlerine göre aşırı bir biçimde artmış, buna bağlı olarak tüketim fazlalaşmış ve insanlık, bu fazla nüfusu besleyip, yine insanlığın gerektirdiği koşullar içinde yaşatabilmek için yeni kaynak arayışlarına ve yeni teknoloji yarışlarına girmiştir. Daha iyi yaşama arzusunun getirdiği tüketim alışkanlığının karşılanabilmesi için, başlangıçta sonsuz bir kaynak olarak düşünülen doğal kaynaklar, adeta talan edilircesine insanlığın hizmetine sunulmuş buna karşılık üretim esnasında ve tüketim sonrasında meydana gelen atık maddeler ekolojik dengeye zarar vereceği düşünülmeden doğaya rastgele bırakılmıştır. Giderek artan miktarlarda doğaya terk edilen bu maddeler, canlı hayatının temel taşları olan su, hava ve toprakta büyük tahribatlara yol açmaya başlayınca, tabiatın korunmasının zorunluluğu yavaş yavaş anlaşılmaya başlanmıştır. Son çeyrek yüzyıl içinde gelişen bu düşünce, özellikle gelişmiş ülkeler başta olmak üzere, bütün toplumlarca benimsenmiş ve doğanın korunmasına yönelik pek çok inceleme ve araştırma yapılmıştır.

2872 sayılı Çevre Kanunu'nun 2/c maddesine göre; “çevre kirliliği terimi: insanların her türlü faaliyetleri sonucu, havada, suda, toprakta meydana gelen olumsuz gelişmelerle ekolojik dengenin bozulması ve aynı faaliyetler sonucu ortaya çıkan koku, gürültü ve atıkların çevrede meydana getirdiği arzu edilmeyen sonuçları ifade eder” [1].

Yasalarımızda bu şekilde tarif edilen Çevre kirliliği, çeşitli bilim dallarında farklı şekillerde tanımlanabilir. Ekolojistler, geniş bir bakış açısıyla, sistemin dengesini bozan her şeye kirlenici gözü ile bakmışlardır. Örneğin, su kirlenmesini “su ortamında yaşayan canlı türlerinde azalma meydana getiren ve bazı türlerin kaybolması ile sistemin dengesini bozan her şey” veya “bir su yatağındaki organizmalara kötü yönde tesir eden herhangi bir maddenin bu su yatağına girmesi” şeklinde tarif ederler.

Mühendisler ise kirlenmeyi “insanların neden olduğu kalite değişimleri ile, suyun (veya havanın) bugünkü veya gelecekteki faydalı maksatlar için kullanılabilirliğine zarar verilmesi” şeklinde tanımlarlar.

Çevre kirliliği çeşitliliğine, gelişen teknoloji ile birlikte her geçen gün yeni terimler eklenmektedir: Elektromagnetik alan kirliliği, nükleer enerji kirliliği, ışık kirliliği (light pollution) vs... Bu nedenle, bir yandan teknolojinin bize sunduğu olanaklardan vazgeçmemeli, diğer yandan ise doğaya verilecek olan zarar minimuma indirilmeye çalışılmalıdır. Zira, doğanın doğal dengesi korunduğu sürece çok daha yüksek yaşam standartlarına kavuşmak mümkün olacaktır.

Çevre kirliliğinin bir alt grubu olan su kirliliği en önemli kirlilik türlerinden biridir. Doğrudan ya da dolaylı olarak bütün canlı ve cansız varlıkları etkiler. Taze ve temiz içme ve kullanma suyu gereksiniminin yanı sıra, insanlarda yüzlerce hastalığın, bitkilerde deformasyonunun, kanalizasyon sisteminde “taç korozyonu” gibi bir çok zararlı etkinin başlıca sebebidir. Bu nedenle, kullanılmış ya da atık suların alıcı su ortamlarına deşarj edilmeden önce bazı standartları sağlaması gerekir. Bu standartlar bir çok ülke yönetmeliklerinde belirtilerek yasalara geçmiştir. Örneğin ülkemizde 4 Eylül 1988 tarihinde 19919 sayılı Resmi Gazete’de yayınlanarak yürürlüğe giren Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği’ne göre sayfa 51 Çizelge 10.3’te Pamuklu Tekstil sektörünün alıcı ortama deşarj standartları verilmiştir.

Bu standartları sağlayabilmek üzere, evsel ve/veya endüstriyel atıksu arıtma sistemleri geliştirilmiştir.

Atıksu arıtım sistemlerinde, arıtma işlemlerinde mekanik, kimyasal ve biyolojik olmak üzere üç temel süreç rol oynar. Atıksu arıtımında bu süreçlerden bir tanesinin kullanımı genellikle yeterli olamamakta ve ikisi veya tamamının değişik bileşimleri kullanılmaktadır. Atıksularda bulunan kaba parçacıkların ızgaralardan geçirilmesi ya da kendi ağırlığı ile çökebilen katıların çöktürülerek uzaklaştırılması mekanik süreçlere, koagülasyon, dezenfeksiyon gibi kimyasal maddelerin kullanılması ile suyun temizlenmesi sağlanan sistemler ise kimyasal süreçlere örnek olarak verilebilir. Biyolojik atıksu arıtımı ise, mikroorganizmaların aktif olarak rol aldığı ve özellikle atıksu içerisindeki organik maddelerin giderildiği sistemlerdir. Aktif çamur sistemleri, damlatmalı filtreler, havalandırılmalı lagünler, biyolojik atıksu arıtma sistemlerine örnektir.

Bazı durumlarda ise, atıksu içerisinde bulunan kirleticilerin yukarıda adı geçen süreçlerle temizlenmesi mümkün olamaz ve adsorpsiyon, ozonlama, ters osmoz gibi ileri arıtım tekniklerine başvurulur.

Yine, ileri arıtım tekniklerinden biri olan elektrokimyasal atıksu arıtımı ile de atıksuların ileri derecede arıtılmaları söz konusudur. İlk bakışta en büyük dezavantajının elektrik akımı kullanımını olduğu düşünülen Elektrokimyasal atıksu arıtımı; organik maddelerin, inorganik maddelerin, mikroorganizmaların, ağır metallerin giderimi ve geri kazanımı gibi geniş bir alanda uygulanmaktadır.

Konusu elektrokimyasal adsorpsiyonla tekstil atıksularından boyar madde giderimi olan bu çalışmanın birinci bölümünde dünyanın çevre kirliliği konusundaki tarihçesine kısaca değinilerek, çalışmada yer alan alt başlıklar açıklanmaya çalışılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde, suyun canlı varlığındaki ve hayatımızdaki önemi, suyun kirlenmesine neden olan kaynaklar ve ülkemizde bu konu ile ilgili yasa ve yönetmeliklere değinilmiştir. Üçüncü bölümde, tekstil atıksularının karakteristik özellikleri açıklanmış ve tekstil atıksularının arıtımında kullanılan yöntemler genel olarak ele alınmıştır. Yine aynı bölümde, tekstil atıksuyunun en karakteristik özelliği olan ve tez çalışmasının konusunu oluşturan boyar maddelerin, arıtım teknolojileri ve alıcı ortamlardaki etkilerine değinilmiştir. Elektrokimyasal atıksu arıtımı başlıklı dördüncü bölümde, elektrokimya ve elektrokimya mühendisliğinden söz edildikten sonra, asıl çalışma konusu olan elektroadsorpsiyonla atık su arıtımı ve bu konu ile ilgili daha önce yapılmış olan araştırmalara değinilmiştir. Beşinci bölümde, yine atıksu arıtımında kullanılan ve elektroadsorpsiyonla kıyaslanan adsorpsiyon türleri ve izotermeleri hakkında bilgi verildikten sonra, bu konuda yapılmış olan deneysel çalışmalardan söz edilmiştir. Deneysel Çalışmalar başlıklı altıncı bölümde, çalışmada kullanılan deney düzeneği, kullanılan kimyasal maddeler ve yardımcı araçlar ve tayin yöntemlerine değinilmiş, hesaplamalarda kullanılan eşitlikler açıklanmıştır. Yine aynı bölümün devamında, gerçekleştirilen ön deneme çalışmalarının yanısıra elektroadsorpsiyon ve adsorpsiyon sonucu elde edilen deneysel çalışma sonuçları çizelgeler ve şekiller halinde verilmeye çalışılmıştır. Yedinci bölümde elektrokimyasal adsorpsiyon ve adsorpsiyon sonucu elde edilen deneysel çalışma bulguları parametreler bazında ele alınarak değerlendirilmiş ve Sonuç ve Öneriler ise sekizinci bölümde verilmiştir.

Çalışmanın, konusunda, ülkemizde gerçekleştirilen ilk çalışmalardan birisi olması nedeniyle, gerek daha sonra yapılacak araştırmalara, gerekse atıksu arıtım tesislerinde su arıtımı konusunda ışık tutacağı umulmaktadır.

## 2. SU KİRLİLİĞİ

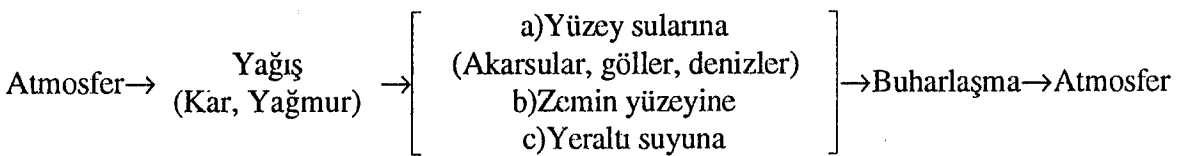
Günümüzde sık sık karşılaştığımız terimlerden birisi olan “Su Kirliliği”, gelecek açısından canlı varlığını kısıtlayacak en önemli kirlilik türlerinden birisidir. Yiyecek olmaksızın hayatlarını 8-10 gün sürdürebilen insanlar, susuz yaşama 2-3 günden fazla dayanamamaktadırlar.

Su Kirliliği S.K.K.Y.’de “Su kaynağının kimyasal, fiziksel, bakteriyolojik, radyoaktif ve ekolojik yönlerinin olumsuz yönde değişmesi şeklinde gözlenen ve doğrudan veya dolaylı yoldan biyolojik kaynaklarda, insan sağlığında, su kalitesinde ve suyun diğer amaçlarla kullanılmasında engelleyici bozulmalar yaratacak madde veya enerji atıklarının boşaltılması” şeklinde tanımlanmıştır [2].

Yeryüzündeki su potansiyeli ve suyun hidrolik çevrimine değinilerek su ve su kirliliğinin önemi daha iyi incelenebilecektir:

Yeryüzünde bulunan toplam su miktarı,  $1600 \times 10^6 \text{ km}^3$  tür. Bunun  $220 \times 10^6 \text{ km}^3$ ’ü kimyasal olarak bağlı sudur. Geriye kalan  $1380 \times 10^6 \text{ km}^3$  su ise serbest sudur. Yeryüzündeki serbest su, dünyanın tüm yüzey alanı üzerinde ( $510 \times 10^6 \text{ km}^2$ ) üniform olarak 2700m kalınlığında bir tabaka oluşturacak kadar fazladır. Ancak bu toplam su miktarının %97,6’sı denizlerdeki tuzlu sulardır ve bu sular insanların gereksinimlerini karşılama açısından uygun niteliklere sahip değildir. Karalardaki toplam su miktarı yeryüzündeki suların %2,4’ünü oluşturmaktadır ( $33,4 \times 10^6 \text{ km}^3$ ). Karalardaki suyun ancak %10 kadarı teorik olarak kullanılabilir tatlı su potansiyelini oluşturmaktadır. Bu miktar yeryüzündeki toplam su potansiyelinin %0,3’ü kadardır [3]. Türkiye’nin yıllık ortalama akarsu potansiyeli  $186 \times 10^9 \text{ m}^3$  olup, bu kapasitenin ortalama  $110 \times 10^9 \text{ m}^3$ ’ü kullanılmaya elverişlidir. Nüfusumuzun 60 milyon olduğu düşünülürse kişi başına düşen su miktarı  $1830 \text{ m}^3$ ’tür. Bir ülkenin su zengini sayılabilmesi için, kişi başına düşen kullanılabilir su miktarının  $10000 \text{ m}^3$ ’ten fazla olması gerekmektedir. Ülkemizde halen teknik yönden kullanılmaya elverişli  $110 \times 10^9 \text{ m}^3$  suyun 40 milyar  $\text{m}^3$ ’ü fiilen kullanılabilir. Mevcut su potansiyelinin %12’si içme ve kullanımda, %10’u sanayide, %78’i tarımsal sulamada kullanılmaktadır [4].

Doğadaki suyun hidrolojik çevrimi şematik olarak



şeklinde gösterilebilir. Ayrıca, hidrolojik çevrim Şekil 2.1’deki gibi gösterilebilir [5].

Hidrosferde mevcut suyun kaynaklara göre;

Okyanus ve denizler

%97

Göller, akarsular ve yeraltı suları

%2

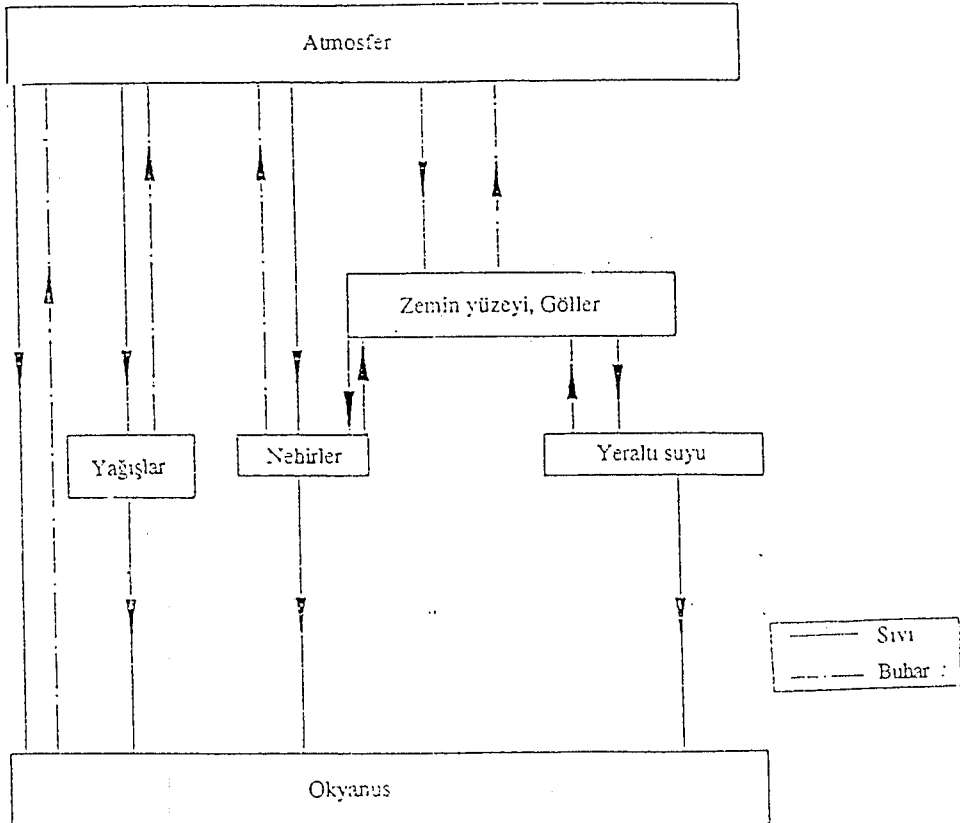
Buzul ve kar şeklinde

%1

olarak dağıldığı bilinmektedir[5].

Kirlenmemiş bir suyun fiziksel ve kimyasal özellikleri şunlardır:

- Suyun yoğunluğu; 0°C'de buz halinde 0,91671 g/ml, 0°C'de sıvı halinde 0,99867 g/ml, 4°C'de sıvı halinde 1,0000 g/ml olup [6], maksimum birim hacim ağırlığı +4°C'dedir. Suyun bu özelliği, donma sonucu kayaların ayrışmasını, göllerin tabakalaşmasını ve soğuk mevsimlerde, derin sularda su canlılarının korunmasını sağlar.
- Suyun viskozitesi yüksektir. Bu özellik süspansiyon halindeki katı maddelerin taşınmasına ve çökme neticesinde siltli ve killi toprakların oluşmasına neden olur.
- Suyun kimyasal etkinliği çeşitli metal tuzlarının ve gazların çözünmesine elverişlidir. Böylece sular, çözülmüş haldeki besin maddelerini fitoplankton ve zooplanktonlara taşırlar[5].



Şekil 2.1. Hidrolojik çevrim [5]

## 2.1. Alıcı Ortamın Kirlenmesine Neden Olan Kaynaklar

Atıksuların akıtıldığı ortam herhangi bir akarsu, göl veya deniz olabilir. Alıcı ortamın kirlenmesine neden olabilecek kaynaklar oldukça fazladır. Bu kirletici kaynakların en önemlileri aşağıda verilmiştir.

a) Endüstrilerden Atılan Atıksular: Deniz kenarında kurulan endüstriler doğrudan doğruya, içlerinde bulunanlar ise akarsular vasıtası ile atıksularını denize boşalttıkları zaman kirlenme sorunları yaratmaktadırlar. Bunun sonucunda denizlerde ve/veya diğer alıcı ortamlarda oksijen azalması, sudaki askıdaki katı parçacıkların artması, yağ, ağır metal ve toksik kimyasal maddelerin derişiminin artması, alıcı ortam sıcaklığının değişmesi gibi sorunlar meydana gelmektedir.

b) Yerleşim Merkezlerinden Atılan Evsel Atıksular: Evsel atıksuların arıtılmadan çevreye akıtılması mikrobik kirlenmeye, oksijen azalmasına, azot ve fosfor derişiminin artmasına ve bazen alıcı ortama fazla miktarda katı madde, ağır metal ve toksik madde eklenmesine neden olmaktadır.

c) Yerleşim Merkezlerinden Kaynaklanan Yağmur Suları: Ayrık atıksu toplama sistemi olan yerleşim merkezlerinde, yağmur suları, yağmur toplama kanalları vasıtası ile akarsu, göl veya denizlere akıtılmaktadır. Bu atıksular yağmur sırasında sürüklenen katı parçacıkları taşıdıkları için alıcı ortamdaki katı madde derişimi önemli ölçüde artmaktadır.

d) Yaygın Kirletici Kaynaklar: Tarım alanlarından, ormanlık alanlardan vb. yerlerden, yağmurlardan sonra akan sular genellikle bir kanalizasyona toplanmadan, serbestçe yüzeyden veya yeraltından akarak alıcı ortama erişmektedirler. Bu atıksuların toplanması ve kontrol edilmesi çok zordur. Bu tip sular iskan sahalarından, zirai alanlardan ve çiftliklerden, maden ocaklarından, ormanlık arazilerden vb. kaynaklanabilir.

e) Alıcı ortamlara atılan katı atıklar [7].

## 2.2. Su Kirlenmesi Türleri

Oluştığı bileşenlere göre kirliliği genel olarak aşağıdaki gibi gruplandırabiliriz.

a) Mikrobiyolojik kirlenme: Halk sağlığı açısından en önemli kirlenme sayılabilecek olan bu sınıf, alıcı ortama atılan ve akıtılan atıkların içinde patojenik mikroorganizmaların bulunmasından kaynaklanmaktadır. Bu tip mikroorganizmalar, yok oluncaya kadar, alıcı ortam sağlığı açısından tehlikeli sayılmaktadır.

Alıcı ortamda mikrobiyolojik kirlenmeyi oluşturan patojenik mikroorganizmaların türünü ayrı ayrı belirlemek pratik açıdan çok zordur. Bu nedenle mikrobiyolojik kirlenmenin belirlenmesi indikatör olarak adlandırılan belli mikroorganizmaların yardımıyla yapılmakta, bu iş için ise genel olarak koliform bakteri grubu kullanılmaktadır.

b) Organik kirlenme: Bu tür kirlenme, alıcı ortamdaki organik madde derişiminin artmasından kaynaklanmaktadır. Su içerisindeki organik bileşikler; bitki ve hayvan artıklarının doğal bozunmasından, endüstriyel, kentsel ve zirai kirlenmeden ve atık su arıtımı sırasında doğal organik maddelerle halojenürlerin tepkimelerinden ileri gelir [6]. Alıcı ortamın kirlenmesi ile ilgili çalışmalarda genellikle kirliliğe neden olan organik kirleticiler ayrı ayrı belirlenmemektedir. Bunun yerine, bu kirleticilerin etkilerini dolaylı bir yoldan verebilen Biyolojik Oksijen İstemi (BOİ), Kimyasal Oksijen İstemi (KOİ) gibi bazı parametreler kullanılmaktadır.

Atıksular bir alıcı ortama boşaltıldıkları zaman bünyelerinin ve alıcı ortam hidrodinamiğinin zorunlu kıldığı biçimde hareket ederek, çökebilirler çöker; yüzebilirler su yüzeyine çıkar; askıda kalabilenler difüzyon ve dispersiyon etkisi ile seyrelir ve su içerisindeki bakterilerin faaliyeti ile biyokimyasal ayrıma uğrarlar. Bu işlem sırasında bakteriler, suyun içinde bulunan çözünmüş oksijeni tüketirler. Suyu eklenen organik madde az olduğu zaman, oksijen kullanımı da az olur ve havalandırma yoluyla oksijen atmosferden kolaylıkla geri kazanılır. Ancak, alıcı ortama atılan organik kirleticilerin çok fazla olduğu durumlarda aerobik bakteriler ayrışma sırasında suyun içindeki tüm oksijeni tüketebilir ve alıcı ortamda anaerobik koşullar hakim olur, bu şartlar altında biyolojik ayrışma anaerobik bakteriler tarafından sürdürülür. Anaerobik ayrışma sonucunda organik maddeden karbondioksit, metan, hidrojen sülfür gibi bileşikler oluşur.



Böylece alıcı ortama atılan organik kirleticilerin fazla olması, sadece ortamın ekolojik dengesini bozmakla kalmayıp, hoş olmayan kokulara (Haliç örneği), ayrıca, oksijen değerinin 4 mg/L'nin altına düşmesi de bir çok balık türünün yok olmasına neden olur.

c) İnorganik kirlenme: Suya eklenen bir çok madde, inorganik kirlenmeye neden olmaktadır. Bunların arasında demir, mangan, klorür, ağır metaller, azot, fosfor ve diğer bir çok madde sayılabilir. Bu parametrelerin herbirinin çevreye etkisi farklı olup, doğanın bu kirleticileri zararsız hale getirme yolu ise, çöktürme ve seyreltmedir.

d) Isıl kirlenme: Alıcı ortamlardaki doğal sıcaklığı değiştirerek doğal dengeyi bozan kirlenmedir. Alıcı ortamın sıcaklığını değiştirebilecek ısı kaynaklarının varoluşu ekolojik dengeyi ve su kalitesini önemli ölçüde etkiler. Isıl kirlenmenin ana kaynağı termal santrallerdir. Ancak, değişik endüstrilerin soğutma suları da ısıl kirlenmeye neden olabilir. Alıcı ortama, sıcaklığı farklı olan bir atıksuyun deşarj edilmesi ile aşağıdaki etkiler gözlenir.

i) Ekolojik etkiler: Sıcaklığın artması, plankton ve deniz dibi canlı türlerinin çoğalma hızlarını etkiler ve böylece sudaki canlı popülasyonu değişikliğe uğrar. Ayrıca, bir çok canlı türü, yaşamlarını belirli sıcaklık sınırları içinde sürdürebilmektedir.

ii) Su kalitesine etkileri: Su sıcaklığının artması suyun oksijen ile doygunluk düzeyini etkilemektedir. Böylece suyun sıcaklığının artması ile bir taraftan suyun içinde çözünebilecek oksijen miktarı azalmakta, diğer taraftan artan bakteri faaliyetleri sonucu anaerobik koşullara daha çabuk ulaşılmaktadır.

iii) Sedimentlere etkisi: Su sıcaklığının artması ile suyun içinde bulunan katı parçacıkların çökme hızı da artmaktadır. Böylece dip bileşimi etkilenmektedir [7].

### **2.3. Su Kirliliği ile İlgili Yasal Düzenlemeler**

Ülkemizde hava, su, toprak, kirliliğini önlemek ve dolayısıyla; canlı ve cansız varlığını korumak ve geleceğini garanti altına almak üzere geçmişten günümüze kadar çeşitli yasa ve yönetmelikler çıkarılmıştır. Bu yasalardan birisi de Anayasamızın 56. maddesinde “Herkes sağlıklı ve dengeli bir çevrede yaşama hakkına sahiptir. Çevreyi geliştirmek, çevre sağlığını korumak ve çevre kirliliğini önlemek devletin ve vatandaşların ödevidir” şeklinde yer alan hükümdür.

İçme suyu kaynaklarının korunmasına yönelik 1593 Sayılı Umumi Hıfzıssıhha Kanunu ile içme amaçlı su sağlanan su kaynaklarının korunması, lağım sularının dere, çay ve nehirlere verilmesine sınırlama getirilmiştir [8].

4 Nisan 1971 tarihli Resmi Gazete’de yayınlanan 1380 sayılı “Su Ürünleri Kanunu” ile su ürünlerinin üretimi ve üretim yerlerinin sınıflandırılması ve denizler ve iç suların kirlenmesini önlemeye yönelik hükümler getirilmiş ve bu tür durumlarda uygulanacak cezai hükümler belirtilmiştir [9].

11 Ağustos 1983 tarihli 2872 sayılı Çevre Kanunu; bütün çevre sorunlarını ele alan ilk kapsamlı yasal düzenlemedir. Kanun kapsamında “bütün vatandaşların ortak malı olan çevrenin korunması, iyileştirilmesi; kırsal ve kentsel alanda arazinin ve doğal kaynakların en uygun şekilde kullanılması ve korunması; su, toprak ve havanın kirlenmesinin önlenmesi” gibi doğrudan çevrenin korunmasına yönelik yasal düzenlemeler bulunmaktadır[1]

Ayrıca, her yıl Tarım ve Köy İşleri Bakanlığı’nca hazırlanan ve kirliliğin denetiminde gerekli sınır değerleri düzenleyen sirkülerler vardır. Bu sirkülerlerden 1985 tarih ve 18680 sayılı sirkülerin dördüncü bölümünde sulara boşaltılacak atıklar için deşarj kriterleri açıklanmıştır [10].

2872 sayılı Çevre Kanunu uyarınca düzenlenen “Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği”, 04.09.1988 gün ve 19919 sayılı Resmi Gazete’de yayınlanmak suretiyle yürürlüğe girmiştir. Yönetmeliğin amacı, ülkenin yeraltı ve yerüstü su kaynakları potansiyelinin her türlü kullanım amacıyla korunması, en iyi bir biçimde kullanımının sağlanması ve su kirlenmesinin önlenmesidir [2].

Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği uyarınca yayınlanan tebliğler ise şöyledir;

- \* Suda Tehlikeli ve Zararlı Maddeler Tebliği (R.G.: 12.03.1989 - 20106)
- \* İdari Usuller Tebliği (R.G.: 12.03.1989 - 20106)
- \* Numune Alma ve Analiz Metodları Tebliği (R.G.: 07.01.1991 - 20748)
- \* Teknik Usuller Tebliği (R.G.: 07.01.1991 - 20748)

### 3. TEKSTİL ATIKSULARININ KARAKTERİSTİKLERİ

Tekstil atıksularının en belirgin özelliği renkleridir. Kullanılan boyar maddenin tipine bağlı olarak tekstil atıksularının rengi, baskınlıklarına göre, kırmızı, kahverengi, mavi, mor ve siyah olarak değişir. Tekstil atıksuları günden güne renk değiştirir; hatta bazen, müşteri isteklerini karşılayabilmek üzere, boyama sürecinde kullanılan boyar madde günde birkaç kez değişir. Renk değişimleri aynı zamanda tekstil atıksularının KOİ'si üzerinde de dalgalanmalara neden olur. Böyle boyar maddece zengin sular arıtılmadan deşarj edilirse, alıcı ortam ekosisteminde olumsuz etkiler oluşturacaktır [11].

Tekstil endüstrilerinden alıcı ortama verilen boyama atıkları alıcı suyun renginin değişmesine, boyalı hale gelmesine neden olurlar. Kullanılan boyaya göre bitki ve hayvan yaşamı üzerine toksik etki yaparlar, nehrin kendi kendini arıtma kapasitesini (özümleme kapasitesi) engellerler [12].

Boya banyoları atıkları alıcı suyun renklenmesine, suyun ışık geçirgenliğinin azalmasına, akuatik floranın fotosentez hızının azalmasına neden olurlar. Bazı anilin boyaları düşük derişimlerde olsalar da balık organizmalarında birikirler ve et üzerinde belirgin renk oluştururlar. Tekstil atıkları ile renklenmiş alıcı sular, diğer endüstriler (kağıt, bira v.b.) için su kaynağı olarak kullanılamazlar.

Tekstil atıksularındaki büyük pH dalgalanmaları diğer önemli dezavantajlardan birisidir. pH değişimi, öncelikle boyama sürecinde farklı tiplerde boyar madde kullanımından kaynaklanır. Atıksuyun pH'ı 2'den 12'yi aşan değerlere kadar değişebilir. Böylesine büyük pH değişimi, özellikle aktif çamur ve kimyasal arıtım süreçlerinin oldukça kısıtlı pH değerleri nedeniyle önemli bir sorundur. Bu nedenle uygun pH ayarlaması tekstil atıksuları arıtım süreçlerinde gerekli bir parça haline gelmiştir [11].

Endüstriyel atıksuların bir çoğuna kıyasla tekstil atıksularının sıcaklığı, alışılmadık bir şekilde yüksektir. Boyama sürecinde, değişik basamaklarda sıcaklığı 90°C'a kadar varan yıkama suları kullanılır. Tekstil atıksularının yaklaşık 40°C'a kadar varan sıcaklığı, bu yıkama sularının bir sonucudur. Yüksek sıcaklık, direkt boyama sürecinden gelen tekstil atıksularının arıtımını gerçekleştirilemez hale getirir ve bu nedenle 30°C veya daha düşük sıcaklıklara ön ısı giderimi gerektirir.

Tekstil atıksularının içerdiği diğer önemli kirleticiler az miktarlarda polivinil alkol (PVA), karboksimetil selüloz (CMC), kimyasal maddeleri parçalamak için nişasta ve sentetik liflerdir. Tekstil malzemelerinin üretiminde kullanılan bu lifler; doğal olanlar (Bitkisel -pamuk-, Hayvansal -yün-) ve sentetik olanlar (akrilik, naylon vb.) şeklinde ikiye ayrılabilir [13].

Kaplama maddeleri derişimlerine bağlı olarak 10000 mg/L'nin üstünde yüksek KOİ değerlerine sahip olduklarından tekstil atıksularının KOİ içeriğine önemli ölçüde katkıda bulunurlar.

pH, BOİ, toplam katılar ve üretilen atıksu miktarı bir süreçten diğerine büyük çeşitlilik göstermesine karşın, bu atıksuların dengeleme tankında karıştırılması ile fiziksel ve kimyasal özellikler açısından daha kararlı atıksu elde edilebilir. Genel olarak, tekstil atıksuları, KOİ içeriği ve renk yoğunluklarına göre 3 sınıfa ayrılabilir: yüksek, orta ve düşük şiddetli atıksular. Yüksek şiddetli atıksular 1600 mg/L'nin üzerinde KOİ derişimi ve çok düşük ışık geçirgenliğine sahip, koyu renkli sulardır. Orta şiddetli atıksu 800-1600 mg/L KOİ içerirken, düşük şiddetli atıksuyun KOİ içeriği <800 mg/L'dir. Çizelge 3.1'de bu üç tekstil atıksuyunun ortalama özellikleri gösterilmiştir. Atıksuyun rengi, yoğunluk açısından, bu üçlü sınıflandırmayla doğru orantılı olarak değişir. Ancak, bazı durumlarda düşük ya da orta şiddetli kirli atıksu çok koyu renge sahip olabilir. Bu atıksuların arıtımındaki zorluk derecesi, bağlı kirlilik derecesi ile yakından ilgilidir. Genel olarak, tekstil atıksularının pek çoğunun orta ve düşük şiddette kirli atıksu sınıfına girdiği söylenebilir[11].

Çizelge 3.1. Tekstil atıksuları ortalama özellikleri [11]

Tip	BOİ (mg/L)	KOİ (mg/L)	pH	Askıda katı madde (mg/L)	Sıcaklık (C)	Yağ (mg/L)	İletkenlik (µS)
Yüksek şiddetli	500	1500	10	250	28	50	2900
Orta şiddetli	270	970	9	137	28	21	2500
Düşük şiddetli	100	460	10	91	31	10	2100

Arıtılmadan deşarj edilen tekstil endüstrisi atıksuları çözünmüş oksijeni hızlı bir şekilde tüketirler. Bu oksijen tüketimi dipte toplanan atıkların bozunması ile hızlanır. Akarsuların dibinde toplanan maddeler esas olarak yün lifleri ve yündeki safsızlıklardır. Suyun fiziksel özellikleri bozulur, renkli ve kokulu bir hal alır [14].

Tekstil atıksularında bulunan ve kükürtlü maddelerin kullanımından oluşan sülfür bileşikleri özellikle beton borular üzerinde zararlı etki yapar. 300 mg/L'nin üzerindeki sülfat derişimleri, beton kanalizasyon borularında korozyona (taç korozyonu) yol açarlar. Ayrıca, yünlü tekstil atıklarında bulunan yağların ve sabunların bozunmasından oluşan yağ asitlerinin de kanalizasyon kanallarında korozyon etkisi vardır [12].

### 3.1. Tekstil Endüstrisi Atıksularının Arıtım Teknolojileri

Tekstil atıksularının deşarj sınırlarını sağlayacak şekilde arıtılması için genellikle birden fazla temel sürecin uygulanmasına gerek vardır. Bu süreçlerin seçimi için, tesis ve işletme masrafları, arazi gereksinimi, atıksu özelliklerindeki değişikliklere karşın istenilen çıkış suyu kalitesinin sağlanması gibi hususlar göz önüne alınmalıdır.

Tekstil endüstrisinde kirletici bileşenlerin arıtılmasında kullanılan teknolojiler;

1. Askıda katı madde giderimi
  - Izgaradan geçirme
  - Çökeltme
  - Filtrasyon
  - Flotasyon
2. BOİ/KOİ azaltma yöntemleri
  - Lagünler
  - Aktif çamur
  - Besi maddesi ilavesi
  - Sabit yataklı biyolojik reaktörler
    - Damlatmalı filtreler
    - Döner diskler
  - Aktif karbon adsorpsiyonu
  - Kimyasal pıhtılaştırma
3. Yağ ve gres giderme
4. Krom giderme
5. Renk giderme
6. Fenolik bileşiklerin giderilmesi
7. Fosfat azaltma
8. Azot azaltma
9. Çamur azaltma

Tekstil fabrikaları atıksularının arıtılmaları genellikle üç ana etkene bağlı olarak geliştirilmiştir. Bunlardan fiziksel olaylara dayanan mekanik arıtımda, atıksulardaki bazı maddeler çökeltme yoluyla giderilmektedir. İkincisi, fiziksel veya kimyasal olaylara bağlı arıtım, üçüncüsü ise mikroorganizmaların temizleme özelliğine dayalı biyolojik arıtımdır[15].

### 3.1.1. Mekanik arıtım

Mekanik arıtımda, kendi ağırlığıyla tabana çöken veya yüzeye çıkan katı maddeler ile yağ ve benzeri yüzücü maddeler tutularak sudan ayrılır. İri maddeleri tutmak için ızgaralar, kum ve benzeri maddeleri tutmak için kum tutucular, yüzen maddeleri ayırmak için yağ ayırıcılar, kendi halinde çökebilen maddeleri ayırmak için ise çöktürme havuzları kullanılır [15].

Tekstil fabrikalarında mekanik arıtım, atıksuyun özelliklerini dengelemeye ve ayarlamaya yarayan havuzlarla birlikte uygulandığı zaman önem kazanmaktadır.

Mekanik arıtımda, dengeleme havuzlarının yanısıra çökeltme havuzları da önemli yer tutar. Çökeltme havuzlarında suyun iki saat kalması genellikle yeterli olmaktadır. Eğer, yalnızca, mekanik arıtım Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'ndeki sınır değerleri sağlamaya yeterli değilse daha ileri arıtım işlemleri gerekir [15].

### 3.1.2. Kimyasal arıtım

Tekstil fabrikası atıksularının arıtılmasında mekanik arıtım yeterli olmadığı için kimyasal arıtım da uygulanabilir. Kimyasal arıtımda kendi ağırlığıyla çökemeyen katı maddelerle, kolloidler ve çözünmüş maddelerin, suya pıhtılaştırıcı ve pıhtılaştırmaya yardımcı maddeler ilave etmek ve karıştırmak suretiyle yumaklar halinde çökelmeleri sağlanır.

Kimyasal arıtım sistemleri bir seri fiziksel ve kimyasal süreçlerin birleşmesinden meydana gelmiştir. Bu sistem içerisinde dengeleme, hızlı karıştırma, yumaklaştırma, çöktürme, çamur giderme, filtrasyon ve dezenfeksiyon birimleri bulunabilir.

Kimyasal arıtım özellikle renkli veya ince dağılmış katı tanecikler içeren atıksulara uygulanmaktadır. Kimyasal arıtım sonucunda genellikle büyük hacimlerde çamur oluşur.

Kimyasal arıtım ile biyolojik arıtımda BOİ ve organik katı maddelerin farklı bir yolla giderilmeleri sağlanır. Biyolojik süreçler organik maddeleri artık oksijen tüketemeyecekleri bir düzeye getirir ve kararlı kılar. Kimyasal arıtım yönteminde ise organik maddeler ilave edilen pıhtılaştırıcılarla birlikte çöker [15].

### 3.1.3. Biyolojik arıtım

Yüzyılımızın başında geliştirilmeye başlanan biyolojik arıtım, organik kirleticileri içeren evsel ve endüstriyel atıksulara uygulanır. Günümüzde yüksek arıtım gücüne sahip biyolojik yöntemler geniş çapta kullanılmaktadır.

Biyolojik arıtımda atıksudaki organik maddeler, mikroorganizmalar tarafından besin ve enerji kaynağı olarak kullanılır. Atıksuda gelişen ve arıtımda önemli olan başlıca organizmalar; bakteriler, mantarlar, algler, protozoalar, rotiferler, kabuklular ve virüslerdir. Organizmalar ve buna bağlı olarak arıtma, oksijen kullanımına göre ikiye ayrılır. Birinci grup moleküler oksijen kullanan ve oksijenli ortamda yaşayabilen organizmalar, diğeri oksijenin bulunmadığı yerlerde yaşayabilen organizmalardır. Mikroorganizmaların gelişmesi yaşadıkları çevreye bağlıdır. Yaşamalarına etki eden başlıca faktörler; pH, sıcaklık, gerekli besi maddelerinin, eser elementlerin, yeterli oksijenin bulunması ve uygun karıştırma.

Tekstil atıksularının geniş alan gereksinmesi olan yöntemlerle arıtımında olumlu sonuçlar alınmamıştır. Atıksuyun büyük havuzlarda uzun süre bekletilerek biyolojik olarak arıtımı beklenen sınır değerleri sağlayacak yeterlikte olmamıştır. Bu nedenle biyolojik arıtım yöntemlerinden, daha küçük yer kaplayan ve daha yüksek arıtma verimi sağlayan damlatmalı filtre ve aktif çamur yöntemi geniş uygulama alanı bulmuştur [15].

Belirli bir sürecin kirleticiyi giderebilmesi, atıksuyun özelliklerine bağlıdır. Tekstil atıksularının arıtılması için kullanılan arıtma sistemlerindeki süreçler ve arıtma verimleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

### 3.2. Atıksulardan Boyar Madde Giderimi

Çeşitli endüstriyel atıksular biyolojik olarak parçalanması zor ya da olanaksız olan boyar maddeler içerirler. Boyar madde içeren atık su oluşturan sanayiler arasında tekstil, boya, gıda ve deri endüstrileri sayılabilir. Boyar maddeler, genellikle biyolojik olarak parçalanması zor bileşiklerden oluştuğu için giderimlerinde fizikokimyasal yöntemlerin kullanılması daha uygundur [16].

Çizelge 3.2. Arıtma Sistemlerindeki Süreçlerin Tahmini Kirlenici Giderme Verimleri [15]

Arıtma prosesi	BOİ5	KOİ	TAM	GRES	RENK
<b>ÖN ARITMA</b>					
Izgaradan geçirme	0-5	-	5,0-20	-	-
Dengeleme	0-20	-	-	-	-
Nötralizasyon	-	-	-	-	-
Kimyasal pıhtılaştırma (*)	40-70	40-70	30-50	90-97	0-70
Flotasyon	30-50	20-40	50-60	90-98	-
<b>BİYOLOJİK ARITMA</b>					
Konvansiyonel aktif çamur	70-95	50-70	85-95	0-15	-
Uzatmalı havalandırma	70-94	50-70	65-95	0-15	-
Havalandırma lagün	60-90	45-80	85-95	0-10	-
Aerobik lagün	50-80	35-60	50-80	0-10	-
Damlatmalı filtre	40-60	20-30	-	-	-
<b>ÜÇÜNCÜ KADEME ARITMA</b>					
Kimyasal pıhtılaştırma (*)	40-70	40-70	30-90	90-97	0-70
Karışık ortamli filtrasyon	25-40	25-40	80	-	-
Karbon adsorpsiyonu	25-40	25-60	25-40	-	80-90
Klorlama	0-5	0-5	-	0-5	0-5
Ozonlama	-	30-40	50-70	-	70-80
<b>İLERİ ARITMA</b>					
Spray sulama	90-95	80-90	95-98	-	-
Buharlaştırma	98-99	95-98	99	-	-
Ters ozmoz	93-95	90-95	95-98	-	-

(\*) Giderme verimleri kimyasal madde ve kullanılan dozaj ile ilgilidir.

Atıksulardan renk giderimi için koagülasyon/flokülasyon (pıhtılaştırma/yumaklaştırma), adsorpsiyon ve kimyasal yükseltgeme gibi çeşitli fiziksel/kimyasal yöntemlerle, biyolojik arıtım sistemleri kullanılabilir [16]. Bu yöntemlerle elde edilen renk giderim veriminin atıksudaki boya türüne bağlı olarak değişiklik göstermesi, atıksulardan renk giderimi için uygun yöntemin seçimini daha da zorlaştırmaktadır. Koagülasyon/flokülasyon ile atıksulardan renk giderimi yaygın yöntemlerden biri olmasına karşın oluşan kimyasal çamurun özelliği ve çokluğu nedeniyle çamur uzaklaştırma sorunu doğmaktadır. Ozonlama ve klorlama yöntemleri ile de rengin tamamen giderilmesi mümkündür. Ancak, ozon üretiminin ekonomik olmaması, klorlama sonucunda da kanserojen klorlu organik bileşiklerin oluşması bu yöntemlerin kullanımını kısıtlamaktadır. Ters ozmoz, ultrafiltrasyon ve iyon değişimi yöntemleriyle de renk giderimi sağlanabilmesine karşın, ekonomik nedenlerden dolayı bu yöntemler yaygın



olarak uygulanmamaktadır. Boyar maddelerin karmaşık organik yapıya sahip olmaları biyolojik olarak parçalanmalarını zorlaştırmakta, bu nedenle klasik biyolojik sistemler renk gideriminde yetersiz kalmaktadır. Özellikle fenol, kresol ve boyar madde gibi biyolojik parçalanması zor olan organik maddelerin aktif çamur sisteminde havalandırma birimine toz aktif karbon (PAC) ilavesi ile giderimi olumlu sonuçlar vermektedir. PAC aktif çamur olarak isimlendirilen bu sistemde, toz aktif karbon ilavesi ile toksik, biyolojik parçalanabilirliği az olan organik maddeler aktif karbon üzerine adsorplanarak biyolojik sistemi etkilemeden giderilmekte ve sistem performansında artış gözlenmektedir[16].

### **3.2.1. Boyarmadde atıksularının alıcı ortamlardaki etkileri**

Atıksularda çok çeşitli bileşikler bulunabildiğinden alıcı sulardaki etkileri farklı olabilmektedir. Alkoller ve doymuş karboksilik asitler biyolojik olarak yükseltgene bildiklerinden alıcı sulardaki çözünmüş oksijenin tükenmesine yol açarlar. Alkoller de dahil olmak üzere çeşitli organik bileşikler biyokimyasal ayrışma süreçlerine etki ederler[12].

Bazı bileşikler 2,5 mg/L derişimde mikroorganizmalara karşı toksik olmadıkları halde, ikisi ya da üçü birarada bulunduğunda biyolojik ayrışmayı tamamen engelleyebilmektedir. İzopropil eter, iminoetil alkol, etilendiamin ve trietanolamin gibi bileşiklerin ayrışması için 50 günden uzun bir süreye gerek olduğu bulunmuştur. Sülfürler, polisülfürler ve hidrosülfürler gibi bazı bileşikler ise alıcı su ortamlarında ani ve büyük bir oksijen tüketimine neden olurlar[12].

İnorganik asitler, ağır metal tuzları ve toksik organik bileşikler yüzeysel sulardaki biyokimyasal dengeyi bozar, bazen de kısa veya uzun mesafelerde biyolojik yaşamı tamamen ortadan kaldırabilir. Organik maddelerin ve boyar maddelerin balıklar üzerinde toksik etkiler yaptığı çeşitli araştırmacılar tarafından gösterilmiştir. Hidrazin 0,7 mg/L gibi çok düşük derişimlerde bile çok toksiktir. Diğer bileşikler için belirlenen sınır derişimler: Sodyum bisülfid 4 mg/L, diamilamin 5 mg/L, fenol 10 mg/L, dimetilamin 30 mg/L, amilasetat 50 mg/L, asetik asit 100 mg/L şeklindedir. Boyalar için verilen sınır derişimleri ise viktorya mavisi 10 mg/L, metil viyolet 6B 10 mg/L, parlak yeşil boyalar 10 mg/L'dir. Boyaların balıklar üzerindeki etkileri Çizelge 3.3'te özetlenmiştir [12].

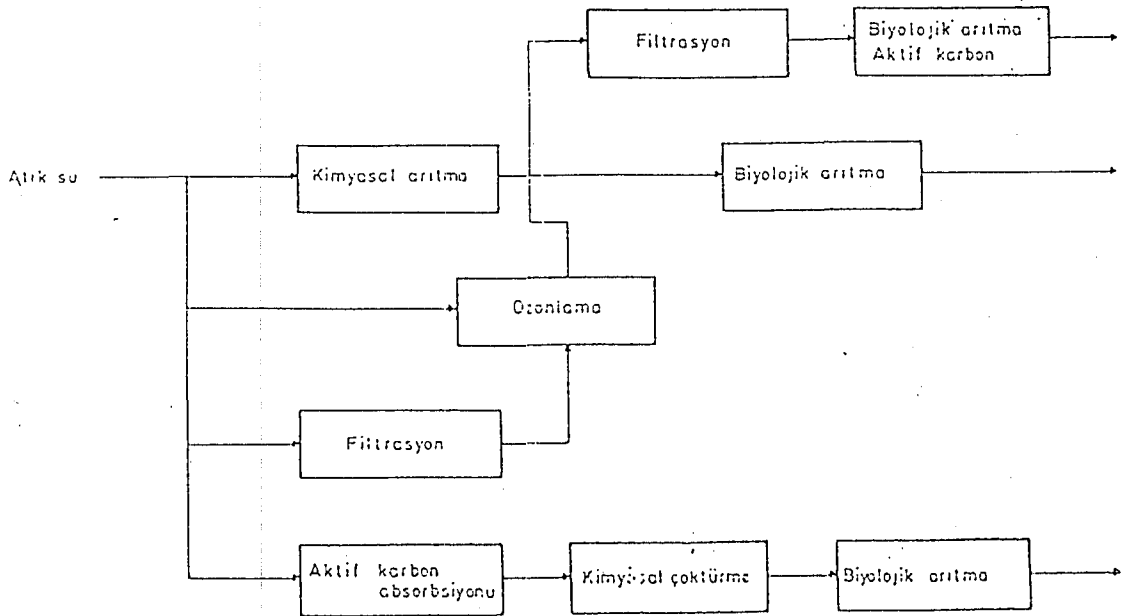
Çizelge 3.3. Balıklar üzerinde çeşitli boyaların etkileri [12]

Boya	Derişim (mg/L)	İnceleme periyodu (gün)	Etki
Metilen mavisi	217,5-177,5	7	Belirgin
Metilen mavisi	157,5-57,5	7	Belirgin
Krizoidin	5	0,3	Belirgin
Bismark Krizoidini	8	4	Belirgin
Bismark Krizoidini	5	4	Hiçbir etki yok
Nortensa sarısı	85	4	Belirgin

Günümüzde, boyaların zehirli özellikler taşıdığı, bazı boyaların çalışma ortamında belirlenen düzeylerde tutulması gerekliliği, az miktarda fakat uzun süreli maruz kalmalarda kronik etkilerinin gözönünde tutulması zorunluluğu boya ile çalışan işçiler üzerinde araştırılarak bulunmuştur [17].

Benzidin türevli boyar maddelerin insan sağlığı üzerinde kanserojen etki yaptığı bilinmektedir. Bu etki nedeniyle başta ABD olmak üzere gelişmiş ülkeler tarafından, benzidin ve benzidinden türeyen boyar maddelerin üretilmesi, tüketilmesi ve ülkeye sokulması yasaklanmıştır. Buna karşılık ülkemize her yıl 50 ton benzidin ithal edilmektedir. Ayrıca, diğer yerli ve ithal girdilerle birlikte 250 ton benzidinli boyar madde üretilmekte ve 250 ton ürün boyar madde ithal edilmektedir [18].

Şekil 3.1'de Yünlü tekstil endüstrisi boyahane atıksularının arıtımı için kullanılacak alternatif arıtma yöntemleri görülmektedir.



Şekil 3.1. Yünlü tekstil endüstrisi boyahane atıksularının arıtımı için kullanılacak alternatif arıtma yöntemleri [12]

## 4. ELEKTROKİMYASAL ATIKSU ARITIMI

Elektrokimyasal atıksu arıtımı, Elektrokimya ve Elektrokimya Mühendisliği'nin temel ilkelerinin kullanıldığı arıtma yöntemidir. Bu nedenle elektrokimyasal atıksu arıtımı hem atıksu arıtımı tekniklerinin hem de elektrokimyasal tekniklerin iyi bilinerek biraraya getirilmesini gerektirmektedir [19].

Elektrokimyasal reaktörler modern toplumlarda hayati derecede önemli rol oynamaktadırlar. Günlük yaşamda elektriğin geniş ölçüde kullanılması ve yeni teknolojilerin uygulanmasındaki artış elektrokimyasal reaktörlerin sayısı, tip ve uygulamalarında da son derece büyük artışa neden olmuştur. Öyleki 1900'lerden önce sadece Galvanik pillerde geniş kullanım olanağı bulan elektrokimyasal reaktörler, günümüzde, metal ve kimyasal madde üretimi, taşınabilir sabit güç kaynakları, metal kaplama, korozyon kontrolü, çevresel amaçlı arıtım, saflaştırma, sensörler ve tıbbi cihazlar gibi değişik amaçlarla kullanılmaya başlanmıştır [20].

### 4. 1. Elektrokimya ve Elektrokimya Mühendisliği

Elektrokimya, elektrik enerjisi ile oluşan kimyasal tepkimeler veya kimyasal tepkimeler sonucu üretilen elektrik enerjisi ile ilgilenen bir bilim dalıdır. Endüstride uygulanmak istenen elektrokimyasal süreçler, ilk önce laboratuvar boyutundaki reaktörlerde yapılmaktadır. Bu boyuttan endüstri boyutuna geçilirken, ortaya çıkan sorunların çözümünde yalnızca elektrokimyanın ilkeleri yeterli olmamaktadır. Elektrokimya mühendisliği bu aşamada devreye girerek, süreçlerin endüstriye uygulanmaları esnasında ortaya çıkan problemleri çözmeye çalışır [19].

Elektrokimya mühendisliği; kimya mühendisliği ve elektrokimyadan ortaya çıkan kavramların uygulamalarından doğar. Elektrokimya mühendisliği teorisi, başlıca elektrokimyasal reaktörler üzerinde odaklanır. Elektrokimyasal reaktör, içinde elektrokimyasal süreçlerin gerçekleştiği bir sistem olarak düşünülebilir [21].

Elektrokimyanın ilkeleri dört grupta toplanabilir [22].

1. Elektrokimyasal termodinamik
2. Elektrot kinetiği
3. Elektrolitik kütle aktarımı
4. Reaktör gerilimi

Elektrokimya mühendisliğinin ilkeleri ise, elektrokimyanın ilkeleri ile birlikte şunlardır [23].

1. Isı aktarımı
2. Hidrodinamik ve kütle aktarımı
3. Reaktör tasarımı ve malzeme bilimi
4. Ölçek büyütme
5. Optimizasyon ve maliyet

Ayrıca bir elektrokimyasal tepkime hızı sürecin temel sınırlayanıdır. Hız;

- a. Tepkimeye girenlerin elektrot yüzeyine ulaşma hızı
- b. Ara ve son ürünlerin uzaklaştırılma hızı
- c. Ara yüzey tepkime hızı

tarafından belirlenir. Ayrıca, hız belirleyen basamak, kütle aktarımı ile aynı zamanda yer alan arayüzey tepkimelerinin bir bileşimi olabilir. Bu “karışık kontrol” olarak bilinir [24]. Bu kontrol endüstriyel elektrokimyasal süreçler için tipiktir. Genelde, proses ve tepkime mühendisliğinin amacı kütle aktarımını kontrol edebilmektir. Çünkü bu, belli hidrodinamik koşullarda en büyük dönüşüm hızı demektir. Konvektif difüzyonun sınır akımı bu basamağı karakterize eder. Sınır akımı aynı zamanda etkin elektrot yüzeyi ve elektrokimyasal hücrenin boyutlarını da belirler.

Bir elektrokimyasal reaktör; kimyasal reaktöre ek olarak elektrotlar içerir. Böyle bir sistemde elektrokimyasal tepkimeler elektrotlar arasında gerilim farkı yaratılarak gerçekleştirilir. Genellikle, elektrokimyasal reaktörde elektrotlarda elektrolit çözeltisini oluşturan bileşenlerin ayrışması söz konusudur. Bu ilke, farklı yollardan uygulanabilir. Elektrokimyasal reaktörler daha çok saf maddeler elde etmek için karışımların ayrılmasında kullanılır. Alüminyum, magnezyum yada sodyum gibi saf metal ve klor gibi ametallerin üretimi endüstriyel uygulamalara örnek gösterilebilir. Diğer önemli uygulama alanlarından biri elektrolit bileşenlerinin elektrotlarda tutularak ayrılmasıdır. Elektrokimyasal reaktörlerde üretilen maddelerin, diğer bazı kimyasal ya da teknik süreçlerle üretilmesi de mümkündür. Ancak, elektrokimyasal reaktörlerin kullanılmasının bir çok avantajı vardır; bunlardan biri, elektrokimyasal reaktörlerin aynı anda gerçekleşen paralel tepkimelere karşı yüksek derecede seçicilikle karakterize edilmesidir. Bu, tepkimelerin sabit bir sıcaklıkta sürdürülmesi ile başarılabilir. Bu yolla son derece yüksek saflıkta elektroliz ürünleri elde edilebilir [25].

Elektrokimyasal reaktörlerde gerçekleşen elektrot tepkimeleri, katı-sıvı ara yüzeyinde yeralan heterojen indirgenme ve yükseltgenme tepkimeleridir. Elektrot tepkimeleri, ana çözeliden ara yüzeye madde difüzyonu, elektrotta bir yüzey tepkimesi ve ara yüzeyden ana çözeltiliye doğru ürünün difüzyonu şeklinde üç kademedeki gerçekleşir. Ara yüzeyde, kalınlığı çözeltilinin hareketine bağlı olan bir difüzyon tabakası bulunur [26].

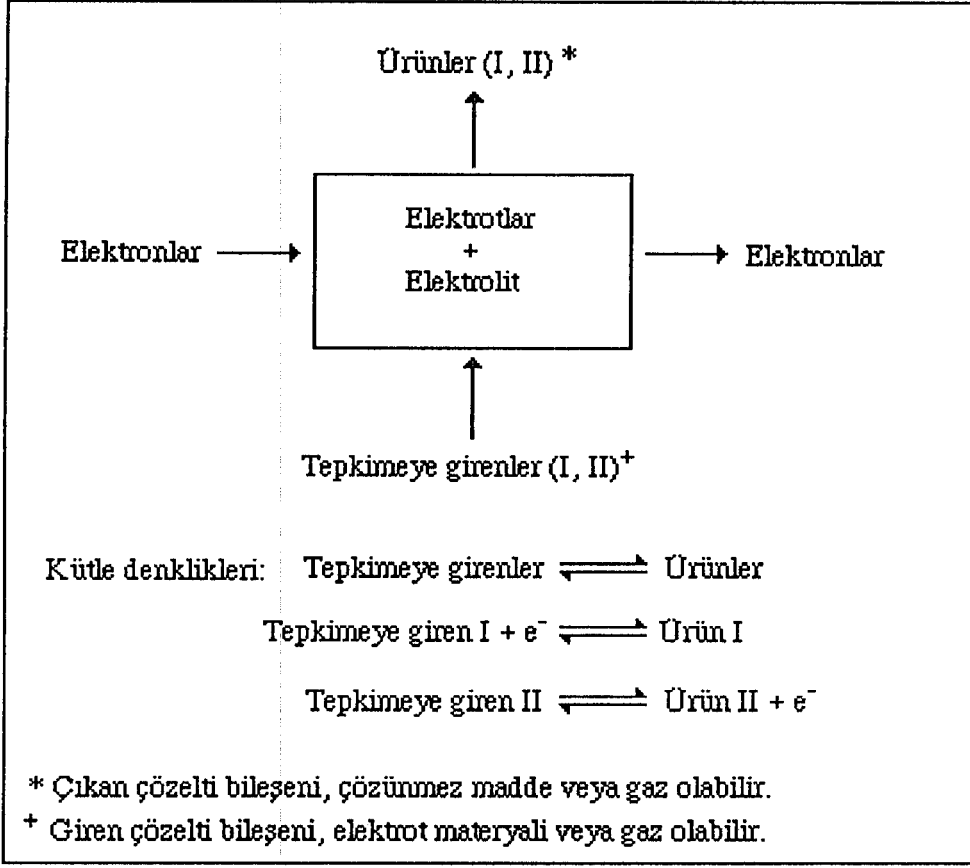
Bu tez çalışmasının da konusu içine giren poröz elektrotlar, özellikle uygulamalı elektrokimyada; galvanik hücreler ve elektrokimyasal sentezlerde geniş uygulama alanı bulur. Potansiyel elektrik enerjisi kaynağı olan yakıt hücreleri son zamanlarda artan ilgiyle yoğun araştırma konusu olmuştur. Bu araştırmalar aynı zamanda poröz elektrotların analitik uygulamalarına da yol açmıştır. Bir gaz karışımındaki oksijen derişiminin belirlenmesi ve çok saf hidrojen ve oksijen üretmek için elektrolizörlerin geliştirilmesi örnek olarak verilebilir.

Büyük iç yüzey alanları nedeniyle, poröz elektrotlar elektrokimyasal süreçlerin yeterli derecede yüksek akım ve düşük aşırı gerilimle gerçekleşmesine olanak sağlarlar. Bu da elektrokimyasal hücrede elektrik enerjisinin etkin bir şekilde kullanımı anlamına gelmektedir [27].

Elektrokimyasal işlemler sürekli ve kesikli olmak üzere iki farklı yolla gerçekleştirilir. Bir çok elektrokimyasal reaktör sürekli şekilde işletilir; yani, reaktöre sürekli yeni elektrolit beslenir ve işlem görmüş elektrolit uzaklaştırılır. Elektrokimyasal kesikli reaktörler, elektrolitteki derişimin artmasıyla karakterize edilirler. Kesikli tepkime bittikten sonra, genellikle, elektrolit ve elektrotlar değiştirilir. Sürekli ve kesikli çalışma sistemlerinde, elektrolitin bir kısmı tekrar reaktöre döndürülebilir.

Ayrıca elektrokimyasal süreçlerde sabit ve akışkan yatak gibi diğer reaktör tipleri de uygulanabilir. Bu reaktörler iyi türbülans sağlanabilmesi nedeniyle yüksek ısı ve kütle aktarım hızları ile karakterize edilirler. Sabit ve akışkan yataklı reaktörler yükseltgeme-indirgeme tepkimelerinde kullanılırlar [25].

Bir elektrokimyasal reaktörde gerçekleşen olaylar ve kütle denklilikleri Şekil 4.1'de görülmektedir.



Şekil 4.1. Elektrokimyasal reaktörde gerçekleşen olaylar ve kütle denklilikleri [21]

Elektrokimyasal reaktörlerde kütle aktarımı konvektif difüzyon sistemi ile gösterilebilir. Tepkimeye giren bileşenin molar kütle akısı ( $N_i$ ) göç terimi ihmal edilerek şöyle yazılır:

$$N_i = -D_i \nabla C_i + UC_i \quad (4-1)$$

Endüstriyel boyutta, çalışılan çözeltiler çoğunlukla düşük çözelti direnci sağlamak üzere, destek elektrolit içerdiği için göç teriminin ihmal edilmesi doğru olmaktadır. Bu eşitlik I. Fick yasasının bir şeklidir ve konveksiyon (ulaşım) terimi ( $UC_i$ ) eklenmiştir. Yani toplam akış, difüzyonel ve ulaşım ile kütle aktarımının toplamına eşittir. Kimyasal tepkimelerin elektrot yüzeyi ile sınırlı olduğu kabulü ile, bu eşitlik bir elementin kütle denkliği şeklinde ifade edilir.

$$\frac{dC_i}{dt} = -\nabla \cdot N_i \quad (4-2)$$

(4-1) eşitliği (4-2)'de yerine konulursa;

$$\frac{dC_i}{dt} = -D_i \cdot \nabla^2 \cdot C_i - U \nabla C_i \quad (4-3)$$

şeklini alır.

Bu ifade ise II. Fick yasasının genişletilmiş şeklidir. Newton yasasına uyan akışlar için (birçok elektrolitik çözelti gibi) hız  $V$ , Navier-Stokes eşitliği ile verilir ve sıkıştırılmayan bir akışkan için vektörel gösterim ile

$$\frac{dV}{dt} + U (\nabla U) = -\frac{1}{g} \nabla P + \nu \nabla^2 U + \rho \quad (4-4)$$

şeklinde ifade edilir.

Buna göre birim hacimde, kütle ve ivmenin çarpımı, tüm kuvvetlerin ( basınç gradyanı gibi hidrolik kuvvetler + iç sürtünme kuvvetleri,  $U$  + yoğunluk,  $\rho$  gibi dış kuvvetler) toplamına eşittir. Sıkıştırılmayan akışkanlar için kütle korunumu ile

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (4-5)$$

eşitliği de yazılabilir. Bu diferansiyel eşitlikler, konvektif kütle aktarımının tüm faktörlerini belirler [19].

Geometrik olarak karmaşık sistemlerde ve özellikle türbülent akışın bazı durumlarında, bu eşitlikler analitik olarak çözülemez. Bu durumlarda, kütle aktarım katsayısı veya difüzyon tabakası kalınlığına ilişkin bağıntılar, genel boyutsuz eşitliklerle açıklanır. Bu eşitlikler benzerlik teorisinden alınabilir, sabitler ve üsleri ise deneysel olarak hesaplanır.

Boyutsuz eşitlikler ve genel denklemleri:

$$S_h = \frac{k \cdot l}{d} = \text{Sherwood sayısı} = \frac{\text{etkin molekül aktarımı}}{\text{moleküler difüzyon}} \quad (4-6)$$

$$R_e = \frac{U \cdot L}{\nu} = \text{Reynold sayısı} = \frac{\text{Yığın akışla momentum aktarımı}}{\text{Moleküler momentum aktarımı}} \quad (4-7)$$

$$S_c = \frac{\nu}{D} = \text{Schmidt sayısı} = \frac{\text{Momentum aktarımı}}{\text{Moleküler difüzyon ile kütle aktarımı}} \quad (4-8)$$

$Sh = a Sc^b Re^c$  bağıntısı, bir elektrokimyasal reaktörde kütle aktarım ilişkilerini gösterir (a, b, c deneysel olarak hesaplanır).

Kimyasal reaktörlerin hidrodinamiği, elektrokimyasal reaktörlere, bazı durumlarda doğrudan uygulanabilir, fakat çoğu durumda elektrik alanının kütle aktarımına etkisi ihmal edilemez. Laminer ve türbülent akışlarda girişe yakın ve uzak yerleştirilmiş değişik tip ve boyuttaki elektrotların dinamiği Pickett [28] tarafından incelenmiştir.

Elektrokimyasal reaktörlerin tasarımı termodinamik, elektrot kinetiği ve taşınım özellikleri temeline dayanır. Bu üç temel açıdan elektrokimyasal reaktörlerin işleyişi oldukça karmaşıktır, ancak, bu ilkeler reaktörlerin davranışını en iyi şekilde açıklamaya yardımcı olurlar.

Termodinamik, elektrokimyasal reaktörlerde ısı etkilerinin ve tepkime denklıklarının temelini oluşturur. Aynı zamanda, elektrolitlerdeki taşınım özellikleri için itici gücün tanımlanmasında ve elektrolit çözeltilerinin özelliklerinin belirlenmesinde de temeldir.

Elektrot kinetiği, denge durumunda elektrot tepkime hızı ile ilgilenir. Bu, itici güç olarak ele alınan yüzey aşırı geriliminin bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Bir elektrot tepkimesinin hızı, aynı zamanda, elektrot/elektrolit ara yüzeyinin yapısı ve bileşiminden de etkilenir [29].

Laboratuvar koşullarında, elektrokimyasal deneyler için kullanılacak reaktörlerin tasarımında, aşağıdaki etkenlerin gözönünde tutulması gerekmektedir [19].

1. Çalışma elektrodunun gerilimi doğru ölçülebilmelidir.
2. Çalışma elektrodunun bütün yüzeyi boyunca akım yoğunluğu ve dolayısıyla gerilim düzgün dağılmış olmalıdır
3. Çalışma elektrodu ve yardımcı elektrot hücre direncini azaltmak için mümkün olduğunca birbirine yakın olmalıdır.

Endüstride ise elektrokimyasal süreçler için daha büyük reaktör ve değişik tasarım kavramları gerekliliği ortaya çıkar. İdeal bir endüstriyel reaktör için tasarım koşulları çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir.

1. Elektrot yüzey alanının reaktör hacmine oranı büyük olmalıdır. Eğer elektrot yüzey alanının, reaktörün hacmine oranı büyükse, daha küçük boyutlu reaktörlerin kullanımı ile daha iyi hacim-zaman verimi elde edilebilir. Ayrıca akım yoğunluğu ile elektrokimyasal reaktörün birim hacmi elektrotun toplam yüzey alanı ile doğru orantılı olacağından elektrot yüzey alanının reaktör hacmine oranının yükseltilmesinin, endüstriyel elektrosentezler için daha uygun olacağı belirtilmiştir.



2. Elektrot gerilimi her yerde aynı olmalıdır. Reaktördeki akım verimi elektrot gerilimine bağlıdır. Elektrot gerilimi tepkime seçimliliğini de belirler. Bu nedenle hem kimyasal hem enerji verimi hem de hacim-zaman verimi elektrot geriliminden etkilenmektedir.

3. Isı ve kütle aktarımı iyi olmalıdır. Kütle aktarım hızı kimyasal verim ve hacim-zaman veriminde etkindir. Uzaklaştırılması gereken ısı ise akım verimini etkileyeceğinden uygun ısı ve kütle aktarımının sağlanması reaktör tasarımında çok önemli yer tutar.

4. Sürekli sürece uygun olmalıdır. Süreç sürekli ise, ürünler başka bir tepkime vermeden ortamdan alınabilir. Değişim zamanla değişmediğinden yatışkın hale ulaşılır ve sürekli kalite kontrol olanağı doğar.

5. Yapı basit olmalıdır; Elektrotlar kolay çıkarılıp takılabilmelidir. Bakım onarım işleri kolaylaşacağı gibi basit yapı her zaman maliyetin düşük olmasını sağlar.

6. Gaz halindeki maddelerle veya ürünlerle çalışabilmelidir.

7. Yüksek basınç ve sıcaklık koşullarında çalışmaya uygun olmalıdır.

8. İlk yatırım maliyeti düşük olmalıdır.

9. Hücre gerilimi düşük, yani hücre direnci küçük olmalıdır.

10. Tüm parçaların ömrü uzun olmalı ve kolay sağlanabilmelidir.

11. Değişik fazlar arasında iyi bir temas sağlanabilmelidir.

12. Diğer süreçlerle birleştirilmelidir [19].

#### **4.2. Elektrodsorpsiyon**

Elektrokimyasal atıksu arıtımının; bir reaktörün anot/katod uçlarına uygulanan gerilim vasıtası ile sudan bazı safsızlıkların uzaklaştırılması şeklinde uygulandığı bilinmektedir. Bu süreçlerde işleyen temel mekanizma yükseltgeme ve indirgeme tepkimeleridir. Elektrodsorpsiyonda da mekanizma anotta oluşan yükseltgeme ve katotta gerçekleşen indirgeme tepkimeleri şeklinde, elektrotlarda yürütülür.

Elektrodsorpsiyon (Elektrosorpsiyon) ile elektriksel alan altında, maddelerin yüklü kolloidler halinde geniş yüzey alanına sahip elektrotlar üzerine zorlanmış tutunmaları söz konusudur.

Elektroadsorpsiyonda, elektrot olarak, adsorban özelliği bulunan bir çok madde kullanılabilir; bunlar arasında grafit ve karbon, nikel veya bakır gibi iletken maddelerin kumaş, keçe veya köpük gibi şekilleri yaygındır [30]. Ancak, daha çok uygulama olanağı bulan karbon yapısındaki adsorbanlardır.

Yapılan araştırma ve çalışmalar, bu yöntemle atıksulardan birçok safsızlığın etkin bir şekilde giderilebileceğini göstermektedir. Bu uygulamalarda; organik maddelerin, ağır metallerin, boyar maddelerin, alumina ( $Al_2O_3$ ) gibi askıda kolloidal taneciklerin ve kolloidal tanecikler gibi davranan mikroorganizmaların sudan uzaklaştırılabileceği gösterilmiştir.

Elektrokimyasal atıksu arıtım çalışmalarında uygun elektrot seçimi, sonucu doğrudan etkileyeceği için, elektrot seçimine özellikle dikkat edilmelidir. Bu nedenle seçilecek elektrodun;

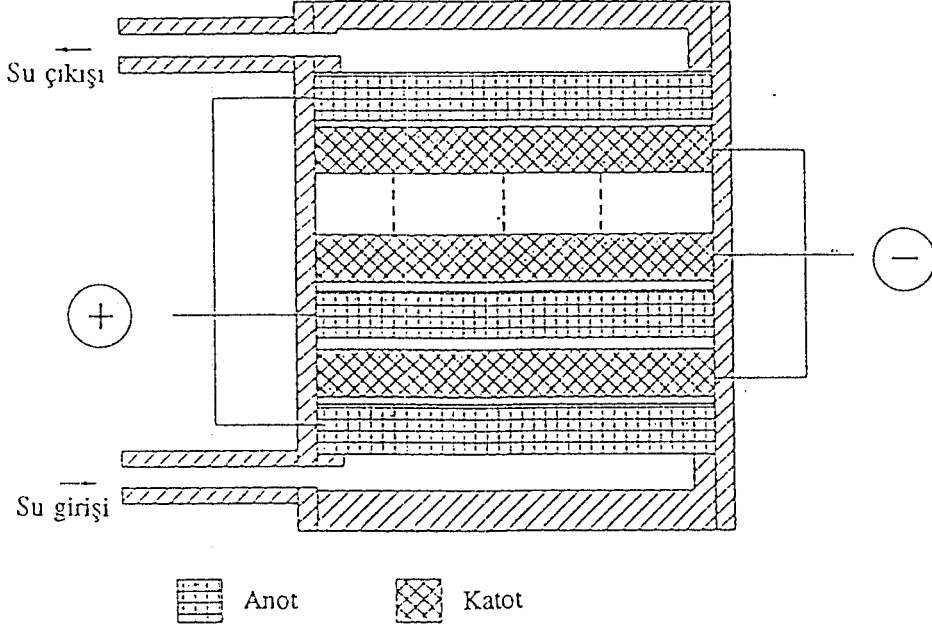
- a) Geniş yelpazede kimyasal maddelere karşı büyük gerilim aralıklarında kimyasal ve elektrokimyasal olarak inert olması,
- b) Büyük özgül yüzey alanına sahip olması; (Bu gereksinimi sağlayabilmek için elektrot gözenekli olmalıdır.),
- c) Gözenek sisteminde yüksek akış geçirgenliği sağlanabilmesi,
- d) Düşünülen hücre tasarımına göre kolayca şekillendirilebilmesi,
- e) Yüksek elektronik iletkenliği olması,
- f) Ucuz olması

gibi özelliklere sahip olması istenir [31].

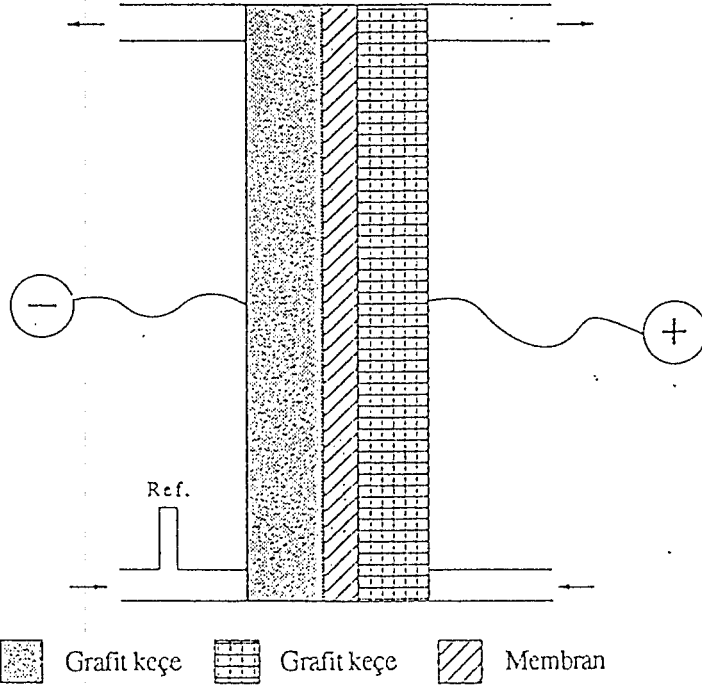
En iyi adsorpsiyon hızına ve kapasitesine ulaşmak için elektrot çiftine olası en yüksek gerilimin uygulanması zorunludur [32].

Elektrokimyasal arıtımla maddelerin büyük saflık derecesinde kazanımı ve suların ileri derecede arıtımı sağlanabilmektedir. Bu işlemler esnasında, bir çok süreç için ek kimyasal madde gerekmemekte ve kullanılan elektrotların yenilenmesi mümkün olmaktadır. Ancak, bazı durumlarda ortama destek elektrolit olarak NaCl eklenmesi söz konusu olmaktadır. NaCl, anotta yükseltgenerek hipoklorit oluşturmakta, bu da ağartıcı olarak renk gideriminde, dezenfektan olarak mikroorganizma gideriminde arıtım verimini önemli ölçüde etkilemektedir. Yine hipokloritin, elektroadsorpsiyonla siyanür giderme süreçlerinde, siyanürün siyanata dönüşme basamağında önemli rol oynadığı gösterilmiştir [33].

Elektroadsorpsiyonda, genel olarak, flow-through ve flow-by tipinde çalışan iki tür hücre kullanılmakta olup, bu hücre tipleri Şekil 4.2 ve 4.3'te görülmektedir[34].



Şekil 4.2. Elektroadsorpsiyonda kullanılan bir flow-through hücre [34]



Şekil 4.3. Elektroadsorpsiyonda kullanılan bir flow-by hücre [34]

#### 4.2.1. Elektroadsorpsiyonla boyar madde giderimi

Zhou Ding ve arkadaşları, iki kutuplu partikül elektrot kullanarak atıksulardan renk giderimi ve ilkeleri üzerine araştırma yapmışlardır. [35]

Yüksek derişimlerde çeşitli boyar maddeler (direkt, reaktif, katyonik ve asit boyları vb.) ile hazırlanan atıksuların arıtıldığı yöntem; yüksek verimliliği, düşük enerji gereksinimi ve uzun kullanım ömrü ile karakterize edilmiştir [36]. Bu amaçla gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalarda %99'un üzerinde renk gideriminin yanısıra %80'in üzerinde KOİ ve BOİ<sub>5</sub> giderimi sağlanmıştır. Performans süresinin, aktif karbon adsorpsiyonundan çok daha fazla olduğunu ve enerji gereksiniminin alışlagelmiş elektrolitik süreçlere göre daha düşük olduğunu bulmuşlardır. [35]

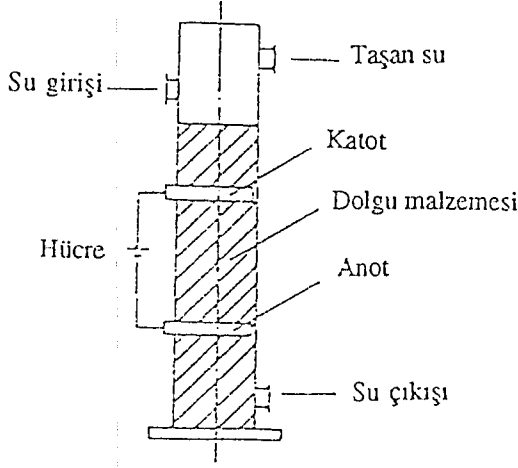
Çalışmada, 0,82 g/cm<sup>3</sup> yoğunluğu ve 850 m<sup>2</sup>/g özgül yüzey alanına sahip aktif karbonun, mika ve silika ile sırasıyla 8:1:2 oranında karışımı kullanılmıştır. 12 V gerilimin uygulandığı deneylerde, her biri için %99'un üzerinde giderim verimi elde edilen 100 mg/L'lik Reaktif brilliant orange X-GR, Direkt fast light yellow SGL ve asit kırmızı GRS boya çözeltileri kullanılmıştır.

Uzunluğu 200 mm, çapı 46 mm olan, 120 mm derinlikte 63 g dolgu içeren ve başlıca bileşeni aktif karbon olan bir reaktörde 12 V'da 100-400 mg/L'lik çeşitli boya çözeltileri arıtılmıştır. Toplam 562 döngünün gerçekleştirildiği deneylerde, çıkış çözeltilisinin renkli olduğu fark edildiğinde işlem durdurularak reaktör temiz su ile geri yıkanmıştır. Bu deneyler sonucunda bu tip reaktörlerin performans ömrünün oldukça uzun olduğu görülmüştür.

Yaklaşık 250 saat süren ve yüksek derişimlerde (100-400 mg/L) 14 L'lik çeşitli boya çözeltilerinin arıtıldığı 562 döngüden sonra, renk giderim hızı hala %97'nin üzerinde olduğu görülmüş ve renk giderim hızı düştüğünde reaktör su ile geri yıkanarak tekrar mükemmel renk giderme kapasitesine ulaşmıştır.

Uzunluğu 500 mm, çapı 60 mm olan ve 240 mm derinlikte 120 g dolgu içeren diğer bir reaktörde uygulanan elektrik alan ile elde edilen verimin, yalnız aktif karbonun kullanıldığı adsorpsiyon verimi ile kıyaslanması amaçlanmış ve iki kutuplu partikül elektrotlu reaktörün yalnız aktif karbon adsorpsiyonuna nazaran çok daha etkin olduğu kanıtlanmıştır.

Deneylerde kullanılan yalnızca boyutları farklı olan reaktör Şekil 4.4’ de görülmektedir.



Şekil 4.4. Deneylerde kullanılan reaktör [35], [36]

#### 4.2.2. Elektroadsorpsiyonla mikroorganizma giderimi

Bakterilerin katılar üzerinde adsorpsiyonu iyi bilinen bir olaydır. Bu çalışmalar, sıvı ortamlardan bakterilerin, yan etkileri olmaksızın uzaklaştırılması sürecine doğan gereksinme nedeniyle gerçekleştirilmiştir [32]. Örneğin, klor ve klor bileşikleri ile su kaynaklarının arıtımı yıllardır bakterilerin öldürülmesi için kullanılan güvenli bir yöntem olarak düşünülürdü. Ancak, bu yöntem son yıllarda, klorlama sürecinde klorlu organik bileşiklerin oluşması nedeniyle insanlar için olası bir tehlike haline gelmiştir [32].

Bakterilerin yığın halindeki katı yüzeylerinde adsorpsiyon özelliği gösterdiği bilinmektedir. Bu eğilim bakteri hücre duvarında var olan yüklü gruplar ve adsorbandaki karşıt yüklü gruplar arasındaki elektrostatik çekim kuvvetlerinden etkilenir. Adsorpsiyon sürecinde aynı zamanda Van der Waals çekim kuvvetleri ve hidrojen bağları da önemli rol oynar. Proteinlerin hücre duvarının bir parçası olması nedeniyle, aynı zamanda çözeltinin pH'nın da adsorpsiyon derecesine etki edeceği beklenir.

İyon değiştirici reçineler, bakterilerin adsorpsiyonunda güçlü adsorban olarak kullanılmalılarının yanı sıra dezenfeksiyon maddesi olarak da hizmet etmektedirler. Bunlara benzer olarak, karbon ve grafit de bakteriler için olası adsorpsiyon yatakları olarak düşünülmüşlerdir. Bakterilerin aktif kömür kumaş üzerine adsorpsiyonu da başka

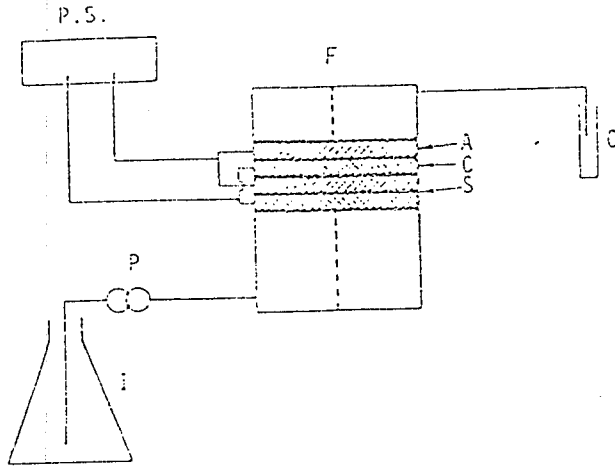
araştırmacılar tarafından çalışılmıştır [32]. Bu yöntemle bakteri derişimlerinde 5 kat azalma olduğu görülmüştür. Gram (+) koklar yıkama ile çözeltiye geçerken, Gram (-) basillere de rastlanmıştır. Bu araştırmacılar, kömür kumaşın yaralardaki bakteri sayısını azalttığını ve bylece iyileşmeyi hızlandırdığını ileri sürmüşlerdir.

Aktif karbon granül ve tozlarının, su temizleme cihazlarında, mikroorganizmalar için etkin bir adsorban olduğu bilinmektedir.

Yoram Oren ve arkadaşları [32] tarafından gerçekleştirilen çalışmada bakterilerin karbon keçe gibi lifli karbonlarzerine elektroadsorpsiyonu ilk kez gösterilmiştir. Pozitif yüklü karbon keçe elektrottan geçen *E. Coli* süspansiyonundaki bakteri yoğunluğunun 3-4 kat azaltılabildiği ve elektrot yükünün değiştirilmesi ile bakterilerin süspansiyona tekrar geri dndğu görülmüştür. Çalışmada çok yüksek yoğunluklarda *E. Coli* içeren ( $10^7$ - $10^8$  hücre/cm<sup>3</sup>) giriş suyu kullanılmıştır. Bylece elektrokimyasal hücredeki derişim değişiklikleri LSD (Light Scattering Detector) ile izlenebilmiştir. Ölçümler aynı zamanda, agar kullanılarak hücre sayısının tahmini yöntemleri ile de izlenmiştir.

Daniel Golub ve arkadaşları [32] tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise *E. Coli* ve *S. Typhimurium* hücrelerinin lifli karbon elektrotlarda elektroadsorpsiyonu araştırılmıştır. Anot-katot çifti çok basamaklı bir seri elektrofiltre şeklinde yerleştirilmiştir. Her iki bakteri türü elektrikle yüklü elektrot yatağa güçlü bir şekilde bağlanmış ve bakteri hücrelerinin tamamının uzaklaştırılması sağlanmıştır.

Çok basamaklı elektrokimyasal filtrede akış sistemi ve elektrik bağlantıları şekil 4.5'te görülmektedir. Flow-through modunda çalışan elektrofiltrede, elektrotlar, güç kaynağına biri anot biri katot olacak şekilde bağlanmıştır. Bylece, hücreden geçen çözeltinin aynı gerilim altında, bir seri şeklinde sıralanmış anot/katot çiftlerinden geçmesi sağlanmıştır.

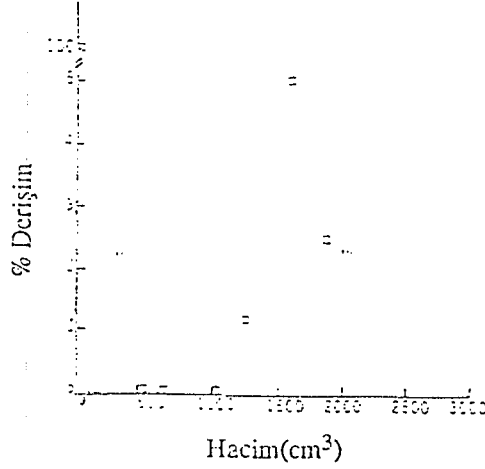


Şekil-4.5. Çok basamaklı elektrokimyasal filtrede akış sistemi ve elektrik bağlantıları (F; filtre ortamı, A; anot, C; katot, S; ayırıcı, P; pompa, P.S.; güç kaynağı, I; giriş, O; çıkış) [32].

Bütün deneylerde 8000-10000 bakteri/cm<sup>3</sup> derişiminde *E. Coli* ve *S. Typhimurium* ilave edilen tamponlanmamış steril tuz çözeltileri kullanılmıştır. Her iki bakteri tipi için iki ayrı deney düzeneği kurulmuştur. Birinci düzende; bakteri süspansiyonu yüksüz filtre üzerinden geçirilmiş, anot/katot gerilim farkı kısa devre ile sıfıra ayarlanmıştır. Bu durumda *E. Coli* ve *S. Typhimurium* derişimlerinde sırasıyla %95 ve %85 gibi önemli derecede azalma gerçekleşmiştir. İkinci düzende; anot/katot çifti arasına 1,5 V'luk gerilim uygulanması, süspansiyondan her iki bakteri tipinin hızlı ve tümüyle uzaklaştırılması ile sonuçlanmıştır.

1,5 V gerilimin seçilmesinin nedeni, suyun elektrolizi ve klor iyonlarının yükseltgenmesinin bu değer ile sınırlı olmasıdır. Bu tepkimelerin başlaması yüksek enerji tüketimine neden olur. Ortamda klor bulunması, süspansiyonun dezenfeksiyonunu sağlamaktadır.

Yine aynı çalışmada, elektrotlara 1,5 V gerilim uygulanarak filtreden belirli hacimde *E. Coli* süspansiyonu geçirilmiş ve güç kaynağı bağlantısı kesilerek açık-devrede süspansiyon akışına devam edilmiştir. Bu durumda, sistemden gerilim geçerken sıfıra düşen *E. Coli* derişiminin açık devre koşullarında tekrar artış gösterdiği farkedilmiştir (Bakınız Şekil 4.6).



Şekil 4.6. 1,5 V gerilim altında (40cm<sup>3</sup>/dk) hücreden geçen *E. Coli* % derişimi (1000 cm<sup>3</sup>'ten sonra gerilim kaynağı kapatılmıştır) [32].

Sonuç olarak farklı tiplerdeki sulardan, gözenekli karbon elektrolarda, elektroadsorpsiyonla bakteri uzaklaştırılması; tam uzaklaştırmanın mümkün olması, kimyasal madde gereksinimi olmaması, ölmüş bakteri hücrelerinin arıtılmış suya geçmemesi ve adsorbanın kısmi rejenerasyonu nedenleriyle bir çok sürece göre avantajlı bulunmuştur.

#### 4.2.3. Elektroadsorpsiyonla ağır metal giderimi

##### 4.2.3.1. Krom giderimi

Kromun, özellikle Cr(VI) şeklinde oldukça toksik olduğu bilinmektedir. Bu nedenle alıcı ortama deşarj edilecek atıksulardaki kromun derişimi 2 mg/L ile sınırlandırılmıştır (S.K.K.Y. Tablo 19). Kromlu bileşenlerin atıksulardaki derişimini azaltmak için bir çok yöntemden, en yaygın olarak kullanılan SO<sub>2</sub>, NaHSO<sub>3</sub> veya demir sülfat gibi indirgen kimyasal maddelerle kromat iyonunun Cr<sup>3+</sup> iyonuna indirgenmesi ve çöktürme tanklarında, pH ayarlaması ile hidroksitler şeklinde çöktürülmesidir. Bir çalışmada kromun ağ şeklinde camsı karbon elektrotlar üzerinde elektrokimyasal birikimi (electrodeposition) çalışılmıştır [37]. Potansiyostatik olarak kontrol edilen laboratuvar ölçekli bir kolondan 10 kez geçirildikten sonra uzaklaştırılan metal miktarı %51 olup; bu, büyük ölçekli bir birimde sürecin kullanımını kısıtlayan düşük bir verimdir. Bununla birlikte kromun-kompleks elektrokimyasal etkinliği nedeniyle bu sonuç hiç de sürpriz



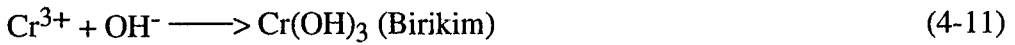
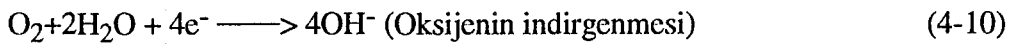
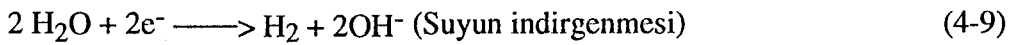
değildir. Krom, çözeltilerden elektrokimyasal olarak, hem metal hem de çözünmeyen iyonik bileşen ( $\text{Cr}(\text{OH})_3$  gibi) şeklinde biriktirilebilir. Her iki şekilde de etkin bir giderim için çözelti bileşimi ve elektrokimyasal koşullar dikkatlice ayarlanmalıdır.

Sonuç olarak Cr (VI)'nın indirgenmesini takiben uygun pH'larda krom hidroksit şeklinde birikim söz konusudur ve yapılan çalışmalarda bu iki basamağın bir elektrokimyasal kolonda gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir [37]. Ayrıca, gerilim ve çözeltinin pH'ı dikkatlice kontrol edildiğinde Cr(VI)'nın tamamının uzaklaştırılması sağlanabilecektir

Grafit, karbon, nikel veya bakır gibi maddelerin kumaş, keçe, köpük gibi şekillerde işlenmesi ile elde edilen poröz elektrotların en önemli ortak yanı elektrokimyasal olarak yüksek yüzey alan sağlanabilmesi ve çözelti için yüksek geçirimsizliğe sahip olmasıdır. Bu da, boyut ve verimlilik açısından reaktör optimizasyonunda dikkate değer yararlar sağlayacaktır[30].

Cr (VI) ile kirlenmiş çözeltilerin elektrokimyasal olarak temizlenmesi, diğer toksik metal kirliliklerine göre çok daha karmaşık ve pH'a son derece hassas bir süreç olup, birikim için önce  $\text{Cr}^{3+}$ 'e indirgenme söz konusudur [30].

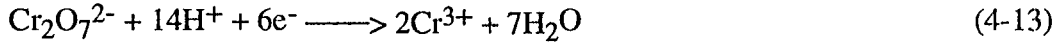
Krom (III)'ün, elektrokimyasal kolonda; sürekli biriktirilmesi; suyun elektrolizi ile hidroksil iyonların katodik olarak üretimi ve suda çözünebilir türleri şeklinde bulunması durumunda oksijenin indirgenmesi şeklinde gerçekleşir; Burada gerçekleşen tepkimeler, katotta;



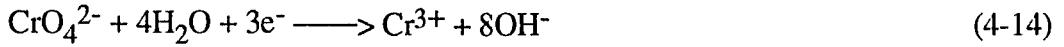
anotta;



Bir kolonda Cr(VI)'nin uzaklaştırılması PH'a bağlı bir süreçtir. Bu ilişki sadece Cr<sup>3+</sup>'nin çökmesi için gerekli olan pH değeri için değil; aynı zamanda Cr(VI)'nin elektrolitik indirgenme mekanizmasının gerçekleşmesi açısından da geçerlidir.



ve



tepkimelerinde görülen, pH düştükçe Cr(VI)'nin Cr<sup>3+</sup>'e indirgenmesinin kolaylaşmasıdır.

#### 4.2.3.2. Kadmiyum giderimi

Yüksek zehirliliğe sahip bir element olarak değerlendirilen kadmiyumun alıcı ortama deşarj edilecek atıksulardaki derişim değeri 0,1 mg/L'dir (S.K.K.Y. Tablo 19). Son yıllarda kadmiyum, Ni/Cd pil üretimi gibi endüstrilerden doğal su kaynaklarına girmesi nedeniyle büyük bir çevre sorunu haline gelmiştir [34].

Sıvı çözeltilerden bu iyonu uzaklaştırmanın başlıca yolu, metalin katodik yolla indirgenmesidir. Daha sonra Cd aşağıdaki tepkime uyarınca elektrotta birikir.



Yeterince büyük katodik gerilimlerde, çözelti/elektrot ara yüzeyinde su ve oksijen indirgenmesinden dolayı bazik pH değerleri (pH>9,5) oluşur (Denklem 4-9 ve 4-10).

Bu koşullarda Cd(OH)<sub>2</sub> oluşur ve yüklü kolloidal partikül olarak elektrotta adsorpsiyonla çözeltilerden uzaklaştırılır [34].

#### 4.2.3.3. Nikel giderimi

Nikel, başlıca, pH >7,5 olduğunda Ni(OH)<sub>2</sub> şeklinde çöktürülerek uzaklaştırılır. Bu durumda (4-9) ve (4-10) tepkimelerinde görülen su elektrolizi ve oksijen indirgenmesi gerçekleşir.

#### 4.2.4. Siyanür giderimi

Atık sulardaki siyanürün elektrokimyasal olarak arıtımı yaklaşık 30 yıldan beri çalışılmaktadır. Ayrışma mekanizması da göz önüne alınarak bu konu ile ilgili iki yaklaşım öne sürülmüştür [34].

Birincisine göre; siyanür giderimi direkt anodik yükseltgeme ile gerçekleştirilebilmektedir. Bu durumda siyanür amonyum ve karbonata kadar ayrılmakta ve aşağıdaki anodik tepkimeler gerçekleşmektedir;



Bazı amonyum iyonları siyanat ile tepkimeye girerek üreye dönüşürken, siyanat iyonu hidrolize uğrayarak amonyum ve karbonat iyonuna dönüşür;



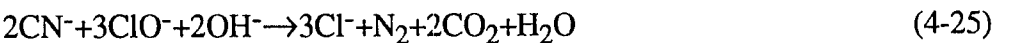
İkinci yaklaşıma göre; bazik bir klor çözeltisi aktif hipoklorit vermek üzere anodik yükseltgemedeki kullanılır;



Bu çözelti atık suya ilave edildiğinde, hipoklorit siyanürü siyanata ;



ya da azot ve karbondioksite yükseltgeyecektir.



#### 4.2.5. Elektroadsorpsiyonla organik madde giderimi

Gerilime bağılı adsorpsiyon; elektrolitik çözeltilerden adsorplanabilir bileşiklerin ayrılması anlamında kullanılan yeni bir terimdir ve özellikle, süreç akımlarında seyreltik derişimlerde bulunan organik bileşiklerin adsorpsiyonuna uygulanabilir görünmektedir. Bu tür uygulamalar için elektrosorpsiyon doğal olarak düşük enerji gerektiren bir süreçtir. Böyle sistemlerde, adsorbana belirli bir gerilim uygulanırken, adsorblanan, çözeltiden uzaklaştırılır ve ikinci bir gerilimde başka bir çözeltiye desorbe edilir [38].

#### 4.3. Elektroadsorpsiyon ile Yapılan Deneysel Çalışmalar

Polar olmayan bir bileşğin (Benzen) GAC üzerine kimyasal ve elektrokimyasal adsorpsiyonunun araştırıldığı bir çalışmada; sabit dipol momenti olmayan moleküllerin GAC üzerine elektrosorpsiyonunun mümkün olduğu görülmüştür. Maksimum elektrosorpsiyon etkisi , adsorpsiyon olarak % 34 ve desorpsiyon olarak ise % 46 bulunmuştur. Deneysel sonuçları açıklamak üzere teorik bir model geliştirilmiştir [39].

Bir organik bileşik olan  $\beta$ -naftolün çözeltilerden ayrılmasında gerilime bağılı adsorpsiyonun kullanılması deneysel olarak gösterilmiştir.  $\beta$ -naftolün seyreltik derişimlerde sıvı elektrolitik çözeltilerden adsorpsiyonunda; flow-through tipinde çalışan elektrokimyasal reaktörde poröz olmayan camsı karbon elektrotlar kullanılmıştır.  $\beta$ -naftolün camsı karbon üzerine adsorpsiyon izotermeleri 1V'luk gerilim aralığında gösterilmiştir [38].

Daniel Golub ve arkadaşları [37] yaptıkları çalışmada, grafit keçe elektrot kullanarak, elektroadsorpsiyonla atık sulardan Cr(VI) uzaklaştırılmasını araştırmışlardır. Sürecin, Cr(VI)'nın elektrokimyasal olarak Cr<sup>3+</sup>'a indirgenmesi ve elektrokimyasal olarak oluşan yüksek pH'lı ortamda çözünmez krom hidroksite dönüştürülmesi şeklinde iki basamakta yürütülebileceği ileri sürülmüştür. Oluşan hidroksitin, elektrot yüzeyine, yüklü kolloidal partikül olarak bağlandığı görülmüştür [37].

Bir başka çalışmada, Cr(VI) ile kirlenmiş suların grafit keçeden oluşturulmuş elektrokimyasal kolonda sürekli uzaklaştırılması araştırılmıştır. Süreç, temel olarak, Cr(VI)'nın hızlı bir şekilde Cr<sup>3+</sup>'a indirgenmesine ve hidroksitleri şeklinde elektrot yatağında çökmesini sağlayacak pH değerlerinin oluşumuna dayanmaktadır. Bütün süreçler, indirgeme hızının pH'a hassasiyeti ve çökeltme için yüksek pH gereksinimleri

nedeniyle önemli bir şekilde pH'a bağımlıdır. Çalışmada, <25 ppb düzeylerinde çıkış derişimi elde etmek için gerekli koşullar, çökeleğin yatak boyunca dağılımı ve maksimum yükleme kapasitesi belirlenmiştir [30].

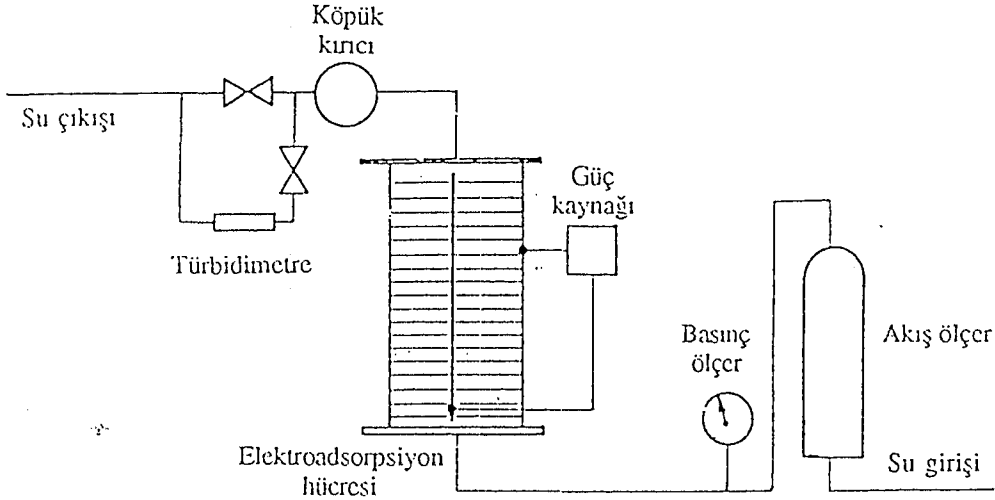
1-20 mg/L arasındaki derişimlerde kadmiyum, nikel ve siyanür içeren sıvı atıkların elektrokimyasal arıtımının araştırıldığı bir çalışmada, flow-by ve flow-through tipinde çalışan elektrokimyasal hücrelerde elektrot olarak grafit keçe kullanılmıştır. Kadmiyum/nikel ve kadmiyum/siyanürün eşanlı uzaklaştırılmasında derişimlerin ppb düzeylerine düşürüldüğü görülmüştür. Genel olarak, flow-by hücre veriminin flow-through hücre veriminden daha büyük olduğu, ancak bununla birlikte, akış hızı düşürüldüğünde iki hücre veriminin birbirine yaklaştığı bulunmuştur [34].

Sulu elektrolit çözeltilerden eser haldeki civa iyonlarının giderildiği ve geri kazanıldığı bir çalışmada, flow-by ve flow-through tipinde çalışan hücrenin performansı araştırılmıştır. Bu amaçla elektrot olarak grafit keçe kullanılmıştır. Bu çalışmada, 30 mg/L  $Hg^{2+}$  ( $HgCl_2$  olarak ) içeren 0,5 M NaCl çözeltisi katot bölmesinden 0,1-1,5 cm/s aralığındaki sabit hızlarda pompalanmıştır. Düşük akış hızlarında etkin elektrot boyunun 1,2 cm, yüksek akış hızlarında ise 2,5 cm olduğu gösterilmiştir [31].

Zamandan bağımsız çıkış derişimi, düşük akış hızlarında 0,01 ppb'nin altındadır. 0,83 ve 1,39 cm/s akış hızlarında sırasıyla %99,99 ve %99'luk arıtım derecelerine ulaşılmıştır [31].

Bir çalışmada; nükleer santrallerde döngüde bulunan ağır su içerisindeki askıda alümina ( $Al_2O_3$ ) partiküllerinin uzaklaştırılması çalışılmıştır. Bu süreç, temelde yüklü kolloidler ve zıt yük ile yüklenmiş poröz karbon elektrotların karşılıklı elektrostatik etkileşimlerine dayanır ve ileri derecede arıtım verimlerine ulaşmak söz konusudur [40].

Ağır suların açık devrede filtreden geçirildiklerinde bulanıklılıkta ~%90 azalma olduğu görülmüştür. Bununla birlikte filtreye elektrik akımı uygulandığında suyun bulanıklığının temiz suyun bulanıklık düzeylerine kadar düştüğü görülmüştür. Bu çalışmada; 1 kg elektrot malzemesi ile en az 5 m<sup>3</sup> atık suyun ileri arıtım düzeylerine kadar arıtılabileceği tahmin edilmektedir. Sonuç olarak; nükleer reaktörlerde soğutma sularındaki askıda kolloidal partiküllerin uzaklaştırılmasında poröz lifli karbon elektrotlarda elektroadsorpsiyon etkin bir süreç olarak görülmektedir. Bu deneylerde kullanılan su akış sistemi ve elektrik bağlantıları Şekil.4.7'de görülmektedir [40].



Şekil 4.7. Poröz karbon elektrotların kullandığı elektroadsorpsiyon sürecinde su akış sistemi ve elektrik bağlantılarının şematik gösterimi [40]

Karbon ve lifli grafit elektrotlarda alümina ( $Al_2O_3$ ) taneciklerinin gerilime bağlı adsorpsiyonun çalışıldığı bir başka çalışmada, gerilimin; grafit, karbon ve asitle rejenere edilmiş karbon elektrotların adsorpsiyon kapasiteleri üzerinde belirgin farklılıklar oluşturduğu bulunmuştur. Grafit elektrotların adsorpsiyon hızı karbon elektrotlardan daha yüksek bulunmuş ve bu olay elektrotlardaki yüzey gruplarının pH değişimlerine cevabı ile ilişkilendirilmiştir. Şekil 4.8’de karbon keçe üzerinde adsorplanan büyük alümina kümelerinin (cluster) SEM’de büyütülmüş hali görülmektedir [41].



Şekil 4.8. Karbon keçede adsorplanan alümina kümeleri (SEM; \*10.000) [41].

## 5. ADSORPSİYON

### 5.1 Giriş

Adsorpsiyon, sıvı veya gazların içinde bulunan tanecik şeklindeki moleküllerin veya gazların katı yüzeylerine, seçici olarak toplanması ve biriktirilmesidir. Katı adsorbanlar, genellikle, 5mm'lik çapa kadar sabit yataklarda ve 0,05 mm'lik çaplara kadar ise akışkan yataklarda kullanılabilen gözenekli granüler parçacıklardır. İç gözenekler (0,01 µm ve daha küçük çaplarda), toplam  $10^2$ - $10^4$  m<sup>2</sup>/g iç yüzey alanı oluşturacak şekilde, tüm taneciğin % 50 hacmine sahiptir [42].

Çözeltilerde adsorpsiyon, ilk olarak Lowitz tarafından 1785'te incelenmiş ve kısa süre sonra, rafinerizasyon işleminde şekerden renk giderimi için uygulanmıştır. 19.yy.'in ikinci yarısından sonra, Amerikada su arıtım tesislerinde aktifleştirilmemiş odun kömürü (charcoal) filtreler kullanılmıştır. I. Dünya savaşında, gaz maskelerinde kullanılmak üzere küçük miktarlarda granüler aktif karbon (GAC) üretilmiştir. 1920'lerde toz aktif karbon (PAC) klorofenollerle kirlenen su kaynaklarında tat ve koku kontrolü için kullanılmıştır[6].

Su kaynaklarının arıtımında kullanılan ilk GAC birimleri 1929'da Almanya Hamm'da ve 1930'da Michigan Bay City'de inşa edilmiştir.

PAC ilk kez evsel atıksu arıtımında; 1930 yılında New Jersey, New Milford da kullanılmış, sonraki bir kaç yıl içerisinde öncelikle tat ve koku kontrolünde kullanımı yaygınlaşmıştır.

1970'lerin ortalarında, insanların, endüstriyel atıklar, tarımsal kimyasal maddeler ve kanalizasyon deşarjlarıyla kirlenen su kaynakları ile ilgilenir hale gelmesiyle içme sularından organik maddelerin uzaklaştırılmasında kullanılan bir süreç olarak adsorpsiyona ilgi artmıştır.

Diğer büyük ilgi alanı suyun klorlanması sırasında oluşan trihalometanların (THMs) ve diğer bilinen ve şüpheli karsinogenlerin uzaklaştırılmasıdır.

Şu anda, su arıtımında adsorpsiyon özellikle koku ve tat giderimi için kullanılmaktadır. Bununla birlikte, sentetik organik kimyasal maddelerin, renkli organik maddelerin, dezenfeksiyon sonucu oluşan kimyasal maddelerin giderilmesinde kullanımı da düşünülmektedir [6].

Ağır metal gibi, sağlık riski taşıyan bazı inorganik bileşenler de adsorpsiyon ile giderilmektedir. Su fazla klorlandığında, adsorpsiyon ürünün deklorinasyonunda kullanılır.

Adsorpsiyon; bir katının fazlar arasındaki ara yüzeylerde biriktiği fiziksel ve/veya kimyasal bir süreçtir. Su arıtma amaçlı olarak çözüldüden adsorpsiyon, su içerisindeki safsızlıklar bir katı-sıvı arayüzeyinde biriktiğinde gerçekleştirilmiş olur [6].

Adsorban; üzerinde birikimin meydana geldiği katı fazdır.

Adsorplanan; sıvı fazdan ara yüzeye uzaklaştırılacak olan maddedir [43].

Çözüldüden katı yüzeye adsorplananı çeken kuvvetler olması nedeniyle; maddelerin adsorpsiyonu adsorbanlar üzerinde gerçekleşir. Bu termodinamik olarak “adsorplananın yüzeyde çözüldüye göre daha az serbest enerjiye sahip olması” şeklinde düşünülebilir [6].

Adsorpsiyonu etkileyen faktörler; adsorplayıcının tipi, kirleticinin derişimi ve tipi, basınç, sıcaklık ve bağıl nemdir [44].

Adsorpsiyonun en büyük avantajı yöntemin bir çok uygulama alanına sahip olması ve yeni alanlar için kullanımının her geçen gün artmasıdır. Adsorpsiyonun etkin olarak kullanıldığı süreçler,

Sıvı faz arıtımlarında;

- a) petrol fraksiyonlarından renk giderilmesi (solventler, lubrikantlar (yağlayıcılar), balmumu (waxes))
- b) Evsel su kaynaklarından koku, tat ve renk giderimi,
- c) Bitkisel ve hayvansal yağlardan renk giderimi
- d) İşlenmemiş şeker şurubundan renk giderimi,
- e) Meşrubat ve ilaç preparatlarının temizlenmesi,
- f) Fermentasyon karışımlarından vitamin ve diğer ürünlerin geri kazanımı,
- g) Su kirliliği kontrolü için, süreç akımlarının temizlenmesi,
- h) Süreç akımlarından tuz ve kül uzaklaştırılması,
- i) Parafinli hidrokarbonlardan aromatik bileşenlerin ayrılması,

ve gaz fazı uygulamalarında,

- j) Kuru temizleme, gazete baskısı, boya kurutma gibi buharlaşmanın söz konusu olduğu süreçlerde havaya karışan çözücülerin geri kazanımı,
- k) gazların dehidrasyonu,
- l) havalandırma sistemlerinde koku ve toksik gazların giderimi,
- m) Düşük sıcaklıklarda asal gazların (kripton, ksenon) ayrılması,
- n) Düşük sıcaklıklarda besleme havasındaki kirliliklerin giderimi,
- o) Hava gazından koku giderimi ve
- p) Düşük moleküler ağırlıklı hidrokarbon gazlarının faz ayrımı

şeklinde sıralanabilir [42].



Çizelge 5.1'de önemli adsorban maddelerinin fiziksel özellikleri, her maddenin kullanımının uygun olduğu alanla birlikte verilmiştir.

Çizelge 5.1 Başlıca adsorban tipleri ve kullanım alanları [42]

Bileşim	İç porozite (%)	Dış hacim fraksiyonu (%)	Kuru yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	Yüzey alanı (m <sup>2</sup> /g)	Kullanım alanları (*)
Asitle etkinleştirilmiş kil	30	40	560-880	100-300	a
Aktif alümina ve boksit	30-40	40-50	720-880	200-300	a, j, k
Alüminosilikat	45-55	35	660-705	600-700	a, k, o, p
Kemik külü	50-55	18-20	640	100	d, h
Karbonlar	55-75	35-40	160-480	600-1400	hemen hepsi
Fuller's earth (Kil)	50-55	40	480-640	130-250	a, c
Demir oksit (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	22	37	1440	20	o
Magnezyum oksit (MgO)	75	45	400	200	a
Silika jel	70	40	400	320	j, k, l, n

(\*) Kullanım alanları 5.1 başlığı altında a-p şıkları arasında verilmiştir.

Adsorpsiyon ile tutulabilen kimyasal maddeler kolay ve zor adsorplananlar şeklinde sınıflandırılabilir:

Kolay adsorplanan maddeler;

Aromatik çözücüler: benzen, toluen, nitrobenzenler,

Klorlu aromatikler: PCB'ler, klorobenzenler, kloronaftalin,

Fenol ve klorofenoller,

Çok halkalı aromatikler: Asenaften, benzopiren, vb.,

Pestisit ve Herbisitler: DDT, eldrin, klordan, BHC'ler, hepklor, vb.,

Aromatik olmayan klorlu maddeler: Karbon tetraklorür, kloroalkil eterler, heksaklorobutadien vb.,

Yüksek molekül ağırlıklı hidrokarbonlar: Boyalar, benzin, aminler, vb..

Zor adsorplanan maddeler;

Alkoller,

Düşük molekül ağırlıklı ketonlar, asitler ve aldehitler,

Şekerler ve nişastalar,

Çok yüksek molekül ağırlıklı veya kolloidal organik maddeler,

Düşük molekül ağırlıklı alifatik bileşikler.

Kolay adsorplanan metaller;

Antimon, arsenik, bizmut, krom, kalay, gümüş, civa, kobalt, zirkonyum.

Zor adsorplanan metalller;

Kurşun, nikel, titanyum, vanadyum, demir, bakır, kadmiyum, çinko, baryum, selenyum, molibden, manganez, tungsten, radyum.

Kolay adsorplanan inorganik bileşikler;

Klorlu, bromlu, iyotlu ve florürlü bileşikler.

Zor adsorplanan inorganik bileşikler;

nitrat, fosfat, klorür, bromür, iyodür [5], [6].

## 5.2. Adsorpsiyon Türleri

Gaz, sıvı veya herhangi bir çözültide çözülmüş katı maddelere ait molekül, atom veya iyonların katı bir maddenin yüzeyinde toplanması olarak tanımlanan adsorpsiyon işlemi fiziksel veya kimyasal olarak gerçekleşir .

Adsorban ile adsorplanan arasındaki bağ dipol-dipol etkileşmesi ve Van der Waals kuvvetleri sonucunda oluşuyorsa adsorpsiyon fiziksel adsorpsiyondur. Adsorban ile adsorplanan arasındaki elektron aktarımı ile gerçekleşen, yani kimyasal bağların oluştuğu adsorpsiyon ise kimyasal adsorpsiyondur [6], [15], [43].

Fiziksel adsorpsiyon, karışımlardaki bileşenlerin bir fazdan diğer faza aktarılmasında; adsorbanların yüzey alanını, gözenek büyüklüğünü, gözeneklerin dağılımını belirlemede ve heterojen katalizli tepkimelerde önem kazanır. Fiziksel adsorpsiyon ısısı küçük olup, çoğu gazlarda sıvılaştırma ısısı kadardır. Bu tür adsorpsiyonda, adsorplanmış tabaka birden fazla molekül kalınlığındadır. Fiziksel adsorpsiyon, genellikle, çok hızlı olduğundan gözlenen hız, adsorpsiyon süreci yerine moleküllerin yüzeye aktarım hızıyla kontrol edilir. Fiziksel adsorpsiyonda adsorplanan gaz miktarı sıcaklık arttıkça azalır. Kritik sıcaklığın üstündeki sıcaklıklarda fiziksel adsorpsiyon önemli değildir.

Kimyasal adsorpsiyonda ise etkinleşme enerjisi kimyasal tepkime ısısı kadardır. Adsorplanmış tabaka monomoleküler kalınlıktadır. Kimyasal adsorpsiyon hızı fiziksel adsorpsiyona göre daha düşüktür. Çünkü kimyasal adsorpsiyon süreçleri belirli bir etkinleşme enerjisi ile karakterize edilir ve bu yüzden ancak belirli bir minimum sıcaklık üstündeki sıcaklıklarda tepkime hızla gelişir. Kimyasal adsorpsiyon, maddenin kaynama noktasının, hatta kritik sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda da gerçekleşir.

Bir katı ile katalizlenen hemen hemen tüm tepkimelerde, yani heterojen katalizli tepkimelerde, girdilerden bir veya birkaçının kimyasal adsorpsiyonu bütün tepkime mekanizmasında bir ara basamak oluşturmaktadır.

### 5.3. Adsorpsiyon İzotermi

Sabit sıcaklıkta adsorplanan madde miktarı ile denge basıncı veya derişimi arasındaki bağıntıya “adsorpsiyon izotermi” denir. Bir başka ifade ile, adsorpsiyon izotermi, adsorban üzerinde adsorplanan maddenin dengedeki yüzey derişimini, çözültüden adsorplanan madde derişiminin fonksiyonu olarak açıklar [6]. Fiziksel ve kimyasal adsorpsiyonlarda, dengeyi belirlemek amacıyla çeşitli matematiksel modeller verilmiştir. Bu modeller Langmuir, Freundlich, Brauner-Emmett-Teller (BET) ve Temkin izotermi olarak bilinir. Bu izotermi gerçekte dengeye ulaşıldığı ve adsorpsiyonun tersinir olduğu varsayımı yapılarak türetilmiştir [15]

#### 5.3.1. Langmuir izotermi

Özellikle kimyasal adsorpsiyon için türetilen Langmuir izotermi kataliz uygulamalarında basitliği ve katalizli tepkimeler için kinetik ifadelerin türetilmesinde başlangıç noktası oluşturması açısından önemlidir.

Türetme yüzeyde adsorplanan gazın derişimi veya örtülmüş yüzey kesri, adsorplanan miktarın ölçüsü olarak kabul edilip yapılır. Türetmede şu varsayımlar yapılır:

- Katalizörlerin bütün yüzeyi, adsorpsiyon için eşit etkinliğe sahiptir.
- Adsorplanmış moleküller arasında etkileşme yoktur.
- Bütün adsorpsiyon aynı mekanizmayla gerçekleşir.
- Yüzeyin her noktası aynı özelliktedir.
- Adsorplanan gaz tabakasının katı üzerindeki kalınlığı en fazla monomoleküler bir tabaka olabilir.
- Adsorpsiyon ilk başladığında yüzeye çarpan her molekül yüzeyde tutulabilir; fakat adsorpsiyon ilerledikçe ancak yüzeyin örtülmemiş kısmına çarpan moleküller adsorplanabilir.

Adsorpsiyon tam bir monomoleküler tabaka ile sınırlandırıldığından, herhangi bir andaki yüzey iki kısımda düşünülebilir. Adsorplanan moleküllerle örtülmüş kesir  $\theta$  ise,

boş kesir (1-θ) olduğundan, sadece yüzeyin örtülmemiş kısımlarına çarpan moleküller adsorplanabileceğinden, birim toplam yüzey başına adsorpsiyon hızı (1-θ) ile orantılı olacaktır.

Langmuir adsorpsiyon izoterminin genel denklemi şu şekildedir:

$$q_{den} = x/m = \frac{Q_0 * b * C_{den}}{1 + b * C_{den}} \quad (5-1)$$

- $q_{den}$  = Denge de birim adsorban başına adsorplanan madde miktarı,  
 $x$  = adsorplanmış maddenin kütlesi veya hacmi,  
 $m$  = adsorbanın kütlesi  
 $C_{den}$  = Çözeltide adsorplanmadan kalan madde derişimi,  
 $Q_0$  ve  $b$  = Langmuir adsorpsiyon sabitleri [45].

### 5.3.2. Freundlich izotermi

Freundlich bağıntısı adsorplanan madde miktarının denge basıncı ile ilişkisini vermektedir. Freundlich izotermi genellikle sıvı çözeltilerden adsorpsiyon için kullanıldığı gibi, gazların adsorpsiyonu için de kullanılır.

Freundlich izotermi, adsorpsiyon ısısının yüzey örtüsü ile logaritmik olarak azaldığını kabul etmektedir. Freundlich izotermi aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir:

$$q_{den} = x/m = K_f * C_{den}^{1/n} \quad (5-2)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada:

- $q_{den}$  = Denge de birim adsorban başına adsorplanan madde miktarı,  
 $x$  = adsorplanmış maddenin kütlesi veya hacmi,  
 $m$  = adsorbanın kütlesi  
 $C_{den}$  = Çözeltide adsorplanmadan kalan madde derişimi,  
 $K_f$  ve  $n$  = Freundlich adsorpsiyon sabitleridir [45].

Bu bağıntı, orta derişim ve basınçlar için deneysel sonuçlar ile uygunluk gösterir. Freundlich denkleminde  $n$ 'nin değerinin büyük olması adsorpsiyon izoterminin keskin bir köşe yaptığını ve adsorpsiyonun şiddetli olduğunu ifade eder,  $n$ 'nin en küçük değeri ise birdir.

Freundlich denklemi logaritmik olarak

$$\log(x/m) = \log k + (1/n) \log C_{den} \quad (5-3)$$

şeklinde de ifade edilir.

### 5.3.3. Brauner-Emmet-Teller (BET) izotermi

Brauner, Emmet ve Teller, adsorban üzerinde adsorplanan gaz moleküllerinin sıkışarak çok tabakalı bir adsorpsiyon oluştuğu varsayımından hareketle bir izoterm türetmişlerdir. BET izotermi olarak bilinen bu eşitlik, Langmuir izoterminde izlenen yolun bütün tabakalara uygulanmasıyla çıkarılır.

BET eşitliği aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$\frac{P}{(x/m)(P_0-P)} = \frac{1}{ah} + \frac{(h-1)p}{ahP_0} \quad (5-4)$$

Burada; P buhar basıncını, P<sub>0</sub> buharın doygunluk basıncını gösterir, a ve h ise izoterm sabitleridir.

### 5.3.4. Temkin (Slygin-Frumkin) izotermi

Temkin izotermi, Langmuir izoterminde, adsorpsiyon ısısının yüzey örtüsüyle doğrusal olarak değiştiği kabul edilerek türetilmiştir. Buna göre adsorpsiyon ısısı;

$$q_{ads} = q_{ads,0} (1-\alpha\theta) \quad (5-5)$$

şeklinde ifade edilir. Burada q<sub>ads,0</sub> boş yüzeydeki adsorpsiyon ısısı ve α ise sabittir. θ ise;

$$\theta = \frac{RT}{q_0 \alpha} \ln A_0 P \quad (5-6)$$

ile ifade edilir. A<sub>0</sub> ise şu denklemle verilir;

$$A_0 = a_0 \exp(-q_{ads} / RT) \quad (5-7)$$

## 5.4. Sıvı Çözeltilerden Adsorpsiyon

Atıksulardan organik bileşiklerin ve diğer safsızlıkların giderilmesi için adsorpsiyon yöntemi sık sık kullanılır.

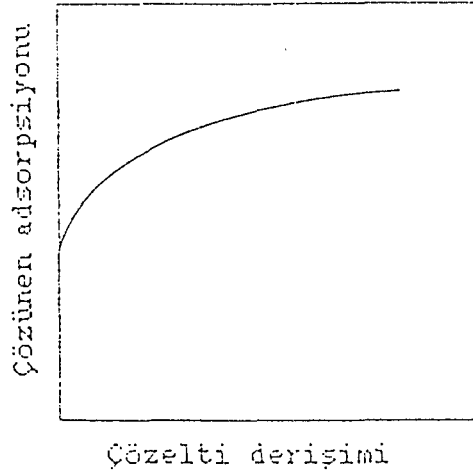
Bu konuyla ilgili ilk çalışmalar Freundlich tarafından yapılmıştır. İlk deneylerde genellikle sulu çözeltiler ve adsorban olarak da çeşitli tipte odun kömürü kullanılmıştır.

Çözeltilerden adsorpsiyonda moleküller arası etkileşimler:

- Çözünmüş haldeki organik bileşiklerle adsorban yüzeyi arasındaki etkileşim,
- Çözücü molekülleri ile adsorban yüzeyi arasındaki etkileşim,
- Çözeltideki bileşenlerin arasındaki etkileşim

şeklindedir [46].

Özellikle sıvı çözeltilerden katı çözünenin adsorpsiyonunda gözlenen en yaygın izoterm Şekil 5.1'deki gibidir. Bu tür izoterm için Freundlich eşitliği düşük ve yüksek derişimlerde genelde iyi sonuç vermez. Çünkü düşük derişimlerde  $x/m$ ,  $c$ 'nin birinci kuvvetiyle orantılıdır, yüksek derişimlerde ise  $x/m$ ,  $c$ 'den bağımsız olan sabit bir değere ulaşır. Freundlich eşitliği orta derişim aralığında kullanılır. Bu nedenle olayı açıklayacak başka eşitlikler üzerinde de çalışılmıştır. Bunların arasında Langmuir eşitliği önemlidir. Gazlarda iyi sonuç veren Langmuir eşitliği, geliştirilerek çözeltiler için uygulanmıştır.



Şekil 5.1. Çözeltiden katı adsorpsiyonu için tipik bir izoterm [6]

Langmuir eşitliği çözeltiden adsorpsiyon için iki ayrı şekilde kullanılabilir [6]:

$$\frac{c}{x/m} = \frac{1}{ab} + \frac{1}{a} c \quad (5-8)$$

$$\frac{c}{N} = \frac{1}{bN_m} + \frac{1}{N_m} c \quad (5-9)$$

Bu denklemlerde:

$c$  :Çözünen maddenin denge derişimi

$x/m$  :Birim adsorban başına adsorplanan madde miktarı

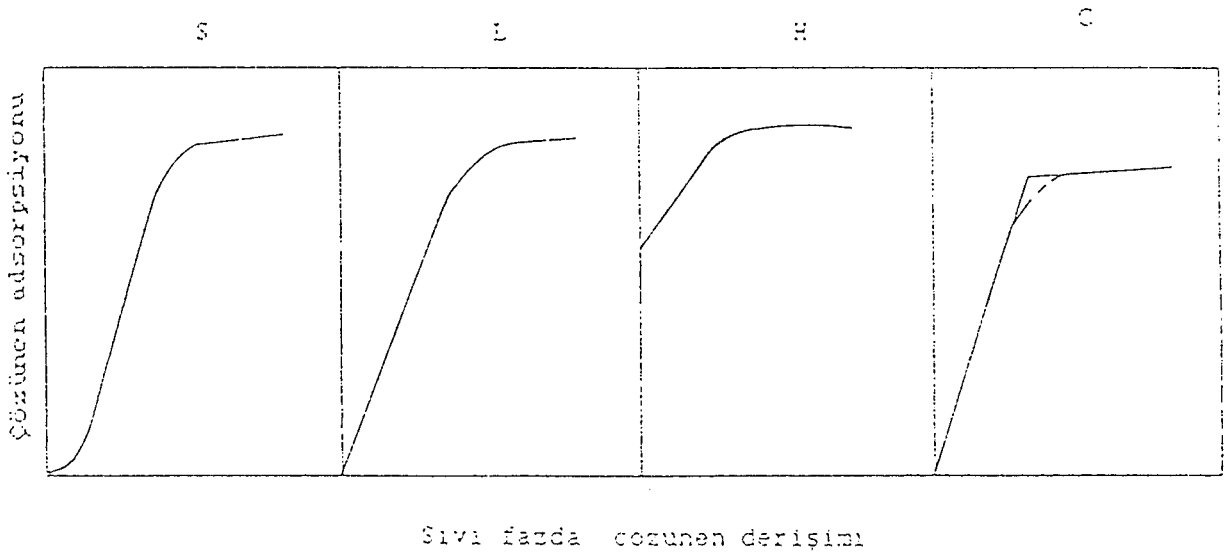
$a, b$  :Sabitler

$N$  :Denge derişiminde bir gram adsorban başına adsorplanan maddenin mol sayısı

$N_m$  :Adsorplanan maddenin adsorbanın tüm yüzeyini bir molekül kalınlığında bir tabaka ile kaplayabilmesi için bir gram adsorban tarafından adsorplanması gereken maddenin mol sayısıdır.

Langmuir eşitliği tamamen karışan sıvı çözeltilere uygulanamamasına karşın seyreltik çözeltilerden katuların adsorpsiyonu için elde edilen izotermlere uygunluk gösterir.

Giles tarafından çözeltilerden katuların adsorpsiyonunda gözlenen izotermler Şekil 5.2'de gösterildiği gibi başlıca dört tipe ayrılmıştır.



Şekil 5.2. Çözeltilerden katı adsorpsiyonu için izotermlerin sınıflandırılması [6]

S tipi izotermlere şu hallerde rastlanır:

- Çözücünün kuvvetle adsorplandığı haller,
- Etkileşen tabakalar arasındaki çekim kuvvetlerinin büyük olduğu haller,
- Adsorplanan moleküllerin basit yapıda olduğu olduğu haller.

L (Langmuir) tipi izotermlere, yüzeydeki merkezlere çözücünden kuvvetli bir rekabet olmadığı hallerde rastlanır. Bu izoterme sahip sistemlerde adsorplanan moleküller doğrusal veya düzlemsel yapıdadır.

H tipi izotermlere, adsorplanan ile adsorban arasındaki kuvvetli bir çekimin olduğu hallerde rastlanır. Bu tip izoterme sahip sistemlerde, çözeltinin çok seyreltik olduğu hallerde bile kimyasal adsorpsiyon söz konusudur.

C tipi izotermler, çözelti ile adsorban arasında adsorplananın sabit paylaşımını gösterir ve özellikle tekstil elyafında gözlenir.

Çözeltiden adsorpsiyonda sıcaklığın etkisi, düşük derişimlerde izoterm, sıcaklığın artmasıyla azalarak kendini gösterir. Yüksek derişimlerde ise izotermler aynı sınır değere yaklaşır. Bunun nedeni, sıcaklık arttıkça çözünen ile yüzey arasındaki çekim kuvvetlerinin zayıflamasıdır. Ayrıca sıcaklık arttıkça çözünen maddenin çözücüdeki çözünürlüğü de artmaktadır.

### 5.5. Adsorpsiyon Düzeneklerinin Türleri

Adsorpsiyon düzenekleri kesikli veya sürekli olarak çalıştırılabilir. Kesikli süreçlerde, adsorban ve atıksu uygun bir tepkime kabında çözünen derişimi istenilen düzeye ininceye kadar karıştırılır. İşlem sonunda kullanılan adsorban türüne göre, adsorban tekrar kullanılabilir duruma getirilebilir.

Pek çok sürekli akım adsorpsiyon düzeneği sabit yataklı adsorpsiyon kolonları olarak çalıştırılır. Bu düzenekler hem endüstriyel hem de evsel atıksuların arıtımında kullanılabilir. Sabit yataklı adsorplayıcılar tek kolon veya bir seri kolon halinde bulunabilir. Bu kolonlar aşağı veya yukarı doğru akışlı olarak çalıştırılır. Aşağı doğru akışlı olan düzenekte adsorpsiyon daha etkilidir.

Yukarı doğru akışlı kolonlar sabit veya akışkan yataklı olarak kullanılır. Akışkan yataklı kolonlar, sabit yataklı kolonlara göre daha avantajlıdır.

Yukarı veya aşağı doğru akışlı kolonların seriler halinde olması adsorban kullanımını optimize eder ve işletme maliyetini düşürür.

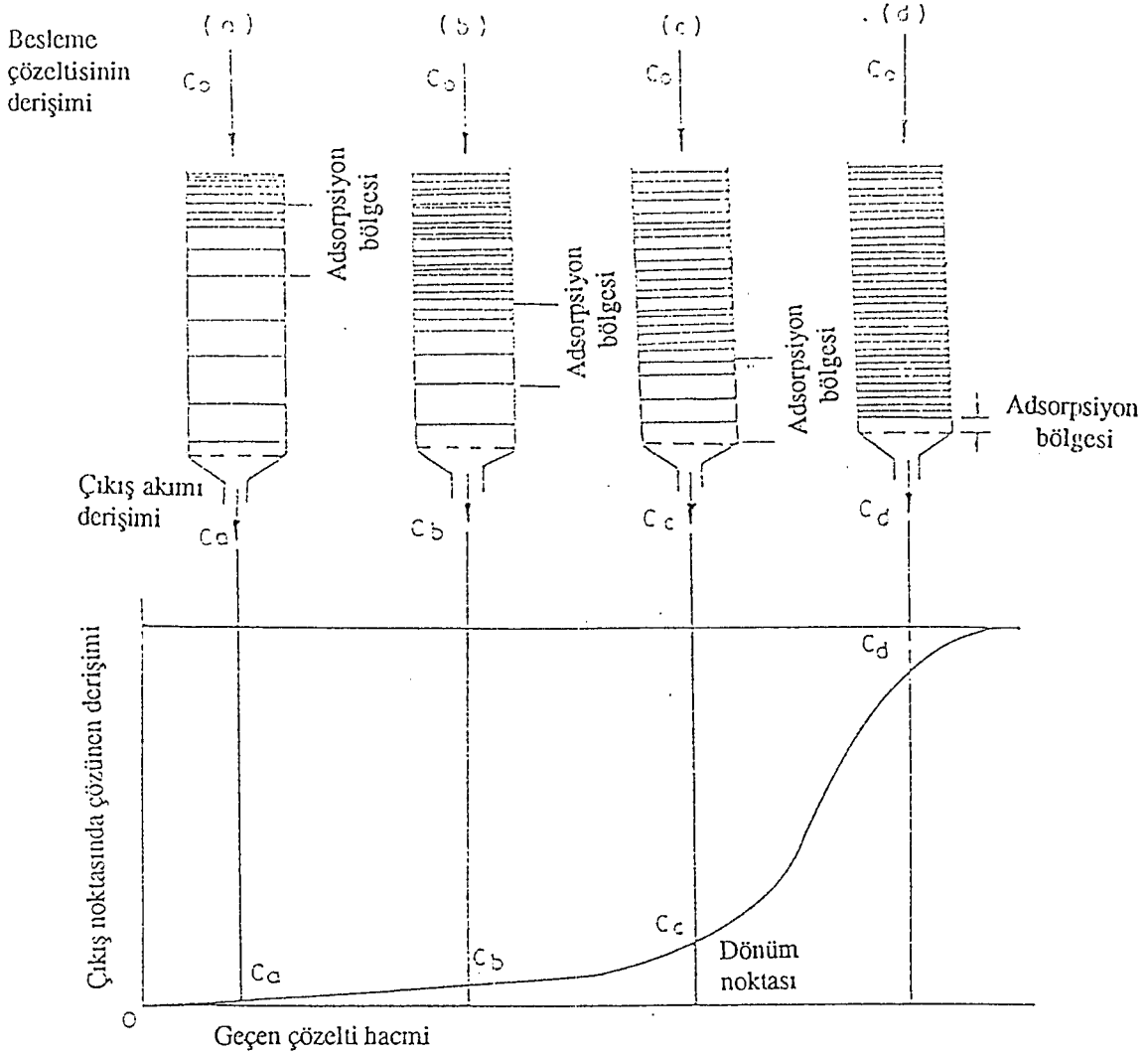


## 5.6. Sabit Yataklı Kolonlarda Adsorpsiyon

Sabit yataklı kolondan sürekli olarak sıvı çözelti geçirildiğinde çözünen bileşen ilk önce yatağın üst kısmında hızlı ve etkili bir şekilde adsorplanır. Çözeltide kalan az miktardaki çözünen ise yatağın alt kısımlarındaki adsorbanlar tarafından adsorplanır. Bir süre sonra kolonun üst kısmı çözünence doymuş hale gelir ve adsorpsiyon bölgesi aşağı doğru kayar. Adsorpsiyon bölgesinin yatağın alt kısmına doğru kaymasıyla birlikte çıkış akımındaki çözünen derişimi de artmaya başlar. Sabit yataklı adsorpsiyon kolonundan geçen çözelti hacmine karşı çıkış akımındaki çözünen derişiminin değişimi Şekil 5.3'te gösterilmiştir.

Başlangıçta  $C_0$  derişimdeki çözelti temiz adsorban yatağının içinden geçeceğinden çözünen yatağın üst kısmındaki adsorbanlar tarafından hızlı bir şekilde adsorplanır. Adsorpsiyon bölgesi aşağıya doğru kaydıkça, çıkış akımındaki çözünen derişimi de artarak  $C_b$  değerini alır. Kolondan, Şekil 5.3'te (c) konumuna gelinceye kadar çözelti geçtiğinde adsorpsiyon bölgesinin alt kısmı yatağın alt sınırına ulaşır ve çıkış akımındaki çözünen derişimi ilk kez önemli ölçüde artarak "dönüm noktasında"  $C_0$  değerine ulaşır. Çözelti geçmeye devam ettikçe çıkış akımındaki derişim hızla yükselerek (d) konumuna geldiğinde kolon, çözüneni adsorplama yönünden doymuşluğa ulaşmış sayılabilir. Böylece doymuş bölgenin alt sınırı kolonun dibine erişmiştir. Çıkış akımında istenen sınır aşıldıkında adsorbanın rejenere edilmesi veya değiştirilmesi gerekecektir.

Sabit yataklı kolonda adsorpsiyon sürecinin gerçek hızı ve mekanizması, akışkan hızına ve beslemedeki çözünen derişimi yüksek olduğunda yatağın yüksekliğine bağlıdır. Çalışma sırasında dönüm noktasına ulaşma zamanı önemlidir ve bu zaman yatak yüksekliğinin azalması, adsorbanın tanecik boyutunun artması ve beslemedeki başlangıç derişiminin artmasıyla azalır [6].



Şekil 5.3. Sabit yataklı adsorpsiyon kolonundan geçen çözelti hacmi ile çıkan çözeltideki çözünen derişiminin değişimi [6].

### 5.7. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Adsorbanlar

Bütün katıları adsorban olarak kabul edebiliriz, ancak endüstride kullanılan adsorbanların sayısı oldukça kısıtlıdır. Bir adsorbanın endüstriyel süreçlerle kullanılabilmesi için aşağıdaki özelliklere sahip olması istenir:

- ucuz ve bol miktarda olmalı,
- Rejenere edilerek tekrar tekrar kullanılabilmeli,
- Fiziksel sağlamlığı olmalı,
- Kimyasal olarak inert olmalı,
- Adsorplama kapasitesi yüksek olmalı,
- Bir karışımdan, belirli bir veya birkaç maddenin ayrılması isteniyorsa, bu maddelere karşı seçicilik özelliği göstermelidir [15].

Adsorplanan madde miktarı, adsorbanın yüzey alanı ile doğru orantılıdır. Bu nedenle adsorbanların spesifik yüzey alanlarının büyük olması istenir. Bu büyük spesifik yüzey alanını sağlayabilmek içinde adsorbanların gözenekli yapıya sahip olmaları gerekir. Adsorplanan maddelerin büyük bir kısmı gözeneklerin meydana getirdiği iç yüzey alanında adsorplanır [15].

### **5.7.1. Karbon ve karbonlu maddeler**

Aktif karbonun su arıtımında kullanımı giderek yaygınlaşan bir yöntemdir. Bu yöntemle düşük kaliteli sular arıtılarak yüksek kaliteli sular elde edilebilmektedir. Ayrıca, endüstriyel atıksulardan fiziksel-kimyasal arıtımla safsızlıkların giderimi için de aktif karbon kullanılabilir [15], [17].

Aktif karbonların adsorplama kapasiteleri ve seçicilik özellikleri üretildiği maddenin cinsine ve üretim koşullarına göre farklılık gösterir. Ortak özellikleri, yüzey polariteleri az olduğundan, diğer adsorbanlara göre polar olmayan molekülleri daha iyi tutmalarıdır. Bu özelliklerinden dolayı hava ve diğer gazlardan organik madde buharlarının ayrılıp geri kazanılmasında önemli uygulamaları vardır [15], [17].

Çok pahalı camsı karbon ve pirolitik karbon dışında, karbonlu maddeler yeşil (odun, sap, saman) maddelerden “Acheson süreci” ile üretilen polikristal grafitlerdir.

Piroliz sonrası 2000 °C civarına ısıtılan amorf kokun karbon yapısı grafit dönüşür. Bu süreç, genellikle, dışarıdan herhangi bir basınç uygulamaksızın gerçekleştirildiği için sonuçtaki katı yapı gözeneklidir. Ham maddenin izostatik basıncı poroziteyi büyük oranda düşürür, ancak pratik olarak sıfır porozite elde etmek için matriks, vakum altında sıcak zift ile grafitleştirilir ve süreç ikinci kez tekrarlanır. Bu işlem sırasında önemli noktalardan biri, grafitin 400°C'nin üstündeki sıcaklıklarda oksijene direnç gösterememesi ve yüksek sıcaklıklarda CO<sub>2</sub> ile birleşerek CO'ye dönüşmesidir [47].

Aktif karbonun fiziksel özellikleri, toz şeklinde karıştırılmalı reaktörlerde veya granüler halde yatak reaktörlerde kullanılıp kullanılmadığına bağlı olarak, performansı ile ilgilidir.

Toz aktif karbon için iki önemli fiziksel özellik filtre edilebilirliği ve yoğunluğudur. Filtrasyon ile uzaklaştırılacak olan karbonun filtre edilebilirliği; tanecik şekli ve boyut dağılımı ile kontrol edilir. Yoğunluğu; birim hacim başına karbon kütlesidir. Kütle, sisteme verilen karbonun adsorplama kapasitesi ile ilgilidir; yüksek yoğunluk birim hacim adsorban için daha fazla adsorplanan giderimi sağlar.

GAC için önemli fiziksel özellikler sertlik ve tanecik boyutudur. GAC işletme maliyetlerinin çoğu taşıma ve rejenerasyon işlemleri esnasındaki aşınmalardan kaynaklanır. Sert karbonlar için ise kayıplar daha azdır.

Aktif karbonların adsorplayıcı özellikleri adsorpsiyon oranı ve kapasitesi üzerinde önemli etki yapar, bu, karbon seçiminde gözönünde bulundurulmalıdır. Bu özellikler arasında spesifik yüzey alanı, gözenek boyut dağılımı ve yüzeyin kimyasal yapısı sayılabilir. [6].

Homojen dağılma özelliğine sahip aktif karbon, özellikle, organik kökenli maddelerin adsorpsiyonla gideriminde, ileri arıtım tekniği olarak uzun yıllardır kullanılmaktadır [48].

### 5.7.2. Perlit

Perlit, küresel ve oldukça fazla çatlaklara sahip doğal bir camdır. Perlitik kırılmalar sonucunda meydana gelen çatlaklarda oluşan ince hava filmlerinin gelen ışığı yansıtması nedeniyle inci parlaklığında ve genellikle gri veya yeşil renktedir. Genellikle, perlitin ağırlığının %3-4'ü sudur. Cam lavların hızla soğuması sonucunda oluşur. Bu soğuma sırasındaki gerilmeler sonucunda çatlakların oluştuğu kabul edilir. Bazı araştırmacılar ise camsı özelliğinden dolayı su adsorplarken bu çatlakların oluştuğunu kabul etmektedirler.

Dünyada nitelikli en büyük perlit yataklarına sahip ülkelerden birinin Türkiye olduğu ve jeolojik olası kaynakların en az  $7 \times 10^9$  ton civarında olduğu kaydedilmektedir[49].

Perlit 815-1093°C gibi yüksek sıcaklıklara ısıtıldığında, yumuşayan cam içindeki sular çok küçük buhar kabarcıkları haline gelir ve perlitü patlatarak başlangıçtaki hacminin 15-20 katı kadar genişletir. Bu olay tümüyle, mısırın patlamasına benzemektedir. Bu nedenle perlit, süzmeye yardımcı, dolgu, destek ve izolasyon maddesi olarak kullanılabilir.

## 5.8. Adsorpsiyonun Uygulandığı Deneysel Çalışmalar

Sulu çözeltilerden iyonlaşabilir aromatik bileşiklerin aktif karbon ile adsorpsiyonuna pH ve tuzun etkisinin araştırıldığı bir çalışmada 1g/L'lik fenol ve benzoik asit çözeltileri kullanılmıştır. Bu amaçla çözeltilerin pH değeri 1-11 arasında değiştirilerek ve 0,2 ve 0,5M NaCl ilavesi ile adsorpsiyon ölçümleri gerçekleştirilmiş; benzoik asit için en yüksek adsorpsiyonun pH=3 civarında olduğu, 0,2M NaCl ilavesi ile bütün pH aralıklarında aktif karbon adsorpsiyon kapasitesinde %50-60'luk artışlar olduğu ve 0,5M'lık NaCl ilavesi ile daha yüksek adsorpsiyon kapasitesine ulaşamadığı görülmüştür. Fenol adsorpsiyonunda ise pH 1 ve 11 değerlerinde iken aktif karbon adsorpsiyon kapasitesi %10-15 düşmekte, pH 3-9 aralığında ise sabit kalmaktadır. 0,2M NaCl ilavesi ile düşük pH değerlerinde %50'ye varan kapasite arttırımı sağlanabilmesine karşın tuz miktarı 0,5M'a çıktığında yine yükselme sağlanamamıştır [46].

Bir başka çalışmada; atık bir madde olan pirinç kabuğundan yapılan aktif karbonda sulu çözeltilerden Cu(II) ve Cd(II) iyonlarının adsorpsiyonla uzaklaştırılması incelenmiştir. Cu(II) iyonunun adsorpsiyonu; karıştırma süresi 60 dakika, pH=5,3, doz 0,5 g/25mL, Cu(II) derişimi 15 mg/L alındığında %99,07 olarak hesaplanmıştır. Cd(II) iyonunun adsorpsiyonu; karıştırma süresi 80 dakika, pH=6,97, doz 1,0 g/25mL, Cd(II) derişimi 15 mg/L alındığında %54 olarak hesaplanmış olup pirinç kabuğundan yapılan aktif karbonun kadmiyumun adsorpsiyonunda, bakıra göre daha az etkili olduğu gözlenmiştir [50].

Balkaya ve arkadaşlarının [51] yapmış oldukları çalışmada organofosfatlı bir pestisit olan dimetil 2,2 dikronovinil fosfat (Dichlorvos yada DDVP)'in ponza taşında adsorpsiyonuyla atıksudan giderimi amaçlanmıştır. Yapılan çalışmada ponza taşı adsorpsiyonuyla DDVP giderimine, ponza taşı miktarı ve boyutunun ve pH'ın etkisi araştırılmış, 30-40 mg/L DDVP içeren örneklerin 5 saat süren adsorpsiyonu sonunda %20-25 arasında değişen giderim hızları elde edilmiştir. pH=10'da ise %40-50 giderim verimine ulaşılmıştır.

Yünlü tekstil endüstrisi atıksularında renk gideriminde bentonit, ponza taşı ve pirinç kabuğu gibi düşük maliyetli adsorbanlar kullanılarak adsorpsiyon yönteminin etkinliği araştırılmıştır. Adsorpsiyon deneyleri sonrası renk giderimi incelendiğinde düşük derişimlerde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Adsorpsiyon süresinin 3 saat'ten 7 güne

çıkartılmasının renk giderimi açısından bir farklılık oluşturmaması ekonomik yönden olumlu bir sonuç olarak değerlendirilmiştir. Adsorban olarak kullanılan pirinç kabuklarının tane boyutu 0,18-0,425mm. aralığında ve katı/sıvı oranı 1/1000 (g/mL) olduğunda %95,9'luk renk giderimi elde edilmiştir [52].

Altundoğan ve Tümen [53] yaptıkları çalışmada Etibank Seydişehir Alüminyum İşletmeleri'nden sağlanan kırmızı çamurun katı kısmını kullanarak sulu çözeltilerden As (V) adsorplama özelliklerini araştırmış; As (V) adsorpsiyonuna; süre, pH, başlangıç As(V) derişimi ve kırmızı çamur dozunun etkilerini incelemişlerdir. 10mg/L'lik As(V) çözeltilisinden 100g/L adsorban dozunda (25°C, pH: 3,15'te) ve 120 dakikalık temas süresi sonunda %99,8'lik bir giderim gözlemişlerdir

Dağaşan ve arkadaşları [54] Maya endüstrisi atık sularında renk giderimi üzerine çalışma yapmışlardır. Şeker fabrikası yan ürünü olan melas kullanan fermentasyon endüstrilerinin atık sularında yüksek organik maddelere ilaveten melanoidin pigmentinden kaynaklanan renk sorunu görülmektedir. Yüksek miktarda bulunan organik maddeler biyolojik arıtım ile giderilebilmekte, ancak, atık suya renk veren melanoidin pigmenti bir çok mikroorganizma tarafından parçalanamamaktadır. Bu çalışmada kimyasal yöntemler kullanılarak, maya fabrikası atık sularından renk giderimi çalışmalarının sonuçları sunulmuştur. Buna göre aktif karbon ile % 88 renk giderimi sağlanırken, kireç ile % 66,  $Al_2(SO_4)_3$  ile % 66, hipoklorit ile ise (bazik ortamdan) % 56 renk giderimi gerçekleştirilmiştir.

Tekstil atıksularının havalı ortamda aktif karbonla arıtılmasını içeren çalışmada, aktif karbon, aerobik ortamda organik maddelerin parçalanmasına yardımcı olarak kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda, pamuklu tekstil atıksuyunda bekletme süresinin 2 saat, aktif karbon dozunun 50 g, pH'ın 4 ve hava debisinin 0,24 m<sup>3</sup>/h olduğu durumlarda optimum koşullara ulaşılmıştır. Optimum koşullarda, KOİ'nin %85 oranında giderildiği gözlenmiştir [48].

Adsorban madde olarak zeolit, kemik tozu, odun talaşı, odun külü ve toz ve granüler aktif karbonun kullanıldığı bir çalışmada, tekstil endüstrisinde kullanılan Reactofast Turq. Blue HA5G1 boyar maddesi ile hazırlanan çözeltilerin arıtılması ve adsorbanların giderim verimlerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Zamana karşı renk giderimi çalışmalarında en iyi sonuç PAC, odun külü ve yanmış kemik tozu kullanılarak elde edilmiştir. Bu üç adsorban için %95'in üzerinde giderime ulaşılmıştır [16].

Türkiye'nin farklı bölgelerinden elde edilen 13 doğal sünger taşının (pumice rock) fosfat giderim veriminin araştırıldığı çalışmada; yüksek CaO içeren taşların yüksek fosfat giderme kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Böylece, yüksek oranlarda CaO içeren sünger taşlarının fosfat için etkin bir adsorban olduğu anlaşılmıştır

Marmara bölgesi Anadolu yakasından toplanan ve CaO içeriği % 32,6 olan sünger taşı için fosfat giderim verimi % 98,95 bulunurken, Doğu Anadolu bölgesinden elde edilen ve %2,1 CaO içeren sünger taşı için giderim verimi % 2,5 olarak hesaplanmıştır. Deneyler sonucunda CaO içeriği ile fosfat giderim verimi arasında doğrusal ilişki olduğu görülmüştür. Ayrıca, sünger taşının seyreltik NaOH ile rejenerasyondan sonra tekrar kullanılabilirliği bulunmuştur [55].

Brasquet ve arkadaşları [56] kirli sulardaki bileşenlerin, kesikli ve sürekli akışlı reaktörlerde lifli aktif karbonlar (FAC) üzerine adsorpsiyonunu çalışmışlardır. Kesikli çalışmalarda mikrokirleticilerin (fenol ve atrazine) adsorpsiyon kapasitesi ve hızlarının granüler aktif karbona (GAC) göre daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Öte yandan, yüksek moleküler ağırlıklı moleküller FAC üzerine adsorbe edilememiştir. Bu çalışma sonucunda FAC adsorpsiyonunun fenol ve atrazine gibi aromatik mikrokirleticiler için seçici olduğu, humic maddeler gibi yüksek moleküler ağırlıklı bileşenlerin lifler üzerine adsorbe olamadığı ve bu yüksek moleküllü bileşenlerin, mikrokirleticilerin adsorpsiyonuna engelleyici bir etki yapmadığı bulunmuştur.

12 çeşit aktif karbonun Ni (II)'nin giderilmesinde kullanıldığı bir çalışmada [57], adsorpsiyon kapasitesinin pH'tan etkilendiği ve pH'ın düşüşü ile büyük oranlarda azaldığı rapor edilmiştir; pH <3 olduğunda giderim verimi düşmüş, pH>3 değerlerinde artma eğilimi gözlenmiştir. Aktif karbonların asit-baz süreci ile 5 kez rejenerasyonundan sonra Ni (II) uzaklaştırma verimi % 80'in üzerine çıkmıştır.

Farklı ham maddelerden toz ve granüler şekilde hazırlanan değişik aktif karbonlar kullanılarak, çözeltilerden Cr (VI)'nin uzaklaştırılması çalışılmıştır. Deneylerde; pH, başlangıç Cr (VI) derişimi ve karbon-çözelti temas süresinin giderime etkisi araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan aktif karbonların sulu çözeltilerden Cr (VI) uzaklaştırılmasında yeterli olduğu bulunmuştur. En uygun deneysel koşullar; pH = 2 ve aktif karbon-Cr (VI) temas süresi 200 saat olduğu durumda elde edilmiştir. Aktif karbonlarla uzaklaştırılan Cr (VI) miktarlarındaki farklılığın, aktif karbon yüzeyindeki kimyasal yapının ve porozitenin farklılığından kaynaklandığı; bu sonuçların ise karbon

hazırlamada kullanılan ham maddelerin ve aktifleştirme sürecinin bir sonucu olduğu ileri sürülmüştür [58].

Bir başka çalışma, granüler aktif karbonun Klorit ( $\text{ClO}_2^-$ ) ve Klorat ( $\text{ClO}_3^-$ ) iyonunu uzaklaştırma verimini belirlemek üzere gerçekleştirilmiştir. Deneylede; pH, hidrolik yük, başlangıç derişimi, organik madde ilavesi ve GAC tanecik boyutunun etkisi incelenmiştir. Başlangıçta bütün  $\text{ClO}_2^-$ 'nin GAC tarafından  $\text{Cl}^-$  iyonuna indirgendiği, ancak daha sonra, karbonun  $\text{ClO}_2^-$ 'yi indirgeme kapasitesinin azaldığı görülmüştür. Bu indirgeme tepkimesi,



şeklindedir. Burada;

$\text{C}^*$ ; Aktif karbon yüzeyi,

$\text{CO}_2^*$ ; oluşan yüzey oksitlerdir. Tepkime hızı zamanla hızla düşmektedir.

Klorit iyonu uzaklaştırma verimi; doğal organik madde ilavesinin azaltılması, pH'ın düşürülmesi, hidrolik yüklemenin ve GAC tanecik boyutunun küçültülmesi ve sıcaklığın artışı ile artmıştır. Klorit iyonu uzaklaştırılması en etkin olarak pH= 5 değerinde gerçekleştirilmiştir.

8 deneyin 6'sında  $\text{ClO}_2^-$  iyonunun %98'in üzerinde uzaklaştırıldığı görülmüştür. 2 deneydeki giderim verimi %94 ve %96,6 olup bunun nedeninin adsorpsiyon olduğu düşünülmektedir.

Klorat ( $\text{ClO}_3^-$ ) iyonunun GAC ile tepkimeye girmediği, ancak fiziksel adsorpsiyona uğradığı görülmüştür [59].

Eskişehir bölgesi ağırlıklı olmak üzere, seçilen altı bentonit örneği üzerinde gerçekleştirilen bir çalışmada, katyonik ve bazik bir boyar madde olan metilen mavisinin  $25^\circ\text{C}$ 'da sulu çözeltilerden adsorpsiyonu incelenmiştir. Boyar madde derişimleri spektrofotometrik olarak belirlenmiş, verilerin Langmuir izotermi ile uygunluk gösterdiği saptanmıştır [60].

Tümen ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [61],  $\text{SO}_2$  üretim artışı olan pirit külünü kullanarak sulu çözeltilerden fosfat giderilmesi üzerine çeşitli parametrelerin etkilerini araştırmışlardır. Sonuçlar, temelde  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 'ten ibaret olan pirit külünün fosfat için zayıf bir adsorban olduğunu göstermiştir.



## 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 6.1. Yöntem

Atıksulardan boyar madde uzaklaştırmak amacıyla, elektroadsorpsiyon ve kimyasal adsorpsiyon yöntemi uygulanmıştır. Elektroadsorpsiyon çalışmalarında “iki kutuplu damlamalı” bir elektrokimyasal reaktör kullanılmıştır (Şekil 6.1). Laboratuvar ölçekli amaçlanan bu çalışmada kullanılan ve deneylerin gerçekleştirildiği kolon reaktörün boyu 70 cm, iç çapı 5,0 cm, dış çapı 5,5 cm’dir. Reaktörün iç kısmı, iki kutuplu elektrot olarak perlit ve aktif karbon karışımı ile doldurulmuştur. Elektrotlar ile doldurulmuş kolonun iki ucunda, gerilimin uygulandığı, iki grafit çubuktan oluşan anot ve katot bağlantıları bulunmaktadır. Deneylerde iki bağlantı arasındaki dolgu kolon boyu 5, 25 ve 45 cm olarak ele alınmıştır. Kolonda, yerçekimi ile sağlanan akışın reaktör kesit alanı boyunca homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak amacıyla reaktörün üst kısmından besleme yapılan hortumun ucuna hava taşı konulmuştur.

Çalışma çözeltisi stok kabı, üzerinde teflon vana bulunan hortum ile bir rotametreye bağlanmış ve çalışma çözeltisinin belirli akış hızlarında reaktöre beslenmesi sağlanmıştır. Sabit akış hızı elde edildiğinde, reaktöre gerilim uygulanarak dengeye gelmesi için beklenmiştir. Reaktörün alt tarafından çıkan ve toplama kabına alınan çözeltinin derişimi spektrofotometrik olarak tayin edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan deney düzeneği, Şekil 6.2’de görülmektedir.

Tasarlanan sistem sürekli olarak çalıştırılmış, çalışma çözeltisi olarak Acilan Blau boyar maddesinin saf suda çözülmesi ile hazırlanan model atıksular kullanılmıştır. Bu çalışmada, başlangıç derişiminin giderime etkisini belirlemek amacıyla 30 mg/L, 40 mg/L ve 100 mg/L’lik derişimlerde üç farklı model atıksu kullanılmıştır.

Sistem verimini ve enerji tüketimini doğrudan etkileyen reaktör gerilimi, 5-25V arasında değişen değerlerde denenmiş, ayrıca, akış hızının boyar madde giderimi üzerine etkisi de incelenmiştir. Optimum koşullarda elektrot yatak derinliğinin etkisi incelenmiş ve bir tekstil endüstrisi atıksuyunun arıtılabilirliği de araştırılmıştır.

Deneysel çalışmalarda kullanılan granüler aktif karbonun yoğunluğu 1,74 g/cm<sup>3</sup> olarak bulunmuştur. Yapılan elek analizi sonucu yüzey alanı 1185 cm<sup>2</sup>/g ve ortalama tanecik çapı 2,13 mm olarak saptanmıştır.

Deneysel çalışmalarda kullanılan perlitin yoğunluğu 0,4662 g/cm<sup>3</sup>, yapılan elek analizi sonucu yüzey alanı 85 cm<sup>2</sup>/g ve ortalama tanecik çapı 2,65 mm olarak bulunmuştur (Kullanılan perlitler 2,5-2,8 mm açıklığındaki elekler arasında kalan kısımdır).

### **6.1.1. Kullanılan kimyasal maddeler**

Acilan Blau (Bayer) tekstil boyar maddesinin kullanıldığı elektroadsorpsiyon deneylerinin bir kısmında destek elektrolit olarak NaCl kullanılmıştır.

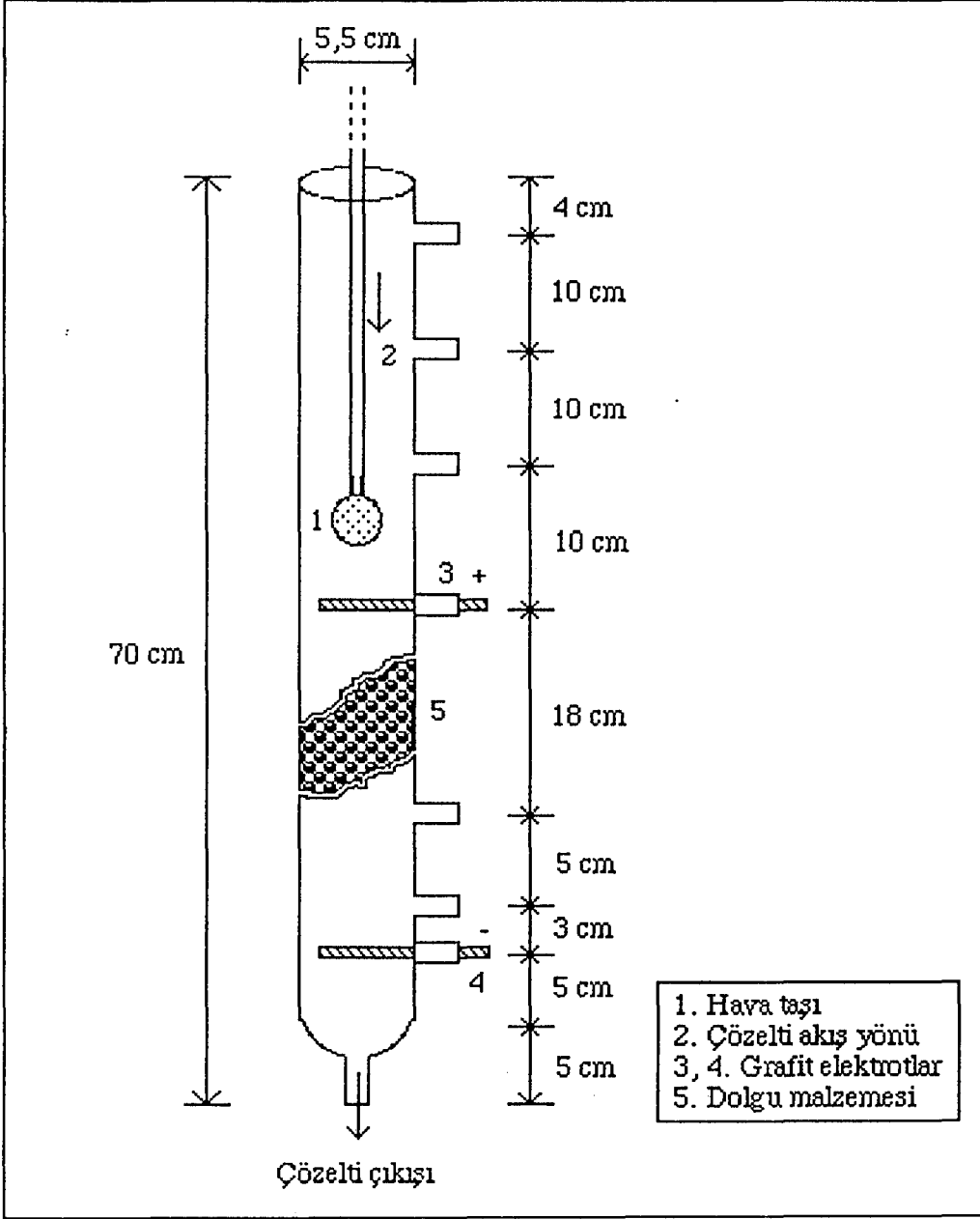
### **6.1.2. Kullanılan yardımcı araçlar**

Reaktöre 220 V kapasiteli ELSİM marka güç kaynağı ile gerilim uygulanmış, akış hızını kontrol etmek amacıyla COLE PARMER 11-60648 marka rotametre, reaktörden geçen akımı ölçmek amacıyla OGSM 3900 Dijital ampermetre kullanılmıştır.

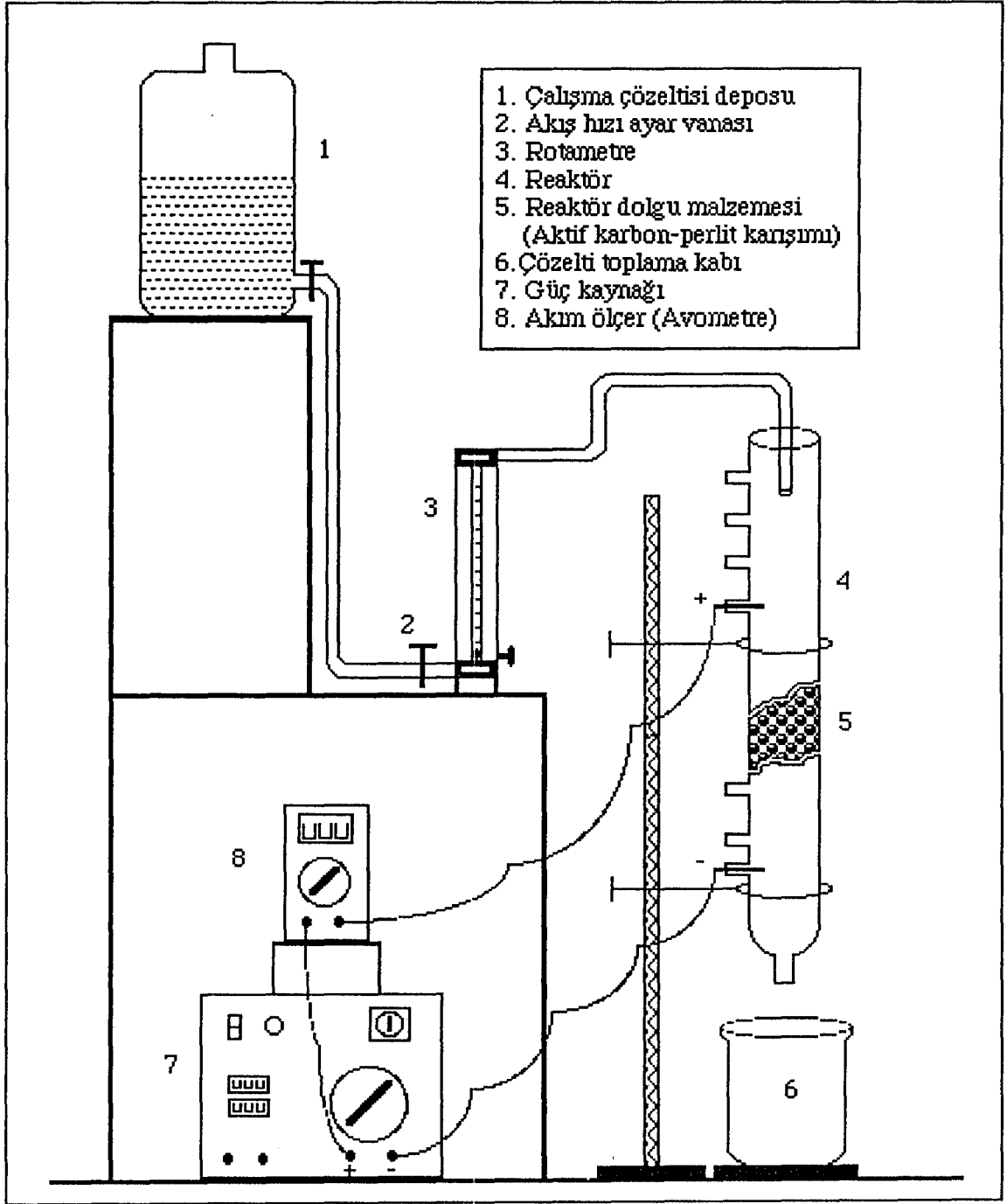
Dolgu malzemesi olarak kullanılan granüler aktif karbonların rejenerasyonunda NÜVE FN 400 etüv, boyar madde çözeltisi hazırlamak amacıyla tartım işlemlerinde OHAUS marka analitik terazi ve çözeltilerdeki boyar madde derişimlerinin analizinde DR LANGE CADAS 100 model spektrofotometre kullanılmıştır.

### **6.1.3. Boyar madde tayini**

Deneyleerde, hazırlanan standart çözeltilerdeki boyar madde derişimlerine karşı spektrofotometrede okunan absorbans değerleri grafiğe geçirilerek, standart çalışma doğrusu çizilmiştir (Bkz. EK 2). Bu çalışma doğrusu yardımıyla boyar madde derişimleri belirlenmiştir.



Şekil 6.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan iki kutuplu damlamalı reaktör



Şekil 6.2. Elektroadsorpsiyon çalışmalarının gerçekleştirildiği deney düzeneği

#### 6.1.4. Standart çalışma doğrusunun çizilmesi ve derişim hesabı

Derişimleri bilinen bir seri çözelti hazırlanarak, çözeltilerin maksimum absorbands verdiği dalga boyunda ( $\lambda=625$  nm) spektrofotometrede absorbands okumaları yapılmıştır. Derişim-absorbans değerleri grafiğe geçirilerek hazırlanan standart çalışma doğrusu EK 2 ve örnek hesaplamalar EK 3’de verilmiştir.

Reaktörden çıkan çözeltideki boyar madde derişimini belirlemek için standart çalışma doğrusundan elde edilen denklem kullanılmıştır. Bu denklem:

$$y = mc + n \quad (6-1)$$

olup, burada

- y = Absorbans,
- m = eğim,
- c = derişim (mg/L)
- n = sabit’ tir.

#### 6.1.5. Verim hesabında kullanılan eşitlikler

##### 6.1.5.1. Yüzde giderim;

$$\% \text{ Giderim} = \frac{(C_0 - C)}{C_0} \times 100 \quad (6-2)$$

$C_0$  = Başlangıç derişimi (mg/L)

C = Son derişim (mg/L)

##### 6.1.5.2. Enerji tüketimi;

$$\text{Enerji tüketimi (kwh/m}^3\text{)} = \frac{I \times V}{v \times 10^3} \quad (6-3)$$

V = Toplam reaktör gerilimi (Volt, V)

I = Reaktörden geçen akım (Amper, A)

v = Reaktörden geçen çözelti akış hızı ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

Eşitlik 6.1, 6.2 ve 6.3 ile ilgili örnek hesaplamalar EK 3’de verilmiştir.

## 6.2. Ön Deneme Çalışmaları

Deneysel çalışmalarda incelemeyi düşündüğümüz parametreleri test etmek üzere gerçekleştirilen ön çalışmalarda, en etkin aktif karbon/perlit karışımını belirlemek üzere gerilim, akış hızı ve derişim değerleri parametre olarak kullanılmıştır. Aktif karbon ve perlitlerin 6:1, 8:1 ve 10:1 oranlarında karıştırılması ile elde edilen deneyler sonucunda, 8:1 oranındaki karışımın kullanılmasının uygun olacağına karar verilmiştir. Bu amaçla 5, 10, 15 ve 20 V gerilimlerde,  $1,11 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{h}$ ,  $1,86 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{h}$  ve  $2,61 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{h}$  'lik 3 ayrı akış hızlarında ve 30, 40 ve 100 mg/L'lik 3 ayrı boyar madde derişiminde elektroadsorpsiyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen bazı sonuçlar şöyledir; 100 mg/L derişimindeki boyar madde kullanıldığında (15 V,  $1,11 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{h}$ ,  $l=25$  cm) 8:1'lik karışımında giderim % 90,47 ve enerji tüketimi  $0,425 \text{ kwh}/\text{m}^3$ , 6:1'lik karışımında ise giderim % 82,22 ve enerji tüketimi  $0,493 \text{ kwh}/\text{m}^3$  olarak bulunmuştur.

30 mg/L derişimli boyar madde kullanılan bir başka deneyde (20V,  $2,61 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{h}$ ,  $l=25$  cm) 8:1'lik karışımında giderim % 87,60 ve enerji tüketimi  $0,373 \text{ kwh}/\text{m}^3$ , 10:1'lik karışımında ise giderim % 84,83 ve enerji tüketimi  $0,766 \text{ kwh}/\text{m}^3$  olarak hesaplanmıştır.

Ön deneme amaçlı bir başka çalışmada, gerilimin giderime etkisini görebilmek üzere 50V'luk gerilimlerde çalışılmış ve bu gerilim değerinde aktif karbonların çok küçük parçacıklar haline geldiği farkedilmiştir. Bu durum aktif karbonların, deneysel çalışma sonrası yıkama suları ile reaktörün alt kısmından uzaklaşmasına, dolayısıyla aktif karbon kaybına ve verimin düşmesine neden olmuştur. Bunu önlemek ya da en aza indirmek için deneysel çalışmalarda yüksek gerilim değerlerine çıkılmayarak; 5, 10, 15 ve 20 V gerilimlerde çalışılmıştır.

### 6.2.1. Adsorpsiyon izotermlerinin elde edilişi

Çalışmalarda kullanılan adsorbanlar  $105^\circ\text{C}$ 'ta 2 saat kurutularak rejenere edilmiştir. Altı erlene farklı miktarlarda adsorban ve derişimi bilinen saf boya çözeltisinden 100'er mL konulmuş, Jar testi cihazında, 90 rpm karıştırma hızında 2,5 saat karıştırılarak çalkalandıktan sonra mavi bant süzgeç kağıdından süzölmüştür. Süzöntülerin absorbans değerleri yardımıyla her bir çözeltinin derişimleri saptanmıştır. Adsorpsiyon sonrası çözeltilerin son derişimlerine karşılık birim adsorban başına adsorplanan madde miktarları grafiğe geçirilerek izoterm elde edilmiştir.

### 6.3. Elektroadsorpsiyon Sonuçları

Çalışmalarda, 5, 25 ve 45 cm'lik yatak derinliklerinde (I) çalışılmıştır. Her bir deney setinde üç ayrı akış hızı ( $1,11 \times 10^{-3}$ ,  $1,86 \times 10^{-3}$  ve  $2,61 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/h) ve dört farklı gerilimde (5, 10, 15 ve 20 V) elektroadsorpsiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Bütün deneylerde 8:1 oranında aktif karbon/perlit karışımı kullanılmıştır. Ayrıca çalışmalarda, destek elektrolit olarak kullanılan 0,1 ve 0,3 M NaCl'nin renk giderimine etkisi de araştırılmıştır.

#### 6.3.1. 5 cm'lik elektrot yatak derinliğinde elde edilen sonuçlar

Elektrot yatak derinliği 5 cm olduğunda elde edilen sonuçlar Çizelge 6.1-6.5 ve bu sonuçlardan elde edilen verilerle çizilen Gerilim-Son derişim (C) grafikleri şekil 6.3-6.7 arasında verilmiştir.

Bütün çalışmalarda aynı elektrokimyasal reaktör kullanılmış olup, düzeneğin şekli daha önce 6. bölümde "Deneysel Çalışmalar" başlığı altında verilmiştir (Bkz. Şekil 6.2). Şekil 6.8'de farklı derişimlerde destek elektrolit içeren 30 mg/L çözelti için gerilim-son derişim grafiği, Şekil 6.9'da farklı derişimlerde boyar madde içeren çözeltiler için gerilim-son derişim grafiği ve Şekil 6.10'da ise 30 mg/L boyar madde içeren çözelti için farklı akış hızlarında gerilim-enerji tüketimi grafiği verilmiştir.

Çizelge 6.1. 30 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 5cm, 8:1)

Akış hızı (m <sup>3</sup> /h),E-03	Gerilim (V)	Akım (mA)	Son derişim (C) (mg/L)	% Giderim	Enerji tüketimi (kwh/m <sup>3</sup> ),E-02
1,11	5	23,5	18,95	36,83	11
	10	58,7	16,85	43,83	53
	15	80,3	16,12	46,26	109
	20	135,5	11,87	60,42	241
1,86	5	25,5	25,19	16	7
	10	54,8	23,49	21,7	29
	15	83,2	22,9	23,65	67
	20	141,4	21,14	29,51	152
2,61	5	26,3	27	9,98	5
	10	55,1	26,46	11,77	21
	15	87,4	25,44	15,19	50
	20	150,6	24,22	19,26	115

Çizelge 6.2. 30 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 5cm, 8:1, 0.1 M NaCl)

Akış hızı (m <sup>3</sup> /h),E-03	Gerilim (V)	Akım (mA)	Son derişim (C) (mg/L)	% Giderim	Enerji tüketimi (kwh/n <sup>3</sup> ),E-02
1,11	5	36,7	16,51	44,97	17
	10	89,2	13,77	54,07	80
	15	161,6	10,75	64,16	218
	20	222	4,161	86,13	400
1,86	5	38,7	22,22	25,93	10
	10	95,3	18,17	39,43	51
	15	169,4	15,92	46,92	137
	20	260	12,31	58,96	280
2,61	5	39,8	24,76	17,47	8
	10	97,9	21,19	29,34	38
	15	170,1	19,05	36,5	98
	20	278	15,58	48,05	213

Çizelge 6.3. 30 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 5cm, 8:1, 0.3 M NaCl)

Akış hızı (m <sup>3</sup> /h),E-03	Gerilim (V)	Akım (mA)	Son derişim (C) (mg/L)	% Giderim	Enerji tüketimi (kwh/n <sup>3</sup> ),E-02
1,11	5	53,6	11,82	60,58	24
	10	123	8,65	71,16	111
	15	214	5,57	81,41	289
	20	255	2,257	92,47	459
1,86	5	57,7	16,17	46,1	16
	10	135	10,26	65,79	73
	15	244	8,65	71,16	197
	20	320	5,33	82,22	344
2,61	5	59,3	20,17	32,76	11
	10	145	13,24	55,87	56
	15	263	11,97	60,09	151
	20	342	10,36	65,46	262

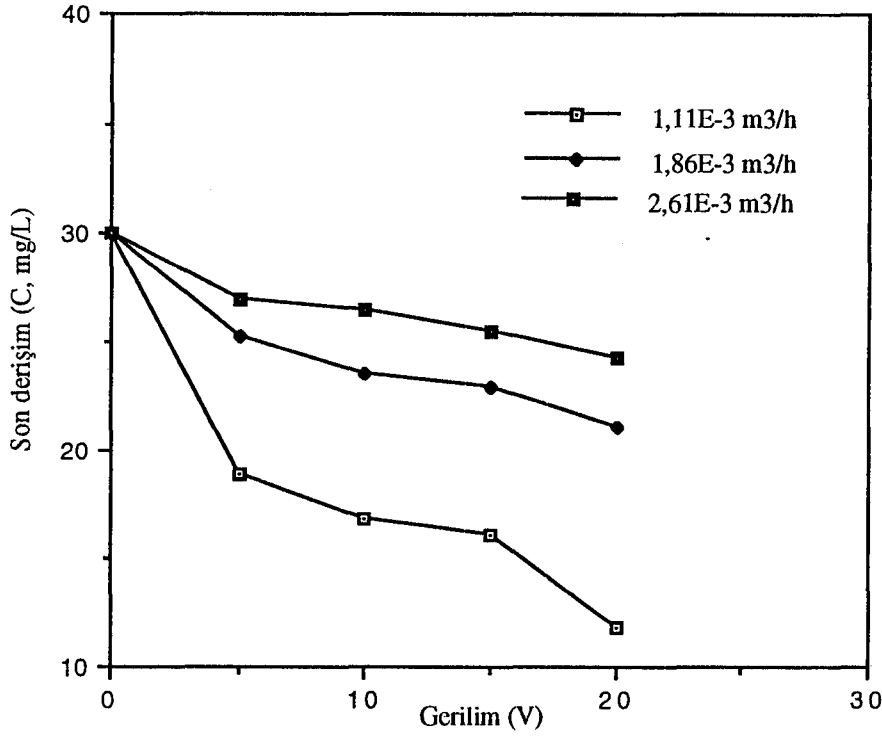


Çizelge 6.4. 40 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 5cm, 8:1)

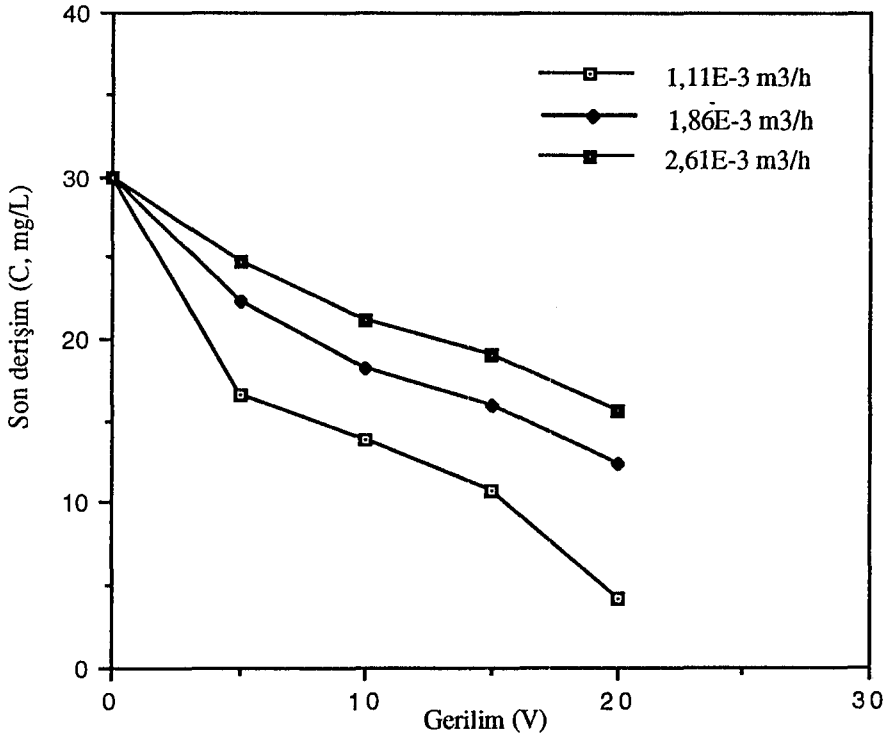
Akış hızı (m <sup>3</sup> /h) ,E-03	Gerilim (V)	Akım (mA)	Son derişim (C) (mg/L)	% Giderim	Enerji tüketimi (kwh/m <sup>3</sup> ) ,E-02
1,11	5	12,3	25,1	37,25	5,54
	10	36,3	22,8	43	32,7
	15	63	21,97	45	85
	20	125,8	16,27	59,33	227
1,86	5	11,8	30,3	24,25	3
	10	37,1	28,52	28,27	20
	15	75,3	25,78	35,55	61
	20	148,6	23,78	40,55	160
2,61	5	12,5	33,25	16,87	2
	10	35,8	31,49	21,27	14
	15	73,8	30,37	24,07	42
	20	123,8	29,25	26,87	95

Çizelge 6.5. 100 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 5cm, 8:1)

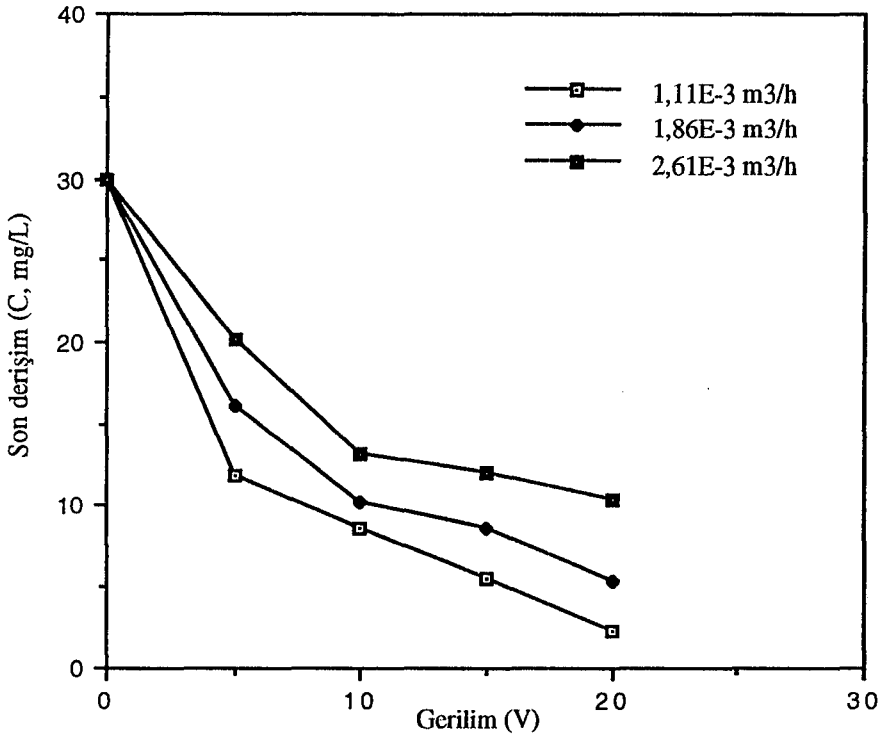
Akış hızı (m <sup>3</sup> /h) ,E-03	Gerilim (V)	Akım (mA)	Son derişim (C) (mg/L)	% Giderim	Enerji tüketimi (kwh/m <sup>3</sup> ) ,E-02
1,11	5	14	62,29	37,71	6
	10	27,1	59,12	40,88	24
	15	50	56,97	43,02	68
	20	62,5	36,67	63,33	113
1,86	5	13,8	86,95	13,05	4
	10	28,3	85,67	14,33	15
	15	50,4	83,18	16,82	41
	20	65	74,35	25,65	70
2,61	5	18,6	92,75	7,24	4
	10	35,6	89,77	10,23	14
	15	52,5	88,21	11,79	30
	20	61,7	82,99	17,01	47



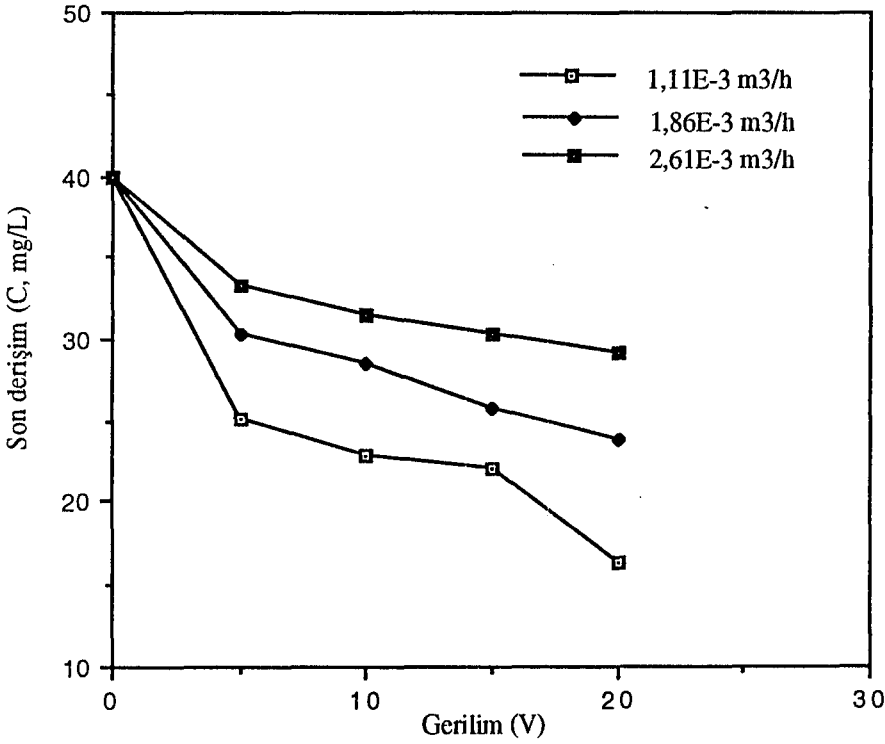
Şekil 6.3. 30 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değişimi (l= 5cm, 8:1)



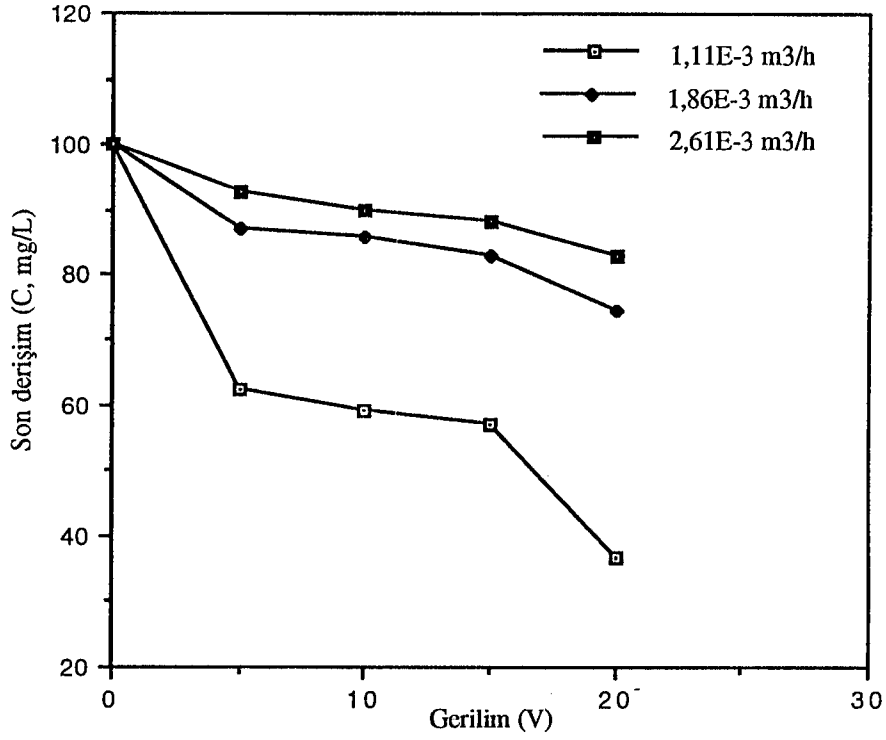
Şekil 6.4. 30 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değişimi (l= 5cm, 8:1, 0,1 M NaCl)



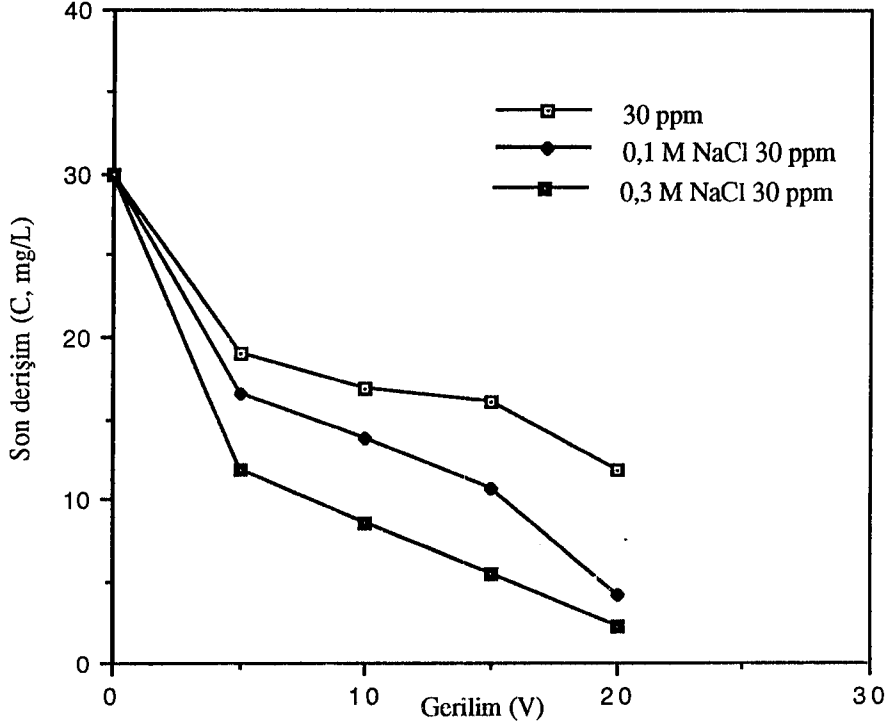
Şekil 6.5.30 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değişimi (l= 5cm, 8:1, 0,3 M NaCl)



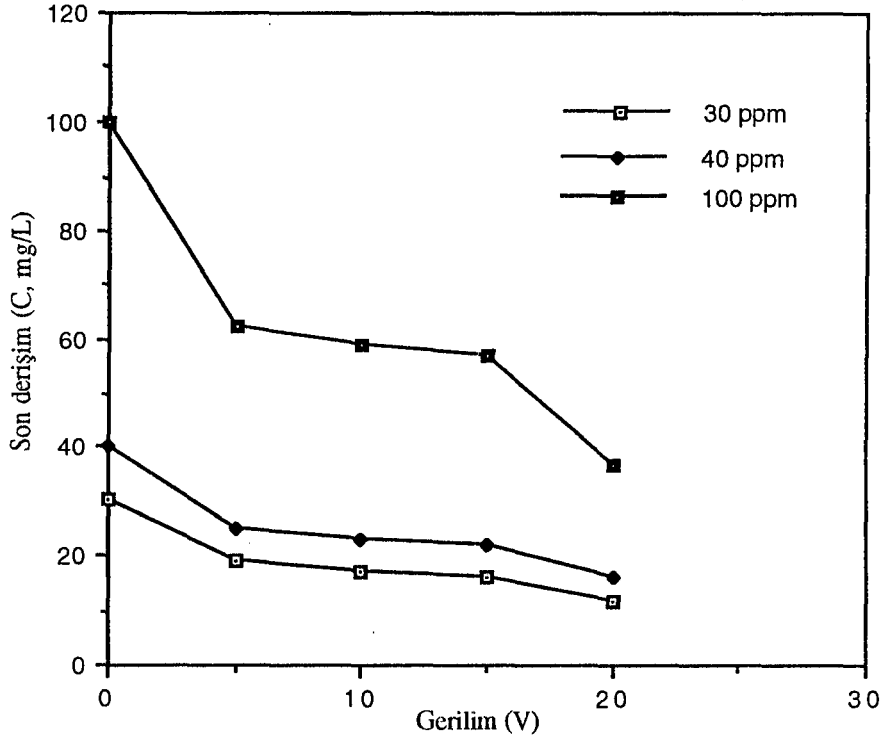
Şekil 6.6. 40 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değişimi (l= 5cm, 8:1)



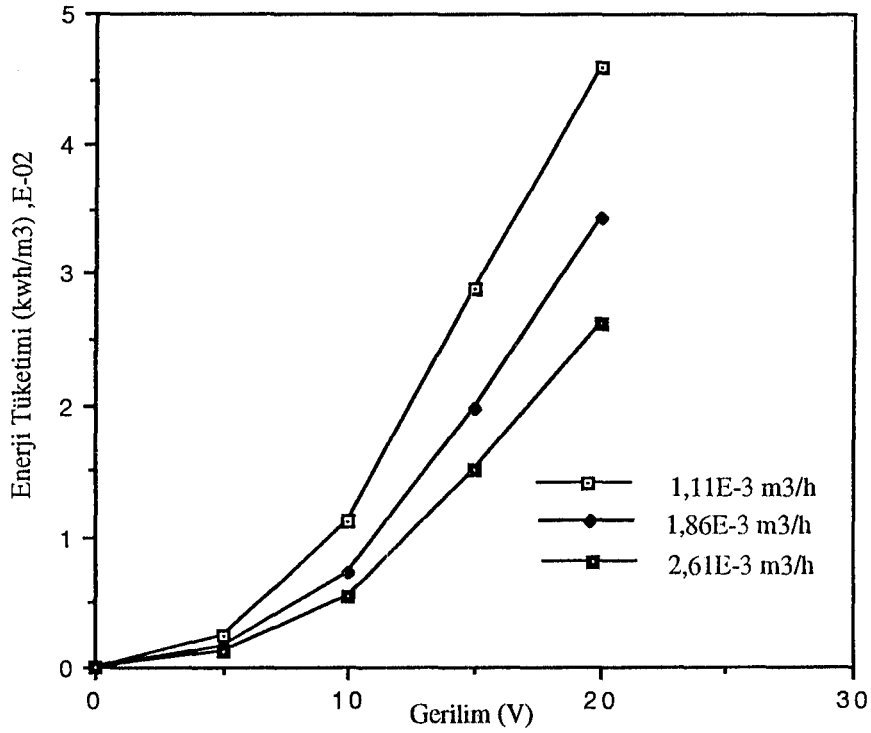
Şekil 6.7. 100 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değişimi (l= 5cm, 8:1)



Şekil 6.8. Farklı derişimlerde destek elektrolit (NaCl) içeren 30 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değişimi (l= 5cm, 1,11x10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>/h, 8:1)



Şekil 6.9. Farklı derişimlerde başlangıç boyar maddesi içeren çözeltiler için kalan derişimin gerilimle değişimi ( $l= 5\text{cm}$ ,  $1,11 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$ , 8:1)



Şekil 6.10. 30 mg/L başlangıç boyar maddesi içeren çözeltiler için farklı akış hızlarında enerji tüketiminin gerilimle değişimi ( $l= 5\text{cm}$ ,  $1,11 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$ , 8:1)

### 6.3.2. 25 cm'lik elektrot yatak derinliğinde elde edilen sonuçlar

Bu deney içinde elde edilen sonuçlar Çizelge 6.6-6.14 arasında ve her bir çalışma için gerilim-son derişim (C) ilişkisi ise Şekil 6.11-6.19 arasında verilmiştir.

Ayrıca, 25 cm'lik elektrot yatak derinliğinde, reaktörden geçen çözelti hacmi ile adsorplama kapasitesindeki değişimi gözleyebilmek için çalışmalar gerçekleştirilmiş ve sonuçlar 6.15 ve 6.16'daki Çizelgeler ve 6.20 ve 6.21'deki Şekillerde verilmiştir. Şekil 6.22'de farklı derişimlerde destek elektrolit içeren 30 mg/L çözelti için gerilim-son derişim, Şekil 6.23'te farklı derişimlerde başlangıç boyar maddesi içeren çözeltiler için gerilim-son derişim ve Şekil 6.24'de farklı derişimlerde başlangıç boyar maddesi içeren çözeltiler için hacim-enerji tüketimi grafikleri görülmektedir.

Çizelge 6.6. 30 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 25cm, 8:1)

Akış hızı ( $m^3/h$ ), E-03	Gerilim (V)	Akım (mA)	Son derişim (C) (mg/L)	% Giderim	Enerji tüketimi (kwh/ $m^3$ ), E-02
1,11	5	19,4	4,65	84,5	9
	10	44,2	3,087	89,7	40
	15	72,8	1,525	94,9	98
	20	87,4	0	100	158
1,86	5	20,9	6,699	77,67	6
	10	45,2	5,235	82,55	24
	15	74,5	3,477	88,4	60
	20	95,8	1,427	95,24	103
2,61	5	21,4	10,55	64,8	4
	10	48,1	8,99	70	18
	15	75,3	7,138	76,2	43
	20	100,7	4,697	84,34	77

Çizelge 6.7. 30 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 25cm, 8:1, 0,1 M NaCl)

Akış hızı ( $m^3/h$ ), E-03	Gerilim (V)	Akım (mA)	Son derişim (C) (mg/L)	% Giderim	Enerji tüketimi (kwh/ $m^3$ ), E-02
1,11	5	5,8	2,89	90,37	3
	10	15,8	2,5	91,66	14
	15	30,6	0,695	97,68	41
	20	45	0	100	81
1,86	5	7,1	6,06	79,8	2
	10	15,5	3,96	86,8	8
	15	29,3	3,04	89,87	24
	20	44,2	0,256	99,14	48
2,61	5	7,3	9,72	67,6	1
	10	14,9	8,11	72,96	6
	15	28,9	6,6	78	17
	20	48,7	3,72	87,6	37

Çizelge 6.8. 30 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 25cm, 8:1, 0,3 M NaCl)

Akış hızı (m <sup>3</sup> /h),E-03	Gerilim (V)	Akım (mA)	Son derişim (C) (mg/L)	% Giderim	Enerji tüketimi (kwh/m <sup>3</sup> ),E-02
1,11	5	26,3	6,31	78,97	12
	10	59,4	4,55	84,83	54
	15	93,1	2,355	92,15	126
	20	105,7	0	100	190
1,86	5	29,7	7,87	73,76	8
	10	65,6	6,504	78,32	35
	15	101,5	4,698	84,34	82
	20	125,3	2,062	93,13	135
2,61	5	30,3	11,43	61,88	6
	10	66,5	9,969	66,77	26
	15	104,7	8,456	71,81	60
	20	133,3	5,87	80,43	102

Çizelge 6.9. 40 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 25cm, 8:1)

Akış hızı (m <sup>3</sup> /h),E-03	Gerilim (V)	Akım (mA)	Son derişim (C) (mg/L)	% Giderim	Enerji tüketimi (kwh/m <sup>3</sup> ),E-02
1,11	5	21,3	11,43	71,4	10
	10	47,3	10,21	74,46	43
	15	74,4	8,55	78,6	101
	20	101,2	4,31	89,23	182
1,86	5	22,5	14,26	64,33	6
	10	49,3	12,6	68,48	27
	15	78,1	11,678	70,8	63
	20	104	9,09	77,27	112
2,61	5	22,8	18,56	54,59	4
	10	50,2	17,34	56,6	19
	15	79	15,92	60,18	45
	20	106,9	13,38	66,5	82

Çizelge 6.10. 40 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 25cm, 8:1, 0,1 M NaCl)

Akış hızı (m <sup>3</sup> /h) ,E-03	Gerilim (V)	Akım (mA)	Son derişim (C) (mg/L)	% Giderim	Enerji tüketimi (kwh/m <sup>3</sup> ) ,E-02
1,11	5	6,9	7,77	80,58	3
	10	16,9	7,33	81,67	15
	15	28,9	4,75	88,13	39
	20	43,7	0	100	79
1,86	5	6,3	10,64	73,4	2
	10	17	9,28	76,8	9
	15	30,1	7,32	81,7	24
	20	43,9	2,6	93,5	47
2,61	5	6,9	16,56	58,6	1
	10	17,2	14,32	64,2	7
	15	29,3	12,5	68,75	17
	20	44,2	8,24	79,4	34

Çizelge 6.11. 40 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 25cm, 8:1, 0,3 M NaCl)

Akış hızı (m <sup>3</sup> /h) ,E-03	Gerilim (V)	Akım (mA)	Son derişim (C) (mg/L)	% Giderim	Enerji tüketimi (kwh/m <sup>3</sup> ) ,E-02
1,11	5	24,8	10,31	74,22	11
	10	58,1	8,26	79,34	52
	15	84,7	6,162	84,59	114
	20	98,3	2,696	93,26	177
1,86	5	28,1	12,41	68,97	8
	10	64,5	10,6	73,49	35
	15	95,8	8,31	79,22	77
	20	120,1	4,5	88,74	129
2,61	5	29,4	16,41	58,97	6
	10	64,7	14,85	62,87	25
	15	97,6	12,8	67,99	56
	20	135,3	9,77	75,56	104



Çizelge 6.12. 100 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 25cm, 8:1)

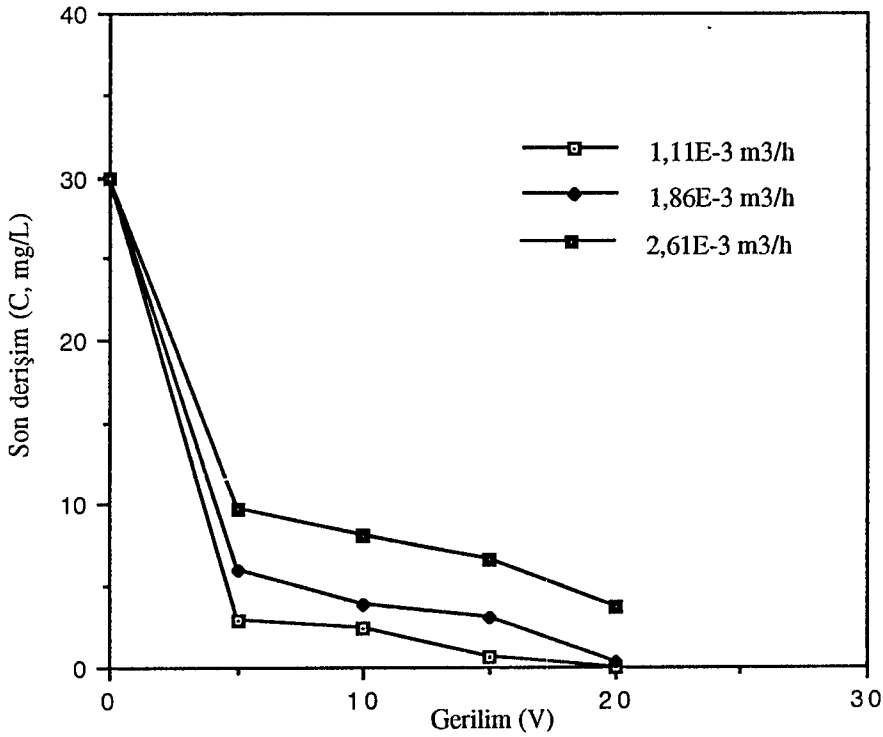
Akış hızı (m <sup>3</sup> /h),E-03	Gerilim (V)	Akım (mA)	Son derişim (C) (mg/L)	% Giderim	Enerji tüketimi (kwh/m <sup>3</sup> ),E-02
1,11	5	5,7	20,27	79,73	3
	10	18	16,4	83,6	16
	15	31,5	9,53	90,47	43
	20	47,2	1,769	98,23	85
1,86	5	5,9	30,37	69,63	2
	10	19,8	21,44	78,56	11
	15	31,8	17,78	82,22	26
	20	47,7	7,58	92,42	51
2,61	5	5,3	42,5	57,47	1
	10	20,1	38,47	61,53	8
	15	32,4	33,15	66,85	19
	20	48,7	22,76	77,24	37

Çizelge 6.13. 100 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 25cm, 8:1, 0,1 M NaCl)

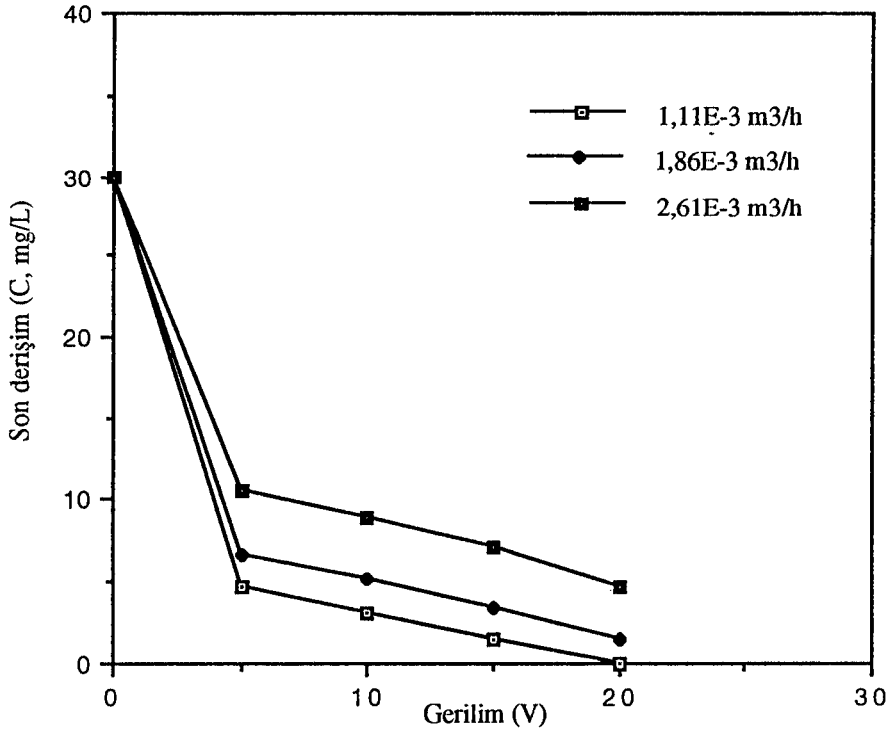
Akış hızı (m <sup>3</sup> /h),E-03	Gerilim (V)	Akım (mA)	Son derişim (C) (mg/L)	% Giderim	Enerji tüketimi (kwh/n <sup>3</sup> ),E-02
1,11	5	18,7	22,71	77,29	8
	10	37,9	18,22	81,78	34
	15	60,8	10,5	89,49	82
	20	60,5	0	100	109
1,86	5	19,8	33,2	66,8	5
	10	42,5	27,64	72,36	23
	15	64,4	22,27	77,73	52
	20	74,2	10,65	89,35	80
2,61	5	20,5	45,99	54,01	4
	10	67,8	39,5	60,5	26
	15	72,5	34,47	65,53	42
	20	90,4	24,66	75,34	69

Çizelge 6.14. 100 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l=25cm, 8:1, 0,3 M NaCl)

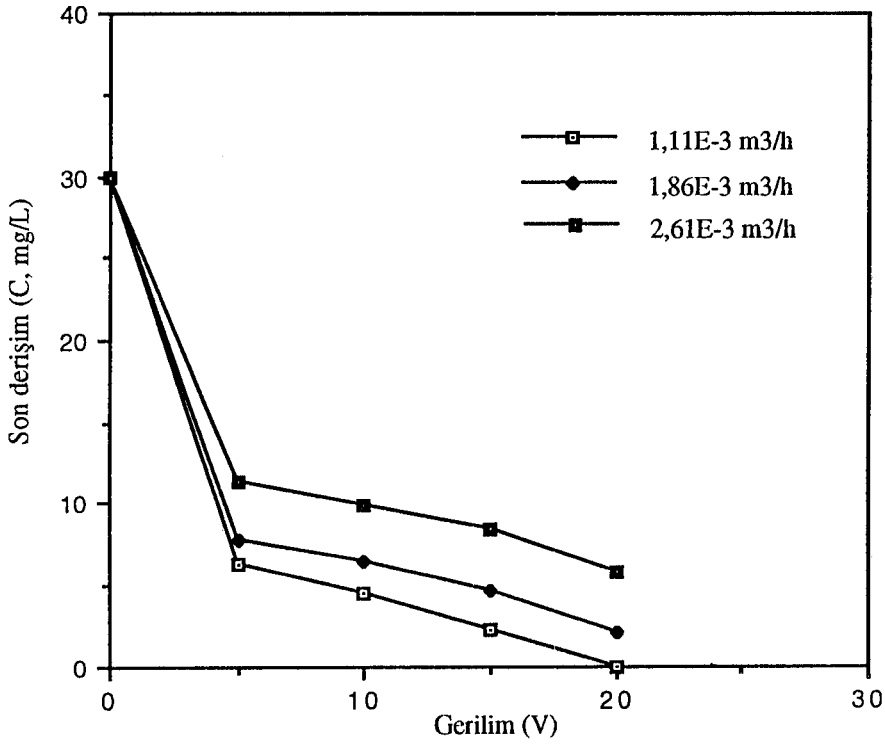
Akış hızı (m <sup>3</sup> /h) ,E-03	Gerilim (V)	Akım (mA)	Son derişim (C) (mg/L)	% Giderim	Enerji tüketimi (kwh/m <sup>3</sup> ) ,E-02
1,11	5	27,4	24,12	75,88	12
	10	61,5	18,17	81,83	55
	15	91,5	4,75	95,25	124
	20	101,2	0	100	182
1,86	5	30,2	33,35	66,65	8
	10	67,1	27,98	72,02	36
	15	102,5	17,29	82,71	83
	20	118,2	2,6	97,4	127
2,61	5	30,7	45,41	54,59	6
	10	68,3	40,28	59,72	26
	15	105,7	31,35	68,65	61
	20	128,5	6	94	98



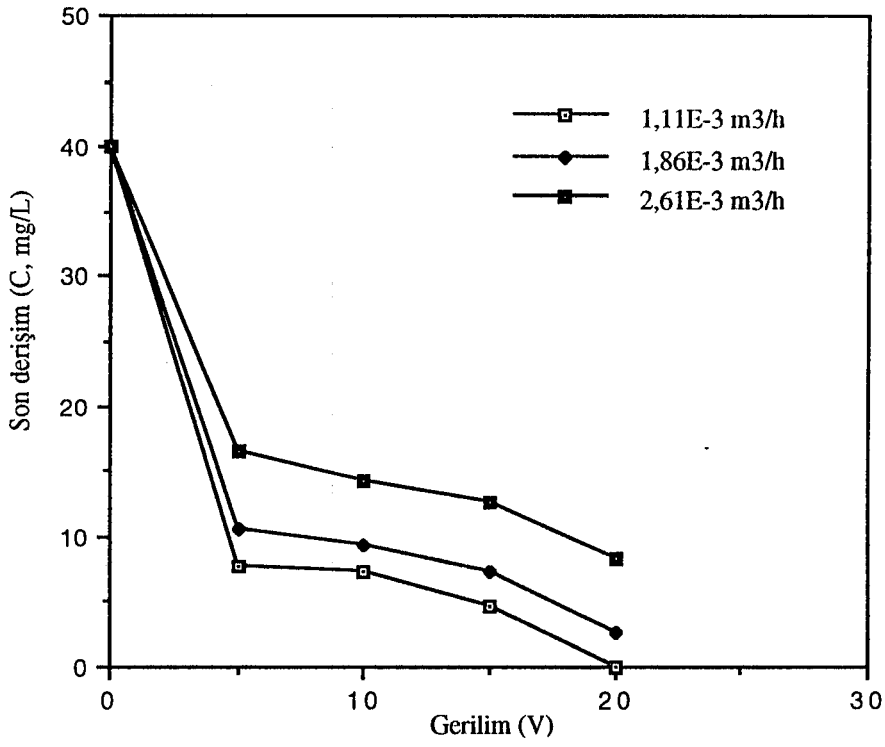
Şekil 6.11. 30 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değişimi (l= 25cm, 8:1)



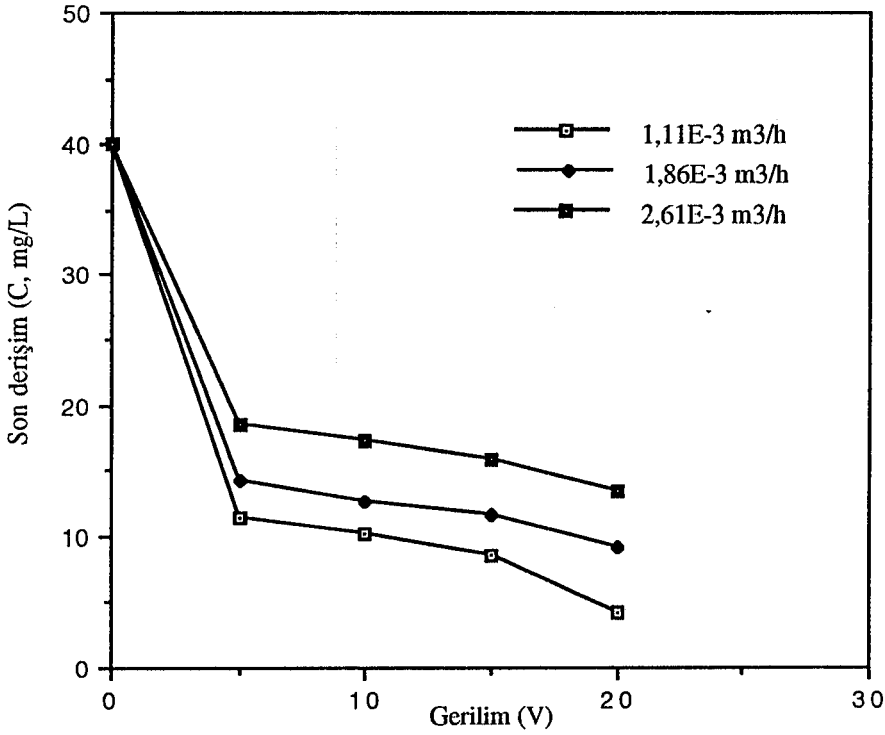
Şekil 6.12. 30 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değişimi (l= 25cm, 8:1, 0,1 M NaCl)



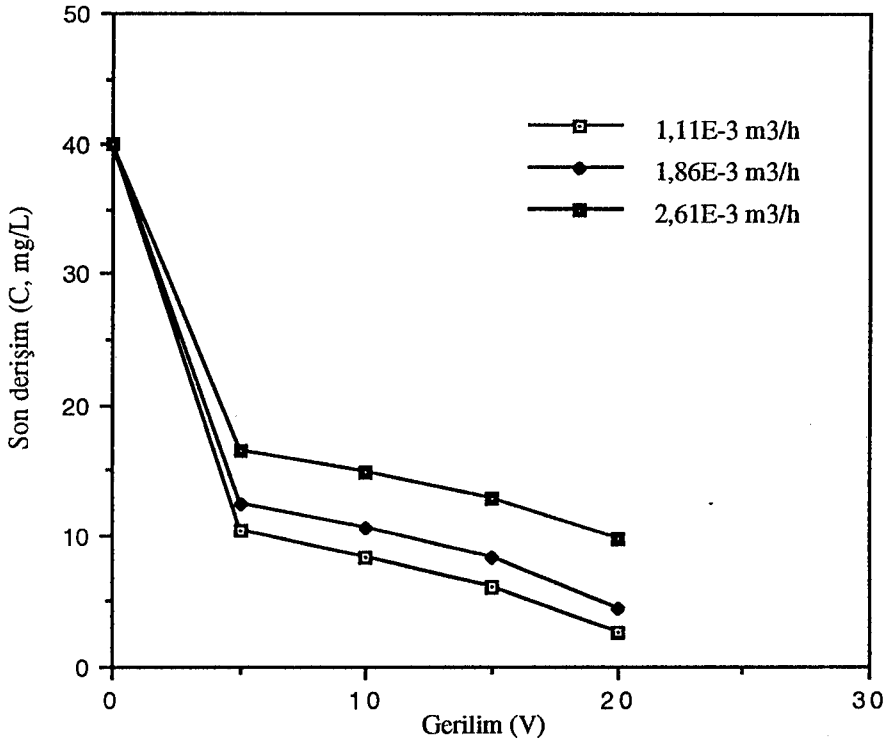
Şekil 6.13. 30 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değişimi (l= 25cm, 8:1, 0,3 M NaCl)



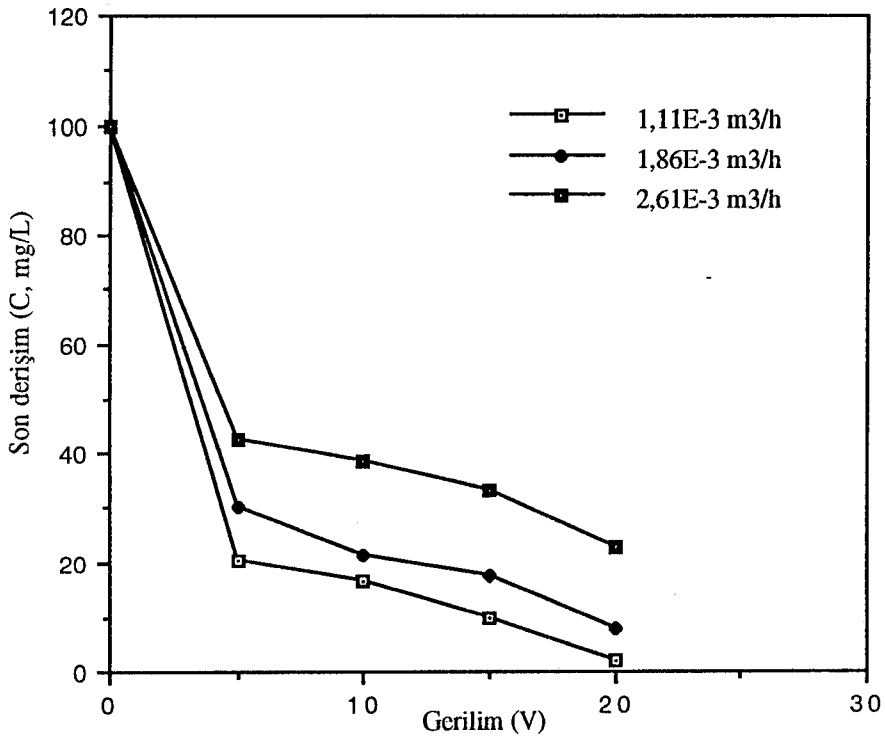
Şekil 6.14. 40 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değişimi (l= 25cm, 8:1)



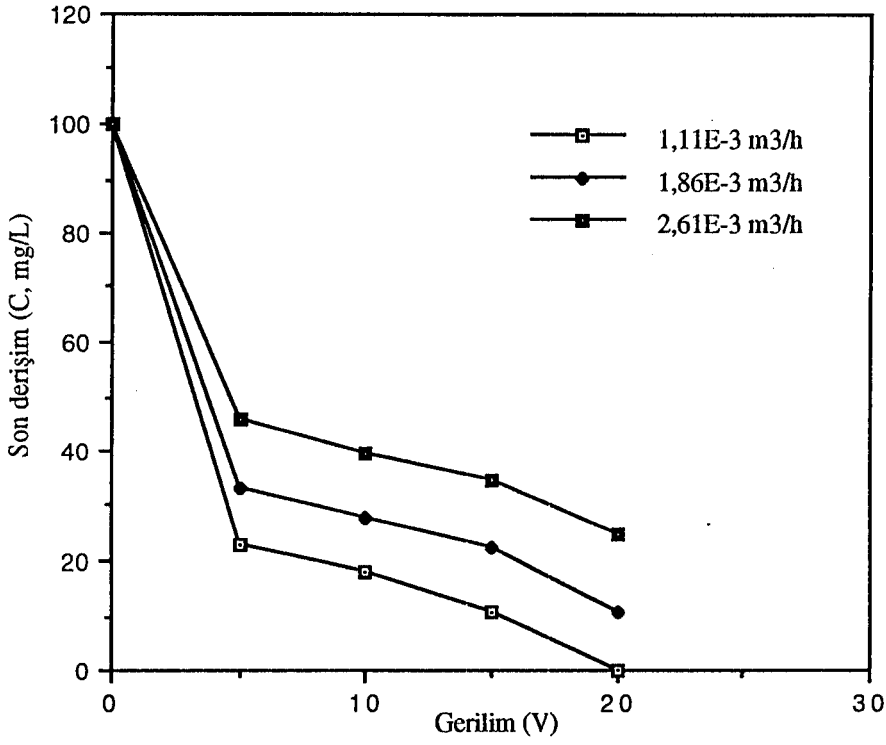
Şekil 6.15. 40 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değişimi (l= 25cm, 8:1, 0,1 M NaCl)



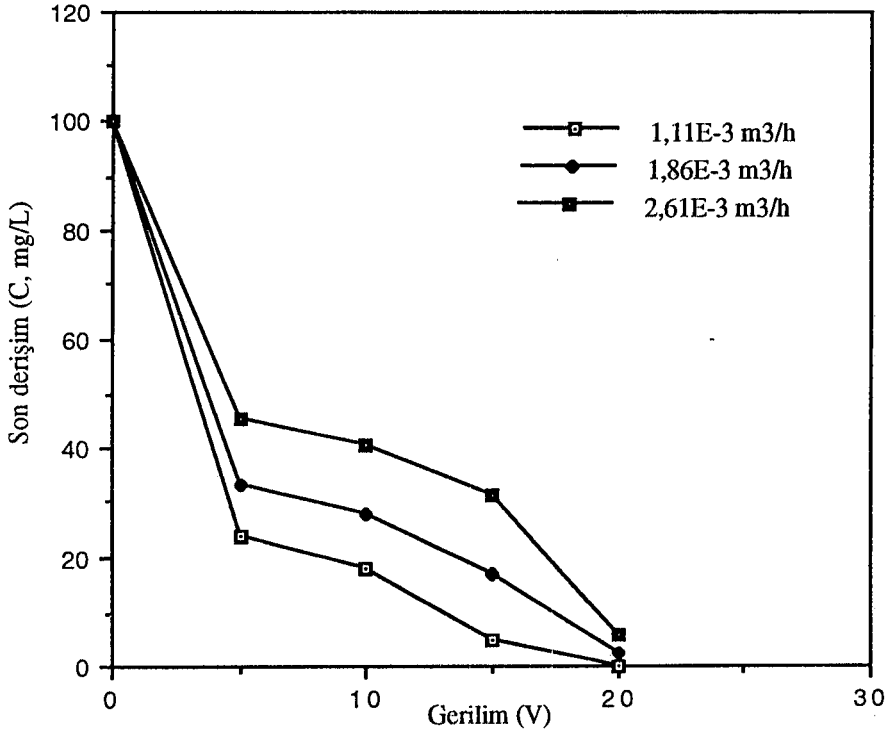
Şekil 6.16. 40 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değişimi (l= 25cm, 8:1, 0,3 M NaCl)



Şekil 6.17. 100 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değişimi (l= 25cm, 8:1)



Şekil 6.18. 100 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değişimi (l= 25cm, 8:1, 0,1 M NaCl)



Şekil 6.19. 100 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değişimi (l= 25cm, 8:1, 0,3 M NaCl)

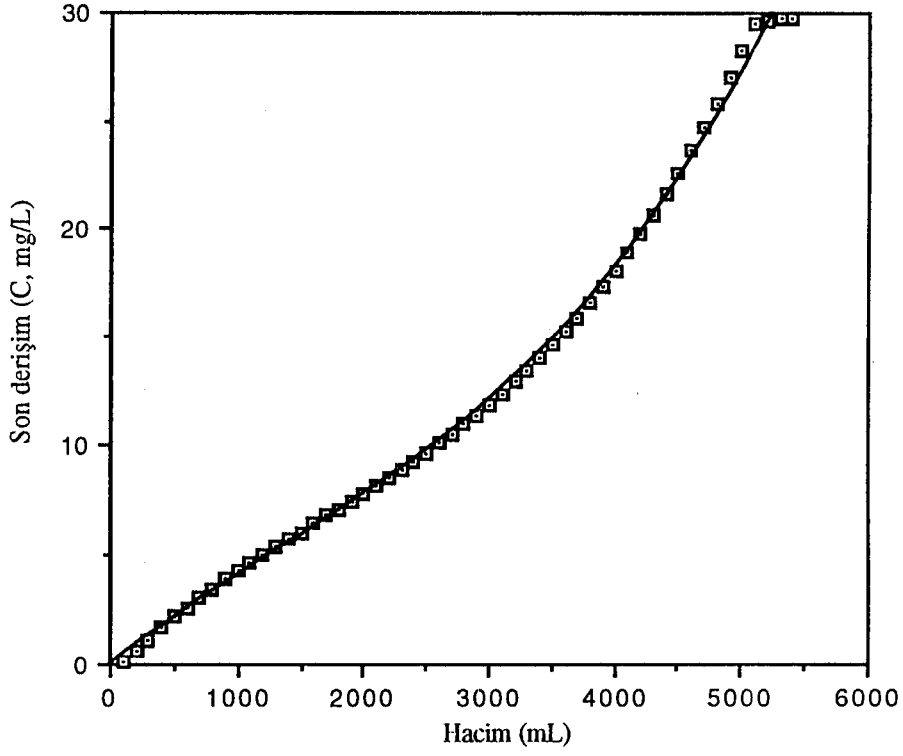
Çizelge 6.15. 30 mg/L çözelti ile elde edilen sonuçlar (10 V, l= 25cm, 8:1, 1,857x10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>/h)

Hacim (mL)	Akım (mA)	Son Derişim (mg/L)	% giderim	Enerji tüketimi (kwh/m <sup>3</sup> ), E-02
100	7,2	0,0732	99,75	3,87
200	7,2	0,627	97,91	3,87
300	6,6	1,15	96,16	3,55
400	6,5	1,66	94,46	3,50
500	6,2	2,14	92,87	3,33
600	6,3	2,60	91,33	3,39
700	6,3	3,04	89,87	3,39
800	6,2	3,46	88,47	3,33
900	6,2	3,87	87,10	3,33
1000	6,2	4,26	87,80	3,33
1100	6,1	4,65	84,50	3,28
1200	6,3	5,02	83,27	3,39
1300	6,2	5,38	82,07	3,33
1400	6,2	5,74	80,86	3,33
1500	6,2	6,02	79,93	3,33
1600	6,2	6,43	78,55	3,33
1700	6,1	6,78	77,40	3,28
1800	6,1	7,12	76,27	3,28
1900	6,1	7,47	75,10	3,28
2000	6,1	7,82	73,94	3,28
2100	5,9	8,17	72,76	3,18
2200	5,9	8,53	71,55	3,18
2300	5,9	8,90	70,32	3,18
2400	5,8	9,28	69,06	3,12
2500	5,7	9,67	67,75	3,07
2600	5,7	10,07	66,43	3,07
2700	5,7	10,49	65,02	3,07
2800	5,7	10,93	63,56	3,07
2900	5,6	11,38	62,05	3,01
3000	5,6	11,86	60,47	3,01
3100	5,6	12,35	58,83	3,01
3200	5,6	12,87	57,10	3,01
3300	5,5	13,43	55,23	2,96
3400	5,5	13,99	53,37	2,96
3500	5,5	14,60	51,33	2,96
3600	5,5	15,23	49,24	2,96
3700	5,5	15,89	47,02	2,96
3800	5,4	16,59	44,70	2,90
3900	5,4	17,33	42,23	2,90
4000	5,4	18,10	39,66	2,90
4100	5,4	18,90	37,00	2,90
4200	5,4	19,76	34,14	2,90
4300	5,4	20,66	31,12	2,90
4400	5,3	21,60	28,00	2,84
4500	5,3	22,58	24,73	2,84
4600	5,3	23,62	21,26	2,84
4700	5,3	24,70	17,65	2,84
4800	5,3	25,83	13,90	2,84
4900	5,3	27,02	9,93	2,84
5000	5,3	28,26	5,80	2,84
5100	5,3	29,56	1,46	2,84
5200	5,3	29,67	1,10	2,84
5300	5,3	29,70	1,00	2,84
5400	5,3	29,74	0,86	2,84

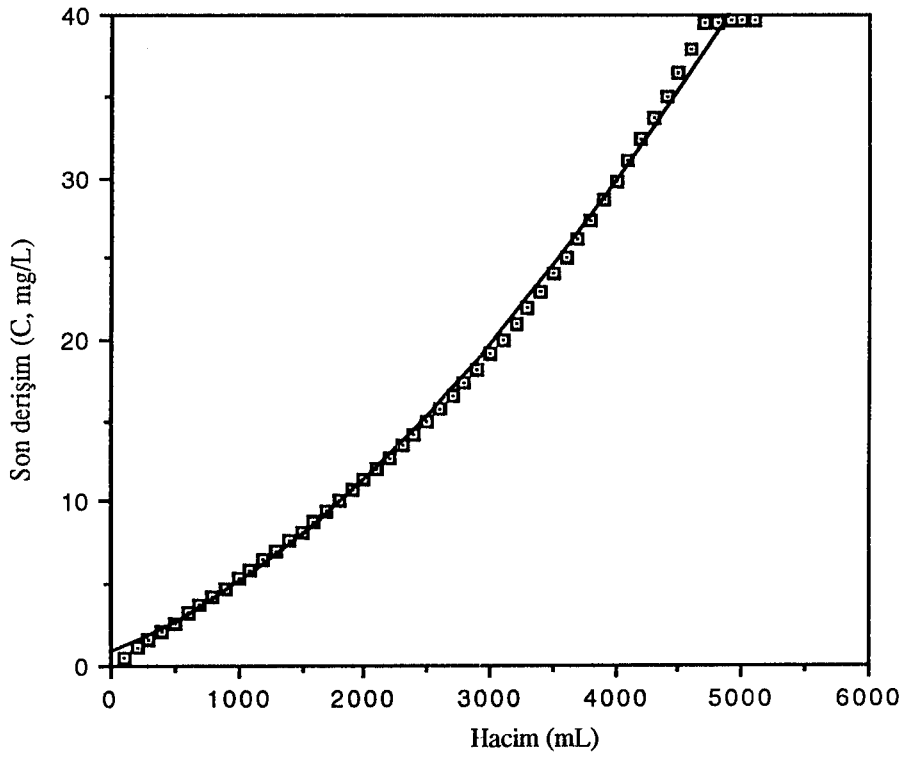
Çizelge 6.16. 40 mg/L çözelti ile elde edilen sonuçlar (10 V, l=25cm, 8:1, 1,857x10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>/h)

Hacim (mL)	Akım (mA)	Son Derişim (mg/L)	% giderim	Enerji tüketimi (kwh/m <sup>3</sup> ), E-02
100	8,3	0,528	98,68	4,47
200	8,3	1,06	97,35	4,47
300	8,2	1,59	96,03	4,41
400	8,2	2,12	94,70	4,41
500	8,2	2,65	93,38	4,41
600	8,2	3,18	92,05	4,41
700	8,1	3,72	90,70	4,36
800	8,1	4,25	89,37	4,36
900	7,8	4,79	88,02	4,2
1000	7,8	5,34	86,65	4,2
1100	7,8	5,90	85,25	4,2
1200	8,0	6,46	83,85	4,31
1300	8,0	7,03	82,42	4,31
1400	7,9	7,61	80,97	4,25
1500	7,9	8,21	79,47	4,25
1600	7,8	8,81	77,97	4,2
1700	7,8	9,43	76,43	4,2
1800	7,6	10,06	74,85	4,09
1900	7,6	10,71	73,22	4,09
2000	7,6	11,37	71,57	4,09
2100	7,5	12,05	69,87	4,04
2200	7,4	12,75	68,12	3,98
2300	7,4	13,47	66,32	3,98
2400	7,4	14,21	64,48	3,98
2500	7,2	14,97	62,58	3,87
2600	7,2	15,76	60,60	3,87
2700	7,2	16,57	58,59	3,87
2800	7,1	17,40	56,50	3,82
2900	7,1	18,26	54,35	3,82
3000	6,9	19,15	52,11	3,71
3100	6,9	20,06	49,85	3,71
3200	6,6	21,01	47,46	3,55
3300	6,6	21,98	45,05	3,55
3400	6,3	22,99	42,51	3,39
3500	6,3	24,03	39,93	3,39
3600	6,3	25,10	37,25	3,39
3700	6,3	26,21	34,36	3,39
3800	6,3	27,36	31,60	3,39
3900	6,2	28,54	28,65	3,33
4000	6,2	29,76	25,59	3,33
4100	6,2	31,01	22,45	3,33
4200	6,2	32,31	19,225	3,33
4300	6,1	33,65	15,875	3,28
4400	6,1	35,04	12,40	3,28
4500	6,1	36,46	8,85	3,28
4600	6,1	37,93	5,175	3,28
4700	6,1	39,45	1,38	3,28
4800	6,0	39,52	1,20	3,22
4900	6,0	39,63	0,925	3,22
5000	6,0	39,69	0,775	3,22
5100	6,0	39,74	0,65	3,22

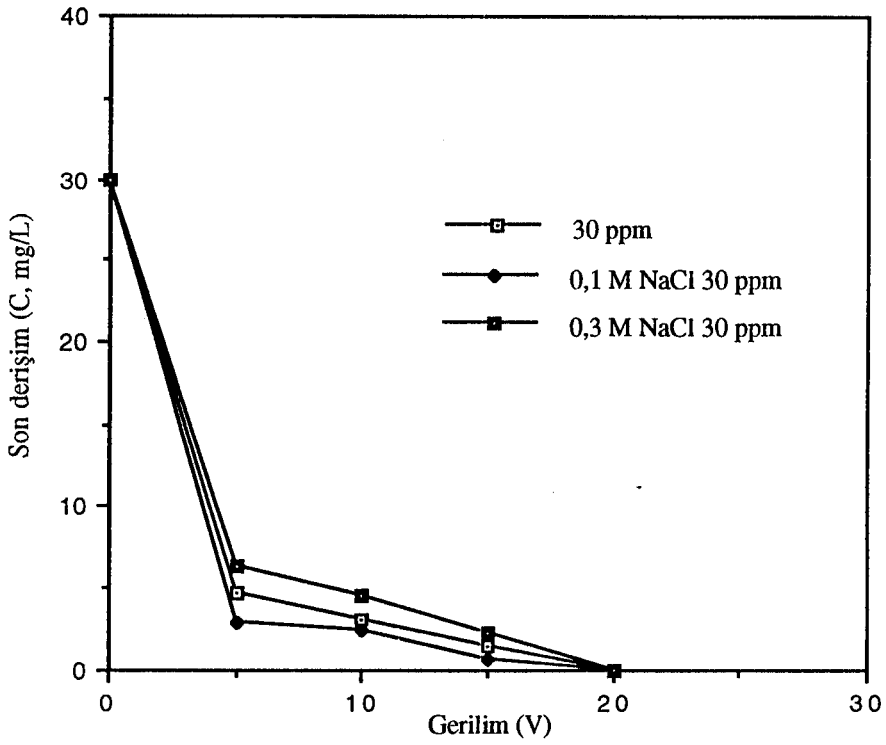




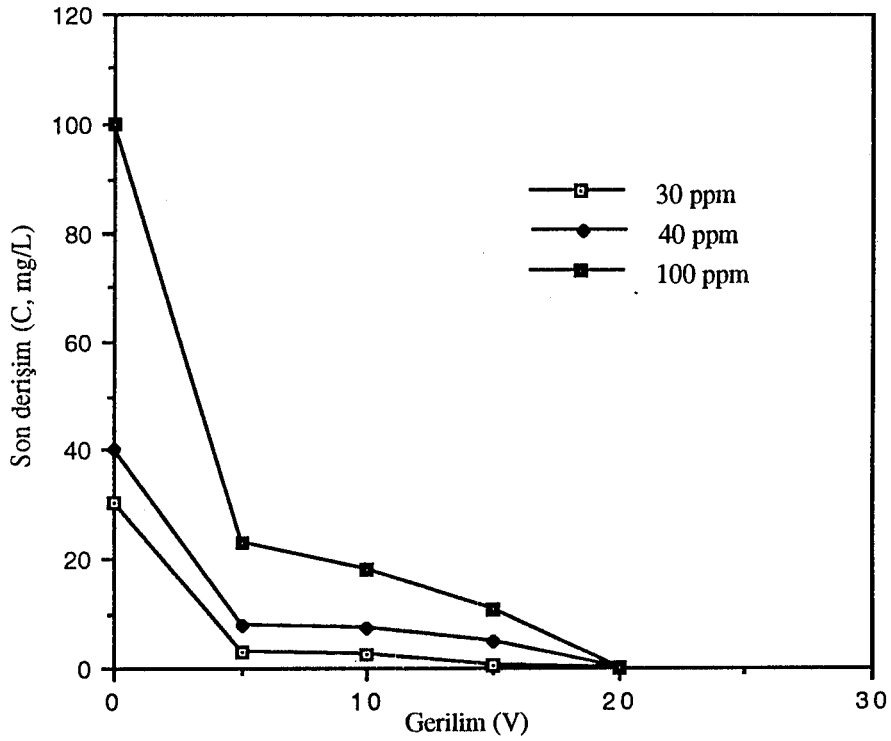
Şekil 6.20. 30 mg/L çözelti ile yapılan deneyler sonucu elde edilen kalan derişimin hacimle değişimi (10 V)



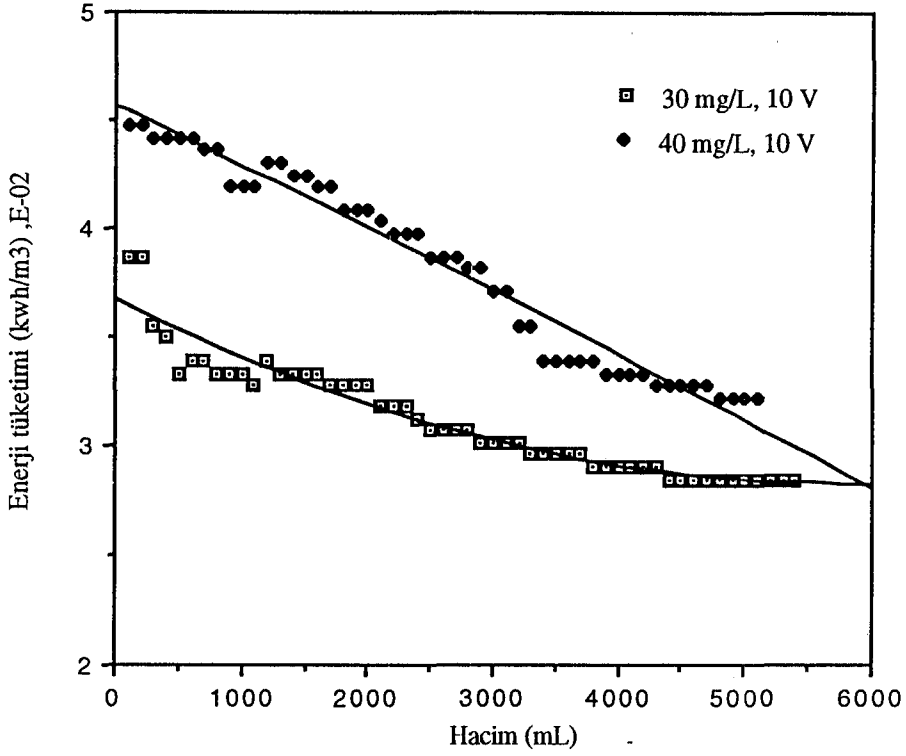
Şekil 6.21. 40 mg/L çözelti ile yapılan deneyler sonucu elde edilen kalan derişimin hacimle değişimi (10 V)



Şekil 6.22. Farklı derişimlerde destek elektrolit (NaCl) içeren 30 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değişimi ( $l= 25\text{cm}$ ,  $1,11 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$ , 8:1)



Şekil 6.23. Farklı derişimlerde başlangıç boyar maddesi içerin çözeltiler için kalan derişimin gerilimle değişimi ( $l= 25\text{cm}$ ,  $1,11 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$ , 0,1 M NaCl, 8:1)



Şekil 6.24. Farklı derişimlerde başlangıç boyar maddesi içeren çözeltiler için enerji tüketiminin hacimle değişimi ( $l= 25\text{cm}$ ,  $1,86 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$ , 8:1)

### 6.3.3. 45 cm'lik elektrot yatak derinliğinde elde edilen sonuçlar

Elektrot yatak derinliğinin 45 cm olduğu çalışmalarda elde edilen sonuçlar Çizelge 6.17-6.19 arasında ve gerilim-son derişim (C) grafikleri de Şekil 6.25-6.27 arasında verilmiştir. Şekil 6.28'de farklı derişimlerde boyar madde çözeltileri için gerilim-son derişim grafiği, Şekil 6.29'da 30 mg/L boyar madde içeren çözelti için farklı akış hızlarında gerilim-enerji tüketimi grafiği ve Şekil 6.30'da 30 mg/L boyar madde içeren çözeltiler için farklı elektrot yatak derinliklerinde gerilim-son derişim grafiği görülmektedir.

Çizelge 6.17. 30 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 45cm, 8:1)

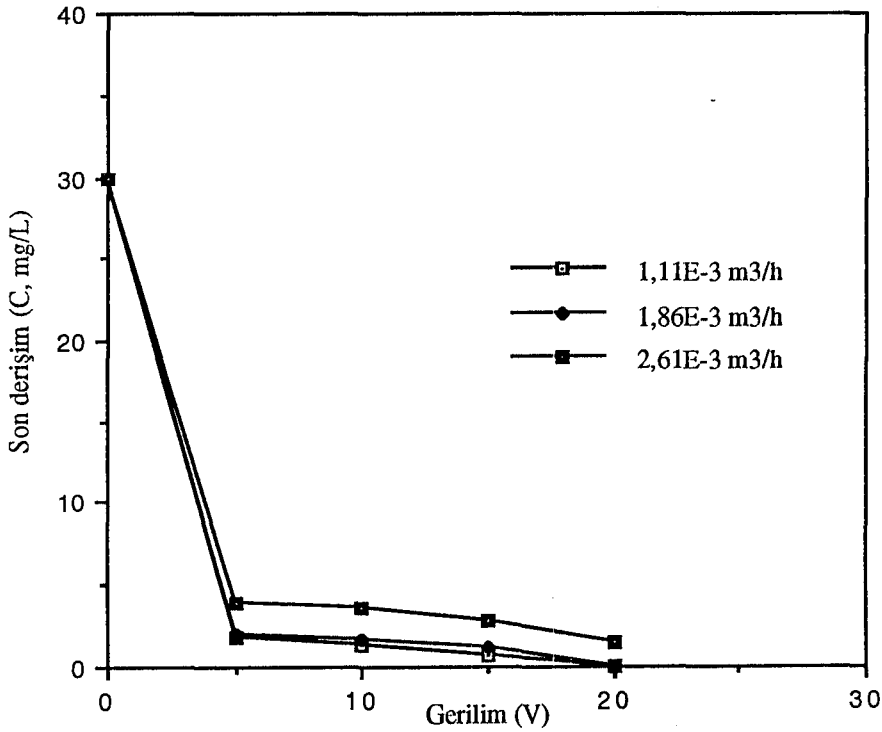
Akış hızı (m <sup>3</sup> /h) ,E-03	Gerilim (V)	Akım (mA)	Son derişim (C) (mg/L)	% Giderim	Enerji tüketimi (kwh/m <sup>3</sup> ) ,E-02
1,11	5	11,3	1,818	93,94	5
	10	23,1	1,378	95,4	21
	15	34,1	0,695	97,68	46
	20	47,2	0	100	85
1,86	5	11,5	2,013	93,29	3
	10	23	1,623	94,59	12
	15	34,2	1,135	96,22	28
	20	47,5	0	100	51
2,61	5	11,6	3,868	87,11	2
	10	23	3,624	87,92	9
	15	34,2	2,794	90,68	20
	20	47,6	1,476	95,08	37

Çizelge 6.18. 40 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 45cm, 8:1)

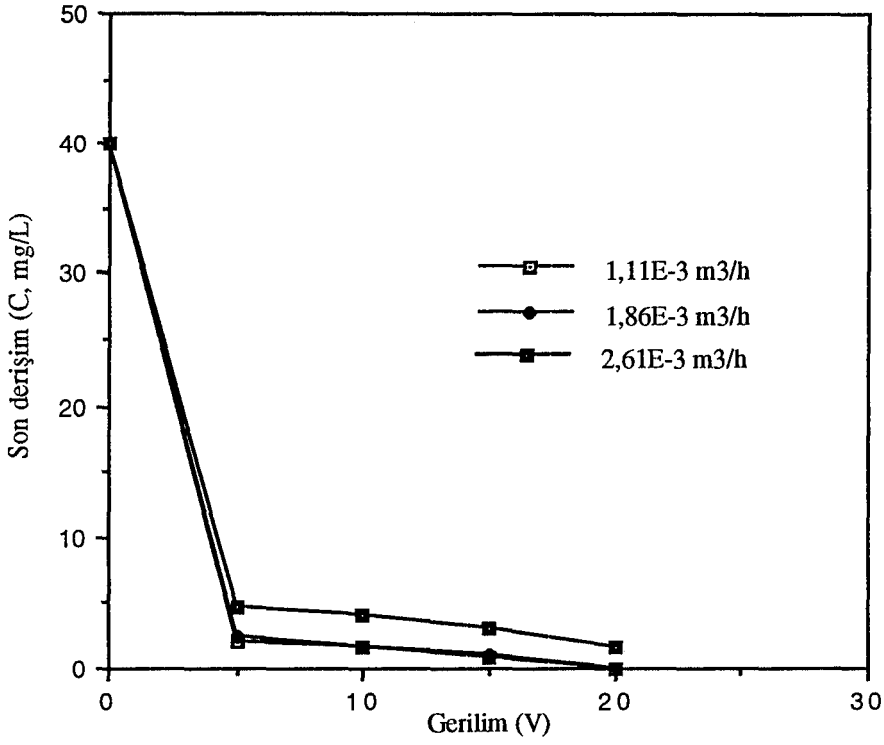
Akış hızı (m <sup>3</sup> /h) ,E-03	Gerilim (V)	Akım (mA)	Son derişim (C) (mg/L)	% Giderim	Enerji tüketimi (kwh/m <sup>3</sup> ) ,E-02
1,11	5	11,8	2,062	94,85	5
	10	23,5	1,62	95,94	21
	15	32,9	0,793	98,02	44
	20	46,7	0	100	84
1,86	5	11,8	2,355	94,11	3
	10	23,1	1,72	95,7	12
	15	33,7	0,988	97,53	27
	20	47,1	0	100	51
2,61	5	11,8	4,6	88,5	2
	10	24,2	4,014	89,96	9
	15	34,4	2,989	92,53	20
	20	47	1,574	96,06	36

Çizelge 6.19. 100 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 45cm, 8:1)

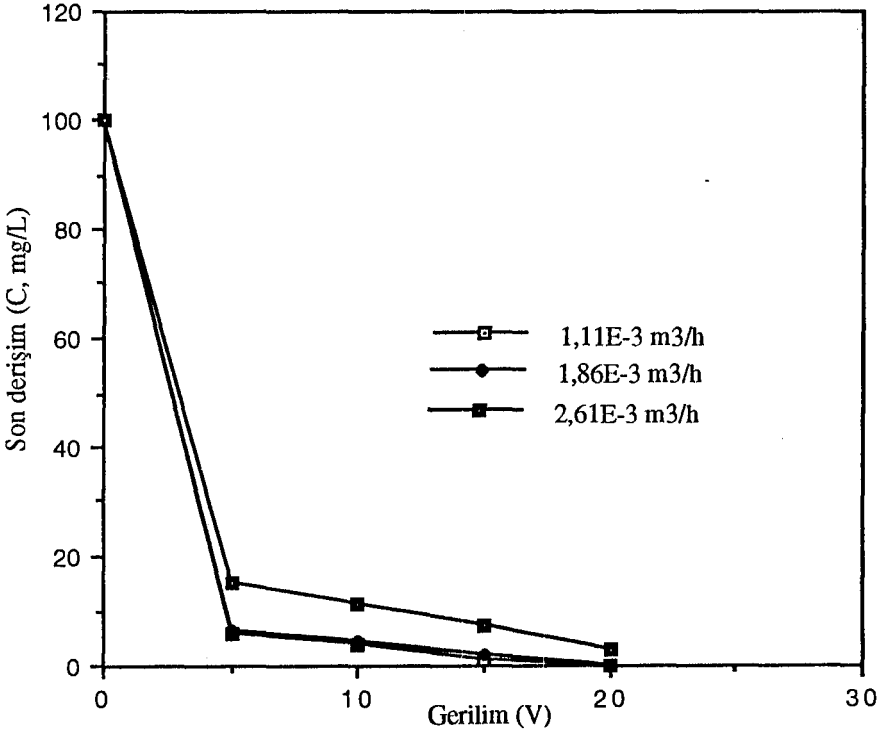
Akış hızı (m <sup>3</sup> /h) ,E-03	Gerilim (V)	Akım (mA)	Son derişim (C) (mg/L)	% Giderim	Enerji tüketimi (kwh/m <sup>3</sup> ) ,E-02
1,11	5	13,7	5,72	94,28	6
	10	28	3,72	96,28	25
	15	43	0,89	99,11	58
	20	55,8	0	100	101
1,86	5	13,7	6,5	93,5	4
	10	28,2	4,45	95,55	15
	15	42,7	1,87	98,13	34
	20	57,1	0	100	61
2,61	5	14,2	14,89	85,11	3
	10	28,1	11,43	88,57	11
	15	43,8	7,48	92,52	25
	20	57,7	2,89	97,11	44



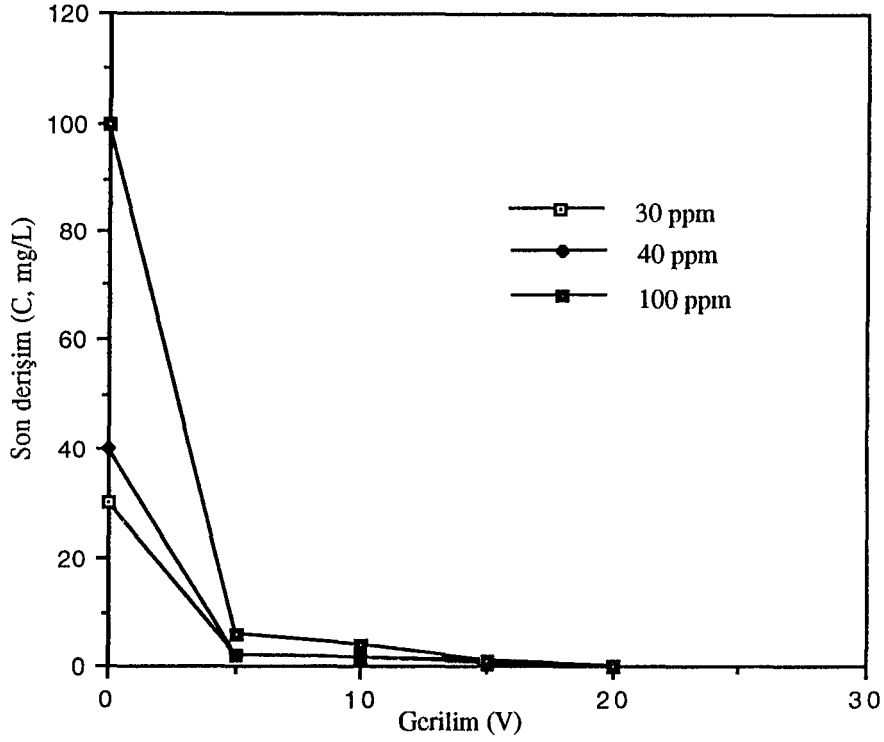
Şekil 6.25. 30 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değişimi (l= 45cm, 8:1)



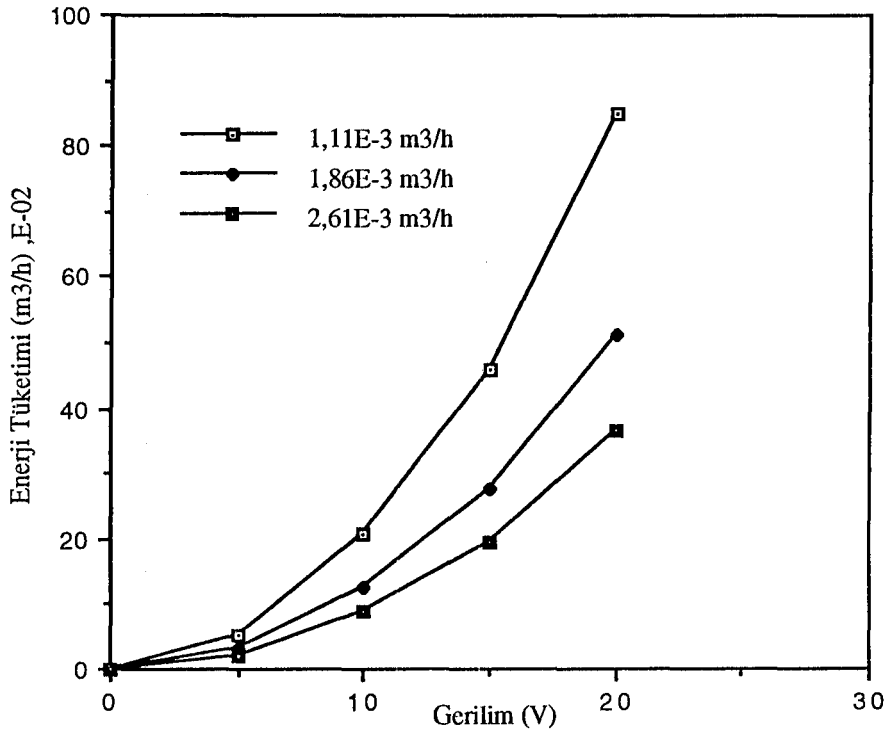
Şekil 6.26. 40 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değişimi (l= 45cm, 8:1)



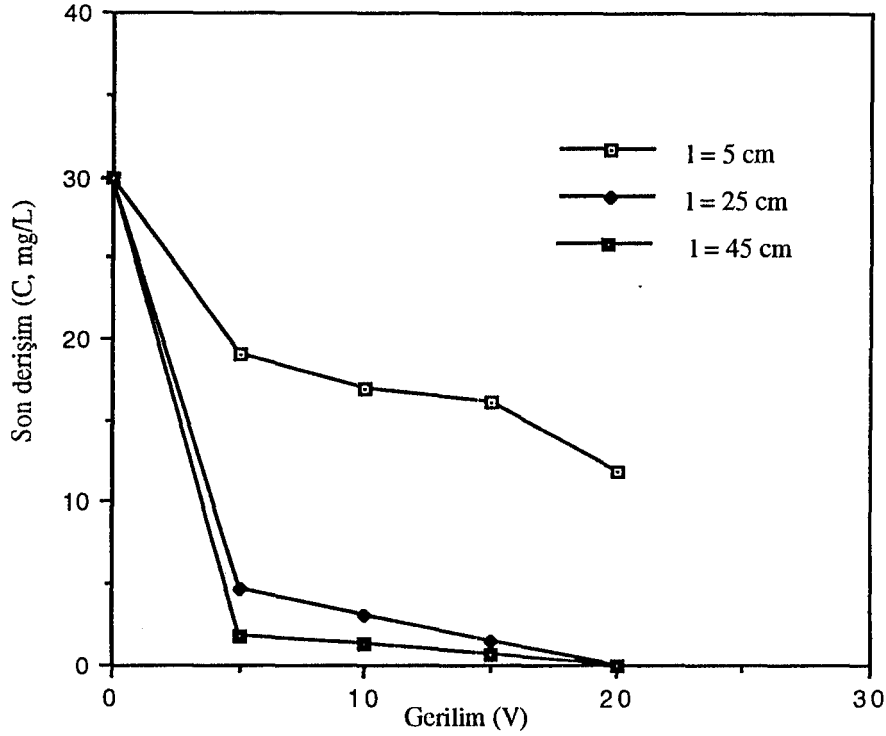
Şekil 6.27. 100 mg/L çözelti için kalan derişimin gerilimle değişimi (l= 45cm, 8:1)



Şekil 6.28. Farklı derişimlerde başlangıç boyar maddesi içeren çözeltiler için kalan derişimin gerilimle değişimi ( $l= 45\text{cm}$ ,  $1,11 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $0,1 \text{ M NaCl}$ ,  $8:1$ )



Şekil 6.29.  $30 \text{ mg/L}$  başlangıç boyar maddesi içeren çözeltiler için farklı akış hızlarında enerji tüketiminin gerilimle değişimi ( $l= 45\text{cm}$ ,  $1,11 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $8:1$ )



Şekil 6.30. 30 mg/L başlangıç boyar maddesi içeren çözeltiler için farklı elektrot yatak derinliklerinde kalan derişimin gerilimle değişimi ( $1,11 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$ , 8:1)

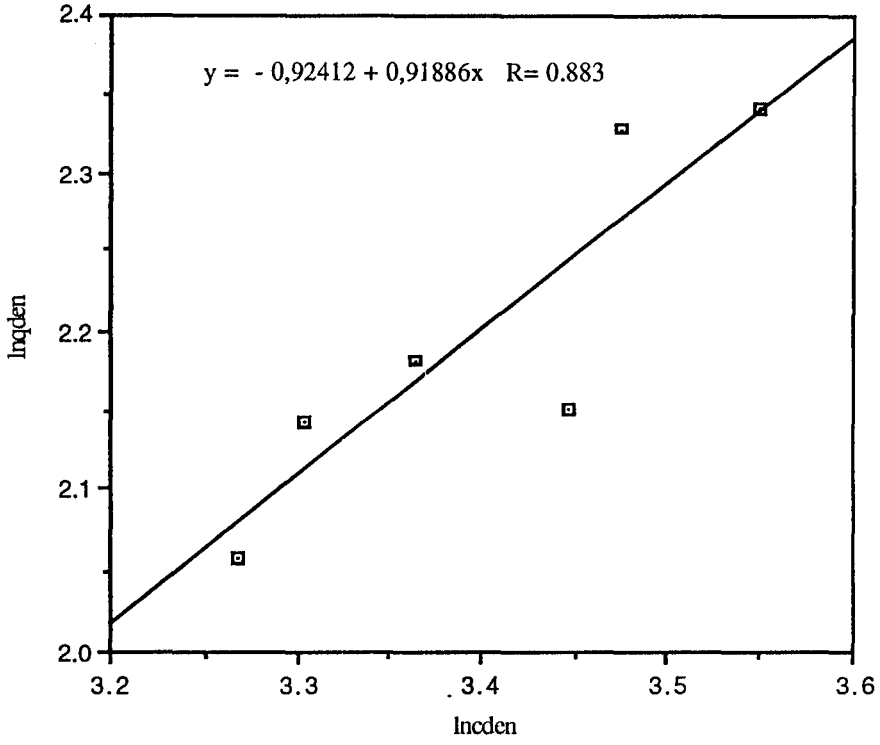
#### 6.4. Kimyasal Adsorpsiyon Sonuçları

Kimyasal adsorpsiyon çalışmalarında da elektrokimyasal adsorpsiyon deneylerinde kullanılan reaktör kullanılmıştır (Bkz. Şekil 6.2). Adsorpsiyon çalışmaları 5, 25 ve 45cm olmak üzere üç farklı yatak derinliklerinde gerçekleştirilmiş olup dolgu malzemesi olarak 8:1 oranında karıştırılmış aktif karbon/perlit kullanılmıştır.

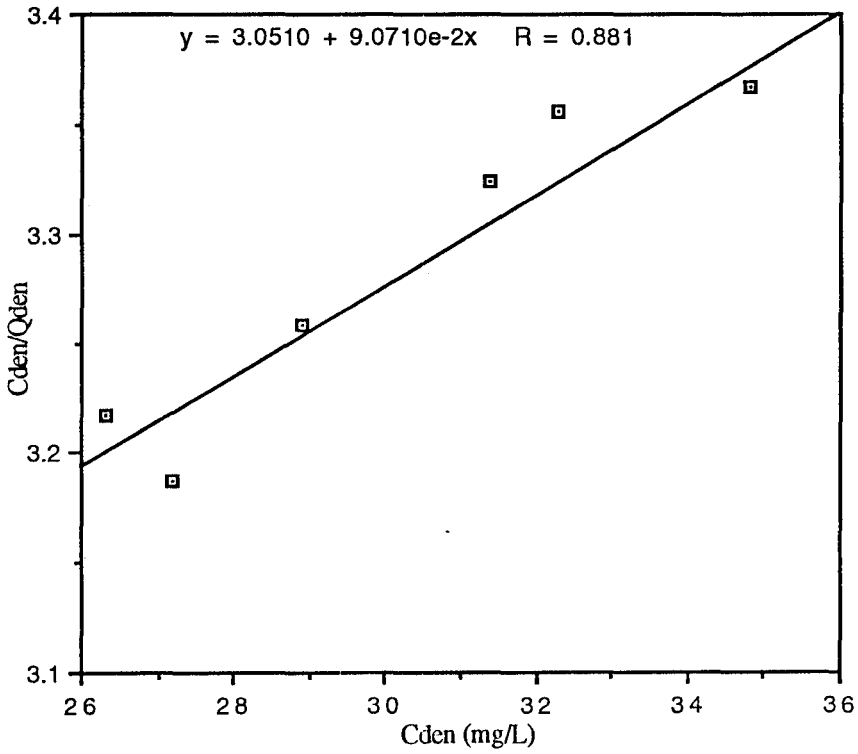
Deneysel çalışmalarda kullanılan aktif karbonlar için izotermiler çizilmiş ve hem Freundlich hem de Langmuir izotermi ile uygunluk gösterdiği farkedilmiştir. Şekil 6.31’de Freundlich izotermi, Şekil 6.32’de ise Langmuir izotermi görülmektedir.

Her bir yatak derinliği için akış hızları ( $1,11 \times 10^{-3}$ ,  $1,86 \times 10^{-3}$  ve  $2,61 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$ ) ve başlangıç boyar madde derişiminin (30, 40 ve 100 mg/L) giderim üzerine etkisi araştırılmıştır. Adsorpsiyon çalışmaları sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.20-6.28 arasında ve akış hızı ile %giderim değişiminin gösterildiği grafikler Şekil 6.33-6.35 arasında verilmiştir. Çizelge 6.29’da 30 mg/L, Çizelge 6.30’da ise 40 mg/L’lik çözeltiler için kalan derişimin hacimle değişimi görülmektedir. Şekil 6.36’da 30 mg/L çözelti için, Şekil 6.37’de 40 mg/L çözelti için kalan derişimin hacimle değişimi görülmektedir. Şekil 6.38’de 5 cm yatak derinliğinde, Şekil 6.39’da 25 cm yatak derinliğinde ve Şekil 6.40’da ise 45 cm yatak derinliğinde elde edilen adsorpsiyon ve elektroadsorpsiyon (20V) deney sonuçlarının karşılaştırılması (40 mg/L, 8:1) gösterilmiştir. Şekil 6.41’de 30 mg/L çözelti için, Şekil 6.42’de ise 40 mg/L çözelti için adsorpsiyon ve elektroadsorpsiyon (10V) deneylerinde elde edilen kalan derişimin hacimle değişimi karşılaştırılmıştır.





Şekil 6.31. Acilan Blau boyar maddesi içeren, 40 mg/L'lik çözeltinin aktif karbon ile adsorpsiyonu sonucu elde edilen Freundlich izotermi



Şekil 6.32. Acilan Blau boyar maddesi içeren, 40 mg/L'lik çözeltinin aktif karbon ile adsorpsiyonu sonucu elde edilen Langmuir izotermi

Çizelge 6.20. 30 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 5cm, 8:1)

Akış hızı (m <sup>3</sup> /h) ,E-03	Son derişim (C) (mg/L)	% Giderim
1,11	13,53	54,89
1,86	19,53	34,22
2,61	21,34	28,86

Çizelge 6.21. 40 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 5cm, 8:1)

Akış hızı (m <sup>3</sup> /h) ,E-03	Son derişim (C) (mg/L)	% Giderim
1,11	21,24	46,88
1,86	29,98	25,05
2,61	31,98	20,04

Çizelge 6.22. 100 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 5cm, 8:1)

Akış hızı (m <sup>3</sup> /h) ,E-03	Son derişim (C) (mg/L)	% Giderim
1,11	38,47	61,52
1,86	76,69	23,31
2,61	84,6	15,4

Çizelge 6.23. 30 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 25cm, 8:1)

Akış hızı (m <sup>3</sup> /h),E-03	Son derişim (C) (mg/L)	% Giderim
1,11	5,04	83,2
1,86	10,6	64,66
2,61	15,53	48,23

Çizelge 6.24. 40 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 25cm, 8:1)

Akış hızı (m <sup>3</sup> /h),E-03	Son derişim (C) (mg/L)	% Giderim
1,11	10,16	74,6
1,86	18,75	53,125
2,61	22,36	44,1

Çizelge 6.25. 100 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 25cm, 8:1)

Akış hızı (m <sup>3</sup> /h),E-03	Son derişim (C) (mg/L)	% Giderim
1,11	19,97	80,03
1,86	25,2	74,8
2,61	49,89	50,11

Çizelge 6.26. 30 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 45cm, 8:1)

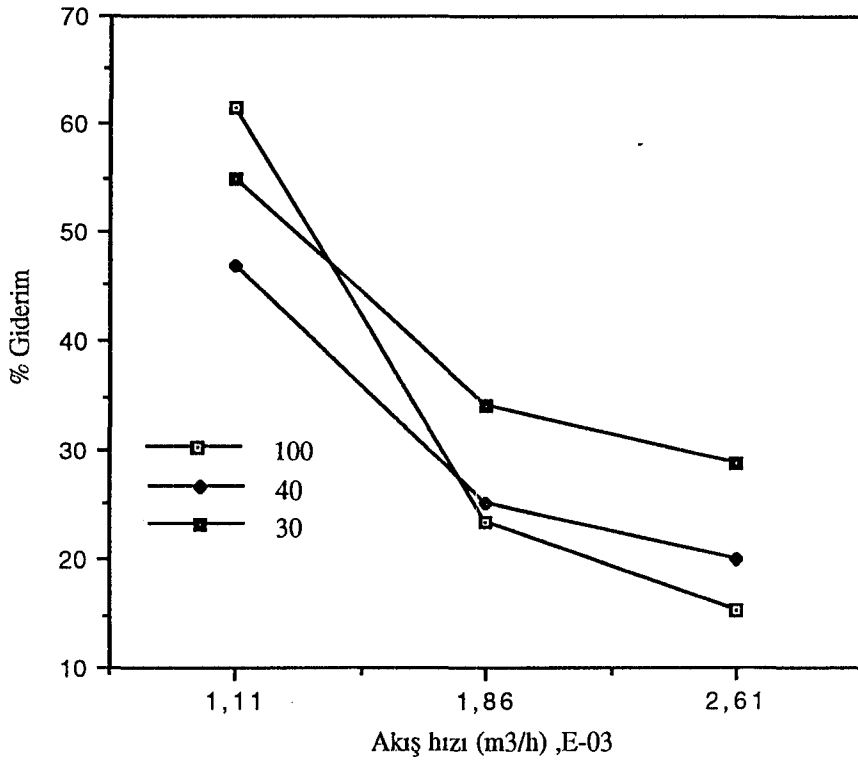
Akış hızı (m <sup>3</sup> /h) ,E-03	Son derişim (C) (mg/L)	% Giderim
1,11	0,65	97,83
1,86	1,89	93,7
2,61	2,79	90,7

Çizelge 6.27. 40 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 45cm, 8:1)

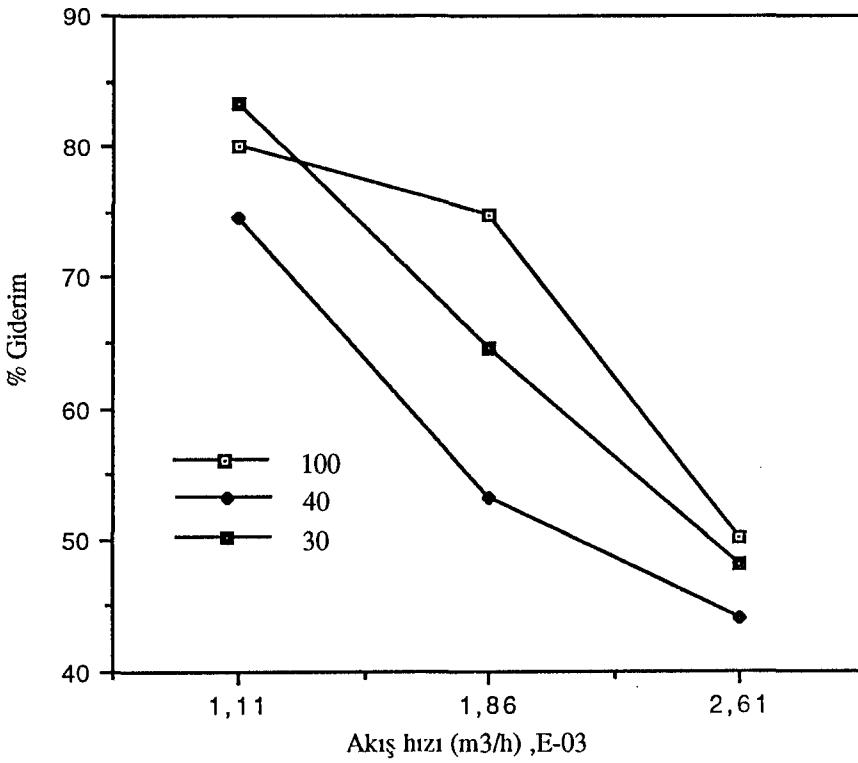
Akış hızı (m <sup>3</sup> /h) ,E-03	Son derişim (C) (mg/L)	% Giderim
1,11	3,75	90,625
1,86	4,79	88,025
2,61	5,85	85,375

Çizelge 6.28. 100 mg/L çözelti ile elde edilen deneysel sonuçlar (l= 45cm, 8:1)

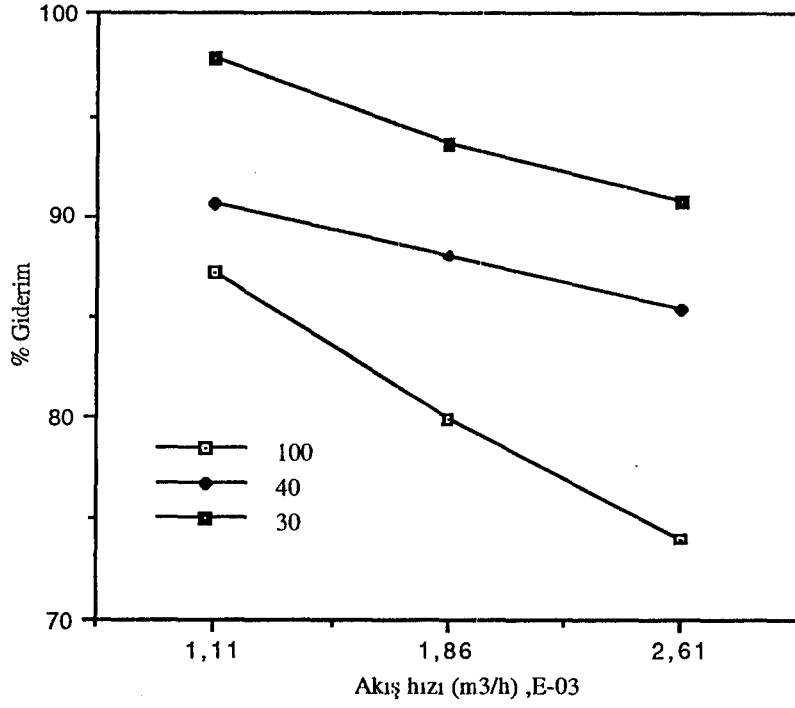
Akış hızı (m <sup>3</sup> /h) ,E-03	Son derişim (C) (mg/L)	% Giderim
1,11	12,85	87,15
1,86	20,13	79,87
2,61	25,95	74,05



Şekil 6.33.5 cm yatak derinliğinde elde edilen adsorpsiyon deney sonuçları (8:1)



Şekil 6.34. 25 cm yatak derinliğinde elde edilen adsorpsiyon deney sonuçları (8:1)



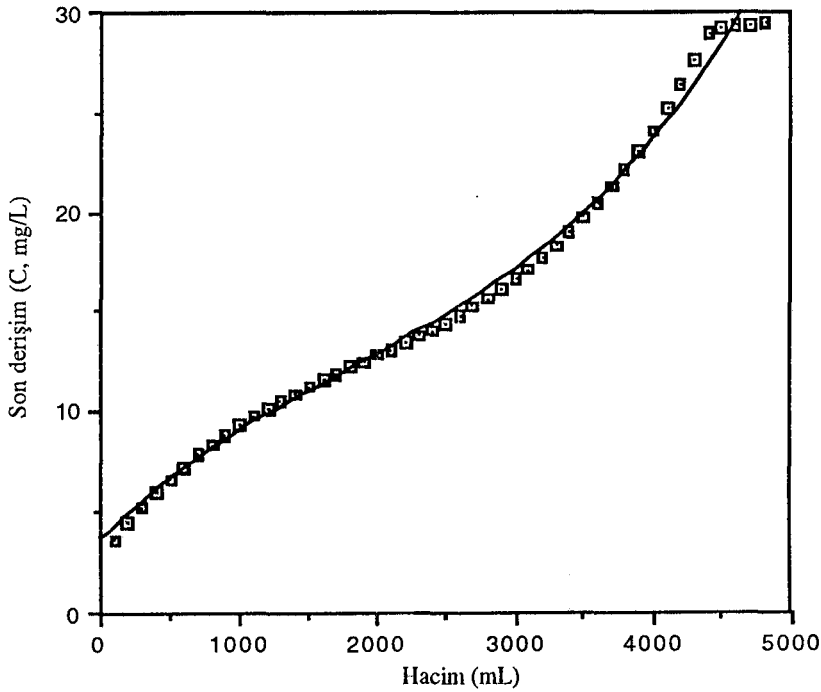
Şekil 6.35. 45 cm yatak derinliğinde elde edilen adsorpsiyon deney sonuçları (8:1)

Çizelge 6.29. 30 mg/L çözelti ile elde edilen sonuçlar (l= 25 cm, 8:1,  $1,857 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$ )

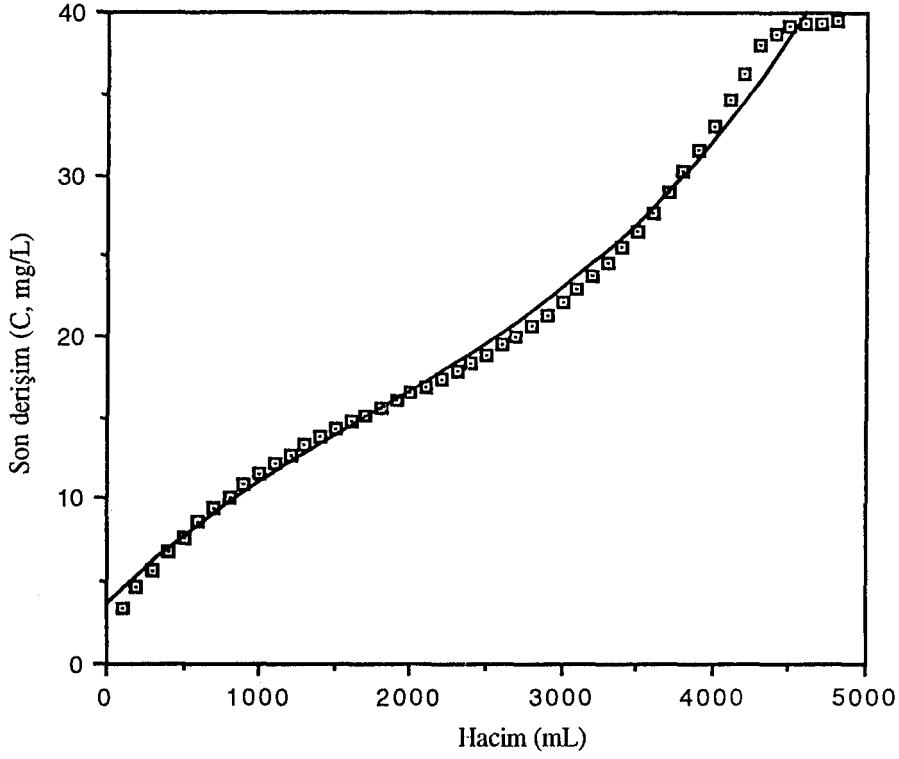
Hacim (mL)	Son Derişim (mg/L)	% giderim	Hacim (mL)	Son Derişim (mg/L)	% giderim
100	3,67	87,76	2500	14,43	51,90
200	4,49	85,04	2600	14,81	50,62
300	5,26	82,47	2700	15,22	49,27
400	5,97	80,10	2800	15,65	47,82
500	6,63	77,90	2900	16,11	46,30
600	7,25	75,82	3000	16,6	44,65
700	7,82	73,93	3100	17,13	42,90
800	8,35	72,16	3200	17,71	40,96
900	8,84	70,53	3300	18,32	38,93
1000	9,30	69,01	3400	18,99	36,70
1100	9,73	67,55	3500	19,7	34,33
1200	10,13	66,24	3600	20,47	31,75
1300	10,50	65,0	3700	21,3	29,0
1400	10,86	63,80	3800	22,19	26,03
1500	11,20	62,67	3900	23,14	22,87
1600	11,53	61,58	4000	24,16	19,45
1700	11,85	60,50	4100	25,26	15,80
1800	12,16	59,47	4200	26,42	11,93
1900	12,46	58,45	4300	27,67	7,76
2000	12,77	57,42	4400	28,99	3,37
2100	13,08	56,40	4500	29,25	2,50
2200	13,40	55,33	4600	29,33	2,23
2300	13,73	54,25	4700	29,37	2,10
2400	14,07	53,10	4800	29,46	1,80

Çizelge 6.30. 40 mg/L çözelti ile elde edilen sonuçlar ( $l= 25 \text{ cm}$ ,  $8:1$ ,  $1,857 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$ )

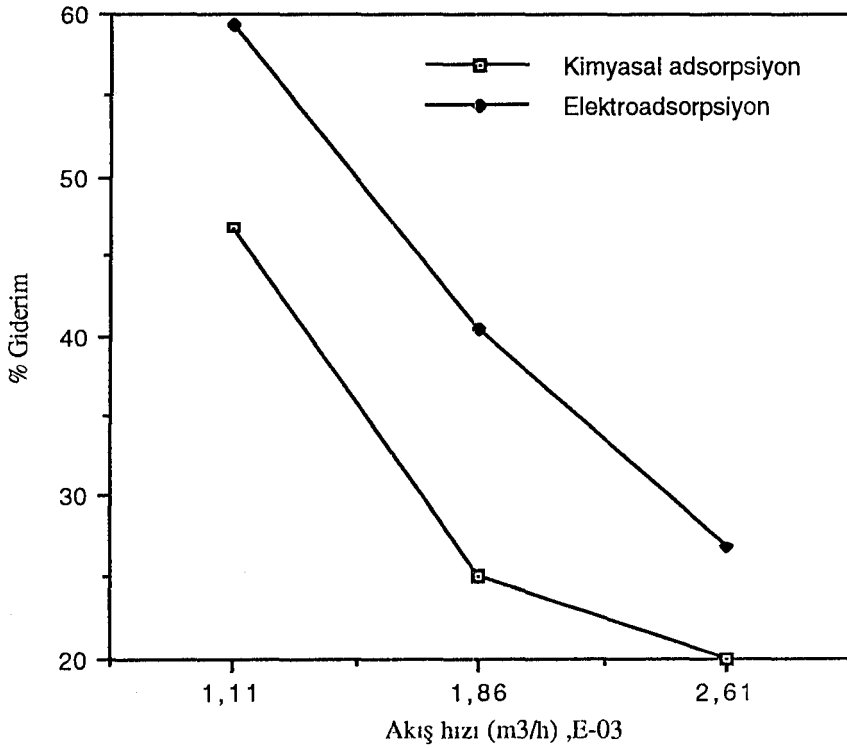
Hacim (mL)	Son Derişim (mg/L)	% giderim	Hacim (mL)	Son Derişim (mg/L)	% giderim
100	3,45	91,37	2500	18,93	52,675
200	4,64	88,4	2600	19,48	51,3
300	5,73	85,67	2700	20,06	49,85
400	6,76	83,1	2800	20,69	48,28
500	7,71	80,72	2900	21,36	46,6
600	8,58	78,55	3000	22,07	44,825
700	9,4	76,5	3100	22,85	42,8
800	10,16	74,6	3200	23,68	40,8
900	10,87	72,83	3300	24,57	38,575
1000	11,53	71,18	3400	25,54	36,15
1100	12,14	69,65	3500	26,58	33,55
1200	12,72	68,2	3600	27,69	30,775
1300	13,26	66,85	3700	28,89	27,46
1400	13,78	65,55	3800	30,18	24,55
1500	14,27	64,325	3900	31,57	21,08
1600	14,74	63,15	4000	33,05	17,38
1700	15,19	62,025	4100	34,63	14,425
1800	15,64	60,9	4200	36,33	11,175
1900	16,08	59,8	4300	38,13	7,675
2000	16,53	58,675	4400	38,68	6,3
2100	16,98	57,55	4500	39,24	5,1
2200	17,44	56,4	4600	39,35	4,625
2300	17,91	55,225	4700	39,39	4,525
2400	18,41	53,98	4800	39,45	4,375



Şekil 6.36. 30 mg/L çözelti için kalan derişimin hacimle değişimi ( $l= 25 \text{ cm}$ ,  $8:1$ ,  $1,857 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$ )

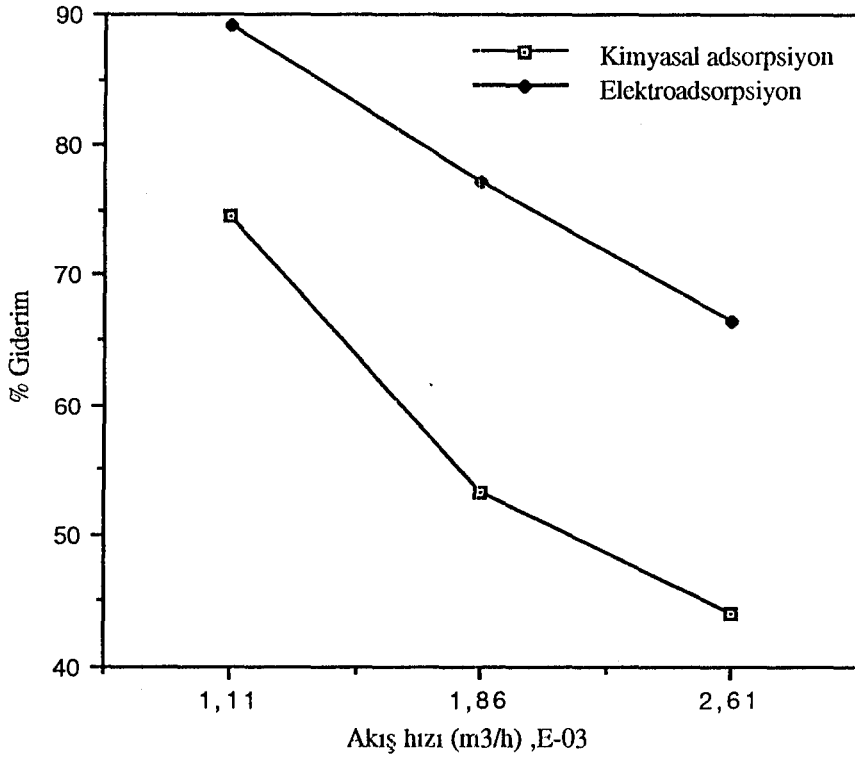


Şekil 6.37. 40 mg/L çözelti için kalan derişimin hacimle değişimi ( $l= 25$  cm, 8:1,  $1,857 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/h)

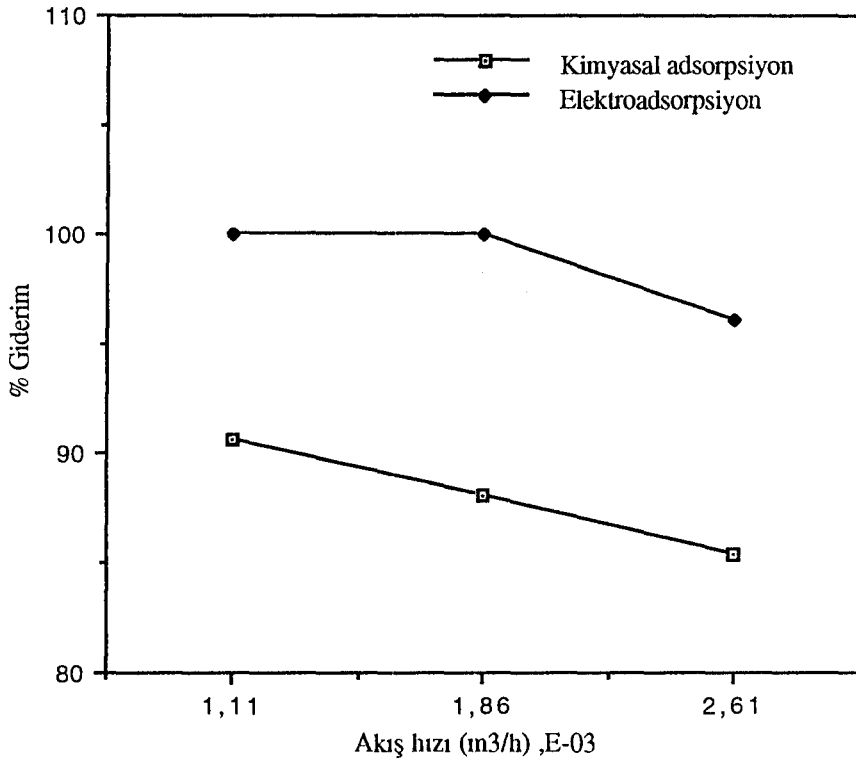


Şekil 6.38. 5 cm yatak derinliğinde elde edilen adsorpsiyon ve elektroadsorpsiyon (20V) deney sonuçlarının karşılaştırılması (40 mg/L, 8:1)

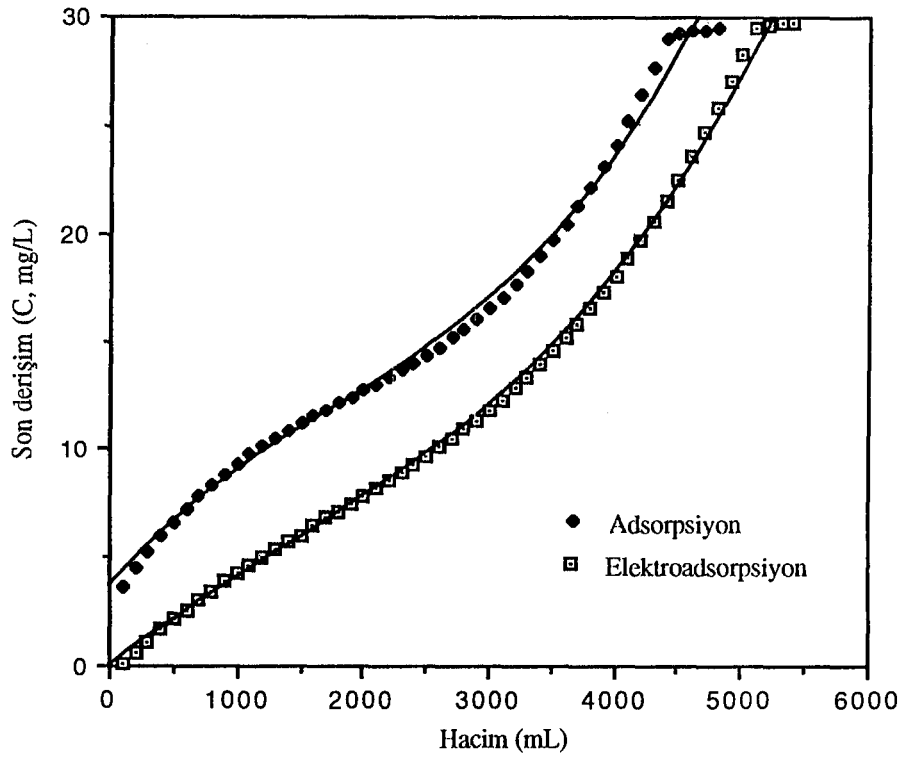




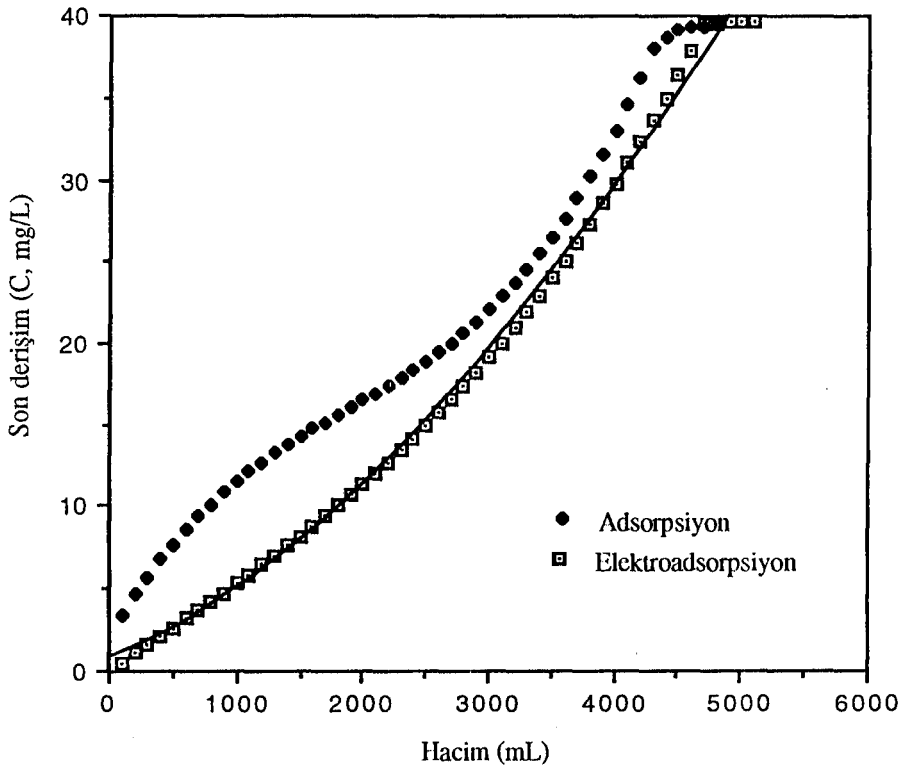
Şekil 6.39.25 cm yatak derinliğinde elde edilen adsorpsiyon ve elektroadsorpsiyon (20V) deney sonuçlarının karşılaştırılması (40 mg/L, 8:1)



Şekil 6.40.45 cm yatak derinliğinde elde edilen adsorpsiyon ve elektroadsorpsiyon (20V) deney sonuçlarının karşılaştırılması (40 mg/L, 8:1)



Şekil 6.41. 30 mg/L çözelti için adsorpsiyon ve elektroadсорpsiyon (10V) deneylerinde kalan derişimin hacimle değişiminin karşılaştırılması



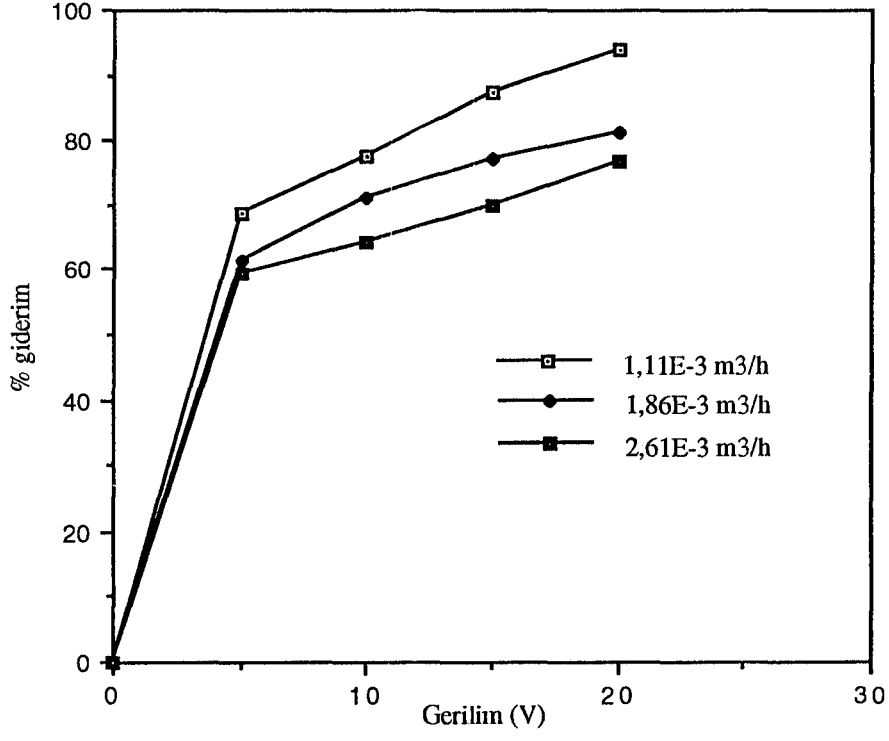
Şekil 6.42. 40 mg/L çözelti için adsorpsiyon ve elektroadсорpsiyon (10V) deneylerinde kalan derişimin hacimle değişiminin karşılaştırılması

## 6.5. Sarar Tekstil Endüstrisi Atıksuyu ile Gerçekleştirilen Deneysel Çalışma Sonuçları

Sarar Tekstil Fabrikası İşletme çıkışından (Parchall Kanalı) 25.12.1997 tarihinde atıksu alınmış ve bu atıksuyun Elektrokimyasal atıksu arıtma reaktöründe giderilebilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla, saat 15:40' da alınan ve alındığı andaki sıcaklığı 27° C olan atıksu, kaba filtre kağıdından süzöldükten sonra, elektro adsorpsiyonun gerçekleştirildiği reaktörden geçirilmiş ve sonuçlar Çizelge 6.31 ve Şekil 6.43'te verilmiştir. Çizelge 6.31'den de görülebileceği üzere, bu deneylerde de üç farklı akış hızı ( $1,11 \times 10^{-3}$ ,  $1,86 \times 10^{-3}$  ve  $2,61 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/h) ve dört farklı gerilim (5, 10, 15 ve 20V) değerinde çalışılarak bu parametrelerin tekstil atıksuyunun arıtımına olan etkisi araştırılmıştır. Tekstil atıksuyunun maksimum absorbans verdiği dalga boyu ( $\lambda$ ) 510 nm olarak belirlenmiştir.

Çizelge 6.31. Tekstil endüstrisi atıksuyu ile gerçekleştirilen deney sonuçları

Akış hızı (m <sup>3</sup> /h),E-03	Gerilim (V)	Akım (mA)	% Giderim	Enerji tüketimi (kwh/m <sup>3</sup> ),E-02
1,11	5	11,6	68,75	5,23
	10	23,7	77,5	21,3
	15	36,5	87,5	49,3
	20	54,7	94	98,6
1,86	5	11,5	61,25	3,1
	10	24,1	71,25	12,9
	15	39,2	77,25	31,6
	20	55,3	81,25	59,5
2,61	5	11,7	59,5	2,24
	10	24,2	64,25	9,27
	15	37,7	69,75	21,7
	20	52,8	76,75	40,4



Şekil 6.43. Tekstil endüstrisi atıksuyunun kullanıldığı deneylerde gerilimle %giderimin değişimi

## 7. BULGULARIN TARTIŞILMASI

### 7.1. Elektroadsorpsiyon ile Boyar Madde Gideriminde Deneysel Bulguların Tartışılması

#### 7.1.1. Uygulanan gerilimin etkisi;

Deneysel çalışmalarda 5, 10, 15 ve 20 V olmak üzere 4 gerilim değerinde çalışılmıştır. Yapılan çalışmalarda uygulanan gerilimin artırılmasıyla, büyüyen elektrik alanı nedeniyle giderimde artış olduğu gözlenmiştir (Bkz. Şekil 6.9 ve 6.28). Örneğin, 25 cm elektrot yatak derinliğinde 30 mg/L'lik boyar madde derişimi ile gerçekleştirilen çalışmalarda ( $1,11 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/h akış hızı, 0,1 M NaCl ) 20 V gerilimde tümüyle giderim sağlanırken, 5 V gerilimde giderim %90,37 olmuştur (Bkz. Çizelge 6.7).

Gerilimin giderime etkisinin araştırıldığı ön çalışma deneylerinde 50 V'luk gerilimlerde çalışılmış, ancak bu gerilimde aktif karbonların çok küçük parçacıklar şeklinde parçalandığı ve giderim veriminde düşüşler olduğu görülmüştür. Bu nedenle, deneysel çalışmalarda 20 V'tan yüksek gerilimlerde çalışılmamıştır.

Uygulanan gerilimin artışı ile birlikte beklendiği şekilde enerji tüketiminde de artış görülmüştür. 100 mg/L'lik çözelti ile yapılan deneysel çalışmalarda (l = 25 cm, 8:1 karışım) 5 V gerilimde %79,73 giderim ile enerji tüketimi  $2,57 \times 10^{-2}$  kWh/m<sup>3</sup> iken, bu değer 20 V gerilim ve %98,23 giderim için  $8,5 \times 10^{-1}$  kWh/m<sup>3</sup>'e ulaşmıştır (Bkz. Çizelge 6.12).

#### 7.1.2. Başlangıç derişiminin etkisi;

Üç farklı başlangıç derişiminde (30, 40 ve 100mg/L) yapılan çalışmalarda, artan derişimle giderimde düşüşler olduğu görülmüştür (Bkz. Şekil 6.9, 6.23 ve 6.28). Aynı koşullarda (l = 25 cm, 8:1 karışım, 0,1 M NaCl ) farklı derişimlerde gerçekleştirilen deneylerde 30 mg/L için 15 V gerilim ve  $1,86 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/h akış hızında giderim %89,87 iken 40 mg/L için %81,7 ve 100 mg/L için %77,73 olmuştur (Bkz. Çizelge 6.7, 6.10 ve 6.13).

Bununla birlikte, başlangıç derişimi daha büyük olduğunda aynı süre içinde uzaklaştırılan madde miktarı artmakta; dolayısıyla yaklaşık aynı değerde enerji ile daha fazla madde giderilebildiğinden spesifik enerji tüketimi azalmaktadır. Artan derişimle giderilen madde miktarının artması sistemin difüzyon kontrollü olduğunu göstermektedir.

### 7.1.3. Akış hızının etkisi;

Deneylerde temel olarak düşük ( $1,1 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{h}$ ), orta ( $1,86 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{h}$ ) ve hızlı ( $2,61 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{h}$ ) olmak üzere üç farklı akış hızında çalışılmıştır. Deney sonuçları akış hızının giderim üzerinde büyük etkisi olduğunu göstermektedir (Bkz. Şekil 6.16). Örneğin; 40 mg/L'lik çözelti yapılan çalışmada ( $l=25 \text{ cm}$ , 8:1 karışım, 0,3M NaCl) 5 V gerilim için;  $1,11 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{h}$  akış hızında % 74,22,  $1,86 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{h}$  akış hızında % 68,97 ve  $2,61 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{h}$  akış hızında %58,97 giderim elde edilmiştir (Bkz. Çizelge 6.11). Bununla birlikte akış hızı arttıkça enerji tüketimi azalmaktadır.

Bütün deneylerde saptanan ortak sonuç akış hızı düştükçe giderimin arttığıdır. Bunun nedeni, akış hızı azaldıkça çözeltinin reaktör içerisinde kalış süresinin, yani temas süresinin artmasıdır.

### 7.1.4. Destek elektrolitin etkisi;

Elektrokimyasal süreçlerde, kütle akışına direnç oluşturan düşük iletkenliği önlemek üzere uygun destek elektrolit kullanımı yaygındır [19]. Bu çalışmada da atık suyun iletkenliğini artırmak amacıyla 0,1 M ve 0,3 M NaCl kullanılmış ve giderime etkisi araştırılmıştır. Destek elektrolit ilavesi ile sistemden geçen akım ve enerji tüketiminde artış olmuştur.

Elektrot yatak derinliğinin 5 cm olduğu deneylerde, artan destek elektrolit miktarı ile giderimde artış görülmüştür (Bkz. Şekil 6.18).

Elektrot yatak derinliğinin 25 cm olduğu deneylerde, 30 ve 40 mg/L boyar madde çözeltileri için 0,1 M NaCl ilavesi ile giderimin arttığı, ancak 0,3 M NaCl ilavesi ile fazla bir değişiklik olmadığı, hatta giderimin düştüğü görülmüştür (Bkz. Şekil 6.22). 100 mg/L boyar madde çözeltisi için ise destek elektrolitin bir etkisi görülmemiştir.

45 cm'lik elektrot yatak derinliği için, genel olarak giderim %90'ın üzerinde olduğu için destek elektrolit ilavesine gerek görülmemiştir. Destek elektrolit ilavesine gerek duyulmaması sistemi daha ekonomik kılmaktadır.

#### **7.1.5. Elektrotlar arası mesafenin (yatak derinliği) etkisi;**

Çalışmalarda üç farklı (5, 25 ve 45 cm) elektrot yatak derinliği uygulanmıştır. Elektrotlar arası uzaklık arttıkça giderim de artmıştır (Bkz. Şekil 6.30). Çünkü, eletrotlar arası uzaklığın artışı ile elektrot yatağındaki dolgu maddesi miktarı da artmaktadır. Bu ise daha fazla dolgu malzemesini kateden boyar madde çözeltisinin reaktör içerisindeki temas süresinin artması anlamına gelmektedir.

En yüksek giderime 45 cm'lik elektrot yatak derinliğinde ulaşılmakla birlikte bu durumda reaktör içerisindeki aktif karbon/perlit hacminde de ( $\sim 880 \text{ cm}^3$ ) artış olacaktır. Bu ise sistemi ekonomik açıdan kısıtlamaktadır. Bu nedenle 25 cm'lik elektrot yatak derinliği ideal uzunluk gibi görünmektedir. Bu mesafede tamamen giderim sağlanmakta ve minimum giderim ise %54,01 olmaktadır.

## **7.2. Kimyasal Adsorpsiyon ile Elektroadsorpsiyonun Karşılaştırılması**

Kimyasal Adsorpsiyon deneylerinde 30, 40 ve 100 mg/L olmak üzere üç farklı derişimde boyar madde kullanılmıştır. Artan derişim değerleri giderimin azalmasına neden olmuştur. Örneğin, 5 cm yatak derinliğinde yapılan deneylerde  $1,86 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$  akış hızı için 30 mg/L boyar madde içeren çözeltinin giderimi %34,22, 40 mg/L için %25,05 ve 100 mg/L için %23,31 olmuştur (Bkz. Çizelge 6.20, 6.21 ve 6.22).

Sabit sıcaklıkta adsorplanan madde ile denge derişimi arasındaki bağıntı olan adsorpsiyon izotermelerinin elde edildiği çalışmalarda, Langmuir izotermi için %88,10, Freundlich izotermi için ise %88,30 korelasyon katsayısı elde edilmiştir. Çalışma sonucu Langmuir adsorpsiyon izoterm sabitleri  $a = 11,024$ ,  $b = 0,0297$  ve Freundlich adsorpsiyon izoterm sabitleri  $k = 0,397$  ve  $n = 1,088$  olarak bulunmuştur.

Adsorpsiyon izotermeleri oluşturulurken, denge derişiminin başlangıç derişimine eşit olduğu koşulda ( $C_{den}=C_0$ ), Freundlich izotermine göre,  $(Q_{den})_{max} = (x/m)_{max} = 11,769$  olarak bulunmuştur. Deneysel çalışmalarda, 2.5 saatlik karıştırma süresi sonucu elde

edilen en yüksek  $Q_{den}$  değeri 10,40 olup,  $(Q_{den})_{max}$ 'a yaklaşıldığı görülmektedir. Ayrıca, hacimle kalan derişimin karşılaştırıldığı deneylerde yaklaşık 2,5 saatte denge derişimlerine ulaşılması, kullanılan adsorpsiyon izotermelerinin uygunluğunu ortaya koymaktadır.

Başlangıç boyar madde derişimleri gözönüne alındığında elektroadsorpsiyonla giderimin daha yüksek düzeylere ulaştığı görülmüştür. Örneğin, 25 cm elektrot derinliğinde, elektroadsorpsiyonda  $1,11 \times 10^{-3} m^3/h$  akış hızında %89,24,  $1,86 \times 10^{-3} m^3/h$  akış hızında %77,27 ve  $2,61 \times 10^{-3} m^3/h$  akış hızında %66,50 giderim verimine ulaşılırken, bu değerler adsorpsiyonda  $1,11 \times 10^{-3} m^3/h$  akış hızı için %74,60,  $1,86 \times 10^{-3} m^3/h$  akış hızı için %53,125 ve  $2,61 \times 10^{-3} m^3/h$  akış hızı için ise %44,10 olarak bulunmuştur (Bkz. Çizelge 6.9, 6.24 ve Şekil 6.39, 6.41 ve 6.42).

Elektroadsorpsiyon deneylerinde olduğu gibi, adsorpsiyon deneylerinde de  $1,11 \times 10^{-3}$ ,  $1,86 \times 10^{-3}$  ve  $2,61 \times 10^{-3} m^3/h$  olmak üzere üç farklı akış hızında çalışılmıştır. Bütün adsorpsiyon deney sonuçları akış hızı azaldıkça giderimin arttığını göstermiştir. Akış hızının azalması boyar madde çözeltisinin kolonda kalış süresini arttırdığı için giderimi doğrudan etkilemektedir. 45 cm yatak derinliğinde 40 mg/L çözelti için yapılan deneylerde  $1,11 \times 10^{-3} m^3/h$  için giderim %90,625,  $1,86 \times 10^{-3} m^3/h$  için %88,025 ve  $2,61 \times 10^{-3} m^3/h$  için ise %85,375 olarak bulunmuştur (Bkz. Çizelge 6.27).

Yatak derinliğindeki artışın giderim üzerinde önemli derecede etkisi olmuştur. Buna neden olarak kolon uzunluğunun artması ile çözeltinin temas süresinin uzayarak daha fazla adsorban ile etkileşmesi gösterilebilir.

40 mg/L boyar madde içeren çözeltinin  $1,11 \times 10^{-3} m^3/h$  akış hızında 5 cm'lik kolondan geçirilmesi ile %46,88, 25 cm'lik kolondan geçirilmesi ile %74,6 ve 45 cm'lik kolondan geçirilmesiyle ise %90,625 giderime ulaşılmıştır (Bkz. Çizelge 6.21, 6.24 ve 6.27).

Hacime karşı adsorplama kapasitesindeki değişimin araştırıldığı çalışmalarda; 30mg/L çözelti için elektroadsorpsiyonda 5400mL'de (Bkz. Çizelge 6.15), adsorpsiyonda ise 4500mL'de (Bkz. Çizelge 6.29) denge derişimine ulaşıldığı görülmüştür. Aynı şekilde, 40mg/L için yapılan deneylerde, denge derişimine elektroadsorpsiyonda 5100mL'de (Bkz. Çizelge 6.16), adsorpsiyonda ise 4400mL'de (Bkz. Çizelge 6.30) ulaşılmıştır. Sonuçlar, elektroadsorpsiyonda denge derişimine daha fazla çözelti hacminde ulaşıldığını göstermektedir. Yani, elektroadsorpsiyonla, adsorbanlar rejenere edilmeden, daha fazla çözeltiyi arıtmak mümkün olacaktır (Bkz. Şekil 6.20., 6.21, 6.36 ve 6.37).

Üç farklı elektrot yatak derinliğinde gerçekleştirilen deney sonuçları elektroadsorpsiyonla boyar madde gideriminin, kimyasal adsorpsiyona göre daha iyi olduğunu ortaya koymaktadır (Bkz. Şekil 6.38, 6.39 ve 6.40).



## 8. SONUÇ ve ÖNERİLER

Elektroadsorpsiyonun yanısıra kimyasal adsorpsiyon çalışmalarının da gerçekleştirildiği bu tez çalışmasında adsorban olarak aktif karbon ve perlitin 8:1 oranındaki karışımı kullanılmıştır. Her iki adsorpsiyon türü için elde edilen deneysel sonuçlara bir bütün olarak göz atıldığında elektroadsorpsiyon deneylerinde daha yüksek giderimlere ulaşıldığı ve reaktör çıkışında derişimin daha düşük düzeylere indirilebildiği görülmüştür.

Yapılan çalışmalarda “Acilan Blau- Bayer” boyar maddesi içeren ve 100 mg/L gibi, tekstil atıksuları için yüksek sayılabilecek bir derişimdeki çözeltilerin elektroadsorpsiyon ile başarılı bir şekilde arıtılabileceği sonucuna varılmıştır. Tekstil endüstrisi atıksuyu ile gerçekleştirilen çalışmalarda, bu suyun renginin %94 oranında giderilebildiği ve bunun için ise 0,0523 kWh/m<sup>3</sup> enerji tüketildiği bulunmuştur.

Daha önce gerçekleştirilmiş çalışmalarda, elektroadsorpsiyon ile boyar maddelerin [35], [36] yanısıra Kadmiyum (Cd), Civa (Hg), Krom (Cr), Nikel (Ni) gibi ağır metallerin geri kazanımı [30], [31], [34], [37], fenol, β-naftol gibi organik maddelerin [38], [39], Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) gibi inorganik maddelerin [40], [41] ve mikroorganizmaların da [32] atıksulardan uzaklaştırılmasının başarı ile sağlanabildiği görülmektedir.

Sistemin önemli avantajları arasında; düşük enerji gereksinimi, aktif karbonların rejenere edilerek tekrar tekrar kullanılabilmesi, ek kimyasal madde gerektirmemesi sayılabilir. Sadece destek elektrolit olarak uygun bir tuz kullanılması (NaCl gibi) söz konusudur ki bu durumda da elektrokimyasal olarak oluşan hipokloritin, çözelti reaktörden çıktıktan sonra, zamanla ağartıcı özelliği göstererek, renk giderme işleminin devam etmesini ve atıksuyun, içerisinde mikroorganizma bulunması durumunda dezenfeksiyonu sağlar.

Sistemin dezavantajları, elektrik enerjisi kullanılıyor olması, aktif karbonların rejenere edilebilseler bile rejenerasyondan sonra adsorplama kapasitelerinin bir miktar azalması, uygulanan gerilim nedeniyle aktif karbonların az da olsa parçalanarak reaktörden suyla uzaklaşmasıdır.

Alternatif enerji kaynaklarına (Güneş enerjisi, Jeotermal enerji vb.) yönelerek elde edilebilecek elektrik enerjisi ile sistemin önemli bir dezavantajının üstesinden gelinebilecektir.

## KAYNAKLAR

1. Resmi Gazete, Çevre Kanunu, 11 Ağustos 1983, Sayı: 18132.
2. Resmi Gazete, Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, 4 Eylül 1988, Sayı: 19919.
3. USLU, O., TÜRKMAN, A., *Su Kirliliği ve Kontrolü*, T.C. Başbakanlık Çevre Genel Müdürlüğü Yayınları Eğitim Dizisi-1, Ankara, 1987.
4. ÇAKMAK, L., DEMİR, T., *Su Kirliliği ve Etkileri*, Çevre ve İnsan, Sayı:36, Ağustos 1997.
5. KARPUZCU M., *Çevre Kirlenmesi ve Kontrolü*, Kubbealtı Neşriyatı, Üçüncü Baskı, İstanbul, 1991.
6. MONTGOMERY. J. M., *Water Treatment Principles and Designs*, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley&Sons, Inc., USA, 1985.
7. KOCASOY, G.(Ed.), *Atıksu Arıtma Sistemleri*, TMMOB Kimya Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, 2. Baskı, İstanbul, 1991.
8. Resmi Gazete, Umumi Hıfzıssıhha Kanunu, 6 Mayıs 1930, Sayı: 1489.
9. Resmi Gazete, Su Ürünleri Kanunu, 4 Nisan 1971, Sayı: 13799.
10. Resmi Gazete, Tarım ve Köy İşleri Bakanlığı 10 No'lu Sirküleri, 28 Şubat 1985, Sayı: 18680.
11. LIN, S. H., PENG, C.F., *Treatment of Textile Wastewater by Electrochemical Method*, Wat. Res. Vol. 28, No. 2, pp. 277-282, Great Britain, 1994.
12. ŞENGÜL, F., *Endüstriyel Atıksuların Özellikleri ve Arıtımı*, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Yayınları No. 172, İkinci Baskı, İzmir, 1991
13. SINGLETON, R., W., *Textiles*, Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley&Sons, Vol: 22, USA, 1983.

## KAYNAKLAR (Devam)

14. KOZIOROWSKI, B., KUCHARSKI, J., *Industrial Waste Disposal*, 370 pp., Pergamon Press, London, 1972.
15. DOĞAN, A., Bir Pamuklu Tekstil Fabrikası Atık Suyunun Adsorpsiyon Yöntemiyle Arıtılabilirliğinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eylül 1989.
16. KARAPINAR, İ., KARGI, F., *Atıksulardan Boyar Maddelerin Adsorpsiyonla Giderimi*, Çevre Bilimleri, Hacettepe Üniversitesi Çevre Uygulamaları ve Araştırma Merkezi, Sayı: 4, ss 1-7, Eylül 1996.
17. DEMİRAL, H., ATA, İ., UĞUZDOĞAN, E., SEVEN, C., *Atıksulardan Boyar Maddelerin Arıtılması*, Kimya Mühendisliği Uygulamaları Ödevi (yayınlanmamış), Eskişehir, Haziran 1994.
18. ANAÇ, İ., *Benzidin Türevli Tekstil Boyalarının Kanserojen Etkileri*, Çevre Kirliliği ve Kirleticilerin İnsan Bedenine Etkileri -Hava, Su, Toprak Kirliliği ve Atık, İlaç ve Kimyasalların İnsan Vücuduna Etkileri- Sempozyum Bildirileri, Ed: E. Dölen, İstanbul, 6-8 Ocak 1986.
19. KOPARAL, A. S., *Nitratın Sudan Elektrokimyasal Yöntemlerle Uzaklaştırılması*, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eylül 1996.
20. MCLARNON, F. R., CAIRNS, E. J., ISMAIL, M. I., *Introduction to Electrochemical Reactors, Electrochemical Reactors; Their Science and Technology, Fundamentals, Electrolysers, Batteries and Fuel Cells, Part A*, M. I. ISMAIL (Ed), Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands, 1989.
21. MARCHIANO, S. L., ARVIA, A. J., *Electrodes, Electrochemical Reactors; Their Science and Technology, Fundamentals, Electrolysers, Batteries and Fuel Cells, Part A*, M. I. ISMAIL (Ed), Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands, 1989.
22. ÖZTABAK, S., *Kobalt (III) Asetatın İki Kutuplu Damlamalı Reaktörde Elektrokimyasal Olarak Elde Edilmesi ve Prosesin Optimizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1987.

## KAYNAKLAR (Devam)

23. GÜVENÇ, A., İki Kutuplu Dolgulu Kolon Reaktöründe Mangan (III) Asetat Elektrosentezinin Optimizasyonu, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1989.
24. ÖĞÜTVEREN, Ü. B., Elektrokimya Mühendisliği, Yüksek Lisans Ders Notları, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yayımlanmamış), 1991.
25. UNBEHAUEN, H., ALATIQUI, I., *Control Systems, Electrochemical Reactors; Their Science and Technology, Fundamentals, Electrolysers, Batteries and Fuel Cells, Part A*, M. I. ISMAIL (Ed), Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands, 1989.
26. KITA, H., ARAMATA, A., *Fundamentals of Electrode Kinetics, Electrochemical Reactors; Their Science and Technology, Fundamentals, Electrolysers, Batteries and Fuel Cells, Part A*, M. I. ISMAIL (Ed), Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands, 1989.
27. ROUSAR, I., MICKA, K., KIMLA, A., *Basic Properties of Porous Electrodes, Electrochemical Engineering II, Part D-F*, Prague, Czechoslovakia, 1986.
28. PICKETT, D., *Electrochemical Reactor Design*, Elsevier Scientific Publishing Co., 1977.
29. ROUSAR, I., *Fundamentals of Electrochemical Reactors, Electrochemical Reactors; Their Science and Technology, Fundamentals, Electrolysers, Batteries and Fuel Cells, Part A*, M. I. ISMAIL (Ed), Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands, 1989.
30. ABDA, M., GAVRA, Z., OREN, Y., *Removal of Chromium from Aqueous Solutions by Treatment with Fibrous Carbon Electrodes: Column Effects*, Journal of Applied Electrochemistry, Vol. 21, pp. 734-739, 1991.

## KAYNAKLAR (Devam)

31. OREN, Y., SOFFER, A., *Graphite Felt as an efficient Porous Electrode for Impurity Removal and Recovery of Metals*, *Electrochimica Acta*, Vol. 28, No. 11, pp. 1649-1654, 1983.
32. GOLUB, D., BEN-HUR, E., OREN, Y., SOFFER, A., *Electroadsorption of Bacteria on Porous Carbon and Graphite Electrodes*, *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, Vol. 17, pp. 175-182, 1987.
33. YAVUZ, Y., BİLGE, F., *Elektrokimyasal Adsorpsiyonla Atıksu Arıtımı*, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Arıtım Teknikleri Ders Projesi (Yayımlanmamış), Aralık 1995.
34. ABDA, M., OREN, Y., *Removal of Cadmium and Associated Contaminants from Aqueous Wastes by Fibrous carbon Electrodes*, *Wat. Res.*, Vol. 27, No. 10, pp. 1535-1544, 1993.
35. DING,Z., MIN, C. W., HUI, W. Q., *A study on the use of Bipolar-Particles-Electrodes in Decolorization of Dyeing Effluents and its Principles*, *Water Science Technology*, Vol; 19, pp; 391-400, 1987.
36. DING,Z., MIN, C. W., *Study of New Decolorization Method of Dyeing Waste Waters*, *Environmental Chemistry*, Vol; 3, No; 4, August 1984.
37. GOLUB, D., OREN, Y., *Removal of Chromium from Aqueous Solutions by Treatment with Porous Carbon Electrodes: Electrochemical Principles*, *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 19, pp. 311-316, 1989.
38. EISINGER, S., R., ALKIRE, R., C., *Seperation by Electrosorption of Organic Compounds in a Flow-through Porous Electrode- II. Experimental Validation of Model*, *Journal of Electrochemistry Society: Electrochemical Science and Technology*, Vol. 130, No. 1, pp. 85-101, 1983.

## KAYNAKLAR (Devam)

39. PLAISANCE, H., MOCHO, P., BONNECAZE, G., *Adsorption and Electrosorption of Benzen on Granular Activated Carbon*, Environmental Technology, Vol. 17, pp. 1313-1325, 1996.
40. TOBIAS, H., TARAGAN, E., OREN, Y., SOFFER, A., *Removal of Suspended Alumina Particles from Heavy Water by Electroadsorption on Fibrous Carbon Electrodes*, Nuclear Technology, Vol. 77, April 1987.
41. COHEN, H., SOFFER, A., OREN, Y., *The Electroadsorption of Alumina Particles on Fibrous Carbon and Graphite Electrodes*, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 120, No. 1, November 1987.
42. VERMEULEN, T., *Adsorptive Seperation*, Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley&Sons, Vol: 1, USA, 1983.
43. FOWKES, F. M., *Adsorption*, Mc Graw-Hill Encyclopedia of Science and Technology, Vol: 1, Mc Graw -Hill, Inc., USA, 1982.
44. KIMBERLY, A., GGRAFF-BYUNG, R. K., *Textile Wastes*, Water Pollution Control Federation, V: 59, 1987.
45. YENER, J., AKSU, Z., *Atık Sularındaki O-Klorofenollerin Aktif Karbon üzerine adsorpsiyonununun incelenmesi*, UKMK-2 Bildiri Kitabı, 2.Cilt, S. Türkay, Ş.B. Tantekin-Ersolmaz, M.F. Yardım (Editörler). İTÜ, İstanbul, 9-13 Eylül 1996.
46. ÖZDEMİR, G., ATALAY, S., *Sulu Çözeltilerden Aromatik Bileşiklerin Aktif Kömürle Adsorpsiyonuna pH ve Tuz Etkisi*, UKMK-2 Bildiri Kitabı, 1. Cilt, S. Türkay, Ş.B. Tantekin-Ersolmaz, M.F. Yardım (Editörler). İTÜ, İstanbul, 9-13 Eylül 1996.

## KAYNAKLAR (Devam)

47. WENDT, H., *Commercially Available Materials for Electrolyser Construction, Electrochemical Reactors; Their Science and Technology, Fundamentals, Electrolysers, Batteries and Fuel Cells, Part A*, M. I. ISMAIL (Ed), Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands, 1989.
48. ÖZTÜRK, M., SAKA, N., *Tekstil Atıksularının Havalı Ortamda Aktif Karbonla Arıtılması*, Çevre'89 Beşinci Bilimsel ve Teknik Çevre Kongresi, Adana, 1989.
49. ULUATAM, S. S., *Su Filtrasyonunda Kum ve Perlitin Yatak Malzemesi Olarak Kullanımının Karşılaştırılması*, Doğa-Turkish Journal of Engineering and Environmental Science, Vol. 16, No. 4, pp. 281-289, 1992.
50. TEKER. M., İMAMOĞLU, M., ÖZACAR, M., *Pirinç Kabuğundan Yapılmış Aktif Karbonla Cu(II) ve Cd(II) İyonlarının Adsorpsiyonu*, UKMK-2 Bildiri Kitabı, 1. Cilt, S. Türkay, Ş.B. Tantekin-Ersolmaz, M.F. Yardım (Editörler). İTÜ, İstanbul, 9-13 Eylül 1996.
51. BALKAYA, N., AĞAR, E., ONAR, A.N., *Atıksudan Pestisit Giderimi*, UKMK-2 Bildiri Kitabı, 2. Cilt, S. Türkay, Ş.B. Tantekin-Ersolmaz, M.F. Yardım (Editörler). İTÜ, İstanbul, 9-13 Eylül 1996.
52. ELNEKAVE, M., KOYUGÖLGE, T., KIRDAR, E., DEVECİ, N., *Yünlü Tekstil Endüstrisi Atıksuyunun Biyolojik Arıtımı ve Renk Giderimi*, UKMK-2 Bildiri Kitabı, 2. Cilt, S. Türkay, Ş.B. Tantekin-Ersolmaz, M.F. Yardım (Editörler). İTÜ, İstanbul, 9-13 Eylül 1996.
53. ALTUNDOĞAN, H.S., TÜMEN, F., *Kırmızı Çamur Kullanılarak Sulu Çözeltilerden AS(V) Adsorpsiyonu*, UKMK-2 Bildiri Kitabı, 2. Cilt, S. Türkay, Ş.B. Tantekin-Ersolmaz, M.F. Yardım (Editörler). İTÜ, İstanbul, 9-13 Eylül 1996.
54. DAGAŞAN, L., ALKAN, R., YONSEL, Ş., ARHAN, Y., *Maya Atık Sularında Renk Giderimi Çalışmaları*, UKMK-2 Bildiri Kitabı, 2. Cilt, S. Türkay, Ş.B. Tantekin-Ersolmaz, M.F. Yardım (Editörler). İTÜ, İstanbul, 9-13 Eylül 1996.

## KAYNAKLAR (Devam)

55. ONAR, N. A., BALKAYA, N., AKYÜZ, T., *Phosphate Removal by Adsorption*, Environmental Technology, Vol. 17, pp. 207-213, 1996.
56. BRASQUET, C., ROUSSY, J., SUBRENAT, E., LE CLOIREC, P., *Adsorption and Selectivity of Activated Carbon Fibers Application to Organics*, Environmental Technology, Vol. 17, pp. 1245-1252, 1996.
57. DING, Z., GUAN, X. C, TAI, H. R., LAN, T. G., *Removing Nickel (II) in Water by Using Activated Carbon*, Environmental Chemistry, Vol. 2, No. 3, June 1983.
58. PEREZ-CANDELA, M., MARTIN-MARTINEZ, J., M., TORREGROSA-MACIA, R., *Chromium (VI) Removal with Activated Carbons*, Wat. Res., Vol. 29, No. 9, pp. 2174-2180, 1995.
59. GONCE, N., VOUNDRIAS, E. A., *Removal of Chlorite and Chlorate Ions from Water Using Granular Activated Carbon*, Wat. Res., Vol. 28, No. 5, pp. 1059-1069, Great Britain, 1994.
60. İNEL, O., KAYIKÇI, N., *Bentonit Türü Killerde Boyar Madde Adsorpsiyonu*, Doğa-Turkish Journal of Engineering and Environmental Science, Vol. 14, No. 2, pp. 332-341, 1990.
61. TÜMEN, F., ARSLAN, N., DAĞAŞAN, E., BİLDİK, M., *Phosphate Removal by Pyrite Cinder*, Doğa-Turkish Journal of Engineering and Environmental Science, Vol. 13, No. 1, pp. 83-93, 1989.



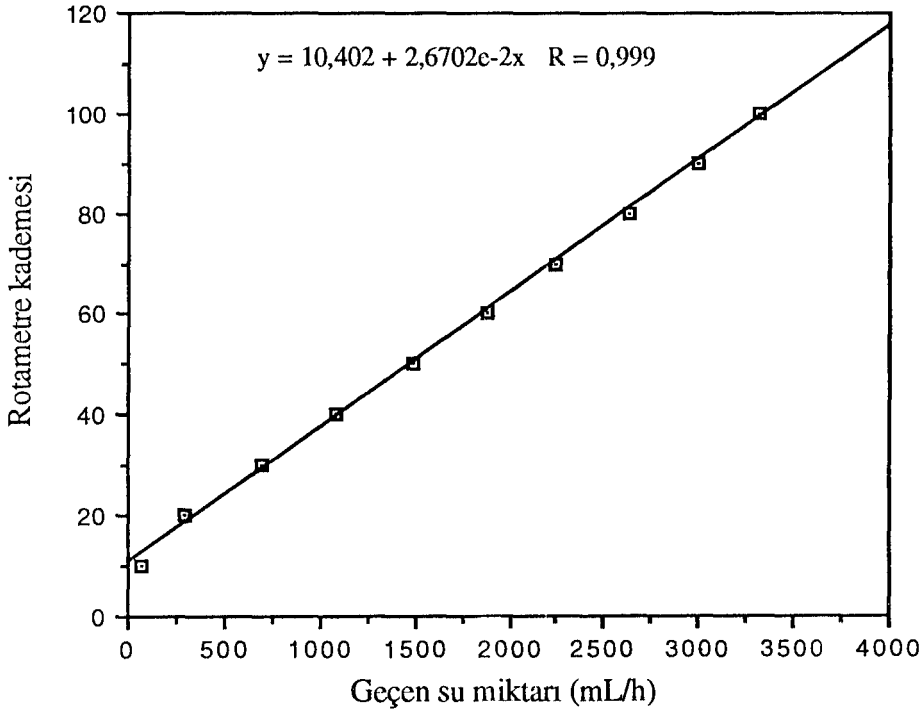
# **EKLER**

## EK 1. ROTAMETRE KALİBRASYONU

Rotametre kalibrasyonu yapılırken, her bir rotametre kademesi için 20 dakikada geçen çözelti hacimleri ölçülmüş ve ortalama değerleri göz önüne alınmıştır.

Çizelge EK 1.1. Rotametre kalibrasyonunda kullanılan veriler

Rotametre kademesi	Geçen su miktarı (mL, t=20 dak.)	Debi (mL/h)
10	22,5	67,5
20	99	297
30	231	693
40	361	1083
50	497	1491
60	625	1875
70	750	2250
80	880	2640
90	997	2991
100	1105	3315



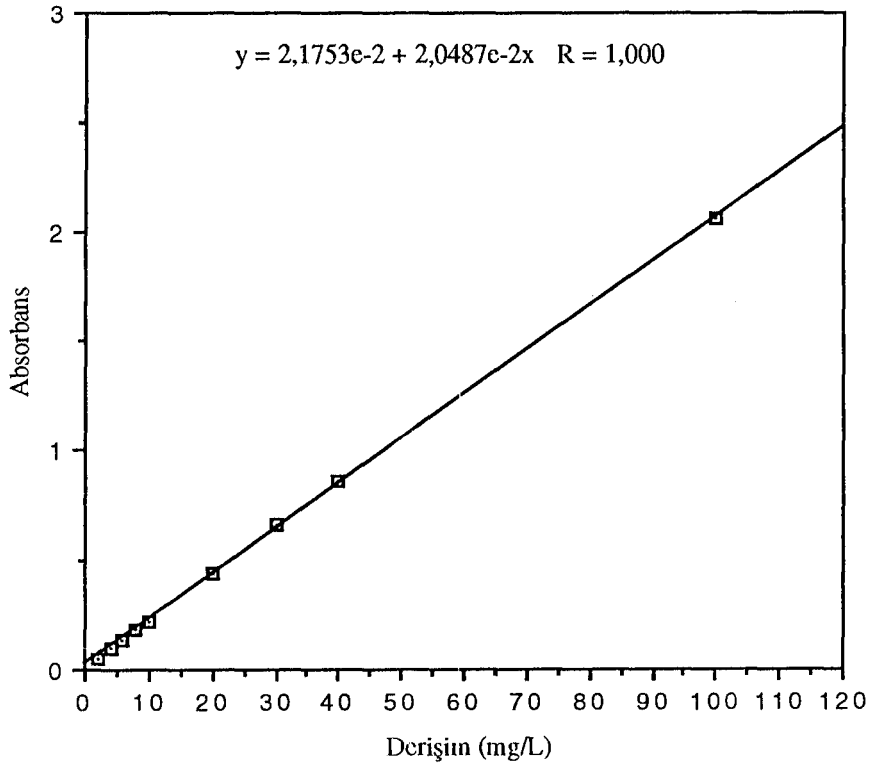
Şekil EK 1.1. Çizelge EK 1.1.'deki veriler yardımıyla elde edilen kalibrasyon doğrusu

## EK 2. STANDART ÇALIŞMA DOĞRUSU

Belirli derişimlerdeki boyar maddenin, spektrofotometrede 625 nm dalga boyunda Absorbans değerleri okunmuş ve derişime karşı grafiğe geçirilerek standart çalışma doğrusu elde edilmiştir.

Çizelge EK 2.1.Standart çalışma eğrisinin hazırlanmasında kullanılan derişim değerleri ve 625 nm dalga boyunda derişimlere karşılık gelen absorbans verileri

Derişim (mg/L)	2	4	6	8	10	20	30	40	100
Absorbans	0,053	0,096	0,139	0,182	0,222	0,442	0,656	0,854	2,059



Şekil EK 2.1. Standart çalışma doğrusu

### EK 3.

## ÖRNEK HESAPLAMALAR

#### EK 2.1. Derişim Hesabı

Çizelge 7.6'da 30 mg/L çözelti kullanılarak 15 V gerilimde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda (l= 25cm, 8:1) reaktörden çıkan çözeltinin absorbansı 0,036 bulunmuş ve derişim (6-1) eşitliği kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$y = 2,1753 \cdot 10^{-2} + 2,0487 \cdot 10^{-2} c$$

$$0,036 = 2,1753 \cdot 10^{-2} + 2,0487 \cdot 10^{-2} c$$

$$c = 0,695 \text{ mg/L}$$

#### EK 2.2. Yüzde Giderim Hesabı

Çizelge 7.10'da 0,1 M NaCl içeren 40 mg/L boyar madde çözeltisi kullanılmış olup, 20 V gerilimde elde edilen deneysel çalışmada (l= 25cm, 8:1), % Giderim (6-2) eşitliği kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Giderim} = \frac{(C_0 - C)}{C_0} \times 100$$

$$\% \text{ Giderim} = \frac{(40 - 4,31)}{40} \times 100$$

$$\% \text{ Giderim} = 89,23$$

#### EK 2.3. Enerji Tüketimi Hesabı

Çizelge 7.9'da 40 mg/L boyar madde çözeltisi kullanılmış olup,  $1,11 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$  akış hızı ve 5 V gerilimde Enerji Tüketimi (6-3) eşitliği kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$\text{Enerji tüketimi (kwh/m}^3) = \frac{I \times V}{v \times 10^3}$$

$$\text{Enerji tüketimi (kwh/m}^3) = \frac{6,9 \times 10^{-3} \times 5}{1,11 \times 10^{-3} \times 10^3}$$

$$\text{Enerji tüketimi} = 3,11 \times 10^{-2} \text{ kwh/m}^3$$