

**T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MEMBRAN DİSTİLYASYON PROSESİ İLE İÇME SULARINDAKİ ARSENİĞİN  
ARITILABİLİRLİĞİ**

**DİLARA YEŞİLİRMAK**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN  
PROF. DR. MEHMET ÇAKMAKCI**

**İSTANBUL, 2016**

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MEMBRAN DİSTİLASYON PROSESİ İLE İÇME SULARINDAKİ ARSENİNİN**  
**ARITILABİLİRLİĞİ**

Dilara YEŞİLİRMAK tarafından hazırlanan tez çalışması 29.03.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Prof. Dr. Mehmet ÇAKMAKCI

Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Mehmet ÇAKMAKCI

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Mahir İNCE

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof.Dr. Hüseyin SELÇUK

İstanbul Üniversitesi



Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nce desteklenmiştir. Proje No: 2013-05-02-KAP09

## ÖNSÖZ

---

Çalışmamın koordinasyonu ve işleyişine fazlasıyla itina göstermiş olan, bilgi ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen büyük sabır timsali, saygıdeğer danışmanım Prof. Dr. Mehmet ÇAKMAKCI'ya,

Çalışmama bilgi ve deneyimleriyle destek vermiş olan Arş. Görevlisi Harun ELCİK'e,  
Çalışmamda yardımını esirgemeyen Uzman Havva Melda AKBİN'e,

Yardım ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bu meziyeti görev bilmiş olan bilime gönül vermiş değerli arkadaşlarım; Ali ZOUNGRANA'ya, İsmail Hakkı ZENGİN'e, Esra HALLAÇ'a, Tuba GENÇ'e, Demet Işık KURTOĞLU'na, ve Hatice ÇOLTU'ya,

Maddi ve manevi her koşulda yanımda olan beni bu günlere getiren babam Mahir YEŞİLİRMAK'a ve annem Nuran YEŞİLİRMAK'a,

Çalışmamadaima şevk katmış olan kızkardeşim Nurcihan YEŞİLİRMAK'a ve erkek kardeşim Bilal YEŞİLİRMAK'a,

Çalışmamda yardımını kıymetli hocalarım ve arkadaşlarıma,

En içten teşekkürlerimi sunarım.

Mart, 2016

Dilara YEŞİLİRMAK

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	viii
KISALTIMA LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT.....	xv
<b>BÖLÜM 1</b>	
GİRİŞ.....	1
1.1    Literatür Özeti.....	1
1.2    Tezin Amacı.....	2
1.3    Hipotez.....	2
<b>BÖLÜM 2</b>	
LİTERATÜR.....	3
2.1    Arsenik, Etkileri ve Giderilmesi.....	3
2.1.1    Arsenik Kimyası.....	3
2.1.2    Arsenik Kaynakları.....	4
2.1.3    Yönetmelik.....	5
2.1.4    Arseniğin Sağlığa Etkileri.....	5
2.1.5    Sularda Arsenik.....	6
2.1.6    Arseniğin Arıtım Metodları.....	7
2.2    Membran Distilasyonu.....	11
2.2.1    Doğrudan Temaslı Membran Distilasyonu (DCMD).....	11
2.2.2    Hava Boşluklu Membran Distilasyonu (AGMD).....	12
2.2.3    Gaz Süpürücülü Membran Distilasyonu (SGMD).....	12
2.2.4    Vakum Membran Distilasyonu (VMD).....	13
2.3    Membran Distilasyonunu Etkileyen İşletme Parametreleri.....	14
2.3.1    Besleme Sıcaklığı.....	14
2.3.2    Besleme Konsantrasyonu.....	14

2.3.3	Beslemenin Sirkülasyon Hızı ve Karıştırma Oranı.....	15
2.3.4	Süzüntünün Giriş Sıcaklığı.....	15
2.3.5	Sıcaklık Farkı ve Ortalama Sıcaklık Etkisi.....	16
2.3.6	Buhar Basıncı Farkı.....	17
2.4	Kütle Transferi.....	17
2.4.1	Membran Gözenekleri Aracılığıyla Kütle Transferi.....	18
2.5	Sıcaklık Transferi.....	19
2.6	MD Prosesini Etkileyen Membran Parametreleri.....	20
2.6.1	Membran Kalınlığı.....	21
2.6.2	Membran Porozitesi.....	21
2.6.3	Membran Gözenek Boyutu.....	21
2.6.4	Gözenek Eğriligi.....	22
2.6.5	Membran Yüzey Kimyası.....	22
2.6.6	Membran Modül Geometrisi.....	22
2.7	MD Uygulama Alanları.....	23

### BÖLÜM 3

DENEYSEL ÇALIŞMA.....	25	
3.1	Sentetik İçme Suyu Karakteristik Özellikleri.....	25
3.2	Deneysel Çalışma Düzenegi.....	26
3.2.1	Membran Distilasyon Düzenegi.....	26
3.2.2	Çalışmada Kullanılan Membranlar.....	26
3.3	Analizler.....	28

### BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE DEĞERLENDİRME.....	30	
4.1	Sentetik Çözeltiden Arsenik Giderimi.....	30
4.1.1	Akı.....	30
4.1.2	Arsenik Giderimi.....	34
4.1.3	İletkenlik Giderimi.....	36
4.2	Karbon İlaveli Sentetik Çözeltiden Arsenik Giderimi.....	38
4.2.1	Akı.....	38
4.2.2	Arsenik Giderimi.....	41
4.2.3	İletkenlik Giderimi.....	42
4.2.4	Toplam Organik Karbon (TOK) Giderimi.....	43
4.3	Fe(III) İlaveli Sentetik Çözeltiden Arsenik Giderimi.....	44
4.3.1	Akı.....	44
4.3.2	Arsenik Giderimi.....	45
4.3.3	İletkenlik Giderimi.....	46
4.3.4	Fe(III) Giderimi.....	47
4.4	Tuz İlaveli Sentetik Çözeltiden Arsenik Giderimi.....	49
4.4.1	Akı.....	49
4.4.2	Arsenik Giderimi.....	52
4.4.3	İletkenlik Giderimi.....	53
4.4.4	Değerlendirme.....	54

SONUÇLAR.....	60
---------------	----

KAYNAKLAR.....	63
----------------	----

ÖZGEÇMİŞ.....	70
YAYINLANAN MAKALELER.....	71



## SİMGE LİSTESİ

$l$	Membran modülü boyunca gerçekleşen basınç düşmesi
$Re_N$	Reynolds Sayısı
$u$	Sıvının hızı
$dh$	Akış kanalının hidrolik çapı
$f$	Sürtünme katsayısı
$\rho$	Sıvının yoğunluğu
$\mu$	Dinamik viskozite
$C_{Bm}$	Membran yüzeyindeki konsantrasyon
$C_{Bb}$	Besleme konsantrasyonu
$\delta_{f0}$	Konsantrasyon Polarizasyon Tabakası
$CP$	Sınır Tabakası
$\delta_{fc}$	Konsantrasyon Sınır Tabakası
$T_{fm}$	Besleme tarafındaki membran yüzey sıcaklığı
$T_{pm}$	Süzüntü tarafındaki membran yüzey sıcaklığı
$T_{fb}$	Besleme tarafındaki sıvının sıcaklığı
$T_{pb}$	Süzüntü tarafındaki sıvının sıcaklığı
$k$	Knudson difüzyonu
$P$	Poiseuille akış
$M$	Moleküler difüzyon
$N$	Molar akı
$C$	Membran distilasyon katsayısı
$P_{fm}(T_{fm})$	Sıcaklığın fonksiyonu olarak besleme buhar basıncı (membran yüzeyinde)
$P_{pm}(T_{pm})$	Sıcaklığın fonksiyonu olarak süzüntü buhar basıncı (membran yüzeyinde)
$K_n$	Membran porları arasında transfer olan gaz moleküllerinin ortalama yolunun ortalama membran por çapına oranı
$\delta_{ft}$	Besleme sıcaklık sınır tabakası kalınlığı
$\delta_{pt}$	Süzüntü sıcaklık sınır tabakası kalınlığı
$q_f$	Beslenen ısı akışı
$h_f$	Sıcaklık transfer katsayısı
$r$	Membran porlarının ortalama por boyutu
$a$	Knudson difüzyonu
$\delta_m$	Membran kalınlığı
$\tau$	Membran eğriliği
$J$	Akı
$m_p$	Süzüntü ağırlığı
$A_m$	Membran alanı

## KISALTMA LİSTESİ

---

As	Arsenik
As(III)	Arsenit
As(V)	Arsenat
AGMD	Hava Boşluklu Membran Distilasyonu
C	Karbon
DCMD	Doğrudan Temaslı Membran Distilasyonu
EPA	Çevre Koruma Ajansı
Fe	Demir
Fe(III)	Ferrik demir
KOİ	Kimyasal Oksijen İhtiyacı
LEP	Likit Giriş Basıncı
MD	Membran Distilasyonu
MDC	Membran Distilasyon Kristalizasyonu
MF	Mikrofiltrasyon
NF	Nanofiltrasyon
PP	Polipropilen
PTFE	Politetrafloroetilen
PVA/PEG	Polivinilalkol/Polietilenglikol
PVDF	Polivinilidiflorit
RO	Ters Osmoz
SGMD	Gaz Süpürücülü Membran Distilasyonu
TÇKM	Toplam Çözünmüş Katı Madde
TOK	Toplam Organik Karbon
TPC	Sıcaklık polarizasyon katsayısı
UF	Ultrafiltrasyon
USEPA	Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı
WHO	Dünya Sağlık Örgütü
VMD	Vakum Membran Distilasyonu
VOC	Uçucu Organik Karbon

## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Arsenik görünümü [6].....	4
Şekil 2.2 Doğrudan Temaslı Membran Distilasyonu (DCMD) .....	11
Şekil 2.3 Hava Boşluklu Membran Distilasyonu (AGMD) .....	12
Şekil 2.4 Gaz Süpürücülü Membran Distilasyonu (SGMD).....	13
Şekil 2.5 Vakum Membran Distilasyonu (VMD) .....	13
Şekil 2.6 MD’da sıcaklık ve konsantrasyon polarizasyonu.....	18
Şekil 3.1 MD prosesi (a) görünümü (b) şematik diyagramı.....	27
Şekil 3.2 Atomik Absorpsiyon Spektrofotometresi Görünümü .....	28
Şekil 3.3 Arsenik Kalibrasyon Eğrisi .....	29
Şekil 4.1 100 µg/L As(III) konsantrasyonunda akı-zaman değişimi.....	31
Şekil 4.2 1.000 µg/L As(III) konsantrasyonundaki akı-zaman değişimi.....	32
Şekil 4.3 As(V) 100 µg/L konsantrasyonunda akı-zaman değişimi .....	33
Şekil 4.4 1.000 µg/L As(V) konsantrasyonunda akı-zaman değişimi.....	34
Şekil 4.5 100 ve 1.000 µg/L As(III) konsantrasyonlarında arsenik giderimi .....	35
Şekil 4.6 100 ve 1.000 µg/L As(V) konsantrasyonlarında arsenik giderimi.....	36
Şekil 4.7 100 ve 1.000 µg/L As(III) ve 100 ve 1.000 µg/L As(V) konsantrasyonlarında musluk suyundan iletkenlik giderimi .....	37
Şekil 4.8 1.000 µg/L As(III) ve 5 mg C /L konsantrasyonunda akı-zaman değişim .....	38
Şekil 4.9 1.000 µg/L As(III) ve 10 mg C /L giriş konsantrasyonunda akı-zaman değişimi .	39
Şekil 4.10 1.000 µg/L As(III) ve 20 mg C /L giriş konsantrasyonunda akı-zaman değişimi .	40
Şekil 4.11 1.000 µg/L As(III) ve 5, 10 ve 20 mg C/L konsantrasyonunda arsenik giderimi ..	41
Şekil 4.12 1.000 µg/L As(III) ve 5, 10 ve 20 mg C/L konsantrasyonunda iletkenlik giderimi .....	43
Şekil 4.13 1.000 µg/L As(III) ve 5, 10 ve 20 mg C/L konsantrasyonunda TOK giderimi .....	43
Şekil 4.14 1.000 µg/L As(III) ve 2,5 mg/L Fe(III) konsantrasyonunda akı-zaman değişimi.....	44
Şekil 4.15 1.000 µg/L As(III) ve 5 mg/L Fe(III) konsantrasyonunda akı-zaman değişimi.....	45
Şekil 4.16 2,5 ve 5 mg/L Fe(III)’lü 1.000 µg/L As(III) içeren sentetik suyun artırılarak giderimi.....	46
Şekil 4.17 1.000 µg/L As(III) ve 2,5 ve 5 mg/L Fe(III) konsantrasyonlarında sudan iletkenlik giderimi.....	47
Şekil 4.18 1.000 µg/L As(III) ve 2,5 mg/L Fe(III) konsantrasyonunda demir giderimi .....	48
Şekil 4.19 5 mg/L Fe(III) 1.000 µg/L As(III) içeren sentetik suyun 0,22-0,45 PTFE ve 0,22-0,45 PVDF membranıyla artırılarak giderimi .....	49
Şekil 4.20 1.000 µg/L As(III) konsantrasyonunda ve 2.500 µS/cm iletkenlik değerinde akı-zaman değişimi .....	50
Şekil 4.21 1.000 µg/L As(III) konsantrasyonunda ve 5.000 µS/cm iletkenlik değerinde akı-zaman değişimi .....	51

Şekil 4.22 1.000 µg/L As(III) konsantrasyonunda ve 10.000 µS/cm iletkenlik değerinde akı- zaman değişimi .....	52
Şekil 4.23 1.000 µg/L As(III) ile 2.500, 5.000 ve 10.000 µS/cm iletkenlik değerlerinde arsenik giderimi .....	53
Şekil 4.24 1.000 µg/L As(III) ve 2.500, 5.000 ve 10.000 µS/cm iletkenlik değerlerinde iletkenlik giderimi.....	54



## ÇİZELGE LİSTESİ

---

	Sayfa
Çizelge 2.1 Ülkemizde bazı su kaynaklarındaki arsenik konsantrasyonları [19].....	6
Çizelge 2.2 MD prosesinin bazı uygulama alanları [23] .....	24
Çizelge 3.1 Sentetik çözeltinin karakteristik özellikleri .....	25
Çizelge 3.2 Membranların karakteristik özellikleri .....	27
Çizelge 3.3 Analiz edilen parametreler ve analiz metodları.....	28

# MEMBRAN DİSTİLASYON PROSESİ İLE İÇME SULARINDAKİ ARSENİĞİN ARITILABİLİRLİĞİ

Dilara YEŞİLİRMAK

ÇevreMühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof.Dr. Mehmet ÇAKMAKCI

Bu çalışmada 100 µg/L ve 1.000 µg/L konsantrasyonlarında As(III) (arsenit) ve As(V) (arsenat) içeren iki farklı sentetik çözelti hazırlanarak membran distilasyonu ile çalışmalar gerçekleştirilmiştir. 0,22 µm ve 0,45 µm gözenek çaplarına sahip PTFE ve PVDF hidrofobik membranlar kullanılmış ve 40 °C, 50 °C, 60 °C ve 65 °C sıcaklık şartlarında arıtılabilirlik çalışmaları yapılmıştır. Ayrıca, 1.000 µg/L As(III) içeren çözeltilere 2.500, 5.000 ve 10.000 µS/cm iletkenlik oluşturacak şekilde tuz ve 5, 10, 20 mg/L karbon (C) olacak şekilde standart KOİ çözeltisi ile 2,5 ve 5 mg/L Fe(III) olacak şekilde FeCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O ilave edilmiştir. Böylece, sentetik çözeltilere ilave edilen kirleticilerin As(III) giderimi ve membran distilasyonu prosesi üzerine etkileri de incelenmiştir.

Bu çalışmada As(III), As(V), Fe(III) ve iletkenlik yaklaşık 100% oranında giderilmiştir. TOK'u oluşturan organik maddelerin bir kısmı buharlaşarak hidrofobik membrandan geçmiş ve TOK giderme verimi yaklaşık 92,5% olmuştur. Akı; 0,45 µm gözenek çaplı membranlarda daha yüksek olmuş ve maksimum akı değeri 27,9 L/m<sup>2</sup>sa olarak belirlenmiştir. Sıcaklık arttıkça da akı değerinde artış görülmüştür. PTFE membranları,

akı ve kirletici giderme verimleri bakımında PVDF membranlara göre daha iyi performans göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Doğrudan temaslı membran distilasyonu, arsenit giderimi, arsenat giderimi, hidrofobik membran



## ABSTRACT

---

### TREATABILITY OF ARSENIC IN DRINKING WATER BY MEMBRANE DISTILLATION PROCESS

Dilara YEŞİLIRMAK

Department of Environmental Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Prof. Dr. Mehmet ÇAKMAKCI

In this study, two different synthetic solution which contained that 100 µg/L and 1.000 µg/L concentrate As(III) (arsenite) and As(V) (arsenate) was prepared. Thus, the treability by membrane distillation of sollution which has different concentration has been searched. 2.500 µS/cm, 5.000 µS/cm, 10,000 µS/cm conductivity was formed by salt, 5, 10, 20 mg/L concentrate C was formed by standart COD solution; 2,5 and 5 mg/L Fe(III) was formed by FeCl<sub>3</sub> 6H<sub>2</sub>O and these were added to the solution which contained 1.000 µg/L As(III). Removal of arsenic, conductivity, iron, and TOC were researched. In addition, influence of conductivity to flux was investigated. Treatability of the prepared 12 different solution was investigated at 40 °C, 50 °C, 60 °C, 65 °C operating condition by PTFE and PVDF hydrophobic microporous membrane at 0,22 µm and 0,45 µm pore size.

In this study operated of lab-scale, arsenic was rejected efficiency of 100% rate, 100% rate of iron, 99,89% rate of conductivity, 92,5% rate of TOC were reached rejection efficiency. The formed maximum quantity of flux was 27,9 L/m<sup>2</sup>h.

At the result of the study, if the pore size increased, rise of the flux would be observed in as waited. PTFE membrane supplies treatment better than PVDF membrane. If temperature increase, vapour pressure will be increased so flux will increase.

**Keywords:** Direct contact membrane distillation, removal arsenic, arsenat giderimi, hydrophobic membrane



#### 1.1 Literatür Özeti

Nüfus ve endüstriyel faaliyetlerdeki artış sebebiyle yeterli miktarda tatlı suya ulaşım gün geçtikçe güç olmaktadır. Yeryüzünde su dağılımının her noktada eşit olmaması sebebiyle bazı yerleşimlerde su sıkıntısı da yaşanmaktadır. Ulaşılabilir su kaynakları da genellikle arıtılmaksızın kullanılabilir kalitede değildir. Bazı su kaynaklarında sadece metal bileşenleri kirletici olarak bulunabilmektedir. Arsenik hem metal ve hem de ametal özellikleri göstermekte ve su kaynaklarında bulunabilmektedir. Arsenik, yer kabuğunun yapısında doğal olarak bulunmaktadır ve yeraltı sularına doğal prosesler sonucunda karışmaktadır. Jeolojik sebeplerden dolayı yeraltı sularının arsenik ile kirlenme potansiyeli olduğu bilinmektedir. Arsenik, demir oksitlerin çözünmesi ya da desorbsiyonu ile arsenik piritlerin oksidasyonu sonucunda ortaya çıkabilir. Bazı yeraltı sularında yüksek konsantrasyonlarda arsenik bulunabilmektedir. Yeraltı sularının yoğun kullanıldığı Bangladeş'te 30 ile 70 milyon arasında insanın yüksek arsenik kirlenmesine maruz kaldığı tahmin edilmektedir. Arsenik, kanserojen (deri, akciğer, idrar yolları) ve kanserojen olmayan etkilere sebep olabilmektedir. Ayrıca, arseniğin akut ve kronik zehirlilik etkileri de belgelenmiştir.

Koagülasyon/çökelme ve filtrasyon, geliştirilmiş koagülasyon yöntemi, demir ve mangan oksidasyonu, iyon değişimi, aktif alüminyum oksit, kireçle yumuşatma işlemleri, oksidasyon, membran prosesler, granüler demir oksitler ve zeolitler arsenik giderimi için kullanılabilen proseslerdir. Konvansiyonel arıtım prosesleri genellikle arsenik giderimi için yeterli olmamaktadır. Konvansiyonel arıtma proseslerine ilave proseslerin eklenmesi ile arsenik giderimi sağlanabilmektedir. Son yıllarda arsenik gideriminde demir tuzlarının yaygın kullanıldığı görülmektedir. Demir tuzlarının kullanılması sonucunda bertaraf edilmesi gereken önemli miktarda kimyasal çamur

oluşmaktadır. Çamur oluşumu, demir tuzlarının kullanımı için önemli bir dezavantaj oluşturmaktadır. Son yıllarda membran proseslerin arsenik giderimi için kullanımında da artış görülmektedir. Genellikle yüksek basınçlarda işletilen nanofiltrasyon (NF) ile ters osmoz (RO) membranları arsenik giderimi amacıyla kullanılmaktadır. Bu tesislerde de bertaraf edilmesi gereken konsantre akımı ile yüksek enerji tüketimi söz konusudur. Distilasyon membranlarının üretimi konusundaki gelişmeler son yıllarda membran distilasyonu (MD) proseslerinin de su ve atıksu arıtımında kullanımına katkı sağlamıştır. Arsenik gideriminde de son yıllarda MD ile çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada da Doğrudan Temaslı Membran Distilasyonu (DCMD) ile arsenik giderimi araştırılmıştır.

## **1.2 Tezin Amacı**

Bu çalışmanın amacı su kaynaklarında bulunabilen arseniğin MD prosesi ile arıtılabilirliğinin araştırılmasıdır. Bu kapsamda farklı gözeneklere sahip hidrofobik membranlar kullanılmıştır.

## **1.3 Hipotez**

Membran distilasyon prosesi düşük basınç ve sıcaklıkta işletilmektedir. Isıtmanın güneş enerjisi veya atık ısı ile yapılması halinde oldukça ekonomiktir. Farklı hidrofobik membranlar MD prosesinde kullanılarak arseniğin arıtılabilirliğinin ortaya konması bu çalışmanın hipotezini oluşturmaktadır.

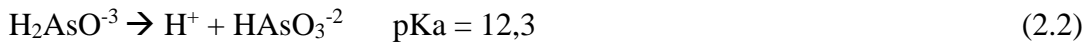
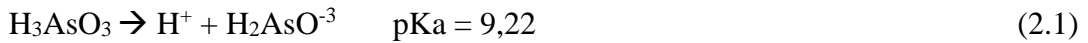
#### 1.4 Arsenik, Etkileri ve Giderilmesi

##### 1.4.1 Arsenik Kimyası

Periyodik tabloda 5A grubunda yer alan arseniğin atom numarası 33 olup, atom ağırlığı 74,91'dir. Metal-Ametal arası özellik göstermektedir. Doğada inorganik olarak genellikle arsenit (As(III)) ve arsenat (As(V)) formunda bulunmaktadır [1].

Arseniğin kimyası kompleksdir. Çünkü arsenik farklı bileşikler ve formlar oluşturabilir. Arsenik doğada +3 (arsenit), +5 (arsenat), 0 ve -3 oksidasyon basamaklarında bulunabilir [2]. Arseniğin değerliğini ve türünü suyun pH değeri, redoks potansiyeli, sülfür, demir ve kalsiyum gibi iyonların mevcudiyeti ve mikrobiyal faaliyetler etkilemektedir [3].

İnorganik arsenik yüzeysel su, yer altı suyu ve deniz suyunda baskın iken, organik arsenik türleri doğalgaz ve petrolde baskındır [3]. İndirgenmiş sularda, As(III) aşağıdaki tepkimelere göre iyonlarına ayrılmaktadır [4].



Benzer şekilde, yükseltgenmiş sularda ise As(V) aşağıda verilen tepkimelere göre iyonlaşmaktadır [4].





Muhteviyatında arsenik bulunan bileşiklerin toksisitesi nötral, üç değerlikli, beş değerlikli olmalarına, organik ve inorganik formda bulunmalarına ve fiziksel durumlarına bağlıdır. İnorganik arsenik genellikle organik arseniğe göre daha toksiktir. Ayrıca, As(III) ise nötral ve As(V)'e göre daha toksiktir [5]. Şekil 2.1'de arsenik görünümü görülmektedir [6].



Şekil 0.1 Arsenik görünümü [6]

#### 1.4.2 Arsenik Kaynakları

Arseniğin oluşumunda doğal ve antropojenik kaynaklar olmak üzere iki faktör etkin rol oynamaktadır. Jeokimyasal faktörlerle suyun içerisinde çözülmüş metal arsenik bileşikleri doğal kaynağa; böcek ilacı, zirai ilaçlar ve fosfatlı gübreler, yarı iletken endüstrileri, madencilik ve döküm sanayii, endüstriyel prosesler, kömür yakma, ahşap koruyucu vb. gibi prosesler ise arseniği oluşturan antropojenik kaynaklara örnektir. Kayalar arseniğin başlıca birikim yerleridir ve kayaların aşınması, jeotermal ve volkanik faaliyetler arseniğin birincil doğal kaynaklarıdır. Dünyada doğal aşınma sonucunda yıllık yaklaşık 40.000 ton arsenik çevreye yayılmaktadır. Bu değer, insan faaliyetleri sonucunda çevreye verilen miktarın yaklaşık iki katıdır. Yer kabuğunda en çok bulunan 20. element olan arsenik bazı mineralin yapısında ana unsur olarak da bulunmaktadır.

### 1.4.3 Yönetmelik

Amerika Birleşik Devletleri Halk Sağlığı Servisi 1942 yılında arsenik için maksimum müsaade edilebilir konsantrasyonu 50 µg/L belirlemiş ve 1992 yılında bu konsantrasyonu 10 µg/L'ye düşürmüştür [7]. 1993 yılında Dünya Sağlık Örgütü (WHO) içme sularında müsaade edilebilir arsenik konsantrasyonu sınır değerini 50 µg/L'den 10 µg/L'e düşürmüştür [8]. 2001 yılında Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (USEPA) içme suyundaki maksimum kirletici seviyesini 50 µg/L'den 10 µg/L'e revize etmiştir ve yeni müsaade edilebilir konsantrasyon 2006 yılında uygulamaya konulmuştur [9]. 17.02.2005 tarihinde resmi gazetede yayımlanan ve Sağlık Bakanlığı tarafından hazırlanan “İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik”te müsaade edilebilir maksimum arsenik konsantrasyonu Türkiye’de 10 µg/L olarak belirlenmiştir. 2008 yılında bu yönetmelik değeri Türkiye’de uygulamaya konmuştur ve TS-266 içme suyu standartlarında da müsaade edilebilir maksimum arsenik konsantrasyonu 50 µg/L'den 10 µg/L'ye düşürülmüştür. Pek çok Avrupa ülkesi içme suyunda müsaade edilebilir maksimum arsenik konsantrasyonunu 10 µg/L'ye düşürmüş olmasına rağmen Sırbistan, Hırvatistan ve Bulgaristan’da halen 50 µg/L maksimum müsaade edilebilir değer olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, Bangladeş, Hindistan, Bahrain, Bolivia, Çin, Mısır, Endonezya, Uman, Filipinler, Suudi Arabistan, Sri Lanka, Vietnam ve Zimbabve gibi gelişmekte olan ülkelerde de 50 µg/L arsenik için müsaade edilebilir sınır değeri olarak kullanılmaktadır.

### 1.4.4 Arseniğin Sağlığa Etkileri

Arsenik ile kirlenmiş suya maruz kalınması çeşitli sağlık problemlerine yol açabilmektedir. İçme suyu ve yiyeceklerde bulunan arsenik deri, akciğer, karaciğer, böbrek ve mesanede kanser riskinin artmasına sebep olmaktadır. Arseniğe maruz kalınması kardiovasküler rahatsızlıklara ve sinir sistemi fonksiyon bozukluklarına sebep olabilmektedir [10]. Bazı raporlarda arseniğin cilt kanseri, mide-bağırsak rahatsızlıkları, kas zayıflığı ve iştah kaybına sebebiyet verdiği de belirtilmektedir [11].

İnsan sağlığına arseniğin olumsuz etkileri söz konusu olmasına rağmen inorganik arsenik türleri sıtma, frengi, lösemi ve sedef hastalığı gibi rahatsızlıkların tedavisinde kullanılmaktadır. Ancak arsenik içeren bu ilaçlar kullanıldığında hastalarda deri lezyonları görülmektedir [12]. Arsenik tedavi amacı haricinde de endüstriyel, zirai, eczacılık ve farklı amaçlar için faydalı madde olarak kullanılmaktadır [13].

### 1.4.5 Sularda Arsenik

WHO, EPA, Avrupa Birliği ve İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik'te (Türkiye) içme suyunda önerilen maksimum arsenik konsantrasyonu 10 µg/L'dir. Bu maksimum konsantrasyonun geçerli olduğu ülkelerde yaklaşık 100 milyon kişi standardının üzerinde arsenik konsantrasyonuna maruz kalmaktadır. Ayrıca, Asya kıtasında bazı ülkelerde içme sularında müsaade edilen maksimum arsenik konsantrasyonu 50 µg/L'dir. Bu standardın uygulandığı ülkelerde de yaklaşık 45 milyon kişi standardın üzerinde arsenik konsantrasyonuna maruz kalmaktadır [14].

70'den fazla ülkede yapılan araştırmada, yer altı sularındaki arsenik konsantrasyonunun 0,5-5.000 µg/L aralığında olduğu raporlanmıştır [14]. Arizona'daki alüvyonlu havzanın yer altı sularındaki çözünmüş arsenik konsantrasyonunun genellikle 50 µg/L sınırını aştığı ve 1.300 µg/L'e kadar yüksek değerlere ulaşabildiği belirtilmektedir [15].

Nehir ve göllerde, kaynağa ve havzanın jeokimyasına bağlı olarak arsenik konsantrasyonu 0,15-0,45 µg/L aralığında değişmektedir [2], [10], [16]. Bazı kirlenmiş nehir sularında arsenik konsantrasyonu 0,1-2,1 µg/L aralığında değişim göstermektedir. Jeotermal girdiler, evaporasyon ve yer altı suyu kontaminasyonu nehirlerdeki arsenik konsantrasyonunun sebeplerinden biri olarak bilinmektedir. Örnek olarak, Kuzey Şili'de jeotermal girdiler sebebiyle Nao Nehri'nde yüksek konsantrasyonda arsenik (21.000 µg/L) ölçülmektedir [17]. Ayrıca, nehir sularındaki arsenik konsantrasyonunun yüksek olmasında madencilik faaliyetinin de payı vardır. Örnek olarak, Avustralya'daki Mole Nehri'nin suyu, New South Wales Madencilik ve Arsenopirit maden prosesinden dolayı yüksek konsantrasyonda (110-600 µg/L – 13.900 µg/L) arsenik içermektedir [18].

Ülkemizde İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik'te yer alan maksimum kirlenici konsantrasyon sınırını aşan bazı su kaynakları Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 0.1 Ülkemizde bazı su kaynaklarındaki arsenik konsantrasyonları [19]

Lokasyon	Arsenik Konsantrasyonu, µg/L
Emet-Kütahya (İçme suyu kaynağı)	448
Hisarcık-Kütahya (Çeşme suyu)	380
Hisarcık (Kuyu suyu)	50
Hisarcık (Yüzeysel su)	510
İğdeköy-Emet-Kütahya (Yüzeysel su)	10-20
İğdeköy-Emet-Kütahya- (Yer altı suyu)	10 – 7.754
Bigadiç-Balıkesir- (Yer altı suyu)	30-900
Eşme-Uşak (Yer altı suyu)	50

#### 1.4.6 Arseniğin Arıtım Metodları

Arsenik doğal sulara öncelikle  $H_3AsO_3$ ,  $H_2AsO_4^-$  ve  $HAsO_4^{2-}$  inorganik formları şeklinde bulunur. Oksijen veya diğer oksidanların varlığı halinde As(V) sulara baskın türü oluşturmaktadır ve As(III) yer altı sularında indirgeyici şartlarda daha yaygındır. Her iki formda yavaş redoks dönüşümlerinden dolayı çevrede genellikle birlikte bulunurlar. Su kaynaklarındaki arsenik konsantrasyonunun 10  $\mu\text{g/L}$  ve altına düşürülebilmesi için arıtmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Arıtmanın uygun prosesler ile etkili ve verimli olarak gerçekleştirilmesi önemlidir [20]. Arsenik; koagülasyon, çöktürme ve filtrasyon ile 95%; kireçle yumuşatma ile pH 10,5'te >90%; iyon değiştirme ile 95%; ters osmoz ile >95% ve aktif alümin ile 95% oranında giderilebilmektedir [21]. Arsenik giderimi için oksidasyon, granüler demir oksitler, zeolitler vb. arıtım yöntemleri de kullanılmaktadır.

Demir ve mangan oksidasyonu esnasında arsenikte oksitlenerek sudan giderilebilmektedir. Demir ve mangan oksidasyonu, düşük maliyetli arsenik arıtma uygulamaları için kullanılabilir. Bunun için havalandırma ve filtrasyon yeterli olmaktadır. Eğer içme suyundan arsenik etkili bir biçimde gideriliyor ise demir ve manganında giderildiği düşünülmektedir [22].

Kuyularda (ham suda) bulunan demir ve arsenik konsantrasyonlarına bağlı olarak arsenik giderim için kimyasal madde ilavesi yapılmayabilir. Su, bir kaskat havalandırma sisteminden geçirildikten sonra filtre edilir. Arsenik giderim verimi, demir konsantrasyonu arttıkça artmaktadır [22].

Koagülasyon, çökelme ve filtrasyon kombinasyonu arsenik giderimi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Metal tuzları ile arsenik koagülasyonu 1934 yılından beri uygulanmaktadır. En yaygın olarak kullanılan metal tuzları alüminyum tuzu olan alum ve demir tuzlarından demir klorürdür. Hem alumun hem de demir klorürün optimal koşullar altında arseniği etkin bir şekilde giderebilmektedir. Bu optimal koşullar koagülantın türüne göre değişiklik göstermektedir. Demir klorürle ( $FeCl_3$ ) uygulanan koagülasyonda pH'nın 8'in altında olması verimlilik açısından önemlidir. Alum ise daha düşük pH Aralıklarında (7-8 arası) iyi sonuç vermektedir. Genel olarak koagülant dozunun artırılması daha yüksek giderme verimine ulaşılmasında önemlidir. Demir klorür ve alumun arsenik giderimindeki tipik dozları 5-30 mg/L ve 10-50 mg/L arasındadır. Demir klorürün alumden daha iyi giderim sağlamaktadır [22].

Demir klorür ve alum, As(V) gideriminde başarılı olurken, özellikle alum kullanıldığında As(III)'in giderim veriminin As(V)'e kıyasla daha az olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle giderim öncesi bir ön oksidasyona ihtiyaç duyulmaktadır. Demir klorür'ün, As(III)'ü alümandan daha etkili biçimde gidermesinin nedeni, demir klorürün As(III)'ü As(V)'e oksitlemesi ve oluşan As(V)'in koagülasyonla gidermesidir [22].

Özellikle filtrasyon aşaması, As(V)'in giderimi açısından çok önemlidir. Koagülasyon sonrası çöktürme ile 30% oranında As(V) giderimi söz konusu iken, 1 mikron filtrasyon sonrasında bu oran 96%'lara çıkmaktadır [22].

Mevcut olan koagülasyon yönteminin koagülasyon dozunun artırılması ya da pH'nın azaltılması ile arsenik giderim verimi artırılabilir. Bu işlem genellikle gelişmiş koagülasyon olarak adlandırılmaktadır. Bazı çalışmalarda, alum ve demir klorür koagülantlarının dozları 10'dan 30 mg/L'ye ve pH'da 7'den 5,5'e kadar düşürülerek aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir [22]:

- As(V) giderimi demir klorür ile kolay bir şekilde tüm şartlar altında 90% verime ulaşabilmektedir.
- Demir tuzlarının kullanımı ile alum kullanımına göre daha yüksek verim elde edilmiştir.
- Düşük pH'larda alum ile arsenik giderimi arttırılmıştır.

Aktif alum ile arıtım yöntemi içme suyundaki iyonların oksitlenmiş aktif alum yüzeyi üzerinde giderilmesini temel alan bir fiziko-kimyasal prosestir. Proses içindeki iyon değişimleri reaksiyonlarına rağmen, aktif alum ile giderim bir adsorbsiyon prosesi olarak tanımlanmaktadır. Aktif alum, As(V) giderimi için daha etkilidir. pH, rekabet halindeki iyonlar, arsenik oksidasyon kademesi ve temas süresi gibi faktörler, aktif alum ile arsenik giderimi üzerinde belirleyici etkilere sahiptir. En yüksek arsenik giderimi pH 6 civarında elde edilirken ve pH 6'nın üstündeki değerlerde arsenik giderim verimi azalmıştır [22].

Kireçle yumuşatma arsenik giderimi için etkili olan bir diğer konvansiyonel arıtma prosesidir. pH 10,5-12 arasında As(V)'in gideriminde etkin bir prosestir. Suyu eklenen kireç pH'ı arttırmakta ve karbonat dengesini değiştirmektedir. pH arttıkça, bikarbonat karbonata dönüşmekte ve kalsiyum karbonat olarak çökmektedir. Fazla kireç kalsiyum karbonatın çökme noktasından sonra magnezyumun giderimi için eklenmektedir.

As(V) giderimi kalsiyum karbonat, magnezyum hidroksit ve demir hidroksit oluşumu ile arttırılmaktadır. Ayrıca, demir ilavesi As(V) giderimini arttırmaktadır [22].

Granüler demir hidroksit, özellikle doğal sulardan seçici arsenik giderimi için keşfedilen bir adsorban maddedir. Amorf demir hidroksit üzerinde tüm arsenik türlerinin adsorpsiyonu için yapılan çalışmalarda bu maddenin aktif alüminyum okside göre 5 ila 10 kat daha verimli olduğu belirlenmiştir. Sabit filtre yatak sistemlerinde granüler aktif demir oksit ya da demir hidroksitin sudan arsenik adsorpsiyon kapasitesi aktif alüminyum okside göre daha yüksektir [22].

Doğal zeolitlerle giderimi üzerinde de çalışmalar yapılmış ve klinoptinolit ve chabazit ile büyük oranda arsenit ve arsenat giderimi elde edilmiştir. 1 mg/L konsantrasyonundaki arsenik, 235 yatak hacmi kapasitesi kadar su arıtımına kadar giderilebilmektedir [22].

Arseniğin etkin bir şekilde gideriminde bazı iyon değişimi reçineleri son yıllarda kullanılmaktadır. Anyon türlerinin gideriminde kullanılan kuvvetli baz formundaki anyon değişim reçineleri, arsenik gideriminde tercih edilen bir metottur. Bu reçine sadece pH 2,2'nin üzerinde negatif yüklü As(V) türünün giderilmesinde kullanılmaktadır. Ancak As(III)'ün pH 9,2'nin altındaki çözeltide yüksüz formda bulunmasından dolayı reçine tarafından giderimi söz konusu değildir [22].

Membran filtrasyonu yöntemi, sudaki birçok kirleticinin giderilmesinde kullanılan, güvenilirliği, ulaşılabilirliği, kurulum ve işletim kolaylığı gibi nedenlerle son yıllarda su arıtımı konusundaki yönetmeliklere ve standartlara cevap verebilecek yeni bir teknolojidir.

Basınçlı membran filtrasyonları basınç büyüklüğüne göre iki kategoride incelenmektedir: RO ve NF gibi yüksek basınçlı membranlar, mikrofiltrasyon (MF) ve ultrafiltrasyon (UF) gibi düşük basınçlı membranlardır. Yüksek basınçlı membranlar düşük basınçlı membranlara göre daha küçük gözenek büyüklüğüne sahip olduğundan ve bu gözeneklerden akışkanın geçebilmesi için daha fazla basınç gerektiğinden daha yüksek bir enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Yüksek basınçlı membranlar 10 bar'dan 60 bar'a kadar basınç ile işletilebilmektedir. RO ve NF gibi yüksek basınçlı membranlar çözünmüş arseniğin giderimi için uygun gözenek büyüklüğüne sahiptirler [22].

MD sıcaklık sürücü kuvveti ile işletilen bir membran proses türüdür. Sıcaklık sebebiyle oluşan buhar hidrofobik mikro gözenekli MD membranından geçmektedir. Isı izalatörü

ve fiziksel bariyer gibi her iki görevi de yapan hidrofobik membran, membran boyunca buharın serbest taşınımına olanak sağlar ve sıvı ile katı fazın membran boyunca geçişini önlemektedir. Arsenik gideriminde de MD kullanılmaktadır. As(III) ve As(V) gideriminde oldukça etkili bir prosestir. MD’de prensip olarak uçucu olmayan bileşikler (arsenik vb.) besleme tarafında tutulurken sadece su buharı ve uçucu bileşikler membrandan geçmektedir. MD ile 95% ve üzerinde giderim verimleri elde edilmiştir.



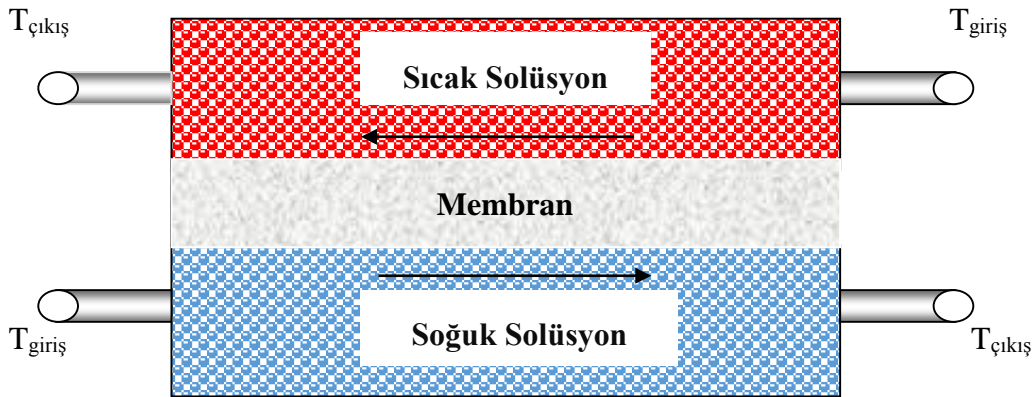
## 1.5 Membran Distilasyonu

MD, sürücü kuvvetin ‘sıcaklık farkı’ ile işletildiği bir membran ayırma prosesidir. Sıcaklık farkı ile oluşan buhar hidrofobik mikro gözenekli membrandan geçmektedir. Membrana beslenen sıvının, membranın bir yüzeyinde direkt temas etmesi ve oluşan buharların membran gözeneklerine nüfuz etmesi gereklidir. Membranın hidrofobik yapısı sıvının porlardan girişini önlemektedir [23].

MD prosesinde kullanılan hidrofobik mikro gözenekli membranlar genellikle politetrafloroetilen (PTFE veya teflon), polipropilen (PP) veya polivinidil florit (PVDF)’den üretilmektedir. MD proseslerinde membran boyunca ısı kaybını önlemek için membranın termal iletkenliğinin düşük olması gerekmektedir. Ayrıca membranın termal stabilitesinin aşırı sıcaklıklara, asit ve baz gibi kimyasallara karşı dirençli olması gerekmektedir [23].

### 1.5.1 Doğrudan Temaslı Membran Distilasyonu (DCMD)

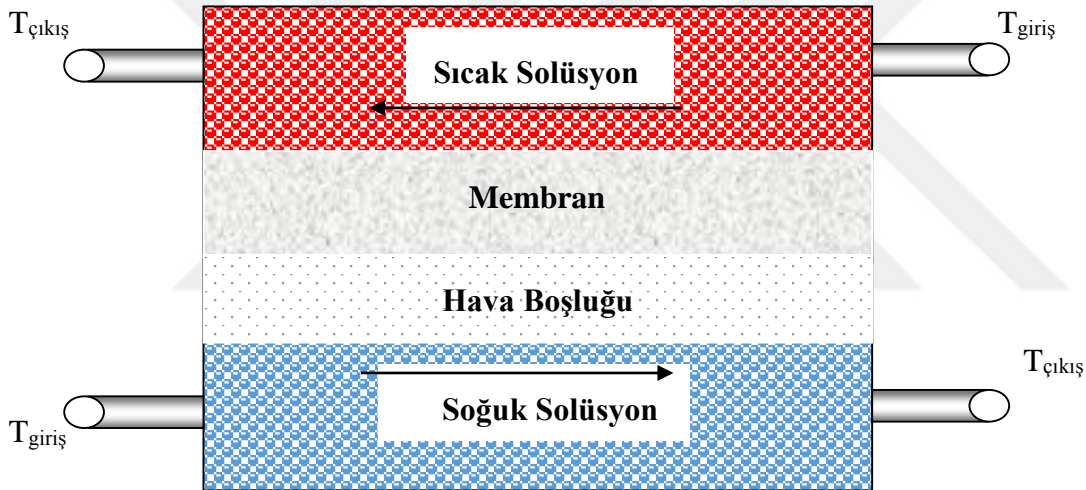
DCMD’de, membranın bir tarafına buharlaşan sıcak su ve diğer tarafına da buharın yoğunlaşmasını sağlayan soğutma suyu direkt temas etmektedir. Bu konfigürasyonda (Şekil 2.2) sıcak çözelti (besleme suyu) membran yüzeyiyle direkt temas etmektedir. Bundan dolayı buharlaşma, hidrofobik membran yüzeyinde gerçekleşmektedir. Buhar, membran boyunca basınç farkından dolayı süzüntü tarafına taşınır ve membran modülü içinde yoğuşur. Hidrofobik özelliğinden dolayı beslenen su membran gözeneklerinden geçmez. DCMD, en basit MD konfigürasyonudur; tuzsuzlaştırma, gıda ve ağır metal sanayi gibi birçok alanda kullanılmaktadır [24], [25], [26]. Bu dizaynda iletimden kaynaklanan sıcaklık kaybı başlıca sorundur.



Şekil 0.2 Doğrudan Temaslı Membran Distilasyonu

### 1.5.2 Hava Boşluklu Membran Distilasyonu (AGMD)

Membran modülü, membran ve yoğunlaşma yüzeyi ya da membran modülü dahilindeki plaka arasında durgun hava boşluğu içermektedir (Şekil 2.3). Soğuk yüzey ve besleme solüsyonu arasındaki sıcaklık farkı, membranın besleme yüzeyinde itici gücü oluşturmaktadır. Membrandan geçen buhar, soğuk hava akımının geçtiği yüzeye temas ederek yoğunlaşmaktadır. MD prosesinin verimini artıran membran modülü içerisindeki hava boşluğu, membran boyunca ısı kaybını doğrudan temas olmaması sebebiyle azaltmaktadır. Süzüntü akısı, çözülmüş madde konsantrasyonunun artmasıyla su buhar basıncında azalma sebebiyle azalmaktadır. Besleme suyunda tuzluluğun artması membran yüzeyinde ek konsantrasyon sınır tabakasının gelişmesiyle membran boyunca kütle transferine ayrı direnç oluşturabilir. Sıcaklık polarizasyon etkisine nazaran konsantrasyon polarizasyonunun etkisi daha azdır [27], [28], [29], [30].

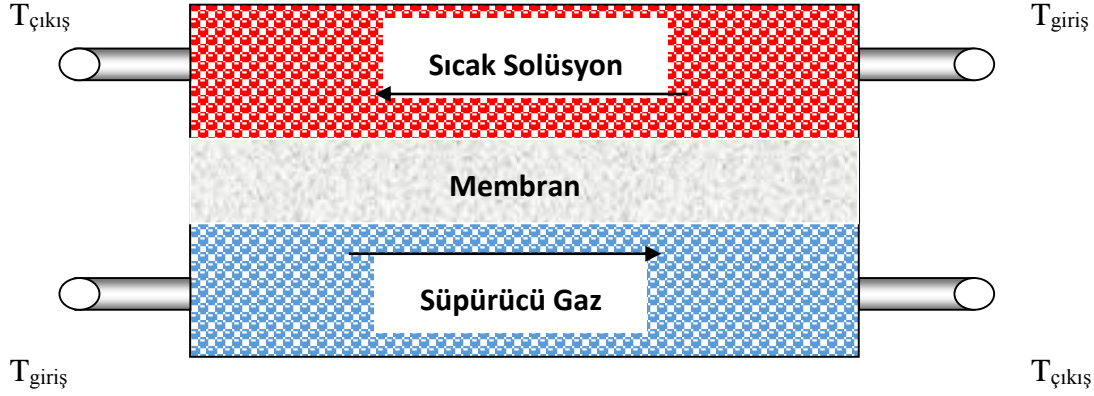


Şekil 0.3 Hava Boşluklu Membran Distilasyonu (AGMD)

### 1.5.3 Gaz Süpürücülü Membran Distilasyonu (SGMD)

Sıcaklık farkı sebebiyle oluşan buhar hidrofobik mikro gözenekli membrandan geçmekte ve geçen buhar membranın süzüntü kısmında bulunan inert gaz tarafından membran dışında yoğunlaştırma alanına taşınır (Şekil 2.4). Bu MD konfigürasyonu Gaz Süpürücülü Membran Distilasyonu (SGMD) olarak adlandırılmaktadır. AGMD'ye benzer, sıcaklık kaybını azaltır, ama sabit değildir ve kütle transfer katsayısını artıran bir gaz bariyeri vardır. Bu konfigürasyonun başlıca dezavantajı süpürücü gaz hacminin fazla ve süzüntü hacminin az olması sebebiyle geniş yoğunlaştırıcı gereksinimidir. Termostatik Gaz Süpürücülü Membran Distilasyonu (TGSM) olarak adlandırılan bir proseste AGMD ve SGMD birleştirilebilir. Bu

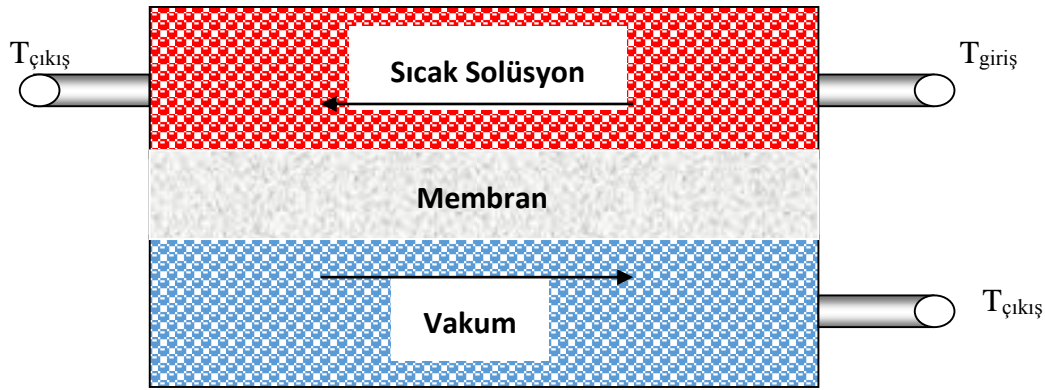
durumda inert gaz membran ve yoğuşma yüzeyi arasındaki boşluktan geçirilir. Buhar kısmı yoğuşma yüzeyinde ve geriye kalanı ise membran hücresi dışında harici yoğunlaştırıcıda yoğuşur [29].



Şekil 0.4 Gaz Süpürücü Membran Distilasyonu (SGMD)

#### 1.5.4 Vakum Membran Distilasyonu (VMD)

VMD konfigürasyonunda, ısı farkı sebebiyle oluşan buharın hidrofobik mikrogözenekli membrandan geçmekte ve süzüntü kısmında ise uygulanan vakumla çekilerek membran modülü dışında yoğunlaştırılmaktadır (Şekil 2.5) Uygulanan vakum basıncı uçucu moleküllerin doygunluk basıncından daha düşüktür. İletkenlikten kaynaklanan sıcaklık kaybının olmaması avantaj olarak düşünölmektedir [31], [32], [33].



Şekil 0.5 Vakum Membran Distilasyonu (VMD)

## 1.6 Membran Distilasyonunu Etkileyen İşletme Parametreleri

### 1.6.1 Besleme Sıcaklığı

Besleme sıcaklığının süzüntü akısı üzerindeki etkisi, farklı MD konfigürasyonları için ayrıntılı olarak araştırılmıştır. Diğer MD parametreleri sabit tutularak besleme sıcaklığı 20 ile 80 °C arasında (beslenen çözeltisi sıcaklığı kaynama sıcaklığının altında) değiştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda besleme sıcaklığının artmasıyla MD akısında eksponansiyel bir artış gözlemlenmiştir. Transmembran buhar basıncının eksponansiyel artışı, akıyı artırmıştır. Ancak, uçucu bileşen içeren bir çözelti ile çalışıldığında, besleme sıcaklığı ile süzüntü akısının eksponansiyel artışı gerçekleşmeyebilir [23]. MD sistemlerinde, sıvının sirkülasyon hızına bağlı olarak hamsuyun giriş sıcaklığı çıkış sıcaklığından farklıdır. Bu sebeple, lokal bir sıcaklık polarizasyon katsayı değerinin sistem için uyarlanması gereklidir [23].

### 1.6.2 Besleme Konsantrasyonu

Beslenen sıvı konsantrasyonunun transmembran akısı üzerindeki etkisi, ayırma prosesine bağlıdır. Yüksek konsantrasyonlu çözeltilerin arıtımında basınç sürücülü membran proseslerinde akıda gözlemlenen yüksek düşüş MD proseslerinde görülmemektedir [31], [33], [34], [35]. Uçucu olmayan çözeltiler dikkate alındığında, besleme konsantrasyonunun en büyük etkisi tüm MD konfigürasyonlarında süzüntü akısının azalması şeklindedir. Dolayısıyla suya uçucu olmayan çözümlerin ilavesi kısmi buhar basıncını düşürür ve sonuç olarak konfigürasyondaki itici güç azalmış olur. Konsantrasyon polarizasyonu sonucu besleme tarafındaki membran yüzeyinde birikim sonucu kek tabakası oluşabilir. Kek tabakasının etkisi sıcaklık polarizasyonu ile karşılaştırıldığında çok daha küçüktür. Diğer yandan, alkol gibi uçucu bileşenler içeren çözeltiler hesaba katıldığından, artan çözünen konsantrasyonun etkisi uçucu bileşenlerin termodinamik özelliklerine ve su ile etkileşimine bağlı olarak değişmektedir. Genellikle bu gibi durumlarda, uçucu bileşen konsantrasyonunun artması süzüntü akısında da artışa sebep olmaktadır. Bu durum, uçucu bileşenlerin besleme tarafındaki konsantrasyonlarına bağlı olarak transmembran kısmi basıncının artışına dayandırılmaktadır. Böyle bir durumda, membranın gözeneklerinin ıslanmasından kaçınmak için dikkatli olunmalıdır. Burada dikkat edilmesi gereken bir diğer konu, tuz gibi uçucu olmayan içeriğin, çözeltinin buhar basıncını değiştirebilir olmasıdır. Örneğin su-alkol karışımında tuz ilavesi, buhar basınç oranını değiştirebilir ve MD'nin seçiciliğini artırır [23].

### 1.6.3 Beslemenin Sirkülasyon Hızı ve Karıştırma Oranı

Beslemenin sirkülasyon hızı ve karıştırma oranı, besleme tarafındaki membran modülünün ısı transfer katsayısını artırma, sıcaklık ve konsantrasyon polarizasyon etkilerini azaltmada etkilidir. Bazı MD sistemlerinde besleme sirkülasyon hızı ve karıştırma oranı ile MD akısının arttığı ve daha yüksek besleme debilerinde parabolik artış meydana geldiği görülmüştür. Bununla birlikte, bazı çalışmalarda besleme sirkülasyon hızının artışı ile MD akısının lineer olarak arttığı görülmüştür. Daha yüksek bir verimlilik için daha fazla karıştırma ya da daha yüksek sirkülasyon hızı ile türbülanslı akım rejiminin sağlanması ve işletmenin bu şartlar altında olması gerekmektedir [23].

DCMD, AGMD ve VMD konfigürasyonlarında süzüntü akısı besleme debisiyle artış gösterirken (bazı durumlarda parabolik artış meydana gelebilir) besleme debisinin SGMD akısı üzerindeki etkisi neredeyse ihmal edilebilir seviyededir( uçucu olmayan çözünmüş maddeler besleme solüsyonunda bulunduğu) [36], [37], [38].

Membran modülü boyunca (L) gerçekleşen basınç düşmesi sıvının hızının karesiyle orantılı iken Reynolds sayısı ( $Re_N$ ) ile sıvının hızı (u) arasında lineer bir ilişki vardır [23].

$$Re_N = \frac{u \, d \, \rho}{\mu} \quad (2.6)$$

$$\Delta P = f \frac{l}{d} \rho \frac{u^2}{2} \quad (2.7)$$

dv: akış kanalının hidrolik çapı

f : sürtünme katsayısı

$\rho$  : sıvının yoğunluğu

$\mu$  : dinamik viskozite

### 1.6.4 Süzüntünün Giriş Sıcaklığı

DCMD uygulamalarında süzüntü sıcaklığının azalması ile süzüntü akısını artırdığı fakat AGMD prosesinde süzüntü sıcaklığının dikkate değer bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir [28], [34]. Bu konfigürasyonda, hava boşluğundaki ısı transfer katsayısı, (bir uçtan bir uca) DCMD ısı transfer katsayısına göre baskındır. Bundan dolayı süzüntü sıcaklığındaki değişikliklerin AGMD akısı üzerinde kayda değer bir etkisi olmadığı belirlenmiştir.

SGMD konfigürasyonunda da durum aynıdır. Süzüntü tarafındaki süpürücü gazın sıcaklığı membran modülünün çıkışına doğru hızla artar ve süzüntü akısındaki etkisi ihmal edilebilir

ölçüdedir. Sonuç olarak, daha fazla MD akısı için, süzüntü tarafındaki sıcaklığı sabit tutulması ve besleme tarafındaki sıcaklığının artırılması önerilmektedir [23].

Daha önce de belirtildiği üzere, süzüntü sıcaklığı; membran modülü boyunca özellikle giriş ve çıkış hava sıcaklıkları farkının yaklaşık olarak 20 °C olduğu SGMD konfigürasyonunda artmaktadır [39]. Bu değişim sıvı tipine, sürücü kuvveti ile transmembran akısını etkileyen akış hızına bağlıdır [36]. SGMD konfigürasyonunda bu problemin üstesinden gelmek için, süzüntü tarafına süpürücü gazın sıcaklığını korumak ve sürücü kuvveti membran modülü boyunca mümkün olduğu kadar sabit tutmak için süzüntü ile soğuk hava arasına ayırım tabakası yerleştirilir [39], [40].

### **1.6.5 Sıcaklık Farkı ve Ortalama Sıcaklık Etkisi**

Membran distilasyon prosesinde sürücü kuvvet olan transmembran buhar basıncı, DCMD, AGMD ve SGMD konfigürasyonlarında membran modülünün besleme ve süzüntü tarafları arasındaki sıcaklık farkı sebebiyle oluşmaktadır. Süzüntü akısı, sıcaklık farkıyla lineer olarak artış gösterebilmektedir [31], [41], [42].

Arrhenius bağıntısı deneysel verilere oldukça uygunluk göstermektedir. Benzer sonuçlar AGMD modülleri üzerinde yapılan çalışmalarda da görülmektedir. Bununla beraber SGMD modülleri üzerindeki çalışmalarda farklı bir eğilim gözlemlenmiştir. Transmembran akısının, sıcaklık farkının artmasıyla doğrusal bir şekilde arttığı görülmüştür. Bu eğilim sıcaklık ve konsantrasyon polarizasyon etkisiyle ilgili olabilir [33], [43].

Sıcaklık ve konsantrasyon polarizasyon etkisi azaltılarak süzüntü hızı artırılabilir. Süzüntü tarafında ısı transfer katsayısı arttığında membran yüzeyindeki sıcaklık, süzüntü tarafındaki sıcaklığa yaklaşır ve bu durum akının azalmasına sebep olur.

SGMD konfigürasyonunda; uçucu olmayan bileşenler besleme sıvısında bulunduğu anda, sıcaklık polarizasyonu süzüntü tarafında lokalize olur ve optimum bir süzüntü akış hızı oluşur. Bunun üzerindeki hız negatif etkide bulunabilir ya da akıyı düşürür. Bundan dolayı SGMD'deki gaz akışı maksimum su transmembran akısını sağlamak için optimize edilmelidir. Bu sonuç süzüntü basıncındaki artışa bağlanmıştır. Aslında gaz akışı, transmembran hidrostatik basıncı besleme sıvısının giriş basıncından (LEP) az olmalıdır ve süzüntü basıncı besleme tarafındaki basınçtan az olmalıdır [23].

### 1.6.6 Buhar Basıncı Farkı

Daha öncede belirtildiği üzere, MD prosesinde sürücü kuvvet, membranın iki tarafı arasındaki buhar basınç farkıdır. Bu, sıcaklık farkıyla ya da membran modülünün süzüntü tarafına vakum uygulanarak sağlanabilir. Transmembran buhar basıncının süzüntü akısı üzerindeki etkisi aşıkardır [44].

Sıcaklık ve konsantrasyon polarizasyonunun süzüntü akısındaki etkisinden dolayı, süzüntü akısıyla buhar/basınç farkı arasında lineer olmayan bir ilişki de gözlemlenmiştir. VMD konfigürasyonunda hem süzüntü akısı hem de transmembran hidrostatik basıncı, süzüntü tarafına uygulanan vakum basıncının azalması ile artıyorsa membran gözeneklerinin ıslanma ihtimali çok yüksektir. Besleme sıvısında uçucu organik bileşenler bulunduğunda daha yüksek bir buhar basıncı oluşabilir ve sonuçta yüksek akı elde edilebilir. Ancak; bu durum prosesin daha zayıf bir ayırma faktörüne sahip olmasına sebep olabilir [33], [44]; [45].

### 1.7 Kütle Transferi

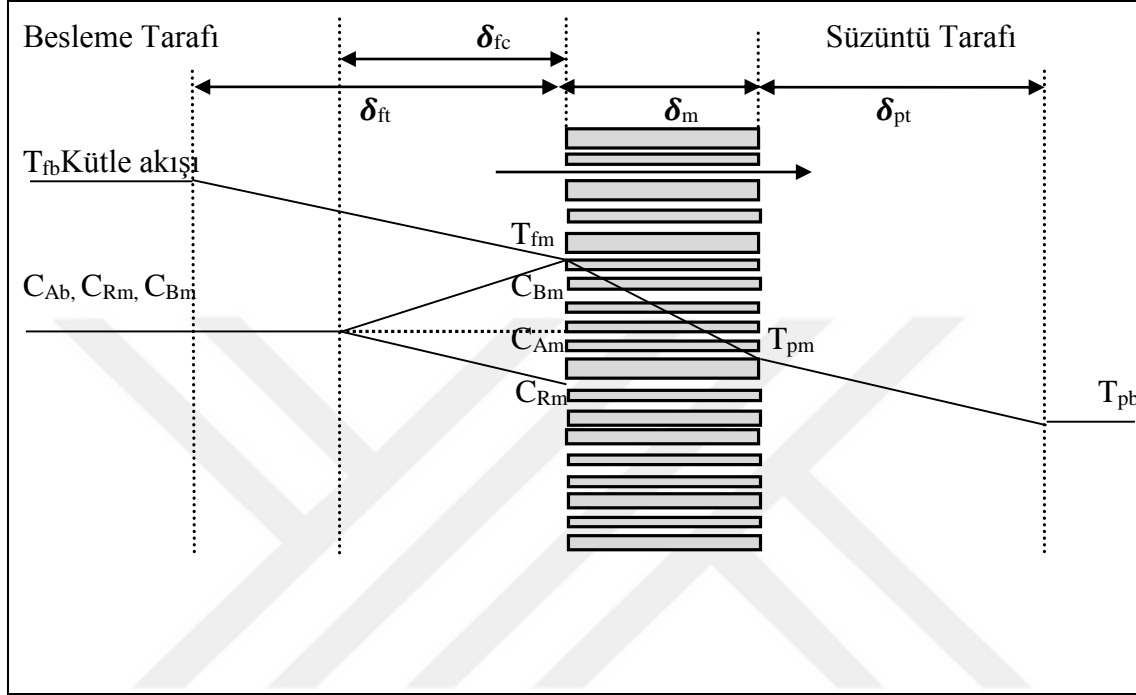
Besleme suyundaki çözünen maddelerin uçuculuğuna bağlı olarak kütle transferi Şekil 2.6'da görülmektedir. Uçucu türlerin kütle transferi [23];

- Membran yüzeyine kütle beslemesiyle
- Membran gözeneklerinden gaz (buhar) geçişiyle
- Membran yüzeyinden süzüntü tarafına kütle geçişi ile gerçekleşir.

Besleme tarafında sadece tek bir uçucu bileşen dikkate alındığında, konsantrasyon gradyanı pek oluşmaz. Bu durumda ( $C_{Ab} = C_{Am}$ ) sıcaklık polarizasyon daha etkilidir. Besleme çözeltisinde birden fazla bileşen varlığında hem konsantrasyon hem de sıcaklık gradyanı eş zamanlı bir şekilde oluşabilir. İlk olarak sıvılarda, uçucu olmayan çözünenlerin membran yüzeyindeki konsantrasyonları ( $C_{Bm}$ ) ayırma prosesi gerçekleştiği sürece kütle beslemesindekinden ( $C_{Bb}$ ) daha yüksek hale gelir. Ayırma hemen hemen 100% düzeyinde gözlemlenir. Bu durumda membran prosesinin verimini etkileyen aşırı doyma durumu başarılabilir [23].

Membran yüzeyinde artan uçucu olmayan bileşen konsantrasyonu, transmembran akısında azalmaya sebep olabilir. Bu durum besleme tarafında uçucu molekül türlerine karşı kütle transfer direnci gibi davranan konsantrasyon polarizasyon tabakasının ( $\delta_{f0}$ ) kalınlığından kaynaklanır [23].

MD proseslerinde amaç besleme tarafındaki uçucuların buhar halinde membrandan geçmesinin sağlanmasıdır. Diğer taraftan uçucu olmayan çözünmüş ve katı maddelerin membran tarafından alıkonulmasıdır. Şekil 2.6'da bileşenin sınır tabakası ( $\delta_{fc}$ ) boyunca konsantrasyonunu göstermektedir (bileşenin kütle besleme fazındaki konsantrasyonundan ( $C_{Rb}$ ), membran yüzeyindeki konsantrasyonuna ( $C_{Rm}$ ) doğru) [23].



$T_{fm}$  : Besleme tarafındaki membran yüzey sıcaklığı;  $T_{pm}$  : Süzüntü tarafındaki membran yüzey sıcaklığı;  $T_{fb}$ : Besleme tarafındaki sıvının sıcaklığı;  $T_{pb}$ : Süzüntü tarafındaki sıvının sıcaklığı

Şekil 0.6 MD'da sıcaklık ve konsantrasyon polarizasyonu

### 1.7.1 Membran Gözenekleri Aracılığıyla Kütle Transferi

MD prosesinde kütle transferi membranın her iki tarafında da bulunan buhar basınç gradyeni ile olmaktadır. Kütle transferi mekanizması üç temel mekanizma üzerine kuruludur: Knudsen-difüzyon (k), Poiseuille-akış (P) ve moleküler difüzyon (M) ya da bu mekanizmaların kombinasyonlarıdır.

Kütle transfer prosesinde etkin mekanizma dikkate alınmaksızın, molar akı (N) aşağıdaki denklemlerle hesaplanabilir.

$$N = C [P_{fm}(T_{fm}) - P_{pm}(T_{pm})] \quad (2.8)$$

C: Membran distilasyon katsayısı (deneysel olarak saptanabilir)

$P_{fm}(T_{fm})$ : Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak besleme buhar basıncı (membran yüzeyinde)

$P_{pm}(T_{pm})$ : Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak süzüntü buhar basıncı (membran yüzeyinde)

MD katsayısı, C, hem işletme koşullarının hem membran yapısının bir fonksiyonudur. MD konfigürasyonu, Knudson sayısı ( $K_n$ ) kadar önemlidir.  $K_n$ , membran porları arasında transfer olan gaz moleküllerinin ortalama yolunun ortalama membran gözenek çapına(d) oranıdır. Aslında  $K_n$  sayısı, membran gözenekleri arasından geçen akışın fiziksel durumuna karar verir. Bununla birlikte, MD'de kullanılan membranlar gözenek büyüklüğünde farklılık gösterdiklerinden membran gözenekleri arasında birden fazla mekanizma meydana gelebilir [23].

### 1.8 Sıcaklık Transferi

MD mekanizması hem ısı hem de kütlenin eş zamanlı taşınımını gerektirmektedir. Bütün MD konfigürasyonlarında ısı transfer durumu çok önemlidir. Isı transferi dört adımda gerçekleşmektedir [23].

- Membran modülünün besleme tarafında sıcaklık sınır tabakasına karşı besleme çözeltisinden membran yüzeyine ısı transferi
- MD'de iletim yoluyla hem membran matrisi hem de gazla dolmuş gözeneklerde dikkate değer ısı kayıpları ile ısı transferi
- Buhar gizli ısıyla birleşmiş ve bundan dolayı membran porları boyunca kütle transferi (MD'de yeterli ısı mevcudiyeti)
- Membran yüzeyinden süzüntüye doğru sıcaklık sınır tabakasında sıcaklık polarizasyonu ile ısı transferi

Isı transferi, sıcaklığın yüksek olduğu alandan daha düşük olduğu alana doğru gerçekleşir. Isı transfer sınır tabakası membran yüzeyinde şekillenir, ısı transferine direnç uygular. Sıvı/membran arayüzeyinde uygulanan kütle fazdan daha düşük sıcaklık farkı oluşur. Bu kütle transferi sürücü kuvveti olumsuz yönde etkiler. MD prosesinde düşük akımın asıl sebeplerinden biri sıcaklık polarizasyonudur. Sıcaklık polarizasyon etkisiyle 80%'den fazla sürücü kuvvette azalma gözlemlenebilir. Sıcaklık polarizasyon katsayısı (TPC), kütle sıcaklık farkında transmembran sıcaklık fraksiyonu olarak tanımlanmıştır [23].

$$TPC = \frac{T_{fm} - T_{pm}}{T_{fb} - T_{pb}} \quad (2.9)$$

$T_{fm}$ ,  $T_{pm}$ ,  $T_{fb}$ ,  $T_{pb}$  besleme ve süzüntü tarafında sırasıyla membran yüzey sıcaklıkları ve sıvı kütleli sıcaklıklardır. MD'de sıcaklık polarizasyon şematik diyagramı Şekil 2.6'da görülmektedir. Sıcaklık polarizasyon etkisinden dolayı iyileştirilmiş termal besleme sınır tabakası kalınlığı  $\delta_f$  olan besleme membran yüzeyinde besleme sıcaklığı  $T_{fm}$  kütleli besleme sıcaklığı  $T_{fb}$ 'e karşı kademeli olarak azalır. Benzer bir şekilde süzüntü tarafında (uygulanmamış VMD konfigürasyonu) iyileştirilmiş sıcaklık sınır tabakası kalınlığı ( $\delta_{pt}$ )'den dolayı membran yüzeyindeki sıcaklık ( $T_{pm}$ ), süzüntüdekinden daha yüksektir. Hem besleme hem de süzüntü sıcaklık sınır tabakası hidrodinamik şartlar kadar, sıvı özellikleri ve işletme şartlarının fonksiyonudur. Sıcaklık polarizasyon etkisini büyük ölçüde azaltmak için optimum şartlarda MD işletilmelidir. Membranın düzenlenmesiyle veya birbirine geçmiş ara levhaya benzer hava boşlukları desteği uygulanması ile debi geçiş dizaynı geliştirilerek sıcaklık ve kütle transferinin artması başarılabilir. Daha iyi karıştırma şartlarını başarmak ve sıcaklık polarizasyon etkisini minimize etmek için araştırmacılar genellikle yüksek akış hızında işletim seçeneğini tercih etmektedir. Özellikle maksimum gözenekli membranlar ve organik sulu çözeltiler kullanıldığı zaman membranda gözenek ıslanmasından kaçınmak için membran modülü boyunca düşük basınç kayıplarının dikkate alınması gereklidir [23].

Beslenen ısı akışı ( $q_f$ ) sınır tabakası sıcaklık transfer katsayısına ( $h_f$ ) bağlıdır ve besleme yığını ve membran yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı çevresel etkiler gözardı edilirse aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir [23]:

$$q_f = h_f (T_{fb} - T_{fm}) \quad (2.10)$$

Daha yüksek besleme sıcaklığı genellikle transmembran akısında eksponansiyel artışa neden olmasına rağmen, sıcaklık polarizasyon etkisi besleme sıcaklığı ile artar [39], [46], [47].

## 1.9 MD Prosesini Etkileyen Membran Parametreleri

MD prosesinde genellikle hidrofobik mikrofiltrasyon membranları kullanılmaktadır. Bu membranlarda çoğunlukla PP, PVDF ve PTFE kullanılarak imal edilmektedir. Hollow fiber veya düz levha şeklinde üretilmektedir.

Membran kalınlığı, porozitesi, gözenek boyutu, gözenek eğriliği, yüzey kimyası ve modül geometrisi gibi membran parametreleri MD sistemini etkilemektedir.

MD proseslerinde transmembran akısı ve farklı membran karakteristik parametreleri arasındaki ilişki aşağıdaki denklemde görülmektedir.

$$N\alpha(r^a\epsilon)/(\delta_m\tau) \quad (2.11)$$

( $\alpha$  : Doğru orantılı olduğunu gösterir sembol)

N molar akı, r membran gözeneklerinin ortalama gözenek boyutu, a Knudson difüzyonu ve viskoz akışlar için 1 veya 2'e denk olan faktör,  $\delta_m$  membran kalınlığı ve  $\tau$  ise membran eğriliğidir.

### 1.9.1 Membran Kalınlığı

MD'de süzüntü akısı membran kalınlığıyla ters orantılıdır. Membran kalınlığı kütle transferine direnç oluşturmada önemli bir rol oynamaktadır. Yüksek MD süzüntü eldesi için, membran olabildiğince ince olmalıdır. Bunun tersine, MD'de membran matrisi boyunca iletim ile sıcaklık kaybı olduğundan daha iyi sıcaklık verimini başarmak için membran olabildiğince kalın olmalıdır. Bilgisayar simülasyon programı yardımıyla ticari membranların termal iletkenliği göz önüne alındığında tahmin edilen optimum kalınlık 30-60  $\mu\text{m}$  aralığında bulunmuştur [43]. DCMD'de çok ince tabakalı hidrofobik katmanlı gözenekli kompozit hidrofobik membranların kullanımının 5  $\mu\text{m}$  kadar düşük kalınlıkta olduğu doğrulanmıştır [48], [49].

### 1.9.2 Membran Porozitesi

Membran poroziteside, MD akısını etkileyen membran boşluk hacmi olarak adlandırılan önemli parametrelerden biridir. Yüksek poroziteli membranlar buharlaşma için daha iyi yüzey alanı oluşturmaktadır. Genel olarak MD membranlarının gözenek oranları %30-85 arasındadır. Kullanılan MD konfigürasyonuna bakılmaksızın daha yüksek membran porozitesi daha yüksek akı ile neticelenir [23].

### 1.9.3 Membran Gözenek Boyutu

100 nm'den 1  $\mu\text{m}$ 'e kadar olan membranların gözenek boyutunun artmasıyla MD akısının arttığı kabul edilmektedir. Knudson difüzyonuna benzer bir şekilde Knudson viskoz geçişi ile çok küçük gözenekli membranlar daha büyük gözenekli özellik göstermektedir. Membran gözenek boyutunun artmasıyla akı artmakta ve dolayısıyla kütle transferinde artış olmaktadır [35], [50]. Fakat, membran gözeneklerinin ıslanmasından kaçınmak için membran gözenek boyutunun olabildiğince küçük olması gerekir. İhtiyaç duyulan optimum değer her bir MD uygulamaları için artıtılacak olan besleme solüsyon tipine bağlı olarak belirlenmelidir [23].

#### **1.9.4 Gözenek Eğriliği**

Gözenek eğriliği, ortalama gözenek boyunun membran kalınlığıyla kıyaslanmasıdır. MD çalışmalarını ve akıyı öngörmek için tahmin edilen eğrilik faktörü çoğunlukla 2 değerindedir [31], [51], [52]. Ayrıca, eğrilik faktörünün 3.9 kadar yüksek değerde olduğu da raporlanmıştır [53]. Genellikle membran gözenekleri membranda düz değildir, nüfuz eden moleküller daha düşük MD akısına neden olan eğrilik boyunca taşınır. MD akısı genellikle eğrilikle ters orantılıdır [23].

#### **1.9.5 Membran Yüzey Kimyası**

Membran genellikle buhar/sıvı arayüzeyinde destek görevi görmektedir ve beslenen sulu çözeltilerin buhar/sıvı dengesini değiştirmemektedir. Membran besleme çözeltisine karşı dirençli olmalıdır. Çözelti ile temas halinde membran gözeneklerinin kuruluşu devam etmelidir yani membran hidrofobik özellik göstermelidir. Hidrofobiklik ya hidrofobik materyallerin kullanımıyla ya da hidrofilik membranların farklı yüzey modifikasyon teknikleriyle başarılabilir [47], [54], [55]. Membran tekniğindeki son gelişmeler, hidrofobik mikro gözenekli membranların yüzeylerini (sıcak çözelti tarafı) ıslanmaya karşı korumaktadır. PVDF'den yapılmış hidrofobik mikroporöz düz-levha membranı öncelikle potasyumdikromatlı sülfirik asit çözeltisi ile muamele edilerek suyla yıkanıp kurumaya bırakılmaktadır [56], [57]. Polimer jel kompozit membranın yüzeyine sürülerek gözeneklerin ıslanmaya karşı koruması sağlanmıştır. PVA/PEG karışımı da hidrofobik membranın gösterdiği ıslanma problemini bertaraf etmek amacıyla kullanılabilir [58].

#### **1.9.6 Membran Modül Geometrisi**

Düz-levha membranlar düz ve çerçeve ile spiral sarımlı modüllerde hollow fiber membranlar ise tübular modüllerde genellikle kullanılmaktadır. MD modül dizaynı membran modülü boyunca aşırı beslemeye, yüksek türbülanslı süzüntü akış hızına ve düşük basınç kaybına uygun olmalıdır. MD proses uygulamaları şimdiye kadar endüstriyel MD modülleriyle sınırlı görülmektedir. MD'nin izotermal olmayan bir proses olmasından dolayı MD modül dizaynı sadece iyi akış, düşük basınç kaybı ve yüksek kütleli yoğunluk şartlarını sağlamamalıdır. Ayrıca, iyi bir termal geri kazanım ve termal stabiliteyi de sağlamalıdır. Solar enerjili tuzsuzlaştırma sistemi ile entegre olmuş AGMD için ısı geri kazanımlı spiral sargılı modül

önerilmiştir. Hollow fiber modülünde akımın etkili bir şekilde yayılmaması sebebiyle sıvı akışının efektif kütle alanı boyunca eksikliği dikkate alınmalıdır [59], [60].

### 1.10 MD Uygulama Alanları

MD'nin ticari uygulamasındaki başlıca engeller şunlardır [23]:

- RO gibi diğer ayırma tekniklerine göre daha düşük süzüntü akısı
- Konsantrasyon ve sıcaklık polarizasyon etkileri sebebiyle süzüntü akısında azalma, membranın kirlenmesi ve toplam ya da kısım kısım gözenek ıslanması
- MD için membran ve modül dizaynı
- Yüksek termal enerji tüketimi

MD proseslerinin avantajları aşağıda belirtilmiştir [31]:

- Teoride iyonların, büyük moleküllerin, kolloidlerin, hücrelerin ve diğer uçucu olmayan maddelerin 100% 'e yakın olarak alıkonulması
- Klasik distilasyonlara göre daha düşük işletim sıcaklığı gereksinimi
- Klasik basınç tahrikli proseslere göre daha düşük işletim basınç gereksinimi
- Membran ve çözelti arasında daha az kimyasal etkileşim
- Membranın mekanik ihtiyacının daha az olması
- Diğer distilasyon proseslerine göre daha az hava boşluğu gereksinimi
- Bakım ve onarım ihtiyacının az olması
- Atık ısı, solar enerji gibi ısı kaynaklarının kullanılabilmesi
- Düşük işletme maliyeti
- Ortam basıncında işletim olanağı
- Daha düşük sıcaklıklarda işletme olanakları
- Düşük kirlilik eldesi

MD konfigürasyonlarının laboratuvar ölçekli olarak çalışıldığı ve uygulanabilir bulunduğu alanlar Çizelge 2.2'de özetlenmektedir. MD, sudan uçucu olmayan iyon, kolloid, makromoleküllerin ayrılmasında, benzen, kloroform, trikloroetilen gibi iz uçucu organik bileşenlerin sudan uzaklaştırılmasında ya da alkol gibi diğer organik bileşenlerin sudan uzaklaştırılmasında ya da alkol gibi diğer organik bileşenlerin ekstrasyonunda uygulanmıştır. MD hem distile su üretimi için hem de akuatik solüsyonlar için uygundur [23].

MD'nin su tuzsuzlaştırılması, çevresel atık temizlemesi, suyun yeniden kullanımı ve süt ve meyve suyu konsantrasyonları gibi gıda endüstrisi, kandan suyun ayrılması gibi biyomedikal alanlarda uygulamaları mevcuttur. Azeotropik karışımların (alkol gibi) sudan ayrılmasında, radyoaktif çözeltilerde ve nükleer tuzsuzlaştırma uygulamasında, boya ile kontamine olmuş tekstil atık suları gibi atık suların arıtımında, soğutma sıvılarında, hümik asit çözeltilerinin arıtımında, farmösetik atık su arıtımında ve yüksek sıcaklığın proses sıvısındaki ayrışmayı kolaylaştırdığı yerlerde MD prosesi ilgi görmektedir. DCMD tuzsuzlaştırma ve uçucu olmayan iyonik çözünmüş maddelerin giderilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [23].

Membranların kimyasal stabilizesine bağlı olarak MD, asitlerin konsantrasyonu için de kullanılabilir. Sülfürik asidin, hidroklorik asitin ve nitrik asitin konsantrasyonu hem DCMD hem de VMD ile 60%'ın üzerinde gerçekleştirilebilmiştir [23].

Çizelge 0.2 MD prosesinin bazı uygulama alanları [23]

Uygulama Alanları	DC MD	AG MD	SG MD	V MD
Tuzsuzlaştırma ve saf su üretimi (tuzlu suda)	√	√	√	√
Nükleer endüstri (radyoaktif çözeltilerin konsantrasyonu ve atıksuların arıtılması; saf su üretimi)	√			
Tekstil endüstrisi (boya giderimi ve atıksu arıtımı)	√			√
Kimya endüstrisi (asitlerin konsantrasyonu, sudan uçucu organiklerin giderimi, alkol/su karışımı gibi azeotropik karışımlardan ayırma ve kristalizasyon)	√	√	√	√
Farmosetik ve biyomedikal endüstrisi (kandan ve protein çözeltilerinden suyun ayrılması, atıksu arıtımı)	√			
Gıda endüstrisi (meyve sularının konsantrasyonu ve süt işleme) ve yüksek sıcaklıklı proses sıvılarını parçalamasını sağlayan alanlar	√	√		√

## BÖLÜM 3

### DENEYSEL ÇALIŞMA

#### 1.11 Sentetik İçme Suyu Karakteristik Özellikleri

Çalışmalarda sentetik çözeltiler musluk suyu ile hazırlanmıştır. Musluk suyuna 0,05 mol/L'lik NaAsO<sub>2</sub> (sodyum arsenit solüsyonu) (Merck İlaç ve Kimya Ticaret A.Ş.) ve bir diğer çözelti için ise H<sub>3</sub>AsO<sub>4</sub> standart solüsyonu (Merck İlaç ve Kimya Ticaret A.Ş.) ilave edilerek arsenikli sentetik çözeltiler elde edilmiştir. Hazırlanan 100 µg/L ve 1.000 µg/L As(III) ve As(V) konsantrasyonundaki çözeltilerinin karakteristik özellikleri Çizelge 3.1'de görülmektedir.

Çizelge 0.1 Sentetik çözeltinin karakteristik özellikleri

No	pH	İletkenlik, µS/cm	As(III) Konsantrasyonu, µg/L	Organik Madde Konsantrasyonu TOK, mg/L	FeCl <sub>3</sub> ilavesiyle Fe(III) Konsantrasyonu, mg/L	As(V) Konsantrasyonu, µg/L
1	7,48	804	1.000	-	-	-
2	7,35	633	100	-	-	-
3	7,44	690	1.000	-	2,5	-
4	7,41	701	1.000	-	5	-
5	7,35	632	1.000	5	-	-
6	7,35	643	1.000	10	-	-
7	7,34	658	1.000	20	-	-
8	7,36	2665	1.000	-	-	-
9	7,24	5140	1.000	-	-	-
10	7,4	10030	1.000	-	-	-
11	7,42	694	-	-	-	1.000
12	7,44	689	-	-	-	100

Çalışmalarda iletkenlik, organik madde ve demir konsantrasyonlarının prosese ve akıya etkilerinin araştırılması amacıyla 1.000 µg/L As(III) içeren solüsyonlara sırasıyla sodyum tuzu,

$C_8H_5KO_4$  (potasyum hidrojen filat) (standart KOİ çözeltisi) ve  $FeCl_3.6H_2O$  ilave edilmiştir. İletkenlikleri 2.500, 5.000 ve 10.000  $\mu S/cm$  olacak şekilde üç ayrı çözelti; organik madde konsantrasyonu 5, 10 ve 20 mg C/L olacak şekilde üç ayrı çözelti; 5 ve 10 mg/L demir olacak şekilde iki ayrı çözelti hazırlanmıştır. Toplamda 12 farklı çözelti hazırlanmış olup bunların MD ile arıtılabilirliği incelenmiştir.

## 1.12 Deneysel Çalışma Düzenegi

### 1.12.1 Membran Distilasyon Düzenegi

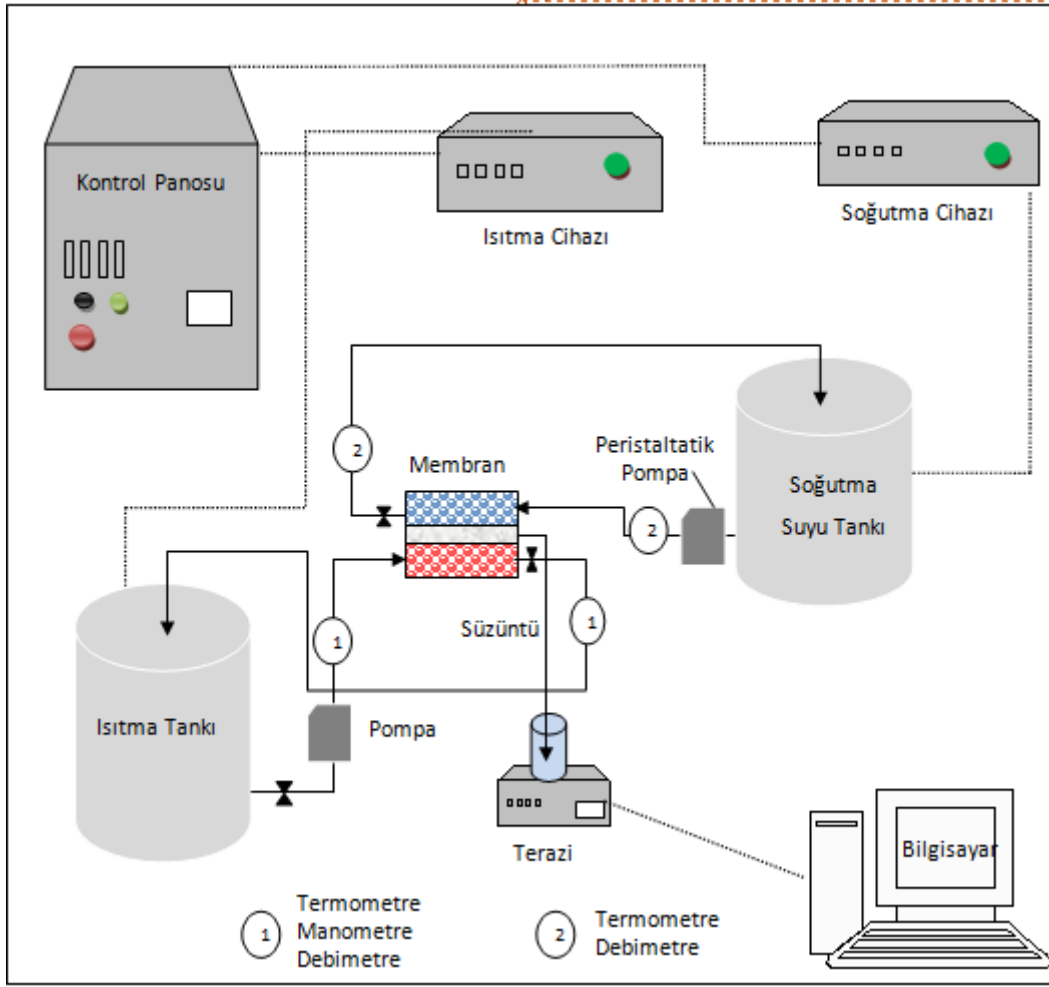
Çalışmalar laboratuvar ölçekli modifiye DCMD düzeneginde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.1). Membran hücresi öncesinde hazırlanan çözeltiler 40 °C, 50 °C, 60 °C ve 65 °C olacak şekilde elektrikli ısıtıcı vasıtasıyla reaktörde ısıtılmıştır. Isınan sıcak su DCMD düzenegine pompa vasıtası ile iletilmiştir. Membranın soğuk su kısmında ise su sıcaklığı eşanjör sistemi vasıtasıyla 10 °C'de sabit tutulmuştur. Sıcak suyun DCMD düzenegine beslenme debisi 4 L/dk'dır. DCMD düzeneginde basınç genellikle 0,5 bar olacak şekilde ayarlanmıştır. DCMD düzeneginde efektif membran alanı 0,015 m<sup>2</sup>'dir.

### 1.12.2 Çalışmada Kullanılan Membranlar

0,22  $\mu m$  ve 0,45  $\mu m$  gözenek çaplı hidrofobik PVDF ve PTFE membranlar Membrane Solution-LLC firmasından temin edilmiştir. Temin edilen membranların özellikleri Çizelge 3.2'de görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 0.1 MD prosesi (a) görünümü (b) şematik diyagramı

Çizelge 0.2 Membranların karakteristik özellikleri

Membran Materyali	Por Çapı, $\mu\text{m}$	Kalınlık, mm	Akış Oranı, (ml/dk/cm <sup>2</sup> @0,689474 bar)
PTFE	0,22	180-240	11-14,5
PTFE	0,45	170-220	63-74
PVDF	0,22	140-180	4,5-6,3
PVDF	0,45	120-180	10,5-16,5

### 1.13 Analizler

As(III), As(V), TOK, demir, iletkenlik ve pH parametreleri analiz edilmiştir. Membranın her iki tarafındaki sıcaklık değerleri de termostatlar ile ayarlanmıştır. Analiz edilen parametreler ve analiz metodları Çizelge 3.3'te görülmektedir.

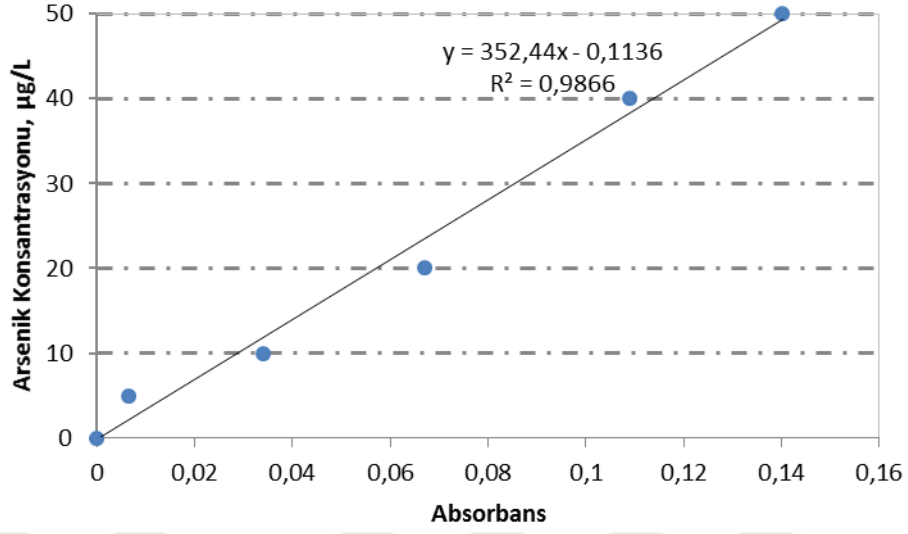
Çizelge 0.3 Analiz edilen parametreler ve analiz metodları

Parametre	Metod	Ekipman
pH	SM 4500 H	Thermo Scientific Orion 5-Star
İletkenlik		Thermo Scientific Orion 5-Star
Sıcaklık	SM 2550	Sıcaklık ölçer
Demir	3111 B	AAS Cihazı
As(III)	3111 B	AAS Cihazı
As(V)	3111 B	AAS Cihazı
TOK	SM 5310 B	Hach Lange

Standart Metodlar 3111 B yöntemi ile Perkin Elmer Analyst 400 Atomik Absorpsiyon Spektrofotometresiyle (AAS) As(III) ve As(V) analizi yapılmıştır (Şekil 3.2). Analiz 193,7 nm dalga boyunda gerçekleştirilmiştir. Analiz öncesinde kalibrasyon eğrisi oluşturulmuştur ve Şekil 3.3'te görülmektedir.



Şekil 0.2 Atomik Absorpsiyon Spektrofotometresi Görünümü



Şekil 0.3 Arsenik Kalibrasyon Eğrisi

Çizelge 3.3'te belirtilen parametrelere ilaveten akı değerleri de hesaplanmıştır.

Akı hesaplamalarında denklem 3.1 kullanılmıştır.

$$J = \frac{m_p}{A_m t} \quad (3.1)$$

J: Akı,  $m_p$ : Süzütünün ağırlığı,  $A_m$ : Membran alanı, t: Süre

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE DEĞERLENDİRME

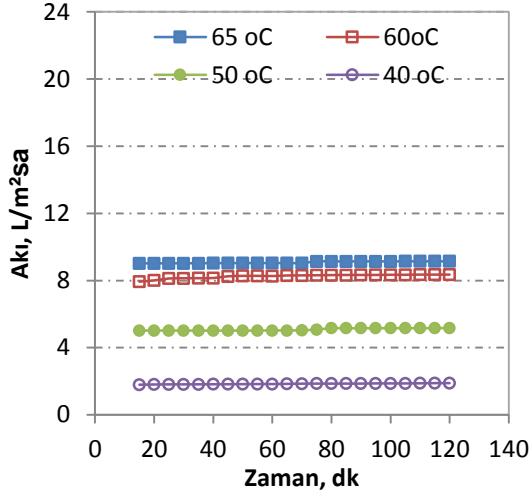
Musluk suyuna As(III) ve As(V) ilave edilerek hazırlanan sentetik çözeltiler ile çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, iletkenlik, organik madde ve demir ilavesi ile bu parametrelerin hem arsenik giderme verimi ve hem de DCMD düzeneğine olası etkileri de araştırılmıştır. Deneysel çalışma sonuçları As(III) ve As(V) gideriminde akı, arsenik, TOK, Fe(III) ve iletkenlik giderimi olarak aşağıda sunulmuştur.

#### 1.14 Sentetik Çözeltiden Arsenik Giderimi

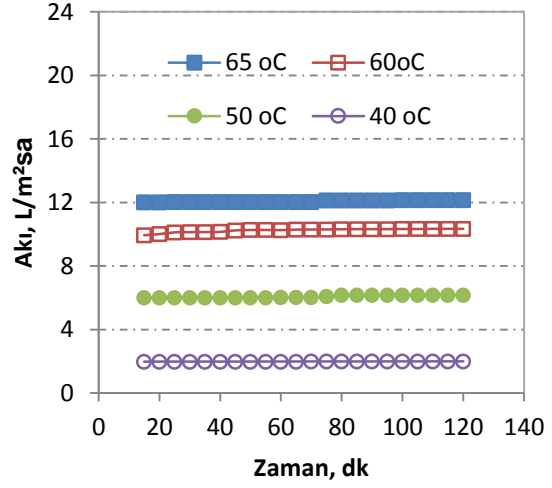
Musluk suyuna 100 µg/L ve 1.000 µg/L As(III) ve As(V) çözeltileri ilave edilerek sentetik çözelti hazırlanmıştır. 40 °C, 50 °C, 60 °C ve 65 °C sıcaklıklarında sentetik çözelti DCMD düzeneği ile arıtılmıştır. Akı, arsenik ve iletkenlik giderimleri incelenmiştir.

##### 1.14.1 Akı

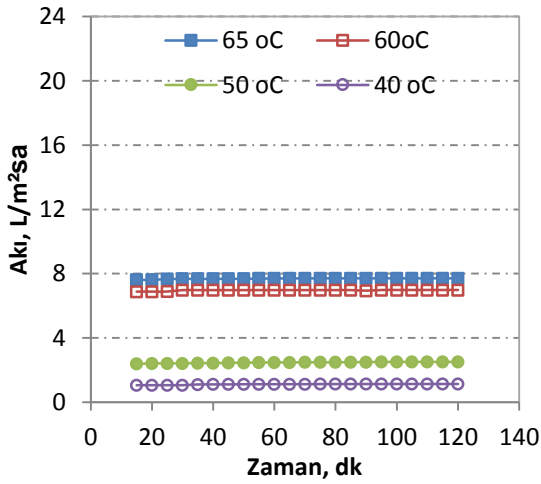
Dört farklı giriş suyu sıcaklığında sentetik çözelti DCMD düzeneği ile arıtılmıştır. 100 µg/L ve 1.000 µg/L As(III) ve As(V) içeren çözeltilerin akı değerleri sırasıyla Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te görülmektedir.



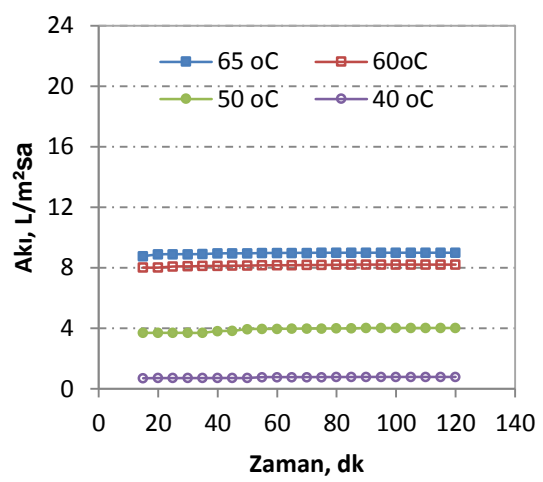
a) PTFE-0,22 µm



b) PTFE-0,45 µm



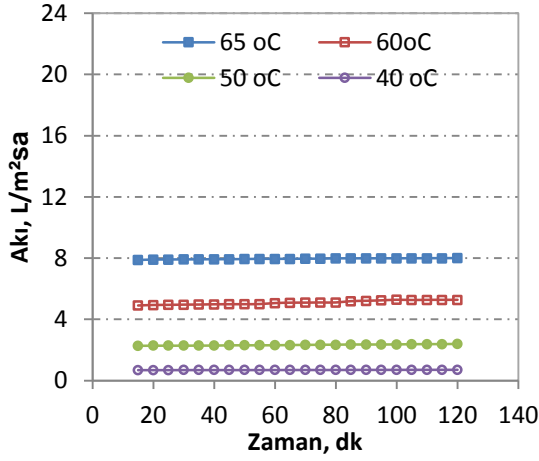
c) PVDF-0,22 µm



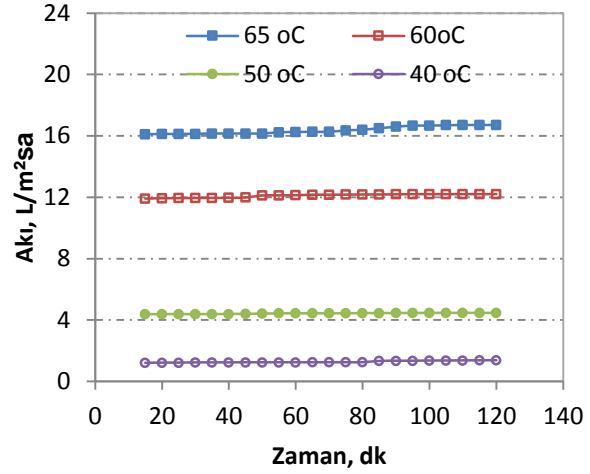
d) PVDF-0,45 µm

Şekil 0.1 100 µg/L As(III) konsantrasyonunda akı-zaman değişimi

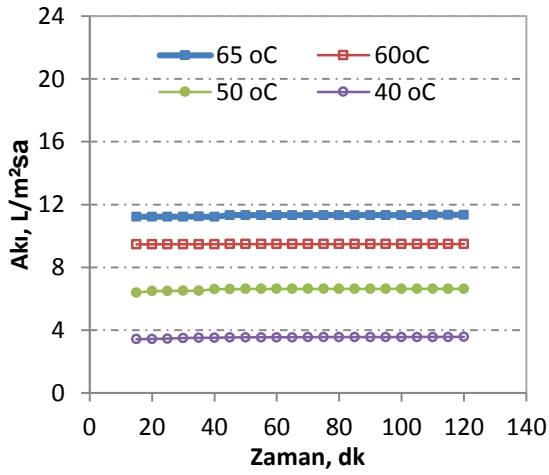
Şekil 4.1'den görüldüğü üzere sıcaklık arttıkça, akı oluşumunda artış gözlenmiştir. DCMD düzeneği girişinde hamsu sıcaklığının artması ve soğutma kısmındaki su sıcaklığının sabit tutulması ile hidrofobik membranın her iki tarafındaki sıcaklık farkında da artış olmuştur. Sıcaklık farkının etkisi ile daha fazla suyun buharlaşması söz konusudur. En yüksek akı değerleri kullanılan tüm membranlarda uygulanan en yüksek sıcaklık değerinde (65 °C) elde edilmiştir. Sıcaklık farkının yanısıra, gözenek boyutunun da akı üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Hem PTFE ve hem de PVDF membranlarda 0,45 µm gözenek çapında daha yüksek akı değeri elde edilmiştir. Membran türleri karşılaştırıldığında PTFE membran ile daha yüksek akı değerleri elde edilmiştir.



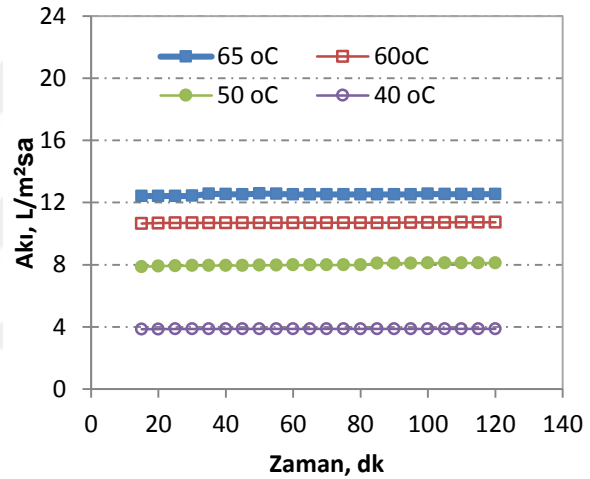
a) PTFE-0,22 µm



b) PTFE-0,45 µm



c) PVDF-0,22 µm

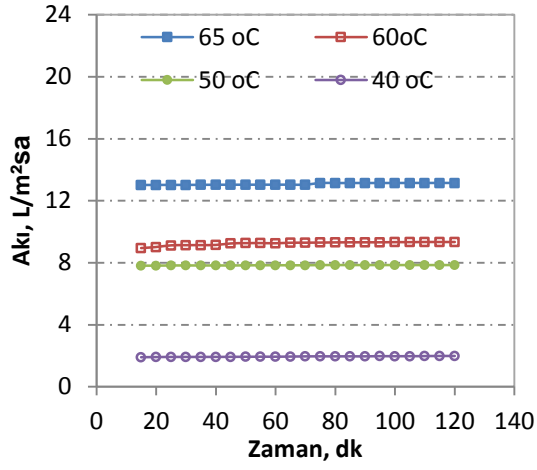


d) PVDF-0,45 µm

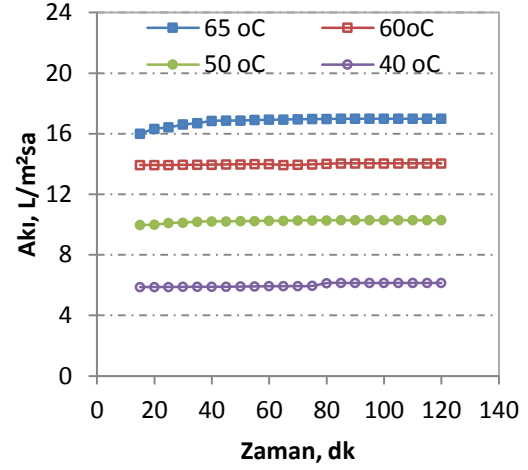
Şekil 0.2 1.000 µg/L As(III) konsantrasyonundaki akı-zaman değişimi

Şekil 4.2'de görüldüğü üzere 1000 µg/L As(III) içeren sentetik çözeltinin DCMD ile arıtılması ile akı değerleri Şekil 4.1'e benzer şekilde artış göstermiştir. Sıcaklık farkı, gözenek boyutu ve membran türünün akı üzerindeki etkisi 100 µg/L As(III) ile benzer olmuştur. As(III) konsantrasyonunun artması akı üzerinde bir olumsuzluk oluşturmamış ve yüksek konsantrasyonda As(III) içeren sentetik çözeltide daha yüksek akı değerleri elde edilmiştir.

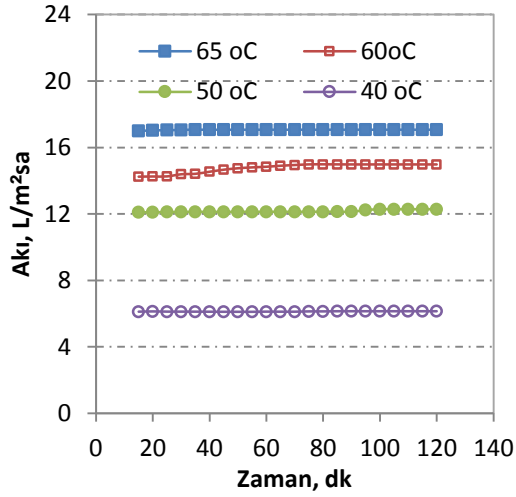
100 µg/L ve 1.000 µg/L As(V) ilaveli sentetik çözeltinin DCMD düzeneğiyle arıtılmasıyla oluşan sentetik suyun arıtımından meydana gelen akı miktarları aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



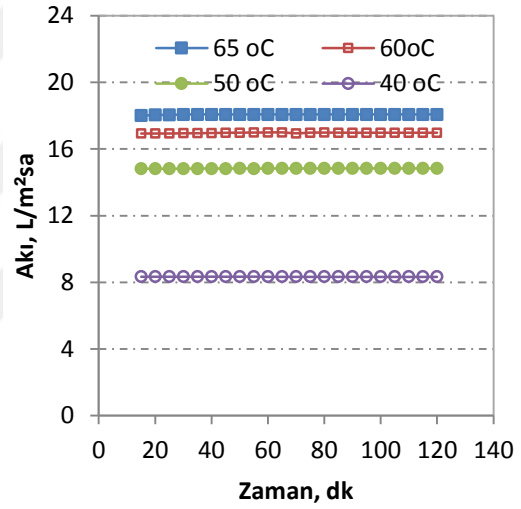
a) PTFE-0,22 µm



b) PTFE-0,45 µm



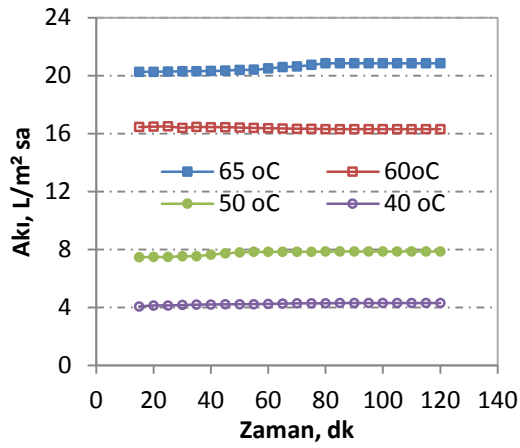
c) PVDF-0,22 µm



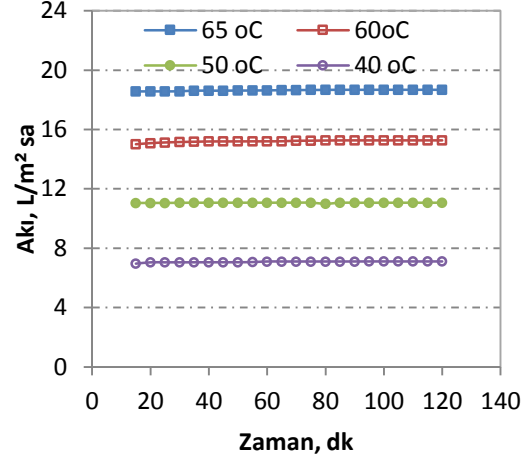
d) PVDF-0,45 µm

Şekil 0.3 As(V) 100 µg/L konsantrasyonunda akı-zaman değişimi

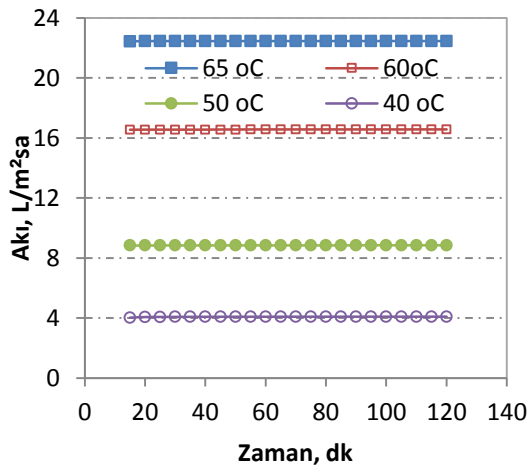
100 µg/L As(V) ilaveli sentetik çözeltinin DCMD ile arıtılması sonucu oluşan akı değerleri Şekil 4.3'te görülmektedir. As(III) ile elde edilenden daha yüksek akı değerleri elde edilmiştir. Ayrıca, PVDF membranların akı değerleri PTFE membranlara göre daha yüksek olmuştur.



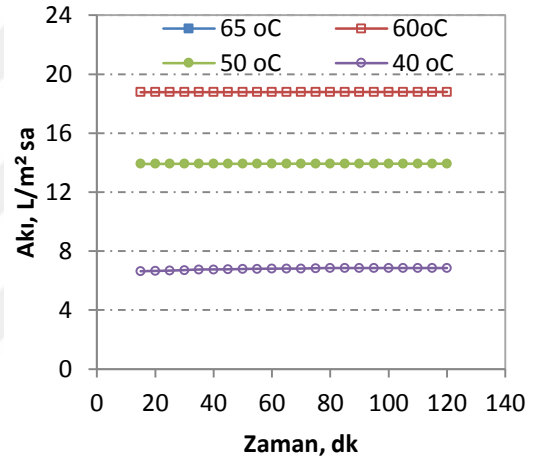
a) PTFE-0,22 µm



b) PTFE-0,45 µm



c) PVDF-0,22 µm



d) PVDF-0,45 µm

Şekil 0.4 1.000 µg/L As(V) konsantrasyonunda akı-zaman değişimi

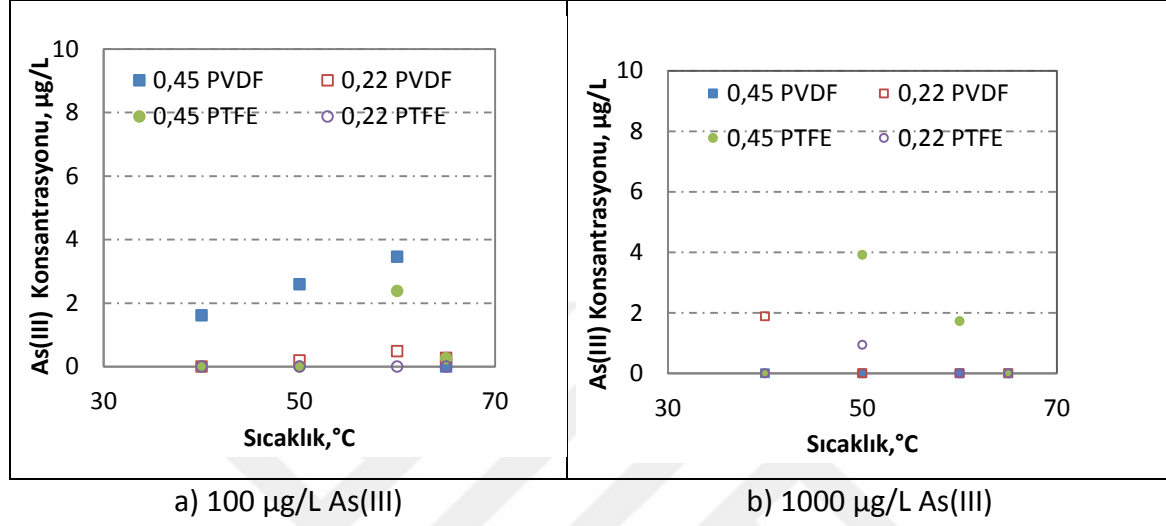
1.000 µg/L As(V) ilaveli sentetik çözeltinin DCMD ile konsantrasyonuna ayarlanmış çözelti proste ham su olarak kullanılmıştır. As(V) çözeltisi membran distilasyon yöntemiyle artıldığında en fazla akı 0,45 PVDF membranında elde edilmiştir. Grafikten de anlaşıldığı gibi gözenek boyu arttıkça akı miktarında artış meydana gelmektedir. PVDF membranında oluşan akı PTFE membranındaki akıya göre daha fazladır. Bu proste As(V) arıtımı ile As(III) arıtımına göre daha fazla akı oluşumu gözlenmiştir.

### 1.14.2 Arsenik Giderimi

100 µg/L ve 1.000 µg/L giriş konsantrasyonundaki sentetik suların MD prosesi ile arıtımı neticesinde ulaşılan konsantrasyon değerleri aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.

Giriş As(III) konsantrasyonu 100 µg/L (0,1 mg/L) olan sentetik suyun farklı sıcaklıklardaki ve farklı por boyutuna sahip PTFE ve PVDF membranlarındaki As(III) giderimi aşağıdaki şekilde gibidir.

1.000 µg/L (1 mg/L) As(III) içeren sentetik suyun membran distilasyon yöntemiyle arıtımında As(III) giderimi aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.

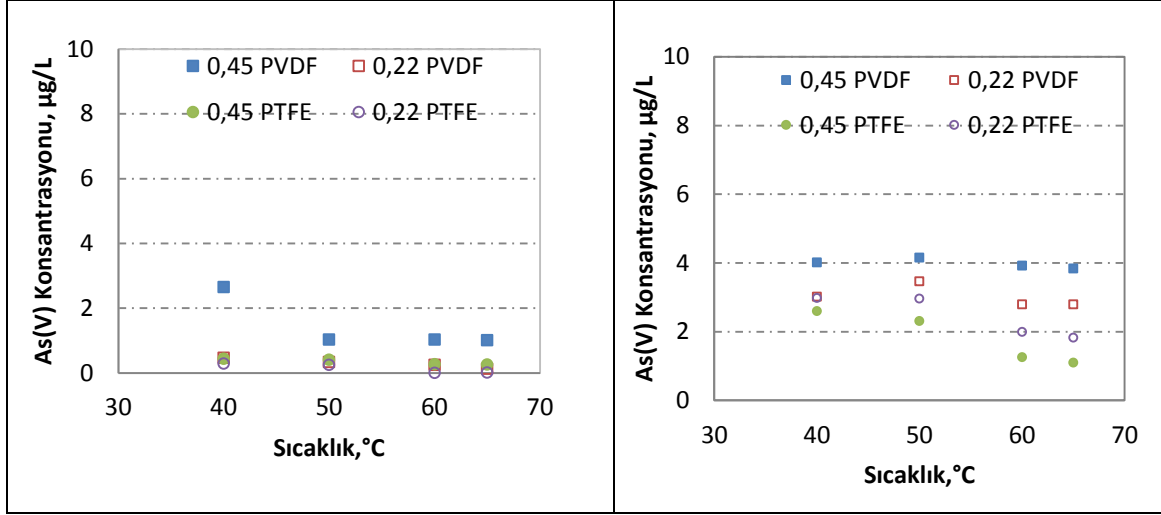


Şekil 0.5 100 ve 1.000 µg/L As(III) konsantrasyonlarında arsenik giderimi

Çalışmada membran distilasyon yöntemi kullanılarak sıcaklığın arsenik giderimi üzerine etkisi araştırılmıştır. Öncelikle 100 µg/L'e ve 1000 µg/L'e ayarlanan iki farklı konsantrasyondaki çözelti; 40, 50, 60 ve 65 °C sıcaklık değerlerinde farklı gözenek çapına sahip iki farklı materyaldeki (PTFE, PVDF) hidrofobik membranlar kullanılarak arıtılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde WHO, EPA, İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik kapsamında ortak sınır değer olan maksimum konsantrasyon sınır değerinin (10 µg/L) altında As(III) konsantrasyonuna ulaşılmıştır.

Yarlagadda ve diğ. 2011; yaptıkları çalışmada 96,5–99,9% oranında arsenik giderimi, 99% oranında tuz reddi elde etmiştir. Bu çalışmada da benzer şekilde 96,54% ve üzerinde arsenik ve ortalama 99% oranında tuz giderim verimine ulaşılmıştır.

100-1.000 µg/L As(V) içeren sentetik sudan As(V) giderim grafiği aşağıdaki gibidir.



a) 100 µg/L As(V)

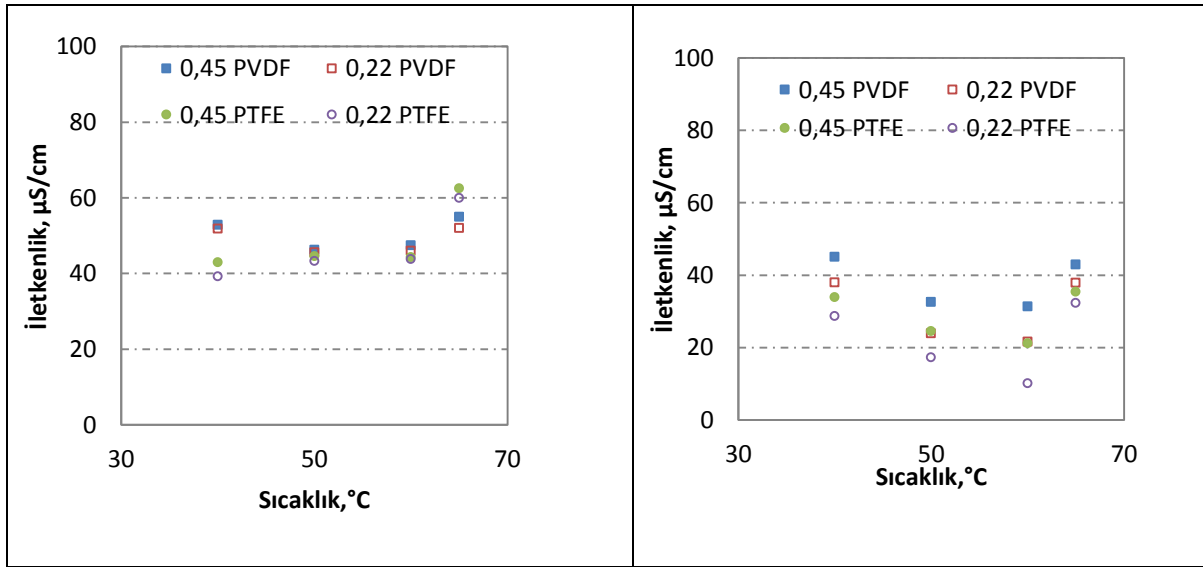
b) 1.000 µg/L As(V)

Şekil 0.6 100 ve 1.000 µg/L As(V) konsantrasyonlarında arsenik giderimi

As(V) konsantrasyonu 100 ve 1.000 µg/L'e ayarlanan iki ayrı çözelti 0,22 ve 0,45 µm gözenek boyutundaki PTFE ve PVDF membranları kullanılarak 45, 50, 60 ve 65 °C işletme sıcaklıklarında arıtılmıştır. Arıtılan suyun sıcaklık ve pH'ı yönetmelikteki içme su standartlarına uygun çıkmıştır. As(V)'in yüksek verimde arıtılması sonucunda yönetmelikteki maksimum arsenik konsantrasyon değerinin altında çıkmıştır.

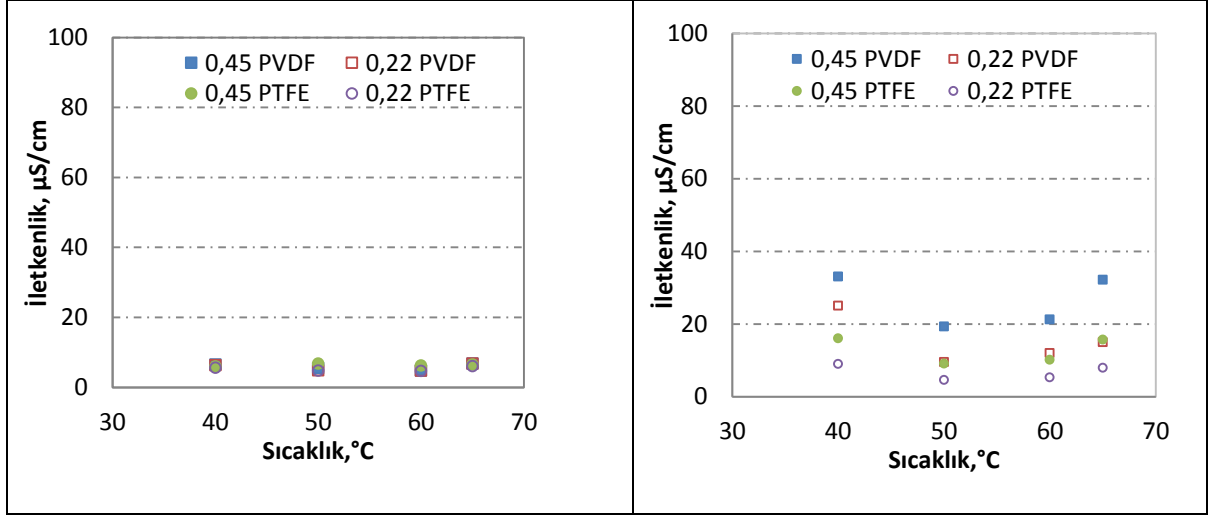
### 1.14.3 İletkenlik Giderimi

100 ve 1.000 µg/L As(III) ve As(V) çözeltilerinin proses sonucundaki iletkenlik giderim grafiği aşağıdaki şekillerde verildiği gibidir.



a) 1.000 µg/L As(III)

b) 100 µg/L As(III)



c) 1.000 µg/L As(V)

d) 100 µg/L As(V)

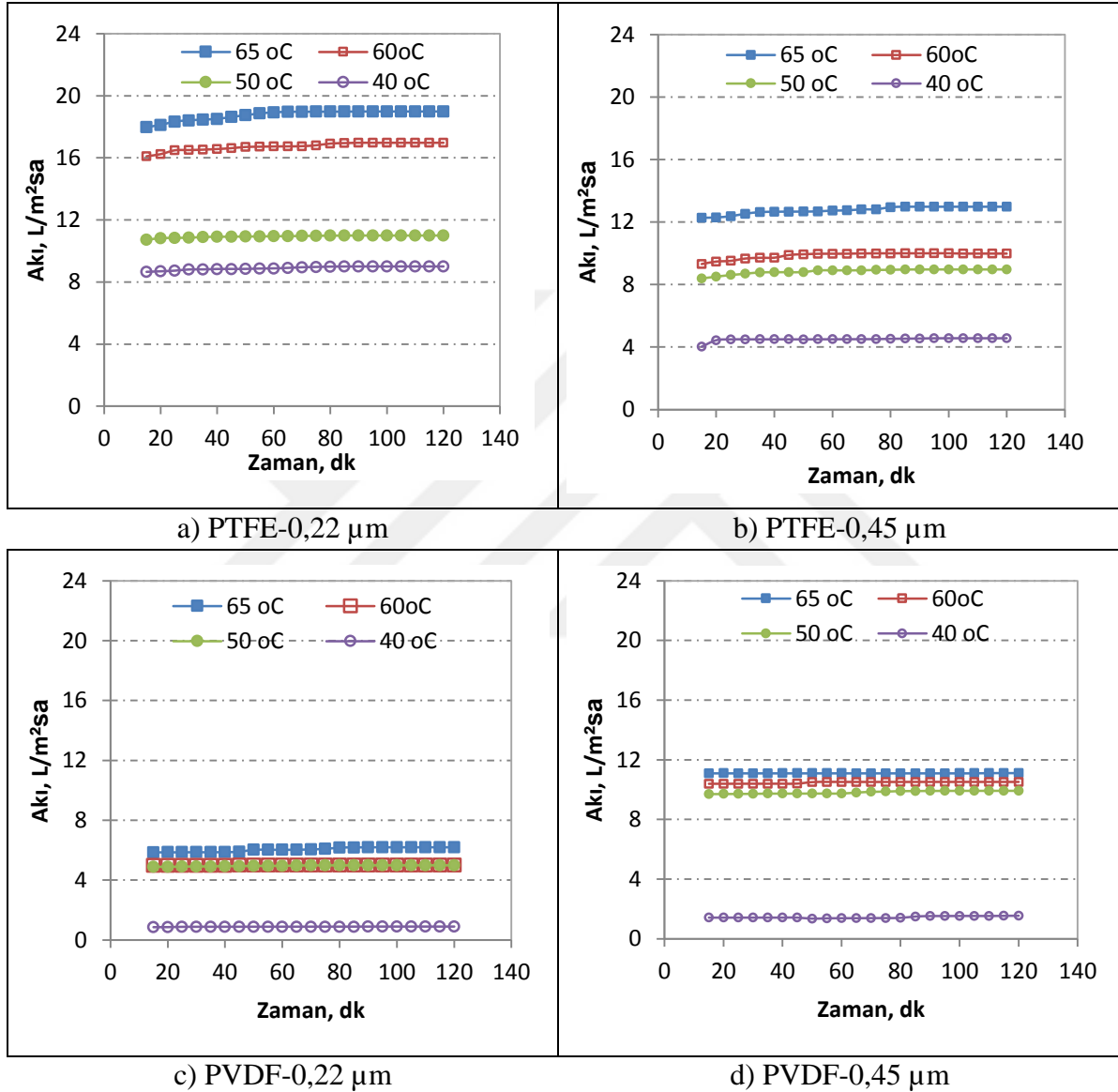
Şekil 0.7 100 ve 1.000 µg/L As(III) ve 100 ve 1.000 µg/L As(V) konsantrasyonlarında musluk suyundan iletkenlik giderimi

100 ve 1.000 µg/L konsantrasyonuna ayarlanan As(III) ve As(V) çözeltilerin giriş iletkenlik değerleri iletkenlik ölçer ile ölçülmüştür. Membran distilasyon yöntemiyle arıtılması sonucunda oluşan temiz suyun iletkenliği yüksek verim elde edilerek giderilmiştir.

## 1.15 Karbon İlaveli Sentetik Çözeltiden Arsenik Giderimi

### 1.15.1 Akı

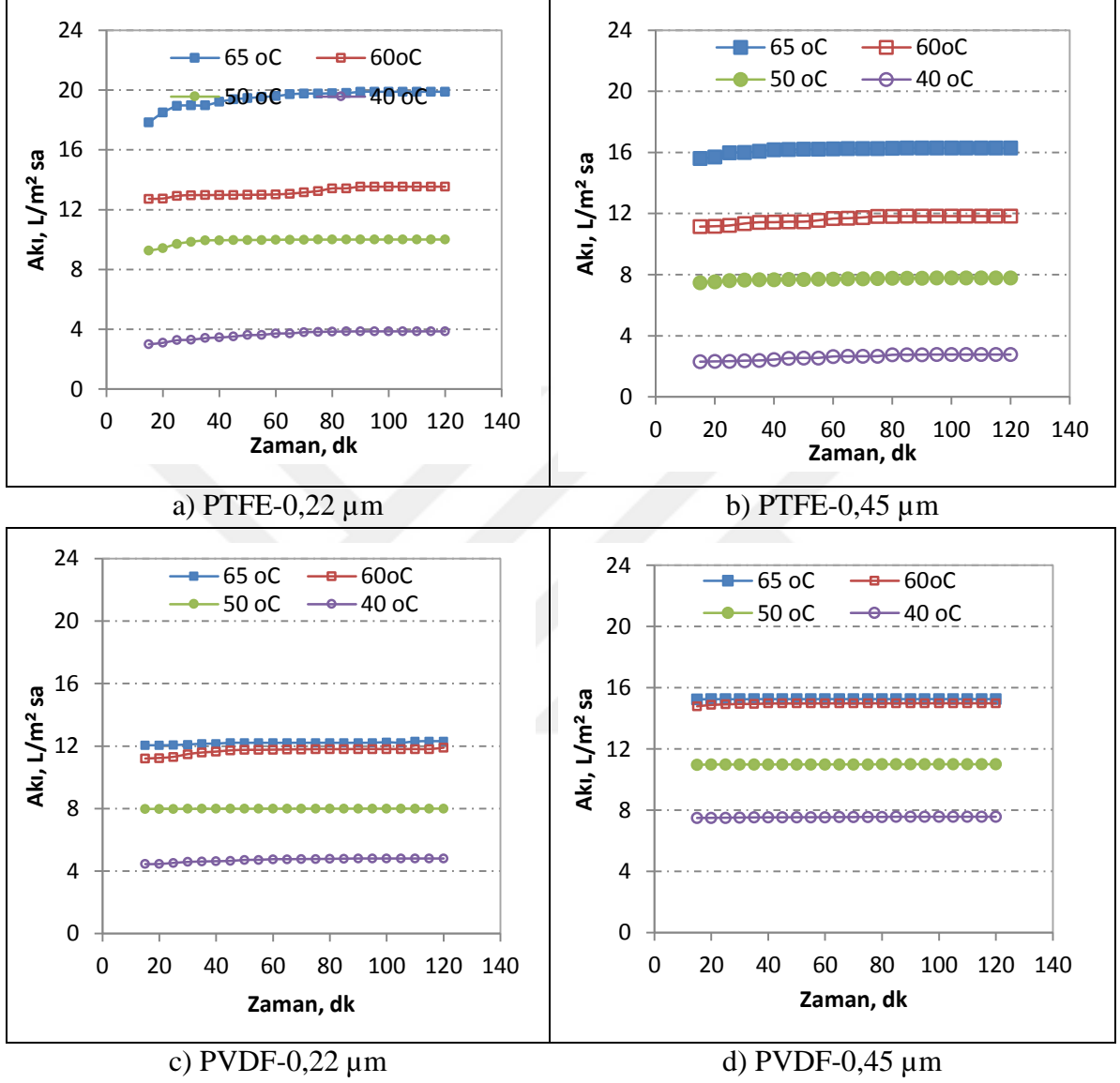
1.000 µg/L As(III)'lü sentetik suya 5 mg/L C ilavesinden sonra DCMD ile arıtımında gerçekleşen akı miktarları aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



Şekil 0.8 1.000 µg/L As(III) ve 5 mg C /L konsantrasyonunda akı-zaman değişim

1.000 µg/L içeren içme suyuna konsantrasyonu 5 mg/L C olacak şekilde standart KOİ çözeltisi yani potasyum hidrojen filatat ( $C_8H_5KO_4$ ) eklenmiştir. Bu çalışmada da farklı sıcaklık değerlerinin akı üzerine etkisi araştırılmıştır. Sıcaklık arttıkça akının arttığı gözlenmiştir. PTFE membranı ile PVDF membranı mukayese edildiğinde, PTFE membranında oluşan akının daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

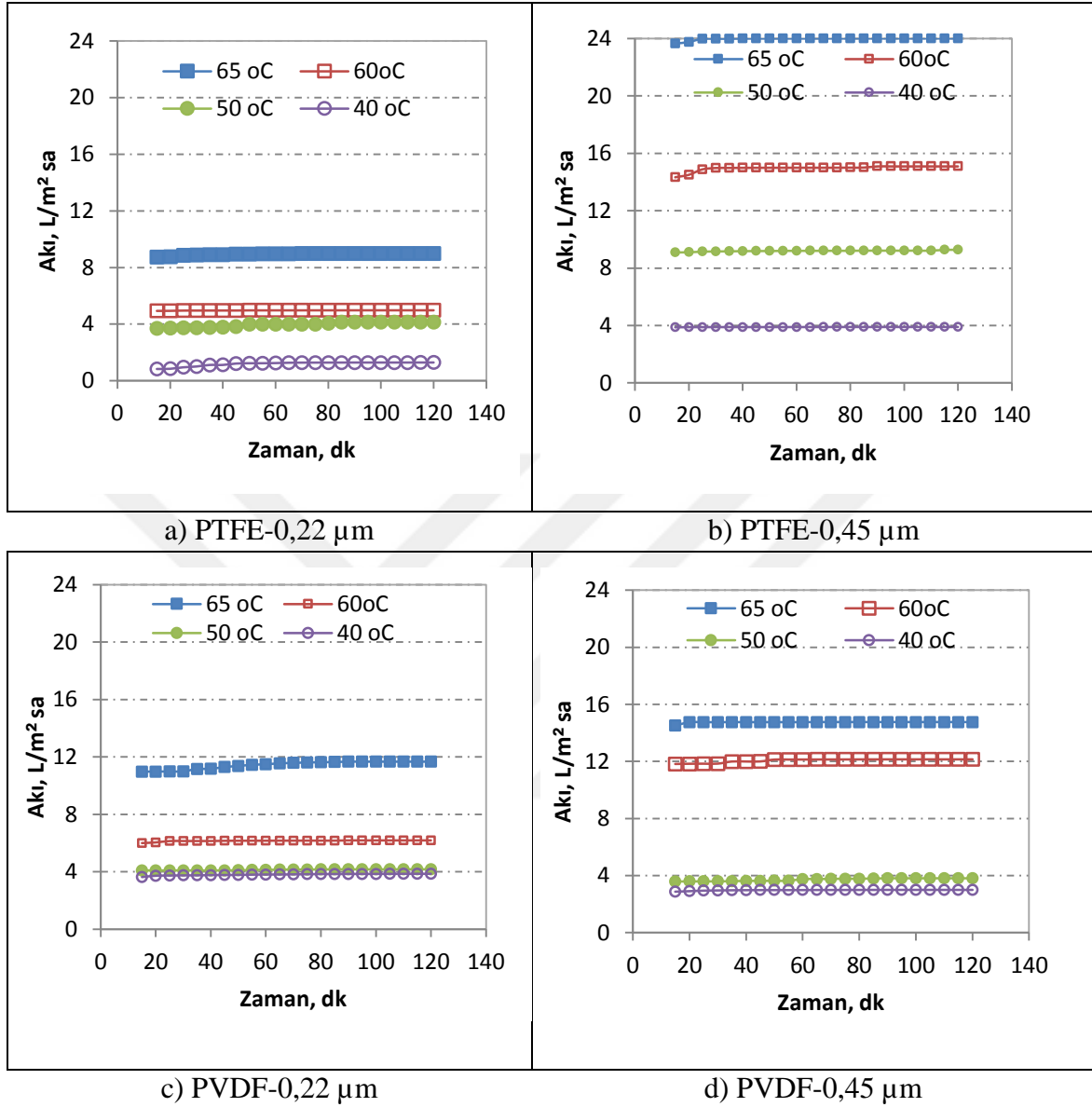
1.000 µg/L As(III)'lü sentetik suya 10 mg/L C ilavesinden sonra DCMD ile arıtımında gerçekleşen akı miktarları aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



Şekil 0.9 1.000 µg/L As(III) ve 10 mg C /L giriş konsantrasyonunda akı-zaman değişimi

1.000 µg/L içeren içme suyuna, konsantrasyonu 10 mg/L C olacak şekilde standart KOİ çözeltisi yani potasyum hidrojen filatat ( $C_8H_5KO_4$ ) eklenmiştir. Bu sayede karbon miktarının akı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Karbon konsantrasyonundaki artışa bağlı olarak akı üzerinde artış meydana gelmiştir. Bu çalışma da farklı sıcaklık değerlerinin akı üzerine etkisi araştırılmıştır. Sıcaklık arttıkça akının arttığı gözlenmiştir. PTFE membranında oluşan akının, PTFE membranı ile PVDF membranı mukayese edildiğinde, daha fazla olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

20 mg/L C ilave edilmiş 1.000 µg/L As(III) konsantrasyonundaki sentetik suyun MD yöntemiyle arıtımında meydana gelen akı miktarları aşağıdaki gibidir.

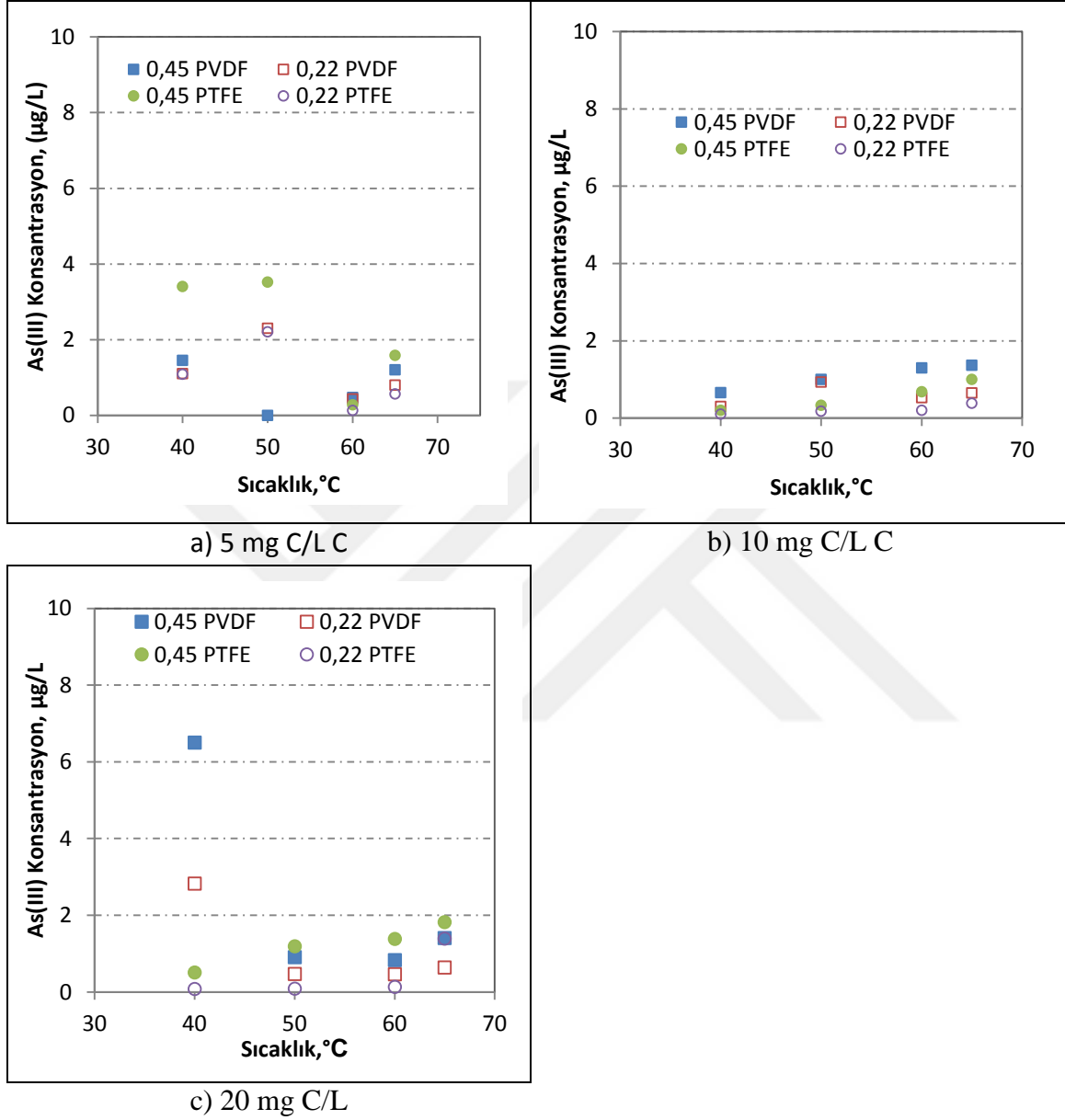


Şekil 0.10 1.000 µg/L As(III) ve 20 mg C /L giriş konsantrasyonunda akı-zaman değişimi

1.000 µg/L konsantrasyonundaki içme suyuna 20 mg/L C konsantrasyonu olacak şekilde standart KOİ çözeltisi yani potasyum hidrojen filat (C<sub>8</sub>H<sub>5</sub>KO<sub>4</sub>) ilave edilmiştir. Böylece karbon miktarının akı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Karbon konsantrasyonundaki artışa bağlı olarak akı üzerinde artış meydana gelmektedir. Ancak membranda konsantrasyon polarizasyon etkisi sebebiyle akıda azalma meydana gelmektedir. Bu çalışmada da farklı sıcaklık değerlerinin akı üzerine etkisi araştırılmıştır. Sıcaklık arttıkça akının arttığı gözlenmiştir. PTFE membranında oluşan akının, PTFE membranı ile PVDF membranı mukayese edildiğinde, daha fazla olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

### 1.15.2 Arsenik Giderimi

1.000 µg/L sentetik su 5-10-20 mg/L C olacak şekilde ayarlandıktan sonra membran distilasyon prosesi yöntemi ile arıtımı aşağıdaki şekillerde ifade edilmektedir.



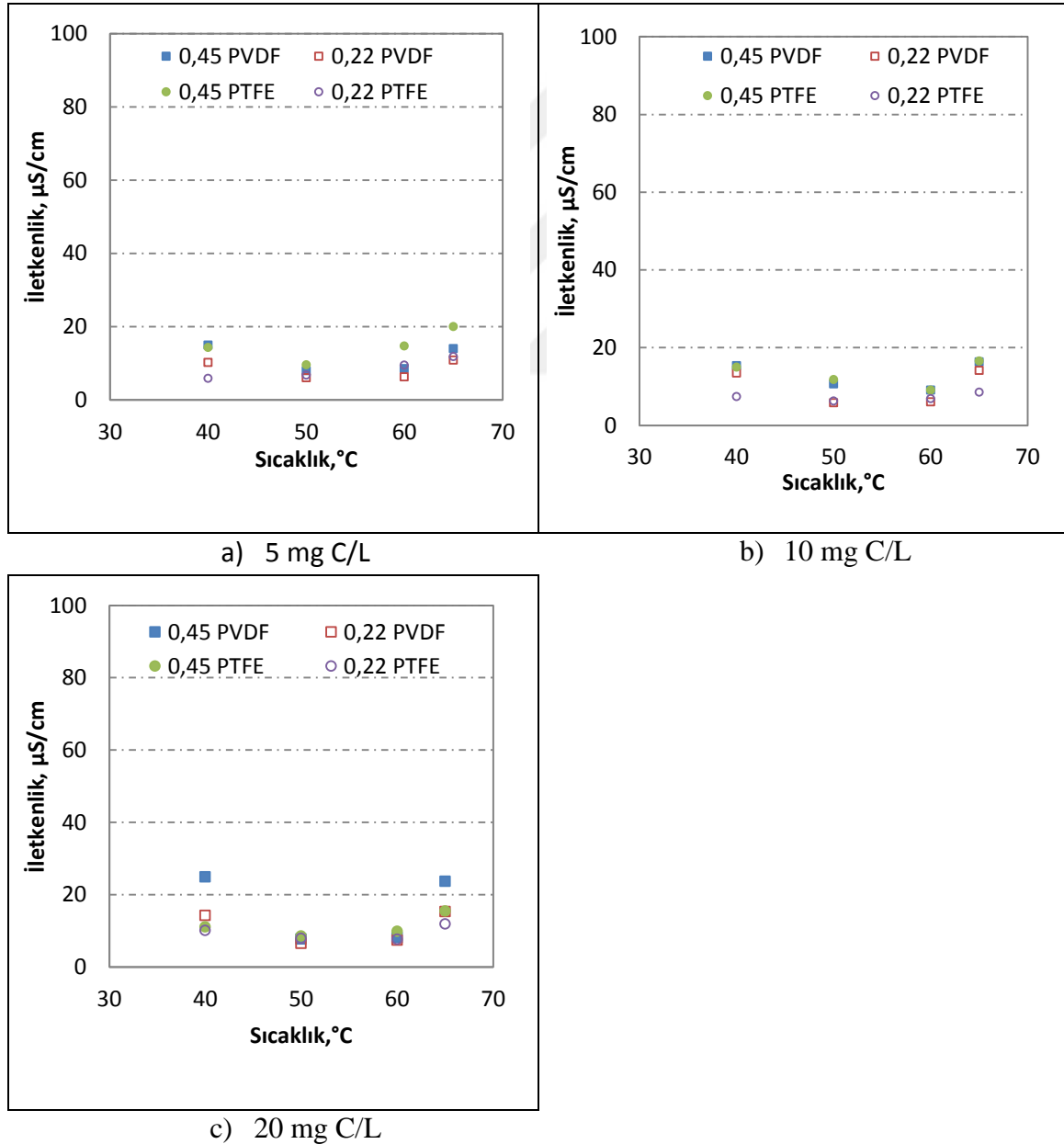
Şekil 0.11 1.000 µg/L As(III) ve 5, 10 ve 20 mg C/L konsantrasyonunda arsenik giderimi

1.000 µg/L As(III) çözeltisine 5, 10, 20 mg/L C konsantrasyonunda olacak şekilde standart KOİ çözeltisi ilave edilmiştir. Üç farklı konsantrasyondaki çözeltinin proses sonucundaki As(III) giderim verimi araştırılmıştır. As(III) konsantrasyonu MD ile artırım sonucunda yönetmelik sınır değerinin altında ölçülmüştür.

Yapılan çalışmada 100 ve 1.000 ppb As(III) ve As(V) içeren suların arıtımı ayrı ayrı incelenmiştir. Ayarlanan bütün sıcaklardaki arıtım ile standartlardaki müsaade edilen arsenik konsantrasyonların altına düşülmüştür. Yani MD yöntemiyle arıtılan su WHO'ya ve EPA'ya göre 0,01 mg/L olan arsenik limitinin altındadır. Bu da MD yönteminin bütün sıcaklıklarda efektif arıtım sağladığını göstermektedir.

### 1.15.3 İletkenlik Giderimi

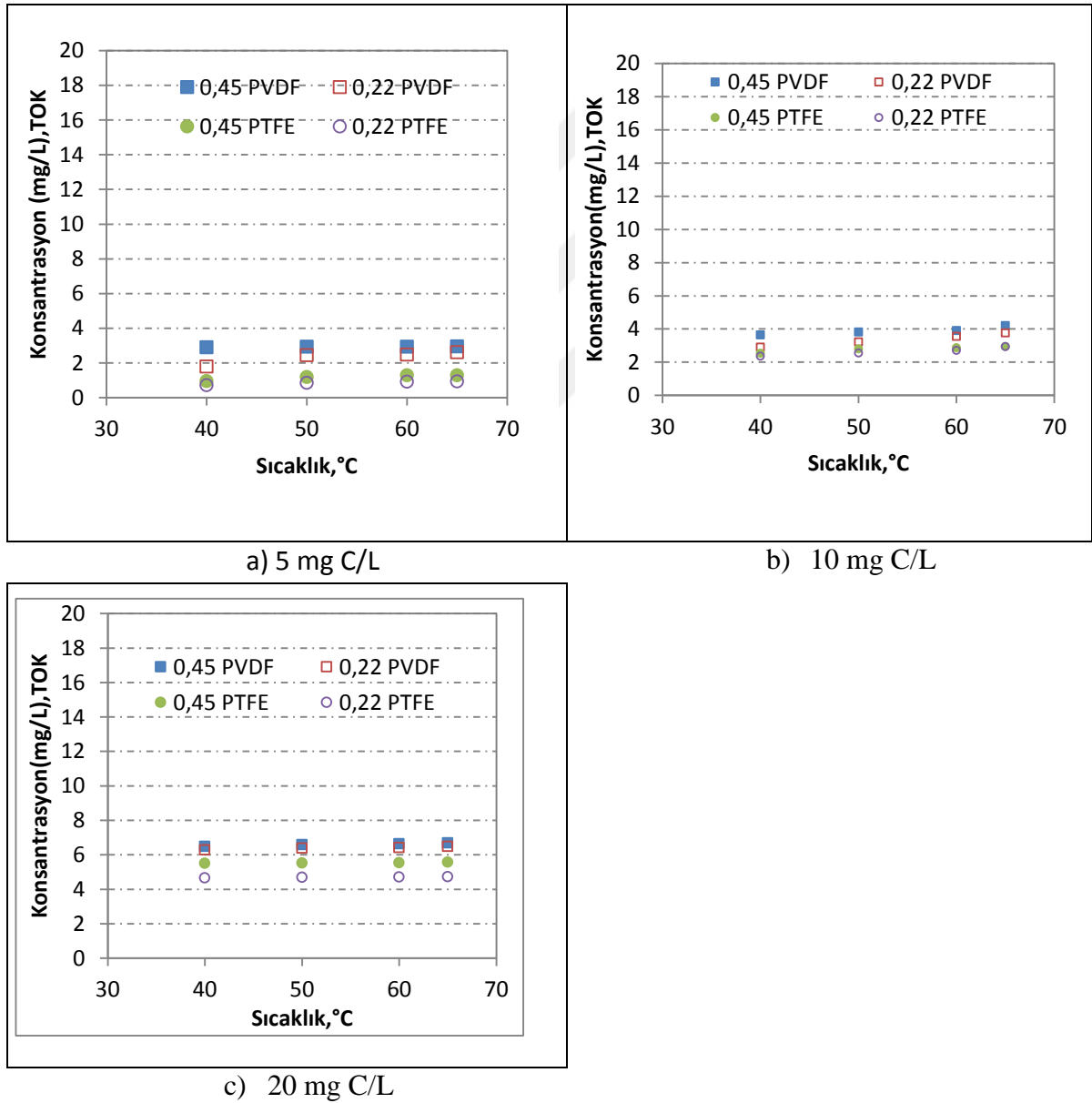
5-10-20 mg/L C, 1.000 ppb As(III) içeren sentetik suyun giriş iletkenlik değeri iletkenlik ölçer ile ölçülmüştür. İletkenlik değeri ölçülen sentetik suyun membran distilasyon yöntemiyle arıtımı sonucunda oluşan iletkenlik değeri aşağıdaki gibidir.



Şekil 0.12 1.000 µg/L As(III) ve 5, 10 ve 20 mg C/L konsantrasyonunda iletkenlik giderimi 5, 10, 20 mg/L C içeren 1.000 µg/L As(III) çözeltisinin iletkenlik değerleri ölçülmüştür. Ölçümü yapılan üç ayrı çözelti membran distilasyon yöntemiyle arıtılması neticesinde yüksek verimde iletkenlik giderimi saptanmıştır. Mebran distilasyon yönteminin bütün sulu çözeltilerde efektif olduğu tespit edilmiştir.

#### 1.15.4 Toplam Organik Karbon (TOK) Giderimi

5-10-20 mg/L C'ü bulunan 1.000 ppb As(III)'lü suyun membran distilasyon yöntemiyle arıtımı ile TOK giderimi aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



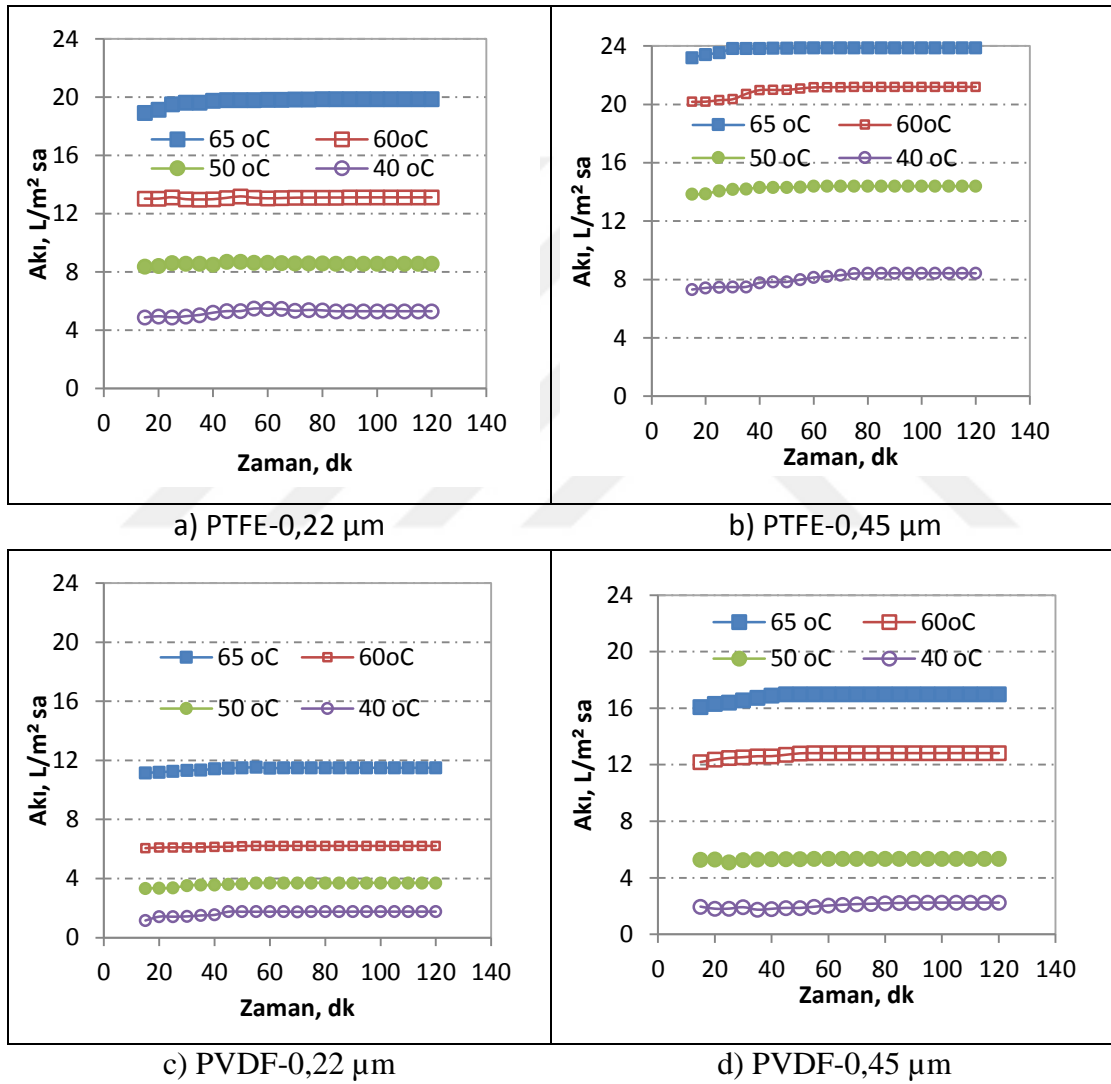
Şekil 0.13 1.000 µg/L As(III) ve 5, 10 ve 20 mg C/L konsantrasyonunda TOK giderimi

MD yönteminin TOK gideriminde fizibilitesi incelendiğinde; prosesteki artırım veriminin 40,1-79,2% arasında olduğu gözlenmiştir.

## 1.16 Fe(III) İlaveli Sentetik Çözeltiden Arsenik Giderimi

### 1.16.1 Akı

2,5 mg/L Fe(III) ilave edilen 1.000 µg/L As(III) konsantrasyonundaki sentetik suyun MD prosesi yöntemiyle arıtımında oluşan akı miktarları aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.

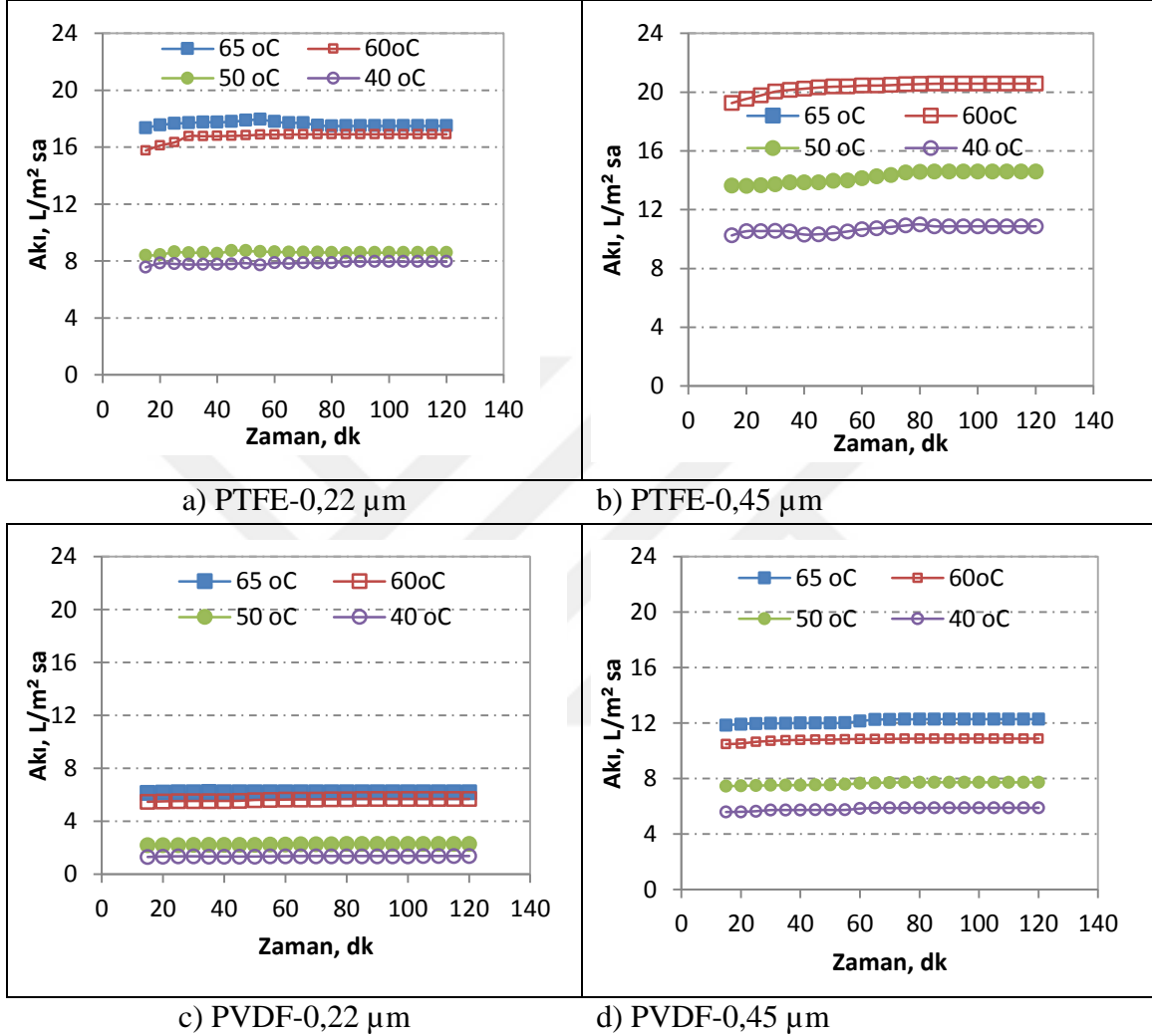


Şekil 0.14 1.000 µg/L As(III) ve 2,5 mg/L Fe(III) konsantrasyonunda akı-zaman değişimi

Bu çalışmada 1.000 µg/L arsenit içeren içme suyuna 2,5 mg/L Fe(III) olacak şekilde FeCl<sub>3</sub> 6H<sub>2</sub>O ilave edilmiştir. Bu deneysel çalışmada membran distilasyon prosesinde Fe(III) konsantrasyonunun akı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sıcaklık arttıkça buhar basıncı

artışından dolayı membran akısında artış meydana gelmiştir. PTFE materyalindeki membranların akısının PVDF membranların akısına göre daha fazla olduğu görülmüştür.

5 mg/L Fe(III) eklenen 1.000 µg/L As(III) konsantrasyonundaki sentetik suyun MD prosesi yöntemiyle artımında oluşan akı miktarları aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.

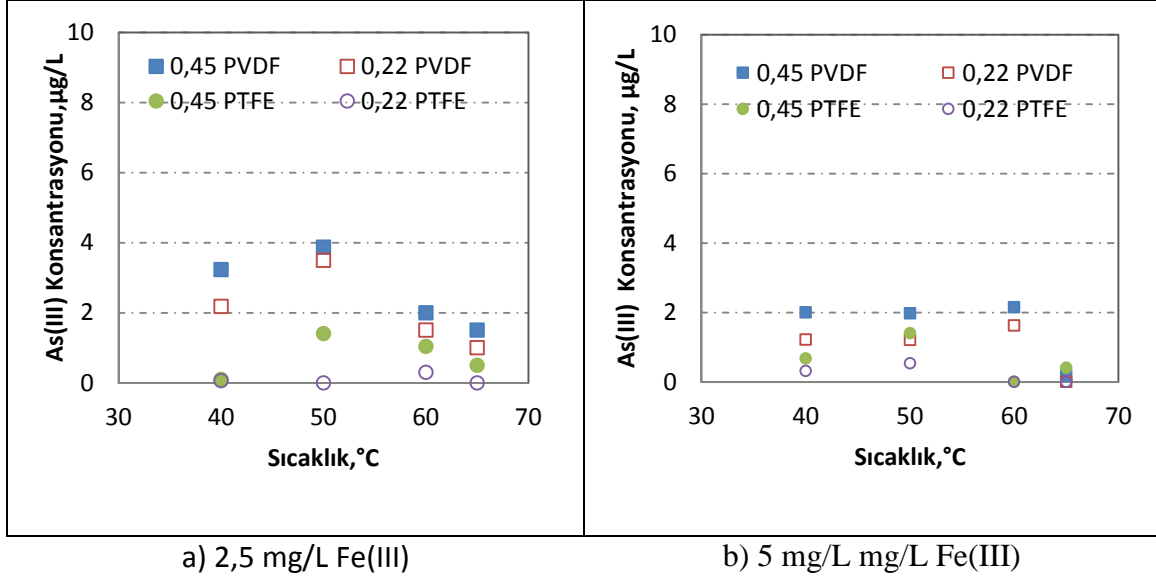


Şekil 0.15 1.000 µg/L As(III) ve 5 mg/L Fe(III) konsantrasyonunda akı-zaman değişimi

1.000 µg/L arsenit ile kirlenmiş içme suyuna konsantrasyonu 5 mg/L Fe(III) olacak şekilde, FeCl<sub>3</sub> 6H<sub>2</sub>O çözeltisi ilave edilmiştir. Laboratuvar şartlarında hazırlanan bu su, membran distilasyon prosesinde ham su olarak kullanılmıştır. Fe(III) konsantrasyonundaki artış, membran gözeneklerinin tıkanmasıyla akıda azalmaya sebep olmuştur.

### 1.16.2 Arsenik Giderimi

2,5-5 mg/L Fe(III) ve 1.000 µg/L As(III) konsantrasyonuna sahip sulardan As(III) giderimi aşağıdaki gibidir.

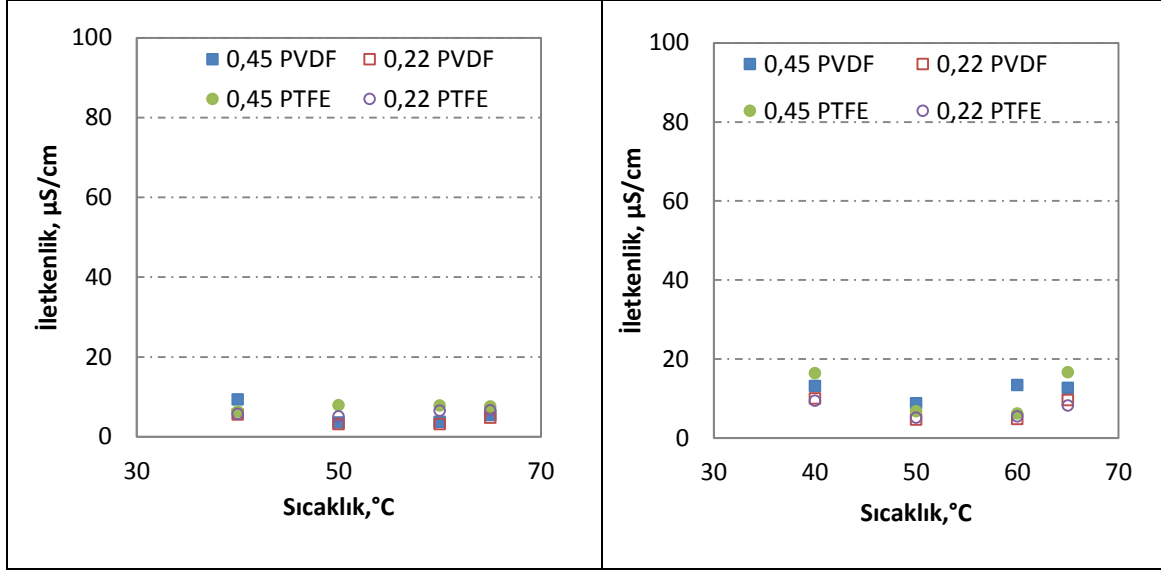


Şekil 0.16 2,5 ve 5 mg/L Fe(III)'lü 1.000 µg/L As(III) içeren sentetik suyun artırılarak giderimi

1.000 µg/L As(III) çözeltisine 2,5 ve 5 mg/L konsantrasyonunda Fe(III) olacak şekilde FeCl<sub>3</sub> 6H<sub>2</sub>O çözeltisi eklenmiştir. İki farklı konsantrasyona sahip Fe(III) çözeltisi proste giriş suyu olarak kullanılmıştır. Fe(III) ilave edilen çözeltinin membran distilasyon yöntemiyle arıtımında daha yüksek verimde arsenik arıtımı gerçekleşmiştir. Bunun sebebi gözeneklerdeki arsenik ve Fe(III) birikimidir. Bu sayede membran gözenek çapı küçülmekte ve membran daha seçici davranmaktadır.

### 1.16.3 İletkenlik Giderimi

2,5 mg/L ve 5 mg/L Fe(III) konsantrasyonundaki suyun arıtımıyla ulaşılan iletkenlik değerleri aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



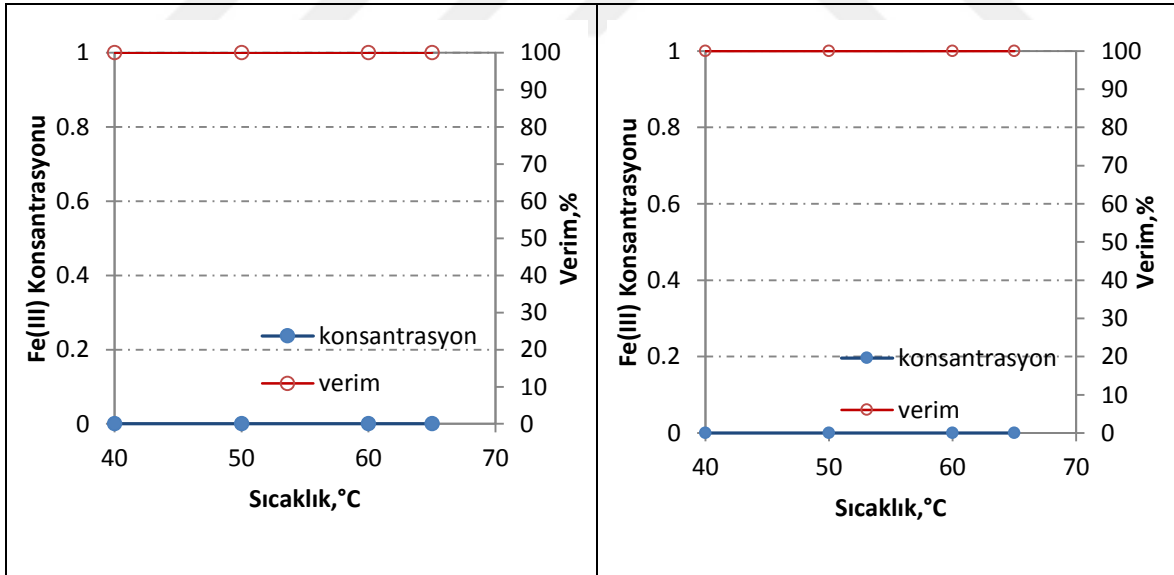
a) 2,5 mg/L Fe(III)

b) 5 mg/L Fe(III)

Şekil 0.17 1.000  $\mu\text{g/L}$  As(III) ve 2,5 ve 5 mg/L Fe(III) konsantrasyonlarında sudan iletkenlik giderimi

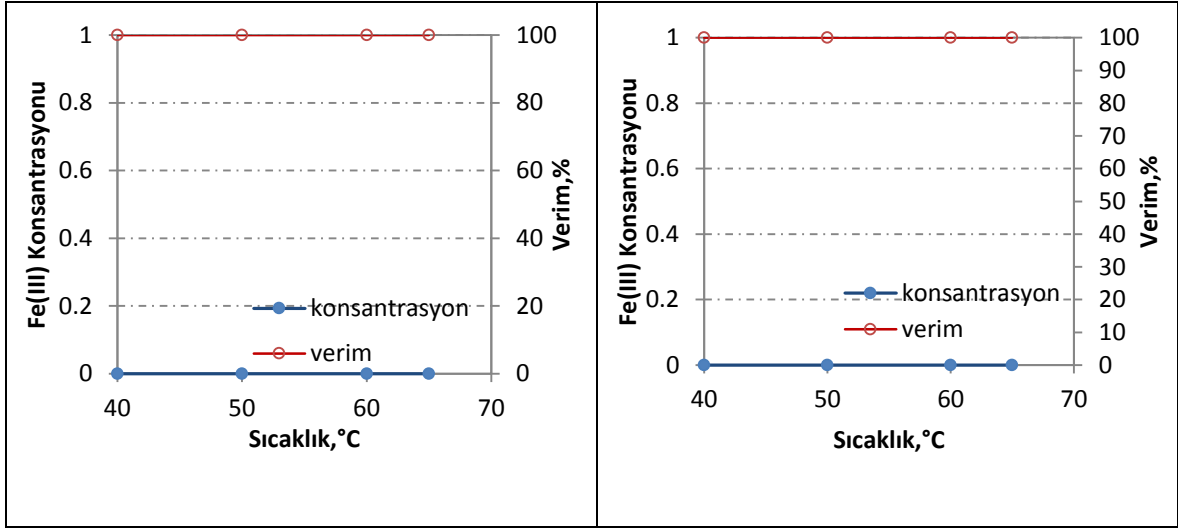
#### 1.16.4 Fe(III) Giderimi

2,5 mg/L Fe(III) 1.000 ppb As(III) konsantrasyonundaki sentetik suyun arıtımı aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



a) PTFE-0,22  $\mu\text{m}$

b) PTFE-0,45  $\mu\text{m}$



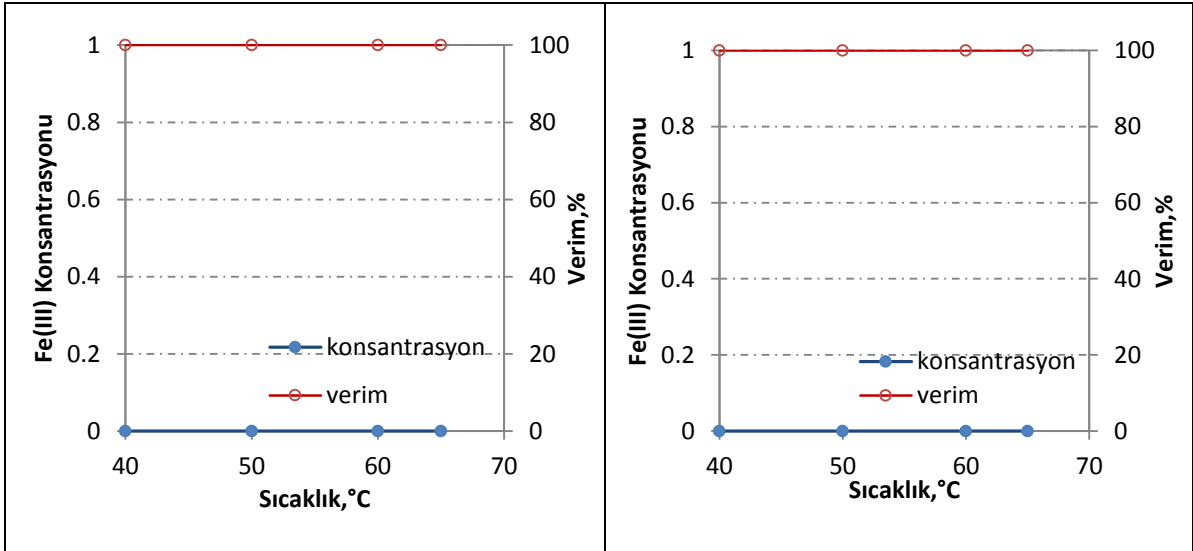
c) PVDF-0,22 µm

d) PVDF-0,45 µm

Şekil 0.18 1.000 µg/L As(III) ve 2,5 mg/L Fe(III) konsantrasyonunda demir giderimi

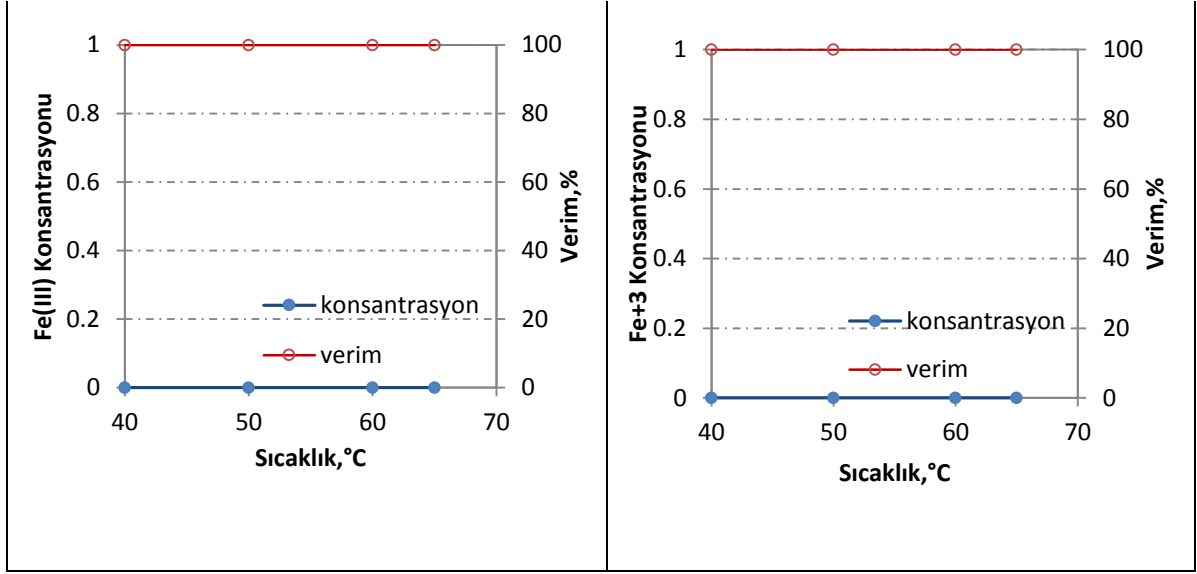
1.000 µg/L As(III) içeren içme suyuna 2,5 mg/L Fe(III) konsantrasyonunda olacak şekilde FeCl<sub>3</sub> 6H<sub>2</sub>O ilave edilmiştir. DCMD yönteminde Fe(III)'ün giderimi her bir membran türünde ve herbir sıcaklık değerinde %100 sağlanmıştır. MD metodu Fe(III) giderimi için etkili bir yöntemdir.

5 mg/L Fe(III) ilave edildiğinde 1.000 ppb As(III)'lü sentetik suyun arıtımıyla gerçekleşen Fe(III) giderim grafikleri aşağıdaki gibidir.



a) PTFE-0,22 µm

b) PTFE-0,45 µm



c) PVDF-0,22 µm

d) PVDF-0,45 µm

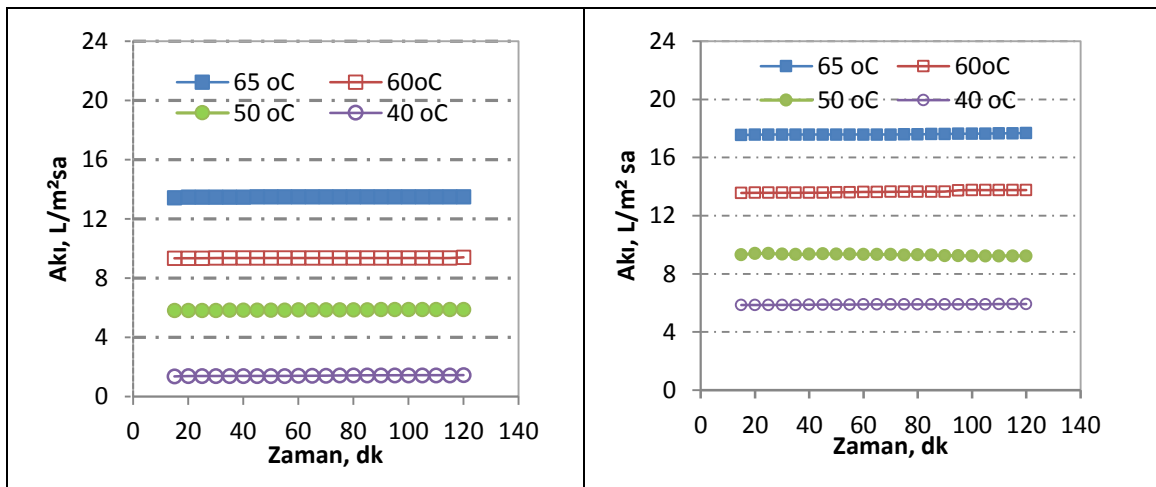
Şekil 0.19 5 mg/L Fe(III) 1.000 µg/L As(III) içeren sentetik suyun 0,22-0,45 PTFE ve 0,22-0,45 PVDF membranıyla arıtılarak giderimi

5 mg/L Fe(III) konsantrasyonuna ayarlanmış çözelti 40, 50, 60 ve 65 °C'de iki farklı boyuttaki gözenekli PTFE ve PVDF membranlarıyla arıtılmıştır. Her bir membranda ve dört farklı sıcaklık değerinde arıtılan çözeltilerden 100% oranında verim elde edilmiştir.

### 1.17 Tuz İlaveli Sentetik Çözeltiden Arsenik Giderimi

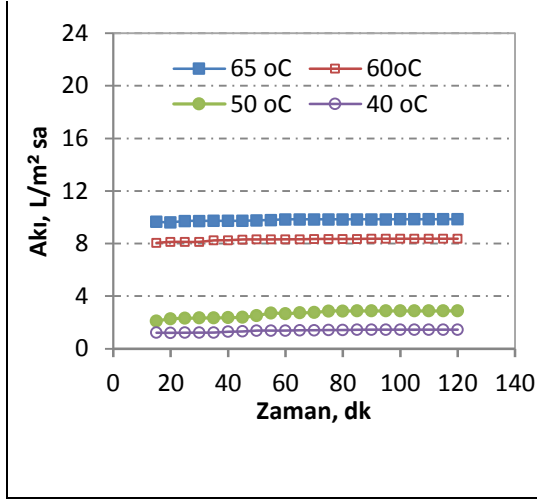
#### 1.17.1 Akı

Tuz ilavesiyle iletkenliği 2.500 µS/cm'e ayarlanan 1.000 µg/L As(III) içeren sentetik suyun arıtımıyla oluşan akı miktarı aşağıdaki gibidir.

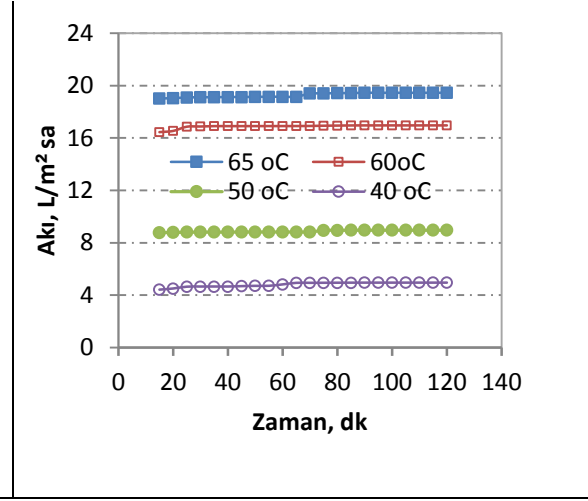


a) PTFE-0,22 µm

b) PTFE-0,45 µm



c) PVDF-0,22 µm

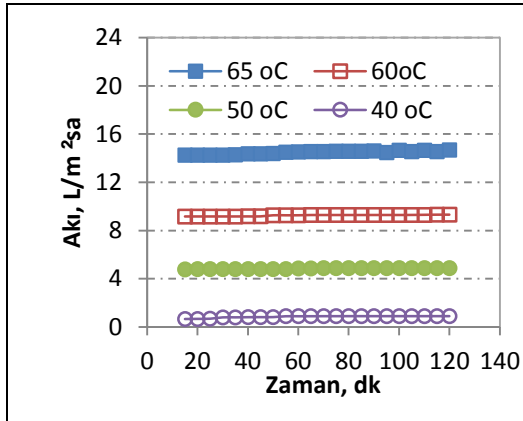


d) PVDF-0,45 µm

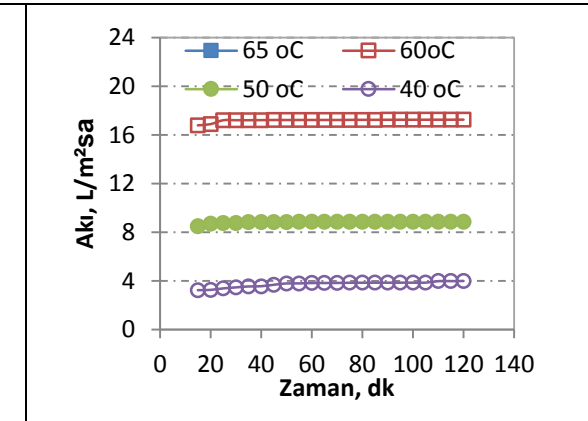
Şekil 0.20 1.000 µg/L As(III) konsantrasyonunda ve 2.500 µS/cm iletkenlik değerinde akı-zaman değişimi

Farklı iletkenlik değerlerindeki arsenikli su ile çalışılarak, iletkenliğin akı üzerinde etkisi araştırılmıştır. İletkenliğin artması, suyun buhar basınç kuvvetini azaltmaktadır. Dolayısıyla iletkenlik arttıkça membran akısında düşüş meydana gelmektedir.

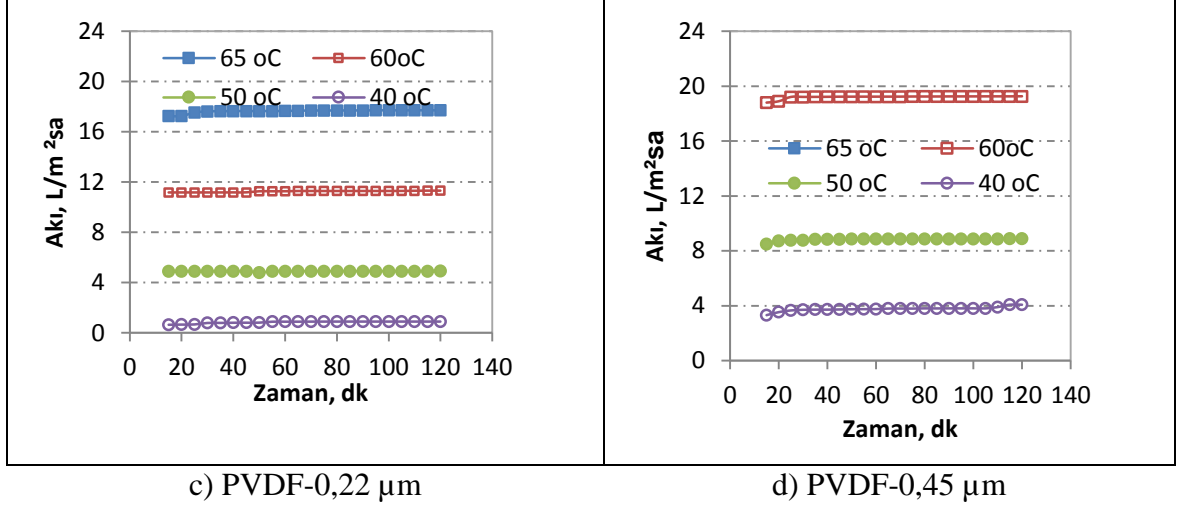
Sofra tuzu ilave edilerek 5.000 µS/cm iletkenliğe ulaşan 1.000 µg/L As(III) konsantrasyonundaki sentetik suyun artımıyla oluşan akı miktarı aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



a) PTFE-0,22 µm



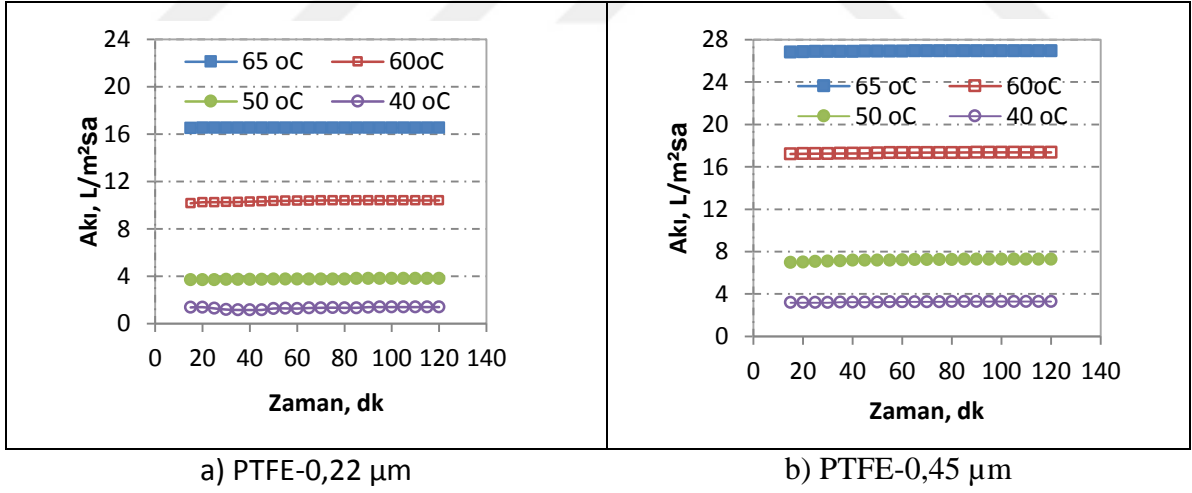
b) PTFE-0,45 µm

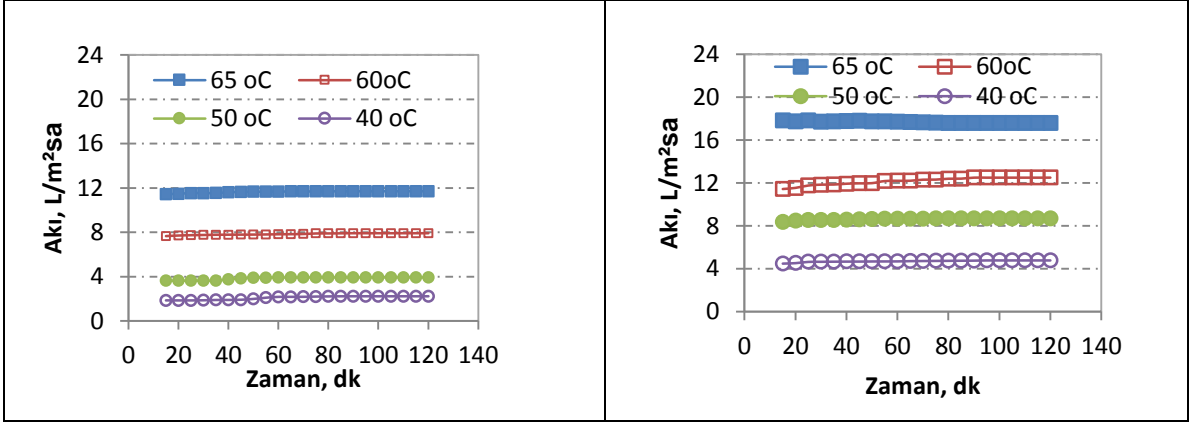


Şekil 0.21 1.000 µg/L As(III) konsantrasyonunda ve 5.000 µS/cm iletkenlik değerinde akı-zaman değişimi

1.000 µg/L konsantrasyonundaki As(III) içeren suya, iletkenliğinin 5.000 µS/cm olması için sifra tuzu ilave edilmiştir. Bu kapsamda, farklı iletkenlikteki su üzerinde akının etkisi araştırılmıştır.

10.000 µS/cm iletkenlikteki 1.000 µg/L As(III) giriş konsantrasyonundaki sentetik suyun artımıyla oluşan akı miktarı aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.





c) PVDF-0,22 µm

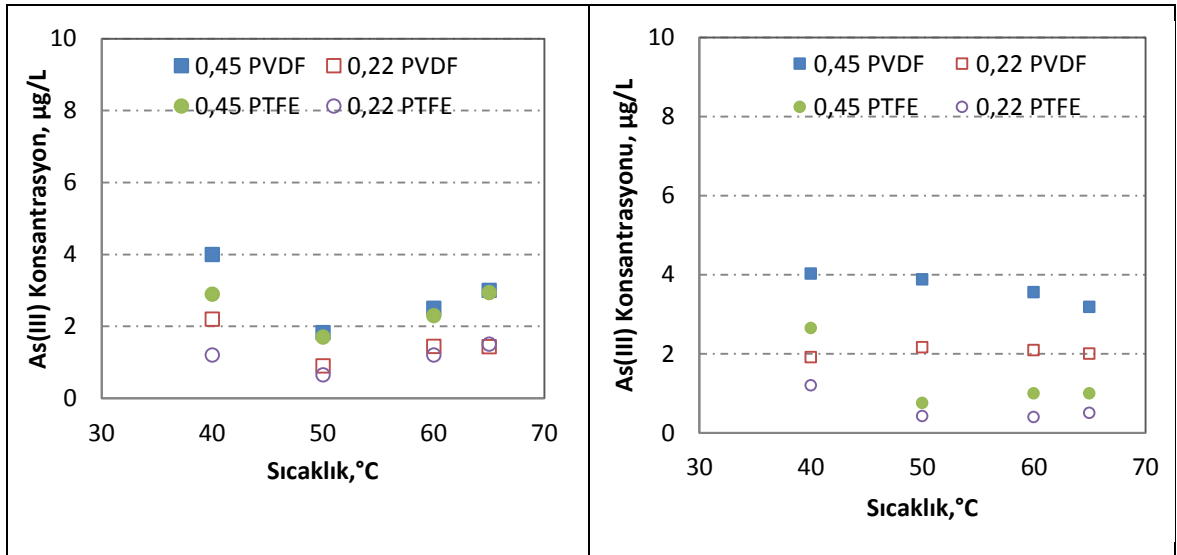
d) PVDF-0,45 µm

Şekil 0.22 1.000 µg/L As(III) konsantrasyonunda ve 10.000 µS/cm iletkenlik değerinde akı-zaman değişimi

1.000 µg/L As(III) konsantrasyonlu içme suyunun iletkenliği 10.000 µS/cm'e ayarlanmıştır. Bunun için çözeltiliye sofr tuzu ilave edilmiştir. Çözelti membran distilasyon prosesine dahil edildiğinde akı miktarında düşüş meydana gelmiştir. İçme suyunda meydana gelen buhar basıncındaki düşüş, membran distilasyon prosesinde akı kaybına sebep olmuştur. PTFE membran akısı, PVDF membran akısına kıyasla daha fazladır.

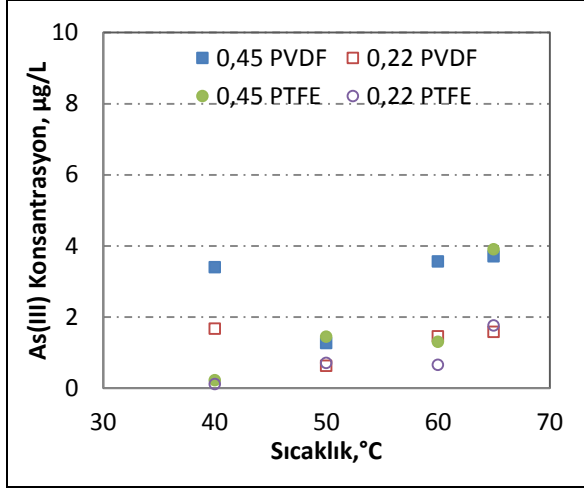
### 1.17.2 Arsenik Giderimi

2.500-5.000-10.000 µS/cm iletkenlikte 1.000 µg/L As(III) konsantrasyonundaki sulardan As(III) giderimi aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



a) 2.500 µS/cm

b) 5.000 µS/cm



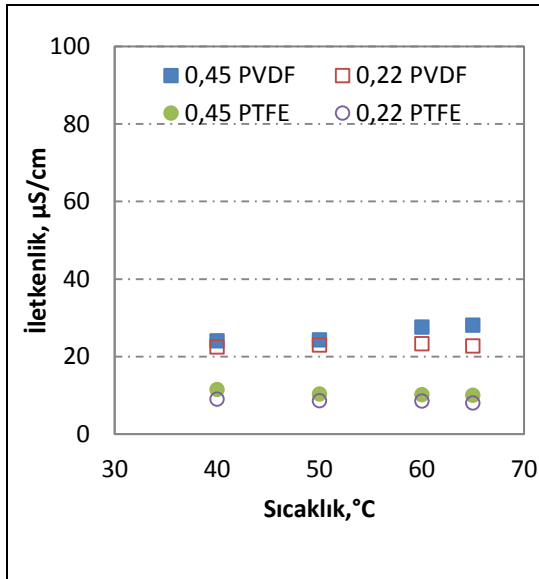
c) 10.000 µS/cm

Şekil 0.23 1.000 µg/L As(III) ile 2.500, 5.000 ve 10.000 µS/cm iletkenlik değerlerinde arsenik giderimi

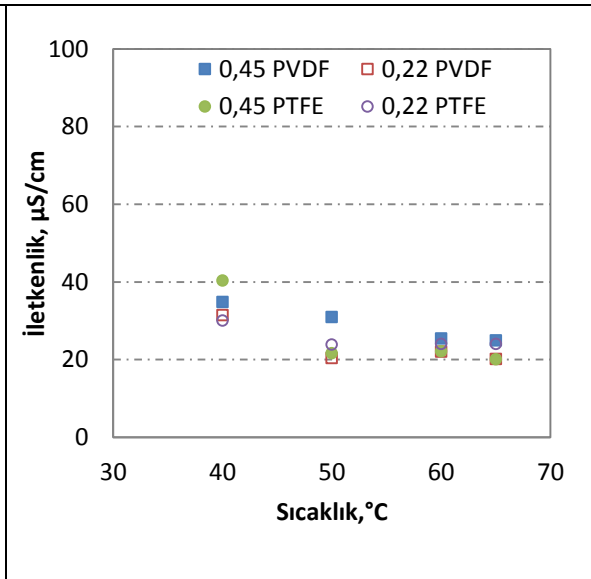
DCMD yöntemi ile İçme suyundan As(III) giderimi önemli ölçüde yüksek verimde gerçekleşmektedir. Bu çalışmada üç ayrı iletkenlik değerine sahip 1.000 µg/L konsantrasyonundaki As(III) çözeltisi giriş suyu olarak kullanılmış ve çözeltinin proses çıkışında yönetmelik sınır değer konsantrasyonunun altına düştüğü gözlenmiştir.

### 1.17.3 İletkenlik Giderimi

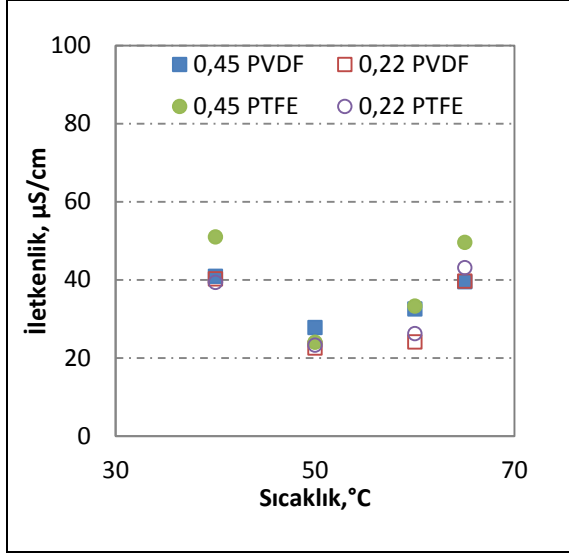
2.500 µS/cm iletkenlikteki 1.000 ppb As(III)'lü suyun membran distilasyon yöntemiyle arıtımıyla giderilen iletkenlik miktarı aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



a) 2.500 µS/cm



b) 5.000 µS/cm



c) 10.000 µS/cm

Şekil 0.24 1.000 µg/L As(III) ve 2.500, 5.000 ve 10.000 µS/cm iletkenlik değerlerinde iletkenlik giderimi

Desalinizasyon uygulamasında membran distilasyon yönteminin uygulanabilirliği bu çalışmada araştırılmıştır. Bu kapsamda içme suyunun içerisine tuz ilavesi yapılmıştır. İletkenlik ölçer ile suyun iletkenlik değeri 2.500, 5.000, 10.000 µS/cm'e ayarlanmıştır. DCMD yöntemi ile suyun arıtılması neticesinde saf su niteliğinde iletkenlik değerleri ölçülmüştür. Bu da membran distilasyon yöntemiyle yüksek düzeyde arıtım gerçekleştirileceği anlamına gelmektedir. Yani membran distilasyon yöntemi sudan iletkenlik gideriminde etkili bir yöntemdir.

#### 1.17.4 Değerlendirme

##### İletkenlik Giderimi

İletkenlik sudaki inorganik çözülmüş katılardan etkilenmektedir. Bu çalışmada hem As(III) hem de As(V)'te genel olarak 90%'nın üzerinde iletkenlik giderim verimi elde edilmiştir. Düşük por çaplı (0,22 µm) membranların iletkenlik değerleri daha düşük olmuştur. Süzüntüdeki düşük iletkenlik değeri, As de dahil olmak üzere çözülmüş iyonların hidrofobik membran tarafından tutulduğunu göstermektedir. Normal şartlarda, besleme suyundaki buharlaşmayan tüm maddeler hidrofobik membran porlarından geçemez ve besleme tarafında tutulur. 1.000 µS/cm'den daha düşük olan giriş iletkenlik değeri nedeniyle giderim verimi yüksek gözükmemekte (90% civarı), ancak bazı denemelerde çıkış iletkenlik değeri 10 µS/cm'ye kadar düşmektedir. Besleme sıcaklığının artması süzüntünün iletkenliğinde

ekspansiyel bir artışa neden olmaktadır. Chen ve diğ., 2013; tarafından yapılan çalışmada, besleme suyunun iletkenliği ve süzüntü akısı arasında güçlü bir negatif korelasyon olduğu ve akının besleme sıcaklığı ile bağlantılı olduğu belirtilmiştir. Besleme sıcaklığı 40 °C'den 60 °C'ye ( $\Delta T=30$  °C'den 50 °C'ye) çıkarıldığında süzüntünün iletkenliği neredeyse 2 kat artmıştır. Bunun nedeninin iletkenliğe katkı sağlayan bazı maddelerin buharlaşabilir olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, yüksek sıcaklık, çözülmüş iyonların mobilitesini artırmaktadır ve membranın yapısına etki ederek hidrofobikliğini ve por çapını etkilemektedir. Bunun sonucunda bazı çözülmüş iyonlar membran porlarından geçerek süzüntüdeki iletkenliği artırmaktadır.

Çalışmanın ikinci kısmında yüksek tuzluluğun akıya ve As giderim verimine etkisinin incelenmesi amacıyla besleme suyunun iletkenliği tuz ilavesiyle 2.500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 5.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ve 10.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 'ye çıkarılmıştır. Yüksek iletkenliğin As giderim verimini bir miktar azaltmasına rağmen bunun ihmal edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür. Boubakri ve diğ., 2015; tarafından yapılan çalışmada, borla kontamine olmuş deniz suyundan MD ile bor gideriminde işletme parametrelerinin bor giderimine etkisi incelenmiştir. Besleme tuz konsantrasyonunun süzüntü akısında ve bor gideriminde kayda değer bir etkisi olmadığı görülmüştür. Süzüntünün iletkenliği besleme tuz konsantrasyonundan bir miktar etkilenmiştir. Bunun nedeninin tuzun membran yüzeyine birikmesinin sonucu olarak tuzlu suyun süzüntüye difüzyon mekanizmasıyla karışması olduğu düşünülmektedir. Ancak çalışmada kullanılan membranların tuz rejeksiyonu iyi olmuş ve süzüntünün iletkenlik değeri çok düşük olmuştur.

Besleme suyuna Fe(III) ve C ilave edildiğinde süzüntünün iletkenlik değeri daha düşük olmuş ve daha yüksek giderim verimi elde edilmiştir. 40 ve 50 °C çalışma sıcaklıklarında süzüntünün iletkenlik değeri 5  $\mu\text{S}/\text{cm}$  olarak ölçülmüştür ve giderim verimi 99%'un üzerindedir. Besleme sıcaklığı 60 °C'ye çıkarıldığında iletkenlik giderim verimi düşmüştür. Aynı şekilde daha büyük gözenek çaplı membran kullanıldığında iletkenlik giderim verimi daha düşük olmuştur. Besleme suyuna Fe(III) veya C eklendiğinde bu maddeler, As(III) ve diğer iletkenlik oluşturan iyonlarla birlikte floklar oluşturarak çökelmektedir. Besleme tankında çökelen bu bileşikler membranın aktif yüzeyine ulaşamamaktadır. Bu da membran porlarından geçen iyon miktarını azaltmakta ve süzüntünün iletkenlik değerinin daha düşük olmasını sağlamaktadır.

### **Arsenik Giderimi**

Çalışmada DCMD ile besleme suyundaki As(III), As(V) ve diğer buharlaşmayan içerikler konsantre akımında tutulmuştur. Tüm testlerde süzüntülerdeki minimum As konsantrasyonları elde edilmiştir. Kullanılan membranların hidrofobik doğası gereği, su ve buharlaşmayan bileşikler membrandan geçememiştir. Teorik olarak membrandan sadece su buharı geçebilmekte ve modülün soğuk kısmında buhar yoğunlaşmaktadır. Konvansiyonel filtrelerde ve membran filtrasyonunda boyutları küçük olan As partikülleri basınç uygulandığında membran bariyerinden geçerek süzüntü akımına karışabilmektedir. MD prosesinde basınç gerekmemekte ve hidrofobik membran, suyun ve içeriğindeki bazı partiküllerin geçmesini önlemektedir. Buhar fazında sadece buharlaşabilen moleküller membrandan geçebilmektedir. As(III) ve As(V) gibi buharlaşmayan bileşikler membran porlarından geçememekte ve konsantre akımında kalmaktadır. Criscuoli ve diğ., 2012; tarafından yapılan çalışmada, VMD ile As giderimi incelenmiş ve benzer sonuçlar elde edilmiştir. Tüm süzüntülerde As konsantrasyonu tespit edilebilir değerlerin altında olmuştur. VMD’de membrandan sadece su gibi buharlaşabilen maddelerin geçebildiği, As gibi buharlaşmayan maddelerin ise tutulduğu belirtilmiştir.

Yapılan çalışmada tüm süzüntülerde neredeyse 100% As(III) ve As(V) giderim verimi elde edilmiştir. Criscuoli ve diğ., 2012; tarafından da belirtildiği gibi rejeksiyon verimi As’nin oksidasyon durumuna (As(III) ve As(V)) bağlı değildir. Süzüntülerde As konsantrasyonu WHO tarafından belirlenen 10 µg/L’nin altındadır. Birçok araştırmacı (Criscuoli ve diğ., 2012; Quo ve diğ., 2009; Manna ve diğ., 2010; Pal ve diğ., 2010; Manna ve diğ., 2016) MD ile As gideriminde 99% üzerinde As giderim verimi elde etmiş ve süzüntülerin As konsantrasyonları WHO’nun limit değerinin altında olmuştur. Süzüntüye geçen ihmal edilebilir konsantrasyonlarda As’nin membrandan geçmesinin nedeni membran porlarının üniform olmayan yapısı ve yüksek sıcaklıklarda membranın muhtemel denatürasyonudur. Sonuç olarak MD ile As, arseniti arsenata dönüştürmeye gerek kalmadan tek proses ile arıtılmıştır. Literatürde As(V) çeşitli tekniklerle giderilmekte ancak As(III) giderimi zor olmakta ve As(III)’in önce arsenata oksidasyonu ve sonrasında giderilmesi gerekmektedir [61], [62]. Ancak bu da ayrı bir kirliliğe neden olmakta ve arıtma maliyetini yükseltmektedir. Elcik ve diğ., 2013; tarafından yapılan çalışmada, As(III)’ün giderimi için oksidasyon sonrası farklı ultrafiltrasyon membranları kullanılmış ve 96%’e varan giderim verimi elde edilmiştir. As(V)’in demirle koagülasyonunun membranlarda arsenik rejeksiyonunu önemli ölçüde artırdığı gözlenmiştir.

Besleme suyundaki As konsantrasyonu As(III) ve As(V) rejeksiyonunu etkilememiştir. 100 µg/L ve 1.000 µg/L besleme konsantrasyonlarında süzüntülerdeki As konsantrasyonları aynı olmuştur. Manna ve diğ., 2016; tarafından yapılan çalışmada da aynı sonuca ulaşılmıştır. VMD ile yaptıkları çalışmada besleme suyunda 500 ile 2.000 µg/L arasında değişen As konsantrasyonlarında her membran seti için 6 saat çalışılmış ancak As rejeksiyon veriminde önemli bir varyasyon görülmemiştir. 6 saat sonunda membranda ıslanma görülmemiş ve özelliklerini kaybetmeden uzun süre kullanılabilceği belirtilmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmında besleme suyu iletkenliği 2.500, 5.000 ve 10.000 µS/cm'ye yükseltilmiş ancak arsenik giderim veriminde çok fazla değişiklik olmamıştır. Tüm arıtma koşullarında 99%'a varan As(V) giderimi elde edilmiştir. Boubakri ve diğ., 2015; tarafından yapılan çalışmada, DCMD ile bor giderimi yapılmış ve aynı sonuçlar elde edilmiştir. Hidrofobik membranlar uçucu olmayan çözülmüş maddeleri geçirmemektedir. Bunun sonucu olarak, besleme çözeltisindeki tuz konsantrasyonunun As giderim performansına çok önemli bir etkisi olmamaktadır. Bazı deney setlerinin süzüntülerinde As(III) konsantrasyonu ortalama 3,5 µg/L'dir. Yüksek sıcaklık (60 °C ısıtma sıcaklığı), membranın por yapısını etkileyebilmekte ve bazı küçük partiküllerin membran porlarından geçerek süzüntü akımına karışmasına neden olabilmektedir.

Besleme çözeltisine Fe(III) ve C ilave edildiğinde daha yüksek As(III) giderim verimi elde edilmiştir. En iyi giderim düşük sıcaklıkta, besleme çözeltisine Fe(III) ilave edildiğinde elde edilmiş ve süzüntüde As(III) tespit edilememiştir. Literatürde MD ile yapılan çalışmaların çoğunda As gideriminde 99% üzerinde verim elde edilmiş ve süzüntülerdeki As konsantrasyonu WHO ve TS-266'nın limit değerinin altında olmuştur [63], [64], [65], [66], [67].

Besleme çözeltisine ilave edilen C ve Fe(III), As(III) partikülleriyle floklar oluşturarak çökelmektedir [15], [61]. Flok oluşumuyla membran modülüne beslenen As(III) miktarı azalmaktadır. Bu da konsantrasyon polarizasyonunu ve membran tıkanmasını ciddi oranda azaltmaktadır. Ancak besleme sıcaklığının kontrol altında tutulması gerekmektedir. Yüksek sıcaklıkta flokların stabilizasyonu bozulabilir ve bazı partiküller süzüntüye karışabilir. Her membran seti için 6 saat işletme boyunca As(III) rejeksiyon veriminde herhangi bir varyasyon görülmemiştir. Bu da membranın ıslanmadığını ve özelliklerini kaybetmeden uzun süre kullanılabilceğini göstermektedir. [67].

## Membran Akısı

MD ayırma performansı farklı parametrelerle ifade edilebilir ancak en önemli parametre akıdır ve akı sistemin implantasyon maliyeti ve fizibilitesi üzerinde doğrudan etkilidir.

Sıcaklık, besleme pH'ı, besleme konsantrasyonu ve debisi, membran özellikleri, işletme süresi ve tıkanma gibi parametreler akıyı etkilemektedir [65], [66], [68].

$\Delta T$  sıcaklığındaki artış akıyı artırmıştır. Criscuoli ve diğ., 2012; VMD ile As arıtımında besleme sıcaklığı 20 °C'den 40 °C'e çıkarıldığında akı 3 kg/m<sup>2</sup>.s'den 12.5 Kg/m<sup>2</sup>.s'ye yükselmiştir. Sıcaklığa dayalı bir proses olan MD'de akı, besleme sıcaklığının yanında membran yapısı ve por çapı boyutundan da etkilenmektedir. Yüksek sıcaklık buhar oluşumunu artırmakta ve bunun sonucu olarak sürücü kuvveti artırmaktadır [68]. Membran yapısı ve por çapından bağımsız olarak 60 °C besleme sıcaklığında 40 ve 50 °C besleme sıcaklıklarına göre daha yüksek akı gözlenmiştir. Ancak yüksek sıcaklık besleme suyundaki bazı istenmeyen kimyasalların buharlaşmasına ve membrandan geçerek süzüntü kalitesini etkilemesine neden olmaktadır. Ayrıca yüksek sıcaklık membranın bütünlüğünü etkileyebilmektedir bu yüzden yüksek sıcaklığa dayanıklı membranların kullanılması gerekmektedir. Düşük besleme sıcaklığında sistemin akısı düşük olmakta ancak daha yüksek kalitede süzüntü elde edilebilmektedir. Büyük por çaplı membranlardan buhar geçişi kolaylaşmakta ve daha fazla süzüntü oluşmaktadır. Diğer yandan inorganik çözülmüş katılar gibi küçük partiküller yüksek konsantrasyonlarda porları zorlayarak geçebilmekte ve bu da süzüntü kalitesini etkilemektedir. Düşük por çapında akı daha düşük olmuş ancak süzüntü kalitesi daha iyi olmuştur. Her membran seti için 6 saatlik çalışma süresi boyunca akı stabil kalmıştır ve membran tıkanması veya ıslanması gözlenmemiştir. Criscuoli ve diğ., 2012; tarafından yapılan çalışmada, arsenik içeren sentetik suyun distilasyonunda da membran tıkanması gözlenmemiştir. Bhattacharya ve diğ., 2014 ve Manna ve diğ., 2016; tarafından yapılan PTFE membranlarıyla krom (VI) ve As giderimi için yapılan çalışmalarda aynı membran davranışları görülmüştür. Manna ve diğ., 2016; tarafından yapılan çalışmada, 40 saatlik çalışma süresi boyunca akıda düşme meydana gelmemiştir. MD prosesinde membran akısının düşmeye başlamadan önce uzun saatler boyunca stabil kaldığı düşünülmektedir [69]. MD prosesinde oluşan sıvı-buhar arayüzeyi besleme suyundaki konsantrasyona bağlı olarak akıda meydana gelen hızlı düşüşü azaltmaktadır. Ek olarak, tuzluluktaki artış ile akıda bir miktar yükselme görülmüştür. Ancak yüksek tuz konsantrasyonlarında, tuz membran yüzeyine birikebilmekte ve membran tıkanmasına neden olmaktadır. 10.000 µS/cm tuz

konsantrasyonu ile yapılan çalışmada membran akısında düşme görülmüştür. Besleme suyundaki tuz konsantrasyonundaki artış viskozite gibi bazı fiziksel ve kimyasal değişimlere neden olmaktadır. Bu da membran-sıvı arayüzeyini etkilemekte ve konsantrasyon polarizasyonu ile sıcaklık polarizasyonu oluşarak akıda düşmeye neden olmaktadır. Sonuç olarak, besleme sıcaklığı gibi işletme şartlarının yanında membran özellikleri ve besleme suyunun karakteristikleri de süzöntü kalitesini ve akıyı etkilemektedir.

Besleme çözeltisine Fe(III) ve C ilave edildiğinde akının daha yüksek olduğu görülmüştür. 60 °C besleme sıcaklığında PTFE 0,22 µm membranıyla yapılan çalışmada sadece As(III), As(III)+10 mg/L C ve As(III)+5 mg/L Fe(III) ilave edilen çözeltilerin akıları sırasıyla 7,85, 11,62 ve 16,76 L/m<sup>2</sup>.s olmuştur. Fe(III) ve C'un varlığında akının artması bu kimyasalların sedimentasyon gücünden meydana gelmektedir. Bunun nedeni Fe(III)'nin As(III) ile daha iyi koagülasyonudur. Besleme çözeltisine ilave edilen Fe(III) ve C, çözeltideki iyonlarla floklar oluşmakta ve bu floklar tankta çökelmektedir. Bu da modüle beslenen suyun daha az konsantre olmasına ve membran yüzeyinde birikme ve tıkanmanın daha az olmasını sağlamaktadır.

### **Fe(III) ve TOK Giderimi**

Fe(III) ve TOK kullanılan membranlar tarafından verimli bir biçimde tutulmuştur. Süzöntüde Fe(III) tespit edilememiştir. Metaller buharlaşamazlar, bu yüzden membran yüzeyinden sadece basınç uygulandığında geçebilirler. Fe(III) ve As(III) iyonları birlikte çökelerek tankta tutulmuştur. Ancak TOK yüksek sıcaklıklarda buharlaşabilmektedir. Çalışmada membran por çapının büyümesi ve besleme sıcaklığının artışı süzöntüdeki TOK konsantrasyonunun artışına neden olmuştur. Düşük besleme sıcaklığında süzöntüdeki TOK konsantrasyonu daha az olmaktadır. Yüksek sıcaklıkta besleme çözeltisinde bulunan TOK'un uçucu organik kısmı buharlaşabilmekte ve membrandan geçebilmektedir [70].

## BÖLÜM 5

### SONUÇLAR

Bu çalışmada, konvansiyonel arıtma sistemlerine göre daha etkili olan membran distilasyon prosesi tercih edilmiştir. Arsenik dünyada önemli bir problem oluşturmaktadır. Membran distilasyon prosesi ile içme suyundan arsenik giderim fizibilitesi araştırılmıştır. As(III), As(V), Fe(III), TOK, iletkenlik giderimi doğrudan temaslı MD yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. MD'da çeşitli gözenek boyutundaki PTFE ve PVDF'den imal edilen hidrofobik mikroporöz membranlar kullanılmıştır. Besleme çözeltisinin sıcaklığı 40 °C, 50 °C, 60 °C ve 65 °C'de olmak üzere dört farklı sıcaklık derecesine ayarlanarak sıcaklık farkının arıtmaya ve oluşan akı değerlerine etkisi araştırılmıştır. Bu proseste sıcaklık farkının oluşabilmesi için sirküle edilen soğuk su sıcaklığı 10 °C'e ayarlanmış bu sayede proseste buhar basıncı oluşturulmuştur. Oluşan su miktarı hassas terazi ile ölçülmüş ve akı değerleri ise bilgisayarda bulunan bir program yardımıyla takip edilmiştir.

- MD'da kullanılan membranların gözenek boyutunun, akı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. 0,22 µm ile 0,45 µm gözenek boyutuna sahip membranlarda oluşan akı mukayese edilecek olursa; 0,45 µm gözenek boyutundaki membranlarda oluşan akı miktarı 0,22 µm gözenek boyutundaki membranlarda oluşan akı miktarına göre daha fazladır.
- MD yöntemi uygulamasında sıcaklığın akıya etkisi incelenmiştir. Sıcaklık arttıkça akı miktarında artış gözlenmiştir. 27.9 L/m<sup>2</sup>sa maksimum akı değerine 65 °C sıcaklığındaki işletme şartlarında 0,45 µm gözenek çapındaki PVDF membranının kullanımıyla ulaşılmıştır. Besleme sıcaklığı soğutucunun kullanımıyla 10 °C'de tutulmuş böylece buhar basınç farkının artmasıyla herhangi bir basınç kuvvetine gerek duyulmamıştır. Bu da membran distilasyon yönteminde; diğer basınç sürürlü membran arıtma yöntemlerinde kullanılan basınçtan daha azına gereksinim duyulmuştur.

- Membran distilasyon modifikasyonunda iletkenliğin akı üzerindeki etkisi incelendiğinde; iletkenliğin artmasıyla akı miktarında artışın olduğu raporlanmıştır. İçmesuyunun 0,45 µm gözenek çapında PVDF membranıyla arıtımı sırasında oluşan akı miktarı 12.6 L/m<sup>2</sup>sa iken iletkenliği 5.000-10.000 µS/cm'e ayarlanan musluk suyunun arıtımıyla oluşan akı miktarının 0,45 µm gözenek çapındaki PVDF membranlar ile 27,9 L/m<sup>2</sup>sa değerine ulaştığı görülmüştür.
- Konvesiyonel membran arıtma sistemlerinde görülen akıda azalma, membran distilasyon prosesinde görülmemiştir. Membran distilasyon prosesinde akı stabildir. Yani membranlarda kirlenme potansiyeli düşüktür.
- Hidrofobik membranların kullanımıyla 100% oranında membranların arseniği tuttuğu gözlenmiştir. Membranların arseniği tutması ile konsantre suyuunda bulunan arseniğin düşük konsantrasyonlarda olduğu raporlanmıştır.
- Membranlar aracılığıyla 100% oranda Fe(III) tutulmuştur. Oluşan süzüntüde demir saptanamadığından demir konsantrasyon standartlarını sağlamaktadır.
- TOK gideriminde işletme şartlarının önem arz ettiği anlaşılmıştır. 50 °C işletme şartlarında 0,45 µm PTFE membranı ile 92,5% TOK giderim seviyesine ulaşılmıştır.
- İletkenlik giderimi genellikle 90%'ın üzerinde olmuş ve 99,89%'a kadar iletkenlik giderimi gerçekleşmiştir. İletkenlik gideriminde membran materyali ve sıcaklık etkili parametrelerdendir. Membran distilasyon yönteminin iletkenlik gideriminde efektif olduğu gözlenmiş, desalinizasyon çalışmalarında uygulanabilirliği kanıtlanmıştır.
- Kirletici konsantrasyonu arttıkça arıtma sırasında oluşan akıda artış gözlenmiştir. 100 ppb As(III) çözeltisinin arıtımıyla oluşan maksimum akı 8,95 L/m<sup>2</sup>sa iken 1.000 ppb As(III) çözeltisinin arıtımıyla oluşan akı miktarı 12.6 L/m<sup>2</sup>sa'tir.
- Konvansiyonel distilasyon proseslerine göre daha az sıcaklık gerektiren işletme şartlarında yüksek arıtım gerçekleşmiştir. Sıcaklığın güneş enerjisi, atık ısısından elde edilen enerji... vs gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından eldesi mümkündür ve bu, daha az enerji gereksinimi sağlayacaktır.
- Diğer membran ünitelerine göre daha az yer ihtiyacı olduğundan dolayı yerden tasarruf sağlayan fizibil bir prosestir.

- Membranlar uzun süreli kullanıma uygundur. Çabuk tahrip olmamaktadırlar. Dolayısıyla membran tüketiminden kaynaklanan maliyette azalma meydana gelmektedir.



## KAYNAKLAR

---

- [1] Vikipedi: Özgür Ansiklopedi, <https://tr.wikipedia.org/wiki/Arsenik>, 21 Ocak 2016
- [2] Bissen, M. ve Frimmel, FH., (2003). “Arsenic: a review Part 1: Occurrence, toxicity, speciation, mobility”, *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, 31: 9-18,.
- [3] EPA, (2002). “Arsenic treatment technologies for soil, waste, and water”, EPA/National Service Center for Environmental Publications, ABD.
- [4] Kartinen, E.O. ve Martin C.J., (1995) “An overview of arsenic removal processes”, *Desalination*, 103: 79-88,.
- [5] Roy, P. ve Saha A., (2002). “Metabolism and toxicity of arsenic: A Human Carcinogen” *Current Science*, 82: 38-45,.
- [6] Dokuz Eylül Üniversitesi, [web.deu.edu.tr/zdm/tr/index\\_dosyalar/page0004.html](http://web.deu.edu.tr/zdm/tr/index_dosyalar/page0004.html), 02 Ocak 2016.
- [7] Smith, A.H. ve Smith M.H.M., (2004). “Arsenic drinking water regulations in developing countries with extensive exposure”, *Toxicology*, 198(1-3):39-44.
- [8] WHO, (2003). “Arsenic in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water quality. Geneva, World Health Organization (WHO/SDE/WSH/03.04/75).
- [9] EPA, (2003). “Minor Clarification of the National Primary Drinking Water Regulation for Arsenic; Final Rule”, EPA 815-Z-03-002, Washington, DC, ABD.
- [10] Smedley, P.L. ve Kinniburgh, D.G., (2002). “A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters”, *Applied Geochemistry*, 17(5): 517-568.
- [11] Nordstrom, D.K., (2002). “Worldwide occurrences of arsenic in ground water”,

Science, 296(5576):2143-2145.

- [12] Yoshida, T., Yamauchi, H. ve Sun, G.F., (2004). "Chronic health effects in people exposed to arsenic via the drinking water: Dose-response Relationships in Review", *Toxicology and Applied Pharmacology*, 198(3): 243-252.
- [13] Duker. A.A., Carranza, E.J.M. ve Hale, M., (2005). "Arsenic geochemistry and health", *Environment International*, 32(5):631-641.
- [14] Ravenscroft, P., Brammer, H. ve Richards, K., (2009). "Arsenic Pollution: a Global Synthesis", Wiley-Blackwell, U.K., 618.
- [15] Han, B., Runnells, T., Zimbron, J. ve Wickramasinghe, R., (2002). "Arsenic removal from drinking water by flocculation and microfiltration", *Desalination*, 145(1-3):293-298.
- [16] Bissen, M. ve Frimmel, FH., (2003). "Arsenic: a review Part 2: Oxidation of arsenic and its removal in water treatment", *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, 31(2):97-107.
- [17] Cáceres, V.L., Gruttner, D.E. ve Contreras, N.R., (1994). "Water recycling in arid regions: Chilean Case", *Ambio*, 21:138-144.
- [18] Ashley, P.M. ve Lottermoser, B.G., (1999). "Arsenic Contamination at the Mole River Mine", *Australian Journal of Earth Sciences*, 46(6):861-874.
- [19] Başkan, M.B. ve Pala, A., (2009). "İçme sularında arsenik kirliliği: Ülkemiz açısından bir değerlendirme", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(1):69-79.
- [20] Jain, A., Sharkma, V.K. ve Mbuya O.S., (2009). "Removal of arsenite by Fe(VI), Fe(VI)/Fe(III), and Fe(VI)/Al(III) salts: Effect of pH and anions", *Journal of Hazardous Materials*, 169(1-3):339-344.
- [21] Wickramasinghe, S.R., Han, B., Zimbron, J., Shen, Z. ve Karim, M.N., (2004) "Arsenic removal by coagulation and filtration: comparison of groundwaters from the United States and Bangladesh", *Desalination*, 169(3):231-244.

- [22] Çakmakçı, M., Başpınar, A. B., Balaban, Ü., Uyak, V., Koyuncu, İ. ve Kınacı, C., (2008). “İçme suyunda arsenik ve giderme yöntemleri”, Kent Yönetimi, İnsan ve Çevre Sorunları Sempozyumu, Kasım 2-6, İstanbul, Türkiye, 605-621.
- [23] El-Bourawi, M.S., Ding, Z., Ma, R. ve Khayet, M., (2006). “A framework for better understanding membrane distillation separation process”, Journal of Membrane Science, 285(1-2):4-29.
- [24] Calabro, V., Jiao, B.L. ve Drioli, E., (1994). “Theoretical and experimental study on membrane distillation in the concentration of orange juice”, Ind. Eng. Chem. Res., 33:1803-1808.
- [25] Alves, V.D. ve Coelho, I.M., (2006). “Orange juice concentration by osmotic evaporation and membrane distillation: A comparative study” Journal of Food Engineering, 74(1):125-133.
- [26] Kimura, S., Nakao, S., ve Shimatani, S., (1987). “Transport phenomena in membrane distillation”, Journal of Membrane Science, 33(3):285-298.
- [27] Walton, J., Lu, H., Turner, C., Solis, S. ve Hein, H., (2004). “Solar and waste heat desalination by membrane distillation”, Desalination and Water Purification Research and Development Program, Nisan, El Paso, Teksas, ABD.
- [28] Banat, F.A. ve Simandl, J., (1998). “Desalination by membrane distillation: a parametric study”, Separation Science and Technology, 33(2):201-226.
- [29] García-Payo, M.C., Izquierdo-Gil, M.A. ve Fernández Pineda, C., (2000). “Air gap membrane distillation of aqueous alcohol solutions”, Journal of Membrane Science, 169(1):61-80.
- [30] Banat, F.A. ve Simandl, J., (1999). “Membrane distillation for dilute ethanol: Separation from aqueous streams”, Journal of Membrane Science, 163(2):333-348.
- [31] Lawson, K. W. ve Lloyd, D. R., (1997). “Membrane distillation”, Journal of Membrane Science, 124:1-25.
- [32] Bandini, S., ve Sarti, G. C., (1999). “Heat and mass transport resistances in vacuum membrane distillation per drop”, AIChE Journal, 45(7):1422-1433.

- [33] Lawson, K. W. ve Lloyd, D. R., (1996). "Membrane distillation, 1. Module design and performance evaluation using vacuum membrane distillation", *Journal of Membrane Science*, 120:111-121.
- [34] Banat, F.A. ve Simandl, J., (1994). "Theoretical and experimental study in membrane distillation", *Desalination*, 95(1):39-52.
- [35] Cath, T. Y., Adams, V. D. ve Childress, A. E., (2004). "Experimental study of desalination using direct contact membrane distillation: a new approach to flux enhancement", *Journal of Membrane Science*, 228(1):5-16.
- [36] Khayet, M., Godino, P. ve Mengual, J. I., (2000): "Theory and experiments on sweeping gas membrane distillation", *Journal of Membrane Science*, 165(2): 261-272.
- [37] Khayet, M., Godino, P. ve Mengual, J. I., (2003). "Posibility of nuclear desalination through various membrane distillation configurations: a comparative study", *Int. J. of Nuclear Desalination*, 1:30-46.
- [38] Khayet, M., Godino, P. ve Mengual, J. I., (2000). "Nature of flow on sweeping gas membrane distillation", *Journal of Membrane Science*, 170(2):243-255.
- [39] Rivier, C. A., García-Payo, M. C., Marison, I. W. ve von Stockar, U., (2002) "Separation of binary mixtures by thermostatic sweeping gas membrane distillation: I. Theory and simulations", *Journal of Membrane Science*, 201(1-2):1-16.
- [40] García-Payo, M. C., Rivier, C. A., Marison, I. W. ve von Stockar, U., (2002) "Separation of binary mixtures by thermostatic sweeping gas membrane distillation: II. Experimental results with aqueous formic acid solutions", *Journal of Membrane Science*, 198(2):197-210.
- [41] Nene, S., Kaur, S., Sumod, K., Joshi, B. ve Raghavarao, K.S.M.S., (2002) "Membrane distillation for the concentration of raw cane-sugar syrup and membrane clarified sugarcane juice", *Desalination*, 147(1-3):157-160.
- [42] Kim, J., Park, S. E., Kim, T., Jeong, D. ve Ko, K., (2004). "Isotopic water separation using AGMD and VEMD", *Nukleonika*, 49(4):137-142.

- [43] Laganà, F., Barbieri, G. ve Drioli, E., (2000). "Direct contact membrane distillation: modelling and concentration experiments", *Journal of Membrane Science*, 166(1):1-11.
- [44] Mengual, J.I. ve Peña, L., (1997). "Membrane distillation", *Colloid Interf. Sci.*, 1:17-29.
- [45] Sarti, G.C., Gostoli, C. ve Bandini, S., (1993). "Extraction of organic-compounds from aqueous streams by vacuum membrane distillation", *Journal of Membrane Science*, 90:21-33.
- [46] Pinon-Miramontes, M., Bautista-Margulis, R. ve Perez-Hernandez, A., (2003) "Removal of arsenic and floride from drinking water with cake alum and a polymeric anionic flocculent", *Fluoride*, 36(2):122-128,.
- [47] Khayet, M., Godino, M. P. ve Mengual, J. I., (2002). "Thermal boundary layers in sweeping gas membrane distillation processes", *AIChE Journal*, 48, 7, 1488-1497,.
- [48] Khayet, M., Mengual, J. I., ve Matsuura, T., (2005). "Porous hydrophobic/hydrophilic composite membranes: Application in desalination using direct contact membrane distillation", *Journal of Membrane Science*, 252, (1-2):101-113.
- [49] Khayet, M., Matsuura, T. ve Mengual, J. I., (2005). "Porous hydrophobic/hydrophilic composite membranes: Estimation of the hydrophobic-layer thickness" *Journal of Membrane Science*, 266(1-2):68-79.
- [50] Schneider, K., Hölz, W., Wollbeck, R. ve Ripperger, S., (1988). "Membranes and modules for transmembrane distillation", *Journal of Membrane Science*, 39(1): 25-42.
- [51] Bandini, S., Saavedra, A. ve Sarti, G.C., (1997). "Vacuum membrane distillation: experiments and modeling", *AIChE Journal*, 43(2):398-408.
- [52] Schofield, R.W., Fane, A.G. ve Fell, C.J.D., (1987). "Heat and mass transfer in membrane distillation", *Journal of Membrane Science*, 33(3):299-313.
- [53] Fernández-Pineda, C., Izquierdo-Gil, M.A. ve García-Payo, M.C., (2002). "Gas permeation and direct contact membrane distillation experiments and their analysis using different models", *Journal of Membrane Science*, 198(1):33-49.

- [54] Khayet, M. ve Matsuura, T., (2003). "Application of surface modifying macromolecules for the preparation of membranes for membrane distillation", *Desalination*, 158:51-56.
- [55] Wu, Y., Kong, Y., Lin, X., Liu, W. ve Xu J., (1992). "Surface-modified hydrophilic membranes in membrane distillation", *Journal of Membrane Science*, 72(2):189-196.
- [56] Li, B. ve Sirkar, K.K., (2004). "Novel membrane and device for direct contact membrane distillation based desalination process", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 43(17):5300-5309.
- [57] Li, B. ve Sirkar, K.K., (2005). "Novel membrane and device for vacuum membrane distillation-based desalination process", *Journal of Membrane Science*, 257(1-2):60-75.
- [58] Peng, P., Fane A.G. ve Li, X., (2005). "Desalination by membrane distillation adopting a hydrophilic membrane", *Desalination*, 173(1):45-54.
- [59] Zhongwei, D., Liying, L. ve Runyu, M., (2003). "Study on the effect of flow maldistribution on the performance of the hollow fiber modules used in membrane distillation", *Journal of Membrane Science*, 215(1-2):11-23.
- [60] Zheng, J., Xu, Y. ve Xu, Z., (2003). "Flow distribution in a randomly packed hollow fiber membrane module", *Journal of Membrane Science*, 211(2):263-269.
- [61] Caniyilmaz, S., (2005): "Arsenic Removal from Groundwater By Fe-Mn Oxidation And Microfiltration", B.S., Middle East Technical University, Master of Science Thesis.
- [62] Elcik, H., Cakmakci, M., Sahinkaya, E. ve Ozkaya, B., (2013). "Arsenic removal from drinking water using low pressure membranes", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 52:9958-9964.
- [63] Qu, D., Wang, J., Hou, D., Luan, Z., Fan, B. ve Zhao, C. (2009). "Experimental study of arsenic removal by direct contact membrane distillation", *Journal of Hazardous Materials*, 163:874-879.
- [64] Criscuoli, A., Bafaro, P. ve Drioli, E.,(2012). "Vacuum membrane distillation for purifying waters containing arsenic", *Desalination*, 323:17-21.

- [65] Manna, A.K., Sen, M., Martin, A.R. ve Pal, P., (2010). "Removal of arsenic from contaminated groundwater by solar-driven membrane distillation", *Environmental Pollution*, 158:805-811.
- [66] Pal, P. ve Manna, A.K., (2010). "Removal of arsenic from contaminated groundwater by solar-driven membrane distillation using three different commercial membranes", *Water Research*, 44(19):5750-5760.
- [67] Manna A.K. ve Pal, P., (2016). "Solar-driven flash vaporization membrane distillation for arsenic removal from groundwater: Experimental investigation and analysis of performance parameters", *Chemical Engineering and Processing*, 99:51-57.
- [68] Yarlagadda, S., Gude, V.G., Camacho, L.M., Pinappu, M. ve Deng, S., (2011). "Potable water recovery from As, U, and F contaminated ground waters by direct contact membrane distillation process", *Journal of Hazardous Materials*, 192:1388-1394,.
- [69] Levlin, E., "Conductivity measurements for controlling municipal waste-water treatment", *Dep. Of Land and Water Resources Engineering*, Stockholm, Sweden, 2007.
- [70] Koczka, K. ve Mizsey, P., (2010). "New area for distillation: wastewater treatment", *Chemical Engineering*, 54(1):41-45.

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Dilara YEŞİLİRMAK  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 04.07.1989/GİRESUN  
**Yabancı Dili** : İngilizce  
**E-posta** : dilarayesilirmak@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y.Lisans	Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı	Yıldız Teknik Üniversitesi	2016
Lisans	Çevre Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2012
Lise	Fen Bilimleri	Karatay S.D.M.P. Anadolu Lisesi	2007

### İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2013-2014	Enerji Çevre Yatırımları ve Danışmanlığı Haritacılık İmar İnşaat A.Ş. / Eti	Çevre Mühendisi/Çevre Görevlisi

2015- 2016	Alüminyum A.Ş. MRT Çevre Müh. Ve Diş Sağ. Hiz. Mad. Müş. Dış Tic. Ltd. Şti.	Çevre Mühendisi/Çevre Görevlisi
2016-?	Enviro Müh. Med. İnş.Kauç. ve Mad. San. Tic. Ltd. Şti.	Çevre Mühendisi/Çevre Görevlisi

### **YAYINLANAN MAKALELER**

1. The Effects of Ferric Iron and Organic Matter on Arsenite Removal From Water by Direct Contact Membrane, Sigma Journal Engineering and Natural Sciences Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 34(1), 2016, 81-89
2. Arsenic Removal From Drinking Water by Direct Contact Membrane Distillation, Membrane Water Treatment, Vol. 7, No.3 (2016) 241-255
3. Membran Distilasyon ile İçme Sularından Arsenit Giderimi, Turkchem Dergisi, 2015, 56-61