



**AĞIR METAL MİKROKİRLİLİĞİ İÇEREN  
ATIKSULARIN MEMBRAN  
BİYOREAKTÖR+GRANÜL AKTİF KARBON  
SİSTEMİ İLE ARITIMININ İNCELENMESİ**

**Savaş ÇALIK**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Çevre Teknolojisi Bilim Dalı**

**Doç. Dr. Okan Tarık KOMESLİ**

**2017**

**Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**AĞIR METAL MİKROKİRLİLİĞİ İÇEREN ATIKSULARIN  
MEMBRAN BİYOREAKTÖR+GRANÜL AKTİF KARBON  
SİSTEMİ İLE ARITIMININ İNCELENMESİ**

**Savaş ÇALIK**

**ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
Çevre Teknolojisi Bilim Dalı**

**ERZURUM  
2017**

**Her hakkı saklıdır**



T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

AĞIR METAL MİKROKİRLİLİĞİ İÇEREN ATIKSULARIN  
MEMBRAN BİYOREAKTÖR+GRANÜL AKTİF KARBON  
SİSTEMİ İLE ARITIMININ İNCELENMESİ

Doç. Dr. Okan Tarık KOMESLİ danışmanlığında, Savaş ÇALIK tarafından hazırlanan bu çalışma **28/03** 2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı – Çevre Teknolojisi Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği/oy çokluğu (.../...)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doç.Dr.Okan Tarık KOMESLİ

İmza :

Üye : Doç.Dr.Alper Erdem YILMAZ

İmza :

Üye : Doç.Dr.İlker KAZAZ

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu **05/10/2017** tarih ve **39/32** nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Cavit KAZAZ  
Enstitü Müdürü

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### AĞIR METAL MİKROKİRLİLİĞİ İÇEREN ATIKSULARIN MEMBRAN BİYOREAKTÖR+GRANÜL AKTİF KARBON SİSTEMİ İLE ARITIMININ İNCELENMESİ

Savaş ÇALIK

Atatürk Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı  
Çevre Teknolojisi Bilim Dalı

Doç. Dr. Okan Tarık KOMESLİ

Gerçekleştirilen çalışma sırasında laboratuvar ölçekli membran biyoreaktör (MBR) atıksu arıtma sistemine entegre edilmiş granüler aktif karbon sistemi ile karbon (KOİ), azot ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ), fosfor ( $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ) ve ağır metal arıtım verimi araştırılmıştır. MBR sistemi aktif çamur ve membran ünitesi olmak üzere iki tanktan oluşmaktadır. Aktif çamur ünitesi 10 L, Membran Ünitesi 8 L litrelik reaktörden oluşmaktadır. Orta Doğu Teknik Üniversitesi yerleşkesinde bulunan gerçek ölçekli MBR sisteminden 3.5 g/L konsantrasyonunda getirilen aktif çamur (MLSS) sistem dengeye gelene kadar çalıştırılmıştır. Sistem dengeye geldiği zaman MLSS konsantrasyonu 12 g/L seviyesine çıkmıştır. Sistem dengeye geldikten sonra sentetik olarak hazırlanan atıksuya seçilen ağır metaller, Arsenik (As), Nikel (Ni), Kurşun (Pb), Çinko (Zn), her biri ortalama 200 ppb konsantrasyonunda eklenmiştir. Çalışma iki kısımdan oluşmaktadır. Çalışmanın birinci kısmında MBR sistemi 16, 20 ve 24  $\text{L/m}^2\text{-sa}$  olarak üç farklı akıda çalıştırılmıştır. MBR giriş KOİ,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  değerleri sırasıyla ortalama 550, 80 ve 25 mg/L seviyesinde olup çıkış değerleri 25, 20 ve 21 değerlerindedir. En yüksek arıtım 16  $\text{L/m}^2\text{-sa}$  da ölçülmüştür. Arıtım verimleri ortalama 96, 56 ve 10 olmuştur. MBR çıkışındaki ağır metal arıtım verimi As için %10, Ni için %91, Pb için %96 ve Zn için %96 olarak ölçülmüştür. MBR çıkışındaki arıtılmış atıksu toplanarak 5 ml/dk akış hızında GAC kolonundan geçirilmiştir. GAC kolonu sonrası KOİ,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  arıtımı %35, 18 ve 11 oranında artış gözlemlenmiştir. GAC çıkışında As arıtımı %85 olarak ölçülmüştür. Ni, Pb ve Zn değerleri ölçülebilir değer olan 3 ppb'nin altında olmuştur.

2017, 98 Sayfa

**Anahtar Kelimeler:** Batık Membran Filtrasyonu, Ağır Metal Giderimi, Granüllü Aktif Karbon

## ABSTRACT

Master Thesis

### INVESTIGATION OF WASTEWATER INCLUDING HEAVY METAL TREATMENT WITH MEMBRANE BIOREACTOR COMBINED WITH GRANULATED ACTIVATED CARBON

Savaş ÇALIK

Ataturk University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Environmental Engineering Department  
Environmental Technology Department

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Okan Tarik KOMESLI

During the study, treatment wastewater including carbon (COD), nitrogen ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ), and phosphorus ( $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ) and heavy metals with laboratory scale Membrane Bioreactor (MBR) combine with Granular Activated Carbon system was investigated. There are two tanks in MBR system first one is activated sludge system about 10 L and the other one in membrane chamber about 8 L. Activated sludge was transferred Full Scale MBR system from Middle East Technical University. Concentration of MLSS was about 3.5 g/L and it increase around 12 g/L when it reached to steady-state. After steady-state, treatment system was feed by synthetic wastewater including heavy metals, Arsenic, As, Nickel, Ni, Lead, Pb, Zinc, Zn, concentration of each one was about 200 ppb. The study was conducted in two system. In the first system, MBR system was operated in three different fluxes, which were 16, 20 ve 24  $\text{L/m}^2\text{-h}$ . Concentration of COD,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  in the influent were about 550, 80 ve 25 mg/L respectively. The highest treatment was achieved when the flux was 16  $\text{L/m}^2\text{-h}$ . The heavy metal treatment efficiency of MBR system was 10% for As, For other selected metals were more than 90 % and for Ni it was 91%, for Pb it was 96% and for Zn it was 96%. After treatment of MBR system, treated wastewater was collected for GAC treatment. The flowrate of wastewater during the GAC column was arranged 5 mL/min. After GAC removal, extra 35% for COD, 18 % for  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and 11% for  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  treatment was achieved. The As removal was increased about 85% after GAC column. Concentrations of other heavy metals, Ni, Pb and Zn, were less than Limit of Detection which was 3 ppb.

**2017, 98 pages**

**Keywords:** Submerged Membrane Miltration, Heavy Metals Removal, Granular Activated Carbom

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde gerek maddi gerekse manevi her türlü desteğini esirgemeyen, çalışmalarına bilimsel anlamda yön veren ve karşılaştığım problemlerin çözümünde yardımcı olan hocam Sayın Doç. Dr. Okan Tarık KOMESLİ'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmanın başından sonuna kadar ilgi ve alakasını hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Sayın Onur SÖZÜDOĞRU teşekkürü bir borç bilirim.

Laboratuvar çalışmalarım boyunca her yardıma ihtiyacım olduğunda yardıma koşan ve desteğini esirgemeyen Çevre Mühendisliği Bölümünde görev yapan değerli çalışanlara teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman yanımda olan maddi ve manevi varlığımı benden hiç eksik etmeyen bugünlere gelmemi sağlayan, hayat boyu hakkını ödeyemeyeceğim canım annem Yektane ÇALIK' e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu zor çalışma sürecinde en çok fedakârlığı gösteren, yükümü paylaşan, sabır ve destekleriyle bitirmemde en çok yardımcım olan, manevi desteğini her an yanımda hissettiğim sevgili eşim ve hayat arkadaşım olan Kübra ÇALIK'e ve canımdan çok sevdiğim kızım Meryem Zümra ÇALIK ve oğlum Faruk Yahya ÇALIK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

**Savaş ÇALIK**

**Eylül, 2017**

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	x
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KURAMSAL TEMELLER.....</b>	<b>3</b>
2.1. Ağır Metal Nedir .....	3
2.2. Ağır Metal Kaynakları.....	4
2.2.1. Doğal Kaynaklar.....	5
2.2.2. Antropojenik (insan eliyle) kaynaklar .....	6
2.3. Arıtımı İncelenen Metaller .....	8
2.3.1. Arsenik .....	8
2.3.2. Kurşun .....	9
2.3.3. Nikel .....	10
2.3.4. Çinko .....	11
2.4. Ağır Metal Arıtım Yöntemleri .....	13
2.4.1. Kimyasal çöktürme.....	14
2.4.2. Koagülasyon-flokülasyon (Pıhtılaşma ve yumaklaştırma).....	15
2.4.3. Yüzdürme (Flotasyon).....	15
2.4.4. Elektrokimyasal arıtma teknikleri .....	15
2.4.4.a. Elektrokimyasal çöktürme .....	16
2.4.4.b. Elektrodializ .....	16
2.4.4.c. Membran elektrolizi .....	17
2.4.4.d. Membran filtrasyon .....	17
2.4.5. Biyosorpsiyon.....	19
2.4.6. İyon Değişirme .....	20
2.4.7. Adsorbsiyon (Yüzeye tutunma).....	21

2.5. Aktif çamur nedir .....	22
2.6. Aktif Çamurda Ağır Metal Arıtımı .....	23
2.7. Membran Biyoreaktör Nedir Nerelerde Kullanılır .....	27
2.8. Aktif Karbon.....	32
2.8.1. Aktif karbon çeşitleri.....	33
2.8.2. Aktif karbon arıtmada kullanım alanları .....	34
2.8.3. Aktif karbon ağır metal arıtımı.....	35
<b>3. MATERYAL ve METOD.....</b>	<b>37</b>
3.1. Analitik Yöntemler.....	37
3.1.1. Bulanıklık .....	37
3.1.2. Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) .....	37
3.1.3. pH.....	37
3.1.4. Sıcaklık ve çözünmüş oksijen .....	38
3.1.5. İletkenlik.....	38
3.1.6. Toplam Askıda Katı Madde (TSS).....	38
3.1.7. Uçucu Askıda Katılar (VSS) .....	38
3.1.8. Ağır metal tayinleri .....	38
3.2. Aşırı Mikroorganizma.....	41
3.3. Sentetik Atıksu Bileşimi.....	41
3.4. Membran Biyoreaktör+ Granül Aktif Karbon Arıtma Sistemi .....	42
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI .....</b>	<b>46</b>
4.1. Sistemin Devreye Alınması ve Çalışmaya Başlama .....	46
4.1.1. MLSS ve MLVSS değişimleri .....	47
4.1.2. KOİ Giderimi .....	48
4.1.3. $\text{NH}_4^+$ -N giderimi.....	51
4.1.4. $\text{PO}_4^{3-}$ -P giderimi .....	54
4.1.5. Ağır metal giderimi .....	57
4.1.5.a. Arsenik (As (V)+As (III) (Toplam arsenik)) arıtımı .....	58
4.1.5.b. Kurşun (Pb (II)) arıtımı .....	61
4.1.5.c. Nikel (Ni (II)) arıtımı.....	63
4.1.5.d. Çinko (Zn (II)) arıtımı .....	66
5. SONUÇ ve TARTIŞMA .....	70



KAYNAKÇA.....	73
EKLER.....	80
EK 1.....	80
EK 2.....	83
EK 3.....	88
EK 4.....	97
ÖZGEÇMİŞ .....	99



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

AKM	: Askıda Katı Madde
As (III)+As(IV)	: Arsenik
ÇO	: Çözünmüş Oksijen
GAC	: Granüllü Aktif Karbon
HRT	: Hidrolik Bekletme Süresi
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
MBR	: Membran Biyoreaktör
MLSS	: Aktif Çamur Havuzundaki Askıda Katılar
MLVSS	: Aktif Çamur Havuzundaki Uçucu Katılar
MR	: Membran Reaktör
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	: Amonyum Azotu
Ni (II)	: Nikel
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	: Nitrat Azotu
Pb (II)	: Kurşun
PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> -P	: Fosfat Fosforu
SRT	: Çamur Yaşı
TSS	: Toplam Askıda Katı Madde
VSS	: Uçucu Askıda Katı Madde
Zn (II)	: Çinko

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Peryodik tablo .....	3
Şekil 2.2. Biyolojik arıtımda metal konsantrasyonu ilişkisi .....	26
Şekil 2.3. Biyolojik reaksiyonların ağır metalle olan ilişkisi.....	26
Şekil 2.4. Por büyüklüğüne göre membran proseslerin sınıflandırılması .....	28
Şekil 2.5. Membran filtrasyonda kek kalınlığı ve akının; (a) klasik filtrasyon ve (b) çapraz akış filtrasyondaki değişimi .....	29
Şekil 2.6. Membran konfigürasyonları; batık ve harici membran sistemleri.....	30
Şekil 3.1. Arsenik metalinin cihaz kalibrasyon eğrisi.....	39
Şekil 3.2. Kurşun metalinin cihaz kalibrasyon eğrisi .....	40
Şekil 3.3. Nikel metalinin cihaz kalibrasyon eğrisi .....	40
Şekil 3.4.Çinko metalinin cihaz kalibrasyon eğrisi .....	41
Şekil 3.5. Laboratuvar çalışmasında kullanılan deneysel düzeneğin akış diyagramı .....	43
Şekil 3.6. MBR+ GAC Arıtma Düzeneği .....	45
Şekil 4.1. Çalışma sırasında MLSS ve MLVSS değişimi.....	47
Şekil 4.2. MBR Sistemindeki KOİ giderimi .....	48
Şekil 4.3. MBR+GAC sistemindeki KOİ giderimi .....	49
Şekil 4.4. MBR ve MBR+GAC sistemindeki KOİ giderim verimi .....	51
Şekil 4.5. MBR Sisteminde $\text{NH}_4^+$ -N giderimi .....	52
Şekil 4.6. MBR+GAC sisteminde $\text{NH}_4^+$ -N giderimi .....	53
Şekil 4.7. MBR ve MBR+GAC sisteminde $\text{NH}_4^+$ -N verimi.....	54
Şekil 4.8. MBR Sistemindeki $\text{PO}_4^{-3}$ -P giderimi.....	55
Şekil 4.9. MBR+GAC sisteminde $\text{PO}_4^{-3}$ -P giderimi .....	56
Şekil 4.10. MBR ve MBR+GAC sistemindeki $\text{PO}_4^{-3}$ -P verimi .....	57
Şekil 4.11. MBR sistemindeki As (V)+As (III) (Toplam arsenik) arıtımı .....	58
Şekil 4.12. MBR+GAC sistemindeki As(V)+As(III) (Toplam Arsenik) arıtımı.....	59
Şekil 4.13. MBR ve MBR+GAC sistemindeki As (V)+As (III) (Toplam Arsenik) verimi .....	60
Şekil 4.14. MBR sistemindeki Pb (II) arıtımı .....	61
Şekil 4.15. MBR+GAC sistemindeki Pb (II) arıtımı .....	62

<b>Şekil 4.16.</b> MBR ve MBR+GAC sistemindeki Pb (II) giderim verimi .....	63
<b>Şekil 4.17.</b> MBR sistemindeki Ni (II) arıtımı .....	64
<b>Şekil 4.18.</b> MBR+GAC sistemindeki Ni(II) arıtımı .....	65
<b>Şekil 4.19.</b> MBR ve MBR+GAC sistemindeki Ni (II) giderim verimi.....	66
<b>Şekil 4.20.</b> MBR Sistemindeki Zn (II) arıtımı .....	67
<b>Şekil 4.21.</b> MBR+GAC sistemindeki Zn (II) arıtımı .....	68
<b>Şekil 4.22.</b> MBR ve MBR+GAC sistemindeki Zn (II) giderim verimi .....	69



## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge 2.1.</b> Ağır metal iyonlarının içme suyu, sulama suyu ve metal endüstrisi direkt deşarjına ilişkin standartlar .....	12
<b>Çizelge 3.1.</b> Sentetik atıksu bileşimi.....	41
<b>Çizelge 3.2.</b> İz element çözeltilisinin bileşimi .....	42
<b>Çizelge 3.3.</b> MBR sisteminin özellikleri.....	43
<b>Çizelge 4.4.</b> GAC özellikleri.....	44



## 1. GİRİŞ

Dünya var olduğundan beri insanoğlu atıklarını alıcı ortama vermektedir. Belli bir konsantrasyona kadar alıcı ortama verilen organik atıklar doğa tarafından kabul edilebilmektedir. Fakat insan kaynaklı atıkların özümleme kapasitesinin üzerinde olduğu için alıcı ortamlarda olumsuz etkilere neden olmaktadır. Bu sebepten evsel ve endüstriyel atık suların arıtılması insan ve çevre sağlığı açısından çok önemlidir. Üstelik endüstriden kaynaklı ve doğada parçalanamayan atıkların alıcı ortama verilmesi ile temiz su kaynakları çok fazla kirlenmekte ve canlılar açısından toksik etki yapmaktadır. Artan nüfus ve gelişen teknolojiyle birlikte su tüketimi yıllar içerisinde hızlı bir artış göstermiştir. Bu nedenle mevcut temiz su kaynakları hızla azalmakta olup kişi başına düşen su seviyelerinde ciddi bir azalma görülmektedir. Bunlara ek olarak arıtılmadan veya yetersiz arıtılan atıksularda alıcı ortama verilmekte böylece alıcı ortamdaki temiz su kaynakları da kirlenmektedir. Üstelik iklim değişikliklerinden dolayı düzensiz yağışlar olmakta böylece mevcut yeraltı ve yerüstü su kaynakları olumsuz olarak etkilenmektedir. Gelişen sanayi ile birlikte kirlilik parametreleri değişmekte bunlardan birisi de ağır metal kirliliği olmaktadır. Ağır metal kirliliğinin en önemli kaynaklarından biri de endüstriden kaynaklanan atık sulardır.

Endüstriyel atık sular en çok toksik ve kirletici etkiye sahiptir. Ağır metal içeren endüstriyel atıksular pek çok sanayiden kaynaklanabilir. Bunların başında otomotiv, deri, metal sanayi, maden işletmesi gelmektedir. Ülkemizde endüstriyel ve evsel atıksuların aynı kanalizasyon sistemine verilmesinden dolayı ağır metal içeren atıksuların hacimleri önemli ölçüde artmaktadır. Alıcı ortama verilen ağır metal miktarı bölgede mevcut olan sanayi ile doğru orantılıdır. Bölgedeki sanayi ne kadar büyük ise ağır metal miktarı da o kadar fazla olmaktadır. Belediyelerin yapmış olduğu arıtma tesisleri ağır metal arıtımına yönelik tesisler değildir. Bunun için arıtmanın ağır metal içeren atıksudan hemen sonra yapılması ve gerekli giderimler sağlandıktan sonra alıcı ortama verilmesi gerekmektedir. Bazı belediyeler bu şekilde yapmasına rağmen birçok belediye doğrudan kendi kanalizasyon sistemine ağır metal içeren atıksuları almaktadır. Fakat karbon, azot, fosfor gibi kirleticilerin deşarj standartlarının yanında mutlaka ağır

metal standartlarının da sağlanması gerekmektedir. Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği Atıksu Deşarj Limitleri Yönetmelik Ek 1.1 ve alt tablolarında nüfuslara göre EK 1’de verilmektedir.

Endüstriyel kuruluşlar, Maden ocakları, Cevher yıkama ve zenginleştirme, sanayi bölgeleri v.b gibi yerlerden çıkan atıksular alıcı ortama verilmeden önce SKKY’e göre yeraltı ve yerüstü su kaynaklarının korunması, su kirliliğinin önüne geçilmesi, su kalitesinin korunması amacıyla her endüstri için ayrı bir deşarj sınırı getirilmiştir.

EK-1 tablolarda görüldüğü gibi ağır metal deşarj standartları endüstriden endüstriye değişim göstermektedir. Her endüstri için farklı ağır metal deşarj standardı bulunmaktadır. Bunun nedeni her endüstride aynı ağır metal bulunmamasıdır.

Ağır metallerin arıtımı konusunda değişik yöntemler kullanılmaktadır. Biyolojik arıtım ağır metal arıtımı konusunda pek yaygın kullanılan bir yöntem değildir. Genellikle ağır metallerin arıtımında fiziksel, kimyasal yöntemler kullanılmaktadır. Fakat son yıllarda bu yöntemlere ek olarak biyolojik prosesler de yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. Ağır Metal Nedir

Ağır metaller deyimi fiziksel özelliği açısından birim hacimdeki kütesinin  $6.0 \text{ g/cm}^3$ 'e eşit veya daha büyük yoğunluğa sahip metalik elementlere denir (Abel 1996; Barrera *et al.* 2006).

Ağır metallerin molekül kütlesi çoğunlukla  $20 \text{ g/mol}$ 'den daha büyük, atom ağırlığı 22-92 arasında değişen, periyodik tablonun 13-16. gruplarında yer alan, yarı iletken özelliğe sahiptir (Ciminli 2005). Başka bir deyişle Ağır metaller periyodik cetvelin, üçüncü ya da daha büyük periyodunda bulunan metaller veya yarı metaller, lantanitler ve aktinitler için kullanılan ve bilimsel olarak kabul edilmiş olmayan bir deyimdir (Şekil 2.1).

## Periodic Table of the Elements

The periodic table is organized into groups (1-18) and periods (1-7). The legend identifies the following categories:

- Alkalai metals:** Group 1 (yellow)
- Alkaline earth metals:** Group 2 (orange)
- Lanthanides:** Groups 3-10 (blue)
- Actinides:** Groups 11-18 (red)
- Transition metals:** Groups 3-10 (green)
- Unknown properties:** Groups 11-12 (grey)
- Post-transition metals:** Groups 13-16 (light blue)
- Metalloids:** Groups 13-16 (purple)
- Other nonmetals:** Groups 13-16 (cyan)
- Halogens:** Group 17 (dark blue)
- Noble gases:** Group 18 (orange)

The table includes the following elements and their atomic weights (in parentheses):

- Group 1: H (1.0078), Li (6.938), Na (22.990), K (39.098), Rb (85.468), Cs (132.91), Fr (223)
- Group 2: He (4.0026), Be (9.0122), Mg (24.305), Ca (40.078), Sr (87.62), Ba (137.33), Ra (226)
- Group 3: Sc (44.956), Y (88.906), La (138.91), Ac (227)
- Group 4: Ti (47.867), Zr (91.224), Hf (178.49), Rf (261)
- Group 5: V (50.942), Nb (92.906), Ta (180.95), Db (262)
- Group 6: Cr (51.996), Mo (95.96), W (183.84), Sg (266)
- Group 7: Mn (54.938), Tc (98.9062), Re (186.21), Bh (264)
- Group 8: Fe (55.845), Ru (101.07), Rh (101.07), Hs (269)
- Group 9: Co (58.933), Rh (101.07), Ir (223.02), Mt (268)
- Group 10: Ni (58.693), Pd (106.42), Pt (200.59), Ds (268)
- Group 11: Cu (63.546), Ag (107.87), Au (196.97), Rg (268)
- Group 12: Zn (65.38), Cd (112.41), Hg (200.59), Cn (268)
- Group 13: Al (26.982), Ga (69.723), In (114.82), Uut (268)
- Group 14: Si (28.086), Ge (72.63), Sn (118.71), Fl (268)
- Group 15: P (30.974), As (74.922), Sb (121.76), Uup (268)
- Group 16: S (32.059), Se (78.96), Te (127.60), Lv (268)
- Group 17: Cl (35.446), Br (79.904), I (126.90), Uus (268)
- Group 18: Ar (39.948), Kr (83.798), Xe (131.29), Rn (222), Uuo (268)
- Lanthanides: La (138.91), Ce (140.12), Pr (140.91), Nd (144.24), Pm (145), Sm (150.36), Eu (151.96), Gd (157.25), Tb (158.93), Dy (162.50), Ho (164.93), Er (167.26), Tm (168.93), Yb (173.04), Lu (174.97)
- Actinides: Ac (227), Th (232.04), Pa (231.04), U (238.03), Np (237), Pu (244), Am (243), Cm (247), Bk (247), Cf (251), Es (252), Fm (257), Md (258), No (259), Lr (262)

Şekil 2.1. Peryodik tablo



Yukarıdaki periyodik tabloda görüldüğü gibi kurşun, kadmiyum, krom, demir, kobalt, bakır, nikel, cıva, çinko, skandiyum, vanadyum, manganez, antimon, galyum, arsenik, stronsiyum, itriyum, zirkonyum, niyobyum, rutenyum olmak üzere 55'tan fazla metal dahildir.

Yeryüzünde doğal olarak bulunuş şekillerine bakılınca, dünyanın iç katmanlarında büyük yoğunluklu maddeler, dış katmanlarında ise yoğunluğu düşük maddeler yer almaktadır. Ağır metaller dünyanın dış katmanlarının bileşenleri olup, doğadan insanların neden olduğu etkilerle (antropojenik etkiler), jeokimyasal döngüleri ve biyokimyasal sistemleri etkilemektedir. Bu etkilerde doğal çevrede ağır metal birikimine neden olmaktadır (Aslan 2009).

Yer kabuğunun dış katmanlarında doğal olarak bulunan ağır metaller kolay kolay bozulmazlar ve kaybolmazlar. Örneğin; bakır, selenyum, çinko, gibi bazı iz elementler belli bir konsantrasyona kadar canlıların yaşamları için gereklidir (Kartal vd 2004; Pak 2011). Fakat belli bir konsantrasyondan sonra canlılar için zararlı etkilere neden olurlar. Bu etkiler canlıların özümseme kapasitesinin üzerinde olması halinde ağır metaller biyolojik birikime neden olarak canlıların biyolojik yapılarını bozmakta olup canlıların zarar görmesine, hücre yapılarının bozulmasına veya ölümüne neden olabilmektedir (Kar 2011; Knoblock *et al.* 1994).

## **2.2. Ağır Metal Kaynakları**

Ağır metaller doğal veya insan kaynaklı olarak, canlılar ile cansız çevrenin etkileşiminde ve bunlar arasındaki devamlılık arz eden ekolojik çevreye dahil olurlar. Ağır metaller sahip oldukları doğrudan veya dolaylı olarak yaptığı etkiler açısından kimyasal bir kirlilik olarak kabul edilir. Bir başka deyişle ağır metaller canlılar tarafından kullanılması, doğada canlıların bünyesine alınarak parçalanması, yok edilmesi belli bir konsantrasyona kadar olsa bile, bu konsantrasyon miktarları da oldukça düşük olduğu düşünülürse, biyolojik olarak canlılar ağır metalleri

parçalayamazlar. Doğada ağır metaller doğal parçalanma süreçleri hemen hemen hiç olmadığından ağır metal birikimlerine neden olmaktadır.

Kaynaklar açısından bakıldığında doğal ve antropojenik (doğada insan etkisinin neden olduğu etkiler) olarak iki başlık altında toplanır (Yılmaz 2009).

### **2.2.1. Doğal Kaynaklar**

Doğada bulunan hiçbir kaynak sınırsız değildir. Kaynakları kullanırken israf etmeden, ekonomik kullanmamız gerekir. Sürdürülebilirlik ve gelecek nesillere kaynaklar bırakmak için doğal kaynakların tasarruflu kullanmamız gerekir. Geri dönüşüm, geri kazanım gibi dönüşüm teknikleri kullanılarak kaynakların daha sürdürülebilir hale gelmesi sağlanmalıdır. Özellikle su çok önemli bir doğal kaynak olup, en çok kirlenmeye maruz kalan kaynaklardan bir tanesidir. Canlı yaşamı için su hayat demektir. Suyun olmadığı hemen hemen hiçbir biyolojik süreç yoktur. Suyun doğal yapısında da ayrıca metaller bulunmaktadır.

Ağır metal kaynakları canlıların yaşadığı ekosistemde çok çeşitli mekanizmalarla birikebilmektedir. Biriken ağır metaller kısa vadede toksik etki, uzun vadede ekosistemde metabolizmada birikim yapmasından dolayı kontrol altına alınması gerekir. Bu etkiyi ortadan kaldırmak için ağır metallerin uygun yöntemlerle bertaraf edilmesi için, uygun metot, geri dönüşüm, bir formdan başka bir forma dönüşümünün yapılması gerekmektedir (Cindoruk 2000).

Doğada ağır metaller yerkabuğunun dış katmanlarında oldukça yüksek konsantrasyonlar da bulunabilirler. Bu metaller çeşitli etkileşimlerle bir takım fiziksel, kimyasal ve fizikokimyasal süreçler geçirerek, çeşitli yollar izlemek suretiyle bir şekilde yine su kaynaklarına gelmektedir. Sonuç olarakta yerkabuğunda doğal olarak bulunan metaller nihayetinde sulara çeşitli yollarla geçerek ağır metal kirliliğine yol açmaktadır. Bununla birlikte ağır metaller sadece su ortamında birikmeyip toprakta, havada da birikebilirler. (Şengül vd 1986).

Ağır metaller, temel kaynağının silikat minarellerinden olan magmatik ve metamorfolojik kayaçların birtakım fiziksel, fizikokimyasal ve kimyasal prosesler neticesinde havaya, suya ve sedimentlere (torlu) ağır metal geçişleri ile oluştuğu söylenebilir (Yılmaz 2009).

### **2.2.2. Antropojenik (insan eliyle) kaynaklar**

İnsan faaliyetleri sonucunda evre bırakılan ağır metal kirlilikleridir. Bu kirlilik kaynakları birçok kaynaktan çevreye geçebilmektedir. Bunlardan bazıları karışık endüstriyel kaynaklı atıklar (organize sanayi bölgesi atıkları), taşıt fabrikaları, maden aktiviteleri, fosil yakıtlarının yoğun kullanıldığı trafik, döküm haneler, metal işletmeler, katı atık tesisleri, evsel, kentsel ve tarımsal faaliyetler sonucu çevreye geçerler (Abel 1996). Evsel atık sularda metal kirleticilerin kaynağı bakır, çinko, kurşun, demir boru sistemleriyle veya tanklarda etkileşimi ile bulunması sonucunda suya geçebilir. Evsel atıksuların karakterizasyonuna bakılınca Civa, Kurşun, Kadmiyum, Krom, Bakır, Kobalt, Alüminyum, Arsenik, Nikel v.b metaller çeşitli bulaşma yollarıyla evsel atık sulara karışabilmektedir. Ayrıca evlerde kullanılan kimyasal atık sınıfına giren kozmetik ürünlerde evsel atık sulara karışarak ağır metal kirliliğine neden olabilmektedir. Evsel atıksuların endüstriyel atık sularla veya yağmur suyu ile karışmasıyla oluşan kentsel atıksulardaki ağır metal kirliliğine neden olan kaynaklar ise kentsel atık toplama üniteleri, evsel atıklar, drenaj sulardır v.b. (Abel 1996; Aslan 2009). Deniz sularındaki metaller, erozyonlar, rüzgarlarla taşınan tozlar, partiküller ile volkanik aktivitelerde orman yangınları, bitki örtüsü, denizlere dökülen nehirler vasıtasıyla birikir (Kar 2011).

Doğal dolanım mekanizmalarına giren metaller insan eliyle veya doğal kaynaklardan çevreye ulaşır. Denizde yapılan araştırmalar Fe, Mn, Co gibi elementlerin doğal olarak yer kabuğundan sulara karıştığını Mg, K ve Ca elementlerinin deniz suyunun doğal bileşenleri olup hava ortamına bu kaynaktan geçtiğini buna karşılık Zn, Cu, Cd, Hg, Ag, Pb ve Cr gibi kronik ve akut zehirliliği yüksek elementlerin atmosfere insan eliyle karıştıktan sonra denize ve yer kabuğuna bulaştığı izlenimini ortaya koymaktadır. Kuşkusuz bu metallerin bu kısmı akarsular, drenaj yolları, atık su deşarj gibi belli başlı

yollar başta olmak üzere tarımsal alanlar dahil karalardan denize karışabilmektedir. İşte böylece karadaki kirletici kaynaklardan çıkıp gerek sıvı kirletici deşarjları ve gerekse atmosferde taşınmak suretiyle deniz ortamına geçen Zn, Cu, Cd, Pb, Cr gibi belli başlı zehirli metaller deniz suyunda bulunabilirler. Buda gösteriyor ki doğadaki ister doğal yollarla isterse antropojenik etkilerle olsun ağır metal kirliliği çeşitli dolaşım mekanizmaları ile kirletici olarak suları, toprağı, bitkileri kısacası ekosistemi etkilemektedir. Bu etkilerde bir şekilde canlı yaşamını tehdit etmektedir (Şengül *et al.* 1986).

Ağır metal kirliliğı içeren atık su kaynaklarının önemli bir kısmı aşağıdaki noktasal kaynaklardan gelmektedir.

**1-Maden Endüstrisi:** Madencilik faaliyetleri yeraltında bulunan veya başka bir deyişle yerkabuğunda bulunan ekonomik kıymeti olan cevherlerin ekonomiye kazandırma faaliyetleri olarak tanımlanabilir.

Maden atıkları endüstriyel atıklar kadar önemlidir. Maden atıklarının endüstriyel atıklardan daha tehlikeli olduğu söylenebilir. Çünkü endüstriyel atıklar bir yerde toplanıp daha kontrollü olarak çevreye bırakılırken maden atıklarında ise durum daha farklı gelişir. Maden faaliyetli sonucunda çıkan atıkların bir yerde toplanması zorlukları arasında olduğundan çevreye gelişi güzel bırakılır. Bu şekildeki yığınlar halinde doğaya bırakılan maden atıkları daha çok toprağı ve suyu pirimer olarak kirletmektedir (Gray 1997; Schreck 1998; Earman and Hershey 2004; Keller vd 2006; Şimşek vd 2012).

Maden ocaklarının (kömür, kireç taşı, demir v.b.) çalıştırılabilmesi için kullanılan proseslere göre kullanılan kimyasallar genellikle asidik karakterli olan maden drenaj suları miktarca yüksek konsantrasyonlarda  $Ca^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$  ve  $Fe^{+2}$ , daha düşük konsantrasyonlarda  $Al^{+2}$ ,  $Mn^{+2}$  ve diğere bazı iyonlarını içerir. Bakır, çinko, kurşun, krom, gümüş, altın, uranyum gibi metalleri içeren cevherlerin topraktan çıkarılması, temizlenmesi, öğütmesi ve saflaştırılması proseslerinde su önemli miktarda kullanılır.

Kullanılmış bu sularda önemli miktarda kirlenmiş olarak proses atığı olarak ortaya çıkmaktadır (Anonymous 1980).

**2-Metal Endüstrileri:** Madenlerden çıkarılan metallerin işlenerek kullanılabilir hale getirilmesi işlemine metal endüstrisi faaliyetlerini kapsamaktadır. Metal sanayii sektörü başta demir çelik işleme tesislerini kapsamaktadır. Bunlar genelde metal hazırlama ve işleme, galvanizleme, dağlama, elektrolitik kaplama, metal renklendirme, çinko kaplama, su verme-sertleştirirmediir. Bunun yanında iletken plaka imalatı, akü imalatı, emayeleme, sırlama, metal taşlama ve zımparalama tesisleri de yer almaktadır. Demir dışı metal üretimi, alüminyum oksit ve alüminyum izabesi, demir ve demir dışı dökümhane ve metal şekillendirme ve benzerleri de demir olmayan metal endüstrisi içerisinde yer almaktadır (SKKY 2004)

Başta demir - çelik endüstrisi olmak üzere bakır çinko, krom endüstrilerinin çeşitli fiziksel ve kimyasal proseslerinde oldukça fazla su kullanılır ve atık suları da ağır metal içerir (Aksu 1998).

**3-Sanayi Kuruluşları:** Üretim prosesleri sonucunda çıkan atıksuların toksik ve tehlikeli olması açısından doğaya, alıcı ortamlara en çok zarar verme potansiyeline sahip olan başta metal kaplama sanayi olmak üzere otomotiv, elektrik ve elektronik sanayi, makina sanayi, kimya sanayi ve boya endüstrileri gibi kuruluşların prosesleri sonucu çıkan atıksular bu grupta yer alır (Metcalf and Eddy 1991).

### 2.3. Arıtımı İncelenen Metaller

#### 2.3.1. Arsenik

Arsenik elementi As ile gösterilir. Peryodik tablonun ametallerin bulunduğu 5A grubu ve 4.periyodunda azot ve fosforun bulunduğu grupta olan, metal ile ametal arasında özelliğe sahip, birim hacimdeki miktarı  $5,13 \text{ g/cm}^3$ , atom numarası 33,atom kütlesi

74,92 g/mol, kaynama noktası 613°C, erime noktası 817°C olan rengi gri olan kırılğan bir metaldir.

Arsenik doğal ve antropojenik olarak alıcı ortamlara geçmektedir. Arsenik doğada yerkabuğunun doğal yapısında bulunmaktadır. Buralarda bulunan arsenik çeşitli proses ve suların kayaçları çözmesiyle yeraltı sularına ve diğer alıcı ortamlara karışmaktadır. Antropojenik kaynak olarak Arsenik ve bileşikleri, pigment boyama, tekstil, cam sanayi, seramik sanayi, organik ve inorganik kimyasal üretimi, petrol rafineleri gibi atıklarından kaynaklanmaktadır (Yıldız 2004; Topal 2009).

Arsenik bileşikleri, canlı metabolizmasına solunum, sindirim, deri yoluyla alınabilmektedir. Arsenik'in toz hali zehirsiz kabul edilmektedir. Vücuda alınan arsenik %95'ten fazlası kanda hemoglobin proteinine bağlanmakta ve birçok enzimin çalışmasını inhibe etmektedir. Arsenik, vücutta, saç, tırnak, karaciğer, böbrek gibi yerlerde birikebilmektedir. Arsenik ayrıca kanserojen etkide göstermektedir (Topbaş vd 1998; Yıldız 2004).

### **2.3.2. Kurşun**

Kurşun elementi Pb ile gösterilir. Peryodik tablonun ametallerin bulunduğu 4A grubu ve 6.periyodunda Gümüş, Civa, Platinin bulunduğu grupta olan, metalik özelliğe sahip, birim hacimdeki miktarı 11,34 g/cm<sup>3</sup>, atom numarası 82, atom kütlesi 207,2 g/mol, kaynama noktası 1740°C, erime noktası 327,5°C olan rengi mavimsi bir metaldir (Dündar ve Aslan 2005).

Kurşun diğer ağır metaller gibi doğal ve antropojenik olarak alıcı ortamlara ulaşmaktadır. Kurşun doğada az miktarda bulunmasına rağmen doğada oldukça sık olarak varlık gösteren bir metaldir. Antropojenik olarak kurşun birçok endüstriden kaynaklanmaktadır. Bu endüstrilerden bazıları; Kurşun madenleri ve metal endüstrileri akü ve pil fabrikaları, petrol rafineleri, boya endüstrisi ve patlayıcı sanayi atık sularında

da istenmeyen derişimler de kurşun kirliliğine rastlanmaktadır. Ancak çoğu kurşun içeren atıktaki kurşun, inorganik formdadır (Aksu 1994; Bayhan 1996).

Metal kirliliğinin başka bir boyutu ise radyoaktif bulaşmasıdır. Nükleer silahların denenmesi, nükleer endüstri atıkları ve atmosferde oluşan radyo izotoplar bu tür kirliliğin kaynaklarıdır. Zehirleyici özelliklerine rağmen taşıdıkları teknolojik önem nedeniyle endüstride geniş ölçüde kullanılmakta ve endüstriyel atıklardan belli miktarlar besin zincirine girmektedir (Anonymous 1980).

### **2.3.3. Nikel**

Nikel elementi Ni sembolü ile gösterilir. Peryodik tablonun geçiş elementlerinin 8B grubu ve 4.periyotta bulunan, birim hacimdeki miktarı  $8,912 \text{ g/cm}^3$ , atom numarası 28,atom kütlesi  $58,6943 \text{ g/mol}$ , kaynama sıcaklığı  $2.913^\circ\text{C}$ , erime sıcaklığı  $1,455^\circ\text{C}$  olan gümüş renkli bir geçiş metalidir. Nikel aynı zamanda aşınmaya, kimyasal bazı etkilere, paslanmalara, oksitlenmeye karşı oldukça dirençlidir.

Nikel doğada alıcı ortamlarda bulunuş şekillerine göre iki kaynaktan gelmektedir. Birincisi doğal kaynaklar, ikincisi antropojenik kaynaklardır. Bu iki kaynaktan da doğaya ve ekosisteme kirletici olarak girmektedir. Doğal kaynaklar likit magmasal, hidrotermal nikel yatakları ve lateritik nikel tortu kaynaklarıdır. Antropojenik kaynaklar ise evsel, kentsel, endüstriyel faaliyetler, (nikel madenleri, nikel işleme tesisleri, pil üretimi), metal sanayi v.b'dir.

Yukardaki bahsedildiği gibi Nikel doğal ve antropojenik olarak alıcı ortamlara geçmektedir. Nikel ağır metali daha çok insan kaynaklı olarak alıcı ortamı kirlettiği söylenebilir. Bu sebeple bir ağır metal olan Nikel canlılar için belli bir konsantrasyonun üzerinde toksik etki gösterecektir. Eğer canlı kendi özümseyeceği kapasitenin üzerinde ağır metale maruz kalması durumunda canlının ölümüne bile neden olacağından mutlaka Nikel'de alıcı ortamda kontrol altında bulundurulması gerekmektedir.

Sağlık açısından incelendiğinde Ni çok çeşitli yollarla insan sağlığını tehdit edebilmektedir. Ni canlı bünyesine içme suyu kullanımı yoluyla buluşacağı gibi, beslenmek için aldığımız gıdalardan da geçebilmektedir. Ayrıca çeşitli prosesler yoluyla havaya geçen Ni solunum yoluyla da vücuda alınabilmektedir. Bu ve benzeri yollarla vücuda alınan Ni belli derişimlere ulaştınca deride döküntü, tahriş ve alerjilere, hücre yapılarını bozarak, etkileyerek kanserlere, fazla derişim aynı zamanda böbreklerde birikime neden olacağından bu ağır metallerin böbrekten atılmasını etkileyeceğinden böbrek hastalıklarına neden olacak sağlık problemleri doğuracaktır (Eke 2010; Kasprzak *et al.* 2003).

#### **2.3.4. Çinko**

Çinko elementi Zn ile gösterilir. Peryodik tablonun geçiş elementlerinin 2B grubu ve 4. periyotta bulunan, birim hacimdeki miktarı  $7,14 \text{ g/cm}^3$ , atom numarası 30, atom kütlesi 65,409 g/mol, kaynama noktası  $907^\circ\text{C}$ , erime noktası  $419,53^\circ\text{C}$  olan sert ve kırılğan olan, parlak görünümlü, mavimsi açık gri renkli olan bir geçiş metalidir. Aynı zamanda çeşitli metal kaplamalarında korozyona karşı kaplama olarak da kullanılmaktadır (Addemir vd 1995; Güler 2008).

Çinko doğada alıcı ortamlarda bulunuş şekillerine göre yine Ni olduğu gibi iki kaynaktan gelmektedir. Birincisi doğal kaynaklar, ikincisi antropojenik kaynaklardır. Bu iki kaynaktan da doğaya ve ekosisteme kirletici olarak girmektedir. Çinko doğada dağınık ama yaygın bir şekilde bulunmaktadır. Doğal kaynaklar olarak yer kabuğunun kendi yapısındaki ZnO, ZnS v.b şekillerinde bulunmaktadır. Antropojenik kaynaklar ise, en önemlisi en başta geleni endüstriyel faaliyetler ki bunların içinde de en önemli kaynak elektrolitik kaplama banyolarıdır. Diğer önemli kaynaklar başında çinko cevheri çıkarma, işleme, kaplama gelmektedir. Ayrıca metal sanayide diğer Çinko kaynakları arasında gösterilebilir.

Yukardaki bahsedildiği gibi Çinko doğal ve antropojenik olarak alıcı ortamlara geçmektedir. Çinko ağır metali daha çok insan kaynaklı olarak alıcı ortamı kirlettiği



söylenbilir. Bu sebeple bir ağır metal olan Çinko canlılar için belli bir konsantrasyonun üzerinde toksik etki gösterecektir. Eğer canlı kendi özümseyeceği kapasitenin üzerinde ağır metale maruz kalması durumunda canlının ölmüne bile neden olacağından mutlaka Çinko'da diğer ağır metaller gibi alıcı ortamda kontrol altında bulundurulması gerekmektedir. Su Kirliliği ve Kontrol Yönetmeliğine bakıldığında Maden sanayii atık sularının alıcı ortama deşarj standartları EK 1. Sektör: Maden Sanayii (Kadmiyum Metali, Demir ve Demir Dışı Metal Cevherleri ve Endüstrisi, Çinko Madenciliği, Kurşun ve Çinkonun Rafinize Edildiği Tesisler, Kalsiyum, Florür, Grafit ve Benzeri Cevherlerin Hazırlanması) Çinko'nun 3 mg/L ve Sektör: Metal Sanayii (Sıcak Galvanizleme Çinko Kaplama) Tesisleri alıcı ortama 5 mg/L olması gerektiği bu değerlerin üstünde alıcı ortama bırakılması yasaklanmıştır (SKKY 2004).

Sağlık açısından Zn çok önemli metallerden biridir. Hatta insan sağlığı için stratejik öneme sahip bir mineral olduğunu söyleyebiliriz. Canlıların dışardan alması gereken iz elementlerinden bir tanesidir. Çinko eksikliğinde birçok hastalığa neden olabilmektedir. Bunlardan bazıları çocuklarda gelişme geriliği, UV ışıklardan koruma, sinir sistemlerinin işlemlerinin etkinliğinde gibi birçok etkisi mevcuttur.

**Çizelge 2.1.** Ağır metal iyonlarının içme suyu, sulama suyu ve metal endüstrisi direkt deşarjına ilişkin standartlar (İleri 2000)

Ağır Metal İyonu (mg/L)	İçme – Kullanma Suyu (TS266) (maks.)	Sulama Suyu (SKKY Teknik Usuller Tebliği) (maks.)	Metal Endüstrisi Direkt Deşarjı (SKKY) (maks.)
Ag (Gümüş)	0,05	0,1	0,1
Cd (Kadmiyum)	0,01	0,01	0,5
Cr <sup>6+</sup> (Krom)	0,01	0,1	0,5
Cu (Bakır)	1,0	2,0	3,0
Hg (Civa)	0,01	0,01	0,05
Ni (Nikel)	0,5	0,5	3,0
Pb (Kurşun)	0,5	5,0	2,0
Zn (Çinko)	5,0	2,0	5,0

## 2.4. Ağır Metal Arıtım Yöntemleri

Su insanlar için temel yaşam kaynağıdır. Doğada gerçekleşen bütün olayların temel taşlarından bir tanesi sudur. Hiçbir kaynak sınırsız, sonsuz değildir. Bu sebeple su nihayetinde dünyada sürdürülebilirlik açısından suların yeniden kullanılması gerekmekte, kullanılmış sularında eğer alıcı ortamlara bırakılacaksa ekosistemin devamlılığı açısından arıtmadan geçmesi gerekmektedir.

Su arıtımı denilince kirletilmiş, kullanılmış suların veya başka bir ifadeyle fiziksel, kimyasal ve biyolojik bazı özelliklerini kaybetmiş suların, yeniden bütün bu özelliklerinin suya yeniden kazandırılması için uygulanan proseslere denir (SKKY 2004).

Ülkemizde 2014 yılı itibariyle belediyelere ait kanalizasyon şebekelerinde toplanan 4.3 milyar m<sup>3</sup> atık suyun %44.2'si akarsuya, %2.8'i baraja, %2.2'si göl-gölete, %44 araziye ve %5.8 i diğer alıcı ortamlara deşarj edilmektedir. Kanalizasyon şebekesinden deşarj edilen 4.3 milyar m<sup>3</sup> atık suyun 3.5 milyar m<sup>3</sup>'ü atık su arıtma tesislerinde arıtılmıştır. Arıtılan atık suyun %33.2'sine biyolojik, %25'ine fiziksel ve %0.2'sine doğal arıtma yöntemlerinin kullanımını içermektedir (TÜİK 2014).

Ağır metal içeren atıksuların arıtım işlemi sırasında kimyasal olarak Koagülasyon, Flokülasyon, flotasyon; Elektrokimyasal olarak (Elektrokimyasal çöktürme, Elektrodializ, Membran elektrolizi), Membran filtrasyonu (MF, UF, NF, RO) Biyosorpsiyon, İyon değiştirme ve Adsorpsiyon işlemleri kullanılmaktadır.

Ağır metalin türüne, özelliklerine, suda bulunma şekline, atıksuyun debisine, deşarj kriterlerine göre yukarıda belirtilen yöntemlerden uygun olan seçilmektedir. Belirtilen arıtma yöntemlerinden bazen tek bazen de kombine olarak arıtma yöntemi seçilmektedir. Ağır metal arıtım yöntemleri aşağıda sıra ile açıklanmaktadır.

### 2.4.1. Kimyasal çöktürme

Atıksulardaki ağır metallerin arıtımı için en sık kullanılan yöntemlerden birisidir. Kimyasal çöktürmeye aynı zamanda durultucu işlemde denebilir. Genelde birincil arıtım dediğimiz mekanik arıtım işlemlerinde giderilemeyen çözünmüş veya askıda katıların su içerisindeki çökemeyen ağır metallerin çökebilecek hale gelmeleri için metalin özelliğine göre uygun kimyasallar kullanılarak su içerisinde çökeltme yoluyla ayrılmasıdır (Papadopoulos *et al.* 2004; Kurniawan *et al.* 2006; MEB 2013). Kimyasal çöktürme işleminde herhangi bir karıştırma olmaksızın sadece uygun kimyasallar kullanılarak çözünmüş ve askıda maddeler flokleştirilerek yer çekimi ile çökeltme meydana gelir, çöken çamur sudan uzaklaştırılır.

Ağır Metallerin giderilmesinde iki çeşit çöktürme yöntemi daha sık kullanılmaktadır. İlk olarak Hidroksit Çöktürmesi ve Sülfür Çöktürmesidir. Hidroksit çöktürmesinde uygulama açısından kolay uygulanabilir olması işletme kolaylığı sağlaması daha çok tercih edilmesine neden olmaktadır. Ayrıca bu arıtım prosesin de oluşan çamurun uzaklaştırılması da daha kolaydır. Bu yüzden Hidroksit çöktürmesi metallerin giderilmesinde sıkça tercih edilmektedir. Hidroksit çöktürmesi sularda serbest halde veya kompleks dediğimiz merkezi bir atom veya moleküle zayıf bir şekilde bağlanmış çevresindeki atom veya molekül yapısındaki metallerin arıtılmasında kullanılmaktadır. Diğer bir çöktürme yöntemi ise sülfür çöktürmesidir. Hidrojen, Demir, Sodyum gibi metallerin sülfür tuzları kullanılarak, metalleri metal sülfürleri şeklinde çöktürürler (Çeviker 1994; Tünay 1996).

Kimyasal arıtma sisteminin bazı avantaj ve dezavantajları mevcuttur. İlk kurulum maliyetinin düşük olması, işletme sırasında yaşanan problemlerin çok fazla olmaması avantajlarını oluştururken, çökeltme ile oluşan kimyasal çamurun bertarafında işletme giderlerinin artmasına neden olacağından bu prosesin dezavantajları arasında gösterilebilir (Kurniawan *et al.* 2006). Kimyasal çöktürme işlemi bazen arıtma tek başına yeterli olmayabilir. Bu durumda olarak birkaç prosesle kombine birleştirilerek arıtım yapılabilir.

#### **2.4.2. Koagülasyon-flokülasyon (Pıhtılaşma ve yumaklaştırma)**

Koagülasyon ve flokülasyon ile atık sulardaki ağır metal bulunduran suların arıtılmasında kullanılan arıtma yöntemlerinden birisidir. Koagülasyon presesi sırasında, ağır metal kirliliği içeren atık suya eklenen bazı kimyasallar (Demir, Alüminyum, kalsiyum tuzları, kireç taşı gibi kimyasallar kullanılarak) hızlı karıştırılması ile suda bulunan maddelerin kararlı yapısını bozup floklaştırma işlemi ile birlikte bu maddeler bir araya gelerek çökeltirilir. Floklaştırma sırasında yavaş karıştırma uygulanır. Bir araya gelen kirleticiler daha sonra çökeltiyerek uzaklaştırılır (Gönüllü 2004; Kurniawan *et al.* 2006). Ağır metal içeren atıksuyun pH'sı, kirletici konsantrasyonu, atıksuyun sıcaklığı, tane boyutu, bekleme süresi arıtım verimini etkilemektedir (Şahin 2010).

#### **2.4.3. Yüzdürme (Flotasyon)**

Yüzdürme işlemi ağır metal arıtımında kimyasal arıtmanın yanında çöktürme yerine kullanılan bir işlemdir. Ağır metal arıtımı sırasında tek başına arıtma sağlamamaktadır. (Boysan 2008). Çökelme işleminde olduğu gibi dibe çökerek değil tam aksine su yüzeyine toplanması şeklinde uygulanır (Gönüllü 2004; Lazaridis *et al.* 2001). Bir sıvı içerisinde bulunan ağır metaller hava kabarcıkları ile tutularak su yüzeyine taşınıp buradan da sıyırıcı veya benzer bir uygulama ile sudan uzaklaştırılması esasına dayanan bir arıtım yöntemidir (Kurniawan *et al.* 2006; Akanser 2010).

#### **2.4.4. Elektrokimyasal arıtma teknikleri**

Elektrokimyasal Arıtma Teknikleri, elektrokimyasal çöktürme, elektrodializ ve membran elektrolitidir. Bu üç teknikle de atık sularda ağır metal giderimi yapılabilmektedir (Gönüllü 2004).

#### **2.4.4.a. Elektrokimyasal çöktürme**

Elektroliz işleminde çözülen madde bulunduran veya başka bir ifadeyle serbest iyon içeren bir çözelti içerisine daldırılmış elektrik akımını iletmeye yarayan elektrotların oksidasyon-redüksiyon reaksiyonları meydana geldiği bir prosestir. Bu yöntemle atık suda bulunan ağır metal içeren inorganik maddelerin giderilebildiği ve geri kazanımının yapılabildiği bir uygulamadır. Sistem herhangi bir kimyasal madde ile beslenmesine gerek duymaksızın gelen redoks reaksiyonları ile ağır metal giderilmesi sağlanır. Yer zaman ve enerjiden tasarruf edilen bu arıtım yönteminin avantajları arasında gösterilebilir (Kurniawan *et al.* 2006).

#### **2.4.4.b. Elektrodiyaliz**

Atıksu içinde bulunan iyonlara dışardan bir voltaj uygulanır. Anyon ve katyon geçiren elektriksel potansiyel uygulanmış çözeltideki yüklü parçacıkların iyon değiştirici membrandan bir çözeltiden başka bir çözeltiye geçiş sağlaması şeklinde olan bir prosestir (Kurniawan *et al.* 2006).

Elektrodiyaliz prosesin de iyon değiştirici membranlar iki şekilde olabilir. Bunlardan bir tanesi anabolik diğeri ise kataboliktir. Atıksuyun içinde iyonlaşmış halde bulunan atık ile arıtım için kullanılan membrana atıksu beslemesi yapıldığında anyonlar anyon değiştiriciden geçerek anoda, katyonlarda katyon değiştiriciden geçerek katotta birirmektedir (Kurniawan *et al.* 2006; Özkök 2015).

Elektrodiyaliz yönteminde proses kontrolü AKM ve pH üzerinden yapılmaktadır. Elektrodiyaliz yöntemi ile yapılan ağır metal çalışmalarında 1000 mg/L'den daha fazla ağır metal içeren suların arıtımı için uygun olmadığı fakat 20 mg/L'den daha az konsantrasyona sahip ağır metal içeren suların arıtımın da başarılı olduğu gözlemlenmiştir (Kurniawan *et al.* 2006).

#### **2.4.4.c. Membran elektrolizi**

Membran elektroliz prosesinde, membranla arıtım elektroliz sırasında çözülmüş madde halinde bulunan süreçle birlikte yürütülür.

Bu prosese klor alkali süreci, ağır metallerin madde kazanımı, tuzlardan asit, baz üretimi örnek olarak verilebilir (Germic *et al.* 1997).

İki tip katot kullanılır metal katot ve geniş yüzey alanlı katottur. Akım yoğunluğu artırılması verim iyileştirme zamanı azalır. Enerjiye ihtiyacı daha azdır (Tzanetakakis *et al.* 2003; Boysan 2008).

#### **2.4.4.d. Membran filtrasyon**

Membranlar; bazı mikroorganizmalar, organik maddeler, askıda katı madde, iyonlar ve ağır metallerin arıtımı için kullanılır. Membranlar partikül boyutuna göre mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon ve ters ozmos, olmak üzere 4 membran tekniği vardır. Atık suyu özelliğine göre, kirletici konsantrasyon, atık suyun pH, sıcaklığına bağlı olarak membranlar seçilir. Metal sanayi atıksularından prosesler sonucunda oluşan metal kaynaklı kirliliğin arıtılmasında sıkça kullanılan bir yöntemdir. (Weber 1972; Kurniawan *et al.* 2006; Boysan 2008).

#### **1. Mikrofiltrasyon (MF)**

Mikrofiltrasyon tekniği basınç itici gücü ile arıtım yapan bir tekniktir. Düşük itici güce sahiptir. Mikrofiltrasyonla por çapına göre su ve atıksuların arıtımında kullanılan bir tekniktir. Membran ekstraksiyonu ile membran da tutulan maddelerle süzüntü kısmı arasından konsantrasyon gradyanı ile ayrılır (Judd 2006).

## 2. Ultrafiltrasyon (UF)

Ultrafiltrasyon tekniği atıksu arıtımında kullanılan önemli bir arıtım tekniğidir. Por çapına partikül büyüklüğüne göre moleküller, kirleticiler, iyonlar, metaller, virüsler, trihalometan giderimin de kullanılır. Büyük çaplı kirleticilerin membrandan geçişine engel olarak ayrıca bir saflaştırma işlemi gerçekleştirmektedir. Diğer arıtım proseslerinde olduğu gibi bu prosesinde kendi içinde artıları ve eksileri mevcuttur. En önemli artısı küçük yüzey alanı ihtiyacı ve daha küçük itici kuvvette ihtiyacı duymasındır. Membran tıkanması, kirlenmesi olduğundan membran performansı düşer, dolayısıyla da birim zamanda birim alandan geçen sıvı miktarı düşer, buda daha fazla itici kuvvette (daha fazla basınç) ihtiyacı duyulur. Daha fazla basınç, daha fazla enerji sarfiyatı demektir. Buda işletme maliyetini artırır (Asman and şanlı 1997; Laşn *et al.* 2000; Kurniawan *et al.* 2006; Boysan 2008). Membran da tıkanma fiziksel ve kimyasal yıkamayla giderilmezse membran değiştirilmesi gerekir. UF'da ağır metal giderimlerinde por büyüklüğü veya tekil haldeki ağırlıklarına bağlı (Molekül ağırlıklarına) olarak yapmaktadır (Arslan 2008).

## 3. Nanofiltrasyon (NF)

Nanofiltrasyon tekniği, por büyüklüğüne göre seçici ayırım yapan ve ters osmoz ile ultrafiltrasyon arasında bir geçirgenlik yapan arıtım yöntemidir. Por çapına sularda renk, koku, tad, pestisit, metal gibi kirleticilerin arıtılmasında kullanımında uygulama alanı bulmuştur (Aslan 2016).

Nanofiltrasyon arıtım tekniği ters osmozdan daha düşük basına ihtiyacı duyar. Nanofiltrasyon sularda sertlik yapan 2A grubu elementlerinin iyonlarını veya başka bir ifade ile +2 yüklü iyonların giderilmesinde oldukça geniş kullanım alanları bulmaktadır (Kurniawan *et al.* 2006).

Diğer arıtım yöntemlerinde olduğu gibi bu yöntemde kendi içerisinde arıtılacak suyun özelliklerine göre bazı üstünlükleri veya kısıtlılıkları mevcuttur. Pahalı oluşu,

membranın bozulmasına eğilimli olması önemli dezavantajları arasındadır. Nanofiltrasyonda daha düşük sürücü kuvvete ihtiyaç duyduğundan dolayısıyla daha düşük enerji ihtiyacına bu ise işletme maliyetinin daha düşük olmasına neden olmaktadır (Kurniawan *et al.* 2006; Boysan 2008).

#### **4. Ters Osmoz (Rezerve Osmozu RO)**

Ters osmoz atıksu içinde çözünmüş halde bulunan düşük moleküler kütlesi düşük kirleticilerin giderilmesinde sıkça kullanılan bir arıtım yöntemidir (Aslan 2016) . Bu arıtımda kullanılan membrandaki sıvı haldeki kirleticiler ile askıda, koloidal katıların çözünürlük ve geçirgenlik hızları sayesinde gerçekleşir. Sürücü kuvvet olarak basınç kullanılmakta olup, bu basınç etkisiyle yarı geçirgen bir zardan sıvı haldeki kirletici kısmı diğer tarafa fiziksel olarak hareket ederken molekül kütleleri büyük olan kirleticiler atıksu tarafında kalır ve yoğunlaştırılmış kısım elde edilir (Judd, 2006).

Besleme çözeltisinin osmotik basıncından daha büyük bir hidrostatik basınç uygulanarak katyonik bileşikler sudan ayrılırlar. Bu yöntemde diğer arıtım yöntemlerinde olduğu gibi kendi özelinde bir takım avantajlar ve dezavantajlar bulundurmaktadır. Önemli avantajlarından bazıları yüksek miktarda ağır metal giderimi yapabilir olması, arıtılan suyun tekrar kullanılabilir hale gelmesi, yüksek organik şok yüklemelere karşı dayanıklı olması, yüksek kimyasal kararlılıkta olması, yüksek sıcaklıklarda çalışılabilme imkanı ve mekanik dayanıklılık bu prosesin önemli avantajlarından. Bazı önemli dezavantajları ise; uygulanan sürücü kuvvet yani basıncın fazla olması, enerji maliyetini artıracak dolayısıyla bu da işletme maliyetini artıracaktır ve prosesin işletilmesinde deneyimli personele ihtiyaç olmasıdır (Weber 1972; Benito and Ruiz 2002; Sonune and Ghate 2004; Kurniawan *et al.* 2006).

#### **2.4.5. Biyosorpsiyon**

Biyosorpsiyon arıtım yöntemi biyolojik yapılar kullanılarak (mikroorganizmalar) ağır metalleri bünyelerine alarak, atık sudaki ağır metal giderimin de kullanılan tekniğe



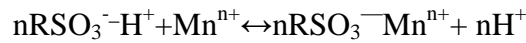
biyosorpsiyon denir. Çok karmaşık ve birçok etki mekanizması dolayısıyla uygulanması oldukça zor bir yöntemdir (Kargı 1998; Qaiser *et al.* 2007)

Yukarda bahsedildiği gibi biyosorpsiyon oldukça kompleks ve karmaşık olduğu, buna bağlı olarakta arıtımda birçok etki mekanizmasına sahip olacağı ve bu yöntemle en etkili arıtımın yapılabilmesi için optimum şartların oluşturulması gerekmektedir. Biyosorpsiyon arıtım yönteminin etkilendiği bazı parametreleri şöyle sıralayabiliriz; biyokütlenin yani kullanılacak biyolojik materyalin miktarı, cinsi, arıtılacak ağır metalin türü, özelliği, konsantrasyonu, sıcaklık, pH'tır (Hamutoğlu vd 2012).

#### 2.4.6. İyon Değişirme

İyon değişirme prosesi, atık sularda istenmeyen anyon ve katyonların giderilmesi için kullanılır (Samsunlu 2006). Çözünmeyen bir değişirme materyaline bağlanmış bir iyonun, çözültideki aynı yükte farklı iyonla yer değişirmesi esasına dayanan fizikokimyasal arıtma yöntemidir (Tchobanoglous 1991).

İyon değişirme çoğunlukla metallerin geri kazanılması işlemlerinde kullanılmaktadır. İyon değıştiriciler özelliklerine bağlı olarak metallerin giderilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. İyon değıştirme sırasında meydana gelen mekanizma şu şekilde gerçekleşmektedir.



Yukardaki denklemde anyonik fonksiyonel grubu  $n\text{RSO}_3^-$ , M katyon grubunu, n katsayısı ise oksidasyon oluşumuna bağlı olarak reaksiyon katsayısını ifade eder (Arslan 2008).

Bu yöntemde diğer arıtım yöntemlerinde olduğu gibi kendi içinde bir takım avantajlar ve dezavantajlar bulundurmaktadır. Önemli avantajlarından bazıları değerli metallerin

geri kazanılmasında, çamur oluşumunun olmaması, basit ve kullanışlı ekipmanlara sahip olması, uygulama süresinin kısa oluşu v.b. Dezavantajları ise yüksek maliyetli olması, bütün ağır metaller için uygulanabilir olmaması ve tek başına yeterli bir prosesi olmaması bazı arıtım yöntemleri ile kombineli olarak kullanılması şeklinde sıralanabilir (Weber 1972; Uysal 2012).

#### **2.4.7. Adsorbsiyon (Yüzeğe tutunma)**

Adsorbsiyon bir maddenin başka maddeleri yüzeyine bağlaması olayıdır. Başka bir ifade ile adsorbsiyon atıksu veya bir çözelti içinde bulunan kirleticilerin bir adsorbent yardımıyla adsorbente tutularak kirleticilerin ortamdaki uzaklaştırılmasıdır.

Adsorbsiyon, fiziksel, kimyasal ve değişim adsorbsiyonu olmak üzere üç çeşidi vardır. Fiziksel adsorbsiyon, adsorbanta bağlanan kirleticileri, adsorbent yüzeyin fiziksel kuvvetlerle bağlarlar. Kimyasal adsorbsiyon da, tanecik ile adsorbe olan molekül arasında kimyasal bağlarla bağlanırlar. Değişim adsorbsiyonunda ise, iyonlar kendi yüklerine zıt yüklü yüzeylerde birikmesi ile olur (Samsunlu 2006).

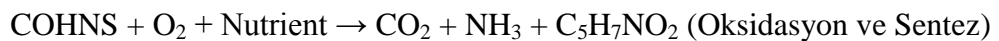
Adsorbsiyon arıtım yöntemi ağır metal gideriminde sıkça kullanılan bir yöntemdir. Adsorbsiyon biyolojik veya katı-sıvı adsorbsiyon olmak üzere de farklı kendi içinde yöntemleri mevcuttur. Biyolojik adsorbsiyonda mikroorganizmalar kullanılarak atıksudaki ağır metalleri giderirler (Yüksel 2000). Adsorbent olarak doğal veya doğal olmayan ürünler kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları aktif karbon, metal hidroksitler, tarım atıkları, selülozik ve polimerik malzemeler, reçine sayılabilir (Arslan vd 2004; Alyüz and Sevil 2005; Kurniawan *et al.* 2006; Boysan 2008). Doğal adsorbanların kullanılması maliyeti de düşürür. Adsorbanın seçiminde en önemli faktör ise maliyet ve verimdir (Lainé *et al.* 2000; Vengris *et al.* 2001; Gönüllü 2004; Boysan 2008).

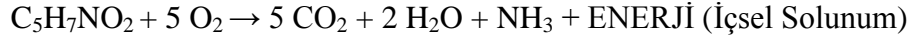
## 2.5. Aktif çamur nedir

Aktif çamur arıtımının mikroorganizma tarafından gerçekleştirildiği çeşitli karakterlere sahip atık suların arıtılmasında kullanılan biyolojik arıtım temelini oluşturan bir arıtım prosesidir. Başka bir ifade ile bu proses atık su içerisinde bulunan kirleticilerin yani organik yapıların oksijenin varlığında biyokimyasal yollarla yükseltgenme esasına dayanan kimyasal bir tepkime temeline dayanan bir arıtım yöntemidir. Biyolojik olarak parçalanma, ayrışma, oksitlenme, arıtımı da görev alan ve aktif çamur adını verdiğimiz mikroorganizmalar tarafından gerçekleştirilir. Biyolojik olarak parçalanma organik yapıların bir kısmı mikroorganizmalar tarafından enerji ihtiyacı için kullanılırken, kalan kısmı da yeni biyohücrelerin oluşumunda kullanılır (Tünay 1978; Odabaş 2006).

Biyolojik arıtım temelli olan aktif çamur prosesi, havalandırma tankı, çökeltme tankı, biyokütle devri ve atık biyokütle basamaklarını kapsar. Genelde sürekli veya kesikli olarak işletilen aktif çamur prosesi karbon giderimi, azot giderimi (nitrifikasyon, denitrifikasyon), fosfor giderimi yapılmaktadır. Proses oksijenli (aerobik) veya ortamda ki bağlı oksijeni kullanabilen (anoksik) şekilde işletilebilmektedir. Aktif çamur prosesi ile arıtımı yapılmış olan atık sudan aktif haldeki mikroorganizma çökeltilerek, flotasyonla veya membranla alınabilmektedir. Biyolojik olarak parçalanabilen organik maddeler (substratlar) biyokütlenin içsel solunumu ile enerjiye dönüştürülür. İçsel solunum canlının yaşam faaliyetlerini sürdürebilmesi için gerekli bir faaliyet olup organik bileşikler elektron verici,  $O_2$ ,  $NO_2$ ,  $NO_3$ ,  $SO_4$  ve benzeri gibi inorganik bileşikler ise elektron alıcı olarak ortamda bulunurlar. Elektron alıcı  $O_2$  ise proses aerobiktir. Biyokütle organik substrat içerisinde moleküller arası enerjiyi ATP (Adenozintrifosfat) fosfat bağlarına çevirir. Bu enerji hücre içerisinde büyüme ve yeni hücre oluşumlarında kullanılır (Spanjers and Vanrolleghem 1995).

Mikroorganizma organik maddeyi içsel solunum ile parçalar, hem de oksidasyon ve sentez yapar.





## 2.6. Aktif Çamurda Ağır Metal Arıtımı

Ağır metal içeren atık sular, deşarj edildikleri ortamda canlılar üzerinde olumsuz etkiler meydana getirirken ekosistemde döngüsünü etkilemektedir. Bu etkileri yok etmek için alıcı ortama deşarj edilmeden önce mutlaka arıtılması gereklidir. Ağır metallerin ekosistem ve özellikle canlı yapılar üzerindeki olumsuz etkileri yok etmek için arıtılırken biyolojik arıtımın tercih edildiği noktalarda (Ağır metal içeren evsel, endüstriyel, maden, sızıntı v.b.) biyolojik arıtım olumsuz etkilenmektedir.

Atıksuda çözülmüş halde bulunan ağır metaller, kimyasal çöktürme, kimyasal oksidasyon, iyon değişimi, filtrasyon (elektrokimyasal arıtma, ters osmoz), adsorbsiyon gibi prosesler kullanılmaktadır (Wheatland *et al.* 1975; Çalışkan 2002).

Son yıllarda çıkarılan ve yürürlüğe konulan yasa ve yönetmeliklerle su kalite standartları belirli şartları taşıma zorunluluğu getirilince arıtma proseslerinde daha etkili, verimli ve ekonomik arıtma alternatifleri, modifikasyonları geliştirilmiş, bu alternatifler ve modifikasyonlar içerisinde biyolojik arıtma tercihi artmaya başlamıştır. Biyolojik arıtma yapılabilmesi için gerekli şartları sağlanması açısından ise son zamanlarda değişik alternatif ve modifikasyonlarla tercih edilmeye başlanmıştır. Biyolojik arıtım tercihlerinde özellikle klasik aktif çamur sistemlerinin üzerinde çeşitli arıtım verimlerini, ortam şartlarını ve sistemin biyolojik yapısını ortaya koyacak bir takım fiziksel, kimyasal ve biyolojik çalışmalar yapılmıştır. Biyolojik prosesler kullanılarak atıksudaki ağır metal gideriminin de aktif çamur kullanılması oldukça önemlidir. Klasik aktif çamur sistemi de bir biyolojik arıtım olmasından dolayı ağır metal arıtımını esnasında mikroorganizmalara çeşitli etkilerle etki ederek arıtma verimini düşürebilmekte hem de mikroorganizmaların çalışmasını etkilemekte hatta belli bir konsantrasyonun üzerinde toksik etki yapabilmektedir. Klasik aktif çamur arıtım prosesinde atık sudaki ağır metal veya metaller iki kademeli olarak arıtımı yapılır. Mekanik arıtım dediğimiz birincil arıtım kademesi (çökelme), diğeri ikincil arıtım

kademesi olup atık sudaki çözünmüş maddelerin çamur üzerine tutunması ile gerçekleşir (Barth *et al.* 1965; Brown *et al.* 1973; Chen *et al.* 1974; Çalışkan 2002).

Atık sudaki ağır metallerin arıtım verimleri bir veya birden fazla etkiye bağlı olarak farklı arıtma verimleri incelenmiş ve arıtım kademelerine göre çeşitli verimler elde edilmiştir. Mekanik arıtım kademesinde çökeltme tankında %5-20, aktif çamur prosesinde %10-80 arasında ağır metal giderimi yapılabildiği ortaya konulmuştur. Yapılan araştırmalarda miktarı, cinsi, karakterizasyonu, mikroorganizma çeşidi, pH, AKM konsantrasyonu, çözünmüş oksijen konsantrasyonu, mikroorganizma yaşı, organik madde miktarı ve cinsi gibi birçok faktör incelenerek bu arıtım verimleri elde edilmiştir (Çalışkan 2002).

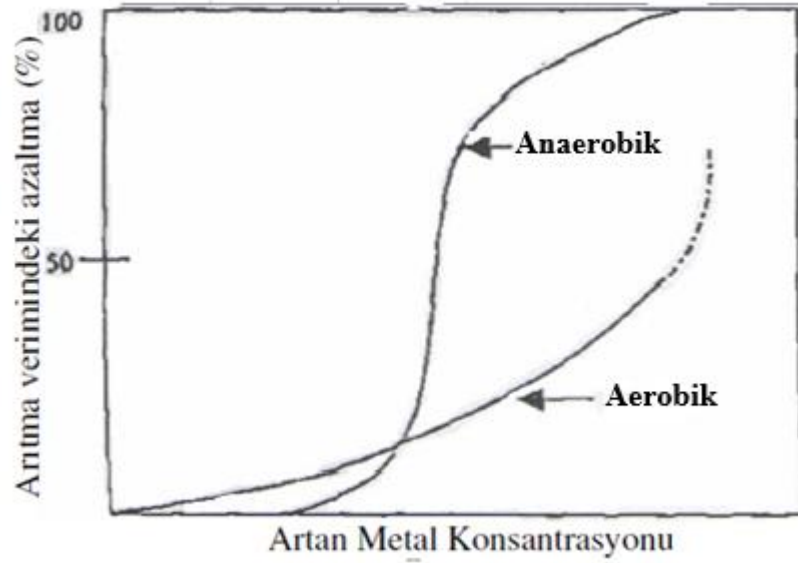
### **Aktif Çamur İle Ağır metaller Arasındaki Etkileşimler**

Metallerin belli bir konsantrasyonuna kadar canlıların temel yaşam faaliyetlerini sürdürebilmeleri için gereklidir. Fakat belli bir konsantrasyon üzerinde alıcı ortamlara verilmesi halinde ekosistemin tamamını veya bir kısmını etkileyerek besin zinciri ile canlıların bünyesine girerek olumsuz etkiler yapmaktadır. Ayrıca ağır metallerin deşarj edildikleri ortamlarda belli bir miktarın üzerinde çevresel yönden de olumsuz etkiler meydana getirebilmektedir. Krom, bakır, demir, kadminyum, gümüş, civa, nikel, antimon, kurşun, bizmut gibi ağır metaller toksiteliğe sebep olan bazı metallerdir (Gokcay ve Yetis 1991).

Ağır metal gideriminde biyolojik arıtma prosesleri ve modifikasyonları kullanılması ve etkileri birçok araştırmada incelenmiş. Bu etkilerin başında ağır metallerin kimyasal özellikleri yani doğadaki toksikliği, bulunuşu, ekosisteme etki mekanizmasının sebep olduğu incelenmiştir (Kaplan *et al.* 1987; Cindoruk 2000). Atıksu arıtımında kullanılan biyolojik proseslerde de ağır metallerin toksitedesi çözülmüş serbest halde bulunan metal iyonları sebep olabileceği belirtilmiştir (Cindoruk 2000). Fakat ortamdaki bu serbest metal iyonları bileşik oluşturabilir bu da farklı bileşikler oluşmasına neden olacağından oluşan bileşikler serbest haldeki iyonlardan daha az

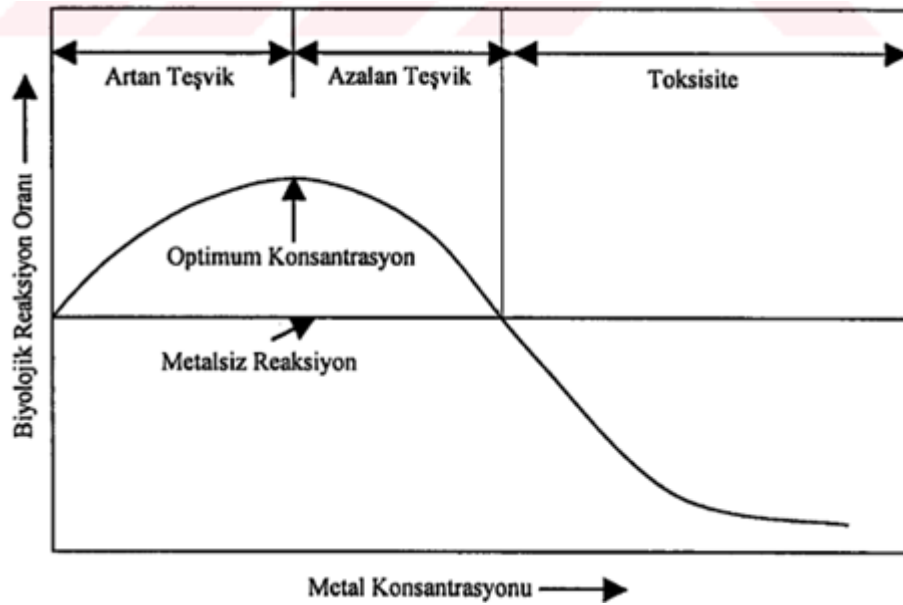
toksik etkiye sahip olabileceğinden atık sudaki metallerin toksik etkisini azaltabilir. Atıksudaki bu zehirli etkiyi azaltan mekanizmada topraktaki organik maddelerin temel yapı taşı olan humusun en aktif ögesi olan humik asit, yine humus kaynaklı olan fulvik asit gibi organik maddelerden oluşan, merkezde bir metale bağlanan iyonun, atomun veya molekülün sülfat, karbonat gibi inorganik bileşiklere sarması ile ve diğer kompleks oluşturan EDTA (etilendiamintetraasetik asit), TRIEN (trietiltetraamin) ile kararlı, belli bir dayanıklılığa sahip bir nevi kendi içinde denge halinde olan yapılar oluştururlar (Kaplan *et al.* 1987). Bu oluşuma kararlı, denge halinde olan metal ile merkezi bir metale bağlanan iyon, molekül, atomun oluşturduğu karmaşık yapıların, merkezdeki metale bağlanan iyon, atom, moleküllerin iyonlaşma derecesine, amino, karbonil, karboksil grubu gibi fonksiyonel gruplarla bağlıdır. Merkezi bir metale bağlanan iyon, atom veya molekülün polikarboksilik asitler, hidrosikarboksilik asitler, polifosforik asitler, bazı aminoasitler gibi kelatlaştırıcı maddelerle oluşturdukları komplekste kararlı olur (Bhattacharyya and Cheng 1987; Cindoruk 2000). Yüksek konsantrasyonda ağır metaller, mikroorganizmalar çalışmasına inhibe eder ve biyolojik arıtmayı olumsuz etkiler. Fakat metal konsantrasyonu daha düşük miktarlarda olduğu zaman mikroorganizmalar metallerin toksik etkisinden daha az etkileneceğinden daha kolay ortama uyum sağlar. Hatta düşük konsantrasyondaki metaller biyolojik reaksiyonu hızlandırabilir. Çünkü bu iz metaller canlılar için yaşamsal faaliyetlerini sürdürmeleri için gereklidir. Belli bir konsantrasyonun üstünde ise toksik etki gösterecektir (Gokcay ve Yetis 1991).

Barthe ve arkadaşları (1965), biyolojik arıtım verimi ile çözünmüş metal konsantrasyonu arasındaki ilişkiyi Şekil 2.2'de göstermiştir. Şekilde biyolojik arıtım yapılan bir sistemde arıtma verimindeki azalma ile artan metal konsantrasyonu incelenmiş olup arıtımın aerobik ve anaerobik şartlarda olumsuz yönde etkilenmeye başladığı andan itibaren gösterilmiştir (Demirer 1991).



Şekil 2.2. Biyolojik arıtımda metal konsantrasyonu ilişkisi (Barthe *et al.* 1965)

Mc Carty (1964), biyolojik reaksiyonların ağır metallerle ilişkisini göstermiştir. Şekil 2.3'te gösterilmiştir (Demirer 1991).



Şekil 2.3. Biyolojik reaksiyonların ağır metalle olan ilişkisi (Mc Carty 1964)

Ağır metallerin biyolojik aktiviteye etkisi, sadece karbon parçalanması yapan bakterilerle değil azot giderimi (nitrifikasyon, denitrifikasyon), fosfor giderimi yapan reaksiyonları gerçekteştiren bakteriler de kullanılmaktadır.

### **Aktif Çamurda Ağır Metal Giderimini Etkileyen Faktörler**

Biyolojik arıtımın aktif çamur proseslerinde ağır metal giderimini etkileyen üç temel etken vardır.

**1. İşletme Parametreleri:** Çamur konsantrasyonu, çöken çamur hacmi, aktif çamurun havuzda kalış süresi (çamur yaşı), çözünmüş oksijen konsantrasyonu gibi parametreler ağır metal giderimini etkileyen parametrelerdir (Cindoruk 2000). Yüksek miktarda sıvı haldeki AKM giderimi metal giderimini artırmaktadır (Brown *et al.* 1973; Chen *et al.* 1974; Cindoruk 2000).

**2. Fiziksel ve Kimyasal faktörler:** pH, metalin konsantrasyon çözünürlüğü, ağır metalin değeriği, partikül büyüklüğü gibi değişkenler fiziksel olarak biyolojik arıtımı etkileyen parametrelerdir (Cindoruk 2000). Yüksek pH da metal hidroksitler oluşmakta, düşük, pH da ise organik maddelerle metaller arasında daha fazla etkileşim olur. (Cindoruk 2000).

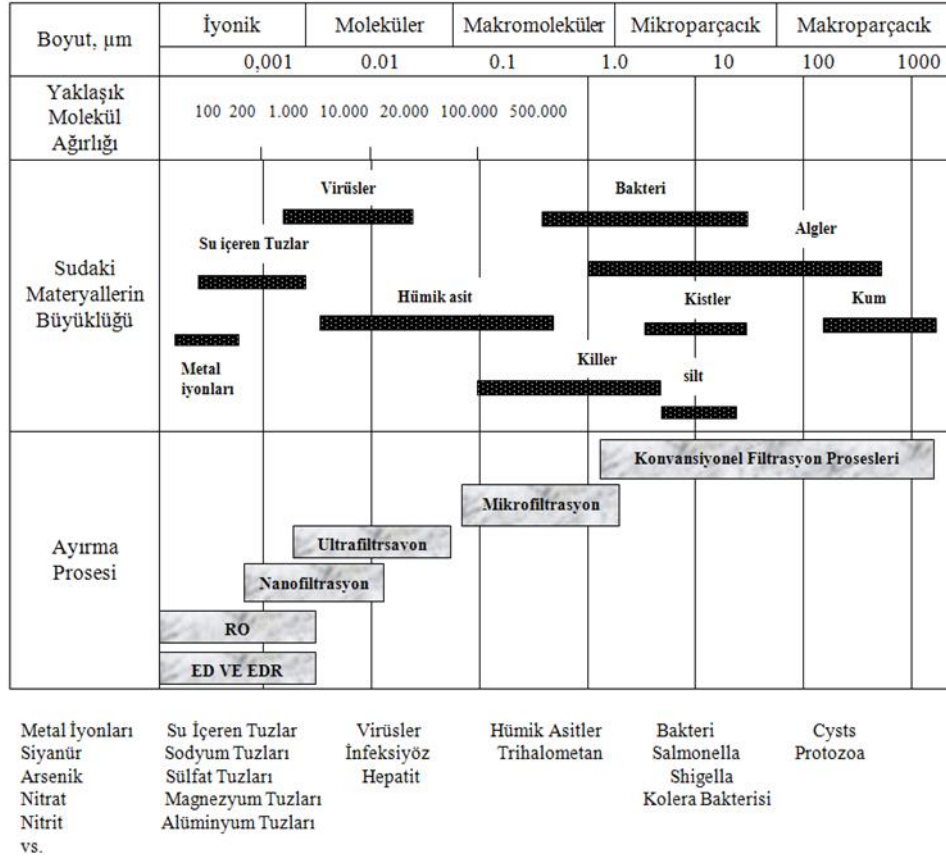
**3. Biyolojik Faktörler:** Ağır metal arıtımın etkileyen biyolojik faktörler hücre dışı polimerleri (EPS) gösterilebilir. EPS'ler ile yumak oluşturmakta olup buda çamur yaşı arttıkça artmaktadır.

### **2.7. Membran Biyoreaktör Nedir Nerelerde Kullanılır**

Membranlar; su veya atıksudaki fiziksel ya da kimyasal bileşenlerin bir kısmını geçiren yarı seçici özelliği olan metal, organik veya anorganik polimerlerden üretilmiş bir malzemedir. Membran ayırma mekanizması; ters osmoz, nanofiltrasyon, ultrafiltrasyon,

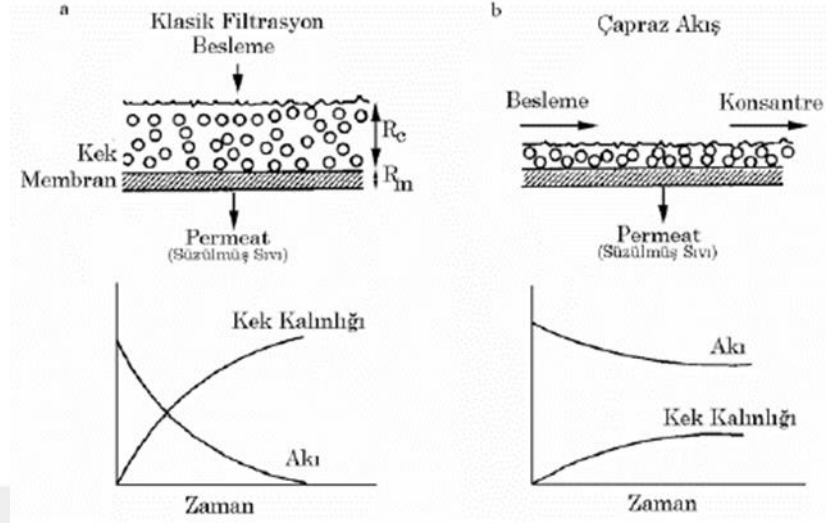


mikrofiltrasyon olmak üzere dört ana ayırım mekanizmasına sahiptir (Smith *et al.* 2012). Bu ayırma mekanizması içinde en geniş porlu olan mikrofiltrasyon, en küçük porlu olan ise ters osmozdur. Ayırma özelliklerine göre membranlar aşağıdaki şekilde verilmiştir.



**Şekil 2.4.** Por büyüklüğüne göre membran proseslerin sınıflandırılması (Judd and Jefferson 2003; Uzuner 2012)

Membran filtrasyonlarında 2 yöntem uygulanır. Birincisi klasik beslemeli (ölü son = Dead-End) ve ikincisi çapraz akış (Cross-Flow) yöntemleridir Şekil 2.5.

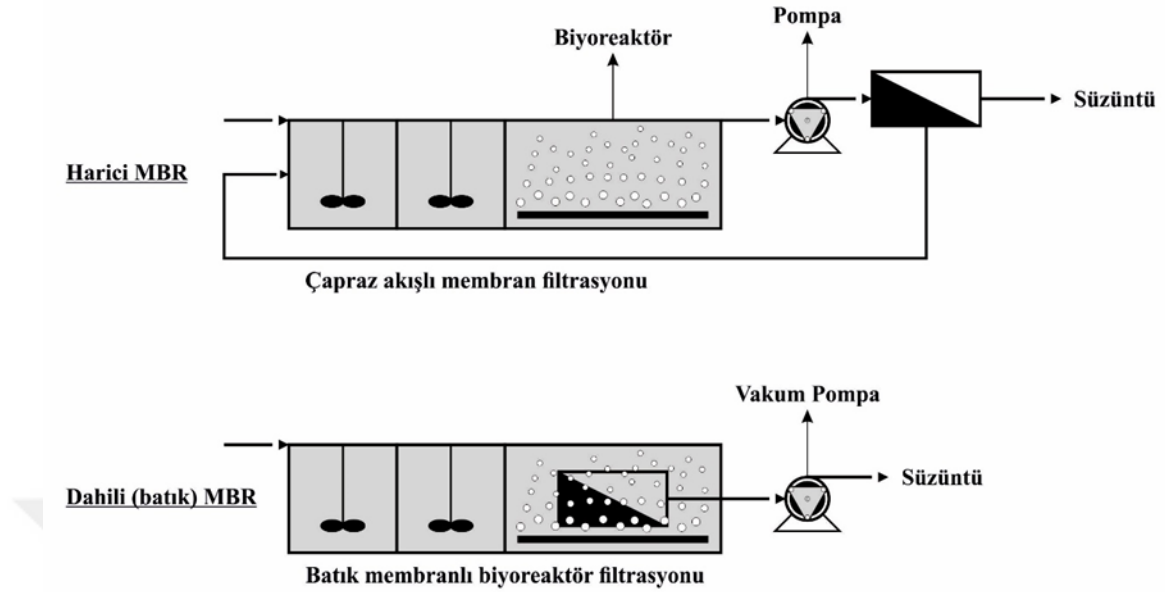


**Şekil 2.5.** Membran filtrasyonda kek kalınlığı ve akının; (a) klasik filtrasyon ve (b) çapraz akış filtrasyondaki değişimi (Cicek 2002; Sözüdoğru 2015)

Yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi klasik sistemde membran yüzeyine dik atıksu verilmektedir. Bu da membranın hızlı bir şekilde tıkanmasına sebep olmaktadır. Çapraz akışta ise membran yüzeyine paralel olarak atıksu verilmekte olup daha az tıkanma görülmektedir.

### Membran Biyoreaktörler

Membran biyoreaktörler, biyolojik arıtma sonrasında biyokütle ayırımı için klasik sistemlerde kullanılan çöktürme havuzu yerine mikro ve nanogözeneklere sahip membranlarının kullanıldığı sistemlerdir. Membran biyoreaktörler, biyolojik arıtımın membran sistemiyle birlikte entegre edildiği sistemlerdir. İki çeşit MBR sistemi bulunmaktadır. Bunlar harici ve dahili sistemlerdir (Şekil 2.6).



**Şekil 2.6.** Membran konfigürasyonları; batık ve harici membran sistemleri (Kitiş vd 2011)

### MBR Sistemlerinin Kentsel Atıksu Arıtımındaki Uygulamaları

MBR sistemleri ilk olarak kentsel atıksuların arıtılması ve yeniden kullanılması için kullanılmıştır (Çiçek *et al.* 1999; Cicek 2002). MBR'lar, kompakt oluşları ve az yer kaplamaları nedeniyle özellikle yer sıkıntısı olan bölgelerde ideal bir atıksu arıtım teknolojisi olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenlerden dolayı ihtiyaca göre arıtılacak atıksuyun özelliklerine göre birçok farklı MBR sistemleri tasarlanmıştır (Yamaguchi *et al.* 1991; Yiğit 2007). Membran teknolojisinin ilk çıktığı yıllarda oldukça pahalı bir sistem olması nedeniyle kentsel atıksuların MBR teknolojisi ile arıtılması çok dar alanlarda ve küçük ölçeklerde uygulama alanı bulabilmiştir (Muller *et al.* 1995). Hollanda'da gerçekleştirilen bir çalışmada, evsel atıksuların aerobik membran sistemi ile başarılı bir şekilde arıtılabildiğini, fakat prosesin yüksek basınç ve havalandırma maliyetleri nedeniyle makul bulunmadığı belirlenmiştir (Muller *et al.* 1995). Bir diğer çalışmada da çarpraz akışlı (cross flow) mikrofiltrasyon prosesinin ileri bir arıtma tekniği olarak kullanılmasının daha etkili olduğu belirtilmiştir (Ross *et al.* 1992; Ottoson *et al.* 2006). Fakat membran tasarımı ve optimizasyonundaki gelişmelere ve membran teknolojisi üzerinde çalışan firma sayısının artmasına paralel olarak, kentsel

atıksuların MBR sistemleri ile arıtılmasında maliyetlerin önemli oranda azalacağı düşünülmektedir. (Çiçek *et al.* 1999).

### **MBR Sistemlerinin Endüstriyel Atıksu Arıtımındaki Uygulamaları**

Endüstriyel atıksuların en önemli iki özelliği KOİ'nin yüksek oluşu, BOİ'nin düşük oluşu olması başka bir ifade ile yüksek organik yüklere sahip olması ve arıtmaya dirençli maddelerin olmasıdır. Bu yüzden klasik arıtım yöntemlerine ek olarak MBR gibi alternatif arıtma teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır (Çiçek *et al.* 1999; Brik *et al.* 2006).

Son yıllarda aerobik membran biyoreaktör sistemleri, endüstriyel atıksuların arıtılmasında anaerobik arıtımla birlikte kullanılan bir arıtma teknolojisi haline gelmiştir. Genel olarak yüksek miktarda KOİ değerine sahip atıksular, anaerobik sistemler ile arıtıldığından dolayı, endüstriyel atıksularda MBR teknolojisi de bu proses etrafında geliştirilmiştir (Çiçek *et al.* 1999). İlk olarak Degremont firması seramik ultrafiltrasyon membran ekipmanı içeren bir aerobik biyoreaktör tasarlayarak, Fransa'daki bir kozmetik endüstrisi atıksularının arıtılmasında uygulamaya başlamıştır. Bu arıtma sisteminde, çıkış suyu kalitesinin doğrudan kullanıma uygun nitelikte olduğu gözlenmiştir (Manem and Sanderson 1996; Brik *et al.* 2006).

Gıda endüstrisi proseslerinde oldukça fazla miktarlarda su tüketilmekte ve yüksek organik madde içeriğine sahip atıksu oluşmaktadır. Endüstrinin temel kirletici yüklerini ise yüksek BOİ5 ve KOİ yanında, toplam askıda katı madde, yağ-gres ve nütrientler oluşturmaktadır (Çiçek *et al.* 1999). İngiltere'de bir nişasta işleme prosesinde, anaerobik arıtımla desteklenen bir MBR sistemi işletime alınmıştır (Butcher 1989).

Güney Afrika'da geliştirilen ve Anaerobik Çürütme-Ultrafiltrasyon (ADUF) olarak adlandırılan sistem, bir süt işleme tesisinde uygulamaya alınmıştır. Bu sistemde KOİ %97 oranında arıtılmış ve kolloidal maddeler etkili bir şekilde uzaklaştırılmıştır (Ross *et al.* 1992).

Japonya’da gerçekleştirilen bir çalışmaya göre, alkol işleme proseslerinden kaynaklanan atıksuların pilot ölçekli bir anaerobik MBR sisteminde arıtılması sonucu %98 KOİ giderimi (7 kg/m<sup>3</sup>-gün KOİ yüklemesinde) elde edilmiştir. Ayrıca, bu çalışmada düşük miktarda biyokütle ve yüksek miktarda metan gazı elde edilmiştir (Nagano *et al.* 1992; Yiğit 2007).

Amerika’da bir otomobil fabrikasında sentetik metal sıvıları ve yüksek miktarda yağ gres içeren, 116 m<sup>3</sup>/gün debiye ve 6,3 kg KOİ/m<sup>3</sup>.gün yüke sahip atıksular, aerobik MBR sistemi ile arıtılmıştır. Sonuç olarak %94 KOİ arıtımı elde edilmiş ve yağ-gres içeriğinde önemli oranda düşüş sağlanmıştır (Knoblock *et al.* 1994; Yiğit 2007).

## **2.8. Aktif Karbon**

Aktif karbon çoğunlukla yapısal formül dediğimiz atomların birbirleriyle olan ilişkileri, bağlarını ve konumlarını gösteren yapılar veya kimyasal analiz yöntemleriyle ayrıca analiz edilmeyen, özelliği ortaya konulmamış, ayırt edilmemiş bolca gözenekli karbonlu malzemelere verilen genel bir terimdir. Yüzey alanı ve gözenek hacmi oldukça fazla olup mikrokristalin bir yapıya sahiptir. Gözenek hacimlerine bakıldığı zaman 0,2 cm<sup>3</sup>/gr’dan ve yüzey alanları ise 400 m<sup>2</sup>/gr’dan fazla olduğunu söyleyebiliriz (Gürdal and Yalçın 1992; Yazoğlu 2010) Gözenek çapları ise 3A° ile birkaç bin angstrom arasında değişmektedir (Orbak 2015).

Aktif karbon yukarıda bahsedildiği gibi gözenek hacmine, yüzey alanına ve bir gözenek çapına sahiptir. Aktif karbon yapısını oluşturan bileşikler olan %87-97 arasında karbon içerirler. Geriye kalan kısımlarda arıtımda kullanılacak kirliliğin içerisine göre Hidrojen, Oksijen, Kükürt, Azot ve diğer elementleri bulundurabilirler (Choma *et al.* 1987; Özdemir 2011; Şencan 2011; Jagtoyen *et al.* 1992; Yazoğlu 2010). Aktif karbon sahip olduğu özellikler bakımından iyi bir adsorbenttir.

### 2.8.1. Aktif karbon çeşitleri

Aktif karbon, hangi amaçla kullanılacaksa ona göre tanecik boyutu şekline göre seçilir. Bu nedenle Aktif karbon yapısal özelliklerine göre sınıflandırılacak olursak (Işılay 2013).

1-Toz Aktif Karbon (PAC); Toz haldeki Aktif karbon kimyasal etkileşimler neticesinde toz halde imal edilir. 0,18 mm çap aralığında küçük öğütülmüş yapılardır. Kullanımı kolay özellikle atık suların arıtılmasında sıkça kullanılan bir türdür (Uzun 2008; Özdemir 2013; Işılay 2013).

2- Granüler Aktif Karbon (GAC); 0,2-5 mm çap aralığında amorf yapılı yapılardır. Toz Aktif karbondan daha büyük yapılara sahiptir. Sıvı, gaz adsorpsiyon işlemlerinde sıkça kullanılmaktadır (Türkyılmaz 2011; Özdemir 2013; Işılay 2013).

3- Pelet Aktif Karbon; 0,8-5 mm çap aralığına sahip silindirik toz aktif karbon büyük olan yapılardır. Sağlam mekanik özelliklerinden dolayı gaz adsorpsiyondan daha çok kullanım alanı bulmakta (Küçükgül 2004; Işılay 2013).

4- Küresel Aktif Karbon; Katran, Naftalin ve Tetralin eritilip küreler elde edilip, bu elde edilen küreleri nafta dediğimiz bir çözügen ile muamele edip naftalin kimyasalı ile ayırma (ekstrakte) yapılmaktadır. Küresel Aktif karbon pelet aktif karbon gibi mekanik olarak dayanıklı olup gaz adsorpsiyonlarından sıkça kullanılmaktadır. Özellikle SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> gibi gazların adsorpsiyonlarında başarılı olarak uygulama alanı bulabilmektedir (Orbak 2015).

5- Emprenye Aktif Karbon: I, Ag, Al, Mg, Zn, Fe, Lt, Ca gibi elementler ile ketonlar, tersiyer aminler içeren karbon kullanılarak üretilmiş Aktif karbondur (Uzun 2008; Işılay 2013).

6- Pelimer Kaplanmış Aktif Karbon; Geçirgenliği olan, pürüzlü olmayan bir 'biocompatible' pelimeri gözenekli yapıya sahip olan karbonları çepeçevre kalın olmayan ince diyebileceğimiz bir kaplama ile kaplanarak elde edilir (Fennimore *et al.* 1978; Işılay 2013).

### **2.8.2. Aktif karbon arıtmada kullanım alanları**

Aktif karbonlar yapılarından kaynaklanan özelliklerinden dolayı çok iyi birer tutucu, emici veya adsorbenttirler. Bu üstünlükleri ile birçok alanda geniş uygulama alanı bulmaktadırlar. Aktif karbon sıvı ve gaz fazında çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. gaz maske yapımı, renk, koku giderimin de, atık su arıtımında, içme suyu arıtımında, çözücülerin geri kazanımlarında saflaştırılmalarında, konsantre edilmelerinde, gaz reaksiyonlarının hızlandırılmasında, katalizlemesinde, tıp eczacılıkta sıklıkla kullanılmaktadır (Şen 2009; Işılay 2013).

Aktif karbon sıvı haldeki uygulamalarında hedef olarak renk, koku, tad, köpük yapıcı (fosfatlar gibi) maddelerin uzaklaştırılması, çözeltilerin konsantrasyonlarının artırılmasında, katı maddelerin tutunarak geri kazandırılması işlemlerinde kullanılmaktadır (Ekici 2007; Işılay 2013; Özdemir 2013).

Aktif karbon aynı zamanda organik ve pek çok inorganik maddelerinde arıtılmasında sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle organik maddeler yüksek oranda arıtılabilmektedir (Eryıldız 2010; Işılay 2013; Özdemir 2013).

Aktif karbonlar sıvı, gaz absorpsiyonlarında, içme suyu arıtımında (renk, koku, klorür gazının uzaklaştırılması) (Döngel 1997), atık suların arıtılmasında (deterjanlar, hidrokarbonlar, pestisitler, fenoller, fosfatlar) kullanılmaktadır (Gülensoy 1995; Döngel 1997).

Aktif karbon gaz halindeki uygulamalarında daha güçlü mekanik yapılarda olup sıvı gaz uygulamalarına göre daha sağlam, yüksek m/v oranına sahip aktif karbondur (Akikol 2005; Işılay 2013; Özdemir 2013).

Gaz fazı uygulamaları temel olarak geri kazanım, ayırma, saflaştırma katalizlemedir. (Kirk-Othmer 1992; Işılay 2013; Özdemir 2013).

Endüstriyel gaz arıtılmasında (SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O vs.) (Doğu 1991; Kıncay 1991; Döngel 1997; Metzinger *et al.* 1992). Gaz karışımlarının ayrılmasında (Döngel 1997), gaz maske yapımında, temiz hava temini için (ofis, laboratuvar, hastane klima) cihazlarının kullanılmaktadır (Döngel 1997; Yamık 1995).

Gıda endüstrilerinde renk giderimin de, tat, koku giderimin de kullanılmaktadır (Döngel 1997; Jankowska *et al.* 1991).

Eczacılık ve tıp alanında mantar, yiyecek, fosfor, fenol gibi maddelerden kaynaklanan zehirlenmelerde tutum olarak yani adsorplayıcı olarak kullanılır (Döngel 1997; Bansal *et al.* 1988).

Diğer kullanım alanları ise, kimya endüstrilerinde, bazı değerli elementleri geri kazanımında, bazı kirleticilerin giderimin de kullanılmaktadır (Tırıs *et al.* 1993; Yalçın ve Arol 1993; Döngel 1997).

### **2.8.3. Aktif karbon ağır metal arıtımı**

Ağır metallerin arıtımında aktif karbon sıklıkla kullanılmaktadır. Bunun en önemli sebeplerinden bir tanesi maliyeti olmasıdır. Literatür incelendiğinden birçok ağır metalin Aktif karbon giderimi çalışmaları yapılmıştır. Özellikle organik içerikli malzemelerden yapılmış aktif karbon kullanılmıştır. Aktif karbon ağır metal arıtımına bakıldığında sıcaklık, karıştırma hızı, adsorbent miktarı arıtıma etki eden faktörler



olarak sıralanabilir. Bu etkilerden sıcaklık ısı alan (endotermik) olduğundan arıtıma olumlu etki yaptığı görülmesine rağmen yine de bu etki çok fazla olmadığı söylenebilir. Adsorbsiyonun asidik ortamlarda daha etkili olduğu yapılan çalışmalarda ortaya konulmuştur. Adsorbent miktarı da yine yapılan çalışmalara bakıldığında adsorbsiyon kapasitesiyle ters orantılı olmasına rağmen ağır metal giderimi ile doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir (Deniz 2014).

Aktif karbonla yapılan ağır metal giderimlerin de çalışmalarında daha çok organik içerikli maddeleri daha iyi arıttığı, ağır metal arıtmalarının ise aktif karbon tek başına yeterli arıtımı sağlayamayacağı görülmüştür.

### **3. MATERYAL ve METOD**

#### **3.1. Analitik Yöntemler**

Çalışmalar sırasında yapılan analizler Standart Metodlara (APHA) göre paralel olarak yapılmıştır. Çalışmalar başlamadan membran biyoreaktör sistemi dengeye getirilmiştir. Daha sonra analizler düzenli olarak yapılmaya başlanmıştır.

##### **3.1.1. Bulanıklık**

Çalışmalar sırasında atıksu giriş ve çıkış bulanıklığını belirlemek için WTW marka Turb-555IR model bulanıklık ölçer kullanılmıştır. Çalışmalar sırasında türbidimetre, 0 ile 1000 NTU arasında değişen bulanıklık standardı ile kalibre edilmiştir. (Katalog No. 22955-04).

##### **3.1.2. Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)**

Çalışmalar MBR giriş, MBR çıkış ve aktif karbon kolonu çıkış numunelerinden KOİ ölçümleri Standart Metodlar Method#5220C'e göre yapıldı. KOİ ölçümleri sırasında Merck Phoro 300 model spektrofotometre kullanılmıştır.

##### **3.1.3. pH**

pH ölçümleri için Horiba Marka D-55E model pH metre kullanılmıştır. Cihaz önceden hazırlanmış solusyonlarla pH 4 ve 9 göre kalibre edilmiştir.

#### **3.1.4. Sıcaklık ve çözünmüş oksijen**

Sıcaklık ve çözünmüş oksijen ölçümleri Horiba Marka D-55E model cihaz ile yapılmıştır.

#### **3.1.5. İletkenlik**

Horiba Marka D-55E model iletkenlik ölçer kullanılmıştır.

#### **3.1.6. Toplam Askıda Katı Madde (TSS)**

Havalandırma tankı ve filtre haznesindeki toplam askıda katı ölçümleri, Standart Metotlara (2540B) göre yapılmıştır.

#### **3.1.7. Uçucu Askıda Katılar (VSS)**

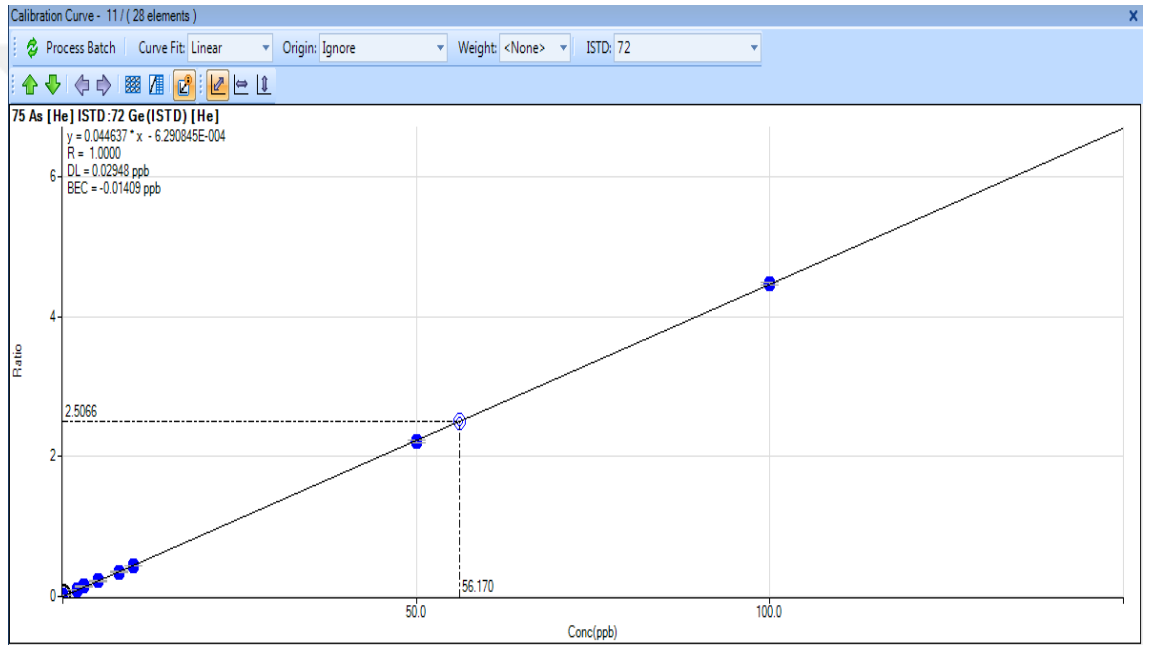
Havalandırma tankı ve filtre haznesindeki VSS ölçümleri Standart Metotlara (2540E) göre yapılmıştır.

#### **3.1.8. Ağır metal tayinleri**

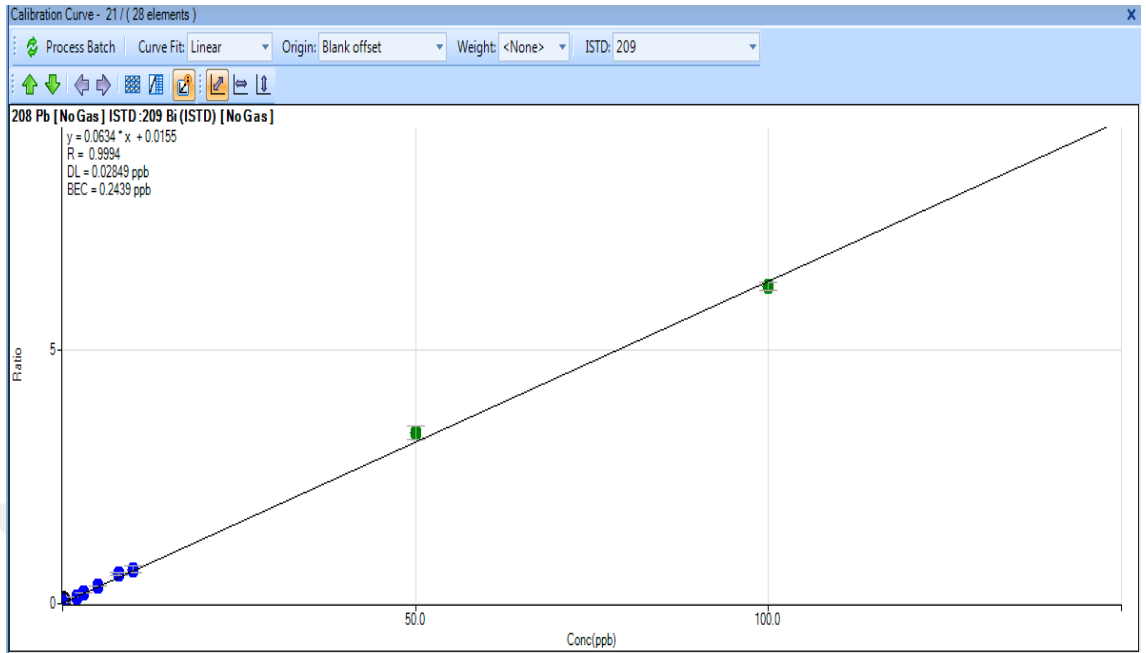
Çalışmalar sırasında Nikel, (Ni), Çinko, (Zn), Arsenik, (As), ve Kurşunun, (Pb) membran biyoreaktöre entegre edilmiş granül aktif karbon kolonu ile arıtımı incelenmiştir. Çalışma sırasında içerisinde Ni, Zn, As ve Pb olarak sentetik atıksu hazırlanmıştır. Giriş ve çıkış ağır metal konsantrasyonları sürekli olarak ölçülmüştür. Ağır metallerin analizleri ICP-MS (Endüktif Eşleşmiş Plazma-Kütle Spektrometresi) cihazı ile yapılmıştır. Bu Cihaz 80'den fazla element analizi gerçekleştirilebilir. Konsantrasyon aralığı ppt düzeylerinde ölçüm yapabilir olup, çalışma prensibi olarak elementler iyonlaştırılır iyonlar kütlelerine göre ayrıştırılır ve sayılarak ölçüm yapılır. Cihazda elektron çoğaltıcı dedektör sistemi kullanılmaktadır. Analizler cihaz

içerisindeki vakum ortamında gerçekleşir. Ortalama analiz süresi 4 dakika civarında olup aynı anda çok sayıda element analizi yapılabilir. Yüksek ölçüm hassasiyetine sahiptir. Plazmayı argon gazı kullanarak oluştururken sürükleyici gaz olarak helyum gazı kullanılmaktadır.

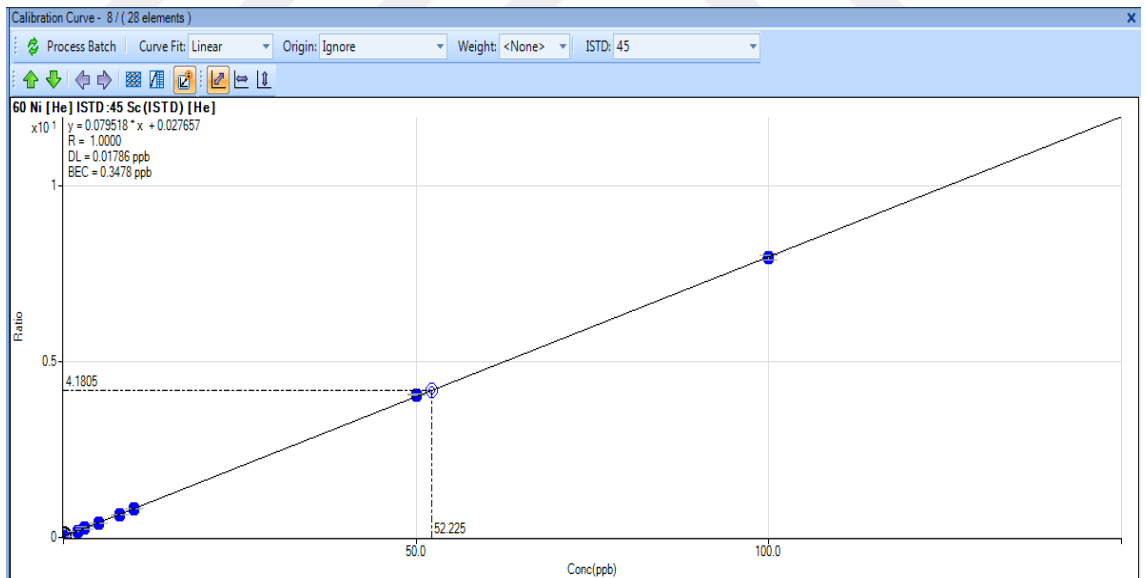
Belirlenen ağır metallerle ait cihaz kalibrasyon eğrileri 3,5,8,10,50,100 ppb aralığında çizilmiştir. Ağır metallerle ait kalibrasyon eğrileri aşağıda verilmiştir.



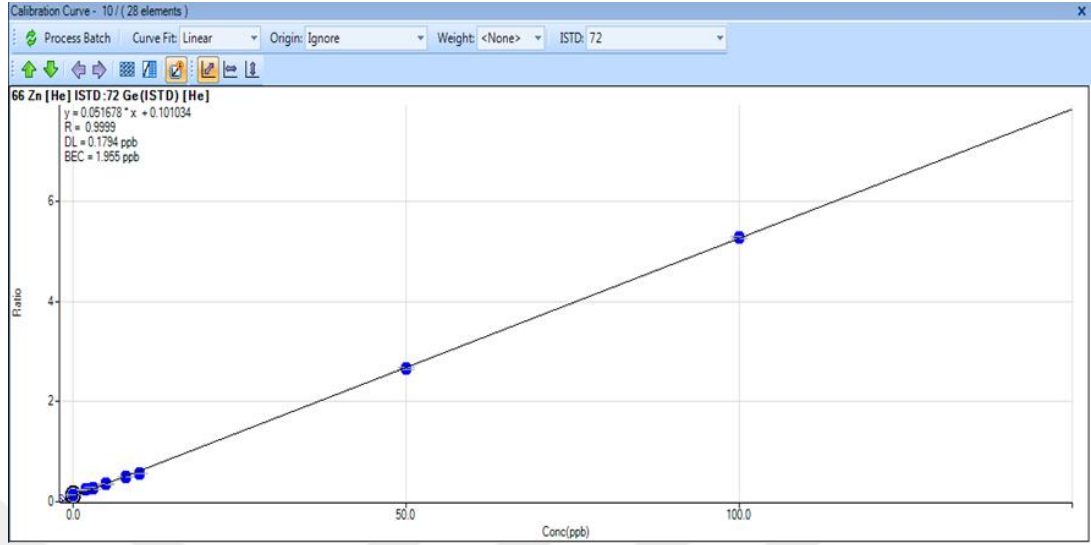
Şekil 3.1. Arsenik metalinin cihaz kalibrasyon eğrisi



Şekil 3.2. Kurşun metalinin cihaz kalibrasyon eğrisi



Şekil 3.3. Nikel metalinin cihaz kalibrasyon eğrisi



**Şekil 3.4.**Çinko metalinin cihaz kalibrasyon eğrisi

### 3.2. Aşı Mikroorganizma

Çalışma sırasında kullanılan aktif çamur ODTÜ MBR atıksu arıtma tesisinden alınmıştır. Alınan çamurun konsantrasyonu 3500 g/L olup reaktördeki MLSS konsantrasyonu 10000-12000 mg/L'ye ulaşana kadar 1.5 ay sentetik atıksu ile besleme yapılmıştır.

### 3.3. Sentetik Atıksu Bileşimi

Tüm deneysel çalışmalarda sentetik atıksu kullanılmış ve sentetik atıksu bileşimi Çizelge 3.1'de sunulmuştur.

**Çizelge 3.1.** Sentetik atıksu bileşimi

Kimyasal	Derişim (mg/L)
$\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	500
$\text{NH}_4\text{Cl}$	80
$\text{KH}_2\text{PO}_4$	18
$\text{NaHCO}_3$	140

Ek olarak hazırlanan sentetik atık suyun her litresine 1mL olacak şekilde Çizelge 3.2’de içeriği verilen iz element çözeltisinden eklenmiştir.

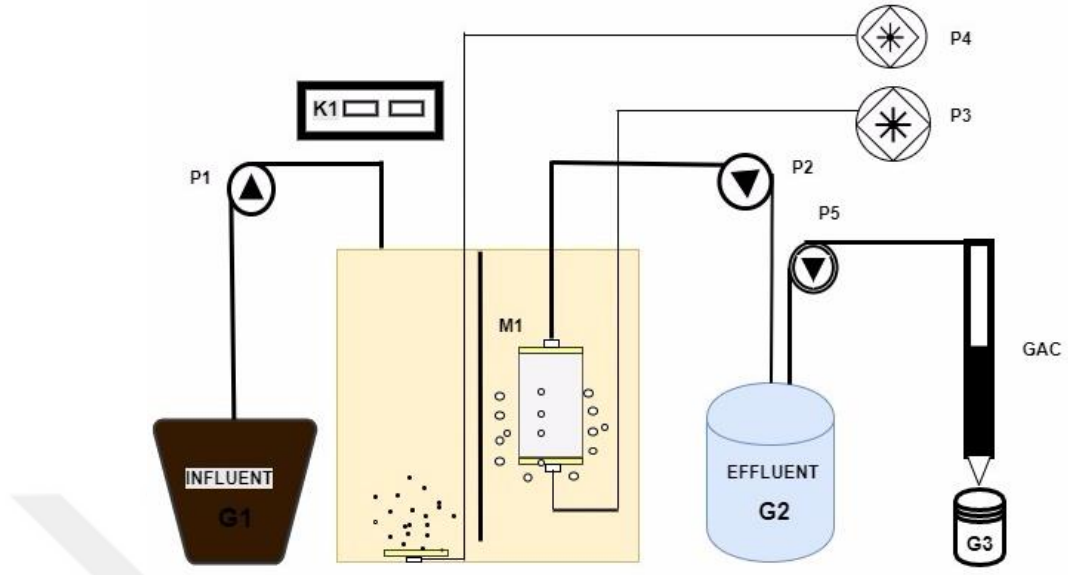
**Çizelge 3.2.** İz element çözeltisinin bileşimi

Kimyasal	Derişim (mg/L)
FeCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	0.15
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0.15
CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O	0.03
KI	0.03
ZnSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	0.12
CoCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	0.15
MnCl <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O	0.12

Atıksuda ağır metal arıtımını araştırmak için konsantre olarak ağır metal stokları belli bir hacimde sentetik atıksu bileşimlerini oluşturan CH<sub>3</sub>COONa.3H<sub>2</sub>O, NH<sub>4</sub>Cl, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, NaHCO<sub>3</sub> kimyasallardan eklendikten sonra ek olarak hazırlanan sentetik atık suyun her litresine 1mL olacak şekilde Çizelge 3.2’de içeriği verilen iz element çözeltisinden eklenmiştir. Hazırlanan bu sentetik suya As, Pb, Ni, Zn elementleri sentetik atıksuya litrede ortalama 200 ppb olacak şekilde eklenmiştir.

### 3.4. Membran Biyoreaktör+ Granül Aktif Karbon Arıtma Sistemi

Çalışmalar sırasında ağır metal içeren atıksuların membran biyoreaktöre entegre edilmiş granüllü aktif karbon ünitesi ile arıtımı araştırılmıştır. Sistem iki üniteden oluşmakta olup birinci kısımda membran biyoreaktör ikinci kısımda ise granül aktif karbon bulunmaktadır. MBR sisteminden çıkan atıksular GAC ünitesine verilmekte MBR tarafından arıtılmayan organiklerin ve ağır metallerin giderim verimleri incelenmektedir. Aşağıdaki şekilde MBR+GAC sisteminin akış diyagramı bulunmaktadır.



**Şekil 3.5.** Laboratuvar çalışmasında kullanılan deneysel düzeneğin akış diyagramı

Şekil 3.5’de görüldüğü gibi sistem MBR ve GAC ünitesinden oluşmaktadır. MBR sistemi biyolojik tank ve membran tankından oluşmaktadır. Biyolojik tank ve membran tankı sırasıyla 10 ve 8 L hacindedir. Giriş tankında sentetik olarak hazırlanan atıksu bir vakum pompası yardımı ile reaktöre (MBR tankına) gelmektedir. MBR tankında katı-sıvı ayrımı yapmak için bir plaka (flat sheet) membran bulunmaktadır. MBR sistemine ait özellikler aşağıda verilmiştir.

**Çizelge 3.3.** MBR sisteminin özellikleri

Tank Hacmi	16 L
Membran Alanı	0.03 m <sup>2</sup>
Membran modül boyutları	100x150x10 mm
Membran materyali	Poliethersulfone (PES)
Gözenek Çapı	0.04 mikron
Akı (L/m <sup>2</sup> .sa)	16-20-24
Membran Şekli	Plaka
Tank Hacmi (cm <sup>3</sup> )	15x30x50
MLSS (g/L)	7 g/L (MF başlangıcında) 12 g/L (MF sonunda)



Çizelge 3.3’de MBR sistemine ait özellikler verilmiştir. Sisteme atıksu peristaltik pompa ile atıksu tankından verilmektedir. Biyoloji tankı ve membran tankına sürekli hava verilmektedir. Biyolojik tankına hava verilmesinin sebebi karışımı sağlamak ve Membran tankına verilen havanın sebebi membran yüzeyini temizlemek ve türbülans oluşturmaktır. Hava işlemi iki adet hava pompası ile yapılmaktadır. Biyoloji tank ile membran tankı arasında boşluklar bulunmakta olup bu boşluklar iki tank arasındaki çamur konsantrasyonunun dengede olmasını sağlamaktadır. Peristaltik pompa yardımı ile membranlardan arıtılmış atıksu filtre yapılmaktadır. Daha sonra arıtılmış atıksu GAC kolonuna gönderilmektedir. Sistemde kullanılan aktif karbona ait özellikler Çizelge 4.4’te verilmiştir.

**Çizelge 4.4.** GAC özellikleri

GAC Özellikleri	
Yoğunluk	1.8-2.1 g/cm <sup>3</sup>
Sudaki Çözünürlük	Çözünmez (insoble)
pH	4-7
Absorbsiyon	62 min
Kütle Yoğunluğu	0.42-0.52 g/ml
Nem	5 %max
Sertlik	96 %min
Molekül Ağırlığı	12.01 g/mol

Sistemden GAC kullanılmasının sebebi artan organik kirliliğin arıtılmasıdır. Buna ek olarak MBR çıkışında sistemde tutulmayan ağır metallerinde burada tutulması hedeflenmektedir. Çalışma sırasında kullanılan reaktör Şekil 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.6. MBR+ GAC Arıtma Düzeniği

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

### 4.1. Sistemin Devreye Alınması ve Çalışmaya Başlama

Ağır metal kirliliği mevcut doğayı ve temiz su kaynaklarını çok ciddi bir şekilde tehdit etmektedir. Ağır metal içeren atıksuların arıtımı zorunlu olup istenilen deşarj standartlarının sağlanması gerekmektedir. Fakat evsel atıksu arıtma tesisleri ağır metal arıtımı için dizayn edilmemiş olup sadece karbon, azot ve fosfor arıtımı için dizayn edilmiştir. Son yıllarda artan temiz su ihtiyacından dolayı membran biyoreaktör (MBR) atıksu arıtma sistemleri hızla yaygınlaşmaktadır. MBR sistemleri ileri arıtma sistemleri olup arıtılmış atıksu geri kullanılmaktadır. Dünyada hızla artan sanayi ve ağır metal kirliliğinden dolayı ağır metallerin biyolojik olarak arıtımı araştırılmaktadır. Ağır metal konsantrasyonuna bağlı olarak ve deşarj limitleri göz önüne alınarak biyolojik arıtım tek başına yeterli olmayabilmektedir. Bu sebeple biyolojik arıtım başka sistemlerde kombine edilerek dizayn edilip, arıtım verimi araştırılmıştır.

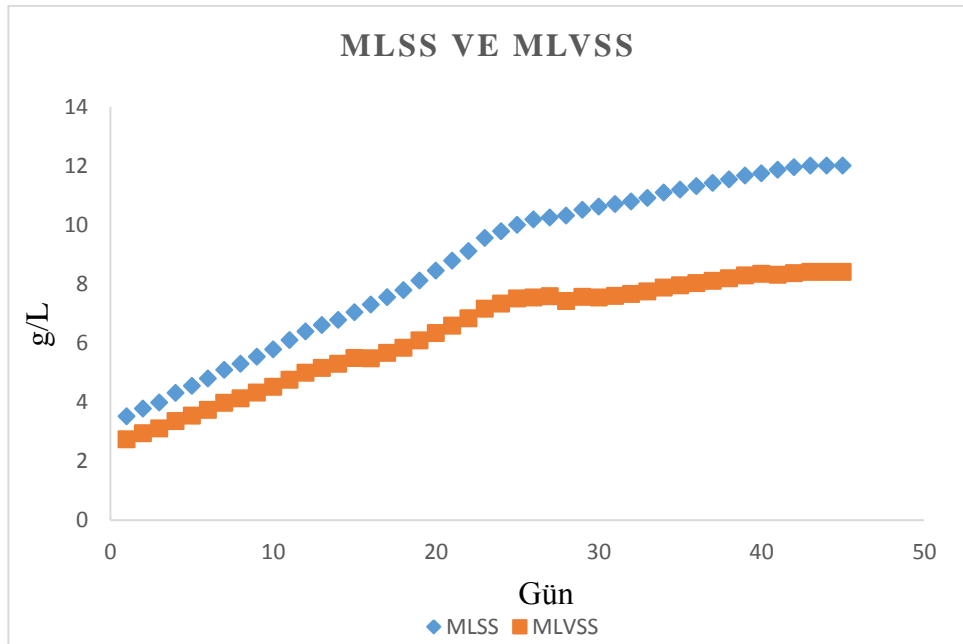
Çalışma sırasında membran biyoreaktör entegre edilmiş granüllü aktif karbon (GAC) prosesinin atıksu da bulunabilecek bazı ağır metallerin arıtılabilirliği araştırılmıştır. Sentetik olarak hazırlanmış atıksu da azot, fosfor ve organik atıkların yanında seçilen As(V)+As(III) (Toplam Arsenik), Pb (II), Zn (II), Ni(II), ağır metallerinin MBR ve GAC sistemleri ile arıtılabilirliği incelenmiştir. Çalışmalar sırasında farklı akılar denenerek atıksu debilerinde oluşabilecek salınımlarında araştırılmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında MBR sisteminde bulunan aktif çamurun stabil hale gelmesi için sistem sadece organik yüklemesi yapılmıştır. Sistem dengeye geldikten sonra sentetik atıksuya As(V)+As(III) (Toplam Arsenik), Pb (II), Zn (II), Ni(II) ağır metallerinin hepsi ayrı ayrı 200 ug/L olacak şekilde ilave edilmiştir. MBR sistemi değişik akılarda çalıştırılarak sadece aktif çamur ve MBR sistemin değil aynı zamanda akınında arıtıma etkisi araştırılmıştır. MBR sisteminde akı sırası ile 16, 20, 24 L/m<sup>2</sup> sa olarak ayarlanmış ve arıtılmış atıksu toplandıktan sonra GAC sistemine verilmiştir.

MBR çıkışındaki arıtılmış atıksu GAC prosesine verilerek GAC prosesinin arıtım verimi incelenmiştir. MBR sonrasında arıtılmış atıksu toplanarak daha sonra GAC kolonuna verilmiştir. Toplanan arıtılmış atıksu içerisinde kalan organik, azot, fosfor ve ağır metallerin giderimi de araştırılmıştır. GAC kolonuna 5 ml/dk sabit akış verilip atıksuyun pH'ı 3-5-7-9 ayarlanmıştır. MBR çıkış ve GAC çıkışında ağır metal, KOI, azot ve fosfor değerleri belli aralıklar ölçülmüştür. Çalışma sıcaklığı  $20\pm 5$  °C arasında gerçekleştirilmiş olup elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir.

#### 4.1.1. MLSS ve MLVSS değişimleri

Çalışma sırasında kullanılacak olan aktif çamur ODTÜ-Teknokent yerleşkesinde bulunan gerçek ölçekli MBR sisteminden alınmıştır. Laboratuvar ölçekli MBR sistemi 45 gün sentetik atıksu ile çalıştırıldıktan sonra dengeye gelmiş olup aktif çamur konsantrasyonu 3,5 g/L den 12 g/L kadar çıkmış ve stabil hale gelmiştir. Çalışmalar sırasında sistemden çamur atılmamış olup sistem çamur yaşı çalışma süresi olarak ayarlanmıştır. Çalışma sırasında MLSS ve MLVSS konsantrasyonundaki değişim Şekil 4.1'de verilmiştir.

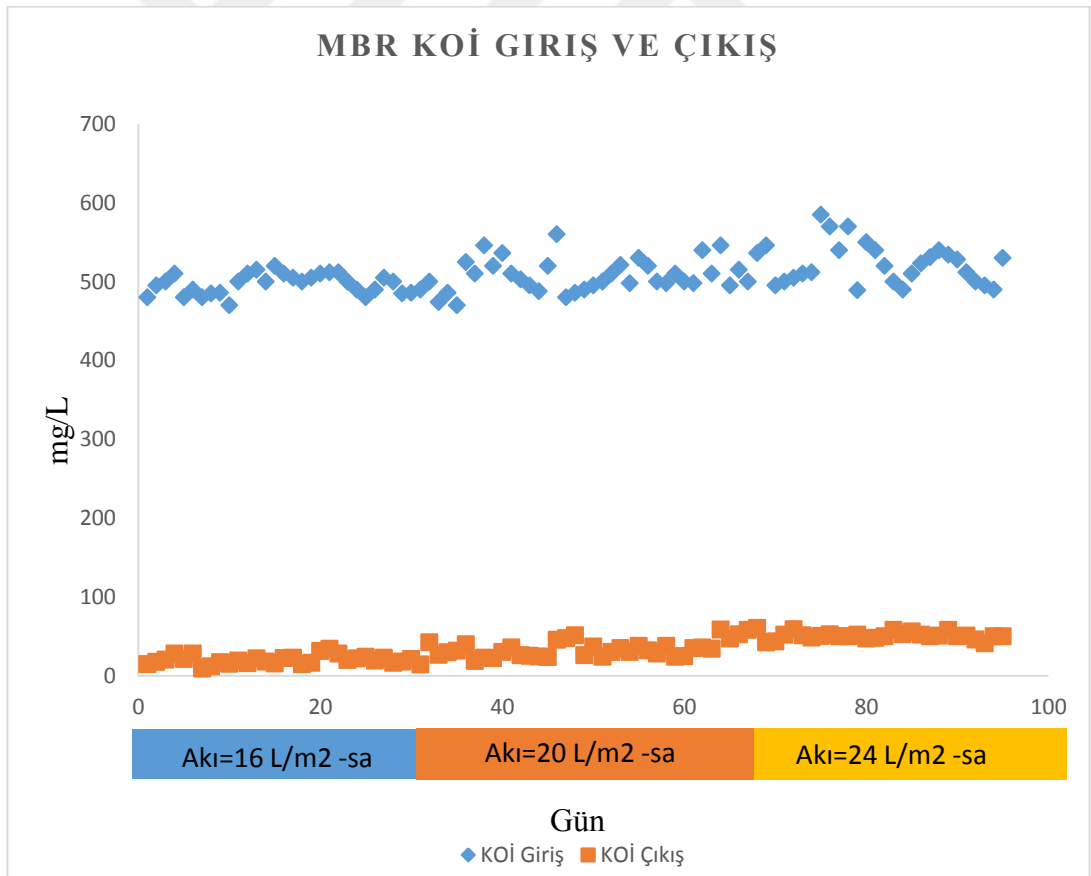


Şekil 4.1. Çalışma sırasında MLSS ve MLVSS değişimi

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi MLSS konsantrasyonu 3.5 g/L den başlamış olup sistem dengeye geldiği zaman 12 g/L da sabitlemiştir. Başlangıçta MLVSS miktarı MLSS miktarının %75-80 arasında iken sistemden çamur atılmadığı için çalışmanın ileriki zamanlarında bu oran %70 den daha aşağı olmuştur. Çalışma başlangıcında aktif çamur daha gençken çalışmadan çamur atılmadığı için çamur yaşlanmıştır. Çalışma sonuna doğru MLVSS miktarı 8 g/L civarında olmuştur.

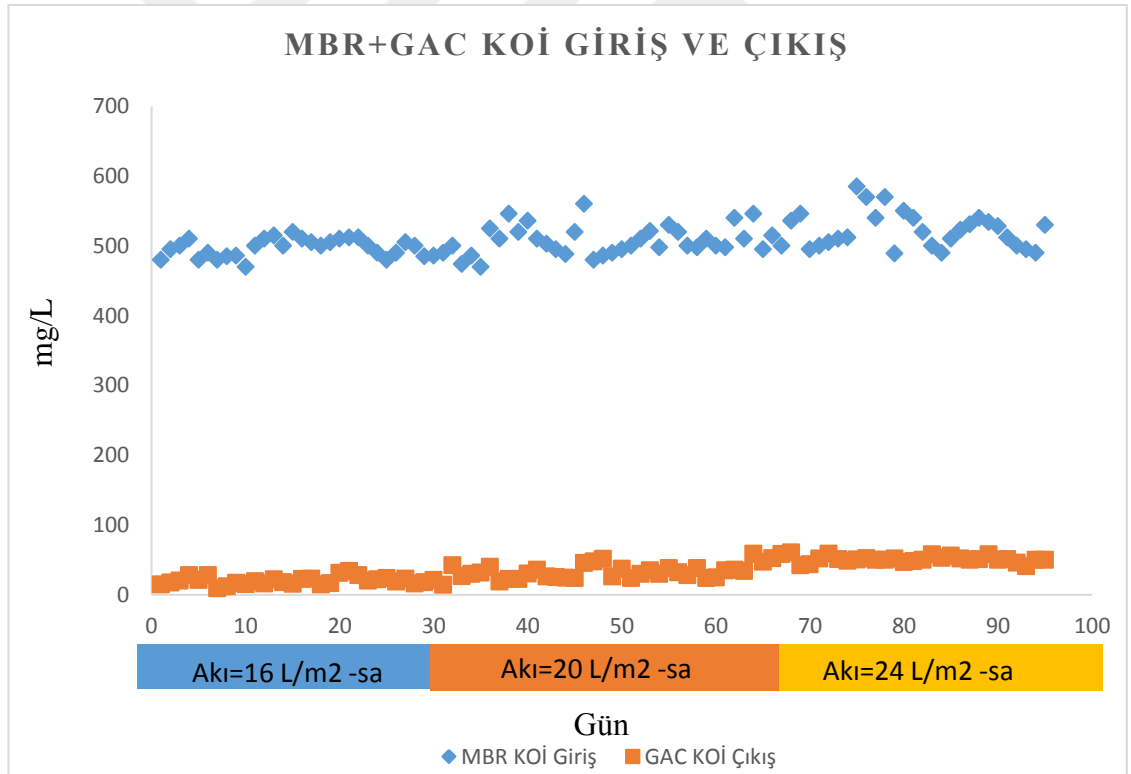
#### 4.1.2. KOİ Giderimi

Çalışmalar sırasında MBR sistemi 16, 20 ve 24 L/m<sup>2</sup> sa olarak 3 farklı akı ile çalışılmış olup sistemdeki akıya göre KOİ giderim verimleri incelenmiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. MBR Sistemindeki KOİ giderimi

Şekil 4.2’de sistem dengeye geldikten sonra sırasıyla 16, 20 ve 24 L/m<sup>2</sup> sa akı ile çalıştırılmıştır. İlk olarak MBR sistemindeki akı 16 L/m<sup>2</sup> sa olarak ayarlandı. Sentetik olarak hazırlanmış olduğumuz atıksuyun içerisinde seçilen ağır metallerinde 200 ppb olacak şekilde eklenerek sistem beslenmeye başlanmıştır. Atıksu giriş KOİ değeri 470-520 mg/L arasında değişmekte olup, MBR sisteminden çıkış atıksuyumuzda ki KOİ miktarı 10-25 mg/L arasında ölçülmüştür. MBR sistemindeki KOİ arıtım verimi akı 16 L/m<sup>2</sup> sa olarak çalıştırıldığı zaman ise ortalama %97 olarak gerçekleşmiştir. MBR sisteminden çıkış suyu, GAC kolonuna verilmiştir. MBR sisteminin çıkışı GAC kolonunun girişi kabul edilmiştir. GAC kolonundan çıkış KOİ miktarı 6-14 mg/L arasında olup MBR sistemine ilave olarak %35 arıtım verimi elde edilmiştir. MBR+GAC kombine sistemini 16 L/m<sup>2</sup> sa akı için toplam arıtım verimi ortalama %97.5 olarak gerçekleşmektedir.



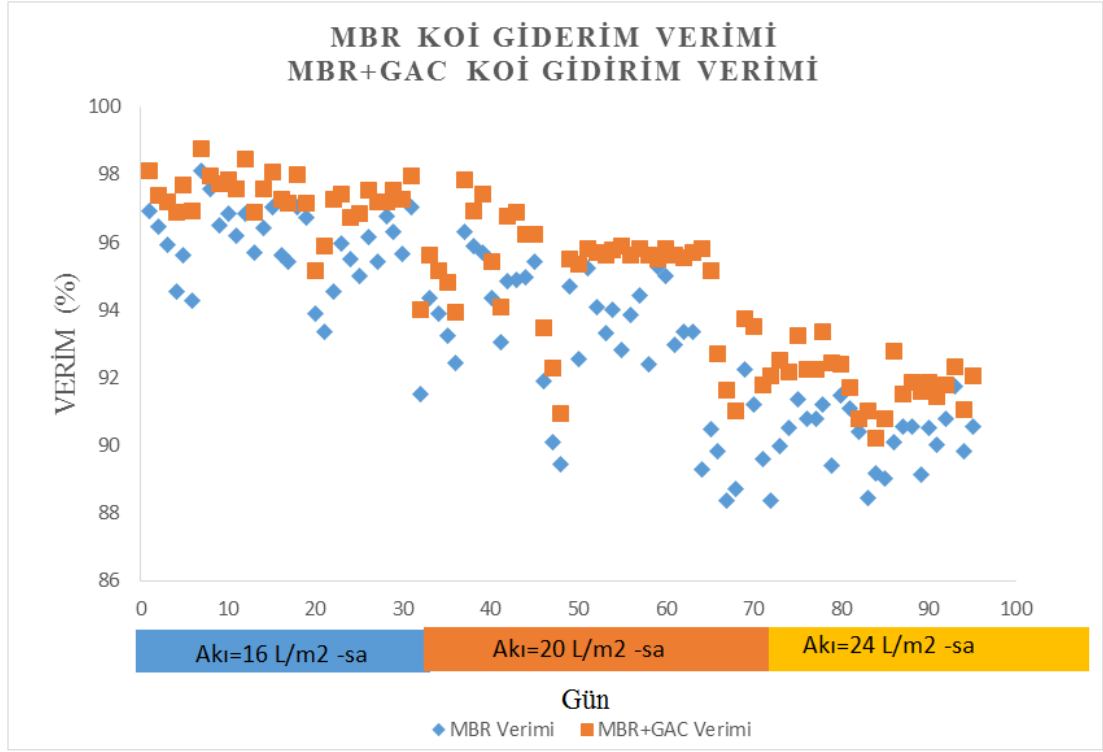
**Şekil 4.3.** MBR+GAC sistemindeki KOİ giderimi

Çalışmanın ilk akı araştırması bittikten sonra sistem akısı 20 L/m<sup>2</sup> sa göre ayarlanmış ve çalıştırılmaya başlanmıştır. İkinci çalışma devresinde giriş KOİ değeri 490-550 mg/L

arasında olup aralığındadır. MBR sistemine verilen atıksuyumuz MBR sistemindeki çıkış miktarı 22.3-42.3 mg/L arasındadır. MBR sistemindeki toplam arıtım verimi ortalama %94'dür. MBR sisteminden çıkan arıtılmış atıksu GAC kolonunun giriş suyu olarak verilmiştir. GAC kolonundan çıkış KOİ miktarı ortalama 22 mg/L olup MBR sistemine artı olarak %27 arıtım elde edilmiştir. MBR+GAC arıtım prosesinin toplam arıtım verimi %96 olarak gerçekleşmiştir. 20 L/m<sup>2</sup> sa akıdaki verimin 16 L/m<sup>2</sup> sa akıdaki verimden daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bunun en önemli sebebi hidrolik bekleme süresinin (HRT) düşmesinden kaynaklanmaktadır.

Çalışmanın son kısmında akı 24 L/m<sup>2</sup> sa olarak ayrılmış olup KOİ miktarı 480-560 mg/L aralığındadır. MBR sistemine verilen atıksu MBR sistemindeki çıkış miktarı 45-60 mg/L arasında ölçülmüştür. MBR sistemindeki arıtım verimi ise ortalama %91'dir. MBR sisteminden çıkan atıksu buradan GAC kolonuna verilmiştir. MBR sisteminin çıkışı GAC kolonunun giriş kabul edilmiştir. GAC kolonundan geçirilen atıksuyun çıkışı KOİ miktarı 37-49 mg/L'dir. MBR sistemine artı olarak %24 arıtım elde edilmiştir. MBR+GAC sisteminin toplam arıtım verimi ortalama %92.5 elde edilmiştir. 24 L/m<sup>2</sup> sa'lik akıdaki çalışmalardaki verimlere bakılınca da hem 20 L/m<sup>2</sup> sa'lik akıdan, hemde 16 L/m<sup>2</sup> sa'lik akıdaki verimden daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak HRT süresinin düşmesi ile atıksu sistemde daha az kaldığı için arıtma veriminin düşmesine neden olmaktadır.

16, 20, 24 L/m<sup>2</sup> sa'lik akılara ait MBR ve MBR+GAC arıtım verimleri Şekil 4.4'de verilmektedir.



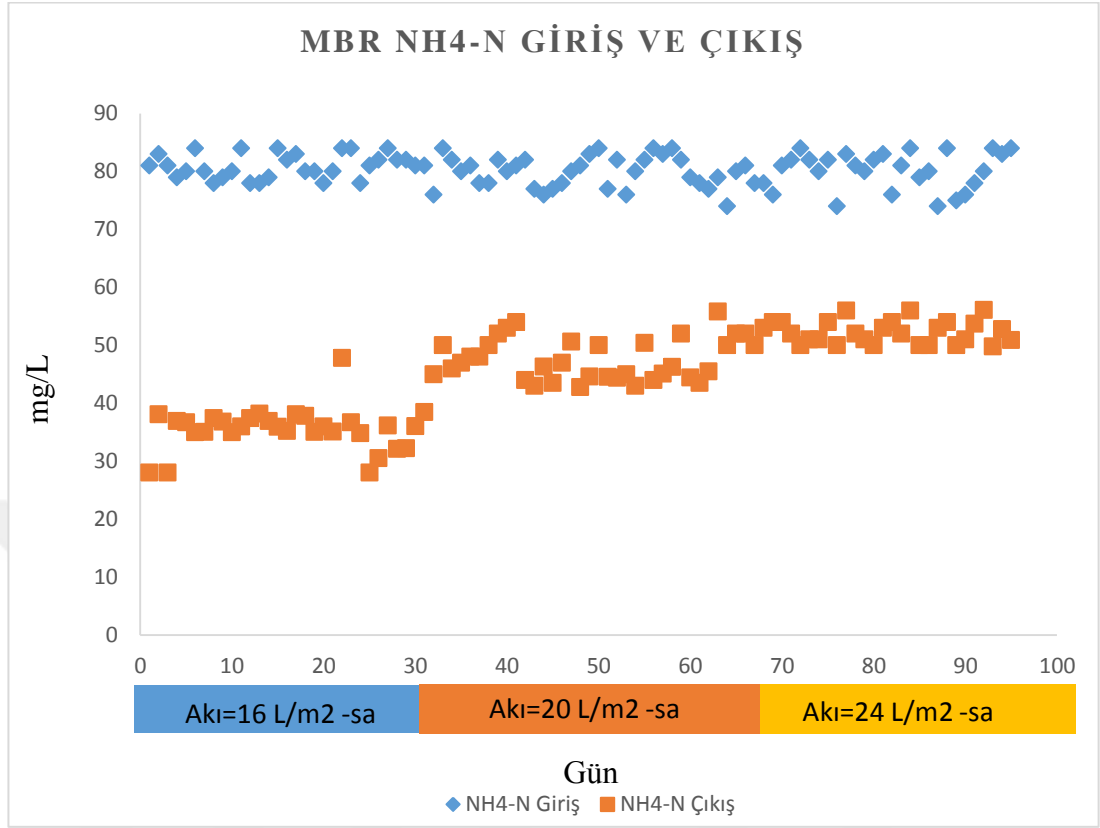
**Şekil 4.4.** MBR ve MBR+GAC sistemindeki KOİ giderim verimi

Şekil 4.4’de görüldüğü gibi en yüksek arıtım verimi 16 L/m<sup>2</sup> sa’lik akıda elde edilmiştir. Akının artması ile sisteme daha fazla atıksuyun girmesine dolayısıyla suyun sistemde kalma süresinin azalmasına neden olmaktadır. Sistemde suyun az kalması da arıtım veriminin düşmesine neden olmaktadır. HRT süresinin az oluşu sistemde biyolojik arıtım yapan mikroorganizmaların atıksudaki besi öğeleriyle daha az temas edeceğinden yeterli reaksiyon süresi bulamayabilecek bu sebeple mikroorganizmaların daha az organik madde parçalamasına neden olacaktır ki buda arıtım veriminin düşmesine neden olacaktır.

#### 4.1.3. NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N giderimi

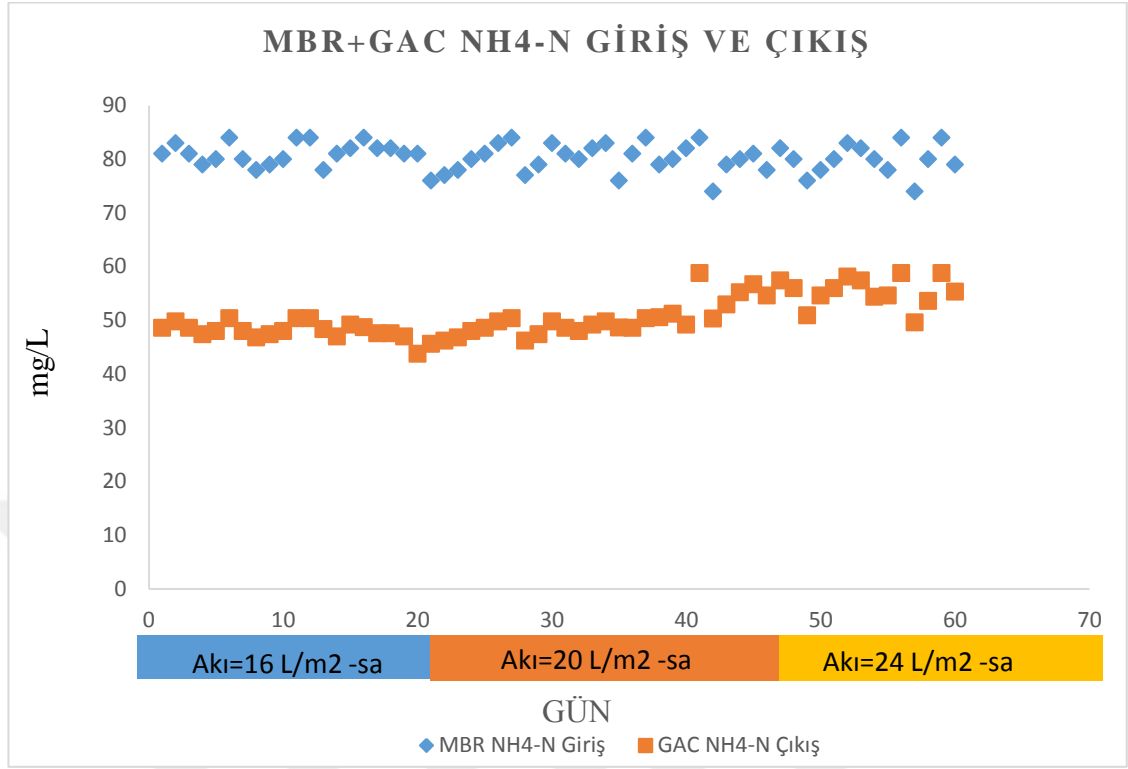
Çalışmalar sırasında KOİ arıtımının yanında NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N arıtımı da araştırılmıştır. Çalışmaya ait arıtım verimleri Şekil 4.5’de verilmiştir.





**Şekil 4.5.** MBR Sisteminde NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N giderimi

Şekil 4.5’de görüldüğü gibi çalışmanın ilk kısmında akı 16 L/m<sup>2</sup> sa olarak ayarlanmıştır. MBR giriş NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N miktarı 78-84 mg/L arasında değişmekte olup, MBR sisteminden çıkış NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N miktarı 28.02-47.8 mg/L arasındadır. MBR sistemindeki NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N arıtım verimi ortalama %55.78’dir. MBR sisteminden çıkış suyumuz, GAC kolonuna verilmiştir. MBR sisteminin çıkışı GAC kolonunun girişi kabul edilmiştir. GAC kolonundan çıkış NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N miktarı 17-28 mg/L arasında olup MBR sistemine artı olarak %18 arıtım verimi elde edilmiştir. MBR+GAC entegre sistemini 16 L/m<sup>2</sup> sa’lık akı için toplam arıtım verimi %74 olarak gerçekleşmektedir (Şekil 4.6).



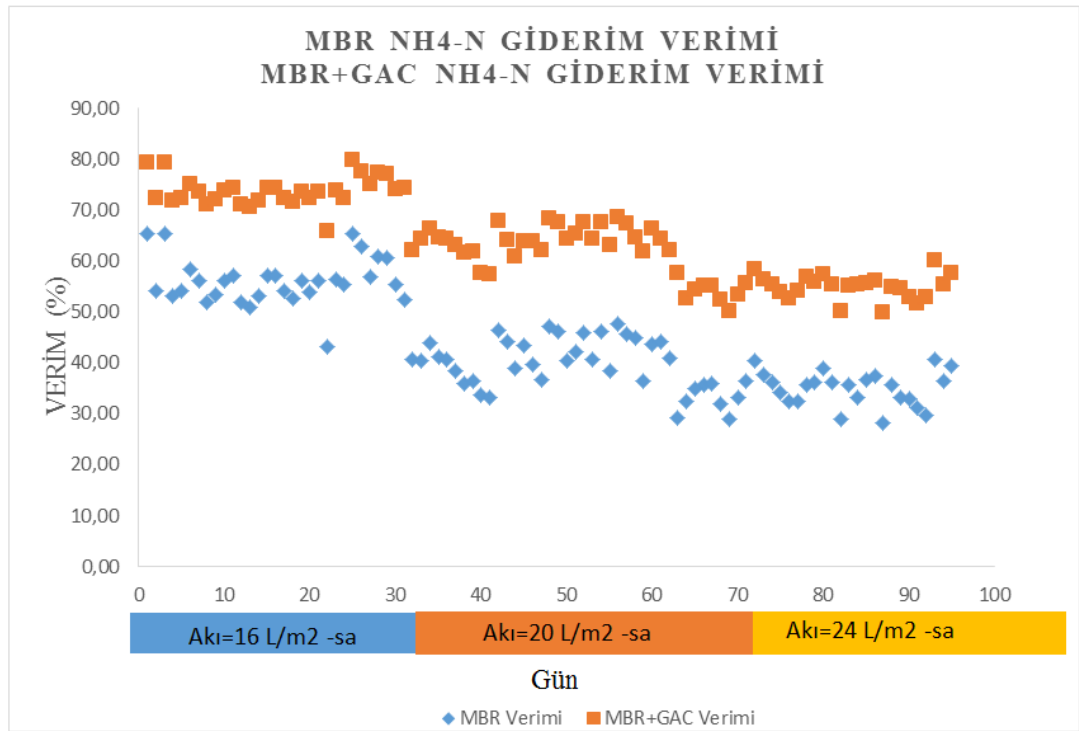
**Şekil 4.6.** MBR+GAC sisteminde NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N giderimi

Çalışmanın ikinci aşamasında 20 L/m<sup>2</sup> sa'lik akıda sentetik olarak hazırlanmış olduğumuz atıksuyumuzda giriş NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N miktarı 76-84 mg/L aralığında ölçülmüştür. MBR sistemine verilen atıksuyumuz MBR sistemindeki çıkış miktarı 42.8-55.8 mg/L arasındadır. Bu haliyle MBR sistemindeki toplam arıtım verimi ortalama %42.13'dür. Yine MBR sisteminden çıkan suyumuz GAC kolonuna verilmiştir. MBR sisteminin çıkışı aynı zamanda GAC kolonunun girişi kabul edilmiştir. GAC kolonundan çıkış NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N miktarı 25-30 mg/L olup MBR sistemine artı olarak %23 arıtım elde edilmiştir. MBR+GAC kombine arıtım prosesinin toplam arıtım verimi %65 olarak gerçekleşmiştir.

24 L/m<sup>2</sup> sa akıdaki çalışmanın son kısmında ise giriş atıksuyundaki NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N miktarı 74-84 mg/L aralığındadır. MBR sistemindeki çıkış NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N miktarı 49.8-56.1 mg/L arasında ölçülmüştür. MBR sisteminin arıtım verimi ortalama %34'dür. MBR sisteminden çıkan atıksu GAC kolonuna verilmiştir. GAC kolonundan geçirilen atıksu

çıkışı  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  değeri 34-37 mg/L'dir. MBR sistemine artı olarak %21 arıtım elde edilmiştir. MBR+GAC sisteminin toplam arıtım verimi %55 elde edilmiştir.

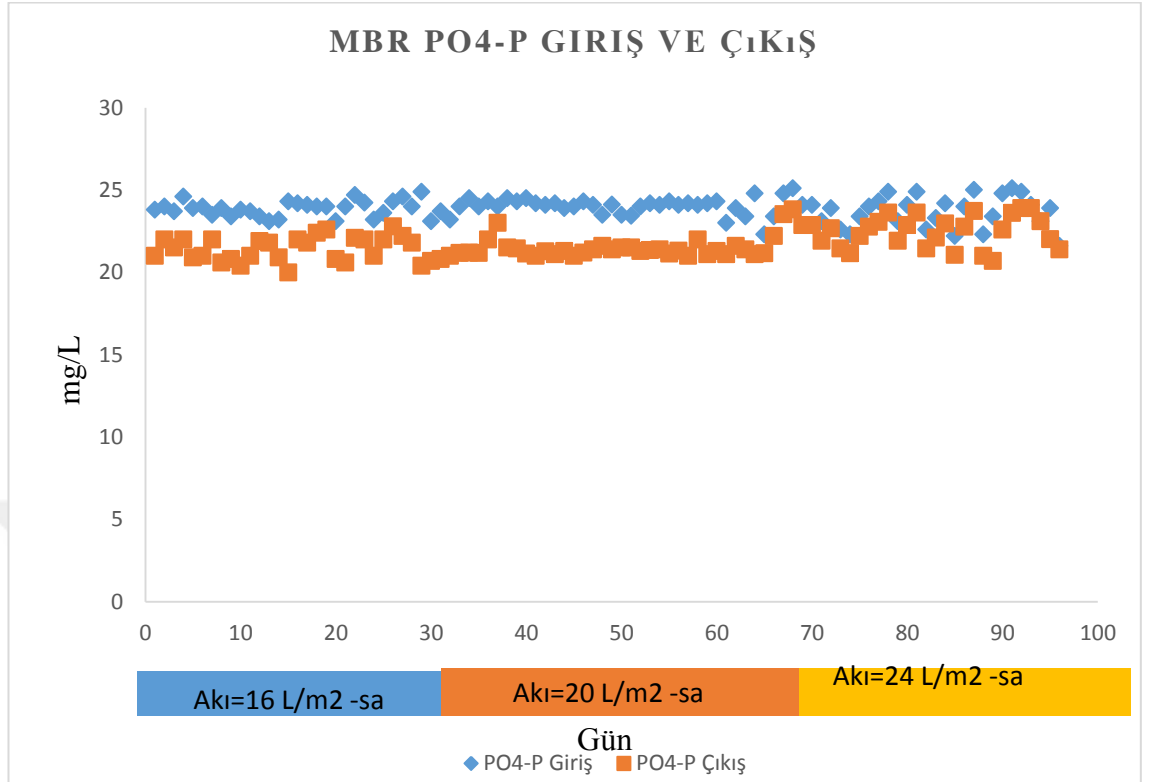
Yukarıda yapılmış deneysel çalışmalarda HRT arttığı zaman  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  arıtımının arttığı görülmüştür. 3 farklı akıda MBR'da en iyi arıtım veriminin 16 L/m<sup>2</sup> sa akıda gerçekleştiği görülmüştür (Şekil 4.7). Diğer çalışmalarımızda 16 L/m<sup>2</sup> sa akı seçilerek deneysel çalışmalara devam edilmiştir.



Şekil 4.7. MBR ve MBR+GAC sisteminde  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  verimi

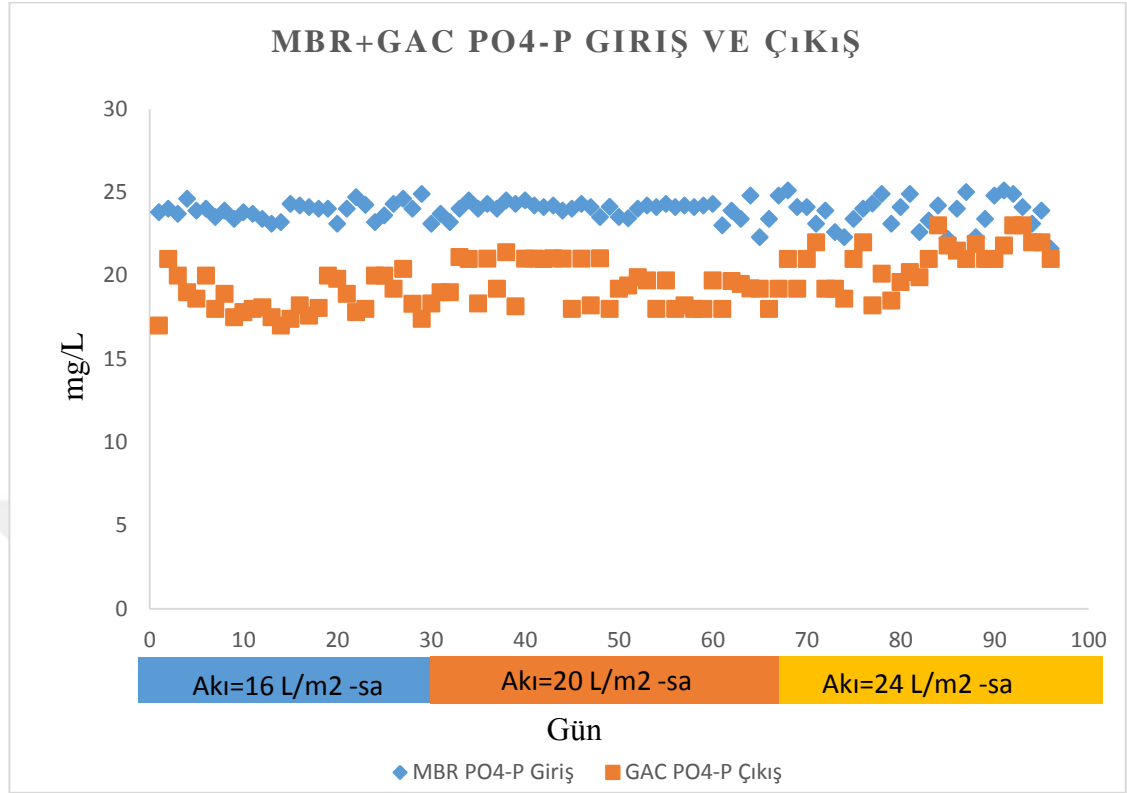
#### 4.1.4. $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ giderimi

Çalışmalar sırasında 3 farklı akıda  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  arıtım verimleri araştırılmıştır. MBR arıtım sonuçları Şekil 4.8'de verilmiştir.



**Şekil 4.8.** MBR Sistemindeki PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>-P giderimi

Şekil 4.8’de görüldüğü gibi sırası ile 16, 20 ve 24 L/m<sup>2</sup> sa akılarda PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>-P arıtım verimleri araştırılmıştır. Çalışmanın ilk kısmında akı 16 L/m<sup>2</sup> sa olarak ayarlanmış ve giriş PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>-P değeri 23.1-24.9 mg/L arasında değişmektedir. MBR sisteminden çıkış atıksuyunda PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>-P değeri 20.4-22.8 mg/L arasındadır. MBR sistemindeki PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>-P arıtım verimi ise ortalama %10’dur. MBR sisteminden çıkan arıtılmış atıksu GAC kolonuna verilmiştir. GAC kolonundan çıkış PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>-P miktarı 17-20 mg/L arasında olup MBR sistemine ilave olarak ortalama %11 arıtım verimi elde edilmiştir. MBR+GAC kombine sistemini 16 L/m<sup>2</sup> sa akı için toplam arıtım verimi %22 olarak gerçekleşmektedir.

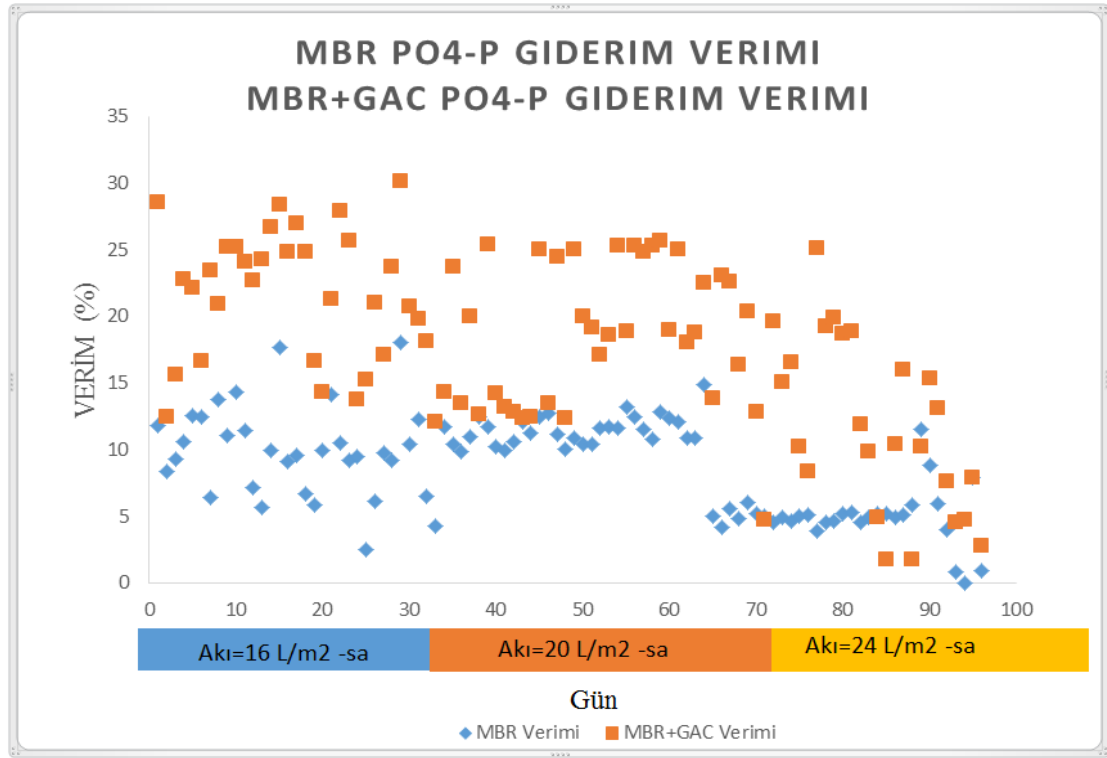


**Şekil 4.9.** MBR+GAC sisteminde PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>-P giderimi

20 L/m<sup>2</sup> sa akıda sentetik olarak hazırlanan atıksuyun giriş PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>-P değeri 24-24.6 mg/L aralığında ölçülmüştür. MBR sistemindeki çıkış PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>-P değeri 21.1-21.6 mg/L arasındadır. MBR sistemindeki PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>-P arıtım verimi ortalama %11'dir. MBR sisteminin çıkışı GAC kolonuna verilerek PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>-P arıtım verimi incelenmiştir. GAC kolonundan çıkış PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>-P miktarı ortalama 18 mg/L olup MBR sistemine artı olarak %7.5 arıtım elde edilmiştir. MBR+GAC kombine arıtım prosesinin toplam arıtım verimi %19 olarak gerçekleşmiştir.

Çalışmanın son kısmında ise akı 24 L/m<sup>2</sup> sa olarak ayarlanmış giriş atıksuyundaki PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>-P miktarı 20.7-25.1 mg/L aralığındadır. MBR çıkış atıksuyun da PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>-P değeri 20.7-23.9 mg/L arasında ölçülmüştür. MBR sistemindeki arıtım verimi ortalama %5'dir. GAC kolonundan geçirilen atıksu çıkışı PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>-P miktarı ortalama 20 mg/L'dir. MBR sistemine artı olarak %7.1 arıtım elde edilmiştir. MBR+GAC sisteminin toplam arıtım verimi %12 elde edilmiştir.

Çalışmalar sırasında elde edilen  $PO_4^{-3}$ -P arıtım verimleri Şekil 4.10'da verilmektedir.



Şekil 4.10. MBR ve MBR+GAC sistemindeki  $PO_4^{-3}$ -P verimi

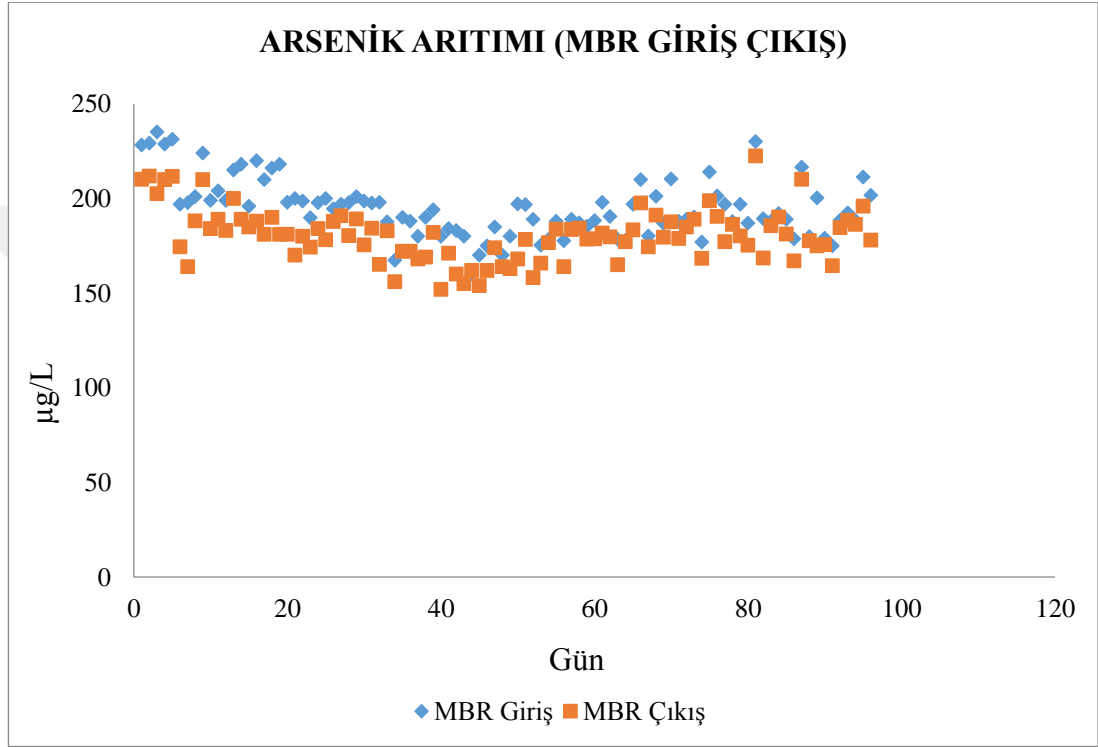
Şekil 4.10'da görüldüğü gibi akı miktarı azaldıkça arıtım verimi artmaktadır.

#### 4.1.5. Ağır metal giderimi

Çalışmalar sırasında MBR sistemine entegre edilmiş GAC sistemi ile seçilen ağır metallerin As(V) (Arsenat)+As(III) (Arsenit) (As (V)+As (III) =Toplam Arsenik), Pb (II), Zn (II), Ni (II) arıtım verimleri incelenmiştir. Sentetik olarak hazırlanan atıksuya her birinin konstrasyonu 160-250  $\mu\text{g/L}$  arasında olan As (V)+As (III) (Toplam Arsenik), Pb (II), Zn (II), Ni (II) elementleri içeren atıksu farklı akılarda MBR sistemine verilerek arıtım verimi araştırılmıştır. MBR sisteminden çıkan atıksu GAC kolonuna verilmiş ve arıtımın artırılması araştırılmıştır.

#### 4.1.5.a. Arsenik (As (V)+As (III) (Toplam arsenik)) arıtımı

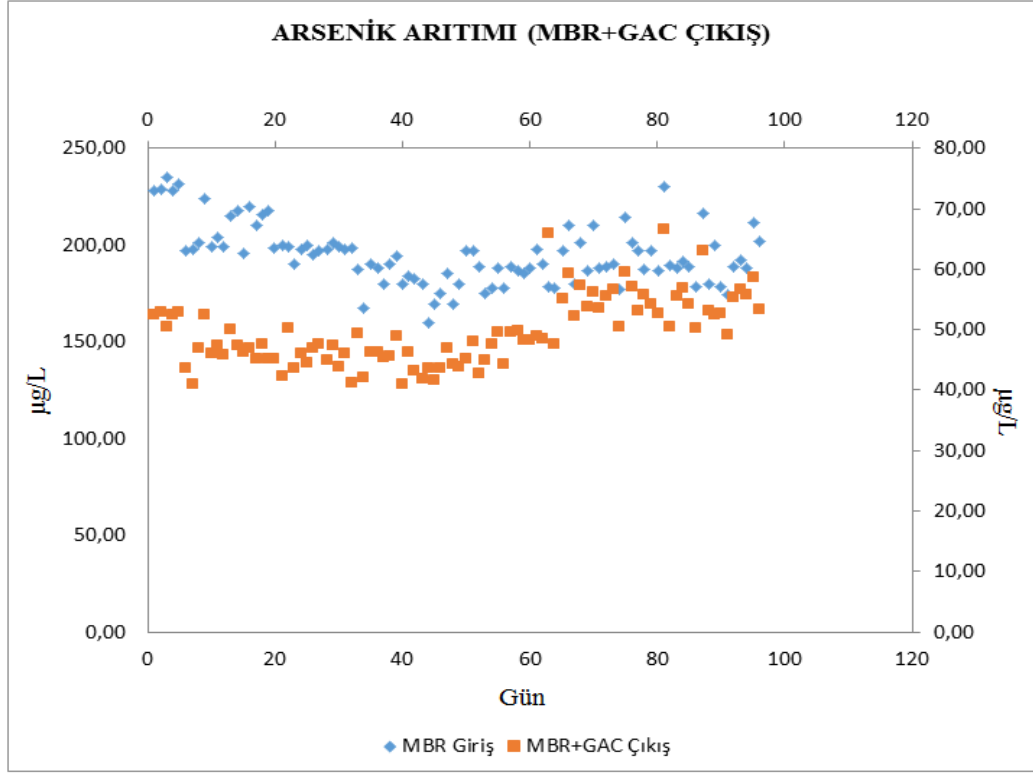
Çalışma sırasında araştırılan birinci ağır metal arsenik olup MBR sistemi ile farklı konsantrasyonlarda arıtım verimi incelenmiştir.



**Şekil 4.11.** MBR sistemindeki As (V)+As (III) (Toplam arsenik) arıtımı

Yukarıdaki şekilde MBR sisteminde değişik akılardaki As arıtımı gösterilmektedir. MBR ile (As (V)+As (III) =Toplam Arsenik), arıtım verimi düşük olup giriş (As (V)+As (III) =Toplam Arsenik), değeri 200 ug/L civarında çıkış (As (V)+As (III) =Toplam Arsenik), değeri çok fazla değişmemiştir. Üç farklı akıda yapılan çalışmalarda arıtım verimlerinin %5 ile %10 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Akı 16 L/m<sup>2</sup> sa olduğu zaman MBR sistemindeki As (V)+As (III) (Toplam Arsenik) giderim verimi %10, 20 L/m<sup>2</sup> sa'lik akıdaki MBR sistemindeki As (V)+As (III) (Toplam Arsenik) giderim verimi %7, 24 L/m<sup>2</sup> sa'lik akıdaki MBR sistemindeki As (V)+As (III) (Toplam Arsenik) giderim verimi %5 civarında gerçekleşmiştir. Böylece akı arttığı zaman As (V)+As (III) (Toplam Arsenik) gideriminin düştüğü görülmektedir. MBR çıkışında

toplanan arıtılmış atıksu 5 ml/dk sabit akış hızı GAC kolonuna verilmiştir. MBR+GAC sistemindeki As (V)+As (III) (Toplam Arsenik) giriş ve çıkış değerleri Şekil 4.12’de verilmektedir.

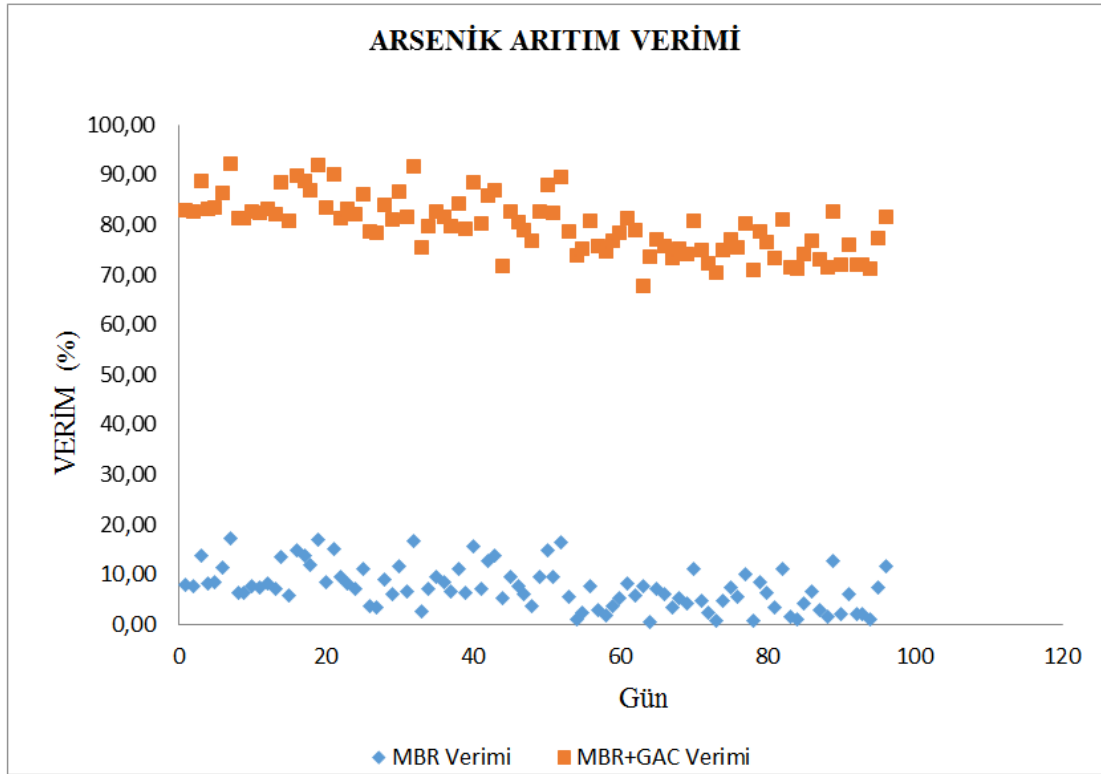


Şekil 4.12. MBR+GAC sistemindeki As(V)+As(III) (Toplam Arsenik) arıtımı

Çalışma sırasında toplanan arıtılmış atıksu 5 ml/dk sabit akış hızı GAC kolonuna verilmiştir. GAC kolonuna verilen atıksuyumuz farklı konsantrasyonlarda ve farklı pH'larda arıtım performansı incelenmiştir. Arıtılmış atık suyumuz  $25\pm 5^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta, 5 m/dk sabit akış ile farklı konsantrasyon da ve 4 farklı pH =3-5-7-9 ile sırasıyla; GAC kolonunun arıtım verimi incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda MBR'de en iyi arıtım veriminin  $16 \text{ L/m}^2 \text{ sa}$  olduğu, GAC kolonunda ise farklı pH'larda arıtım verimlerinde çok değişiklik olmadığı görüldüğünden pH=3 seçilerek deneysel çalışmalarımızda kullanılmasına karar verilmiştir.



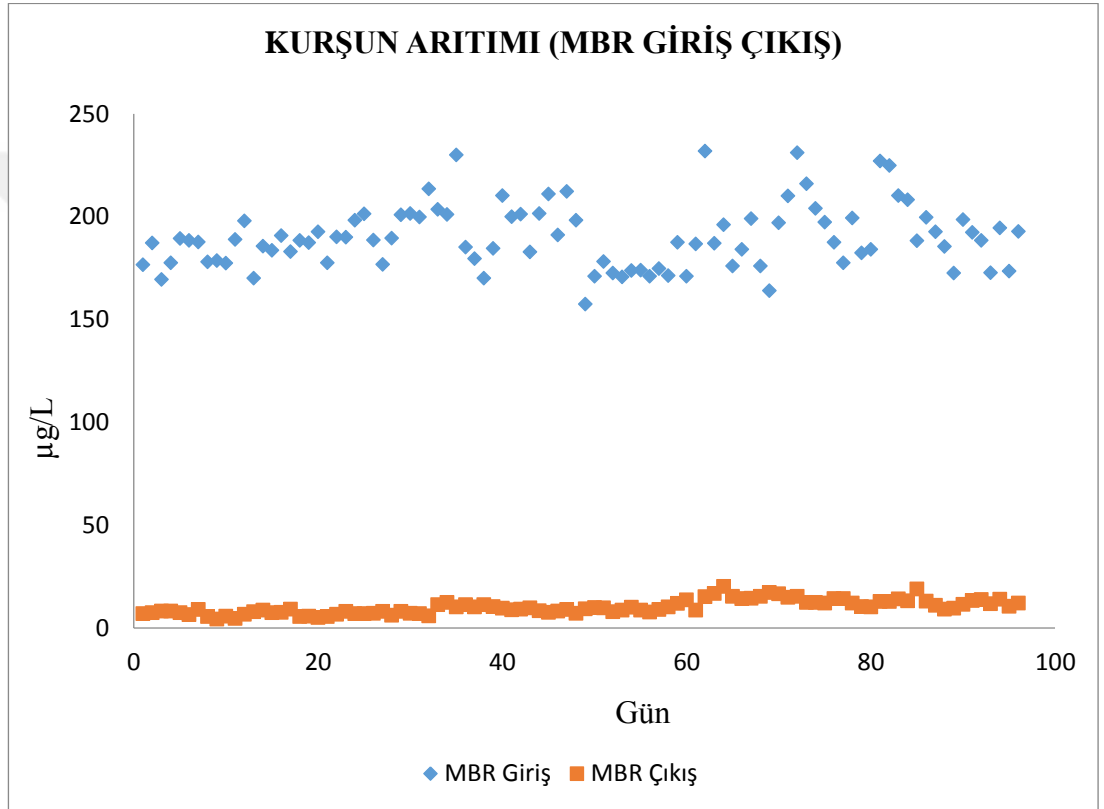
MBR sistemindeki farklı konsantrasyonlar da arıtım verimlerinin %5 ile %10 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. MBR sistemindeki As (V)+As (III) (Toplam Arsenik) giderim verimi %10, 20 L/m<sup>2</sup> sa'lik akıdaki MBR sistemindeki As (V)+As (III) (Toplam Arsenik) giderim verimi %7, 24 L/m<sup>2</sup> sa'lik akıdaki MBR sistemindeki As (V)+As (III) (Toplam Arsenik) giderim verimi %5 civarında gerçekleşmiştir. Arıtılmış topladığımız atıksu GAC kolonuna verildiğinde farklı konsantrasyonlarda, pH=3,5,7,9'da verimin çok değişmediği görülmüştür. GAC kolonunda çalışmalarımızda pH=3 tercih edilmiştir. Diğer çalışma şartları ise 5 ml/dk akıta 25±5°C sıcaklıktır. GAC kolonunda MBR sistemine artı olarak farklı konsantrasyonlar da %70-75 arıtım yaptığı görülmektedir. Toplamda MBR+GAC entegre sistemlerinin toplam arıtım verimi %80-85 dolaylarında olduğu görülmektedir.



**Şekil 4.13.** MBR ve MBR+GAC sistemindeki As (V)+As (III) (Toplam Arsenik) verimi

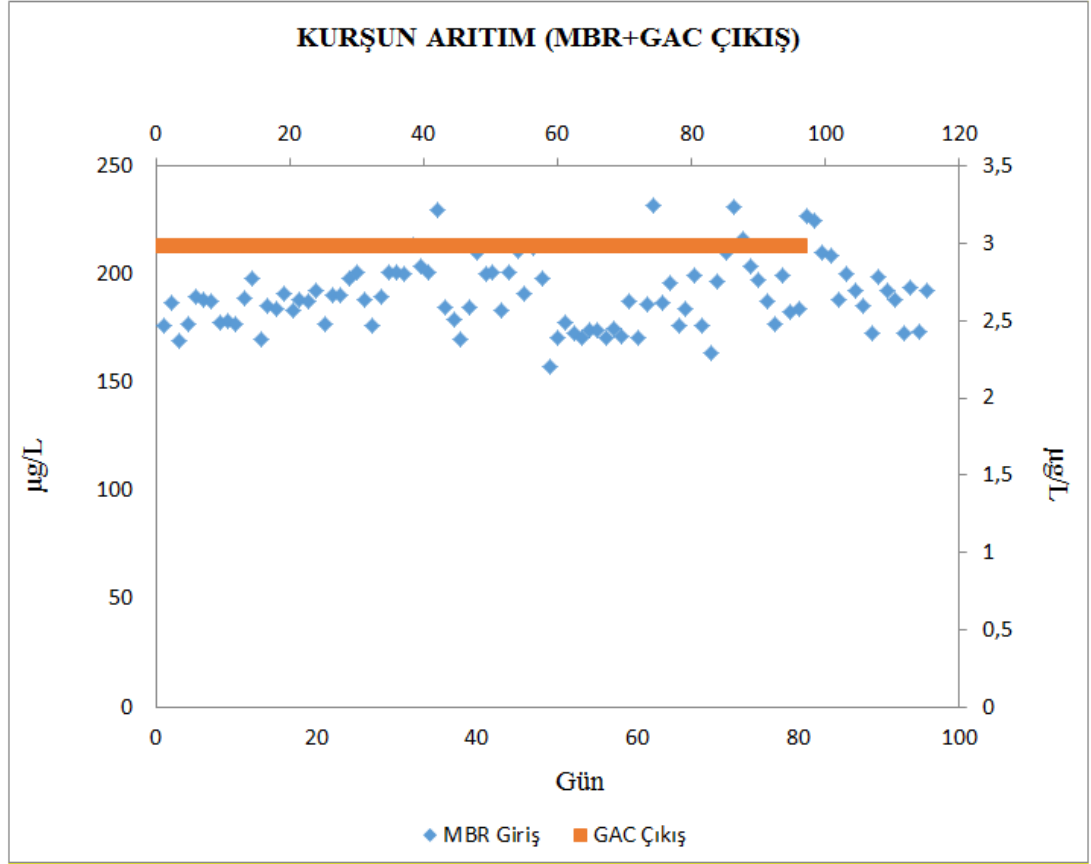
#### 4.1.5.b. Kurşun (Pb (II)) arıtımı

MBR sistemi üç farklı akıda çalıştırılmış olup sistemden elde edilen arıtılmış atıksu GAC girişi olarak ayarlanmıştır. MBR giriş ve çıkış Pb (II) değerleri aşağıdaki şekilde verilmektedir.



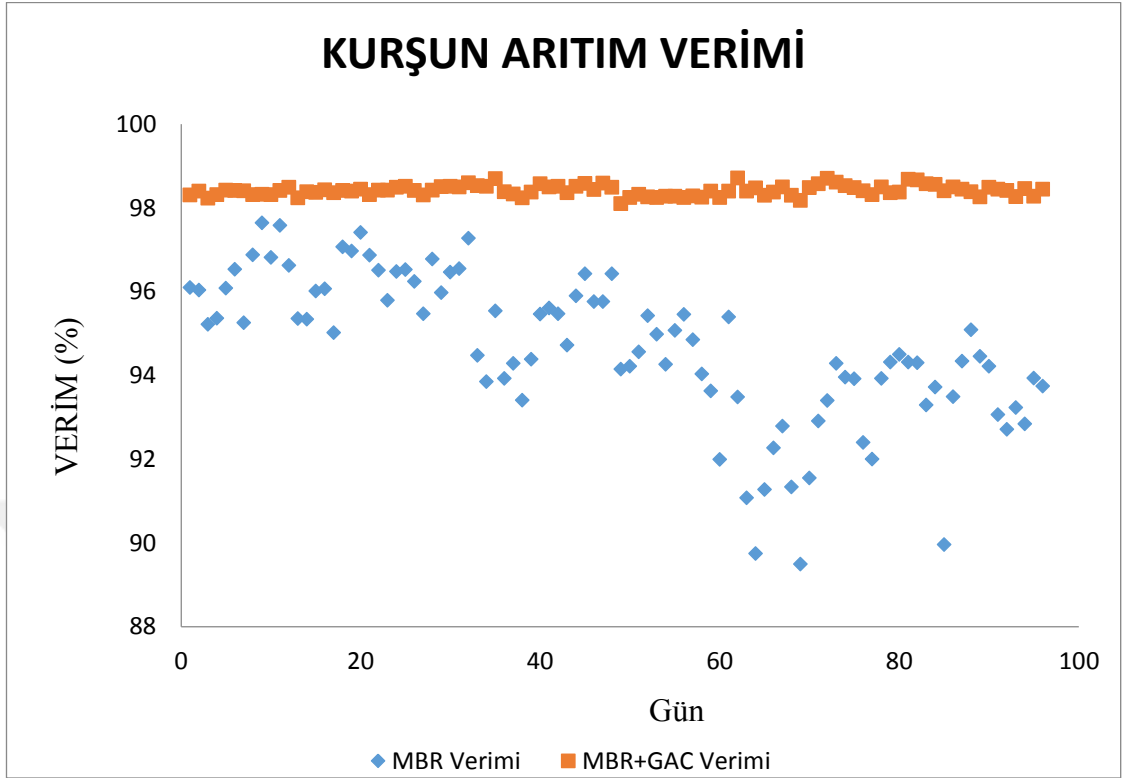
**Şekil 4.14.** MBR sistemindeki Pb (II) arıtımı

Şekil 4.14'te görüldüğü gibi MBR arıtım verimi incelenmiştir. İlk olarak 16 L/m<sup>2</sup> sa'lik akıdaki MBR sistemindeki Pb (II) giderim verimi %96, 20 L/m<sup>2</sup> sa'lik akıdaki MBR sistemindeki Pb (II) giderim verimi %95, 24 L/m<sup>2</sup> sa'lik akıdaki MBR sistemindeki Pb (II) giderim verimi %94 civarında gerçekleşmiştir. MBR sisteminde en yüksek arıtımın 16 L/m<sup>2</sup> sa'lik olduğu görülmektedir. Daha sonra MBR çıkışında toplanan arıtılmış atıksuda bulunan Pb (II)'nin giderimi için GAC kullanılmıştır. GAC sonucunda elde edilen veriler Şekil Şekil 4.14'de verilmektedir.



**Şekil 4.15.** MBR+GAC sistemindeki Pb (II) arıtımı

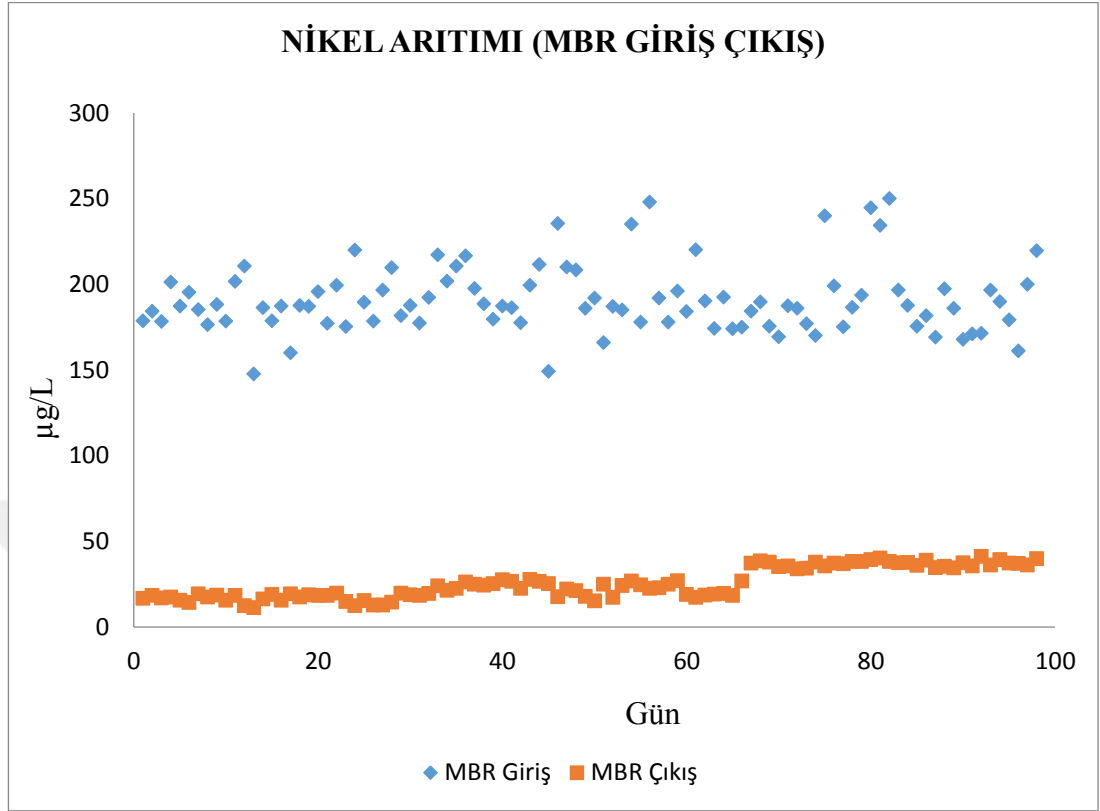
Bütün akılarda ayrı ayrı toplanan arıtılmış atıksu daha sonra 5 ml/dk sabit debi ile GAC sistemine verişmiştir. GAC kolonundaki ağır metal arıtımı MBR sistemine artı %2-6 arasında arıtım yaptığı görülmektedir. GAC kolonu çıkışında bütün analizlerde Pb (II) konsantrasyonu 3 ug/L olan LOD (ölçülebilir limit) nin altındadır. GAC çıkış değeri 3 ppb olarak alındığı için şekilde ve yüzde arıtımın gösterildiği Şekil 4.16'da toplam verim %98 civarında görülmektedir.



**Şekil 4.16.** MBR ve MBR+GAC sistemindeki Pb (II) giderim verimi

#### 4.1.5.c. Nikel (Ni (II)) arıtımı

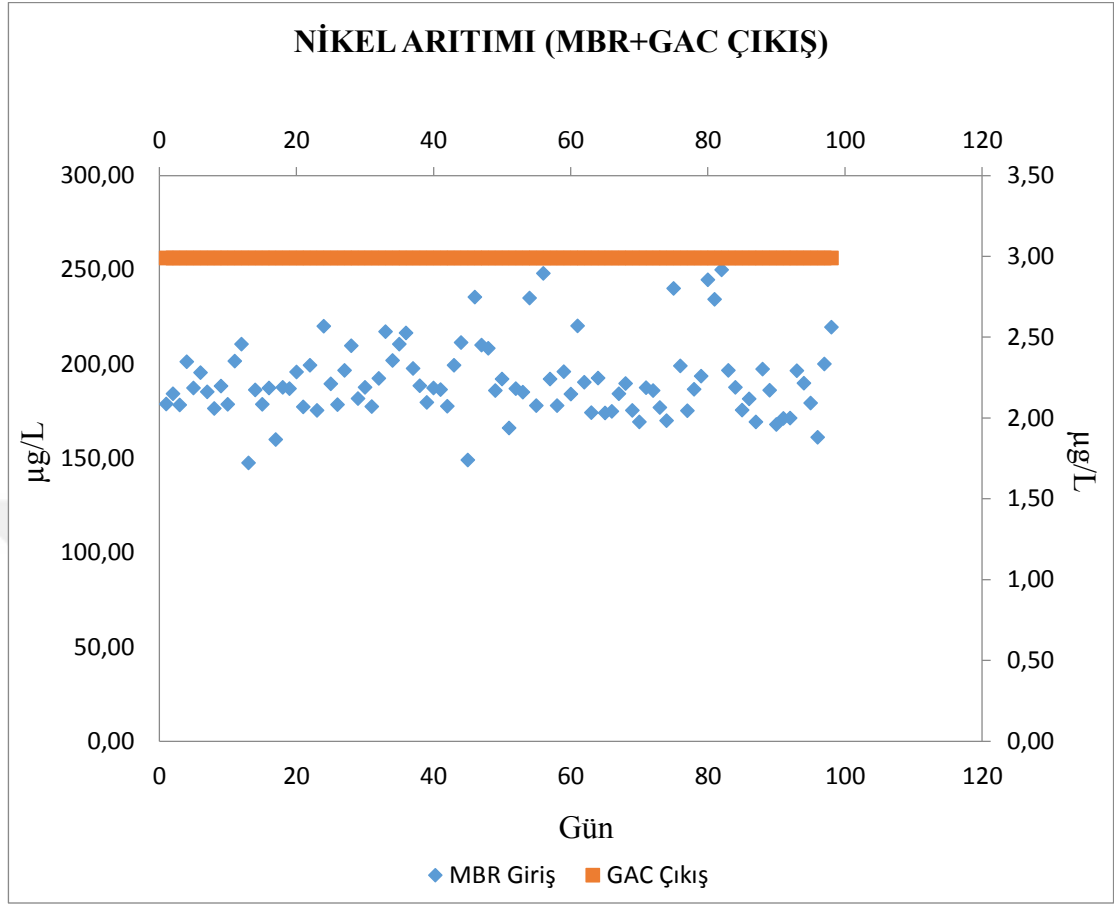
Çalışma sırasında arıtım verimi incelenen üçüncü ağır metal Ni (II)'dir. Çalışma sırasındaki MBR akı değişimine göre Ni (II) arıtımı incelenmiş Şekil 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.17. MBR sistemindeki Ni (II) arıtımı

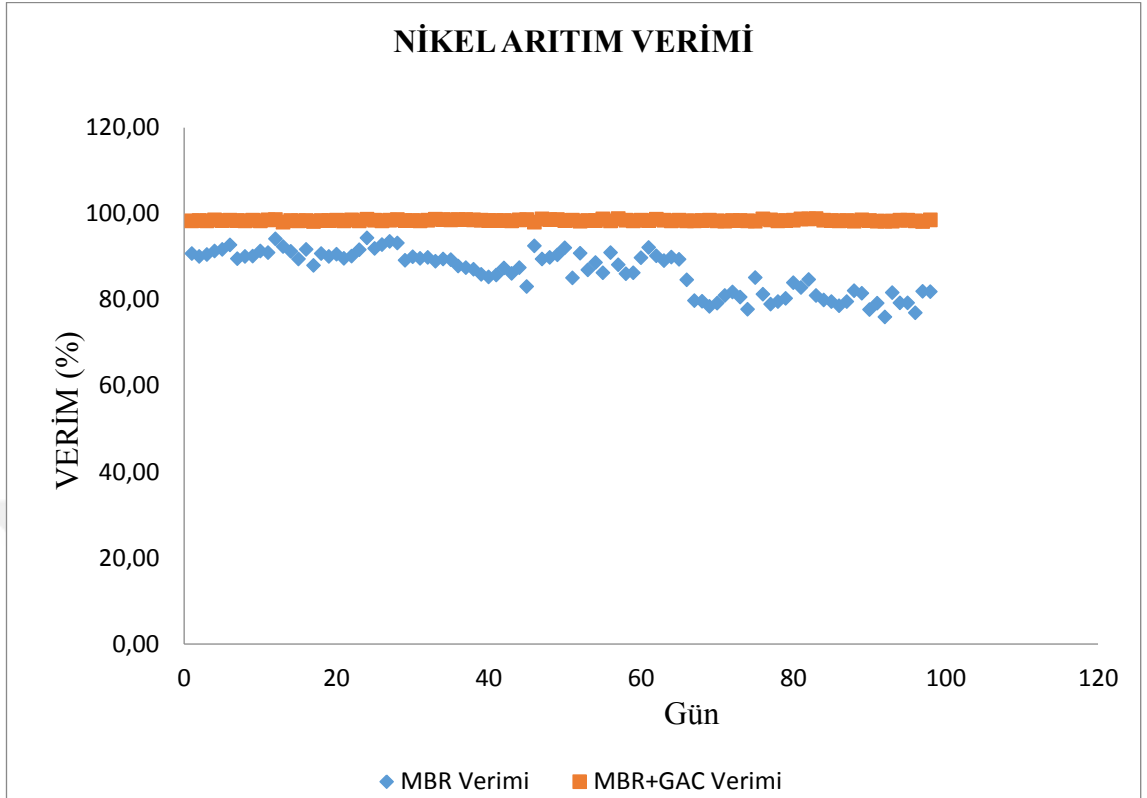
MBR girişindeki Ni (II) konsantrasyonu 200 ppb olarak ayarlanmıştır. Analizler sırasında ilk önce sistem 16 L/m<sup>2</sup> sa'lık sabit akıda çalıştırılmıştır. Bu akıdaki Ni (II) giderim verimi ortalama %91 olarak ölçülmüştür. daha sonra akı 20 L/m<sup>2</sup> sa çıkarılarak MBR çıkışında Ni (II) ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçümlerde akı artırıldığı zaman Ni (II) arıtım verimi ortalama %89 olarak belirlenmiş ve %2 lik bir azalma gözlemlenmiştir. Daha sonra MBR sistemi son akı olarak 24 L/m<sup>2</sup> sa göre ayarlanmıştır ve Ni (II) giderim verimi %80 civarında gerçekleşmiştir. Sistemin akısı 16 L/m<sup>2</sup>-sa dan 24 L/m<sup>2</sup>-sa yani %50 artırıldığı zaman. Ni (II) giderim verimi %10 daha az olmuştur.

Elde edilen ve değişik akılara göre toplanan MBR çıkışı GAC kolonuna verilerek GAC etkisi araştırılmıştır. Elde edilen değerler Şekil 4.18'de verilmiştir.



**Şekil 4.18.** MBR+GAC sistemindeki Ni(II) arıtımı

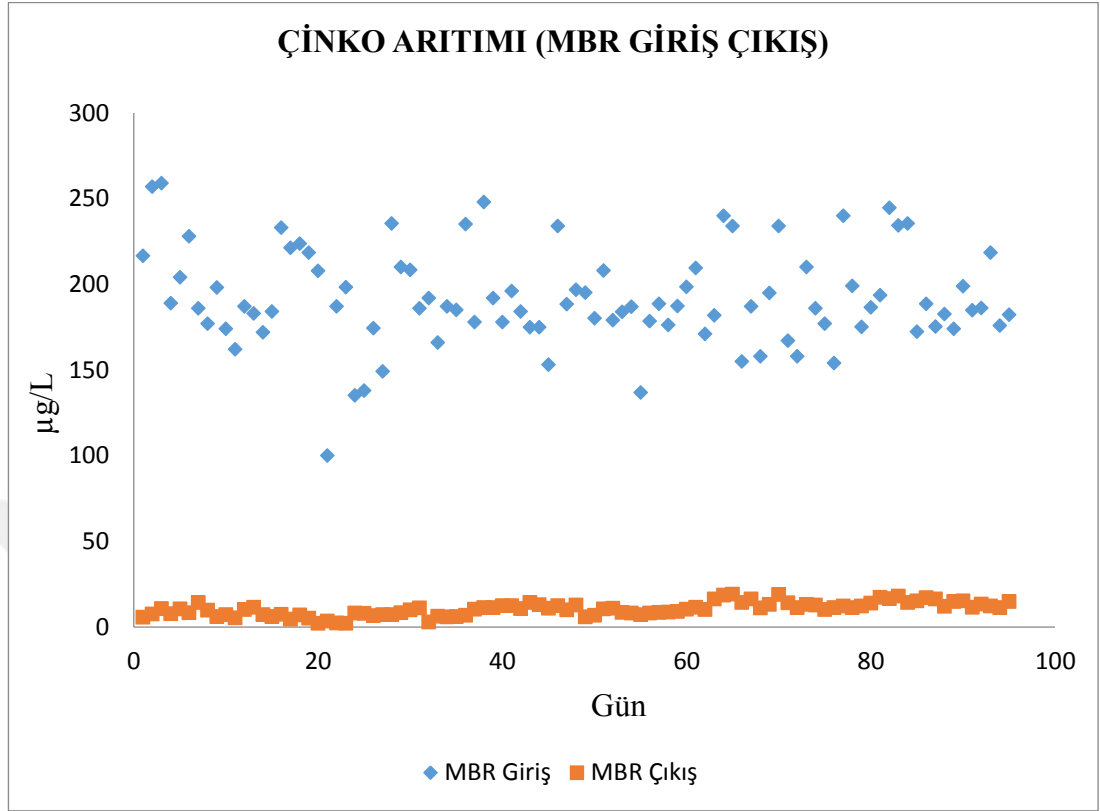
MBR çıkış konsantrasyonu 20-30 ug/L seviyesinde olan Ni (II) GAC kolonunda ortalama %7-18 arasında ekstra giderim sağlandığı görülmüştür. Elde edilen değerler LOD limiti olan 3 ug/L'nin altında olduğu için grafikte sabit olarak 3 ug/L ile gösterilmiştir. Toplamda MBR+GAC entegre sistemlerinin Ni (II) için toplam verimin %98'in üzerinde olduğu görülmektedir.



**Şekil 4.19.** MBR ve MBR+GAC sistemindeki Ni (II) giderim verimi

#### 4.1.5.d. Çinko (Zn (II)) arıtımı

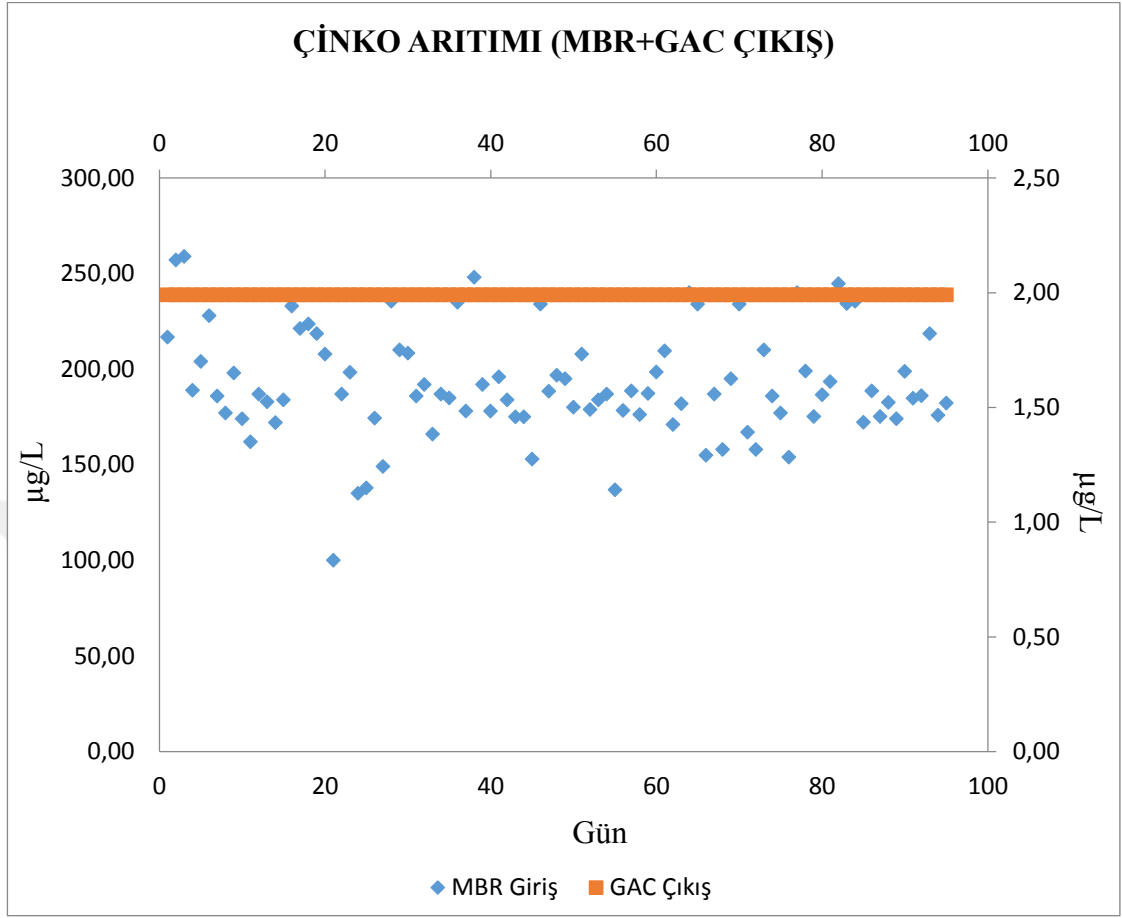
Çalışma sırasında arıtım verimi incelenen son ağır metal Zn (II)'dir. Çalışmanın ilk kısmında değişik akılarda MBR ile arıtımı incelenmiştir. Zn (II) giriş konsantrasyonu 200 ug/L civarında olup arıtım ile ilgili değerler Şekil 4.20'de verilmiştir.



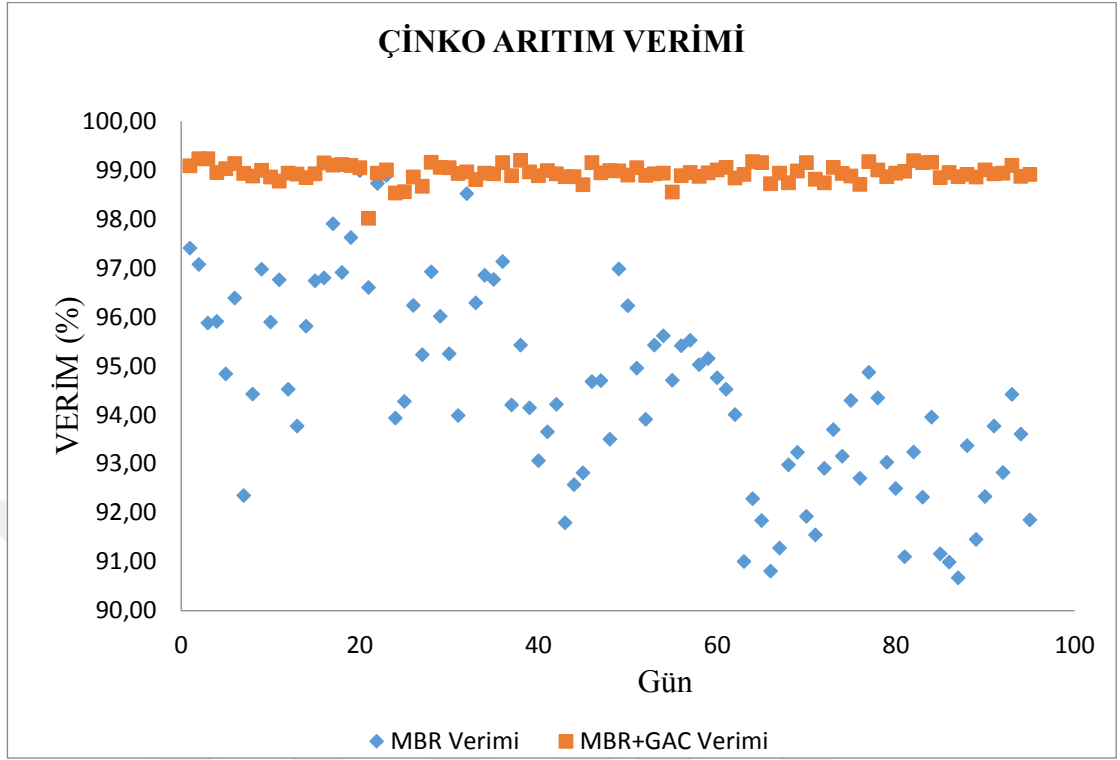
**Şekil 4.20.** MBR Sistemindeki Zn (II) arıtımı

Belirlenen akılarda giriş değerleri 200 ug/L civarında olup çıkış değerleri 20 ug/L'nin altındadır. Arıtım verimleri incelendiği zaman 16, 20 ve 24 L/m<sup>2</sup> sa akılar için sırasıyla %96, 95 ve 93 olarak ölçülmüştür. Her ne kadar akı arttığı zaman arıtım verimi düşse de çok fazla bir fark görülmemektedir. MBR çıkışında toplanan arıtılmış atıksu daha sonra GAC kolonuna verilmektedir. GAC kolonunda MBR sistemine artı %4-9 arasında arıtım yaptığı görülmektedir. Toplamda MBR+GAC entegre sistemlerinin Zn (II) arıtımındaki toplam verim %98 dolaylarında olduğu görülmektedir. Şekil 4.21 MBR+GAC sistemindeki Zn (II) giderimi, Şekil 4.22 MBR ve MBR+GAC sistemindeki Zn (II) verimi sunulmuştur.





**Şekil 4.21.** MBR+GAC sistemindeki Zn (II) arıtımı



Şekil 4.22. MBR ve MBR+GAC sistemindeki Zn (II) giderim verimi

## 5. SONUÇ ve TARTIŞMA

Hızla artan nüfusla birlikte bunların getirdiği ihtiyaçlar ve bu ihtiyaçların karşılanması için çevrenin kirletilmesiyle birlikte hava, toprak kirlenirken bu kirliliklerin en son ve nihai olarak gelip kirlettiği su kaynakları olacaktır. Nihayetinde doğadaki kaynaklar sınırsız değildir. Özellikle kirlenmenin son basamağı olan su kirliliği su kaynaklar açısından çok önemlidir. Mevcut su kaynaklarının önümüzdeki yıllarda yetmeyeceği gerçeği de karşımızda dururken mutlaka kaynakların ekonomik kullanılması, daha az su tüketen teknolojilerin seçilmesi ve suların artırılarak sürdürülebilirlik açısından yeniden kullanıma sunulması gereklidir. Kirletilmiş veya kirlenmiş suların kirlilik derecesine, karakterizasyonuna göre gelişen teknolojilerle bir çok arıtım prosesleri geliştirilmiş ve halende geliştirilmeye devam etmektedir.

Yaptığımız bu çalışmamızda MBR batık membran sistemine GAC ünitesi eklenerek azot, fosfor, KOİ ve ağır metal içeren suların arıtılması incelenmiştir. MBR'da azot, fosfor, KOİ ve ağır metal giderimleri incelenmiş daha sonrada MBR'den çıkan arıtılmış atıksuyumuz GAC kolonuna vermiş burada da azot, fosfor, KOİ ve ağır metal giderimleri incelenmiştir. MBR'de 3 farklı akı ile çalışılmış, toplanan arıtılmış atıksu GAC kolonunda ise farklı konsantrasyonlarda,  $25\pm 5^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta ve farklı pH'larda arıtım performansı incelenmiştir.

MBR'de KOİ gideriminin deneysel çalışmalarında 3 farklı akı ile çalışılmış en yüksek giderimin  $16 \text{ L/m}^2$  sa akıda gerçekleşmiştir. Atıksu giriş KOİ değeri 470-520 mg/L arasında olup MBR'den çıkış KOİ değerimiz 10-25 mg/L olup ortalama %97 arıtım yapılmıştır. Arıtılmış topladığımız atıksuyumuz farklı konsantrasyonlarda GAC kolonuna verilmiş burada da MBR sistemine ek olarak %35 arıtım yapılmış olup MBR+GAC sisteminin toplam giderim verimi %97.5 olarak gerçekleşmiştir. Deneysel çalışmalarımızda  $16 \text{ L/m}^2$  sa akıda,  $20 \text{ L/m}^2$  sa akıda,  $24 \text{ L/m}^2$  sa akıda en fazla arıtımın  $16 \text{ L/m}^2$  sa akıda gerçekleştiği görülmektedir. Bunun sebebi ise atıksuyun sistemde kalış süresinin fazla oluşuyla sistemdeki mikroorganizmalar atıkla daha uzun süre temas halinde olmasından kaynaklanmıştır.

$\text{NH}_4^+$ -N gideriminin de 3 farklı akı ile çalışılmış en yüksek giderimin  $16 \text{ L/m}^2$  sa akıda gerçekleşmiştir. Atıksu girişi  $\text{NH}_4^+$ -N miktarı  $78\text{-}84 \text{ mg/L}$  arasında olup, MBR'deki çıkış miktarı  $28\text{-}47.8 \text{ mg/L}$  arasındadır. MBR sistemindeki  $\text{NH}_4^+$ -N arıtım verimi ortalama %55.7'dir. MBR sisteminden çıkan arıtılıp topladığımız atıksuyumuz GAC kolonuna verilmiştir. GAC kolonu çıkış  $\text{NH}_4^+$ -N miktarı  $17\text{-}28 \text{ mg/L}$  arasında olup MBR sistemine ek olarak %18 arıtım yapılmış olup MBR+GAC sisteminin toplam giderim verimi %74 olarak gerçekleşmiştir. Bunun sebebi de atıksuyun sistemde kalış süresinin fazla olmasıdır.

$\text{PO}_4^{3-}$ -P gideriminin de 3 farklı akı ile çalışılmış en yüksek giderimin  $16 \text{ L/m}^2$  sa akıda gerçekleşmiştir. Atıksu girişi  $\text{NH}_4^+$ -N miktarı  $23.1\text{-}24.9 \text{ mg/L}$  arasında olup, MBR'deki çıkış miktarı  $20.4\text{-}22.8 \text{ mg/L}$  arasındadır. MBR sistemindeki  $\text{PO}_4^{3-}$ -P arıtım verimi ortalama %10'dur. MBR sisteminden çıkan arıtılıp topladığımız atıksuyumuz GAC kolonuna verilmiştir. GAC kolonu çıkış  $\text{PO}_4^{3-}$ -P miktarı  $17\text{-}20 \text{ mg/L}$  arasında olup MBR sistemine ek olarak %11 arıtım yapılmış olup MBR+GAC sisteminin toplam giderim verimi %22 olarak gerçekleşmiştir.

Ağır metallerin arıtımında toplanan arıtılmış atıksuyumuz,  $25\pm 5^\circ\text{C}$  sıcaklıkta,  $5 \text{ m/dk}$  sabit akış ile farklı konsantrasyonda ve 4 farklı pH =3-5-7-9'da (As (V)+As (III) =Toplam Arsenik), Pb (II), Zn (II), Ni(II) ağır metallerin GAC kolonundaki arıtım verimleri incelenmiştir.

(As (V)+As (III) =Toplam Arsenik) MBR'deki  $16 \text{ L/m}^2$  sa akıda arıtım verimi %5-10,  $20 \text{ L/m}^2$  sa'lik akıdaki %7,  $24 \text{ L/m}^2$  sa'lik akıdaki giderim verimi %5 civarında gerçekleşmiştir. Farklı konsantrasyonlarda ve pH'larda yapılan çalışmalarda pH'larda verimi çok fazla etkilemediği görüldüğünden pH =3 alınarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. (As (V)+As (III)=Toplam Arsenik), GAC kolonunda %70-75 civarında arıtılmış olup MBR+GAC sisteminin toplam verimi %80-85 dolaylarında gerçekleşmiştir. MBR sisteminde en iyi arıtımı  $16 \text{ L/m}^2$  sa akıda elde edilirken Toplam arsenik MBR sisteminde çok az arıtılmıştır. GAC kolonunda ise verim daha artmıştır.

Yüksek konsantrasyonlarda hem MBR'de hem de GAC'ta arıtım verimi giderek düştüğü görülmüştür.

Pb (II), MBR'deki 16 L/m<sup>2</sup> sa akıda arıtım verimi %96, 20 L/m<sup>2</sup> sa'lik akıdaki %95, 24 L/m<sup>2</sup> sa'lik akıdaki giderim verimi %94 civarında gerçekleşmiştir. Farklı konsantrasyonlarda ve pH'larda yapılan çalışmalarda pH'larda verimi çok fazla etkilemediği görüldüğünden pH =3 alınarak deneysel çalışmalar yapılmıştır Pb (II), GAC kolonunda %2-6 civarında arıtılmış olup MBR+GAC sisteminin toplam verimi %97-98 dolaylarında gerçekleşmiştir. Pb (II), zaten MBR sisteminde çoğu arıtılmıştır. Atıksuyumuz da ağır metaller mix olarak katılmış olduğundan çıkan suyumuzu GAC kolonundan geçirilmiştir.

Ni (II) MBR'deki 16 L/m<sup>2</sup> sa akıda arıtım verimi %91, 20 L/m<sup>2</sup> sa'lik akıdaki %89, 24 L/m<sup>2</sup> sa'lik akıdaki giderim verimi %80 civarında gerçekleşmiştir. Farklı konsantrasyonlarda ve pH'larda yapılan çalışmalarda pH'larda verimi çok fazla etkilemediği görüldüğünden pH=3 alınarak deneysel çalışmalar yapılmıştır Ni (II) GAC kolonunda %7-18 civarında arıtılmış olup MBR+GAC sisteminin toplam verimi %97-98 dolaylarında gerçekleşmiştir. Ni (II) zaten MBR sisteminde çoğu arıtılmıştır.

Zn (II) MBR'deki 16 L/m<sup>2</sup> sa akıda arıtım verimi %96, 20 L/m<sup>2</sup> sa'lik akıdaki %95, 24 L/m<sup>2</sup> sa'lik akıdaki giderim verimi %93 civarında gerçekleşmiştir. Farklı konsantrasyonlarda ve pH'larda yapılan çalışmalarda pH'larda verimi çok fazla etkilemediği görüldüğünden pH =3 alınarak deneysel çalışmalar yapılmıştır Zn (II) GAC kolonunda %4-9 civarında arıtılmış olup MBR+GAC sisteminin toplam verimi %98 dolaylarında gerçekleşmiştir.

## KAYNAKÇA

- Abel, P. D., 1996. *Water pollution biology*: CRC Press.
- Addemir, O, Açma, E, & Arslan, C., 1995. Çinko, Sistem Yayıncılık: İstanbul.
- Akanser, A., 2010. Sulardan Kuagulasyon/Yumaklaştırma İşlemi ile Ağır Metal Artımı. *Hacettepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü Yüksek Lisans Tezi*.Ankara.
- Akikol, İ. 2005. Farklı Aktivasyon Yöntemleriyle Geliştirilen Aktif Karbonlar ile Sudan Ağır Metal Giderimi,. *Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul*.
- Aksu, Z., 1998. Atıksulardaki Ağır Metal İyonlarının Yeşil Alglerden *Chlorella Vulgaris*'e Adsorbsiyonunun Kesikli Düzende Karıştırılmalı ve Akıskan Yatak Tepkime Kaplarında İncelenmesi, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi. *Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara*.
- Alyüz, Bilge, & Sevil, V., 2005. Low-cost adsorbents used in heavy metal contaminated waste water treatment. *Sigma*, 3.
- Anonymous, 1980. Metal Kaplama Sanayisi Atık Suları. *D.S.İ Genel Müdürlüğü Araştırma Ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı Yayını, Ankara* 703.
- Arslan, M, Temocin, Zillfikar, & Yigitoglu, Mustafa., 2004). Removal of cadmium(II) from aqueous solutions using sporopollenin. *Fresenius Environmental Bulletin*, 13(7), 616-619.
- Arslan, T., 2008. Kompleks Olarak Bağlı Ağır Metal İçerikli Atıksuların Elektrokoagulasyon ile Arıtım. *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Bilimleri ve Mühendisliği Çevre Mühendsiliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi*.
- Aslan, M., 2016. Membran Teknolojileri,. *T.C Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Türkiye Çevre Koruma Vakfı, Ankara*.
- Aslan, S., 2009. Yukarlı Akışlı Çamur Yataklı Reaktörde Ağır Metal ve Tuzluluğun Etkisinin İncelenmesi. *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı* (Doktora Tezi), 1-3.
- Asman, Gülsen, & Şanlı, O., 1997. Ultrafiltration of Fe (III) solutions in the presence of poly (vinyl alcohol) using modified poly (methyl methacrylate-co-methacrylic acid) membranes. *Journal of applied polymer science*, 64(6), 1115-1121.
- Bansal, Roop Chand, Donnet, Jean-Baptiste, & Stoeckli, F., 1988. *Active carbon*: M. Dekker.
- Barrera, H., Ureña-N., Fernando, B., B., & Barrera-Díaz, C., 2006. Removal of chromium and toxic ions present in mine drainage by Ectodermis of *Opuntia*. *Journal of Hazardous Materials*, 136(3), 846-853.
- Barth, EF, Ettinger, MB, Salotto, Bo V, & McDermott, GN t., 1965. Summary report on the effects of heavy metals on the biological treatment processes. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 86-96.
- Benito, Y, & Ruiz, ML., 2002. Reverse osmosis applied to metal finishing wastewater. *Desalination*, 142(3), 229-234.

- Bhattacharyya, D, & Cheng, CY., 1987. Activated carbon adsorption of heavy metal chelates from single and multicomponent systems. *Environmental progress*, 6(2), 110-118.
- Boysan, Füsün., (2008). Poliüre-poliamin reçinesi kullanılarak atıksulardaki ağır metal kirliliğinin adsorpsiyonla gideriminin incelenmesi. *akarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Bölümü Çevre Teknolojileri Anabilim Dalı Doktora Tezi*, 94.
- Brik, M, Schoeberl, P, Chamam, B, Braun, R, & Fuchs, W., 2006. Advanced treatment of textile wastewater towards reuse using a membrane bioreactor. *Process Biochemistry*, 41(8), 1751-1757.
- Brown, HG, Hensley, CP, McKinney, GL, & Robinson, JL., 1973. Efficiency of heavy metals removal in municipal sewage treatment plants. *Environmental letters*, 5(2), 103-114.
- Butcher, GJ., 1989. Experiences with anaerobic digestion of wheat starch processing waste. *International biodeterioration*, 25(1-3), 71-77.
- Chen, KY, Young, CS, Jan, TK, & Rohatgi, N., 1974. Trace metals in wastewater effluents. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 2663-2675.
- Choma, J, Jaroniec, M, & Piotrowska, J., 1987. On the mesopore correction of adsorption data used for characterizing microporous structure of activated carbons. *Materials chemistry and physics*, 18(4), 409-421.
- Cicek, N., 2002. *Membrane bioreactors in the treatment of wastewater generated from agricultural industries and activities*. Paper presented at the Written for presentation at the AIC 2002 Meeting CSAE/SCGR Program Saskatoon, Saskatchewan.
- Ciminli, CS., 2005. Gölbaşı Gölü'nde Su ve Bazı Organizmalarda Ağır Metal Birikimi. *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Su Ürünleri Anabilim Dalı, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Antakya*, 69.
- Cindoruk, S. S., 2000. Anaerobik Selektörlü Aktif Çamur Sisteminde Ağır Metal Giderimi. *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi Bursa*, 66.
- Çalışkan, S., 2002. Bakır ve krom metallerinin seçicili ve klasik aktif çamur proseslerine etkileri. *Yüksek Lisans Tezi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Uludağ Üniversitesi*.
- Çeviker, Ğ., 1994. Kimyasal İndirgeme ile Ağır Metal Arıtımı, *Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*.
- Çiçek, Nazim, Franco, Juan P, Suidan, Makram T, Urbain, Vincent, & Manem, Jacques., 1999. Characterization and comparison of a membrane bioreactor and a conventional activated-sludge system in the treatment of wastewater containing high-molecular-weight compounds. *Water Environment Research*, 71(1), 64-70.
- Demirer, G.N., 1991. Simulative Effects of Chromium (VI) on Activated Sludge Process. *M.Sc. Thesis.METU, Ankara*.
- Deniz, T., 2014. Çay Atığından Aktif Karbon ile Sulu Çözeltilerden Ağır Metallerin Giderimi. *Yüksek Lisans Tezi Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı Ankara*, 109.

- Doğu, G., Ercan.Y. Durmaz, A., 1991. Baca Gazı Düsülfürisazyon Proseslerinin Genel Değerlendirilmesi. *Yanma ve Hava Kirliliği Kontrolü I.Ulusal Sempozyumu, Gazi Üniversitesi Müh.Mim.Fak.,Ankara.*
- Döngel, B., 1997. Zonguldak Kömürlerinden Aktif Karbon Üretimi. *Yüksek Lisans Tezi Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı Zonguldak, 76.*
- Earman, Sam, & Hershey, Ronald L., 2004. Water quality impacts from waste rock at a Carlin-type gold mine, Elko County, Nevada. *Environmental Geology, 45(8), 1043-1053.*
- Eke, M., 2010. Nikel Hiperakümülatörü Thlaspi Elegans Boiss'den Nikelin Asitle Ekstraksiyonu ve Elektrokimyasal Yolla Metal Olarak Geri Kazanımının Araştırılması.
- Ekici, H.S., 2007. Kayısı Çekirdeğinden Elde Edilen Aktif Karbonla Sulardan Fosfat ve Bakır(II) Giderimi,. *Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Elazığ., 122.*
- Eryıldız, M., 2010. Biyokütleden Elde Edilen Aktif Karbonlar ile Sulu Çözümlerden Ağır Metal ve Boyar Madde Giderimi,. *Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, ÇevreMühendisliği Ana Bilim Dalı, Eskişehir.*
- Fennimore, J., Ruder, G., and Simmonite, D., 1978. Treatment of particulate carbon: Google Patents.
- Germic, L, Ebert, K, Bouma, RHB, Borneman, Z, Mulder, MHV, & Strathmann, H., 1997. Characterization of polyacrylonitrile ultrafiltration membranes. *Journal of membrane Science, 132(1), 131-145.*
- Gokcay, Celal F, & Yetis, Ulku., 1991. Effect of chromium (VI) on activated sludge. *Water research, 25(1), 65-73.*
- Gönüllü, M Talha., 2004. *Endüstriyel kirlenme kontrolü: Birsen Yayınevi.*
- Gray, NF., 1997. Environmental impact and remediation of acid mine drainage: a management problem. *Environmental Geology, 30(1), 62-71.*
- Gülensoy, H., Mahramanlıoğlu, M., & Kızılcıklı, İ., 1995. Fenolün sulu çözümlerinden doğal ve aktifleşmiş kömür kullanılarak adsorbsiyon yöntemi ile uzaklaştırılması. *Biyologlar Derneği 2. Ulusal Ekoloji ve Çevre Kongresi Bildiri ve Poster Özet Kitabı Ankara, 33.*
- Güler, Erkan., 2008. *Çinko tesisi liç artıklarından metal kazanım yöntemlerinin araştırılması. DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.*
- Gürdal, G, & Yalçın, MN., 1992. Kömürde Gaz Birikmesini Kontrol Eden Parameteler- Genel Bakış, Türkiye 8. *Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, 4-8.*
- Hamutoğlu, R., Dinçsoy, A. B., Cansaran-Duman, D. & Aras, S., 2012. Biyosorpsiyon, adsorpsiyon ve fitoremediasyon yöntemleri ve uygulamaları. *Türkiye Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi, 69, 69.*
- Işlay, Ö., 2013. Şarap endüstrisi artığı üzüm saplarından aktif karbon eldesi ve karakterizasyonu. *Fırat üniversitesi fen bilimleri enstitüsü Yüksek Lisans Tezi Biyoloji Anabilim Dalı, 122.*
- İleri, R., 2000. *Çevre biyoteknolojisi: Değişim Yayınları.*
- Jagtoyen, M., Thwaites, M., Stencil, J., McEnaney, B., & Derbyshire, F., 1992. Adsorbent carbon synthesis from coals by phosphoric acid activation. *Carbon, 30(7), 1089-1096.*
- Jankowska, H., Świątkowski, A., & Choma, J., 1991. *Active carbon: Ellis Horwood Ltd.*



- Judd, Simon, & Jefferson, Bruce., 2003). *Membranes for industrial wastewater recovery and re-use*: Elsevier.
- Judd, S., 2006. Claire Judd. *The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment*, 124-160.
- Kaplan, D., Abeliovich, A., & Ben-Y. S, 1987. The fate of heavy metals in wastewater stabilization ponds. *Water Research*, 21(10), 1189-1194.
- Kar, M., 2011. Yamulara Barajı (Kayseri) Su, Sediment ve Tatlı Su Kefali (*Squalus Cephalus*) Örneklerinde Ağır Metal Düzeylerinin Mevsimsel Değişimlerinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Ens., Kayseri* 57.
- Kargı, F., 1998. Çevre Mühendisliğinde Biyoprosesler. (3. Basım). *Dokuz Eylül Üniversitesi Müh. Fakültesi Basımı. İzmir*.
- Kartal, G., Güven, A., Kahvecioğlu, Ö., Timur, S., Metalurji, İTÜ., 2004. Metallerin çevresel etkileri–II. *Metalurji Dergisi*, 137, 46-51.
- Kasprzak, Kazimierz S, Sunderman, F William, & Salnikow, Konstantin, 2003. Nickel carcinogenesis. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 533(1), 67-97.
- Keller, Edward A., Akyol, E., & Kayabalı, K., 2006. *Çevre jeolojisine giriş*: Gazi.
- Kıncay, O.ve Temir, G., 1991. Duman Gazlarından SO<sub>x</sub> ve NO<sub>x</sub>'lerin Birlikte Temizlenmesi *Yanma ve Hava Kirliliği Kontrolü I. Ulusal Sempozyumu Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Ankara*.
- Kirk-Othmer., 1992. Encyclopedia of Chemical Technology. *M. Dekker Inc., Vol 2*.
- Kitiş, M., Yiğit, N. Ö., Köseoğlu, H., & Bekaroğlu, Ş. Ş, 2011. İleri atıksu arıtma ve atıksuların tekrar kullanılması.
- Knoblock, MD, Sutton, PM, Mishra, PN, Gupta, K, & Janson, A., 1994. Membrane biological reactor system for treatment of oily wastewaters. *Water Environment Research*, 66(2), 133-139.
- Kurniawan, T. A., Chan, G. Y. S., Lo, W. H., Babel, S., 2006. Physico-Chemical Treatment Techniques For Wastewater Laden With Heavy Metals, *Chemical Engineering Journal*, 118, 83-98.
- Kurniawan, T. A., Chan, Gilbert YS, Lo, Wai-Hung, & Babel, S., 2006. Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals. *Chemical engineering journal*, 118(1), 83-98.
- Küçükgül, E. Y., 2004. Ticari aktif karbon üretimi ve özelliklerinin belirlenmesi.
- Laîné, J-M, Vial, D, & Moulart, Pierre., 2000. Status after 10 years of operation—overview of UF technology today. *Desalination*, 131(1-3), 17-25.
- Lazaridis, NK, Matis, KA, & Webb, M., 2001. Flotation of metal-loaded clay anion exchangers. Part I: the case of chromates. *Chemosphere*, 42(4), 373-378.
- Manem, J., & Sanderson, R., 1996. Membrane bioreactors. *Water treatment membrane processes*, 17, 1-33.
- MEB, T.C. Milli Eğitim Bakanlığı., 2013). Kimya Teknolojisi Su Arıtma. *Ankara* 28.
- Metcalf, A, & Eddy, C., 1991. Wastewater Engineering. Treatment Disposal Reuse. Tchobanoglous, G. and Burton, FL: McGraw-Hill New York.
- Metzinger, J., Hasokowati, W., Hudgins, RR., Silveston, PL., & Gangwal, S., 1992. Application of a periodically operated trickle bed to sulfur removal from stack gas. *Chemical engineering science*, 47(13-14), 3723-3727.

- Muller, EB., Stouthamer, AH., van Verseveld, H W van, & Eikelboom, DH., 1995. Aerobic domestic waste water treatment in a pilot plant with complete sludge retention by cross-flow filtration. *Water Research*, 29(4), 1179-1189.
- Nagano, A, Arikawa, E, & Kobayashi, H., 1992. The treatment of liquor wastewater containing high-strength suspended solids by membrane bioreactor system. *Water Science and Technology*, 26(3-4), 887-895.
- Odabaş, E., 2006. Aktif çamur sistemlerinde metal toksisitesinin respirometrik metod kullanılarak belirlenmesi. *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi Bursa*, 69.
- Orbak, İ., 2015. *Tunçbilek Linyitinden Kimyasal Aktivasyon Yöntemi ile Aktif Karbon Üretimi*. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ottoson, J., Hansen, A, Björleinius, B., Norder, H., & Stenström, TA., 2006. Removal of viruses, parasitic protozoa and microbial indicators in conventional and membrane processes in a wastewater pilot plant. *Water Research*, 40(7), 1449-1457.
- Özdemir, Z. Z., 2011. *Palmiye kabuğu kökenli aktif karbon ile zeytinyağı atık sularında kirlilik parametrelerine bakış*. SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Özdemir, I., 2013. Şarap endüstrisi artığı üzüm saplarından aktif karbon eldesi ve karakterizasyonu. *Firat üniversitesi fen bilimleri enstitüsü Yüksek Lisans Tezi Biyoloji Anabilim Dalı*, 122.
- Özkök, T., 2015. *Ağır Metallerin Fosfonik Asit Bazlı Bileşiklerle Gideriminin İncelenmesi*. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Pak, O., 2011. Kırklareli ili ve Çevresinde Otoban Kenarlarındaki Topraklarda Bazı Ağır metal Kirliliğinin Araştırılması. *Namık Kemal Üniversitesi Fen Bil. Enst. Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ*.
- Papadopoulos, A, Fatta, D, Parperis, K, Mentzis, A, Haralambous, K-J, & Loizidou, M., 2004. Nickel uptake from a wastewater stream produced in a metal finishing industry by combination of ion-exchange and precipitation methods. *Separation and Purification Technology*, 39(3), 181-188.
- Qaiser, S., Saleemi, Anwar R, & Mahmood A., M., 2007. Heavy metal uptake by agro based waste materials. *Electronic Journal of Biotechnology*, 10(3), 409-416.
- Ross, WR, Barnard, JP, Strohwal, NKH, Grobler, CJ, & Sanetra, J., 1992. Practical application of the ADUF process to the full-scale treatment of a maize-processing effluent. *Water Science and Technology*, 25(10), 27-39.
- Samsunlu, A., 2006. Atıksuların Arıtılması, Birsen Yayınevi: İstanbul.
- Schreck, P., 1998. Environmental impact of uncontrolled waste disposal in mining and industrial areas in Central Germany. *Environmental Geology*, 35(1), 66-72.
- SKKY, Gazete, Resmi, & Yönetmeliği, Su Kirliliği Kontrolü., 2004). Tarih 31.12. 2004: Sayı: 25687.
- Smith, A. L., Stadler, L. B., Love, N. G., Skerlos, S. J., and Raskin, L. 2012. Perspectives on anaerobic membrane bioreactor treatment of domestic wastewater: a critical review. *Bioresource technology*, 122, 149-159.
- Sonune, A., & Ghate, R., 2004. Developments in wastewater treatment methods. *Desalination*, 167, 55-63.
- Sözüdoğru, O., 2015. Yüksek Azot ve Fosfor İçerikli Atıksuların Kesikli Ardışık Biyolojik Reaktöre Entegre Edilmiş Batık Membran Filtrasyon Sistemi İle

- Arıtımın İncelenmesi. *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi Erzurum*, 66.
- Spanjers, H., & Vanrolleghem, P., 1995. Respirometry as a tool for rapid characterization of wastewater and activated sludge. *Water Science and Technology*, 31(2), 105-114.
- Şahin, S., 2010. Su Arıtma Teknolojisinde Yer Alan Yumaklaştırma İşleminin Teknolojik Esasları The Technological Fundamentals Of Flocculation Management In The Water Technology. *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi cilt-sayı 3-1*.
- Şen, N., 2009. Fındık Kabuklarından Aktif Karbon Elde Edilmesi ve Karakterizasyonu., *Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Elazığ.*, 122.
- Şencan, A., 2011. *Fındık kabuğu ve fındık kabuğundan farklı yöntemlerle elde edilen aktif karbonun kurşun (ii) sorpsiyon potansiyelinin belirlenmesi*. SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Şengül, F., Müezzinoğlu, A., & Samsunlu, A., 1986. Çevre Mühendisliği Kimyası. *DEÜ Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Yayınları MM/ÇEV-86 EY*, 122.
- Şimşek, C., Gündüz, O., & Elçi, A., 2012. Terkedilmiş Balya (Balıkesir) Pb-Zn Maden Atıklarının Ağır Metal ve Doğal Radyoaktivite İçeriği ve Çevre Kalitesi Açısından Değerlendirilmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 2(1).
- Tchobanoglous, G. Burton. FL, 1991. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse: McGraw-Hill, Inc., Tokyo, Jap.*
- Tırıs, M., Kalafatoğlu, E., & Okutan, H., 1993. Hava Kirliliği Kaynakları ve Kontrolü. *Tübitak Marmara Araştırma Merkezi Kimya Mühendisliği Araştırma Bölümü, Gebze-Kocaeli*, 7-8.
- Tünay, O., 1996. Çevre Mühendisliğinde Kimyasal Prosesler, *İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul*.
- Tünay, O., 1978. *İnhibisyonun aktif çamur prosesine etkisi*
- TUİK, 2014 Belediye Atık Su İstatistikleri Sayı 18778 Ankara <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=18778> access 30.05.2017
- Tzanetakakis, Nick, Taama, WM, Scott, Keith, Jachuck, RJJ, Slade, RS, & Varcoe, J., 2003. Comparative performance of ion exchange membranes for electro dialysis of nickel and cobalt. *Separation and Purification Technology*, 30(2), 113-127.
- Uysal, T., 2012. Su İçerisindeki Ağır Metal iyonlarının Kuluncak (Malatya) Vermikülitleri Üzerine Adsorpsiyonu. *Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya*, 31-36.
- Uzun, I., 2008. Kavak ağacı artıklarından aktif karbon üretimi. *Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir*.
- Uzuner, S., 2012. Süt endüstrisi atıksularının arıtımında jet-loop membran biyoreaktörlerin performansının incelenmesi.
- Vengris, T, Binkien, R, & Sveikauskait, A., 2001. Nickel, copper and zinc removal from waste water by a modified clay sorbent. *Applied Clay Science*, 18(3), 183-190.
- Weber, W. J., 1972. *Physicochemical processes for water quality control: Wiley Interscience*.

- Wheatland, AB., Gledhill, C, & O'Gorman, JV., 1975. Developments in the treatment of metal-bearing effluents. Improvement of effluent quality. *Chemistry and Industry 1975 No 15* 632-639.
- Yalçın, M., & Arol, AĞ., 1993. Altın Metalurjisi için Yerli Kaynaklardan Aktif Karbon Üretimi. *Türkiye XIII. Madencilik Kongresi*, 413-426.
- Yamaguchi, T., Nakao, S., & Kimura, S., 1991. Plasma-graft filling polymerization: preparation of a new type of pervaporation membrane for organic liquid mixtures. *Macromolecules*, 24(20), 5522-5527.
- Yamık, A., Mustafaev, I. ve Akçıl, A. 1995. Aktif Karbon Üretiminde Radyasyon Metodları. *1.Sistem Mühendisliği ve Savunma Uygulamaları Sempozyumu, Kara Harp Okulu Sistem Yönetimi Bilimleri Bölümü Sistem Müh. Programı Ankara.*
- Yazoğlu, P. T., 2010. *Pirinç Kabuğu Külünden Üretilen Kalsiyum Silikatın Ve Aktif Karbonun Ağır Metal Adsorpsiyon Özelliklerinin Kıyaslanması*. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yılmaz, E. Ş., 2009. Siyanobakterilerle ağır metallerin giderimi ve bunu etkileyen faktörlerin araştırılması. *Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyoloji Anabilim Dalı Doktora Tezi Ankara*, 106.
- Yiğit, N. Ö., 2007. *Membran biyoreaktörü ile (MBR) evsel atıksu arıtımı*. SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yüksel, B., 2000. Atıksulardan Kurşun Gideriminde Doğal Kil Minerallerinin Adsorban Olarak Kullanılmasının Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*

**ÖZGEÇMİŞ**

- Adı Soyadı** : Savaş ÇALIK
- Doğum Tarihi** : 14.03.1980
- Doğum Yeri** : Erzurum
- Medeni Hali** : Evli, 2 çocuk
- Lise** : Erzurum Lisesi
- Lisans 1** : (1998-2002) Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Bölümü
- Lisans 2** : (2011-2014) Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü
- Yüksek Lisans** : (2014-2017) Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Teknolojileri Bilim Dalı
- Çalıştığı Kurum** : T.C. Sağlık Bakanlığı, Erzurum Halk Sağlığı Laboratuvarı,(Bölge Hıfzıssıhha Enstitüsü)